

# Encapsulation hermétique pour systèmes hydro- et thermo-sensibles

THÈSE N° 4348 (2009)

PRÉSENTÉE LE 8 AVRIL 2009

À LA FACULTÉ SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR  
LABORATOIRE DE PRODUCTION MICROTECHNIQUE 1  
PROGRAMME DOCTORAL EN SYSTÈMES DE PRODUCTION ET ROBOTIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Frank SEIGNEUR

acceptée sur proposition du jury:

Prof. H. Bleuler, président du jury

Prof. J. Jacot, directeur de thèse

Prof. P. Lambert, rapporteur

Dr T. Maeder, rapporteur

Dr P. Pfluger, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Suisse  
2009



*A mes parents*



# Résumé

Le nombre de fabricants de microsystemes a considérablement augmenté ces dernières années. Cela ne veut pas dire que l'introduction de ces nouveaux produits sur le marché en est devenue plus facile. Pour passer d'un micro-système à un produit utilisable il faut une étape d'encapsulation qui permet la protection mais aussi l'interconnexion du microsysteme avec l'extérieur. Trop souvent, lors de la conception d'un microsysteme, le concepteur ne réfléchit pas à la méthode d'encapsulation, ce qui rajoute des coûts et des délais pour obtenir un produit.

Cette thèse se veut un outil de conception pour ceux qui doivent réaliser un microsysteme dont la technique exige la protection contre les gaz et les vapeurs.

Certains microsystemes sont sensibles à l'humidité et à la température. Jusqu'à maintenant, pour obtenir un boîtier étanche, la solution la plus simple était de braser un capot sur une base de boîtier en les passant au four. Cette méthode peut chauffer le microsysteme à des températures qu'il ne peut pas supporter. Cette thèse montre qu'il existe des méthodes qui permettent de réaliser des boîtiers hermétiques tout en conservant une basse température d'encapsulation.

Dans un premier temps, on définit la perméabilité des matériaux aux gaz et aux vapeurs ainsi que la notion d'herméticité d'un boîtier et les différentes méthodes de mesure de fuites. De cette partie, on conclut que seuls les matériaux tels que les métaux, les céramiques ou les verres permettent d'obtenir un boîtier hermétique sur une dizaine d'années. On passe ensuite en revue les différentes méthodes permettant la fermeture hermétique de boîtiers. La brasure par diode laser, méthode utilisée dans cette thèse, permet d'obtenir un boîtier hermétique tout en diminuant l'impact thermique sur le microsysteme encapsulé. L'avantage de la diode laser par rapport à un autre laser est sa basse densité de puissance, ainsi que la possibilité de contrôler la puissance en continu pendant le tir. La puissance peut être commandée par un système mesurant la température pendant la brasure, par exemple avec un pyromètre.

Pour concevoir un boîtier, on montre qu'il est nécessaire de formaliser les besoins et de les transcrire en fonctions que le boîtier devra remplir. L'analyse fonctionnelle permet cette formalisation. Cette méthode itérative doit idéalement se faire parallèlement à la conception du microsysteme, mais elle peut aussi être faite lorsque la conception du microsysteme est déjà avancée. On décrit certaines méthodes de recherches de fonctions, ce qui permet de réduire les reconceptions lorsque le produit est déjà existant.

On propose aussi une démarche de modélisation thermique qui permet de trouver un modèle idoine à chaque situation. La première étape est la recherche des ordres de grandeurs. Le modèle est ensuite affiné soit par une analogie électrique ou par des simulations numériques lorsque cela est nécessaire.

Plusieurs démonstrateurs ont été réalisés dans le cadre de cette thèse. On montre notamment la faisabilité d'un boîtier hermétique en LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic) pour une matrice de micro-miroirs dans le cadre d'une application spatiale. La fabrication est basée sur un équipement simple (sérigraphie) susceptible d'exister chez tout fabricant de microsysteme. Les boîtiers en LTCC sont applicables aux systèmes complexes produits en petites et moyennes séries, là où les boîtiers céramiques standard sont beaucoup plus chers et n'offrent généralement pas une souplesse de conception suffisante.

La méthode est adaptée à la fabrication de cellules hermétiques contenant du rubidium servant à des horloges atomiques miniatures. Le temps et la température de fermeture sont drastiquement diminués par rapport au soudage anodique, ce qui diminue l'évaporation du rubidium durant l'opération de fermeture de la cellule. Plusieurs points sont encore à améliorer, notamment l'adhésion de la métallisation.

La démarche de modélisation thermique est illustrée dans l'étude d'une opération de polymérisation de colle époxy par laser. On utilise notamment une méthode d'analyse dimensionnelle couplée à l'expérimentation, ce qui permet de déterminer le comportement du système dans un domaine de paramètres limité. Dans cet exemple, on montre aussi la polyvalence de la diode laser.

On traite encore de certains aspects techniques liés à l'utilisation d'une diode laser pour l'opération de brasure, notamment les contraintes en terme de mouillage et de temps de brasure. On constate notamment que l'étamage des surfaces est préférable à l'utilisation de préformes.

**Mots-clés :** Microsysteme, MEMS, Production, Encapsulation hermétique, LTCC, Brasure laser.

# Abstract

The quantity of MEMS manufacturers has considerably been increasing these last years. This doesn't mean that the introduction of such products on the market has become easier. A packaging operation is needed to obtain a usable product out of a microsystem. The packaging ensures protection but also interconnexion with the outside. Too often, during the conception of a microsystem, the engineer usually does not think about packaging methods, which increases costs and time to obtain a product.

This thesis is a conception tool to help those who need to realise a microsystem requiring protection against gas and vapours.

Some microsystems are sensitive to humidity and temperature. Up to now, to obtain an hermetic package, the easiest solution was soft soldering of a cap on a base. This operation was often done in an oven, which may heat the microsystem to temperatures it can not withstand. In this thesis we describe methods which allow the design and manufacturing of hermetic packages together with a low sealing temperature.

In a first phase, material permeability is defined, as well as the notion of package hermeticity and leak measurement methods. The conclusion is that the only materials which allow long-term hermeticity (up to 10 years) are ceramics, glasses and metals. Usual methods for hermetic sealing of packages are then described. Soft soldering by the mean of a laser diode, which is used in this thesis, allows to obtain an hermetic package, together with a low thermal budget. The advantage of the laser diode over another type of laser is its low power density, as well as the possibility to continuously control its power during operation. The power can be controlled during soldering depending on the measured temperature, for example by the mean of a pyrometer.

In order to design a package, it is necessary to formalize the requirements in terms of functions that need to be fulfilled by the package. Functional analysis is used to formalize these requirements. This iterative method needs to be done during the conception of the microsystem, but can also be done

when the design of the microsystem is already done. In order to reduce reconception phases, most of the functions need to be found at an early stage of the package design. Some methods which allow to find these functions are described.

A thermal modelling method is also proposed. This method allows to find an appropriate model to each situation. The first step consists in finding orders of magnitude. The model is then refined by the mean of an electrical analogy or by the mean of numerical simulations when necessary.

Several demonstrators have been realized during this thesis. The feasibility of an LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic) package for a micromirrors array is demonstrated. The manufacturing of this package is based on screen-printing technology. LTCC packages are suitable for small to medium series of complex microsystems. For complex devices, standard ceramic packages are more expensive than LTCC-based ones, and may not provide the required flexibility.

The proposed method is adapted to manufacturing of hermetic cells containing rubidium, for miniature atomic clocks. Sealing time and temperature are drastically reduced compared to anodic bonding, which reduces evaporation of the rubidium during the sealing operation. Some improvements are needed, mainly adhesion of the metallization and atmosphere control during the sealing.

The thermal modelling method is illustrated in an example of laser curing of epoxy glue. In order to determine the behaviour of the system, dimensional analysis is used together with experimentation. Versatility of the laser diode is also shown in this project.

Finally, some technical points related to the use of a laser diode for soft soldering are also described. Recommendations are given regarding wettability of the solder and reduction of the heating time. Notably, pre-tinning the surfaces with solder is found to be preferable to the use of preforms.

**Keywords:** Microsystem, MEMS, Production, Hermetic packaging, LTCC, Laser soldering.

# Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont donné la possibilité de réaliser ce travail. Merci tout d'abord au Professeur Jacques Jacot, mon directeur de thèse, de m'avoir accueilli au LPM. Toutes les discussions que nous avons eues ont été un apport inestimable, que ce soit dans la réalisation de cette thèse, ou pour mon travail au LPM en général. Un merci également au Docteur Thomas Maeder, qui m'a suivi durant les dernières années de ma thèse et soutenu mon travail.

Merci au Professeur Hannes Bleuler d'avoir accepté d'être le Président de mon jury, ainsi qu'au Professeur Pierre Lambert pour sa participation à mon jury de thèse ainsi que pour ses conseils avisés concernant les simulations numériques et l'analyse dimensionnelle. Merci aussi au Docteur Peter Pfluger d'avoir pris le temps d'évaluer mon travail.

J'aimerais également adresser mes remerciements à quelques membres du LPM, en particulier:

Yannick Fournier, pour les heures communes passées au design et à la réalisation de boîtiers en LTCC. Sans tes connaissances et ta motivation, bien des démonstrateurs de cette thèse n'auraient pas vu le jour.

Karine, pour sa patience ainsi que pour ses nombreuses relectures assidues de ma thèse.

Merci aussi à Niki, mon collègue du bureau, de m'avoir supporté pendant ces années, à moins que ce ne soit l'inverse.

Finalement, je remercie mes parents pour leurs encouragements, leur soutien et leur patience.



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Le marché des microsystèmes . . . . .	1
1.2	Du wafer au produit . . . . .	2
1.3	L'importance de l'encapsulation dans la conception d'un microsystème . . . . .	3
1.4	Fonctions de l'encapsulation . . . . .	5
1.5	Domaine choisi pour la thèse . . . . .	7
1.6	Approche choisie . . . . .	9
1.7	Structure de la thèse . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Quelques aspects fondamentaux sur la fermeture de boîtiers</b>	<b>11</b>
2.1	Définition et mesure de l'herméticité . . . . .	11
2.1.1	Définition de l'herméticité . . . . .	11
2.1.2	Herméticité des matériaux . . . . .	13
2.1.3	Méthodes de mesure de l'herméticité . . . . .	17
2.2	Méthodes de fermeture de boîtiers . . . . .	21
2.2.1	Surmoulage plastique . . . . .	21
2.2.2	Soudure anodique (Anodic Bonding) . . . . .	21
2.2.3	Boîtiers discrets de type "TO" . . . . .	22
2.2.4	Boîtiers céramiques standard . . . . .	22
2.2.5	Brasure au four . . . . .	23
2.2.6	Soudure à la molette . . . . .	24
2.2.7	Chauffage par réaction exothermique . . . . .	24
2.2.8	Soudure de métaux par ultrasons . . . . .	25
2.2.9	Brasure assistée par ultrasons . . . . .	26

2.2.10	Thermocompression . . . . .	27
2.3	Comparaison des méthodes d'encapsulation . . . . .	28
2.4	Conclusions . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Méthodologie pour obtenir un boîtier hermétique</b>	<b>31</b>
3.1	Hypothèses . . . . .	31
3.2	Démarche de conception . . . . .	32
3.2.1	Introduction . . . . .	32
3.2.2	Analyse fonctionnelle . . . . .	32
3.2.3	Conclusion . . . . .	36
3.3	Chauffage par laser . . . . .	37
3.3.1	Principe du scellement par laser . . . . .	38
3.3.2	Contrôle de la puissance . . . . .	39
3.3.3	Mesure de température par thermistances sérigraphiées	40
3.3.4	Mesure de température par pyromètre . . . . .	43
3.3.5	Conclusion . . . . .	45
3.4	Modélisation thermique . . . . .	46
3.4.1	Introduction aux modes de transferts thermiques . . .	48
3.4.2	Modèle analytique . . . . .	50
3.4.3	Modèle par analogie électrique . . . . .	54
3.4.4	Simulations numériques . . . . .	57
3.4.5	Analyse dimensionnelle . . . . .	59
3.4.6	Conclusion . . . . .	62
<b>4</b>	<b>Démonstrateurs</b>	<b>63</b>
4.1	Développement d'un boîtier pour MEMS optique . . . . .	63
4.1.1	Définition du problème . . . . .	64
4.1.2	Analyse fonctionnelle . . . . .	64
4.1.3	Description de la solution. . . . .	66
4.1.4	Méthode de développement . . . . .	66
4.1.5	Choix des matériaux et des pâtes de sérigraphie . . . .	67
4.1.6	Fabrication du boîtier en LTCC . . . . .	68
4.1.7	Scellage hermétique . . . . .	69

4.1.8	Aspects économiques . . . . .	71
4.1.9	Résultats . . . . .	73
4.1.10	Conclusion . . . . .	73
4.2	Encapsulation de rubidium pour une horloge atomique . . . . .	75
4.2.1	Définition du problème . . . . .	75
4.2.2	Description générale de la solution . . . . .	75
4.2.3	Description de la méthode de fermeture . . . . .	76
4.2.4	Résultats . . . . .	77
4.2.5	Conclusion . . . . .	80
4.3	Etude d'une opération de polymérisation de colle époxy . . . . .	81
4.3.1	Définition du problème . . . . .	81
4.3.2	Approche du problème . . . . .	82
4.3.3	Modèle d'échauffement simple . . . . .	84
4.3.4	Modèle de conduction simple . . . . .	85
4.3.5	Chauffage local par laser . . . . .	87
4.3.6	Détermination précise de paramètres de polymérisation . . . . .	89
4.3.7	Modèle d'échauffement par analyse dimensionnelle . . . . .	96
4.3.8	Conclusions . . . . .	103
4.4	Encapsulation d'un capteur de pression implantable . . . . .	104
4.4.1	Définition du problème . . . . .	104
4.4.2	Tests de chauffage par laser . . . . .	104
4.4.3	Améliorations . . . . .	108
4.4.4	Mesures d'herméticité . . . . .	109
4.4.5	Conclusion . . . . .	109
<b>5</b>	<b>Conclusions</b>	<b>111</b>
<b>A</b>	<b>Résolution unidimensionnelle de l'équation de Laplace</b>	<b>115</b>
<b>B</b>	<b>Détermination du flux de fuite dans un disque</b>	<b>117</b>



# Table des figures

1.1	Prévision des volumes de vente de MEMS selon leur type. Source: YOLE Développement. . . . .	2
1.2	Du wafer au produit : exemple du Digital Light Processing (Texas Instruments) [5]. . . . .	3
1.3	Aperçu des couches formant un emballage aseptique (Source : Tetra Pak). . . . .	6
1.4	Variantes de packaging. Source : Bosch . . . . .	8
1.5	Capteur infrarouge pyroélectrique pour spectromètre. Source: IR Microsystems. . . . .	9
2.1	Herméticité de différents matériaux. Figure adaptée de [19] .	13
2.2	Augmentation du chemin de diffusion par des nanoparticules en feuillets. . . . .	15
2.3	Procédé de dépose de couche mince $\text{SiO}_x$ . . . . .	16
2.4	Détection à l'hélium . . . . .	17
2.5	Principe de la mesure d'herméticité par spectroscopie FTIR, tiré de [27]. . . . .	18
2.6	Interférométrie optique . . . . .	19
2.7	Boîtiers discrets de type TO. . . . .	22
2.8	Boîtiers céramiques standard. . . . .	23
2.9	Soudure à la molette. . . . .	24
2.10	Vue schématique du principe utilisé. Tiré de [41]. . . . .	25
2.11	Soudure par ultrasons. Source : <a href="http://www.amtechultrasonic.com">www.amtechultrasonic.com</a> .	26
2.12	Brasure assistée par ultrasons. Image adaptée de [44]. . . . .	26
2.13	Schéma de principe de la thermocompression. . . . .	27
3.1	Démarche de conception sérielle. Tiré de [47]. . . . .	32

3.2	Démarche d'analyse fonctionnelle. Noter les itérations. . . . .	35
3.3	Equipement laser utilisé dans le cadre de la thèse (diode laser + optique de déviation). . . . .	38
3.4	Chauffage quasi simultané. . . . .	39
3.5	Vue générale d'un scellement par laser. . . . .	40
3.6	Principe de la commande en puissance du laser. . . . .	40
3.7	Vitre équipée de thermistances pour la mesure de température pendant la brasure. . . . .	41
3.8	Evolution de la valeur de la résistance en fonction de la température. . . . .	41
3.9	Evolution de la température en fonction du temps aux endroits R5, R4 et R2. . . . .	42
3.10	Puissance instantanée nécessaire au suivi d'un profil de température. . . . .	44
3.11	Comparaison de la puissance de consigne et de la puissance optique utile. . . . .	44
3.12	Vue en coupe du boîtier LTCC utilisé pour les modélisations thermiques. . . . .	47
3.13	Photo du boîtier en LTCC. La cavité est visible sur la coupe de gauche. . . . .	47
3.14	Flux thermiques dans le boîtier. . . . .	48
3.15	Schéma équivalent pour le boîtier sans cavité. . . . .	51
3.16	Schéma équivalent pour le boîtier avec cavité. . . . .	52
3.17	Décomposition en résistances et capacités. . . . .	54
3.18	Schéma équivalent. . . . .	55
3.19	Simulations par analogie électrique, version sans canal. . . . .	55
3.20	Simulation par analogie électrique, version avec canal. . . . .	56
3.21	Résultat de simulation COMSOL, pour une puissance fixe donnée, comparaison des versions sans et avec canal. . . . .	58
3.22	Graphe des températures, pour une puissance fixe donnée, comparaison des versions sans et avec canal. . . . .	59
3.23	Résultat de simulation COMSOL, pour une puissance fixe donnée, comparaison des formes de canaux. . . . .	60
3.24	Graphe des températures, pour une puissance donnée, comparaison des formes de canaux. . . . .	61

4.1	Boîtier prêt à être scellé. . . . .	64
4.2	Vue schématique du boîtier. . . . .	66
4.3	Vue détaillée des plages de bonding. . . . .	68
4.4	Vue schématique de la méthode utilisée pour la lamination. . . . .	69
4.5	Températures maximales des opérations. . . . .	70
4.6	Canal pour équilibrer les pressions lors de la brasure de la vitre. . . . .	71
4.7	Vue schématique du boîtier symétrique. . . . .	73
4.8	Principe de la cellule hermétique. . . . .	76
4.9	Echantillon ayant subi un test d'arrachage. On remarque que la liaison entre le joint de brasure et le verre reste intacte. . . . .	76
4.10	Cellules hermétiques. . . . .	77
4.11	Processus de fermeture de cellules de rubidium. . . . .	78
4.12	Diagramme de phase rubidium - étain, tiré de [77]. . . . .	79
4.13	Graphes de l'absorption d'une cellule. Source: Ch. Schoeri, LTF, UniNE. . . . .	79
4.14	Le signal d'horloge CPT, avec une détection lock-in à 1kHz. Source: Ch. Schoeri, LTF, UniNE. . . . .	80
4.15	Schéma en coupe d'un passage de fil. . . . .	81
4.16	Photo d'un passage de fil. Le second depuis la gauche est chauffé par une diode laser. . . . .	82
4.17	Schéma des flux thermiques pour trois variantes de chauffage différentes. L'objectif est de minimiser l'impact thermique sur l'intérieur du système. . . . .	83
4.18	Schéma des flux entrant et sortant sur l'élément de colle. . . . .	84
4.19	Modèle pour le flux de fuite dans la coque en titane. . . . .	86
4.20	Echauffement du système pour une puissance laser de 3 W. Résultats mesurés sur un système équipé de thermocouples placés sur deux ferrules, ainsi que sur la batterie et l'électronique. . . . .	87
4.21	Chauffage du système en gardant la température de la colle constante. . . . .	88
4.22	Chauffage du système en gardant la température de l'électronique constante. . . . .	89
4.23	Spectre d'absorption infrarouge pour l'état polymérisé et non polymérisé. . . . .	91

4.24	Spectre d'absorption des groupes époxy (en haut) et hydroxyle (en bas). . . . .	92
4.25	Thermodynamique de la réaction de polymérisation . . . . .	93
4.26	Taux de polymérisation en fonction du temps et de la température . . . . .	94
4.27	Schéma montrant les paramètres du modèle entrant en jeu. . . . .	96
4.28	Réduction du nombre de paramètres . . . . .	98
4.29	Principe de la détermination des constantes C1 et C3. . . . .	99
4.30	Détermination des constantes C1 et C3, mesures expérimentales. . . . .	100
4.31	Détermination des constantes C1 et C5, mesures expérimentales. . . . .	101
4.32	Packaging pour capteur de pression implantable . . . . .	104
4.33	Les étapes observées lors de l'opération de brasure. . . . .	105
4.34	Evolution de la température du joint pendant l'opération de brasure. . . . .	106
4.35	Montage utilisé pour garantir le contrôle de l'atmosphère, le contact des deux composants ainsi qu'un chauffage général, en plus du chauffage local par laser. . . . .	107
4.36	Piste en diélectrique noir pour augmenter l'absorption du faisceau laser. A gauche on notera la formation de bulles entre le diélectrique et le verre. . . . .	108
B.1	Modèle pour un flux de fuite dans une partie circulaire. . . . .	117

# Chapitre 1

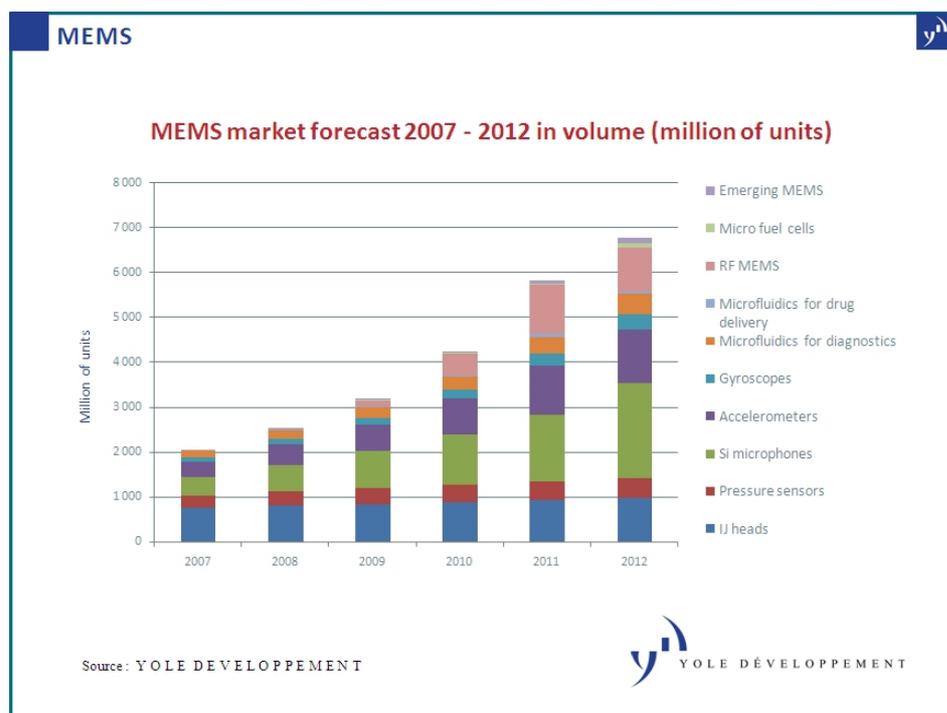
## Introduction

Cette thèse traite de méthodes d'encapsulation ou packaging, étape particulièrement importante du processus de fabrication de produits basés sur des microsystèmes. Dans cette introduction, on montre en quoi l'encapsulation est une étape critique et pourquoi il est nécessaire de trouver des solutions. La première partie décrit le marché des microsystèmes concernés par l'étanchéité et l'importance de l'encapsulation dans la démarche de conception du produit. La notion d'encapsulation et les fonctions qu'elle remplit sont définies de manière générale dans une seconde partie.

### 1.1 Le marché des microsystèmes

De plus en plus d'entreprises produisent actuellement des microsystèmes appelés aussi MEMS (Micro Electro Mechanical Systems). On constate d'une part une augmentation des volumes de production, et aussi une diversification des domaines d'application (automobile, aéronautique, défense, télécommunications, médical). Certains produits ont un volume de production qui a largement dépassé la phase de lancement, par exemple les têtes d'impression jet d'encre, les micro-miroirs pour la projection d'images, ainsi que les capteurs de pression. 70% du marché actuel des MEMS est généré par ces produits matures. D'autres produits, comme les accéléromètres ou les microphones en silicium, sont en croissance. D'autres types de MEMS feront leur apparition ces prochaines années (voir figure 1.1), il s'agit notamment des micro-moteurs et des micro-piles à combustible. Ces MEMS ont un coût de développement élevé et sont spécifiques à chaque application. En 2007, le marché mondial des MEMS a représenté 6.9 milliards de dollars. Sur la période 2007-2012, on table sur une croissance annuelle de 12 à 13 %. Selon les analyses [1], le marché devrait représenter 13,4 milliards en 2012.

Les Etats-Unis s'intéressent essentiellement aux produits dont le volume se compte en millions de pièces par an. En Europe, on s'intéresse aussi aux produits à forte valeur ajoutée, même si le volume est inférieur à 100'000 pièces par an. En Asie, les entreprises s'intéressent à tout, quels que soient la valeur ajoutée ou le volume annuel.

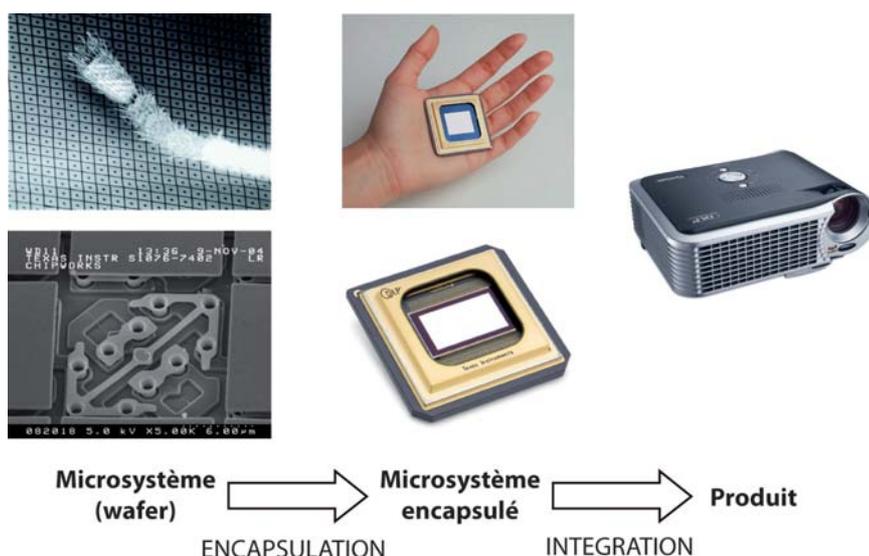


**Fig. 1.1:** Pr evision des volumes de vente de MEMS selon leur type.  
Source: YOLE Développement.

## 1.2 Du wafer au produit

Actuellement, fabriquer un microsystème repose sur des procédés réalisés en salle blanche. A partir du wafer sorti de la salle blanche, il faut encore réaliser plusieurs étapes pour obtenir un produit : individualisation, encapsulation, intégration (voir la figure 1.2). En dehors des entreprises industrielles qui disposent d'une grande expérience de fabrication de microsystèmes, les développeurs de microsystèmes ne réfléchissent souvent pas à la technique d'encapsulation : les procédés de fabrication en salle blanche ne se prêtent généralement pas   cela, excepté peut-être le cas du "chip-scale packaging" (CSP) [2] [3]. Etant donné qu'il est difficile pour une entreprise fabriquant des MEMS de maîtriser les méthodes d'encapsulation, il est plus intéressant de demander les services d'une entreprise spécialisée. Actuellement, il

est assez courant de sous-traiter l'assemblage et l'encapsulation d'un micro-système, et la tendance est de plus en plus de sous-traiter les opérations concernant la fabrication du micro-système en lui-même [4]. Cette pratique n'est pas si négative en soi, mais il faut que l'étude de l'encapsulation commence dès les premières étapes de la conception du micro-système, elle ne peut être dissociée de celle-ci. Lors des premières étapes de conception, il faut tenir compte des contraintes liées à l'encapsulation, et réciproquement.



**Fig. 1.2:** Du wafer au produit : exemple du Digital Light Processing (Texas Instruments) [5].

### 1.3 L'importance de l'encapsulation dans la conception d'un micro-système

D'énormes efforts sont fournis pour développer de nouvelles technologies, mais les efforts se concentrent surtout sur le coeur lui-même, la méthode d'encapsulation est souvent négligée. Les affichages OLED sont un excellent exemple de technologie prometteuse [6]. Ils peuvent être utilisés dans de nombreuses applications : écrans pour appareils portables, téléviseurs, ordinateurs. La luminosité et le rendu des couleurs en font un concurrent important pour les écrans à cristaux liquides (LCD, Liquid Cristal Display) qui nécessitent un rétro-éclairage, ou pour les écrans plasma.

Même si l'on parle de cette technologie depuis plusieurs années déjà [7] [8], elle tarde à s'imposer. Le principal problème est la sensibilité des OLED à l'eau, l'herméticité du scellement doit être parfaitement maîtrisée si l'on

veut garantir une durée de vie acceptable pour en faire un produit. Les polymères permettent la flexibilité de l'ensemble, mais leur perméabilité doit être diminuée pour améliorer la durée de vie de ces écrans [9] [10].

Le problème est que l'encapsulation n'est pas prise en compte dans la conception des produits. Celui qui développe un produit jusqu'au niveau du wafer a toujours la technologie de base à l'esprit, mais cela ne suffit pas aux industriels pour parvenir à concevoir des produits qui s'imposent sur le marché. Nous devons penser à l'ensemble des problèmes que les industriels ont à résoudre et développer des plate-formes technologiques complètes. Le packaging est spécifique à chaque microsystème (voir « MEMS law » ci-dessous) et il fait partie intégrante d'un produit. De plus, si on ne pense pas au packaging dans les premières phases d'un projet, le temps de développement total, de l'idée au produit, peut être rallongé de quelques années. Ou même le produit peut ne jamais arriver sur le marché.

On connaît les procédés qui permettent de réaliser des microsystèmes. Dans cette thèse, on propose une méthodologie qui permet de passer du micro-système au produit. On montre qu'il existe des méthodes qui permettent de réaliser des boîtiers hermétiques tout en conservant une basse température d'encapsulation.

Pour illustrer le fait que le packaging fait partie intégrante d'un produit, on peut donner l'exemple suivant. L'uniformisation des processus de fabrication dans le domaine des MEMS est encore lointaine, ce qui se traduit par la loi suivante :

The MEMS law: "One product, one process"

En français, il faut traduire ici "process" par procédure. C'est la suite des opérations qui est propre à chaque microsystème, alors que les procédés de fabrication sont relativement bien connus, même si ils doivent être adaptés à chaque produit. Ainsi, dans ce domaine, il est courant de repenser les étapes de fabrication pour chaque nouveau produit. Mais récemment, cette loi a encore été précisée par Martin Schmidt, du MIT :

The MEMS law: "One product, one process, one package"

Que l'on peut traduire ainsi : "Un produit, une procédure, une méthode d'encapsulation". Cela montre une certaine prise de conscience que l'encapsulation est une étape à part entière et qu'un microsystème ne peut devenir un produit sans cette étape d'encapsulation. Cela est d'autant plus vrai lorsque l'on sait que l'encapsulation peut représenter jusqu'à 50 % du coût

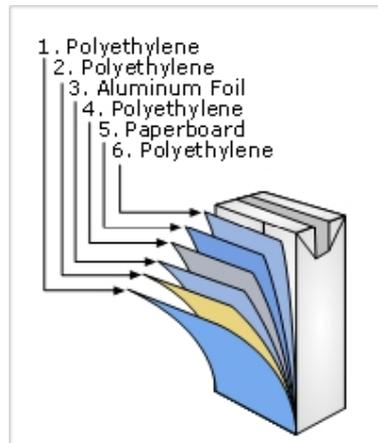
total d'un produit. La tendance est à la diminution du coût du boîtier par rapport au microsystème encapsulé, mais il existe des exceptions, comme par exemple les MEMS optiques, pour lesquels le coût du boîtier est supérieur au coût du microsystème [11]. Malheureusement, l'étape d'encapsulation est encore trop souvent négligée dans la conception des produits.

## 1.4 Fonctions de l'encapsulation

La notion d'encapsulation peut être définie en termes de fonctions. Il s'agit de trouver un ensemble de solutions qui permettent à la fois la protection et l'interconnexion d'un système avec son environnement. La protection est nécessaire contre les sollicitations externes que l'on ne veut pas transmettre au dispositif (mécaniques, électriques, chimiques, etc.). L'interconnexion est par contre nécessaire pour certaines sollicitations (dans le cas de capteurs ou d'actionneurs) qui doivent être transmises entre le monde extérieur et le microsystème [12]. D'une manière générale il faut toujours assurer en tout cas des interconnexions électriques, ce qui n'est pas trivial lorsque le boîtier doit être hermétique. Le besoin correspondant à ces fonctions est de garantir le fonctionnement d'un système en dehors de son environnement de fabrication.

Pour illustrer cette notion de fonctions remplies par le packaging, prenons un exemple du domaine alimentaire : la brique de lait, ou d'une manière générale, un emballage permettant de contenir une boisson (voir figure 1.3). La fonction principale est de contenir le liquide. D'autres fonctions secondaires sont : protéger contre les UV, protéger le liquide de l'oxydation, empêcher que les substances volatiles ne sortent du liquide. Dans ce cas, la solution est l'utilisation d'une feuille multicouche formée de carton, d'aluminium et de plastique. Une autre fonction est de pouvoir accéder au liquide "encapsulé" à un moment donné : on a besoin d'une interface avec l'extérieur. Dans le cas de la brique de lait, une solution est de déchirer un coin de l'emballage. Si l'ouverture doit être réversible, on utilise alors un bouchon muni d'un filetage garantissant l'étanchéité. A travers cet exemple tiré de la vie quotidienne, on retrouve les notions de protection vis-à-vis des sollicitations externes et d'interface avec l'extérieur.

Continuons avec notre exemple. Nous savons que la solution utilisée est une multicouche de carton - aluminium - plastique. Chacun de ces matériaux remplit des fonctions différentes : le plastique assure l'étanchéité : le liquide est contenu dans la brique, il ne mouille pas le carton, il ne se répand pas en dehors du conteneur. On pourrait penser que l'aluminium suffirait à assurer l'étanchéité, mais le plastique est nécessaire pour pouvoir sceller l'emballage et aussi pour éviter le contact direct du liquide avec l'aluminium.



**Fig. 1.3:** Aperçu des couches formant un emballage aseptique (Source : Tetra Pak).

L'aluminium sert principalement à protéger le contenu de l'environnement extérieur : il offre une barrière à la diffusion de l'oxygène, qui pourrait altérer le contenu. Nous voyons que dans ce cas, on veut limiter les transferts qui se font du système vers l'extérieur et inversement. Finalement, le carton remplit aussi plusieurs fonctions. La principale est sans doute de garantir la rigidité de l'ensemble pour éviter que la brique ne s'effondre sur elle-même. Il permet aussi de donner une forme régulière à l'emballage pour qu'il soit possible de les empiler. Il faut aussi pouvoir verser sans renverser en tenant le carton d'une seule main. Une autre fonction de la partie cartonnée est liée à l'aspect : c'est un support à diverses impressions qui permettent de mettre en valeur le produit, impressions protégées par une dernière couche plastifiée. Cet exemple, bien qu'étant particulier, montre aussi l'aspect esthétique du packaging.

On remarque aussi que l'on doit faire la distinction entre étanchéité (assurée dans notre exemple par le plastique) et l'herméticité (la feuille d'aluminium). Les solutions pour obtenir l'étanchéité ou l'herméticité sont différentes : une feuille d'aluminium de quelques microns d'épaisseur forme une barrière meilleure que plusieurs millimètres de plastique (voir figure 2.1).

Comme dans l'exemple ci-dessus, le plastique est souvent utilisé pour garantir l'étanchéité (sous forme de joints, de o-rings, etc.), mais une erreur fréquente est de vouloir garantir une herméticité en utilisant un joint collé (polymère). Le joint obtenu est étanche, mais pas hermétique. Les notions d'étanchéité et d'herméticité ainsi que leurs méthodes de mesure sont définies au paragraphe 2.1.1.

## 1.5 Domaine choisi pour la thèse

Les besoins en termes d'encapsulation varient énormément d'une application à l'autre en fonctions de critères principalement physiques ou financiers. Comme présenté précédemment, les sollicitations et l'interconnexion sont différentes d'un système à l'autre. Dans le cadre de cette thèse, on s'intéresse aux moyens d'encapsulation de microsystèmes répondant à un ou plusieurs des critères suivants :

- Produit sensible à la température
- Produit sensible à l'humidité
- Produit nécessitant une herméticité "vraie"

Les applications concernées sont sensibles à la température, à l'humidité, ou nécessitent une atmosphère contrôlée : certains MEMS, par exemple les matrices de micro-miroirs, présentent des déformations irréversibles lorsqu'ils sont soumis à des températures même relativement peu élevées (de l'ordre de 150 °C) et de courtes durées (passage dans un four, par exemple). De même, les microsystèmes électrostatiques peuvent être sensibles au claquage, il est alors nécessaire de contrôler l'atmosphère d'encapsulation. Les éléments biologiques nécessitent le contrôle de tous les paramètres simultanément (température, humidité et atmosphère) : si ces paramètres sortent d'un domaine très limité, le système est détruit [13]. On peut encore citer la sensibilité de l'électronique ou des MEMS à l'humidité [14], ainsi que la dé-polarisation d'éléments piezoélectriques s'ils sont soumis à des températures trop élevées [15].

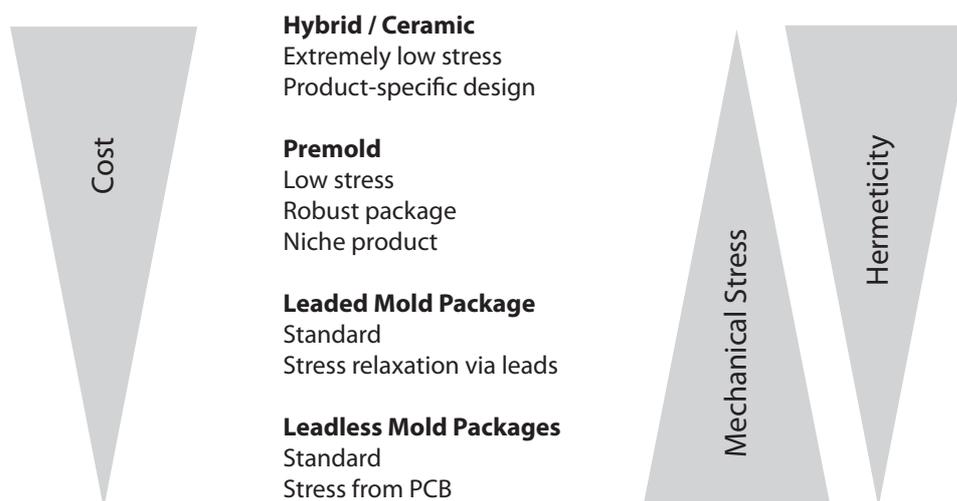
On s'intéresse aux produits à forte valeur ajoutée, typiquement :

- Prototypes ou démonstrateurs fonctionnels (série pilote)
- Petites à moyennes séries
- Applications spatiales
- Applications médicales
- Recherche scientifique

La série pilote sert principalement à l'établissement du chaînon manquant entre la recherche en MEMS et les produits. Ce point est particulièrement important pour deux raisons : d'une part, la recherche d'une méthode d'encapsulation permettant l'utilisation courante d'une technologie est souvent négligée. D'autre part, il s'agit souvent de faire le lien entre le monde microscopique du MEMS et le monde macroscopique dans lequel il sera utilisé. Ce point est également souvent mal identifié.

La taille des séries envisagée nécessite une grande flexibilité dans la solution proposée. On se focalise sur des techniques "légères", c'est-à-dire présentant

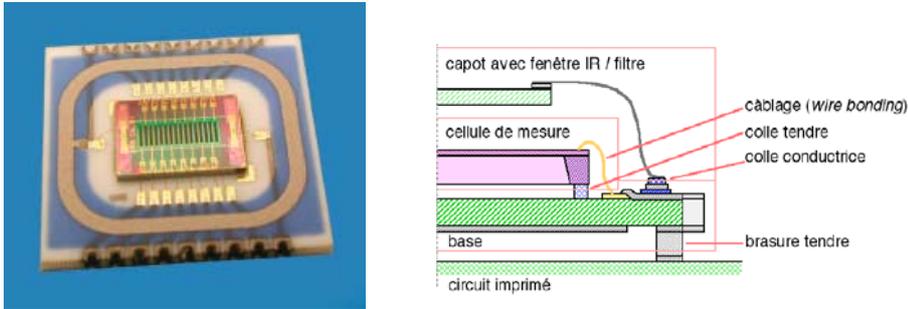
des frais d'équipements réduits ou utilisant des équipements génériques permettant une grande souplesse d'utilisation. Nous verrons que les techniques proposées ont une plage de validité relativement large en ce qui concerne la taille des séries.



**Fig. 1.4:** Variantes de packaging. Source : Bosch

Le cas qui nous intéresse et qui est traité dans le cadre de cette thèse se situe au niveau de l'hybride/céramique (Voir Figure 1.4). L'avantage est qu'il implique peu de contraintes sur le composant encapsulé et qu'il garantit une meilleure herméticité par rapport aux boîtiers plastiques. Par contre, le coût est plus élevé qu'une solution surmoulée. Mais la solution du surmoulage n'est pas intéressante ou tout simplement pas applicable lorsqu'il s'agit de petites séries. On s'intéresse à ce cas, car il permet aussi l'herméticité, et il est facilement adaptable à des produits dont le développement est déjà avancé. L'encapsulation pour les applications spatiales est souvent de type hybride (voir par exemple [16]). Ce domaine correspond aussi à des petites séries à forte valeur ajoutée.

Le capteur infrarouge pyroélectrique pour spectromètre fabriqué par IR Microsystems (voir figure 1.5) est un excellent exemple. Il s'agit d'une structure en silicium sur laquelle est déposée une couche mince de titano-zirconate de plomb (PZT), utilisée comme surface pyroélectrique. Ce spectromètre permet de détecter le CO<sub>2</sub> et le CO [17]. Une caractéristique de ce capteur est son impédance élevée, ce qui implique qu'il est nécessaire d'encapsuler au moins le capteur, et si possible aussi le premier niveau d'amplification pour éviter le bruit.



**Fig. 1.5:** Capteur infrarouge pyroélectrique pour spectromètre. Source: IR Microsystems.

La solution consiste en une base en céramique sur laquelle le capteur en silicium est collé et bondé. Cette base permet la protection mécanique et l'interconnexion électrique du capteur. L'interface optique est réalisée grâce à une vitre dans le capot.

## 1.6 Approche choisie

On prouve dans cette thèse que l'on peut obtenir des boîtiers hermétiques à long terme, en utilisant des techniques faciles à mettre en oeuvre, permettant des fabrications de petites séries, tout en minimisant l'impact thermique de l'opération de fermeture. Pour cela, plusieurs outils sont utilisés. Tout d'abord, l'analyse fonctionnelle qui permet de formaliser les fonctions que la solution devra remplir. L'idée est ensuite d'utiliser des matériaux présentant une perméabilité faible (métaux, céramiques, verres), et de trouver un moyen de les assembler hermétiquement à basse température. Des modèles sont développés afin de déterminer le comportement thermique des boîtiers lors de la phase de fermeture. Les solutions proposées sont vérifiées expérimentalement grâce à des démonstrateurs, que ce soit en termes de faisabilité technique, de viabilité économique ou en termes d'herméticité.

## 1.7 Structure de la thèse

Le chapitre 2 présente les aspects théoriques liés à la réalisation d'une encapsulation hermétique : notion d'herméticité, moyens de mesure de l'herméticité, perméabilité des matériaux. Les méthodes d'assemblage ou de fermeture de boîtiers actuelles sont aussi décrites. Dans le chapitre 3, on présente l'hypothèse : il est possible de fermer des boîtiers hermétiquement tout en

gardant une basse température de fermeture. On présente alors les méthodes et les modèles qui permettent de réaliser de telles fonctions. Le chapitre 4 présente les démonstrateurs réalisés dans le cadre de cette thèse. Finalement l'apport de cette thèse est évalué dans le chapitre 5. Cette thèse comporte également des annexes et des références, ainsi qu'un CV et une liste de publications de l'auteur.

## Chapitre 2

# Quelques aspects fondamentaux sur la fermeture de boîtiers

Dans ce chapitre, on traite de manière théorique les différents aspects nécessaires pour réaliser une encapsulation hermétique à basse température. Dans un premier temps, on s'intéresse à la définition et à la mesure de l'herméticité. On compare aussi la perméabilité des matériaux (plastiques, métaux, céramiques). On décrit aussi différents types de boîtiers hermétiques existants ainsi que les méthodes permettant d'obtenir un scellement hermétique.

### 2.1 Définition et mesure de l'herméticité

Dans cette partie, on s'intéresse à la notion d'herméticité, ainsi qu'à ses différentes méthodes de mesure. Nous donnons plusieurs exemples dans lesquels l'herméticité joue des rôles différents, et doit être abordée de différentes manières.

#### 2.1.1 Définition de l'herméticité

On donne souvent un taux de "fuite" comme mesure d'herméticité. Il faut noter que pour les cas qui nous intéressent, il ne s'agit pas d'une fuite au sens strict : la fuite se réfère à la notion d'écoulement, ce qui n'est pas le cas dans la plupart des situations traitées, où le transport se fait par diffusion. Nous verrons que dans certains cas, d'autres critères que le taux de fuite peuvent

être utilisés. L'unité de mesure d'une fuite est le  $\text{mbar} \cdot \text{l/s}$ . Un taux de fuite de  $1 \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$  correspond à un transfert de gaz ayant entraîné une différence de pression de 1 mbar dans un volume de 1 litre en 1 seconde. Cela peut aussi s'exprimer comme un transfert de  $1 \text{ cm}^3$  de gaz à pression atmosphérique en 1 seconde.

A titre d'exemple, un système qui présente un taux de fuite inférieur à  $10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$  peut être considéré comme étanche à la vapeur d'eau. A partir d'un taux de fuite de  $10^{-7} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$ , on peut parler d'herméticité aux gaz. Mais la limite entre étanchéité et herméticité est difficile à définir. On peut toutefois associer l'étanchéité à l'absence d'écoulement d'un liquide ou d'un gaz. L'herméticité se définit plutôt comme la résistance à la diffusion, pour autant que l'étanchéité soit réalisée. Séparons le transport d'un fluide en différents modes :

- écoulements visqueux (régimes laminaires et turbulents)
- régime moléculaire
- régimes intermédiaires

Considérons le libre parcours moyen  $\lambda$ , à savoir la distance moyenne que peut parcourir une molécule avant d'en rencontrer une autre. On a alors, pour un trou de diamètre  $\phi$  :

$$\begin{aligned} 100\lambda < \phi & \text{ régime visqueux} \\ \lambda < \phi < 100\lambda & \text{ régime intermédiaire} \\ \phi < \lambda & \text{ régime moléculaire} \end{aligned}$$

On constate que l'on a deux modes de transport principaux en fonction des libres parcours moyens et des diamètres de passage. Ce sont deux phénomènes différents qui permettent d'établir une limite entre étanchéité et herméticité. Cette limite sera différente en fonction des éléments entrant en jeu. Si le taux de fuite est souvent donné comme mesure d'herméticité, il faut parfois utiliser d'autres critères, notamment lorsqu'il s'agit de mesurer l'herméticité. Souvent on fixe un objectif d'herméticité en tant que durée de vie d'un système encapsulé. Pour certains systèmes, et notamment lorsque le volume du boîtier devient très faible, on doit obtenir des taux de fuite de l'ordre de  $10^{-16} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$ . Dans ces cas, il est alors plus judicieux de parler en termes de durée de vie.

Prenons l'exemple d'un capteur de pression absolu composé d'une cavité de référence scellée hermétiquement. Les spécifications de ce capteur garantissent une dérive inférieure à 1% sur sa durée de vie, c'est-à-dire environ 10 ans. La cavité de référence est d'un volume de l'ordre du millimètre cube. Cela correspond à un taux de fuite de  $10^{-13} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$ .

## 2.1.2 Herméticité des matériaux

Pour caractériser la diffusion à travers un matériau, on utilise plutôt la perméabilité que l'herméticité. L'unité couramment utilisée est le  $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{Pa})$ . Mais  $\text{mol}/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{Pa})$  serait plus adapté. En partant de la mole, connaissant la masse moléculaire on peut retrouver la masse, et avec la loi des gaz parfaits, on peut retrouver un volume standard.

Il faut noter qu'il faut considérer plusieurs cas, en fonction du perméant ainsi que du matériau considéré. C'est souvent le cas pour les matières plastiques (polymères), dont la perméabilité aux arômes et aux vapeurs organiques est mesurée dans [18]. La diffusion des fluides à travers les polymères suit un régime de transport moléculaire. D'une manière générale, les polymères sont plus perméables que les métaux et les céramiques (au minimum trois ordres de grandeur). Il est par contre difficile de trouver les valeurs de perméabilité de différents matériaux, car elles sont fonction du perméant, mais aussi de la solubilité du perméant dans le matériau. La figure 2.1 donne un excellent aperçu des ordres de grandeurs de l'herméticité de différents matériaux.

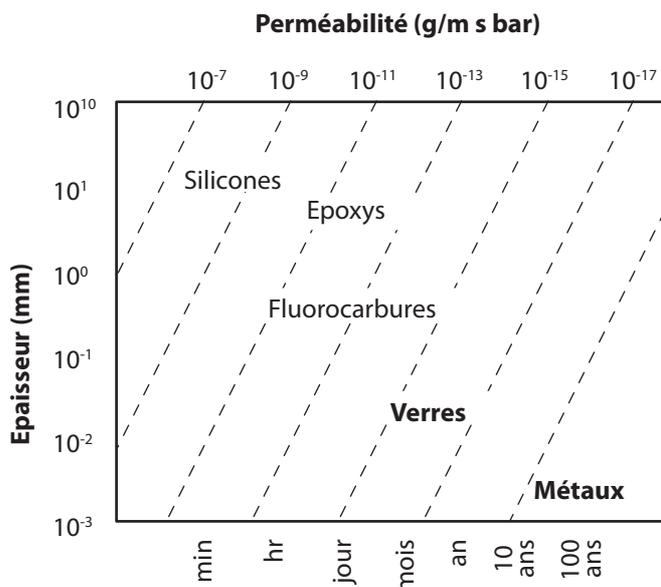


Fig. 2.1: Herméticité de différents matériaux. Figure adaptée de [19]

On constate que les métaux et les verres ont une herméticité supérieure aux plastiques. L'échelle inférieure de la figure 2.1 est particulièrement parlante : en fonction de l'épaisseur et du matériau choisi, on peut déterminer un temps de diffusion. Pour des applications nécessitant une herméticité sur le long terme (de l'ordre de 1 an ou plus), on est obligé d'utiliser soit des verres, soit des métaux. C'est ce qui a été choisi comme approche dans le cadre de

cette thèse.

Le tableau 2.1 donne un aperçu des perméabilités de différents matériaux pour l'azote et l'oxygène à température ambiante. Les valeurs de perméabilités pour les métaux sont difficiles à mesurer car trop faibles et ne se trouvent pas dans la littérature.

Matériau	Perméant	Perméabilité en $\text{g/m} \cdot \text{s} \cdot \text{bar}$
Caoutchouc	O <sub>2</sub>	$1.4 \cdot 10^{-9}$
Caoutchouc	N <sub>2</sub>	$3.0 \cdot 10^{-10}$
PET	O <sub>2</sub>	$7.2 \cdot 10^{-11}$
PET	N <sub>2</sub>	$4.4 \cdot 10^{-12}$
HDPE	O <sub>2</sub>	$1.1 \cdot 10^{-9}$
HDPE	N <sub>2</sub>	$2.8 \cdot 10^{-10}$
LDPE	O <sub>2</sub>	$3.2 \cdot 10^{-9}$
LDPE	N <sub>2</sub>	$6.4 \cdot 10^{-10}$

**Tab. 2.1:** Valeurs de perméabilités à l'oxygène et à l'azote. Source: [www.composite-agency.com](http://www.composite-agency.com). On notera que les valeurs pour les métaux ne sont pas indiquées, elles sont difficilement mesurables.

On donne encore des valeurs typiques pour l'hydrogène à 1 bar pour différents matériaux dans le tableau 2.2.

Matériau	Perméant	Perméabilité en $\text{g/m} \cdot \text{s} \cdot \text{bar}$
Résine époxy	H <sub>2</sub>	$9 \cdot 10^{-11}$
Caoutchouc	H <sub>2</sub>	$4.7 \cdot 10^{-10}$
PET	H <sub>2</sub>	$5.7 \cdot 10^{-11}$
HDPE	H <sub>2</sub>	$1.7 \cdot 10^{-10}$
LDPE	H <sub>2</sub>	$6.8 \cdot 10^{-10}$
PVC	H <sub>2</sub>	$1.2 \cdot 10^{-10}$
99 Al	H <sub>2</sub>	$2 \cdot 10^{-17}$
99 Fe	H <sub>2</sub>	$9 \cdot 10^{-8}$
Acier Inox	H <sub>2</sub>	$9 \cdot 10^{-9}$

**Tab. 2.2:** Valeurs de perméabilités à l'hydrogène. Source: [www.composite-agency.com](http://www.composite-agency.com)

Il faut noter toutefois que le cas de l'hydrogène est particulier : certains métaux peuvent absorber l'hydrogène sous sa forme atomique, alors que dans les polymères, l'hydrogène se trouve sous sa forme moléculaire. Ceci peut expliquer pourquoi on obtient des valeurs de perméabilité plus grandes dans le

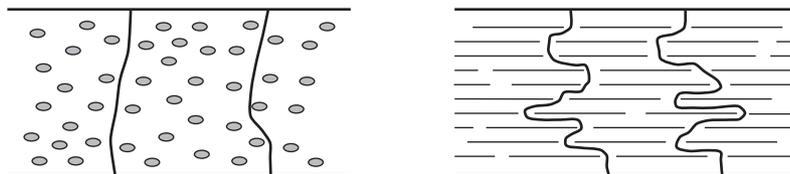
cas des métaux que dans les cas des polymères. Mais d'une manière générale, les métaux et les céramiques sont moins perméables que les plastiques. On peut toutefois essayer d'améliorer l'herméticité des plastiques, en utilisant différents moyens :

- la métallisation des plastiques [20]
- les composites nanoargiles [21]
- les couches minces  $\text{SiO}_x$  [22] [23]

Ces différentes méthodes sont brièvement discutées dans les paragraphes suivants.

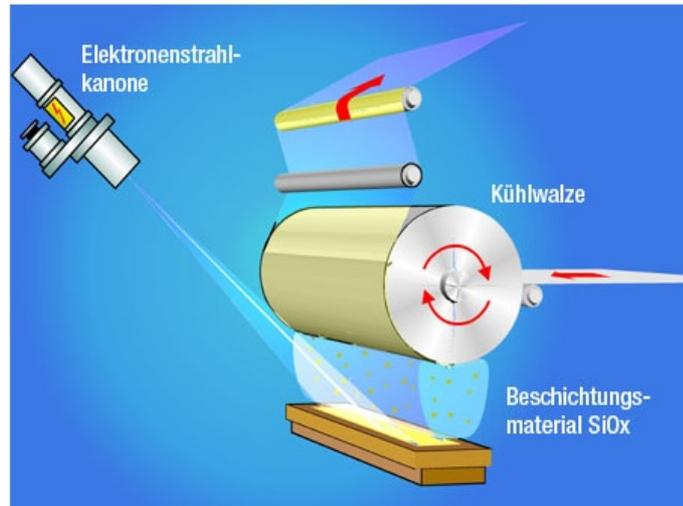
**Métallisation des plastiques.** On peut déposer une couche de métal sur une grande variété de plastiques (ABS, PC, PP, PS, PVS, PE, PES, PVDF, PE, PI, PTFE). On peut métalliser un plastique par galvanisation (chimique ou électrochimique) ou par dépôt physique en phase vapeur (Physical Vapor Deposition, ou PVD). On peut obtenir des couches jusqu'à  $25 \mu\text{m}$ . On voit que cette couche métallique permet théoriquement une bien meilleure herméticité. Mais le principal désavantage est que la métallisation ne rend pas le plastique intrinsèquement hermétique, le procédé n'intervient que sur la surface. Il est donc difficile à mettre en oeuvre pour garantir l'herméticité d'un système entier.

**Nanoargiles.** Les nanocomposites sont des mélanges quasi-moléculaires de polymères thermodurcissables ou thermoplastiques et de nanoparticules. On utilise les nanoparticules pour modifier plusieurs propriétés physico-chimiques (résistance mécanique, stabilité thermique, accroissement de la température de transition vitreuse, résistance au feu, etc.). Plusieurs types de minéraux se prêtent à la production de nanoparticules : les octasilicates, le fluorure de mica, la montmorillonite, etc. La montmorillonite a un coût peu élevé et de faibles taux de charge sont nécessaires pour obtenir les effets désirés. En utilisant des nanoparticules en feuillets, on peut obtenir une diminution de la perméabilité d'un polymère : les nanoparticules réduisent la porosité et créent un "chemin tortueux" en raison de la structure plate (voir figure 2.2).



**Fig. 2.2:** Augmentation du chemin de diffusion par des nanoparticules en feuillets.

**Couches minces  $\text{SiO}_x$ .** Comme pour la métallisation des plastiques, on dépose une couche d'un matériau sur le plastique. C'est un procédé utilisé pour les films alimentaires. Dans ce cas, il s'agit d'oxyde de silicium évaporé par un procédé utilisant un faisceau d'électrons à haute puissance. L'épaisseur obtenue est de quelques nanomètres, assurant la recyclabilité de la feuille de plastique.



**Fig. 2.3:** Procédé de dépôt de couche mince  $\text{SiO}_x$ . Source: [www.ceramis.com](http://www.ceramis.com)

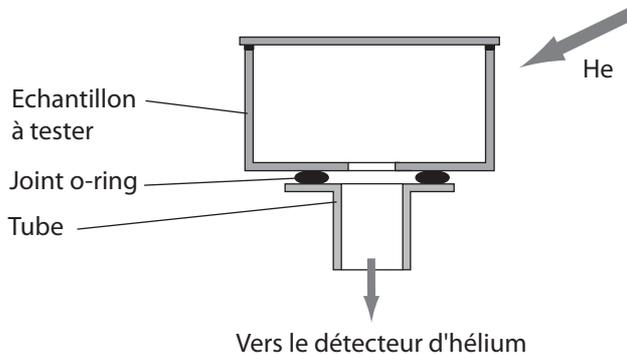
Le principal désavantage est que la couche de  $\text{SiO}_x$  se fissure, on n'obtient ainsi pas l'herméticité, mais on réduit quand même la perméabilité. Sur ce point, la métallisation des plastiques est meilleure, puisque l'on obtient une couche plus ductile, évitant ainsi les fissures. Par contre, le  $\text{SiO}_x$  a l'avantage de ne presque pas altérer l'aspect du plastique, contrairement à la métallisation. Avec une telle méthode, on peut diminuer la perméabilité d'un ou deux ordres de grandeur [24]. Ceci est suffisant pour les affichages à cristaux liquides ou pour l'emballage de nourriture, mais pour les cas des affichages OLED, par exemple, il faut gagner un facteur  $10^5$  à  $10^6$  pour éliminer l'oxygène et l'eau qui pourraient dégrader à la fois le polymère émettant la lumière et les cathodes en Ca ou Ba, sensibles à l'eau. Une solution pour contrer les défauts locaux de la couche déposée est de déposer plusieurs couches successives, on peut ainsi approcher les performances nécessaires pour les OLED, mais il semblerait que la superposition de couches augmente surtout le délai de transmission, alors que la perméabilité en état stationnaire n'est pas modifiée [25].

### 2.1.3 Méthodes de mesure de l'herméticité

Il existe plusieurs méthodes permettant de mesurer des taux de fuite ou l'herméticité d'un boîtier. Nous donnons ici leurs principaux avantages et inconvénients.

**Détection de fuite à hélium.** Cette méthode est basée sur la détection de l'hélium passant à travers le scellement ou les parois d'un boîtier. C'est une méthode couramment utilisée, mais elle nécessite un équipement dédié. Le principal avantage est que la molécule d'hélium est petite, on peut ainsi détecter de très petites fuites, de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-12}$  mbar · l/s. Le taux de fuite détectable est lié à la limite de détection du spectromètre de masse. Cette méthode est ainsi plus utilisée pour une mesure d'herméticité que pour une détection de fuite : on peut détecter, mais pas mesurer des fuites supérieures à  $10^{-8}$  mbar · l/s. L'effet de la désorption de la surface du boîtier est négligeable [26].

Pratiquement, on trouve plusieurs variantes de cette méthode. On peut par exemple utiliser un boîtier scellé, soumis pendant un temps donné à une atmosphère d'hélium à une pression supérieure à celle se trouvant dans le boîtier. Le boîtier est ensuite transféré dans une chambre à vide. On mesure alors l'hélium sortant du boîtier. Dans ce cas, les temps d'exposition à l'atmosphère d'hélium ainsi que les temps de transfert du boîtier d'une enceinte à l'autre jouent un rôle non négligeable sur la mesure.

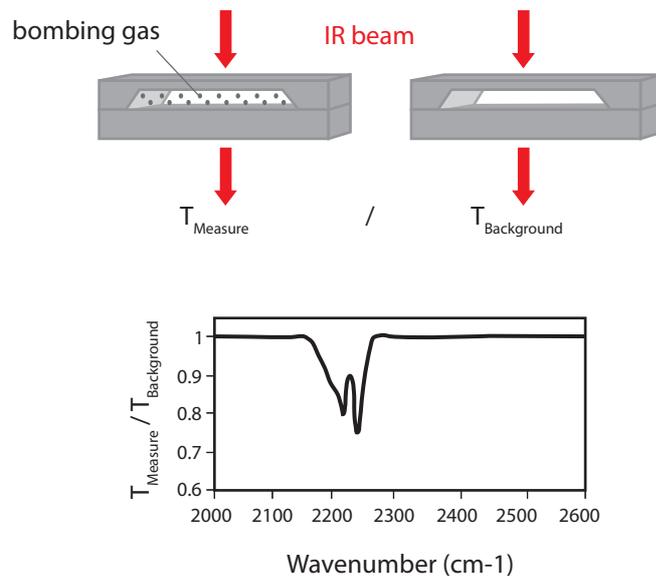


**Fig. 2.4:** Détection à l'hélium

Une autre méthode consiste à utiliser des échantillons présentant un trou (de l'ordre du millimètre de diamètre). L'échantillon est placé directement sur le détecteur, l'étanchéité est assurée par un joint o-ring (Voir figure 2.4). L'ensemble est ensuite exposé à l'hélium. Si le boîtier est hermétique, il devrait alors protéger le détecteur. On compare alors le signal avec celui obtenu en plaçant une pièce pleine (pas un boîtier) sur le détecteur. L'avantage de cette

dernière variante est qu'elle ne dépend pas du volume du boîtier, et qu'elle couvre à la fois les fuites grossières et fines. Par contre, le facteur limitant est l'herméticité du joint o-ring qui est bien inférieure à l'herméticité qu'il est possible d'obtenir par un joint métallique. Finalement, elle ne permet que de caractériser une méthode de fermeture, mais pas un boîtier en lui-même, du fait que l'échantillon est non-hermétique.

**Spectroscopie FTIR.** Cette méthode est basée sur l'absorption infrarouge du gaz se trouvant dans le boîtier à tester [27]. L'idée est de mesurer la concentration par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (Fourier-Transform Infrared Spectroscopy ou FTIR). Si les matériaux du boîtier sont transparents aux infrarouges, il est possible d'analyser le gaz se trouvant dans la cavité par une spectroscopie FTIR. En mesurant la concentration de gaz dans la cavité, on peut déduire la variation de pression interne et ainsi calculer un taux de fuite. Dans ce cas aussi, un équipement dédié est nécessaire. Le boîtier doit être transparent aux infrarouges, et le gaz dans le boîtier doit être contrôlé. La géométrie du boîtier peut aussi créer des interférences.



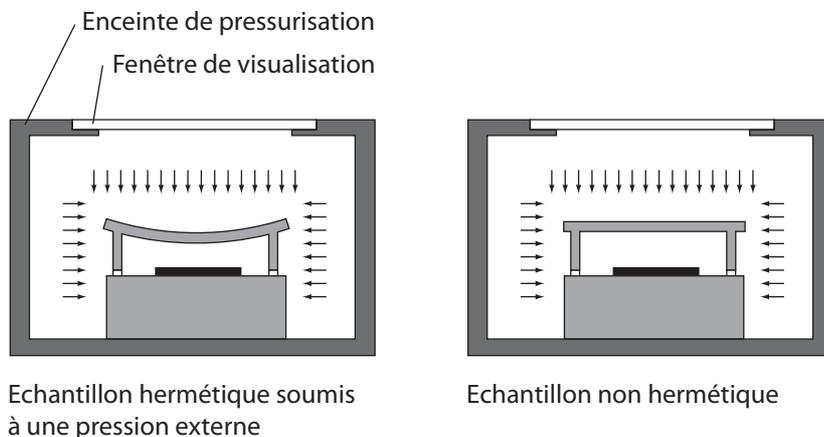
**Fig. 2.5:** Principe de la mesure d'herméticité par spectroscopie FTIR, tiré de [27].

**Facteur de qualité mécanique.** Cette méthode est basée sur la mesure du facteur de qualité d'un résonateur se trouvant dans le boîtier hermétique [28]. Le facteur de qualité d'un MEMS fabriqué correctement est très haut

dans le vide, et se dégrade lorsque la pression augmente. Cette méthode est très sensible, mais n'est applicable qu'à des systèmes encapsulés sous vide. L'avantage est qu'elle est applicable à presque tous les MEMS présentant une structure libre.

**Mesure par résistance d'une couche de calcium.** Cette méthode se base sur la dégradation d'une couche de calcium par réaction avec l'oxygène et l'eau. Cette dégradation se traduit par une augmentation de la résistance électrique. On peut aussi mesurer cette dégradation par une mesure optique. Le désavantage principal est le fait que le calcium est réactif à température ambiante. Il faut alors soit préparer la couche sous atmosphère contrôlée, ou alors la passiver en la recouvrant d'une couche d'étain [29]. L'activation se fait alors par chauffage.

**Mesure par interférométrie optique.** Pour des boîtiers de très petits volumes, la méthode par détection d'hélium ne suffit pas. Plus le volume est petit, plus il est sensible aux fuites ainsi qu'à la désorption à partir des parois. Une méthode développée par Goswami [26] se base sur la déformation du boîtier lorsqu'il est soumis à une haute pression (voir figure 2.6). L'échantillon est placé dans une chambre dans laquelle il est soumis à une



**Fig. 2.6:** Interférométrie optique

haute pression. Dans le cas d'un échantillon non hermétique, la différence de pression change avec le temps, de manière proportionnelle au flux de fuite. Puisque la déformation du boîtier est proportionnelle au différentiel de pression, on peut déterminer le flux de fuite. La déformation du boîtier est mesurée par interférométrie optique. Cette méthode permet de mesurer des taux de fuite de l'ordre de  $2 \cdot 10^{-12}$  mbar  $\cdot$  1/s.

**Mesure par oxydation d'une couche mince de cuivre.** Cette méthode proposée par Gueissaz [30] est basée sur l'oxydation d'une couche mince de cuivre. Le cuivre s'oxyde pour former du  $\text{Cu}_2\text{O}$  à des températures inférieures à  $200^\circ\text{C}$ . L'oxyde de cuivre est relativement transparent à la lumière proche infrarouge, alors que le cuivre métallique est opaque pour des épaisseurs supérieures à 20 nm. Cette méthode nécessite donc une mesure optique et permet de détecter une large plage de fuites. Des tests ont montré la possibilité de mesurer des fuites de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-16}$  mbar  $\cdot$  l/s. Comme il s'agit d'une mesure optique, il faut que le boîtier soit transparent à la longueur d'onde utilisée. Par contre, on peut envisager d'utiliser cette méthode sur chaque pièce produite, et ainsi réaliser un test de qualité sur chacune. Dans le cas de boîtiers non transparents à la lumière, la mesure peut se faire de manière électrique, mais cela nécessite alors de contacter électriquement la plage à mesurer.

**Considérations sur la mesure de l'herméticité.** Les différentes méthodes décrites ci-dessus permettent généralement de mesurer un taux de fuite exprimé en mbar  $\cdot$  l/s. Souvent, il est nécessaire d'assurer l'herméticité même si les différences de pression sont faibles. Les échanges se font alors davantage par voie chimique, par des diffusions. Il peut alors être plus intéressant de déterminer l'herméticité d'un boîtier par une mesure fonctionnelle : on peut aussi exprimer l'herméticité d'un boîtier par la durée de vie du système encapsulé lorsque cela est possible. La limite vient du fait que mesurer une durée de vie de l'ordre de 10 ans est difficile, il faut alors utiliser des tests de vieillissement accéléré. Un exemple de mesure fonctionnelle est la mesure par le facteur de qualité. Dans ce cas, c'est le système encapsulé lui-même qui permet de mesurer l'herméticité du boîtier. A défaut de pouvoir corriger la non-herméticité, on peut déterminer que la pièce est défectueuse, cela pendant son utilisation.

Si le composant encapsulé ne peut pas mesurer l'atmosphère d'encapsulation, il est utile de rajouter un élément permettant la mesure de l'atmosphère dans le boîtier. On peut par exemple mesurer l'oxydation d'un conducteur métallique se trouvant dans le boîtier [31]. Une méthode qui en découle et basée sur l'oxydation d'une couche épaisse est proposée dans [32]. Le principe est d'utiliser une microplaque chauffante recouverte d'un métal réactif à l'oxygène [33] [34]. La réaction avec l'oxygène est activée par chauffage, et la mesure de l'augmentation de la résistance électrique permet de mesurer la réaction. En utilisant différents matériaux réactifs (métaux, céramiques, polymères), on peut contrôler différents gaz tels que l'azote ou la vapeur. Cela peut être particulièrement intéressant si le boîtier n'est pas suffisamment hermétique pour assurer la durée de vie du système demandée. Un élément "getter" (ou piège à gaz) [35] permet de compenser la faible herméticité du

boîtier et surtout la désorption à partir des parois.

## 2.2 Méthodes de fermeture de boîtiers

Dans cette partie, nous donnons une liste des différentes méthodes d'encapsulation de microsystèmes. Dans un premier temps, nous donnons un aperçu relativement large des méthodes utilisées, même si elles ne remplissent pas les mêmes fonctions que le sujet de ce travail. Ensuite, nous détaillons des méthodes de chauffage pour obtenir une brasure.

### 2.2.1 Surmoulage plastique

C'est une méthode couramment utilisée pour encapsuler des circuits intégrés. La protection est moulée par dessus le composant, qui est alors soumis à la température et à la pression d'injection du plastique. Il existe plusieurs versions (avec pattes, avec billes pour bonding). Dans le cas des versions à pattes, les contraintes sont reprises en partie par les pattes, alors que pour les versions sans pattes, les contraintes venant du PCB sont transmises. Les boîtiers obtenus ne sont pas hermétiques.

### 2.2.2 Soudure anodique (Anodic Bonding)

C'est une méthode standard qui consiste à plaquer deux substrats l'un à l'autre à température élevée (environ 400 °C) entre deux électrodes [36] [37]. On applique une grande tension continue (jusqu'à 1 kV) entre les électrodes, ce qui crée un champ électrique qui pénètre dans les substrats. Un des substrats est un verre contenant des ions de sodium qui migrent de la surface sous l'effet du champ électrique. La liaison se fait par oxydation du silicium (polarisé +), qui crée des liaisons chimiques avec le verre. Le principal désavantage est la haute température nécessaire, même si dans certains cas des températures inférieures (environ 180 °C) sont possibles [38]. De même, le procédé est sensible à la planéité et à la rugosité des surfaces à assembler [39]. C'est donc un procédé couramment utilisé pour réaliser une encapsulation de grandes séries au niveau du wafer, mais les contraintes de température et de planéité ne la rendent pas toujours applicable.

### 2.2.3 Boîtiers discrets de type "TO"

Les boîtiers discrets métalliques sont formés de deux parties : une base sur laquelle le chip est collé et bondé ainsi qu'un capot. Le capot est soudé sur la base, soit par décharge, soit par induction. Ces deux méthodes peuvent être parfaitement contrôlées : lors de la soudure par décharge, on mesure l'allure du courant pour en déduire la qualité de la soudure. Avec la soudure par induction, on peut chauffer localement le pourtour du boîtier sans chauffer le centre en jouant sur la fréquence du courant : à fréquence élevée, les courants induits se concentrent sur la surface de la pièce. A basse fréquence, les courants induits sont mieux répartis vers le centre.

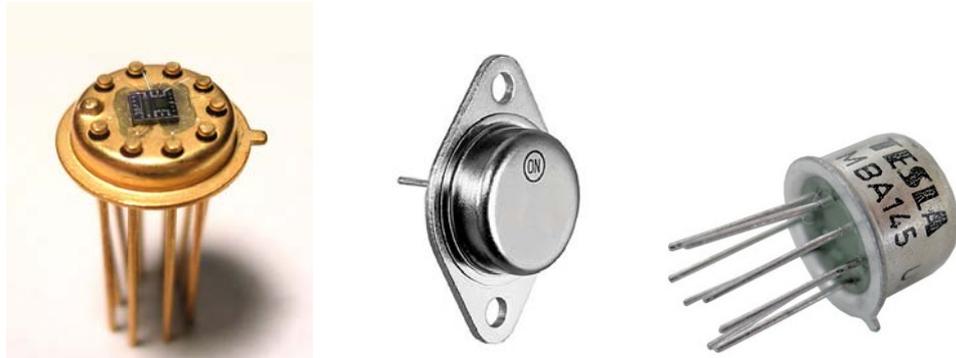


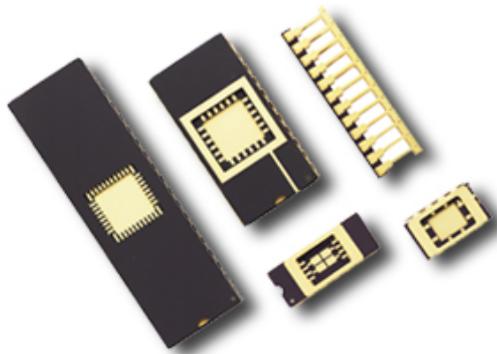
Fig. 2.7: Boîtiers discrets de type TO.

L'interconnexion électrique se fait par des pattes scellées par verre dans la base. Ce type de boîtier permet de dissocier la haute température nécessaire au scellement des pattes et la basse température de fermeture nécessaire lorsque le système à encapsuler se trouve dans le boîtier. Ces boîtiers sont relativement limités par leur forme et leur nombre de connexions. La technique de soudure par induction peut paraître intéressante en termes de focalisation de l'échauffement. Elle n'est malheureusement pas applicable aux boîtiers développés dans le cadre de cette thèse : les métallisations, même déposées par couche épaisse, sont de masse trop faible pour obtenir un échauffement suffisant par induction.

### 2.2.4 Boîtiers céramiques standard

Il existe des boîtiers standard en céramique permettant l'encapsulation d'un système (figure 2.8). Ces boîtiers peuvent être obtenus dans différentes tailles et différents nombres de connexions électriques. Le principal désavantage de cette solution est qu'elle n'est pas adaptée à de petites et moyennes séries à cause des quantités minimales de commande: lorsque les besoins ne

permettent pas l'utilisation de boîtiers simples, le boîtier doit être produit sur mesure. Ces boîtiers sont fermés par un couvercle brasé sur la base. Cette solution technique est particulièrement adaptée pour obtenir un boîtier hermétique.



**Fig. 2.8:** Boîtiers céramiques standard.

Une variante aux boîtiers céramiques standard est la solution proposée par EPCOS: le "Chip Sized SAW Package" ou CSSP, présenté dans [40]. L'objectif est de réduire la taille d'un boîtier hermétique pour des filtres à ondes acoustiques de surface (Surface Acoustic Wave filters). Le microsystème est connecté par billes sur un substrat en céramique assurant la connexion électrique. Le dos du boîtier est recouvert d'une feuille de plastique laminée, qui est ensuite métallisée électrochimiquement pour assurer l'herméticité. C'est une méthode très performante mais assez lourde technologiquement, elle est ainsi réservée à de grandes séries.

Pour les boîtiers céramiques standard, la question de l'impact thermique lors de la brasure doit être discutée. C'est pourquoi nous donnons ci-dessous plusieurs méthodes de chauffage permettant d'obtenir un joint métallique.

### 2.2.5 Brasure au four

C'est une méthode relativement simple. L'ensemble du boîtier est soumis à une température permettant la fusion du joint de brasure. L'avantage est la possibilité de pouvoir brasurer une grande quantité de pièces simultanément. La température est homogène, on évite ainsi de trop grandes contraintes thermiques dans le boîtier. Il faut par contre noter que l'ensemble du boîtier est soumis à la température de fusion du joint, ce qui élimine cette méthode dans le cas de l'encapsulation de composants sensibles à la température. La seule possibilité pour réduire l'impact thermique est d'utiliser des brasures "basse température", par exemple l'eutectique Sn:Bi, qui fond

à 138°C, mais même dans ce cas, le composant sera soumis à une température d'environ 150°C. Finalement, une brasure telle que Sn:Bi résistera moins bien au fluage et à la fatigue. Il faut alors utiliser des méthodes de chauffage localisées.

### 2.2.6 Soudure à la molette

Il s'agit d'une méthode de soudage par résistance, utilisée principalement pour assembler des tôles. Les deux pièces à assembler se recouvrent, le chevauchement étant environ égal à 1,5 à 2 fois l'épaisseur de la tôle la plus fine. Les pièces sont guidées entre deux molettes et sont chauffées par le passage du courant d'une électrode à l'autre. Contrairement à la thermosoudure, la zone de recouvrement est portée à fusion. La pression mécanique des molettes induit aussi un écrasement de la zone de contact, la contrainte mécanique est donc le principal désavantage de cette méthode. Pour obtenir un joint hermétique, il faut que les points de soudure soient superposés (voir figure 2.9).

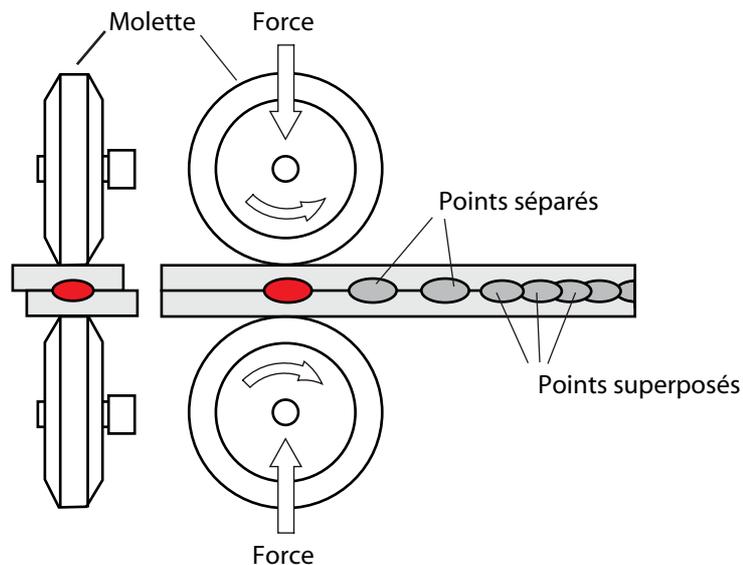
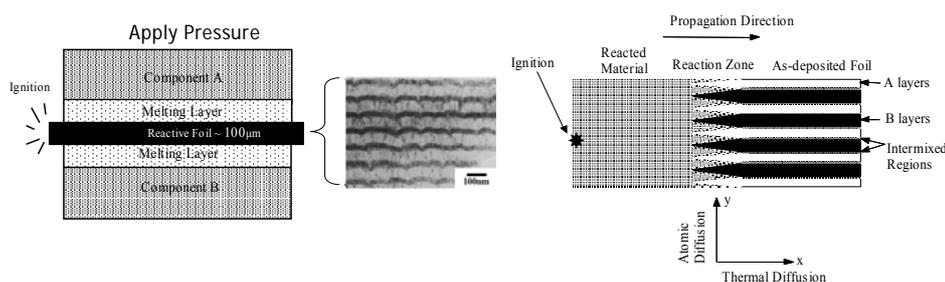


Fig. 2.9: Soudure à la molette.

### 2.2.7 Chauffage par réaction exothermique

Cette technique de brasure, décrite dans [41] et [42] est basée sur l'utilisation d'un film multicouche réactif. Ce film, constitué de milliers de couches d'épaisseur à l'échelle nanométrique, est placé entre deux pièces à assembler

(voir figure 2.10). L'idée est d'utiliser des couples à enthalpie de mélange fortement négative, par exemple Al et Ni, le processus étant alors exothermique. Lorsque la réaction est initiée, soit électriquement ou thermiquement, la chaleur générée permet la fusion des préformes de brasure contiguës, assurant ainsi la liaison des deux pièces. L'avantage est que les composants ne sont pas exposés à de hautes températures, la chaleur nécessaire étant concentrée sur le joint de brasure.



**Fig. 2.10:** Vue schématique du principe utilisé. Tiré de [41].

Cette méthode peut être appliquée entre autres au scellement de boîtiers ainsi qu'à la brasure d'éléments refroidisseurs sur des cartes électroniques. L'avantage réside principalement dans le fait qu'il n'est pas nécessaire d'avoir un équipement coûteux pour réaliser l'opération, en comparaison avec une brasure effectuée par laser. Mais le coût de fabrication du multicouche métallique par couches minces est par contre élevé.

## 2.2.8 Soudure de métaux par ultrasons

La soudure des métaux par ultrasons est couramment utilisée pour assembler des plastiques. On peut aussi l'appliquer pour l'attachement des métaux [43]. Le principe est d'utiliser une vibration et une force pour former une soudure en frottant et pressant les deux pièces à assembler. Le but est de casser et disperser les oxydes de surface, permettant l'attachement des deux surfaces en contact par thermocompression. Les surfaces sont pressées ensemble à une distance atomique, permettant une forte attraction des atomes à travers l'interface : on crée un lien atomique, sans atteindre la température de fusion des métaux entrant en jeu. Comme la soudure par ultrasons de métaux ne nécessite pas d'atteindre la température de fusion des métaux, leur température de fusion et leur conductivité thermique ne font pas partie des paramètres du procédé.

Les avantages du procédé sont multiples : il n'y a pas de consommables, il ne nécessite pas de préparation avant soudure et il n'y a pas de nettoyage



Fig. 2.11: Soudure par ultrasons. Source : [www.amtechultrasonic.com](http://www.amtechultrasonic.com)

après l'opération. Le procédé peut aussi être contrôlé très précisément. Finalement, c'est un procédé à basse température. Par contre, cette méthode est relativement peu flexible, car elle nécessite des outils adaptés à la géométrie des pièces à assembler.

### 2.2.9 Brasure assistée par ultrasons

En appliquant une vibration ultrasonique à une brasure en fusion, on crée des bulles par cavitation [44]. La taille de ces bulles augmente jusqu'à ce qu'elles deviennent instables et implosent. Au moment de l'implosion, la brasure se trouvant autour de la bulle accélère vers le centre, pouvant ainsi frapper une surface. Ceci nettoie la surface et brise son oxyde, on peut ainsi obtenir des soudures sur du verre, des céramiques, l'acier et l'aluminium [45]. Cette méthode permet de ne pas utiliser de flux pendant la brasure. Un autre effet de l'application des vibrations ultrasoniques est la réduction de la tension de surface de la brasure, diminuant la probabilité de ponts de brasure, tout en homogénéisant l'épaisseur de la brasure.

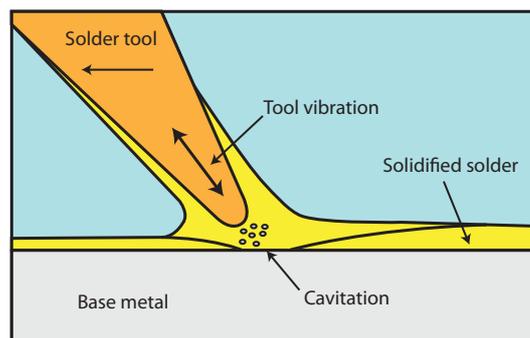


Fig. 2.12: Brasure assistée par ultrasons. Image adaptée de [44].

Pratiquement, ce procédé est adapté sur des pannes de fers à souder (voir figure 2.12), pour une utilisation manuelle ou automatique. L'utilisation de

ce procédé pourrait être utile pour de l'étamage de verres, mais l'opération finale de fermeture du boîtier doit être réalisée d'une autre manière.

### 2.2.10 Thermocompression

Cette méthode de soudure consiste à presser les deux pièces à assembler l'une contre l'autre, tout en les chauffant. L'apport de chaleur se fait grâce à une thermode chauffée par effet Joule (voir figure 2.13). Il faut noter qu'il n'y a pas de fusion de la matière, l'attachement résultant de la diffusion en phase solide entre les deux pièces à assembler. Les deux surfaces sont amenées en contact et une interface se crée à l'échelle atomique par interdiffusion. La température atteinte est d'environ 0.75 fois la température de fusion du matériau ayant la température de fusion la plus faible. La pression sur les deux solides contribue à l'augmentation de la surface réelle de contact par déformation. L'augmentation de la température rend les matériaux plus aisément déformables, et aide donc également le processus d'augmentation de la surface de contact. Le procédé est particulièrement adapté pour le soudage de deux composants de même matériau ductile et dont les surfaces sont sans oxydes. Cependant, le soudage de deux matériaux différents est également possible. La thermosoudure est utilisée en particulier pour l'assemblage de fils sur des substrats. L'avantage de cette méthode est l'absence de métal d'apport, ainsi qu'un échauffement localisé.

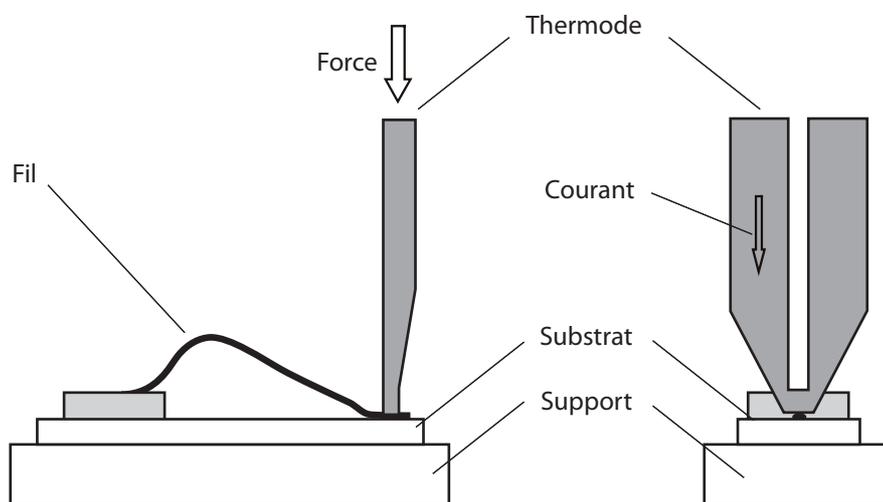


Fig. 2.13: Schéma de principe de la thermocompression.

Dans les cas où une thermode est nécessaire, cette méthode n'est pas adaptée à la fermeture hermétique de boîtiers : l'échauffement par effet Joule nécessite une faible section au bout de la thermode, il est donc difficile de

réaliser des thermodes ayant la forme complète du joint à chauffer.

Une variante consiste en l'utilisation d'un métal mou (par exemple l'indium). Dans ce cas, il est possible de réaliser des soudures à basse température. La thermode n'est plus nécessaire puisque la température nécessaire est atteignable dans un four par exemple. Dans le cas de l'indium la fermeture est possible à température ambiante, par pression. Mais dans ce cas la température d'utilisation est limitée.

## 2.3 Comparaison des méthodes d'encapsulation

Le tableau 2.3, adapté de [46], donne un aperçu de différentes méthodes de scellement.

Méthode	T [°C]	Tolérance à la topographie	Comportement électrique	Herméticité
Verre de scellement	450	Bonne	Isolant (*)	Bonne
Soudure anodique	400	Mauvaise	Isolant	Bonne
Thermo-compression	340	Moyenne	Conducteur	Bonne
Brasure	300	Bonne	Conducteur	Bonne
Collage	100	Bonne	Isolant (*)	Mauvaise

**Tab. 2.3:** Comparaison des méthodes de scellement. (\*) Conduction possible avec charges.

On constate que les méthodes permettant une bonne herméticité ont une température d'application élevée, mais il est possible de réduire l'impact thermique dans le cas de la brasure en focalisant l'énergie nécessaire à la fusion du joint.

## 2.4 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons traité les conditions à satisfaire qui permettent de réaliser une encapsulation hermétique. On constate que l'herméticité varie fortement d'un type de matériau à l'autre, et qu'il est nécessaire d'utiliser des céramiques, des verres ou des métaux pour obtenir un boîtier hermétique.

Ensuite, on a montré les différentes méthodes existantes permettant de réaliser l'encapsulation de microsystèmes ainsi que les méthodes de chauffage

permettant de réaliser une brasure. Les méthodes standard sont peu adaptées à l'encapsulation de systèmes sensibles à la température et à l'humidité, excepté peut-être les boîtiers standard de type "TO". Les autres solutions sont soit basées sur un recouvrement plastique synonyme de contraintes mécaniques et de mauvaise herméticité, ou soumettent le microsysteme à une température de scellement élevée.

Il existe une multitude de méthodes de mesure de l'herméticité de boîtiers. Ces méthodes peuvent être extérieures (détection d'hélium, interférométrie optique, spectroscopie FTIR) ou intégrées dans le boîtier (résistance d'une couche de calcium, oxydation d'une couche épaisse). Pour de très petits volumes de boîtiers, il peut être nécessaire de réaliser une mesure fonctionnelle, par exemple le facteur de qualité mécanique du microsysteme encapsulé. Dans certains cas, il est aussi nécessaire de rajouter des éléments "getter" pour compenser le dégazage pendant la durée de vie du produit.



## Chapitre 3

# Méthodologie pour obtenir un boîtier hermétique

### 3.1 Hypothèses

Dans le chapitre précédent, nous avons vu comment se caractérise l’herméticité, comment elle se mesure et comment on peut obtenir des boîtiers hermétiques. On constate que pour obtenir un boîtier hermétique, on doit travailler avec des métaux, des verres ou des céramiques. Actuellement, la plupart des méthodes d’assemblage pour ces matériaux impliquent de hautes températures qui pourraient détruire le microsystème à encapsuler. De plus ces méthodes sont adaptées à des systèmes standard, mais il existe peu de solutions pour les microsystèmes non standard tels que décrits dans l’introduction.

On veut prouver que l’on peut réaliser un boîtier hermétique en utilisant des matériaux tels que les céramiques et les métaux, tout en minimisant l’impact thermique sur le microsystème encapsulé lors du scellement. Ce type de boîtier doit satisfaire plusieurs fonctions (interconnexions, protection), nous utilisons l’analyse fonctionnelle pour déterminer ces fonctions. Nous décrivons les outils technologiques qui permettent de réaliser les fonctions demandées.

Dans le cadre de cette thèse, on ne cherche pas à obtenir un boîtier hermétique pour un microsystème en particulier, mais on veut montrer qu’il existe des méthodes qui permettent de réaliser des boîtiers présentant une haute herméticité et une basse température d’encapsulation.

## 3.2 Démarche de conception

### 3.2.1 Introduction

Actuellement, l'étape d'encapsulation est rarement prise en compte lors de la conception d'un microsystème. On se retrouve typiquement dans une démarche de conception sérielle : chaque étape est réalisée à la suite et indépendamment des autres (voir figure 3.1). Lorsqu'un problème est découvert dans une de ces étapes, la conception doit être reprise pour le corriger. Le résultat est donc que la conception doit être modifiée pour corriger des déficiences qui sont observées plus tard dans le cycle de production. Ces étapes de reconception n'amènent pas de valeur ajoutée. Cette démarche peut engendrer des coûts jusqu'à 10 fois supérieurs par rapport au cas où le produit est correctement conçu du premier coup. Les conséquences peuvent être désastreuses si le produit est entre les mains du client lorsqu'un problème arrive : autant en termes de coût de réparation qu'en termes de ventes perdues à cause d'une image ternie.

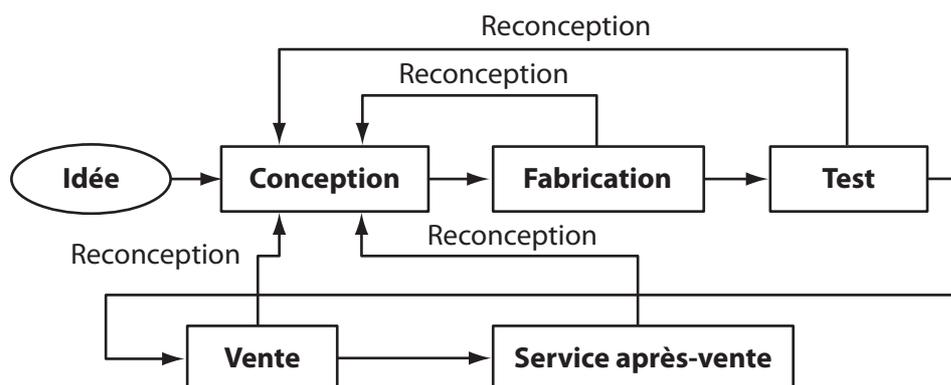


Fig. 3.1: Démarche de conception sérielle. Tiré de [47].

L'analyse fonctionnelle permet dans une certaine mesure d'éviter ces étapes de reconception. Dans les sections suivantes nous détaillons cette méthode et comment elle peut s'appliquer à la recherche d'une solution d'encapsulation.

### 3.2.2 Analyse fonctionnelle

On constate souvent des lacunes au niveau des étapes de conception des produits basés sur des microsystèmes. Souvent, par manque d'analyse, on focalise les efforts de conception sur le microsystème à fabriquer, on ne pense pas aux étapes nécessaires pour obtenir le produit final. Dans certains cas, l'analyse pour la conception de l'encapsulation est mal faite, souvent elle

est inexistante. Cela peut être dû entre autres à un manque de recherche de solutions alternatives en dehors des procédés utilisés pour la fabrication du microsysteme lui-même. Même dans le cas où une équipe développant le microsysteme sous-traite sa fabrication, ce qui est de plus en plus courant, elle sera tentée d'utiliser ces mêmes procédés pour l'encapsulation, ce qui n'est souvent pas adapté.

Dans bien des cas, le boîtier d'un microsysteme sert d'interface entre deux échelles différentes : on a d'une part l'environnement du microsysteme à l'échelle micrométrique et d'autre part l'environnement extérieur à l'échelle macroscopique. Ces deux échelles nécessitent l'emploi de solutions techniques différentes. Il faut donc, par des méthodes d'analyse et de conception, essayer de s'éloigner de la solution technique pour penser en termes de fonctions que le boîtier devra remplir. Une fois seulement que ces fonctions auront été définies, on pourra trouver la ou les solutions techniques les plus à même de remplir ces fonctions.

L'analyse fonctionnelle permet de formaliser les besoins des clients en termes utilisables par les ingénieurs dans la conception d'un nouveau produit. Il faut tout d'abord définir trois notions fondamentales [48] :

1. **Besoin.** Notion vue du client qui motive la création du produit.
2. **Fonction.** Il s'agit de traduire en termes d'ingénieur les fonctions à remplir pour satisfaire les besoins du client.
3. **Produit.** Élément concret qui répond au besoin à travers la satisfaction des fonctions (création du produit).

Pour satisfaire le besoin, il faut le connaître. Pour comprendre le besoin, il faut l'exprimer en termes de fonctions. Pour identifier les fonctions, il faut posséder des méthodes d'analyse.

La démarche de conception commence par l'analyse des besoins. Il faut d'abord identifier le système à étudier, ainsi que les différents interacteurs. Cette étape peut paraître simple, mais il est parfois difficile de déterminer correctement le système. Prenons l'exemple d'un réseau de capteurs sans fil destinés à la mesure, à la transmission et à l'analyse de données météorologiques. L'ensemble du système est composé de noeuds auxquels sont reliés les capteurs, de stations de base auxquelles les noeuds se connectent, ainsi que d'une base de données et d'une interface utilisateur. Le système entier est défini par l'ensemble de ces composants, mais il peut être judicieux de traiter chacun de ces composants de manière individuelle : les interacteurs ne sont pas forcément les mêmes pour le noeud que pour la base de donnée. Il va de soi que ces éléments sont liés par des fonctions.

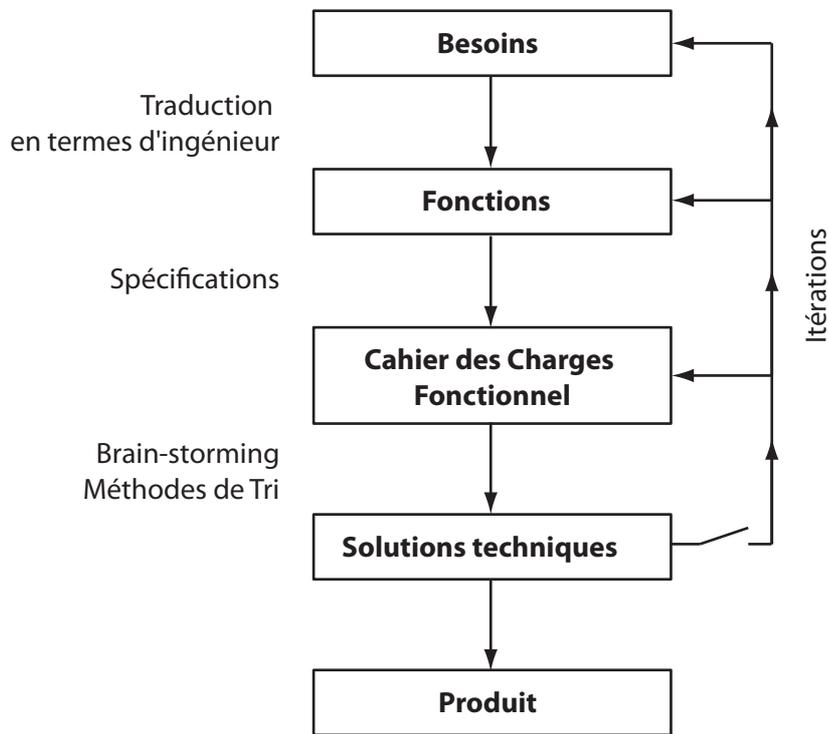
Dans le cas de l'encapsulation d'un MEMS, les interacteurs sont, entre autres : le concepteur du MEMS, le fabricant, l'utilisateur final. Chacun a des

besoins différents qu'il faut identifier. Les besoins peuvent être des critères techniques (performances électriques, optiques, etc.), mais peuvent aussi exprimer des critères économiques, esthétiques ou liés à d'autres contraintes. Les interacteurs peuvent aussi être des éléments physiques. Pour obtenir une première liste des besoins, on peut dans un premier temps demander aux utilisateurs ce qu'ils attendent du produit. La liste ainsi obtenue est relativement peu fournie, il faut alors guider la démarche de recherche de besoins. On peut par exemple penser au système dans différentes situations : fabrication, mise en exploitation, utilisation normale, maintenance, destruction. On peut ainsi obtenir des besoins auxquels on n'avait pas pensé à priori, mais qu'il est important de découvrir dès les premières phases de conception. Les besoins vont donc aussi venir des utilisateurs du produit, de ceux qui l'installent et en font la maintenance, ainsi que les personnes qui le fabriquent et réalisent les tests. Cette approche doit avoir lieu dans chaque phase de conception du produit, même dans les premières étapes de conception.

Prenons le cas d'une matrice de micro miroirs qu'il s'agit d'encapsuler. La situation est la suivante : l'effort de développement est fait sur la conception et la fabrication d'une matrice de miroirs destinés à router des faisceaux de fibres optiques. Les premiers chips sortent de la salle blanche et il faut réaliser un boîtier pour tester ces chips. Dans ce cas, le système est clairement défini : il s'agit du boîtier permettant la protection de cette matrice de micro miroirs. Les besoins exprimés par le fabricant du chip sont les suivants : le package doit pouvoir être positionné par rapport au faisceau de fibres optiques, on doit pouvoir contrôler les miroirs, il faut une vitre pour protéger le microsystème tout en laissant passer les signaux optiques. On remarque une erreur souvent commise : on donne déjà la solution technique dans la liste des besoins.

L'étape suivante est la traduction des besoins en fonctions. C'est une étape qui est faite principalement par l'ingénieur, mais l'appui du client est aussi nécessaire pour s'assurer que les besoins sont bien interprétés. On traduit les besoins en termes d'ingénieur. A cette étape, on ne définit pas encore de solution. Une fonction est toujours exprimée par un verbe et un substantif. Lorsque les fonctions sont exprimées, on peut créer le cahier des charges fonctionnel (CdCF) : à chaque fonction on ajoute des critères et des niveaux. Les critères sont des moyens physiques qui caractérisent une fonction (masse, longueur, volume). Ce sont des dimensions mesurables. Chaque fonction peut avoir plusieurs critères. A chaque critère, on associe un niveau pour lequel la fonction est remplie. Ce cahier des charges fonctionnel sert de référence. Lorsque l'on propose des solutions techniques, on se rapporte au cahier des charges fonctionnel, pour déterminer si la solution technique satisfait les fonctions associées, en comparant les critères et les niveaux.

Il faut noter que la démarche d'analyse fonctionnelle est itérative (voir fi-



**Fig. 3.2:** Démarche d'analyse fonctionnelle. Noter les itérations.

gure 3.2). Lorsque l'on arrive à des solutions techniques, on remet souvent en question les besoins exprimés auparavant, notamment à cause de contraintes techniques qui n'étaient pas apparues avant la recherche de solutions. Pour obtenir un bon produit, il faut généralement effectuer trois itérations. Cependant, lors d'une phase, les conditions ne changent pas. On peut travailler sur une base constante. Ce n'est que lors d'une itération que l'on remet en question ce qui a été fait dans chaque phase.

Reprenons l'exemple du réseau de capteurs. A un moment donné, quand on réfléchit aux solutions possibles, on peut aussi se poser la question s'il faut des noeuds qui communiquent entre eux ou si un élément central qui communique avec chacun des capteurs ne serait pas une bonne idée. Ce n'est que lors d'une seconde itération que l'on va découvrir le problème de la consommation des capteurs liée à la portée d'émission. Ce constat, purement technologique à un moment donné et pour un coût donné, impose de modifier les fonctions requises par le système. Mais pour arriver à ce constat, il aura fallu, pendant une phase, réfléchir aux solutions techniques sans remettre en questions les fonctions trouvées auparavant.

Cette démarche d'analyse fonctionnelle qui peut sembler contraignante par ses étapes et ses règles permet de quitter la routine qui conduit à utiliser les

solutions techniques à disposition et de chercher des solutions qui tiennent compte des fonctions à satisfaire pour remplir les besoins des clients du produit. Elle permet aussi de ne pas se contenter d'adopter des solutions parce qu'elles sont disponibles.

### **3.2.3 Conclusion**

La recherche d'une méthode d'encapsulation doit être incluse dans la démarche de conception d'un système. Cela passe par l'analyse fonctionnelle du produit entier. On verra alors que le choix d'une solution technique d'encapsulation aura un impact sur le système en lui-même. Dans le cas où la conception du système est déjà avancée, les choix de solutions techniques pour la méthode d'encapsulation seront plus limités, et le développement de la méthode d'encapsulation sera plus long, voire impossible. Si l'on pense à l'encapsulation dès les premières phases de conception du produit, on évite les phases de reconception dues à l'approche sérielle. La démarche d'analyse fonctionnelle permet de prendre du recul par rapport au problème, il est ainsi plus facile de trouver une solution idoine.

### 3.3 Chauffage par laser

Pour obtenir une barrière hermétique, on propose d'utiliser un joint métallique entre deux demi-boîtiers en céramique ou en verre. De manière à diminuer l'échauffement thermique sur le microsysteme, il faut focaliser l'énergie de chauffage sur le joint. La solution proposée dans le cadre de cette thèse est l'utilisation d'une diode laser.

Dans la recherche et l'industrie, on utilise les lasers dans de nombreuses applications : perçage fin, gravage, marquage, trimming, découpe, soudure, traitement des surfaces, et ceci dans des domaines très variés : communications de données, construction, usinage, divertissement. Il existe différents types de laser, utilisés pour des applications différentes. Dans la microfabrication, on utilise surtout des lasers Nd:YAG avec des longueurs d'ondes dans l'infrarouge proche ou bien multipliés en fréquence. Pour l'ablation de matériaux, on utilise plutôt des lasers pulsés IR, visible et UV. Pour la métrologie et certaines méthodes photochimiques, on utilise des lasers continus d'ions Ar<sup>+</sup> et Kr<sup>+</sup> qui ont des longueurs d'onde dans le visible et dans l'UV proche. On peut généralement caractériser un laser par sa résolution, sa qualité de faisceau, son mode (continu, pulsé), sa puissance, la taille de spot obtenue, mais aussi la longueur d'onde et l'absorption par différents matériaux.

Pour nos applications, on cherche à obtenir un chauffage localisé; pour cela, le critère principal est la densité de puissance, qui doit être relativement faible. De plus, la puissance doit être pilotable en continu, de manière à contrôler précisément l'énergie apportée. La puissance à disposition est aussi un critère de choix, mais il est secondaire, on privilégie la souplesse. Les diodes laser sont particulièrement adaptées à cela : la puissance optique continue peut aller jusqu'à 400 W, et le diamètre de spot est de l'ordre du demi-millimètre. Cela correspond à une densité de puissance de 50 kW/cm<sup>2</sup>. A titre de comparaison, on peut obtenir des densités de puissance de l'ordre de 10 MW/cm<sup>2</sup> avec un laser Nd:YAG.

L'équipement utilisé dans le cadre de cette thèse consiste en une diode laser d'une puissance de 25 W en continu, couplée à une optique de déviation (voir figure 3.3). Le faisceau laser est amené de la source à l'optique de déviation par une fibre optique. L'optique de déviation permet le balayage d'une surface d'environ 5 cm sur 5 cm, la vitesse de déplacement du point de focalisation peut atteindre 1 m/s. Le diamètre du spot au point de focalisation est d'environ 0.8 mm. La puissance optique peut être contrôlée en continu pendant le tir, entre 0 et 25 W. L'avantage de la diode laser réside dans le fait que la puissance peut être facilement contrôlée pendant le chauffage. La densité de puissance est faible, ce qui est un avantage dans

le cas où on cherche à chauffer la matière (brasure, polymérisation de colle). Un autre avantage de la diode laser est son bas coût, environ la moitié d'un laser CO<sub>2</sub> ou Nd:YAG.

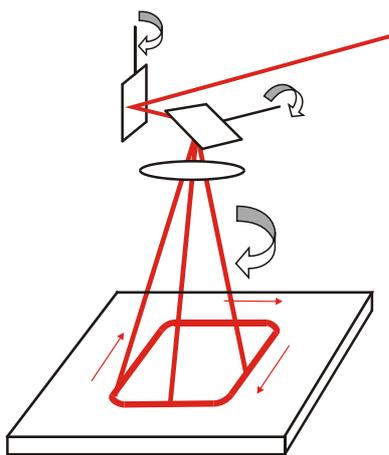


**Fig. 3.3:** Equipement laser utilisé dans le cadre de la thèse (diode laser + optique de déviation).

### 3.3.1 Principe du scellement par laser

Il existe différentes méthodes de suivi d'un contour par laser, la plus simple étant le chauffage par point (spot welding) [49]. Dans ce cas, le point de focalisation suit le contour à chauffer. Le tracé peut être suivi précisément, mais le principal désavantage est que l'échauffement est localisé. Dans le cas d'un joint de brasure, lorsque les deux pièces à assembler sont étamées, la hauteur du joint après chauffage doit être inférieure à la hauteur totale des deux joints avant le chauffage, ce qui est impossible à obtenir dans le cas du chauffage par point. Une autre possibilité est le chauffage par ligne (line welding), similaire au chauffage par point, si ce n'est que l'on chauffe une ligne au lieu d'un point. On retrouve les mêmes désavantages, tout en étant moins flexible quant à la forme du joint. Le chauffage simultané (simultaneous welding) utilise plusieurs diodes allumées en même temps. L'avantage principal est le temps de cycle plus court que pour le chauffage par point. De plus, si l'ensemble du joint est en fusion, les deux pièces peuvent bouger l'une par rapport à l'autre, notamment verticalement, ce qui garantit un joint uniforme, contrairement au cas du chauffage par point : la zone qui n'est pas en fusion empêche le rapprochement des deux pièces à braser. Par contre, là aussi, la géométrie est limitée à des formes rectangulaires ou à des

formes circulaires si l'on utilise des optiques spéciales. Une autre technique particulièrement intéressante est le chauffage quasi-simultané (voir figure 3.4). Grâce à une optique de déviation, le point de focalisation balaye le joint à une vitesse de l'ordre de 1 m/s. Pour des petits boîtiers, on peut atteindre jusqu'à 100 passes par seconde; le joint est alors chauffé essentiellement uniformément. On peut utiliser des formes de joint spéciales, par exemple des formes rectangulaires aux coins arrondis.



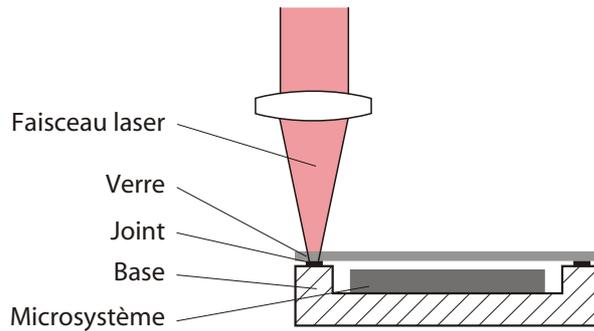
**Fig. 3.4:** Chauffage quasi simultané.

Dans le cas du chauffage quasi-simultané, l'échauffement est plus élevé que dans le cas du chauffage par point. Il faut donc réduire le temps de chauffage, cela nécessite une puissance plus élevée. Mais si l'on réduit le temps de chauffage il faut aussi assurer que le mouillage des surfaces par la brasure se fait correctement. Cela passe par le préétamage des surfaces, discuté dans le paragraphe 4.4.3.

Dans la plupart des cas traités dans le cadre de cette thèse, on brase deux demi-boîtiers l'un à l'autre à l'aide d'une diode laser. Le faisceau laser traverse le verre et chauffe directement le joint de brasure (voir figure 3.5). On utilise la méthode de chauffage quasi-simultanée.

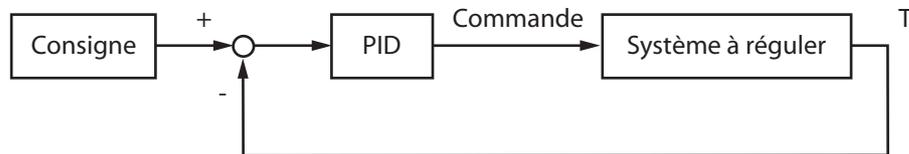
### 3.3.2 Contrôle de la puissance

Le contrôle de la diode laser est réalisé par un programme Labview permettant plusieurs modes de fonctionnement. La première possibilité est de donner comme consigne une puissance constante sur un temps donné. Ce mode est utile pour déterminer les ordres de grandeur de puissance à utiliser. Le second mode de fonctionnement permet de suivre une succession



**Fig. 3.5:** Vue générale d'un scellement par laser.

de paliers de puissance pendant des temps donnés. Là aussi, cela peut permettre d'étudier un système en faisant des tirs à des puissances différentes, par exemple pour augmenter progressivement la température à l'endroit du tir. Finalement, grâce à différents moyens de mesure de température, on peut suivre un profil de température de consigne et adapter automatiquement la puissance nécessaire pendant le tir (voir figure 3.6). Les paramètres du régulateur PID ont été déterminés par la méthode de Ziegler-Nichols [50] [51]. Deux méthodes de mesure de température ont été utilisées : par thermistance intégrée et par pyromètre.

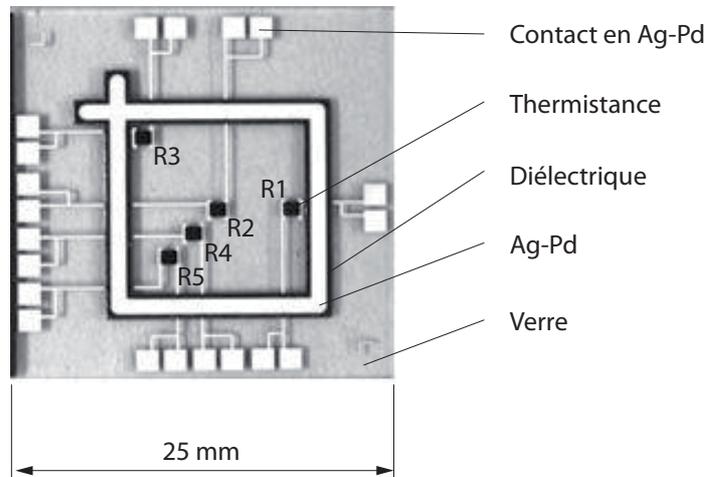


**Fig. 3.6:** Principe de la commande en puissance du laser.

### 3.3.3 Mesure de température par thermistances sérigraphiées

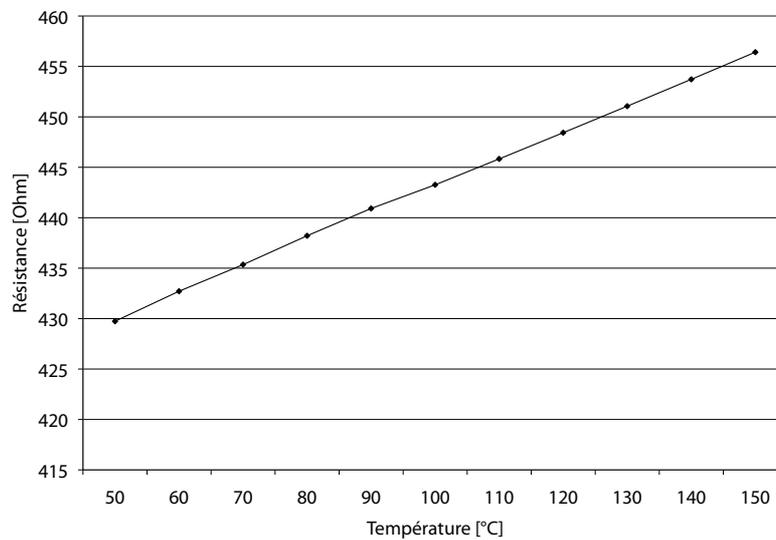
On utilise des résistances dont la valeur varie en fonction de la température [52] [53]. Ces résistances sont réalisées par sérigraphie, il est facile de placer plusieurs résistances sur une même pièce, à différents endroits (voir figure 3.7). Par contre, le procédé de fabrication implique une variation de la valeur nominale qui nécessite une calibration de chaque résistance [54]. La résistance nominale est de l'ordre de  $300 \Omega$ , avec un haut TCR (environ  $800 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ). Les résistances sont cuites à  $500^\circ\text{C}$ . Le coefficient de dilatation est compatible avec des substrats en verre.

La figure 3.8 représente l'évolution de la résistance en fonction de la température du substrat. On peut observer une dépendance linéaire de la résistance



**Fig. 3.7:** Vitre équipée de thermistances pour la mesure de température pendant la brasure.

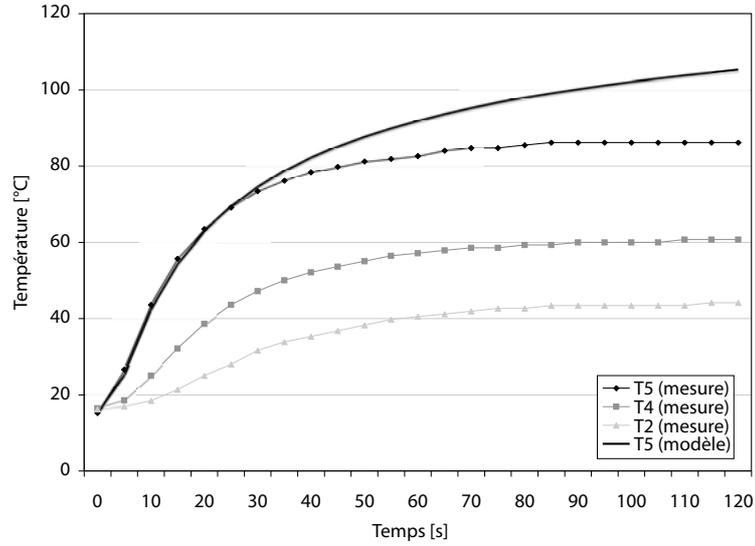
en fonction de la température. Toutes les résistances présentent le même comportement.



**Fig. 3.8:** Evolution de la valeur de la résistance en fonction de la température.

On peut étudier l'évolution de la température en gardant le spot laser fixe. Les résultats suivants sont donnés en tirant dans le coin inférieur gauche

(près de la résistance R5). On peut mesurer la température des résistances R5, R4 et R2, placées respectivement à une distance 4.3, 6.6 et 9 mm du point de tir (voir figure 3.9).



**Fig. 3.9:** Evolution de la température en fonction du temps aux endroits R5, R4 et R2.

Un modèle simple permet de déterminer la diffusion thermique dans la plaque de verre [53]. Il s'agit de résoudre l'équation de Laplace pour la diffusion thermique :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_{th} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.1)$$

Pour simplifier le calcul, détaillé en annexe, on néglige les pertes latérales, le profil de température ne dépend donc plus que de  $x$  et de  $t$ . Nous obtenons :

$$T(x, t) = \left[ (T_0 - T_1) \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} du \right] + T_1 \quad (3.2)$$

$$z = \frac{x}{2\sqrt{D_{th}t}} \quad (3.3)$$

Dans la figure 3.9, le résultat de ce modèle est superposé aux mesures pour la résistance R5. On constate que pour des temps courts, le modèle est

satisfaisant. Pour des temps supérieurs à 30 secondes, le modèle n'est plus valable, car il ne prend pas en compte les pertes latérales.

### 3.3.4 Mesure de température par pyromètre

La mesure de température par pyrométrie est une mesure sans contact. Dans notre cas, la mesure ne peut se faire qu'en un point, on a donc potentiellement moins d'information que dans le cas des thermistances sérigraphiées. Une option est l'utilisation d'une caméra thermique, qui peut potentiellement donner une information sur l'ensemble du joint [55], mais ces caméras sont chères par rapport à un pyromètre. Plusieurs facteurs peuvent avoir une influence sur la calibration du pyromètre, notamment l'émissivité du matériau mesuré, ainsi que l'angle d'inclinaison du pyromètre. En fonction du matériau à mesurer, on devra utiliser différentes plages de longueurs d'onde, nécessitant plusieurs pyromètres différents. Le pyromètre utilisé permet des mesures sur les céramiques (Alumine, LTCC) ainsi que sur les diélectriques sérigraphiés. Par contre, la longueur d'onde utilisée n'est pas adaptée à la mesure de température des métaux.

A titre d'exemple, nous montrons la puissance instantanée qui résulte du suivi d'un profil de température typique utilisé pour obtenir une brasure. Le profil de température est aussi représentée sur le même graphique (voir figure 3.10). Le profil de température mesuré se confond avec la consigne.

On remarque que l'on peut obtenir un excellent suivi de la température grâce à un équipement relativement simple. Il faut encore relever un fait particulièrement intéressant : avec cette boucle de contre-réaction, on ne connaît pas la puissance optique effective du laser. On fixe comme consigne une valeur de puissance délivrée par la diode, mais la puissance optique est inférieure : il faut tenir compte des pertes dans la fibre optique, dans l'optique de déviation, puis finalement dans l'élément physique séparant l'optique et l'élément à chauffer (l'air, et éventuellement la vitre du boîtier ou de l'enceinte hermétique). Pour déterminer la puissance optique exploitable, on utilise une tête de mesure optique (OPHIR). Dans la figure 3.11, on donne les valeurs de puissance de consigne, comparées aux valeurs mesurées à la sortie de l'optique de déviation, ainsi que celles après passage au travers de deux vitres différentes (lamelle de microscope, utilisée comme vitre dans plusieurs projets d'encapsulation, ainsi que la vitre d'une enceinte hermétique permettant de préparer les boîtiers avant encapsulation en atmosphère protégée).

On constate que la plus grande perte par rapport à la consigne (près de 25%) est due à la fibre optique et à l'optique de déviation. Les deux vitres, d'épaisseurs 1 et 3 mm, impliquent des pertes d'environ 6 et 15% respectivement. Bien qu'il ne soit pas nécessaire de connaître ces puissances optiques pour

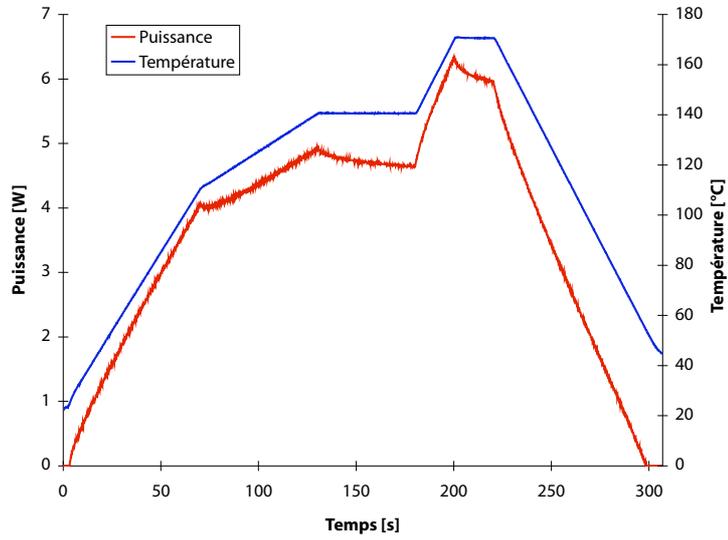


Fig. 3.10: Puissance instantanée nécessaire au suivi d'un profil de température.

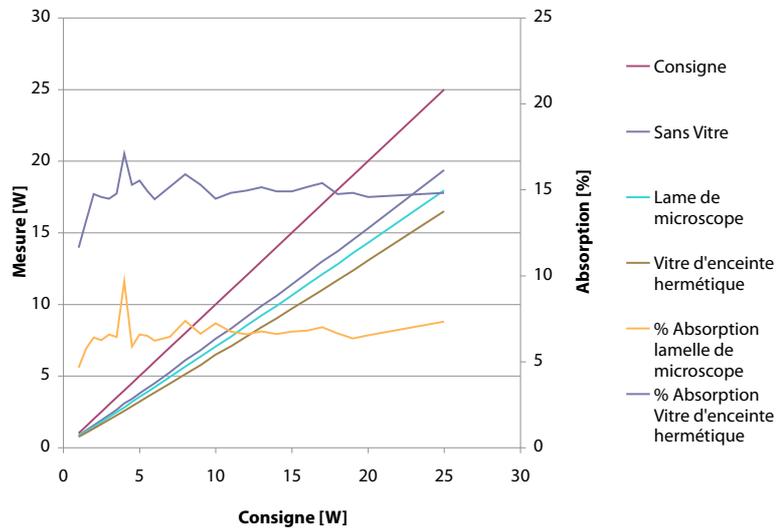


Fig. 3.11: Comparaison de la puissance de consigne et de la puissance optique utile.

le contrôle en utilisant la boucle de contre réaction, il est très intéressant de les connaître pour comparer les modèles théoriques aux mesures. Le dernier point à prendre en compte est le taux d'absorption du faisceau optique par le matériau. Il est très difficile de chauffer les métaux, le taux d'absorption est de l'ordre de 10%.

### **3.3.5 Conclusion**

La diode laser est un équipement particulièrement adapté pour le scellement de boîtiers hermétiques hybrides céramiques / verre. Le coût est relativement bas, la flexibilité est excellente. Techniquement, la basse densité de puissance associée à des moyens de mesure de température permettent de contrôler la température pendant la brasure. L'échauffement est focalisé sur la zone à chauffer, et l'échauffement du microsystème encapsulé ne dépend que de la conductivité du boîtier.

La diode laser utilisée dans le cadre de cette thèse permet le chauffage localisé. La méthode peut être facilement contrôlée par des moyens de mesure permettant de garantir la maîtrise du procédé. Un autre avantage de la diode laser est qu'il est facile de reconfigurer le tracé suivi par le spot laser, ce qui est appréciable pour le prototypage ou les petites séries.

### 3.4 Modélisation thermique

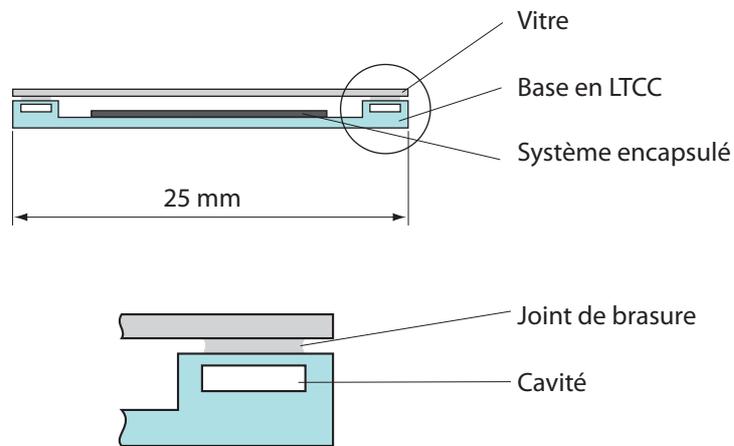
Dans cette partie, nous donnons et comparons des méthodes permettant de déterminer le comportement thermique de boîtiers hermétiques lors de leur fermeture. Nous comparons différentes méthodes de modélisation et d'optimisation à travers un exemple concret : un boîtier en céramique co-cuite à basse température (LTCC, Low Temperature Cofired Ceramic) permettant de diminuer l'impact thermique sur le système encapsulé lors d'une soudure par laser.

L'idée est de réaliser un demi-boîtier en LTCC présentant une conduction thermique faible. Le LTCC est une solution technique permettant de remplir plusieurs fonctions principales d'un boîtier hermétique : herméticité, possibilité de réaliser une interface électrique à travers le LTCC, possibilité de braser une vitre pour l'interface optique grâce à la sérigraphie de métallisation, facilité de mise en oeuvre, possibilité de petites et moyennes séries. Le LTCC présente aussi les propriétés intéressantes suivantes : basse conductivité thermique (3 W/m/K), possibilité de structuration (structures suspendues, cavités) [56].

Lors d'un scellement par laser, l'échauffement du système se trouvant au centre du boîtier est principalement dû à la conduction dans le boîtier (de la zone de brasure vers le centre du boîtier). La convection est faible par rapport à la conduction dans le boîtier, de même, pour des températures de l'ordre de 600 K, la radiation peut être négligée. Il faut alors trouver un moyen de réduire la conduction dans le boîtier. On ne peut pas changer la conductivité thermique du matériau, par contre, on peut augmenter la résistance thermique entre le point de chauffage et le système encapsulé.

Dans ce chapitre, nous traitons l'exemple d'une base de boîtier en LTCC. Il s'agit d'un boîtier carré, de taille environ 25 par 25 mm présentant une cavité, destiné à être scellé par un verre brasé [57]. Comme nous l'avons vu au paragraphe 2.2, il existe plusieurs méthodes permettant d'obtenir la fusion de la brasure formant le joint. Dans le cas qui nous intéresse, nous nous concentrons sur l'utilisation d'une diode laser pour chauffer le joint. L'échauffement du système encapsulé se fait alors principalement par conduction dans le boîtier.

Le boîtier utilisé présente la particularité d'avoir une cavité se trouvant sous l'emplacement de la brasure (voir figure 3.12). On arrive à cette idée de rajouter un canal par un raisonnement sur les flux thermiques dans le boîtier. Le flux entrant est dû au laser. On peut influencer le flux ayant un impact sur le microsysteme en augmentant la résistance à la conduction thermique entre le joint et la brasure. Le LTCC permet la réalisation de tels



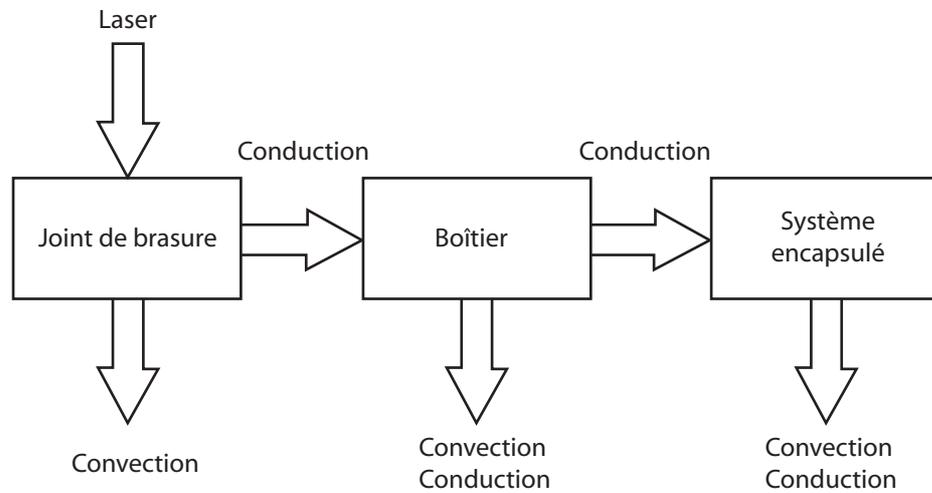
**Fig. 3.12:** Vue en coupe du boîtier LTCC utilisé pour les modélisations thermiques.

canaux, par exemple pour refroidir un circuit générant de la chaleur [58] [59] [60] ou pour des applications micro-fluidiques [61] [62].



**Fig. 3.13:** Photo du boîtier en LTCC. La cavité est visible sur la coupe de gauche.

Les différents modèles décrits plus loin nous permettent d'évaluer l'effet de ce canal.



**Fig. 3.14:** Flux thermiques dans le boîtier.

### 3.4.1 Introduction aux modes de transferts thermiques

Il existe trois modes de transferts thermiques : la convection, la conduction et la radiation. Nous donnons ici une définition rapide de chacun de ces modes [63].

#### Conduction

La conduction est le transfert de chaleur d'une zone à haute énergie (température) à une zone à énergie plus faible. La conduction est due principalement à l'énergie de mouvement entre molécules adjacentes. Dans ce mode, il n'y a pas de déplacement significatif des molécules. Le transfert thermique est donné par la relation suivante :

$$q = -kA_c \frac{\Delta T}{L} \quad (3.4)$$

Avec :

- $q$  flux thermique (W)
- $k$  conductivité thermique du matériau (W/m/K)
- $A_c$  section (m<sup>2</sup>)
- $\Delta T$  différence de température (°C)
- $L$  longueur du transfert thermique (m)

Comme le transfert de chaleur par conduction est directement proportionnel à la conductivité thermique du matériau, du gradient de température et de la section, on peut trouver la différence de température avec:

$$\Delta T = \frac{qL}{kA_c} \quad (3.5)$$

A priori, c'est le mode principal qui nous intéresse dans le cas de l'encapsulation d'un microsystème. La chaleur au point de brasure est transmise par conduction dans le boîtier.

### Convection

La convection est une combinaison d'un transport volumique et du mélange au niveau macroscopique de zones d'un liquide ayant des températures différentes. Il y a deux types de convection : forcée ou naturelle. La convection naturelle est due au mouvement produit par les différences de densité entre les particules chaudes et celles qui sont froides. Dans la convection forcée, le mouvement du fluide est causé par l'action des forces extérieures. On suppose une dépendance linéaire de la température le long de la surface d'un solide en contact avec un fluide refroidissant. On parle de refroidissement newtonien. Ainsi :

$$q_c = h_c \cdot A_s (T_s - T_m) \quad (3.6)$$

Avec :

- $q_c$  flux thermique convectif (W)
- $A_s$  surface (m<sup>2</sup>)
- $T_s$  température de la surface (°C)
- $T_m$  température du liquide refroidissant (°C)
- $h_c$  coefficient de transfert thermique convectif (W/m<sup>2</sup>)

Ce mode de transfert thermique est moins important que la conduction en termes de transmission de chaleur du point de brasure au microsystème. Cependant les pertes par convection ne peuvent être négligées.

### Radiation

La radiation est le seul mode de transfert qui peut intervenir à travers le vide. Il est dépendant de la température de la surface entrant en compte.

La quantité de chaleur transmise par radiation entre deux corps de températures  $T_1$  et  $T_2$  est donnée par :

$$q_r = \epsilon \sigma F_{1,2} A (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.7)$$

Avec :

- $q_r$  quantité de chaleur transférée par radiation (W)
- $\epsilon$  émissivité de la surface
- $\sigma$  constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$ )
- $F_{1,2}$  facteur de forme entre les surfaces des corps 1 et 2
- $A$  surface de l'aire de radiation ( $\text{m}^2$ )
- $T_1$  température de la surface du corps 1 (K)
- $T_2$  température de la surface du corps 2 (K)

Sauf dans le cas où la température du corps est très élevée (1000 K), la radiation est normalement négligeable pour les systèmes microtechniques.

### 3.4.2 Modèle analytique

On cherche à modéliser le comportement thermique du boîtier, notamment la conduction de chaleur entre l'endroit de chauffage et le système encapsulé. Il s'agit volontairement d'un modèle très fortement simplifié, mais qui permet de "sentir", par un calcul simple, l'effet de la cavité sur le système étudié. On formule plusieurs hypothèses simplificatrices :

- On considère un problème unidimensionnel.
- La conduction dans le boîtier est plus importante que la radiation et la convection.
- On considère les faces supérieures et inférieures comme étant isolées. Le flux entrant est égal au flux sortant.

Il s'agit de trouver les solutions de l'équation de la chaleur, donnée ici sous sa forme générale [64] :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda(T)}{\rho(T)c_p(T)} \nabla^2 T + \frac{s(T)}{\rho(T)c_p(T)} \quad (3.8)$$

Si l'on néglige la variation des caractéristiques physiques  $\lambda$ ,  $\rho$  et  $c_p$  en fonction de la température et en utilisant la notation  $\frac{\lambda}{\rho c_p} = a$ , l'équation peut être simplifiée sous la forme :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + \frac{s}{\rho c_p} = a \Delta T + \frac{s}{\rho c_p} \quad (3.9)$$

Le facteur de proportionnalité "a" donné par  $\frac{\lambda}{\rho c_p} = a$  s'appelle la diffusivité thermique et est fonction du matériau. C'est une mesure de la capacité des corps à laisser passer la chaleur par conduction. Nous voyons donc que pour un matériau donné, on ne peut pas influencer ce paramètre.

Dans le cas où on n'a pas de source interne, on a  $s = 0$  :

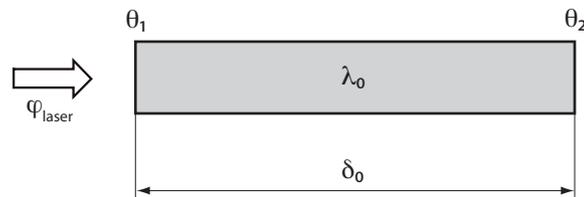
$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \Delta T \quad (3.10)$$

Dans le cas stationnaire ou permanent, on a  $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ , on peut donc poser, pour le cas d'un système de coordonnées cartésiennes :

$$T = T(x) \quad (3.11)$$

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad (3.12)$$

Reprenons le cas d'un boîtier présentant une cavité entre le point de chauffage et le système encapsulé (figure 3.12). On peut obtenir un schéma équivalent, sous la forme d'un barreau. Il est traversé par un flux équivalent au flux entrant, fourni par la diode laser.



**Fig. 3.15:** Schéma équivalent pour le boîtier sans cavité.

L'équation différentielle qui décrit la propagation de la chaleur dans ce barreau prend la forme :

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad (3.13)$$

La solution générale de cette équation est :

$$T(x) = C_1 \cdot x + C_2 \quad (3.14)$$

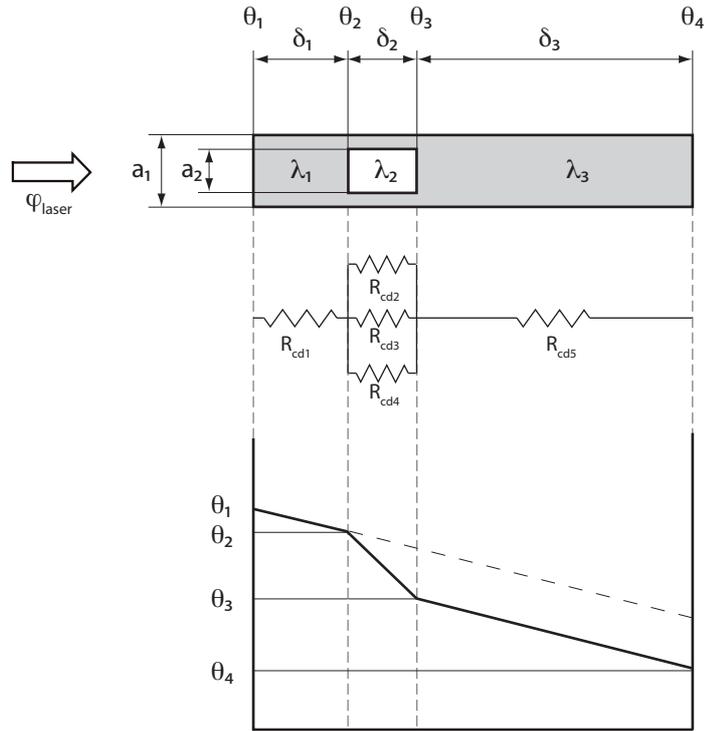
On peut exprimer le flux surfacique dans ce barreau :

$$\varphi_l = \frac{\lambda}{\delta} (\theta_1 - \theta_2) \quad (3.15)$$

On peut alors exprimer la température au point  $\theta_2$ , en fonction de la conductivité  $\lambda_1$  et de la température au point de chauffage  $\theta_1$  :

$$\theta_2 = \theta_1 - \varphi_l \frac{\delta_0}{\lambda_0} \quad (3.16)$$

Prenons maintenant le cas du boîtier présentant une cavité. On peut décomposer le barreau en structures ayant une résistance thermique connue, et en utilisant un schéma électrique équivalent.



**Fig. 3.16:** Schéma équivalent pour le boîtier avec cavité.

Dans notre cas, on peut écrire la résistance thermique totale :

$$R_{tt} = R_{cd1} + \frac{1}{\frac{1}{R_{cd2}} + \frac{1}{R_{cd3}} + \frac{1}{R_{cd4}}} + R_{cd5} \quad (3.17)$$

On a encore :

$$\varphi_l = \frac{\theta_1 - \theta_4}{R_{tt}} \quad (3.18)$$

Comme on fait l'hypothèse que le flux est constant dans le barreau, on peut trouver les températures  $\theta_2$  et  $\theta_3$ . On peut aussi trouver l'impact de la cavité sur la différence de température  $\theta_1 - \theta_4$ .

Dans notre cas, grâce à la cavité, on a une diminution de la température du centre du boîtier de l'ordre de 10 degrés par rapport au barreau sans cavité. On voit que l'effet de la cavité, pour le cas stationnaire, n'est pas très marqué. Mais ce cas ne prend en compte que la résistance thermique. Dans le cas du chauffage par laser, c'est le cas transitoire qui est intéressant et il faut prendre en compte les capacités thermiques. Dans ce cas, il est plus difficile de résoudre l'équation de la chaleur. Il faut alors utiliser d'autres modèles thermiques.

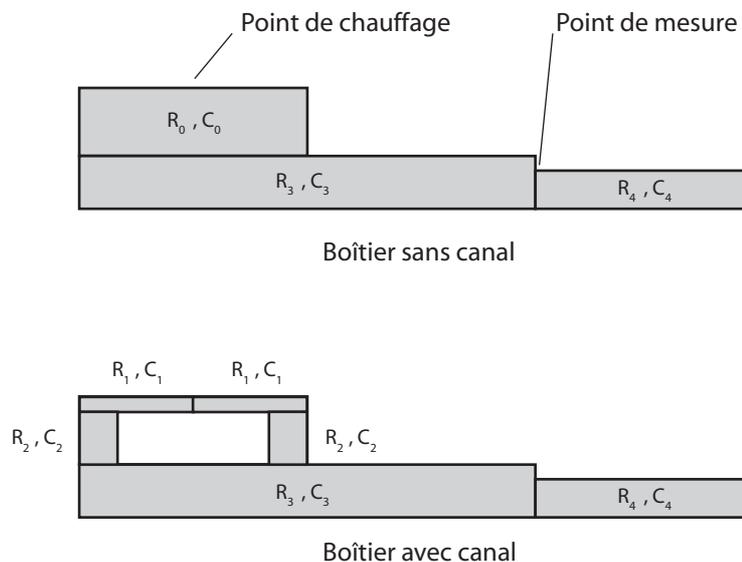
Ce modèle simple permet donc de déterminer grossièrement les ordres de grandeur entrant en jeu. Du fait des hypothèses de départ (pas de convection, pas de radiation, problème unidimensionnel), le modèle s'écarte de la réalité, mais on sait qualitativement quels sont les effets de ces hypothèses sur le résultat final.

Un tel modèle est appliqué au cas de la polymérisation d'une colle époxy dans la section [4.3.3](#).

### 3.4.3 Modèle par analogie électrique

Sur la base du modèle analytique présenté précédemment, on peut franchir une étape supplémentaire en développant un modèle par analogie électrique [65]. L'idée est que la conduction thermique et la conduction électrique sont similaires et ont un diagramme électrique équivalent. La résistance thermique correspond à la résistance électrique, la température correspond à la tension, le flux thermique correspond au courant électrique et la capacité calorifique correspond à la capacité électrique.

On décompose la section à modéliser en résistances et capacités équivalentes (voir figure 3.17). Comme pour le modèle analytique, ces éléments équivalents sont mis en série ou en parallèle, de manière à obtenir un schéma équivalent que l'on utilise dans un programme de simulation électrique (PSpice). La consigne est la température au point où se trouve la brasure. Plus précisément, on impose un profil de température (rampe constante, palier, puis refroidissement). On peut alors mesurer le courant (le flux thermique) à l'endroit de la brasure (cela correspond à la puissance optique qui arrive sur le point de brasure), ainsi que la tension (température) au centre du boîtier.



**Fig. 3.17:** Décomposition en résistances et capacités.

Le schéma électrique équivalent qui en résulte est représenté sur la figure 3.18.

En lançant la simulation, on obtient les résultats représentés dans les figures 3.19 et 3.20.

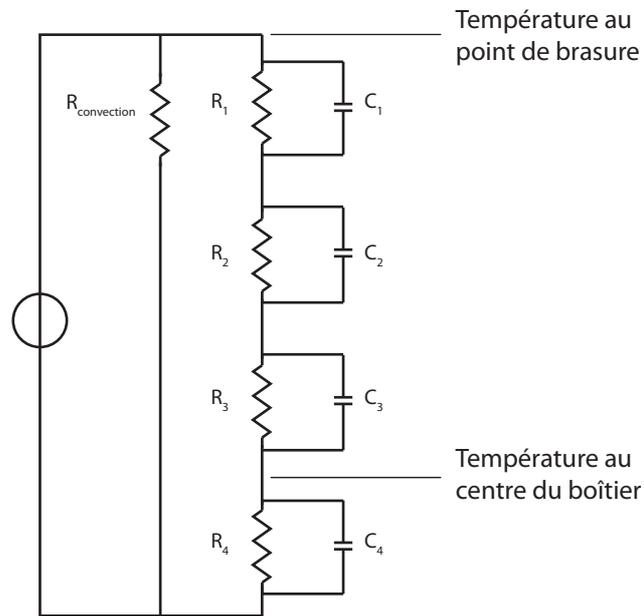


Fig. 3.18: Schéma équivalent.

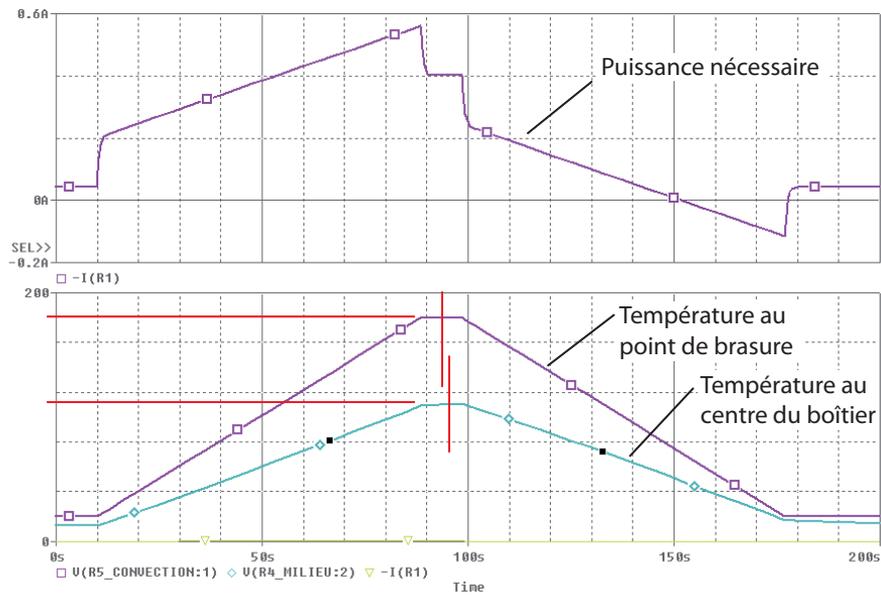
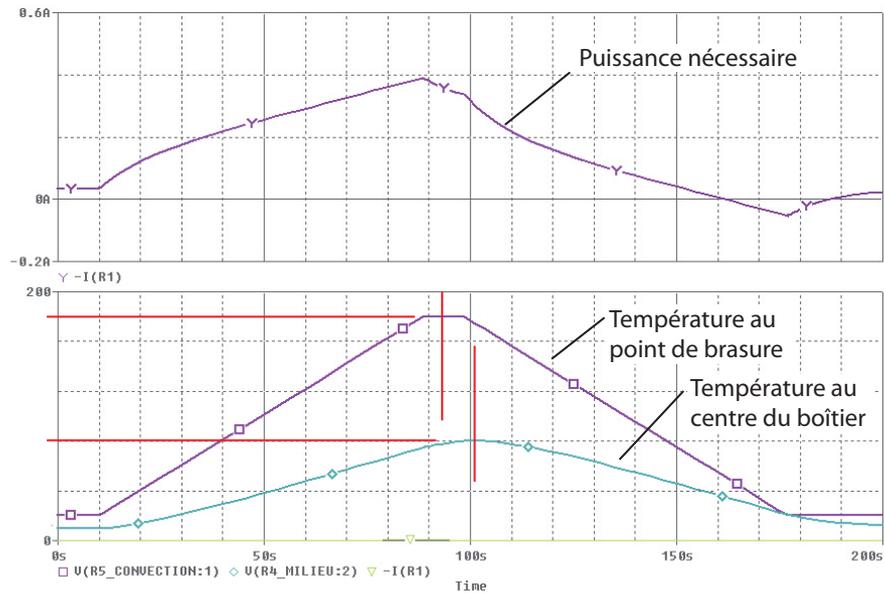


Fig. 3.19: Simulation par analogie électrique, version sans canal.

On constate que le profil de température au centre du boîtier a la même allure que le profil de température à l'endroit de la brasure. Dans le cas du boîtier avec canal, la température au centre du boîtier est inférieure à celle pour le boîtier sans canal, ce qui est le résultat recherché. On constate



**Fig. 3.20:** Simulation par analogie électrique, version avec canal. On notera le plus grand écart entre les températures au point de brasure et au centre du boîtier, ainsi qu'un décalage temporel du maximum de température plus important.

aussi un décalage temporel de la température maximum entre le point de chauffage et le centre du boîtier. Ce décalage temporel est plus important dans le cas avec canal.

On peut aussi obtenir l'allure du courant, qui correspond à la puissance optique nécessaire. On obtient les mêmes allures que ce qui a été mesuré lors d'un chauffage asservi par pyromètre (voir section 3.3.4). On constate aussi que les constantes de temps sont différentes. Dans le cas avec canal, on a besoin de moins de puissance que dans le cas sans canal. C'est similaire à ce que l'on peut voir avec les simulations numériques : le canal a donc deux effets : réduction de la température au centre du boîtier, diminution de la puissance nécessaire pour obtenir la température de fusion.

### 3.4.4 Simulations numériques

Le modèle par analogie électrique permet de voir l'effet de la capacité thermique de la matière. Par contre les pertes par convection ne sont pas totalement prises en compte. De même, dans le cas de notre boîtier en LTCC, la section du transfert de chaleur n'est pas constante : on parle d'étalement thermique [63]. Normalement, lorsque la section augmente, la résistance thermique diminue, mais ce n'est pas toujours le cas : l'étalement thermique est parfois pénalisant. C'est typiquement le cas pour un chauffage laser: la source de chaleur est localisée sur une section qui est faible par rapport à la section du boîtier dans laquelle la conduction a lieu. On peut calculer la résistance thermique due à l'étalement, mais il est difficile de la prendre en compte dans un modèle analogique.

Pour prendre en compte les paramètres difficiles à modéliser avec les précédentes méthodes, une simulation numérique est nécessaire.

#### Définition du modèle

Les simulations ont été réalisées dans COMSOL. On utilise un modèle thermique en deux dimensions, en régime transitoire. Le boîtier est d'abord défini géométriquement, puis on définit les paramètres thermiques du LTCC (voir tableau 3.1), ainsi que les conditions aux bords (puissance du laser, pertes par convection et conduction).

Propriété	Symbole	Valeur	Unité
Conductivité thermique	$k$	3	W/m/K
Masse volumique	$\rho$	3100	kg/m <sup>3</sup>
Capacité calorifique	$C_P$	733	J/kgK

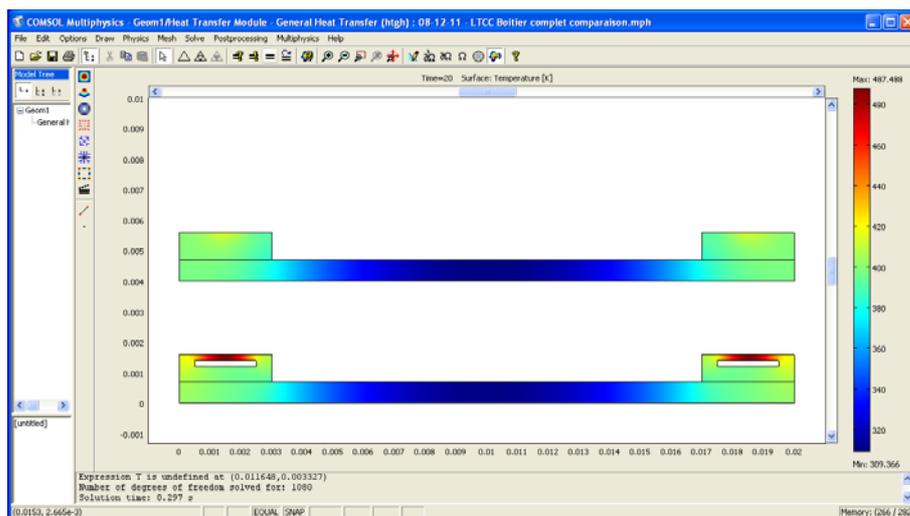
**Tab. 3.1:** Propriétés thermiques du LTCC.

Une première simulation permet de comparer l'effet du canal sur l'échauffement du système (voir figures 3.21 et 3.22). Les deux simulations sont réalisées pour la même valeur de flux thermique au point de brasure. Il est intéressant de remarquer que dans les deux cas, la température au centre du boîtier est très proche, cela semble logique puisque la même quantité de chaleur est apportée par le laser. Par contre, la température au point de brasure est beaucoup plus élevée dans le cas avec le canal. On peut donc conclure les points suivants:

- Pour une même puissance laser donnée, l'échauffement du centre du boîtier est similaire dans les deux cas. Le canal n'a pas beaucoup d'influence sur l'échauffement du centre du boîtier.

- A puissance d'entrée égale, le canal permet d'augmenter la température à l'endroit de la brasure.

C'est ce dernier point qui est intéressant. Avec le canal, on cherchait à diminuer l'échauffement du centre du boîtier. On y arrive effectivement puisque le temps nécessaire à la fusion du joint est inférieur dans le cas avec le canal. En d'autres termes, l'écart de température entre la brasure et le centre du boîtier est supérieur lorsque l'on utilise un canal.

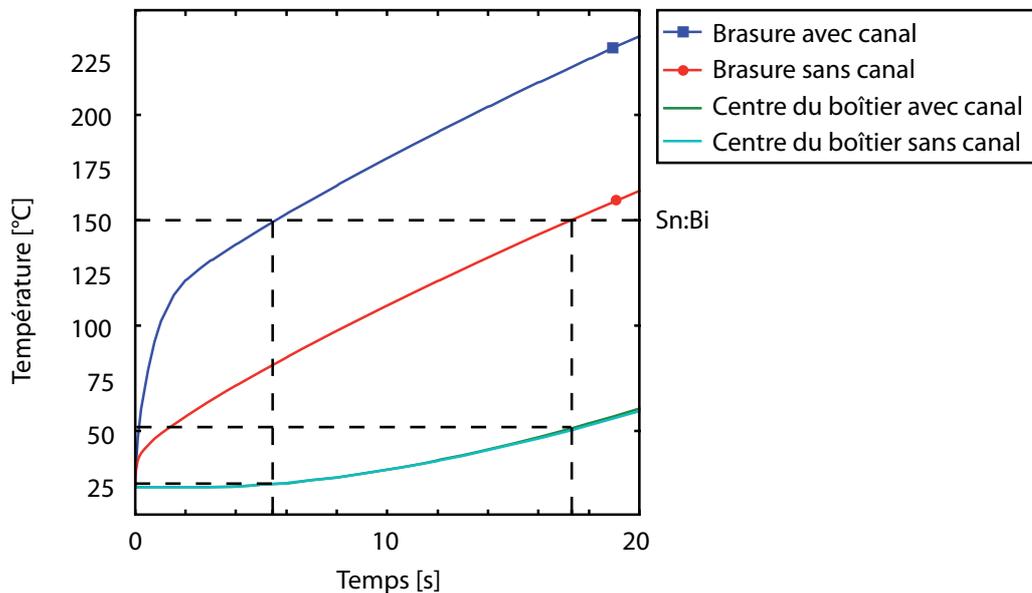


**Fig. 3.21:** Résultat de simulation COMSOL, pour une puissance fixe donnée, comparaison des versions sans et avec canal.

Une seconde simulation permet de comparer plusieurs géométries de canaux (voir figures 3.23 et 3.24). On compare notamment l'effet de la largeur du canal et de sa position. On constate qu'il faut réduire l'épaisseur entre le point de chauffage et le haut du canal. Plus le canal se trouve près de la brasure, plus l'échauffement sera grand. La largeur du joint est apparemment moins critique.

On rappelle que le but de ces modèles est principalement de déterminer l'effet du canal sur l'échauffement de centre du boîtier. On ne prend pas en compte le capot en verre, ni la brasure. A chaque fois, on compare les températures atteintes dans le cas avec canal et dans le cas sans canal.

En voyant ces résultats, on pourrait penser qu'il est inutile de faire les modèles analogiques ou par analogie électrique, puisque la simulation numérique donne des résultats rapidement. Mais les simulations numériques ont des désavantages : si on ne connaît pas les ordres de grandeur du résultat auquel on peut s'attendre, on n'a pas de moyen de détecter des erreurs grossières de simulation (conditions aux limites, maillage, propriétés des matériaux). Les deux précédents modèles, simples à établir, sont nécessaires pour



**Fig. 3.22:** Graphe des températures, pour une puissance fixe donnée, comparaison des versions sans et avec canal.

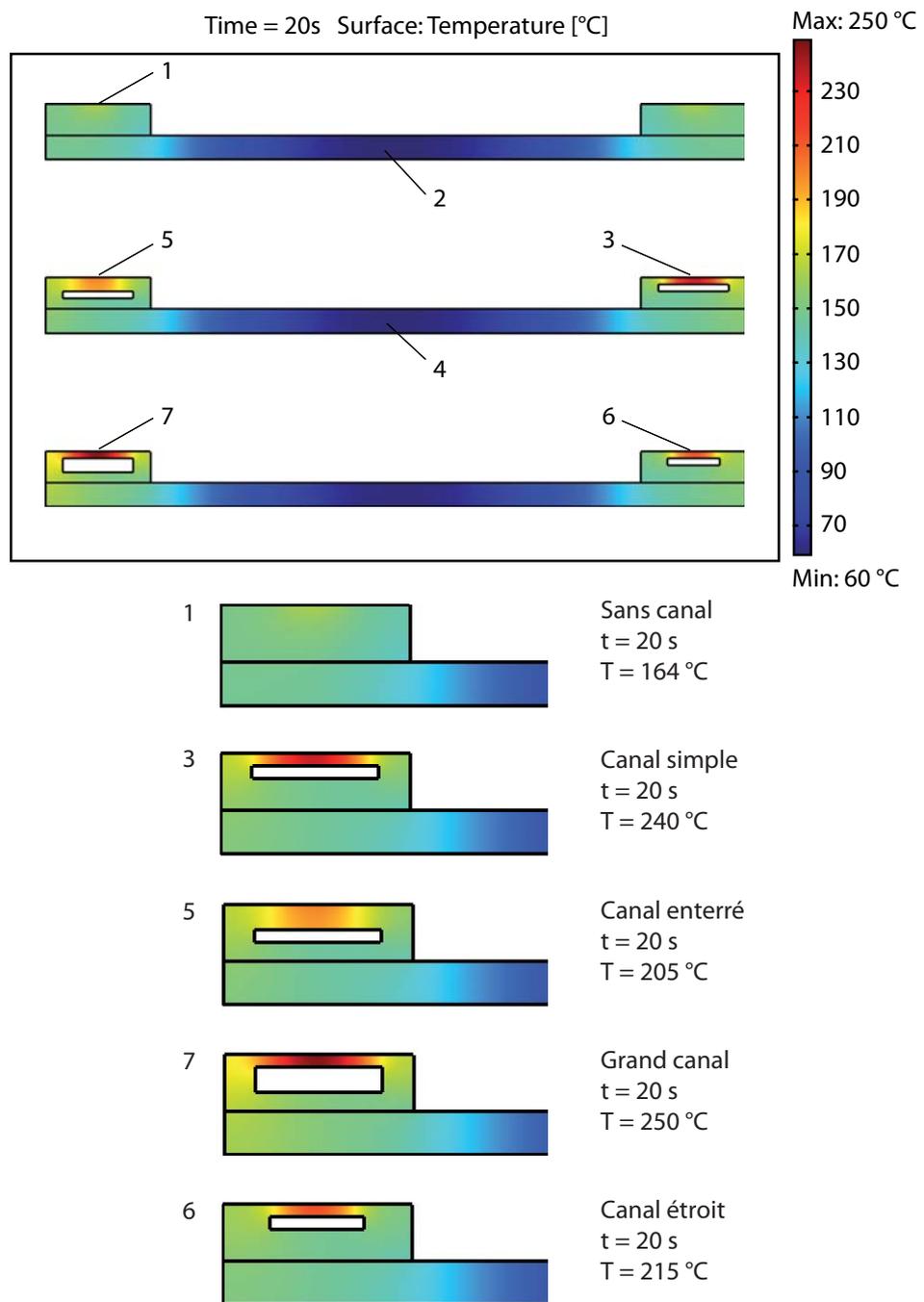
obtenir un point de comparaison avec les simulations.

### Limites

Il est très difficile de simuler un modèle complet dans le but de prévoir son comportement. Dans notre cas, il aurait fallu prendre en compte le cordon de brasure, la vitre, le taux d'absorption du faisceau laser, etc. Ce sont des paramètres qui deviennent difficiles à intégrer, notamment l'absorption du faisceau laser ou le comportement thermique de la brasure lorsqu'elle entre en fusion. Mais il s'agit plutôt de déterminer les effets qui sont importants et lesquels sont négligeables. Ici, nous avons voulu déterminer l'effet de la cavité sur l'échauffement, c'est pourquoi on ne s'intéresse qu'au fond du boîtier "nu".

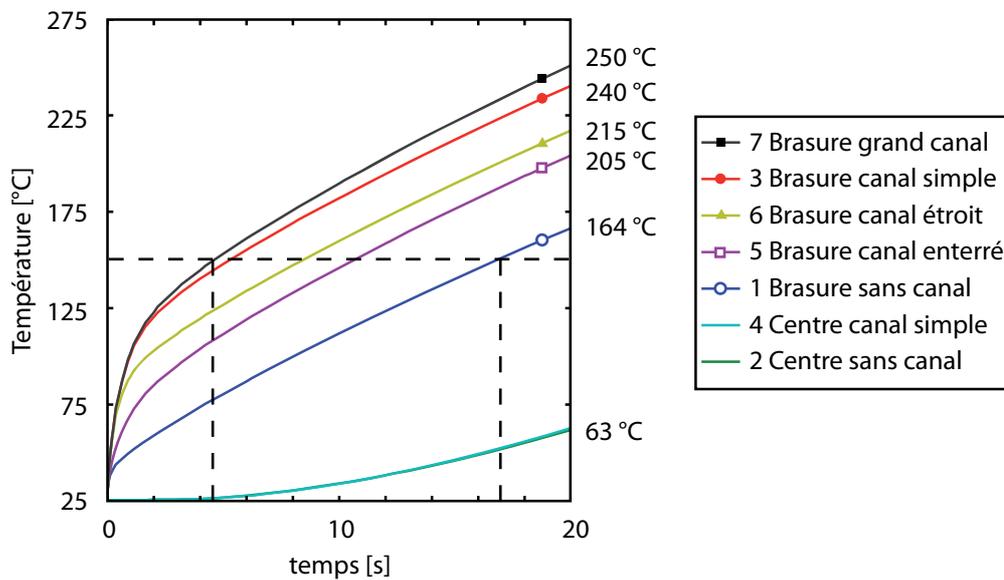
### 3.4.5 Analyse dimensionnelle

L'analyse dimensionnelle est une méthode qui permet d'aborder l'étude de problèmes dont les paramètres dominants sont mal identifiés, qui ne sont pas modélisés sous la forme d'équations ou seulement sous la forme d'équations difficiles à résoudre. Elle permet alors de réduire systématiquement le



**Fig. 3.23:** Résultat de simulation COMSOL, pour une puissance fixe donnée, comparaison des formes de canaux.

nombre de paramètres du problème et d'obtenir, sous certaines conditions, leur ordre de grandeur.



**Fig. 3.24:** Graphe des températures, pour une puissance donnée, comparaison des formes de canaux.

L'analyse dimensionnelle est un outil puissant dans les domaines où les lois physiques utilisées habituellement ne rendent pas compte des aspects essentiels. Par exemple, si on étudie l'équilibre de très petits composants submillimétriques en s'appuyant sur l'équation de Newton, on risque fort de passer à côté des forces de surface qui seront à cette échelle bien plus importantes que les forces d'inertie. En revanche, il sera souvent difficile d'établir des relations entre les paramètres dont on pense à priori qu'ils pourraient jouer un rôle. L'analyse dimensionnelle permet dans ces cas de poser des relations entre les grandeurs qui seront susceptibles de fournir un modèle efficace du comportement.

L'analyse dimensionnelle nécessite une bonne expérience du domaine pour être très efficace. On peut aussi trouver des relations entre certaines variables qui ne sont valables qu'à l'intérieur de certaines limites ou trouver des domaines dans lesquels les relations sont linéaires. C'est une méthode de l'ingénieur qui permet de créer des modèles idoines dans des cas où il n'est pas possible de dégager des lois générales.

Dans le cas de l'étude d'une opération de polymérisation décrit dans le paragraphe 4.3, nous traitons le problème grâce à l'analyse dimensionnelle liée à l'expérimentation. A défaut de pouvoir comprendre le phénomène, on peut prévoir son comportement.

### 3.4.6 Conclusion

Dans ce chapitre on a montré qu'il est possible de modéliser le comportement thermique d'un boîtier lors de la fermeture. Dans un cas simple, un modèle analytique permettant de déterminer les ordres de grandeur peut être suffisant. Pour des systèmes plus complexes, les simulations numériques peuvent permettre de prédire et comprendre le comportement thermique et aussi estimer l'effet de différentes variantes. Il faut bien entendu avoir un peu d'expérience pour juger de la complexité du cas, mais on minimise considérablement les risques d'erreurs en suivant la démarche itérative suivante :

- Modèle analytique pour déterminer les ordres de grandeur.
- Dans les cas un peu complexes: modèle par analogie électrique.
- Dès que les ordres de grandeur sont définis, les simulations numériques permettent de tenir compte des effets transitoires et de la convection.

Cela permet d'éviter les erreurs de simulation grossières dues à un problème mal posé, mais aussi de gagner du temps si l'on considère que le modèle analytique simple est suffisant pour évaluer le problème posé.

## Chapitre 4

# Démonstrateurs

Ce chapitre regroupe les différents démonstrateurs qui ont été réalisés dans le cadre de cette thèse. Tous ces démonstrateurs présentent des différences, que ce soit au niveau de la nature du système à encapsuler ou au niveau de la méthode proposée. Cela montre bien que pour chaque problème, il faut chercher une méthode d'encapsulation idoine, répondant exactement aux besoins, et qui ne sera peut être pas applicable dans d'autres conditions. Le premier exemple, la réalisation d'un boîtier pour MEMS optique, est le plus typique du domaine des MEMS. La solution se rapproche des boîtiers céramiques standard disponibles sur le marché. Par contre, la méthode utilisée, plus flexible, peut s'appliquer à des séries plus petites.

Le problème de l'échauffement localisé est traité dans le cas de la polymérisation de colle époxy (4.3), alors que les méthodes de fermeture hermétique sont surtout décrites dans le boîtier pour MEMS optique (4.1) et dans le cas de l'encapsulation de rubidium (4.2).

### 4.1 Développement d'un boîtier pour MEMS optique

Dans cette partie, nous traitons d'une méthode de fabrication de boîtier hermétique pour un microsystème nécessitant une atmosphère contrôlée et plusieurs interfaces électriques et optiques.

### 4.1.1 Définition du problème

Il s'agit de concevoir et réaliser un prototype de boîtier hermétique pour un microsystème optique électrostatique (Micro-Optical Electro Mechanical System, MOEMS), conçu pour une application dans le domaine spatial. Le MOEMS est constitué de deux parties superposées : une partie électrode et une matrice de 128 micro-miroirs. Chaque miroir nécessite 3 connexions électriques pour son actionnement. Au moment de la demande de faisabilité d'un boîtier hermétique, le MOEMS est déjà largement défini (dimensions, interface électrique), et son design ne peut être changé.

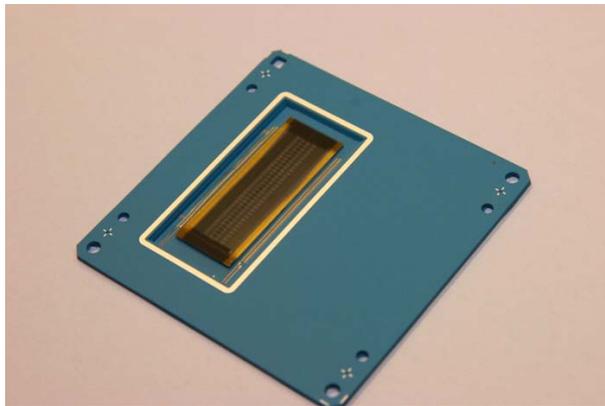


Fig. 4.1: Boîtier prêt à être scellé.

### 4.1.2 Analyse fonctionnelle

La première étape consiste à réaliser une analyse permettant de trouver les solutions techniques optimales. Il faut prendre en compte les besoins exprimés par le client, tout en les reformulant et en les complétant en fonction des contraintes liées à la méthode d'encapsulation. La première étape de l'analyse fonctionnelle est l'étude des besoins.

#### Besoins

Nous donnons ici les besoins exprimés par le fabricant du MEMS, ainsi que les fonctions qui en résultent. La description faite par le fabricant du MEMS est résumée ainsi : on veut un boîtier hermétique pour un MEMS optique. Le MEMS requiert environ 400 connexions électriques, le boîtier doit pouvoir être fixé mécaniquement sur un posage permettant son alignement avec des fibres optiques. Il faut une vitre pour permettre aux signaux optiques

d'atteindre la matrice de micro-miroirs. Les miroirs ne doivent pas subir de contrainte thermique lors de la fermeture du boîtier. Les miroirs ne doivent pas osciller pendant l'utilisation du microsystème. Finalement, le boîtier doit être compatible à la directive RoHS (Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment) [66].

## Fonctions

Il faut maintenant traduire les besoins en termes d'ingénieurs : les fonctions. On reprend ci-dessous les fonctions principales.

**Assurer la connectivité électrique.** On doit connecter le MEMS à un contrôleur permettant l'actionnement de chacun des miroirs. Des plages de bonding sont placées sur deux bords du chip électrode. Il faut donc que l'on puisse faire un bonding entre le chip et le boîtier. D'autre part, l'électronique de commande doit pouvoir être reliée au boîtier par un connecteur.

**Assurer une interface optique.** La solution doit garantir un lien optique vers l'extérieur. La solution est d'utiliser une vitre scellée. La vitre reçoit un coating anti-reflets.

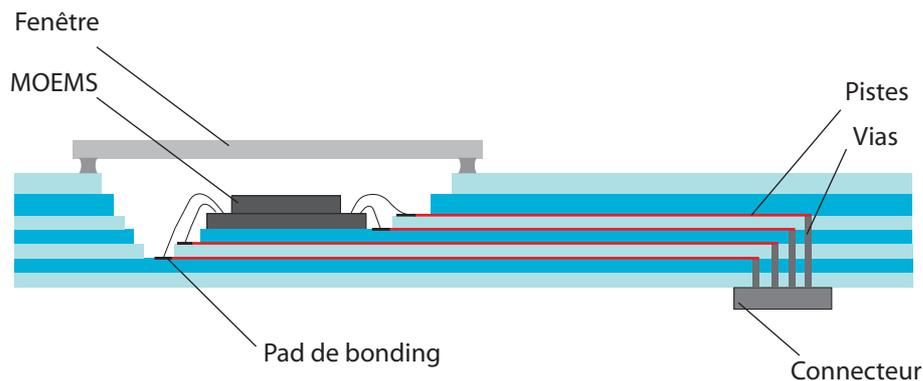
**Assurer le positionnement mécanique.** Le chip doit pouvoir être positionné précisément sous un réseau de fibres optiques. La position du boîtier doit pouvoir être ajustée par rapport à ce réseau de fibres.

**Permettre le contrôle de l'atmosphère dans le boîtier.** Les micro-miroirs doivent être scellés sous atmosphère sèche, pour garantir la stabilité et la fiabilité à long terme. Comme le système ne dispose pas d'un amortissement intégré, il faut un milieu dissipatif: les miroirs ne peuvent pas être scellés sous vide.

**Minimiser l'impact thermique sur le MEMS lors du scellement.** Le boîtier doit minimiser la quantité de chaleur transmise au MEMS pendant l'opération de fermeture. Les micro-miroirs se déforment lorsqu'ils sont soumis à des températures supérieures à 160 °C environ.

### 4.1.3 Description de la solution.

En fonction des contraintes décrites dans la partie précédente, la solution suivante est proposée : le boîtier est composé de deux parties principales. La base est faite de LTCC (DuPont 951). Une vitre est brasée sur cette base, par l'intermédiaire d'une brasure eutectique Sn:Bi (voir figures 4.2 et 4.1).



**Fig. 4.2:** Vue schématique du boîtier.

Le boîtier consiste en une base de LTCC constituée de 10 couches, incluant une cavité pour le MEMS. Le chip est collé dans la cavité et relié à des plages de bonding par des fils en or. Les plages de bonding, également en or, sont reliées au connecteur à travers les couches de LTCC par des pistes et des vias. Ces pistes, vias et plages de bonding sont sérigraphiés sur les tapes de LTCC crues. Le bas du boîtier est composé de 5 couches de LTCC sur lesquelles sont sérigraphiées les pistes et les plages de bonding. Ce sont des couches de  $114 \mu\text{m}$  d'épaisseur. Les parois de la cavité sont formées par des couches de LTCC de  $254 \mu\text{m}$  d'épaisseur. La vitre est brasée sur le boîtier pour garantir l'herméticité. Une couche d'anti-reflet est déposée sur la vitre. Un cordon de métallisation est déposé sur le verre, dans le but de permettre le mouillage et l'adhésion de la brasure sur le verre. Afin de réduire l'impact thermique sur le MEMS durant l'opération de fermeture, toutes les opérations nécessitant une haute température sont faites avant que le MEMS ne soit collé dans la cavité. Les dernières opérations (bonding et brasure de la vitre) sont faites à basse température, réduisant ainsi l'impact thermique sur le MEMS.

### 4.1.4 Méthode de développement

La conception proprement dite commence par des croquis sur papier, en tenant compte des contraintes dimensionnelles et techniques, ainsi qu'en

gardant en tête le résultat de la première itération de l'analyse fonctionnelle. On détermine ainsi les dimensions générales du boîtier, le nombre de couches nécessaires et le layout général des pistes conductrices et des vias. Dans le cas de ce projet, il a été nécessaire de réaliser les plages de bonding du boîtier sur deux couches différentes, la résolution de sérigraphie étant trop faible par rapport au pas des plages se trouvant sur le MEMS. Cela contraint le design entier du boîtier, et ne peut être résolu que par réflexion. Après cette première phase de développement, l'analyse fonctionnelle entre dans une nouvelle itération : les premiers choix techniques sont remis en question.

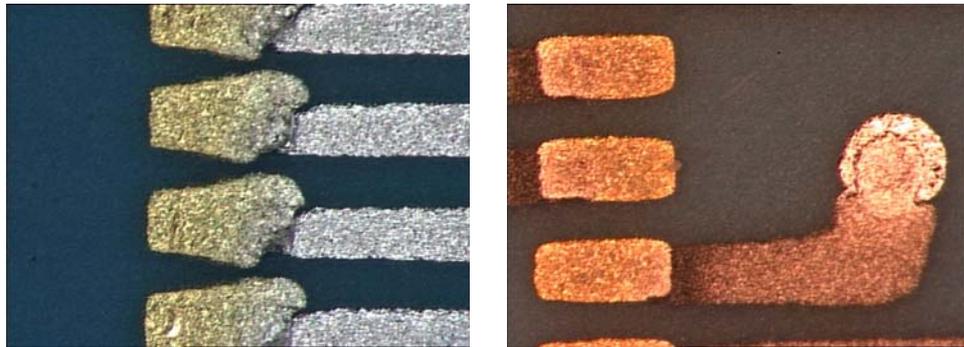
Rapidement, on se rend compte que le boîtier sert d'interface entre deux échelles différentes : microscopique (le MEMS) et macroscopique. Ceci est particulièrement flagrant en ce qui concerne l'interface électrique. Du côté du MEMS, les 400 connexions sont réparties sur deux côtés de 30 mm de longueur environ. La largeur d'un pad de bonding est de 120  $\mu\text{m}$ , le pas est de 150  $\mu\text{m}$ . De l'autre côté, le connecteur choisi présente des billes de brasure d'un diamètre proche du millimètre, avec un pas de 1.3 mm. Il faut trouver une technologie qui est compatible avec ces deux échelles. Les procédés standard de sérigraphie permettent des pas de 300  $\mu\text{m}$  (largeur de piste de 150  $\mu\text{m}$ ). Cela convient pour le connecteur, mais pas pour le chip : il faut utiliser deux couches décalées pour garantir l'alignement. La résolution de sérigraphie peut être améliorée en utilisant des trames fines (500 mesh, fils de 18  $\mu\text{m}$ ), ou en les traitant avec un revêtement empêchant le mouillage des pâtes de sérigraphie sur la trame. Dans ce cas, on peut atteindre des largeurs de piste de l'ordre de 40  $\mu\text{m}$  [67]. La technique de photo-imageage permet aussi de telles résolutions [68].

#### 4.1.5 Choix des matériaux et des pâtes de sérigraphie

On choisit le système de LTCC DuPont (DP) 951 pour sa facilité de mise en oeuvre. Ce système est déjà utilisé au LPM pour la réalisation de capteurs et de systèmes pneumatiques. Il s'agit dans cette gamme de choisir trois différentes pâtes pour trois usages et fonctions différentes : les plages de bonding, les pistes ainsi que les vias. La contrainte principale vient des plages de bonding, puisque nous disposons d'un équipement ne permettant que l'utilisation de fils de bonding en or. C'est pourquoi la pâte des plages de bonding doit aussi être de l'or (CDF-34 ou DP5472). Pour les pistes, deux différentes pâtes ont été testées : DP6146 (Ag-Pd) et DP6145 (Ag). Deux pâtes de via ont aussi été testées : DP6138 (Ag-Pd) et DP6141 (Ag). La séquence de sérigraphie est la suivante :

- vias
- pistes
- plages de bonding

On pourrait inverser la sérigraphie des plages et des pistes, mais l'alignement est plus facilement réalisable dans cet ordre. Le premier point constaté est que les deux pâtes de vias sont équivalentes. Les deux sont faciles à sérigraphier et satisfont la fonction de remplissage de via en assurant la connexion électrique. Pour les plages de bonding, la pâte d'or DP5472 présente des décollements après cuisson (voir figure 4.3). La facilité de sérigraphie est équivalente à la pâte CDF-34, mais cette dernière ne présente pas de décollement, et la résolution obtenue est meilleure. Pour les pistes, la pâte DP6145 est plus facile à sérigraphier que la DP6146. Pour les couches non enterrées, la DP6146 se gondole [69]. Malgré ces deux inconvénients, on préfère la DP6146 qui présente une meilleure compatibilité avec la CDF-34 utilisée pour les plages de bonding. Dans les deux cas, on constate un effet Kirkendall [70] entre les plages de bonding et les pistes, sans effet sur la conductivité de l'ensemble.



**Fig. 4.3:** Vue détaillée des plages de bonding. Largeur de piste: 150  $\mu\text{m}$ .  
A gauche : DP5472 pour les plages de bonding, 6145 pour les pistes, on observe un décollement. A droite : CDF34 pour les plages de bonding, 6146 pour les pistes. Les plages ne sont pas déformées. Noter la diffusion entre les plages et les pistes.

En résumé, les pâtes choisies sont : DP6141 (Ag) pour les vias, DP6146 (Ag:Pd) pour les pistes, CDF-34 (Au) pour les plages de bonding.

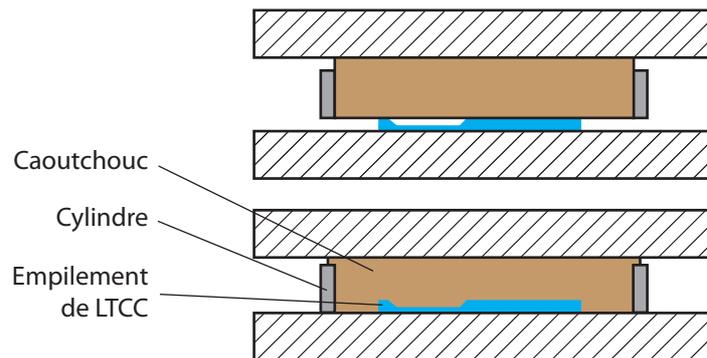
#### 4.1.6 Fabrication du boîtier en LTCC

Les détails de fabrication de ce boîtier en LTCC se trouvent dans [71]. On mentionne toutefois ici un point critique qui a fait l'objet de développements, à savoir la technique de lamination pseudo-isostatique, permettant une lamination uniforme des cavités avec un équipement beaucoup plus simple qu'une presse isostatique.

L'empilement de LTCC est laminé sur une presse uniaxiale, en utilisant un

Fonction	Pâte	Matériau	Commentaires
<b>Via fill</b>	<b>DP6141</b>	<b>Ag</b>	
Via fill	DP6138	Ag-Pd	
Piste	DP6145	Ag	facile à sérigraphier, ne gondole pas, mauvaise compatibilité avec les plages en or
<b>Piste</b>	<b>DP6146</b>	<b>Ag-Pd</b>	sérigraphie plus difficile que DP6145, gondole en surface, bonne compatibilité avec les plages en or
<b>Plages</b>	<b>CDF-34</b>	<b>Au</b>	bonne compatibilité avec DP6146
Plages	DP5472	Au	décollements observés

**Tab. 4.1:** Résumé des pâtes de sérigraphie testées. En gras, les pâtes retenues pour l'application.



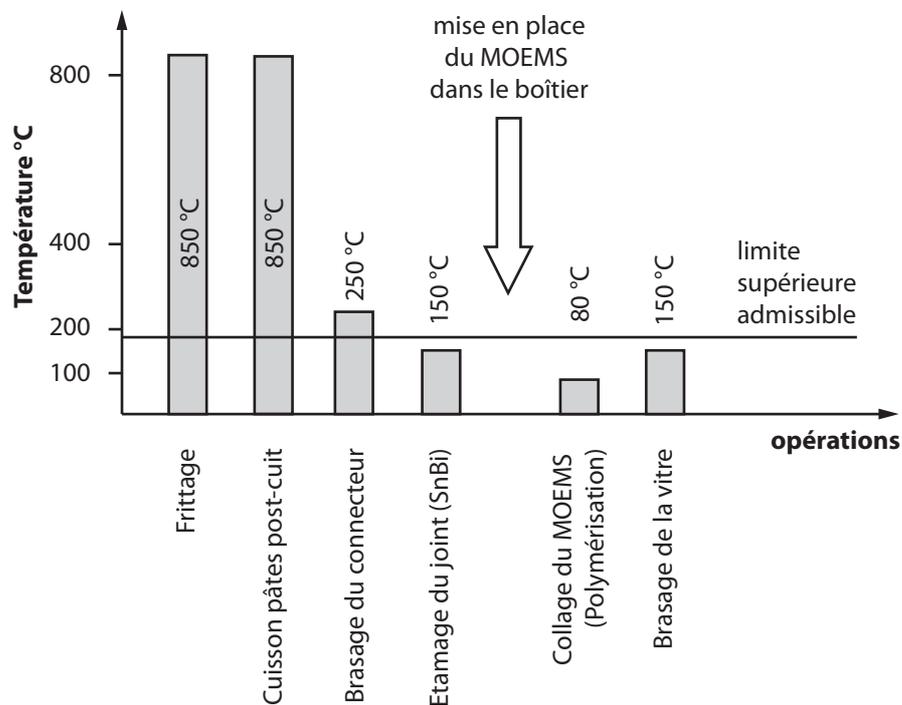
**Fig. 4.4:** Vue schématique de la méthode utilisée pour la lamination. Noter le cylindre extérieur qui empêche la déformation du caoutchouc dans le plan.

caoutchouc circulaire contraint par un anneau (voir figure 4.4). L'anneau extérieur évite les déformations du caoutchouc dans le plan ce qui évite la destruction de l'empilement de LTCC et assure une pression de lamination beaucoup plus uniforme, calculable et contrôlable.

#### 4.1.7 Scellage hermétique

La séquence de fermeture doit être soigneusement réfléchi afin de minimiser l'impact thermique sur le micro-système encapsulé. Il faut placer le micro-système dans le boîtier le plus tard possible. Les seules opérations après

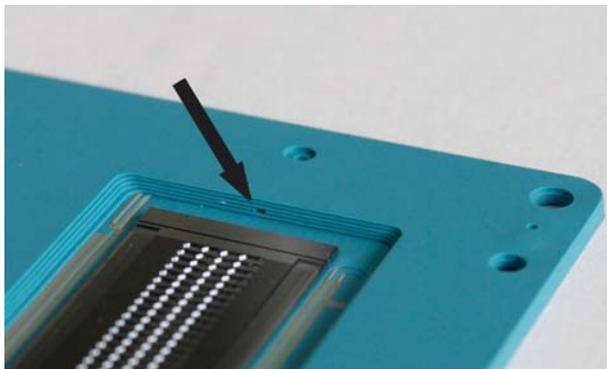
dépose du microsysteme dans le boîtier sont le collage du chip, le bonding et le scellement de la vitre. Pour ce microsysteme, la température maximum acceptable est de  $160^{\circ}\text{C}$  pendant 5 minutes. Le MEMS subit deux chauffages : la polymérisation de la colle époxy ( $80^{\circ}\text{C}$  pendant 10 minutes) et la brasure de la vitre (pic à  $150^{\circ}\text{C}$  pendant 30 secondes environ). Pour ce projet, les deux opérations de brasage (connecteur et vitre) ont été réalisées dans un four. Pour éviter que le connecteur ne se déplace lors de la brasure de la vitre, on utilise une brasure Sn:Cu:Ag ( $220^{\circ}\text{C}$ ) pour le connecteur, et de la brasure Sn:Bi ( $140^{\circ}\text{C}$ ) pour la vitre. On notera que toutes ces pâtes de brasure ne contiennent pas de plomb, pour être conforme à la norme RoHS.



**Fig. 4.5:** Températures maximales des opérations. Le microsysteme est placé dans le boîtier lorsque toutes les opérations à haute température ont été effectuées.

Un autre point à prendre en compte est le différentiel de pression induit lors du refroidissement du boîtier à la fin de l'étape de scellement. Si l'opération est réalisée au four, l'air dans le boîtier refroidit moins vite que l'air à l'extérieur. Dans ce cas, lorsque le joint de brasure est encore liquide, la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur du boîtier peut mener à la création d'un trou dans le joint de brasure. L'autre cas possible est si le four utilise un refroidissement par ventilation, la pression à l'extérieur du boîtier peut alors augmenter pour mener au même phénomène. Pour éviter cela, on utilise un canal dans le corps du boîtier, pour permettre l'équilibrage

des pressions externe et interne. Ce canal est alors scellé ultérieurement par une pastille de brasure, chauffée localement. On évite ainsi le différentiel de pression.



**Fig. 4.6:** Canal pour équilibrer les pressions lors de la brasure de la vitre.

Cet effet est limité lorsque le chauffage est localisé (par exemple avec un laser), mais il apparaît néanmoins. Dans le cas de ce boîtier, il n'a pas été possible d'utiliser la diode laser à disposition, sa puissance étant trop faible. La puissance maximum du laser est à déterminer en fonction de la longueur du cordon à chauffer. Pour des boîtiers de diamètre d'environ 10 mm, une puissance de 30 W est suffisante. Pour chauffer des cordons de longueur plus grande, il faut soit un laser plus puissant, soit augmenter l'absorption thermique du matériau qui absorbe le laser. Dans le cas d'un verre métallisé, l'absorption est faible et il est difficile de l'augmenter. La dernière possibilité est de réaliser un chauffage par point, comme décrit dans le paragraphe 3.3. Mais comme nous l'avons vu, les deux parties ne peuvent pas bouger l'une par rapport à l'autre.

#### 4.1.8 Aspects économiques

Il est difficile de déterminer le coût d'un boîtier tel que développé pour ce projet. On peut néanmoins estimer les coûts principaux, composés de la conception, de la fabrication et de la matière utilisée. Nous donnons les valeurs pour une série de 10 boîtiers.

**Développement et conception** Le temps de développement est déterminé par la complexité du système à encapsuler (par exemple nombre et position des connexions), mais aussi par les fonctions nécessaires (sensibilité à la température, nécessité d'une atmosphère protectrice). Il s'agit aussi de déterminer les propriétés mécaniques du boîtier : taille, trous de fixation,

position des composants et choix du connecteur. Dans notre cas, on estime cette phase à 4 mois, y compris la réalisation des layouts à l'aide d'un logiciel. Il s'agit d'un processus itératif, en collaboration étroite avec le fabricant du système. Deux personnes sont nécessaires pour cette tâche, mais leur taux de travail est estimé à 50%.

**Fabrication** Cette partie consiste en la fabrication des écrans de sérigraphie, la découpe laser du LTCC, la sérigraphie, la lamination, la cuisson, les post-opérations, le collage et bonding du système dans le boîtier, les tests électriques puis le scellement. Les temps pour ces tâches sont résumés dans le tableau 4.2.

Opération	Temps
Découpe Laser	4 jours
Sérigraphie	5 jours
Lamination et cuisson	2 jours
Sérigraphie	2 jours
Collage et bonding du système	5 jours
Tests électriques et fermeture	5 jours

**Tab. 4.2:** Durées des opérations de fabrication. Valeurs mesurées dans le cas d'une fabrication manuelle.

**Matière** La matière représente une petite partie du coût par rapport au développement et à la fabrication. Ces coûts sont résumés dans le tableau 4.3, ils n'incluent que la base en LTCC, le connecteur et la vitre ne sont pas inclus. Le coût d'une tape de LTCC est de 3 €, y compris la pâte de sérigraphie. Le coût total de la matière pour un boîtier est estimé à environ 33 €.

Couche LTCC	Quantité	Coût, y compris la pâte, en €
1-5 (114 $\mu\text{m}$ )	50	150
6-9 (254 $\mu\text{m}$ )	40	120
10 (114 $\mu\text{m}$ )	20	60
<b>Total</b>	110	330

**Tab. 4.3:** Coût de la matière

La principale source du coût est liée au développement. L'équipement nécessaire est relativement léger : ordinateur + logiciel de routage spécialisé, laser de découpe, sérigraphieuse, four à bande, bondeuse.

### 4.1.9 Résultats

Le rendement des connexions électriques est bon : sur trois boîtiers testés, seuls deux miroirs sur les 128, toujours au même endroit, ne sont pas fonctionnels. Cela représente au mieux 0 connexion défectueuse sur 384, au pire 6 connexions sur 384 (il est néanmoins peu probable que les trois connexions d'un miroir défectueux soient interrompues). Cela correspond à 0.5%. Il faut relever qu'il s'agit de prototypes et que l'alignement des feuilles de LTCC est fait de manière manuelle. On peut encore diminuer le nombre de connexions défectueuses en modifiant le routage des connexions interrompues et en améliorant la méthode d'alignement. Depuis ce projet, un dispositif d'alignement des feuilles LTCC a d'ailleurs été développé au LPM pendant un projet de master [72]. La méthode de lamination par caoutchouc contraint a aussi été améliorée, notamment grâce à l'ajout d'inserts de caoutchouc dans les cavités pendant la lamination. Ces nouvelles techniques de mise en oeuvre du LTCC sont décrites dans [71].

### 4.1.10 Conclusion

Cet exemple montre qu'il est possible de réaliser un boîtier hermétique pour un microsysteme complexe, nécessitant plusieurs types d'interfaces (optique, électrique). Dans ce cas, même si le microsysteme est déjà réalisé, l'analyse fonctionnelle permet de formaliser les besoins et ainsi de trouver les fonctions qui s'y rapportent.

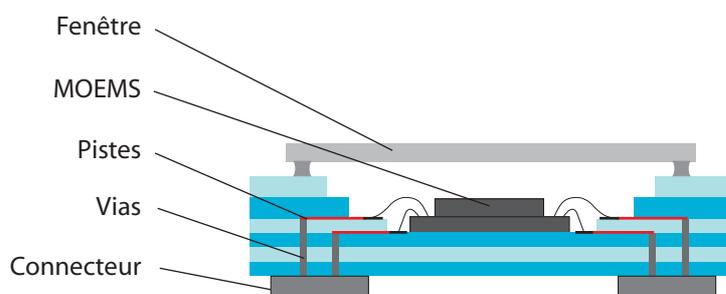


Fig. 4.7: Vue schématique du boîtier symétrique.

Le nombre d'opérations de sérigraphie et le temps de développement sont les principaux facteurs qui influencent le coût de cette solution. Mais il est possible d'en réduire la complexité en réalisant un design symétrique, ce qui est possible si on utilise plusieurs connecteurs au lieu d'un seul (voir figure 4.7). On peut ainsi diminuer le nombre de couches recevant des pistes et le routage est aussi largement simplifié. Les temps de développement et de fabrication seront ainsi réduits. L'autre avantage de la symétrie est qu'elle

permet encore de réduire les déformations du boîtier lors de la cuisson. Pour encore diminuer ces déformations, il faut augmenter l'épaisseur du boîtier et réduire sa largeur.

Le LTCC permet d'assurer l'herméticité ainsi que les connexions électriques. Toutes les opérations visant à assurer ces fonctions, qui nécessitent une haute température, se font avant la mise en place du microsystème dans le boîtier, ce qui permet de limiter l'impact thermique sur le microsystème, même sans utiliser une diode laser pour sceller le boîtier.

Cette méthode permet de réaliser des petites et moyennes séries. La sérigraphie est la partie la plus contraignante : elle devient rentable lorsque le volume de production augmente, c'est ce qui empêche d'utiliser cette solution pour du prototypage, mais des séries d'une dizaine de pièces ou plus sont envisageables.

D'une manière générale, on voit que pour des microsystèmes spéciaux ou complexes, les boîtiers standard ne sont pas adaptés. La solution idoine est l'utilisation du LTCC. Elle convient aux petites et moyennes séries et peut être adaptée à des grandes séries. Pour les microsystèmes plus simples de petites et moyennes séries, les boîtiers standard représentent la solution optimale. Ces boîtiers sont réalisés en HTCC (High Temperature Cofired Ceramic).

## 4.2 Encapsulation de rubidium pour une horloge atomique

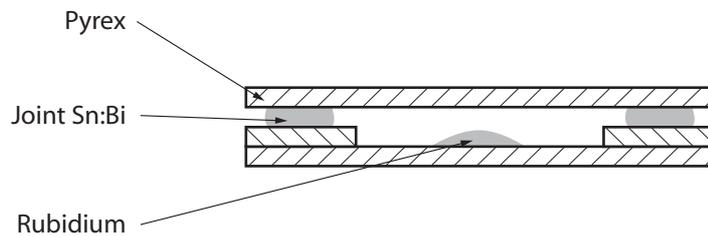
### 4.2.1 Définition du problème

Cette étude s'insère dans le cadre d'un projet visant à optimiser la construction d'horloges atomiques [73]. Il s'agit de développer une méthode permettant d'obtenir de petites cavités transparentes contenant du rubidium. Les principales fonctions demandées sont : bas coût de revient, basse température d'encapsulation, haute herméticité avec atmosphère protectrice, facilité de mise en oeuvre. Le rubidium (Rb) est un métal alcalin utilisé dans les cellules de référence pour les horloges atomiques [74]. Il réagit rapidement en présence d'eau, notamment à l'air libre. Il s'agit donc de l'encapsuler sous atmosphère protectrice. Une atmosphère typique est quelques millibars d'un mélange azote / argon. Dans un souci de réduire les coûts, on cherche une méthode facile à mettre en oeuvre et répétitive. La solution actuelle est basée sur une soudure anodique [37]. Le principal problème est la haute température nécessaire [75], [76], qui entraîne une évaporation du rubidium à encapsuler. On peut légèrement baisser la température nécessaire pour la soudure anodique, mais on doit alors augmenter la tension, ce qui crée des arcs électriques, sans résoudre totalement le problème de l'évaporation du rubidium. Il est donc nécessaire de réduire drastiquement la température et le temps d'encapsulation pour éviter l'évaporation du rubidium, tout en garantissant une bonne herméticité et une bonne compatibilité avec le rubidium encapsulé.

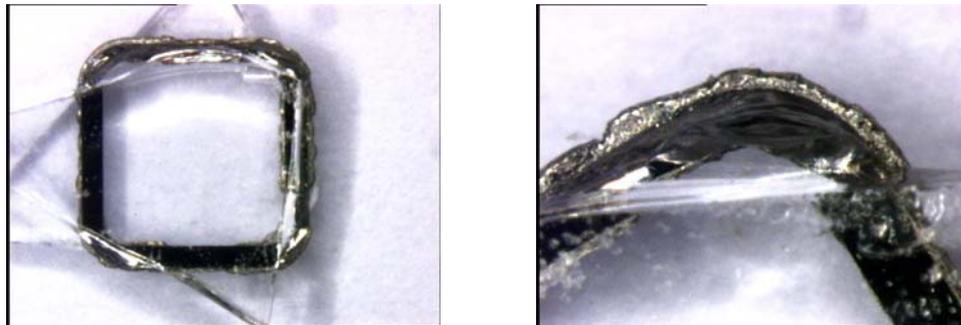
### 4.2.2 Description générale de la solution

La solution consiste en une cellule composée de deux parties en pyrex, assemblées l'une à l'autre par un joint de brasure eutectique Sn:Bi. Sur chaque demi-cellule, on dépose un anneau de métallisation (Ti-Pt-Au) par évaporation. Le Ti (20 nm) est utilisé pour l'adhésion sur le verre, le Pt (200 nm) résiste à la diffusion et l'Au (50 nm) permet le mouillage de la brasure. Ensuite, on sérigraphie un cordon de brasure eutectique Sn:Bi, qui sera passé au four puis nettoyé afin d'enlever le flux. Les deux parties sont brasées l'une à l'autre après dépose du rubidium à l'intérieur de la cavité.

Si la métallisation est réalisée proprement, la résistance de l'ensemble est excellente. Des essais d'arrachement mènent à la rupture du verre, alors que le joint entre le verre et la brasure ne se casse pas (voir figure 4.9).



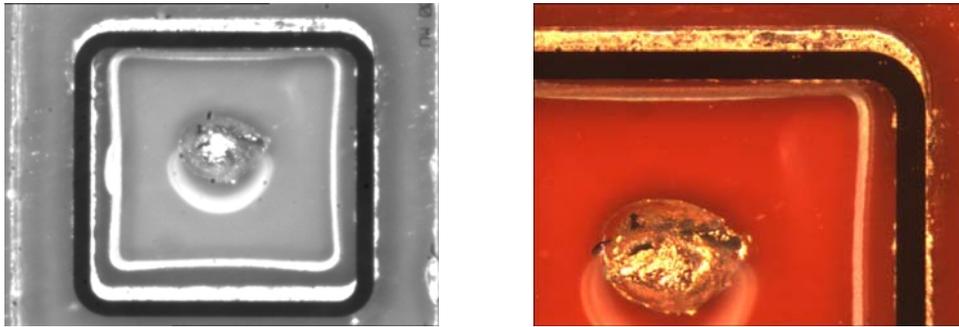
**Fig. 4.8:** Principe de la cellule hermétique.



**Fig. 4.9:** Echantillon ayant subi un test d'arrachage. On remarque que la liaison entre le joint de brasure et le verre reste intacte.

### 4.2.3 Description de la méthode de fermeture

Il est difficile de fermer les capsules, principalement à cause de la réactivité du rubidium avec l'humidité, ainsi que par sa basse température de fusion (environ  $40^{\circ}\text{C}$ ). La séquence d'opération depuis la dépose du rubidium dans la cellule, jusqu'à l'obtention du joint hermétique doit se faire sous atmosphère inerte. On doit aussi minimiser le budget thermique lors de cette opération. Une solution est de réaliser ces opérations dans une boîte à gants contenant de l'azote. Deux méthodes permettent de déposer du rubidium dans la cavité. La première possibilité est d'utiliser du rubidium conditionné dans une ampoule sous vide ou sous argon. Sous atmosphère inerte, une fois l'ampoule brisée, on peut manipuler le rubidium liquide à l'aide d'une micro-pipette. Cette méthode a l'avantage d'être simple, mais pas très répétitive. Une autre solution est de déposer le rubidium par évaporation. Une fois le rubidium déposé dans la capsule, deux options se présentent : soit on chauffe l'ensemble de la capsule pour arriver au point de fusion du joint, par exemple en utilisant une plaque chauffante; soit l'ensemble de la capsule est placé dans un boîtier hermétique, permettant de sortir l'ensemble de la boîte à gants afin de réaliser la fusion du joint par laser. Cette dernière possibilité est particulièrement intéressante, car elle permet de minimiser l'impact thermique sur le rubidium.



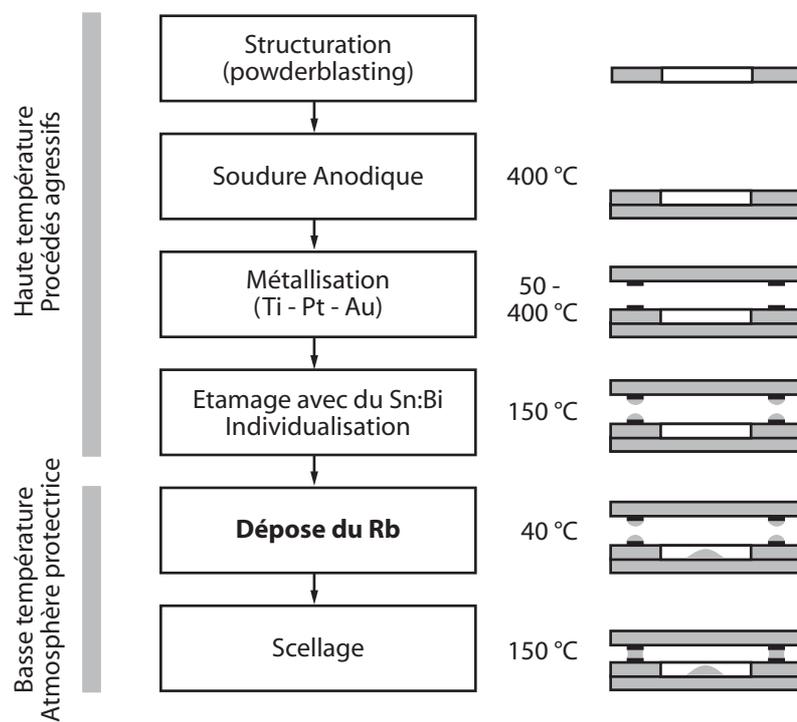
**Fig. 4.10:** Cellules hermétiques.

Un point important à relever est l'interaction entre le rubidium et le joint de brasure. Si l'on regarde le diagramme de phase Rb - Sn (figure 4.12) [77], on peut voir que les composés intermétalliques ont un point de fusion élevé. Le diagramme de phase Rb - Bi est similaire [78]. Cela devrait entraîner une passivation de la surface de la brasure en contact avec les vapeurs de métaux alcalins, garantissant ainsi la stabilité du joint.

Dans ce cas, le joint de brasure assure trois fonctions principales du boîtier : l'herméticité, l'étanchéité et l'attachement mécanique des deux demi-boîtiers. Il peut être intéressant de rajouter un joint époxy supplémentaire qui remplirait les fonctions de tenue mécanique et d'étanchéité : dans certains cas la métallisation est mauvaise, ce qui implique que certaines cellules sont relativement fragiles. Le joint plastique éviterait aussi le contact direct du rubidium avec le joint de brasure. On aurait alors un risque de contamination du rubidium et une dégradation du joint, puis la perte du rubidium par réaction. Le joint de brasure ne remplirait alors que la fonction d'herméticité, ce qui empêcherait la diffusion de l'humidité à l'intérieur de la capsule.

#### 4.2.4 Résultats

Les premiers échantillons scellés sous 1 atmosphère d'azote sont hermétiques : le rubidium ne s'altère pas avec le temps. Les cellules sont néanmoins fragiles, un choc provoque souvent une fuite qui mène à la réaction du rubidium avec l'humidité ambiante. Ces échantillons ne présentent par contre pas de trace du rubidium lors d'une analyse d'absorption. A priori cela est dû à la pression de 1 atmosphère d'azote dans la cellule. D'autres cellules ont été réalisées avec une pression d'azote de 50 mbar. Dans ce cas, on peut mettre en évidence la présence du rubidium à l'intérieur des cellules (voir figure 4.13). Le spectre est élargi et légèrement décalé.



**Fig. 4.11:** Processus de fermeture de cellules de rubidium. Les opérations à haute température sont effectuées avant la dépose du rubidium.

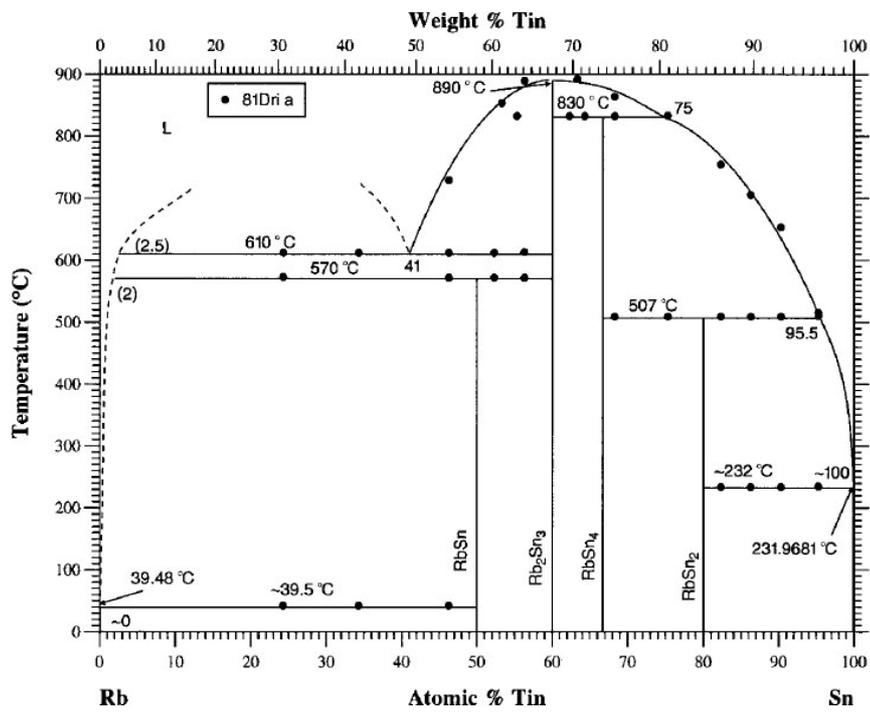


Fig. 4.12: Diagramme de phase rubidium - étain, tiré de [77].

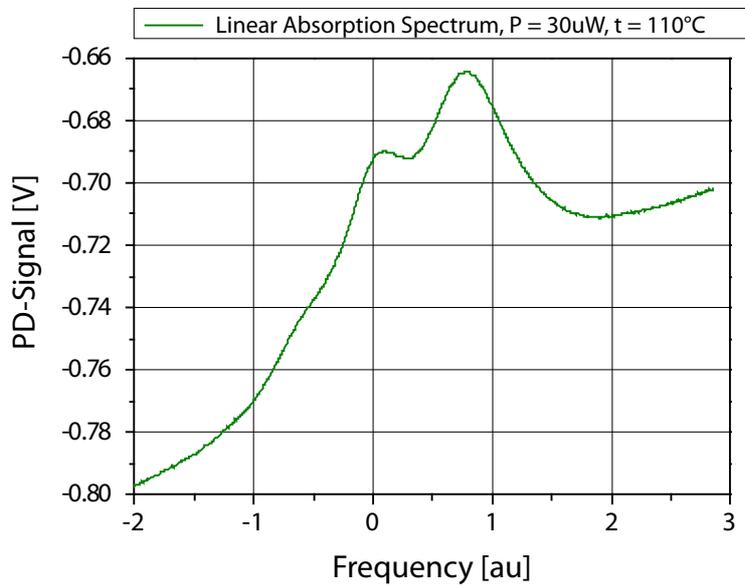
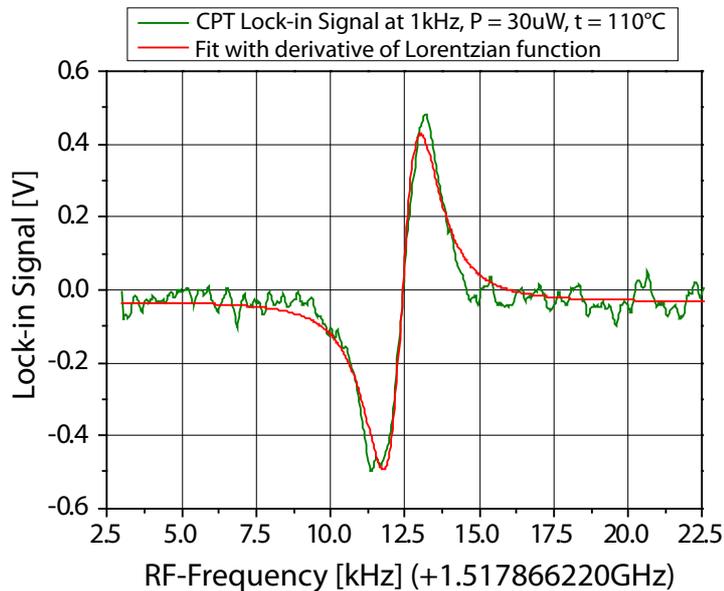


Fig. 4.13: Graphe de l'absorption d'une cellule. Source: Ch. Schoeri, LTF, UniNE.



**Fig. 4.14:** Le signal d'horloge CPT, avec une détection lock-in à 1kHz.  
Source: Ch. Schoeri, LTF, UniNE.

#### 4.2.5 Conclusion

Avec ce projet, on démontre la faisabilité de l'encapsulation d'un matériau sensible à la température et à l'humidité. La méthode permet de drastiquement réduire le temps et la température d'encapsulation par rapport au soudage anodique. Le procédé nécessite un équipement relativement simple (boîte à gants, plaque chauffante, sérigraphieuse) qui permet de maîtriser à la fois la température et l'atmosphère d'encapsulation.

Cette étude est encore assez préliminaire, des études supplémentaires sont nécessaires à long terme. Sur cette base, un projet a été démarré et deux articles sont en cours de rédaction [79] [80]. Des efforts doivent être faits sur la qualité de la métallisation des verres: on voit que lorsque la métallisation est faite correctement l'accroche est excellente, mais dans certains cas, un choc peut détruire l'herméticité de la cellule ce qui mène à la réaction du rubidium se trouvant à l'intérieur. Une méthode de remplissage de rubidium doit aussi être développée, la méthode actuelle ne permet pas le dosage précis de la quantité de rubidium déposé.

Il faut encore évaluer la tenue du joint s'il entre en contact avec le rubidium. Si le joint se dégrade en contact avec le rubidium, on peut alors imaginer une solution qui force le rubidium à rester à un endroit (zone à mouillabilité élevée) ou une solution à double joint (epoxy + brasure).

## 4.3 Etude d'une opération de polymérisation de colle époxy

Dans cette partie, on traite principalement de modélisation de comportement thermique dans le but d'améliorer une étape de fabrication sur un produit existant. On donne un exemple de modèle analytique simple permettant de déterminer la pertinence d'une solution technique. Une importante partie est consacrée à la méthode d'analyse dimensionnelle couplée à l'expérimentation. Un exemple concret est proposé, puis la méthode et ses limitations sont discutées. On montre que par une méthode d'analyse, on peut optimiser le procédé de polymérisation de manière à réduire son impact thermique sur le système.

### 4.3.1 Définition du problème

L'objectif de cette étude est d'optimiser une opération de polymérisation de colle époxy. Il s'agit d'un produit dans le domaine médical, déjà abouti au niveau de la conception ainsi que des méthodes de fabrication. Il consiste en un boîtier hermétique en titane fermé par une soudure laser sur son pourtour, au travers duquel plusieurs contacts électriques doivent passer (jusqu'à environ 10 fils maximum selon le type de boîtier). Les passages de fils (ferrules) sont composés d'une pièce en céramique scellée au fond d'une cavité, au travers de laquelle les fils passent. De la colle époxy deux composants doit être déposée puis polymérisée dans ces cavités (voir figures 4.15 et 4.16). La fonction de cette colle est principalement d'empêcher que les tissus organiques ne colonisent la cavité une fois le système implanté dans le corps humain. La fonction de fermeture hermétique est satisfaite par le passage de fil lui-même, et non pas par la colle.

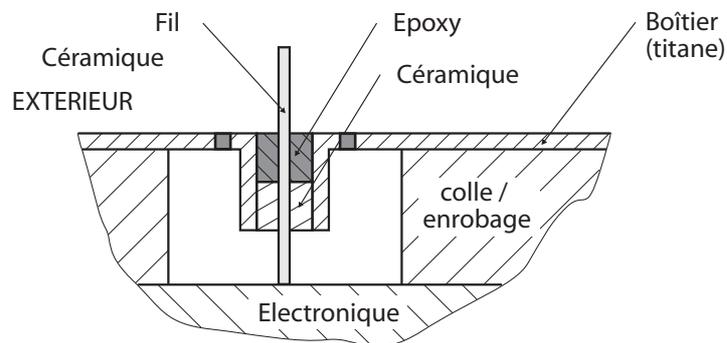
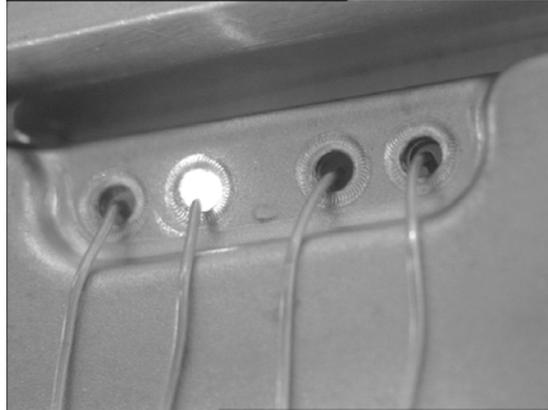


Fig. 4.15: Schéma en coupe d'un passage de fil.

L'opération de remplissage des passages de fils et de polymérisation de la



**Fig. 4.16:** Photo d'un passage de fil. Le second depuis la gauche est chauffé par une diode laser.

colle est une des dernières étapes de fabrication du système qui est alors presque terminé : le boîtier est déjà scellé hermétiquement sur sa surface latérale et il contient entre autres une partie électronique ainsi qu'une batterie qui ne doivent pas être exposées à une température supérieure à  $70^{\circ}\text{C}$  environ. Un opérateur dépose manuellement la colle au fond des cavités, puis l'ensemble du système est passé au four à une température de  $150^{\circ}\text{C}$  pendant 10 minutes pour réaliser l'opération de polymérisation. La dernière étape consiste en un contrôle de qualité : chaque passage de fil est observé au binoculaire afin de détecter la présence de bulles ou de bavures de colle. Finalement, l'opérateur teste la dureté de la colle avec une pointe en matière plastique. Si la pointe laisse une trace à la surface de la colle, on doit recommencer l'opération de chauffage. Le principal problème vient de la méthode de chauffage permettant la polymérisation : l'ensemble du système est soumis à la température du four. Pour éviter d'exposer l'électronique et la batterie à des températures supérieures à  $70^{\circ}\text{C}$ , les systèmes sont placés sur un support permettant leur immersion dans un bain, tout en gardant la partie à chauffer en dehors du liquide. Il va de soi que cette méthode est peu pratique, entre autres à cause du fait qu'il faut nettoyer les pièces après l'opération.

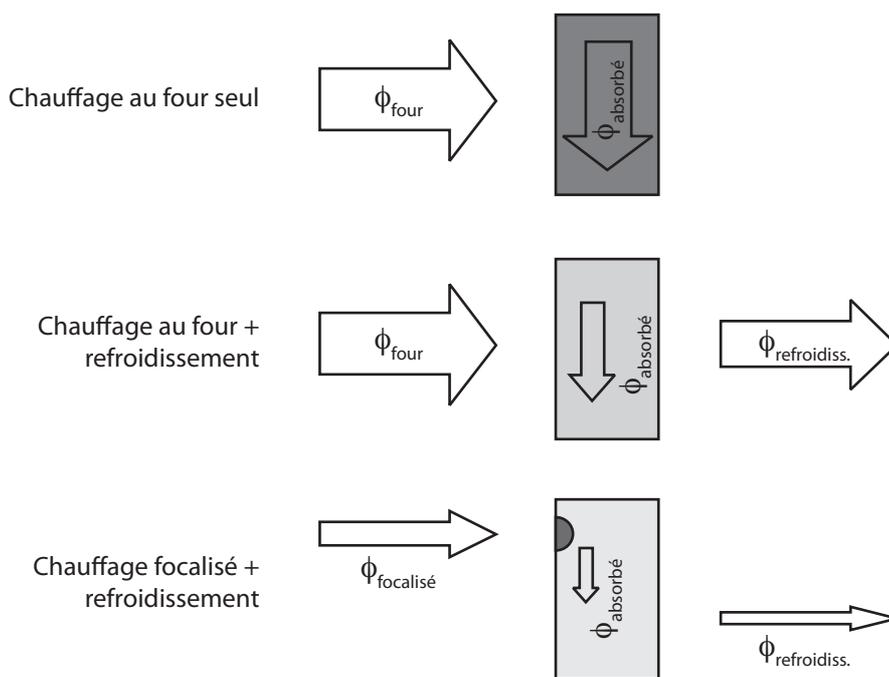
### 4.3.2 Approche du problème

L'idée du mandataire est de trouver un moyen de focaliser l'énergie apportée aux points de colle dans le but de réduire l'échauffement du centre du système. L'approche appliquée est de comprendre le comportement thermique du système entier : conduction thermique entre les points de colle et l'intérieur du système, modèle d'échauffement par source localisée, caractérisation

de la réaction de polymérisation. Premièrement il s'agit donc d'étudier un moyen de réduire l'échauffement de la partie interne du système tout en garantissant une température suffisante sur les zones à polymériser. Ceci se fait sur plusieurs fronts :

- la focalisation du chauffage sur les points de colle
- l'étude de la polymérisation de la colle

L'idée est de raisonner en termes de flux (voir figure 4.17). Dans le cas du chauffage au four, la totalité du flux entrant est absorbé par le système. Si on diminue le flux thermique, et qu'on le focalise, on peut garder la même température en un point donné, mais cette fois l'énergie entrant en jeu est inférieure, donc l'élévation de température du système entier est moindre. Une solution permettant de focaliser ce flux est d'utiliser une diode laser. La diode laser est particulièrement adaptée à cette situation, car la puissance peut facilement être variée en continu, permettant ainsi le contrôle précis du chauffage de la colle.



**Fig. 4.17:** Schéma des flux thermiques pour trois variantes de chauffage différentes. L'objectif est de minimiser l'impact thermique sur l'intérieur du système.

Le problème peut donc se résumer comme suit :

- On veut minimiser la température du centre du système
- On veut garantir une température minimale pour obtenir la polymérisation de la colle en un temps donné

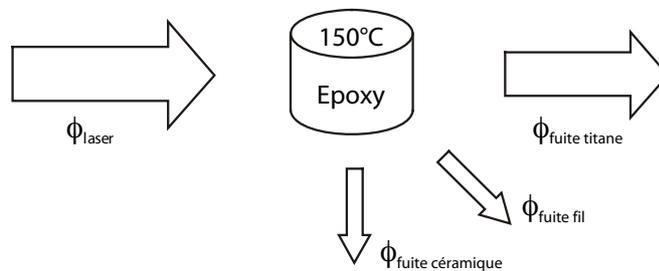
On utilise des méthodes qui permettent d'arriver à ces résultats. Ces méthodes sont décrites dans plusieurs phases. Premièrement, on utilise des modèles d'échauffement analytiques pour déterminer les chemins qui provoquent les plus grands échauffements. Dans une deuxième partie, on propose une approche par l'analyse dimensionnelle [81]. Nous verrons que comme le système ne peut pas être modifié, ces deux approches ne permettent pas de réduire l'échauffement des composants internes, mais permettent de déterminer le comportement du système lorsqu'il est chauffé localement par laser. Pour réduire cet échauffement, on étudie les propriétés de la colle à polymériser grâce à des méthodes d'analyse qui permettent de caractériser précisément les conditions nécessaires à la polymérisation complète. Pour chacune de ces phases, on réalise des mesures permettant de vérifier les résultats expérimentaux.

### 4.3.3 Modèle d'échauffement simple

Le but de ce modèle est d'estimer rapidement les ordres de grandeurs entrant en jeu dans le système lors de son échauffement localisé par laser. Le modèle est basé sur le raisonnement suivant : on cherche l'énergie nécessaire pour élever la température du point de colle de  $20^{\circ}\text{C}$  à  $150^{\circ}\text{C}$ . L'énergie  $E$  nécessaire pour chauffer un volume  $V$  de colle d'une température initiale  $\theta_0 = 20^{\circ}\text{C}$  à  $\theta_1 = 150^{\circ}\text{C}$  est donnée par :

$$E = \rho \cdot C_P \cdot V \cdot (\theta_1 - \theta_0) \quad (4.1)$$

Avec  $\rho$  la masse volumique,  $C_P$  la chaleur massique de la colle. En prenant  $\rho = 1.1 \text{ g/cm}^3$ ,  $C_P = 1050 \text{ J/kgK}$  et  $V = 1.5 \text{ mm}^3$ , on obtient une énergie nécessaire de  $0.2 \text{ J}$ , ce qui est facilement atteignable avec le laser utilisé (puissance max :  $30 \text{ W}$ ). Avec des diodes laser permettant des puissances allant jusqu'à  $400 \text{ W}$ , on peut ainsi facilement chauffer plusieurs points de colle simultanément.



**Fig. 4.18:** Schéma des flux entrant et sortant sur l'élément de colle.

#### 4.3.4 Modèle de conduction simple

Calculons maintenant la puissance nécessaire pour maintenir cette température, c'est-à-dire compenser les flux de fuite (figure 4.18). Considérons l'élément de colle époxy. Le flux entrant est donné par la diode laser. L'élément de colle est en contact avec le fond en céramique, avec le fil traversant la ferrule et avec le boîtier en titane sur sa circonférence. On peut calculer ces trois flux de fuite pour déterminer le flux laser nécessaire à maintenir la température de l'élément de colle. Cela nous permet aussi d'estimer le flux ayant le plus d'impact sur l'échauffement de l'électronique et la batterie.

Le flux de fuite dans la céramique, un cylindre de rayon  $r_{ceramique}$  et de hauteur  $h_{ceramique}$ , en considérant une différence de température  $\theta_1 - \theta_2$  de  $130^\circ\text{C}$  entre le haut et le bas de la céramique, est donné par :

$$\phi_{fuiteceramique} = \pi \cdot r_{ceramique}^2 \cdot \lambda_{ceramique} \cdot \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{h_{ceramique}} \quad (4.2)$$

Avec  $r_{ceramique} = 0.5 \text{ mm}$ ,  $h_{ceramique} = 1 \text{ mm}$  et  $\lambda_{ceramique} = 20 \text{ W/m/K}$ , on obtient  $\phi_{fuiteceramique} = 2 \text{ W}$ .

Ce calcul n'est pas très représentatif, étant donné qu'il est peu probable que le fond de la céramique reste à  $20^\circ\text{C}$  lors du chauffage. De plus, les parties sensibles à la température ne sont pas directement en contact avec le fond de la céramique (voir figure 4.15). Cela donne quand même une estimation du flux de fuite à l'état initial.

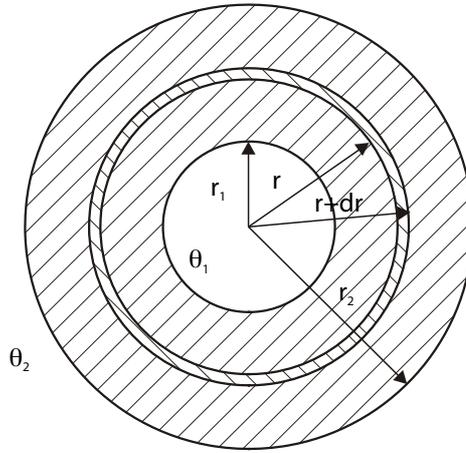
Pour le flux de fuite dans la coque en titane, on considère un disque d'épaisseur  $h$  et de conductivité thermique  $\lambda_{titane}$  (figure 4.19).

Le rayon extérieur  $r_2$  correspond à la température ambiante  $\theta_2$ , et la partie centrale de rayon  $r_1$  doit être maintenue à une température de polymérisation  $\theta_1$ . Le flux de fuite est donné par :

$$\phi_{fuitetitane} = \frac{2\pi h_{titane}}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \lambda_{titane} (\theta_1 - \theta_2) \quad (4.3)$$

En prenant  $r_1 = 0.5 \text{ mm}$ ,  $r_2 = 2.5 \text{ mm}$ ,  $h_{titane} = 0.5 \text{ mm}$  et  $\lambda_{titane} = 20 \text{ W/m/K}$ , on obtient  $\phi_{fuitetitane} = 5.1 \text{ W}$ .

Finalement, on peut encore calculer le flux de fuite dans le fil passant au travers de la ferrule. Il s'agit d'un fil de niobium de rayon  $r_{fil}$  et de longueur



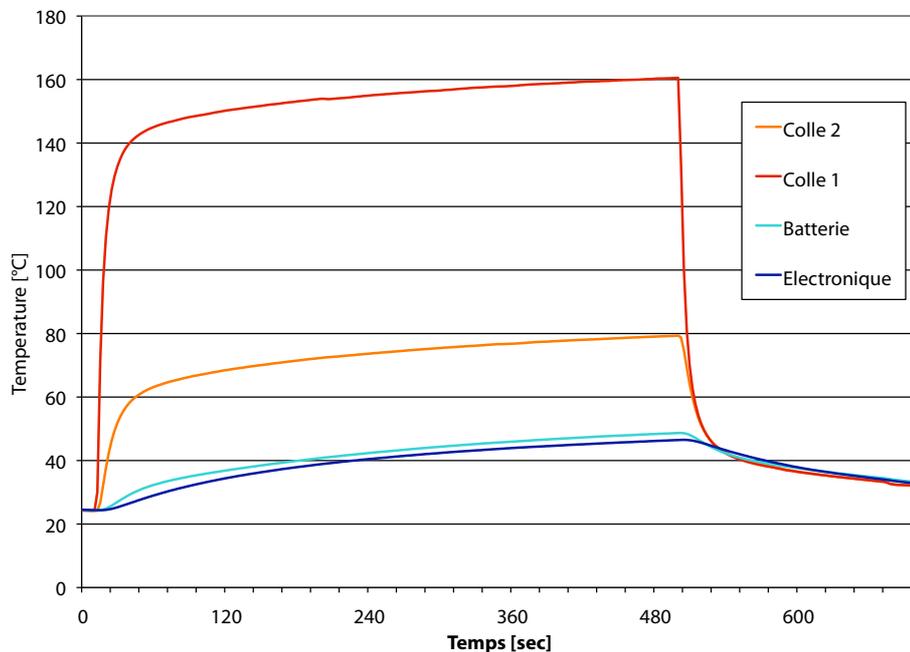
**Fig. 4.19:** Modèle pour le flux de fuite dans la coque en titane.

$L_{fil}$ . La conductivité du niobium est notée  $\lambda_{niobium}$ . On a donc :

$$\phi_{fuitefil} = \pi \cdot r_{fil}^2 \cdot \lambda_{niobium} \cdot \frac{(\theta_1 - \theta_2)}{L_{fil}} \quad (4.4)$$

En prenant  $r_{fil} = 0.5$  mm,  $L_{fil} = 5$  mm et  $\lambda_{niobium} = 53$  W/m/K, on obtient  $\phi_{fuitefil} = 0.01$  W.

On constate que la majeure partie du flux de fuite est dû à la conduction dans la partie en titane (la coque du boîtier). D'un point de vue conception, il s'agirait donc d'isoler au maximum l'électronique et la batterie du boîtier en titane. Etant donné le caractère confidentiel du mandat ainsi que par le fait qu'il s'agit d'un produit dont la conception est arrêtée, il ne nous a pas été possible d'intervenir sur la conception du système en lui-même, seulement sur le mode de chauffage. Nous constaterons que la puissance calculée pour maintenir cette température correspond aux valeurs mesurées. Il s'agit d'un modèle simple, qui ne prend pas en compte les pertes par convection, mais il permet d'obtenir les ordres de grandeur qui sont conformes aux valeurs mesurées (voir figure 4.20). Il faut noter également qu'il s'agit des flux de fuite au début du chauffage. Lorsque la température de la partie électronique augmente, le flux nécessaire pour maintenir la colle à température de polymérisation diminue, comme observé lors des mesures. Cette estimation simple et rapide est nécessaire afin de déterminer les ordres de grandeur entrant en jeu.



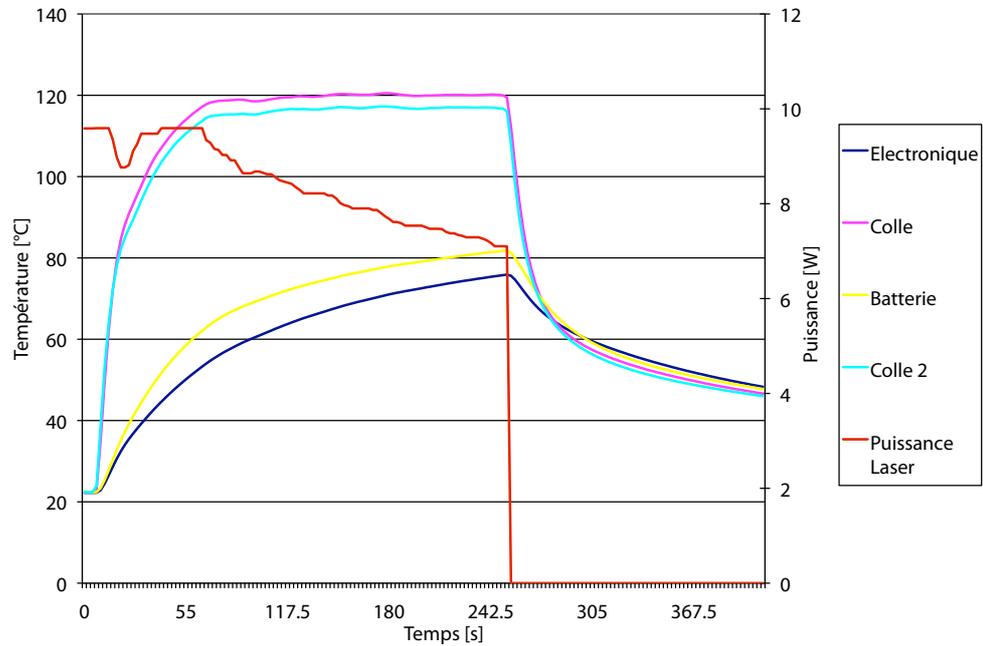
**Fig. 4.20:** Echauffement du système pour une puissance laser de 3 W. Résultats mesurés sur un système équipé de thermocouples placés sur deux ferrules, ainsi que sur la batterie et l'électronique.

#### 4.3.5 Chauffage local par laser

Des essais de chauffage en conditions réelles ont été réalisés. Pour ces mesures, on utilise des boîtiers équipés de thermocouples permettant la mesure en continu de la température. Ces thermocouples sont placés :

- dans les cavités où se trouve la colle
- sur la batterie
- sur l'électronique

La première méthode de chauffage est la suivante : il s'agit de contrôler la puissance pour maintenir la colle à température constante pendant un temps donné (typiquement 150°C pendant 8 minutes). On peut alors mesurer la température atteinte par la batterie et l'électronique. Comme l'énergie est focalisée sur la colle, la température atteinte au centre du système est inférieure à la température du point de colle. Elle est fonction seulement de la conduction thermique interne du système. Un exemple typique de résultat est donné dans la figure 4.21. On constate que la température à l'intérieur du système est inférieure à la température sur le point de colle. Quelle que soit la méthode de chauffage, l'évolution de la température des éléments



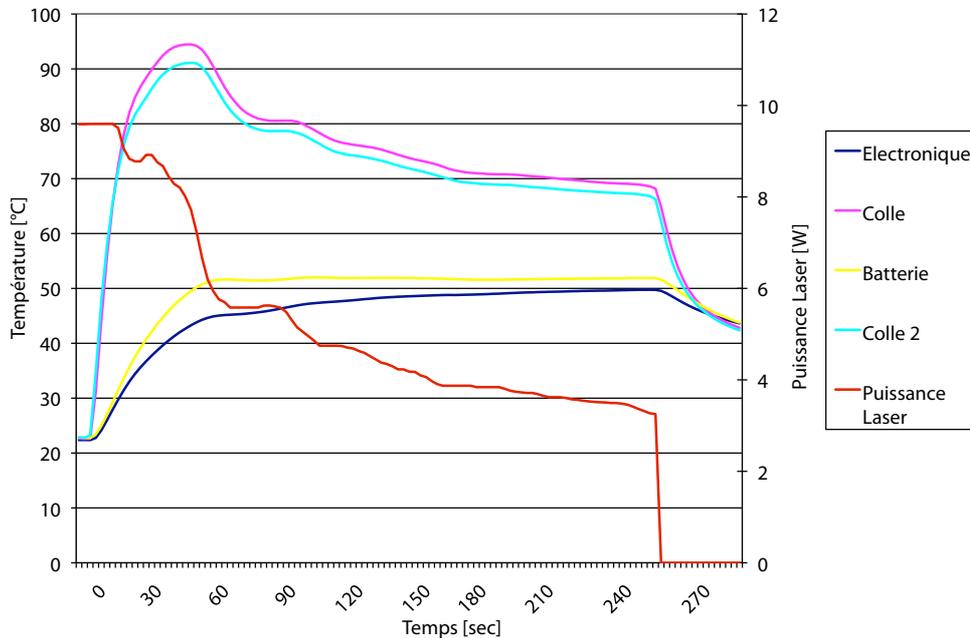
**Fig. 4.21:** Chauffage du système en gardant la température de la colle constante.

sensibles est toujours la même. Ceci est dû au fait que la différence de température entre le point de chauffage et les éléments sensibles est définie par la conduction thermique du système, et elle ne peut pas être influencée. Malheureusement, la température atteinte est encore trop élevée.

Une autre possibilité est de contrôler la puissance de manière à garder non plus la température de la colle constante, mais la température de la batterie et de l'électronique. Les mesures obtenues sont données dans la figure 4.22.

Dans ce cas, la température limite n'est pas atteinte, mais on a alors une diminution de la température de la colle avec le temps. On peut donc penser à priori que la colle n'est pas totalement polymérisée après l'opération. On cherche alors un moyen de déterminer le degré de polymérisation de la colle en fonction du profil de température en un temps donné.

On constate néanmoins que le laser permet de focaliser l'énergie, et ainsi réduire sensiblement l'échauffement de l'intérieur du système. On peut aussi contrôler précisément un profil de température, ceci grâce entre autres à la basse densité de puissance de la diode laser. L'autre avantage est de pouvoir contrôler facilement la puissance du laser en continu.



**Fig. 4.22:** Chauffage du système en gardant la température de l'électronique constante.

Nous avons vu qu'il est possible de diminuer l'échauffement en localisant l'apport de chaleur, ainsi qu'en dosant la puissance du laser utilisé. Mais pour rester dans les limites de température acceptables par l'électronique et la batterie, il faut encore diminuer la température atteinte au centre du boîtier. Ceci peut se faire en étudiant les paramètres de polymérisation.

#### 4.3.6 Détermination précise de paramètres de polymérisation

Dans le but de contrôler le processus de chauffage, nous devons déterminer précisément le temps de polymérisation de la colle utilisée. D'après le fabricant de la colle, les paramètres de polymérisation sont de 10 minutes pour une température de 150°C. Il est rare de pouvoir se fier aux valeurs du fabricant, car de nombreux paramètres entrent en compte dans le phénomène de polymérisation, et le fabricant indiquera souvent ces valeurs de manière sécuritaire. Pour déterminer une valeur utilisable, on pourrait faire des essais à différents couples temps / température et évaluer si la colle est polymérisée ou non. Mais il est difficile de trouver un critère qui permette de détermi-

ner si la polymérisation de la colle est terminée. Deux analyses différentes ont été réalisées dans le but de déterminer précisément ces paramètres. La première méthode, par spectre de transmission, devrait permettre de faire une mesure de fin de polymérisation "in-situ". On pourrait ainsi déterminer une température de chauffage fixe et la maintenir le temps nécessaire à la polymérisation complète. La calorimétrie différentielle à balayage (ou DSC : Differential Scanning Calorimetry) permet d'analyser la réaction de polymérisation, et ainsi de déterminer précisément son début et sa fin. C'est une mesure faite en laboratoire qui permet seulement de caractériser la colle, elle ne peut pas être utilisée sur le système final.

### **Analyse de la réaction par spectre de transmission infrarouge**

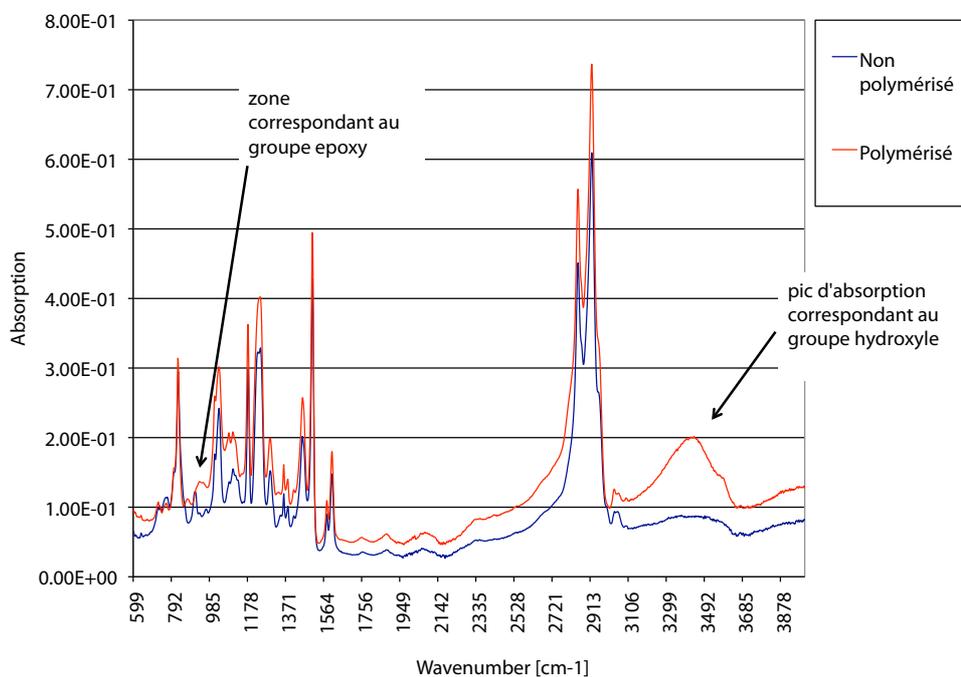
L'idée est de déterminer si l'on peut trouver une différence au niveau de la transmission de lumière pour une colle polymérisée et non polymérisée, cette opération pouvant éventuellement être adaptée à l'équipement existant pour un contrôle "in-situ" lors de la production. En chimie, la spectroscopie infrarouge est utilisée pour confirmer la présence de groupements fonctionnels dans un composé organique. En effet, l'absorption de radiation électromagnétique infrarouge par une molécule dépend des masses des atomes et de la force du lien. Selon les groupements fonctionnels, on verra apparaître différentes bandes d'absorption à différentes fréquences du spectre (voir figure 4.23).

Dans notre cas, on ne connaît pas la composition exacte de la colle époxy, mais on peut remarquer, en plus d'une baisse générale de la transmission, l'apparition d'une bande dans la zone de  $3350\text{ cm}^{-1}$ . Cela correspond au groupe hydroxyle. Dans la figure 4.24, on montre le détail des groupes époxy et hydroxyle.

Malheureusement, ces propriétés sont difficilement utilisables pratiquement. Il faudrait ajouter une zone mesurable sur le système pour pouvoir faire une mesure pendant la fabrication, ce qui n'est pas possible pratiquement à cause du design figé du système.

### **Analyse de la réaction de polymérisation par calorimétrie différentielle à balayage**

L'objectif de l'analyse par calorimétrie différentielle à balayage (DSC) est de déterminer le temps de polymérisation en fonction de la température. La mesure se fait par rapport à un échantillon de référence "vide". L'échantillon à tester est placé dans une capsule qui sera chauffée selon un profil déterminé

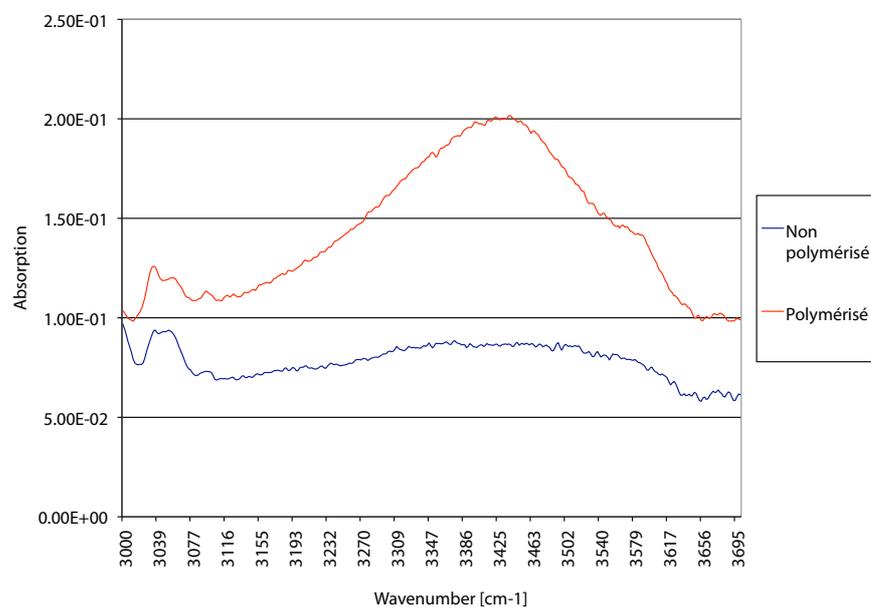
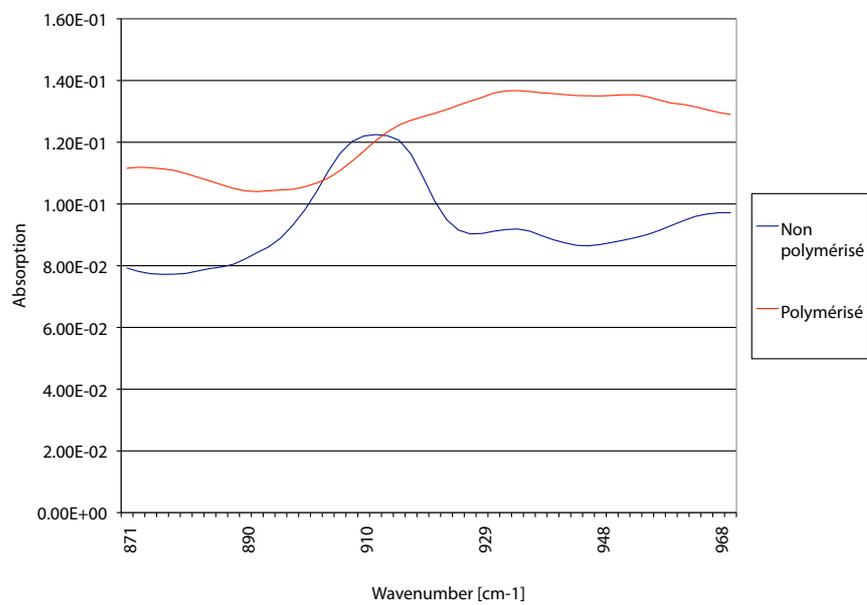


**Fig. 4.23:** Spectre d'absorption infrarouge pour l'état polymérisé et non polymérisé.

auparavant. Une autre capsule vide est aussi placée dans la même machine (Magna-IR 560 E.S.P), elle sert de référence. On mesure alors l'énergie nécessaire pour maintenir ce profil de température. En fonction de la réaction, plus ou moins d'énergie sera nécessaire pour maintenir le profil. On peut ainsi déterminer si la réaction est exothermique ou endothermique. On peut ainsi déterminer quand la réaction commence et se termine. Les résultats sont représentés dans la figure 4.25.

Sur ce graphique, on peut déterminer le début et la fin de la réaction de polymérisation. On notera toutefois que l'instant du début est plus facile à déterminer que la position de la fin. On voit que le temps nécessaire est de l'ordre de 8 minutes, pour une température de 110 °C. L'analyse suivante permet de déterminer un pourcentage de polymérisation en fonction du temps, pour différentes températures de chauffage (voir figure 4.26).

Sur la figure 4.26, on trace le taux de polymérisation en fonction du temps et de la température. On constate que le gain est significatif en passant de 110 °C à 130 °C. Par contre, il est moins intéressant de chauffer à 150 °C, pour un même pourcentage de polymérisation, le gain en temps est minime.



**Fig. 4.24:** Spectre d'absorption des groupes époxy (en haut) et hydroxyle (en bas).

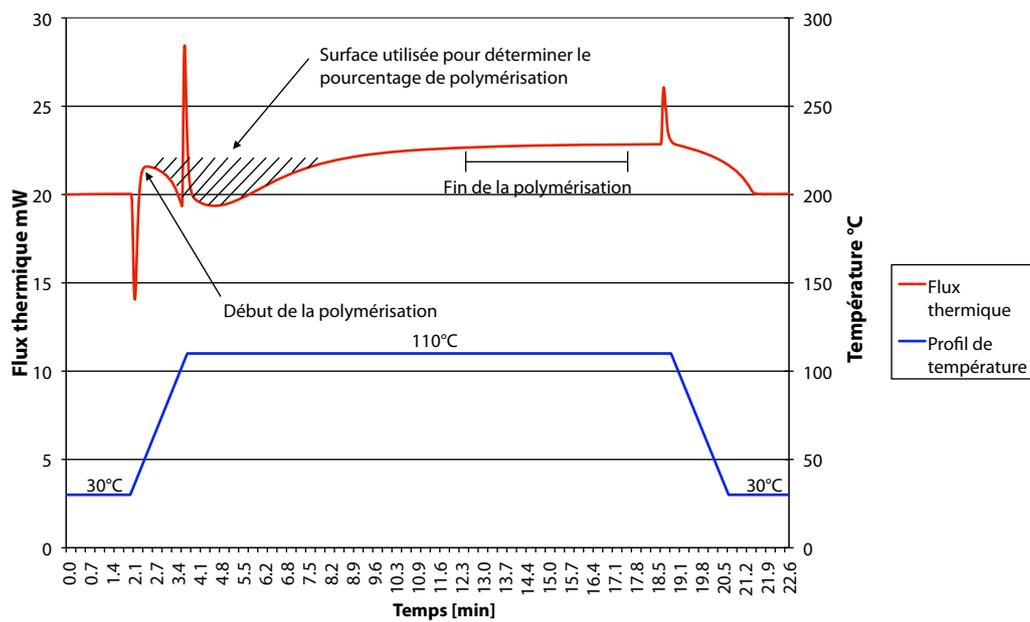
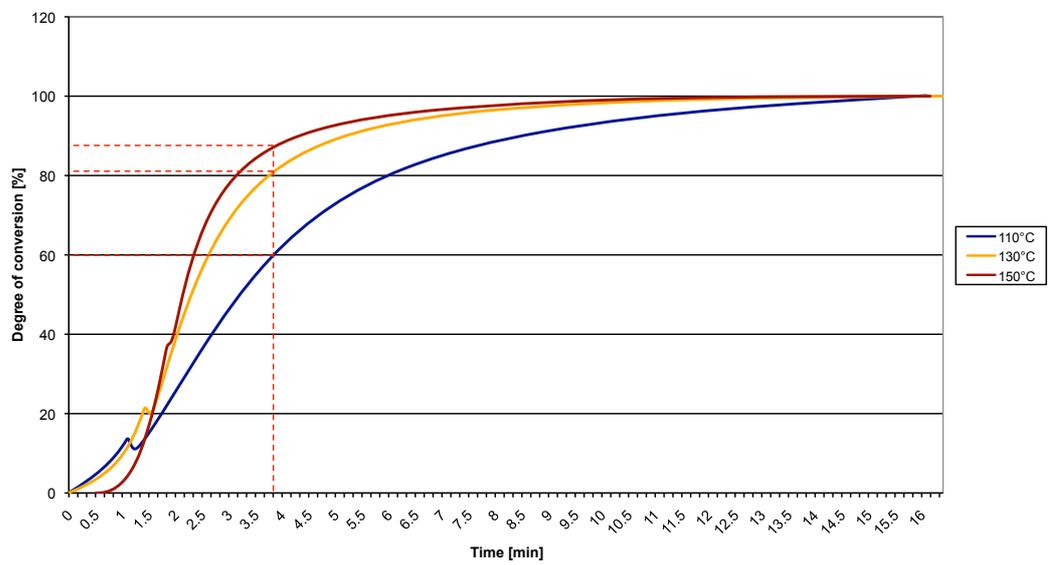


Fig. 4.25: Thermodynamique de la réaction de polymérisation



**Fig. 4.26:** Taux de polymérisation en fonction du temps et de la température

Dans notre cas, il serait judicieux de limiter la température de polymérisation.

### 4.3.7 Modèle d'échauffement par analyse dimensionnelle

Pour illustrer la méthode d'analyse dimensionnelle brièvement décrite au paragraphe 3.4.5, on étudie l'échauffement d'un élément de colle sous l'action d'une diode laser. Il faut noter que nous n'étudions ici que le volume de colle. Le problème est différent de celui du boîtier complet.

Dans certains cas, plusieurs phénomènes sont difficiles à modéliser : fuites par convection, taux d'absorption du rayon laser, etc... Par contre, nous avons une bonne idée des paramètres susceptibles d'affecter notablement le résultat. Il peut être intéressant d'utiliser l'analyse dimensionnelle pour diminuer leur nombre et tenter d'obtenir un modèle de comportement. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de trouver un modèle simple sans connaître précisément les caractéristiques du système ni du laser utilisé. A défaut de pouvoir expliquer le comportement du système, on peut prévoir son comportement.

Dans cet exemple illustratif, le système se limite au volume de colle à chauffer. La colle est pré-polymérisée sous forme d'un cylindre (voir figure 4.27). Cet élément de colle est maintenu uniquement par le thermocouple qui se trouve en son centre, les seules pertes sont donc dues à la convection avec l'air. On cherche à déterminer l'échauffement de l'élément de colle en fonction de différents paramètres : puissance du laser, dimension de l'élément de colle, etc.

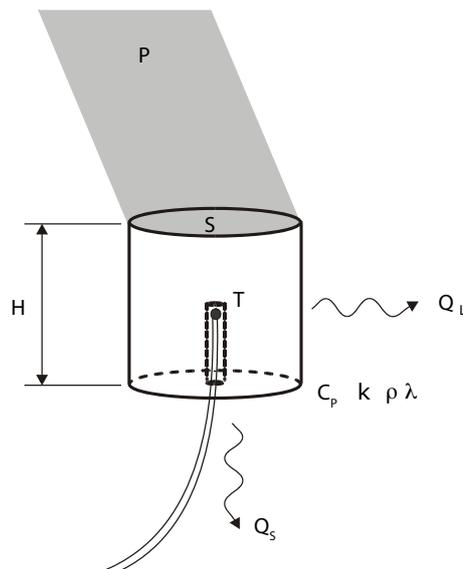


Fig. 4.27: Schéma montrant les paramètres du modèle entrant en jeu.

**Liste des paramètres entrant en jeu.** Dans cette première approche, on dresse tout d'abord la liste des paramètres susceptibles d'entrer en jeu dans le phénomène. L'ensemble des paramètres entrant en jeu est représenté dans la table 4.4. Il est préférable de considérer à priori plus de paramètres que nécessaire [82].

Paramètre	Description	Unité
$S$	Section du volume de colle	$m^2$
$H$	Hauteur du volume de colle	m
$\lambda$	Conductivité thermique de la colle	$Wm^{-1}K^{-1}$
$k$	Coefficient de convection	$Wm^{-2}K^{-1}$
$\rho$	Masse volumique de la colle	$kgm^{-3}$
$C_P$	Chaleur massique de la colle	$Jkg^{-1}K^{-1}$
$P$	Puissance	W
$T$	Ecart de température	K
$t$	Temps de chauffage	s

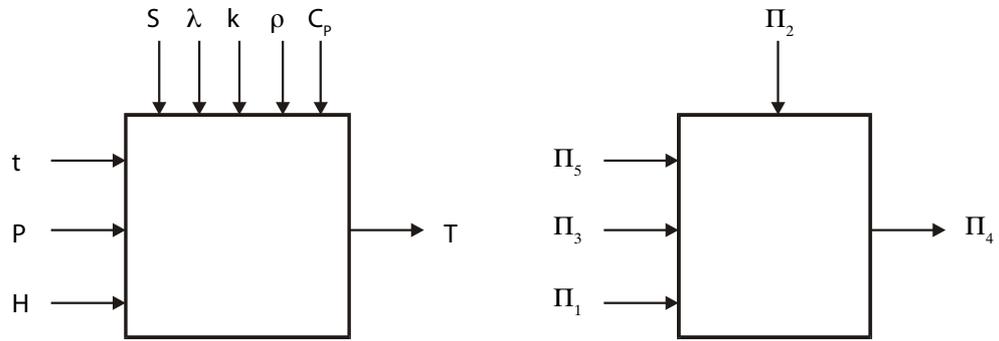
**Tab. 4.4:** Paramètres entrant en jeu

**Construction des nombres adimensionnels.** La matrice dimensionnelle D associée à ce problème est représentée dans la table 4.5. Nous exprimons les  $n = 9$  paramètres ( $T, P, t, \lambda, C_P, H, S, k, \rho$ ) en fonction des 4 unités du système international relatives aux problèmes thermomécaniques :

unité	S	H	$\lambda$	k	$\rho$	$C_P$	P	T	t
kg	0	0	1	1	1	0	1	0	0
m	2	1	1	0	-3	2	2	0	0
s	0	0	-3	-3	0	-2	-3	0	1
K	0	0	-1	-1	0	-1	0	1	0

**Tab. 4.5:** Matrice dimensionnelle

Les paramètres P, T, et t se trouvent en fin de matrice, ce qui permet de les découpler. Cette matrice est de rang  $k = 4$ . Après calcul du noyau de cette matrice, nous obtenons cinq nombres adimensionnels :



**Fig. 4.28:** Réduction du nombre de paramètres

$$\Pi_1 = \frac{H}{\sqrt{S}} \quad (4.5)$$

$$\Pi_2 = \frac{k}{\lambda} \sqrt{S} \quad (4.6)$$

$$\Pi_3 = \frac{PC_P^3 \rho^2 \sqrt{S}}{\lambda^3} \quad (4.7)$$

$$\Pi_4 = \frac{TC_P^3 \rho^2 S}{\lambda^2} \quad (4.8)$$

$$\Pi_5 = \frac{t\lambda}{SC_P \rho} \quad (4.9)$$

Analysons ces nombres adimensionnels :  $\Pi_1$  est un facteur de forme.  $\Pi_2$  est une constante.  $\Pi_3$  contient la puissance délivrée par le laser,  $\Pi_4$  contient l'écart de température, et  $\Pi_5$  contient le temps de chauffage. On peut donc réduire le nombre de paramètres à considérer et tenter d'établir un modèle sous la forme d'un produit de puissances (voir figure 4.28).

**Construction du modèle** On peut exprimer un nombre adimensionnel comme fonction de plusieurs autres. Comme nous cherchons l'échauffement, exprimons  $\Pi_4$  en fonction des autres nombres adimensionnels :

$$\Pi_4 = f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_5) \quad (4.10)$$

En se basant sur une connaissance à priori, on décide de scinder le modèle en deux parties : une partie stationnaire dans laquelle le temps n'intervient pas, et une partie transitoire. On tentera de combiner ces deux modèles de manière à obtenir un modèle global. Traitons dans un premier temps le modèle stationnaire.

**Modèle pour le régime stationnaire** Etant donné que  $\Pi_2$  est constant, et que pour le modèle stationnaire, le temps n'intervient pas, nous pouvons réécrire 4.10 ainsi :

$$\Pi_4 = f(\Pi_1, \Pi_3) \quad (4.11)$$

On suppose alors que la relation 4.11 peut s'exprimer sous la forme :

$$\Pi_4 = C \Pi_1^{C_1} \Pi_3^{C_2} \quad (4.12)$$

Nous obtenons ainsi :

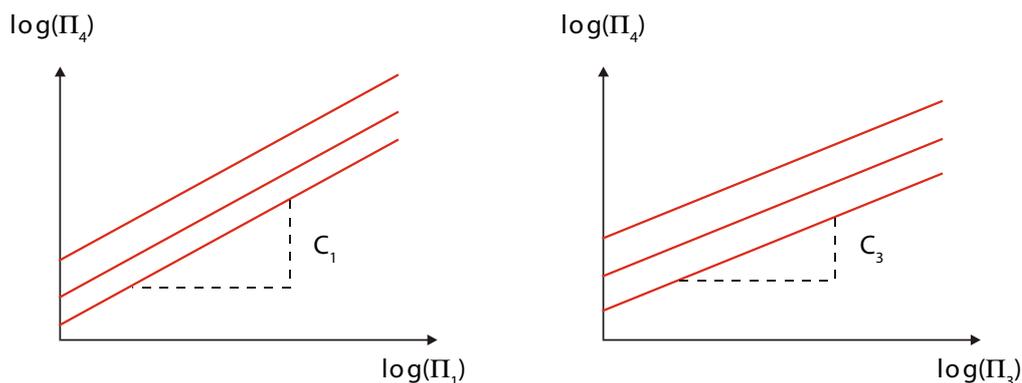
$$\Delta T = C \frac{\lambda^2}{S C_P^3 \rho^2} \left( \frac{h}{\sqrt{S}} \right)^{C_1} \left( \frac{P C_P^3 \rho^2 \sqrt{S}}{\lambda^3} \right)^{C_3} \quad (4.13)$$

$C$ ,  $C_1$  et  $C_3$  sont des constantes à déterminer expérimentalement.

Afin d'exploiter expérimentalement la relation précédente, il est nécessaire de la linéariser. En appliquant le logarithme aux deux membres de l'équation 4.13, on obtient :

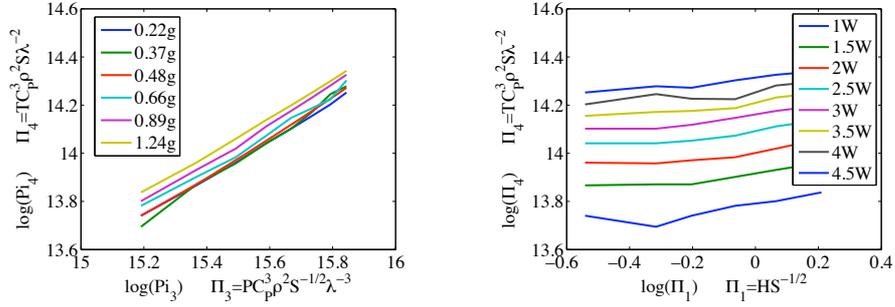
$$\log(\Pi_4) = \log(C) + C_1 \log(\Pi_1) + C_3 \log(\Pi_3) \quad (4.14)$$

On peut alors déterminer les deux coefficients expérimentalement. Dans notre cas, on varie la puissance (entre 0 et 5 W) et la hauteur de l'échantillon. On mesure la température obtenue. Les autres paramètres sont fixes.



**Fig. 4.29:** Principe de la détermination des constantes  $C_1$  et  $C_3$ .

Pour déterminer  $C_1$ , on regarde l'influence de la hauteur de l'échantillon sur l'échauffement. On constate que les valeurs de  $C_1$  et  $C_3$  sont constantes



**Fig. 4.30:** Détermination des constantes C1 et C3, mesures expérimentales.

quelles que soient la puissance et la masse respectivement. La constante C se trouve à l'aide de la relation 4.13. Les constantes  $C_1$  et  $C_3$  ayant été préalablement déterminées, on peut expliciter C pour des conditions connues:

$$C = \frac{\Delta T_0}{\frac{\lambda^2}{SC_P^3 \rho^2} \left(\frac{h_0}{\sqrt{S}}\right)^{C_1} \left(\frac{P_0 C_P^3 \rho^2 \sqrt{S}}{\lambda^3}\right)^{C_3}} \quad (4.15)$$

Où le triplet  $(\Delta T_0, h_0, P_0)$  correspond à une configuration donnée d'expérimentation. Exprimons la constante C avec la notation en nombre adimensionnel :

$$C = \frac{\Pi_4}{\Pi_1^{0.13} \Pi_3^{0.81}} \quad (4.16)$$

Les mesures, dans le cas du régime permanent, ont été faites avec 6 échantillons différents et 8 puissances différentes, soit, au total, 48 configurations différentes. La moyenne de la constante C vaut 16. On peut alors écrire un modèle pour le cas du régime permanent en remplaçant C,  $C_1$  et  $C_3$  dans l'équation 4.13.

$$\Delta T = 16 \frac{\lambda^2}{SC_P^3 \rho^2} \left(\frac{h}{\sqrt{S}}\right)^{0.13} \left(\frac{PC_P^3 \rho^2 \sqrt{S}}{\lambda^3}\right)^{0.81} \quad (4.17)$$

Cette expression est valable quels que soient h et P, pour  $\lambda$ , S,  $C_P$  et  $\rho$  fixés.

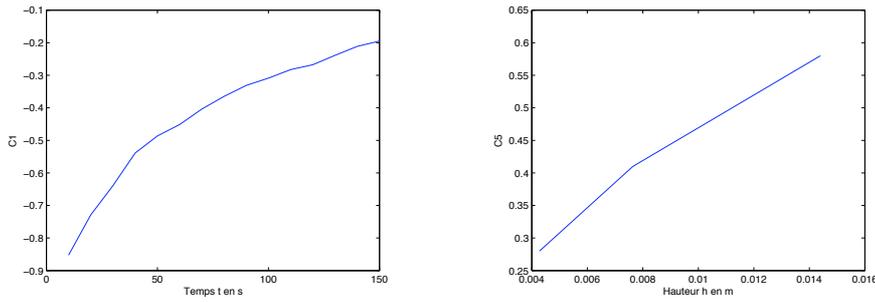
**Modèle pour le régime transitoire.** Dans ce cas, nous prenons en compte le temps. Essayons de réécrire l'équation 4.10 ainsi :

$$\Pi_4 = f(\Pi_1, \Pi_3, \Pi_5) \quad (4.18)$$

On a alors :

$$\Delta T = C \frac{\lambda^2}{SC_P^3 \rho^2} \left( \frac{h}{\sqrt{S}} \right)^{C_1} \left( \frac{\lambda t}{SC_P \rho} \right)^{C_3} \left( \frac{PC_P^3 \rho^2 \sqrt{S}}{\lambda^3} \right)^{C_5} \quad (4.19)$$

On peut, de la même manière que pour le modèle du régime permanent, déterminer les constantes. Mais on constate que  $C_1$  n'est pas constant si on change le temps, et  $C_5$  n'est pas constant si on change la hauteur (voir figure 4.31).



**Fig. 4.31:** Détermination des constantes  $C_1$  et  $C_5$ , mesures expérimentales.

En conclusion, on ne peut pas écrire

$$\Pi_4 = f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_5) \quad (4.20)$$

sous la forme:

$$\Pi_4 = C \Pi_1^{C_1} \Pi_3^{C_2} \Pi_5^{C_5} \quad (4.21)$$

Cet exemple démontre les possibilités et les limites de la démarche d'analyse dimensionnelle, couplée à l'expérimentation. On a pu déterminer un modèle pour le régime permanent, tout en réduisant le nombre de paramètres à tester. Par contre, il faut noter que le modèle obtenu n'est valable que pour un domaine défini, correspondant aux paramètres des mesures. Mais il permet néanmoins, dans notre cas, de déterminer des paramètres de chauffage du

laser, sans que l'on ne connaisse tous les paramètres entrant en jeu (taux d'absorption du laser par la colle, etc.). Le principal écueil est la détermination de la fonction reliant les différents nombres adimensionnels entre eux.

Nous voyons également que les nombres adimensionnels obtenus précédemment sont particulièrement difficiles à analyser. Une alternative est d'essayer d'obtenir des nombres adimensionnels qui ont un sens physique. Cette approche est décrite ci-dessous.

Si l'on reprend les paramètres du premier cas, on se rend compte que la masse volumique  $\rho$  ne sert qu'à la détermination de la capacité calorifique. On peut donc fusionner  $\rho$  et  $C_p$  pour obtenir la capacité thermique volumique, notée :

$$C = \rho C_p \quad (4.22)$$

Avec ces paramètres, on obtient quatre nombres adimensionnels que l'on reformule cette fois afin de leur donner un sens physique:

$$\Pi_1 = \frac{H}{\sqrt{S}} \quad (4.23)$$

$$\Pi_2 = \frac{k\sqrt{S}}{\lambda} \quad (4.24)$$

$$\Pi_3 = \frac{kST}{P} \quad (4.25)$$

$$\Pi_4 = \frac{Pt}{SHCT} \quad (4.26)$$

$$(4.27)$$

$\Pi_1$  est le même facteur de forme que celui obtenu avec la précédente méthode. Il donne une indication sur le rapport entre la hauteur et le diamètre de l'échantillon (élancement).  $\Pi_2$  est le rapport entre la conductance de convection ( $kS$ ) et la conductance interne ( $\frac{\lambda S}{H}$  que l'on peut formuler  $\lambda\sqrt{S}$  pour  $\Pi_1$  donné). Il donne une indication sur l'homogénéité de la température à l'intérieur du volume de colle. D'un point de vue pratique, pour  $\Pi_2$  élevé, la température dans l'élément de colle sera inhomogène. C'est une situation que l'on voudrait éviter pour garantir une polymérisation uniforme.  $\Pi_3$  est le rapport entre un indice de pertes par convection ( $kST$ ) et la puissance du laser ( $P$ ).  $\Pi_4$  est le rapport entre l'énergie amenée par le laser ( $Pt$ ) et l'énergie stockée dans l'élément de colle ( $SHCT$ ). Ce nombre adimensionnel contient le temps et la température.

La précédente méthode ne permet pas de trouver de modèle pour le régime transitoire. Pour un tel régime et si l'on veut couvrir le cas où l'on atteint

l'état stationnaire, on sait que l'on doit formuler l'évolution de la température sous forme d'une courbe de charge RC, de la forme  $1 - \exp(-C_4\Pi_4)$ .

#### 4.3.8 Conclusions

Dans cette partie, on a montré une approche permettant de comprendre et améliorer une étape de fabrication d'un produit microtechnique. Dans ce cas, on ne connaît pas les paramètres qui régissent le comportement du système. L'approche proposée permet de déterminer le comportement du système et aussi de déterminer les paramètres qui ont une influence sur le phénomène. On peut ainsi garantir la maîtrise du procédé.

Les modèles utilisés pour déterminer les chemins thermiques critiques ainsi que le comportement du système lorsqu'il est chauffé par le laser suivent la démarche proposée précédemment. Tout d'abord, on réalise un modèle analytique simple qui permet de déterminer les ordres de grandeurs. Ce modèle est vérifié par des mesures. Le second modèle par analyse dimensionnelle permet de prévoir le comportement du système, mais l'approche montre ses limites, même lorsque l'analyse dimensionnelle est couplée à l'expérimentation.

L'importance de l'analyse fonctionnelle est aussi montrée ici. Le problème apparaît lorsque le produit est déjà proposé et vendu sur le marché. Il aurait été possible de prévoir les contraintes techniques sur le produit aussi pendant sa fabrication en appliquant les aides à la recherche de fonctions. On pense souvent aux contraintes en utilisation, en stockage, mais plus rarement à celles liées à la production. Il faut rappeler qu'une étape de la démarche d'analyse fonctionnelle consiste en la recherche de fonctions liées au cycle de vie du produit : conception, fabrication, assemblage, utilisation, maintenance, élimination et recyclage. L'étude permettant de minimiser cet impact thermique est relativement coûteuse, alors qu'il aurait sûrement été plus simple de corriger la conception du système alors qu'il était encore temps.

Finalement cet exemple montre que la diode laser est une solution alternative au chauffage au four : la focalisation de l'échauffement permet de diminuer l'impact thermique sur les composants sensibles du produit. On constate aussi qu'une telle diode laser est polyvalente : elle permet à la fois la fusion de brasure tendre et le chauffage précis d'une colle époxy.

## 4.4 Encapsulation d'un capteur de pression implantable

### 4.4.1 Définition du problème

Dans ce cas, il s'agit d'étudier la faisabilité d'un échauffement local par diode laser pour effectuer le scellement d'un boîtier de protection pour un capteur médical [83]. Le système est déjà bien défini : il s'agit de brasier un couvercle cylindrique de diamètre 12 mm à un capot en verre (voir figure 4.32). Les deux parties sont métallisées par une couche de 100 nm de titane et de 2  $\mu\text{m}$  d'or. L'or assurant la fonction de mouillabilité. On utilise une préforme de brasure Sn77.2 In20 Ag2 (% masse,  $T_f = 189^\circ\text{C}$ ). Pendant l'opération de brasure, les deux pièces sont pressées l'une contre l'autre.

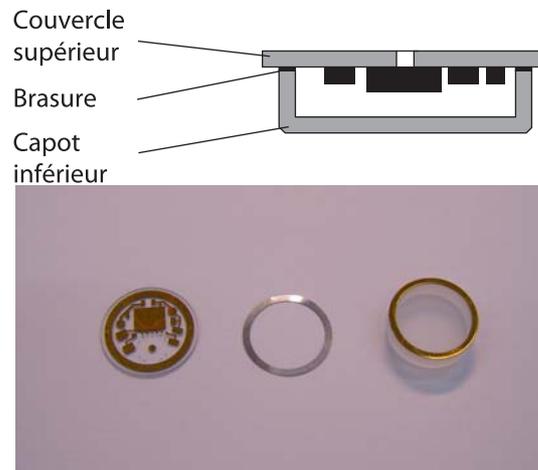
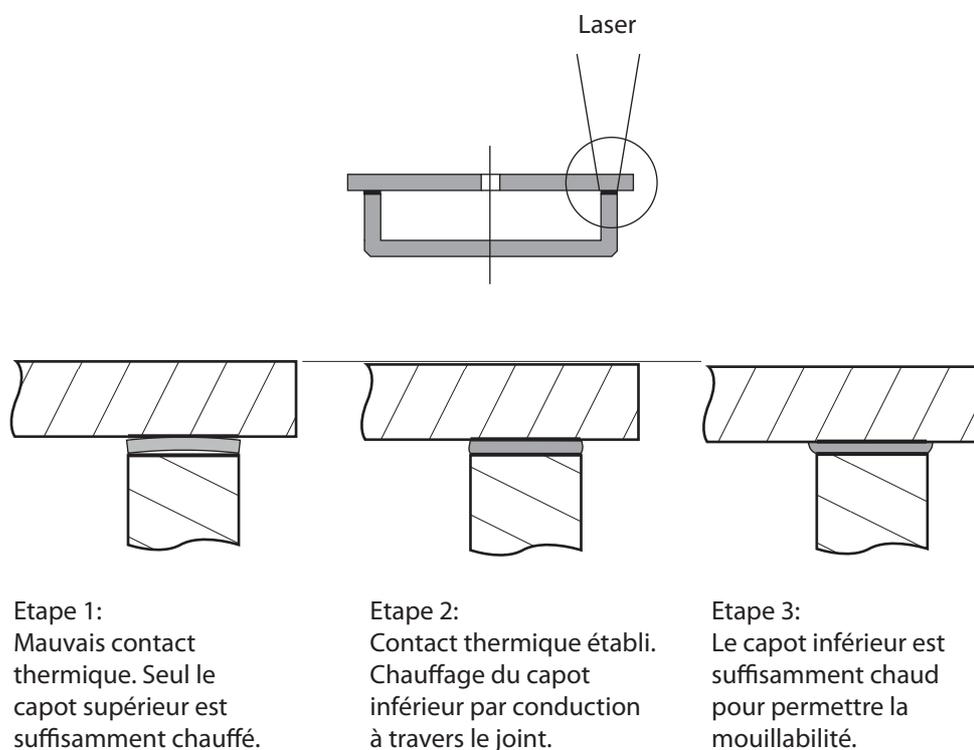


Fig. 4.32: Packaging pour capteur de pression implantable

### 4.4.2 Tests de chauffage par laser

Les tests par fuite d'hélium sur les premiers composants brasés au laser ont montré une mauvaise herméticité de l'ensemble. La mouillabilité sur la face inférieure (capot) n'est pas assurée. Ceci est dû à plusieurs raisons. Premièrement, la brasure Sn77.2 In20 Ag2 s'oxyde rapidement, empêchant la bonne mouillabilité de la couche de métallisation. Il faut donc travailler en absence d'air, sous azote par exemple. Dans le cas de brasures à point de fusion plus élevé, on pourrait aussi utiliser du formagaz. On réalise alors les brasures dans une enceinte hermétique dotée d'une vitre permettant le passage du rayon laser. Cette enceinte est purgée avec un flux d'azote. Deuxièmement,

le couvercle est chauffé directement par le rayon laser. On obtient alors rapidement la fusion du joint, que l'on peut observer pendant la brasure. Par contre, le capot est chauffé uniquement par conduction thermique à travers la préforme de brasure. Cela signifie que dans un premier temps, puisque la préforme est solide (bien que ductile), les points de contacts entre le couvercle et le capot sont peu nombreux, la chaleur est ainsi difficilement transmise du couvercle jusqu'au capot. C'est un des principaux désavantages du laser. Son action s'arrête au premier élément qui absorbe sa longueur d'onde. Le reste de l'échauffement se fait par conduction. Il en découle que l'opération est décomposée en plusieurs étapes (voir figure 4.33):



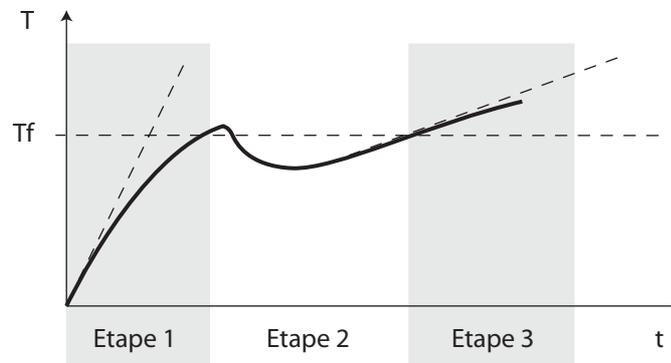
**Fig. 4.33:** Les étapes observées lors de l'opération de brasure.

**Etape 1.** Les deux demi-boîtiers sont pressés mécaniquement l'un contre l'autre, la préforme de brasure se trouvant entre les deux. D'un point de vue thermique, le contact entre les deux demi-parties est faible. La masse à chauffer se résume ainsi au couvercle. On pourrait appliquer une plus grande force sur les deux parties de manière à déformer la préforme de brasure, et ainsi assurer un meilleur contact thermique. Mais le joint serait alors trop écrasé lors de sa fusion.

**Etape 2.** La préforme de brasure entre en fusion. Cela peut être observé pendant l'opération : le couvercle change de position par rapport au capot. Instantanément, le contact thermique entre les deux demi-boîtiers est bien meilleur. Comme le capot inférieur est resté froid pendant la première phase, la chaleur du couvercle est transmise au capot inférieur. La brasure refroidit et se fige. La température du capot n'est pas suffisante pour obtenir une bonne mouillabilité.

**Etape 3.** Pour obtenir un bon mouillage de la brasure sur la métallisation, il faut continuer le chauffage. Thermiquement, le système est maintenant constitué de l'ensemble capot, brasure et couvercle. La masse à chauffer est ainsi plus grande que dans l'étape 1. L'apport de chaleur doit se faire jusqu'à la fusion totale du joint de brasure.

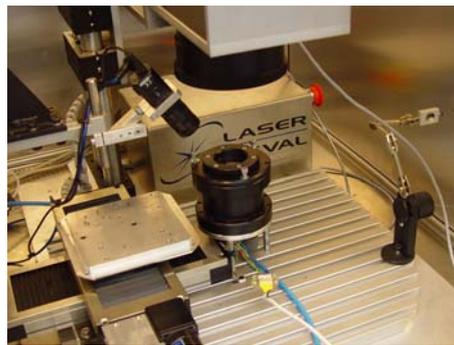
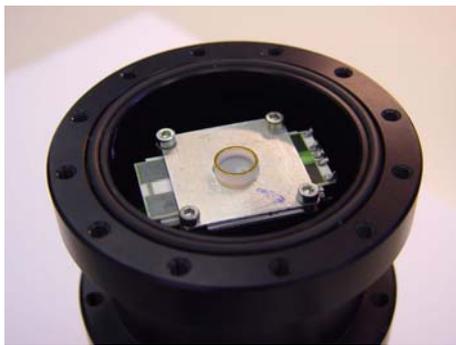
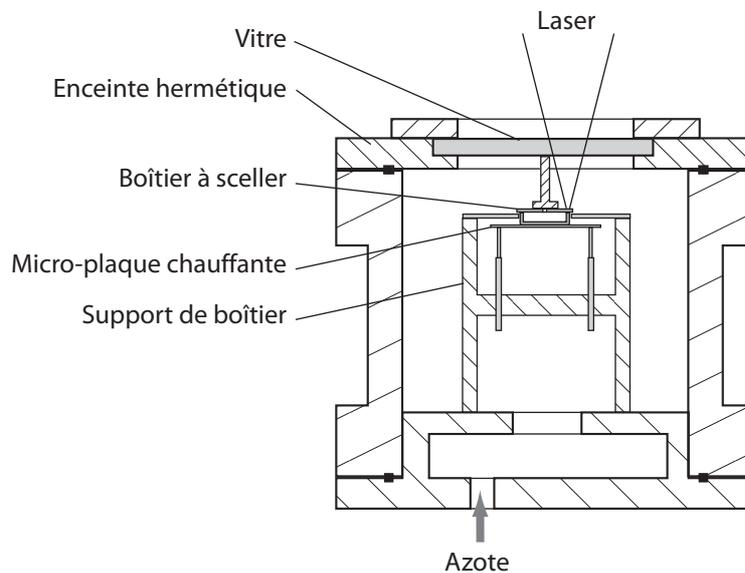
On peut limiter cet effet en préchauffant la base du boîtier à l'aide d'une plaque chauffante, comme décrit plus loin. Il faut noter que cet effet indésirable apparaît dans la plupart des cas rencontrés, également, mais dans une moindre mesure, lorsque les parties à assembler sont étamées avant d'être brasées l'une à l'autre. On a un mauvais contact entre les deux pièces, souvent limité à quelques points, ce qui empêche une transmission uniforme de la chaleur.



**Fig. 4.34:** Evolution de la température du joint pendant l'opération de brasure.

La version finale du montage utilisé est montrée dans la figure 4.35.

Dans ce montage, on utilise une enceinte permettant le contrôle de l'atmosphère. Cette enceinte est purgée par de l'azote, pour éviter l'oxydation de la brasure. On ajoute une plaque chauffante sous le boîtier à fermer, cela permet d'éviter des gradients de température dans le boîtier. La mouillabilité sur la face inférieure est aussi améliorée. L'apport de chaleur reste localisé grâce au laser, mais la puissance laser nécessaire est plus faible, on garantit



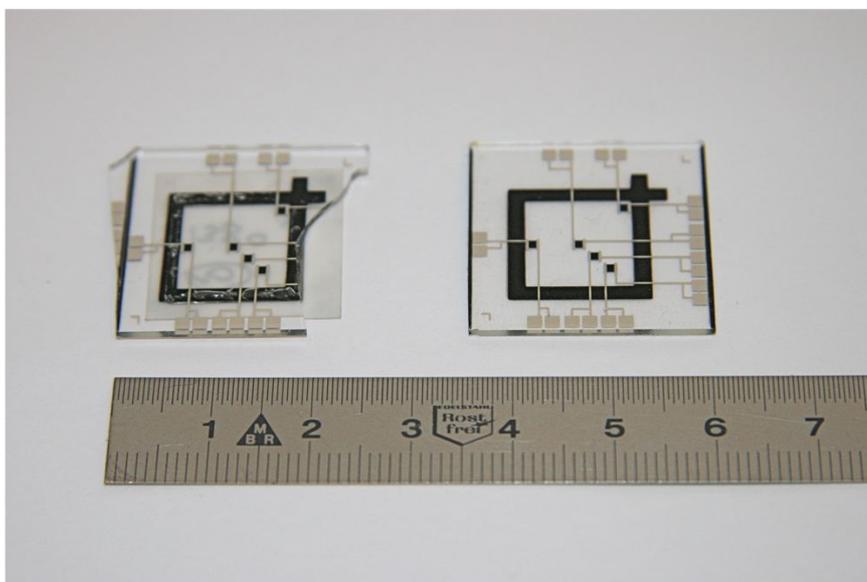
**Fig. 4.35:** Montage utilisé pour garantir le contrôle de l'atmosphère, le contact des deux composants ainsi qu'un chauffage général, en plus du chauffage local par laser.

ainsi un meilleur contrôle. Finalement, l'ensemble de la micro plaque chauffante et du boîtier est pressé vers le haut par des éléments ressorts. La force est reprise par la vitre de l'enceinte au travers d'une cale.

D'une manière générale, on cherche à minimiser l'échauffement en utilisant un laser. Mais nous avons vu qu'il est alors difficile de garantir la qualité du joint obtenu à cause principalement d'une mauvaise mouillabilité de la brasure sur la partie inférieure. Il faut donc rajouter une plaque chauffante afin d'augmenter la température de la partie inférieure, réduisant alors l'intérêt du laser. En termes de maîtrise de la température, cela revient à changer la température initiale, on réduit donc le couple puissance laser / temps nécessaire pour obtenir la fusion. Par contre, la quantité d'énergie nécessaire est plus élevée. Nous arrivons alors à une limite physique qui empêche de

réduire l'impact thermique sur le système encapsulé.

**Puissance du laser** On a vu qu'il est intéressant d'augmenter la puissance du laser pour diminuer le temps de chauffage. Cela est aussi nécessaire dans le cas d'un balayage du cordon de soudure par le faisceau (voir paragraphe 3.3). Lorsque la limite de puissance du laser est atteinte, on peut encore essayer d'augmenter le taux d'absorption du laser. Cela a été fait sur des capots en verre en sérigraphiant une couche de diélectrique noir entre le verre et la métallisation. Dans ce cas, pour une même puissance laser on peut obtenir des températures bien plus élevées que sans diélectrique. Avec un laser de 30 W, on arrive même à un décollement entre le verre et la piste de diélectrique [84] (voir figure 4.36).



**Fig. 4.36:** Piste en diélectrique noir pour augmenter l'absorption du faisceau laser. A gauche on notera la formation de bulles entre le diélectrique et le verre.

Cette méthode permet ainsi d'éviter de devoir acheter une diode laser de puissance élevée. Mais cette étude est encore assez préliminaire et il faudrait développer un diélectrique qui garantisse l'herméticité et la tenue mécanique du joint.

#### 4.4.3 Améliorations

Le problème de conduction thermique dû à la préforme peut être légèrement amélioré : au lieu d'utiliser une préforme, il est préférable d'étamer les deux

pièces à assembler. En étamant les pièces, on garde le problème des points de contact localisés entre les deux parties, mais la puissance du laser est directement transmise à la brasure se trouvant sur la pièce supérieure, ce qui évite sa fuite dans le verre. Une fois la brasure supérieure fondue, le contact thermique est bien meilleur, et on obtient rapidement la fusion de l'ensemble du joint. Le mouillage peut aussi être amélioré si les pièces sont pré-étamées. Dans ce cas, on peut utiliser de la pâte de brasure avec du flux, qui peut être éliminé avant l'assemblage final du boîtier.

#### 4.4.4 Mesures d'herméticité

Les mesures d'herméticité ont été réalisées par détection à l'hélium. On constate que les premières brasures ne sont pas hermétiques, ce qui est dû au fait que la pièce inférieure n'est pas suffisamment chauffée par le laser pour assurer la mouillabilité de la brasure.

Une seconde série de mesures montre que certains échantillons sont hermétiques, mais il reste encore des échantillons qui présentent des fuites. Cela peut être dû à deux choses : d'une part, la mauvaise mouillabilité de la préforme sur la métallisation; d'autre part, la différence de pression qui crée un trou dans le joint en fusion lors du refroidissement (voir la description de ce phénomène dans le paragraphe 4.1.7).

#### 4.4.5 Conclusion

Le chauffage par laser est une solution tout à fait applicable dans ce cas, même si elle implique certains désavantages comme les problèmes de transferts thermiques entre la zone de chauffage et l'ensemble du joint à chauffer. L'utilisation d'une préforme de brasure est intéressante dans la mesure où elle est facile à mettre en oeuvre. Elle évite l'opération et l'équipement de dépose de brasure, ainsi que l'opération d'étamage. Mais pour un chauffage par laser, le transfert thermique est moins bon ainsi que le mouillage des surfaces métallisées. Dans ce cas, il serait plus intéressant d'étamer les surfaces, permettant un mouillage et un transfert thermique meilleurs.

Dans cet exemple, le gain au niveau de la température d'encapsulation est moins intéressant que pour des boîtiers de taille supérieure. Il s'agit typiquement d'un cas où on ne peut pas jouer sur la conduction thermique du boîtier, entre le point de chauffage et les éléments sensibles. La seule possibilité est de focaliser l'énergie et de réduire le temps de chauffage, ce qui est justement difficile puisque la préforme de brasure nécessite plus de temps pour assurer le mouillage.



## Chapitre 5

# Conclusions

Pour qu'un microsystème puisse devenir un produit, il est notamment nécessaire de l'encapsuler. Cette opération permet de créer une interface entre le microsystème et l'extérieur. Jusqu'à maintenant, l'herméticité et la basse température d'encapsulation étaient souvent incompatibles: les brasures sont généralement réalisées au four, ce qui implique que l'ensemble du boîtier est chauffé.

Ce travail propose une méthode qui permet de réaliser des boîtiers hermétiques à long terme, tout en garantissant une basse température d'encapsulation.

Les nouvelles idées présentées dans cette thèse ont toutes été testées sur des cas industriels concrets. On décrit aussi les perspectives et les travaux futurs nécessaires pour améliorer et fiabiliser la méthode proposée.

### **Apport d'un point de vue technologique**

D'un point de vue technologique, on a montré que l'on peut réaliser des boîtiers hermétiques à long terme, typiquement une dizaine d'années, et qui nécessitent une basse température de fermeture. La méthode qui permet d'assembler des matériaux hermétiques (verres, céramiques, métaux) peut être appliquée ou adaptée à différents types de microsystèmes et de boîtiers. Comme nous l'avons vu, chaque système nécessite une méthode d'encapsulation adaptée, il n'est ainsi pas possible de proposer une solution universelle. Mais la démarche proposée permet de trouver une solution d'encapsulation aux produits appartenant au domaine choisi pour cette thèse (petite séries, sensibles à la température et à l'humidité). La méthode proposée se base sur un équipement léger et polyvalent (sérigraphie, LTCC, diode laser), susceptible d'exister chez tout fabricant de microsystème.

Les boîtiers en LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic, céramique co-cuite à basse température) sont particulièrement adaptés puisque le LTCC permet de remplir une large gamme de fonctions nécessaires, la principale étant l'herméticité. Le LTCC a aussi d'autres avantages: basse conductivité thermique, possibilité de formes diverses avec des cavités, intégration de conducteurs électriques sérigraphiés. Le LTCC permet également la réalisation de circuits fluidiques, de fonctions intégrées (capteurs, chauffage). Le LTCC dispose d'une très bonne stabilité thermique et chimique. Il est possible de réaliser des petites et des moyennes séries, ce qui est appréciable dans le cadre du développement d'un microsystème où plusieurs itérations sont parfois nécessaires.

La diode laser permet d'obtenir une brasure hermétique tout en réduisant l'échauffement sur le système encapsulé. Par rapport à un laser, la diode laser est polyvalente (brasure, polymérisation, différentes formes de boîtiers) et la basse densité de puissance permet de maîtriser le procédé de chauffage. La basse densité de puissance de la diode laser est tout à fait adaptée à des applications nécessitant un chauffage, telles que la brasure ou la polymérisation de colle. Un autre avantage de la diode laser est la possibilité de contrôler la puissance en continu pendant le tir. Avec un équipement simple à mettre en oeuvre (pyromètre ou résistances de mesure de température sérigraphiées), on peut contrôler la puissance du laser et la température lors de l'opération de fermeture. On peut donc déterminer la température à laquelle le système a été soumis. Malgré ses nombreux avantages en terme de focalisation d'énergie, la diode laser nécessite une maîtrise de l'opération de fermeture difficile à obtenir : la formation du joint, notamment le mouillage de la brasure sur la métallisation, devient particulièrement critique lorsque l'on veut diminuer le temps de chauffage. On constate également qu'il est nécessaire de balayer le joint de manière quasi-simultanée pour obtenir la formation du joint. Cela implique que la puissance nécessaire est plus élevée que pour le cas d'un chauffage localisé sur un point.

### **Apport d'un point de vue méthodologique**

Du point de vue méthodologique, on a montré que pour développer un boîtier de manière efficace, il est nécessaire d'utiliser des méthodes d'analyse et de conception qui tiennent compte des besoins du fabricant, mais aussi des contraintes liées aux technologies existantes. La conception d'un boîtier hermétique doit se faire conjointement au développement du microsystème lorsque c'est possible. Dans tous les cas, il est indispensable de penser en termes de fonctions. L'analyse fonctionnelle permet de formaliser les besoins en termes de fonctions à remplir. On évite ainsi de choisir une solution technique qui ne serait pas adaptée au problème à résoudre. Cette méthode d'analyse systématique permet de mieux adapter le produit aux besoins et

notamment de diminuer le temps de mise au point. Mais pour que la méthode d'analyse fonctionnelle soit maîtrisée, il est nécessaire de l'avoir pratiquée à travers plusieurs cas concrets.

On propose également une démarche de modélisation du comportement thermique. Le but de cette démarche est de trouver le modèle idoine à chaque situation. Une première étape indispensable est l'évaluation des ordres de grandeurs. Dans ce cas, on fait plusieurs hypothèses qui simplifient le problème, ce qui permet de rapidement déterminer la faisabilité d'une idée ou d'un principe. Pour affiner le modèle et prendre en compte d'autres paramètres on peut utiliser soit un modèle par analogie électrique, soit des simulations numériques. Finalement lorsque certains paramètres sont difficiles à déterminer, on peut s'aider de l'analyse dimensionnelle qui permet de prédire le comportement d'un système dans un domaine de paramètres limité, à défaut d'expliquer les phénomènes entrant en jeu. Cela est particulièrement utile dans le cas du chauffage par laser, puisqu'il est souvent difficile de modéliser l'effet du faisceau laser sur la matière.

**Perspectives** La méthode d'encapsulation proposée ouvre des perspectives dans plusieurs domaines : les microsystèmes organiques, les applications spatiales ou les réalisations de séries zéro. Chaque nouvelle application nécessite un travail de recherche et d'adaptation, mais la méthode proposée permet de tels développements.

Au niveau de la brasure par laser, certains aspects doivent encore être améliorés. Des essais préliminaires ont montré que l'absorption du faisceau laser peut être augmentée par l'utilisation d'un diélectrique sérigraphié entre le verre et la métallisation. Du fait du mode de chauffage quasi-simultané, les grand boîtiers nécessitent une grande puissance pour arriver à la fusion du joint. Il peut être intéressant de développer un diélectrique qui permet d'augmenter l'absorption du faisceau, cela peut éviter l'achat d'une diode laser de plus grande puissance. Evidemment, ce diélectrique ne doit pas dégrader les performances du boîtier, que ce soit en terme d'herméticité ou de tenue mécanique du joint. Il s'agit aussi de déterminer l'impact de la brasure en terme de contamination de l'intérieur du boîtier. Il faudrait établir les contaminants rejetés par la brasure pendant le chauffage, ainsi que après le refroidissement du joint.

Ce travail a mené à des développements novateurs présentés dans plusieurs articles de conférences. Le boîtier en LTCC pour microsystème optique est un exemple représentatif d'applications nécessitant une méthode d'encapsulation telle que décrite dans cette thèse. Des améliorations sont nécessaires, notamment au niveau du design du boîtier dans le but de réduire la déformation du LTCC lors de la cuisson.

L'encapsulation de rubidium dans une capsule scellée par brasure est un développement nouveau, qui permet de drastiquement diminuer le temps et la température de scellement par rapport au soudage anodique. Pour parfaire cette méthode il est encore nécessaire d'améliorer plusieurs points, notamment l'adhésion de la métallisation, la maîtrise de l'atmosphère d'encapsulation ainsi que l'optimisation du couple température et temps de fermeture. Malgré ces améliorations nécessaires, cette méthode donne déjà des résultats supérieurs au soudage anodique. Pour continuer le développement de cette méthode un projet de recherche est mis en place. Un brevet est aussi en cours de dépôt.

## Annexe A

# Résolution unidimensionnelle de l'équation de Laplace

Pour connaître l'évolution temporelle de la température d'une zone d'une plaque de verre située à une distance  $x$  du spot laser (paragraphe 3.3.3), nous devons résoudre l'équation de Laplace pour la diffusion thermique :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_{th} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (\text{A.1})$$

Pour simplifier le calcul, nous négligeons les pertes latérales et le profil de température ne dépend donc plus que de  $x$  et de  $t$ . Il suffit alors de ne retenir que la dérivée seconde par rapport à  $x$  dans l'équation de la diffusion thermique A.1. Les solutions  $T(x, t)$  de l'équation de diffusion ont souvent la propriété de ne dépendre que de la variable composite  $z$ .

$$z = \frac{x}{2\sqrt{D_{th}t}} \quad (\text{A.2})$$

Il faut pour cela que les conditions aux bords et la condition initiale se laissent exprimer aussi par cette variable.

$$\text{Condition initiale} \quad t = 0 \longrightarrow T(z \rightarrow \infty) = T_0$$

$$\text{Condition au bord} \quad x = 0 \longrightarrow T(z \rightarrow 0) = T_1$$

La température  $T(z)$ , maintenant fonction de  $z(x, t)$ , a partout la même valeur où  $x$  et  $t$  donnent le même  $z$ . De même les dérivées par rapport à  $t$

et à  $x$  dans l'équation A.1 sont à exprimer par les dérivées par rapport à  $z$ .

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \frac{dT}{dz} \frac{dz}{dt} = \frac{dT}{dz} \frac{-x}{4\sqrt{D_{th}t^3}} \quad (\text{A.3})$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{d^2 T}{dz^2} \frac{dz^2}{dx^2} = \frac{d^2 T}{dz^2} \frac{-x}{4D_{th}t} \quad (\text{A.4})$$

La substitution de ces expressions dans l'équation différentielle et l'intégration nous donnent successivement :

$$\frac{d^2 T}{dz^2} + 2z \frac{dT}{dz} = 0 \quad (\text{A.5})$$

$$\frac{dT}{dz} = Ae^{-z^2} \quad (\text{A.6})$$

$$T(z) = A \int_0^z e^{-u^2} du + B \quad (\text{A.7})$$

Les constantes d'intégration  $A$  et  $B$  sont déterminées par les conditions aux bords et les conditions initiales. Nous obtenons finalement :

$$T(x, t) = \left[ (T_0 - T_1) \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} du \right] + T_1 \quad (\text{A.8})$$

## Annexe B

# Détermination du flux de fuite dans un disque

Le flux dans une section est donné par :

$$\phi = -\lambda \cdot S \cdot \frac{d\theta}{dr} \quad (\text{B.1})$$

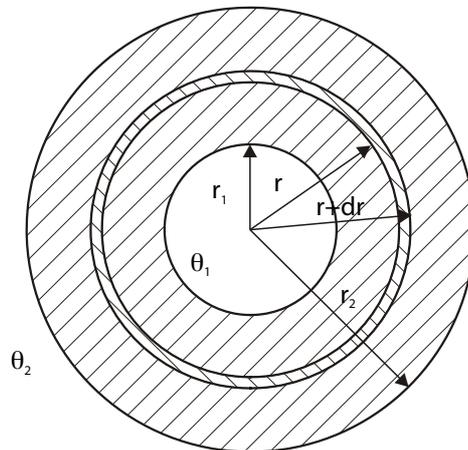


Fig. B.1: Modèle pour un flux de fuite dans une partie circulaire.

Avec :

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \quad (\text{B.2})$$

Ainsi :

$$\phi = -\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \frac{d\theta}{dr} \quad (\text{B.3})$$

$$d\theta = \frac{-\phi}{\lambda \cdot 2\pi \cdot L} \cdot \frac{dr}{r} \quad (\text{B.4})$$

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta = \frac{-\phi}{\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} \quad (\text{B.5})$$

$$\theta_1 - \theta_2 = \frac{-\phi}{\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot L} \cdot (\ln r_2 - \ln r_1) \quad (\text{B.6})$$

$$\theta_1 - \theta_2 = \frac{-\phi}{\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (\text{B.7})$$

Le flux est ainsi donné par :

$$\phi = \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \lambda (\theta_1 - \theta_2) \quad (\text{B.8})$$

# Bibliographie

- [1] J.C. Eloy. Europe is Maintaining its Leadership in MEMS. *MST News*, 2008.
- [2] P. Garrou. Wafer Level Chip Scale Packaging (WL-CSP): an Overview. *Advanced Packaging, IEEE Transactions on*, 23(2):198–205, 2000.
- [3] J.H. Lau. Critical issues of wafer level chip scale package (WLCSP) with emphasis on cost analysis and solder joint reliability. *Electronics Packaging Manufacturing, IEEE Transactions on*, 25(1):42–50, Jan 2002.
- [4] H. van Heeren and P. Salomon. Make or Buy, a Big Decision in a Small Technology - Fabless Versus Own Manufacturing. *MST News*, 2008.
- [5] M. R. Douglass. DMD Reliability: A Success Story. *Proceedings of SPIE*, 4980, 2003.
- [6] L. Zhou, A. Wanga, S. Wu, J. Sun, S. Park, and T. N. Jackson. All-organic active matrix flexible display. *Applied Physics Letters*, 88(8):083502, 2006.
- [7] C.W. Tang and S.A. VanSlyke. Organic Electroluminescent Diodes. *Applied Physics Letters*, 51(12):913–915, 1987.
- [8] M. Stewart, R.S. Howell, L. Pires, and M.K. Hatalis. Polysilicon TFT technology for active matrix OLED displays. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 48(5):845–851, May 2001.
- [9] P.E. Burrows, G.L. Graff, M.E. Gross, P.M. Martin, M. Hall, E. Mast, C. Bonham, W. Bennett, L. Michalski, M. Weaver, J.J. Brown, D. Fogarty, and L.S. Sapochak. Gas Permeation and Lifetime Tests On Polymer-Based Barrier Coatings. *SPIE Annual Meeting*, 2000.
- [10] M. S. Weaver, L. A. Michalski, K. Rajan, M. A. Rothman, J. A. Silvernail, J. J. Brown, P. E. Burrows, G. L. Graff, M. E. Gross, P. M. Martin, M. Hall, E. Mast, C. Bonham, W. Bennett, and M. Zumhoff. Organic Light-Emitting Devices With Extended Operating Lifetimes on Plastic Substrates. *Applied Physics Letters*, 81(16):2929–2931, 2002.
- [11] K. Gilleo. MEMS Packaging: History and Current Trends, 2006.

- [12] K. Persson and K. Boustedt. Fundamental Requirements on MEMS Packaging and Reliability. *International Symposium on Advanced Packaging Materials*, 2002.
- [13] T. Velten, H.H. Ruf, D. Barrow, N. Aspragathos, P. Lazarou, Erik Jung, C.K. Malek, M. Richter, J. Kruckow, and M. Wackerle. Packaging of bio-MEMS: Strategies, Technologies, and Applications. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 28(4):533– 546, 2005.
- [14] F. Gueissaz and D. Piguet. The Microreed, an Ultrasmall Passive MEMS Magnetic Proximity Sensor Designed for Portable Applications. *Proceedings of the MEMS Conference, Interlaken*, page 269, 2001.
- [15] S. Wan and K. J. Bowman. Thermal Depoling Effects on Anisotropy of Lead Zirconate Titanate Materials. *Journal of the American Ceramic Society*, 81(10):2717 – 2720, 2005.
- [16] J. Muller, G. Reppe, H. Thust, and R. Perrone. Development and Evaluation of Hermetic Ceramic Microwave Packages for Space Applications. *Ceramic Interconnect and Ceramic Microsystems Technology (CICMT) Baltimore/MD*, 2005.
- [17] B. Willing, M. Kohli, P. Muralt, and O. Oehler. Thin film pyroelectric array as a detector for an infrared gas spectrometer. *Infrared Physics & Technology*, 39(7):443 – 449, 1998.
- [18] www.composite-agency.com. 2008.
- [19] K. Ely. Issues in Hermetic Sealing of Medical Products. *Medical Device and Diagnostic Industry Magazine*, 2000.
- [20] K. L. Mittal. *Metallized Plastics 2: Fundamental and Applied Aspects*. Springer, 1992.
- [21] R.F. Silva, S. Passerini, and A. Pozio. Solution-cast Nafion/montmorillonite composite membrane with low methanol permeability. *Electrochimica Acta*, 50(13):2639 – 2645, 2005.
- [22] A. P. Roberts, B. M. Henry, A. P. Sutton, C. R. M. Grovenor, G. A. D. Briggs, T. Miyamoto, M. Kano, Y. Tsukahara, and M. Yanaka. Gas permeation in silicon-oxide/polymer (SiO<sub>x</sub>/PET) barrier films: role of the oxide lattice, nano-defects and macro-defects. *Journal of Membrane Science*, 208(1-2):75 – 88, 2002.
- [23] M. Yanaka, B. M. Henry, A. P. Roberts, C. R. M. Grovenor, G. A. D. Briggs, A. P. Sutton, T. Miyamoto, Y. Tsukahara, N. Takeda, and R. J. Chater. How cracks in SiO<sub>x</sub>-coated polyester films affect gas permeation. *Thin Solid Films*, 397(1-2):176 – 185, 2001.
- [24] M.D. Groner, S.M. George, R.S. McLean, and P.F. Garcia. Gas Diffusion Barriers on Polymers Using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Atomic Layer Deposition. *Applied Physics Letters*, 88, 2006.

- [25] G.L. Graff, R.E. Williford, and P.E. Burrows. Mechanisms of vapor permeation through multilayer barrier films: Lag time versus equilibrium permeation. *Journal of Applied Physics*, 6(1840), 2004.
- [26] A. Goswami and B. Han. On Ultra-Fine Leak Detection of Hermetic Wafer Level Packaging. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 31(1), 2008.
- [27] D. Veyrié, D. Lellouchi, J.L. Roux, F. Pressecq, A. Tetelin, and C. Pellet. FTIR Spectroscopy for the Hermeticity Assessment of Micro-Cavities. *Microelectronics Reliability*, 45(2005):1764–1769, 2005.
- [28] A. Jourdain, J. De Coster, P. De Moor, R. Puers, and H.A.C. Tilmans. Hermeticity Investigation of Sealed 0-Level Packages Based on the Damping Characteristics of the MEMS Device. *EMPC*, 2005.
- [29] D. R. Sparks, S. Massoud-Ansari, and N. Najafi. Chip-Level Vacuum Packaging of Micromachines Using NanoGetters. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 26, 2003.
- [30] F. Gueissaz. Ultra Low Leak Detection Method for MEMS Devices. *IEEE*, 2005.
- [31] F. Seigneur, T. Maeder, and J. Jacot. Laser Soldered Packaging Hermeticity Measurement Using Metallic Conductor Resistance. *XXX International Conference of IMAPS Poland Chapter*, 2006.
- [32] T. Maeder, N. Dumontier, T. Haller, Y Fournier, F. Seigneur, and P Ryser. LTCC Active Oxygen Getter Module for Hermetic Packaging Applications. *IMAPS/ACerS 4th International Conference and Exhibition, CICMT Munich*, 2008.
- [33] R Moos and J Kita. Ceramic multilayer gas sensors - an overview. In *Proceedings, XXXI International Conference of IMAPS Poland Chapter*, pages 75–82, Krasieczyn, Poland, 2007.
- [34] J. Kita, F. Rettig, R. Moos, K. H. Drüe, and H. Thust. Hot-Plate Gas Sensors - are Ceramics Better? 2005.
- [35] C. Boffito, B. Ferrario, P. Porta, and L. Rosai. A Nonevaporable Low Temperature Activatable Getter Material. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1981.
- [36] H. Henmi, S. Shoji, Y. Shoji, K. Yoshimi, and M. Esashi. Vacuum packaging for microsensors by glass-silicon anodic bonding. *Sensors and Actuators A: Physical*, 43(1-3):243 – 248, 1994.
- [37] Kevin B. Albaugh. Electrode Phenomena during Anodic Bonding of Silicon to Sodium Borosilicate Glass. *Journal of the Electrochemical Society*, 138(10):3089–3094, 1991.
- [38] S. Shoji, H. Kikuchi, and H. Torigoe. Anodic Bonding Below 180°C for Packaging and Assembling of MEMS Using Lithium Aluminosilicate  $\beta$  Quartz Glass-Ceramic. *Micro Electro Mechanical Systems*, 1997.

- MEMS '97, Proceedings, IEEE., Tenth Annual International Workshop on*, pages 482–487, Jan 1997.
- [39] Thomas R. A. Anodic Bonding of Imperfect Surfaces. *Journal of Applied Physics*, 54(5):2419–2428, 1983.
  - [40] G. Feiertag, H. Krüger, and C. Bauer. Surface Acoustic Wave Component Packaging. *Proceedings, 16th IMAPS European Microelectronics & Packaging Conference (EMPC), Oulu, Finland*, pages 134–138, 1997.
  - [41] AC. Pfahnl, N. Tenketges, J. Cepeda-Rizo, T. Rude, D. Van Heerden, T. Weihs, and O. Knio. Heat Sinks Reactively Soldered to ICs. In *Proceedings*, MA, USA, 2004. DesignCon East.
  - [42] T. Rude, J. Subramanian, J. Levin, D. Van Heerden, and O. Knio. Hermetic Sealing of Microelectronics Packages Using a Room Temperature Soldering Process. In IMAPS, editor, *International Symposium on Microelectronics*, pages 286–290, Philadelphia, USA, 2005.
  - [43] J. Tsujino. Recent developments of ultrasonic welding. In IEEE, editor, *Ultrasonics Symposium*, volume 2, pages 1051–1060, 1995.
  - [44] J. Sprovieri. Soldering the unsolderable. *Assembly Magazine*, 2008.
  - [45] <http://www.sonicsolder.com/>. 2008.
  - [46] P. Weiss. MEMS & MOEMS Reliability: Wafer-Level Packaging and Low-Temperature Processing Issues. 2005.
  - [47] G. R. Blackwell. *The Electronic Packaging Handbook*. CRC Press LCC, 2000.
  - [48] R. Tassinari. *Pratique de l'Analyse Fonctionnelle*. Dunod, 2003.
  - [49] A. Weber. Laser Welding Techniques. *Assembly Magazine*, 2002.
  - [50] R. Longchamp. *Commande Numérique de Systèmes Dynamiques*. PPUR, Presses Polytechniques Universitaires Romandes, 1995.
  - [51] N. Boryszewski. Développement d'un système de contrôle de puissance laser. Projet de semestre, Laboratoire de Production Microtechnique, EPFL (CH), 2007.
  - [52] F. Seigneur and J. Jacot. Laser Sealed Packaging for Microsystems. *IPAS*, pages 307–314, 2006.
  - [53] C. Rey. Etude d'un packaging étanche et de son industrialisation. Projet de semestre, Laboratoire de Production Microtechnique, EPFL (CH), 2005.
  - [54] S. Vionnet-Menot. *Low Firing Temperature Thick-Film Piezoresistive Composites - Properties and Conduction Mechanism*. PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005.

- [55] A. Mathieu, S. Mattei, A. Deschamps, B. Martin, and D. Grevey. Temperature Control in Laser Brazing of a Steel/Aluminium Assembly Using Thermographic Measurements. *Elsevier*, 2005.
- [56] Y. Fournier, O. Triverio, T. Maeder, and P. Ryser. LTCC Free-standing Structures with Mineral Sacrificial Paste. 2008.
- [57] L. Brocard. Etude et optimisation du comportement thermique d'un boîtier hermétique. Projet de semestre, Laboratoire de Production Microtechnique, EPFL (CH), 2007.
- [58] R. Bauer, V. Strickert, K.-J. Wolter, W. Sauer, D. Leonescu, and P. Svasta. Investigation on an Integrated Liquid Cooling System in LTCC-Multilayer. *24th International Spring Seminar on Electronics Technology*, 2001.
- [59] W. K. Jones, Y. Liu, and M. Gao. Micro Heat Pipes in Low Temperature Cofire Ceramic (LTCC) Substrates. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 26(1), 2003. Vias thermiques dans LTCC. Références vers formation cavité et collage LTCC en basse pression.
- [60] W. K. Jones, S. Kappagantula, and J. Wang. Micro Channel Fabrication in LTCC Substrate. In *Proceedings, 1st International Conference on Ceramic Interconnect and Ceramic Microsystems Technologies (CICMT)*, Baltimore, USA, 2005.
- [61] Y. Fournier, R. Willigens, and T. Maeder. Integrated LTCC microfluidic modules - an SMT flow sensor. *15th European Microelectronics and Packaging Conference (EMPC) - IMAPS*, pages P2.06, 577–581, 2005.
- [62] T. Maeder, Y. Fournier, S. Wiedmer, H. Birol, C. Jacq, and P. Ryser. 3D Structuration of LTCC / Thick-Film Sensors and Fluidic Devices. *CICMT Denver*, 2007.
- [63] R. Remsburg. *Thermal Design of Electronic Equipment*. CRC Press LCC, 2001.
- [64] A.-M. Bianchi, Y. Fautrelle, and J. Etay. *Transferts Thermiques*. PPUR, Presses Polytechniques Universitaires Romandes, 2004.
- [65] F. Seigneur, Y. Fournier, T. Maeder, and J. Jacot. Laser soldering of LTCC hermetic packages with minimal thermal impact. *16th IMAPS European Microelectronics & Packaging Conference (EMPC)*, pages 526–530, 2007.
- [66] *On the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (ROHS)*, directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council, 2002 edition.
- [67] D. Schwanke and J. Pohlner. Enhancement of Fine Line Print Resolution due to Coating of Screen Fabrics. *IMAPS/ACerS 4th International Conference and Exhibition, CICMT Munich*, 2008.

- [68] Y.L. Wang, P.J. Ollivier, and M.A. Skurski. Photoformed Thick Films Materials and Their Application to Fine Feature Circuitry. *Proceeding IMAPS, Denver, CO.*, pages 579–584, 2000.
- [69] H. Birol. *Fabrication of Low Temperature Co-Fired Ceramic (LTCC)-Based Sensor and Micro-Fluidic Structures*. PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2007.
- [70] T. Garino and M. Rodriguez. The Effect of Atmosphere on the Interdiffusion of Silver and Palladium. *Journal of the American Ceramics Society*, 1999.
- [71] F. Seigneur, Y. Fournier, T. Maeder, P. Ryser, and J. Jacot. Hermetic Package for Optical MEMS. *IMAPS/ACerS 4th International Conference and Exhibition, CICMT Munich*, 2008.
- [72] S. Giudice. Dispositif d’alignement de précision pour feuilles de LTCC. Projet de master, Laboratoire de Production Microtechnique, EPFL (CH), 2008.
- [73] P. Carazzetti, P. Renaud, and H. Shea. Low-Power Hermetically Sealed On-Chip Plasma Light Source Micromachined in Glass. *IEEE MEMS*, 2008.
- [74] J. Camparo. The rubidium atomic clock and basic research. *Physics Today*, November 2007, 2007.
- [75] A. Berthold, L. Nicola, P.M. Sarro, and M.J. Vellekoop. Glass-to-glass anodic bonding with standard IC technology thin films as intermediate layers. *Sensors and Actuators*, 82(224-228), 2000.
- [76] V.G. Kutshoukov, F. Laugere, W. van der Vlist, L. Pakula, Y. Garini, and A. Bossche. Fabrication of nanofluidic devices using glass-to-glass anodic bonding. *Sensors and Actuators*, 114:521–527, 2004.
- [77] J. Sangster and C.W. Bale. The Rb-Sn (Rubidium-Tin) System. *Journal of Phase Equilibria*, 19(1), 1998.
- [78] *Smithells Metals Reference Handbook*, Butterworth-Heinemann, 1999.
- [79] F. Seigneur, Carazzetti P, C. Schori, T. Maeder, G. Mileti, P. Thomann, and H. R. Shea. Low-temperature hermetic sealing of micromachined Rb cells for chip-scale atomic clocks using eutectic Sn:Bi solder. Abstract soumis à la conférence Transducers 2009, 2008.
- [80] C. Schori, Y. Petremand, F. Seigneur, T. Maeder, H. R. Shea, N. De Rooij, G. Mileti, and P. Thomann. CPT spectroscopy on low-temperature sealed MEMS rubidium vapour cells. Abstract soumis à la conférence EFTF 2009.
- [81] F. Wehrli. Polymérisation de colle époxy à l’aide d’une diode laser. Projet de semestre, Laboratoire de Production Microtechnique, EPFL (CH), 2005.

- [82] P. Lambert. Introduction à l'analyse dimensionnelle. Document interne, EPFL (CH), 2005.
- [83] A. Ginggen, Y. Tardy, R. Crivelli, T Bork, and P. Renaud. A Telemetric Pressure Sensor System for Biomedical Applications. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 55(4), 2008.
- [84] V. Nicollin. Etude d'un packaging étanche et de son industrialisation. Projet de diplôme, Laboratoire de Production Microtechnique, EPFL (CH), 2005.