

Thèse présentée pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université Louis Pasteur
Strasbourg I

- Discipline : Sciences de l'ingénieur
- par Cédric Chaminade
-
-

Physique et technologie du brasage tendre par faisceau laser

Soutenue publiquement le 29 novembre 2006

Membres du jury

Directeur de Thèse: M. Eric Fogarassy, Directeur de recherche, Strasbourg
Rapporteur interne : M. Daniel Mathiot, Professeur, Strasbourg
Rapporteur externe : M. Eric Millon, Professeur, Orléans
Rapporteur externe : M. Eric Audouard, Professeur, St Etienne
Examineur : M. Nacer Aït-Mani, Ingénieur, CEA-LETI, Grenoble
Examineur : M. Nicolas Winkler, Directeur technique, Radiel-Fondam, Dijon
Invité : M. Didier Boisselier, Responsable technique, IREPA LASER, Strasbourg

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés d'une part au sein de l'Institut d'Electronique du Solide et des Systèmes (InESS), laboratoire commun de l'Université Louis Pasteur (ULP) et du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), et d'autre part au sein du Centre Régional d'Innovation et de Transfert de Technologies (CRITT) spécialisé dans applications industrielles du laser de puissance : l'IREPA LASER.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui, de prêt ou de loin, ont rendu possible l'aboutissement de ces travaux de recherche et la réalisation de ce mémoire de thèse. Voilà un bel iceberg sur lequel je tente ici de porter un éclairage approprié... mais forcément tronqué. J'exprime donc mes remerciements à :

M. Eric Fogarassy, aujourd'hui directeur de l'ENSPS, pour avoir accepté d'être mon directeur de thèse, et pour la confiance qu'il m'a témoignée tout au long de ce projet.

M. Didier Boisselier, Responsable technique de l'IREPA LASER, pour m'avoir suivi et considérablement aidé. Sa connaissance des procédés laser et sa capacité à transmettre ce savoir m'ont permis de mener à bien les développements du procédé innovant de brasage tendre par faisceau laser.

Mes remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail de thèse :

Merci à M. Daniel Mathiot, directeur du laboratoire InESS, de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire, d'avoir été l'un des rapporteurs du manuscrit et enfin d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse. Merci à MM. les professeurs Eric Million de l'université d'Orléans et Eric Audouard de l'université de St Etienne d'avoir accepté d'être rapporteur de ce travail. Leurs remarques et suggestions m'ont permis d'apporter des améliorations au manuscrit.

Merci à M. Nicolas Winkler, directeur technique de Radiel Fondam, et M. Nacer Aït-Mani, Ingénieur au CEA LETI pour avoir accepté d'examiner mon mémoire et pour avoir fait parti de mon jury de thèse. J'ai grandement apprécié leurs compétences, leur intérêt très prononcé pour « faire avancer le sujet », et leur immense sympathie.

Bien sûr, un grand merci à l'ensemble des Irepasiens que j'ai eu à côtoyer au cours de ces années de recherche. En particulier à Frédéric Mermet, percussionniste de l'IREPA LASER, avec qui j'ai pu partager les galères, les inepties mais aussi les réussites et les rires – Surtout les rires ; et Simon Sankare, d'abord condisciple et aujourd'hui PhD-aspirant, eu égard à son sens aigu du sérieux et de la dérision, ainsi qu'à son incommensurable générosité.

Un clin d'œil à Pascaline Touraine, miss CLP, pour avoir gardé sa porte ouverte et m'avoir toujours supporté, alors qu'une pause se faisait sentir...

Merci au personnel du laboratoire de l'InESS :

M. le professeur Jean-Paul Stoquert pour m'avoir initié à l'outil d'analyse par RBS.

M. le professeur Paul Montgomery pour les mesures au microscope à sonde optique de faible cohérence.

M. Jean-Marie Koebel, Mme. Marianne Amann-Liess, et M. Florent Dietrich pour leur accueil, leur aide et leur sympathie.

Merci à M. Jacques Faerber, de l'IPCMS, pour ses compétences en matière de Microscopie Electronique à Balayage et ses précieux conseils en matière de préparation d'échantillon.

Merci aux nombreux partenaires qui ont pris part aux projets européens, et auxquels j'ai pu m'adresser pour obtenir de nombreux et précieux renseignements, voire même partager des journées d'expérimentations. Outre Nacer Aït-Mani et Nicolas Winkler (également membres de mon jury), il y a notamment : Roland Tacke et Eric Veninga (TNO), Pascal Penneau (CAPA Electronic), Henrik Andersen (PINOL A/S) et Wolfgang Hornig (BPE International).

Aussi, en dehors de tout contexte scientifique, et cependant essentiel à l'aboutissement de ce travail de recherche, j'adresse un big up à mes amis « Strasbourgeois », généralement liés de près ou de loin au microcosme « basket-ball ». Ils m'ont permis de décompresser, transpirer, progresser (?)...Mais surtout de partager, par l'intermédiaire du sport, de superbes aventures et de créer des liens très forts. Forcément, la liste est non exhaustive... Big up à Olivier « Riddick », Boris « Leeroy », Philippe « T-Mac », « Faz », Rodolphe... Clairounette, Manu, July, Marianne, Maya... pour rester concis.

Last but not least... Un grand MERCI à toute ma famille, pour m'avoir soutenu et aidé. Mention super spéciale à mes parents et mon frère. ☺

GLOSSAIRE DES ACRONYMES

Al-MMC	Composite à Matrice Métallique d'Aluminium
ANSI	American National Standard Institute
AOI	Automatic Optical Inspection
BEI-COMPO	Backscattered Electron Image
BGA	Ball Grid Array
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CMS	Composant Monté en Surface
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
COG	Chip-on-Glass
COV	Composé Organique Volatil
CPM	Coherence Probe Microscopy
CRAFT	Cooperative Research Action For Technology
EDX	Energy Dispersive X-ray
EOD	Élément d'Optique Diffractif
FR4	Flame Retardant 4
FR5	Flame Retardant 5
HASL	Hot Air Solder Levelling
HPDL	High Power Diode Laser
IA	Indice d'Acide
IMC	Inter-Metallic Compound
InESS	Institut d'Electronique du Solide et des Systèmes
IPC	Institute for Printed Circuits (Organisme américain faisant référence pour la normalisation en électronique)
IR	Infrarouge
IREPA LASER	Institut de Recherche Et des Procédés d'Application du LASER
LASER	Light Amplification of Stimulated Emission of Radiation
LEI	Lower Secondary Electron Image
MEB	Microscope Electronique à Balayage

Nd:YAG	Neodym Yttrium Aluminium Garnet (elements du laser solide Nd:YAG)
OSP	Organic Soldering Protective
PCB	Printed Circuit Board
PI	Polyimide
QFP	Quad Flat Package
RBS	Rutherford Back Scattering
RNV	Résidu Non Volatil
RoHS	Restriction Of use of certain Hazardous Substances
SC	Surface mount Capacitor – Condensateur monté en surface
SM xx	Surface Mount xx – xx désignant les dimensions du composant monté en surface. Par exemple, Le SM1208 est un composant de longueur 12 pouces et de largeur 8 pouces.
SMT	Surface Mount Technology
SOIC	Small Outline Integrated Circuit
SOT	Small Outline Transistor
SR	Surface mount Resistance – Résistance montée en surface
TAL	Time Above Liquidus
TEM	Transverse Electro-Magnétique
TH	Through Hole
TLD	Thalès Laser Diode
ULP	Université Louis Pasteur
UV	Ultraviolet
ZAT	Zone Affectée Thermiquement

SOMMAIRE

Introduction	13
Chapitre 1: Contexte et etat de l'art.....	15
1 Introduction.....	17
2 Principe d'un procédé de brasage tendre.....	19
2.1 Introduction.....	19
2.2 Notion de mouillage des métaux liquides lors d'un procédé de brasage.....	19
2.3 Dissolution du métal de base dans le métal liquide	20
2.4 Solidification du métal d'apport liquide.....	22
2.5 Conclusion.....	24
3 Le brasage tendre dans l'industrie électronique	25
3.1 Introduction.....	25
3.2 Contexte industriel et environnemental.....	25
3.3 Les principales techniques de brasage tendre.....	26
3.3.1 Introduction.....	26
3.3.2 Brasage manuel au fer ou à la thermod.....	27
3.3.3 Brasage à la vague	27
3.3.4 Brasage en phase vapeur	28
3.3.5 Brasage infrarouge.....	29
3.3.6 Brasage par convection forcée d'air chaud.....	30
3.3.7 Conclusion.....	31
3.4 Matériaux d'apport (crèmes à braser)	31
3.4.1 Partie métallique.....	32
3.4.2 Partie organique	32
3.4.3 Mise en œuvre (sérigraphie)	34
3.5 Préparation du circuit électronique.....	35
3.5.1 Le substrat du circuit électronique	35
3.5.2 Traitements de surface	36
3.6 Fiabilité, normes et moyens de contrôle des brasures.....	37
3.7 Conclusion.....	38
4 Conclusion	39
5 Références	40

Chapitre 2: Etudes expérimentales 43

6	Préambule	45
6.1	Les débuts	45
6.2	Utilisation du laser Nd:YAG	45
6.3	Lasers continus ou à impulsion ?	46
6.4	Les lasers à diodes.....	46
6.5	Les lasers ultraviolets et visibles	47
6.6	D'un point de vue microstructural.....	47
6.7	La conjoncture actuelle	48
6.8	Les perspectives.....	49
6.9	Conclusion.....	49
7	Introduction	51
8	Les sources laser	52
9	Procédé de brasage de matériaux dissemblables par faisceau laser	53
9.1	Introduction	53
9.2	Détails du procédé de brasage laser.....	53
9.3	Choix et préparation des matériaux	56
9.4	Réalisation d'assemblages céramique-métal.....	57
9.5	Analyse métallurgique d'un assemblage céramique-composite	58
9.5.1	Introduction.....	58
9.5.2	Résultats et discussions.....	59
9.5.3	Conclusion.....	64
9.6	Etude mécanique des assemblages céramique-métal	64
9.6.1	Introduction.....	64
9.6.2	Analyse du faciès de rupture.....	66
9.6.3	Conclusion.....	73
9.7	Réalisation d'un prototype	74
9.7.1	Introduction.....	74
9.7.2	Description du procédé d'assemblage	75
9.7.3	Evaluation et résultats	76
9.8	Conclusion.....	77
10	Procédé de brasage par interaction directe du faisceau sur la crème à braser	79
10.1	Introduction	79
10.2	Evaluation de la compatibilité d'une crème avec un procédé de brasage laser	80
10.2.1	Développement de la procédure expérimentale	80
10.2.2	Interaction laser avec une crème à braser.....	83
10.2.3	Ajustement des paramètres laser au comportement d'une crème à braser	86
10.2.4	Conclusion.....	91
10.3	Réalisation de prototypes pour évaluation	92

10.3.1	Introduction.....	92
10.3.2	Brasage laser multifibre	93
10.3.3	Brasage laser scanner	97
10.3.4	Evaluation des assemblages réalisés	101
10.3.5	Conclusion.....	104
10.4	Tentative d'optimisation d'une crème à braser adaptée au brasage laser.....	105
10.4.1	Introduction.....	105
10.4.2	Essais préliminaires	105
10.4.3	Tests d'un additif noir de carbone	107
10.4.4	Application du brasage laser avec la crème contenant un additif noir de carbone ...	108
10.4.5	Conclusion.....	110
10.5	Conclusion des essais de brasage	111
11	Conclusion.....	113
12	Références	115
13	Annexes	118

Chapitre 3: Modélisation, simulation et validation de procédés de brasage laser	123
---	-----

14	Préambule.....	125
14.1	Les modèles simples	125
14.2	La nécessité de modéliser	126
14.3	Les modélisations par éléments finis.....	128
14.4	Considérations, hypothèses et limitations	129
15	Introduction	131
16	Les outils de calcul	133
17	Modélisation à deux dimensions.....	134
17.1	L'assemblage céramique - métal.....	134
17.2	Etudes préliminaires	138
17.2.1	Interaction du faisceau avec l'assemblage	138
17.2.2	Propriétés thermiques des matériaux	142
17.3	Modélisation du procédé de brasage laser.....	143
17.3.1	Géométrie du système	143
17.3.2	Equation à résoudre	144
17.3.3	Conditions aux limites du système.....	144
17.4	Simulation du procédé de brasage laser	145
17.5	Conclusion	147
18	Modélisation à trois dimensions	148
18.1	Procédé de brasage laser avec crème à braser.....	148

18.1.1	L'assemblage étudié	148
18.1.2	Etude expérimentale des « profils de températures »	148
18.1.3	Développement du modèle et comparaison avec les mesures expérimentales.....	151
18.1.4	Corrélation avec l'étude métallographique du joint brasé.....	153
18.1.5	Conclusion.....	155
18.2	Influence du circuit électronique sur le paramètre laser.....	155
18.2.1	Expérimentations.....	155
18.2.2	Modélisation des circuits électroniques	159
18.2.3	Simulation et comparaison avec les mesures expérimentales	162
18.2.4	Conclusion.....	168
18.3	Utilisation d'un Elément d'Optique Diffractif	169
18.3.1	Introduction.....	169
18.3.2	Résultats Expérimentaux	170
18.3.3	Modélisation des procédés de brasage laser	172
18.3.4	Simulation des différents procédés de brasage laser	176
18.3.5	Conclusion.....	182
19	Conclusion.....	184
20	Références.....	186

Conclusion	188
------------------	-----

INTRODUCTION

Ce travail de thèse porte sur le développement de la technique de brasage tendre par faisceau laser. Bien que déjà très prometteuse dès ses premières investigations, cette technologie reste toujours d'utilisation assez marginale aujourd'hui. Les recherches effectuées traitent des phénomènes physico-chimiques ayant lieu lors du procédé. Elles sont appliquées à la réalisation de prototypes en vue de l'utilisation industrielle de cette technologie innovante d'assemblage.

L'attrait pour cette technologie de brasage s'est amplifié à la faveur des développements scientifiques basés sur l'obtention d'un outil laser présentant un bon rendement ainsi qu'une précision et une fiabilité sans cesse améliorées. Ces travaux ont fait l'objet d'un partenariat entre le laboratoire InESS (ULP/CNRS) de Strasbourg et IREPA LASER : un centre de transfert de technologies spécialisé dans les applications du laser de puissance en industrie. Cette étude a été réalisée dans le cadre de projets européens (CRAFT) portant sur l'utilisation du laser de puissance appliqué au procédé de brasage tendre :

Le projet DISSIBRAZ traite de l'assemblage de matériaux dissemblables (métaux, céramiques, plastiques). Ces assemblages de matériaux dissemblables présentent souvent un vif intérêt dans le milieu industriel et restent fréquemment sources de défi technologique.

Le projet LEADFREE ALSO FOR SMES concerne la problématique de l'élimination du plomb dans l'industrie électronique. Le passage au « sans-plomb » requiert de nouvelles formulations de crème à braser. Différents laboratoires de recherche travaillent en partenariat avec plusieurs PME du secteur de l'électronique pour étudier, développer et évaluer l'ensemble des procédés de brasage en électronique lors de leur application avec une crème à braser sans-plomb. Ce projet a également pour vocation le développement de la technique de brasage laser émergente.

L'objectif est d'acquérir une connaissance accrue du procédé de brasage tendre par faisceau laser afin de pouvoir développer une expertise et un savoir-faire dans ce domaine. Les études expérimentales de cette thèse sont en grande partie issues des travaux réalisés lors de la conduite de ces différents projets.

Les recherches effectuées au cours du travail de thèse s'articulent selon trois principaux axes : un état de l'art du brasage en électronique, une étude expérimentale du procédé de brasage laser appliquée aux domaines de la micromécanique et de la microélectronique, enfin une étude de modélisation des transferts de chaleur au cours de différents procédés de brasage laser.

L'état de l'art du premier chapitre permet d'appréhender l'ensemble de la problématique du brasage en électronique et constitue une base incontournable pour le développement d'un procédé de brasage innovant. Le développement d'un procédé de brasage requiert effectivement une bonne connaissance d'une part des principes physico-chimiques ayant lieu au cours du procédé et d'autre part des différentes technologies, normes, moyens de contrôle et composants rencontrés en électronique.

Un aspect important de la problématique posée dans cette étude est de proposer une alternative technologique aux procédés de brasage conventionnels qui soit viable industriellement. Ces nouvelles

technologies sont aujourd'hui soumises aux normes environnementales (exemple : suppression du plomb notamment dans les crèmes à braser) dans un secteur fortement concurrentiel.

Le second chapitre est consacré aux études expérimentales du procédé de brasage tendre par faisceau laser. Elles sont précédées par une étude bibliographique retraçant l'évolution des recherches sur ce procédé de brasage tendre. Celle-ci permet de se placer dans la continuité des résultats d'ores et déjà obtenus depuis le début des investigations sur ce procédé laser. Ainsi, ces études expérimentales se scindent en deux thèmes de recherche. D'abord l'assemblage de matériaux dissemblables par faisceau laser, puis l'interaction directe du faisceau laser sur la crème à braser. Un des objectifs, commun à ces deux thèmes de recherche, est la réalisation de prototypes en vue de leur utilisation dans des cas concrets d'applications industrielles.

Le troisième et dernier chapitre porte sur la modélisation de différents procédés d'assemblage par faisceau laser. La simulation consécutive de ces modèles permet leur validation basée sur les mesures expérimentales correspondantes. Les recherches bibliographiques préalables ont permis d'évoquer les motivations liées aux développements de calculs numériques dans le cadre de procédés de brasage tendre par faisceau laser. Notre démarche consiste alors à développer des modèles simples permettant d'apporter les informations pertinentes concernant les transferts de chaleur lors de différents procédés de brasage laser. Ainsi, sont traitées : la problématique de l'évaporation du flux inclus dans les crèmes à braser, la définition des règles de tracé d'un circuit électronique soumis à un procédé de brasage laser et l'utilisation d'un Élément d'Optique Diffractif pour l'optimisation d'un assemblage unique plastique-métal.

CHAPITRE 1: CONTEXTE ET ETAT DE L'ART

1 Introduction

Parmi les nombreuses techniques d'assemblage rencontrées en industrie, celle du brasage est aujourd'hui très largement répandue. Ce procédé d'assemblage est souvent – à tort – assimilé au soudage. Cependant, contrairement au soudage, le procédé de brasage se distingue par le fait qu'il ne détériore aucune des deux pièces à assembler. La définition du brasage traditionnel, telle qu'adoptée par l'Institut International de la Soudure, indique qu'il s'agit d'une opération consistant à assembler des pièces métalliques à l'aide d'un métal d'apport à l'état liquide. Ce métal d'apport a une température de fusion inférieure à celle des pièces à réunir et mouille le métal de base qui ne participe pas, par fusion, à la constitution du joint. Le brasage tendre dont il est question lors de ce travail de recherche est, par convention, un procédé de brasage utilisant un métal d'apport de température de fusion inférieure à 450°C – par opposition au brasage fort dont le métal d'apport a une température de fusion supérieure à 450°C.

Bien qu'utilisée depuis des millénaires comme moyen d'assemblage, la technique de brasage met en œuvre des phénomènes physico-chimiques particulièrement complexes. Leur compréhension et leur maîtrise grandissante ont conduit au développement considérable de cette technique. C'est devenu aujourd'hui un procédé moderne applicable aux métaux, aux matériaux non métalliques ainsi qu'aux liaisons de métaux avec des matériaux non métalliques. On rencontre ce procédé dans tous les secteurs de la technique : le brasage tendre est notamment utilisé dans les domaines de la micromécanique et de la microélectronique (Figure 1).

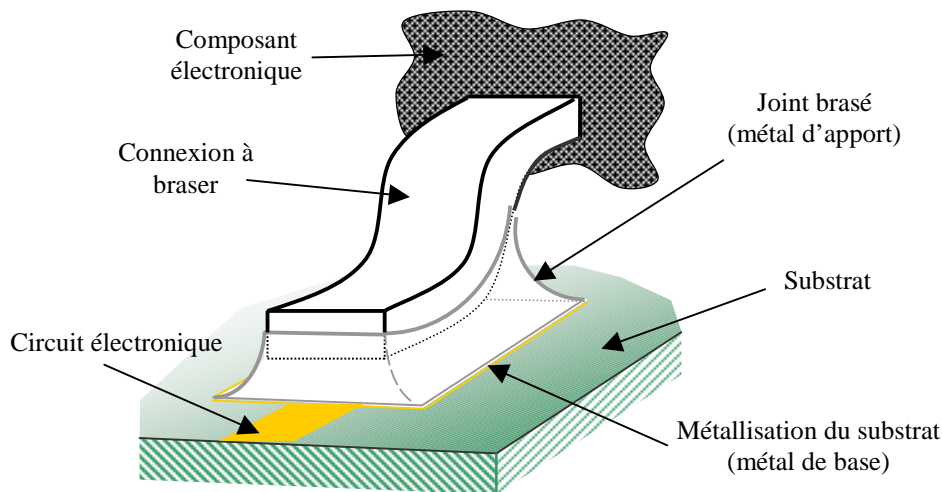


Figure 1 : Schéma de l'assemblage par brasage d'un composant sur une carte électronique

Cet état de l'art permet d'appréhender l'ensemble de la problématique du brasage en électronique et constitue une base incontournable pour le développement d'un procédé de brasage innovant. Le développement d'un procédé de brasage requiert effectivement une bonne connaissance d'une part des principes physico-chimiques ayant lieu au cours du procédé et d'autre part des différentes technologies, normes, moyens de contrôle et composants rencontrés en électronique.

Dans du premier chapitre, les principaux phénomènes physico-chimiques gouvernant un procédé de brasage sont alors détaillés. Le paragraphe suivant offre une vue d'ensemble du contexte, des

différents outils et choix technologiques rencontrés dans l'industrie électronique pour mettre en œuvre un procédé de brasage tendre. Un aspect important de la problématique posée dans cette étude est de proposer une alternative technologique aux procédés de brasage conventionnels qui soit viable industriellement : ces nouvelles technologies sont aujourd'hui soumises aux normes environnementales (exemple : suppression du plomb dans les crèmes à braser) dans un secteur fortement concurrentiel.

2 Principe d'un procédé de brasage tendre

2.1 Introduction

La technique d'assemblage par brasage tendre implique la formation d'un joint brasé permettant la jonction de deux matériaux. La formation du joint brasé est régie par l'interaction des atomes se trouvant à l'interface des deux corps en contact. On peut considérer que le brasage se réalise en plusieurs étapes interdépendantes : La première consiste au mouillage avec étalement du métal d'apport liquide sur le métal de base. La suivante concerne le phénomène de dissolution ayant lieu au cours du procédé. Enfin, il advient la solidification du joint brasé, lors du refroidissement du matériau d'apport, en fin de procédé de brasage.

Les paragraphes suivants présentent ces différents phénomènes physico-chimiques et leurs mécanismes afin d'aborder l'aspect théorique du procédé de brasage. Cette approche succincte des phénomènes physico-chimiques constituant une opération de brasage est inspirée en grande partie des travaux exhaustifs menés par Yu. S. Dolgov et Yu. F. Sidokhine [Dolgov 77].

2.2 Notion de mouillage des métaux liquides lors d'un procédé de brasage

Tel qu'énoncé par Ainsworth, le processus de brasage repose principalement sur l'aptitude qu'a un alliage d'apport fondu à mouiller et s'étaler sur le matériau de base [Ainsworth 71]. C'est au cours du mouillage, et au stade de l'établissement d'un contact physique entre le liquide et le support (adsorption physique) que les groupes d'atomes du liquide pénètrent la sphère d'influence des atomes d'une maille cristalline et s'ordonnent suivant un certain ordre cristallographique. Cet agencement est déterminé par la valeur minimale de l'énergie interfaciale.

L'énergie de liaison ou énergie d'adhérence (W_a en erg/cm²) s'écrit :

$$W_a = \sigma_S + \sigma_L - \sigma_{S-L} \quad (1)$$

Il s'agit de l'énergie nécessaire à la formation des surfaces par séparation de phases moins l'énergie libre existant à l'interface. σ_S , σ_L et σ_{S-L} sont les énergies spécifiques libres de surface (tension superficielle), du métal solide, du métal d'apport liquide et de l'interface solide – liquide.

La caractérisation du mouillage d'un métal liquide sur un support utilise la méthode de la goutte sessile : une goutte de métal liquide est déposée sur la surface du métal de base (Figure 2). La mesure de l'angle de mouillage (θ) permet de quantifier l'aptitude au mouillage d'un métal liquide sur le métal de base. L'expression mathématique de l'angle de mouillage est obtenue lorsque les forces appliquées au point de contact des trois phases atteignent leur condition d'équilibre :

$$\sigma_{S-L} = \sigma_S - \sigma_L \cdot \cos \theta \quad (2)$$

L'énergie d'adhérence est finalement obtenue en remplaçant σ_{s-L} par sa valeur dans la formule (1) :

$$W_a = \sigma_L \cdot (1 + \cos \theta) \quad (3)$$

Lorsque l'angle de mouillage est inférieur à 90°, le métal liquide mouille la surface solide, et il y a défaut de mouillage lorsque l'angle de mouillage est supérieur à 90°.

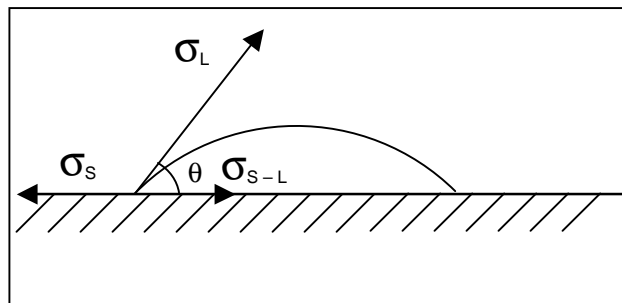


Figure 2 : Schéma d'équilibre des forces représentant la tension superficielle de la goutte de liquide sur la surface solide

A l'échelle atomique, le phénomène de mouillage se scinde en deux phases distinctes :

La première – adsorption physique – consiste au rapprochement des atomes des deux corps en présence, sous l'influence des forces de Van der Waals. Il faut une surface propre de tout oxyde ou impureté afin de permettre l'attraction des atomes de surface des deux corps.

La seconde – adsorption chimique – consiste en la mise en commun des électrons de valence qui mène à la formation de liaisons chimiques stables et fortes.

Le phénomène de pseudo-mouillage est observé lorsque le métal liquide s'étale sur le métal de base lors d'une élévation de température, et qu'il y a retrait de celui-ci au moment du refroidissement. Ce phénomène se caractérise par l'établissement d'une adsorption physique qui n'est pas suivie par une adsorption chimique. Cette dernière peut être empêchée par la présence ou la formation instantanée en surface de phases hétérogènes comportant des liaisons plus ou moins saturées. Ainsi, la formation d'oxydes ou de différentes phases (telles que Cu_5Sn_6 et Cu_3Sn dans le cas usuel du brasage à l'étain sur une pièce en cuivre) empêche un mouillage optimum du métal de base. L'utilisation d'un décapant (flux) permet d'éviter la formation d'oxyde en cours de procédé de brasage. Par ailleurs, on peut prévenir la formation d'hétérogénéités par un contrôle de la température (Le composé Cu_3Sn ne se forme qu'au-delà de 415°C, qui est la température limite de stabilité du composé Cu_5Sn_6).

2.3 Dissolution du métal de base dans le métal liquide

A la température de brasage, la zone de cristallisation est définie comme étant le volume occupé par le métal d'apport liquide dans le joint. Sa composition n'est pas identique à celle de l'alliage d'apport.

Parmi les différents processus responsables de la modification de la composition de l'alliage d'apport, il y a :

- la dissolution du métal de base dans le métal d'apport,
- la migration des éléments du métal d'apport vers l'interface pour créer une solution solide ou former un intermétallique (alliage de liaison) avec le métal de base,
- la vaporisation des composés volatils du métal d'apport,
- ...

La dissolution du métal de base dans le métal d'apport est généralement considérée comme étant le processus prépondérant. Ce phénomène est décrit mathématiquement par l'équation de Nernst-Shchukarev :

$$\frac{dQ}{dt} = K \cdot (C_0^L - C) \cdot S \quad (4)$$

Avec :

$\frac{dQ}{dt}$: quantité de substance dissoute par unité de temps.

S : surface du métal solide dissous.

C_0^L : concentration de la solution saturée.

C : concentration réelle de la solution à un instant donné.

K : constante de la vitesse de dissolution.

On pose : $Q = C \cdot V_L$, et par résolution de l'équation différentielle, on obtient le rapport entre la concentration de la substance dissoute et le temps :

$$C = C_0^L \cdot \left[1 - e^{\left(-\frac{K \cdot S}{V_L} t \right)} \right] \quad (5)$$

Les résultats expérimentaux de l'étude de différents systèmes de métaux et alliages solides plongés dans des métaux liquides indiquent que les constantes de la vitesse de dissolution K sont toutes d'un même ordre de grandeur : quelques 10^{-4} cm/s. Cette constante est déterminée par les vitesses des différents processus élémentaires intervenant lors de la dissolution d'un métal solide dans un métal liquide.

Ces processus élémentaires sont au nombre de deux :

1. La première étape est une réaction chimique hétérogène qui mène à la formation de liaisons chimiques. C'est la combinaison du mouillage et de la migration des atomes à travers l'interface.

- La seconde étape consiste en la diffusion des atomes dissous de l'interface liquide/solide dans le corps même du liquide. Cette diffusion est également accompagnée par un mouvement convectif qui peut être forcé ou naturel (déplacement du liquide suite à une variation locale de densité due à un gradient de température ou une différence de composition chimique).

La répartition de la substance dissoute au sein du métal liquide est dictée par l'étape la plus lente. S'il s'agit de la première étape, la phase liquide aura une composition homogène, dont la concentration est exprimée par l'équation (5). Au contraire, si l'étape 2 est la plus lente, il y a apparition d'une couche limite de diffusion dans laquelle la concentration varie de façon linéaire à partir de C_0^L , jusqu'au niveau de la concentration moyenne donnée par la relation (5) (Figure 3).

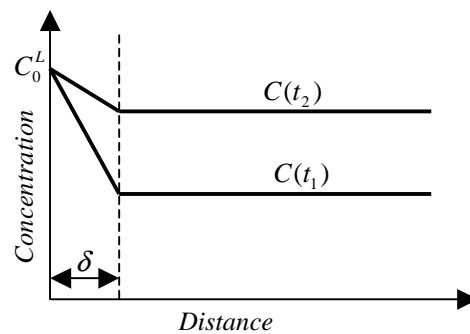


Figure 3 : Répartition des éléments dissous dans le liquide aux temps t_1 et t_2 , si le processus de dissolution est contrôlé par le stade de la diffusion (étape 2)

Dans ce dernier cas, la constante de vitesse de dissolution s'exprime suivant la théorie de Nernst :

$$K = \frac{D}{\delta} \quad (6)$$

Avec :

D : coefficient de diffusion des atomes dissous dans le métal liquide (généralement proche de $3 \cdot 10^{-5}$ cm^2/s dans le cas de métaux portés à 300°C).

δ : épaisseur de la couche de diffusion limite.

les liaisons chimiques de l'interface combinées au phénomène de diffusion des atomes sont propice à la formation d'alliages de liaison. Leur nature peut être définie par l'étude des diagrammes d'équilibre métal de base – métal d'apport de brasage et ne dépend principalement que de la température de brasage. Ces composés sont garants de la tenue mécanique finale de l'assemblage.

2.4 Solidification du métal d'apport liquide

La solidification du métal d'apport mène à la structure initiale du joint brasé qui a une forte influence sur les propriétés de l'assemblage. Le processus, décrit sur la Figure 4 en 6 étapes, consiste en la formation de centres de cristallisation et à leur croissance consécutive. Les éventuels intermétalliques au sein du métal liquide et ceux situés aux interfaces ont des températures de début de solidification

proche de la température de brasage. L'initiation de la solidification s'effectue au niveau de ces sites métallographiques et requiert un état de surfusion thermique du métal liquide par rapport à la température d'équilibre (température du liquidus pour les alliages) : c'est l'étape 1 de la Figure 4. Cette surfusion est nécessaire au développement du processus de cristallisation et elle est responsable de la formation des germes de la nouvelle phase. Ces germes sont de nature hétérogène puisqu'ils sont issus d'intermétalliques ou d'impuretés (Figure 4 étape 2). La vitesse de croissance de la phase solide (front de solidification) est déterminée par la vitesse d'évacuation de la chaleur latente de solidification. Finalement, c'est cette vitesse qui détermine la cinétique du processus de solidification. Lors d'une opération de brasage, la chaleur latente de solidification est le plus souvent évacuée par la phase solide, dans le sens opposé à la croissance (Figure 4 étape 3).

Outre la surfusion thermique, il apparaît une surfusion constitutionnelle : le réajustement permanent de la composition d'équilibre entre les phases solide et liquide (les germes initiaux sont hétérogènes) est effectué grâce au phénomène de diffusion. Celui-ci induit une zone adjacente à la surface de croissance du cristal qui est enrichie en l'un des éléments de l'alliage fondu (Figure 4 étape 4).

Lorsque la zone de surfusion (thermique et constitutionnelle) est suffisamment importante, des rameaux se forment sur les cristaux cellulaires (Figure 4 étape 5), pour ensuite se transformer en dendrites (Figure 4 étape 6). La vitesse de cristallisation des dendrites est bien plus rapide que celle du front de solidification. La croissance des dendrites s'effectue selon les directions définies par le réseau cristallin du métal. Leur croissance s'effectue au fur et à mesure du refroidissement de l'alliage, jusqu'à complète solidification du joint brasé.

Finalement, les résultats issus d'expérimentations et de calculs théoriques montrent que la composition chimique des zones cristallisées dépend presque uniquement de la température de brasage. Elle peut donc être déterminée à l'aide des diagrammes d'équilibres métal de base – métal d'apport de brasage [Ohnuma 03]. Par ailleurs, on note qu'un refroidissement rapide induit une structure fine du joint brasé : un refroidissement lent induit donc une résistance mécanique de l'assemblage plus faible [Kim 02].

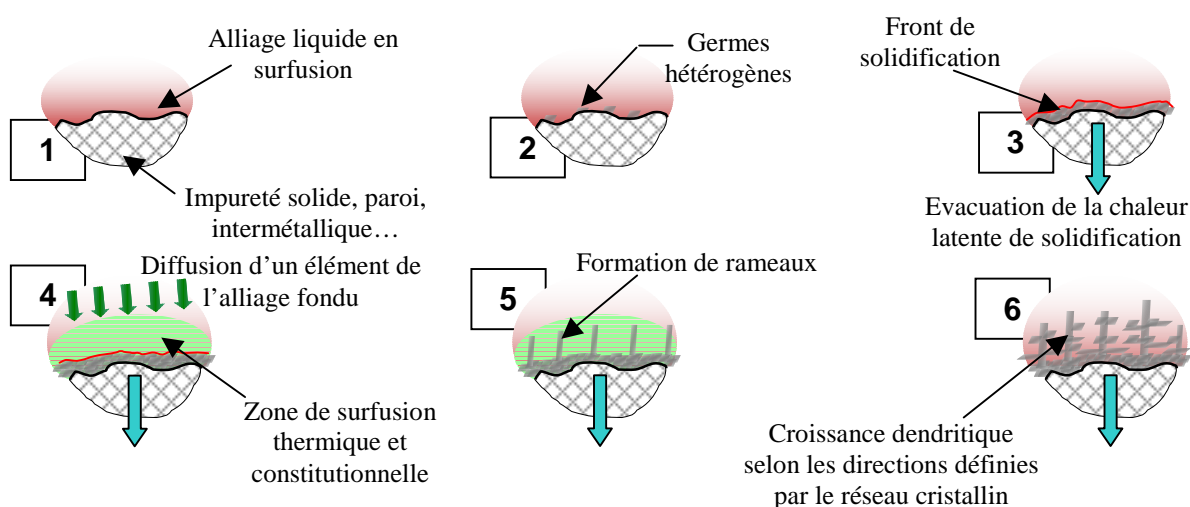


Figure 4 : Déroulement en 6 étapes du processus de solidification du joint brasé

2.5 Conclusion

La description, même succincte, des phénomènes physico-chimiques prépondérants lors d'une opération de brasage apporte des outils de réflexion sur les solutions technologiques à mettre en œuvre pour un tel procédé. Ainsi, afin de favoriser le mouillage du métal de base par le matériaux d'apport, il est nécessaire de sélectionner convenablement les combinaisons de matériaux à assembler, d'éviter la formation d'oxydes à l'interface liquide-solide, et de contrôler la température du procédé pour empêcher la formation d'hétérogénéités éventuelles le long de l'interface.

Le phénomène de dissolution engendre une attention toute particulière à l'état de surface des pièces à assembler ainsi qu'à la définition d'un traitement de surface adapté au procédé.

Enfin, la solidification du joint brasé lors du procédé, caractérisé notamment par la vitesse de refroidissement du joint, peut conduire à des différences notables sur la microstructure du joint brasé. Celle-ci est d'une importance considérable sur les propriétés physiques de l'assemblage.

Le paragraphe suivant illustre les solutions technologiques les plus fréquemment rencontrées dans l'industrie électronique pour une opération de brasage tendre. Il donne également un aperçu de la situation que rencontre actuellement l'industrie électronique, et des modifications qu'engendre l'application de la récente législation européenne visant notamment à bannir le plomb (constituant très avantageux de l'alliage de brasure jusqu'alors universel : l'étain-plomb Sn63Pb37 %massique).

3 Le brasage tendre dans l'industrie électronique

3.1 Introduction

Le procédé de brasage tendre est principalement utilisé dans le domaine de la micro-électronique, et plus particulièrement pour l'assemblage des composants électroniques sur leur substrat (carte électronique). Le développement d'un procédé de brasage tendre par faisceau laser requiert donc une bonne connaissance des solutions technologiques et évolutions auxquelles ce secteur est confronté.

Le paragraphe suivant (§ 3.2) permet d'aborder le contexte dans lequel se situe ce travail de thèse par rapport aux mutations auxquels fait face l'industrie électronique. Les récentes législations européennes remettent en cause beaucoup de choix technologiques, principalement liés à l'utilisation du plomb. Ensuite sont présentés les différents outils, matériaux et techniques de mise en œuvre propres à l'industrialisation d'un procédé de brasage tendre. Cette sorte inventaire des technologies rencontrées dans le cadre du brasage en électronique ne se veut bien évidemment pas exhaustif. D'une part, la multitude des techniques, composants électroniques, traitements de surfaces, matériaux, etc..., relatifs au procédé de brasage, s'ils étaient traités dans leur ensemble, rendraient ce recueil « indigeste » ; d'autre part, les spécificités de ces procédés de brasage sont sans cesse en évolution afin de répondre aux perpétuels défis technologiques : miniaturisation, complexité des composants, réduction des coûts de fabrication... Certains choix technologiques sont parfois rendus rapidement obsolètes.

L'objectif de ce travail est d'offrir une vue d'ensemble du brasage tendre en électronique tel qu'il est ordinairement pratiqué de nos jours. Y sont d'abord détaillés les principaux outils d'apport énergétiques. Puis la description des matériaux d'apport sous forme de crème à braser précède celle de la préparation des circuits électroniques. Enfin, les notions sur la fiabilité des assemblages sont évoquées, avec celles concernant les différentes normes en vigueur et les moyens de contrôle des assemblages finaux.

3.2 Contexte industriel et environnemental

Ce projet de thèse est lié à un secteur industriel en pleine mutation. La directive européenne (RoHS : Restriction Of use of certain Hazardous Substances) visant notamment à éliminer l'utilisation du plomb dans l'électronique à partir du 1^{er} juillet 2006 influe sur la quasi totalité des étapes d'un procédé de brasage tendre. Cette prise de conscience des risques liés à l'utilisation du plomb (saturnisme) a rapidement trouvé son écho aux Etats-Unis et au Japon. Ceci conduit donc à bannir les alliages d'apport et traitements de surface à base de plomb qui sont les plus largement répandus dans l'industrie électronique. Les conséquences indirectes mènent à une remise en question globale du procédé de brasage tendre.

Les alliages de substitutions sélectionnés ont une température de liquidus très supérieure à la température de fusion de l'eutectique Sn63Pb37%massique (environ 30 à 40°C). Ceci impose que les outils de brasage puissent s'adapter à cette élévation de température, que les composants

électroniques la supportent, que les zones thermiques d'activation des flux décapants s'y conforment...

Notons que nombreux sont les industriels qui bénéficient d'une exemption à cette législation. Effectivement, les secteurs de pointe tels que l'automobile, l'aéronautique, le médical et le matériel de contrôle ne sont pas concernés. C'est également le cas des utilisateurs d'alliages à haut point de fusion qui contiennent plus de 85 %massique de plomb puisque aucun alliage de substitution n'est aujourd'hui convaincant pour ces applications. Cependant, les produits présentant un aspect écologique (« sans plomb », ...) sont, à prix égal, plébiscité par l'ensemble des consommateurs. Le qualificatif « sans plomb » constitue alors un sérieux atout commercial [Lerbs 03].

Au-delà des évolutions liées à ces récentes réglementations, l'industrie électronique est continuellement portée par les développements technologiques réalisés à tous ses niveaux de recherches. Ceux-ci sont principalement dictés par la volonté de miniaturisation de systèmes de plus en plus complexes. La transformation des géométries des composants électroniques en est une bonne illustration. Depuis les composants traversant, jusqu'aux BGA et μ BGA, en passant par les SOIC et autres QFP (Figure 5), les technologies d'assemblage se sont modifiées et perfectionnées au fil des années.

Enfin, la situation économique du secteur électronique en Europe – très fortement concurrencé par les leaders mondiaux de la spécialité que sont les asiatiques et les américains – pousse ses acteurs à s'orienter vers des coûts de production réduits au maximum, tout en garantissant une fiabilité des assemblages optimum.

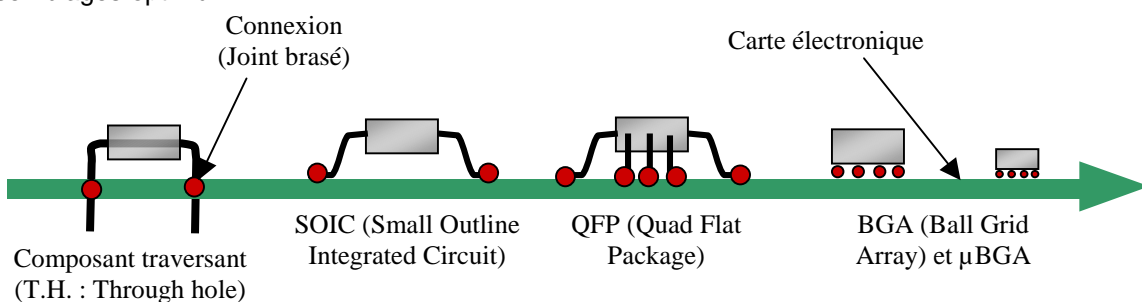


Figure 5 : Evolution technologique des composants électroniques

3.3 Les principales techniques de brasage tendre

3.3.1 Introduction

Ce chapitre décrit les principales techniques de brasage tendre employées dans l'industrie électronique. Ces techniques se différencient par l'utilisation de différents outils permettant de réaliser les étapes indispensables à la création du joint brasé. Les étapes généralement rencontrées lors d'un procédé de brasage consistent en l'activation des flux (pour une attaque des oxydes présents sur les parties à assembler), la fusion et la coalescence des grains d'alliage, la formation d'une interface métallique et enfin le refroidissement de l'assemblage avec solidification du joint brasé. Il s'agit alors d'apporter la chaleur nécessaire à la réussite successive de ces étapes de brasage.

Les outils utilisés ont pour principale fonction l'apport de l'énergie nécessaire au procédé de brasage. On distingue alors différents moyens de transferts thermiques aboutissant à différents outils de

brasage : la conduction (brasage manuel au fer ou à la thermod), le rayonnement (brasage infrarouge), la convection (brasage à convection forcée) et la condensation (brasage en phase vapeur). Le développement des différents outils de brasage s'est effectué au fil de l'évolution de la technologie électronique. Ainsi, afin de répondre à la constante miniaturisation et aux contraintes économiques, l'industrie électronique a été témoin, ces trente dernières années, de l'évolution du procédé de brasage manuel au procédé de brasage à la vague, pour aujourd'hui être dominée par le brasage à convection forcée d'air chaud [Gilbert 01].

Les chapitres suivants retracent chronologiquement l'apparition des principales techniques de brasage. Le détail de chacun de ces outils permet d'évoquer les principes mis en jeu, ses avantages et aussi inconvénients qui ont abouti au développement d'une nouvelle technologie. Notons que tous ces outils de brasage sont toujours utilisés de nos jours : Ils ne se sont pas supplantés les uns les autres. Ces différents outils se complètent et permettent de traiter les nombreux cas d'assemblages rencontrés dans l'industrie électronique.

Le brasage par faisceau laser n'est pas évoqué lors de ces chapitres. Il fait l'objet d'une recherche bibliographie plus approfondie en préambule des études expérimentales.

3.3.2 Brasage manuel au fer ou à la thermod

Le brasage manuel au fer ou à la thermod est assurément le procédé utilisé dès l'origine de cette technique d'assemblage. C'est une méthode simple, bon marché et d'une extrême flexibilité qui reste aujourd'hui encore couramment utilisée pour l'assemblage des prototypes, les reprises et les réparations.

Un « fer à souder » est constitué d'un embout en métal conduisant bien la chaleur (la panne), d'une poignée isolante électriquement et thermiquement permettant la préhension de l'outil, et d'un système de chauffe (généralement électrique). L'outil peut être simplement manipulé à la main, ou fixé à un robot permettant l'automatisation du procédé (thermod).

Cette technique de brasage est qualifiée de sélective, puisqu'on ne peut traiter qu'un joint à la fois (par opposition aux techniques de brasage de masse). Les résultats obtenus lors d'une utilisation manuelle sont en grande partie liés à la dextérité de l'opérateur, ce qui peut induire des problèmes de reproductibilité. De plus, il y a un contact mécanique entre l'outil de brasage et les pièces à fixer. Ceci peut induire une pollution du joint brasé, qui tend à réduire la qualité finale de l'assemblage. Enfin, cette technique reste limitée au brasage de composants électroniques dont les connexions sont accessibles, et de dimension suffisamment grandes.

3.3.3 Brasage à la vague

Le brasage à la vague est utilisé depuis de nombreuses années principalement pour l'assemblage de composants traversant. L'appellation de ces composants électroniques traduit clairement leur méthode de fixation : leurs connexions sont effectuées sur la face opposée d'un circuit électronique simple face (Figure 6). La vague d'alliage liquide s'introduit dans le trou de passage du composant traversant grâce au phénomène de capillarité. Il y a alors solidification du joint brasé en fin de procédé. Cette technique ne requiert pas un pré-dépôt de l'alliage d'apport sur le circuit électronique.

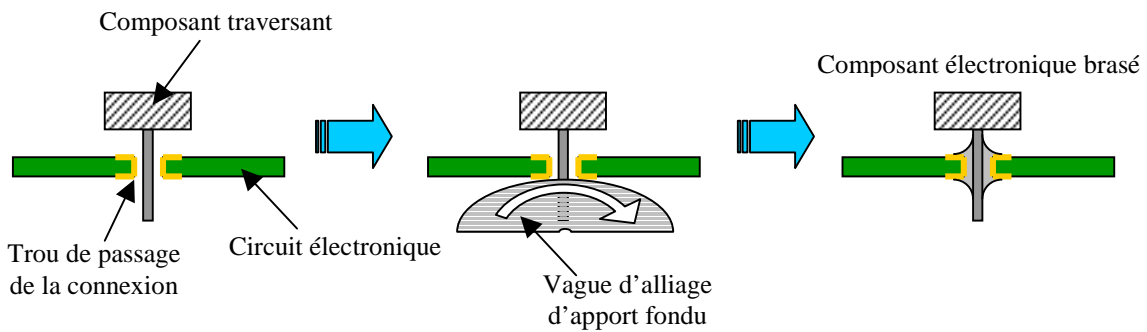


Figure 6 : Procédé de brasage à la vague d'un composant traversant

Malgré le développement des « micro-vagues » permettant de brasage des composants de plus en plus petits, cette technologie reste limitée aux composants traversant, ceux qui supportent la température de fusion de l'alliage d'apport et dont la piste de report est assez large. La volonté de miniaturisation tend aujourd'hui à rendre cette technique de brasage caduque pour bon nombre de circuits électroniques.

Le choix d'une technologie CMS (Composants Montés en Surface ou SMT : Surface Mount Technology) permet d'optimiser la densité de composants sur les cartes électroniques. Il est alors indispensable de coller préalablement ces composants lors du procédé de brasage à la vague ce qui constitue un nouveau inconvénient pour cette technologie. Puis, l'assemblage des composants sur les deux faces du circuit électronique s'avère finalement réhébitoraire à l'utilisation du procédé de brasage à la vague.

Finalement, cette technique de brasage à la vague utilise des récipients d'alliage d'apport fondu qui rendent le procédé peu économique suite à l'augmentation des prix des alliages d'apport liée au passage au « sans plomb ».

3.3.4 Brasage en phase vapeur

La technique de brasage en phase vapeur permet de traiter les circuits électroniques à double face, ce qui contribua fortement au développement de ce procédé, au début des années 1970 [Willis 87].

La Figure 7 représente le schéma de principe du procédé de brasage en phase vapeur d'un circuit électronique. Le transfert thermique s'effectue par condensation et transfert de la chaleur latente de vaporisation. Un plateau convoyeur plonge le circuit électronique dans une enceinte fermée et contrôlée. Au sein de celle-ci, la vapeur saturée d'un liquide perfluorocarboné en ébullition se condense sur l'ensemble des assemblages et dépôts de crème à braser. La chaleur latente du changement d'état sert d'apport énergétique sur les terminaisons pour la formation des joints brasés. Il y a augmentation de la température des assemblages jusqu'à atteindre la température de la vapeur. Le circuit imprimé est ensuite progressivement retiré afin de respecter les étapes de séchage et refroidissement au cours desquelles les joints brasés du circuit électronique se solidifient.

Le procédé de brasage en phase vapeur permet d'assurer une température constante et maîtrisée par le choix du fluide utilisé (pas de surchauffe) au sein d'un milieu chimiquement stable et neutre (pas d'oxydation). La refusion est indépendante des formes des empreintes et des couleurs des matériaux à assembler.

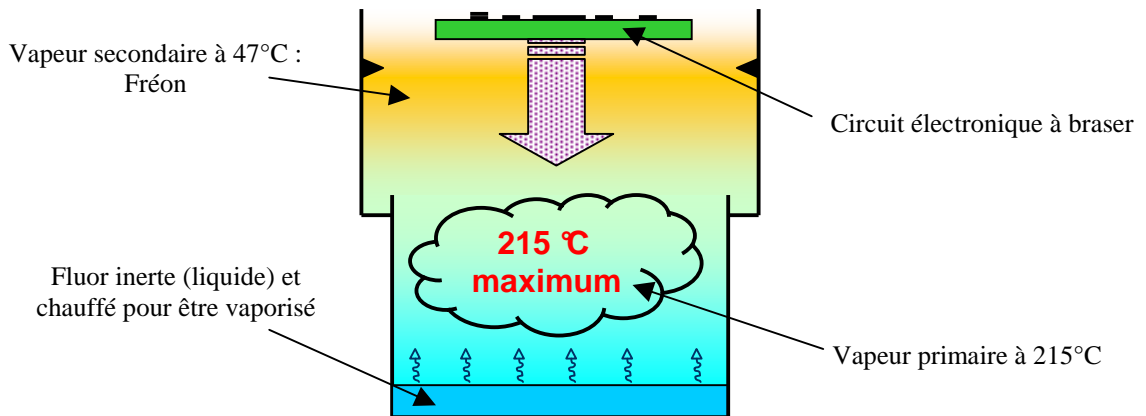


Figure 7 : Schéma de principe du procédé de brasage en phase vapeur

En contre partie, c'est un procédé de brasage avec un coût d'utilisation et de maintenance élevé (Liquide perfluorocarboné ou fluorinert : environ 120euro/kg) qui peut s'avérer dangereux du fait de la présence de gaz toxiques. Comme autre inconvénient, on remarque que ce procédé est peu compatible avec des composants très petits et légers : la condensation peut les faire déplacer, et ainsi créer des défauts de brasure. Le brasage en phase vapeur est également caractéristique d'un manque de flexibilité pour changer le pic de température du procédé. Par ailleurs, c'est un procédé difficilement intégrable sur une chaîne de production qui reste donc peu adapté aux grandes séries. Finalement, le brasage en phase vapeur est surtout intéressant pour les petites séries de circuits électroniques complexes.

3.3.5 Brasage infrarouge

Le brasage en phase vapeur fut utilisé au début de la technologie des CMS, puis fut rapidement remplacé par le procédé infrarouge, dans les années 1980 [Bentzen 00].

Lors d'un procédé de brasage infrarouge (Figure 8), les circuits imprimés sont chauffés puis refroidis à l'intérieur d'un four. Le cycle de température prédéfini est rendu possible par le passage du circuit électronique dans les différentes zones d'un même four. Les principaux avantages de cette technologie sont son coût très bas (procédé et maintenance) et la possibilité de traiter aussi bien les petites et grandes séries.

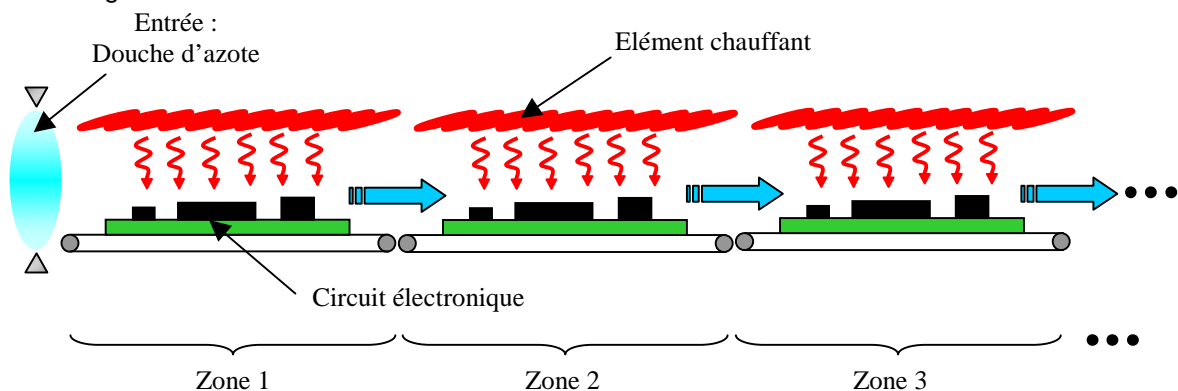


Figure 8 : Schéma du procédé de brasage infrarouge

L'efficacité du transfert thermique par rayonnement dépend principalement de la distance entre les éléments chauffants et les assemblages, la température des éléments chauffants (longueur d'onde) et les couleurs thermiques des assemblages (sélectivité chromatique). C'est un procédé relativement complexe et délicat à maîtriser, puisque l'échange thermique est fonction à la fois de la nature des matériaux (absorption de la longueur d'onde) et de leur état de surface (poli, dépoli). On obtient alors une très bonne efficacité lorsque l'ensemble des couleurs thermiques des assemblages est couplé avec la longueur d'onde des éléments chauffants. Cependant, ceci est rarement le cas dans le domaine des CMS comme l'absorption varie largement d'un composant à l'autre. L'instant auquel l'assemblage atteint la température de brasage sera donc différent d'un composant à l'autre. La durée de procédé doit alors être déterminée pour chaque circuit électronique et également être précisément contrôlée.

Finalement, le procédé de brasage infrarouge tend à disparaître, au profit du procédé de brasage à convection forcée d'air chaud, décrit dans le paragraphe suivant (§ 3.3.6).

3.3.6 Brasage par convection forcée d'air chaud

Le brasage par convection forcée d'air chaud est le procédé le plus couramment utilisé, depuis les années 2000 [Bentzen 00]. Ce procédé a supplanté le brasage infrarouge puisqu'il n'est pas affecté par les phénomènes d'ombrage (joint inaccessible par le rayonnement IR), ni par la couleur des composants électroniques.

Le principe consiste à effectuer la refusion grâce à un apport de chaleur par convection d'air. Le four est constitué de 4 à 8 zones à températures programmables, qui permettent d'ajuster le profil de température auquel sont soumis les circuits électroniques (Figure 9).

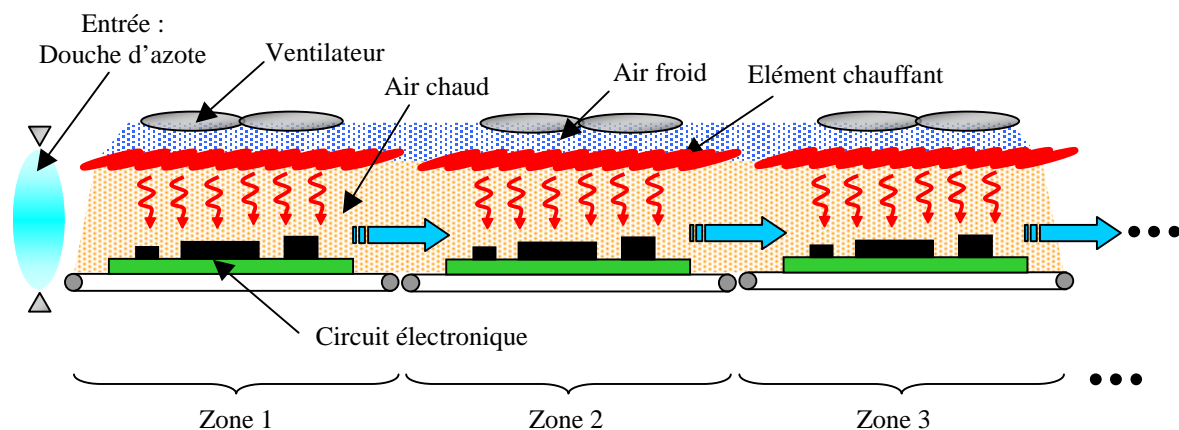


Figure 9 : Schéma du procédé de brasage par convection forcée d'air chaud

L'efficacité du transfert thermique par convection dépend de la vitesse du gaz, de l'angle de contact du gaz et de l'homogénéité de la circulation du gaz. Ce procédé est très efficace pour les assemblages complexes, simple et double face. Il n'a pas de réelle limitation dans le domaine des CMS. Il est également adapté aux grandes séries puisque le four est facile à intégrer dans une chaîne d'assemblage. Le principal inconvénient est dû au risque d'oxydation des brasures, d'où le passage préalable des circuits électroniques sous une « douche » de gaz inerte (azote).

3.3.7 Conclusion

L'évolution de la technologie électronique a mené au développement de différents procédés de brasage pour répondre à la complexité et la miniaturisation croissante des circuits électroniques au fil des années. Les techniques abordées lors de ce travail bibliographique se sont succédées mais sans pour autant disparaître. Comme chaque procédé de brasage possède sa propre spécificité, ils deviennent complémentaires et permettent de traiter l'ensemble des situations rencontrées en électronique aujourd'hui. L'utilisateur trouvera l'outil le plus adapté à son besoin, qu'il s'agisse du brasage d'un prototype, d'une petite ou d'une grande série, mais également en fonction du type et des dimensions des composants à assembler.

Deux familles de technique de brasage se distinguent :

- Les procédés de masse permettant de traiter une quantité de joints simultanément. Ces procédés sont généralement utilisés pour des grandes séries avec peu de valeur ajoutée.
- Les procédés sélectifs qui n'opèrent qu'une connexion à la fois. Ils sont utilisés pour la réalisation de prototypes et permettent l'assemblage de composants sensibles thermiquement. Ces procédés sont également rencontrés pour de la réparation de composants défectueux sur une carte électronique.

Le secteur de l'électronique reste toujours en perpétuelle évolution. Si aujourd'hui, le brasage par convection forcée d'air chaud (four) est le plus utilisé, qu'en sera t'il demain ? Un apport énergétique par faisceau laser semble aujourd'hui répondre aux défis de la microélectronique qui tend vers plus de fiabilité, des cartes très denses en composants et des circuits de plus en plus complexes. La technique de brasage par faisceau laser fait l'objet d'une recherche bibliographie plus approfondie en préambule des études expérimentales de ce travail de thèse.

3.4 Matériaux d'apport (crèmes à braser)

Les matériaux d'apport constituent – avec l'état de surface des pièces à assembler – l'élément clef de la réalisation de la brasure. Ils existent sous différentes formes : fils, préformes, crèmes... C'est la technologie des crèmes à braser qui est exposée ici : elle constitue l'objet d'une partie des recherches effectuées au cours de ce travail de thèse, et est utilisée en grande majorité tout au long des différents essais.

Les principales caractéristiques d'une crème à braser sont :

- sa teneur en métal
- sa granulométrie
- sa viscosité
- son taux de Résidu Non Volatil (RNV)
- son Indice d'Acide (IA)
- sa teneur en halogène
- son aptitude à la coalescence

Les crèmes à braser sont constituées d'une partie organique et d'une partie inorganique. Si la partie inorganique ne représente que 10 à 15% massique du matériau d'apport, cela correspond à un pourcentage volumique compris entre 45 et 55%.

3.4.1 Partie métallique

La partie métallique sert de contact physique et électrique entre les pièces à assembler. Il s'agit de l'alliage d'apport sous forme de poudre. La partie métallique des crèmes à braser est définie par les températures de solidus/liquidus de l'alliage d'apport. Elle se caractérise également par la taille de ses particules, leur forme, aspect de surface, répartition granulométrique mais aussi par leur teneur en oxyde, et en impureté.

Pendant de très nombreuses années, l'alliage d'apport le plus utilisé fut l'étain-plomb : Sn63Pb37 %massique. Une multitude d'alliages de substitution différents sont alors apparus, dès les prémises de la volonté de bannir le plomb de l'industrie [Abtew 00] [Lerbs 03]. Puis la quantité de ces alliages sans plomb a à nouveau décuplé lors de la recherche d'un additif permettant d'améliorer ses performances [Fouassier 01] [Wu 04] [Chen 04] [Kim 03] [Islam 05]. Au final, les matériaux d'apport sans plomb les plus satisfaisants et les plus couramment utilisés de nos jours sont les alliages ternaires SnAgCu et binaire SnAg contenant plus de 95 %massique d'étain dans les deux cas [Zeng 02] [Wiese 02] .

Ces nouveaux alliages sont satisfaisants et remplacent même parfois avantageusement l'étain-plomb de certains points de vue (mouillage, résistance au vieillissement...). Cependant, ils engendrent surtout de nouvelles difficultés dont l'industrie électronique se doit de tenir compte [Lerbs 03] :

- Les alliages sans plomb sont plus chers que l'alliage étain-plomb qui contient une part non négligeable de plomb permettant de réduire son coût.
- Les alliages sans plomb ont une température de solidus/liquidus bien supérieure à celle de l'étain-plomb (221°C l'eutectique Sn96,5Ag3,5 %massique et proche de 217°C pour l'alliage Sn95,8Ag3,5Cu0,7 %massique, contre 182°C pour l'Sn63Pb37 %massique).
- Le contrôle visuel d'un joint sans plomb est rendu plus difficile : les alliages de substitution sont moins brillants que ceux contenant du plomb.
- Les alliages sans plomb contiennent une quantité très importante d'étain. Le risque de formation de filaments (whiskers) pouvant mener à des courts-circuits est alors accru. La croissance cristalline de l'étain sous forme de filaments peut aller jusqu'à plusieurs millimètres de long lors du vieillissement des assemblages Ceci porte préjudice à la fiabilité à long terme des assemblages.

Finalement, les alliages sans plomb ne sont, aujourd'hui, toujours pas entièrement satisfaisants comme alliage de substitution à l'étain-plomb. Faisant suite aux nombreuses recherches qui ont eu lieu sur le sujet, les alliages ternaires SnAgCu et binaire SnAg présentent les meilleurs compromis. Les alliages ternaires SnAgCu sont préférés car ils ont une température de changement d'état inférieure à celle de l'alliage SnAg (proche de 217°C contre 221°C).

3.4.2 Partie organique

Le rôle principal de la partie organique est d'effectuer une attaque chimique sur les surfaces des pièces à assembler afin d'y éliminer toute trace d'oxydation. Les oxydes sont retirés (« lavés ») de la surface à braser, après que leurs liaisons chimiques avec les métaux aient été rompues. La partie

organique sert également de liant à la poudre d'alliage (partie métallique), et son pouvoir collant est utilisé afin de maintenir les composants en place avant le procédé de brasage.

Cette partie organique (plus communément appelée flux décapant ou flux), qui favorise le mouillage et la désoxydation des surfaces métalliques, est constituée :

- d'une résine colophanique modifiée ou synthétique
- d'activateurs (acides carboxyliques)
- d'agents tensio-actifs
- de solvants ayant différents points d'ébullition
- et éventuellement d'halogénures organiques

Les différents types de flux sont classifiés selon leur origine. Les « Rosin fluxes » (symbole RO) sont issus de la résine de sapin (colophane) à laquelle est ajoutée un solvant afin d'en faire une solution qui est ensuite dissoute dans de l'alcool. Les « Resin fluxes » ou « Synthetic Resin fluxes » (symbole RE) sont un mélange de résines naturelles et de résines synthétisées. On trouve également des flux de type acide organique (symbole OR) ou acide inorganique (Symbole IN) qui sont généralement hautement corrosifs et conçus pour avoir un pouvoir réducteur très important. La classification des flux selon la norme ANSI J STD 004 indique également leur niveau d'activité : faible (Low : symbole L), modéré (Moderate : symbole M) et fort (High : symbole H). Enfin, la présence ou non d'halogénure est indiquée par le chiffre 0 (pas d'halogénure) ou 1 (présence d'halogénure).

De même que le potentiel de réduction peut être ajusté par l'ajout d'activateurs, la durée d'activité du flux est augmentée par l'ajout d'halogénure. Ceci s'avère particulièrement utile dans le cas de procédés de brasage lors desquels le temps de maintien de l'alliage d'apport au delà de sa température de liquidus est important (TAL : Time Above Liquidus). C'est le cas du procédé IR par exemple, mais pas celui du procédé manuel. Une étape de nettoyage des cartes électroniques est indispensable lors de l'utilisation d'un flux contenant des halogénures.

Les flux à base naturelle ou synthétique sont constitués de longues chaînes moléculaires qui se brisent lors du procédé de brasage. Celles-ci laissent alors sur le circuit imprimé des résidus neutres (ni corrosif, ni conducteur), mais collants. Le risque d'absorber des poussières et de l'humidité impose un nettoyage des cartes post-brasage. L'utilisation de flux à base d'acide organique ou d'acide inorganique sont également soumis à ce processus de nettoyage dû à leur nature corrosive. Il existe cependant des flux qualifiés de « No clean » (sans nettoyage) ou « Low residue » (peu de résidu) qui permettent donc de s'affranchir de l'étape de nettoyage. La filière électronique utilise de plus en plus de flux et de crèmes à braser à faible résidu et sans halogène appelés produits « no clean ». Le gain en temps, énergie, coût, espace, personnel et pollution est alors conséquent. Cependant beaucoup d'assembleurs continuent de nettoyer les cartes pour des raisons techniques (garantie de fiabilité maximum...), mais aussi cosmétiques.

Enfin, le brasage « sans plomb » impose des températures de procédé plus élevées (+40°C environ). La formulation des flux a dû être repensée afin de correspondre à cette élévation de température. Finalement, les flux sans Composés Organiques Volatils (COV) sont recommandés. Leur formulation (sans alcool), les rendent plus résistants à plus haute température. De plus, ces flux ont également

l'avantage d'être en accord avec la volonté de préserver la couche d'ozone (exemple de l'accord de Kyoto).

Les formulations exactes des flux sont sous couvert du secret industriel. Chaque fabricant ne souhaite donc pas communiquer sur la nature de leurs mélanges. Le taux de Résidu Non Volatil (RNV) et l'Indice d'Acide (IA) sont généralement les seules données physico-chimiques transmises par le fournisseur au sujet des flux employés.

3.4.3 Mise en œuvre (sérigraphie)

Il y a deux méthodes de dépôt des crèmes à braser sur les pistes de report de composant ; soit point par point, à l'aide d'une seringue (dispensing), qui offre beaucoup de flexibilité ; soit par le procédé de sérigraphie (screen printing). Ce dernier procédé de dépôt des crèmes à braser permet d'assurer une meilleure reproductibilité en terme de géométrie et quantité de dépôt. C'est le procédé le plus répandu dans l'industrie électronique. Il consiste à réaliser un masque dans lequel sont percées des ouvertures correspondant aux zones de dépôt de la crème à braser sur le circuit électronique. Il peut s'agir d'un écran en nickel, en acier inoxydable, voire même en papier (innovation allemande, produit jetable). Une raclette (squeegee) permet ensuite d'étaler la crème à braser qui remplit les ouvertures lorsque le masque est positionné sur le circuit électronique (Figure 10). Le procédé de sérigraphie précède l'implantation des composants électroniques et la refusion de la crème à braser.

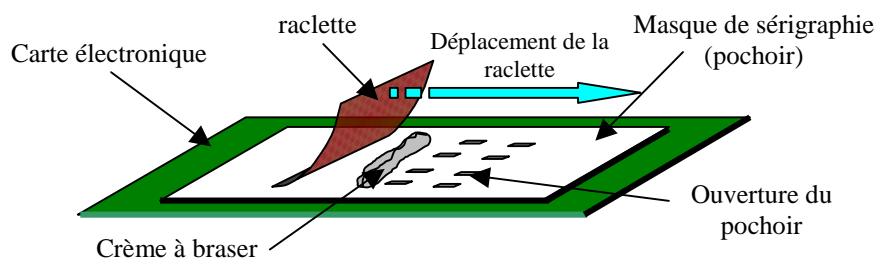


Figure 10 : Schéma du procédé de sérigraphie d'une crème à braser sur un circuit électronique

On considère que le procédé de sérigraphie est à l'origine de 80% des défauts rencontrés en électronique. En effet, outre le positionnement précis du dépôt, sa quantité et sa géométrie jouent un rôle prépondérant sur la présence éventuelle de défauts de brasage. Parmi ceux-ci, on peut citer :

- Le phénomène de « perlage » principalement lié à une quantité de dépôt trop importante de la crème à braser (Figure 11). Les règles admises pour une bonne sérigraphie sont le respect des deux inégalités suivantes :

$$\frac{W}{G} > 4 \quad \text{et} \quad \frac{W}{E} > 1,5$$

Avec :

W : largeur de l'ouverture du pochoir

E : Epaisseur du pochoir

G : Granulométrie de la crème à braser

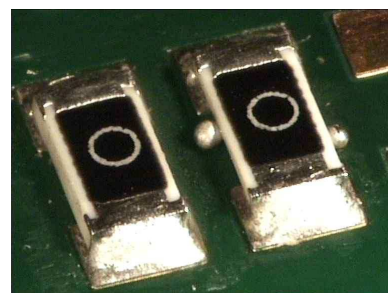


Figure 11 : Phénomène de « perlage » observé sur le composant de droite

- Le phénomène de « tombstoning » (Effet Manhattan, effet crocodile, ...) qui se caractérise par le soulèvement du composant électronique sur l'une de ses pistes de report au cours du procédé de brasage (Figure 12).

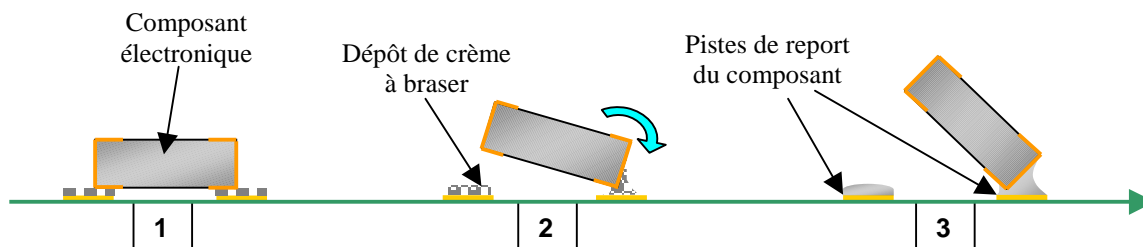


Figure 12 : Processus d'apparition du phénomène de « tombstoning »

Ce phénomène peut être dû à un espace trop important entre les pistes de report du composant (il faut alors revoir le design du circuit), ou à un défaut lors du placement du composant. Il est également rencontré lors d'une montée en température non homogène des deux extrémités du composant. Cependant, dans la plupart des cas, ce défaut peut être évité par l'application d'un procédé de sérigraphie bien maîtrisé. D'une part, la quantité de dépôt doit être équivalente de part et d'autre du composant. D'autre part, l'adoption d'une géométrie spécifique du dépôt peut solutionner le problème (un dépôt triangulaire sur une piste de report rectangulaire permet de réduire les forces de traction du composant électronique) [Yuen].

Finalement, les paramètres importants permettant d'obtenir la meilleure qualité du procédé de sérigraphie sont :

- La bonne définition et le bon transfert de la crème à braser (viscosité, durée de vie sur écran, affaissement et pouvoir collant adaptés)
- Le faible encrassement du masque (une découpe soignée par faisceau laser permet de réduire les cannelures des ouvertures)
- La vitesse élevée du déplacement de la raclette et de retrait du masque
- Une pression suffisante de la raclette sur le masque
- Une bonne reprise de sérigraphie après arrêt

3.5 Préparation du circuit électronique

3.5.1 Le substrat du circuit électronique

Le circuit imprimé est un support isolant sur lequel des pistes de cuivre réalisent la quasi-totalité des connexions entre les composants qu'il supporte [Cadalen 05]. Il s'agit généralement de circuits simple ou double face, ou de circuits multicouches. Ces familles représentent l'immense majorité des circuits électroniques aujourd'hui utilisés. Leur matériau constitutif le plus répandu est le FR4 : Flame Retardant 4 (retardateur de flamme 4).

Un substrat FR4 est constitué d'un empilement de différents maillages de fibres de verre enrobés dans une résine époxyde. Ce stratifié est ensuite recouvert d'une fine couche de cuivre qui, après attaque chimique, constituera le circuit électronique final. Un verni époxy (généralement vert) est enfin appliqué sur l'ensemble de la carte, à l'exception des pistes de report de composant. Son rôle est de protéger le circuit contre toute dégradation mécanique, de prévenir les risques de court-circuit et de limiter le mouillage du matériau d'apport à la piste de report du composant.

Un préchauffage des cartes électroniques précédant l'étape de sérigraphie est parfois réalisé afin d'éliminer leur humidité (c'est le procédé « baking » situé autour de 100-110 °C). Cependant, cette étape n'est souvent pas nécessaire, et dépendra du taux de défaut lié à l'humidité des cartes.

Par ailleurs, notons qu'un substrat plus résistant aux hautes températures qu'impose le passage au « sans plomb » fait l'objet d'un intérêt grandissant. C'est le FR5. Celui-ci a une température de transition vitreuse supérieure à celle du FR4. Il peut alors être utilisé avec des procédés de brasage lors desquels le temps de maintien de l'alliage d'apport au-delà de sa température de liquidus est important (TAL : Time Above Liquidus).

3.5.2 Traitements de surface

Bien qu'il soit théoriquement possible de braser directement sur les pistes de report en cuivre, la propension qu'à cet élément à fortement s'oxyder lors d'une élévation en température incite les industriels à procéder à des traitements de surface. Il s'agit du dépôt d'un revêtement grâce auquel l'opération de brasage sera rendue possible sans avoir à utiliser un flux décapant trop corrosif. Ce dépôt servira également de protection à l'oxydation lors du stockage et de la manipulation des pièces [Ackroyd 77].

Le dépôt le plus répandu est le HASL (Hot Air Solder Levelling) : il s'agit d'un étamage à air chaud de l'alliage de brasage étain-plomb. Ce traitement de surface ne satisfait donc plus la législation européenne visant à bannir le plomb de l'industrie. Par ailleurs, il induit des défauts de planéité préjudiciables au brasage des composants électroniques miniatures. Parmi la dizaine de traitements de surface qui sont employés dans le domaine de la microélectronique, ceux que l'on peut citer comme étant susceptibles d'offrir une alternative viable au procédé HASL sont :

- Les finitions Ni/Au : il s'agit d'un dépôt électrolytique de nickel (quelques microns) suivi d'une immersion dans une solution contenant de l'or pour un dépôt doré de quelques dixièmes de micron. Ce revêtement combine donc une très fine couche d'or qui va très rapidement se dissoudre dans l'alliage d'apport liquide. Le rôle de cette couche dorée est de préserver la couche de nickel contre son processus d'oxydation. Cependant, cette très fine couche d'or est poreuse et n'offre qu'une protection limitée lors de longues périodes de stockage. Quant au revêtement de Nickel, il agit comme une barrière de protection de la piste en cuivre. La vitesse de dissolution du nickel dans l'alliage d'apport en fusion est nettement inférieure à celle du cuivre [Ainsworth 71]. De plus, l'alliage nickel-étain permet d'inhiber la diffusion de l'étain vers le métal de base lors du vieillissement de l'assemblage [Kay 79].
- Les finitions chimiques Ag ou Sn consistent en des dépôts qui sont solubles dans l'alliage d'apport liquide lors du procédé de brasage. Le procédé de dépôt par immersion permet de

recouvrir le matériau de base cuivreux d'une couche de quelques microns d'épaisseur. Ils offrent une très bonne protection contre l'oxydation du matériau de base en cuivre.

- Les finitions organiques OSP (Organique Soldering Protective) sont les traitements les plus économiques [Lerbs 03]. En contre partie, ils offrent une protection contre l'oxydation du matériaux de base assez limitée.

La recherche d'un revêtement « universel » n'a toujours pas aboutie. Chacun d'eux à ses propres spécificités qui les rendent plus ou moins compatible avec le type d'assemblage visé. Il n'est pas rare de trouver différents types de revêtement sur un même circuit électronique. Les revêtements Ni/Au peuvent être préférés pour leur excellente planéité qui permet de brasier les composants les plus fins. Les finitions OSP sont généralement réservées aux assemblages à plus faible valeur ajoutée et présentant une fiabilité moindre. Quant aux revêtements chimiques Sn ou Ag, ils offrent un juste milieu aux deux alternatives précédentes. Ils sont d'un très bon rapport qualité prix, et permettent d'obtenir une surface ayant une excellente brasabilité.

3.6 Fiabilité, normes et moyens de contrôle des brasures

Le degré de fiabilité souhaité par les assemblages brasés est directement fonction de l'application finale du circuit électronique réalisé. Ainsi, la fiabilité à long terme d'un téléphone portable est moins préoccupante que celle d'un avion. D'autre part, les circuits électroniques inclus dans les automobiles sont soumis à des conditions d'utilisation extrêmes (gradients de température, vibrations...). Les circuits électroniques de l'industrie automobile présentent le niveau de fiabilité le plus drastique.

Il existe de nombreuses normes au niveau national, européen et international permettant de décrire et qualifier tous les aspects relatifs à un procédé de brasage. La norme servant de référence internationale en ce qui concerne le niveau d'acceptation et la classification des assemblages électroniques s'intitule IPC-A-610D. Elle liste notamment l'ensemble des connexions rencontrées en électronique, et définit des critères d'acceptation des joints brasés en trois catégories : les classes 1, 2 et 3 allant respectivement des produits électroniques bas de gamme, à ceux nécessitant un niveau élevé de performance. La plupart des grands groupes industriels ont, par ailleurs, développé leurs propres nomenclatures et niveaux de contrôle des joints brasés, afin de garantir une qualité de produit électronique à la hauteur de leurs exigences.

Le contrôle des joints brasés permet de mettre au point et de maîtriser le procédé d'assemblage. Les méthodes de contrôle non-destructives sont préférentiellement utilisées en industrie de fabrication des cartes électroniques. Il peut s'agir d'un contrôle visuel par l'intermédiaire de binoculaires, de microscopes ou même de systèmes automatiques d'inspection (AOI : Automatic Optical Inspection). Ces systèmes automatiques permettent d'augmenter la cadence des contrôles, et sont moins sujets aux appréciations subjectives de l'opérateur puisque l'image de chaque joint est comparée à une image de référence. Un autre moyen de contrôle non-destructif des joints brasés est celui de la radiographie par rayons X. Cette technique offre l'avantage de pouvoir traiter les joints qui ne sont pas accessibles (placés sous le composant électronique, par exemple).

Les contrôles destructifs sont réservés à l'expertise des procédés de brasage. Ce sont, par exemple, la réalisation de micro-sections pour l'analyse de la microstructure des joints brasés par Microscopie

Electronique à Balayage. On peut également citer les tests mécaniques et les tests en vieillissement des assemblages (ceux-ci sont soumis à des cycles thermiques décrits par les normes auxquels la procédure de contrôle se réfère).

3.7 Conclusion

Ce chapitre rassemble les principales informations concernant les outils, méthodes et matériaux constituant l'essence d'un procédé de brasage en électronique. Le contexte industriel y est présenté, puis les thèmes abordés illustrent combien la législation RoHS peut influencer sur la totalité des choix technologiques effectués dans l'industrie électronique.

Les techniques de brasage les plus courantes sont présentées, et leur évolution est expliquée par la volonté de miniaturisation et la complexité grandissante des cartes électroniques. Aujourd'hui, le procédé le plus utilisé est le brasage par convection forcée d'air chaud. Aucun des procédés présentés n'est en mesure de suppléer les autres. Ils sont complémentaires et permettent de traiter l'ensemble des assemblages et situations rencontrés dans l'industrie électronique aujourd'hui. Cependant, ce secteur en perpétuelle évolution nécessite un développement constant des techniques qui y sont employées.

La technologie des crèmes à braser est également abordée. La description de leur composition (microbilles d'alliages et flux décapant) et leurs méthodes de mise en œuvre (sérigraphie, point par point) permet de comprendre le mode de fonctionnement de ces matériaux. Puis l'étude de la problématique des dépôts protecteurs des circuits cuivreux a permis de sélectionner les traitements de surface les plus prometteurs en vue du remplacement du procédé HASL. Il s'agit des revêtements Ni/Au, des finitions chimiques Ag ou Sn ou du traitement OSP qui sont respectivement choisis pour leur excellente planéité, leur très bonne brasabilité ou leur coût réduit. Dans le dernier paragraphe, la notion de fiabilité et un aperçu des normes et différents moyens de contrôle des brasures sont exposés. Finalement, les connaissances acquises lors de l'établissement de cet inventaire de technologies permettent de guider les choix technologiques effectués au cours du travail expérimental de cette thèse.

4 Conclusion

Ces recherches bibliographiques permettent de définir précisément le cadre dans lequel s'effectue le travail de thèse : à la fois d'un point de vue scientifique, technologique et industriel.

Les notions de mouillage, dissolution puis solidification du matériau d'apport lors d'un procédé de brasage tendre sont d'abord exposées. La compréhension de ces phénomènes physico-chimiques a guidé les choix technologiques pour la mise en œuvre de ce procédé d'assemblage. Ceux-ci sont alors détaillés dans la seconde partie de ce travail, avec la situation actuelle de l'industrie électronique. Le développement de cette technologie d'assemblage est aujourd'hui orientée non seulement par la volonté de miniaturisation, l'augmentation continue de la densité de composants sur les circuits imprimés et leur complexité grandissante ; mais également par la récente législation au niveau européen et la prise de conscience mondiale de la nocivité de l'utilisation du plomb. Ainsi, le procédé de brasage tendre est en pleine mutation, et le secteur de l'électronique se doit de trouver des solutions pour répondre aux exigences gouvernementales et écologiques, sans ralentir ses progrès technologiques constants. Aussi, le perfectionnement de la technique de brasage tendre est forcément lié aux préoccupations économiques des industriels, dans un secteur très concurrentiel.

Ce tour d'horizon de la technologie de brasage tendre en électronique offre les bases nécessaires pour diriger les choix technologiques effectués au cours du travail de recherche sur le développement du procédé de brasage tendre par faisceau laser. Aux vues des transformations auxquels l'industrie électronique fait face, le développement d'un procédé de brasage innovant et « high-tech » est donc justifié. Un état de l'art portant sur le procédé de brasage laser est exposé en préambule des études expérimentales de ce travail de thèse.

5 Références

- [Abtew 00] M. Abtew, G. Selvaduray, Lead-free solders in microelectronics, *Materials Science and Engineering*, 27 (2000) 95-141
- [Ackroyd 77] M. Ackroyd, C. MacKay, Solders, solderable finishes and reflowed solder coatings, *Circuit World*, 3 (1977) 2-8
- [Ainsworth 71] P.A. Ainsworth, The formation and properties of soft soldered joints, *Metals and Mat.*, 5 (1971) 374-379
- [Bentzen 00] B. Bentzen, Reflow soldering, SMT in FOCUS, octobre 2000, disponible sur le site Internet www.smtinfocus.com
- [Cadalen 05] E. Cadalen, Conception des circuits imprimés rigides, *Techniques de l'ingénieur*, E3342, 2005
- [Chen 04] B. L. Chen, G. Y. Li, Influence of Sb on IMC growth in Sn-Ag-Cu-Sb Pb-free solder joints in reflow process, *Thin Solid Films*, 462-463 (2004) 395-401
- [Dolgov 77] Y. S. Dolgov, Y. F. Sidokhine, La formation du joint brasé, 1977, *Traduit du russe par C. Lévy*, Publication de la Soudure Autogène, Paris, France
- [Fouassier 01] O. Fouassier, Brasure composite sans plomb de la conception à la caractérisation, Thèse de l'Université de Bordeaux I, 2001
- [Gilbert 01] B. Gilbert, Step by step SMT soldering: reducing soldering defects, Technical paper de Locite Corporation, 2001
- [Islam 05] M. N. Islam, Y. C. Chan, A. Sharif, M. J. Rizvi, Effect of 9wt.% in addition to Sn_{3,5}Ag_{0,5}Cu solder on the interfacial reaction with the Au/NiP metallization on Cu pads, *Journal of Alloys and Compounds*, 396 1-2 (2005) 217-223
- [Kay 79] P.J. Kay, C. A. MacKay, Barrier layers against diffusion, *Trans. Inst. Of Metal Finishing*, 57 (1979) 169-174
- [Kim 02] K.S. Kim, S.H. Huh, K. Sukanuma, Effects of cooling speed on microstructure and tensile properties of Sn-Ag-Cu alloys, *Material Science and Engineering*, A 333 (2002) 106-114
- [Lerbs 03] M. Lerbs, R. Billat, Brasures sans plomb pour l'électronique, Hermès Science, ISBN 2-7462-0661-7, 2003
- [Ohnuma 03] I. Ohnuma, M. Miyashita, X.J. Liu, H. Ohtami, K. Ishida, Phase equilibria and thermodynamic properties of Sn-Ag based Pb-free solder alloys, *IEEE Transactions on Electronics Packaging manufacturing*, 26 1 (2003) 84-89
- [Wiese 02] S. Wiese, F. Feustel, E. Meusel, Characterisation of constitutive behaviour of SnAg, SnAgCu and SnPb solder in flip chip joints, *Sensors and Actuators*, A 99 (2002) 188-193
- [Willis 87] J.B. Willis, Laser soldering applied to electronic circuits, *Proceedings 4th Int. Conf. Lasers in Manufacturing*, May 1987
- [Wu 04] C. M. L. Wu, D. Q. Yu, C. M. T. Law, L. Wang, Properties of lead-free solder alloys with rare earth element additions, *Materials Science and Engineering*, R 44 (2004) 1-44

- [Yuen] M. Yuen, H. Benedict, K. Havlovitz, T. Pitsch, A.C. Mackie, Tombstoning of 0402 and 0201 components." A study examining the effects of various process and design parameters on ultra-small passive devices", Plexus Electronic Assembly Corporation, Neenah, WI et Praxair Inc. Tarrytown, NY, disponible sur le site http://www.xs4all.nl/~tersted/PDF_files/Plexus/tombstoning.pdf (Le 06/10/2006)
- [Zeng 02] K. Zeng, K. N. Tu, Six cases of reliability study of Pb-free solder joints in electronic packaging technology, Materials and Science Engineering, R 38 (2002) 55-105

CHAPITRE 2: ETUDES EXPERIMENTALES

6 Préambule

6.1 Les débuts

C'est en 1974 que la technique de brasage tendre par faisceau laser a été démontrée pour la première fois [Bohman 74 cf Beckett 99]. Cette nouvelle technologie apparaît donc en même temps que l'utilisation du laser en milieu industriel.

Les principaux avantages d'une telle technique paraissent d'ores et déjà incontestables : un apport de chaleur très localisé et précisément contrôlé, ainsi qu'une rapide montée et descente en température du joint brasé.

L'avantage d'un procédé qui permet un apport d'énergie très localisé est évident : il permet d'éviter de chauffer et éventuellement de détériorer les composants alentours. De plus, cet apport très localisé d'énergie induit une rapide montée en température ainsi qu'un refroidissement également très rapide par conduction à travers le substrat. Ces phénomènes, pensait-on à l'époque, permettaient d'éviter la formation des « intermétalliques » connus pour être des composés fragiles et pouvant être la cause de la rupture du joint. [Whitehead 87]

La technologie laser de l'époque (laser à gaz CO₂) ne permettait cependant pas de rendre un tel procédé viable industriellement : outil laser trop coûteux, trop encombrant, avec un faible rendement et présentant un faible coefficient d'absorption par les alliages utilisés en électronique. Ainsi, bien que présentant des avantages certains, ce procédé d'assemblage reste dépendant du progrès technologique lié à la source laser.

6.2 Utilisation du laser Nd:YAG

L'utilisation d'un laser solide Nd:YAG pour le brasage permet de faire un pas supplémentaire vers la popularisation de la technique du brasage laser. Effectivement, depuis 1982 et encore de nos jours, le procédé de brasage utilisant un laser Nd:YAG est étudié.

Parallèlement au développement de la technique de brasage laser, plusieurs articles exposent un comparatif entre les deux technologies laser (Nd:YAG et CO₂) appliquées à un procédé de brasage tendre [Suenaga 87] [Willis 87]. Ces travaux mettent en évidence l'attrait avéré de la technologie Nd:YAG qui conduira à l'abandon de la technologie CO₂ pour le brasage laser de composants électroniques.

Le faisceau laser issu d'un laser solide Nd:YAG a la particularité d'avoir une plus courte longueur d'onde (1.064 µm contre 10.6 µm pour un laser à gaz CO₂). La première conséquence liée à cette caractéristique intrinsèque de l'outil laser est d'induire une meilleure absorption de l'énergie par les métaux et matériaux métalliques. De plus, aux courtes longueurs d'onde, les polymères (tel que le polyimide, possible constituant d'un substrat « Printed Circuit Board » PCB : substrat d'un circuit électronique) sont beaucoup plus « transparents » et supportent donc mieux les énergies sous laser Nd:YAG [Lish 81]. Il apparaît donc que le laser à CO₂ présente deux inconvénients : l'un étant de devoir s'adapter à la haute réflectivité du matériaux d'apport, et l'autre de s'assurer que le faisceau laser n'interagisse pas avec le substrat PCB. John B. Willis indique que l'absorption du faisceau laser

CO₂ par le matériau d'apport peut-être grandement améliorée par l'utilisation d'un flux (décapant). En effet, la plupart des flux utilisés en brasage tendre sont très absorbants à 10.6µm. Ainsi, le couplage d'un faisceau laser CO₂ avec le joint sera bien meilleur si le matériau d'apport inclus un flux. C'est le cas par exemple des pistes de report pré-étamées et recouvertes de flux, ou des crèmes à braser constituées de micro-billes d'alliage de refusion et d'une matrice comprenant le flux.

Si l'absorption du faisceau laser CO₂ du matériau d'apport est améliorée par l'ajout d'un flux, il n'en reste pas moins qu'il est préférable d'avoir un spot laser petit, et précisément positionné au niveau du joint. Or, du fait d'une longueur d'onde 10 fois plus petite que celle d'un laser CO₂, le laser Nd:YAG peut être focalisé sur une surface très petite, et donc adaptée à la géométrie des pistes de report des composants. Par ailleurs, les lasers Nd:YAG ont l'avantage de pouvoir être utilisés avec la technologie des fibres optiques. Ainsi, un faisceau laser Nd:YAG peut-être facilement intégré dans une machine et positionné, en toute sécurité lorsque celui-ci est fibré. Un autre avantage indéniable lié à la technologie Nd:YAG est le coût moins élevé des systèmes optiques permettant la mise en forme du faisceau laser par rapport à la technologie laser CO₂. Finalement, au regard de ces considérations, il paraît évident que la technologie laser CO₂ a été abandonnée dans le domaine du brasage électronique, au dépend de la technologie laser Nd:YAG.

6.3 Lasers continus ou à impulsion ?

Le procédé de brasage nécessite un apport d'énergie suffisant pour amener l'alliage d'apport au delà de sa température de fusion. Il est alors essentiel d'utiliser une source de chaleur qui induit une montée en température de l'ensemble du matériau d'apport. La technologie laser Nd:YAG, comme celle des lasers CO₂, se divise en deux catégories : les lasers à impulsions, et les lasers continus. Les lasers pulsés n'émettent que des pulses de quelques millisecondes, ce qui induit principalement un échauffement en surface du matériau visé. Ainsi, les lasers à impulsions sont inadaptés au procédé de brasage en électronique qui requiert un échauffement de la totalité du matériau d'apport. En conséquence, la majorité des systèmes de brasage laser utilise des sources laser continues.

6.4 Les lasers à diodes

Les résultats obtenus jusqu'à présent pour une opération de brasage laser en électronique montrent que les puissances laser généralement utilisées n'excèdent pas 30W. Le procédé de brasage laser en électronique tend à réduire les pertes d'énergie, grâce à un apport d'énergie très efficace par le faisceau laser. Dès les années 90, les développements effectués sur les lasers à diodes permettent de combiner les faisceaux laser issus de différents modules de semi-conducteurs afin d'obtenir des puissances laser dans la gamme de celles nécessaires à une opération de brasage en électronique. C'est l'avènement des lasers à diodes de puissance (HPDL : High Power Diode Laser). Ces développements ont ainsi rendu les lasers à diodes particulièrement attractifs pour l'application du brasage laser en électronique. Tout d'abord, les longueurs d'onde de ces lasers à diodes étaient typiquement de 780 nm, 860 nm et 980 nm, soit proches de celle du laser Nd:YAG [Berkovitz 97]. En dépit d'un pic d'intensité plus faible, et d'un spot de diamètre plus large comparé au laser Nd:YAG, l'utilisation d'un laser à diodes focalisé ou défocalisé induit une montée en température d'un matériau

métallique équivalente (faisceau focalisé), voire même supérieure (faisceau défocalisé) [Brandner 00]. La répartition plus homogène de l'énergie au sein d'un faisceau laser à diodes est donc préférable en vue d'une opération de brasage laser. Un autre avantage des lasers à diodes est leur simplicité d'utilisation, ils se branchent sur une prise murale. De plus, ils peuvent être refroidis par air et présentent ainsi un encombrement minimum.

Finalement, le brasage laser est devenu une solution économique depuis le développement du laser à diodes. Ceux-ci sont petits et légers, et donc facilement intégrables dans une ligne de production. Ils présentent un bon rendement (de 30% à 50%). La courte longueur d'onde des lasers à diodes leur confère des propriétés adaptées au brasage en électronique : une bonne absorption par les matériaux métalliques, et la possibilité d'être fibré pour plus de flexibilité. En 1999, le prix d'un laser à diodes de puissance avec une puissance de sortie de 120W était comparable à celui d'un laser Nd:YAG ou CO₂ de même puissance. Cependant la maintenance d'un laser à diodes est bien inférieure à celle des lasers Nd:YAG ou CO₂ : Les lasers Nd:YAG nécessitent un remplacement des lampes d'excitation du milieu actif, quant aux lasers CO₂ ils requièrent un remplissage périodique du milieu actif [Beckett 99].

6.5 Les lasers ultraviolets et visibles

La grande majorité des applications de brasage laser utilise des sources Nd:YAG ou diode émettant dans le proche infrarouge. L'utilisation de lasers dont la longueur d'onde se situe dans les domaines visibles et proche ultraviolet (laser à gaz argon : $\lambda = 488$ nm ou laser YAG triplé : $\lambda = 355$ nm) a cependant fait l'objet de recherches dans le cadre de l'application du brasage laser en électronique. Ils sont généralement utilisés pour l'assemblage de puces montées sur verre (Chip-On-Glass ou COG). La connexion de ce type de dispositif électronique se situe entre le composant et le circuit imprimé. Le joint à braser n'est donc pas directement accessible par une incidence du faisceau laser perpendiculaire au substrat. La solution adoptée est une exposition du faisceau laser à travers le substrat. Bien que la plupart des substrats utilisés en électronique soient suffisamment transparents au proche infrarouge (FR4, PI), on dénombre peu d'applications de ce genre [Kordás 06]. Les circuits imprimés sont revêtus d'une couche de vernis épargne (typiquement de couleur verte), qui absorbe les longueurs d'onde laser. De plus, les circuits imprimés double faces empêchent la mise en œuvre d'un tel procédé par transparence (absorption du faisceau par le circuit de la face arrière). Cependant, l'étude de l'assemblage par faisceau laser UV de puces montées sur verre (Chip-On-Glass ou COG) induit des résultats concluants [Lee 01] [Kordás 06].

6.6 D'un point de vue microstructural

Malgré de nombreux avantages, le procédé de brasage laser tarde à s'imposer. Il est limité aux applications auxquelles ni le brasage à la vague ni les procédés de brasage courants au four n'apportent de solution satisfaisante. Il peut s'agir de l'assemblage de composants sensibles aux hautes températures, de l'automatisation de la fabrication de composants optoélectroniques [Chouta 03], ou du brasage de connecteurs sur des capteurs en couche mince [Nicolics 92 a] [Chabicovsky 93]. La plupart de ces utilisations concernent l'aérospatiale et les applications militaires où une haute fiabilité des composants brasés est exigée [Brandner 00]. Effectivement, comparé à un procédé de

brasage IR, le brasage laser procure une meilleure configuration microstructurale et une microdureté plus élevée du joint brasé avant vieillissement [Felipe 94] – ces mêmes travaux montrent cependant que lors du vieillissement, la configuration microstructurale et la microdureté du joint deviennent similaires qu'il s'agisse d'un procédé laser ou IR.

Contrairement aux autres procédés de brasage en électronique, l'outil laser permet d'adapter précisément l'énergie en fonction du joint à réaliser. Il existe une fenêtre de paramètres laser (puissance laser – durée d'exposition) qui permet de brasier convenablement un composant électronique [Rahn 00]. Ainsi, pour chaque type de composant électronique ou dimension de piste de report, les paramètres de brasage laser peuvent être optimisés afin de déterminer la meilleure configuration de brasage. Il est démontré que la formation d'une épaisseur excessive d'intermétalliques cause des défauts de fiabilité dans les joints brasés [Vanzetti 89]. Alors que d'autres procédés de brasage en électronique visent à obtenir une couche d'intermétallique inférieure à $3\mu\text{m}$, un procédé de brasage laser optimisé permet d'obtenir des épaisseurs d'intermétalliques inférieures au micron.

Il est alors possible de déterminer les paramètres laser qui confèrent les meilleures propriétés mécaniques au joint brasé. La méthode des plans d'expérience peut être utilisée pour définir les paramètres laser optima afin d'obtenir, par exemple, la meilleure résistance au cisaillement des billes d'un BGA [Qin 01].

L'évolution métallographique de l'interface brasure-finition (Ni/Au) a été précisément détaillée lors d'un procédé de brasage laser [Tian 02] [Tian 03]. Il est démontré que le refroidissement très rapide du joint brasé en fin de procédé induit une microstructure très fine. Ce phénomène, allié à la formation d'une fine couche d'intermétalliques conduit à augmenter les propriétés mécaniques du joint brasé, notamment sa résistance au cisaillement.

6.7 La conjoncture actuelle

Finalement, un contrôle très précis de l'apport d'énergie grâce à l'utilisation d'un outil laser permet de réaliser des joints dont la résistance mécanique et la fiabilité seront optima. Les études portées sur ces sujets rendent les procédés de brasage de plus en plus attractifs. L'intérêt porté sur le procédé de brasage laser est également relié à d'autres considérations.

Tout d'abord, la tendance à la miniaturisation en microélectronique induit une augmentation de la densité de composants sur les circuits imprimés. Certaines techniques de brasage, tel que le brasage à la vague ne sont plus toujours possibles, ce qui induit une demande en procédés de brasage sélectifs [COH 02]. Ainsi, l'augmentation de la densité des circuits imprimés et la diminution de la dimension des pistes de report nécessitent un procédé de brasage très précis comme le permet la technologie laser.

Ensuite, l'évolution actuelle et future des alliages de brasage est liée aux contraintes environnementales qui imposent l'élimination du plomb. Les températures de fusion des alliages de substitution sont généralement supérieures à celle de la brasure étain-plomb. Afin de préserver les matériaux constituant les cartes et composants électroniques, l'utilisation d'une source de chauffage plus énergétique et localisée telle que le laser devient particulièrement recommandée [IRE 01]. Le

passage de l'alliage étain-plomb ($T_{f \text{ SnPb}} = 183 \text{ }^\circ\text{C}$) aux alliages de substitution sans plomb dont la température de fusion est généralement supérieure à 215°C ($T_{f \text{ SnAgCu}} = 217 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{f \text{ SnAg}} = 221 \text{ }^\circ\text{C}$), tout comme l'utilisation d'alliages de plus haute température tel que Or-Etain ($T_{f \text{ AuSn}} = 279 \text{ }^\circ\text{C}$) ne requièrent simplement qu'une augmentation de la puissance du laser utilisé [Hoult 04] ou de sa durée d'interaction.

Enfin, de nos jours, la plus importante application des lasers à diodes de puissance est leur utilisation comme moyen de pompage des lasers solides et des lasers fibrés. Près de la moitié des lasers à diodes est ainsi utilisé pour ce type d'application. Bénéficiant d'un marché robuste dans ce secteur, la totalité du marché des lasers à diodes de puissance est en progression en 2005 de 11%. De plus, Les chiffres obtenus depuis 2002 montrent que le prix moyen de vente d'un laser à diodes de puissance est toujours en baisse, année après année. Les prévisions pour 2006 indiquent même que leur prix moyen de vente aura presque été réduit de moitié depuis 2002 (-48 %) [Steele 06]. Ceci est donc entièrement à l'avantage de l'application de brasage laser : le coût d'un laser à diodes est devenu très abordable comparé à celui des autres technologies laser, et tend à rendre la technologie de brasage laser très compétitive comme moyen de brasage sélectif. Aujourd'hui, les prix d'un laser à diodes de puissance sont de moins de 170 € (200 \$) pour un simple élément de 1W et de 1700 € (2000 \$) pour un empilement (combinaison d'éléments simples : stack) allant jusqu'à 50W. L'outil laser complet comprend également un système de refroidissement, une alimentation, une fibre optique et un système optique (lentilles de mise en forme du faisceau). Finalement, un outil laser complet de 30W peut revenir environ à 5000 €. Le brasage laser est donc devenu un substitut à bas prix du procédé sélectif de brasage à la vague. Il procure une haute qualité de brasage grâce à une source de chauffage paramétrable, précise et parfaitement reproductible.

6.8 Les perspectives

La récente émergence des lasers TEM00, tel que les lasers fibre et les lasers solides pompés par diodes induit de nouvelles pistes de développement [Leuzinger 04]. Bien que ces systèmes laser soient plus coûteux que les lasers à diodes, leur très haute qualité de faisceau leur confère des avantages certains. Contrairement aux lasers à diodes, le diamètre du faisceau au plan focal n'est pas limité à plusieurs centaines de microns. Un laser TEM00 permet d'obtenir des diamètres de spot laser inférieurs à $100 \mu\text{m}$, ce qui coïncide avec la tendance à la miniaturisation de l'industrie électronique. De plus, l'autre avantage des lasers TEM00 est une profondeur de champ plus importante qui permet de travailler avec de plus grandes distances focales. Ceci facilite l'accès aux joints des composants électroniques à braser. Finalement, l'excellente qualité de faisceau et la facilité d'intégration des lasers fibre en font les candidats idéals pour les futures applications de brasage laser.

6.9 Conclusion

Le développement du brasage laser a eu lieu au fil des technologies laser CO_2 , YAG puis diode. L'outil laser s'avère, aujourd'hui, adapté à l'évolution de l'industrie électronique : la miniaturisation des assemblages, la densité des circuits intégrés en hausse, des composants électroniques sensibles aux hautes températures, le passage aux matériaux d'apport sans plomb ayant un point de fusion élevé...

Le brasage laser est généralement associé à la production de masse [Rahn 00]. C'est un procédé sélectif qui vraisemblablement ne remplacera pas les procédés conventionnels de brasage au four, à la vague ou en phase vapeur [Flanagan 96]. Cependant, le brasage laser est estimé comme étant un des meilleurs outils de brasage sélectif [Leuzinger 04]. De plus, il peut s'avérer être l'unique solution à employer, dans le cas d'opérations de brasage spécifiques afin d'assurer la faisabilité d'un assemblage de haute qualité.

7 Introduction

Le travail expérimental effectué lors de ce projet de thèse s'inscrit dans la continuité du développement du procédé de brasage par faisceau laser. Bien que ce procédé semble conférer une qualité élevée au joint brasé, son emploi reste encore quelque peu marginal dans le milieu industriel. L'ascension d'une telle technologie passe à présent par son utilisation dans le cadre de cas concrets d'applications industrielles.

La première partie traite d'un assemblage de matériaux dissemblables. Ces assemblages sont de type céramique-métal et céramique-composite. Ces assemblages de matériaux dissemblables présentent souvent un vif intérêt dans le milieu industriel et restent fréquemment source de défi technologique [Kara-Slimane 96]. La première approche évoquée lors de ce travail considère un apport énergétique par conduction à travers les pièces à assembler et leur traitement de surface (métallisation). Cette étude détaille les conditions nécessaires à la réussite de tels assemblages par brasage laser. L'étude de faisabilité est accompagnée par les analyses métallurgiques du joint brasé ainsi que par l'évaluation des propriétés mécaniques des assemblages. Finalement, elle a pour objectif la réalisation d'un prototype permettant de valider le procédé d'assemblage de matériaux dissemblables par faisceau laser.

La seconde partie concerne l'interaction du faisceau laser avec une crème à braser. L'utilisation de crèmes à braser comme matériaux d'apport est très répandue dans l'industrie de fabrication des circuits électroniques. L'étape de sérigraphie de ces crèmes à braser précède le positionnement des composants électroniques puis leur fusion lors du procédé de brasage tendre le plus répandu : le procédé au four. L'emploi de crèmes à braser dans le cadre d'un procédé de brasage par faisceau laser devient donc économiquement plus intéressante. Cependant, dès les premières utilisations d'un outil laser pour le brasage de composants électroniques, il apparaît que les crèmes à braser exposées au faisceau induisent des projections de microbilles d'alliage [Willis 87] [Nicolics 92 b]. L'objectif visé par cette seconde partie de recherche est l'étude du comportement de différentes crèmes sous faisceau laser dans le but de définir ses caractéristiques idéales pour un procédé de brasage laser. Ces études nécessitent également le développement de procédés de brasage laser appliqués à l'industrie électronique afin de permettre la validation des crèmes à braser sélectionnées. Enfin, une tentative d'optimisation des crèmes à braser en vue d'une application laser est menée en y incorporant un additif absorbant. L'analyse critique de cette nouvelle formulation est également basée sur son emploi lors du brasage laser de composants électroniques.

L'ensemble des études constituant ces travaux expérimentaux traite de nombreuses thématiques. Celles-ci donnent une vision globale et détaillée de différentes applications d'un procédé de brasage par faisceau laser. L'assemblage de matériaux dissemblables, le brasage par interaction « directe » et « indirecte » du faisceau, la réalisation de prototypes rattachés aux domaines de la micromécanique et de l'électronique font partie des sujets de recherche couverts par ces travaux.

8 Les sources laser

Différentes sources laser sont utilisées lors de ce travail de thèse. Il s'agit principalement de lasers à diodes :

- Les lasers à diodes Thalès (TLD : Thalès Laser Diode) :
L'un dont le faisceau de longueur d'onde 845 nm est issu d'une fibre optique de diamètre 600 μm . Sa puissance maximale est de 30 W.
L'autre est équipé de trois modules de diodes laser connectés à trois fibres optiques distinctes de diamètre 400 μm . Les paramètres laser de chaque faisceau sont identiques : une longueur d'onde de 845 nm et une puissance contrôlable de 2 à 20 W. Les faisceaux issus des fibres optiques de diamètre 400 μm sont éventuellement injectés dans des fibres optiques de diamètre 600 μm si la configuration du système optique faisant suite le requiert.
Ces systèmes sont utilisés en statique (pas de déplacement du faisceau laser).
- Le laser à diodes DioScan (Laserline) est équipé d'un système de miroirs galvanométriques qui permettent un déplacement rapide du faisceau laser. L'outil laser émet un faisceau de longueur d'onde 940 nm, de puissance réglable de 20 à 300 W. La zone de travail accessible par le faisceau laser issu du système de miroirs galvanométriques est un carré de côté 130 mm.
La tête scanner peut être remplacée par une fibre optique (diamètre 400 μm). Cette dernière peut être fixée à un robot 3 axes. Liée aux pertes dans la fibre optique de 10 m de long, la puissance maximale du faisceau laser est réduite à 175 W.

Le procédé d'assemblage du prototype réalisé chez le partenaire industriel danois (PINOL A/S) utilise une source laser Nd :YAG pulsée :

- C'est le laser Rofin SW90 de longueur d'onde 1064 nm et de puissance moyenne maximale 90 W. Sa puissance crête maximale est de 5kW, et il peut être utilisé pour des fréquences d'impulsion allant jusqu'à 200 Hz.

Des systèmes optiques (lentilles pour recollimation, focalisation ou imagerie) sont utilisés afin d'ajuster la distance focale et le diamètre de la zone d'interaction du faisceau laser. Les paramètres des faisceaux sont définis lors de chaque expérimentation. Il s'agit notamment de la répartition énergétique et de la surface d'interaction du faisceau laser sur l'objet visé.

9 Procédé de brasage de matériaux dissemblables par faisceau laser

9.1 Introduction

L'assemblage de matériaux dissemblables est le thème de la première étude de ce travail expérimental. La création d'un lien mécanique fort entre deux matériaux de différente nature tel qu'entre une céramique et un métal ou entre une céramique et un composite présente un attrait important, particulièrement dans l'industrie de la micro mécanique. La réalisation d'une pièce par la combinaison de deux matériaux ayant des spécificités distinctes permet de tirer avantage de chacun d'eux. Par exemple, la partie fonctionnelle d'un outil d'usinage fin pourra être en céramique dont les propriétés de résistance mécanique et thermique sont adaptées, et le support de l'outil en un métal peu coûteux afin de réduire le prix de fabrication de l'objet.

La réalisation d'assemblages de matériaux dissemblables fait d'ores et déjà l'objet d'intenses recherches. Elles aboutissent généralement à la réalisation d'assemblages multicouches permettant la compatibilité de proche en proche des différents matériaux entre eux. Une différence de dilatation thermique trop importante de deux matériaux adjacents peut être la cause d'une rupture prématurée de l'assemblage.

L'étude menée lors de ce projet détaille donc le procédé de brasage tendre par faisceau laser d'un assemblage de matériaux dissemblables. Suite aux descriptifs du procédé de brasage laser et de la préparation des matériaux utilisés, la première partie de ce travail consiste en la caractérisation des assemblages de matériaux dissemblables réalisés. Tout d'abord, une analyse métallurgique du joint brasé est accomplie, puis une étude mécanique de l'assemblage est menée afin d'une part d'obtenir un ordre de grandeur de la résistance mécanique de l'assemblage, et d'autre part de définir son interface la plus fragile.

L'objectif de cette étude est la réalisation de démonstrateurs industriels. La société danoise PINOL A/S, spécialisée dans le développement et la fabrication de systèmes mécaniques de précision, présente un intérêt prononcé dans la réalisation d'assemblages de matériaux dissemblables. La fabrication d'une micro-fraise utilisable dans le domaine médical et plus particulièrement permettant la fixation d'implants en céramiques est une de leurs activités de recherche. Les résultats obtenus lors de l'étude de faisabilité précédente sont utilisés pour la fabrication de tels prototypes.

9.2 Détails du procédé de brasage laser

Les cas évoqués lors de cette étude excluent l'utilisation d'une exposition directe du matériau d'apport par le faisceau laser. L'interaction directe du faisceau laser sur l'alliage d'apport (crème à braser) est précisément détaillée ultérieurement (Paragraphe 10 : Procédé de brasage par interaction directe du faisceau sur la crème à braser).

Ainsi, lorsque le joint de l'assemblage n'est pas accessible par une exposition directe du faisceau laser, deux procédés de brasage laser différents sont envisageables :

- Au moins une des deux pièces à assembler est suffisamment transparente à la longueur d'onde et aux densités d'énergie du laser, alors un procédé par transparence est utilisé (Schéma de gauche de la Figure 13).
- Aucune des deux pièces à assembler n'est transparente au faisceau laser. L'énergie permettant la fusion du matériau d'apport est amenée par le mécanisme de conduction au travers de l'une des deux pièces, comme décrit sur le schéma de droite de la Figure 13.

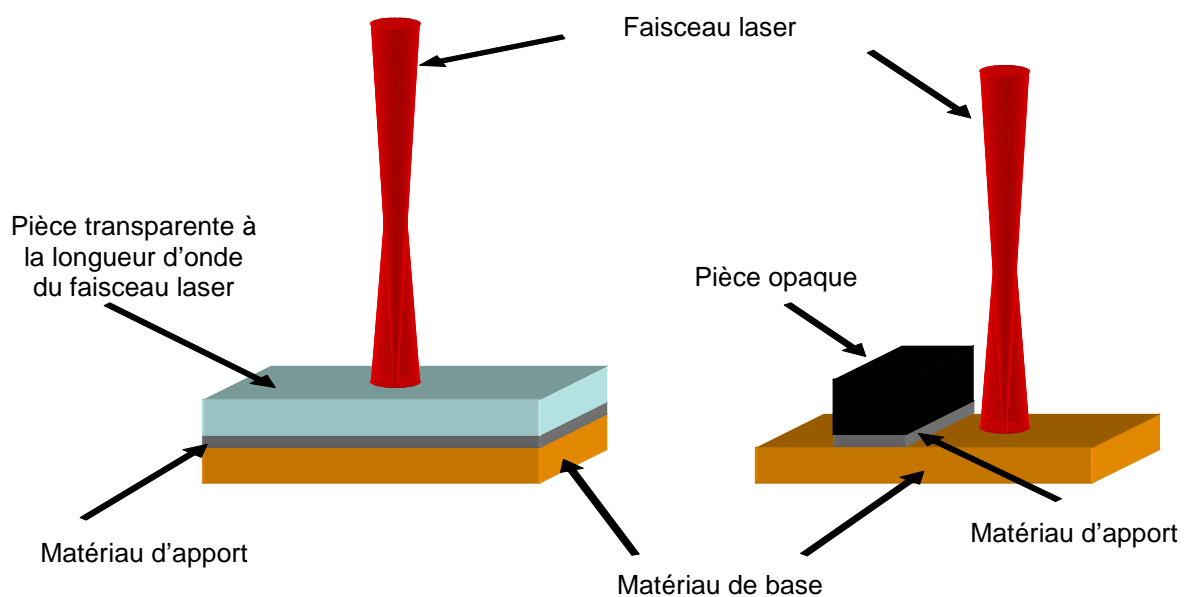


Figure 13 : Différentes configuration de brasage laser : par transparence (à gauche) et par conduction (à droite)

Le procédé de brasage laser dépend alors des propriétés thermo-optiques des pièces à assembler. Le transfert d'énergie vers le joint doit être le plus efficace possible. Le procédé présentant l'apport d'énergie au niveau du joint le plus efficace est préférentiellement sélectionné.

Le procédé de brasage est très sensible à nombre de fluctuations. Ainsi, une attention toute particulière doit être portée aux principaux points suivants :

- Etat de surface des pièces à assembler,
- Compatibilité des matériaux entre eux,
- Positionnement précis des pièces,
- Qualité et quantité de dépôt du matériau d'apport,
- Bon contact entre les différents matériaux.

Dans un procédé par transparence, la quantité d'énergie fournie par le laser et nécessaire à la fusion du matériau d'apport est directement liée :

- à la transparence de la pièce supérieure,

- à l'absorption de la couche de métallisation,
- à la nature et la géométrie de la pièce métallique inférieure (qui dissipe plus ou moins l'énergie)
- au contact entre les pièces,
- au support de l'assemblage (un support isolant est préférable, afin de limiter la dissipation de l'énergie).

La quantité d'énergie fournie par le laser est commandée par :

- La puissance du laser,
- Sa densité de puissance,
- Sa répartition énergétique,
- Le temps d'interaction,
- Le parcours et la vitesse de déplacement du faisceau.

Le procédé de brasage laser développé lors des études de faisabilité utilise un contrôle de température asservi (Figure 14). La mesure de la température proche du joint brasé, en cours de brasage, permet de définir la durée optimale d'interaction laser. Les faibles variations dues aux conditions expérimentales (quantité de matériau d'apport, positionnement de l'échantillon, pression sur l'assemblage, état de surface des matériaux...) sont compensées par l'adaptation de la durée de l'interaction laser. Le contrôle de la température à rétroaction améliore la reproductibilité du procédé de brasage laser. La mesure de température est effectuée à l'aide d'un pyromètre optique.

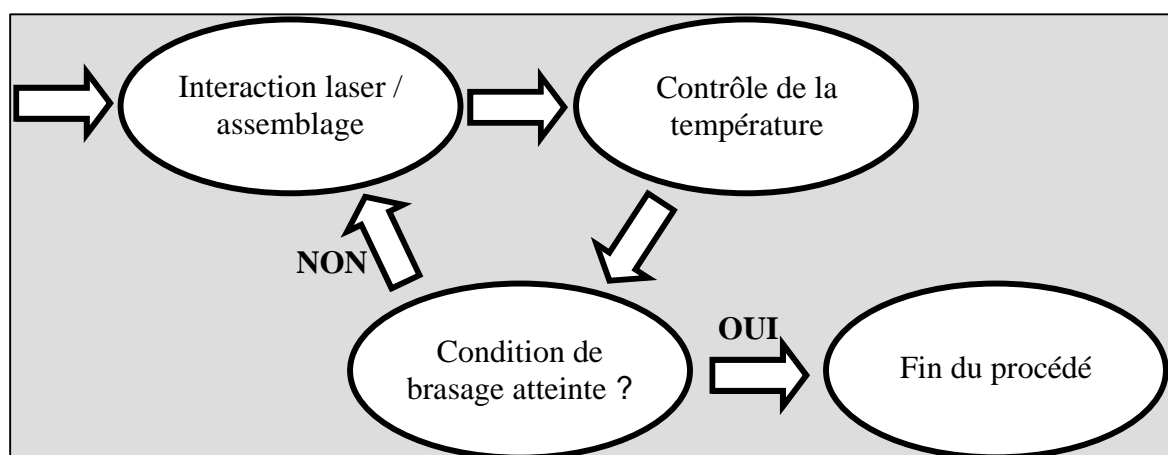


Figure 14 : Procédé de brasage laser par contrôle asservi de la température

9.3 Choix et préparation des matériaux

Les assemblages étudiés se scindent en deux catégories :

- les assemblages métal-céramique,
- les assemblages composite-céramique,

Les pièces de chaque assemblage doivent être compatibles avec l'opération de brasage. Il est alors nécessaire d'appliquer un traitement de surface adapté à chacune de ces pièces. Le système multicouche obtenu pour l'assemblage par brasage de matériaux dissemblables est schématisé sur la Figure 15. Le Tableau 1 indique les différentes combinaisons testées et les matériaux sélectionnés pour l'étude et l'optimisation du procédé de brasage laser.

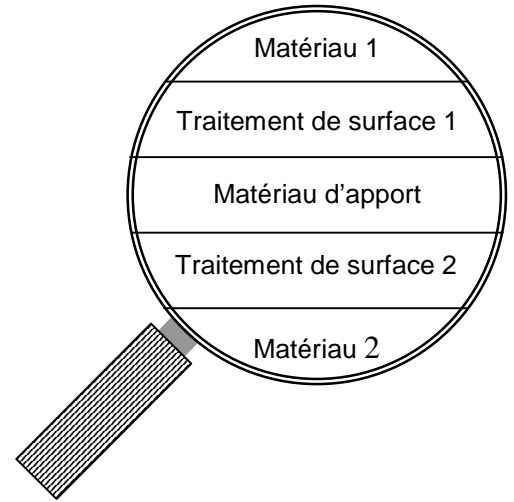


Figure 15 : Schéma du système multicouche

Type d'assemblage	Nature des matériaux à assembler	Nature du traitement de surface	Nature du matériau d'apport	Procédé de brasage laser sélectionné
Métal Céramique	1	Acier inoxydable 304L	Ni/Sn ⁽¹⁾	Par transparence Les essais préliminaires portent sur la transparence de l'alumine à la longueur d'onde du laser à diodes (940nm) et Nd :YAG (1064nm) : 1mm d'épaisseur → T%= 16% 0,25mm d'épaisseur → T%= 34% (Voir le paragraphe 17.2.1) Les épaisseurs d'alumine considérées sont suffisamment transparentes à la longueur d'onde du faisceau laser pour permettre l'utilisation d'un procédé de brasage par transparence.
			Ni/Au ⁽²⁾	
	2	Alumine	Ni/Sn	
			Ni/Au	
		Cuivre	OSP ⁽³⁾	
			Ni/Sn	
Alumine	Ni/Au			
		Ni/Au		
Composite Céramique	Al-CMM ⁽⁴⁾	Ni/Au	Sn-3,5Ag -0,7Cu %massique	
		Ni/Sn		
	Alumine	Ni/Au		
		Ni/Sn		

⁽¹⁾ Ni/Sn correspond à un dépôt de quelques microns de nickel suivi par un dépôt électrolytique de 2 microns d'étain

⁽²⁾ Ni/Au correspond à un dépôt de quelques microns de nickel suivi par une immersion permettant le dépôt d'une couche protectrice de 0,2 micron d'or.

⁽³⁾ OSP : Organic Soldering Protective.

⁽⁴⁾ Al-CMM : Composite à Matrice Métallique d'Aluminium (TiC 15%)

Tableau 1 : Caractéristiques des assemblages étudiés

Les dépôts autocatalytiques des céramiques appliqués par voie de solutions aqueuses sont effectués par les laboratoires de TNO (Pays-Bas) de même que tous les traitements de surfaces indispensables à une bonne brasabilité des pièces à assembler. Les différentes procédures de traitement de surface sont détaillées en annexe.

La métallisation ne doit pas recouvrir entièrement les pièces d'alumine afin de conserver les propriétés optiques du matériau sur sa surface exposée au faisceau laser (transparence à la longueur d'onde du faisceau laser).

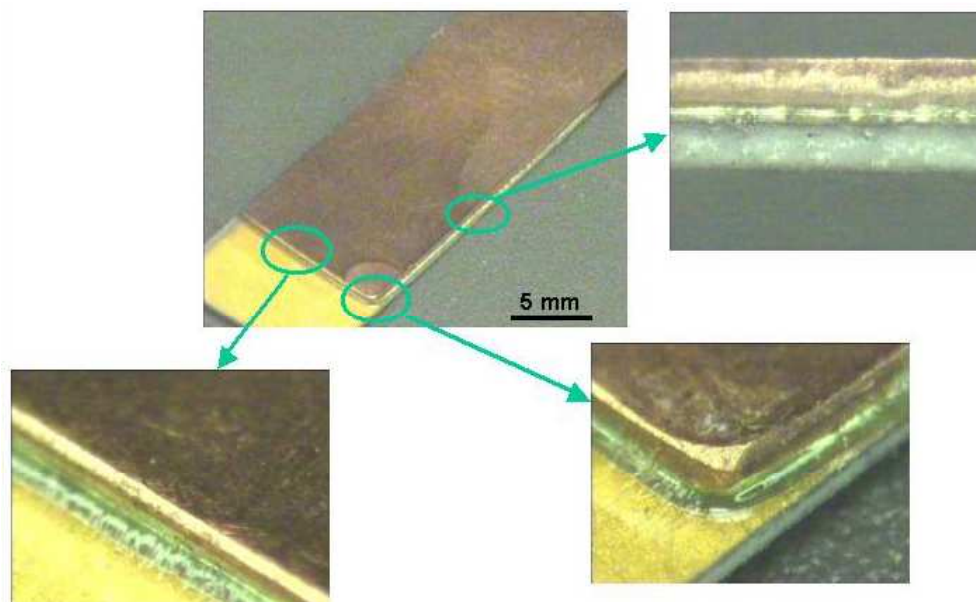
Les matériaux étudiés ont été choisis en fonction de leur degré d'utilisation en industrie ainsi qu'en prenant en compte les intérêts des industriels impliqués dans le projet.

Le matériau d'apport sélectionné est nécessairement un produit 'sans-plomb', en accord avec la directive européenne RoHS (*Reduction of Hazardous Substances*, réduction de substances dangereuses) entrée en vigueur le 1^{er} juillet 2006, qui vise à réduire fortement l'utilisation du plomb dans l'industrie.

9.4 Réalisation d'assemblages céramique-métal

Lors de travaux expérimentaux, on constate que des densités de puissance trop élevées induisent la destruction des céramiques. Par ailleurs, un déplacement rapide du faisceau est préconisé afin d'obtenir une élévation de température uniforme sur l'ensemble du joint à réaliser

L'optimisation du procédé de brasage laser nécessite de nombreux essais permettant de définir les conditions adéquates à la réalisation d'échantillons conformes et avec une bonne reproductibilité (exemple : Figure 16).



**Figure 16 : Assemblage alumine revêtue Ni/Au avec cuivre traité OSP
Matériaux d'apport : Sn-3,5Ag-0,7Cu %massique**

9.5 Analyse métallurgique d'un assemblage céramique-composite

9.5.1 Introduction

L'analyse métallurgique permet d'obtenir des éléments de compréhension sur les phénomènes physico-chimiques ayant lieu lors du procédé de brasage laser. On utilise un Microscope Electronique à Balayage (MEB) type JEOL 6700F, équipé d'un analyseur EDX (Energy Dispersive X-ray) permettant de définir précisément la nature et la position des éléments constituant l'interface. Une coupe transversale des échantillons suivie d'un polissage soigné sont effectués.

L'assemblage étudié est une pièce d'alumine brasée sur un composite avec un matériau d'apport sans plomb Sn-4Ag-0,5Cu %massique

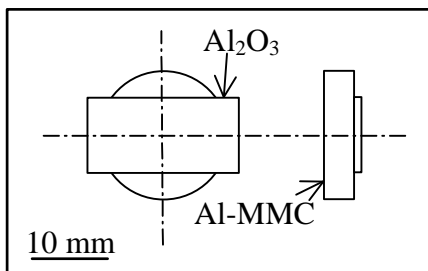


Figure 17 : Assemblage céramique-composite

Le composite est constitué de grains de TiC (15%) incorporés dans une matrice d'aluminium. Il s'agit d'un cylindre de 17mm de diamètre et de 4mm d'épaisseur (Figure 17). Le traitement de surface qui est appliqué consiste en un dépôt autocatalytique de nickel (6 μ m d'épaisseur), suivi d'une immersion dans une solution contenant de l'or pour un dépôt de 0,2 μ m d'épaisseur environ.

La pièce d'alumine est une plaque de dimension 20x10x1mm. Sa surface en contact avec le joint est également métallisée. A

l'issue du dépôt autocatalytique par voie de solution aqueuse, on obtient une couche de 3 μ m de nickel et une de 0,2 μ m d'or sur la surface traitée.

Préparation de l'échantillon:

Une coupe de l'assemblage est réalisée à l'aide d'une scie à fil. Elle est ensuite enrobée « à froid » dans une matrice résineuse (Figure 18). L'échantillon est ensuite soigneusement poli et ne subit aucune attaque chimique avant l'observation au microscope électronique à balayage.



Figure 18 : Coupe de l'assemblage dans sa matrice en résine

Le principal objectif de l'analyse microstructurale du joint brasé est d'obtenir des informations sur le comportement des différents éléments lors du procédé de brasage laser. Les résultats des expérimentations sont comparés aux études préalables, trouvées dans la littérature et effectuées sur le même sujet.

Le détail de l'assemblage et les paramètres du procédé de brasage utilisés sont indiqués dans les Tableau 2 et Tableau 3.

Pièce supérieure	Al ₂ O ₃
Dimensions	20x10x1 mm
Revêtement	Ni(3µm)/Au(0,2µm)
Pièce inférieure	Al-MMC
Dimensions	Ø 17mm ; h 4 mm
Revêtement	Ni(6µm)/Au(0,2µm)
Alliage d'apport	Sn-4Ag-0,5Cu %massique
Quantité	12 ± 1 mg

Tableau 2 : Détails de l'assemblage céramique-composite

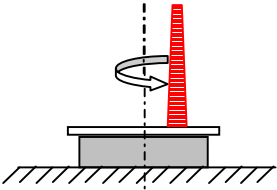
	
Puissance:	270 W
Temps d'interaction:	18,8 s
Dimension du spot:	2 x 1,7 mm (ellipse)
Trajet du faisceau:	Cercles de Ø 2mm
Vitesse de déplacement:	50 mm/s

Tableau 3 : Paramètre laser pour l'assemblage céramique-composite

9.5.2 Résultats et discussions

Le microscope électronique à balayage utilisé dispose de deux détecteurs à diodes placés face à l'objectif et collectant les électrons rétrodiffusés. Ils permettent d'acquérir une image caractéristique des différents éléments présents dans l'échantillon.

C'est le mode BEI-COMPO (Backscattered Electron Image) qui est principalement utilisé dans cette étude. Il permet d'obtenir les images les plus pertinentes, et est très utile à la préparation de l'étude aux Rayons X.

Une première étude du joint indique que l'assemblage est correctement brasé : pas de microbille dans le joint brasé, et bon mouillage aux interfaces (Figure 19). La couche de nickel ne semble pas détériorée par le procédé. Les grains de TiC inclus dans le composite sont également visibles. Ils apparaissent comme des traces blanches dans la matrice sombre d'aluminium.

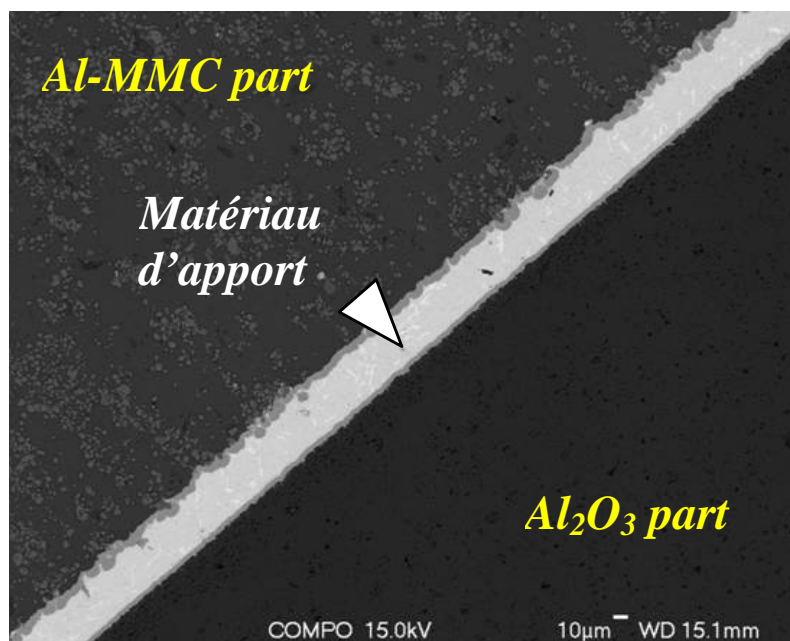


Figure 19 : Image MEB de la coupe du joint brasé en mode COMPO

Avec un meilleur grossissement, des bandes blanches deviennent observables dans le joint brasé (Figure 20). Lors de leur analyse EDX, seul le pic caractéristique de l'or apparaît. Ces bandes blanches révèlent alors la diffusion de la couche d'or au sein du matériau d'apport lors du procédé de brasage laser. La fine couche d'or a pour fonction la protection de la couche de Nickel contre toute oxydation précédant le procédé de brasage (lors du stockage des pièces notamment). Le phénomène de diffusion d'une couche d'or (revêtement de 7 μ m) dans un alliage d'apport contenant majoritairement de l'étain est déjà précisément détaillé lors d'une refusion au laser [Tian 03]. Les résultats de cette étude révèlent qu'une série de réactions interfaciales ont lieu malgré une durée d'interaction laser très courte. La première étape consiste en la diffusion de l'or dans le bain d'étain en fusion : il y a formation d'une couche d'AuSn₄. Puis, sous l'effet des gradients thermiques au sein du joint fondu, l'intermétallique AuSn₄ croît sous forme d'aiguilles. Celles-ci sont ensuite cassées lors de la solidification de l'étain. Finalement, le composé AuSn₄ se dissout de nouveau dans l'étain, ce qui aboutit à une distribution aléatoire de l'or dans le joint brasé.

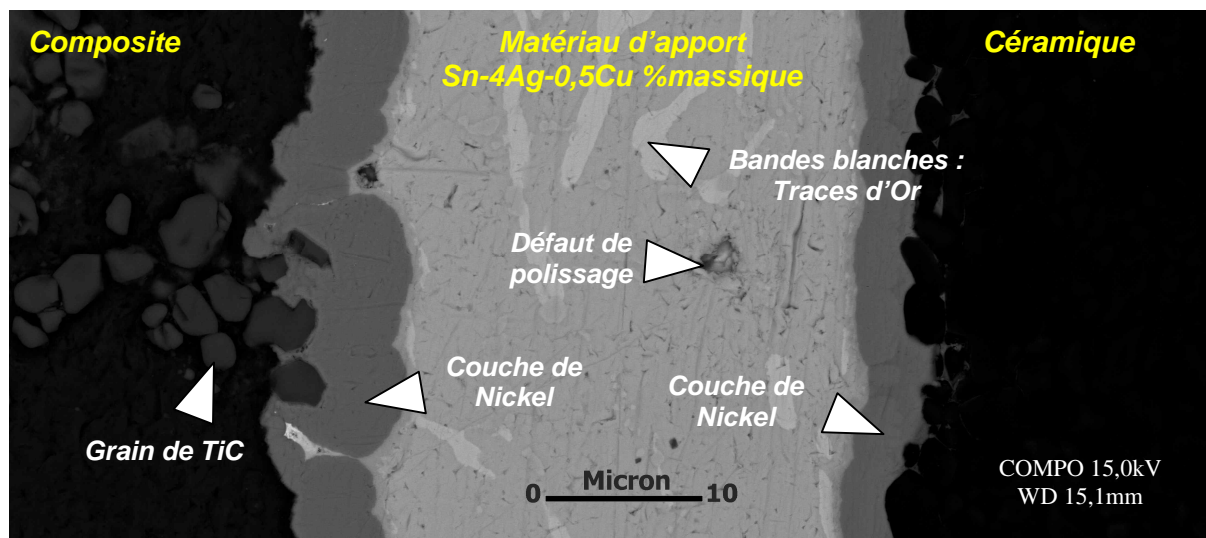


Figure 20 : Image MEB de l'interface de l'assemblage composite-céramique

La Figure 20 montre que la répartition de l'or dans le joint brasé est sous forme de bandes induites probablement par le déplacement du fluide sous forme liquide (effet Marangoni) suite à la dissolution de l'or.

La diffusivité de l'or est de 10⁻⁵ cm²/s dans le silicium à l'état liquide – comparable aux métaux à l'état liquide. L'or diffuse donc sur une distance d'environ 70 μ m en 5 secondes, ce qui explique que l'on puisse en trouver d'un bout à l'autre de l'interface.

Equation de diffusion (loi de Fick):

$$\vec{\phi} = -D.S. \vec{\text{grad}}(C)$$

On en extrait la longueur de diffusion :

$$X = \sqrt{D.t}$$

Avec:

Φ : Flux

S : Surface en contact

X: longueur de diffusion (cm)

D: coefficient de diffusion (cm²/s)

t: temps (s)

$$\rightarrow X = \sqrt{10^{-5} \times 5}$$

$$\rightarrow X = 7,07 \times 10^{-3} \text{ cm} = 70,7 \mu\text{m}$$

L'analyse dispersive en énergie permet de définir la distribution des différents éléments au sein du joint brasé. Les Figure 21 et Figure 22 illustrent les résultats obtenus le long d'une droite traversant le joint brasé. Ces résultats sont issus de la cartographie aux rayons X de chacun des éléments constituant l'assemblage (Figure 24). Ils corroborent les résultats précédents : le revêtement doré diffuse au sein du matériau d'apport pour apparaître sous forme de bandes blanches sur l'image MEB. On constate également que le procédé de brasage laser ne détériore pas la couche de métallisation en nickel (pas de discontinuité et contact parfait de part et d'autre de la couche de nickel).

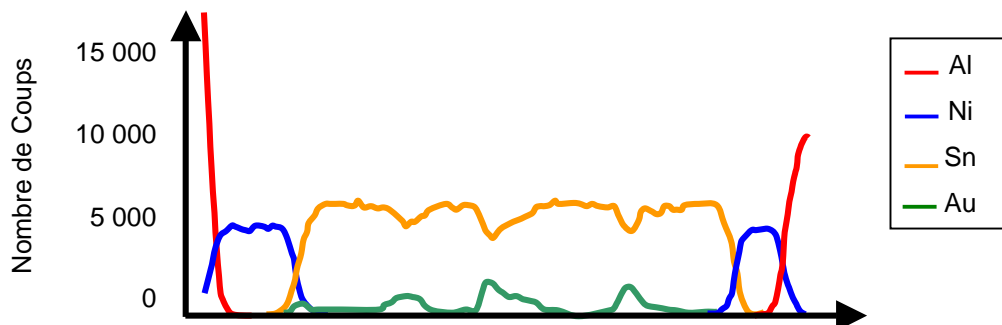
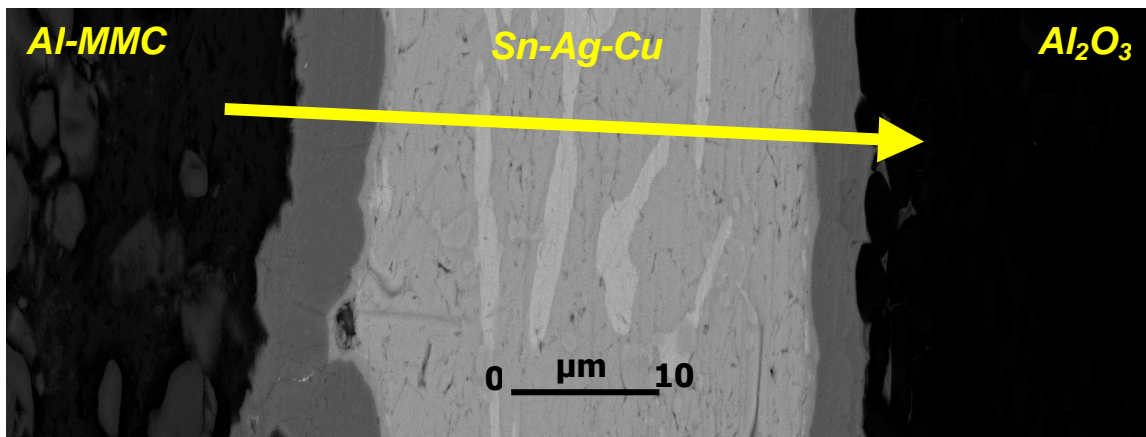


Figure 21 : Distribution des principaux éléments de l'assemblage

La Figure 24 révèle que l'argent contenu dans le matériau d'apport se regroupe afin de former probablement une phase particulière. Lors d'un procédé classique au four, quelle que soit la nature des substrats, il est connu qu'au-delà d'une certaine quantité d'argent contenu dans la crème à braser, il se forme une phase d'intermétallique Ag_3Sn au sein du joint brasé. Un taux d'argent inférieur à 3,2%massique dans la crème à braser permet d'éviter la formation de cette phase [Kim 03]. Ce n'est pas le cas de la crème à braser utilisée lors de notre étude (contenant 4%massique d'argent). L'argent pourrait alors former des phases intermétalliques Ag_3Sn qui sont des sites potentiels de rupture fragile lors du vieillissement de l'assemblage [Kim 02].

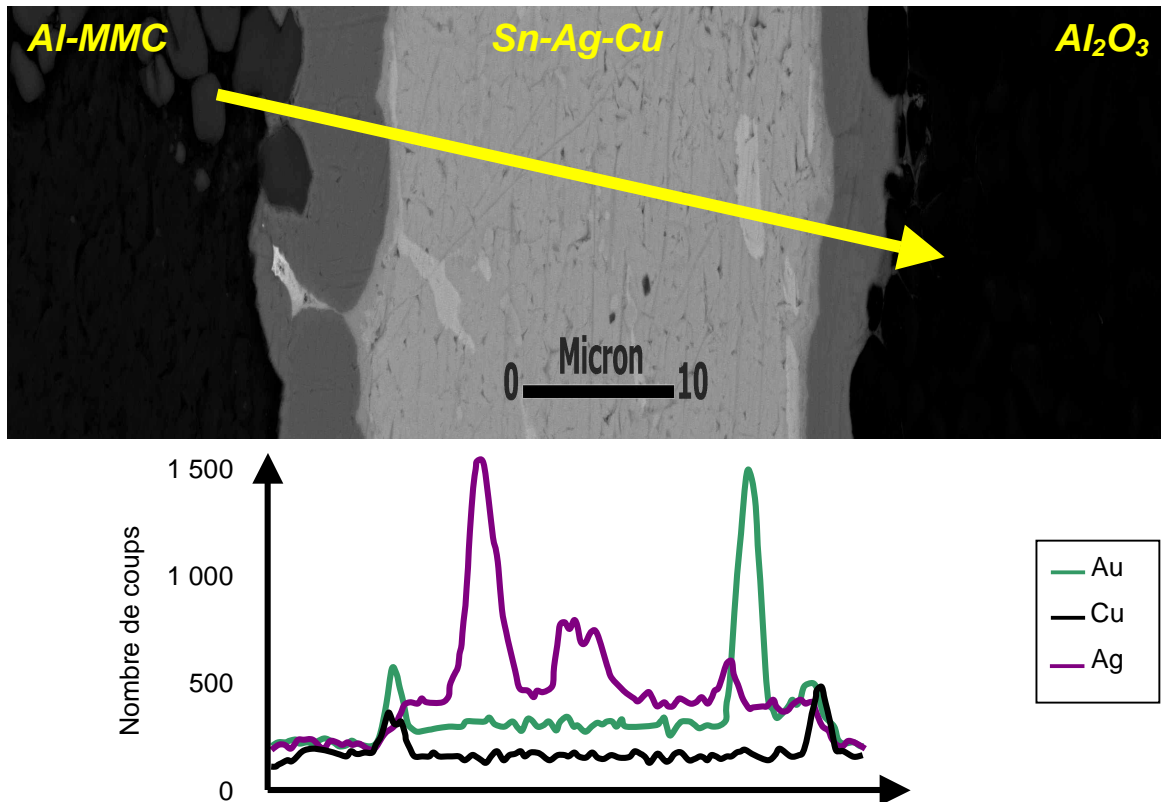


Figure 22 : Distribution des éléments minoritaires de l'assemblage

Le cuivre contenu dans le matériau d'apport permet de réduire son point de fusion de 221°C pour l'eutectique Sn-Ag à 217°C pour l'alliage Sn-Ag-Cu. Précédant l'opération de brasage laser, la répartition du cuivre est homogène dans le matériau d'apport. L'analyse MEB révèle que le cuivre migre au cours du procédé de brasage pour se situer le long des deux interfaces (Figure 23). Ce phénomène a lieu suite à la diffusion de l'or dans le joint à l'état liquide. Le matériau d'apport liquide est alors au contact avec la couche de nickel. Dans cette configuration, la présence de cuivre dans le matériau d'apport induit la formation d'un alliage de liaison de type $(Cu,Ni)_6Sn_5$, plutôt que Ni_3Sn_4 [Wu 04]. La formation d'un alliage de liaison assure la tenue mécanique de l'assemblage. Bien qu'il soit de nature fragile et qu'il puisse être à l'origine des fractures lors du vieillissement de l'assemblage, l'alliage de liaison est nécessaire à la réalisation du joint brasé.

Nombre de recherches existent concernant l'assemblage de matériaux nickelé-dorés avec un matériau d'apport sans plomb de type Sn-Ag-Cu [Ho 02] [Shiau 02] [Yoon 05]. Elles illustrent la

formation d'un composé intermétallique ternaire aux interfaces de l'assemblage : $(\text{Cu,Ni})_x\text{Sn}_y$. D'après C.E. Ho & al, la nature de l'alliage de liaison dépend du taux de cuivre inclus dans le matériau d'apport. Il observe, pour un taux de 0,5%massique (notre cas), deux couches distinctes d'intermétalliques constituant l'interface nickel-alliage d'apport. Il précise également que le diagramme ternaire relatif à la température du procédé et aux éléments en présence indique

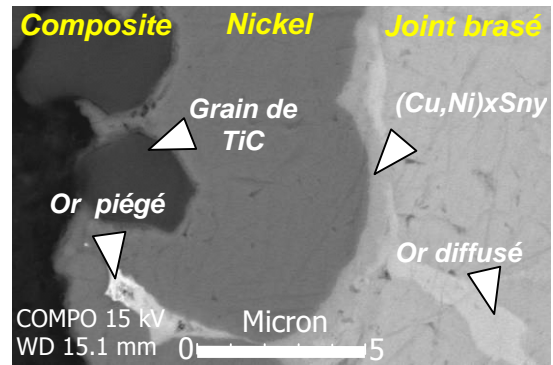


Figure 23 : Agrandissement de l'interface de l'interface nickel-joint brasé

l'existence d'un domaine tri-phasique : $(\text{Sn}) + (\text{Cu}_{0,54}\text{Ni}_{0,46})_6\text{Sn}_5 + (\text{Ni}_{0,77}\text{Cu}_{0,23})_3\text{Sn}_4$. Ainsi, le cuivre contenu dans la brasure diffuse jusqu'aux interfaces afin de créer l'alliage de liaison. La distribution du cuivre au sein du joint brasé suite au procédé de brasage laser est illustrée sur la Figure 24e. Il apparaît que la quasi-totalité du cuivre présent dans le matériau d'apport se retrouve aux deux interfaces de l'assemblage. Le comportement du cuivre lors d'un procédé de brasage par faisceau laser est donc comparable à celui d'un procédé plus lent au four. L.C. Shiau & al. indiquent que la formation d'un alliage de liaison de type $(\text{Cu,Ni})_x\text{Sn}_y$ avec une crème à braser contenant du cuivre est préférable à l'alliage de liaison Ni_3Sn_4 obtenu sans cuivre. En effet, lors du vieillissement de l'assemblage, la vitesse d'accroissement de l'alliage de liaison $(\text{Cu,Ni})_x\text{Sn}_y$ est faible. De plus, la concentration du nickel dans cet alliage de liaison est réduite. L'accroissement de cet alliage d'apport consomme donc très lentement la barrière de protection que représente la couche de nickel.

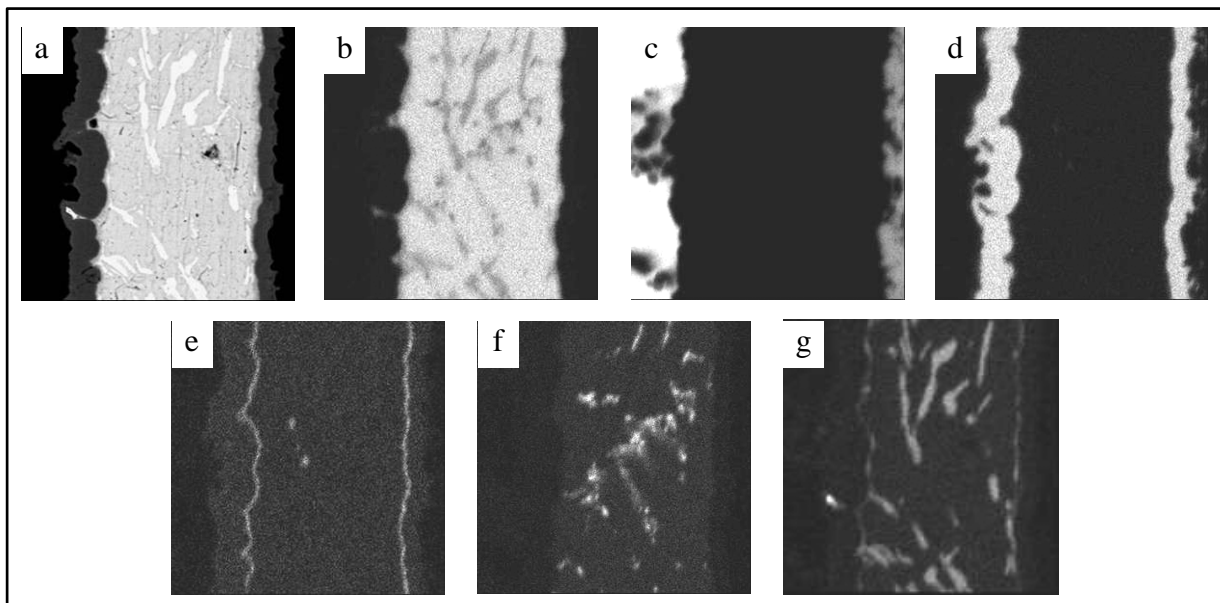


Figure 24 : (a) Image MEB, et les cartographies au rayon X de (b) l'étain, (c) l'aluminium, (d) du nickel, (e) du cuivre, (f) de l'argent et (g) de l'or

9.5.3 Conclusion

Dans le cas d'un assemblage composite-céramique, dont les deux pièces sont métallisées Ni-Au, l'observation MEB post-brasage laser du joint brasé permet une comparaison avec les différents phénomènes ayant lieu lors de procédés conventionnels.

Cette étude permet l'observation de la répartition des différents éléments du joint brasé (Figure 25). Elle met en évidence la diffusion de la fine couche d'or au sein de l'alliage d'apport. La couche de nickel n'est pas affectée par le traitement. L'observation détaillée de l'interface Nickel-matériaux d'apport indique la formation d'un composé intermétallique de type $(Cu,Ni)_xSn_y$. Il y a donc eu diffusion du cuivre contenu dans le matériau d'apport jusqu'à la couche de nickel afin de former l'alliage de liaison $(Cu,Ni)_xSn_y$. La création d'un alliage de liaison est nécessaire à la formation du joint brasé. Il confère une bonne résistance mécanique à l'assemblage réalisé.

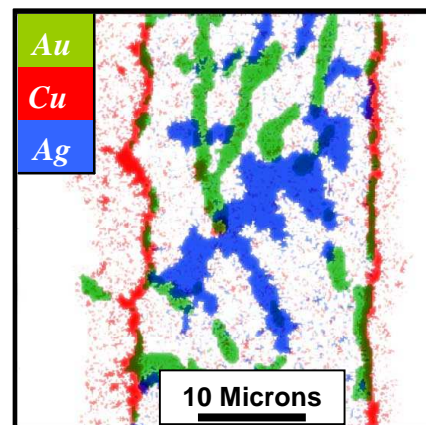


Figure 25 : Répartition des éléments or, cuivre et argent au sein d'une partie du joint brasé

Les phénomènes métallurgiques observés lors de cette étude du procédé de brasage par faisceau laser sont finalement comparables aux phénomènes ayant lieu lors de procédés conventionnels. La spécificité d'un procédé laser est d'être court (quelques secondes) par rapport aux procédés four, IR ou phase vapeur (plusieurs minutes). Cependant, les vitesses de diffusion des éléments dans l'alliage fondu sont telles que la formation des alliages de liaison est également possible lors d'un procédé laser.

9.6 Etude mécanique des assemblages céramique-métal

9.6.1 Introduction

L'étude de faisabilité d'un assemblage de matériaux dissemblables implique l'évaluation mécanique des joints brasés. La tenue mécanique est un critère évident lors de la caractérisation du joint brasé. La mesure de la résistance au cisaillement post-brasage du joint brasé ne reste cependant qu'indicative. Une étude mécanique complète de l'assemblage nécessite principalement des tests en vieillissement. Les tests effectués lors de cette étude permettent d'une part d'obtenir un ordre de grandeur de la résistance de l'alliage, et surtout d'autre part de procéder à une étude du faciès de rupture. Cette étude a pour but de définir l'interface la plus fragile afin d'offrir une voie de recherche pour l'amélioration du procédé d'assemblage par faisceau laser des matériaux dissemblables sélectionnés.

Les contraintes inhérentes à la conduite du projet industriel sur l'assemblage de matériaux dissemblables impliquent à présent de substituer la pièce composite par une pièce métallique. Les assemblages traités sont alors de type métal-céramique tels que représentés sur la Figure 26. Il s'agit plus précisément de l'assemblage d'une pièce d'alumine (20x8x1mm) sur une pièce de cuivre ou

d'acier inoxydable (20x8x1 mm). Le traitement de surface des différentes pièces consiste en une couche de nickel de quelques microns d'épaisseur (~2µm), suivi d'un dépôt d'étain d'épaisseur 2µm. Les paramètres laser utilisés pour chaque assemblage sont issus de l'optimisation du procédé de brasage par asservissement en température (Tableau 4).

L'étude mécanique des assemblages est réalisée à l'aide d'un appareil de traction : ZWICK Z010 TH2S dont la force maximum est de 5kN. Un montage est réalisé afin de permettre le cisaillement des échantillons préalablement brasés (Figure 26).

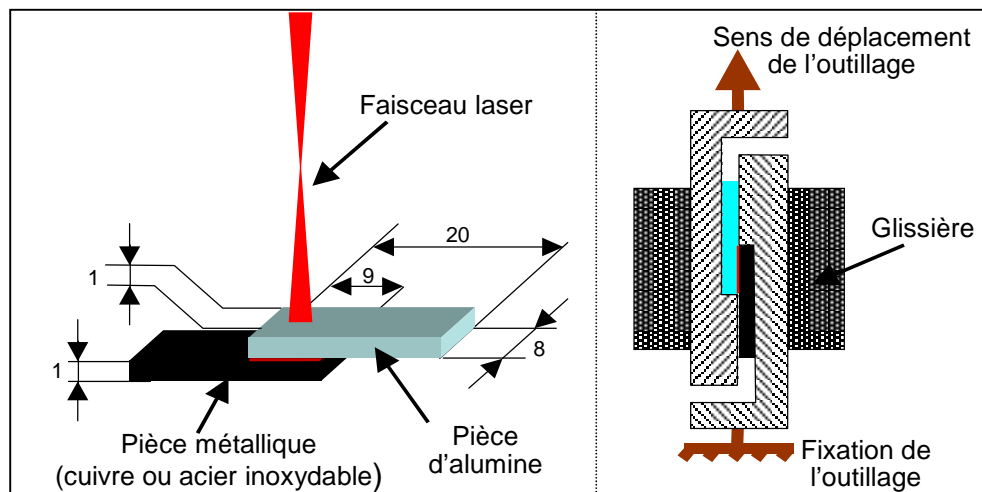


Figure 26 : Détails géométriques des assemblages (à gauche) et schéma de l'outil de cisaillement (à droite)

Type d'assemblage	Quantité de crème à brasier	Puissance laser	Dimension du faisceau (ellipse)	Trajet du faisceau : carrés concentriques	Vitesse de déplacement du faisceau	Temps d'interaction laser
Cuivre / alumine	17 mg	210 W	1,7x2,0 mm	1, 3 et 5 mm de côté	150 mm/s	24 ± 4 s
Acier inox. / alumine						13 ± 3 s

Tableau 4 : Paramètres du procédé de brasage laser des assemblages cuivre/alumine et Acier inoxydable/alumine

Les tests de cisaillement sont effectués sur un déplacement de 13mm de sorte que les deux pièces de l'échantillon brasé soient entièrement désolidarisées. La vitesse de déplacement de l'outil de cisaillement est de 200mm/s. L'appareil mémorise la force maximale enregistrée lors du déplacement de l'outil. Cette valeur est utilisée pour l'évaluation mécanique de l'assemblage.

Le Tableau 5 indique les résultats (en Méga Pascal : MPa) des mesures de résistance au déchirement effectuées sur différents échantillons.

Echantillon numéro Type d'assemblage	1	2	3	4	5	Moyenne (MPa)	Ecart type (MPa)
Cuivre / alumine	11,93	4,44	14,63	6,01	5,82	8,6	± 4,4
Acier inox. / alumine	9,72	4,77	17,63	6,50	12,02	10,1	± 5,0

Tableau 5 : Mesures des résistances au cisaillement de différents échantillons

Il apparaît que les résultats obtenus avec chaque combinaison de matériaux sont très dispersés. La résistance au cisaillement de l'assemblage varie du simple au triple d'un essai à l'autre. Finalement, la résistance au cisaillement moyenne (calculée pour 5 mesures) est respectivement de $8,6 \pm 4,4$ et $10,1 \pm 5,0$ MPa pour les assemblages alumine - cuivre et alumine - acier inoxydable.

La résistance à la traction de l'alliage d'apport constituant le joint brasé (Sn-4Ag-0,5Cu %massique) est de 51 MPa, ce qui correspond à une résistance au cisaillement d'environ 29 MPa. On constate alors que la résistance de l'assemblage réalisé est bien inférieure à cette valeur intrinsèque du matériau constituant le joint. La rupture ne s'effectue pas au cœur du joint, mais aux interfaces les plus fragiles de l'assemblage. La zone de formation des alliages de liaison est généralement le site d'initiation de la rupture. Une étude approfondie du faciès de rupture des assemblages permettra de définir l'interface la plus fragile et offrira des perspectives d'amélioration du procédé d'assemblage par faisceau laser de matériaux dissemblables.

9.6.2 Analyse du faciès de rupture

L'étude du faciès de rupture est principalement axée sur les assemblages de type alumine - acier inoxydable. L'examen visuel des échantillons post cisaillement révèle la présence de zones distinctes au niveau du joint rompu (Figure 27). Sur chacune des pièces (céramique et métallique) apparaissent des taches brillantes. Le motif ainsi représenté sur l'une des deux pièces de l'assemblage possède son « négatif » sur l'autre.

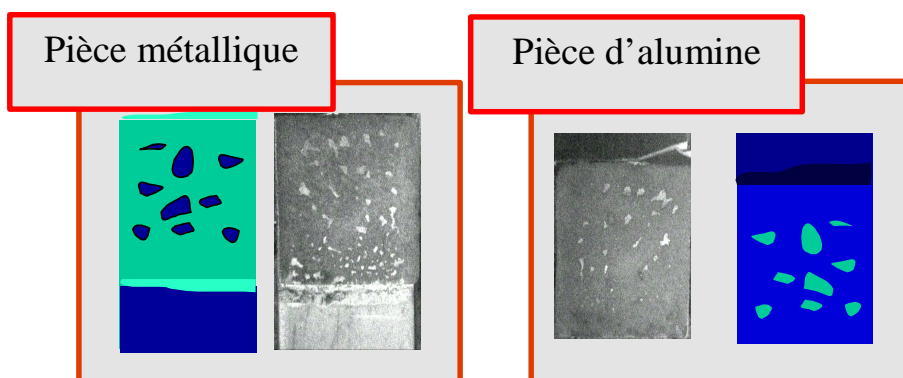


Figure 27 : Photographies et schémas des interfaces des pièces cisailées

La détermination de l'interface la plus fragile de l'assemblage requiert l'analyse des différentes zones constituant la surface du joint post cisaillement. La proportion de taches brillantes est préalablement mesurée à l'aide d'un microscope optique et d'un logiciel de traitement d'image. Finalement, quelle que soit la résistance mécanique de l'assemblage, le rapport de taches brillantes représente en moyenne 8,6% du faciès de rupture (Figure 28 ; Le contraste des différentes zones n'apparaît pas toujours clairement sur les photographies).

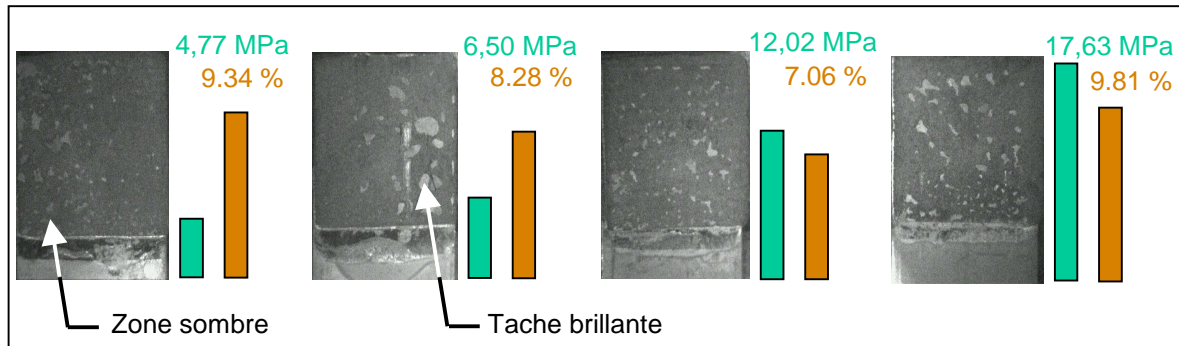


Figure 28 : Photographie des pièces métalliques cisillées. Confrontation de la valeur de résistance au cisaillement avec la mesure de la surface couverte par les taches brillantes

La démarche consiste alors à caractériser précisément la nature des différentes zones constituant le faciès de rupture. Les résultats issus de l'analyse de la rétrodiffusion élastique de Rutherford permettront de définir la nature des différents éléments constituant les premières couches atomiques en surface de l'échantillon. Puis la microscopie à sonde optique de faible cohérence révélera précisément la géométrie de la surface de ces échantillons. Finalement, ces résultats seront complétés par une étude au Microscope Electronique à Balayage muni d'un analyseur EDX (Energy Dispersive X-ray).

9.6.2.1 Rétrodiffusion élastique de Rutherford

L'analyse par la rétrodiffusion élastique de Rutherford (Rutherford Back Scattering – RBS) requiert un faisceau d'ions de haute énergie cinétique (2 MeV) dirigé vers l'échantillon. Ce faisceau incident est constitué d'atomes d'hélium chargés positivement (particules alpha). Il est issu d'un diaphragme de diamètre 0,3mm et d'incidence normale à la surface analysée, puis est rétrodiffusé élastiquement par les atomes de l'échantillon. Le nombre et l'énergie des ions rétrodiffusés sont mesurés par un détecteur placé à 165° de la normale à la surface de l'échantillon. Ces données fournissent des informations sur la composition de l'échantillon, la distribution de ses composants et son épaisseur dans le cas de fines couches. Chaque spectre est obtenu (ou normalisé) pour une dose d'ions incidents de 3 microCoulombs afin de rendre les différentes mesures comparables entre elles.

L'étude est réalisée sur l'échantillon n°4 de l'assemblage alumine - acier inoxydable (Tableau 5), sur la pièce métallique. Plusieurs zones sont analysées, espacées de 1mm les unes des autres : ce sont les points D1, D2, ... et D6. La mesure D9 est effectuée entre les points D2 et D3 (Figure 29).

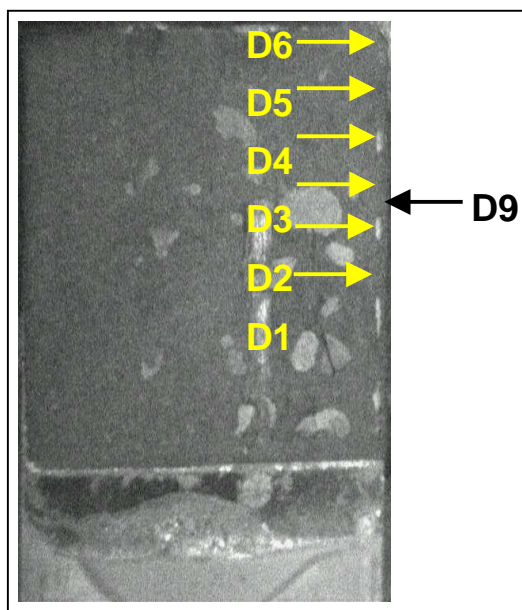


Figure 29 : Emplacement des zones de mesure sur l'échantillon

Les Figure 30, Figure 31 et Figure 32 représentent les résultats obtenus pour les différents points de mesure. Chaque spectre se différencie selon la zone d'interaction du faisceau d'ions. On distingue ainsi trois types de spectres :

- Les mesures aux points D1, D3 et D5 (Figure 30) indiquent la présence de nickel, avec un très faible signal pour l'élément étain.
- Les mesures aux points D2 et D9 (Figure 31) indiquent clairement la présence de nickel recouvert d'une couche d'étain.
- Les mesures aux points D4 et D6 (Figure 32) sont l'intermédiaire des deux premières catégories de résultats.

La principale information issue de cette étude est la présence de nickel sur la totalité de la surface du joint cisailé. Cependant, comme les deux pièces assemblées (alumine et acier inoxydable) sont revêtues d'une couche de nickel, il n'est pas possible de déterminer à quelle métallisation appartient le nickel analysé. L'outil RBS n'est par ailleurs pas suffisamment précis pour révéler la présence d'aluminium (contenu dans l'alumine), d'argent ou de cuivre (contenus dans l'alliage d'apport) : ces éléments devraient apparaître aux plus faibles énergies, et leur signal caractéristique est donc masqué par le fond continu de notre échantillon massif.

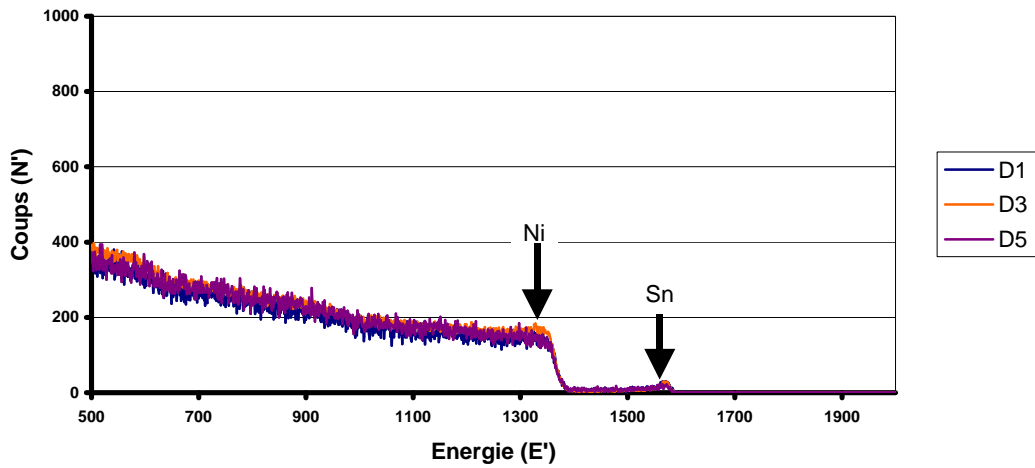


Figure 30 : Spectre RBS des points D1, D3 et D5 - Présence de l'élément nickel

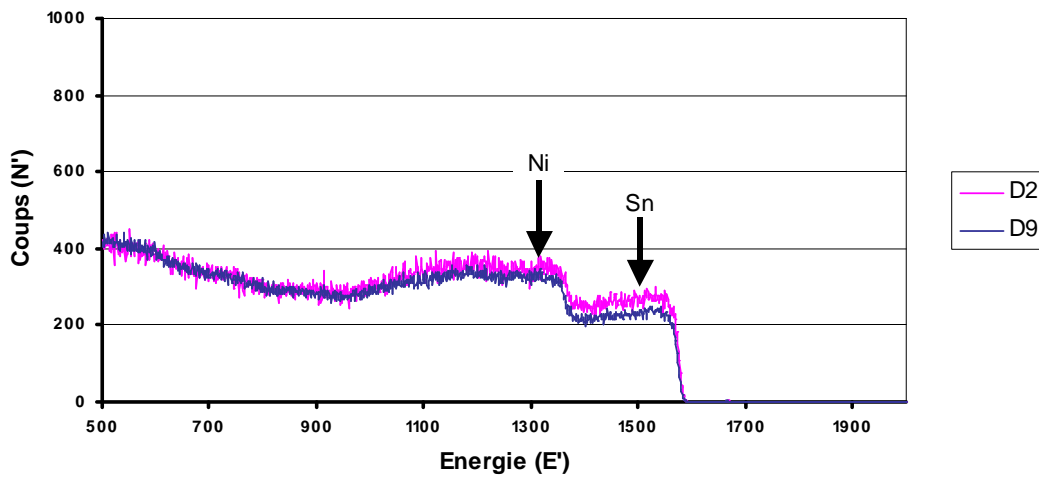


Figure 31 : Spectre RBS des points D2 et D9 – Couche d'étain sur du nickel

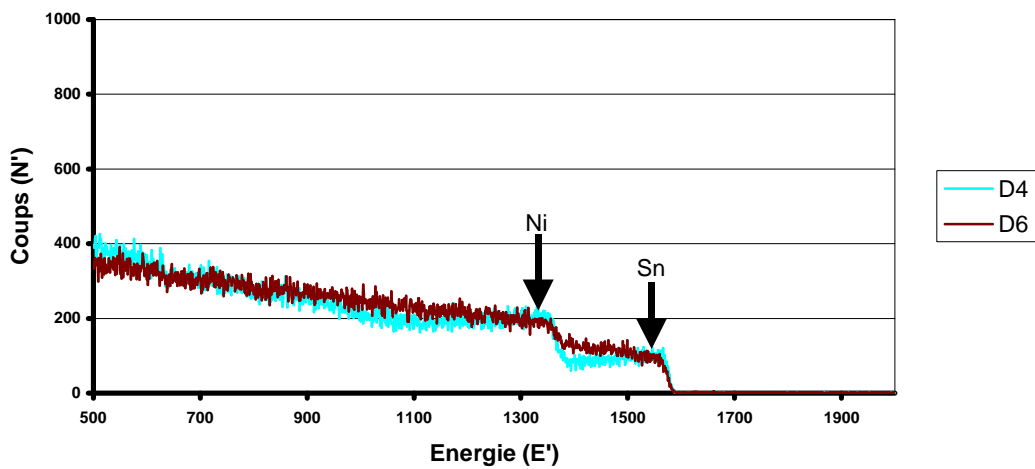


Figure 32 : Spectre RBS des points D4 et D6 – Situation intermédiaire : nickel et peu d'étain

9.6.2.2 Microscopie à sonde optique de faible cohérence

L'outil de microscopie à sonde optique de faible cohérence (Coherence Probe Microscopy – CPM) est généralement utilisé pour déterminer l'état de surface d'un échantillon. Cette technique utilise le principe de l'interférométrie en lumière blanche (400-1100nm) : un front d'onde réfléchi par une surface de référence est comparé à celui réfléchi par la surface de l'échantillon. Le système de caractérisation dispose d'un objectif interférentiel de type Michelson qui permet l'analyse de l'ensemble de l'échantillon par balayage du faisceau sur toute la surface. Outre l'état de surface d'un échantillon, l'appareil de caractérisation permet également de révéler la présence éventuelle de couches partiellement transparentes au faisceau incident. Le but de cette analyse non destructive est de déterminer précisément la forme et la dimension des « taches brillantes » du joint cisailé. La comparaison avec l'épaisseur des différentes strates de l'assemblage multicouche donnera des informations sur la nature de l'interface la plus fragile.

L'étude de nombreuses « taches brillantes » d'un joint cisailé révèle qu'il s'agit de cavités (Figure 33). Toutes ces cavités ont la même profondeur : $26 \pm 1 \mu\text{m}$ qui est comparable à l'épaisseur du joint brasé. La Figure 34 représente l'image en réflexion de la surface supérieure de l'échantillon. Les différentes zones sombres et claires de cette image illustrent la présence d'un matériau partiellement transparent au faisceau de lumière blanche incident. Il s'agit plus précisément de grains de 4 à $6 \mu\text{m}$ d'épaisseur et de 7 à $20 \mu\text{m}$ de largeur.

Finalement, les principales informations issues de cette étude par microscopie interférométrique en lumière blanche sont :

- Les taches brillantes sur le joint cisailé sont des cavités
- Ces cavités ont une profondeur de $26 \mu\text{m}$ qui peut correspondre à l'épaisseur du joint brasé
- La surface supérieure très rugueuse est composée de différents éléments
- L'observation d'une couche partiellement transparente à la lumière blanche laisse supposer la présence de grains d'alumine en surface de l'échantillon.

La présence d'alumine sur le joint cisailé indique qu'une rupture a lieu au niveau des premiers grains de la pièce d'alumine. La principale hypothèse met en cause l'attaque chimique précédant le dépôt auto catalytique de la couche de nickel. Celle-ci fragiliserait trop fortement la surface de la pièce d'alumine.

L'étude par Microscopie Electronique à Balayage faisant suite permettra de confirmer ou d'infirmer la présence d'alumine sur la surface du joint cisailé.

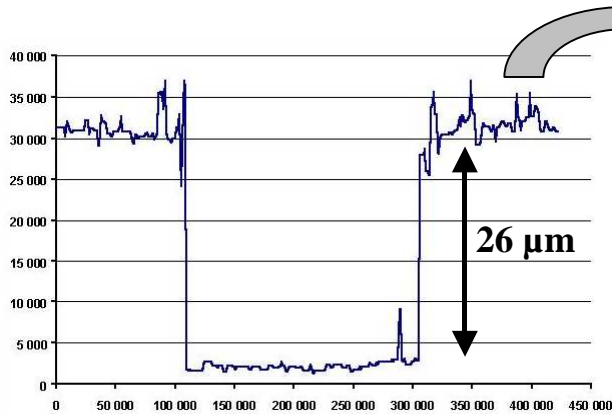


Figure 33 : Profil d'une tache brillante :
cavité de profondeur 26 μ m

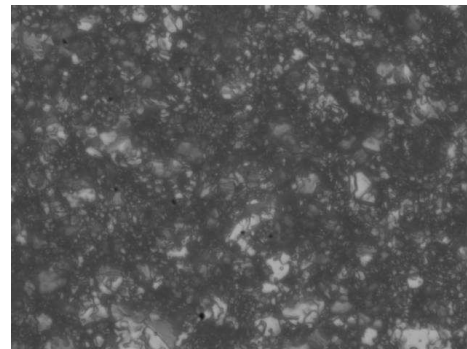


Figure 34 : Image en réflexion de la zone
sombre (152x115 μ m)

9.6.2.3 Microscopie Electronique à Balayage (MEB)

L'étude par Microscopie Electronique à balayage est effectuée sur les deux différents types d'assemblage : alumine-acier inoxydable et alumine-cuivre. Elle est accompagnée par l'analyse EDX (Energy Dispersive X-ray) permettant de définir précisément la nature et la position des éléments en surface de l'échantillon.

Les Figure 35 et Figure 36 représentent les images MEB en mode LEI (Lower Secondary Electron Image) et en mode BEI-COMPO (Backscattered Electron Image) des joints cisailés sur pièces de cuivre et acier inoxydable. Il est fait en sorte qu'une cavité apparaisse sur chacun de ces clichés.

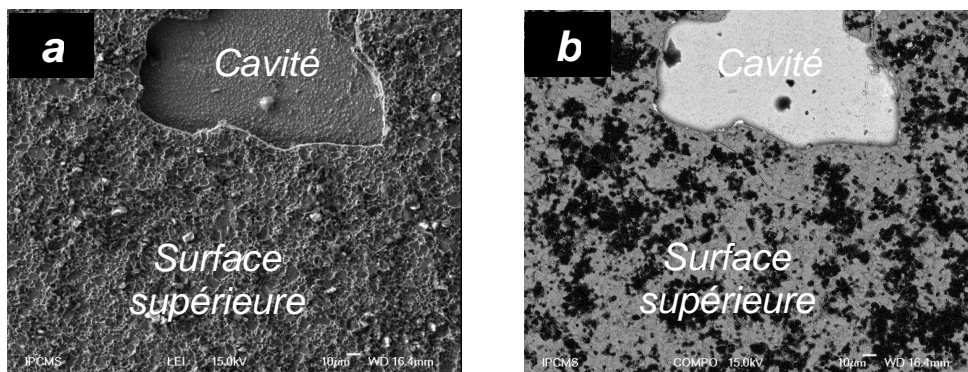


Figure 35 : Images MEB de la surface du joint cisailé de la pièce en cuivre (a) en mode LEI et (b) en mode BEI-COMPO

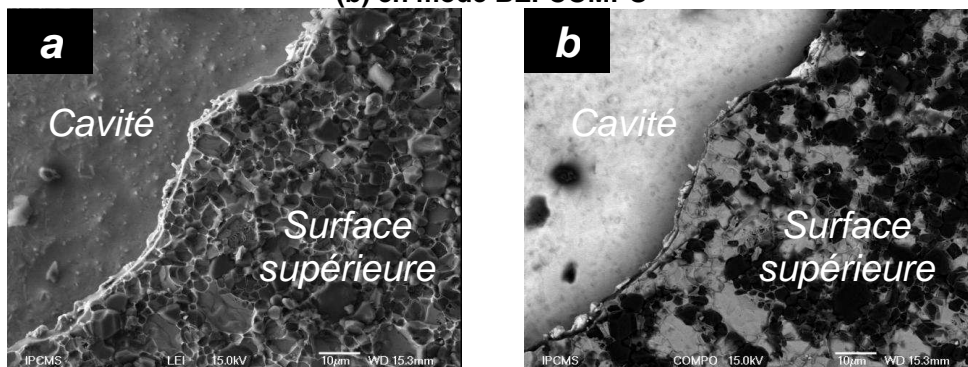


Figure 36 : Images MEB de la surface du joint cisailé de la pièce en acier inoxydable (a) en mode LEI et (b) en mode BEI-COMPO

Les images en mode LEI confirment la forte rugosité observée lors de l'analyse au microscope à sonde optique de faible cohérence de la surface supérieure du joint cisailé. La surface lisse du fond de chaque cavité est également identifiable. Le contraste des images en mode BEI-COMPO est caractéristique des numéros atomiques des éléments en présence. Ces images contiennent trois nuances majeures de gris : La cavité est en gris clair relativement homogène, et la surface supérieure est partagée en zones grises et noires. L'analyse EDX dévoile la nature des différents matériaux constituant la surface du joint cisailé. La Figure 37 illustre les résultats de l'analyse EDX du faciès de rupture sur l'échantillon en acier inoxydable. Il apparaît d'une part que le fond de la cavité est une couche d'étain. D'autre part, la surface supérieure du joint cisailé est constituée d'alumine (zones noires) et de nickel (zones claires). L'utilisation d'un outil de traitement d'image permet de définir la proportion de chaque matériau (nickel et alumine) sur la surface supérieure de l'échantillon. On calcule donc que la surface supérieure est constituée à 50% de nickel et à 50% d'alumine. Finalement, ces résultats confirment l'hypothèse émise lors de l'analyse au microscope à sonde optique de faible cohérence : La rupture du joint brasé a principalement lieu au niveau des premiers grains de la pièce d'alumine, à l'interface alumine-nickel. Lors de la procédure de métallisation, l'attaque chimique de la pièce d'alumine est susceptible de réduire la résistance des grains situés en surface.

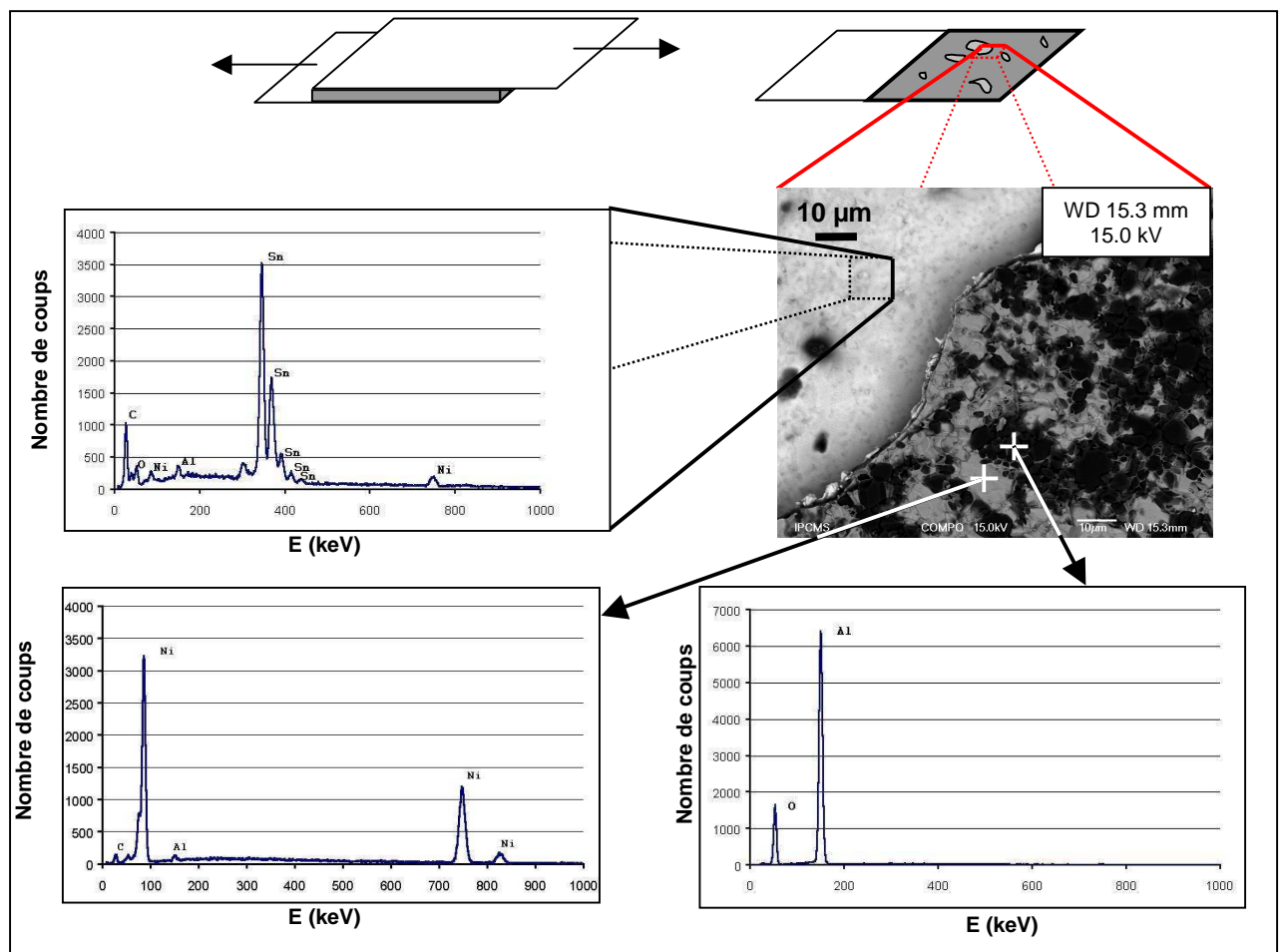


Figure 37 : Résultats de l'étude par Microscopie Electronique à Balayage et EDX du faciès de rupture sur l'échantillon en acier inoxydable

9.6.3 Conclusion

La mesure de la résistance mécanique des assemblages est essentielle pour s'assurer d'une bonne reproductibilité du procédé de brasage. Ces études mécaniques, couplées à l'étude du faciès de rupture permettent de définir les aspects critiques du procédé d'assemblage laser de matériaux dissemblables. L'évaluation des assemblages réalisés montre de grandes variations. Il y a une certaine tenue mécanique, cependant celle-ci varie du simple au triple d'un échantillon à l'autre. De plus, la résistance mécanique de l'assemblage est très inférieure à la résistance intrinsèque de l'alliage constituant le joint brasé. La résistance au cisaillement des assemblages ne représente en moyenne qu'un tiers de celle de l'alliage d'apport considéré seul. La moindre résistance de l'assemblage par rapport à celle de l'alliage seul n'est pas surprenante. En effet, la rupture d'un assemblage a préférentiellement lieu aux interfaces des alliages de liaison du joint brasé. Une analyse du faciès de rupture est donc conduite afin de définir précisément l'interface la plus fragile des assemblages multicouches brasés par faisceau laser. Cette étude nécessite la caractérisation des différents éléments constituant la surface des joints cisailés. Finalement, la combinaison des résultats issus de trois outils de caractérisation (RBS, CPM et MEB+EDX) a permis la détermination de la zone la plus fragile des assemblages. Ainsi, plus de 90% de la rupture du joint a lieu au niveau de l'interface alumine-nickel du système multicouche. La surface supérieure des pièces métalliques au niveau du joint cisailé est constituée en grande partie de grains d'alumine et du nickel provenant de la métallisation de la pièce d'alumine.

La procédure de métallisation des pièces d'alumine est alors légitimement mise en cause. Une observation attentive des images MEB en mode BEI-COMPO issues des analyses métallographiques précédentes corrobore l'hypothèse d'une attaque chimique trop forte de la pièce d'alumine : La Figure 38 illustre clairement que les grains proches de l'interface alumine-nickel sont partiellement désolidarisés de l'ensemble de la pièce d'alumine. Le nickel s'infiltre entre ces grains et leur tient lieu de joint de grain.

L'attaque chimique faisant suite au nettoyage des pièces

d'alumine consiste en une solution d'acide fluorhydrique à 10% dans laquelle est immergée l'échantillon d'alumine pendant 15 minutes. C'est une étape particulièrement critique et directement liée au succès ou non de la procédure de métallisation de la pièce d'alumine. Le développement de la procédure de dépôts autocatalytiques de ces pièces a conduit aux tests de différentes durées d'attaques chimiques (recherche détaillée en annexe). Ces recherches, basées sur une simple observation visuelle, indiquent qu'une durée d'attaque chimique de 15 minutes est conforme avec le résultat escompté. Finalement, au terme de l'évaluation mécanique des assemblages, il s'avère qu'il est nécessaire de préconiser un traitement moins fragilisant pour la tenue des grains de surface de l'alumine afin d'optimiser la tenue mécanique de l'assemblage final.

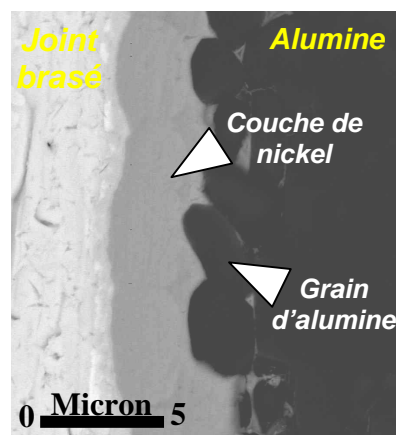


Figure 38 : Image MEB de l'interface nickel-alumine.

La tenue mécanique des assemblages, bien que très variable d'un essai à l'autre, est suffisante pour entreprendre la réalisation de prototypes destinés à une future industrialisation. Suite à ces considérations, il est alors décidé de poursuivre le développement du procédé innovant d'assemblage de matériaux dissemblables par la fabrication de micro-fraises destinées à l'industrie médicale.

9.7 Réalisation d'un prototype

9.7.1 Introduction

La faisabilité d'un procédé de brasage par faisceau laser d'un assemblage de matériaux dissemblables démontrée précédemment permet d'envisager la réalisation d'un prototype en vue d'une application industrielle. Ces assemblages de matériaux dissemblables sont d'un intérêt important dans le domaine de la micro-mécanique. Axé sur la mécanique de précision, le groupe industriel danois PINOL A/S est notamment spécialisé dans le développement et la fabrication de systèmes appliqués à l'industrie médicale. Le prototype conçu à l'issue de l'étude de faisabilité de l'assemblage de matériaux dissemblables est proposé par ce groupe industriel. Il s'agit d'une micro-fraise médicale dont le dessin industriel est représenté sur la Figure 39. Cet objet est simplifié afin de réduire son coût de fabrication lors de la phase de paramétrage du procédé laser (Figure 40).

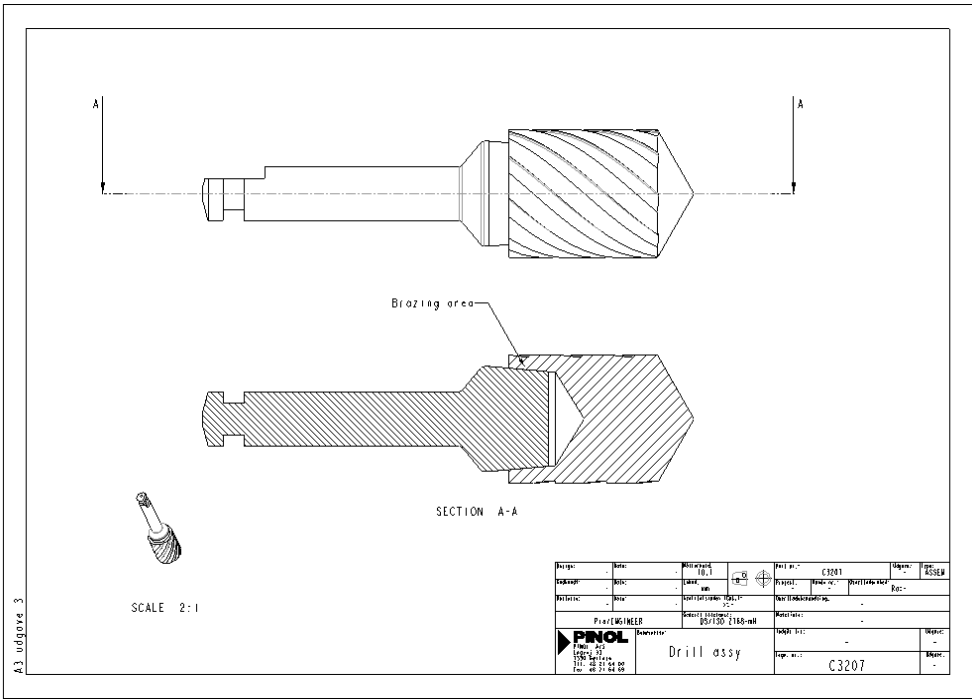


Figure 39 : Schéma de la micro-fraise

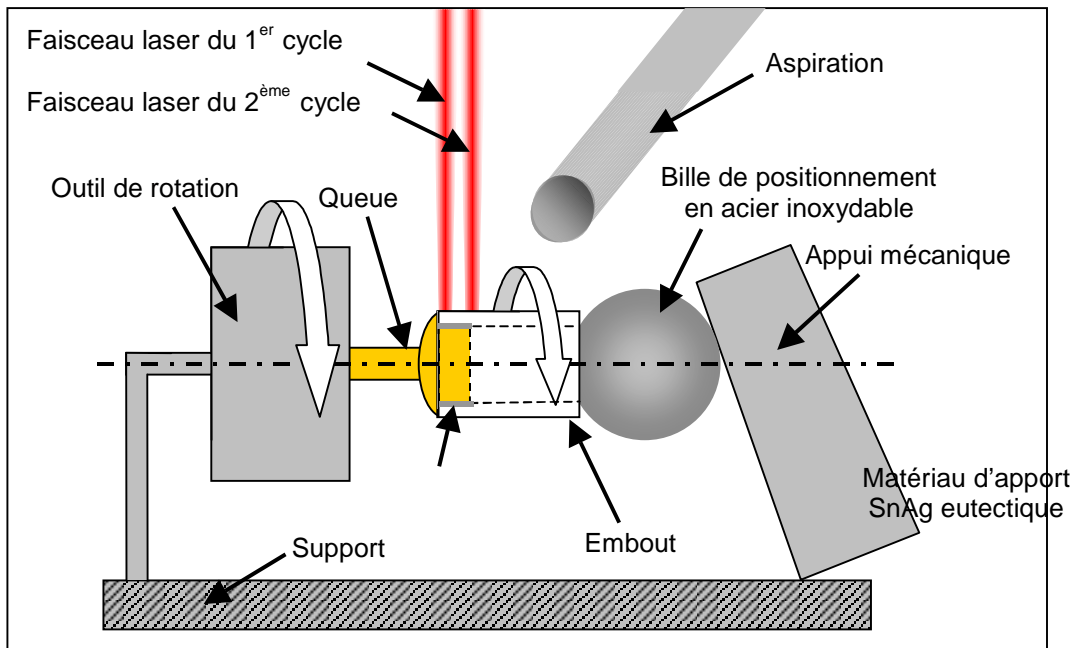


Figure 41 : Schéma du procédé de brasage laser de matériaux dissemblables pour la réalisation d'une micro-fraise en céramique et acier inoxydable

Cycle	Puissance laser (W)	Durée de pulse (ms)	Fréquence (Hz)	Diamètre du spot (mm)	Nombre de rotation (tour)	Durée d'interaction (s)
1	13	1,5	50	2	2	10
2	11	1,5	50	2	2	10

Tableau 6 : Paramètres du procédé de brasage laser des micro-fraises

9.7.3 Evaluation et résultats

La réalisation des micro-fraises par brasage laser de matériaux dissemblables est un succès. La Figure 42 est une photographie de différents prototypes brasés.



Figure 42 : Photo des Micro-fraises

L'évaluation mécanique du prototype est basée sur des tests de résistance à la torsion. Les mesures lors de notre étude sont rendues difficiles, due à la nature fragile des embouts en céramique : un maintien trop fort de la pièce en céramique risque de la casser, et un maintien trop faible ne permet pas de faire une mesure convenable. Les résultats des tests en torsion obtenus sont indiqués sur la Figure 43.

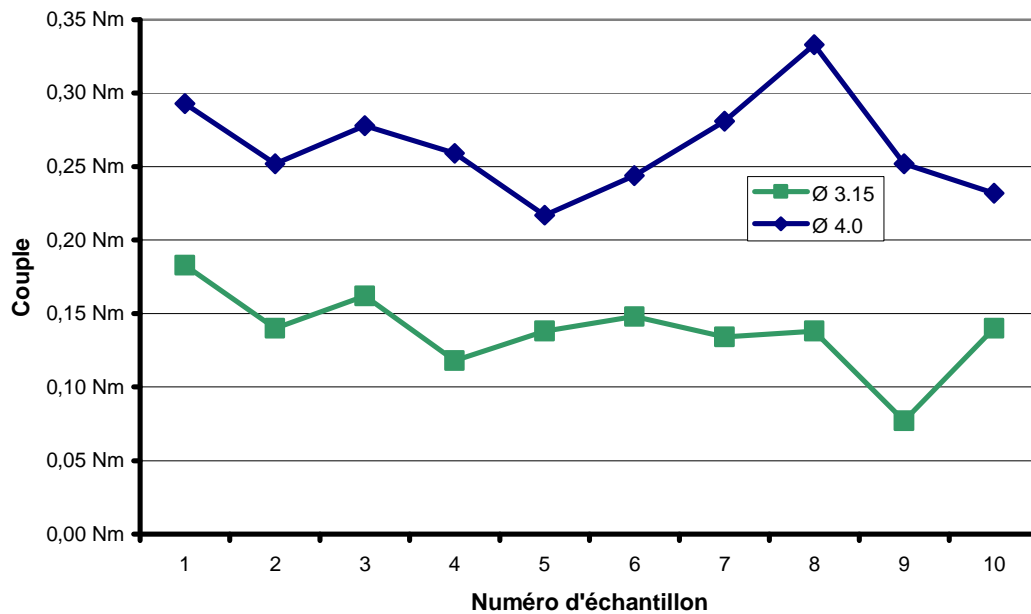


Figure 43 : Résultats des tests de résistance en torsion des micro-fraises

Le cahier des charges de l'outil de fraisage utilisé pour des implants dentaires oblige une résistance minimale en torsion de 0,400 Nm. Les prototypes réalisés ne satisfont pas cette condition. Il s'avère donc nécessaire d'améliorer la tenue mécanique de la métallisation de la pièce de céramique afin d'améliorer fortement la résistance mécanique de l'assemblage.

Par ailleurs, pour de telles applications dans le domaine médical, il est impératif de travailler avec des matériaux biocompatibles, ce qui n'est pas le cas du nickel et de l'étain inclus dans l'assemblage.

9.8 Conclusion

Ces travaux font état de recherches effectuées sur le développement d'un procédé innovant d'assemblage de matériaux dissemblables par faisceau laser. Le procédé de brasage laser est employé afin de réaliser deux types d'assemblages : céramique-métal et céramique-composite. L'objectif final de ces recherches est la fabrication d'une micro-fraise faisant office de démonstrateur.

Les matériaux constituant l'assemblage sont choisis en fonction de leur degré d'utilisation en industrie ainsi qu'en tenant compte des intérêts des industriels impliqués dans le projet. Les pièces métalliques sélectionnées sont en cuivre et en acier inoxydable, et la pièce en céramique est de l'alumine. Les traitements de surface communs sont effectués : ce sont des dépôts Ni/Au ou Ni/Sn, ou un traitement OSP. La première étape consiste en l'étude de faisabilité des assemblages. Le procédé de brasage laser par transparence est sélectionné suite aux mesures des propriétés optiques des pièces d'alumine. En effet, les épaisseurs de céramique considérées induisent des pièces suffisamment

transparentes pour permettre ce type de procédé de brasage laser. Lors des recherches paramétriques de l'outil laser pour l'assemblage des premiers échantillons, on observe qu'un contrôle de la température à rétroaction permet d'accroître fortement la reproductibilité du procédé. Il n'est pas suffisant de simplement paramétrer l'outil laser, il est nécessaire de réguler ces paramètres en cours de brasage par la mesure et l'analyse de l'évolution temporelle de la température de l'assemblage [Nicolics 92 b]. Lors de notre étude, la température atteinte par le joint brasé définit la fin ou la poursuite de l'interaction laser.

La caractérisation des échantillons est basée sur des études métallographiques et mécaniques. Les études métallographiques illustrent la formation de l'alliage de liaison nécessaire à la création du joint brasé. Ces résultats sont appuyés et confirmés par les observations issues de différentes recherches existantes et traitant des mêmes matériaux. La caractérisation de l'assemblage est étendue par leur étude mécanique. Outre la mesure de la résistance au cisaillement, une analyse du faciès de rupture permet de définir l'interface la plus fragile du système multicouche brasé. Le procédé de métallisation de la pièce en céramique s'avère être le facteur limitant de la tenue mécanique générale de l'échantillon. Une voie d'amélioration du procédé d'assemblage consiste donc à optimiser le traitement de surface de l'alumine par l'utilisation d'une attaque chimique moins agressive.

L'ensemble de ces résultats permet d'envisager la fabrication d'un prototype. Il s'agit d'une micro-fraise dont la réalisation technique est supportée par la société danoise PINOL S/A. L'assemblage de ce démonstrateur, basé sur les résultats de l'étude de faisabilité préalable, est un succès. Cependant, des développements restent encore nécessaires afin de répondre au cahier des charges d'une micro-fraise à usage médical. Le procédé de métallisation de la pièce de céramique est à revoir afin d'augmenter la résistance à la torsion de l'outil. Puis l'utilisation de matériaux biocompatibles est une obligation pour ce genre d'outil à usage médical. Il s'agit alors de définir des substituts à l'étain et au nickel inclus dans l'assemblage.

10 Procédé de brasage par interaction directe du faisceau sur la crème à braser

10.1 Introduction

Les alliages d'apport existent sous différentes formes afin d'être compatibles avec le procédé de brasage mis en œuvre et le type de joint à braser. Les fils d'alliage d'apport sont principalement utilisés lors d'une opération de brasage manuelle, et un bain d'alliage d'apport est nécessaire au brasage à la vague pour l'assemblage de composants traversant. Des préformes d'alliage d'apport, de même que des pré-dépôts fusibles sur les pistes de report de composants peuvent également être employés. L'utilisation de crèmes à braser s'avère cependant avantageuse. Elle est principalement associées avec le brasage de composants électroniques montés en surface qui est la technologie la plus répandue de nos jours (CMS : Composant pour Montage en Surface). Dans ce type d'application, une grande partie de la crème à braser interagit directement avec le faisceau laser. Le dépôt de la crème à braser sur les pistes de report de composants peut être effectué point par point à l'aide d'une seringue (dispensing). Ce procédé offre beaucoup de flexibilité en étant facilement adaptable à tout type de composants. Le procédé de sérigraphie des crèmes à braser (screen printing) est plutôt adapté aux grandes séries. Ce procédé permet d'obtenir un gain en productivité important tout en assurant une meilleure reproductibilité du dépôt.

Le procédé de brasage par faisceau laser convient à différentes formes d'alliage d'apport. Il peut s'agir d'un fil d'alliage porté au niveau du joint lors de son étape de brasage, à la manière d'un procédé sélectif avec une pane (manuel ou automatisé). A la différence de l'utilisation d'une pane, l'apport d'énergie par faisceau laser est sans contact ce qui empêche toute pollution du joint fondu et de l'outil de brasage. Le laser permet d'améliorer la reproductibilité du procédé de brasage et la qualité du joint brasé. Des pré-dépôts ou des préformes d'alliage d'apport sont également utilisés avec succès dans le cadre d'un procédé de brasage par faisceau laser. Bien que le procédé de pré-dépôts d'alliage d'apport soit susceptible d'induire des défauts de planéité préjudiciables au brasage de composants électroniques miniatures, cette technique est largement répandue dans le cadre de brasage par faisceau laser. Il en est de même des préformes d'alliage d'apport impliquant, néanmoins, une grande attention lors de leur positionnement qui peut finir par devenir rédhibitoire à leur emploi. L'utilisation de crèmes à braser est également envisageable avec un procédé de brasage laser. C'est cependant la technologie qui reste la plus délicate à mettre en œuvre avec un tel procédé. Dès les premiers essais de développement du brasage par faisceau laser, on observe qu'une montée trop rapide en température des crèmes à braser mène à la formation de projections. Celles-ci sont imputées à l'évaporation brutale des solvants volatils inclus dans la crème [Willis 87] [Nicolics 92 b].

Les crèmes à braser sont généralement bi-phasiques : constituées d'une partie métallique, l'alliage d'apport solide caractérisé par sa nature et sa granulométrie, et d'une partie non métallique (généralement liquide ou pâteuse) ayant une double fonction : d'une part la cohésion de l'ensemble, et d'autre part une action sur l'état de surface des pièces à assembler. Les crèmes obtenues sont plus

ou moins visqueuses selon la nature et la quantité de flux incorporé. Les secrets de fabrication propres à chaque fournisseur de crème à braser sont inaccessibles. Ils portent principalement sur la nature exacte des constituants du flux. Ces recherches sont effectuées sur la base des formulations de crèmes conçues par la société française Radiel-Fondam, filiale de Jahnichen S.A..

Le travail effectué est axé sur la thématique de l'interaction directe du faisceau laser sur une crème à braser. Il a pour premier objectif de définir les caractéristiques adéquates d'une crème à braser dans le cadre d'une application de brasage laser. Basé sur ces résultats, le développement de diverses techniques de brasage par faisceau laser est effectué. La réalisation de prototypes permet une évaluation du procédé. Finalement, une tentative d'optimisation de la formulation d'une crème à braser est effectuée en tenant compte des spécificités d'un procédé laser : l'utilisation d'un additif absorbant tel que le noir de carbone est évalué expérimentalement.

10.2 Evaluation de la compatibilité d'une crème avec un procédé de brasage laser

10.2.1 Développement de la procédure expérimentale

Afin de caractériser le comportement d'une crème à braser soumise à l'interaction directe d'un faisceau laser, un essai simple a été développé (Figure 44). Un plot de crème à braser (diamètre 1mm, épaisseur 0,1mm) est déposé par sérigraphie sur un substrat FR4 (épaisseur 1,48mm) dont la surface a été préalablement traitée par un procédé couramment rencontré dans l'industrie électronique. L'outil laser utilisé émet dans le proche infrarouge (laser à diodes). La répartition énergétique au sein du faisceau laser est homogène (Figure 45), et la zone d'interaction avec l'échantillon est de diamètre sensiblement supérieure à celui du plot de crème à braser (distribution homogène de l'énergie sur une

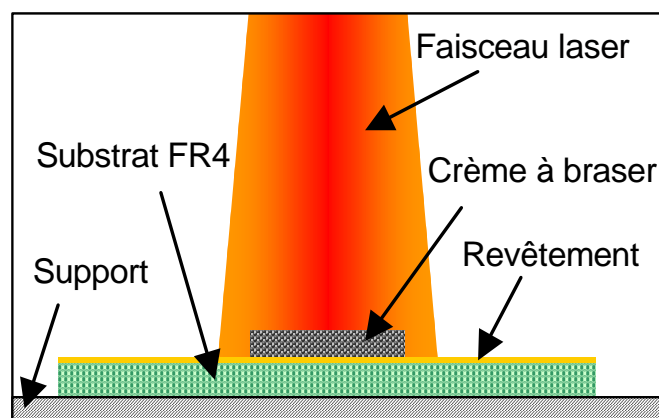


Figure 44 : Schéma de la procédure de caractérisation d'une crème à braser

surface de diamètre 1,26mm). La fluence du faisceau laser est identique sur toute la surface de l'échantillon de crème à caractériser. Une impulsion laser est appliquée. Cette impulsion correspond à l'énergie injectée dans le système. La quantité d'énergie fournie par l'outil laser et nécessaire pour

fondre l'échantillon de crème à braser dépend de la nature et de la géométrie du substrat FR4 et de son support, de la nature du revêtement, et des propriétés de la crème à braser.

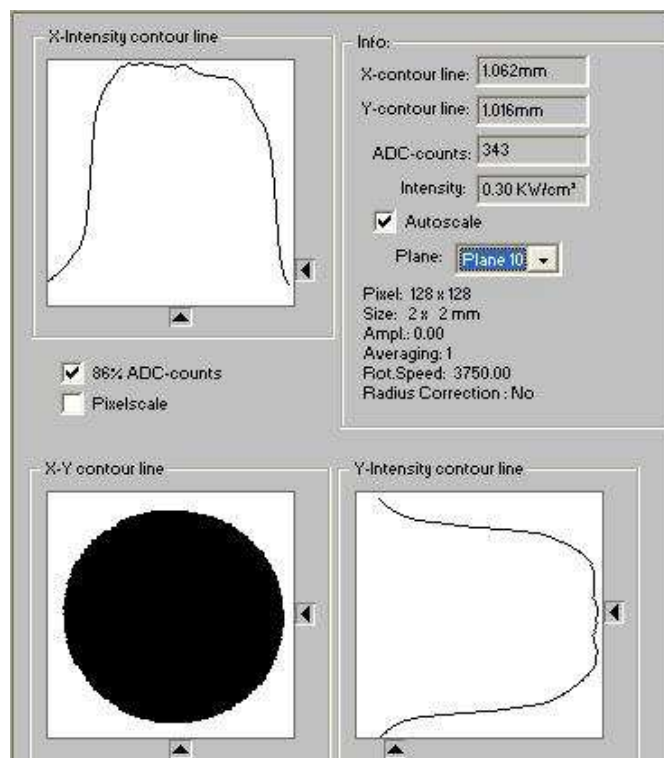
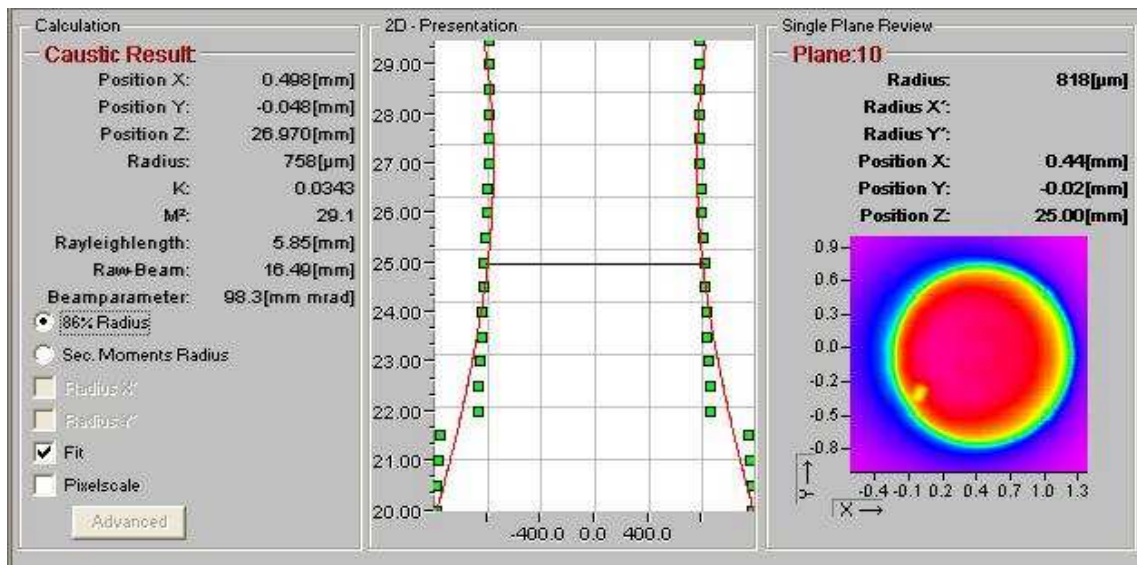
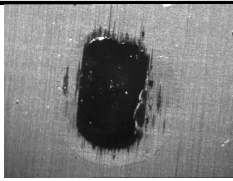
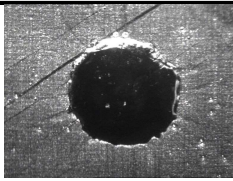
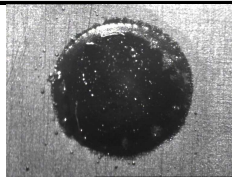
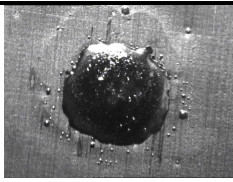
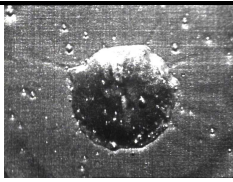
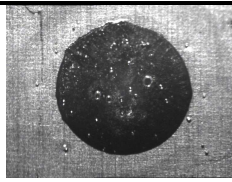
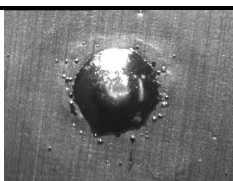
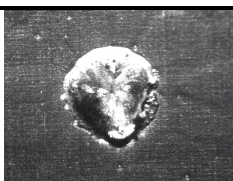
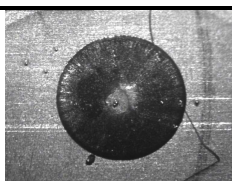


Figure 45 : Analyse de la répartition énergétique au sein du faisceau laser

Suite à la procédure de caractérisation, l'aptitude d'une crème à braser à supporter l'interaction directe d'un faisceau laser est jugée selon plusieurs critères : son aspect (aspect général, brillance, brûlures...), qualité du mouillage sur le substrat et présence de projections. Chaque test comprend 5 à 10 essais sur la même crème à braser (selon la reproductibilité des résultats). Une analyse au microscope optique est effectuée. L'essai illustrant le comportement moyen de chaque crème à braser est alors enregistrée et commentée dans cette étude.

Nature de l'alliage		Nature du revêtement		
		Cuivre - OSP	Nickel - or	Etain chimique
Sn62Pb36Ag2 %massique				
Evaluation ⁽¹⁾	Aspect	★★	★★	★★★★
	Mouillage	★	★★	★★★★★
	Projections	★★	★★	★★
Sn96Ag4 %massique				
Evaluation ⁽¹⁾	Aspect	★★	★★	★★★★
	Mouillage	★★	★★	★★★★★
	Projections	★	★	★★
Sn96,5Ag3Cu0,5 %massique				
Evaluation ⁽¹⁾	Aspect	★★	★★	★★★★
	Mouillage	★	★★	★★★★★
	Projections	★	★★	★★

⁽¹⁾ ★★★★★ excellent ; ★★★★ bon ; ★★★ moyen ; ★ mauvais

Tableau 7 : Evaluation du comportement de différentes crèmes à braser selon la nature du revêtement appliqué sur le substrat FR4

Les essais préliminaires sont basés sur les tests de différentes natures de crème à braser (Tableau 7). Ils indiquent que les meilleurs résultats sont obtenus avec le substrat FR4 bénéficiant d'un dépôt d'étain chimique. Le revêtement cuivre - OSP est celui menant aux résultats les plus critiques. Le taux de réflexion du faisceau laser par chaque revêtement explique les résultats obtenus. Celui-ci est respectivement de 67,5%, 76,6% et 91,2% pour les revêtements étain chimique, nickel – or et cuivre – OSP dans le cas d'une interaction avec un faisceau de longueur d'onde 845nm (résultats de mesures au spectromètre optique équipé d'une sphère d'intégration). La portion du faisceau laser interagissant avec le substrat, autour de l'échantillon de crème à braser induit des résultats différents selon la nature du revêtement. Un taux d'absorption élevé du faisceau laser par la métallisation (soit un taux de réflexion faible) permet une montée en température importante du substrat. Celle-ci favorise notamment la qualité du mouillage de la crème à braser. Finalement, le revêtement étain chimique sera préférentiellement sélectionné lors des études de caractérisation ultérieures.

10.2.2 Interaction laser avec une crème à braser

Le but de cette recherche est de définir les caractéristiques idéales d'une crème à braser, en vue d'une utilisation dans un procédé de brasage laser. Les principales caractéristiques d'une crème à braser sont : la nature de l'alliage, la granulométrie des microbilles, la nature et la quantité de flux incorporé. Chaque caractéristique est isolée pour permettre une appréciation de son influence. La procédure de caractérisation des crèmes à braser sous interaction directe d'un faisceau laser décrite précédemment est appliquée. Une observation au microscope optique est effectuée afin d'évaluer la qualité du mouillage, la quantité de projection et l'aspect de la crème à braser suite à l'interaction laser.

10.2.2.1 Granulométrie

Les premiers tests portent sur la granulométrie des microbilles. Deux types de granulométrie très distincts sont testés : des microbilles de diamètre compris entre 25 et 45 μm (classe 3) et des microbilles de diamètre compris entre 10 et 100 μm (classe 8). Ces crèmes contiennent le même alliage d'apport sans plomb de formule Sn96-Ag4 %massique de même quantité (87%massique d'alliage) et la même nature de flux (Référence SP027). L'impulsion laser est de puissance 30W et la durée d'interaction est de 1000ms. Les résultats obtenus sont reportés dans le Tableau 8.


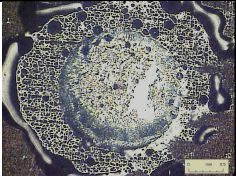

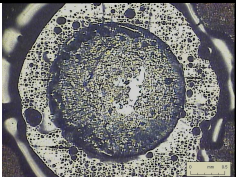
Type de crème	Photos		Diamètre
<p><i>Sn96Ag %massique</i></p> <p>Granulométrie : Classe 3 (25-45μm)</p> <p><i>Flux : SP027 – 13%</i></p>			1,778 mm
<p><i>Sn96Ag %massique</i></p> <p>Granulométrie : Classe 8 (10-100μm)</p> <p><i>Flux : SP027 – 13%</i></p>			1,990 mm

Tableau 8 : Influence de la granulométrie d'une crème à braser sur les caractéristiques de la fusion laser

Le comportement des deux crèmes à braser testées est très similaire. La quantité de projection est équivalente et l'aspect de la crème à braser fondue est terne et granuleuse dans les deux cas. La crème à braser de granulométrie classe 8 semble mouiller sur une plus grande surface, cependant ce résultat n'est pas très significatif d'une quelconque influence de la géométrie des microbilles (variation faible de la surface de mouillage). Ces résultats justifient la possibilité d'utiliser indépendamment l'une ou l'autre classe de granulométrie lors de l'évaluation d'autres caractéristiques de crèmes à braser.

10.2.2.2 Nature de l'alliage d'apport

La nature de l'alliage d'apport est d'une importance primordiale sur le procédé de brasage. C'est elle qui définit la température du procédé. De plus, une analyse critique sur le meilleur substitut au plomb

à adopter en vue de la directive européenne RoHS (*Reduction of Hazardous Substances*, réduction de substances dangereuses) est toujours en cours. Cette étude est basée sur les tests de deux alliages sans plomb (Sn96,5-Ag3-Cu0,5 et Sn99,7-Cu0,3 %massique) qui sont parmi les meilleurs sur le marché. Les résultats obtenus avec ces deux alliages sont comparés à ceux obtenus avec une crème type 'étain-plomb' de formule exacte Sn62-Pb36-Ag2 %massique ayant ses autres caractéristiques sensiblement identiques aux crèmes sans plomb testées (même granulométrie, même nature de flux mais de quantité légèrement inférieure). L'impulsion laser est de puissance 30W et la durée d'interaction est de 1000ms pour chaque essai. Le Tableau 9 illustre les résultats obtenus pour chaque crème à braser testée.


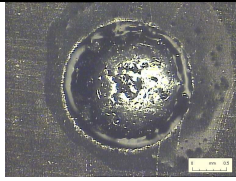

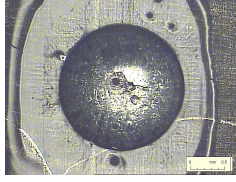

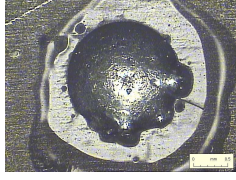
Type de crème	Photos		Diamètre
Sn62Pb36Ag2 %massique <i>Granulométrie : Classe 3 (25-45µm)</i> <i>Flux : DR010 – 12%</i>			1,610 mm
Sn96,5Ag3Cu0,5 %massique <i>Granulométrie : Classe 3 (25-45µm)</i> <i>Flux : DR010 – 13%</i>			1,830 mm
Sn99,7Cu0,3 %massique <i>Granulométrie : Classe 3 (25-45µm)</i> <i>Flux : DR010 – 13%</i>			1,672 mm

Tableau 9 : Influence de la nature de l'alliage d'une crème à braser sur les caractéristiques de la fusion laser

La comparaison des résultats obtenus avec les deux alliages « sans plomb » révèle un très bon comportement de la crème Sn96,5Ag3Cu0,5 %massique : grande surface de mouillage, bon aspect et peu de projections. La surface de mouillage de la crème Sn99,7Cu0,3 %massique est réduite, et surtout irrégulière. Les résultats obtenus avec la crème contenant du plomb (Sn62Pb36Ag2 %massique) sont les meilleurs. De plus, l'alliage plombifère affiche une brillance inégalée par les alliages sans plomb. Néanmoins, la qualité du mouillage de cette crème « étain-plomb » ne semble pas optimum. Le meilleur résultat est obtenu avec la crème Sn96,5Ag3Cu0,5 %massique. La qualité du mouillage est dictée principalement par l'état de surface du substrat, et les propriétés du flux utilisé. La thématique du prochain paragraphe porte donc sur l'influence du flux incorporé dans les crèmes à braser.

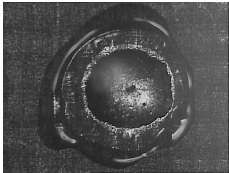
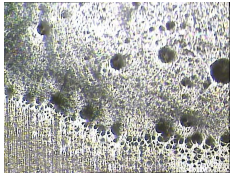
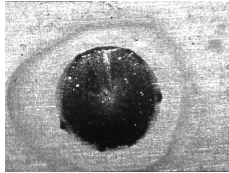
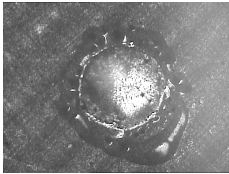
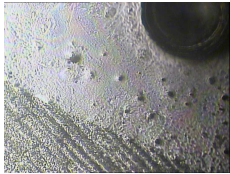
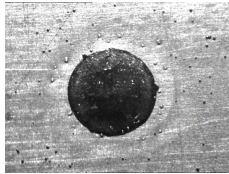
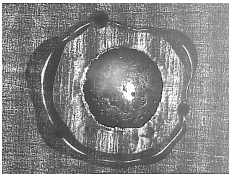
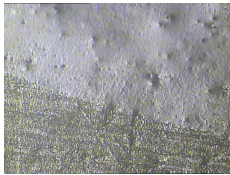
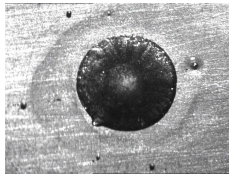
10.2.2.3 Nature et quantité de flux incorporé

La composition exacte des flux utilisés lors de cette étude est sous couvert de confidentialité. Tout fabricant de crème à braser souhaite conserver ses formules de flux secrètes. Le flux a, en effet, un

rôle prépondérant sur l'état final de la brasure en influant directement sur la qualité du mouillage de l'alliage fondu sur le substrat. Les principes de base de l'élaboration d'un flux sont cependant détaillés dans le 1^{er} chapitre de ce travail de thèse. Les deux types de flux testés lors de cette étude sont désignés par leur référence industrielle : SP027 et DR010. L'un est sans halogénure (SP027), ce qui le rend plus écologique.

L'action du flux est la préparation des surfaces en cours de procédé de brasage, il est en revanche responsable de projections principalement lors d'un procédé de brasage par faisceau laser. Une évaporation brutale des solvants volatils constituant le flux induit la présence de billes d'alliage d'apport sur le circuit imprimé, autour du joint brasé. Ce phénomène est à éviter car il peut aboutir notamment à la création de courts-circuits préjudiciables au bon fonctionnement des cartes électroniques.

L'examen des résultats issus de la procédure de caractérisation des crèmes sous interaction directe du faisceau laser est axé sur la qualité du mouillage et la présence de projections. L'impulsion laser utilisée lors des essais est de puissance 30W et sa durée d'interaction est de 2000ms. Le Tableau 9 recense les résultats obtenus pour chaque crème à braser testée.

Type de crème	Photos	
	Mouillage	Projection
<p><i>Sn96,5Ag3Cu0,5</i> <i>%massique</i></p> <p><i>Granulométrie :</i> <i>Classe 3 (25-45µm)</i></p> <p>Flux : DR010 – 13%</p>	 	
Evaluation ⁽¹⁾	★	★★★
<p><i>Sn96,5Ag3Cu0,5</i> <i>%massique</i></p> <p><i>Granulométrie :</i> <i>Classe 3 (25-45µm)</i></p> <p>Flux : SP027 – 14%</p>	 	
Evaluation ⁽¹⁾	★★★	★
<p><i>Sn96,5Ag3Cu0,5</i> <i>%massique</i></p> <p><i>Granulométrie :</i> <i>Classe 3 (25-45µm)</i></p> <p>Flux : SP027 – 11%</p>	 	
Evaluation ⁽¹⁾	★★★	★★

⁽¹⁾ ★★★ bon ; ★★ moyen ; ★ mauvais

Tableau 10 : Influence de la nature et de la quantité de flux inclus dans une crème à braser sur les caractéristiques de la fusion laser

La quantité de flux est indiquée en pourcentage massique de crème à braser. Comme le flux est sous forme liquide, voire pâteuse et l'alliage métallique sous forme solide, une faible variation du taux massique de flux induit une grande variation de son volume.

A l'issue des caractérisations, on constate que la qualité du mouillage induite par le flux DR010 est mauvaise, contrairement à celle induite par le flux SP027. Cependant, le flux DR010 ne génère

aucune projection lors du procédé de caractérisation laser, à l'inverse du flux SP027. L'influence de la quantité de flux est illustrée par la comparaison entre la crème contenant 14 %massique de flux SP027 et celle contenant 11 %massique du même flux. On observe que les projections sont fortement réduites avec la diminution de la quantité de flux inclus dans la crème à braser. La qualité du mouillage est identique et correcte dans les deux configurations.

Finalement, le flux référencé SP027 a le double avantage, d'une part d'être écologique (sans halogénure) et d'autre part de permettre un bon mouillage en un temps court (spécificité d'un procédé de brasage laser). En contre partie, l'utilisation de cette formule de flux induit la présence de projections. Leur nombre peut être néanmoins réduit par la diminution de la quantité de flux incorporé. Par ailleurs, l'avantage d'un procédé laser est de permettre un contrôle précis de l'apport énergétique. Ainsi, les paramètres laser sont susceptibles d'être adaptés au type de crème à braser en fonction de son aptitude à générer des projections : la rampe de montée en puissance du faisceau laser est ajustée afin de ralentir la montée en température de la crème à braser et ainsi éliminer toute projection.

La suite de cette étude est donc axée sur l'influence des paramètres laser lors d'une interaction directe sur une crème à braser. Ces recherches permettent de poursuivre l'optimisation d'une crème à braser par l'étude de l'influence de sa viscosité.

10.2.3 Ajustement des paramètres laser au comportement d'une crème à braser

Une impulsion laser se décompose en trois étapes (Figure 46) : la rampe de montée en puissance (a), la durée d'interaction à pleine puissance (b), et la rampe d'extinction (c).

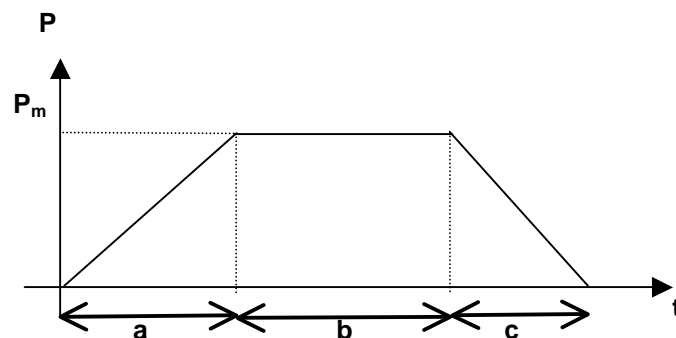


Figure 46 : Détail d'une impulsion laser

La rampe de montée en puissance (a) permet de contrôler l'élévation en température de la crème à braser. Celle-ci est directement liée à la formation de projections : une montée en température trop rapide engendre une évaporation brutale des solvants volatils inclus dans le flux, et donc l'éjection de billes d'alliage (projections). L'augmentation de la durée de montée en puissance induit une réduction de la vitesse de montée en température et permet donc d'éliminer toute projection.

La durée d'interaction à pleine puissance (b) est nécessaire uniquement si la crème à braser n'est pas entièrement fondue à la suite de la première étape de montée en puissance. La durée d'interaction à pleine puissance est en corrélation avec l'état de fusion de l'alliage et son mouillage sur le substrat.

Celle-ci dépend principalement de la nature de l'alliage (température de fusion), de l'absorption du faisceau laser par la crème à braser et de la masse thermique de son environnement (géométrie et nature du substrat, du support, de la métallisation...).

La rampe d'extinction (c) agit directement sur la vitesse de refroidissement de l'alliage d'apport qui elle-même agit sur la microstructure du joint brasé. A terme, la microstructure du joint brasé est liée aux caractéristiques mécaniques du joint brasé. Un refroidissement rapide engendre une microstructure fine et un alliage de liaison mince. Ces phénomènes sont synonymes d'une bonne résistance mécanique et d'une haute fiabilité du joint brasé. Un refroidissement par convection naturelle à l'air ambiant est généralement suffisant. La spécificité d'un procédé laser est d'induire une Zone Affectée Thermiquement (ZAT) réduite, ce qui engendre un refroidissement rapide par conduction à travers les pièces constituant l'assemblage. Finalement, la rampe d'extinction du laser lors d'un procédé de brasage tendre doit être courte. L'outil laser disponible lors de cette étude autorise une rampe d'extinction minimum de 10ms.

La rampe de montée en puissance et la durée d'interaction à pleine puissance sont spécifiques à chaque type de crème à braser. Le travail de recherche suivant est axé sur l'optimisation du cycle laser en fonction du type de crème à braser. Cette étude reprend les résultats obtenus précédemment, et traite également de l'influence de la viscosité des crèmes à braser sur leur comportement sous interaction directe d'un faisceau laser.

10.2.3.1 Optimisation de la rampe de montée en puissance

A la suite de l'interaction directe d'un faisceau laser, la crème à braser présentant le meilleur compromis en terme d'aspect, qualité de mouillage et nombre de projections est de type Sn96,5Ag3Cu0,5 %massique, de classe 3 (Granulométrie : 25-45µm) et contenant le flux référencé SP027 à hauteur de 11 %massique. A partir de cette formulation, il est possible d'agir sur la nature et quantité des solvants du flux, tout en gardant un procédé d'activation identique. Ceci permet de modifier la viscosité générale de la crème à braser. Le Tableau 11 liste les trois différentes valeurs de viscosité testées sur la même base de crème à braser.

<i>Sn96,5Ag3Cu0,5 %massique</i>	<i>Sn96,5Ag3Cu0,5 %massique</i>	<i>Sn96,5Ag3Cu0,5 %massique</i>
<i>Granulométrie : Classe 3 (25-45µm)</i>	<i>Granulométrie : Classe 3 (25-45µm)</i>	<i>Granulométrie : Classe 3 (25-45µm)</i>
<i>Flux : SP027 – 11%</i>	<i>Flux : SP027 – 11%</i>	<i>Flux : SP027 – 11%</i>
Viscosité : 700 Pa.s	Viscosité : 320 Pa.s	Viscosité : 600 Pa.s

Tableau 11 : Les différents types de crème à braser testés (viscosité 700, 320 et 600 Pa.s)

La procédure expérimentale consiste à définir les rampes de montée en puissance de l'outil laser qui mènent aux projections de billes d'alliage. La procédure de caractérisation est identique à celle utilisée précédemment (Paragraphe 10.2.1 : Développement de la procédure expérimentale). L'impulsion laser est cependant remplacée par une rampe de montée en puissance, suivie d'une rampe d'extinction de 10ms. Différentes rampes de montée en puissance sont testées, allant de 10 à

1000ms, de même que différentes puissances de faisceau laser. Chaque crème à braser est alors caractérisée par un graphique indiquant sa zone de projections (rampe trop faible pour une valeur de puissance laser trop importante) et sa zone d'utilisation. La Figure 47 représente le graphique obtenu avec la crème à braser de viscosité 700 Pa.s.

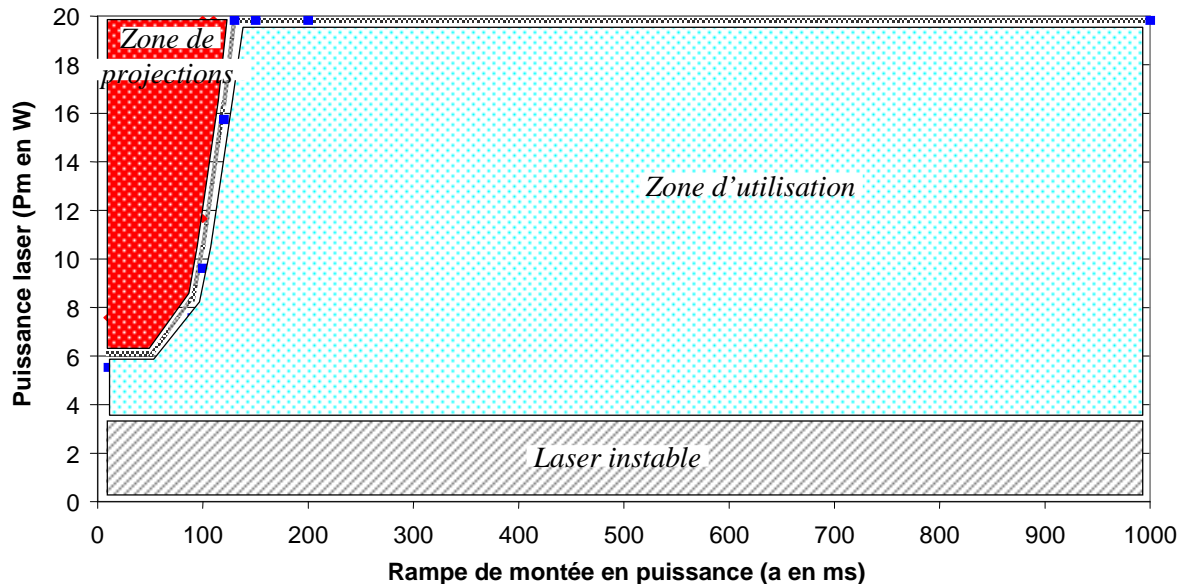


Figure 47 : Zones d'utilisation et de projections de la crème à braser Sn96,5Ag3Cu0,5%massique – classe 3 – SP027 11%massique – 700 Pa.s

Lorsque l'on utilise l'outil laser à pleine puissance (20W), la rampe de montée en puissance idéale pour la crème à braser de viscosité 700 Pa.s est de 200 ms (environ). L'établissement des « zones d'utilisation » spécifiques à chaque crème à braser permet leur différenciation. La Figure 48 reporte les frontières entre chaque zone obtenues pour les trois différentes viscosités testées. On constate que plus la viscosité d'une crème à braser est faible, plus sa « zone d'utilisation » se réduit. La crème à braser de faible viscosité (320 Pa.s) génère des projections quelque soit la puissance laser testée pour une rampe de montée en puissance allant jusqu'à 1000 ms. Une rampe de montée en puissance inférieure à 1000 ms n'est pas applicable avec cette crème à braser. Lorsque la viscosité est faible, les forces de Van der Waals liant les microbilles à la crème à braser le sont également. Les microbilles d'alliage sont alors aisément éjectées de la crème à braser lors de l'évaporation des solvants volatils du flux.

Ces graphiques permettent de définir les rampes de montée optimales pour chaque crème à braser :

- 20W en 200 ms pour la crème à braser de viscosité 700 Pa.s
- 20W en 700 ms pour la crème à braser de viscosité 600 Pa.s
- Rampe de montée en puissance supérieure à 1000ms pour la crème à braser de viscosité 320 Pa.s. Elle est donc éliminée de la procédure de caractérisation de la crème idéale pour un procédé de brasage laser.

Des essais supplémentaires indiquent que la rampe de montée en puissance idéale pour chaque crème à braser est identique que le substrat ait un revêtement étain chimique ou nicklé-doré.

L'échauffement du substrat par interaction avec le faisceau laser n'est pas suffisamment rapide pour induire davantage de projections – la zone d'interaction laser est plus grande que celle recouverte par la crème à braser. On conclut alors que l'interaction directe du faisceau laser avec la crème à braser est seule responsable de l'initiation de projections et cela quelle que soit la nature du revêtement appliqué sur le substrat.

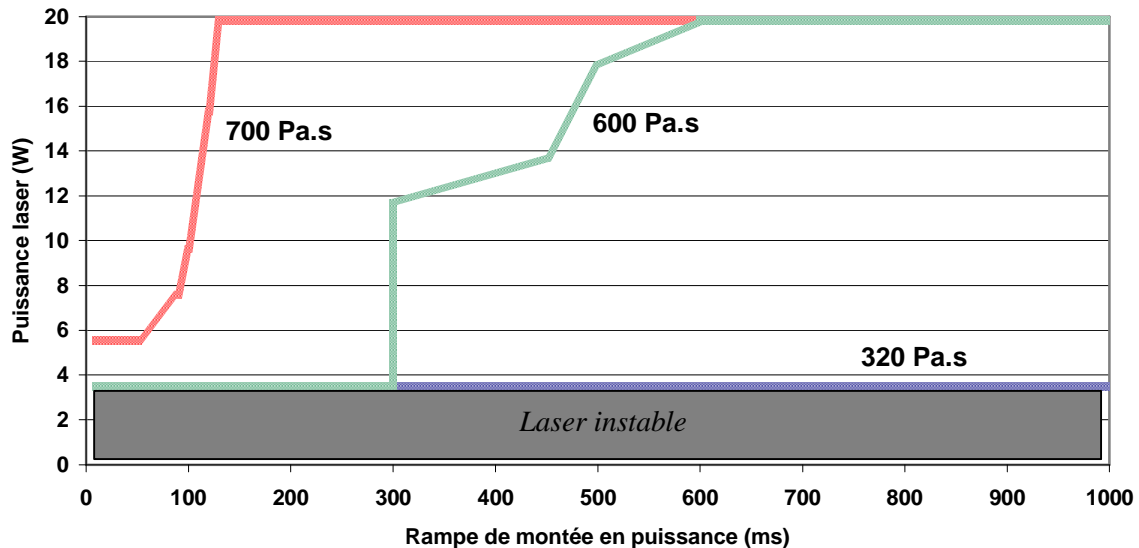


Figure 48 : frontières des « zones d'utilisation » de crèmes à braser de viscosités différentes

10.2.3.2 Optimisation de la durée d'interaction à pleine puissance

Les tests d'optimisation de la durée d'interaction laser sont effectués pour une puissance de faisceau de 20W. Afin d'éviter toute projection, on utilise les résultats précédemment acquis sur l'optimisation de la rampe de montée en puissance pour chaque crème à braser (viscosité 700 Pa.s et 600 Pa.s). Deux types de métallisation sont considérés lors de cette étude : il s'agit de revêtements étain chimique et nickel-or dont les taux de réflexion d'un faisceau de longueur d'onde 845nm sont de 67,5% et 76,6% respectivement (mesurés à l'aide d'un spectromètre optique à sphère d'intégration). L'évolution d'une crème à braser soumise au test de caractérisation par faisceau laser est détaillée sur la Figure 49. Cette illustration est basée sur les résultats obtenus avec la crème à braser de viscosité 700 Pa.s. Les observations suivantes sont identiques quel que soit le type de crème à braser étudié. On distingue différentes phases au fur et à mesure de l'interaction laser : dans un premier temps, les microbilles d'alliage s'agglomèrent entre elles lors de leur fusion. Il y a ensuite formation d'une zone fondue autour de laquelle quelques microbilles subsistent à l'état solide. On atteint la condition optimale de fusion de la crème à braser lorsque toutes les microbilles en périphérie sont fondues. Dans le cas d'un dépôt d'étain chimique sur le substrat, on observe alors que cette couche d'étain fond à son tour, d'où un « accroissement plan » de la zone fondue (phénomène représenté par la Figure 49) . La température de fusion de l'alliage Sn96,5Ag3Cu0,5 %massique est de 217°C, et celle de l'étain pur est de 232°C.

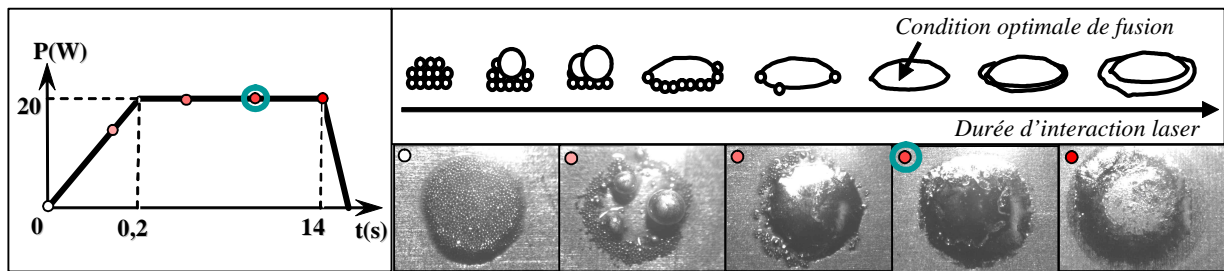


Figure 49 : Evolution d'une crème à braser soumise à une interaction directe du faisceau laser

Le Tableau 12 expose les caractéristiques temporelles d'une impulsion laser de 20W menant à la condition optimale de fusion pour chaque crème à braser traitée, en fonction du type de revêtement appliqué au substrat. Ces durées d'impulsion dépendent des caractéristiques de chaque crème à braser mais également de la masse thermique que constitue le système sur lequel elle sont déposées. Chaque essai est réalisé afin de permettre une comparaison cohérente. La surface des substrats FR4 peut être considérée comme infinie par rapport à la zone affectée thermiquement par le procédé laser. Toute la surface des substrats est métallisée, et ceux-ci sont positionnés sur un support métallique. La dissipation thermique du système n'est donc pas négligeable. Les durées idéales de cycles laser pour chaque crème à braser sont alors particulièrement longues, ce qui accentue les disparités de résultats obtenus avec chaque crème à braser permettant une meilleure comparaison.

	Traitement de surface du substrat	Rampe de montée en puissance (s)	Durée d'interaction à 20W (s)	Rampe d'extinction (s)	Durée totale du cycle laser (s)
<i>Sn96,5Ag3Cu0,5 %massique</i> <i>Granulométrie : Classe 3 (25-45µm)</i> <i>Flux : SP027 – 11%</i> Viscosité : 700 Pa.s	Etain chimique	0,2	8	0,01	8,21
	Nickel/or	0,2	12	0,01	12,21
<i>Sn96,5Ag3Cu0,5 %massique</i> <i>Granulométrie : Classe 3 (25-45µm)</i> <i>Flux : SP027 – 11%</i> Viscosité : 600 Pa.s	Etain chimique	0,7	5	0,01	5,71
	Nickel/or	0,7	11	0,01	11,71

Tableau 12 : Caractéristiques temporelles d'une impulsion laser de 20W menant à la condition optimale de fusion pour chaque crème à braser, en fonction du traitement appliqué au substrat

Suite aux essais, on constate que la nature du revêtement influe fortement sur la durée d'interaction optimale du faisceau laser avec chaque crème à braser. L'échauffement du substrat est plus important dans le cas d'un revêtement étain chimique que dans celui d'un revêtement nickel – or. Ceci permet une fusion et un mouillage plus rapide des microbilles en périphérie du dépôt de crème à braser.

La comparaison des durées d'impulsion laser idéales pour chaque viscosité de crème testée révèle des disparités importantes. La crème à braser dont la viscosité est de 600 Pa.s induit des temps de cycle laser inférieurs à celle dont la viscosité est de 700 Pa.s. En dépit d'une rampe de montée en puissance du faisceau laser trois fois supérieure, la durée d'impulsion totale avec la crème à braser de viscosité 600 Pa.s est sensiblement plus courte.

Finalement, même si une viscosité élevée de la crème à braser permet de réduire la rampe de montée en puissance, ces derniers résultats indiquent que cette caractéristique de crème n'est pas seule responsable de la durée du cycle laser optimum. Le caractère confidentiel des formulations exactes des flux constituant les crèmes à braser ne permet pas d'imputer l'allongement ou la réduction des cycles laser à un solvant en particulier. Quoiqu'il en soit, la viscosité des crèmes à braser n'est pas un paramètre ajustable lors de leur fabrication. Ces résultats permettent de définir, parmi l'ensemble des crèmes à braser testées, celle qui présente les caractéristiques idéales pour un procédé laser : il s'agit de la crème à braser de type Sn96,5Ag3Cu0,5 %massique, classe 3 (Granulométrie : 25-45 μ m), ayant une viscosité de 600 Pa.s et contenant le flux référencé SP027 à hauteur de 11 %massique.

10.2.4 Conclusion

La procédure de caractérisation expérimentale développée ici a permis de définir les caractéristiques adéquates d'une crème à braser dans le cadre d'une application de brasage laser. La fabrication d'une crème à braser spécialement conçue pour un procédé de brasage laser nécessite un certain cahier des charges à respecter. Les spécificités de cette crème à braser sont rappelées ci-dessous :

- Il est nécessaire d'avoir une faible quantité de flux afin d'éviter un nombre important de projections lors du procédé laser.
- Une viscosité élevée de la crème à braser (autour de 700 Pa.s) permet aussi de réduire le nombre des projections lors du procédé laser.
- Un flux disposant d'activateurs tel que ceux présents dans la référence SP027 est préférable. Ceux-ci assurent en effet un meilleur mouillage par rapport à ceux de la référence DR010.
- La granulométrie des crèmes à braser semble indifférente d'après les résultats issus de la comparaison de crèmes de classe 3 et classe 8.

La dernière partie de ce travail illustre l'adaptation possible de l'apport énergétique par le faisceau laser en fonction de la réponse de la crème à braser utilisée. La crème à braser présentant les meilleures caractéristiques est alors sélectionnée pour le développement de diverses techniques de brasage. Cette crème à braser ne contient ni plomb ni halogénure. Elle est de type Sn96,5Ag3Cu0,5 %massique, classe 3 (Granulométrie : 25-45 μ m), avec une viscosité de 600 Pa.s et contenant le flux référencé SP027 à hauteur de 11 %massique. Elle est utilisée lors du brasage laser de différents composants électroniques faisant suite. Ces assemblages constituent des prototypes qui sont alors évalués.

10.3 Réalisation de prototypes pour évaluation

10.3.1 Introduction

Les recherches précédentes ont permis de définir les caractéristiques d'une crème à braser particulièrement adaptée au procédé de brasage par interaction directe d'un faisceau laser. La formulation de crème sélectionnée repose en partie sur l'expertise de la société française Radiel-Fondam, filiale de Jahnichen S.A., concernant notamment la nature exacte des constituants du flux.

La suite de ces recherches porte logiquement sur l'utilisation de cette formulation de crème à braser dans le cadre de la réalisation de prototypes par brasage laser associés au domaine de la microélectronique. L'assemblage de certains composants électroniques par faisceau laser conduit à l'interaction directe du faisceau sur une partie de la crème à braser sérigraphiée. En effet, la connexion du composant ne recouvre pas entièrement le dépôt de crème.

Le développement de deux techniques de brasage par faisceau laser est effectué. Il existe plusieurs méthodes de mise en œuvre du faisceau laser lors de son application pour une opération de brasage électronique [Suenaga 87]. Il peut s'agir d'un procédé de brasage laser « point par point » : une impulsion laser est déclenchée sur chaque connexion à braser. Aussi, on peut utiliser un système de déplacement rapide du faisceau laser (brasage laser scanner). Il permet un tir continu lors du brasage de plusieurs connexions. Une autre méthode consiste à mettre en forme le faisceau laser afin de correspondre à la géométrie de l'ensemble des joints à braser. Un même faisceau laser peut également être « multiplexé » : il est injecté dans un ensemble de fibres, elles-mêmes positionnées afin de braser plusieurs connexions simultanément (brasage laser multifibre). Enfin, l'utilisation d'un système de brasage laser manuel suscite un intérêt récent dans le domaine de l'assemblage de composants électroniques.

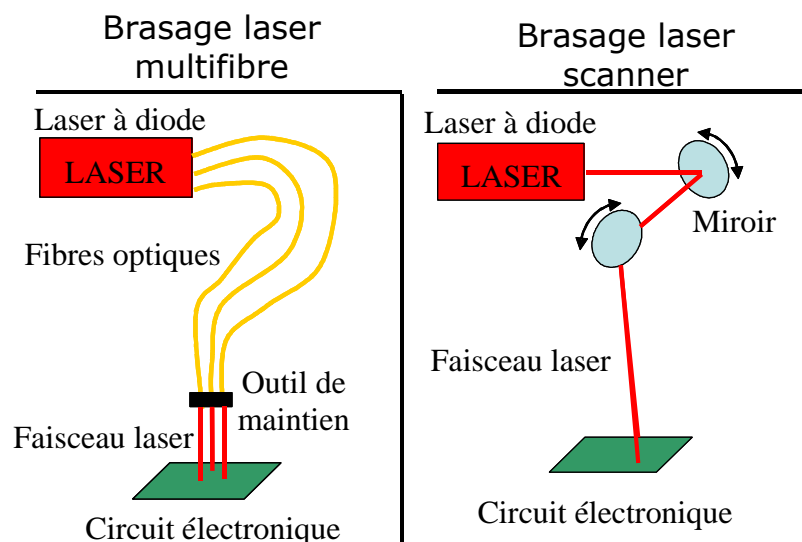


Figure 50 : Schémas des procédés de brasage laser multifibre et brasage laser scanner

Les procédés détaillés ci-après et utilisés pour la réalisation de prototypes sont les techniques de brasage laser multifibre et de brasage laser scanner (Figure 50). Chacune de ces technologies est adaptée préférentiellement à un type de composant électronique. Lors de cette étude, le brasage laser multifibre est expérimenté sur des composants à deux connexions (résistances SR et condensateurs SC) et trois connexions tel qu'un boîtier de transistor à connexion courte (SOT : Small Outline Transistor). Les résistances et condensateurs sont de deux dimensions : 3mm long - 1,5mm large (12-06 inches) et 2mm long - 1,25mm large (08-05). Le procédé de brasage laser scanner est utilisé pour l'assemblage de circuits intégrés à faible encombrement (SOIC : Small Outline Integrated Circuit). Les composants électroniques traités lors des études expérimentales de ce travail de thèse sont associés à leur technique de brasage laser préférentielle et listés dans le Tableau 13.

Technique de brasage laser	Type de composant électronique	Référence
Multi-fibre	Résistance Montée en Surface	SR1206
		SR0805
	Condensateur Monté en Surface	SC1206
		SC0805
Boîtier de transistor à connexion courte (Small Outline Transistor SOT)	SOT23	
Scanner	Circuit intégré à faible encombrement (Small Outline Integrated Circuit SOIC)	SO16GT

Tableau 13 : Les procédés de brasage laser testés et leurs composants électroniques associés

Le brasage de composants électroniques par faisceau laser est étudié ici dans le but du développement de la technologie laser et pour une évaluation des assemblages réalisés. Les mesures de température sont effectuées en cours de procédé à l'aide d'un pyromètre optique. La précision de la mesure est sujette à certaines critiques. D'une part, la zone de mesure n'étant pas ponctuelle (surface circulaire de diamètre 0,6mm), elle est confrontée à un important gradient de température. Les procédés laser sont effectivement caractérisés par un gradient spatial de température qui rend la mesure interprétable seulement avec précautions [Mathieu 06]. D'autre part, le fort gradient temporel de température impose une fréquence d'enregistrement des mesures élevée (toutes les 5ms dans notre étude, ce qui est suffisant pour faire apparaître les principales caractéristiques thermiques des procédés de brasage traités ici).

10.3.2 Brasage laser multifibre

Le procédé de brasage laser multifibre requiert un outil laser équipé de plusieurs fibres optiques. Les faisceaux de laser à diodes émettent dans le proche infrarouge (« courtes longueurs d'onde » : ~800 ~900 nm). La technologie des fibres optiques leur est donc particulièrement adaptée.

Deux systèmes sont alors différenciables : soit un faisceau principal est divisé à l'aide de miroirs semi transparents pour être injecté dans différentes fibres optiques. Soit les faisceaux laser issus de plusieurs modules de diodes sont directement injectés dans leur fibre optique respective.

Lors de cette étude, le laser à diodes Thalès (TLD : Thalès Laser Diode) est équipé de trois modules de diodes laser connectés à trois fibres optiques distinctes. Les paramètres laser de chaque faisceau sont identiques : une longueur d'onde de 845 nm et une puissance contrôlable de 2 à 20W. Les fibres

optiques (diamètre 600µm) sont fixées sur un outil de positionnement (Figure 51). Les faisceaux laser issus des fibres optiques sont ensuite focalisés sur les pistes de report de composant par l'intermédiaire d'une lentille de focalisation : c'est un système d'imagerie. La dimension de la zone d'interaction du faisceau laser avec le joint à braser est contrôlée par la position et la distance focale de la lentille utilisée.

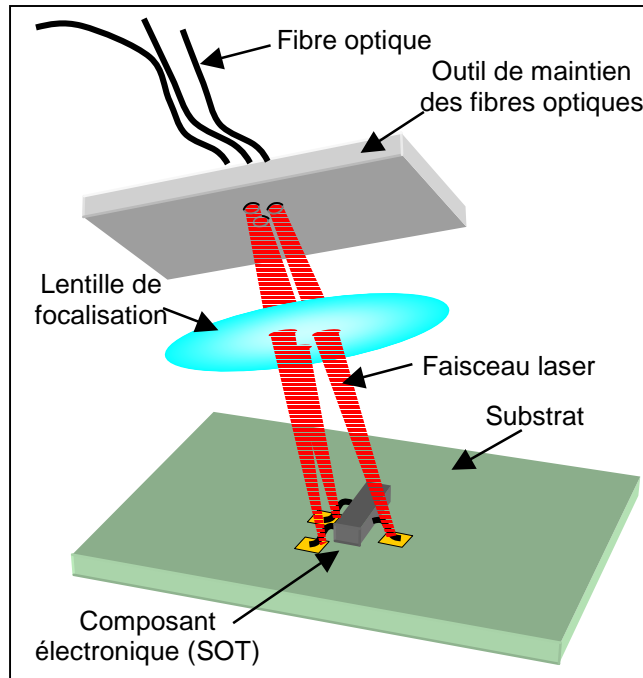


Figure 51 : Schéma du procédé de brasage laser multifibre d'un transistor

Finalement, l'écart entre les fibres optiques sur l'outil de positionnement et le grossissement induit par la lentille de focalisation permettent d'adapter la dimension de la zone d'interaction du faisceau laser à la taille des connexions à braser. Le brasage laser multifibre est utilisé pour l'assemblage de composants électroniques à deux (résistances, condensateurs) et trois (transistors) connexions. Parmi les trois fibres optiques, l'une d'elles est donc déconnectée afin de braser les composants à deux connexions. Les paramètres géométriques des faisceaux laser sont détaillés dans le Tableau 14.

Fibre optique $\varnothing = 600\mu\text{m}$ – focale de la lentille = 60mm					
Référence du composant électronique	Dimension de la piste de report (μm)	Ecart entre chaque piste de report : « pitch » (μm)	Ecart entre les fixations des fibres optiques (μm)	Grossissement du système optique	Diamètre de la zone d'interaction laser théorique (μm)
SOT 23	1300 x 800	2100 1800	2100 1800	1	600
SM 0805	1400 x 1100	1700	1100	1,5	900
SM 1206	1700 x 1200	2700	1800	1,5	900

Tableau 14 : Détails géométriques des pistes de report et du système optique utilisé

Le paramétrage de l'outil laser pour l'opération de brasage laser multifibre s'effectue suivant trois étapes :

- 1- Ajuster la dimension des zones d'interaction des faisceaux laser à la taille des pistes de report du composant à braser (le spot laser doit être au mieux inscrit dans la piste de report du composant)
- 2- Rechercher la puissance maximum du laser qui n'engendre pas de projection de microbilles d'alliage d'apport lors de l'évaporation des constituants volatils du flux.
- 3- Régler la durée d'interaction laser afin d'obtenir la fusion complète de l'alliage d'apport, et un mouillage conforme sur la piste de report et la patte du composant électronique.

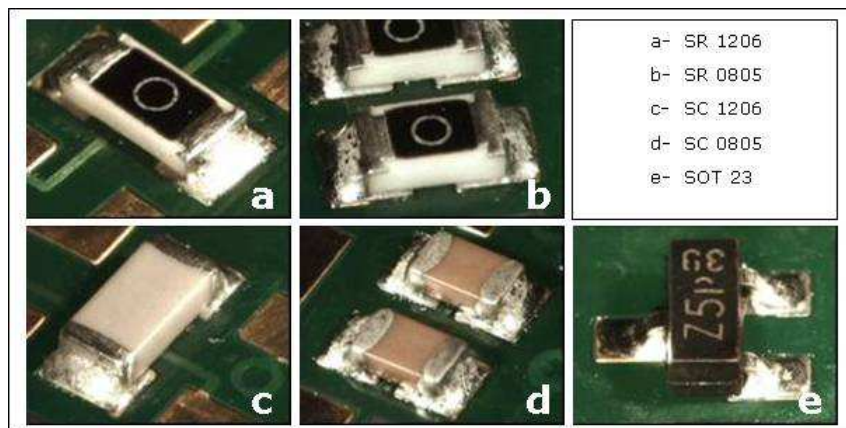


Figure 52 : Résultats du brasage laser multifibre des composants électroniques

La Figure 52 représente les résultats obtenus suite au brasage laser multifibre des différents composants électroniques traités. Les paramètres laser sont indiqués dans le Tableau 15. Ils dépendent principalement de la géométrie du composant électronique, de la quantité de matériaux d'apport et des caractéristiques du circuit électronique connecté aux pistes de report des composants. Ces paramètres sont donc différents d'un composant à l'autre. L'observation visuelle des assemblages indique que la qualité du mouillage est bonne et qu'elle répond à la norme IPC-A-610 basée sur le contrôle visuel des joints brasés. Ces résultats sont reproductibles et aucune projection n'apparaît à l'issue de l'opération de brasage laser.

Référence du composant électronique	Nombre de fibres optiques	Puissance de chaque faisceau laser (W)	Temps d'interaction (s)	Diamètre de la zone d'interaction laser mesurée (mm)
SOT 23	3	4,3	2,5	0,6
SM 0805	2	5,5	3,2	0,9
SM 1206	2	4,7	4,5	0,9

Tableau 15 : Paramètres laser pour le brasage laser multifibre de différents composants électroniques avec la crème à braser sans plomb sélectionnée

Les mesures de température effectuées en cours de procédé de brasage laser multifibre des Composants Montés en Surface (CMS) révèlent des discontinuités caractéristiques des principales étapes du procédé (Figure 53). Elles sont :

- 1- Fusion de l'alliage d'apport et auto centrage du composant électronique
- 2- Arrêt de l'interaction laser
- 3- Solidification du joint brasé

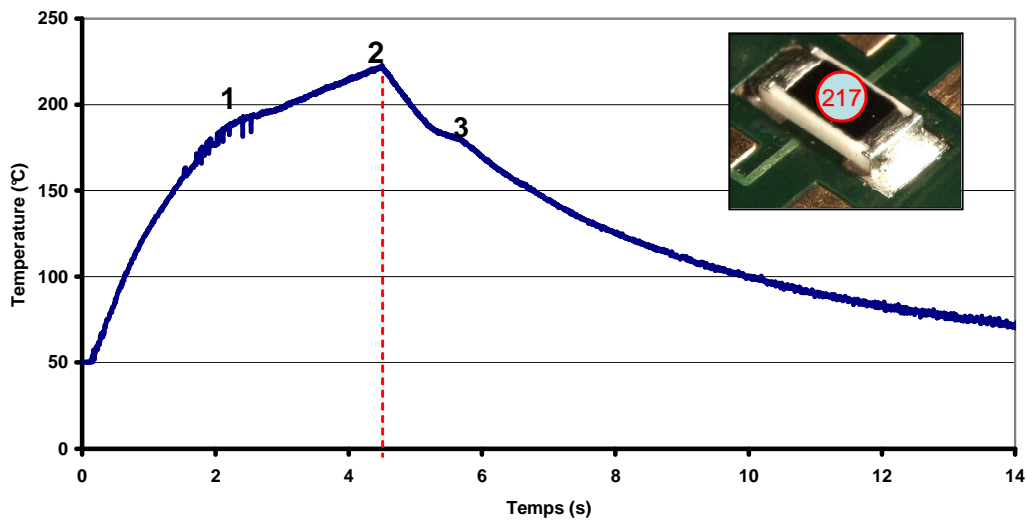


Figure 53 : Mesure de la température au centre d'un composant SM1206 lors de son opération de brasage laser multifibre

L'assemblage d'une dizaine de composants de type SM1206 permet de définir la température maximum atteinte au centre de la face supérieure du composant électronique : 217 ± 7 °C. Elle est équivalente à la température de fusion de l'alliage d'apport (217°C).

Le procédé de brasage laser multifibre devient critique lors du brasage d'un composant électronique dont les pistes de report sont connectées à des circuits de masses thermiques très différentes (Figure 54). « L'asymétrie » des circuits électroniques en terme de masse thermique peut aboutir à l'échec de l'opération de brasage laser multifibre. En revanche, l'assemblage de composants électroniques dont les pistes de report sont « symétriques » est un succès (Figure 55). Basée sur une étude numérique des transferts de chaleur, cette problématique est étudiée au cours de ce travail de thèse (Chapitre 3, paragraphe 5.2 : Influence du circuit électronique sur le paramètre laser). Des solutions y sont apportées afin de contrecarrer ce phénomène.

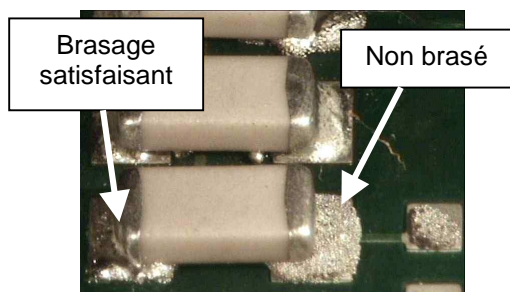


Figure 54 : Echec du brasage d'un composant électronique connecté à un circuit « asymétrique »

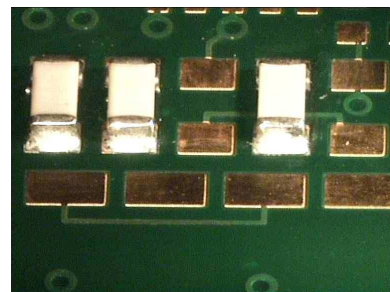


Figure 55 : Brasage laser multifibre de composants électroniques connectés à des circuits « symétriques »

10.3.3 Brasage laser scanner

Le principe du procédé de brasage laser scanner consiste en un tir ininterrompu et un déplacement rapide du faisceau de connexions en connexions. Le passage répété du faisceau sur les joints permet une élévation en température suffisante pour accomplir l'opération de brasage. Cette technique est particulièrement adaptée à l'assemblage de composants dotés de nombreuses connexions. Il s'agit par exemple de circuits intégrés à faible encombrement (Small Outline Integrated Circuit SOIC) ou de boîtiers plats quadrangulaires (Quad Flat Package QFP).

Un système de miroirs galvanométriques permet un déplacement rapide du faisceau laser sans que le circuit électronique à braser ne soit en mouvement. Le laser utilisé lors de cette étude est donc un laser à diodes équipé d'une tête scanner. Il émet un faisceau de longueur d'onde 940 nm et de puissance réglable de 10 à 175 W. La distance focale du système optique est de 297 mm, et la zone d'interaction du faisceau laser au plan focal est de diamètre 1,6 mm. La répartition énergétique au sein du faisceau est gaussienne (le faisceau diode est injecté dans une fibre optique pour être dirigé vers le système scanner. Le faisceau laser en sortie de fibre est alors un mélange de mode assimilé à une répartition gaussienne de l'énergie). La zone de travail accessible par le faisceau laser issu du système de miroirs galvanométriques est un carré de côté 130 mm.

La méthode permettant de définir les paramètres laser d'un procédé de brasage laser scanner est décrite ci-après :

- 1- Programmer le déplacement du faisceau laser de sorte que sa trajectoire recouvre l'ensemble des pattes du composant. Il est préférable que le départ du cycle laser s'effectue à l'écart de la première connexion afin que celle-ci reçoive la même énergie laser que les autres. Le trajet du faisceau laser pour le brasage du composant SO16GT consiste en deux lignes de 11 mm espacées de 6mm.
- 2- Une vitesse de déplacement du faisceau laser élevée permet d'homogénéiser au maximum l'apport d'énergie sur toutes les connexions. On atteint cependant les limites de l'outil laser lorsque la vitesse de déplacement du faisceau est trop élevée pour effectuer précisément la trajectoire désirée. La vitesse de déplacement du faisceau laser utilisée lors de cette étude est de 110 mm/s.
- 3- Rechercher la puissance maximum du laser qui n'engendre pas de projection de microbilles d'alliage d'apport lors de l'évaporation des constituants volatils du flux.
- 4- Régler la durée d'interaction laser (nombre de répétition du cycle) afin d'obtenir la fusion complète de l'alliage d'apport ainsi qu'un mouillage conforme sur la piste de report et la patte du composant électronique.

La Figure 56 schématise la trajectoire du faisceau laser autour du composant SO16GT.

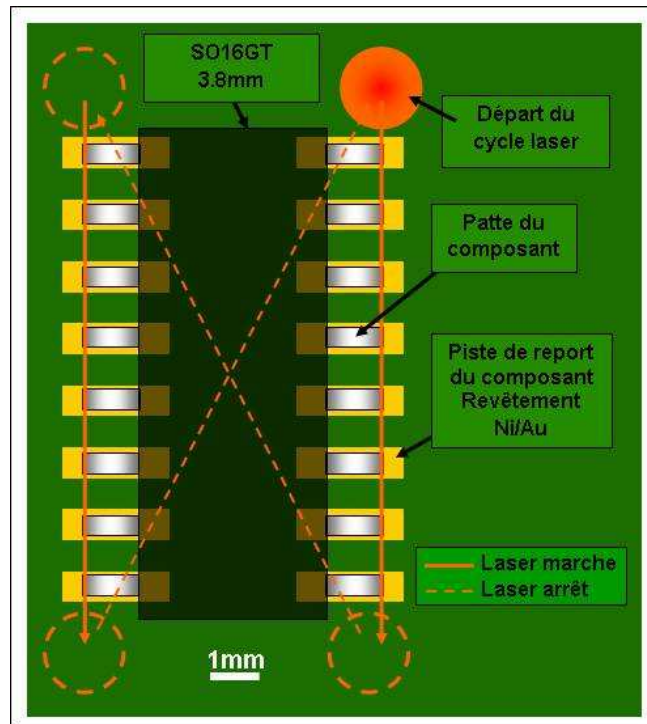


Figure 56 : Schéma du procédé de brasage laser scanner d'un SOIC

Le brasage laser scanner sans plomb des composants électroniques SOIC est un succès (Figure 57). Lors de ce procédé de brasage, le faisceau laser interagit avec la connexion du composant, mais également avec le substrat (Printed Circuit Board PCB). Ce dernier absorbe en partie l'énergie apportée par le faisceau laser ce qui induit un risque de surchauffe et de brûlure. L'étude paramétrique de ce procédé de brasage laser scanner pour les composants SO16GT aboutit aux résultats indiqués dans le Tableau 16.

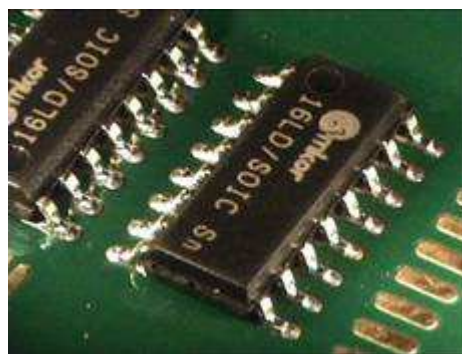


Figure 57 : Résultat du brasage laser scanner sans plomb des composants électroniques SO16GT

Référence du composant électronique	Puissance laser (W)	Vitesse de déplacement (mm/s)	Durée d'interaction (s)	Diamètre du spot laser (mm)	Trajet du faisceau
SO16GT	30	110	11	1,6	2 lignes de 11 mm chacune

Tableau 16 : Paramètres laser du brasage laser scanner d'un composant électronique SO16GT

L'examen visuel des connexions brasées de chaque composant révèle que le procédé est reproductible. Le mouillage est conforme à la norme IPC-A-610 et il n'existe aucune projection de microbille d'alliage sur le substrat (Figure 58).

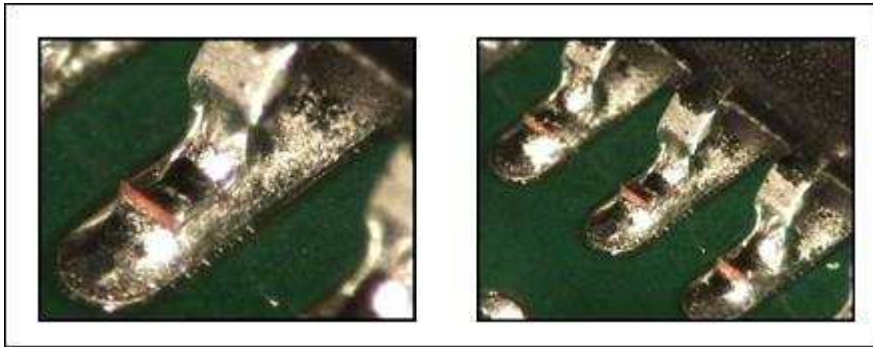


Figure 58 : Observation visuelle des joints brasés par le procédé de brasage laser scanner

En cours de procédé, il apparaît que toutes les connexions ne sont pas brasées simultanément. Les joints aux extrémités de chaque rangée de pattes du composant sont les derniers à être brasés. Un écart de température existe donc entre les différentes pattes d'un même composant. Finalement, lorsque les connexions aux extrémités sont brasées, le procédé laser est achevé. Les mesures de température en cours de procédé sont alors particulièrement pertinentes lors de l'assemblage de composants électroniques par le procédé de brasage laser scanner. Les températures maximales atteintes en divers endroits du composant électronique SO16GT sont indiquées sur la Figure 59. Les nombreux essais expérimentaux permettent de calculer une précision de mesure de $\pm 8 \text{ }^\circ\text{C}$.

En fin de procédé, la température mesurée sur une connexion à l'extrémité d'une ligne est équivalente

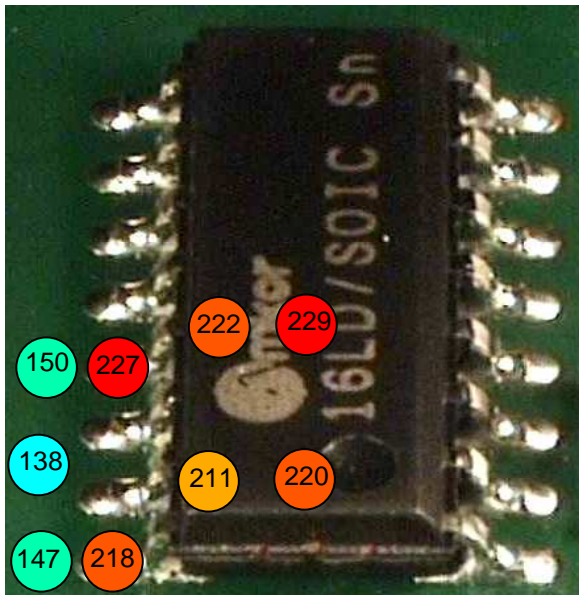


Figure 59 : Températures maximales en différents endroits du composant SOIC

à la température de fusion de l'alliage d'apport (217°C) ; alors que celle mesurée sur une des connexions « centrales » lui est supérieure d'environ 10°C . Un écart de température similaire est mesuré entre le centre du composant et son extrémité ($229 - 220 \text{ }^\circ\text{C}$ et $222 - 211 \text{ }^\circ\text{C}$). Ainsi, toute la partie centrale du composant atteint une température nettement supérieure à celle de son extrémité. Ceci est dû au transfert de chaleur par conduction à travers le composant. Les « connexions centrales » bénéficient de l'élévation en température des connexions qui leurs sont situées de part et d'autre. Ce phénomène peut conduire à l'impossibilité de braser convenablement ce type de composant si le

gradient de température devient trop important entre les connexions aux extrémités et les connexions centrales : Les connexions aux extrémités du composants ne seraient pas brasées alors que les connexions centrales seraient endommagées par leur surchauffe.

Les mesures de températures sur le substrat laissent présager une zone affectée thermiquement localisée. La température du substrat FR4 proche d'une connexion n'excède pas 150°C , et celle

mesurée entre deux connexions est inférieure à 140 °C. Ces mesures sont soumises à un important gradient spatial de température. La zone de mesure n'étant pas ponctuelle, les valeurs obtenues ne permettent qu'une appréciation approximative des champs de température.

La Figure 60 montre l'évolution temporelle en température distincte entre le centre du composant électronique et une de ses connexions centrales. La patte du composant subit une forte montée en température lors des premiers passages du faisceau laser. Puis les phénomènes d'évaporation des constituants volatils du flux et de fusion de l'alliage d'apport tendent à réduire cette élévation en température. Finalement, la température croît fortement de nouveau jusqu'au brasage complet des connexions situées aux extrémités du composant électronique. Le refroidissement du composant suite à l'arrêt de l'interaction laser révèle une discontinuité caractéristique de la solidification de l'alliage d'apport.

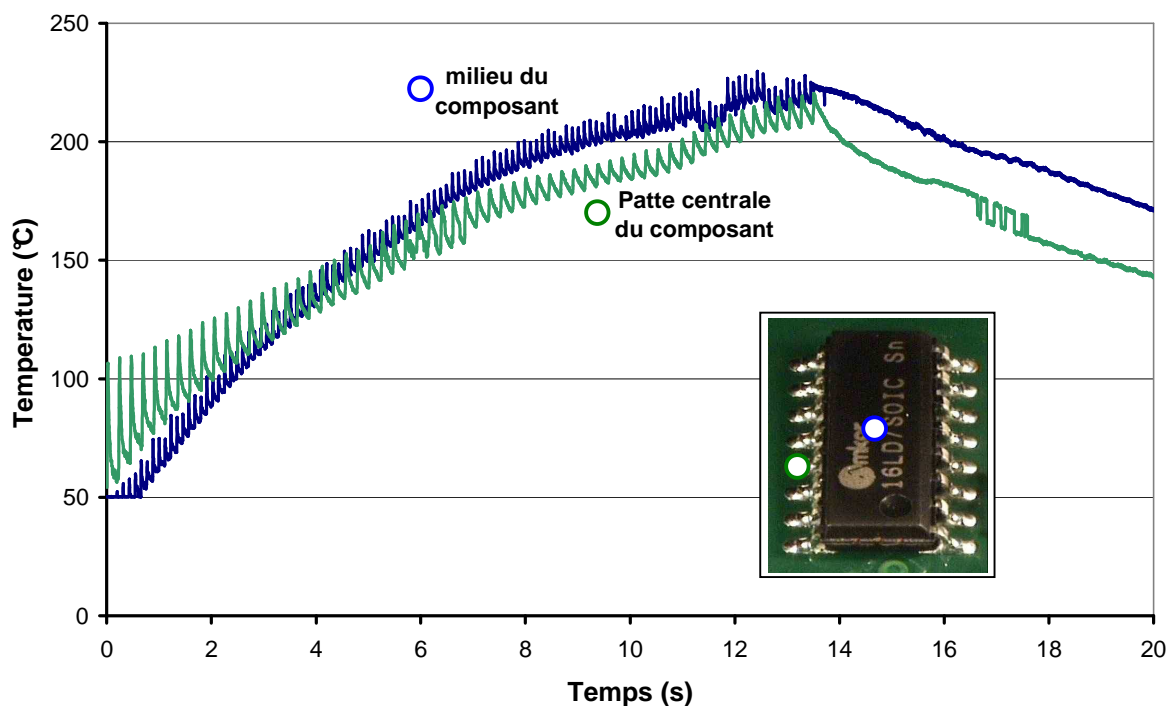


Figure 60 : Mesure de la température au centre du composant électronique et sur une de ses connexions centrales

Tout comme le procédé de brasage laser multifibre (détaillé dans le chapitre 10.3.2 précédent : Brasage laser multifibre), le procédé de brasage laser scanner devient critique lorsque les masses thermiques des circuits électroniques reliés à chaque patte du composant sont très différentes. Si pareil cas échoit, l'outil laser scanner permet de rediriger rapidement le faisceau, en fin de procédé, vers les connexions défectueuses afin de terminer l'opération de brasage par l'application d'une impulsion laser supplémentaire. L'idéal est de pouvoir s'affranchir de ce type d'ajustement, en adaptant les règles de tracé du circuit électronique au procédé de brasage laser employé. Basée sur une étude numérique des transferts de chaleur, cette problématique est étudiée au cours de ce travail de thèse (Chapitre 3, paragraphe 5.2 : Influence du circuit électronique sur le paramètre laser).

10.3.4 Evaluation des assemblages réalisés

L'évaluation des assemblages consiste en l'analyse microstructurale des joints brasés et l'étude de la résistance mécanique des composants électroniques sur le substrat. Ces travaux sont effectués sur les assemblages des composants SO16GT, brasés par la technique de brasage laser scanner.

L'analyse microstructurale de l'assemblage d'un composant SO16GT nécessite une coupe transversale des connexions brasées. L'échantillon est alors enrobé « à froid » dans une matrice résineuse pour permettre un polissage soigné. La Figure 61 classe les images obtenues avec différents grossissements lors de l'observation au microscope optique de la coupe d'une connexion centrale d'un composant SO16GT. Cet examen confirme une qualité de mouillage conforme, estimée d'abord visuellement. De plus, ces analyses ne révèlent aucun défaut de crème dans le joint brasé : le flux n'est pas resté piégé à l'intérieur du joint brasé lors de son évaporation. La surface du joint brasé est rugueuse par endroit : ceci est dû au refroidissement rapide de l'alliage et n'endommage pas la qualité de la brasure.

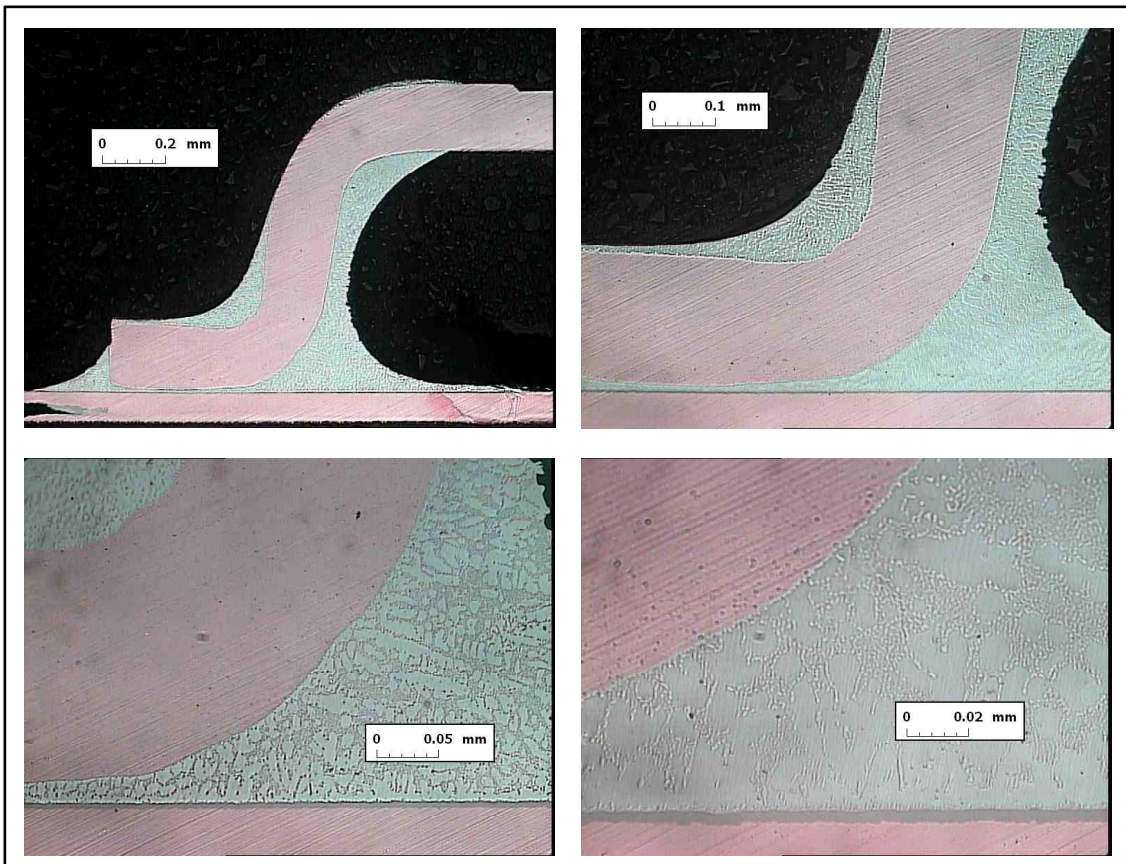


Figure 61 : Observation au microscope optique de la coupe d'une connexion centrale du composant SO16GT

L'échantillon ne subit aucune attaque chimique avant son observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB). Ces observations, accompagnées par une analyse EDX (Energy Dispersive X-ray), dévoilent la nature et l'épaisseur des intermétalliques présents aux interfaces de la connexion : l'interface piste de report – crème à braser (Figure 62) et l'interface composant – crème à braser (Figure 63). La couche d'intermétallique est visible aux deux interfaces. Son épaisseur est très réduite (inférieure à 1 μm) ce qui est caractéristique d'un procédé de brasage rapide tel que l'est le procédé

de brasage laser. L'épaisseur de la couche d'intermétallique dépend en effet de la température et de la durée d'interaction de l'alliage d'apport en fusion aux interfaces de l'assemblage. Les connexions centrales sont celles qui montent le plus haut en température lors du brasage laser scanner du composant SO16GT. On détermine ainsi que les épaisseurs des couches d'intermétallique de toutes les connexions du composant SO16GT brasées par la technique laser scanner sont inférieures ou égales à 1 μm . La nature des intermétalliques est conforme aux attentes. Il s'agit d'un alliage secondaire constitué de cuivre et d'étain à l'interface composant – crème à braser, et d'un alliage ternaire constitué de nickel, cuivre et étain à l'interface piste de report – crème à braser. La diffusion du cuivre inclus dans le matériau d'apport s'effectue uniquement vers la métallisation en nickel de la piste de report de composant. Ce phénomène est largement décrit dans la littérature et également observé lors de l'étude de faisabilité d'un assemblage de matériaux dissemblables du chapitre 10.29.5 : « Analyse métallurgique d'un assemblage céramique-composite » de ce travail de thèse.

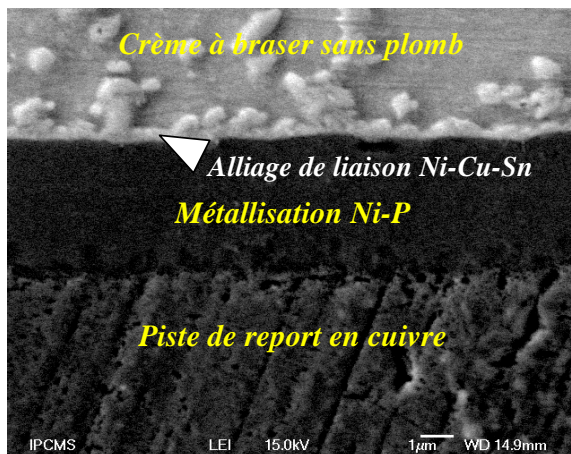


Figure 62 : Image MEB (mode LEI) à l'interface piste de report – crème à braser d'une connexion centrale du composant SO16GT

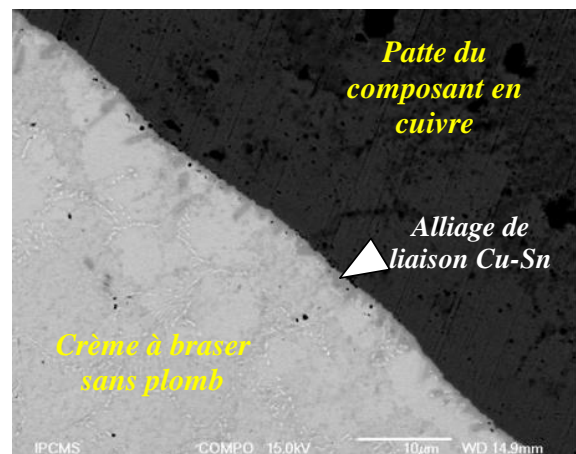


Figure 63 : Image MEB (mode BEI-COMPO) à l'interface composant – crème à braser d'une connexion centrale du composant SO16GT

Finalement, ces analyses microstructurales indiquent que l'opération de brasage du composant SO16GT par la technique de brasage laser scanner offre de très bons résultats. La qualité du mouillage de l'alliage d'apport est bonne, il n'apparaît pas de défaut au sein du joint brasé, et la formation des alliages de liaison assure une certaine tenue mécanique de l'assemblage tout en étant d'épaisseur très réduite ce qui est bénéfique lors du vieillissement de l'assemblage.

Les tests de résistance mécanique des composants SO16GT post brasage scanner permettent d'évaluer la tenue mécanique des assemblages. La configuration du test de résistance au déchirement de ces composants est illustrée sur la Figure 64. Elle est réalisée pour différentes durées de cycle de brasage laser (de 6 à 15 s), autour de la durée de cycle optimum (11 s) définie lors des essais expérimentaux. Deux types de revêtements de piste de report sont également comparés : une finition HASL (Hot Air Solder Leveling : métallisation d'un alliage fusible à base d'étain) et une finition Ni/Au. Les résultats des mesures sont indiqués sur la Figure 65. Ceux-ci permettent de définir la

fenêtre du procédé laser qui est comprise entre 10 et 12 secondes. Un cycle laser inférieur à 10 s ne permet pas de brasage convenablement la totalité des connexions du composant SO16GT (fusion et mouillage de l'alliage d'apport insuffisants sur les connexions situées aux extrémités du composant). Un cycle laser supérieur à 12 s engendre une surchauffe de l'assemblage et l'initiation de brûlures autour des pistes de report.

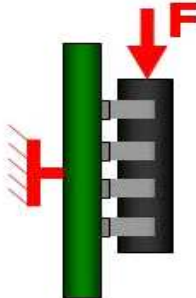


Figure 64 : Configuration du test de résistance au déchirement

Les durées de cycle de 10, 11 et 12 secondes mènent à une valeur moyenne de la résistance au déchirement des assemblages de 169 ± 11 N et 157 ± 10 N pour les finitions respectives Ni/Au et HASL. La comparaison de ces deux résultats n'est pas significative au regard du nombre des mesures et de leur écart type. On peut néanmoins conclure que la tenue mécanique du composant sur le substrat FR4 est excellente, quel que soit le type de revêtement testé (HASL ou Ni/Au). Lorsque la durée du cycle de brasage laser scanner est diminuée, toutes les connexions du composant électronique ne sont pas brasées. La résistance globale de l'assemblage est alors fortement réduite (Mesures avec une finition HASL : 100 N pour un cycle de 6 s contre 157 N pour un cycle de 11s).

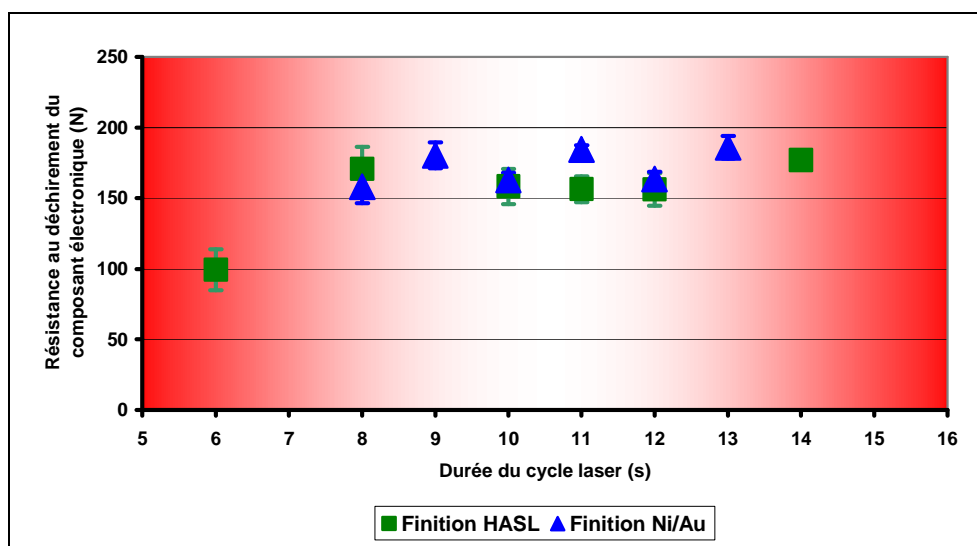


Figure 65 : Résistance au déchirement du composant SO16GT en fonction de la durée du cycle de brasage laser pour deux revêtements de piste de report différents

10.3.5 Conclusion

Parmi l'ensemble des techniques de brasage laser qu'il est possible de mettre en œuvre, ces recherches sont axées sur le développement du brasage laser multifibre et du brasage laser scanner. Chacun de ces procédés est particulièrement adapté à un type de composant électronique : le brasage laser multifibre permet l'assemblage des composants de deux voire trois connexions alors que le brasage laser scanner est utilisé pour l'assemblage de composants électroniques ayant une ou plusieurs rangées de connexions. Ces travaux ont tout d'abord permis de définir une procédure de recherche paramétrique pour chacune des deux techniques de brasage laser considérées. La mesure de la température en cours de cycle laser facilite cette recherche paramétrique et révèle la spécificité de chaque procédé. On constate alors que la température atteinte par chaque composant électronique n'excède pas 230°C environ, et qu'il s'agit d'un pic de température (durée d'interaction à température maximum très courte : généralement inférieure à la seconde). Ces mesures de température apportent également des informations sur les durées de brasage nécessaires à chaque connexion d'un composant brasé par la technique laser scanner. Ainsi, lorsqu'on utilise un balayage classique du faisceau laser sur les rangées de connexions, il existe un gradient de température entre les connexions centrales et celles situées aux extrémités du composant. Ceci peut être préjudiciable à l'opération de brasage si ce gradient de température est trop élevé. Un autre élément de criticité est observé lors du paramétrage des techniques de brasage laser : Il s'agit de la configuration du circuit électronique qui est connecté à chaque piste de report du composant. Les paramètres laser doivent être adaptés à la masse thermique que représente le circuit électronique lié à chaque connexion. Ceci peut induire des défauts d'assemblage dans le cas d'un procédé de brasage laser multifibre qui n'offre pas la possibilité de différencier l'apport énergétique sur chaque joint. Cette problématique est discutée lors des études numériques des transferts de chaleur et des solutions sont apportées pour s'en affranchir (Chapitre 3, paragraphe 5.2 : Influence du circuit électronique sur le paramètre laser). L'évaluation des assemblages brasés comporte une étude de l'aspect du joint par microscopie optique (Qualité du mouillage, de la fusion, présence de défauts...), une analyse microstructurale des alliages de liaison par Microscope Electronique à Balayage (Nature et épaisseur) ainsi que des tests mécaniques (résistance au cisaillement). Ces caractérisations portent sur l'assemblage d'un composant SOIC (Référence SO16GT) par le procédé de brasage laser scanner. Elles révèlent un niveau de qualité élevé tant par l'aspect du joint que par la finesse des couches d'intermétalliques et la tenue mécanique des assemblages de composants électroniques. Ces résultats sont obtenus avec une crème à braser fabriquée par notre partenaire industriel (Radiel-Fondam). Celle-ci est sélectionnée lors des études préliminaires pour ses propriétés physiques qui sont adaptées au procédé de brasage laser par interaction direct du faisceau (Paragraphe 10.2 : « Evaluation de la compatibilité d'une crème avec un procédé de brasage laser » de ce chapitre de thèse). L'amélioration du procédé de brasage laser passe à présent par une formulation de crème à braser spécifiquement conçue pour un procédé laser. Les recherches suivantes traitent donc de l'ajustement des propriétés optiques d'absorption de la crème à braser. L'optimisation de l'interaction laser – crème à braser devrait permettre de rendre le procédé de brasage plus efficace.

10.4 Tentative d'optimisation d'une crème à braser adaptée au brasage laser

10.4.1 Introduction

Au-delà de la sélection des caractéristiques usuelles d'une crème à braser (granulométrie, nature et quantité de flux, viscosité...), ces recherches se proposent d'améliorer leur absorption en vue d'un procédé de brasage laser. L'objectif est d'augmenter l'efficacité du procédé de brasage laser par un couplage faisceau - crème plus important. Les résultats d'ores et déjà obtenus révèlent les caractéristiques physiques d'une crème adaptée à un procédé de brasage laser par interaction directe du faisceau. Il s'agit d'un alliage Sn96,5Ag3Cu0,5 %massique de classe 3 (Granulométrie : 25-45 μ m), avec une viscosité de 600 Pa.s et contenant le flux référencé SP027 à hauteur de 11 %massique. Cette crème à braser sert alors de matériau de base pour cette campagne d'optimisation. Les premiers essais portent sur la définition d'un additif approprié à une absorption élevée d'un rayonnement émettant dans le proche infrarouge (cas des lasers à diodes et YAG). Cet additif doit être compatible avec la formulation initiale de la crème à braser.

La Figure 66 est une vue de la configuration de composants type SOIC précédant l'opération de brasage laser scanner. Le faisceau laser interagit en grande partie avec la crème à braser, et également avec la patte du composant électronique. La nouvelle formulation de crème à braser avec additif sera testée par son application pour le brasage d'un composant SOIC (Référence SO16GT). La qualité du joint brasé devra être au moins égale à celle d'un joint réalisé avec la crème à braser initiale (sans additif).

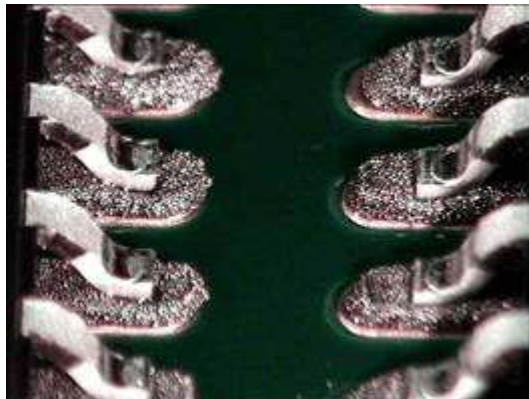


Figure 66 : Configuration des rangées de connexions de composants SOIC (Référence SO16GT) précédant l'opération de brasage

10.4.2 Essais préliminaires

Les premiers essais portent sur l'utilisation d'un additif industriel liquide à base de noir de carbone. Celui-ci est notamment utilisé dans l'industrie des procédés laser de soudage plastique pour sa propriété d'absorption élevée d'un rayonnement laser infrarouge. Il s'agit d'un colorant industriel

fabriqué par Acheson, contenant du noir de carbone et des solvants confidentiels. Ce produit liquide est facilement manipulable. Il est incorporé dans la crème à braser initiale à hauteur de 0,3 et 0,03 % massique. Ces nouvelles formulations de crème à braser sont ensuite testées selon la procédure de caractérisation développée précédemment (paragraphe 10.2.1 : Développement de la procédure expérimentale). Les résultats sont comparés à ceux obtenus avec la crème initiale.

Le Tableau 17 détaille les caractéristiques temporelles d'une impulsion laser de 20W menant à la condition optimale de fusion sur un substrat revêtu Ni/Au pour les différentes formulations de crème testées. On constate que la durée d'interaction laser est fortement réduite même avec un très faible taux d'additif inclus dans la crème à braser : le cycle laser est douze fois plus court avec la crème contenant 0,3 %massique d'additif et 4,5 fois plus court avec la crème contenant 0,03 %massique d'additif. Ces résultats sont entièrement en faveur de l'utilisation d'un additif pour rendre le procédé de brasage laser plus efficace. Il est cependant nécessaire de soumettre ces crèmes à braser de nouvelle formulation aux tests normalisés de coalescence et de mouillabilité.

	Sans additif liquide	+ 0,03 %massique d'additif liquide	+ 0,3 %massique d'additif liquide
Traitement de surface du substrat	Nickel/or	Nickel/or	Nickel/or
Rampe de montée en puissance (s)	0,2	0,4	0,9
Durée d'interaction à 20W (s)	12	2,3	0,1
Rampe d'extinction (s)	0,01	0,01	0,01
Durée totale du cycle laser (s)	12,21	2,71	1,01

Tableau 17 : Caractéristiques temporelles d'une impulsion laser de 20W menant à la condition optimale de fusion sur un substrat revêtu Ni/Au, en fonction du taux d'additif industriel liquide

Le Tableau 18 illustre les résultats des tests de coalescence et mouillabilité des crèmes à braser de différente formulation testées. Il apparaît qu'un taux de 0,3 %massique d'additif engendre une mauvaise mouillabilité sur le substrat en cuivre. Cette crème échoue également au test de coalescence : la surface de la bille d'alliage refondue est très granuleuse. Le taux maximum d'additif liquide noir de carbone compris dans une crème satisfaisant les tests de mouillabilité et coalescence est d'environ 0,03 %massique.

Au-delà de ces considérations, on remarque que les crèmes à braser contenant l'additif liquide industriel noir de carbone tendent à durcir prématurément lors de leur stockage. On peut supposer la formation d'un composant volatil à température ambiante qui assèche la crème à braser avec additif au cours de son évaporation. Il y a donc incompatibilité entre les solvants du flux et ceux de l'additif liquide.

En conclusion, le colorant liquide testé, bien que très prometteur, n'est pas utilisable comme additif pour la crème à braser. Il est alors décidé de travailler avec du noir de carbone seul comme additif afin de supprimer tout solvant supplémentaire à la formulation de la crème à braser.

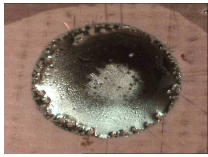



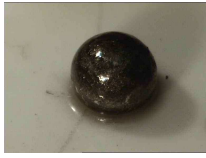

	Sans additif liquide	+ 0,03 %massique d'additif liquide	+ 0,3 %massique d'additif liquide
Tests de mouillabilité (substrat cuive)			
Tests de coalescence (substrat alumine)			

Tableau 18 : Résultats des tests de coalescence et mouillage en fonction du taux d'additif industriel liquide inclus dans la crème à braser

10.4.3 Tests d'un additif noir de carbone

Un nouvel additif noir de carbone (noir de fumée) est incorporé dans la formulation initiale de la crème à braser. Trois nouvelles crèmes à braser sont ainsi fabriquées avec 0,03 %massique, 0,06 %massique et 0,09 %massique d'additif. Elles sont conformes aux tests standards de coalescence et de mouillabilité réalisés par la société Radiel-Fondam. De plus, cet additif solide n'engendre aucune modification de la consistance des crèmes à braser (pas de durcissement comme avec les solvants de l'additif liquide précédent).

La méthode de caractérisation du comportement de ces crèmes à braser sous interaction directe d'un faisceau laser est sensiblement identique à celle décrite dans le paragraphe 10.2.1 : « Développement de la procédure expérimentale ». Seule la dimension de la zone métallisée est modifiée. Celle-ci représente à présent un carré dont la surface ne peut plus être considérée comme infinie par rapport à la zone d'interaction laser. Chaque surface métallisée est utilisée pour quatre essais de caractérisation : la vue de dessus des nouvelles configurations de test est illustrée sur la Figure 67.

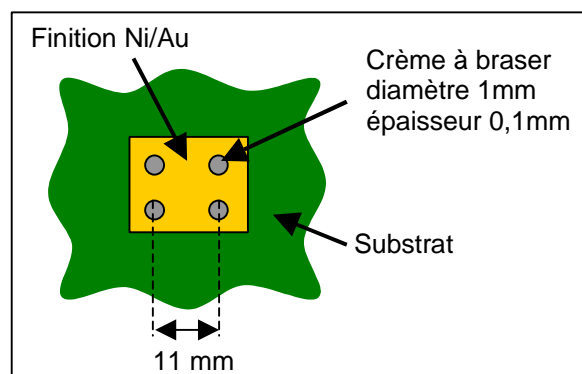


Figure 67 : Nouvelle configuration du test des crèmes à braser soumises à un faisceau laser

Cette modification de la configuration de la zone de test est liée à la disponibilité accrue de ce support auprès du partenaire industriel en charge l'approvisionnement. Ce changement n'affecte cependant pas les résultats de l'étude puisqu'il s'agit d'une étude comparative – entre différents comportements de matériaux sous faisceau laser.

La recherche des paramètres laser nécessaires à la refusion de chaque crème à braser est utilisée comme moyen de comparaison. Le Tableau 19 indique les résultats issus des essais de caractérisation. On constate alors que la durée de cycle laser pour la refusion complète d'une crème à braser décroît avec son taux d'additif noir de carbone de plus en plus important. Plus il y a de particules de noir de carbone absorbantes dans la crème à braser, plus le faisceau laser induit une élévation de la température de la crème à braser rapide. L'emploi d'un additif n'engendre cependant pas un surcroît de projection d'alliage. En revanche, on observe dans les résidus de flux la présence de noir de carbone. Ce phénomène peut être très préjudiciable à un procédé de brasage sans nettoyage (« no-clean ») : les résidus carbonés peuvent induire des courts-circuits sur la carte électronique. La présence de ces résidus n'est donc pas désirée. Le gain de temps de brasage par l'usage d'un additif noir de carbone est inutile s'il est ensuite nécessaire d'ajouter un procédé de nettoyage du circuit électronique.

Finalement, la validation du principe de l'utilisation d'un additif absorbant passe par la réalisation de prototypes. Le chapitre suivant traite du brasage laser scanner d'un composant type SOIC avec une crème à braser contenant un additif noir de carbone. Une attention particulière devra être portée sur l'aspect et la nature des résidus de flux sur le substrat.

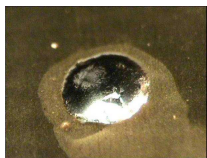
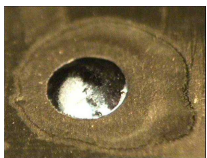

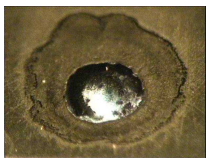
Type de crème à braser	<i>Crème à braser sans noir de carbone</i>	<i>Crème à braser avec 0,03 %massique de noir de carbone</i>	<i>Crème à braser avec 0,06 %massique de noir de carbone</i>	<i>Crème à braser avec 0,09 %massique de noir de carbone</i>
Durée du cycle laser	10 000ms	3 000 ms	2 400 ms	500 ms
Photographie du plot de crème refondu				

Tableau 19 : Résultats des tests de refusion des crèmes à braser en fonction de leur taux d'additif noir de carbone

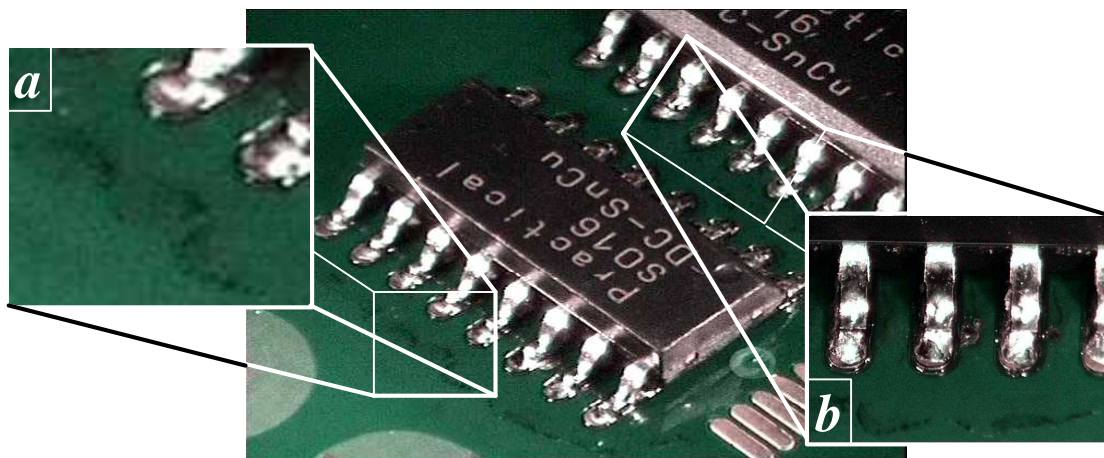
10.4.4 Application du brasage laser avec la crème contenant un additif noir de carbone

Le procédé de brasage laser scanner est utilisé pour l'assemblage de composants électroniques type SOIC (Référence SO16GT). Ce procédé est détaillé dans le paragraphe 10.3.3 de ce chapitre de thèse : « Brasage laser scanner ». Le même procédé est employé pour la validation de la crème à braser contenant un additif noir de carbone. Il est alors possible de comparer ces résultats d'expérimentation avec ceux obtenus précédemment en utilisant la crème sans additif.

Les paramètres de l'outil laser pour le brasage du composant SO16GT avec la crème à braser sans additif sont indiqués dans le Tableau 16 (page 98). La puissance laser est de 30 W, sa vitesse de déplacement de 110 mm/s, le diamètre d'interaction du faisceau de 1,6 mm et la durée d'interaction de 11 s. Ces paramètres mènent à une opération de brasage réussie du composant électronique SO16GT, dont l'aspect des joints est conforme à la norme IPC-A-610. Cette étude a aussi permis de montrer l'existence d'un gradient de température entre les différentes connexions du composant électronique lors du procédé de brasage laser scanner.

La recherche paramétrique de ce procédé est également conduite avec les crèmes à braser contenant 0,03 %massique, 0,06 %massique et 0,09 %massique d'additif noir de carbone. On observe alors une forte réduction de la durée de cycle laser permettant la fusion complète du matériau d'apport. Cependant le procédé devient très critique, tant et si bien que les taux d'additif de 0,06 %massique et 0,09 %massique sont inutilisables : il y a initiation de brûlures proche des connexions centrales avant le brasage complet des connexions aux extrémités du composant.

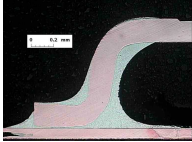
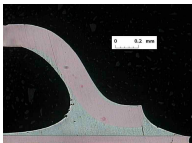
La crème à braser contenant 0,03 %massique d'additif noir de carbone induit également un procédé de brasage laser scanner critique et donc peu reproductible. La Figure 68 illustre certains résultats obtenus avec cette formulation de crème à braser. Il n'existe pas de paramètre laser optimum dû au manque de reproductibilité du procédé – Initiation de brûlures sur la Figure 68 (b). Néanmoins, les meilleurs paramètres laser font état d'une durée de cycle de 6 s (contre 11 s avec une crème sans additif). On observe alors une nette diminution de la durée de cycle du procédé laser.



**Figure 68 : SO16GT brasé avec la crème contenant 0,03 %massique de noir de carbone
(a) Présence de résidus carbonés (b) Initiation de brûlures proches des connexions centrales**

Concernant les résidus de flux présents sur le substrat – Figure 68 (a), on constate qu'ils contiennent une importante partie du noir de carbone inclus dans la crème à braser. La présence d'un flux potentiellement conducteur sur une carte électronique est inacceptable et nécessite son nettoyage approfondi. Le gain de temps acquis lors du procédé de brasage est alors perdu pendant l'opération de nettoyage de la carte électronique.

Le principe de l'utilisation d'un additif absorbant n'est cependant pas remis en cause. Les diverses analyses des joints réalisés avec la crème contenant 0,03 %massique indiquent que malgré une durée de cycle bien plus courte, les propriétés mécaniques et métallurgiques des assemblages sont identiques (Tableau 20).

Type de crème à braser	brasage laser scanner du SO16GT	Aspect du joint : microscope optique	Etude mécanique	Analyse métallurgique : Microscope Electronique à Balayage	
	Durée du cycle laser (s)	Qualité du mouillage	Résistance au cisaillement du SO16GT (N)	Nature des IMC*	Epaisseur des couches d'IMC*
<i>Crème à braser sans noir de carbone</i>	11	 Convenable	169 ± 11	Cu ₆ Sn ₅ et (Cu,Ni) _x Sn _y	~ 1 µm
<i>Crème à braser avec 0,03 %massique de noir de carbone</i>	6	 Convenable	172 ± 10	Cu ₆ Sn ₅ et (Cu,Ni) _x Sn _y	~ 1 µm

* IMC : Alliages de liaison (Inter-Metallic Compounds)

Tableau 20 : Evaluation du brasage laser scanner d'un composant SO16GT avec une crème à braser sans additif et une crème à braser contenant 0,03% massique de noir de carbone

10.4.5 Conclusion

Le noir de carbone est reconnu pour son excellente absorption d'un rayonnement émettant dans le proche infrarouge : il est pour cela utilisé dans l'industrie du soudage plastique par faisceau laser. Ici, il fait l'objet de recherches sur un additif à inclure dans la formulation d'une crème à braser afin de la rendre plus absorbante au faisceau laser.

Les premiers résultats montrent qu'un liquide industriel à base de noir de carbone n'est pas conciliable avec la formulation initiale de la crème à braser : elle se durcit probablement dû à une incompatibilité des différents solvants (non révélés par le fournisseur).

Un additif noir de carbone pur est ensuite testé. Son application pour le brasage laser scanner d'un composant SO16GT indique que l'emploi d'un additif absorbant dans la crème à braser permet de réduire fortement les temps de cycle. Le taux d'additif doit cependant être adapté afin de permettre un assemblage réussi dans le cas du procédé laser scanner. Ce procédé induit en effet un gradient de température entre les différentes connexions qui devient critique lors de l'utilisation d'une crème à braser trop absorbante. De plus, l'additif noir de carbone se retrouve dans les résidus de flux en fin de procédé de brasage : les propriétés de conduction de cet additif induisent donc des risques de courts-circuits sur la carte électronique lors d'un procédé « no-clean » (pas de nettoyage de la carte électronique post opération de brasage). Or, le gain de temps de brasage par l'usage d'un additif noir de carbone est inutile s'il est ensuite nécessaire d'ajouter un procédé de nettoyage du circuit électronique.

L'idée d'un ajout noir de carbone s'est imposée initialement (excellente absorption du rayonnement laser, déjà utilisé dans l'industrie laser et c'est un produit très bon marché). Cependant, un autre type de colorant absorbant, cette fois non conducteur, serait sans doute mieux adapté (peut-être le bleu de méthylène ?). Les résidus de flux contenant un additif non conducteur sont moins néfastes à la qualité du brasage d'un circuit électronique.

On remarque néanmoins que l'ajout de fibres de carbone à la formulation d'alliages de brasure, cette fois dans le but d'améliorer leurs propriétés mécaniques, a déjà fait l'objet de recherches fructueuses [Ho 90]. De même, l'incorporation de nanotubes de carbone multifeuillets, effectuée dans le cadre de l'optimisation des propriétés mécaniques du joint braser, mène à de très bons résultats [Nai 06]. Les conclusions de ces travaux récents indiquent que plus le taux de nanotube de carbone incorporé dans l'alliage de brasure est important, plus la densité et le coefficient thermique d'expansion du matériau décroissent et plus ses propriétés de mouillage augmentent, pour une température de fusion inchangée. Finalement, l'ajout de nanotubes de noir de carbone s'avère d'une part profitable aux propriétés mécaniques du joint braser, et d'autre part, il pourrait améliorer le procédé de brasage laser en réduisant les temps de cycles.

10.5 Conclusion des essais de brasage

Les travaux de recherche accomplis sont d'un double intérêt : il s'agit d'une part de l'étude de l'interaction d'un rayonnement laser avec une crème à braser, et d'autre part du développement de techniques de brasage laser appliquées à la fabrication de cartes électroniques. Ces deux volets sont, de fait, fortement liés : l'application des techniques de brasage laser sert de validation pour les crèmes à braser testées.

Une méthode de caractérisation des crèmes à braser est introduite afin d'étudier leur comportement sous l'interaction d'un rayonnement laser émettant dans le proche infrarouge. Les conclusions résultant de ces essais définissent les caractéristiques préférentielles d'une crème à braser à « usage laser ». Une faible quantité de flux ainsi qu'une viscosité de crème à braser réduite permettent de diminuer les projections d'alliage de brasure lors d'une évaporation trop soudaine des composants volatils au cours d'une l'interaction laser. Ces essais ont également permis d'apprécier une qualité de mouillage supérieure des crèmes contenant un flux sans halogénure (SP027). Ces formulations de flux et crèmes à braser appartiennent à notre partenaire industriel Radiel-Fondam qui ne souhaite pas communiquer sur leur nature exacte. Les natures de flux contenus dans les crèmes à braser sont d'un intérêt crucial et sont donc sous couvert de confidentialité. Chaque fabricant de crème à braser dispose de ses propres formulations protégées par le secret industriel. Ceci n'empêche cependant pas d'effectuer des tentatives d'optimisation de ces crèmes à braser pour une application à une opération de brasage laser. Dans cette optique, la sélection d'un additif adéquat à incorporer dans la formulation des crèmes permet d'augmenter leur propriété d'absorption d'un rayonnement proche infrarouge. L'ajout d'un additif noir de carbone semble indiqué pour obtenir les résultats escomptés. La validation des crèmes ainsi réalisées aboutit à un cycle de brasage laser scanner d'un composant SO16GT réduit de presque moitié (6 secondes avec additif contre 11 auparavant). Cependant, au-delà d'une criticité de procédé accrue, l'additif noir de carbone n'est pas entièrement satisfaisant en ce sens qu'il induit des résidus de flux carbonés potentiellement conducteurs sur la carte électronique. Un procédé de nettoyage est alors vivement recommandé pour éviter tout risque de court-circuit sur la carte électronique.

Le développement de la technique de brasage laser accompagne inévitablement l'étude de l'interaction directe d'un faisceau laser sur une crème à braser. Ce développement permet la

réalisation de prototypes en vue notamment de la validation des crèmes à braser testées. Parmi l'ensemble des techniques de brasage laser énoncées en introduction, ce sont les techniques de brasage laser multifibre et scanner qui sont précisément détaillées lors de cette étude. Elles permettent le brasage de composants électroniques distincts : Le procédé de brasage laser scanner est particulièrement adapté à l'assemblage de composants disposant de rangées de connexions (SOIC, QFP...) alors qu'un procédé de brasage laser multifibre est plutôt utilisé dans le cas de composants électroniques ayant un nombre de connexions réduit (2 voire 3 connexions : SC, SR, SOT...). L'évaluation des différents prototypes réalisés révèle une qualité de brasure au moins égale à celles de procédés conventionnels (bon mouillage, présence d'un l'alliage de liaison...). La particularité d'un procédé laser rapide induit une finesse de structure du joint brasée excellente (faible épaisseur des alliages de liaison par exemple) qui laisse présager une résistance au vieillissement de l'assemblage supérieure.

Finalement, les principales avancées technologiques issues de ces travaux sont la définition des meilleures caractéristiques d'une crème à braser pour application laser, l'évaluation des avantages et limitations d'un additif absorbant tel que le noir de carbone et le développement détaillé des techniques de brasage laser multifibre et scanner.

11 Conclusion

Les partenaires industriels associés aux projets touchant le développement du procédé de brasage laser ont naturellement offert la possibilité de traiter de sujets technologiques d'actualité dans un milieu soumis notamment aux contraintes économiques et environnementales. Ainsi, la prise en compte des accords et traités visant à « un monde plus propre » accompagne l'ensemble de ces travaux de recherche. De plus, les solutions les moins coûteuses et donc les plus économiquement viables guident les différents choix effectués lors de ces développements. Au-delà de ces considérations, le développement d'une nouvelle technologie doit en premier lieu apporter une réelle plus-value aux solutions déjà existantes sur le marché. L'outil laser utilisé comme apport énergétique au brasage tendre offre aujourd'hui de réelles perspectives de développement pour ce procédé.

Les recherches menées lors de ces études expérimentales sont orientées vers des cas concrets d'application du brasage laser. Les avantages et particularités d'un tel procédé permettent ici d'aboutir à la réalisation de différents prototypes issus des domaines de la micromécanique et de l'électronique. La première partie de ces travaux est axée sur la problématique de l'assemblage de matériaux dissemblables. Le détail du procédé laser, les choix des matériaux et de leur traitement de surface, les études de faisabilité du procédé et l'évaluation des assemblages brasés mènent à la fabrication d'une micro-fraise. Les tests portés sur ce démonstrateur, initialement prévu pour un usage médical, montrent que davantage de développements sont encore nécessaires, notamment pour rendre ce prototype biocompatible. De plus, la tenue mécanique de cet outil d'usinage n'est pas encore optimum. Ces travaux ont néanmoins permis de démontrer la faisabilité de l'assemblage de matériaux dissemblables par la technique de brasage laser. Les tests réalisés sur les échantillons indiquent une voie de recherche à adopter afin d'améliorer la tenue mécanique des l'assemblages : il s'agit d'un travail sur l'attaque chimique de la pièce d'alumine lors de son traitement de surface.

La seconde partie de ces travaux expérimentaux est basée sur l'interaction directe du faisceau laser sur le matériau d'apport qui est sous forme de crème à braser. Ce type d'interaction correspond typiquement au procédé de brasage laser rencontré dans le domaine de l'électronique. L'assemblage de composants électroniques est l'application du procédé de brasage tendre la plus répandue. Il peut exister une multitude de joints à braser sur une même carte électronique, de même qu'il existe énormément de configurations de composant différentes. Les résultats de ces recherches montrent que la flexibilité de la technologie laser permet d'adapter l'apport énergétique en fonction du composant à braser. Les techniques de brasage laser multifibre et scanner sont alors développées et leur utilisation détaillée pour le brasage respectif de composants à 2 ou 3 connexions et de composants constitués de rangées de connexions. Le développement de ces techniques de brasage laser sert également de moyen de validation pour les recherches portées sur les crèmes à braser. La première étape de ces recherches permet de définir les caractéristiques adéquates d'une crème à braser pour une application laser. Celle-ci doit principalement avoir une viscosité élevée et une faible quantité de flux. Ces recherches sont conclues par une tentative d'optimisation de ces crèmes à braser, et par l'analyse critique de l'ajout d'un additif absorbant dans leur formulation. Le choix du noir de carbone permet d'obtenir un gain de temps de cycle important pour le brasage d'un composant

SO16GT par brasage laser scanner. En revanche, il induit une criticité accrue du procédé de brasage et des dépôts non désirables sur le circuit électronique. Des résultats de recherches concluants existent déjà sur l'incorporation de fibres de carbone et de nanotubes de carbone en vue d'une amélioration des propriétés mécaniques du joint brasé. Finalement, dans la mesure où une solution est trouvée en ce qui concerne les résidus de flux, un additif carboné peut présenter un double avantage : d'une part il permet de réduire les temps de cycle de brasage laser, et d'autre part il induit de meilleures propriétés mécaniques aux joints brasés.

12 Références

- [Beckett 99] P.M. Beckett, A.R. Fleming, J.M. Gilbert, D.G. Whitehead, The laser in manufacture – its use in the soldering of electronic assemblies, *Trans. Inst. Meas. Control* 21 (1) (1999) 2-7
- [Berkovitz 97] H. Berkowitz, J. Walvoord, Laser soldering of fine pitch SMT devices, *Soldering & Surface Mount Technology* 9 (3) (1997) 41-43
- [Bohman 74] C.F. Bohman, The laser and microsoldering, Society of Manufacturing Engineers; Technical paper N°AD74-810, Mich. 48128 , p.19
- [Brandner 00] M. Brandner, G. Seibold, C. Chang, F. Dausinger, H. Hügel, Soldering with solid state and diode lasers: energy coupling, temperature rise, process window, *J. Laser Appl.* 12 (5) (2000) 194-199
- [Chabocovsky 93] R. Chabocowsky, J. Nicolics, L. Musiejovsky, Investigation of a laser soldering process for the interconnection of thin film sensors with sputtered multilayer metallizations, *J. Vac. Sci. Technol. A* 11 (4) (1993) 1464-1469
- [Chouta 03] P. Chouta, A. Rae, Automating optoelectronics soldering, *Proceedings Optoelectronic Microsystems International 2003*, Carleton university, Ottawa, Canada
- [COH 02] COHERENT, Application Tech Note, Soldering with high-power diode laser – Process optimisation, 2002
- [Felipe 94] T.S. de Felipe, D. O’Laughlin, Laser soldering of Sn-Ag solder, 75th Annual Meeting, American Welding Society, 1994, Philadelphie
- [Flanagan 96] A. Flanagan, A. Conneely, T.J. Glynn, Applications of high-power lasers in electronic assembly, *Key Eng. Mater.* 118 (119) (1996) 147-154
- [Ho 02] C.E. Ho, R.Y. Tsai, Y.L. Lin, C.R. Kao, Effect of Cu concentration on the reactions between Sn-Ag-Cu solders and Ni, *J. Electron. Mater.* 31 (6) (2002) 584-590
- [Ho 03] C.T. Ho, D.D.L. Chung, Carbon fibre reinforced tin-lead alloy as a low thermal expansion solder perform, *Journal of Material Research*, 5 (6) (1990) 1266-1270
- [Hoult 04] T. Hoult, Laser solutions for soldering, *Circuits Assembly*, février 2004
- [IRE 01] IREPA LASER, La lettre de l’IREPA LASER n°20, décembre 2001
- [Kara-Slimane 96] A. Kara-Slimane, Assemblages metal-céramique (oxyde, nitrure) par metallisation brasage : influence des interactions chimiques dans les zones interfaciales, Thèse de l’Ecole Centrale de Lyon, 1996
- [Kim 02] K.S. Kim, S.H. Huh, K. Sukanuma, Effects of cooling speed on microstructure and tensile properties of Sn-Ag-Cu alloys, *Material Science and Engineering, A* 333 (2002) 106-114
- [Kim 03] K.S. Kim, S.H. Huh, K. Sukanuma, Effects of intermetallic compounds on properties of Sn-Ag-Cu lead-free soldered joints, *Journal of alloys and Compounds*, 352 (2003) 226-236

- [Kordás 06] K. Kordás, A.E. Pap, G. Tóth, M. Pudas, J. Jääskeläinen, A. Uusimäki, J. Vähäkangas, Laser soldering of flip-chips, *Optics and Lasers in Engineering*, 44 (2006) 112-121
- [Lee 01] J.H. Lee, W.Y. Kim, D.H. Ahn, Y.H. Lee, Y.S. Kim, Laser soldering for chip-on-glass mounting in flat panel display application, *Journal of Electronic Materials*, 30 (9) (2001) 1255-1261
- [Leuzinger 04] A. Leuzinger, Selecting laser selective soldering, *Industrial Laser Solutions*, Février 2004, <http://ils.pennnet.com>
- [Lish 81] Lish, F. Earl, Laser attachment of components to printing wiring board, Internal report, Martin Marietta, 1981
- [Mathieu 06] A. Mathieu, S. Matteï, A. Deschamps, B. Martin, D. Grevey, Temperature control in laser brazing of a steel/aluminium assembly using thermographic measurements, *NDT&E International* 39 (2006) 272-276
- [Nai 06] S.M.L. Nai, J. Wei, M. Gupta, Improving the performance of the lead-free solder reinforced with multi-walled carbon nanotubes, *Materials Science and Engineering A* 423 (2006) 166-169
- [Nicolics 92 a] J. Nicolics, R. Chabicovsky, Th. Riegler, Laser soldering of thin film sensors, *IEEE/ISHM'92 IEMT Symposium*, Germany
- [Nicolics 92 b] J. Nicolics, L. Musiejovsky, E. Semerad, Optimisation of process parameters for laser soldering surface mounted devices, *IEEE Transaction on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology* 15 (6) (1992) 1155-1159
- [Qin 01] I. Qin, R. Taylor, S. Davey, C. Sanders, Challenges in high yield fine pitch solder ball attachment, SEMI, Semicon Singapore, Semiconductor Packaging Conference, May 2001
- [Rahn 00] A. Rahn, Soldering with diode lasers, *Surface Mount Technology*, Mai 200, pp. 78-80, <http://smt.pennnet.com>
- [Shiau 02] L.C. Shiau, C.E. Ho, C.R. Kao, Reactions between Sn-Ag-Cu lead-free solders and the Au/Ni surface finish in advanced electronic packages, *Solder. Surf. Mount Technol.* 14 (3) (2002) 25-29
- [Steele 06] R.V. Steele, Price erosion puts diodes in the doldrums, Review and forecast, part2: Diode lasers, *Optoelectronics Report*, février 2006
- [Suenaga 87] N. Suenaga, N. Nakazomo, H. Tsuchiya, Laser soldering, *Weld. Tech.* 35 (6) (1987) 58-65
- [Tian 02] Y. Tian, C. Wang, X. Ge, P. Liu, D. Liu, Intermetallic compounds formation at interface between PBGA solder ball and Au/Ni/Cu/BT PCB substrate after laser reflow processes, *Mater. Sci. Eng. B* 95 (2002) 254-262
- [Tian 03] Y. Tian, C Wang, X. Zhang, D. Liu, Interaction kinetics between PBGA solder balls and Au/Ni/Cu metallization during laser reflow bumping, *Solder. Surf. Mount Technol.* 15 (2) (2003) 17-21
- [Vanzetti 89] R. Vanzetti, J.S. Hwang, Laser/infrared signature feedback enhances solder joint reliability, *Proceedings of the technical program, Nepcom-West*, 2 (1989) 1086-1102

- [Whitehead 87] D.G. Whitehead, A.V. Polijanczuk, D.R. Hall, Laser soldering for surface mounted electronic components, Proceedings 4th Int. Conf. Lasers in Manufacturing, May 1987
- [Willis 87] J.B. Willis, Laser soldering applied to electronic circuits, Proceedings 4th Int. Conf. Lasers in Manufacturing, May 1987
- [Wu 04] C.M.L. Wu, D.Q. Yu, C.M.T. Law, L. Wang, Properties of lead-free solder alloys with rare earth element additions, Materials Science and Engineering, R 44 (2004) 1-44
- [Yoon 05] J.W. Yoon, S.W. Kim and S.B. Jung, IMC morphology, interfacial reaction and joint reliability of Pb-free Sn-Ag-Cu solder on electrolytic Ni BGA substrate, Journal of Alloys and Compounds 392 (2005) 247-252.

13 Annexes

Ces annexes détaillent les procédés des différents traitements de surface employés lors du travail expérimental de l'assemblage par faisceau laser de matériaux dissemblables. Les matériaux considérés sont l'alumine (96%), l'acier inoxydable (304), le composite Al/TiC conçu et fabriqué par notre partenaire industriel BPE International (Allemagne) et le cuivre (> 99,9%).

Ces traitements de surface sont effectués par les laboratoires de TNO (Pays-Bas) tout comme l'est le développement de la procédure de dépôt autocatalytique appliqué par voie de solutions aqueuses pour l'alumine.

Alumine

Le Tableau 21 détaille de la procédure de métallisation des pièces d'alumine (revêtement Ni/Au).

	Etape du procédé	Solution chimique	Durée du procédé (s)	Température du procédé (°C)	Remarque
a	Nettoyage	A	300	90	Ultrasonique
b	Rinçage	Eau distillée	180	20	Ultrasonique
c	Attaque chimique	10% HF	900	20	
d	Rinçage	Eau distillée	180	20	Ultrasonique
e	Sensibilisation	E	180	20	
f	Rinçage	Eau distillée	180	20	
g	Activation	G	180	20	
h	Rinçage	Eau distillée	120	20	
i	Revêtement autocatalytique de Ni-B	I	2160	60	Dépôt de 3µm
j	Rinçage	Eau distillée	10	20	
k	Immersion dans Au	K	1200	80	Dépôt de 0,2 µm
l	Rinçage	Eau distillée	180	20	
m	Séchage	Ethanol	5		Air sec et chaud

Tableau 21 : Procédure de métallisation Ni/Au des pièces d'alumine

Solutions chimiques :

A	NaOH	40 g/L	I	NiCl ₂ .6H ₂ O	24 g/L
	Na ₂ CO ₃	15 g/L		Lactic acid (88%)	30 g/L
	Na ₃ PO ₄	15 g/L		NaAc	1 mg/L
	Na-gluconate	20 g/L		DMAB	2,5 g/L
	Tensagex	0,2 g/L		pH (avec NH ₃)	6,1
E	SnCl ₂ .2H ₂ O	10 g/L	K	KAu(CN) ₂	5 g/L
	HCl	40 mL/L		Diammoniumhydroxycitraat	18,7 g/L
				Na ₂ EDTA.2H ₂ O	25,8 g/L
G	PdCl ₂	0,25 g/L		pH (avec NH ₃)	6 – 7
	HCl	2,5 mL/L			

Afin de métalliser les plaques d'alumine uniquement sur une seule de leurs surfaces, elles sont fixées dos à dos lors de leur traitement. Une pièce servant de masque à l'autre.

L'étape critique de cette procédure de métallisation est l'attaque chimique appliquée aux pièces d'alumine. Lorsque aucune attaque chimique n'est réalisée (Figure 69 ; $t=0$), la procédure de métallisation est un échec : trop peu de nucléides de palladium se fixent ensuite sur la surface de l'alumine. Or ceux-ci sont les initiateurs du procédé de dépôt autocatalytique. L'étape d'attaque chimique (10% HF) semble optimale pour une durée de 15 minutes (Figure 69 ; $t=15$). Cette durée d'attaque chimique, définie par des observations visuelles mène à une procédure de métallisation convenable, sans dégradation visible des pièces d'alumine. Cependant, à l'issue de l'étude de faisabilité de l'assemblage de matériaux dissemblables et de la réalisation de prototypes, les conclusions font apparaître une attaque chimique trop forte des pièces d'alumine. Afin d'améliorer la procédure de métallisation en augmentant les propriétés d'adhérence du dépôt, il s'avère nécessaire : soit de réduire la durée de l'attaque chimique, soit d'en changer.

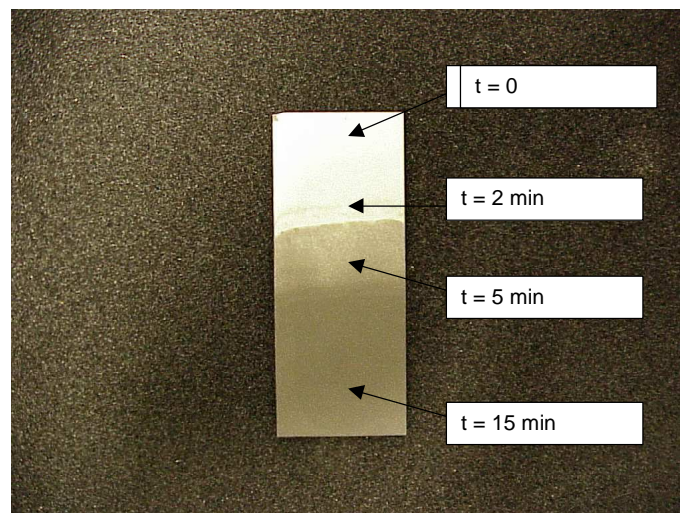


Figure 69 : Observation visuelle de l'effet de la durée de l'attaque chimique (10% HF) sur la qualité de la métallisation Ni/Au d'une pièce d'alumine

Acier inoxydable

Le Tableau 22 détaille de la procédure de métallisation des aciers inoxydables (revêtement Ni/Au)

Etape du procédé	Solution chimique	Durée du procédé (s)	Température du procédé (°C)	Remarque
a Nettoyage	Acétone	300	20	Ultrasonique
b Rinçage	Eau distillée	30	20	
c Dégraissage	A	120	90 – 95	Anode $I = 6 \text{ A/dm}^2$
d Rinçage	Eau	180	20	
e Immersion dans acide	1 :1 HCl + 0,25 mL/L emal	5	20	
f Solution d'amorçage nickel (anode)	W	120	20	Anode $I = 2 \text{ A/dm}^2$
g Solution d'amorçage nickel (cathode)	W	360	20	Cathode $I = 2 \text{ A/dm}^2$
h Rinçage	Eau distillée	120	20	
i Dépôt Ni	N	360	60	Cathode $I = 5 \text{ A/dm}^2$ pour 6 μm
j Rinçage	Eau distillée	10	20	
k Immersion dans Au	K	1200	80	Dépôt de 0,2 μm
l Rinçage	Eau distillée	180	20	
m Séchage	Ethanol	5		Air sec et chaud

Tableau 22 : Procédure de métallisation Ni/Au des pièces en acier inoxydable

Solutions chimiques :

W	NiCl ₂ .6H ₂ O	200 g/L	N	NiSO ₄ .6H ₂ O	240 g/L
	HCl	57 mL/L		NiCl ₂ .6H ₂ O	45 g/L
				H ₃ BO ₃	30 g/L

Composite Al/TiC:

Le Tableau 23 détaille de la procédure de métallisation du composite Al/TiC (revêtement Ni/Au)

Etape du procédé	Solution chimique	Durée du procédé (s)	Température du procédé (°C)	Remarque
a	Dégraissage	30 g/L Minco ®	300	65
b	Rinçage	Eau distillée	180	20
c	Attaque chimique	25 g/L Kelco ®	60	65
d	Rinçage	Eau distillée	180	20
e	Attaque chimique / décapage	P	120	20
f	Rinçage	Eau distillée	180	20
g	Décapage	Bondal ®	60	20
h	Rinçage	Eau distillée	120	20
i	Attaque chimique / décapage	P	120	20
j	Rinçage	Eau distillée	180	20
k	Décapage	Bondal ®	60	20
l	Rinçage	Eau distillée	120	20
m	Revêtement autocatalytique de Ni-B	I	2160	60 Dépôt de 3 µm
n	Rinçage	Eau distillée	10	20
o	Immersion dans Au	K	1200	80 Dépôt de 0,2 µm
p	Rinçage	Eau distillée	180	20
q	Séchage	Ethanol	5	Air sec et chaud

Tableau 23 : Procédure de métallisation Ni/Au des composites Al/TiC

Solutions Chimiques

P	HNO ₃ (65%) : eau	1 : 1
	HF	10 mL/L

N.B. :

Les procédures de métallisation Ni-B/Sn sont très proches de celles Ni/Au. Seule l'étape d'immersion dans l'or est remplacée par un dépôt électrocatalytique de 2 µm d'étain dans la solution suivante :

Na ₂ Sn(OH) ₆	10 g/L
NaOH	10 g/L
Emal	petite quantité

Avec :

$$i = 1,5 \text{ A/dm}^{-2}$$

Température : 68 °C

Durée : 20 minutes

Anodes d'étain polarisées (vert)

Cuivre

Le Tableau 24 détaille de la procédure de traitement de surface des pièces en cuivre (traitement OSP : Organic Soldering Protective).

Etape du procédé	Solution chimique	Durée du procédé (s)	Température du procédé (°C)	Remarque
a Nettoyage	Acétone	300	20	Ultrasonique
b Rinçage	Eau distillée	30	20	
c Dégraissage	A	120	90 – 95	Anode $I = 6 \text{ A/dm}^2$
d Rinçage	Eau	180	20	
e Pré-attaque chimique	5% H_2SO_4	20	20	
f Rinçage	Eau distillée	120	20	
g Micro Attaque chimique	ENTEK ME-1020 90 g/L + 1% H_2SO_4	90	25	
h Rinçage	Eau distillée	30	20	
i Rinçage acide	5% H_2SO_4	60	20	
j Rinçage	Eau distillée	30	20	
k Dépôt OSP	ENTEK PLUS Cu-106A	60	40 – 46	
l Rinsage	Eau distillée	30	20	
m Séchage	Eau distillée			Air sec et chaud

Tableau 24 : Traitement OSP des pièces en cuivre

CHAPITRE 3: MODELISATION, SIMULATION ET VALIDATION DE PROCEDES DE BRASAGE LASER

14 Préambule

14.1 Les modèles simples

Quelle que soit la technique utilisée lors d'un procédé de brasage (four, vague, fer, laser...), l'évolution thermique de l'assemblage est un facteur prépondérant. Un procédé de brasage requiert un apport d'énergie suffisant afin de porter les surfaces des matériaux à assembler et l'alliage d'apport au moins au-delà du point de fusion de ce dernier. La température atteinte par l'assemblage a également une limite supérieure, définie notamment par la résistance thermique des matériaux à assembler. Par ailleurs, l'optimisation d'un procédé de brasage afin d'améliorer la qualité des joints brasés, est liée à un contrôle précis de la montée et de la descente en température de l'assemblage global : le succès de l'opération de brasage en dépend, de même que l'état microstructural du joint brasé - et donc sa résistance mécanique finale.

La nécessité d'un contrôle optimum de l'évolution en température semble primordiale pour l'optimisation d'un procédé de brasage laser. Dès les années 1990, de simples modèles thermiques sont développés afin de décrire l'influence des propriétés des matériaux sur la température du joint en cours de brasage. La singularité du brasage par faisceau laser consiste à paramétrer les caractéristiques du faisceau laser, sans avoir accès à un outil de corrélation simple entre ces paramètres de faisceau laser et la température atteinte lors du procédé de brasage. La qualité du joint brasé dépend ainsi fortement de la quantité d'énergie absorbée par les matériaux exposés au faisceau laser, des propriétés thermiques de ces matériaux et de la géométrie de l'assemblage. Finalement, la nature des matériaux et leurs propriétés intrinsèques sont les facteurs dominants du procédé de brasage laser. Les premiers modèles thermiques simples assimilent le joint de brasure à une masse thermique constante, soumise à une certaine énergie Q . Cette énergie provient d'une impulsion laser de puissance Φ et de durée τ telle que :

$$Q = \Phi \cdot \tau \quad (1)$$

Le bilan énergétique du procédé permet également de définir cette quantité de chaleur comme étant la somme de l'énergie dissipée à travers l'assemblage $\dot{Q}(t)$ avec l'énergie nécessaire à chauffer et assurer le changement d'état physique de l'alliage d'apport Q_{joint} :

$$Q = Q_{joint} + \int_0^{\tau} \dot{Q}(t) dt \quad (2)$$

Q_{joint} est défini uniquement par les propriétés thermiques du joint brasé : la capacité calorifique et la chaleur latente de fusion de l'alliage d'apport. De plus, si l'on considère que les propriétés thermiques et les flux de chaleur ne sont pas dépendants de la température (approximation justifiée grâce à la gamme de température d'un procédé de brasage tendre relativement réduite), alors la température du joint brasé décroît exponentiellement lors de son refroidissement. L'énergie dissipée s'écrit alors :

$$\dot{Q}(t) = \Phi \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_{joint}}\right) \right] \quad (3)$$

En combinant les équations (2) et (3), on obtient la relation entre la puissance laser et la durée d'interaction du faisceau laser :

$$\Phi = \frac{Q_{joint}}{\tau_{joint} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-\tau}{\tau_{joint}}\right) \right]} \quad (4)$$

Les valeurs Q_{joint} et τ_{joint} sont alors définies expérimentalement à partir de deux combinaisons puissance-durée de l'interaction laser.

Finalement, cette méthode, basée sur peu de mesures expérimentales, permet de définir l'ensemble des combinaisons puissance-temps d'interaction laser menant au brasage convenable d'un composant électronique. Cette méthode a été employée notamment dans le cas de l'assemblage d'un composant SOIC [Nicolics 92 b] (Cette publication décrit précisément la méthodologie de ces calculs). Ces résultats indiquent également que la dissipation de l'énergie dans l'assemblage est d'autant plus faible que le temps de brasage est court. Ainsi, un brasage laser utilisant la plus courte des interactions laser-matériau sera optimal. La réduction du temps de brasage induit une montée en température plus forte. La limite inférieure du temps de brasage est d'abord fixée par l'aptitude de la crème à braser à engendrer des projections lors de l'évaporation brutale du flux. De plus, cette limite inférieure du temps de brasage est également et surtout fixée par le temps de mouillage de la piste de report par l'alliage fondu. Ces considérations indiquent que les résultats issus du calcul mathématique, bien que validés expérimentalement, ne permettent pas une maîtrise globale de l'ensemble des phénomènes physico-chimiques décrivant le procédé de brasage laser. Un tel modèle paraît d'ailleurs totalement utopique. Pourtant, la compréhension et la modélisation des transferts de chaleur lors d'un procédé de brasage laser suscitent toujours un intérêt grandissant.

14.2 La nécessité de modéliser

C'est à double sens : Une bonne connaissance des phénomènes physico-chimiques est obligatoire pour modéliser un procédé de brasage laser, de même que la modélisation de ce procédé apporte des informations sur ces phénomènes physico-chimiques, et notamment la prépondérance des uns envers les autres. L'objectif visé par la modélisation numérique d'un procédé de brasage laser peut être de différente nature : elle peut être utilisée comme une aide au paramétrage de l'outil laser, elle permet d'évaluer la température en tout point de l'assemblage et simplifie la recherche de possibles améliorations du procédé.

Dans la plupart des cas, il s'agit d'une aide au paramétrage de l'outil laser. Comme vu précédemment, l'ensemble des combinaisons puissance-durée d'impulsion du faisceau laser peut être obtenu avec un minimum de mesures expérimentales. Une étude rigoureuse des transferts de chaleur permet ainsi d'améliorer la qualité du joint brasé et la reproductibilité du procédé [Flanagan 96] : le modèle thermique du brasage laser d'un composant électronique montre l'intérêt d'une répartition énergétique homogène dans le faisceau laser, afin d'éviter des gradients thermiques trop importants sur les pistes de report de composants. De plus, l'étude présentée par A. Flanagan compare les effets de l'utilisation de faisceaux de diamètres différents sur le procédé de brasage laser. Il en déduit une plage pour le

diamètre optimum du faisceau laser qui est spécifique à l'assemblage étudié. Toujours utilisé comme une aide au réglage des caractéristiques du procédé, la modélisation thermique permet d'évaluer la faisabilité et l'efficacité d'un procédé de brasage laser par rapport à un autre. La modélisation thermique du brasage en ligne d'une rangée de pattes d'un même composant (ex. : QFP, SOIC...), montre ainsi l'avantage de ne pas débiter le cycle de brasage directement sur une patte du composant, mais plutôt sur le substrat, afin de braser convenablement la première patte rencontrée par le faisceau laser [Beckett 02].

Un autre champ de motivation pour la modélisation thermique du procédé de brasage laser est la possibilité d'obtenir la température d'endroits inaccessibles aux outils de mesures expérimentaux. Les acquisitions de température lors de procédés de brasage sont généralement effectuées à l'aide de thermocouples. L'utilisation de thermocouples, même de dimensions très réduites, induisent une masse métallique supplémentaire qui modifie les températures du procédé : la mesure fausse le résultat. L'utilisation de pyromètres optiques est répandue dans le cadre des procédés laser. Cependant, cette utilisation requiert un accès direct à la zone de mesure, ce qui n'est pas toujours le cas. L'exemple de la mesure de l'évolution en température lors du brasage laser d'une bille de BGA est caractéristique de l'utilité de la modélisation thermique afin d'avoir accès aux températures en tout point de l'assemblage [Tian 02 a]. En effet, compte tenu des durées d'interaction laser très courtes et des dimensions d'assemblage très réduites, la mesure expérimentale est rendue particulièrement délicate. Or la température atteinte par le joint lors du procédé de brasage est le facteur prépondérant gouvernant la formation des intermétalliques (nature et épaisseur), et par extension la résistance finale de l'assemblage. Basée sur ces données de température, la diffusion des éléments constituant l'interface solide-liquide lors du brasage peut également être estimée [Nicolics 92 a]. De plus, les calculs thermomécaniques révélant les contraintes mécaniques de l'assemblage lors de sa formation sont aussi reliées aux gradients thermiques [Tian 04]. Finalement, la modélisation de l'évolution temporelle et spatiale de la température de l'alliage d'apport est une information souvent très délicate à mesurer, et pourtant primordiale pour l'évaluation de la qualité d'un joint brasé. Dans ces cas, la modélisation thermique permet d'obtenir la température et son évolution au cours du procédé en tout point de l'assemblage.

La modélisation du procédé de brasage laser présente également l'intérêt de permettre certains essais d'amélioration du procédé de façon relativement simple et surtout à moindre coût. La géométrie des pistes de report de composants, la nature des matériaux employés, les épaisseurs des finitions sont autant de paramètres facilement modifiables lors de la modélisation du procédé. Toutes ces combinaisons sont difficilement étudiables expérimentalement, mais les résultats peuvent être anticipés par l'utilisation de la modélisation thermique. De la même façon, les résultats de la modélisation thermique initient des voix d'amélioration de l'assemblage, et particulièrement des géométries de circuits optimales. L'étude numérique des transferts de chaleur lors du brasage laser d'un QFP montre qu'une interaction maximum du faisceau laser avec les pattes du composant est préférable. Ainsi, l'auteur préconise des composants QFP dont les pattes sont toutes orientées vers l'extérieur dans le cas d'un procédé de brasage laser [Flanagan 96]. Par ailleurs, avec le développement des techniques de mise en forme des faisceaux laser par Eléments d'Optique

Diffractionnels, les géométries du faisceau laser peuvent être étudiées au préalable, et leur bénéfice évalué avant la réalisation de tels éléments encore coûteux de nos jours.

14.3 Les modélisations par éléments finis

Les modèles simples tels que celui décrit précédemment donnent un aperçu très satisfaisant de l'aspect thermique d'un procédé de brasage laser. De nombreuses publications indiquent que la sélection des paramètres laser appropriés au brasage de composants électroniques peut résulter d'études portées sur le développement de ces modèles [Nicolics 92 a] [Naveed 03]. En 1994, le modèle par éléments finis d'un procédé de transfert automatique sur bande (Tape Automated bonding : connexion d'une puce sur un circuit flexible) utilisant l'énergie laser comme source de chaleur et comprenant 2757 éléments et 2892 nœuds nécessitait des temps de calcul d'environ 90 minutes avec un ordinateur personnel [Economikos 94]. Avec l'augmentation des puissances de calcul offertes par l'outil informatique, la complexité des systèmes étudiés et des phénomènes physico-chimiques modélisés croît. La modélisation par éléments finis est maintenant devenue une méthode fréquemment usitée pour l'étude du brasage laser de composants électroniques [Beckett 02].

La modélisation par éléments finis implique deux étapes principales. D'abord la construction d'un maillage pour discrétiser les objets à modéliser en plusieurs éléments, et ensuite la résolution des équations différentielles régissant les phénomènes physiques ayant lieu à chaque nœud de chaque élément. L'étape qui consiste à représenter et mailler les géométries, est très souvent décisive en ce qui concerne le succès ou non de la simulation numérique. Le maillage doit être resserré dans les zones où un gradient de température important est calculé ; il est élargi dans les zones présentant un faible gradient de température afin de réduire les temps de calcul. Le maillage doit rendre compte de l'apport d'énergie très localisé du procédé laser. Par ailleurs, les procédés laser induisent des vitesses de montée en température et de refroidissement très rapides. Le pas de temps lors de la résolution de l'équation différentielle doit être adapté. Un ajustement automatique de ce pas de calcul est donc préférable afin de rendre compte des évolutions rapides en température au début du procédé laser, et au début du refroidissement de l'assemblage.

Dans un repère cartésien, l'équation différentielle d'un transfert de chaleur sans changement d'état du matériau s'écrit de la façon suivante :

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (5)$$

Avec ρ la densité du matériau, C_p la chaleur spécifique et λ la conductivité thermique du matériau.

Généralement, la longueur de pénétration du faisceau laser dans les matériaux irradiés est négligeable par rapport à la dimension de l'assemblage. Ainsi, la source laser est considérée comme étant une condition limite du système. Le modèle mathématique permet de tenir compte de la distribution de l'énergie au sein du faisceau laser. Une distribution gaussienne de l'énergie aura un impact très différent sur l'évolution en température du système, comparée à une distribution plus homogène. La distribution gaussienne de l'énergie laser s'écrit sous la forme :

$$q(x, y) = \frac{3 \cdot \eta \cdot P}{\pi \cdot a^2} \cdot \exp\left(-\frac{3 \cdot (x^2 + y^2)}{a^2}\right) \quad (6)$$

Avec η le coefficient d'absorption du matériau, P la puissance du faisceau laser et a le rayon du spot laser.

Dans le cas d'un modèle qui tient compte des échanges convectifs avec l'air ambiant, la condition à la frontière exposée au faisceau laser s'écrit donc :

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = -h_c \cdot (T_s - T_\infty) + q(x, y) \quad (7)$$

Quant aux autres frontières, où seul l'échange convectif a lieu, la formule devient :

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = -h_c \cdot (T_s - T_\infty) \quad (8)$$

Avec $\frac{\partial T}{\partial n}$ décrivant le gradient de température le long de la normale à la frontière, h_c le coefficient de transfert convectif, T_s et T_∞ respectivement les températures de la surface du matériau et de l'air ambiant.

Parmi les hypothèses, celle d'un contact parfait entre les différents matériaux est fréquemment utilisée. Les frontières internes des assemblages à braser sont alors considérées comme continues et la condition à l'interface s'écrit :

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial n} = \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial n} \quad (9)$$

$$T_1 = T_2 \quad (10)$$

Avec T_1 et T_2 la température à l'interface des deux matériaux.

Le modèle thermique du procédé laser est ainsi décrit numériquement, dans l'hypothèse d'un contact parfait entre les pièces, et sans tenir compte des pertes par rayonnement qui sont négligeables dans un tel procédé.

14.4 Considérations, hypothèses et limitations

Modéliser, c'est simplifier. La complexité des phénomènes physico-chimiques d'un procédé de brasage laser implique l'établissement d'hypothèses permettant leur simplification. Ainsi, de la même façon que l'on considère un contact parfait entre les matériaux et que l'on néglige les pertes par rayonnement, d'autres hypothèses sont également nécessaires lors de la modélisation d'un procédé de brasage laser.

Certaines sont de nature paramétrique : les matériaux employés sont considérés comme isotropes, et leurs propriétés invariantes dans la plage de température du procédé de brasage laser. L'isotropie des substrats FR4-PCB est discutable. Leur structure est constituée de résine époxy renforcée par 8 couches de fibre de verre. De plus, les données sur ces matériaux sont rares, et leurs propriétés thermiques diffèrent d'un fabricant à l'autre. Ainsi, la littérature indique plusieurs valeurs pour la conductivité thermique d'un substrat FR4-PCB ⁽¹⁾ [Beckett 02], allant de quelques dixièmes à quelques $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. L'absorption du faisceau laser par les matériaux est également une donnée primordiale,

¹ Site Internet : <http://www.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=O1705> (19/05/05)

mais sujette à de fortes variations liées notamment au matériau (nature, géométrie, état de surface...), à la longueur d'onde, à l'angle d'incidence du faisceau et à la température. Celle-ci peut alors changer d'un fabricant de composants électronique à l'autre [Nicolics 92 b]. Bien que l'absorptivité peut-être facilement mesurée à l'état solide [Greenstein 89], son évolution au cours du procédé de brasage laser est plus difficilement quantifiable. Dans le cas d'une exposition directe du faisceau laser sur l'alliage d'apport, l'absorptivité est affectée par le changement d'état de l'alliage, de même que par la formation éventuelle d'une couche d'oxyde.

D'autres hypothèses sont d'ordre géométrique : le procédé de brasage implique divers phénomènes physico-chimiques qui tendent à modifier l'aspect du matériau d'apport. Dans le cas extrême d'un matériau d'apport sous forme de crème : l'évaporation des solvants volatils du flux, la coalescence progressive des microbilles et le mouillage des pistes rendent le procédé assez difficile à modéliser. Rares sont les tentatives de prise en compte de l'ensemble de ces phénomènes. J. Nicolics a choisi de discrétiser l'évolution morphologique du matériau d'apport afin de détailler plus précisément les transferts de chaleur au cours du procédé de brasage laser [Nicolics 94]. Cependant, on considère généralement le matériau d'apport sous sa forme finale (joint brasé). L'interaction du faisceau laser avec le substrat, issu des réflexions sur le joint brasé de même que les échanges convectifs au sein de l'alliage d'apport sous forme liquide - dus à l'effet Marangoni - sont également négligés. Par ailleurs, compte tenu de l'apport d'énergie très localisé d'un laser, il n'est généralement nul besoin de représenter la totalité d'un assemblage. Ainsi, la géométrie d'un PCB sera limitée à la Zone Affectée Thermiquement (ZAT).

Malgré les nombreuses approximations paramétriques et géométriques, nombres de modèles thermiques de procédés de brasage laser montrent une bonne corrélation avec les mesures expérimentales [Beckett 02] [Tian 02 a] [Tian 04].

15 Introduction

Le travail de modélisation et de simulation numérique effectué au cours de cette thèse a accompagné le développement du procédé de brasage laser. Ces modélisations sont appliquées aux montages de brasage conçus lors du projet, et sont donc confrontées aux mesures de températures acquises expérimentalement. La première partie de ce travail concerne l'assemblage par brasage laser d'un matériau céramique semi transparent et d'un métal avec comme matériau d'apport un alliage sans plomb sous forme de crème à braser. Il s'agit plus précisément de l'étude des transferts de chaleur, par la résolution de l'équation de la chaleur appliquée à une représentation en 2 dimensions de l'assemblage. Les résultats de calculs obtenus grâce au logiciel de résolution des équations différentielles partielles Flex-PDE indiquent que leur comparaison avec les mesures expérimentales n'est pas concluante.

Afin d'améliorer la concordance des résultats calculés et des mesures expérimentales, la suite du travail de modélisation/simulation est alors axée sur une représentation en 3 dimensions des assemblages étudiés à l'aide du logiciel de résolution COMSOL MULTIPHYSICS. Cette deuxième partie de l'étude numérique des transferts de chaleur lors d'une opération de brasage laser se scinde en trois sous parties indépendantes les unes des autres. L'ensemble de ces sous parties permet de détailler les différentes motivations associées à l'étude numérique de transferts de chaleur. Ainsi, leur modélisation suivie de leur simulation permet :

- D'obtenir la température en tout point de l'assemblage. Une analyse critique des phénomènes physico-chimiques ayant lieu lors d'un procédé de brasage laser permet de juger de la prépondérance de chacun. Ainsi, l'évaporation des solvants volatils inclus dans le flux d'une crème à braser s'avère être une étape primordiale lors de l'utilisation d'une crème à braser. Les gradients de température entre les deux interfaces d'un assemblage ont alors été calculés, les résultats de simulation concordent avec les mesures expérimentales, et l'étude microstructurale des joints brasés est justifiée par ces données de température issues de la simulation numérique.
- D'apporter une aide au paramétrage de l'outil laser. Lors d'une opération de brasage laser, le paramétrage de l'outil laser dépend de la nature et des propriétés thermiques de l'assemblage. Plus la masse thermique de l'assemblage est importante, plus l'énergie laser devra être élevée. Ainsi, le circuit connecté à la piste de report du composant joue un rôle important dans le paramétrage du faisceau laser. Bien que de dimension réduite, les propriétés hautement conductrices du circuit ne peuvent pas être négligées. Ainsi, lors du brasage multifibre d'un composant électronique à deux connexions, une asymétrie trop marquée du circuit électronique induit des défauts de brasage. Les règles de tracé des circuits électroniques sont primordiales afin de réussir toute opération de brasage, quelle que soit la technologie utilisée. C'est d'autant plus le cas lors d'un procédé de brasage laser dont l'apport d'énergie est localisé, et donc soumis au proche entourage du joint brasé. L'étude numérique des transferts de chaleur dans différents circuits électroniques

connectés aux pistes de report de composant permet de démontrer la faisabilité de l'assemblage, et de définir les règles de tracé adéquates.

- D'évaluer les bénéfices issus de l'utilisation d'une nouvelle technologie de mise en forme du faisceau laser. L'émergence des systèmes de mise en forme des faisceaux laser par les biais d'Eléments d'Optique Diffractifs (EOD) permet d'envisager des procédés de brasage laser plus efficaces. Cependant, le coût de tels dispositifs reste prohibitif. Leur impact sur le procédé final doit donc être préalablement évalué. Pour certains assemblages, un déplacement du faisceau laser est nécessaire pour chauffer l'ensemble du matériau d'apport. Cette étude numérique des transferts de chaleur permettra de mettre en évidence l'avantage de la mise en forme du faisceau laser afin de s'affranchir du refroidissement du matériau d'apport lors de deux passages consécutifs du faisceau en utilisant un spot laser mobile.

L'ensemble de cette étude de modélisation et simulation donne un aperçu général des différentes sources de motivation de l'établissement du calcul numérique d'un procédé de brasage par faisceau laser. Partant d'un simple modèle à deux dimensions, la démarche a abouti à l'utilisation préférentielle de modèles à trois dimensions. Les modèles à trois dimensions sont satisfaisants pour la description des phénomènes de brasage laser. La complexité des phénomènes physico-chimiques et la difficulté à acquérir l'ensemble des propriétés des matériaux limitent cependant le calcul numérique. Quelques approximations s'imposent. Néanmoins, la corrélation des mesures expérimentales avec les résultats de simulation reste très satisfaisante. La dernière partie permet de traiter une application innovante du brasage par faisceau laser. Le développement des EOD est en plein essor. La mise en forme du faisceau laser permet d'améliorer grandement certains procédés d'assemblage utilisant la technologie laser.

16 Les outils de calcul

Deux outils de calcul distincts sont utilisés au cours de cette étude des transferts de chaleur lors d'un procédé de brasage laser. Il s'agit des logiciels FlexPDE et COMSOL MULTIPHYSICS. Chacun de ces logiciels est axé sur la résolution d'une équation différentielle selon la méthode des éléments finis. L'ensemble des mécanismes de transferts physico-chimiques peut se résoudre mathématiquement par l'établissement d'une équation différentielle. Ces logiciels de calcul permettent donc de traiter indifféremment les phénomènes électromagnétiques, d'écoulement de fluides, de diffusion, de réactions chimiques... et, dans le cadre de notre étude, de flux de chaleur.

La méthodologie est identique pour chaque logiciel : il s'agit dans un premier temps de définir la géométrie des différents objets du système, puis on retrouve les deux étapes principales nécessaires à la simulation du procédé : d'abord la construction d'un maillage pour discrétiser les objets à modéliser en plusieurs éléments, et ensuite la résolution de l'équation différentielle décrivant les phénomènes physiques ayant lieu à chaque nœud de chaque élément.

Les deux logiciels utilisés diffèrent par leur méthode d'utilisation :

- FlexPDE impose la création d'un programme « manuscrit » dont le langage et la structure sont propres aux concepteurs du logiciel. Ce programme inclut la définition de l'ensemble des variables du système, l'équation exacte à résoudre, les frontières du système et la traduction mathématique du flux de chaleur qui leur sont appliquées, de même que la nature des résultats à afficher en cours de calcul. La version de démonstration utilisée lors de ce travail est limitée en mémoire. Un effort de simplification de l'ensemble du système physico-chimique étudié est donc nécessaire pour l'obtention de résultats. Bien que des versions plus avancées permettent l'utilisation de géométries à trois dimensions, ce logiciel est employé ici dans le cadre de modélisations dans des systèmes à deux dimensions.
- Les différentes géométries d'un système étudié avec COMSOL MULTIPHYSICS sont définies à la manière de logiciels de Conception Assistés par Ordinateur (CAO). Cette approche permet d'importer des géométries complexes issues d'un logiciel de CAO. La définition du flux de chaleur à chaque frontière du système est ensuite sélectionnée à partir d'un menu déroulant. L'affichage des résultats de simulation est possible à l'issue du calcul. Ce logiciel est utilisé ici dans le cas de systèmes à trois dimensions.

L'ensemble de ces études de modélisations et simulations numériques est réalisé à l'aide d'un simple ordinateur de bureau (Processeur de 1,8GHz et mémoire vive de 1Go).

17 Modélisation à deux dimensions

17.1 L'assemblage céramique - métal

Le procédé de brasage étudié concerne l'assemblage d'un métal (cuivre) et d'une céramique (alumine). Il s'agit des tests préliminaires d'un projet d'assemblage de matériaux dissemblables par faisceau laser. Dans le cadre de cette première étude de faisabilité, les pièces à assembler sont de simples plaques (20x10x1mm). Les domaines d'applications visées par ce genre d'assemblage de matériaux dissemblables sont aussi bien la microélectronique que la micromécanique.

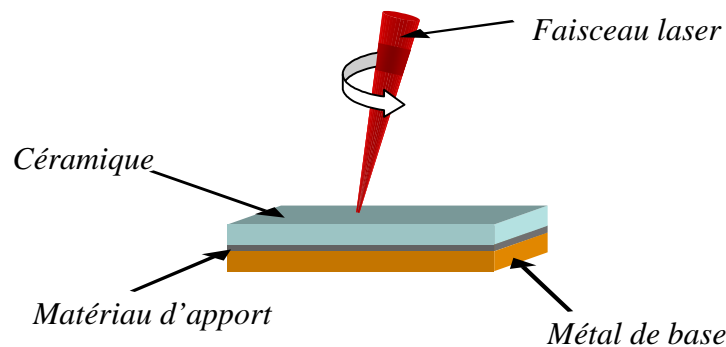


Figure 70 : Schéma du procédé de brasage laser de l'assemblage céramique-métal

La Figure 70 schématise l'assemblage à réaliser : Le faisceau laser diode (longueur d'onde 940nm) est partiellement transmis par l'alumine, et interagit donc à l'interface de l'assemblage céramique/métal.

Traitement de surface

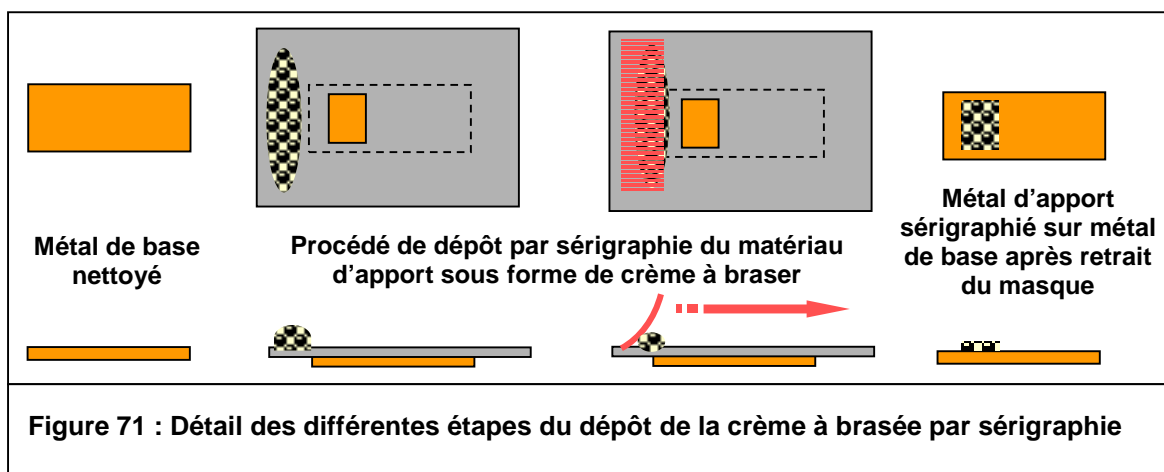
Les pièces à assembler ont préalablement reçu un traitement de surface afin d'être compatibles pour une opération de brasage. Le matériau de base métallique a un revêtement OSP (Organic Soldering Protective) qui préserve le cuivre d'une oxydation prématurée. La céramique a un revêtement « nickelé-doré » : Ni(3µm)/Au(0,2µm) sur une seule de ses faces, afin de préserver les propriétés de transparence optique de l'autre face.

Les dépôts autocatalytiques des céramiques appliqués par voie de solutions aqueuses sont effectués par les laboratoires de TNO (Pays-Bas) de même que les autres traitements de surfaces indispensables à une bonne brasabilité des pièces à assembler.

Matériau d'apport

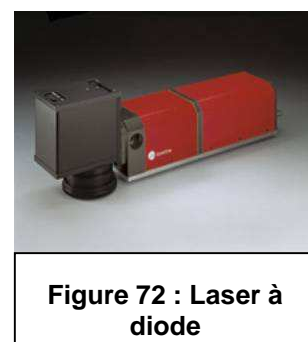
Le matériau d'apport est sous forme de crème à brasier de composition Sn-4,0Ag-0,5Cu (% massique). Sa température de fusion est de 217°C. La Figure 71 détaille le procédé de sérigraphie utilisé pour déposer le matériau d'apport sur le métal de base. Ce procédé de dépôt permet d'avoir une bonne reproductibilité de la quantité de matériau d'apport déposée. Le masque de sérigraphie a une épaisseur de 0,1mm, et la fenêtre de déposition est rectangulaire : 6x4mm. Suite au placement de

la céramique, le matériau d'apport s'étalera sur toute la zone de contact entre les deux pièces (15x10mm).



La source laser

Le laser utilisé est un laser à diode, continu, avec une longueur d'onde de 940 nm. La puissance maximum du faisceau laser est de 300 W. Afin d'assurer une bonne reproductibilité de la puissance du faisceau, le laser doit être utilisé au delà de 30 W. La distance focale est de 290 mm, et le spot laser au plan focal est elliptique : 1,5x1,1 mm. La répartition énergétique du faisceau laser est gaussienne dans une direction, et super gaussien (top hat) dans l'autre. Ce laser (Figure 72) est équipé d'un système de déflexion du faisceau laser à l'aide de miroirs galvanométriques (tête scanner). Les principales caractéristiques de ce laser sont détaillées dans le Tableau 25.



Type de laser	Diode
Longueur d'onde	940 nm
Puissance délivrée maximum	300 W
Distance focale	297 mm
Dimension du spot au plan focal	1,5 x 1,1 mm
Note	Equipé d'un système de déflexion du faisceau (scanner)

Tableau 25 : Caractéristiques du laser à diode utilisé

Le faisceau laser est programmé pour effectuer des cercles de 2 mm de diamètre sur le dessus de l'assemblage afin de répartir au mieux l'énergie du faisceau sur l'ensemble du joint (Figure 70). Le faisceau est défocalisé pour avoir une plus grande surface d'interaction. Il est de dimension 1,7x2,0 mm sur l'alumine (distance focale : 340 mm). La vitesse de déplacement est de 50 mm/s. Le procédé de brasage dure 5,7 secondes, ce qui correspond à 45 tours.

Montage

Le montage utilisé est conçu de telle sorte à maintenir l'assemblage en position, assurer un bon contact entre les pièces et éviter de trop grandes pertes d'énergie par conduction. Comme il est en

aluminium, les surfaces de contact entre montage et assemblage seront donc préférentiellement réduites (Figure 73 et Figure 74).

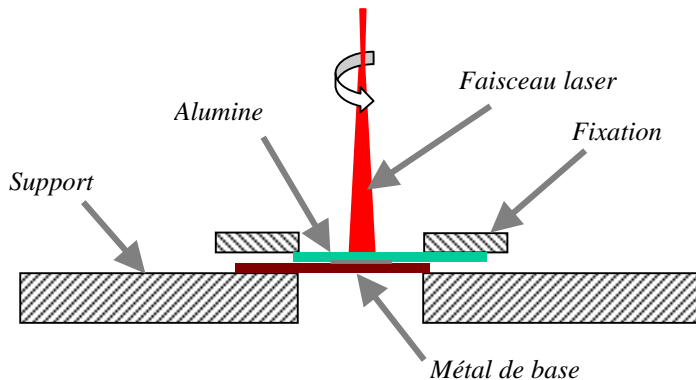


Figure 73 : Schéma du montage



Figure 74 : Photo du montage

Mesures de température

Les mesures de températures du dessus de la pièce d'alumine sont effectuées à l'aide d'un pyromètre optique. La zone de mesure est circulaire, de diamètre 1 mm environ. Afin de permettre une cartographie de la température mesurée sur l'alumine, plusieurs points de mesure sont définis (Figure 75). De plus, pour une future comparaison avec les résultats de la simulation numérique, le cycle de brasage laser utilisant différentes puissances est testé sur un même échantillon préalablement brasé. La mesure de température au point central de l'alumine permet de corréler la température de brasage à la puissance laser utilisée.

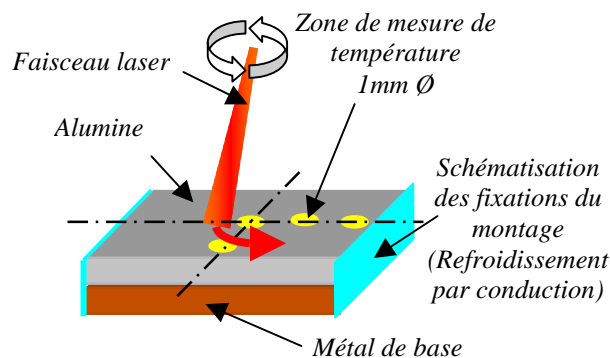


Figure 75 : Schéma des différentes zones de mesure de température

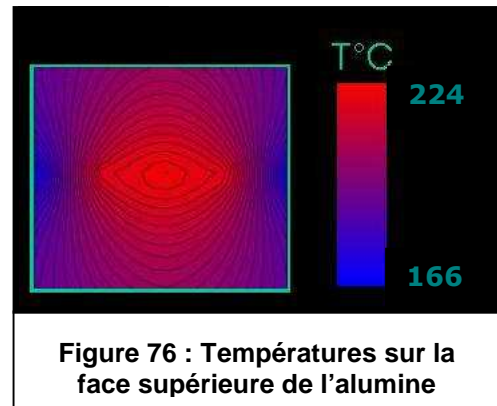
Les paramètres laser optimum pour le brasage de cet assemblage sont indiqués dans le Tableau 26 ci-dessous :

Paramètres de brasage laser	Alliage d'apport (mg)	Puissance (W)	Spot laser (mm)	Trajet du faisceau	Vitesse (mm/s)	Durée d'interaction laser
	17±2	270	1,7 x 2,0	Circulaire Ø 2 mm	50	5,7s (45 tours)

Tableau 26 : Paramètres laser optimaux de l'assemblage étudié

Cartographie de la température

Suite aux mesures de température à différents endroits de la pièce d'alumine, une cartographie de la face visible de la pièce d'alumine lors du procédé de brasage laser a pu être réalisée. La Figure 76 : Températures sur la face supérieure de l'alumine indique la température maximum atteinte lors du procédé de brasage par la pièce d'alumine. On remarque alors que le point le plus chaud ($T=224^{\circ}\text{C}$) dépasse la température de fusion de l'alliage d'apport ($T_f = 217^{\circ}\text{C}$). La précision de ces résultats expérimentaux est discutable. Ceux-ci ne sont qu'une approximation des



champs de température réels. Effectivement, l'utilisation d'un procédé laser induit des gradients de température très élevés, et la zone de mesure n'est pas ponctuelle ($\varnothing 1 \text{ mm}$). De plus, l'utilisation d'une fonction mathématique de lissage a été utilisée pour déduire des mesures expérimentales l'ensemble des températures sur la face visible de la pièce d'alumine. D'après le graphique présenté en Figure 76, on remarque cependant le rôle important de l'outil de maintien en position de l'assemblage qui agit comme un puit thermique, et tend à réduire la température maximum atteinte au niveau de son contact avec l'assemblage.

Température en fonction de la puissance laser

Afin de permettre un comparatif entre les mesures expérimentales de température et le calcul numérique des transferts de chaleur lors du procédé de brasage laser, différentes puissances de faisceau laser ont été testées sur l'assemblage. La température au centre de la face supérieure de la pièce d'alumine a été mesurée pour une gamme de puissance allant de 195 à 300 W. Les autres paramètres du procédé restent identiques : trajet, vitesse, dimension du spot laser, et quantité de matériau d'apport. Le Figure 77 rapporte la température maximum enregistrée sur la pièce d'alumine en fonction de la puissance laser utilisée, lors du procédé de brasage laser.

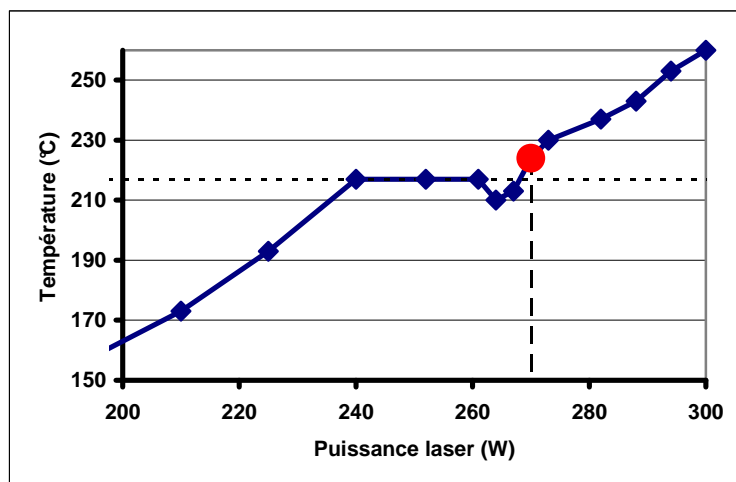


Figure 77 : Température maximum mesurée sur la face supérieure de l'alumine en fonction de la puissance du faisceau laser

La courbe présente quelques discontinuités liées aux phénomènes physico-chimiques ayant lieu lors du procédé de brasage de l'assemblage. Jusqu'à une puissance laser de 240 W, la température mesurée sur la surface supérieure de la pièce d'alumine n'excède pas la température de fusion de l'alliage d'apport. Puis, de 240 W à 260 W, on observe un pallier de température au niveau de la température de fusion du matériaux d'apport. Au-delà de 260 W, il y a d'abord une chute de la température due au mouillage du matériau de base, et donc à un transfert thermique plus important vers la pièce inférieure. 270 W correspond à la puissance laser optimum de ce procédé de brasage (rond sur la Figure 77). Pour des puissances laser supérieures à 270 W, la température maximum mesurée sur la pièce d'alumine continue d'augmenter.

La modélisation faisant suite est donc basée sur le procédé de brasage présenté ci-dessus. Les résultats de la simulation seront comparés aux dernières mesures de température en fonction de la puissance laser utilisée.

17.2 Etudes préliminaires

17.2.1 Interaction du faisceau avec l'assemblage

Transmission, réflexion et absorption du faisceau laser

Il est nécessaire de connaître précisément les propriétés de la pièce d'alumine afin de pouvoir décrire l'interaction du faisceau laser avec l'assemblage. Les mesures de réflexion, transmission et absorption d'une plaque d'un millimètre d'épaisseur d'alumine sont effectuées à l'aide d'un spectromètre optique équipé d'une sphère d'intégration. La Figure 78 indique qu'une grande partie du faisceau laser est réfléchi par l'échantillon d'alumine (autour de 85%). Cependant, comme l'alumine présente une très faible absorption de la longueur d'onde du laser utilisé (940 nm), près de 15% du faisceau est transmis à travers l'échantillon.

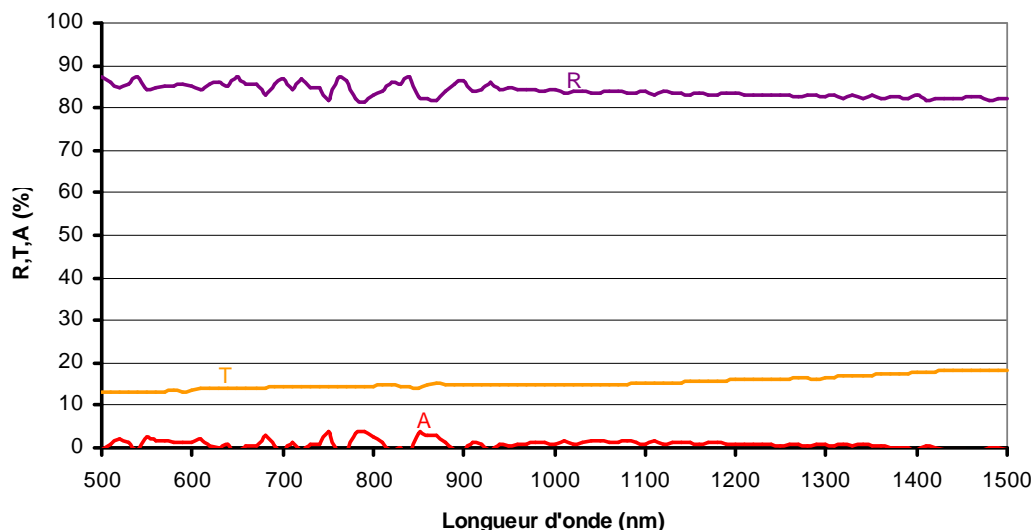


Figure 78 : Transmission, réflexion et absorption de la pièce d'alumine d'1 mm d'épaisseur en fonction de la longueur d'onde du faisceau incident

Les 15% du faisceau laser transmis à travers la pièce d'alumine interagissent alors avec le traitement de surface appliqué sur l'autre face de l'échantillon. La pièce d'alumine métallisée nickel (3µm)-or (0,2µm) présente une transmission du proche infrarouge nulle. Le faisceau est alors soit réfléchi soit absorbé par la surface de l'alumine « nickelée dorée ». La Figure 79 montre les résultats des mesures des propriétés optiques de l'alumine métallisée. En dépit d'une résonance optique lors de la mesure entre 800 et 900 nm, le graphique montre que pour une longueur d'onde proche de 940 nm, la réflexion de l'échantillon est de 88% et son absorption de 12%.

De ces différentes mesures, on en déduit que la quasi-totalité du faisceau transmis à travers les 1mm d'alumine est absorbée par la métallisation. Finalement, 12% de l'énergie laser sera absorbée par la métallisation de l'alumine, et servira à chauffer l'assemblage.

Ces résultats ne tiennent pas compte de la montée température de l'assemblage au cours du procédé de brasage. Généralement, l'absorption de matériaux sous forme solide tend à augmenter avec la température. Cependant, la relativement faible montée en température d'un procédé de brasage tendre permet de s'affranchir de l'évolution des propriétés optiques des matériaux. Ainsi, on considère, en première approximation, que l'absorption du faisceau laser est de 12% tout au long du procédé de brasage laser.

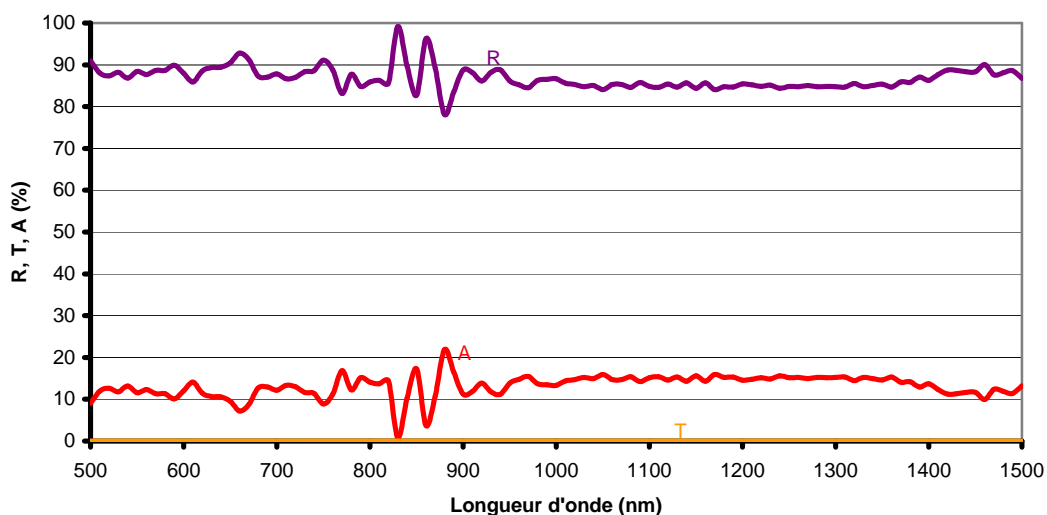


Figure 79 : Transmission, réflexion et absorption de la pièce d'alumine revêtue Ni/Au sur la face opposée du faisceau incident, en fonction de sa longueur d'onde.

Diffusion du faisceau laser

L'étude approfondie de l'utilisation de la Mullite ($3Al_2O_3-2SiO_2$) comme substrat pour le confinement du rayonnement des cellules solaires implique la description précise de ses propriétés optiques. La céramique présente une réflexion particulière du rayonnement lié principalement à la microstructure du matériau. En plus d'être dépendante de l'angle d'incidence, de la rugosité de surface et de la longueur d'onde [Shimokawa 96] [Tazawa 97], la réflexion diffuse (réflexion volumique) est liée à l'existence de joints de grains et de différentes phases dans la céramique : il y a diffusion et réfraction du rayonnement aux différents joints de grain ainsi qu'à la frontière des différentes phases du

matériau [Schneider 93]. La réflexion volumique est démontrée par la mise en évidence d'une relation entre le coefficient de réflexion et l'épaisseur de la céramique étudiée [Bourdais 99].

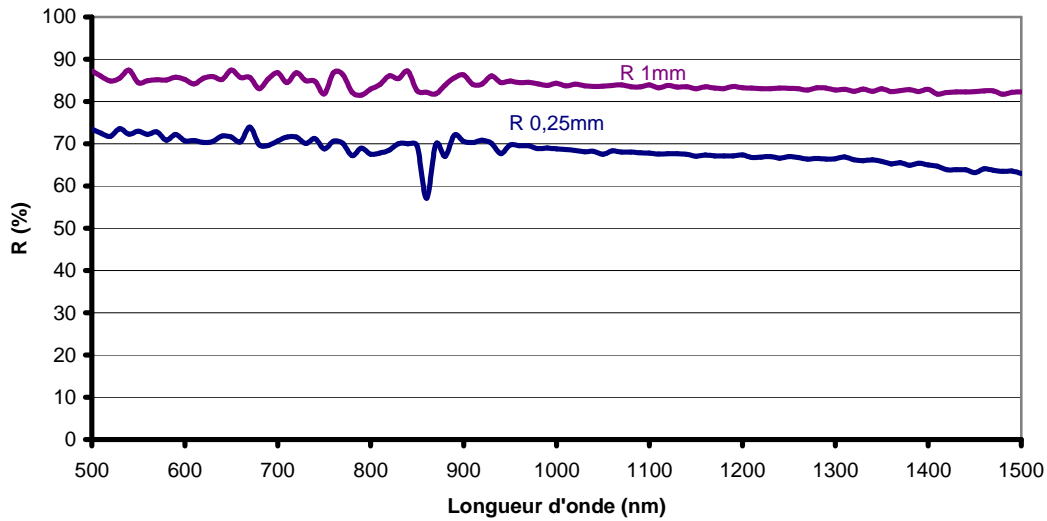


Figure 80 : Réflexion de deux pièces d'alumine d'épaisseur différente (0,25 et 1mm)

Les mesures de réflexion de différentes épaisseurs d'alumine indiquent une réflexion d'autant plus importante que l'échantillon est épais (Figure 80). Puisque l'absorption du faisceau laser est considérée comme nulle, on a donc une réflexion volumique de la pièce d'alumine. La nature de la transmission du faisceau est alors soumise également à la microstructure du matériau.

L'étude de la transmission du rayonnement laser de puissance est effectuée à l'aide d'un calorimètre placé sous l'échantillon d'alumine de 1mm d'épaisseur (Figure 81).

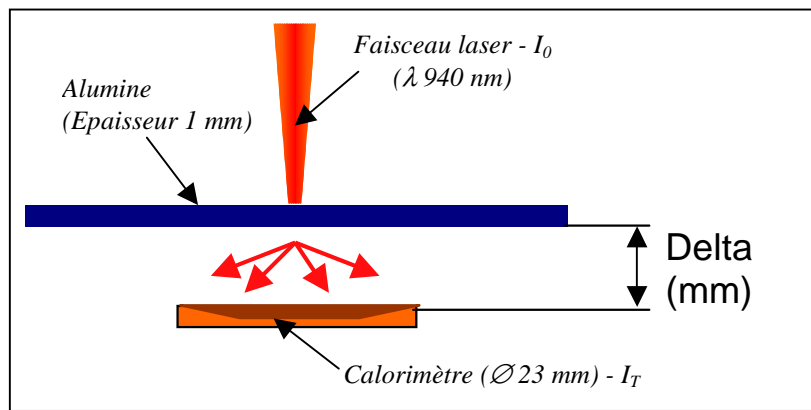


Figure 81 : Schéma de la mesure de la puissance transmise par la pièce d'alumine

La mesure de la puissance du rayonnement transmis par la céramique dépend du placement du calorimètre. Lorsque le calorimètre est proche de la céramique, sa surface de mesure (~415 mm²) représente un angle solide plus grand que lorsqu'il est éloigné. Ainsi, le calorimètre intercepte une fraction plus importante du faisceau diffusé et transmis quand il est proche de l'échantillon (Figure 82).

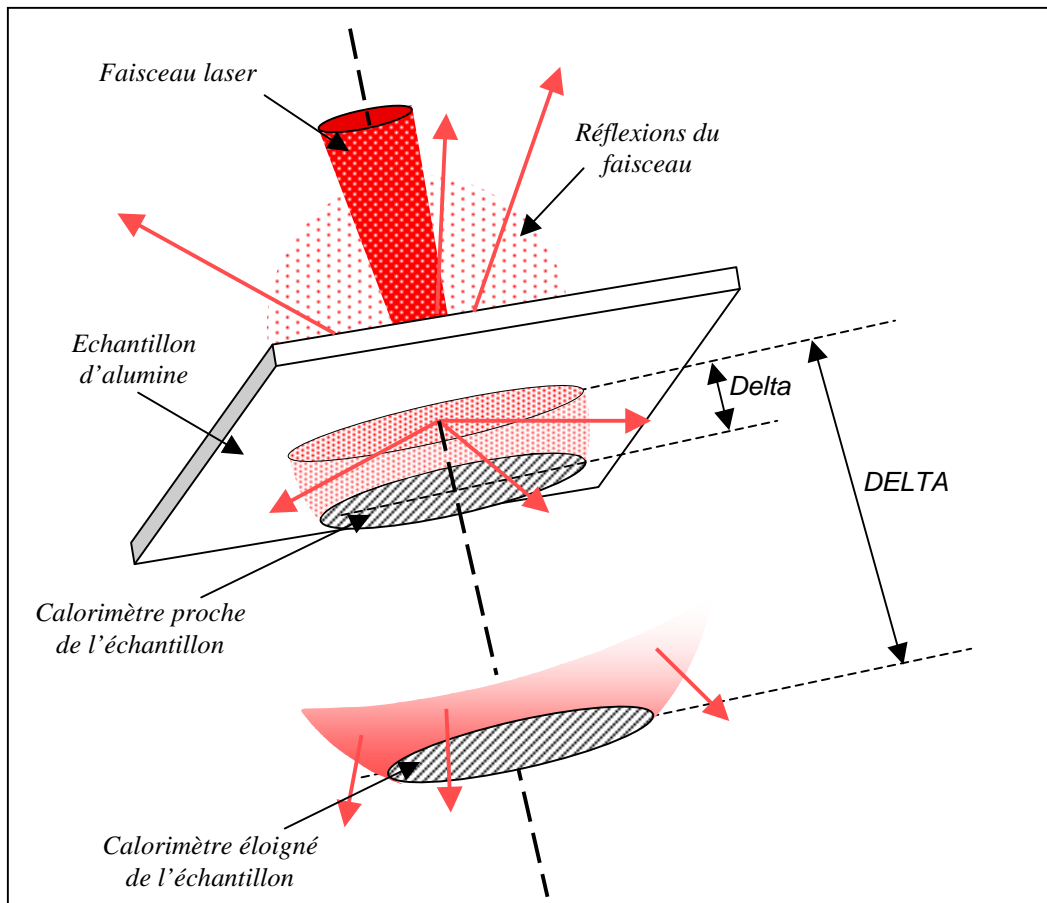


Figure 82 : Schéma de la fraction de faisceau intercepté par le calorimètre en fonction de sa position sous la pièce d'alumine

Le Tableau 27 liste les résultats des mesures de puissance du faisceau transmis, en fonction de la puissance du faisceau incident et du placement du calorimètre sous l'échantillon d'alumine. Les cases grisées représentent les paramètres pour lesquels la densité de puissance est trop élevée pour une mesure sans détérioration du calorimètre.

Delta (mm)	$I_0 = 52,0 \text{ W}$		$I_0 = 108,7 \text{ W}$		$I_0 = 164,0 \text{ W}$		$I_0 = 206,8 \text{ W}$		I_T/I_0 moyen (%)
	I_T (W)	I_T/I_0 (%)	I_T (W)	I_T/I_0 (%)	I_T (W)	I_T/I_0 (%)	I_T (W)	I_T/I_0 (%)	
1	8,0	15,38							15,38
10	5,1	9,80	10,3	9,48	15,6	9,51			9,60
15	3,5	6,73	6,6	6,07	10,4	6,34			6,38
20	2,2	4,23	4,7	4,33	7,0	4,27	8,3	4,01	4,21

Tableau 27 : Mesures de la transmission du faisceau laser en fonction de la puissance du faisceau incident et de la position du calorimètre sous la pièce d'alumine

Comme prévu, plus le calorimètre est éloigné de l'échantillon (Delta élevé), plus la mesure de la puissance est petite. D'autre part, on constate que la puissance du faisceau incident n'influence pas le taux de transmission de la céramique. Le taux de transmission moyen en fonction du placement du calorimètre est représenté sur la Figure 83.

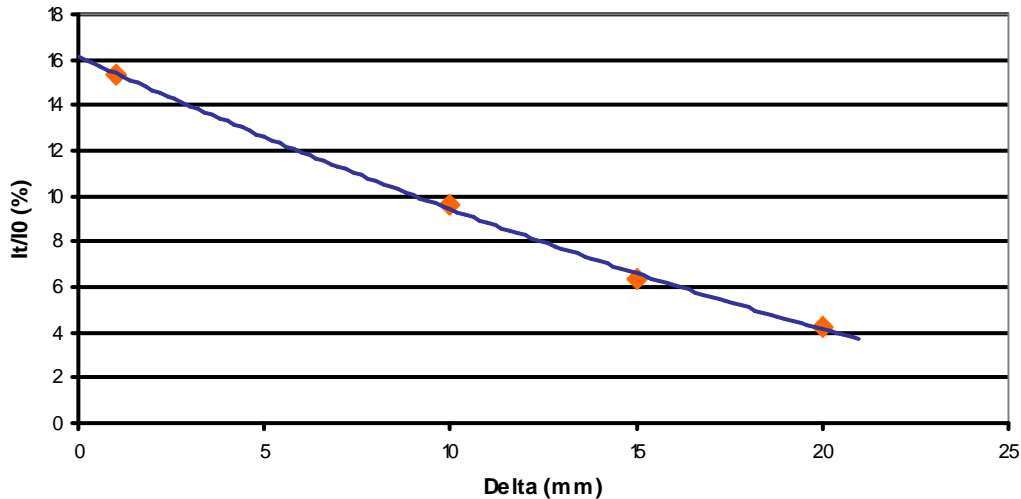


Figure 83 : Mesure de la transmission du faisceau laser en fonction de la position du calorimètre

Par projection de la courbe polynomiale d'ordre 2 qui décrit au mieux l'évolution du taux de transmission mesuré en fonction du positionnement du calorimètre, on peut définir le taux de transmission réel de l'échantillon d'alumine. Ces mesures indiquent un taux de transmission du faisceau laser proche de 16% pour la pièce d'alumine. Ce résultat corrobore les mesures préliminaires effectuées à l'aide du spectromètre optique (environ 15%).

Ces mesures ne nous renseignent pas sur la répartition énergétique du rayonnement transmis par l'échantillon. Cependant, elles mettent en évidence un faisceau de répartition plus homogène, dû aux multiples réflexions et réfractions au sein de l'alumine. Le déplacement du faisceau suivant une trajectoire circulaire sur la pièce d'alumine tend également à répartir l'énergie sur la zone de contact entre l'alumine et son revêtement métallique. Le dernier point concernant ces mesures est la possibilité de négliger l'absorption du faisceau laser par la céramique : l'absorption d'un rayonnement de longueur d'onde 940 nm est inférieure à 1%.

17.2.2 Propriétés thermiques des matériaux

Les propriétés thermiques des différents matériaux sont des données essentielles pour la modélisation des transferts de chaleur. Outre les températures de changement d'état et leur chaleur latente associée, la description complète des propriétés physiques nécessaires pour un modèle thermique comprend également la densité, la chaleur spécifique et la conductivité thermique des matériaux. Ces données sont largement diffusées dans le cas des métaux et des céramiques les plus utilisés (tel que l'alumine). Cependant, les recherches effectuées sur l'établissement de ces propriétés pour les nombreux alliages d'apport ne sont toujours pas exhaustives. De plus, les propriétés

thermiques des crèmes à braser constituées d'un mélange de flux et de microbilles d'alliages ne sont très généralement pas disponibles (hormis leurs températures de liquidus et solidus).

Les propriétés thermiques des matériaux utilisés pour la modélisation du procédé de brasage laser sont listées dans le Tableau 28 (Ce sont les données du fournisseur pour les céramiques frittées : alumine à 96%).

	Masse volumique ρ (kg.m ⁻³)	Conductivité thermique K (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Chaleur spécifique C _P (J.g ⁻¹ .K ⁻¹)
Alumine	3780	34	800
Cuivre	8900	385	385
Aluminium	2780	193	875

Tableau 28 : Propriétés thermiques des matériaux utilisés

17.3 Modélisation du procédé de brasage laser

17.3.1 Géométrie du système

Le système étudié comprend différents éléments : la pièce d'alumine métallisée, le métal de base (cuivre), l'alliage d'apport (crème à braser Sn-4,0Ag-0,5Cu %massique) et le montage de maintien en position (aluminium). L'outil de calcul pour la résolution de l'équation différentiel utilisé impose un nombre limité de degrés de liberté, et donc une géométrie particulièrement simple. Bien qu'étant un élément essentiel à l'opération de brasage, le matériau d'apport n'est pas représenté pour l'étude des transferts de chaleur. La dimension très réduite de la couche de crème à braser déposée requiert un maillage (discrétisation de la géométrie) très précis, non supporté par le solveur informatique. Il en est de même pour les couches de métallisation qui n'excèdent pas quelques micromètres d'épaisseur.

Le système numérique à 2 dimensions représente alors : l'alumine, le métal de base cuivreux et le montage en aluminium qui est essentiel pour le refroidissement par conduction de l'assemblage (Figure 84).

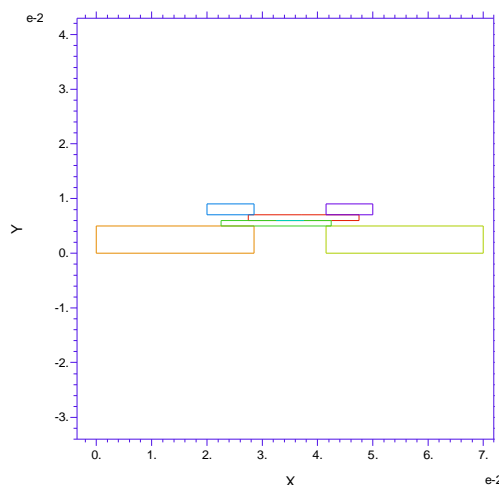


Figure 84 : Géométrie 2D de l'assemblage et du montage

17.3.2 Equation à résoudre

Le cas particulier d'un régime non stationnaire, traité lors de cette étude considère une conductivité thermique des matériaux constante, et un milieu inerte (pas de production de chaleur). L'équation générale des transferts de chaleur (loi de Fourier) dans un repère cartésien s'écrit alors simplement :

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

Avec :

$$\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p} \quad (\text{Diffusivité thermique})$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (\text{Opérateur Laplacien})$$

K (Conductivité thermique en $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

ρ (Densité)

C_p (Chaleur spécifique en $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

17.3.3 Conditions aux limites du système

D'après l'étude préliminaire portant sur les propriétés optiques de l'alumine, l'interaction du faisceau laser avec l'assemblage s'effectue en grande majorité à l'interface de l'assemblage alumine-cuivre. C'est la couche de métallisation de l'alumine (nickel/or) qui absorbe le faisceau qui est alors source de chaleur pour l'assemblage. La source laser est considérée comme source surfacique lorsque l'épaisseur de peau (longueur caractéristique de l'atténuation d'une onde) du matériau irradié est beaucoup plus petite que la profondeur de pénétration définie par : $l_{th} = \sqrt{\alpha \cdot \tau}$ (encore appelée longueur de diffusion) où α est la diffusivité du matériau et τ la durée d'interaction [Martin 03]. Comme l'épaisseur de peau des métaux est généralement de quelques centaines d'Angström, une source surfacique est utilisée pour décrire l'interaction du faisceau laser avec l'assemblage. Un flux de chaleur représentatif de la source laser constitue alors la condition à la frontière définie par l'interface alumine-cuivre.

Malgré les multiples réflexions et réfractions au sein de la pièce d'alumine et le déplacement du faisceau laser, le flux de chaleur à l'interface alumine-cuivre est choisi de forme gaussienne :

$$q(x, y) = \frac{P}{\pi \cdot r^2} \cdot (1 - R) \cdot \exp\left(-3 \cdot \frac{x^2 + y^2}{r^2}\right)$$

Avec :

$q(x, y)$ Flux de chaleur (W/m^2)

P Puissance du faisceau laser (W)

r Rayon de la zone d'interaction du faisceau laser (m)

R Taux de réflexion du faisceau laser (%)

Afin de rendre compte du déplacement du faisceau laser, et d'une répartition énergétique différente sous l'alumine, le rayon de la zone d'interaction du faisceau laser est défini de façon semi empirique. Le paramètre laser optimum et la température maximum du dessus de la pièce d'alumine constituent un point de référence (rond de la Figure 77). Le rayon de la zone d'interaction du faisceau laser est donc défini à partir de cette mesure expérimentale.

Concernant les autres frontières du système :

- On considère un contact parfait au niveau des frontières internes de l'assemblage,
- Au niveau des limites du système avec l'air ambiant, les transferts de chaleur par convection sont pris en compte. La quantité de chaleur transmise par convection entre une paroi solide et un fluide s'exprime selon l'équation suivante :

$$Q_c = h \cdot S \cdot (T_s - T_\infty)$$

Avec :

Q_c	Quantité de chaleur transmise par convection (W)
h	Coefficient d'échange thermique par convection ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
S	Surface d'échange (m^2)
T_s	Température à la surface du solide (K)
T_∞	Température de l'air ambiant (K)

17.4 Simulation du procédé de brasage laser

Les résultats de simulation des paramètres optimaux du procédé de brasage laser permettent de définir la valeur du rayon d'interaction du faisceau à l'interface alumine-cuivre. La température maximum calculée sur la pièce d'alumine en fonction du rayon du faisceau laser est reportée dans le Tableau 29. Ces calculs donnent le rayon d'interaction choisi pour la modélisation du procédé de brasage laser : $r = 5,25$ mm (Température proche de la mesure expérimentale : $224^\circ C$).

Rayon d'interaction du faisceau avec l'interface alumine-cuivre (mm)	Température maximum sur la face supérieure de l'alumine ($^\circ C$)
5,0	241
5,1	233
5,2	227
5,3	222
5,4	215
5,5	209

Tableau 29 : Température calculée de la face supérieure de l'alumine en fonction du rayon d'interaction du faisceau laser de puissance 270W

La Figure 85 montre un comparatif entre la mesure expérimentale et le calcul numérique du procédé de brasage laser idéal (270W ; 5,7s ; ...). La Figure 86 reprend les différentes mesures expérimentales effectuées préalablement, donnant la température maximum à la surface de l'alumine en fonction de la puissance du faisceau laser, et indique également les résultats de la simulation numérique (2D) du même procédé.

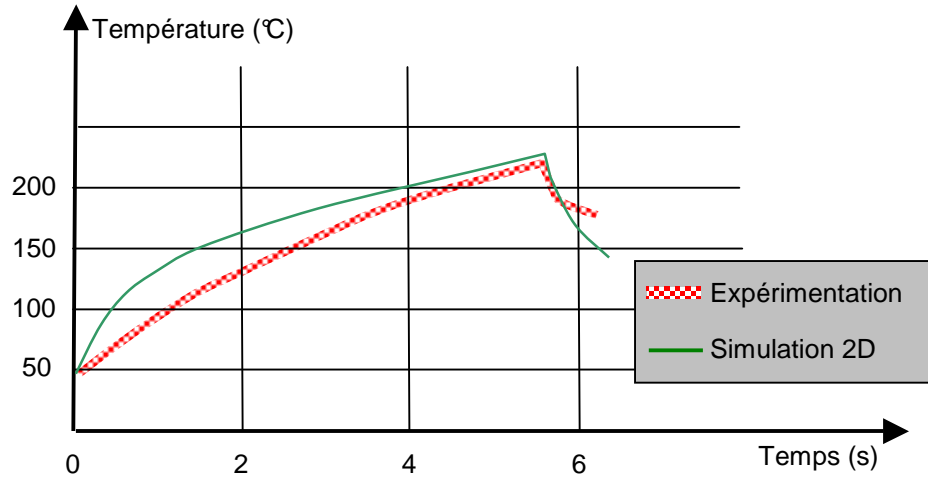


Figure 85 : Evolution temporelle de la température calculée et mesurée du point le plus chaud de la face supérieure de l'alumine

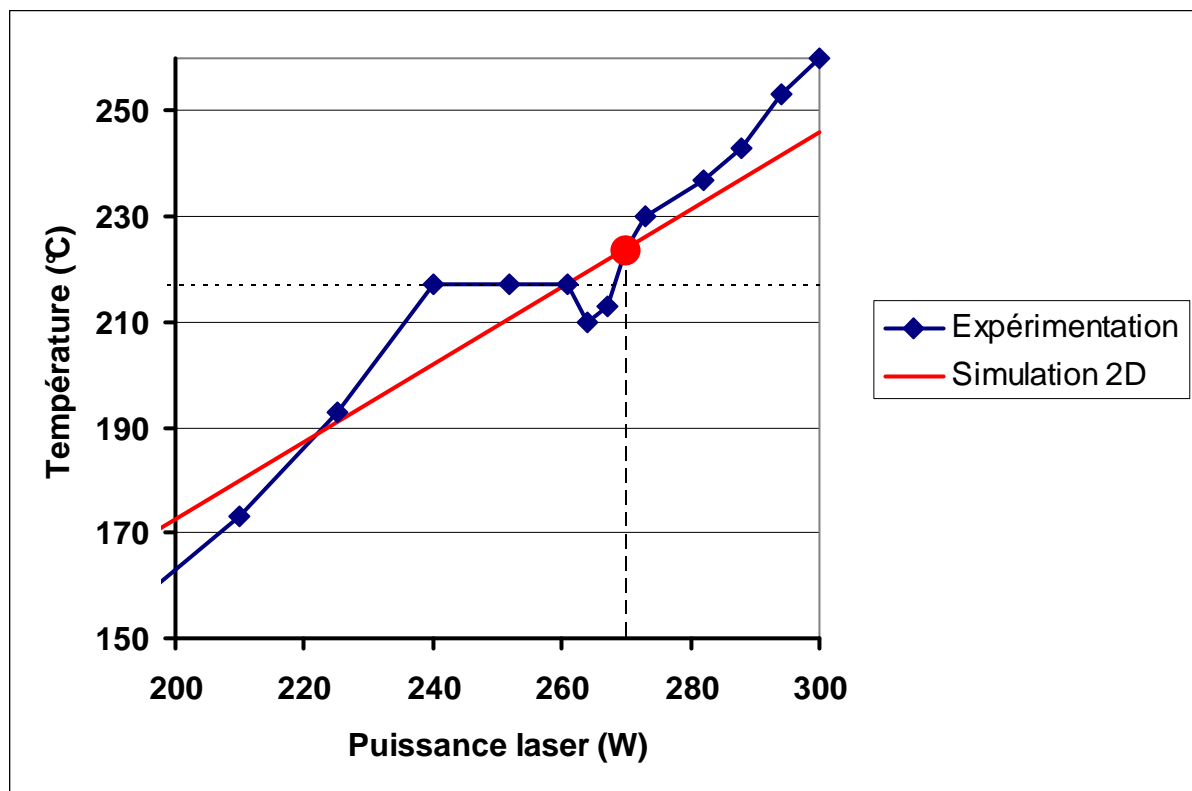


Figure 86 : Température maximum de la face supérieure de l'alumine mesurée et calculée en fonction de la puissance laser utilisée

17.5 Conclusion

Les résultats de la simulation numérique 2D, bien que assez proches des mesures expérimentales ne décrivent pas précisément les différents phénomènes physico-chimiques ayant lieu lors du procédé de brasage laser. Ce modèle à 2 dimensions, et l'outil de calcul limité en capacité de mémoire ne sont pas satisfaisants pour décrire complètement le procédé de brasage laser étudié. Cependant, le modèle développé, particulièrement simple permet d'obtenir des informations pertinentes sur la méthodologie de la modélisation d'un procédé de brasage laser :

L'interaction du faisceau laser avec l'assemblage doit être précisément définie. Lors de cette étude, la pièce d'alumine irradiée présente la particularité d'induire une réflexion volumique du faisceau laser sans l'absorber. Ceci influe sur la répartition énergétique du faisceau laser au niveau de sa surface d'interaction avec l'assemblage. La connaissance exacte de la répartition énergétique du faisceau laser est une donnée essentielle, et celle-ci n'est pas toujours mesurable précisément. Finalement, le faisceau laser est absorbé par la couche de métallisation de la pièce d'alumine. Il est alors considéré comme une source de chaleur surfacique proche du joint de l'assemblage.

L'obtention des propriétés thermiques des différents matériaux est également primordiale. Elle est délicate dans le cas des crèmes à braser qui sont constituées de microbilles d'alliage insérées dans une matrice en résine contenant différents solvants. La plage de température d'un procédé de brasage tendre permet de s'affranchir des variations des propriétés thermiques des matériaux.

La prise en compte de l'évolution morphologique du matériau d'apport au cours du brasage est également un phénomène influent lors du développement d'une étude numérique des transferts de chaleur au sein de l'assemblage [Nicolics 94]. Les phénomènes de coalescence et mouillage du matériau d'apport induisent des discontinuités dans l'évolution en température de l'assemblage. La mesure expérimentale des Figure 77 et Figure 86 indique une baisse de température suite au palier de brasage. Celle-ci correspond au mouillage du matériau d'apport sur le substrat, à un meilleur transfert de chaleur vers le matériau de base et donc à une chute de la température de la surface supérieure de l'assemblage.

Finalement, cette première étude des transferts de chaleur lors d'un procédé de brasage laser met en évidence la nécessité d'utiliser un outil de calcul performant afin de rendre compte des différents phénomènes physico-chimiques d'un procédé de brasage laser.

18 Modélisation à trois dimensions

L'utilisation d'un outil de calcul permettant une modélisation en 3 dimensions, avec des capacités de calcul plus importantes que lors des calculs précédents permet de détailler plus précisément les phénomènes physico-chimiques du procédé de brasage laser. Par ailleurs, une attention particulière est portée sur les géométries des objets considérés. Celles-ci sont adaptées pour tirer meilleur parti des axes de symétrie, et ainsi réduire les temps de calcul.

18.1 Procédé de brasage laser avec crème à braser

18.1.1 L'assemblage étudié

Une crème à braser Sn-3,8Ag-0,7Cu (%massique) a été utilisée pour l'assemblage de deux pièces composites (15% de TiC dans une matrice d'aluminium). La Figure 87 montre la géométrie de l'assemblage. Le traitement de surface appliqué aux deux pièces composites (cylindres : 1mm d'épaisseur et 4,5mm de diamètre) consiste en un dépôt auto catalytique d'une couche de 3 μ m de nickel suivi d'un dépôt de 0,2 μ m d'or par immersion. L'alliage d'apport est constitué de microbilles de 25 à 45 μ m de diamètre et comprend 14 %massique de flux. La crème à braser est déposée sur le matériau de base composite à l'aide d'un masque de sérigraphie d'ouverture circulaire (volume de crème sérigraphiée ~0,5mm³).

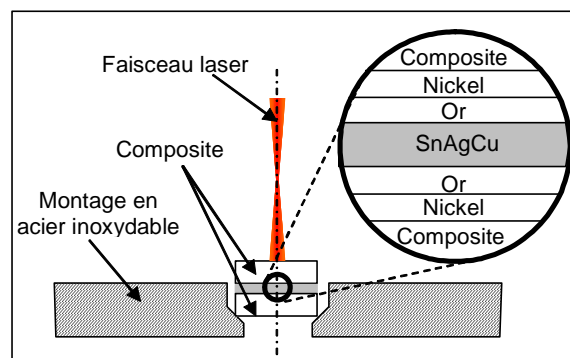


Figure 87 : Schéma de l'assemblage et du montage

L'outil laser utilisé pour cette étude est un laser à diode ($\lambda=940\text{nm}$) équipé d'une fibre optique de 400 μ m de diamètre et d'un simple système optique à deux lentilles (recollimation-focalisation). La puissance maximum délivrée par l'ensemble du système est de 200W. Le faisceau laser est immobile, et sa zone d'interaction avec la pièce supérieure représente un disque de 2mm de diamètre avec une répartition énergétique gaussienne.

Un pyromètre optique permet de mesurer la température sur le dessus de l'assemblage. Les résultats issus des calculs numériques seront alors confrontés à ces mesures expérimentales de température.

18.1.2 Etude expérimentale des « profils de températures »

La Figure 88 représente les mesures de l'évolution temporelle du centre de la face supérieure de l'assemblage, pour différentes puissances laser (30 à 150W) et durées d'interaction (2 à 13s).

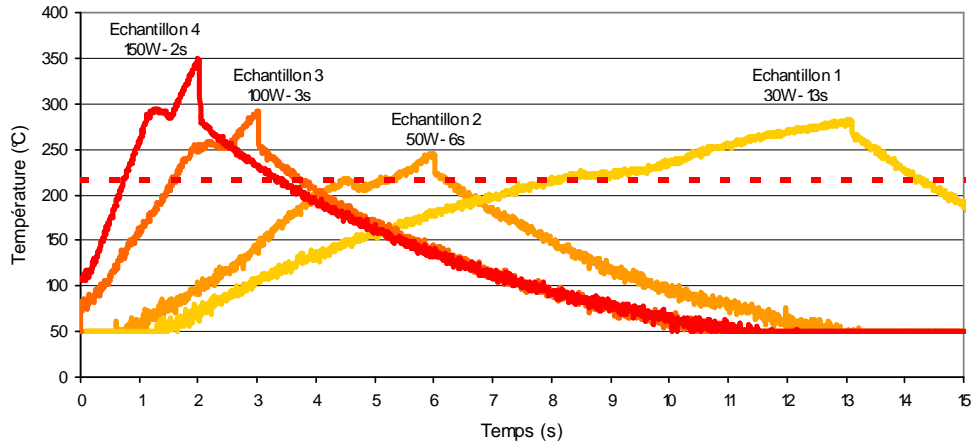


Figure 88 : Mesures de température lors du procédé de brasage laser

L'échantillon 1 est brasé à faible puissance. La montée en température de cet échantillon est donc relativement homogène. Ainsi, la température enregistrée par le pyromètre sur le dessus de l'assemblage doit être proche de celle de l'alliage d'apport. Pour cet échantillon, on observe un palier de température au niveau de la température de changement d'état de l'alliage d'apport (217°C). On remarque également que ce palier caractéristique est d'autant plus haut en température que la puissance du faisceau laser est élevée : le palier est à 260°C pour une puissance laser de 100W et à 290°C pour 150W. La montée en température finale, suite au palier, indique que l'alliage d'apport est entièrement sous forme liquide.

Ces discontinuités peuvent être associées aux différents phénomènes physico-chimiques ayant lieu lors du procédé de brasage laser [Chabicovsky 93]. La Figure 89 détaille l'ensemble des discontinuités observées dans le cas des échantillons 2 et 3. Sept principales étapes peuvent être distinguées.

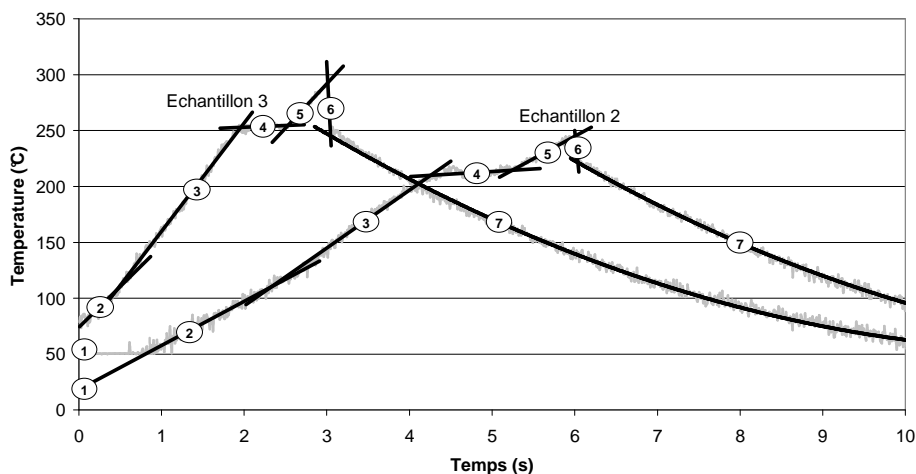


Figure 89 : Discontinuités de l'évolution temporelle en température lors du procédé de brasage laser

Lors des premières millisecondes du procédé, la montée en température dépend des propriétés optiques du matériau irradié et des paramètres du faisceau laser. Puis (étape 2), la température croît plus doucement : il y a un équilibre entre l'énergie fournie au système et sa dissipation par conduction à travers l'assemblage. La troisième droite (étape 3) indique un changement de pente autour de 110°C. La formation d'oxydes à la surface des matériaux irradiés peut être responsable d'une modification de l'absorption du faisceau laser [Brandner 00]. Cependant, le revêtement doré utilisé écarte cette hypothèse. Ce changement de pente a lieu au point d'évaporation des solvants volatiles inclus dans la crème à braser, et révèle ainsi l'impact de l'évaporation des solvants sur le procédé de brasage. Le comportement du flux doit donc être pris en compte pour l'étude thermique d'un procédé de brasage laser [Nakahara 00]. L'évaporation des solvants volatils est alors susceptible d'induire une importante résistance de contact entre les différentes pièces, et tout au long du matériau d'apport (Figure 90). La diffusivité thermique de l'ensemble de la crème à braser est alors fortement réduite. L'énergie fournie par le faisceau laser est difficilement dissipée à travers la crème à braser, suite à l'évaporation des solvants, et la température de la pièce supérieure de l'assemblage va croître plus fortement, comme l'indique le changement de pente sur la

Figure 89.

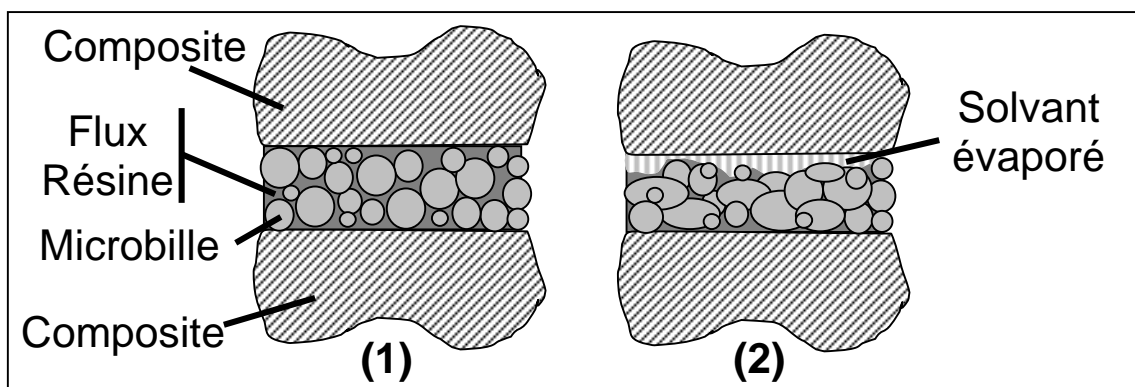


Figure 90 : Configuration de la crème à braser, avant (1) et après (2) l'évaporation des solvants volatils du flux

Mentionnée précédemment, la quatrième étape (palier de température) est souvent attribuée à la fusion de l'alliage d'apport (et un transfert thermique accentué vers la pièce inférieure). Ainsi, à la fin de ce palier, lorsque la température augmente de nouveau, le procédé de brasage laser peut être considéré comme terminé. Ce palier de température est donc suivi d'une montée en température (étape 5) jusqu'à l'arrêt du laser. La fin du procédé de brasage laser est un moment critique du procédé : il doit avoir lieu après la complète fusion du matériau d'apport et avant une surchauffe de l'assemblage. Dans le cas de cette étude, le temps d'interaction du faisceau laser est défini à partir des observations visuelles au cours du procédé. Suite à l'arrêt du faisceau laser et donc de l'apport d'énergie, on observe une forte chute de la température jusqu'à solidification du matériau d'apport (étape 6). Ce refroidissement très rapide est caractéristique des procédés de brasage laser. Il mène à une microstructure fine du procédé du joint brasé, et donc à une bonne résistance mécanique de l'assemblage [Tian 02 b]. Le refroidissement s'effectue principalement par conduction à travers le support de l'assemblage (étape 7).

Finalement, l'étude de l'évolution en température d'un procédé de brasage laser permet de détailler ses phénomènes physico-chimiques prépondérants. Ces considérations sont essentielles pour le développement de la modélisation du procédé de brasage laser

18.1.3 Développement du modèle et comparaison avec les mesures expérimentales

La modélisation et la simulation thermique du procédé de brasage laser détaillé dans les paragraphes précédents sont développées à l'aide du programme de résolution par la méthode des éléments finis COMSOL MULTIPHYSICS et son module de transfert thermique. Les différentes pièces constituant le montage étudié sont cylindriques. La géométrie du système permet donc d'utiliser un modèle à 2 dimensions axisymétrique, qui réduit le nombre de degré de liberté, et donc le temps de résolution du modèle.

Le modèle est constitué des principaux éléments de l'assemblage : les deux pièces composites, et l'alliage d'apport Sn-Ag-Cu. Néanmoins, comme la zone de contact entre l'assemblage et le support de positionnement est volontairement réduite (Figure 87), on suppose que l'acier inoxydable du support ne dissipe pas une quantité significative d'énergie lors de l'interaction laser. La géométrie du modèle n'inclut donc pas le support de positionnement.

	Masse volumique ρ (kg.m ⁻³)	Conductivité thermique K (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Chaleur spécifique C _P (J.g ⁻¹ .K ⁻¹)
Composite	2940	152	832
Alliage d'apport	7430	38	234

Tableau 30 : Propriétés thermiques des matériaux utilisés

Lors du développement de la modélisation thermique par éléments finis, les hypothèses simplificatrices usuelles sont prises en compte afin de faciliter le calcul, sans perdre d'informations essentielles [Tian 04]. Ainsi, le contact entre deux pièces est considéré comme parfait, les matériaux isotropiques, les propriétés thermiques constantes dans la gamme de température étudiée, les échanges convectifs dans l'alliage fondu sont ignorés de même que la chaleur latente de fusion de l'alliage.

Le Tableau 30 indique les propriétés thermiques des matériaux étudiés. Le maillage et les points pertinents de l'assemblage sont représentés sur la Figure 91.

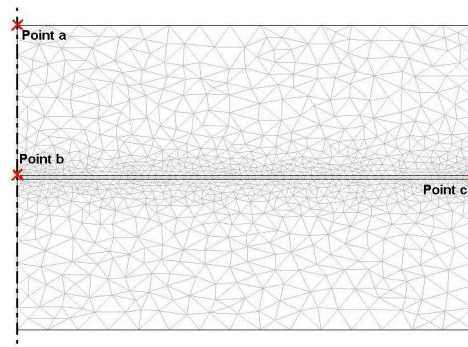


Figure 91 : Discretisation (maillage) de la géométrie 2D-axisymétrique et points pertinents de l'assemblage

Afin de modéliser l'évaporation des solvants volatiles du flux, la conductivité thermique de la crème à braser est supposée fortement réduite lorsque sa température est supérieure à 110°C. La conductivité de l'alliage d'apport entre 110 et 217°C (température de fusion) est alors arbitrairement $K_{SAC} = 0,05W.m^{-1}.K^{-1}$.

Plusieurs montées en température sont alors calculées avec différents paramètres laser. Seuls les étapes de montée en température sont considérées (interaction laser-assemblage ; étapes n° 1 à 5). L'étape de refroidissement n'est pas simulée (étapes 6 et 7). Les évolutions en température des points a, b et c (Figure 92) sont enregistrées. La fusion de l'alliage d'apport est considérée complète lorsque le point c atteint au moins 218°C.

La Figure 92 représente les profils de température calculés et celui mesuré, utilisant les paramètres laser de l'échantillon 2 (Puissance laser : 50W ; diamètre du spot : 2mm). Le modèle (point a) décrit précisément les mesures expérimentales. Cependant, plus la puissance laser est élevée, plus l'écart de température entre mesure et calcul est grand. Ceci est dû aux différentes hypothèses simplificatrices, ainsi qu'aux erreurs expérimentales plus importantes dans le cas de procédés laser rapides. Effectivement, la mesure optique de température (pyromètre optique) peut être faussée lors d'une montée en température trop rapide de la surface des matériaux. Inversement, une montée plus douce en température (cas de l'échantillon 1) induit une température plus homogène de l'ensemble de l'assemblage. L'effet du support dissipant l'énergie ne peut alors plus être négligé.

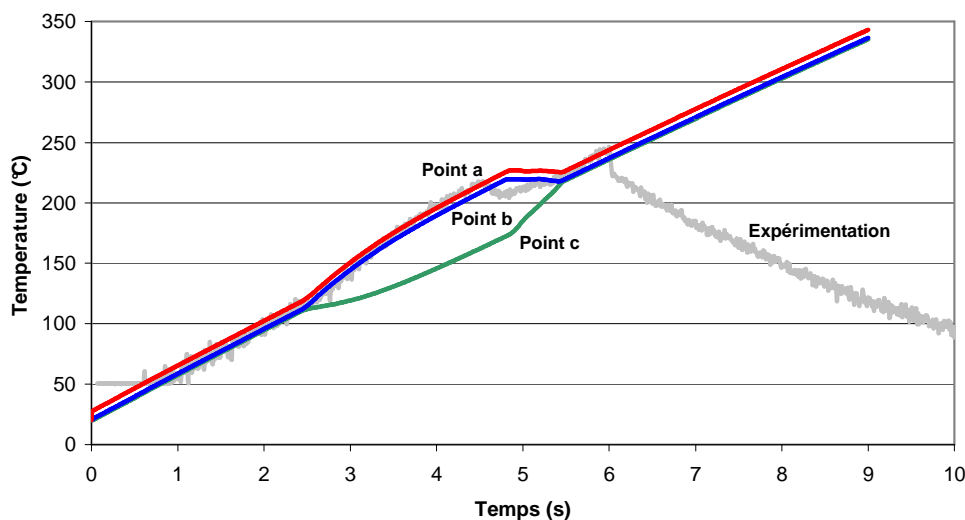


Figure 92 : Calcul numérique de la montée en température aux points a, b et c, et comparaison avec la mesure expérimentale pour un procédé de brasage laser à 50W

Le profil de température calculé au point c est différent de celui enregistré aux points a et b (Figure 92). Ce phénomène est lié à l'évaporation des solvants volatils inclus dans le flux.

La température calculée au point c permet de déduire le temps nécessaire à la fusion complète de l'alliage d'apport. La Figure 93 montre une excellente corrélation entre les valeurs expérimentales (triangles) et les données mathématiques (ligne). Le modèle mathématique développé est alors adapté pour évaluer la température atteinte par l'alliage d'apport, en utilisant différents paramètres laser.

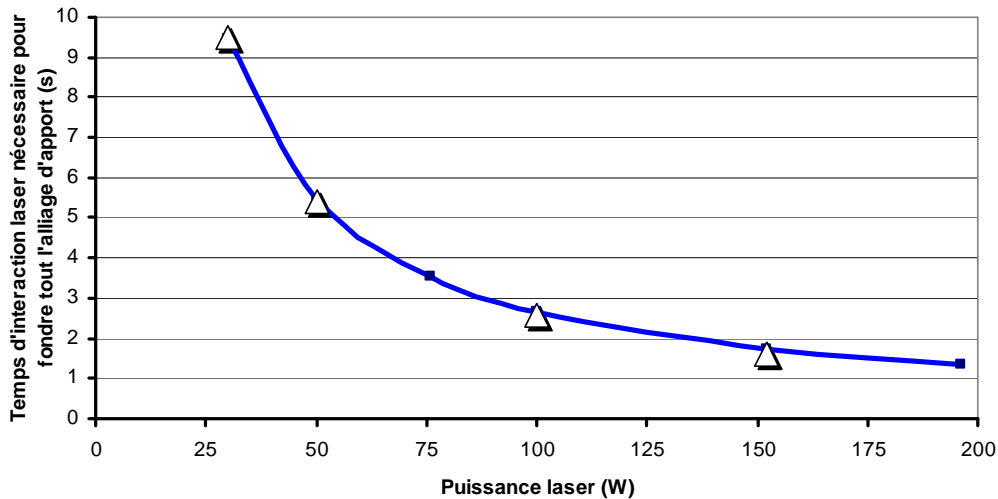


Figure 93 : Comparaison des résultats de la simulation numérique (ligne) et des mesures expérimentales (triangles) concernant le temps nécessaire à fondre la totalité de l'alliage d'apport en fonction de la puissance du faisceau laser

18.1.4 Corrélation avec l'étude métallographique du joint brasé

La création de composés intermétalliques est essentielle à la formation du joint brasé. Ils sont le lien métallurgique de l'assemblage. Les principaux mécanismes gouvernant la diffusion de l'or au sein d'un alliage d'apport étain-plomb lors d'un procédé de brasage laser ont été précisément détaillés [Tian 02 a] [Tian 02 b] [Tian 03]. Ces mécanismes sont très certainement semblables dans le cas d'un alliage sans plomb Sn-Ag-Cu. Par ailleurs, de nombreuses études ont été effectuées concernant la morphologie et les réactions interfaciales lors de la fusion d'un alliage d'apport Sn-Ag-Cu sur un substrat revêtu Ni/Au [Shiau 02] [Ho 02] [Islam 03] [Yoon 05]. Cette configuration de matériau mène à la création de l'intermétallique $(\text{Cu,Ni})_x\text{Sn}_y$ plutôt que Ni_3Sn_4 , dû à la présence de cuivre dans l'alliage d'apport. La formation des intermétalliques, et surtout leur épaisseur dépendent principalement de la température et de la durée d'interaction du substrat avec l'alliage d'apport sous forme liquide. L'épaisseur de l'intermétallique est, en effet, directement liée à la dissolution de l'étain (espèce diffusante principale) dans la couche solide de nickel [Lee 94].

Les Figure 94 et Figure 95 (des échantillons 2 et 4 respectivement) représentent la distribution de l'étain et du nickel (EDX linescan) le long d'une coupe du joint brasé. En tenant compte de la configuration de l'assemblage, et dû à la conduction de l'énergie laser à travers la pièce supérieure, l'alliage d'apport atteindra son point de fusion d'abord au niveau de l'interface supérieure de l'assemblage. De plus, basé sur le calcul numérique, l'évaporation des solvants volatils du flux ralenti la propagation de l'énergie à travers le joint. Ainsi, l'interface inférieure de l'assemblage atteindra la température de fusion de l'alliage bien après l'interface supérieure (Figure 92). Le temps de réaction à l'interface supérieure est alors plus long, et la diffusion de l'étain y est donc plus importante qu'au niveau de l'interface inférieure de l'assemblage. Ceci est confirmé par les résultats expérimentaux (Figure 94 et Figure 95) qui indiquent un profil de distribution de l'étain différent au niveau des deux interfaces du joint brasé.

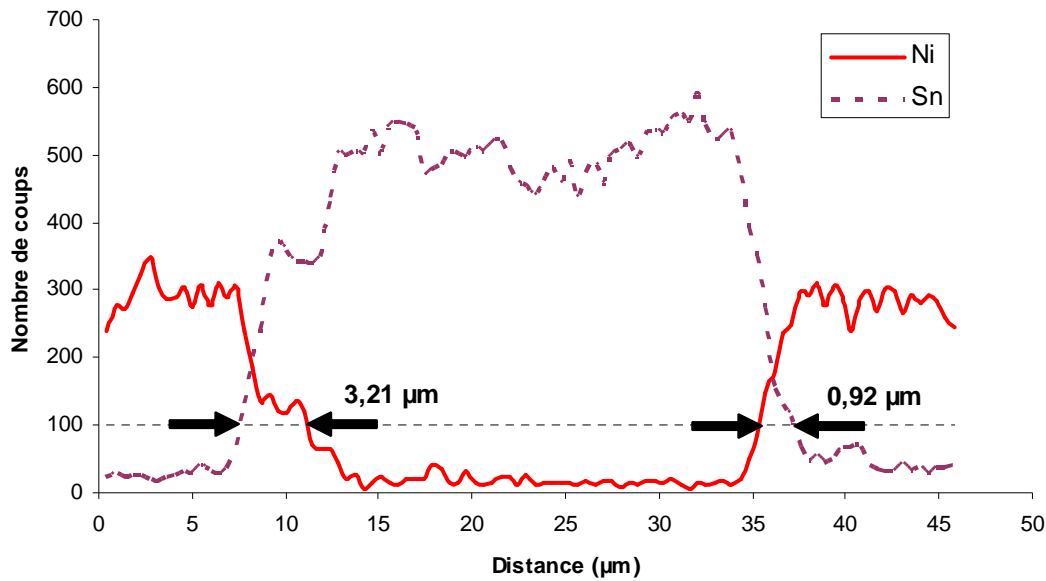


Figure 94 : Distribution du nickel et de l'étain à travers le joint brasé de l'échantillon 2

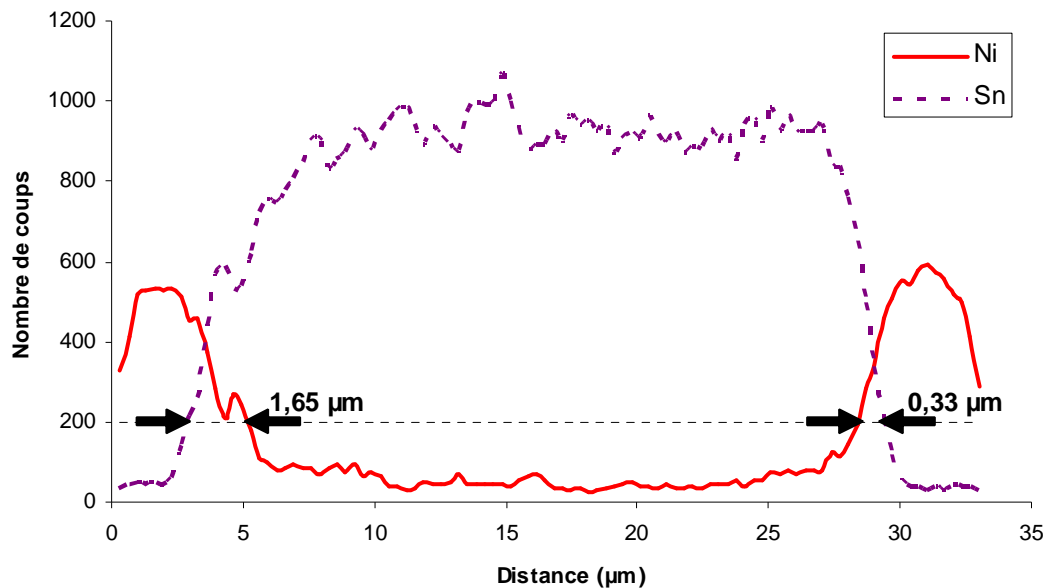


Figure 95 : Distribution du nickel et de l'étain à travers le joint brasé de l'échantillon 4

Le nombre de coups enregistré par l'appareil dépend de la durée de la mesure. L'épaisseur de la couche d'intermétallique au niveau des différentes interfaces est déterminée en fonction du signal maximum enregistré. Elle est calculée à 100 coups pour l'échantillon 2 et 200 coups pour l'échantillon 1. Les valeurs obtenues ne sont qu'une estimation de l'épaisseur de cette couche d'intermétallique. La qualité du polissage de l'échantillon de même que la précision de l'appareil, et le phénomène de poire de diffusion du matériau ne permettent pas d'obtenir des mesures extrêmement précises. Cependant, ces valeurs sont utilisées comme comparatif. Dans un premier temps, on constate que l'épaisseur des alliages de liaison est supérieure dans le cas de l'échantillon 2 que dans celui de l'échantillon 4 (3,21

et 0,92 μm contre 1,65 et 0,33 μm). En effet, le matériau d'apport est maintenu dans sa phase liquide plus longtemps lors du brasage de l'échantillon 2 par rapport au brasage de l'échantillon 4. Par ailleurs, il apparaît également que l'épaisseur de l'alliage de liaison est nettement plus importante sur l'une de deux interfaces de chaque échantillon. Cette observation confirme le résultat avancé par la simulation qui indique que chaque interface de l'assemblage a une histoire thermique différente. La phase liquide du matériau d'apport est obtenue tout d'abord sur l'interface supérieure de l'assemblage, ce qui conduit à une couche d'intermétallique épaisse. C'est seulement en fin de procédé que l'interface inférieure de l'assemblage se trouve en contact avec l'alliage d'apport liquide, ce qui réduit le temps de formation de l'alliage de liaison et donc son épaisseur finale.

18.1.5 Conclusion

Les profils de température mesurés lors de cette étude sont caractéristiques des différentes étapes physico-chimiques ayant lieu lors du procédé de brasage laser. Le développement du modèle thermique décrivant le procédé a permis d'explorer l'hypothèse du rôle prépondérant de l'évaporation des solvants volatils inclus dans le flux de la crème à braser sur la montée en température de l'assemblage. L'évaporation du flux induit un important gradient de température entre les deux interfaces de l'assemblage. Les calculs numériques sont corroborés par les mesures expérimentales de la microstructure du joint brasé. La différence de diffusion de l'étain entre les deux interfaces de l'assemblage indique des profils de température différents. La diffusion de l'étain à travers la barrière de nickel dépend effectivement de la température et de la durée de la réaction chimique entre les différents éléments de l'alliage d'apport et le substrat.

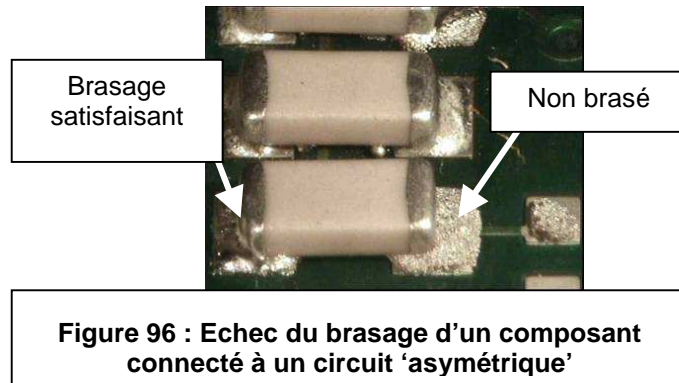
18.2 Influence du circuit électronique sur le paramètre laser

18.2.1 Expérimentations

18.2.1.1 Brasage de composants électroniques

Lors de l'étude expérimentale, on a montré que les paramètres laser utilisés pour le brasage de composants électroniques dépendent notamment du type de circuit connecté à la piste de report du composant. Le circuit électronique, bien que de dimensions très réduites, a une diffusion thermique très élevée. Le cuivre qui constitue les circuits électroniques est choisi pour sa très faible résistivité, ce qui confère des propriétés de conduction de la chaleur très grandes. La géométrie du circuit électronique connecté à la piste de report du composant influe fortement sur la dissipation de l'énergie laser. Le brasage laser d'un composant électronique peut alors échouer si un circuit différent est relié à chacune de ses connexions. La dissipation de l'énergie par le circuit électronique est alors un facteur important pour la détermination des paramètres laser. La Figure 96 montre un composant électronique à deux connexions (SM1206) dont le procédé de brasage laser multifibres n'a pas permis de différencier l'apport d'énergie sur les deux connexions. Le joint est correctement brasé sur la connexion de gauche du composant en revanche, la crème à braser n'a pas atteint son point de

fusion sur la connexion de droite. Cette manipulation révèle l'importance du type de circuit connecté aux pistes de report des composants électroniques.



Lors de la conception des circuits électroniques, le procédé de brasage employé dicte certaines règles de tracé (design rules) afin de rendre possible le brasage du circuit imprimé complet. Dans le cas d'un procédé de brasage laser, chaque joint peut être traité spécifiquement, les paramètres laser doivent alors être ajustés au joint à réaliser. La connaissance du circuit électronique relié à la piste de report est alors primordiale.

18.2.1.2 Mesures de températures sur les pistes de report

Afin de comparer l'effet de différents circuits électroniques reliés à une connexion d'un composant de type SM1206, l'évolution temporelle de la température de la piste de report associée est mesurée lors de son exposition à un faisceau laser de puissance. La montée en température plus ou moins rapide de la piste de report est alors caractéristique de la dissipation de l'énergie dans le circuit électronique voisin. Différents circuits sont disponibles pour l'étude expérimentale (Figure 97). L'anglicisme « pad » est employé pour une meilleure lisibilité du document. Il s'agit d'une piste de report de composant ou plage d'accueil.

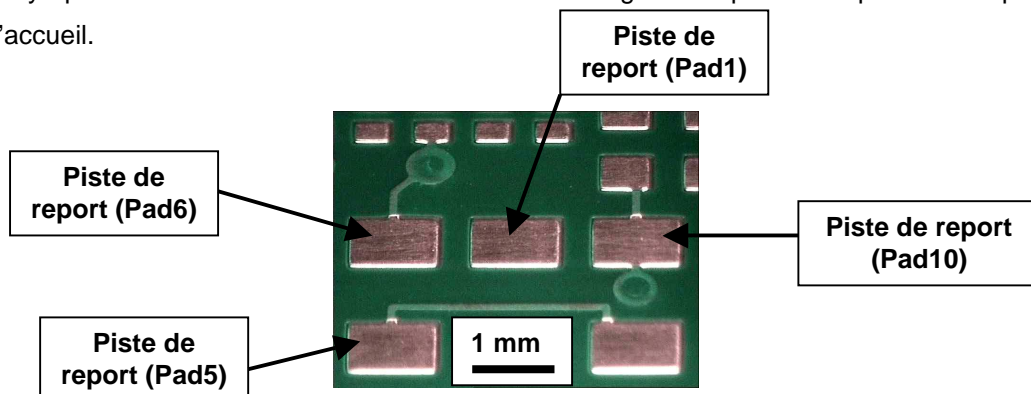


Figure 97 : Photo des différentes pistes de report de composants étudiées

- La piste de report nommée « Pad1 » n'est connectée à aucun circuit électronique.
- La piste de report nommée « Pad5 » est connectée à un simple circuit électronique, lui-même connecté à une autre piste de report de composant type SM1206.
- La piste de report nommée « Pad6 » est connectée à un circuit électronique menant à un via, lui-même relié à une piste de report d'un composant type SM0402.

- La piste de report nommée « Pad10 » est connectée d'un côté à un via, et de l'autre à un circuit menant à une piste de report d'un composant de type SM0603

Pour l'étude de la dissipation de l'énergie thermique à travers le circuit, seule l'interaction de la piste de report avec le faisceau laser est considérée. Ni le composant électronique, ni la crème à braser ne sont utilisés.

Etalonnage de l'outil de mesure de la température d'une piste de report de composant

La mesure de la température sur la piste de report est effectuée à l'aide d'un pyromètre optique. 50°C est la valeur de la température minimum mesurable d'un matériau d'émissivité 1. La faible émissivité du revêtement dorée nécessite donc un étalonnage de l'outil de mesure. La Figure 99 montre l'écart de température mesurée sur le substrat FR4 (émissivité proche de 1) et une piste de report revêtue Ni/Au (émissivité Au = 0,04⁽²⁾). Lorsque le circuit imprimé est placé sur une plaque chauffante, le profil de température est assimilé à une courbe polynomiale d'ordre 2. Le pyromètre optique ne permet pas de mesurer une température sur la piste de report inférieure à 105°C. La Figure 98 donne la correspondance entre la température mesurée sur la piste de report et la température réelle. Sur la plage de mesure de température (105-205°C), cette correspondance est assimilée à une courbe polynomiale d'ordre 2 dont la formule est :

$$T_{réelle} = -0,0045 \cdot T_{pdr}^2 + 2,4142 \cdot T_{pdr} - 0,2418$$

Avec :

T_{pdr} Température mesurée sur la piste de report

$T_{réelle}$ Température réelle

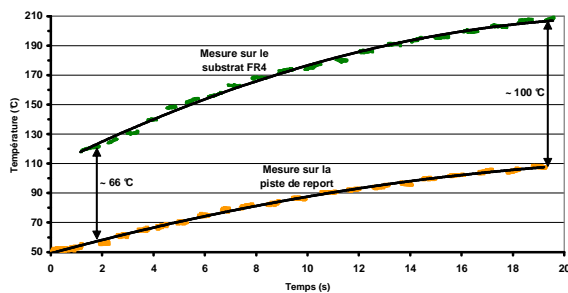


Figure 99 Evolution temporelle de la mesure de température du substrat et de la piste de report de composant.

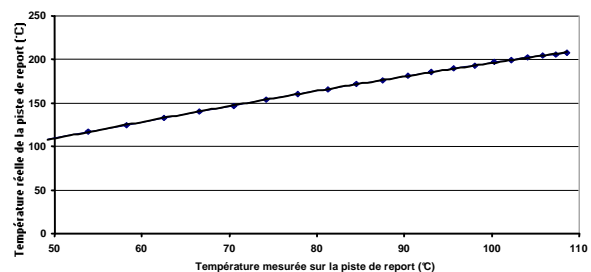


Figure 98 Corrélation entre la température de la piste de report de composant mesurée et sa température réelle

L'évolution en température des différentes pistes de report de composant est mesurée lors de leur interaction avec un faisceau laser de puissance. Le même outil laser à diode a été utilisé pour le brasage des composant type SM1206. La mise en forme du faisceau laser est telle que le spot laser sur la piste de report soit le plus grand possible et que la répartition énergétique du faisceau soit homogène sur la zone d'interaction. Différentes puissances laser sont comparées. Le Tableau 31 indique les paramètres laser utilisés.

² Site Internet : <http://www.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=AMEAu00> (19/04/06)

Type de laser	Temps d'interaction laser (s)	Diamètre du spot laser (mm)	Puissance laser (W)
Diode (845nm)	4,5	1,1	5,1 à 8,4

Tableau 31 : Paramètres laser utilisés lors des mesures expérimentales

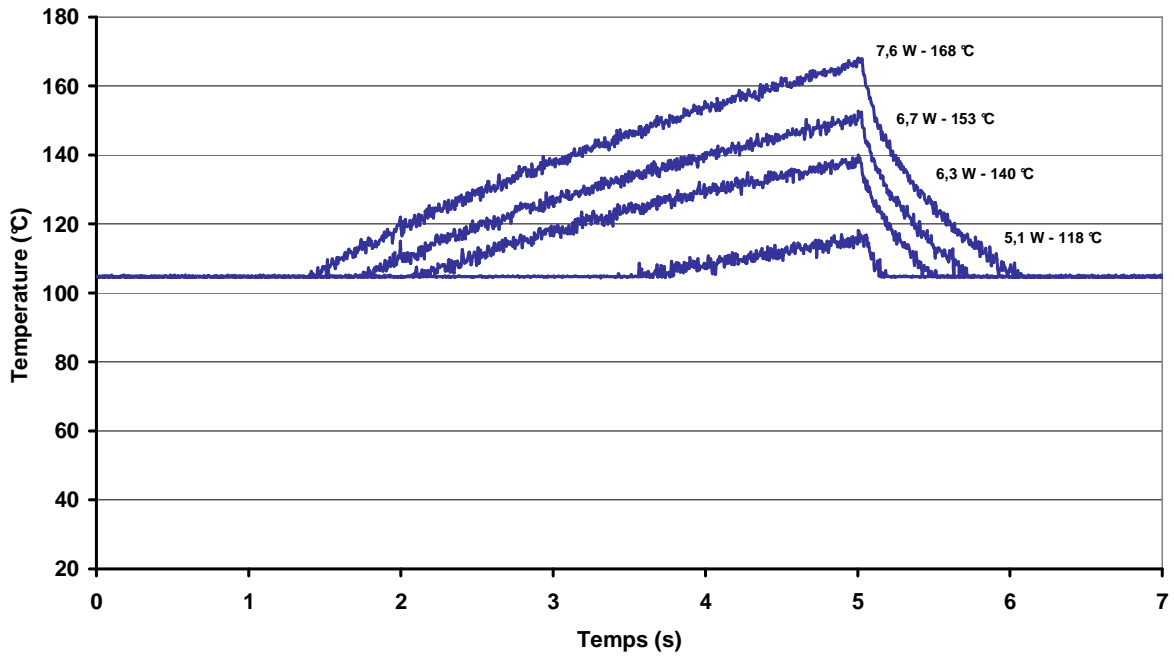


Figure 100 : Evolution temporelle de la température sur la 'Pad1'

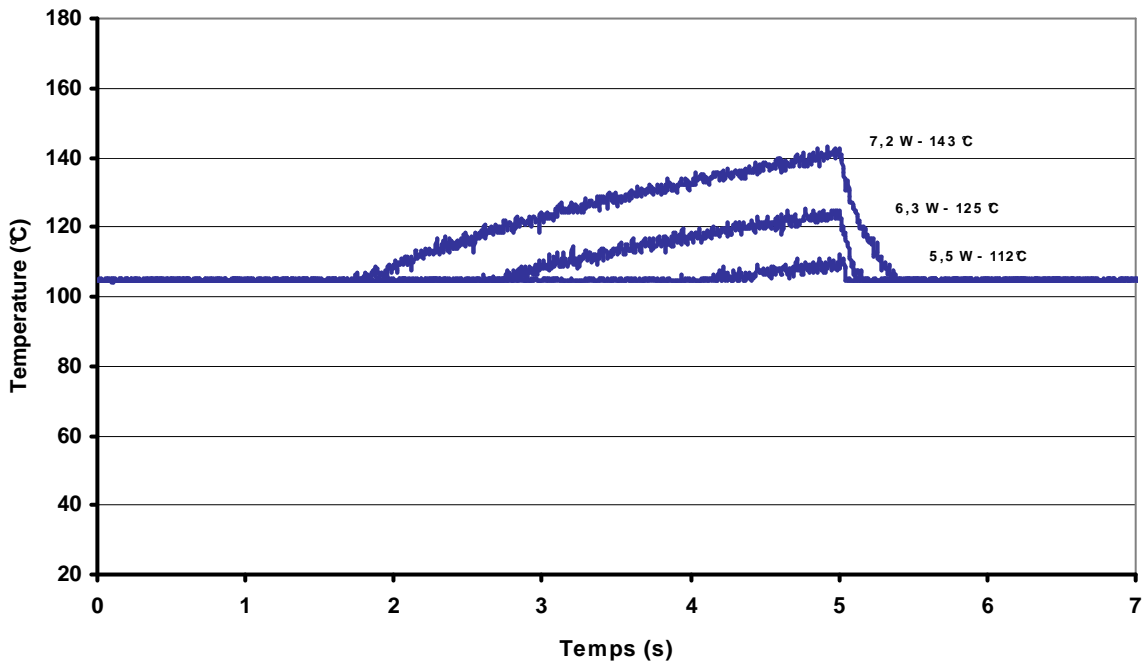


Figure 101 : Evolution temporelle de la température sur la 'Pad5'

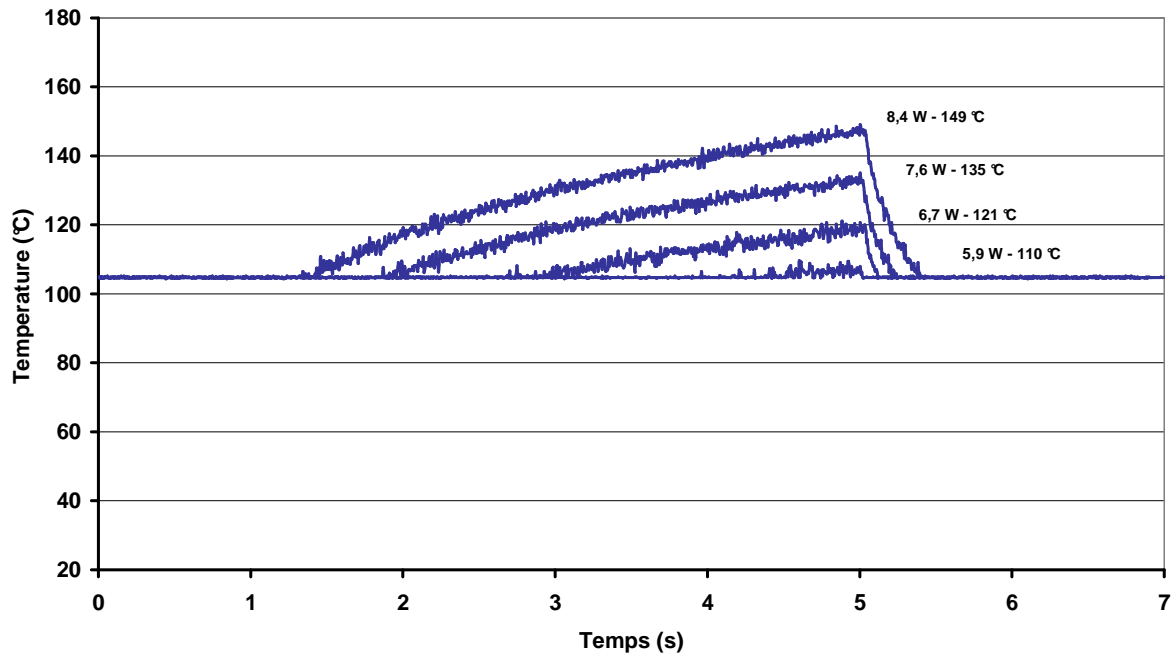


Figure 102 : Evolution temporelle de la température sur la 'Pad6'

Les mesures de température sur les pistes de report de composant nommées Pad1, Pad5 et Pad 6 sont représentées sur les graphiques des Figure 100, Figure 101 et Figure 102. L'énergie laser reçue par Pad1 n'est dissipée dans aucun circuit électronique. La température de la Pad1 croît alors plus fortement comparée aux Pad5 et Pad6. Ces mesures expérimentales de température peuvent être utilisées comme références pour la future validation du modèle numérique des transferts de chaleur.

18.2.2 Modélisation des circuits électroniques

18.2.2.1 Géométrie des l'assemblages

Le système étudié comprend un substrat type FR4, des pistes de report de composant et leur circuit électronique associé. Le substrat FR4 est un excellent isolant thermique qui permet de considérer individuellement chaque circuit, alors que ceux-ci appartiennent au même substrat (Figure 97).

Le modèle géométrique du substrat FR4 est un élément unique. Les limites géométriques du substrat sont étendues jusqu'à représenter tout le domaine thermiquement affecté par le procédé laser. La fine couche de métallisation Ni/Au des pistes de report de composant n'est pas représentée, cependant les propriétés optiques du revêtement sont prises en compte lors de la définition du flux de chaleur surfacique engendré par le faisceau laser.

Au cours des mesures expérimentales, le circuit imprimé est isolé de son support. Le support du substrat FR4 n'est donc pas modélisé, ce qui permet de réduire fortement le nombre de degrés de liberté du système, et donc le temps de calcul.

Les Figure 103, Figure 104, Figure 105 et Figure 106 représentent les géométries 3D des Pad1, Pad5, Pad6 et Pad10. La complexité des circuits va croissante en suivant l'ordre Pad1, Pad5, Pad6, Pad10, il en va de même de leur nombre de degré de liberté.

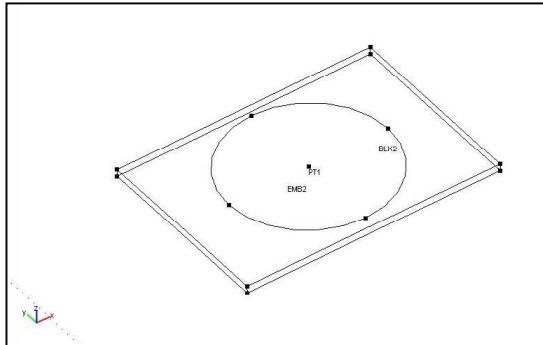


Figure 103 : Géométrie de la 'Pad1'

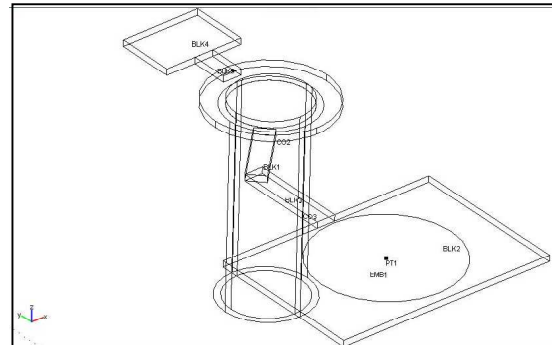


Figure 105 : Géométrie de la 'Pad6'

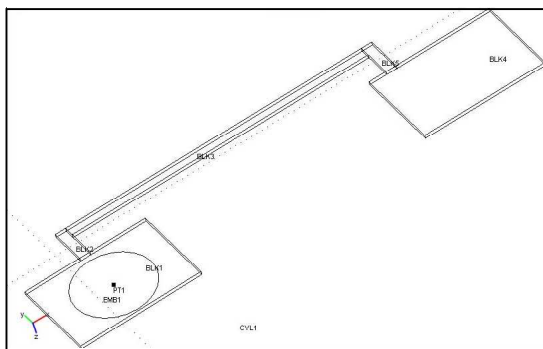


Figure 104 : Géométrie de la 'Pad5'

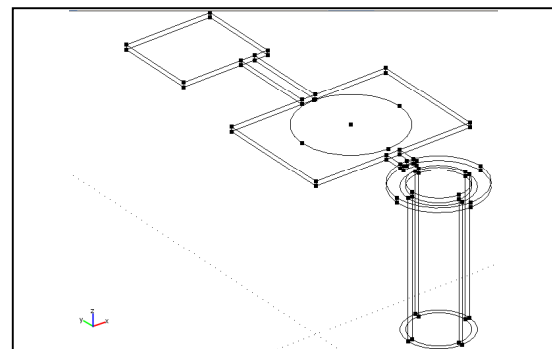


Figure 106 : Géométrie de la 'Pad10'

18.2.2.2 Modélisation de la source laser et données thermiques des différents éléments

Les Figure 107 et Figure 108 représentent la répartition énergétique au plan focal du faisceau laser utilisé pour une puissance de 30W. Celle-ci est assez homogène sur un diamètre de spot de 1,1 mm. L'apport d'énergie par le faisceau laser est donc modélisé comme un flux de chaleur surfacique constant sur un disque de diamètre 1,1mm situé au milieu de la piste de report de composant visée.

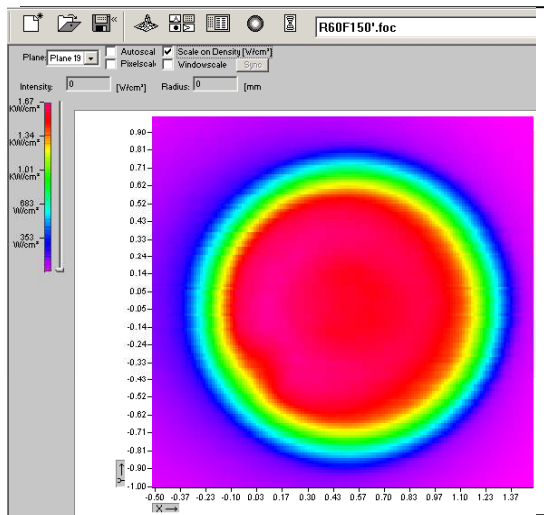


Figure 107 : Répartition bi-dimensionnelle de la densité d'énergie du faisceau laser

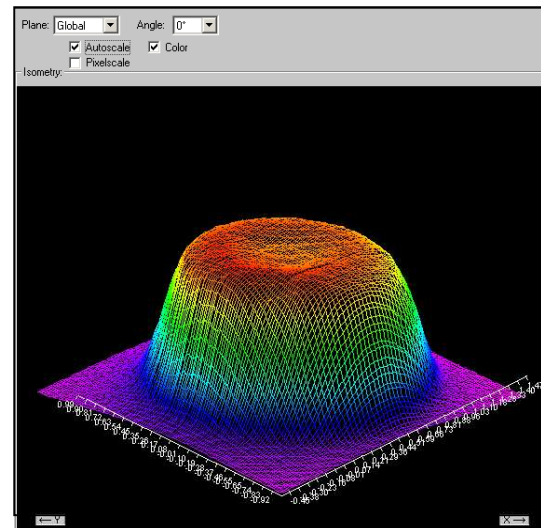


Figure 108 : Répartition tri-dimensionnelle de la densité d'énergie du faisceau laser

L'étude de Greenstein portant sur les propriétés thermiques de différents matériaux de l'industrie électronique indique que la réflexion du revêtement dorée est très élevée pour les longueurs d'ondes situées dans le proche infrarouge [Greenstein 89]. La valeur du flux d'énergie absorbée par la piste de report de composant ϕ laser est modélisée selon l'équation :

$$\phi = \frac{P}{\pi \cdot r^2} \cdot (1 - R)$$

- Avec :
- P Puissance du faisceau laser
 - r Rayon du spot laser ($r = 0,55$ mm)
 - R Taux de réflexion de la surface de la piste de report de composant ($R = 0,987$)

La valeur de la réflexion du faisceau laser par le revêtement doré de la piste de report est précisément déterminée lors de la validation du modèle thermique. Une absorption du faisceau laser par ce revêtement de quelques pourcents est comparable aux données issues de la littérature [Greenstein89].

Les pistes de report de composant (sans revêtement) et les circuits électroniques sont en cuivre. Or, un vernis épargne est utilisé afin d'empêcher le mouillage du circuit électronique par le matériau d'apport lors du procédé de brasage. Ce vernis épargne recouvre l'ensemble du circuit imprimé hormis les pistes de report de composant (Figure 97). Afin de tenir compte du refroidissement par conduction des circuits électroniques dans le vernis épargne, la conductivité du circuit électrique cuivreux est alors réduite d'un coefficient 10 (de 400 à $40 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Ce coefficient est déterminé lors de la validation du modèle thermique, et donc de la comparaison avec les mesures expérimentales. Le Tableau 32 indique les propriétés thermiques des différentes géométries modélisées.

	Masse volumique ρ (kg.m ⁻³)	Conductivité thermique K (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Chaleur spécifique C _P (J.g ⁻¹ .K ⁻¹)
Substrat FR4	1200	0,1	1750
Piste de report	8700	400	385
Circuit électronique	8700	40	385

Tableau 32 : Propriétés thermiques des matériaux utilisés

18.2.3 Simulation et comparaison avec les mesures expérimentales

18.2.3.1 Validation de la modélisation

Les simulations du modèle détaillé précédemment sont confrontées aux mesures expérimentales sur les différents circuits. Les figures Figure 109, Figure 110 et Figure 111 illustrent la concordance des résultats de la simulation du modèle thermique avec les mesures expérimentales préalables. Ce modèle thermique peut alors être utilisé afin de déterminer les pertes d'énergie relatives à chaque configuration de circuit électronique.

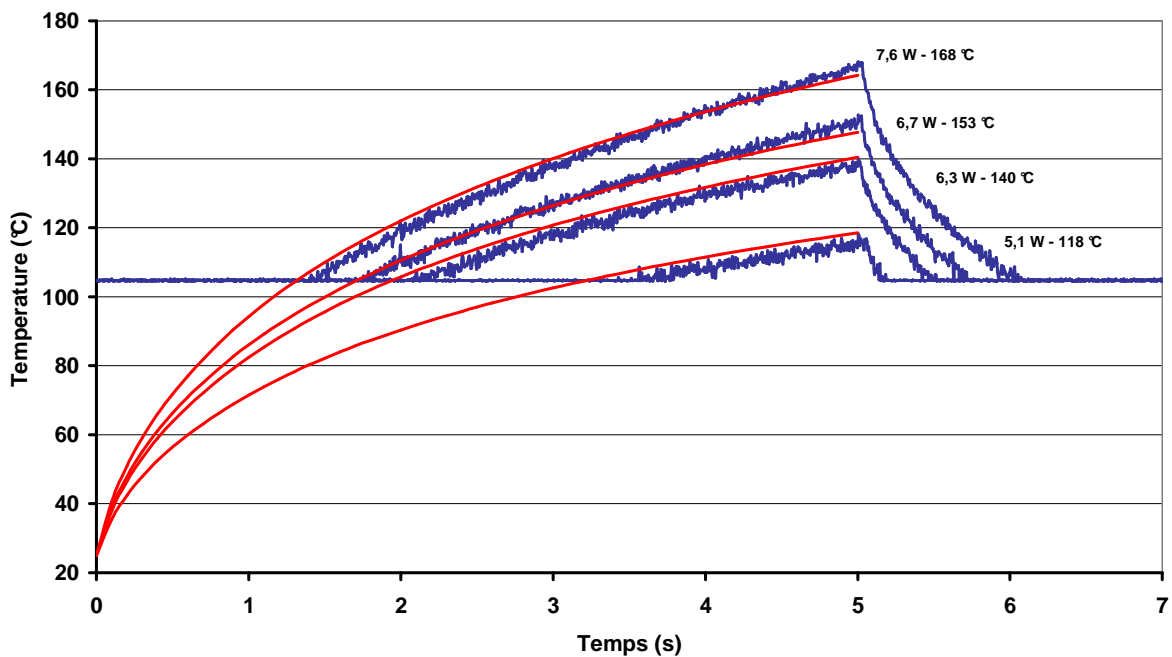


Figure 109 : Comparaison de l'évolution temporelle de la température mesurée et calculée de la 'Pad1'

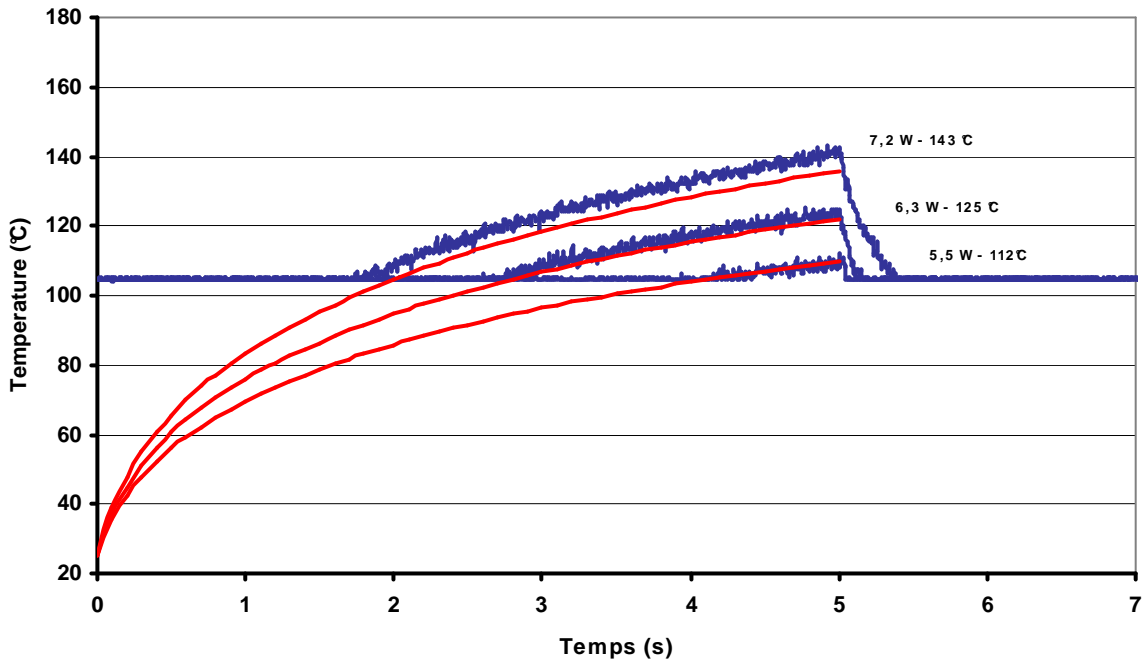


Figure 110 : Comparaison de l'évolution temporelle de la température mesurée et calculée de la 'Pad5'

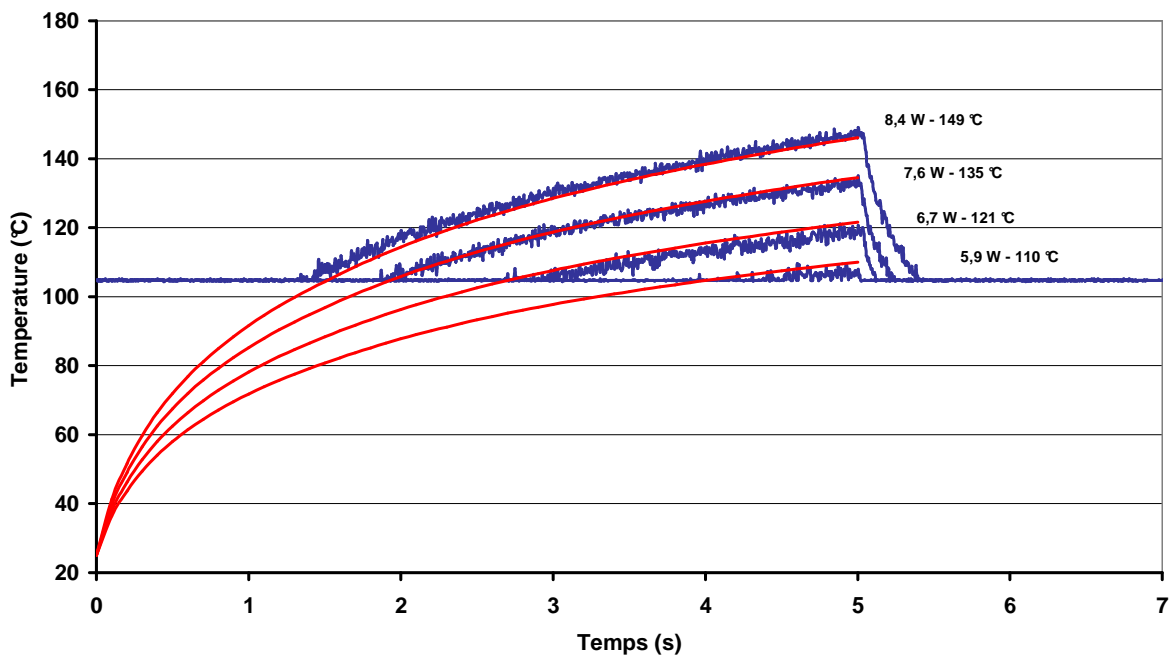


Figure 111 : Comparaison de l'évolution temporelle de la température mesurée et calculée de la 'Pad6'

Une puissance laser de 6W est choisie arbitrairement afin de comparer les différents circuits étudiés. La montée en température des pistes de report de composant exposées à une puissance laser de 6W est représentée sur la Figure 112. On remarque que le cas limite que constitue la Pad1 (aucune

connexion au circuit électronique) atteint une température supérieure à celle des deux autres pistes de report de composant (Pad5 et Pad6). De plus, on peut déduire de cette courbe que la dissipation de l'énergie thermique dans le circuit à la Pad6 est plus importante que celle dans la Pad5 lors d'un procédé de quelques secondes.

La dissipation de l'énergie thermique dans le circuit électronique peut être évaluée à partir du calcul de l'énergie nécessaire pour la montée en température de la piste de report de composant, depuis sa température initiale, jusqu'à sa température finale.

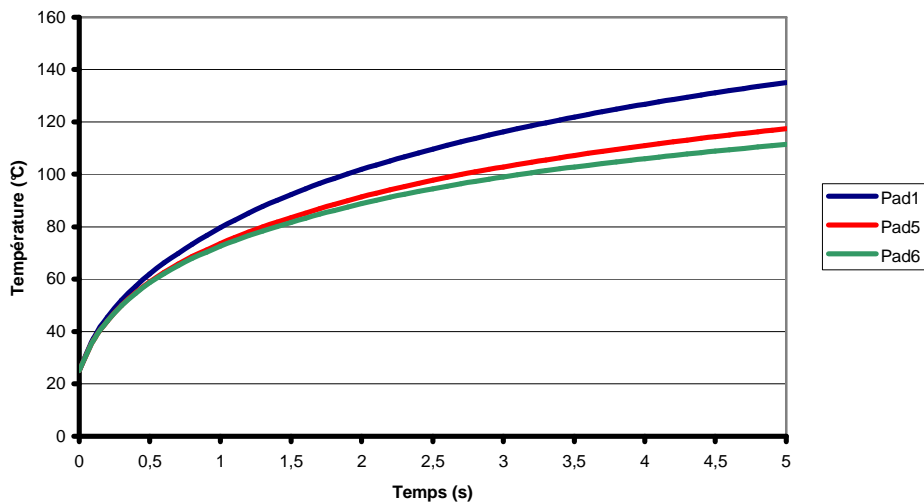


Figure 112 : Résultat de la simulation de l'évolution temporelle en température du centre de différentes pistes de report de composant exposées à une puissance laser de 6W

L'expression mathématique permettant de calculer la variation d'énergie interne des pistes de report de composant (Q) est de la forme :

$$Q = \int_V \rho \cdot C_p \cdot (T - T_i) \cdot dV$$

- Avec :
- ρ Masse volumique de la piste de report de composant (cuivre)
 - C_p Chaleur spécifique de la piste de report de composant (cuivre)
 - T_i Température initiale de la piste de report de composant (25°C)
 - T Température de l'élément de volume considéré de la piste de report de composant

La Figure 113 représente la quantité d'énergie servant à chauffer les pistes de report de composant étudiées. Cette quantité d'énergie dépend des caractéristiques du circuit électronique connecté aux pistes de report de composant. Le cas le plus favorable est celui de la Pad1 puisque n'étant connectée à aucun circuit électronique, la dissipation de l'énergie ne s'effectue qu'à travers le substrat FR4 très peu conducteur. A l'inverse, la dissipation de l'énergie est bien plus importante dans le cas de la Pad10. Depuis cette piste de report de composant, deux circuits électroniques sont connectés. La dissipation à travers le cuivre qui constitue les circuits électroniques est très supérieure à celle à

travers le substrat FR4. Ainsi, comme le montre la Figure 113, l'énergie thermique de la Pad10 à différents temps de calcul est très inférieure à celle de la Pad1.

Lorsque l'on s'intéresse aux Pad5 et Pad6, on constate que la dissipation de l'énergie au sein de leurs circuits électroniques respectifs est comparable pour des temps de tir laser court (environ 1 seconde). Cependant, lorsque la durée de tir laser se prolonge, la différence entre les deux pistes de report de composant s'accroît. Pour des temps de tir courts, l'ensemble de chaque circuit électronique n'est pas affecté thermiquement. Or, à proximité des Pad5 et Pad6, les circuits électroniques sont très similaires. Lorsque le temps de tir est prolongé, le via connecté au circuit électronique de la Pad6 influe sur le procédé, ce qui tend à différencier les deux configurations de circuit électronique. Un procédé laser rapide est alors préférable, cependant, la vitesse de montée en température du matériau d'apport sous forme de crème est limitée par son aptitude à générer des projections lors de l'évaporation du flux.

Finalement, on en déduit qu'un compromis doit être trouvé entre une durée de tir laser et la position d'un via, d'un autre composant ou de tout autre élément agissant comme un puit thermique connecté à la piste de report de composant traitée.

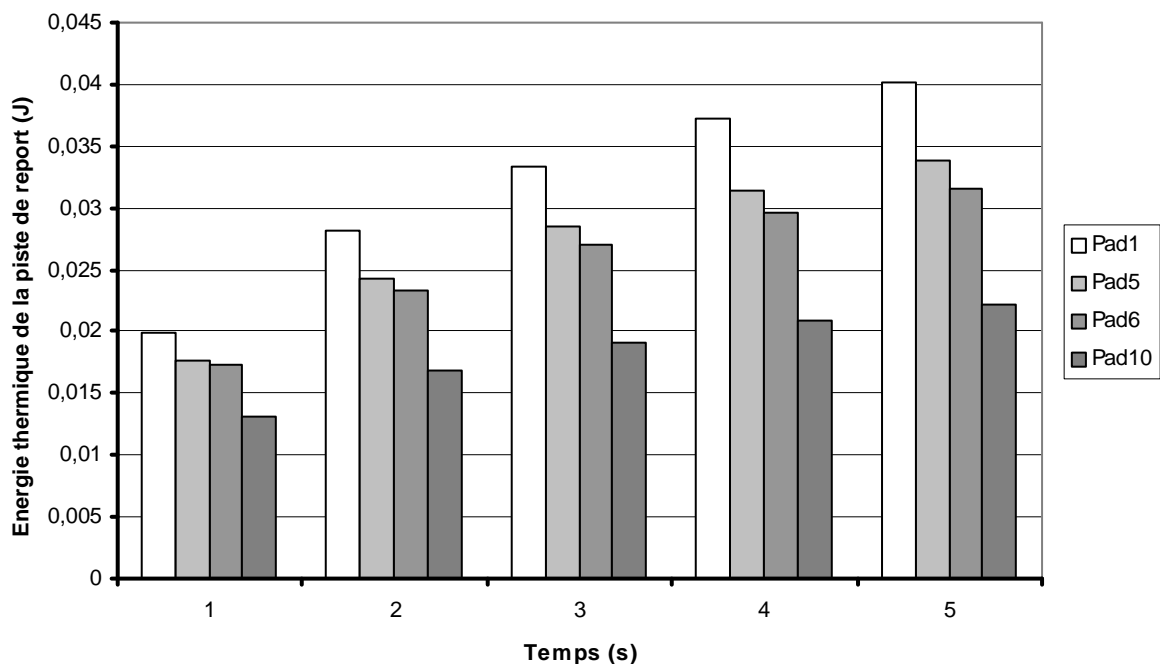


Figure 113 : Variation d'énergie interne de chaque piste de report en fonction du temps d'interaction laser

18.2.3.2 Application de la modélisation

Le modèle numérique préalablement décrit permet de définir l'influence du circuit électronique sur le paramètre laser. Il peut alors être utilisé comme une aide à la définition des règles de tracé des circuits imprimés caractéristiques de l'opération de brasage par faisceau laser. La connexion de la piste de report de composant à un via, à un autre composant ou/et à tout autre élément agissant

comme un puit thermique influe sur le paramétrage de l'outil laser. Plus le « puit thermique » est proche de la piste de report de composant traitée, plus son influence sur les paramètres laser est importante. L'objectif de l'application de cette modélisation est donc d'apporter des informations concernant la position d'un « puit thermique » par rapport à une piste de report de composant. Le substrat FR4 est un très bon isolant ; Le « puit thermique » aura alors une influence non négligeable seulement si celui-ci est relié par un circuit électronique (cuivre) à la piste de report du composant. La Figure 114 illustre les caractéristiques géométriques du circuit traité lors de cette étude. Le substrat de ce circuit électronique est de type FR4. La piste de report d'un composant SM1206 est exposée au faisceau laser. Cette piste de report de composant est reliée à un simple circuit électronique linéaire aboutissant à une deuxième piste de report pour composant SM1206 (configuration 1). La longueur caractéristique du circuit électronique (d) varie d'un modèle à l'autre afin de modifier la position de la deuxième piste de report de composant. D'autre part, l'épaisseur de la seconde piste de report de composant est également augmentée (1mm d'épaisseur contre 50 μ m précédemment) afin de caractériser l'effet d'un puit thermique plus important (configuration 2). La durée d'interaction laser avec la piste de report de composant est fixée à 5 secondes qui est considérée comme la limite supérieure acceptable pour le brasage par faisceau laser d'un composant de type SM1206 avec une crème à brasier sans plomb de température de fusion d'environ 220°C.

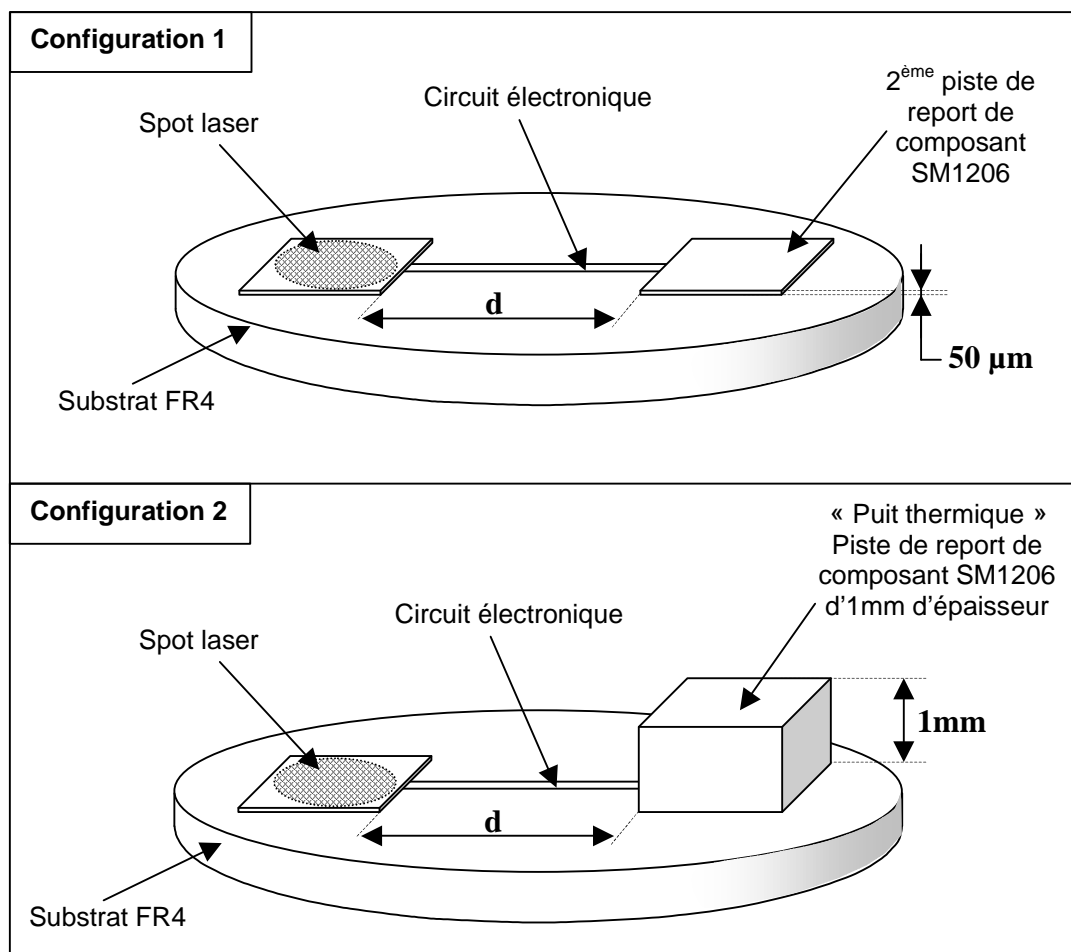


Figure 114 : Configurations des circuits électroniques étudiés pour l'établissement de règles de tracé pour un procédé de brasage laser

La Figure 115 représente la température maximum atteinte par la piste de report en fonction de la longueur caractéristique du circuit électronique pour différents paramètres laser et les deux configurations de circuit étudiées. Il est évident que plus la puissance du laser utilisé est grande, plus la piste de report de composant atteindra une température élevée. Ainsi, pour des longueurs de circuit (d) de 6mm, la température maximum est d'environ 55, 115 et 147°C pour des puissances laser respectives de 2, 6 et 8W. Les résultats de la simulation numérique indiquent que la température maximum de la piste de report du composant tend vers son maximum pour des longueurs de circuit électronique (d) élevées. Il existe donc pour chaque paramètre laser et chaque configuration de circuit une longueur de circuit minimum au-delà de laquelle le puit thermique connecté n'influe plus sur la température atteinte par la piste de report de composant.

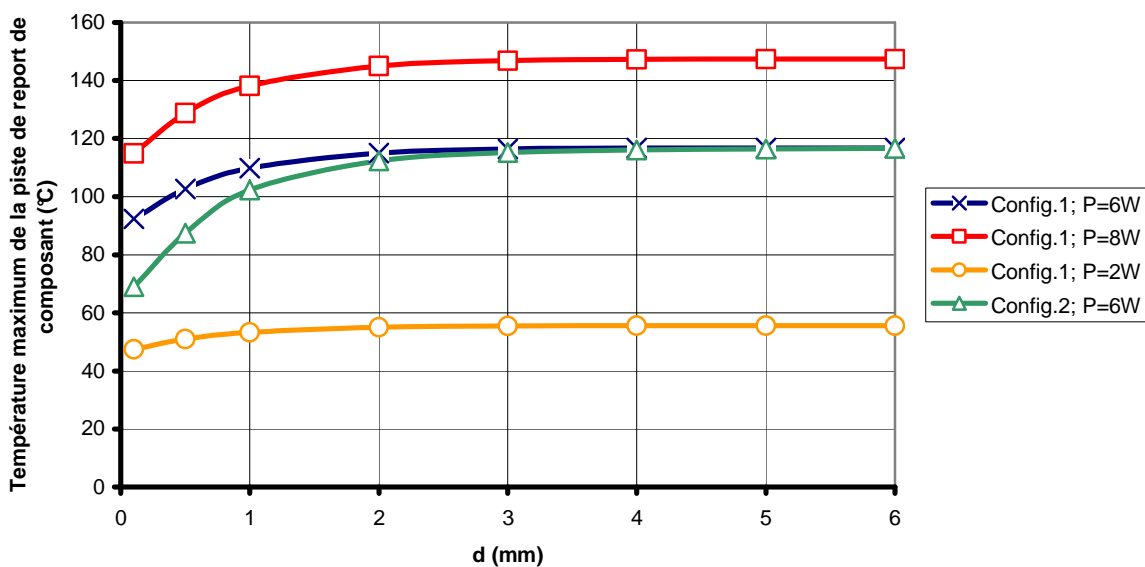


Figure 115 : Température maximum de la piste de report de composant exposée au faisceau laser en fonction de la puissance du laser, de la géométrie du circuit électronique (configuration 1 et 2) et de sa longueur caractéristique (d)

Après normalisation la température maximum atteinte par la piste de report de composant pour les différentes configurations et paramètres laser étudiés (Figure 116), il est possible d'établir une longueur de circuit électronique critique au-delà de laquelle le puit thermique connecté n'a aucune influence sur le procédé laser.

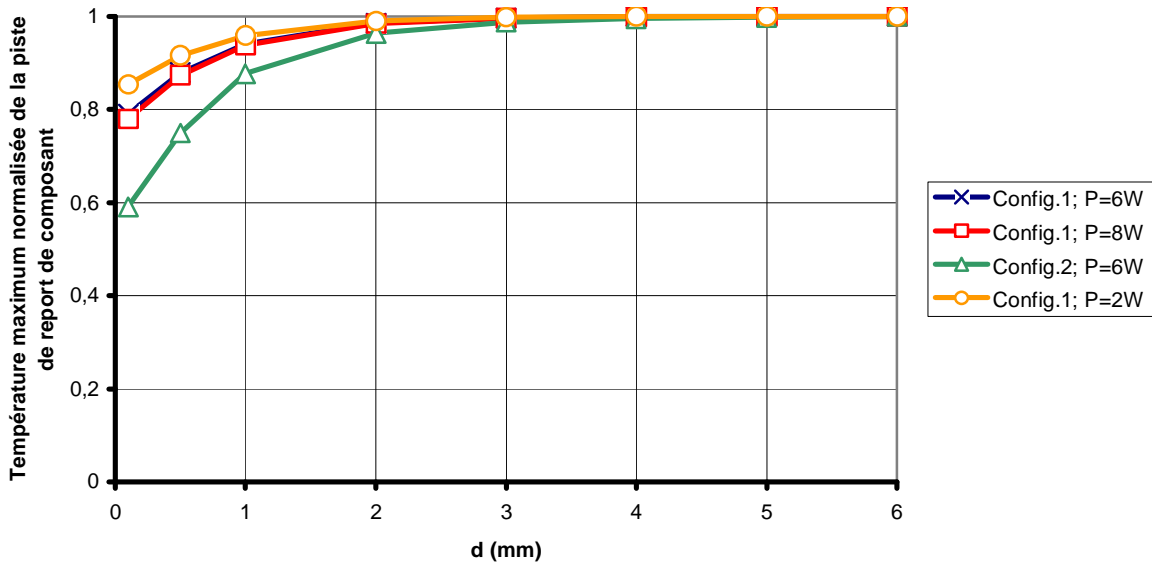


Figure 116 : Température maximum normalisée de la piste de report de composant exposée au faisceau laser en fonction de la puissance du laser, de la géométrie du circuit électronique (configuration 1 et 2) et de sa longueur caractéristique (d)

Le cas de la configuration de circuit électronique n°2 est un cas extrême : le puit thermique modélisé est particulièrement important. Cependant, le graphique de la Figure 116 indique que si ce puit thermique est placé au-delà de 3mm de la piste de report de composant, il aura une influence très réduite sur le procédé laser.

18.2.4 Conclusion

Outre des paramètres du faisceau laser, La température atteinte par un procédé laser dépend fortement de la nature et de la géométrie du matériau traité. Le calcul numérique développé ici traite de l'importance de la configuration du circuit électronique connecté à une piste de report sur les paramètres laser lors du procédé de brasage.

La validation du modèle thermique est réalisée au cours de la première partie de l'étude. Les résultats du calcul numériques sont comparés aux mesures expérimentales de température pour différentes géométries de circuits électroniques. Ces premiers résultats de simulation permettent également l'évaluation de la variation d'énergie interne de chaque piste de report de composant étudiée en fonction du circuit électronique qui lui est connecté.

La seconde partie de cette étude souligne l'importance de la géométrie du circuit électronique sur le procédé laser. Un élément agissant comme « puit thermique » connecté à une piste de report de composant peut influencer fortement les paramètres laser à utiliser. L'utilisation de la technique de brasage laser multifibres issues d'un unique outil laser ne permet pas de différencier l'apport d'énergie sur les différentes connexions d'un même composant. L'apport d'énergie sur chacune des connexions du composant sera alors identique. La dissipation de l'énergie depuis chaque piste de report de composant à travers le circuit électronique doit alors être similaire pour chaque connexion traitée. Les

résultats de la simulation thermique indiquent qu'un puit thermique situé au-delà de 3 mm d'une piste de report n'influe pas sur le paramètre laser (pour une durée de tir maximum de 5 secondes). Ainsi, la connexion entre deux composants d'une longueur supérieure à 3 mm³ permet de ne pas tenir compte de l'influence de la dissipation de l'énergie dans le puit thermique que constitue le second composant. L'opération de brasage sera également réussie dans le cas d'un circuit « symétrique » en terme de dissipation d'énergie, de part et d'autre du même composant à deux connexions.

L'application d'une longueur critique de 3 mm pour tout circuit électronique relié à une piste de report de composant s'oppose à la miniaturisation des cartes électroniques. Il sera alors préférable d'opter pour une dissipation de l'énergie équivalente dans le circuit électronique relié à chaque connexion du composant. Finalement, pour un même composant électronique, les paramètres laser doivent être adaptés en fonction du type de circuit connecté. A un composant électronique ne correspond pas un paramètre laser unique, sauf si une distance d'au moins 3 mm entre deux composants est respectée, ce qui est rarement le cas.

18.3 Utilisation d'un Élément d'Optique Diffractif

18.3.1 Introduction

Le projet industriel portant sur le brasage laser de matériaux dissemblables a conduit au traitement de l'assemblage de deux plastiques métallisés. Le travail de modélisation suivant est donc basé sur l'étude de faisabilité de l'assemblage de ces deux plastiques : un tube de polystyrène est brasé sur une feuille de polyimide (Figure 117). Chacun des deux plastiques est métallisé afin d'avoir une surface compatible avec l'opération de brasage en terme de mouillabilité. Les films plastiques en polyimide (Kapton) sont couramment utilisés dans l'industrie électronique, notamment pour la réalisation de circuits flexibles. Dans le cas de notre étude, ils sont métallisés avec du cuivre ayant lui-même un traitement de surface type OSP (Organic Soldering Protective) afin de ralentir son oxydation lors du stockage de la pièce. Le tube de polystyrène est également métallisé : un procédé de dépôt auto catalytique d'une couche de 4µm de nickel est suivi d'une immersion dans une solution contenant de l'or afin d'obtenir un « flash » d'or sur le nickel de 0,2µm environ.

Le matériau d'apport sans plomb sélectionné est un alliage 60In-40Bi (%massique). Il s'agit de préformes (couronne $\varnothing_{int.}=7$ mm ; $\varnothing_{ext.}=9$ mm ; $h=0,05$ mm) dont le point de fusion est adapté aux matériaux à assembler ($T_f \sim 80^\circ\text{C}$).

La partie expérimentale démontre la faisabilité d'un tel assemblage par transmission de l'énergie laser à travers la feuille de polyimide. Un déplacement circulaire du faisceau laser est paramétré le long du joint à réaliser. Deux techniques de déplacement du faisceau laser sont testées : l'une utilisant un robot 3 axes, et l'autre un système scanner (miroirs galvanométriques). La partie suivante traite de l'étude numérique des transferts de chaleur lors du procédé de brasage décrit précédemment. La

³ Résultat valable pour le type de circuit électronique étudié qui est le plus répandu dans l'industrie électronique (circuit en cuivre sur substrat FR4)

capacité de mémoire de l'outil de calcul impose d'adapter la géométrie de l'assemblage étudié. Finalement, les résultats de simulation permettent de comparer le procédé de brasage laser nécessitant le déplacement du faisceau laser avec le procédé utilisant un outil de mise en forme du faisceau (Elément d'Optique Diffractif : EOD).

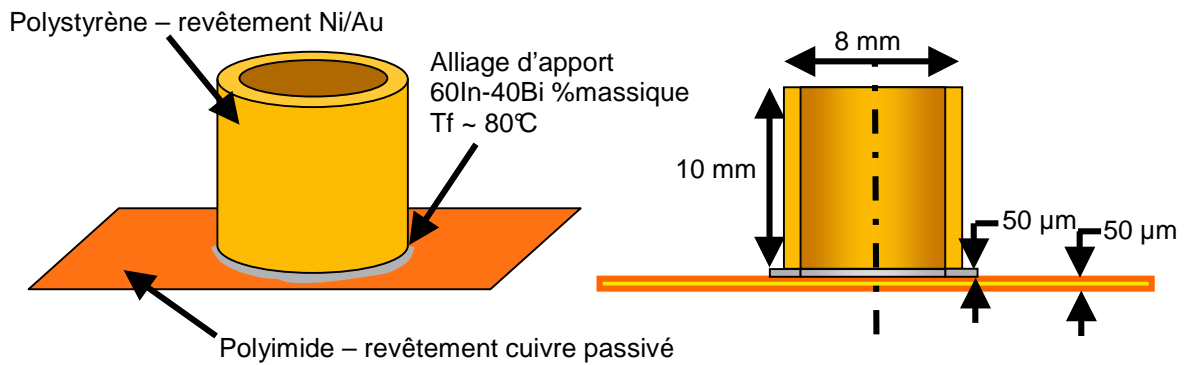


Figure 117 : Schéma de l'assemblage Polystyrène-Polyimide métallisés

18.3.2 Résultats Expérimentaux

Le montage de positionnement des pièces à assembler de cette étude est représenté sur la Figure 118. Un matériau de faible conductivité est préférable afin de limiter les pertes d'énergie par conduction. Le montage de positionnement est donc en polyméthacrylate de méthyle (PMMA).

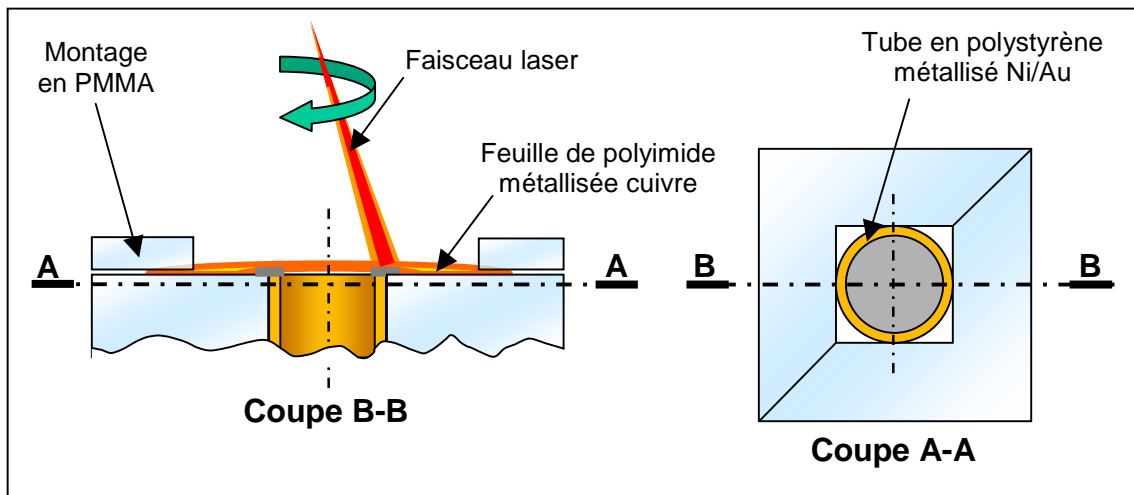


Figure 118 : Schéma du montage de positionnement en PMMA et configuration de brasage laser

Deux procédés de déplacement du faisceau laser sont testés. Chacun d'eux induit une répartition énergétique du faisceau différente :

- L'utilisation de miroirs galvanométriques (scanner) permet un déplacement très rapide du faisceau laser. De plus, la pièce traitée reste immobile lors du procédé d'assemblage laser. La répartition d'énergie au sein du faisceau est super gaussienne (top hat) : 2,1x1,9

mm au plan focal, et donc plus homogène que dans le cas d'un faisceau gaussien (Figure 119).

- Le faisceau laser diode peut également être injecté dans une fibre optique, elle-même adaptée à un robot 3 axes. La vitesse de déplacement du faisceau laser sur l'assemblage est plus faible que précédemment. En sortie de fibre, le faisceau laser est un mélange de modes. La répartition énergétique est donc gaussienne, et le spot laser au plan focal a un diamètre de 430µm (Figure 120). Afin de réduire la fluence, la zone d'interaction avec le faisceau laser est située sous le point focal. Le spot laser est alors de 7 mm de diamètre.

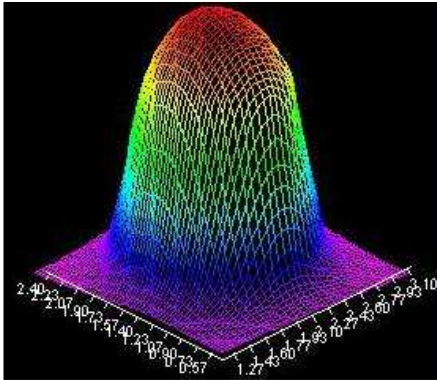


Figure 119 : Répartition énergétique « top-hat » du faisceau laser issue du système de miroirs galvanométriques

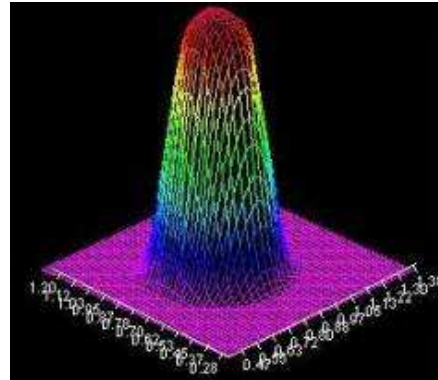


Figure 120 : Répartition énergétique gaussienne du faisceau laser issue de la fibre optique et du système optique relié au robot 3 axes

L'étape de paramétrage du procédé de brasage laser a abouti à deux configurations de faisceau laser appliqués aux deux techniques de déplacement (scanner et robot 3 axes). Le Tableau 33 liste les différents paramètres laser.

	Robot 3 axes	Scanner
Puissance laser	~80 W	~70 W
Temps d'interaction	11,5 s	7 s
Vitesse du faisceau	60 mm/s	~1400 mm/s (50Hz)
Dimension du spot	Ø 7 mm	1,9 x 2,1 mm

Tableau 33 : Paramètres laser permettant le brasage de l'assemblage étudié

La Figure 121 est une photo d'un assemblage brasé : la faisabilité du procédé est démontrée expérimentalement. L'outil laser doit être paramétré afin de ne pas surchauffer ni la métallisation de la face supérieure de la feuille de polyimide, ni le tube en polystyrène. La Figure 122 indique une bonne compatibilité entre les différents matériaux, avec un mouillage satisfaisant du matériau d'apport. La résistance mécanique de l'assemblage est néanmoins assez faible (2,6 MPa). Les tests de déchirement de l'assemblage (Figure 123) indiquent que l'interface la moins résistante est celle entre

le tube en polystyrène et sa couche de métallisation en nickel. Quel que soit le genre de polystyrène testé (noir ou blanc selon le type de charge incorporée), la rupture met le tube en plastique à nu.

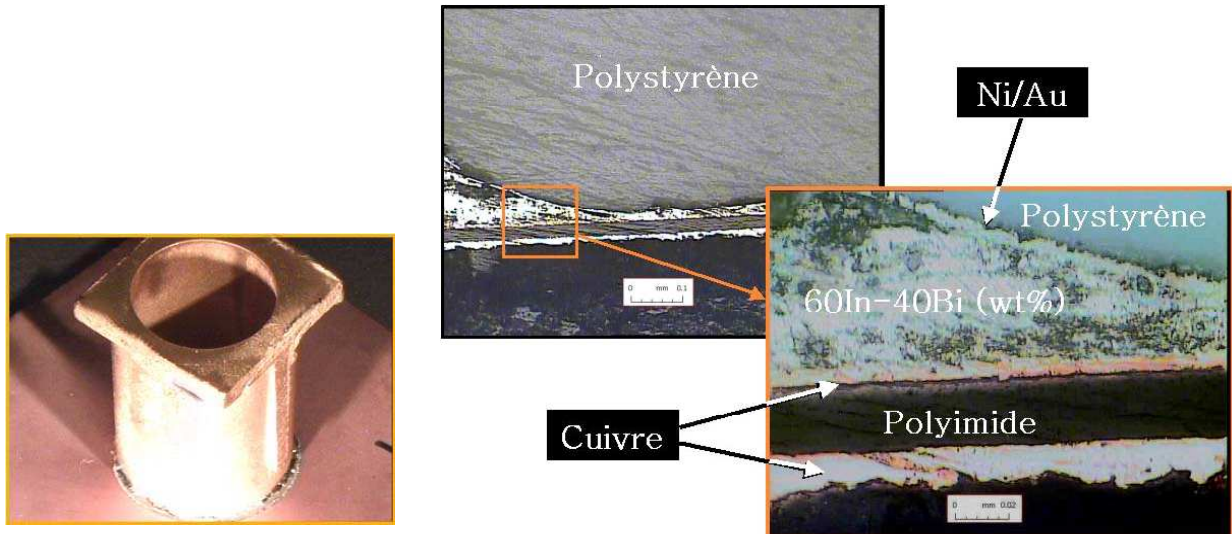


Figure 121 : Photo de l'assemblage

Figure 122 : Analyse du joint brasé au microscope optique

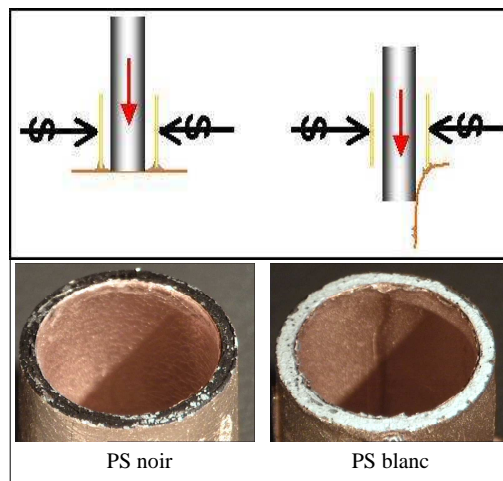


Figure 123 : Etude de la rupture mécanique de l'assemblage par déchirement (Tube en Polystyrène noir et blanc)

18.3.3 Modélisation des procédés de brasage laser

18.3.3.1 Introduction

Le but de cette étude numérique des transferts de chaleur est de comparer deux méthodes d'apport d'énergie distinctes : par déplacement du faisceau laser et par mise en forme du faisceau laser. L'assemblage et le montage incluent des matériaux de géométries très variées allant de couches de métallisation de quelques microns d'épaisseur à un tube en polystyrène de plusieurs millimètres de hauteur. Les spécificités géométriques de l'ensemble des pièces traitées imposent d'adapter le modèle numérique aux capacités de l'outil de calcul.

L'objectif de cette étude numérique des transferts de chaleur est d'évaluer l'intérêt de l'utilisation d'un Élément d'Optique Diffractif (EOD) lors du brasage laser de l'assemblage détaillé précédemment. Le modèle thermique développé est adapté à l'outil de calcul numérique mais doit garder de grandes similitudes avec l'assemblage étudié expérimentalement.

18.3.3.2 Géométrie du modèle

Le modèle inclus les principaux éléments influents sur les transferts de chaleur au sein de l'assemblage (Figure 124). Il s'agit :

- Du tube en polystyrène dont la longueur a été réduite. La zone affectée thermiquement est néanmoins incluse dans le volume du tube. La hauteur de la pièce en polystyrène est alors diminuée de 10 mm à 4 mm.
- De la feuille de polyimide : un disque de 16 mm de diamètre et 500 μ m d'épaisseur. Comparé à l'étude expérimentale, l'épaisseur de la feuille de polyimide a été augmentée afin de réduire la quantité des tétraèdres discrétisant la géométrie lors de son maillage. Le nombre de nœuds, et donc de degré de liberté du système est alors diminué.
- De la couronne d'alliage d'apport dont l'épaisseur est également augmentée. Ses dimensions deviennent : $\varnothing_{int.}=7$ mm ; $\varnothing_{ext.}=9$ mm ; $h=0,1$ mm.
- Du montage en polyméthacrylate de méthyle. Celui-ci est fortement simplifié : il est représenté sous la forme d'une couronne au contact de la feuille de polyimide, sur l'assemblage.

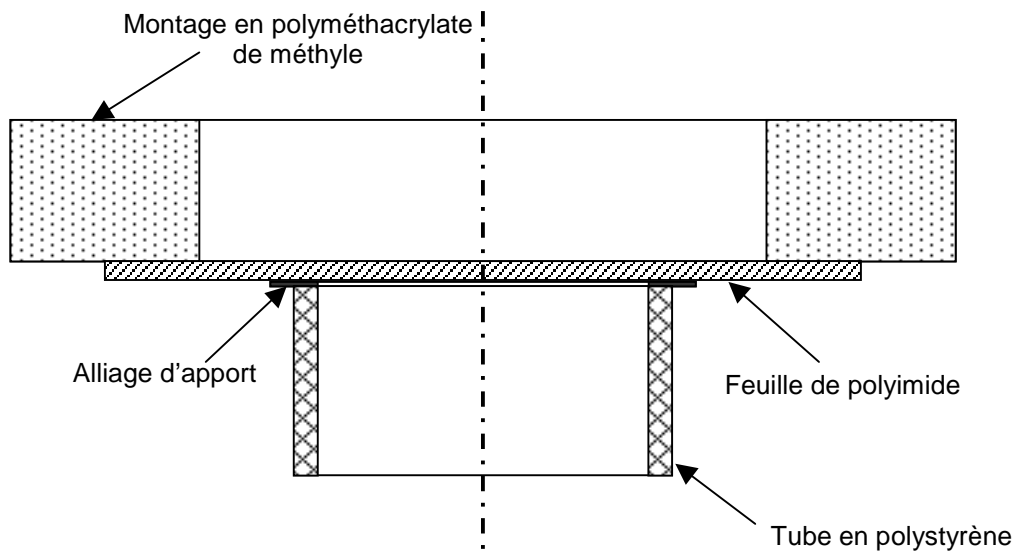


Figure 124 : Schéma en coupe de la géométrie de l'assemblage

Seule la métallisation de la face supérieure de la feuille de polyimide est considérée. C'est la surface d'interaction avec le faisceau laser. Elle agit sur les transferts de chaleur à la manière d'un film de haute conductivité. Ainsi, la diffusivité thermique du cuivre est appliquée aux nœuds constituant la frontière de la face supérieure de la feuille de polyimide.

18.3.3.3 Modélisation de la source laser et données thermiques des différents éléments

Deux différents modes d'apport de l'énergie laser sont modélisés en vue de leur comparaison. L'un requiert un déplacement du terme source appliqué sur la feuille de polyimide métallisée. Ce modèle décrit l'effet de l'utilisation d'un spot laser mobile. L'autre mode d'apport de l'énergie laser consiste en la définition d'une géométrie représentant le spot laser sur laquelle est appliquée le terme source. La description mathématique de ces deux apports d'énergie distincts est détaillée ci-dessous :

Déplacement du faisceau laser :

En sortie de fibre, la répartition énergétique du faisceau laser est gaussienne. Un changement de variable permet d'inclure le déplacement du faisceau laser. L'équation mathématique du terme source appliqué à la frontière supérieure de la feuille de polyimide est donc de la forme :

$$\phi = \frac{3 \cdot P \cdot (1 - R)}{\pi \cdot a^2} \cdot \exp\left(-3 \cdot \frac{u^2 + v^2}{a^2}\right)$$

Avec :

$$u = x - r \cdot \cos\left(\frac{s \cdot t}{r}\right)$$

$$v = y - r \cdot \sin\left(\frac{s \cdot t}{r}\right)$$

Et :

x, y : Coordonnées cartésiennes du centre du spot laser

r : Rayon de la trajectoire du spot laser ($r = 4mm$)

s : Vitesse de déplacement du spot laser (différentes valeurs testée, de 10 à 180mm/s)

t : Temps

P : Puissance du faisceau laser ($P = 40W$)

R : Taux de réflexion de la métallisation cuivrée de la feuille de polyimide ($R = 0,97$)

a : Rayon du faisceau laser ($a = 3,5mm$)

Le pas de temps de la résolution numérique du système est lié à la vitesse de déplacement du faisceau laser. Plus la vitesse de rotation du faisceau laser est élevée, plus le pas de temps doit être petit afin de décrire au mieux la trajectoire du faisceau sur la feuille de polyimide. Le pas de calcul est défini arbitrairement de telle sorte qu'il corresponde à un déplacement du spot laser de $1/12^{\text{ème}}$ de tour. L'équation mathématique permettant de calculer le pas de temps est (La valeur calculée est ensuite tronquée afin de ne garder qu'un seul chiffre significatif) :

$$p = \frac{\pi \cdot r^2}{12 \cdot s}$$

Avec :

p : Pas de calcul

r : Rayon de la trajectoire du spot laser

s : Vitesse de déplacement du spot laser

Faisceau mis en forme :

L'utilisation d'EOD permet de mettre en forme le faisceau laser afin d'adapter la zone d'apport d'énergie à la géométrie du joint à réaliser. Ces éléments agissent sur la phase d'une onde incidente : le faisceau laser incident est donc dirigé sur un support (transmissif ou réfléchif) sur lequel sont usinés les motifs permettant la mise en forme du faisceau. Ces motifs sont calculés par l'application de l'optique de Fourier pour obtenir la forme désirée. L'émergence de ces systèmes optiques et leur compatibilité avec des faisceaux laser de (faible) puissance permet leur utilisation pour des applications de brasage laser.

L'utilisation d'un EOD permet d'obtenir des images du faisceau laser très variées. La qualité de l'image du faisceau laser mis en forme par l'EOD est principalement limitée par la précision de l'usinage du système optique. La faisabilité du procédé de brasage laser par EOD a déjà été démontrée [Amako 01]. Il s'agissait alors de réaliser une EOD permettant de diviser le faisceau laser incident en un réseau de points représentant une forme rectangulaire.

L'EOD choisi pour notre étude de modélisation des transferts de chaleur traite le faisceau incident afin d'obtenir une zone d'interaction circulaire sur la feuille de polyimide métallisée. La géométrie du spot laser obtenue est une couronne de $\varnothing_{int.}=7$ mm et $\varnothing_{ext.}=9$ mm, ce qui correspond aux $\varnothing_{int.}$ et $\varnothing_{ext.}$ de l'alliage d'apport. La répartition énergétique sur cette surface est homogène. Le flux de chaleur est alors de la forme :

$$\phi = \frac{P \cdot (1 - R)}{\pi \cdot (r_{ext}^2 - r_{int}^2)}$$

Avec :

P : Puissance du faisceau laser ($P = 40W$)

R : Taux de réflexion de la métallisation cuivrée de la feuille de polyimide ($R = 0,97$)

r_{ext} et r_{int} les rayons extérieur et intérieur de la zone d'interaction du spot laser mis en forme par l'EOD ($r_{ext} = 4,5mm$ et $r_{int} = 3,5mm$)

Propriétés thermiques des matériaux utilisés :

Les valeurs des propriétés thermiques des matériaux considérés sont listées dans le Tableau 34. L'ensemble des propriétés thermiques des matériaux n'est pas accessible. Il est alors nécessaire d'approximer leur valeur, comme c'est le cas pour l'alliage d'apport InBi. Ceci n'est pas préjudiciable aux résultats de cette étude, puisque d'une part le volume de l'alliage d'apport est particulièrement réduit par rapport à la géométrie globale de l'assemblage. D'autre part, l'alliage d'apport constitue l'unique matériau métallique massif (non sous forme de dépôt). Il y a donc un écart conséquent entre la diffusivité des différents plastiques de l'assemblage et celle de l'alliage d'apport. Finalement,

le but de cette étude est de comparer deux techniques d'apport d'énergie par le faisceau laser. L'important est alors de conserver les mêmes propriétés thermiques des matériaux utilisés pour une comparaison adéquate.

	Masse volumique ρ (kg.m ⁻³)	Conductivité thermique K (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Chaleur spécifique C _p (J.g ⁻¹ .K ⁻¹)
Polyimide	1420	0,25	1090
Cuivre (film de haute conductivité)	8700	400	385
Polystyrène	1050	0,12	1200
60In-40Bi % massique	7850	44	475
polyméthacrylate de méthyle	1420	0,25	1090

Tableau 34 : Propriétés thermiques des matériaux utilisés

18.3.4 Simulation des différents procédés de brasage laser

18.3.4.1 Brasage par déplacement du faisceau laser

Le critère permettant de définir la fin du procédé de brasage est la température atteinte par l'alliage d'apport. Lorsque la température de l'ensemble de l'alliage d'apport est supérieure à sa température de fusion (80°C), on considère le joint comme brasé. Par ailleurs, la température maximum de l'alliage d'apport ne doit pas excéder 90°C afin de ne pas détériorer l'assemblage et notamment le tube de polystyrène. La Figure 124 représente le matériau d'apport et les points de référence (1, 2, 3 et 4) qui sont choisis pour étudier le procédé de brasage laser.

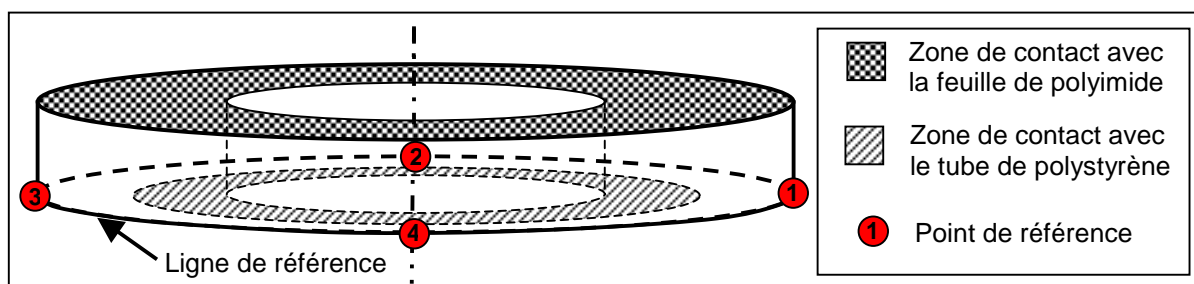


Figure 124 : Schéma de l'alliage d'apport et position des différents point de références

La résolution du modèle thermique décrivant le déplacement du faisceau laser sur l'assemblage est effectuée pour différentes vitesses de rotation du faisceau laser. L'évolution temporelle de la température aux différents points de référence de l'assemblage pour une vitesse de déplacement du spot laser de 20mm/s est représentée sur la Figure 125. On constate que la température des points de référence de l'assemblage augmente en oscillant jusqu'à atteindre la zone de température requise (entre 80 et 90°C) pour l'opération de brasage.

Les oscillations observées sont dues à la position du faisceau laser par rapport au point de référence de l'assemblage. Lorsque le faisceau est à la verticale du point de référence, et donc très proche de celui-ci, sa montée en température est très rapide : l'apport énergétique du faisceau laser au point de référence est très supérieur aux pertes par conduction au sein de l'assemblage. Ensuite, lorsque le faisceau s'éloigne, son apport d'énergie au niveau du point de référence est moindre, et les pertes par dissipation dans l'assemblage restent identiques : La montée en température du point de référence de l'assemblage est alors fortement réduite. Puis le faisceau se rapproche de nouveau, et le rapport apport énergétique/pertes par dissipation redevient de plus en plus favorable à une forte montée en température du point de référence. Finalement, une vitesse de déplacement du faisceau laser de 20 mm/s correspond à une fenêtre de procédé d'environ 0,7seconde, comprise entre 6,3 et 6,9 secondes.

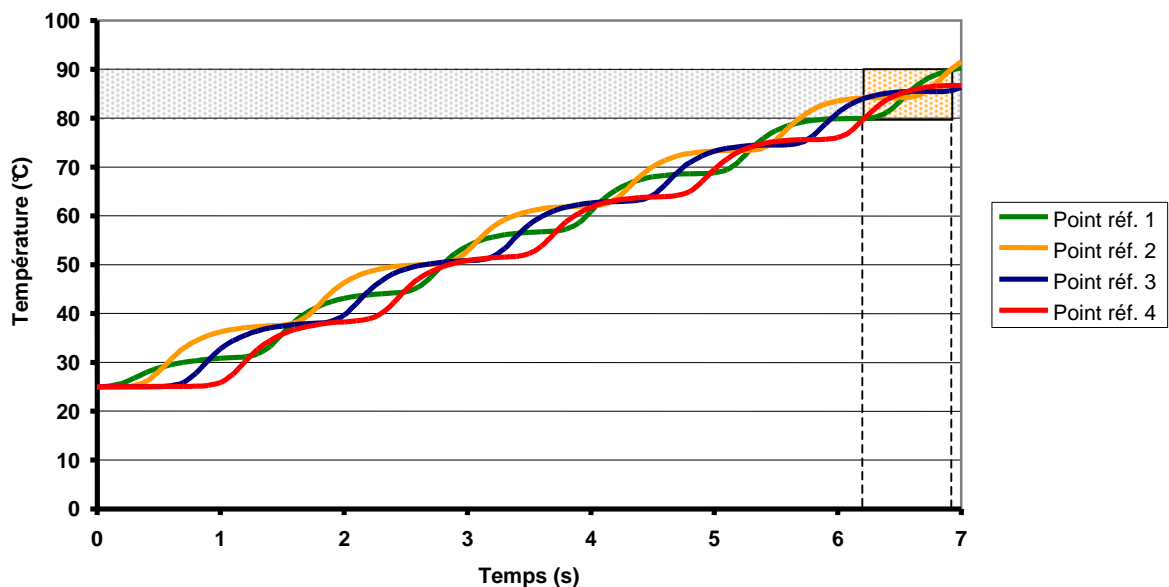


Figure 125: Evolution temporelle de la température du point de référence de l'alliage d'apport pour une vitesse de déplacement du faisceau laser de 20 mm/s

La Figure 126 indique que la vitesse de déplacement du faisceau laser influe sur l'amplitude des oscillations de température de chaque point de référence. Ainsi, lorsque la vitesse de déplacement est faible, l'amplitude des oscillations en température est plus importante. Au contraire, l'amplitude des oscillations est réduite jusqu'à obtenir une montée en température linéaire au niveau de chaque point de référence lorsque la vitesse de déplacement du faisceau laser est augmentée. On remarque

également que quelle que soit la vitesse de déplacement du faisceau laser, l'évolution moyenne de la température aux points de référence s'effectue le long d'une droite de même coefficient directeur. La vitesse de déplacement du faisceau laser induit des amplitudes d'oscillation en température plus ou moins importantes. Des oscillations importantes impliquent un gradient de température élevé au sein de l'alliage d'apport, ce qui peut mener à l'impossibilité de fondre la totalité du matériau d'apport sans détériorer l'assemblage.

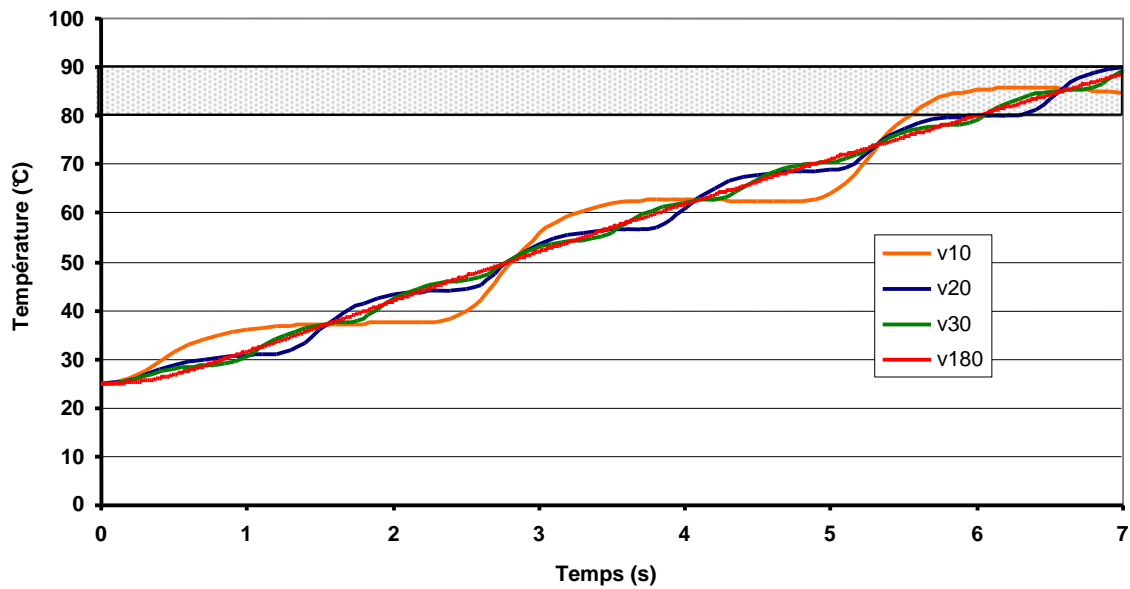


Figure 126 : Evolution en température du point de référence 1 pour différentes vitesses de déplacement du faisceau laser (10, 20, 30 et 180 mm/s)

La ligne de référence est le périmètre de l'alliage d'apport reliant les 4 points de références (Figure 124). La température calculée sur cette ligne est considérée comme étant représentative de la température de l'ensemble de l'alliage d'apport de faible épaisseur. La Figure 127 illustre la température calculée sur la ligne de référence au temps de tir $t=6,7$ secondes pour différentes vitesses de déplacement du faisceau laser (10, 15, 20 et 30 mm/s). La position des points de références 1, 2, 3 et 4 est signalée par des lignes en pointillés. La zone grisée (80-90°C) représente la fenêtre de température dans laquelle l'ensemble de l'alliage d'apport doit se situer afin de réaliser correctement l'opération de brasage laser. Une vitesse de déplacement du faisceau laser trop faible (10 mm/s) induit un gradient de température au sein de l'alliage d'apport inadéquate puisque l'ensemble de l'alliage d'apport n'est pas fondu (Température inférieure à 80°C proche du point de référence 2), alors que sa zone fondue excède la température maximum supportée par l'assemblage (Température supérieure à 90°C autour du point de référence 4). Pour une vitesse de déplacement du faisceau laser de 15 mm/s et au-delà, il est possible d'obtenir l'ensemble du matériau d'apport dans la fenêtre de température que requiert le procédé de brasage de l'assemblage étudié.

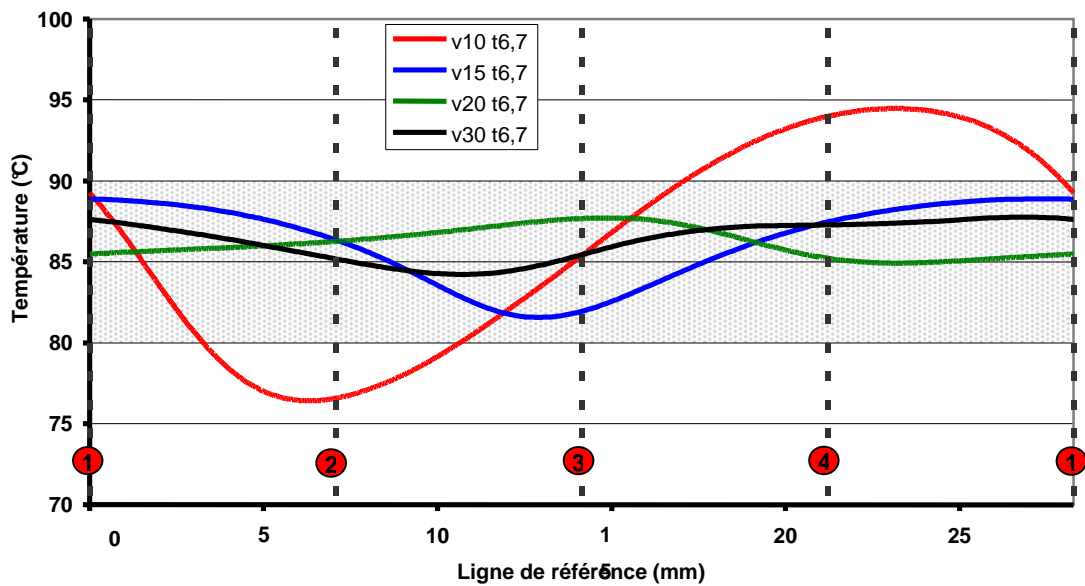


Figure 127 : Température calculée sur la ligne de référence au temps de tir $t=6,7$ secondes et pour différentes vitesses de déplacement du faisceau laser (10, 15, 20 et 30 mm/s)

La Figure 128 indique, en fonction de la vitesse de déplacement du faisceau laser, la chute exponentielle du gradient de température le long de la ligne de référence de l'assemblage, lorsque la totalité de l'alliage d'apport atteint au moins sa température de fusion (80°C).

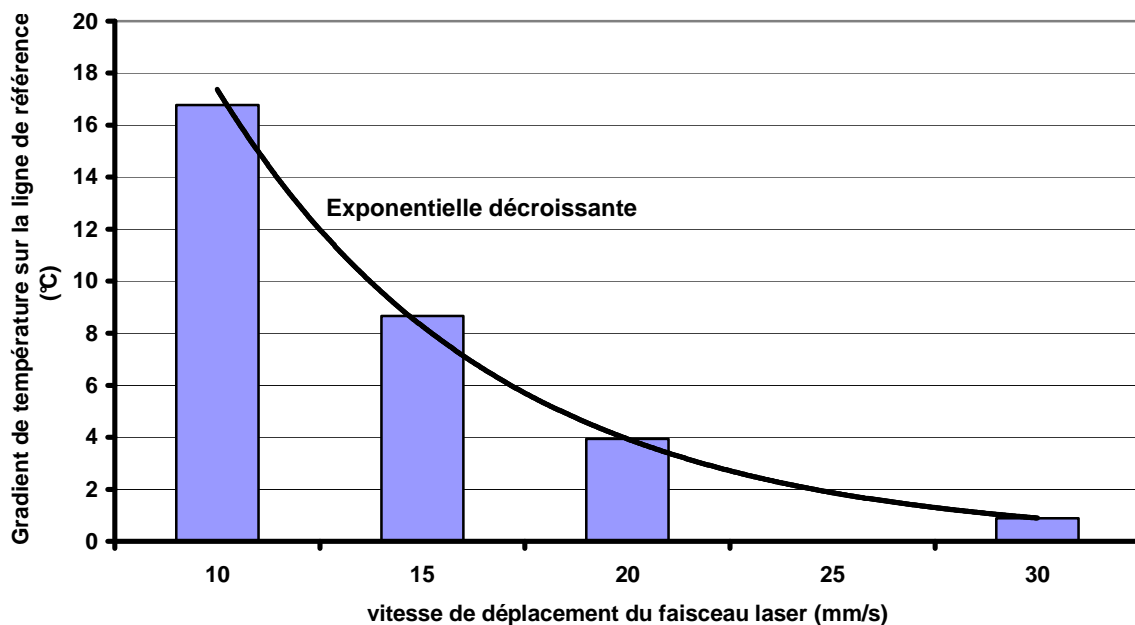


Figure 128 : Gradient de température calculé sur la ligne de référence lorsque sa température minimum atteint 80°C pour différentes vitesses de déplacement du faisceau laser (10, 15, 20 et 30 mm/s)

Ce graphique confirme l'impossibilité de brasage convenablement l'assemblage avec une vitesse de déplacement du faisceau laser trop faible : le gradient de température est supérieure à la fenêtre admise (Plus de 16°C contre 10°C entre 80 et 90°C). Par ailleurs, on constate que plus la vitesse de déplacement du faisceau laser est importante, plus le gradient de température se réduit : la température de l'alliage d'apport devient plus homogène.

L'intérêt d'une montée en température homogène de l'ensemble de l'alliage d'apport permet d'augmenter la fenêtre temporelle de tir laser. Celle-ci est d'environ 0,6 seconde dans le cas d'un déplacement du faisceau laser de 15 mm/s, et 1,16 seconde pour une vitesse de 180 mm/s. Suite à ces considérations, il devient intéressant d'étudier l'effet de la mise en forme du faisceau laser qui devrait permettre une montée en température régulière et homogène de l'alliage d'apport.

18.3.4.2 Brasage par mise en forme du faisceau laser

L'analyse des résultats de la résolution du modèle thermique du procédé de brasage avec un faisceau laser mis en forme utilise les mêmes points de références que précédemment. Les résultats des simulations correspondant à l'utilisation d'un outil de mise en forme du faisceau laser (EOD) sont comparés à ceux obtenus avec un faisceau laser déplacé rapidement sur l'assemblage (vitesse de 180mm/s). L'évolution temporelle du point de référence 1 est tracée sur la Figure 129. A puissance égale (40W), la durée d'interaction laser nécessaire à la fusion du matériau d'apport est réduite de moitié grâce à l'utilisation d'un EOD (de 6 secondes à 3secondes).

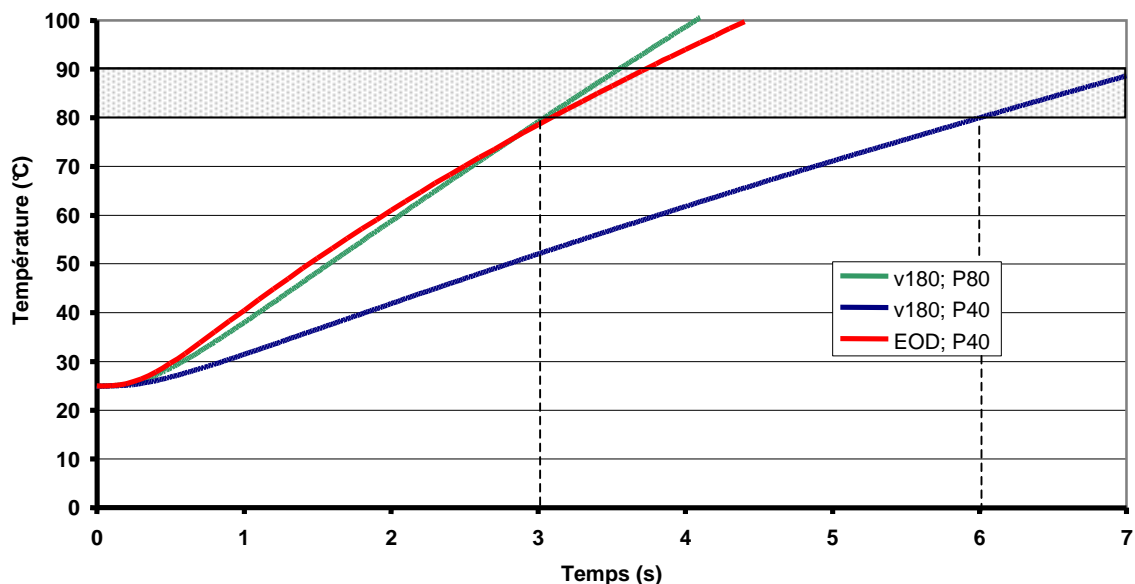


Figure 129 : Comparaison de l'évolution temporelle en température du point de référence 1 :
- cas d'un déplacement rapide du faisceau laser (vitesse de 180mm/s) de puissance 40 et 80W
- cas de l'utilisation d'un EOD pour un faisceau laser de puissance 40W

D'autre part, pour obtenir un temps de fusion sensiblement équivalent, la puissance du faisceau laser en mouvement doit être doublée. Ainsi, la durée de tir laser est de 3 secondes pour atteindre le point de fusion de l'alliage d'apport avec un faisceau de puissance 80W déplacé à 180mm/s, alors que la puissance laser utilisant l'EOD pour le même résultat est de 40W.

Les Figure 130 et Figure 131 illustrent la répartition de la température sur le dessus de l'assemblage, notamment sur la feuille de polyimide métallisée. La comparaison est effectuée entre différentes vitesses de déplacement du faisceau laser et le système utilisant un EOD. La durée d'interaction laser est adaptée en fonction de la vitesse de déplacement et/ou de la puissance du laser utilisé afin d'atteindre la fusion complète du matériau d'apport. Les calculs présentés sur ces graphiques permettent de définir la température maximum atteinte par la feuille de polyimide métallisée.

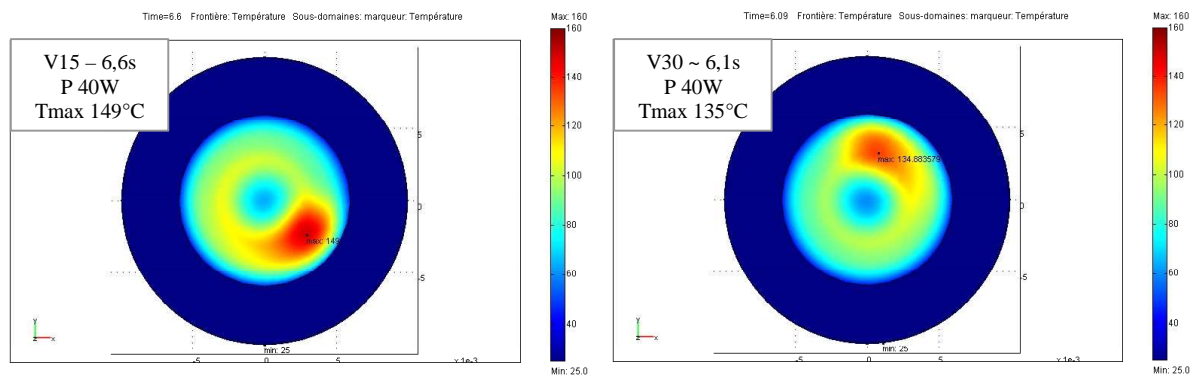


Figure 130 : Répartition de la température sur la vue de dessus de après complète fusion du matériau d'apport avec un faisceau de puissance 40W à 15 et 30 mm/s

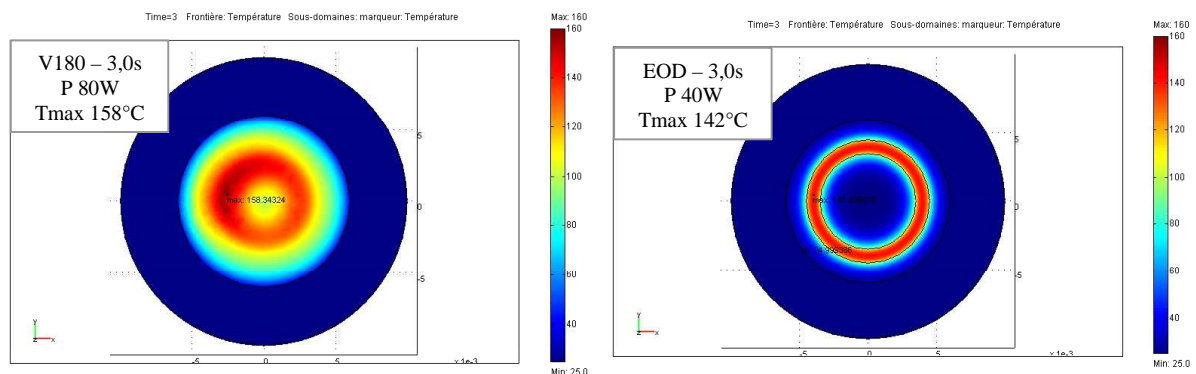


Figure 131 : Répartition de la température sur la vue de dessus de l'assemblage après complète fusion du matériau d'apport (3,0s d'interaction laser) pour le déplacement d'un faisceau de puissance 80W à 180 mm/s, et pour l'utilisation d'un EOD avec un faisceau de puissance 40W

Les graphiques de la Figure 130 permettent la comparaison des effets entre deux vitesses de déplacement du faisceau laser différentes sur la température maximum atteinte par le feuille de

polyimide métallisée en fin de procédé de brasage. On constate que la température maximum calculée sur la feuille de polyimide métallisée diminue sensiblement lorsque la vitesse de déplacement du faisceau laser est augmentée. L'utilisation d'une vitesse de déplacement élevée (à puissance égale) est alors préférée afin d'éviter toute dégradation thermique éventuelle de la feuille de polyimide métallisée.

Les graphiques de la Figure 131 offrent un comparatif entre l'utilisation d'un faisceau laser déplacé à grande vitesse, et l'utilisation d'un outil de mise en forme du faisceau laser. Dans chaque cas, la puissance du faisceau est ajustée afin d'atteindre la fusion complète du matériau d'apport avec des durées d'interaction équivalentes pour chaque technologie (3,0s). On constate que l'EOD permet de réduire la température maximum sur la feuille de polyimide métallisée par rapport au déplacement rapide du faisceau laser (à durée d'interaction égale).

Finalement, l'utilisation d'un EOD permet de réduire fortement le temps de brasage laser de l'assemblage, sans détériorer l'assemblage : ni le tube de polystyrène, ni la feuille de polyimide métallisée ne sont soumis à des températures trop élevées.

18.3.5 Conclusion

L'étude de faisabilité de l'assemblage de deux polymères par brasage laser à basse température est accompagnée par l'étude numérique des transferts de chaleur dans un assemblage très similaire. Les essais expérimentaux démontrent la possibilité de réaliser le joint brasé par l'utilisation de deux technologies distinctes de déplacement du faisceau laser : utilisation d'un robot 3 axes et d'une tête scanner. La principale différence entre ces deux technologies est la vitesse de déplacement du faisceau laser (rapide avec une tête scanner et plus lente avec un robot 3 axes).

Les premiers résultats de la simulation numérique apportent une aide précieuse sur le paramétrage de l'outil laser. Ainsi, ces résultats permettent d'évaluer l'influence de la vitesse de déplacement du faisceau laser sur les caractéristiques du procédé de brasage. Si le succès de l'opération de brasage est également obtenu pour différentes vitesses de déplacement du faisceau laser, les calculs numériques indiquent une valeur critique associée au modèle développé : une limite inférieure en deçà de laquelle l'ensemble de l'alliage d'apport ne peut être fondu sans détérioration de l'assemblage. A l'issue de ces premiers calculs, il apparaît également qu'une vitesse de déplacement du faisceau laser élevée est préférable afin d'homogénéiser la montée en température de l'alliage d'apport. Une vitesse de déplacement rapide du faisceau laser permet d'augmenter la tolérance sur le procédé de brasage en terme de durée d'interaction du faisceau laser. Ces considérations conduisent à l'attrait d'une étude portant sur l'utilisation d'un EOD. Un outil de mise en forme du faisceau laser est susceptible d'améliorer le procédé de brasage laser avec une meilleure homogénéisation du flux de chaleur sur l'ensemble du matériau d'apport.

Dans un deuxième temps, le calcul numérique des transferts de chaleur permet une étude prédictive sur l'utilisation d'un outil innovant de mise en forme du faisceau laser (EOD). L'emploi d'EOD dans le cas d'opérations de brasage n'est toujours pas très répandu. Il ne s'applique généralement qu'à des géométries de joint à braser assez particulières (circulaire dans notre cas). Le principal attrait de ce type de technologie est le gain en cadence de production [Amako 01]. Ceci est absolument confirmé

par l'étude numérique développé ici. A puissance égale, le temps de brasage de l'assemblage est réduit de moitié grâce à l'utilisation de l'EOD dont la géométrie du faisceau laser sur l'assemblage est détaillée lors de l'étape de modélisation. De plus, il apparaît que la mise en forme du faisceau laser n'induit pas d'augmentation supplémentaire de la température maximum de la feuille de polyimide métallisée par rapport au procédé de même durée d'interaction avec un déplacement rapide du faisceau. Cette température maximum est même réduite avec l'utilisation d'un EOD. La métallisation cuivrée de la feuille de polyimide est alors d'avantage préservée d'une possible oxydation.

L'industrialisation du procédé de brasage de l'assemblage de polymères avec mise en forme du faisceau laser nécessite au préalable des essais expérimentaux en laboratoire. La précision d'un EOD est soumise aux contraintes de fabrication. Malgré les techniques avancées de gravure des motifs pour réaliser l'EOD, il est difficile d'éliminer entièrement la présence du faisceau incident (ordre 0) sur l'image de ce système optique. Cependant, une intensité réduite de l'image du faisceau incident située au centre du cercle d'interaction laser avec l'assemblage modifiera sans doute les paramètres laser, mais sans perturber la faisabilité du procédé.

19 Conclusion

L'étude numérique des transferts de chaleur est réalisée en parallèle aux demandes industrielles de brasage laser de différents assemblages. Chaque développement de simulation est donc associé à un assemblage préalablement étudié expérimentalement.

L'établissement de modèles thermiques exploitables a nécessité une démarche progressive. La première étape consiste en un modèle très simplifié à deux dimensions dont la résolution ne permet pas d'exposer l'ensemble des phénomènes physico-chimiques du procédé de brasage laser. Cependant, ce modèle simple s'avère riche d'enseignement. La première étude traite de l'assemblage de matériaux dissemblables céramique-métal. Bien que les propriétés optiques de la pièce de céramique (alumine) aient été précisément caractérisées, il subsiste des zones d'ombre concernant notamment la répartition énergétique du faisceau laser transmis. Par ailleurs, l'outil de calcul utilisé présente une capacité en mémoire réduite qui ne permet pas de discrétiser convenablement l'ensemble de l'assemblage (le matériau d'apport dont la géométrie est de trop faible épaisseur n'est pas représenté). Finalement, malgré les approximations de ce modèle, les résultats permettent une étude qualitative du procédé. Il est possible d'obtenir des informations sur la modification de la nature ou de la géométrie du support de positionnement de l'assemblage. Ces premiers résultats mènent également au choix d'un nouvel outil de calcul autorisant plus de latitude lors de la définition du modèle.

Une géométrie similaire d'assemblage est alors étudiée à l'aide d'un outil de calcul plus performant. Le développement de modèles à trois dimensions requiert des capacités de mémoires plus importantes. Dans un premier temps, il est nécessaire de tirer partie des symétries des géométries et conditions aux limites du système étudié. Ensuite, la prise en compte des phénomènes physico-chimiques prépondérants permet de développer un modèle thermique, validé par les mesures expérimentales. Le second modèle illustre ainsi le rôle important de l'évaporation des solvants volatils du flux sur la température atteinte par l'assemblage lors de l'opération de brasage laser. Les résultats de simulation sont également corroborés par l'analyse de la diffusion des éléments situés aux interfaces de l'assemblage. Finalement, malgré la multitude des phénomènes physico-chimiques ayant lieu lors d'une opération de brasage laser, un modèle précis des transferts de chaleur est rendu possible. Certains phénomènes peuvent être négligés, et d'autres simplifiés tout en conservant une description correcte des transferts de chaleur dans l'assemblage.

Le domaine d'application de la modélisation faisant suite est basé sur la problématique des règles de tracé appliquées au brasage laser d'un circuit électronique. Un procédé de brasage multifibre avec une source laser unique ne permettant pas de différencier l'apport énergétique sur chaque connexion d'un composant électronique est susceptible d'échouer. La masse thermique du circuit électronique relié à chaque connexion d'un composant n'est pas forcément identique. Il existe alors des disparités entre l'énergie laser requise pour chaque connexion du composant. Les premiers résultats de cette étude numérique permettent de quantifier la perte énergétique dans différents circuits. Par extension, l'étude permet également de définir les conditions nécessaires au brasage d'un composant à deux connexions type SM1206. Il apparaît que tout autre élément du circuit électronique relié à la piste de

report doit être éloigné d'au moins 3mm afin qu'il n'ait aucune influence sur le procédé de brasage laser. Ceci n'est valable que si chaque piste de report de composant n'est reliée qu'à un seul circuit électronique. Cette contrainte de fabrication des circuits électroniques s'avère inadaptée à la tendance à la miniaturisation. Ce modèle thermique révèle donc qu'il est préférable d'ajuster les paramètres du laser en fonction des différentes connexions à réaliser. Ainsi, il n'existe pas un seul paramètre laser pour un type de composant électronique, puisque le circuit électronique auquel celui-ci est connecté influe fortement sur le procédé de brasage. Le modèle développé permet d'évaluer la perte d'énergie relative à chaque type de circuit, et devient donc une aide au paramétrage du procédé de brasage laser.

La dernière partie de cette étude de modélisation et simulation de procédés de brasage laser accompagne l'étude de faisabilité d'un assemblage innovant de deux plastiques métallisés. Parallèlement aux études expérimentales, l'étude numérique apporte des informations sur le déroulement du procédé lors du déplacement du faisceau laser. Elle permet d'améliorer le procédé en indiquant qu'un déplacement du faisceau laser rapide sur l'assemblage est préférable afin d'une part de permettre l'assemblage, et d'autre part de réduire les gradients de température au sein de l'alliage d'apport. L'approfondissement d'une voie de recherche sur la mise en forme du faisceau laser pour cet assemblage aboutit à l'étude prédictive des bénéfices d'un tel outil (EOD). L'évaluation préalable d'une méthode innovante et coûteuse de brasage par mise en forme du faisceau laser est nécessaire. Les résultats de cette recherche indiquent le réel intérêt d'une telle technologie sur l'assemblage étudié. Outre la faisabilité d'un procédé de brasage par mise en forme du faisceau laser, la simulation du modèle thermique démontre un gain en temps de brasage conséquent (réduction de moitié).

20 Références

- [Amako 01] J. Amako, K. Umetsu, H. Nakao, Laser soldering with light-intensity patterns reconstructed from computer-generated holograms, *Appl. Opt.* 40 (31) (2001) 5643-5649
- [Beckett 02] P.M. Beckett, A.R. Fleming, J.M. Gilbert, D.G. Whitehead, Numerical modelling of scanned beam laser soldering of fine pitch packages, *Solder. Surf. Mount Technol.* 14 (1) (2002) 24-29
- [Bourdais 99] S. Bourdais, F. Mazel, G. Fantozzi, A. Slaoui, Silicon deposition on mullite ceramic substrates for thin-film solar cells, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 7 (1999) 437-447
- [Brandner 00] M. Brandner, G. Seibold, C. Chang, F. Dausinger, H. Hügel, Soldering with solid state and diode lasers: energy coupling, temperature rise, process window, *J. Laser Appl.* 12 (5) (2000) 194-199
- [Chabicosky 93] R. Chabicosky, J. Nicolics, L. Musiejovsky, Investigation of a laser soldering process for the interconnection of thin film sensors with sputtered multilayer metallizations, *J. Vac. Sci. Technol. A* 11 (4) (1993) 1464-1469
- [Economikos 94] L. Economikos, Laser system for fine pitch Tape Automated Bonding, *J. Vac. Technol. B* 12 (4) (1994) 2394-2399
- [Flanagan 96] A. Flanagan, A. Conneely, T.J. Glynn, Applications of high-power lasers in electronic assembly, *Key Eng. Mater.* 118 (119) (1996) 147-154
- [Greenstein 89] M. Greenstein, Optical absorption aspects of laser soldering for high density interconnects, *Appl. Opt.* 28 (21) (1989) 4595-4603
- [Ho 02] C.E. Ho, R.Y. Tsai, Y.L. Lin, C.R. Kao, Effect of Cu concentration on the reactions between Sn-Ag-Cu solders and Ni, *J. Electron. Mater.* 31 (6) (2002) 584-590
- [Islam 03] M.N. Islam, Y.C. Chan, A. Sharif, M.O. Alam, Comparative study of the dissolution kinetics of electrolytic Ni and electroless Ni-P by the molten Sn_{3.5}Ag_{0.5}Cu solder alloy, *Microelectron. Reliab.* 43 (2003) 2031-2037
- [Martin 03] B. Martin, S. Matteï, Point sur les modélisations thermiques, LASERAP', Ecole CNRS, Séminaire européen, Septembre 2003, Les Hauts de Marquay, France
- [Nakahara 00] S. Nakahara, T. Kamata, N. Yoneda, S. Hisada, T. Fujita, Micro soldering using a YAG laser on lead-free solder, *Proc. SPIE* 4088 (2000) 276-279
- [Naveed 03] S. Naveed, R.L. Woods, Diode laser soldering – A lumped parameter mathematical model and comparison of different optical soldering technologies, *Proc. SPIE* 4973 (2003) 142-157
- [Nicolics 92 a] J. Nicolics, R. Chabicosky, Th. Riegler, Laser soldering of thin film sensors, IEEE/ISHM'92 IEMT Symposium, Germany
- [Nicolics 92 b] J. Nicolics, L. Musiejovsky, E. Semerad, Optimisation of process parameters for laser soldering surface mounted devices, *IEEE Transaction on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology* 15 (6) (1992) 1155-1159

- [Nicolics 94] J. Nicolics, G. Hobler, Numerical analysis of transient temperature distributions during laser soldering, *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering* 13 (4) (1994) 845-860
- [Schneider 93] H. Schneider, M. Schmücker, K. Ikeda, W.A. Kaysser, Optically translucent mullite ceramics, *J. Am. Ceram. Soc.* 76 (11) (1993) 2912-2914
- [Shiau 02] L.C. Shiau, C.E. Ho, C.R. Kao, Reactions between Sn-Ag-Cu lead-free solders and the Au/Ni surface finish in advanced electronic packages, *Solder. Surf. Mount Technol.* 14 (3) (2002) 25-29
- [Shimokawa 96] R. Shimokawa, K. Ishii, T. Takahashi, Optical confinement in thin film Si solar cells by diffuse reflective substrate, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 35 (1996) 3445-3456
- [Tazawa 97] M. Tazawa, K. Yoshimura, K. Igarashi, S. Tanemura, Optical properties of alumina ceramics as a substrate of thin film solar cells, *Solar Energy Mater. Solar Cells* 48 (1997) 315-320
- [Tian 02 a] Y. Tian, C. Wang, Experimental study on laser and hot air reflow soldering of PBGA solder ball, *Proceedings of the International Welding/Joining Conference on Intelligent Technology in Welding and Joining for the 21st Century*, Korea (2002) 469-474
- [Tian 02 b] Y. Tian, C. Wang, X. Ge, P. Liu, D. Liu, Intermetallic compounds formation at interface between PBGA solder ball and Au/Ni/Cu/BT PCB substrate after laser reflow processes, *Mater. Sci. Eng. B95* (2002) 254-262
- [Tian 03] Y. Tian, C. Wang, X. Zhang, D. Liu, Interaction kinetics between PBGA solder balls and Au/Ni/Cu metallization during laser reflow bumping, *Solder. Surf. Mount Technol.* 15 (2) (2003) 17-21
- [Tian 04] Y. Tian, C. Wang, D. Liu, Thermomechanical behaviour of PBGA package during laser and hot air reflow soldering, *Modell. Simul. Mater. Sci. Eng.* 12 (2004) 235-243
- [Yoon 05] J.W. Yoon, S.W. Kim and S.B. Jung, IMC morphology, interfacial reaction and joint reliability of Pb-free Sn-Ag-Cu solder on electrolytic Ni BGA substrate, *Journal of Alloys and Compounds* 392 (2005) 247-252.

CONCLUSION

Ce travail de thèse s'inscrit dans la continuité du développement du procédé de brasage tendre par faisceau laser. Le regain d'intérêt pour cette technologie d'assemblage est porté par une industrie électronique en pleine mutation (notamment dû à la législation qui bannit l'utilisation du plomb), et le coût plus du tout prohibitif de l'outil laser de « faible » puissance (inférieure à 100W). Ces recherches sont effectuées dans un cadre industriel, avec une forte demande pour la réalisation de démonstrateurs. L'ascension de la technologie d'assemblage par brasage tendre laser passe d'ailleurs par son utilisation dans le cadre de cas concrets d'applications industrielles.

Les résultats de ce travail de thèse sont issus de deux approches complémentaires du procédé de brasage laser :

- son étude expérimentale
- son étude numérique des transferts de chaleur (modélisation, simulation et validation)

Etude expérimentale

Le premier thème de recherche de l'étude expérimentale concerne les assemblages de matériaux dissemblables (principalement céramique – métal) par le procédé de brasage avec une interaction indirecte du faisceau laser (le faisceau laser n'interagit pas directement avec le matériau d'apport). Les matériaux constituant l'assemblage sont choisis en fonction de leur degré d'utilisation en industrie tout en tenant compte des intérêts des industriels impliqués dans le projet. L'approche étudiée lors de ce travail consiste en un apport énergétique par conduction à travers les pièces à assembler et leur traitement de surface (métallisation). Cette étude détaille les conditions nécessaires à la réussite de tels assemblages par brasage laser. L'étude de faisabilité est accompagnée par les analyses métallurgiques du joint brasé ainsi que par l'évaluation des propriétés mécaniques des assemblages. Elle a pour objectif la réalisation d'un prototype permettant de valider le procédé d'assemblage de matériaux dissemblables par faisceau laser. Finalement, ces recherches aboutissent au développement d'un procédé de brasage laser par transparence à travers la pièce d'alumine (suffisamment transparente au faisceau d'un laser à diode).

Au cours des recherches paramétriques, on observe qu'un contrôle de la température à rétroaction permet d'accroître fortement la reproductibilité du procédé. Les résultats des études métallographiques du joint brasé sont appuyés et confirmés par les observations issues de différentes recherches existantes et traitant des mêmes matériaux. Puis la caractérisation mécanique des assemblages et l'analyse de leur faciès de rupture ont permis d'envisager la réalisation de démonstrateurs. Ces derniers résultats de caractérisation ont de surcroît permis d'identifier l'interface la plus fragile du système multicouche brasé, et ainsi une voie d'amélioration de la tenue mécanique des assemblages. Finalement, la possibilité d'assembler des micro-fraises (démonstrateurs) par le procédé de brasage tendre avec faisceau laser a été démontrée. Cependant, des développements complémentaires concernant notamment le procédé de métallisation restent encore nécessaires afin de répondre au cahier des charges de ces micro-fraises à usage médical.

Les travaux expérimentaux faisant suite sont axés sur les procédés de brasage par interaction directe du faisceau laser sur le matériau d'apport (crème à braser). Ce type de procédé s'associe principalement au brasage tendre en électronique. Ces travaux de recherche ont pour premier objectif de définir les caractéristiques adéquates d'une crème à braser dans le cadre d'une application de brasage laser. Pour cela, une méthode de caractérisation des crèmes à braser est introduite afin d'étudier leur comportement sous l'interaction d'un rayonnement laser émettant dans le proche infrarouge. Les conclusions résultant de ces essais indiquent les caractéristiques préférentielles d'une crème à braser à « usage laser ».

Ensuite, diverses configurations de brasage par faisceau laser furent expérimentées : le brasage laser scanner et multifibre. La réalisation de prototypes a permis l'évaluation des deux procédés. Ces résultats indiquent une qualité de brasage au moins égale à celles de procédés conventionnels (four, IR, vague...). Une des spécificités d'un procédé laser rapide est de permettre une grande finesse de structure du joint brasé, ce qui laisse présager une résistance au vieillissement excellente des assemblages.

Finalement, une tentative d'optimisation de la formulation d'une crème à braser est effectuée en tenant compte des spécificités d'un procédé laser : la sélection d'un additif adéquat à incorporer à la formulation des crèmes à braser permet d'augmenter leur propriété d'absorption, et donc de réduire le temps de cycle du procédé de brasage laser. Cependant, au-delà d'une criticité de procédé accrue, l'additif noir de carbone n'est pas entièrement satisfaisant. On observe qu'il induit des résidus de flux carbonés potentiellement conducteur sur la carte électronique.

Modélisation, simulation et validation de procédés de brasage laser

La démarche adoptée consiste à développer des modèles simples permettant d'apporter les informations pertinentes concernant les transferts de chaleur lors de différents procédés de brasage laser. Le travail de modélisation a alors consisté, dans un premier temps, à développer un modèle simplifié 2D riche d'enseignement, mais qui ne permet pas de tenir compte de l'ensemble des phénomènes physico-chimiques caractéristiques du procédé de brasage. C'est en particulier le cas des phénomènes d'évaporation des solvants volatils inclus dans le flux des crèmes à braser. Ceci nous a conduit à utiliser un nouvel outil de calcul, basé sur une géométrie 3D, mieux adapté à la complexité des phénomènes à décrire. Ce second modèle illustre ainsi le rôle important de l'évaporation des solvants volatils du flux sur la répartition de la température au sein de l'assemblage lors de l'opération de brasage laser. Les résultats de simulation ont aussi été corroborés par l'analyse de la diffusion des éléments situés aux interfaces de l'assemblage.

L'utilisation de certains procédés de brasage impose des contraintes lors de la conception graphique des circuits électroniques sur leur support (règles de tracé). Nous avons démontré qu'un procédé de brasage multifibre avec une source laser unique est susceptible d'échouer lorsqu'il existe des disparités entre l'énergie laser requise pour chaque connexion du composant. Les premiers résultats de cette étude numérique permettent de quantifier la perte énergétique dans différents circuits. Par extension, l'étude permet également de définir les conditions nécessaires au brasage d'un composant à deux connexions type SM1206. Ce modèle thermique révèle finalement qu'il est préférable d'ajuster

les paramètres du laser à chaque connexion à réaliser. Ainsi, il n'existe pas un seul paramètre laser pour un type de composant électronique, puisque le circuit électronique auquel celui-ci est connecté influe fortement sur le procédé de brasage.

La dernière partie de cette étude de modélisation et simulation accompagne l'étude de faisabilité d'un assemblage innovant de deux plastiques métallisés. Parallèlement aux études expérimentales, l'étude numérique apporte des informations sur le déroulement du procédé avec déplacement du faisceau laser. Elle permet d'améliorer le procédé en indiquant qu'un mouvement rapide du faisceau sur l'assemblage est préférable afin de réduire les gradients de température au sein de l'alliage d'apport. La poursuite des recherches conduit à l'étude prédictive des bénéfices d'un outil de mise en forme du faisceau laser (Elément d'Optique Diffractif : EOD). Les résultats indiquent le réel intérêt d'une telle technologie sur l'assemblage étudié. Outre la faisabilité d'un procédé de brasage par mise en forme du faisceau laser, la simulation du modèle thermique démontre un gain en temps de brasage conséquent.

Finalement, le brasage laser apparaît comme une alternative intéressante aux procédés classiques, dans la mesure où il rend possible des assemblages nécessaires aux évolutions technologiques en cours : céramique-métal, composite-céramique, plastique-métal... D'autre part, le procédé de brasage par faisceau laser s'avère être l'unique méthode permettant de traiter certains assemblages, comme c'est le cas de l'assemblage plastique-métal évoqué lors du paragraphe 17.3 de cette thèse.