

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie mécanique

Étude et caractérisation du comportement thermomécanique de récepteur d'un système photovoltaïque concentré

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie mécanique

Mohamed CHROUFA

Jury : Luc FRÉCHETTE (directeur)
Saïd ELKOUN
Richard ARÈS

À mon épouse, ma mère et mon père

RÉSUMÉ

Le développement dans la dernière décennie des systèmes photovoltaïques concentrés a augmenté le besoin de gérer le budget thermique dans le récepteur pour empêcher sa surchauffe et gérer les pertes de performances liées à la température. Ce projet de maîtrise s'inscrit dans le cadre du développement d'un système solaire fortement concentré en collaboration avec des partenaires industriels. Notre partenaire industriel a mis au point une solution de production d'énergie photovoltaïque de haute concentration à l'échelle commerciale, mais il reste à valider la conception du système adopté.

Le projet concerne l'étude du récepteur photovoltaïque qui est composé d'un réseau dense de 800 cellules solaires triple jonctions, montées sur un substrat. Ce dernier est composé d'un empilement de couches et un échangeur de chaleur pour refroidir le récepteur. Puisque notre récepteur absorbera un grand flux de chaleur, il y aura des contraintes dues à la non-concordance des coefficients de dilatation thermique entre ses différentes couches. Ces déformations pourraient provoquer la rupture de contact entre les cellules solaires, et ainsi la défaillance électrique du récepteur.

Pour cela, ces travaux de recherche ont porté sur une étude thermomécanique du récepteur. En effet, l'étude de la dilatation de l'assemblage multicouche a permis d'acquérir une connaissance d'analyse thermomécanique de la tenue de la structure multicouche vis-à-vis d'un chargement thermique. Puis, le comportement des époxy, conducteur et isolant électrique utilisés pour fixer les cellules sur le substrat, a été étudié en fonction de plusieurs paramètres géométriques et des propriétés matérielles. La différence des coefficients d'expansion thermiques (CTE) des époxy, était le paramètre clé pour varier les contraintes dans les interconnexions. Conséquemment, on a utilisé deux époxy avec deux CTE proches pour diminuer les contraintes induites dans les deux époxy.

De plus, vu que la structure se compose des couches usinées, on a créé des abaques de variation de rigidité effective en fonction des facteurs de formes dimensionnels des couches usinées. Enfin, le travail a permis de mettre en place des essais expérimentaux pour s'assurer du fonctionnement du récepteur à haute température. Par conséquent, on a validé l'utilisation de l'époxy dans la conception adoptée vu que la déformation maximale supportée par ce dernier ($\varepsilon_{max} = 0.167\%$) est supérieure à la déformation maximale qu'il peut avoir au cours de l'opération ($\varepsilon_{\text{époxy}} = 0.0048\%$). Ensuite, les exigences de récepteur en termes de fonctionnement à haute température ont été fixées, comme l'écart maximal que l'époxy peut supporté pour la liaison des cellules entre deux unités du récepteur qui est $\Delta\text{Gap}_{\text{limite}} \in [\mp 46 \mu\text{m}, \mp 53 \mu\text{m}]$.

Mots clés : concentration solaire, étude thermomécanique, contraintes mécaniques, échangeur de chaleur, structure multicouche.

REMERCIEMENTS

Je me permets d'exprimer mes remerciements les plus sincères pour le professeur **Luc Fréchette**, pour la qualité exceptionnelle de son encadrement, sa disponibilité pour toute information tout au long l'élaboration de ce projet. Et surtout pour sa méthode pédagogique puissante qui m'a poussé à réussir ce projet.

Je tiens à remercier Monsieur **Maxime Dubois** pour son aide précieuse et pour tous ces conseils utiles. J'adresse aussi mes remerciements à Monsieur **Mohamed Omri** d'avoir accepté de travailler avec nous sur les tests numériques.

Un grand merci très spécial pour ma femme qui n'a cessé de me supporter. Un grand merci pour mes parents, ma sœur et mes frères qui m'ont tant soutenu.

Enfin merci pour toute personne ayant participé à ce modeste travail.

Mohamed chroufa

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES SYMBOLES ET DES ACRONYMES.....	ix
1. INTRODUCTION ET ÉTAT DE L'ART	1
1.1 Introduction générale	1
1.2 Les cellules photovoltaïques	3
1.3 La dilatation thermique	4
1.4 L'approche de la plaque du récepteur.....	5
1.5 Les techniques du refroidissement	7
1.6 Description du récepteur	8
1.7 Problématique.....	10
1.7.1 Mise en contexte.....	10
1.7.2 Sources des contraintes et les problèmes physiques liés	11
1.7.3 Objectifs et approche utilisée	11
2 ÉTUDE DE LA DILATATION THERMIQUE D'UN ASSEMBLAGE MULTICOUCHE	13
2.1 Mise en contexte et méthodologie	13
2.1.1 Mise en contexte.....	13
2.1.2 Méthodologie.....	14
2.2 Étude de la dilatation thermique d'un multicouche sans flexion	14
2.2.1 Cas de procédure de fabrication	14
2.2.2 Cas d'un bilame	16
2.2.3 Calcul de coefficient d'expansion thermique effectif.....	17
2.3 Étude de la courbure d'un multicouche sous chargement thermique	19
2.3.1 Principe de la flexion d'une structure multicouche	20
2.4 Étude de flexion du récepteur de système photovoltaïque concentrée	23
2.4.1 Mise en contexte et objectif	23
2.4.2 Méthodologie et résultats	25
2.4.3 Solution pour le changement de la résistance de cuivre	33
2.5 Conclusion.....	35
3 ÉTUDE DE L'INFLUENCE DU MICROUSI -NAGE SUR LA DÉFORMATION THERMOMECHANIQUE	36
3.1 Effet de micro-usinage intérieur sur la dilatation thermique de l'échangeur	36
3.1.1 Objectif et description de la méthode utilisée	36
3.1.2 Modèle théorique et hypothèses générales.....	36
3.1.3 Plan d'observation des comportements	37

3.1.4	Observations et interprétations	38
3.1.5	Conclusion.....	40
3.2	Effet de micro-usinage sur la déformation thermomécanique de l'échangeur	41
3.2.1	Mise en contexte.....	41
3.2.2	Méthodologie.....	41
3.2.3	Résultats et interprétations	44
3.2.4	Interprétations.....	47
3.2.5	Conclusion.....	48

4 L'ANALYSE DES CONTRAINTES THERMO -MÉCANIQUES DANS LES COUCHES D'ÉPOXY 49

4.1	Problèmes.....	49
4.2	Méthodologie.....	49
4.3	Influence des paramètres sur les contraintes dans la couche d'époxy.....	55
4.3.1	Influence de l'épaisseur de la couche d'époxy sur la contrainte de tension	56
4.3.2	Influence de la largeur de la couche d'époxy sur la contrainte de traction	57
4.3.3	Influence du changement époxy sur la contrainte de traction.....	57
4.3.4	Influence du module de Young sur la contrainte de traction	59
4.4	Conclusion.....	60

5 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES DE L'ADHESION ET DE L'INTERCONNECTION DES CELLULES SUR LE RECEPTEUR..... 61

5.1	Mise en contexte et problématique	61
5.2	Méthodologie.....	61
5.3	Procédure de préparation des échantillons	67
5.3.1	Étalement d'époxy	67
5.3.2	Nettoyage des cellules solaires des impuretés.....	70
5.3.3	Cuisson d'époxy et préparation des échantillons	73
5.4	Plan d'observation des comportements : Résultats et interprétations	73
5.4.1	Correction de l'afficheur de la plaque chauffante	73
5.4.2	Résultats	75
5.4.3	Interprétations.....	78
5.5	Conclusion.....	78

CONCLUSION GÉNÉRALE 80

ANNEXE A	CONCEPTION DU RÉCEPTEUR.....	82
ANNEXE B-1	SCRIPT <i>MATLAB</i> ® POUR LE CALCUL ANALYTIQUE.....	83
ANNEXE B-2	CALCUL ANALYTIQUE DE RAYON DE COURBURE.....	87
ANNEXE C	VARIATION DU FACTEUR K EN FONCTION DE (A/B, C/B, D/B).....	90
ANNEXE D	PROPRIÉTÉS DES ÉPOXYS.....	94
ANNEXE E-1	DOSSIERS TECHNIQUES DES ÉCHANTILLONS	97
ANNEXE E-1	DOSSIERS TECHNIQUES DES ÉCHANTILLONS	97
ANNEXE E-2	PROCÉDURE DES TESTS SUR LE RÉCEPTEUR RÉEL	102

LISTE DES RÉFÉRENCES.....	107
----------------------------------	------------

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Récepteur du système photovoltaïque concentré.....	3
Figure 1.2 Vue schématique d'une cellule triple jonction [4].....	4
Figure 1.3 Dilatation thermique d'une tige	4
Figure 1.4 Le premier modèle d'un récepteur avec des cellules multijonctions (2001) [12]	5
Figure 1.5 Configuration de la plaque du récepteur	6
Figure 1.6 Tension de circuit ouvert en fonction de la température de la cellule de Si [10]	6
Figure 1.7 Modèle d'échangeur de chaleur avec des microcanaux [12].....	7
Figure 1.8 La configuration du récepteur adopté	8
Figure 1.9 Vue de haut de la plaque du récepteur	9
Figure 2.1 La dilatation thermique d'une structure multicouche	15
Figure 2.2 La dilatation thermique linéaire d'un bilame	16
Figure 2.3 La contrainte parallèle à l'interface de deux couches en fonction de la température	17
Figure 2.4 Coefficient d'expansion thermique en fonction des modules	19
Figure 2.5 Schéma montrant la flexion d'une structure multicouche	20
Figure 2.6 Flexion d'une structure multicouche.....	21
Figure 2.7 La géométrie d'une unité du récepteur.....	24
Figure 2.8 Courbe caractéristique de matériaux	26
Figure 2.9 Représentation schématique des contraintes de cisaillement dans les couches.....	27
Figure 2.10 Distribution des contraintes de cisaillement $ \tau $ pour $\Delta T_1 = 65$	27
Figure 2.11 Distribution de la contrainte moyenne parallèle à l'interface des couches.....	28
Figure 2.12 Représentation schématique de l'effet de variation d'épaisseur de la couche 5	30
Figure 2.13 Représentation schématique de l'effet de variation d'épaisseur d'acier	31
Figure 2.14 Variation de la courbure en fonction d'augmentation de la température	32
Figure 2.15(a) Variation de la courbure en fonction d'épaisseur massique (b) Variation de α_{eff} en fonction d'épaisseur massique	33
Figure 2.16 Les deux phases d'assemblage des couches de chaque unité du récepteur.....	34
Figure 3.1 Dilatation linéaire d'un corps plein.....	36
Figure 3.2 Montage de mesure expérimentale de la dilatation d'échangeur.....	37
Figure 3.3 Le montage de mesure de la dilatation thermique de l'échangeur	38
Figure 3.4 Variation du déplacement longitudinal de l'échangeur en fonction de la T	39
Figure 3.5 Schéma de la modélisation d'un volume micro-usinée avec un volume plein.....	40
Figure 3.6 Volume de contrôle à modéliser	42
Figure 3.7 Maillage du volume de contrôle de la structure.....	43
Figure 3.8 Exemple de distribution de contrainte selon l'axe x dans la structure en fonction des différentes combinaisons de facteurs de forme (a) et (b).....	44
Figure 3.9 Variation du facteur k en fonction des facteurs de formes (a/b, c/b, d/b)	45
Figure 3.10 Variation de contrainte axiale σ_x selon y sur l'arrêt 1 pour $k < 1$	46
Figure 3.11 Variation de contrainte axiale σ_x selon y sur l'arrêt 1 pour $k > 1$	46
Figure 3.12 Modélisation du récepteur réel en un substrat avec des couches pleines	47
Figure 4.1 Vue exposée du volume élémentaire représentatif	49
Figure 4.2 Volume de contrôle du récepteur pour l'étude des époxy's	50

Figure 4.3 Un volume de contrôle de dimensions : $10 \times 10 \times 9,55$ mm.....	50
Figure 4.4 Géométrie et conditions aux limites.....	52
Figure 4.5 Maillage du volume de contrôle	52
Figure 4.6 Le volume de contrôle en déformation	53
Figure 4.7 Déplacement suivant z dans la couche des deux époxys suivant l'axe y.....	54
Figure 4.8 Identification des deux lignes le long desquelles les données sont extraites	54
Figure 4.9 Variation des contraintes induites dans l'époxy en fonction de la position y	55
Figure 4.10 Variation de la contrainte de traction en fonction de l'épaisseur d'époxy.....	56
Figure 4.11 Variation de la contrainte de traction en fonction de la largeur d'époxy.....	57
Figure 4.12 Variation de la contrainte de tension en fonction de ratio des CTE des époxys	58
Figure 4.13 Contrainte induite dans l'époxy en fonction de la position sur l'axe y.....	59
Figure 4.14 Variation de la contrainte de tension selon du ratio des modules de rigidité	60
Figure 5.1 Échantillon pour test #1.....	62
Figure 5.2 Échantillon pour test#2.....	63
Figure 5.3 Présentation de l'écart d'étude (Gap) de test #3	64
Figure 5.4 Échantillon pour le test#3.....	65
Figure 5.5 Échantillon pour le test #3.....	66
Figure 5.6 Variation de la température de cuivre en fonction de la température de la plaque...	65
Figure 5.7 Procédure d'étalement d'une couche d'époxy avec une épaisseur uniforme.....	62
Figure 5.8 Comparaison de deux échantillons collés avec la méthode #1 et #2	63
Figure 5.9 Résultat d'étalement d'époxy	70
Figure 5.10 Gaufre de Silicium coupée en morceaux.....	70
Figure 5.11 Nettoyage des cellules solaire.....	71
Figure 5.12 Procédure de nettoyage des cellules solaire	71
Figure 5.13 État d'une cellule solaire avant et après le nettoyage	71
Figure 5.14 Cycle thermique pour faire cuire l'époxy EK1000	72
Figure 5.15 Montage de mesure de la variation de température	73
Figure 5.16 Variation de la température de la plaque en fonction de température de cuivre	73
Figure 5.17 Résultats des tests thermiques à $T \in [300 \text{ °C}, 450 \text{ °C}]$	74
Figure 5.18 Mesures effectuées sur l'échantillon pour le test #3	76
Figure 5.19 Résultats des tests thermiques sur les échantillons	77
Figure B-2.1 Déformation d'un bilame suite à un chargement thermique ΔT	87
Figure B-2.2 Déflexion d'une bande.....	89
Figure F.1 Principe de fonctionnement du microscope acoustique.....	103
Figure F.2 La pénétration des ondes sonores en fonction de la fréquence du transducteur	103
Figure F.3 Assemblage d'une unité du récepteur.....	104
Figure F.4 L'échantillon a testé sur le microscope acoustique.....	105
Figure F.5 État d'interface de soudure en utilisant in transducteur de 230 MHz.....	106
Figure F.6 État d'interface de soudure en utilisant in transducteur de 15 MHz.....	107

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Coefficient de dilatation des matériaux	10
Tableau 2.1 Propriétés moyennes des matériaux utilisés dans le substrat du récepteur	24
Tableau 2.2 Exemple d'empilement d'une unité du récepteur	25
Tableau 2.3 Valeurs de différentes contraintes dans les couches du substrat	29
Tableau 3.1 Tableau de Mesures de déplacement d'échangeur	39
Tableau 3.2 Caractéristiques du maillage utilisé	43
Tableau 4.1 Les propriétés des matériaux de la puce	51
Tableau 5.1 Mesure de la température sur l'échantillon de test #1	76
Tableau 5.2 Mesures de l'allongement de l'écart entre deux blocs de cuivre	77
Tableau E-1 1 Nombre et dimensions des échantillons.....	97

LISTE DES SYMBOLES ET DES ACRONYMES

Symbole	Définition
HCPV	<i>High concentrated photovoltaïque cells</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
CPV	<i>Concentrated photovoltaic cells</i>
DRA	<i>Dense Receiver Array</i>
PV	Photovoltaïque
CTE	Coefficients d'expansion thermique
AlN	Nitride d'aluminium
3IT	Institut interdisciplinaire d'innovation technologique
VER	Volume élémentaire représentatif
DBC	<i>Direct bounded copper</i>
L	Longueur
V	Tension
I(k)	Intensité(k)
E	Module d'Young
F	Force
t	Épaisseur
w	Largeur
R_{th}	Résistance thermique
k	La courbure
Cu	Cuivre
W_w	L'épaisseur des ailettes des microcanaux
W_c	Largeur des microcanaux
H	Hauteur des ailettes
α	Coefficient d'expansion thermique
T_g	La température de transition vitreuse
α	Coefficient d'expansion thermique
ϑ	Coefficient de poisson
σ	Contrainte de tension
δ	Déflexion
ρ	Rayon de courbure
ε	Allongement
τ	Contrainte de cisaillement

1. INTRODUCTION ET ÉTAT DE L'ART

1.1 Introduction générale

Sous l'effet de nouveaux progrès technologiques, on assiste aujourd'hui à l'apparition de nouveaux concepts de systèmes producteurs d'électricité. Citons parmi lesquels les panneaux solaires photovoltaïques, nécessitant des grandes surfaces de panneaux à fabriquer avec des coûts importants pour recueillir le rayonnement solaire. Une alternative est d'utiliser des miroirs pour concentrer le rayonnement solaire sur des cellules photovoltaïques plus petites avec des facteurs de concentration allant de 200x à 1000x. Ce projet se déroule dans le contexte d'installation d'un concentrateur solaire à l'Université de Sherbrooke, qui se compose de miroirs réfléchissants maintenus sur un cadre parabolique (Figure 1.1). Le cadre parabolique est monté sur une base mobile selon deux axes qui pointe le système précisément face au soleil pendant toute la journée. Les miroirs réfléchissants concentrent la lumière à 1000 fois l'intensité reçue du soleil sur deux unités de réception photovoltaïque. Chaque récepteur est un ensemble de 8 unités fixées sur une plaque d'acier. Chaque unité se compose d'un réseau dense de plus de 100 cellules solaires à haute efficacité montées sur une structure multicouche et un échangeur de chaleur pour les refroidir. La conception initiale de ce système concentrateur est faite par notre partenaire industriel, il reste donc à valider cette conception.

Le travail se concentre au niveau du récepteur. Une des grandes problématiques est la gestion thermique, plus précisément, l'excédent d'énergie qui n'est pas converti en électricité s'accumule dans les composantes du récepteur en forme de chaleur. En effet, ses couches subissent des changements dimensionnels en réponse à la différence des coefficients d'expansion thermique entre elles. Conséquemment, il y aura des déformations du récepteur qui mènent à des fractures des cellules solaires ainsi qu'à une décontraction des liaisons électriques. Donc, le récepteur nécessite un bon niveau de refroidissement pour éviter les déformations, et une bonne uniformité de la température pour minimiser les gradients de température entre ses composants.

L'objectif principal de ce projet est de fixer les exigences de récepteur en termes de fonctionnement à haute température. On va donc étudier l'impact des contraintes thermomécaniques sur le comportement du récepteur. Par la suite, on passe à l'évaluation et au

changement d'une multitude de ses paramètres géométriques et ses propriétés matérielles pour qu'il soit résistant aux différentes contraintes subites.

Ce mémoire est constitué de cinq chapitres. Le premier présente une introduction d'état de l'art sur les systèmes photovoltaïques concentrés. Une attention particulière est portée sur les récepteurs des systèmes solaires concentrés. Ainsi, cette partie fait ressortir la problématique et les objectifs de la recherche suivie d'une méthodologie de travail. Le deuxième chapitre présente une étude thermomécanique au niveau des structures multicouches. Deux configurations géométriques de ces structures sont analysées. Celle de l'étape de fabrication où les moments de flexion sont négligés, et la configuration du récepteur en application. Le troisième chapitre porte sur une étude de la déformation thermomécanique d'une structure micro-usinée à l'intérieur. Le quatrième chapitre présente une étude numérique des différents paramètres de déformation des deux époxyds du récepteur. Le but de cette étude est de fixer les critères de conceptions liés à l'utilisation des époxyds dans le récepteur. Dans le cinquième chapitre, l'étude expérimentale des échantillons du récepteur est présentée. Par ailleurs, les résultats expérimentaux sont analysés dans cette partie. Cette analyse permet de valider les critères de la conception du récepteur.

Finalement, une conclusion générale de ce travail est présentée. Les annexes exposent une vue exposée du récepteur (annexe A), le calcul analytique des contraintes induites dans un multicouche ainsi que le rayon de courbure pour un bilame (annexe B1 et B2), la variation de facteur de correction k en fonction des différentes combinaisons des facteurs de formes qui complète l'étude faite dans le chapitre 3 (annexe C), les propriétés des époxyds étudiés dans le chapitre 4 (annexe D), le dossier technique des échantillons des tests expérimentaux sans cellules solaires présentés dans le dernier chapitre (annexe E-1), la procédure de tests sur le récepteur réel (annexe E-2) et la confirmation d'utilisation d'un microscope acoustique pour analyser les couches de soudures du récepteur (annexe F).

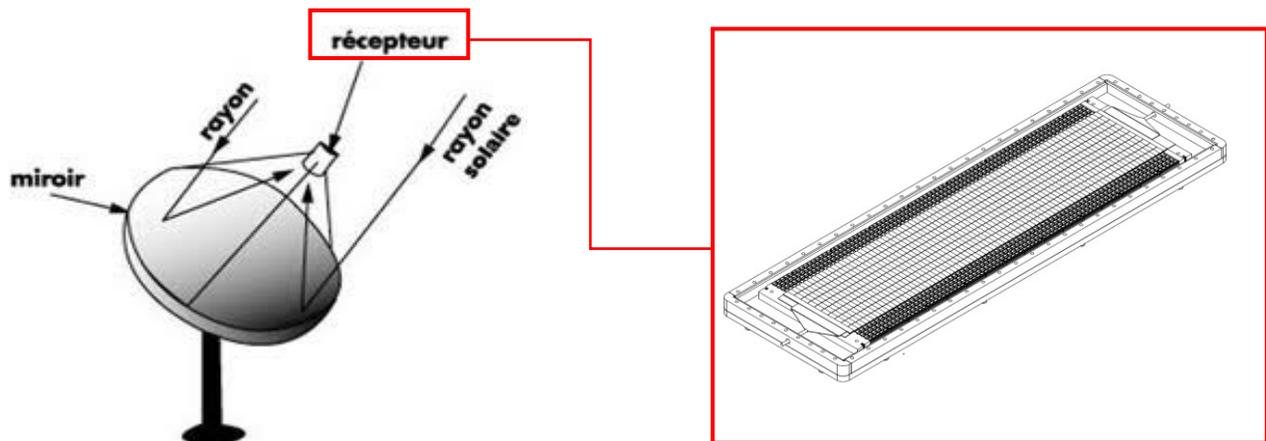


Figure 1.1 Récepteur du système photovoltaïque concentré

1.2 Les cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs, le plus connu étant le silicium cristallin qui occupe maintenant plus de 90% du marché mondial des cellules solaires [4]. Parmi ces dernières, on trouve les cellules multijonctions. Une cellule solaire à triples jonctions se compose d'un empilement de trois types de semi-conducteurs (GaInP/GaInAs/Ge). Chaque type est destiné à convertir une partie du spectre solaire : ultraviolet, visible et infrarouge (Figure 1.2). Ainsi, la majorité du spectre solaire est absorbée, ce qui augmente le rendement de ces cellules et génère un maximum d'électricité. Pour cela, on a utilisé ces cellules dans le récepteur. Ce type de cellules a été initialement développé pour des applications spatiales, et a obtenu des rendements élevés, atteignant 40,7% [1]. Citons entre autres Soitec[25] , SpectroLab [3] et NREL [4] qui ont obtenu des rendements record des cellules photovoltaïques de respectivement 44,7%, 41,6% et 40,8%.

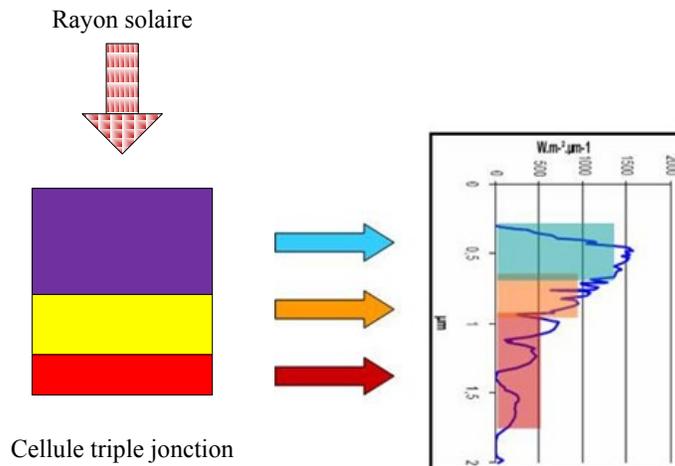


Figure 1.2 Vue schématique d'une cellule triple jonction [4]

Par ailleurs, SolFocus et les autres leaders du marché photovoltaïque concentré ont démontré l'efficacité du système photovoltaïque de 25% [2] lors de la combinaison des cellules photovoltaïques triples-jonctions avec la technique de concentration. Puisque notre récepteur va être face au chargement thermique, on va introduire la dilatation thermique et ses effets sur la déformation de ces différents composants.

1.3 La dilatation thermique

Les corps solides se dilatent lorsque la température augmente. C'est l'expansion d'un corps sous pression constante engendré par une variation de température ΔT (Figure 1.3). Il y a trois types de dilatation à considérer :



Figure 1.3 Dilatation thermique d'une tige

La dilatation linéaire : on traite le cas d'un fil ou d'une tige. La valeur de la dilatation thermique ΔL est donnée par la relation suivante:

$$L_{\text{final}} = L_0(1 + \alpha \cdot \Delta T) \text{ ou } \frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

La dilatation surfacique : comme le cas d'une plaque. L'allongement surfacique thermique S peut s'écrire comme la suite :

$$S_{\text{final}} = S_0(1 + \beta \cdot \Delta T) \text{ ou } \frac{\Delta S}{S_0} = \beta \cdot \Delta T \text{ avec } \beta = 2 \cdot \alpha \quad (1.2)$$

La dilatation volumique : c'est le cas d'un volume cubique. La dilatation volumique peut être exprimée comme la suite :

$$V_{\text{final}} = V_0(1 + \gamma \cdot \Delta T) \text{ ou } \frac{\Delta V}{V_0} = \gamma \cdot \Delta T \text{ avec } \gamma = 3 \cdot \alpha \quad (1.3)$$

1.4 L'approche de la plaque du récepteur

L'approche de la plaque du récepteur était conçue pour la première fois en 2001 par SpectroLab [12] (Figure 1.4). Ce récepteur se compose d'un réseau de cellules photovoltaïques reliées entre elles qui captent la lumière du soleil pour la convertir en électricité. Un isolant qui limite les fuites électriques et colle les cellules au substrat (Figure 1.5). Ce dernier est un empilement des différents matériaux avec un échangeur de chaleur pour refroidir l'ensemble.

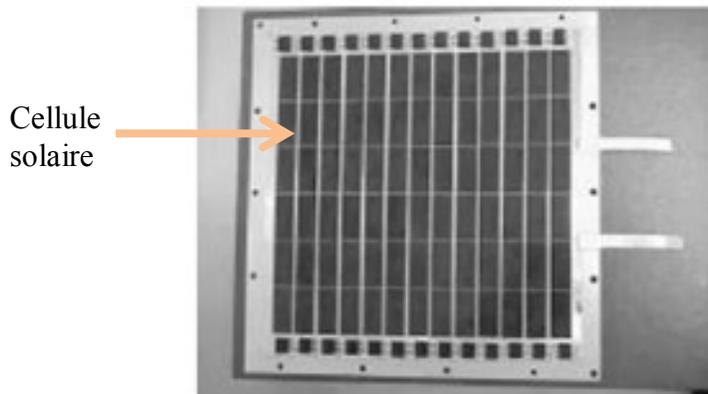


Figure 1.4 Le premier modèle d'un récepteur dense (Dense Receiver Array : DRA) avec des cellules multijonctions (2001) [12]

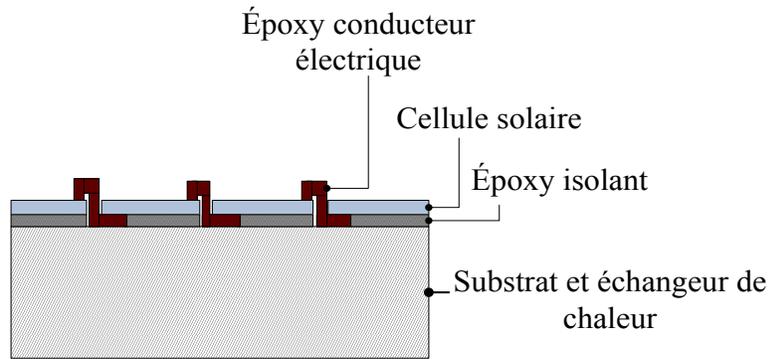


Figure 1.5 Configuration de la plaque du récepteur

Ces récepteurs sont en cours de développement. Un défi qui existe au cours de leur conception est la gestion de flux de chaleur, qui affecte l'efficacité des cellules. En effet, comme le montre la figure 1.6, l'efficacité globale des cellules diminue linéairement avec l'augmentation de la température pour un flux lumineux donné [10].

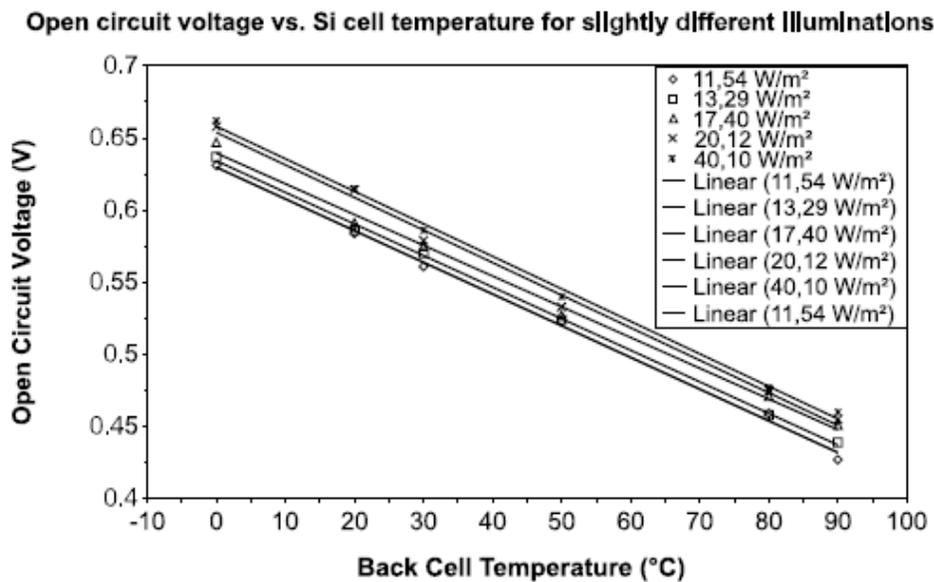


Figure 1.6 Tension de circuit ouvert en fonction de la température de la cellule de Si [10]

En plus, l'impact mécanique de la température sur le récepteur demeure un grand défi à résoudre. En effet, le récepteur est un empilement de plusieurs matériaux [10]. Ayant de différents coefficients d'expansion thermique, les composants subissent des changements dimensionnels conséquents sous l'effet d'un chargement thermique supposé uniforme dans la structure. Donc, la

conception des récepteurs des systèmes solaires concentrés est en cours de développement ainsi que leurs systèmes de refroidissements.

1.5 Les techniques du refroidissement

Les techniques de refroidissement sont diverses. Citons parmi lesquels, entre autres, la technique des microcanaux, présentée dans la figure 1.7. Ce concept a été d'abord développé par Tuckerman et Peace en 1981 avec des matériaux à haute conductivité thermique [6]. Au cours de la conception d'échangeurs de chaleur, ils ont découvert l'influence des microcanaux sur la capacité de refroidissement du système entier. Les sections droites utilisées dans les microcanaux peuvent être rectangulaires, triangulaires et trapézoïdales. Le résultat du refroidissement par les microcanaux est influencé par la taille du canal, la puissance, et d'autres facteurs appropriés [7],[8]. Owhaib et Palm présentent une étude expérimentale qui vérifie les meilleures combinaisons des dimensions à employer pour optimiser le transfert de chaleur dans des canaux microcirculaires [9].

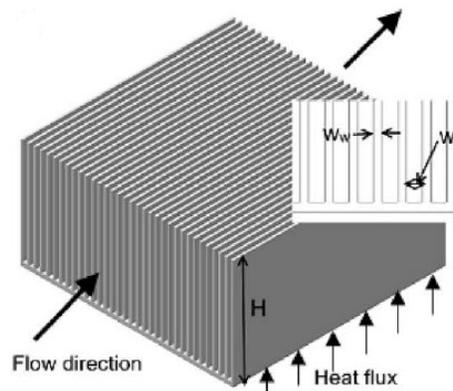


Figure 1.7 Modèle d'échangeur de chaleur avec des microcanaux [12]

Pour notre récepteur, l'approche adoptée pour le refroidissement est celle des microcanaux. Cependant, on va étudier l'influence de la géométrie de ces dernières sur la rigidité effective du récepteur.

1.6 Description du récepteur

Notre système se compose de deux récepteurs. Chaque récepteur se compose de huit unités montées sur une plaque de fixation, comme le montre la figure 1.8, et délivre une tension continue d'environ 300 V.

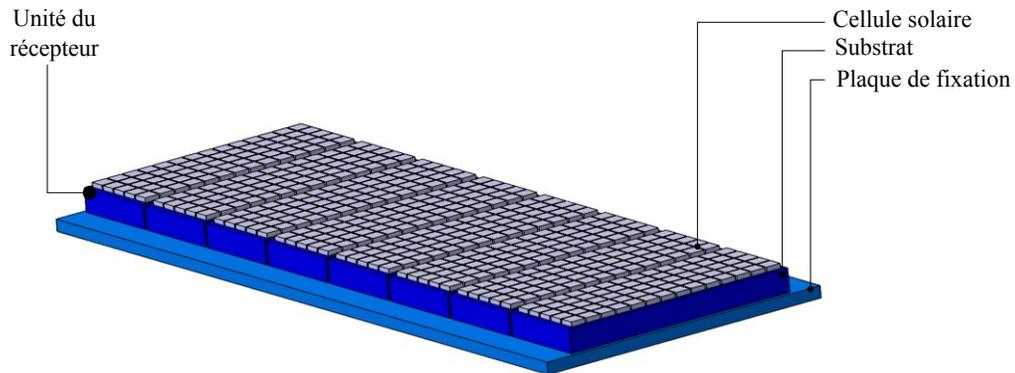


Figure 1.8 La configuration du récepteur adopté

Chaque unité est un réseau dense de cellules solaires de dimensions $1\text{cm} \times 0.6\text{cm}$ sur une plaque froide mesurant 600 mm de longueur, 108 mm de largeur et 0.725 mm de hauteur. La figure 1.9 montre la configuration électrique du récepteur. Il est constitué de 10 rangées de cellules en parallèle. Chaque rangée est composée de 80 cellules montées en série, parcourues par un courant $I(k)$ et délivre une tension V .

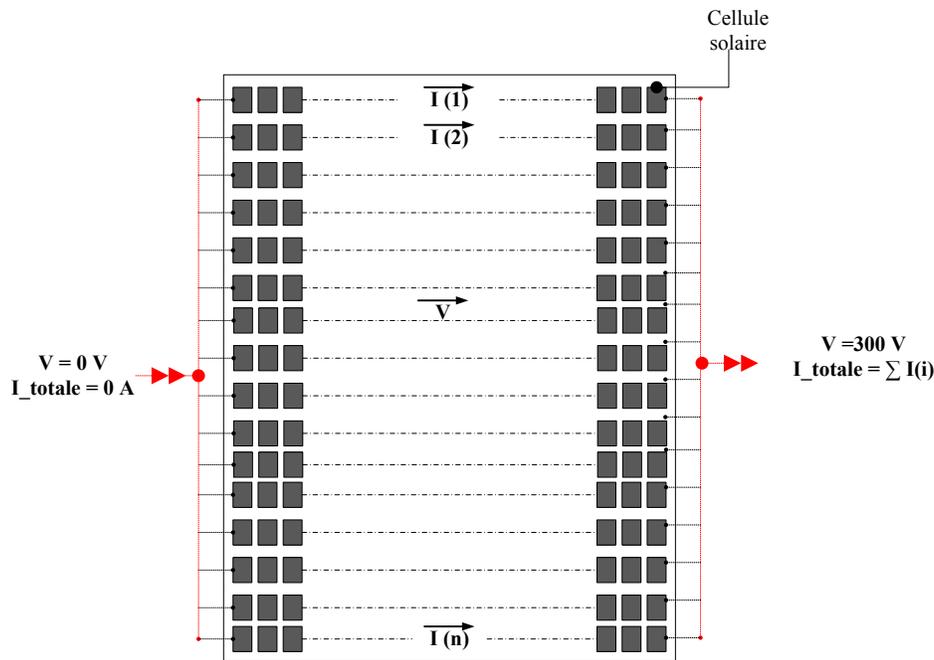


Figure 1.9 Vue de haut de la plaque du récepteur

Les cellules solaires sont reliées entre elles par de l'époxy conducteur, qui assure la conduction électrique. Elles sont montées sur des dissipateurs thermiques constitués d'un empilement de couches incluant des microcanaux dans lesquelles le liquide de refroidissement circule (fig. 1.5). Cette liaison est assurée par l'époxy isolant électrique qui colle les cellules au substrat, et qui garantit la conduction thermique venant des cellules vers la plaque froide.

Pour évaluer correctement les performances du récepteur, il est nécessaire tout d'abord de définir ses conditions de fonctionnement. Citons parmi ces conditions :

- Bonne isolation électrique entre les cellules photovoltaïques et la plaque froide.
- Minimiser l'ombrage¹ pour capter le maximum du rayonnement solaire.
- Une illumination uniforme sur le récepteur.
- Faible résistance électrique dans les zones d'interconnexion entre les cellules.
- Un système de refroidissement capable de maintenir un bon fonctionnement du récepteur par le maintien de la température constante sur les cellules
- Bonne résistance aux chocs thermiques et stable contre le changement de température pendant le cycle jour/nuit et d'une saison à une autre.

¹ Ombre produite par le récepteur sur les miroirs

- Un système fiable avec une durée de vie entre 20 et 40 ans.

1.7 Problématique

1.7.1 Mise en contexte

Le récepteur est un ensemble des couches de différents matériaux qui sont liés entre eux. Étant donné la différence de coefficient d'expansion entre ces matériaux, le récepteur se déforme sous l'influence des contraintes thermiques.

En effet, prenons une structure en "sandwich" constituée de cuivre et germanium. Le coefficient d'expansion thermique de chaque matériau est cité dans le tableau 1.1 suivant :

Tableau 1.1 Coefficient de dilatation des matériaux [17]

	Cuivre	Germanium
Coefficient d'expansion thermique : $\alpha \cdot 10^{-6}$ [K⁻¹]	17	6

En exposant cet empilement à une augmentation de température de ΔT . Sans aucune contrainte, les matériaux tendraient à s'allonger (figure 1.10).

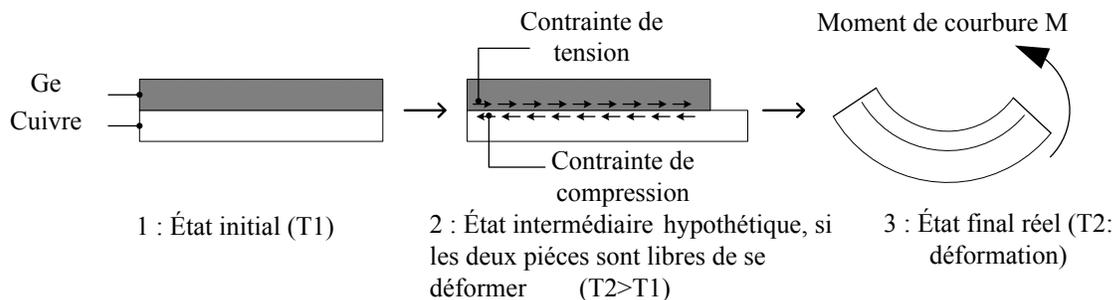


Figure 1.10 Déformation de l'assemblage de cuivre et germanium

Vu que le cuivre a un coefficient de dilatation thermique trois fois plus élevé que le germanium, il se dilate davantage. Du fait que les deux matériaux sont collés, ils sont obligés d'avoir le même allongement. Par la suite, les deux couches subissent des changements dimensionnels conséquents. Ainsi, il y aura des contraintes d'allongement et de compression qui s'opposent

comme la montre la figure 1.10. Conséquemment, l'ensemble se déforme suite aux contraintes de cisaillement à la surface de contact, générant des contraintes de flexion. Afin de mettre en contexte ce problème, l'ensemble des sources probables de ces contraintes thermiques sera cité dans la prochaine section. Les problèmes physiques liés et l'impact des contraintes sur le récepteur seront également présentés subséquemment.

1.7.2 Sources des contraintes et les problèmes physiques liés

Les changements dimensionnels dans le récepteur peuvent être dus à deux sortes de variation de température :

- Variation de la température moyenne

On sait que le cycle jour/nuit génère une variation de température moyenne ΔT au sein du récepteur [10]. Cette variation est la cause des contraintes thermiques dans notre système puisque le récepteur se compose des différents matériaux en contact, ayant de différents coefficients d'expansion thermique. La situation est similaire lors de la phase de fabrication du récepteur, où on va mettre un empilement des différents matériaux dans un four et on l'expose à une variation de température moyenne de ΔT .

- Variation spatiale de la température

Le récepteur peut être sous une illumination non uniforme. Cette non-uniformité provoque l'apparition des points chauds par les échauffements locaux. Ainsi, elle va générer des gradients de température entre la surface et les couches intérieures du récepteur. Cette situation ne sera pas considérée dans cette étude.

1.7.3 Objectifs et approche utilisée

Objectifs généraux

L'objectif du présent projet est de faire les modifications nécessaires dans la conception du récepteur pour garantir son fonctionnement. On va donc étudier l'impact des contraintes thermomécaniques sur le comportement du récepteur. Par la suite, on passe à l'évaluation et au

changement d'une multitude de ses paramètres géométriques et ses propriétés matérielles pour qu'il soit résistant aux différentes contraintes subites.

Objectifs spécifiques

Ainsi on a défini trois objectifs spécifiques :

- Étudier et évaluer les effets des paramètres géométriques et matériels utilisés sur la réponse thermomécanique du récepteur sous chargement thermique.
- Déterminer les critères de choix lié aux époxy conducteur et isolant.
- Caractériser expérimentalement le comportement thermomécanique des cellules collées sur le récepteur du récepteur.

Ainsi, à la suite pour chaque objectif, on va décrire les solutions envisagées et la méthodologie.

Étudier et évaluer les effets des paramètres géométriques et matériels utilisés sur la réponse du récepteur sous chargement thermique

Les besoins industriels pour l'assemblage de différents métaux pour de hautes températures d'utilisation restent un point difficile à satisfaire d'une façon fiable. Dans ce contexte, La présence d'un flux thermique important au sein du récepteur engendre des contraintes thermomécaniques. Ainsi, le but de cette étape est de vérifier si les dimensions géométriques et les matériaux proposés sont adéquats afin de minimiser les déformations thermomécaniques du récepteur. Cette étude se compose de deux parties: la première présente un calcul analytique sur un multicouche sous pression afin de caractériser le cas de fabrication du récepteur par thermocompression. La deuxième partie consiste à modéliser le cas d'un récepteur en application, par la prise en compte des moments de flexion dans la structure.

Étude de la tenue mécanique des époxy

La structure du récepteur se compose de deux types d'époxy. Le premier est un isolant électrique, bon conducteur thermique et qui colle les couches aux cellules solaires tandis que le deuxième est un conducteur électrique (Figure 1.10). Pour valider le choix de ces deux matériaux, on va étudier leurs tenues mécaniques moyennant des tests numériques. La première étape consiste à étudier leur comportement suite à la variation d'une multitude des paramètres. Par la suite, connaissant la limite de la résistance des époxy, on va décider leur utilisation pour garantir la viabilité des

connexions électriques et du collage. Et ceci sera essentiel afin de vérifier la cohérence des tests physiques qui seront effectués ultérieurement.

Caractérisation expérimentale du comportement du récepteur

On ne peut pas se baser seulement sur des résultats numériques pour la validation de la conception du récepteur. Pour cela, cette étape consiste à l'expérimentation des unités du récepteur. En effet, le récepteur se compose de huit unités semblables sur lesquelles les cellules solaires sont collées (Figure 1.8). On a fabriqué des échantillons sur lesquelles on va effectuer des tests thermiques. Ces échantillons sont des volumes représentatifs du récepteur. Ainsi, cette étape a pour but d'effectuer les tests physiques sur ces échantillons pour avoir la déformation limite supportée par les époxy du récepteur. Conséquemment, on va valider leurs utilisations dans la conception du récepteur adopté et s'assurer ainsi de sa tenue mécanique et de son bon fonctionnement sous un chargement thermique réel. À partir de cette étape s'enchaîneront l'analyse des résultats et la rédaction du mémoire qui concluront le projet.

2 ÉTUDE DE LA DILATATION THERMIQUE D'UN ASSEMBLAGE MULTICOUCHE

2.1 Mise en contexte et méthodologie

2.1.1 Mise en contexte

Les structures multicouches sont utilisées en microélectronique et en photovoltaïque concentré, comme le cas de notre récepteur. La fonctionnalité de ces systèmes est très influencée par les contraintes thermoélastiques induites lors d'un chargement thermique. Ces dernières peuvent être dues à une variation de température spatiale ou temporelle qui peut se traduire par le cycle jours/nuit. Nous allons étudier le comportement thermomécanique du récepteur durant la procédure de fabrication et au cours de son opération. Plus précisément, on va identifier les caractéristiques mécaniques et dimensionnelles qui influent sur la dilatation du récepteur dans ces deux cas.

2.1.2 Méthodologie

Cette étude se compose de deux parties: la première partie présente l'étude dans le cas d'assemblage thermique sous pression empêchant la flexion et la deuxième consiste à l'étude dans le cadre d'opération de système solaire, permettant l'élongation et la flexion (courbure). Dans chacune des deux parties, on va étudier analytiquement la déformation d'une structure multicouche suivie d'un script *Matlab*[®] qui calcule les contraintes moyennes induites dans les couches. Ensuite, un exemple traitera le cas du récepteur pour avoir les valeurs des contraintes induites dans ces couches ainsi que sa courbure.

2.2 Étude de la dilatation thermique d'un multicouche sans flexion

2.2.1 Cas de procédure de fabrication

La procédure de fabrication du récepteur consiste à coller plusieurs matériaux par thermocompression (Figure 2.1). Pour cela, on applique une charge uniaxiale constante sur la surface du substrat tout en chauffant l'ensemble jusqu'à une température $T = 900$ °C. Ce collage génère un joint parfait (sans joints d'air) par fusion de la matière. Ainsi, on va fournir une rigidité acceptable et une bonne conductivité thermique. En effectuant l'étude sur la structure multicouche et en posant les hypothèses suivantes, il est possible de déterminer à partir d'équilibre des forces les contraintes induites dans la structure.

Hypothèses :

- On néglige l'effet des moments, car on applique une charge uniaxiale uniforme sur la surface du substrat, on prend en compte que les dilatations latérales.
- Adhérence parfaite² entre les matériaux, il n'y aura pas des fissures à l'interface suite à un chargement thermique.
- Les matériaux sont thermoélastiques isotropes

² Les composants peuvent être colaminés ou soudés

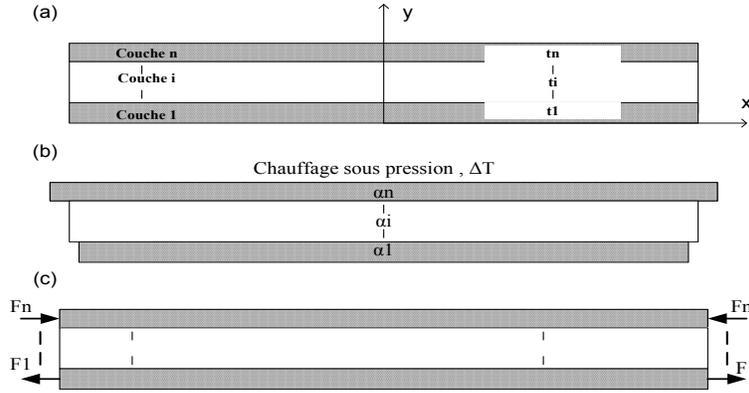


Figure 2.1 La dilatation thermique d'une structure multicouche

Dans le cas d'une structure de n couches symétriques, l'équilibre des forces donne :

$$\sum_{i=1}^n F_i = \sum_{i=1}^n \sigma_i (t_i w_i) = 0 \quad (2.1)$$

Avec F étant la force normale moyenne à chaque couche, i est le numéro de la couche, σ_i est la contrainte moyenne de la couche i, α_i est son coefficient d'expansion thermique et t_i, w_i sont respectivement l'épaisseur et la largeur de la couche i. En néglige les effets de moment, car notre structure est sous une charge uniforme qui empêche les déformations en flexion. Les conditions de compatibilité s'écrivent sous la forme suivante:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_j \quad (i, j) \in [1, \dots, n] \quad (2.2)$$

Où ε_i est la déformation thermique de la couche i, sachant que

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{E_i} + \alpha_i \cdot \Delta T \quad (2.3)$$

Donc, l'équation (2.2) devient :

$$\frac{\sigma_i}{E_i} + \alpha_i \cdot \Delta T = \frac{\sigma_j}{E_j} + \alpha_j \cdot \Delta T \quad (2.4)$$

La résolution de ces n équations mentionnées ci-dessus (Eq. 2.1 et Eq.2.4) se fait en utilisant la technique d'élimination de Gauss. Les n inconnus $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ peuvent être évalués en résolvant le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} t_1 w_1 & t_2 w_2 & \dots & \dots & t_n w_n \\ \frac{1}{E_1} & -\frac{1}{E_2} & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \frac{1}{E_{n-1}} & -\frac{1}{E_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \sigma_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ (\alpha_2 - \alpha_1) \times \Delta T \\ \vdots \\ \vdots \\ (\alpha_n - \alpha_{n-1}) \times \Delta T \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

De cette façon, on obtient les valeurs des contraintes induites dans chaque couche. C'est une méthode analytique pour calculer les contraintes induites dans la structure après la phase de fabrication. Dans la section suivante, on va simplifier le model pour avoir le(s) paramètre(s) qui contrôle ces contraintes.

2.2.2 Cas d'un bilame

Soit une bande composée de deux métaux soudés, chauffée uniformément à partir de T_0 à T_1 , avec $\Delta T = T_1 - T_0$. L'ensemble est maintenir sous charge uniaxiale uniforme P . Soit α_1 et α_2 représentent les coefficients de dilatation des deux métaux (1) et (2) (Figure 2.2). E_1 et E_2 représentent leurs modules d'élasticité, e_1 et e_2 sont leurs épaisseurs, et h est l'épaisseur du bilame. La largeur de la bande est prise égale à l'unité. Considérons un volume de contrôle découpé dans la bande par deux sections mn et m_1n_1 . Supposons que ces deux matériaux sont thermo-élastiques linéaires isotropes et qu'ils sont dans leurs états naturels a T_0 .

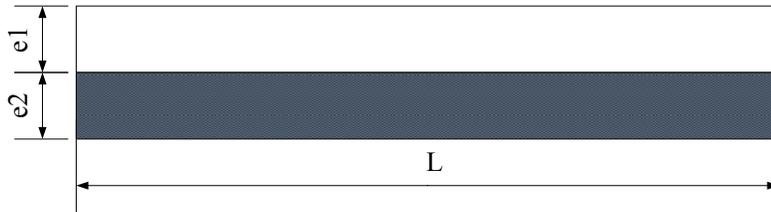


Figure 2.2 La dilatation thermique linéaire d'un bilame

Notre structure étant libre, les deux matériaux tendraient à se dilater de $\epsilon = \alpha \cdot \Delta T$. Puisque les deux couches sont collées ensemble, donc ils vont avoir le même allongement à l'équilibre. En se basant sur l'analyse élastique simple faite dans la section 2.2.1, les contraintes parallèles à l'interface du bilame sont:

$$\sigma_1 = \frac{\Delta T * \Delta \alpha}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} * \frac{e_1}{e_2} \right)} ; \quad \sigma_2 = - \frac{\Delta T * \Delta \alpha}{\left(\frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_1} * \frac{e_2}{e_1} \right)} \quad (2.5)$$

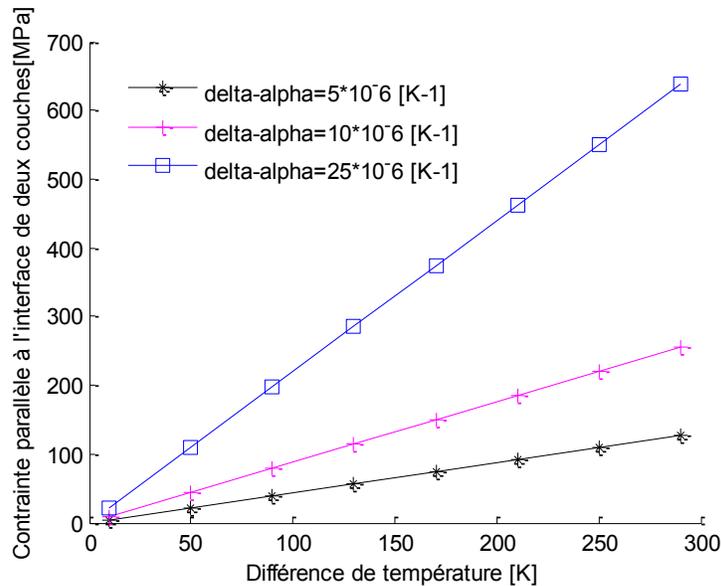


Figure 2.3 La contrainte parallèle à l'interface de deux couches en fonction de la température pour différentes $\Delta\alpha$

La figure 2.3 montre la variation de la contrainte en fonction de température d'un bilame pour différentes $\Delta\alpha$. Il apparaît qu'en augmentant $\Delta\alpha$, la contrainte induite dans le bilame devient plus élevée. Cette variation de contrainte croît linéairement avec l'augmentation de la température. Conséquemment, les contraintes induites dans les couches dépendent fortement du chargement thermique appliqué ΔT ainsi que la différence d'expansion thermique entre les composants de la structure $\Delta\alpha$.

2.2.3 Calcul de coefficient d'expansion thermique effectif

Vu que les contraintes parallèles à l'interface entre deux couches sont fortement proportionnelles à la différence de coefficient d'expansion thermique (CTE) des deux matériaux, donc il faut diminuer $\Delta\alpha$ pour minimiser ces contraintes induites. Conséquemment, l'idée est de déceler les paramètres susceptibles de changer $\Delta\alpha$, donc de varier le coefficient d'expansion thermique effectif d'un multicouche. Ensuite, changer ces paramètres pour avoir le coefficient d'expansion thermique voulue, et ainsi avoir des faibles contraintes induites.

Dans une structure multicouche soumise à une charge axiale qui empêche la courbure, le coefficient d'expansion thermique effectif de la structure est donné comme suit :

$$\alpha_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon}{\Delta T} \quad (2.6)$$

Remplaçant ε par son expression (Eq. 2.3), on obtient l'expression du coefficient d'expansion thermique effectif du multicouche qui est:

$$\alpha_{\text{eff}} = \alpha_i + \frac{\sigma_i}{E_i \cdot \Delta T} \quad \text{pour tous } i \in [1, \dots, n] \quad (2.7)$$

Dans le cas d'un bilame, le coefficient de dilatation effective de ce bilame est :

$$\alpha_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon}{\Delta T} = \alpha_i + \frac{\sigma_i}{\Delta T * E_i} \quad \forall i \in [1, 2] \quad (2.8)$$

Avec,

$$\sigma_1 = \frac{\Delta T * \Delta \alpha}{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} * \frac{e_1}{e_2} \right)} ; \quad \sigma_2 = - \frac{\Delta T * \Delta \alpha}{\left(\frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_1} * \frac{e_2}{e_1} \right)}$$

Exemple

Prenant l'exemple d'un bilame de cuivre et de nitrure d'aluminium AlN. Soit α_1 et α_2 représentent les coefficients de dilatation des deux métaux Cu et AlN, E_1 et E_2 représentent leurs modules d'élasticité, e_1 et e_2 leurs épaisseurs. Faisant varier les deux ratios de modules d'Young et des épaisseurs et voir leurs impacts sur le coefficient d'expansion thermique effectif du bilame.

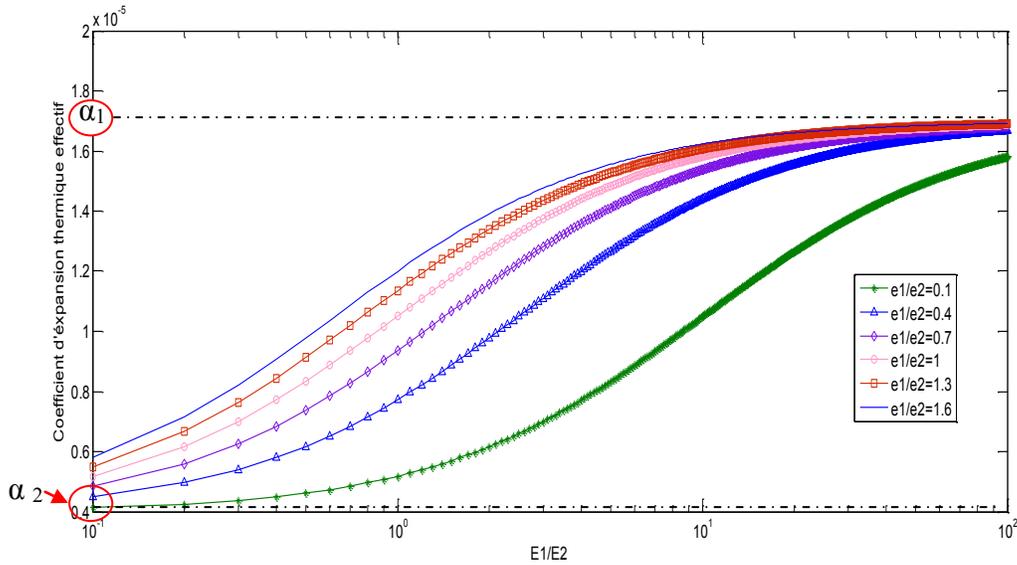


Figure 2.4 Coefficient d'expansion thermique en fonction des modules d'Young pour différent ratio d'épaisseur

Les résultats montrent que pour l'ensemble des ratios d'épaisseur, l'allure de la variation de α_{eff} est similaire. La valeur du coefficient d'expansion thermique effectif tend vers le coefficient du matériau le plus rigide, c'est ce qui montre les deux extrêmes de la figure 2.4. Notamment, ce coefficient augmente avec l'augmentation du facteur e_1/e_2 . De plus, pour un facteur e_1/e_2 donné, le coefficient est plus important pour de grandes valeurs de facteur E_1/E_2 . Ceci vient tout simplement par le fait que coefficient d'expansion thermique effective du bilame est fortement proportionnelle au ratio des modules d'Young et au ratio des épaisseurs de ses composants (Eq. 2.8).

2.3 Étude de la courbure d'un multicouche en application sous chargement thermique

Les chercheurs ont développé beaucoup d'approches de calcul du rayon de courbure et des contraintes induites dans un multicouche sous chargement thermique [14][21][22][23]. L'approche utilisée dans cette analyse est basée sur l'équilibre mécanique de la structure. On a dérivé une solution exacte pour la répartition des contraintes moyennes dans les couches. Puis, une étude de courbure sur un bilame a été effectuée pour simplifier l'étude des paramètres de la déflexion (Annexe B-2). Finalement, on a établi un script *Matlab*[®] de cette étude avec lequel on a étudié la variation des contraintes induites dans le récepteur ainsi que sa déflexion.

2.3.1 Principe de la flexion d'une structure multicouche

Soit une structure multicouche présentée par la figure 2.5, composée de n couches avec des épaisseurs différentes, t_i . L'indice « i » indique le numéro de la couche. Le système de coordonnées est défini de sorte que la face inférieure de la première couche se trouve à $z = 0$.

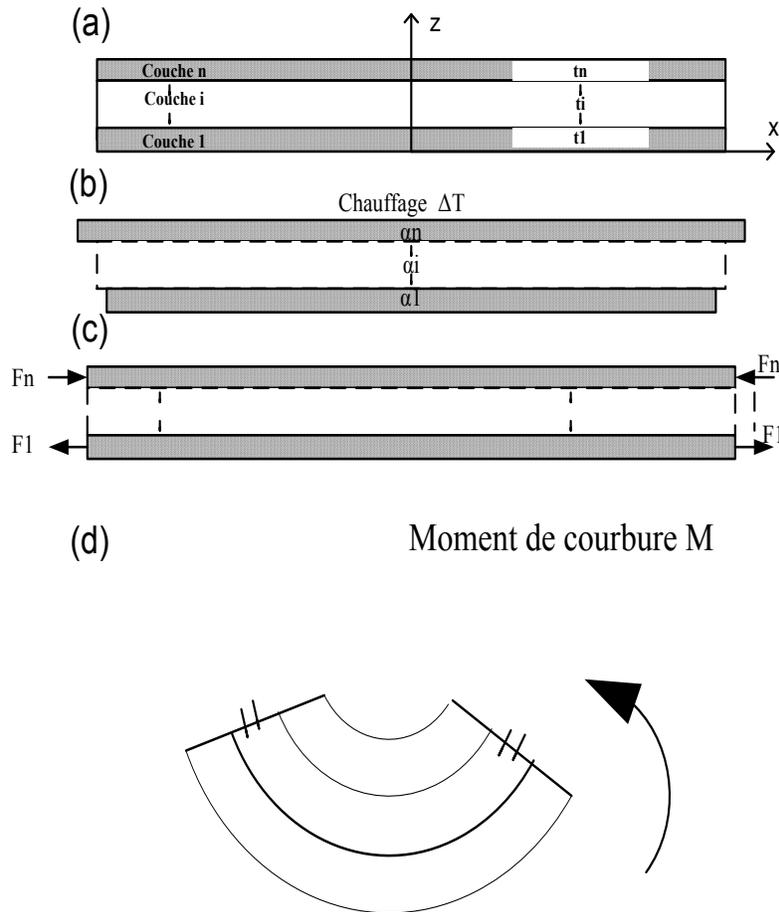


Figure 2.5 Schéma montrant la flexion d'une structure multicouche provoquée par des contraintes thermiques : (a) état sans contrainte ; (b) déformation libre, $\varepsilon_i = \alpha_i \times \Delta T$, suite à un changement de température, ΔT ; (c) déformation sous contrainte, $\varepsilon_i = Cte$ pour maintenir la condition de compatibilité de déplacement, et (d) flexion induite par des contraintes asymétriques.

Le système multicouche subit une ΔT donnée. Premièrement, le système subit un allongement sans contrainte qui est égale à $\varepsilon_i = \alpha_i \times \Delta T$ (Fig. 2.5 b), avec α_i les coefficients de dilatation thermique de la couche (i). Ensuite, il y aura des contraintes de compression/traction uniformes

sur chaque couche. Vu la condition de compatibilité de déplacement, il faut que l'allongement final dans la structure soit constant (Fig 2.5 c). Enfin, la flexion du système se produit en raison de l'asymétrie des contraintes (Fig 2.5 d).

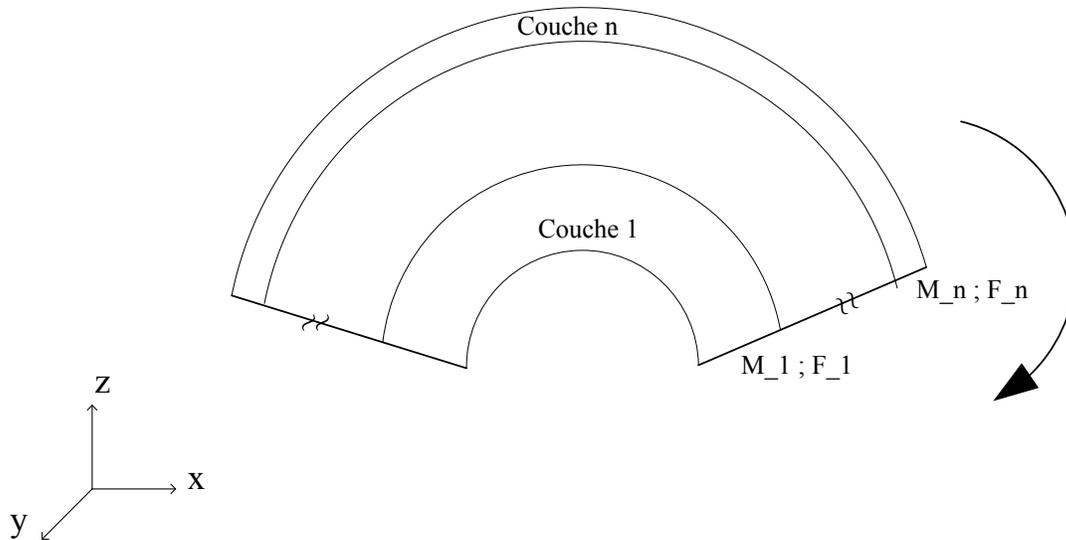


Figure 2.6 Flexion d'une structure multicouche

Après avoir expliqué la démarche de la création des contraintes dans un multicouche, on va établir une méthode de calcul de ces contraintes ainsi que le rayon de courbure de la structure. On considère les hypothèses suivantes :

- La section droite possède un axe de symétrie selon un plan le long de la longueur de la poutre
- Les sections planes restent planes après flexion
- Le module d'élasticité est constant lors de compression et d'allongement
- Adhérence parfaite entre les matériaux, il n'y aura pas des fissures à l'interface suite à un chargement thermique.
- Matériaux sont thermo-élastiques linéaires isotropes
- Dans ce système, les contraintes axiales sont égales ($\sigma_x = \sigma_y$), et la contrainte à travers l'épaisseur est négligeable ($\sigma_z = 0$).

Quand les films multicouches subissent des changements de température, suite à la différence de coefficient de dilatation thermique, la contrainte induite provoquera la courbure de la structure avec un rayon ρ . Dans ce système, la contrainte σ_y va induire l'allongement dans la direction x ,

suite à l'effet du coefficient de Poisson. La déformation suivant l'axe x peut s'écrire sous la forme :

$$\varepsilon_x E = \sigma_x - \vartheta(\sigma_y + \sigma_z) = \sigma_x(1 - \vartheta) \quad (2.9)$$

Donc, la relation entre la contrainte et la déformation peut s'écrire :

$$\frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} = \frac{E}{1 - \vartheta} = E_{\text{eff}} \quad (2.10)$$

C'est le module d'Young effectif qu'il faut utiliser dans les équations d'équilibre. D'après le principe d'équilibre mécanique, les contraintes induites dans les couches doivent respecter les conditions suivantes:

(i) L'équilibre des forces

$$\sum_{i=1}^N F_i = 0 \quad (2.11)$$

avec F_i étant la force normale dans la couche i , N est le nombre des couches.

(ii) L'équilibre des moments

$$\sum_{i=1}^N M_i + \sum_{i=1}^N F_i \cdot x_i = 0 \quad (2.12)$$

avec $M_i = \frac{E_i}{1-\vartheta} \frac{t_i^3}{12\rho}$ étant le moment de flexion. Et,

$$x_i = \sum_{j=1}^{i-1} t_j + \frac{t_i}{2} \quad \text{pour tous } i \in [1, \dots, n] \quad (2.13)$$

Avec x_i étant la hauteur du plan médian de la couche i par rapport à $z=0$.

(iii) La condition de la continuité de déformation entre deux couches

$$\alpha_i \Delta T_i + \frac{(1 - \vartheta_i) F_i}{E_i} \frac{t_i}{2\rho} = \alpha_{i+1} \Delta T_{i+1} + \frac{(1 - \vartheta_{i+1}) F_{i+1}}{E_{i+1}} \frac{t_{i+1}}{2\rho} \quad (2.14)$$

avec α_i étant le coefficient de dilatation thermique, ϑ_i et E_i sont les coefficients de poisson et les modules de Young de chaque couche, respectivement, et ρ est le rayon de courbure. En effet, le premier terme est dû à la dilatation thermique, le deuxième présente la déformation élastique causée par la force axiale, et le dernier traduit les contraintes à l'interface entre deux couches. En

utilisant la méthode d'élimination de Gauss, nous pourrions calculer les (N+1) inconnues: $F_1, F_2, \dots, F_N, \rho$. Ainsi, on peut exprimer la contrainte dans chaque couche par :

$$\sigma_i = \sigma_{\text{tension}-i} + \sigma_{\text{courbure}-i} = \frac{F_i}{t_i'} + \frac{E_i x_i}{\rho} \quad \text{pour tous } i \in [1, \dots, n] \quad (2.15)$$

avec σ_{tension} étant la contrainte provoquée par les forces de tension, σ_{courbure} est la contrainte due à la flexion et t_i' est l'épaisseur massique³ de la couche i . L'équation (2.15) montre l'effet de l'épaisseur et de rayon de courbure sur les contraintes induites dans les couches.

2.4 Étude de flexion du récepteur de système photovoltaïque concentrée

2.4.1 Mise en contexte et objectif

Le substrat est un empilement des couches de différents matériaux, on doit étudier son comportement suite à l'application d'une variation de température moyenne. Le cuivre est parmi les matériaux utilisés dans le récepteur, c'est un bon conducteur, mais son coefficient de dilatation thermique est plus élevé que les autres matériaux. Le cycle thermique entre des nuits froides et des journées ensoleillées peuvent conduire à des défaillances mécaniques qui mènent à des fractures des cellules solaires ainsi qu'à une défaillance des liaisons électriques. En se basant sur les études faites dans la section précédente, on peut calculer le rayon de courbure d'une unité du récepteur ainsi que les contraintes axiales induites dans ses différentes couches dans les conditions extrêmes. Ceci permet d'étudier ainsi la résistance des cellules solaires, du substrat et des époxy en fonction des paramètres dimensionnels et des caractéristiques thermiques des matériaux du récepteur.

Les hypothèses prises en compte dans l'étude du système on opération sont :

- $\Delta T_1 = 65$ (application au cours de cycle jour/nuit)
- On néglige l'effet de temps, on suppose que les propriétés des matériaux sont indépendantes de la température.
- Les gradients de température entre les couches sont négligeables
- Matériaux sont thermo-élastiques linéaires isotropes

³ Il est égal à l'épaisseur t_i si la couche est pleine, sinon $t_i' = \frac{V_{\text{total}}}{\text{Longueur} \times \text{Largeur}}$

Géométrie : On peut modéliser notre récepteur par un multicouche, la figure 2.7 montre les dispositions de ces couches.

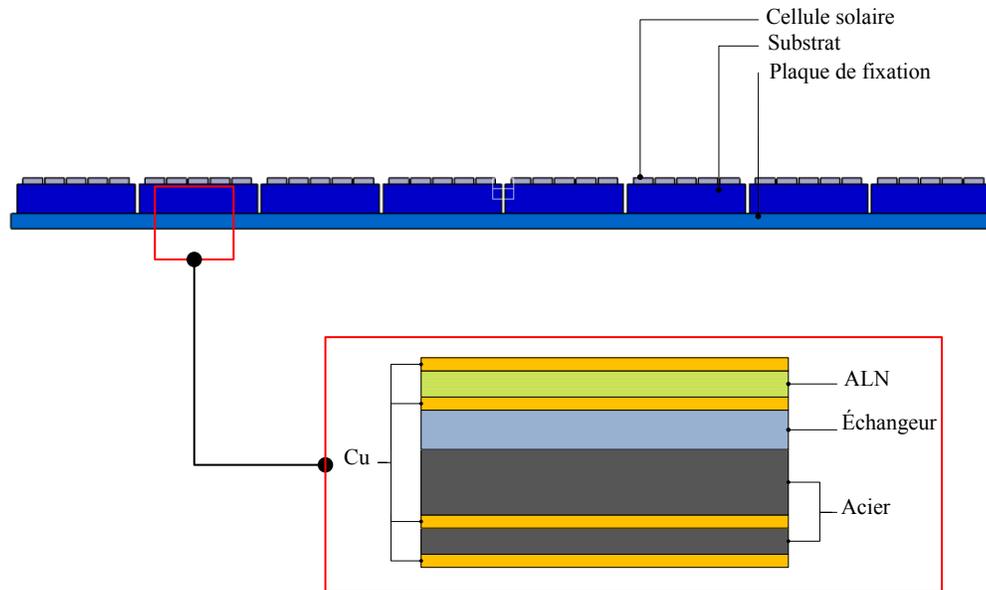


Figure 2.7 La géométrie d'une unité du récepteur

Les conditions initiales

- La température initiale est $T_0 = 25\text{ °C}$ uniformément répartie dans le substrat qui est supposé libre à cette température.

En été, nous sommes susceptibles d'avoir la température entre 20 °C à 85 °C , et en hiver la température sans contrainte peut-être entre -05 °C et -40 °C . Pour cela, la différence de température subite par le récepteur représentative pour cette étude sera de $\Delta T1 = 65$. Les propriétés des différents matériaux sont présentées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 Propriétés moyennes des matériaux utilisés dans le substrat du récepteur [17][16]

Propriétés	Cu	AlN	A42	Unité
CTE	$17.4e^{-6}$	$4e^{-6}$	$3.8e^{-6}$	1/K
Module d'Young	110	318	204	GPa
Coefficient de Poisson	0.343	0.25	0.3	-
Résistance à la rupture	210-270 [17]	2000 [16]	430 [17]	[MPa]

Tableau 2.2 Exemple d'empilement d'une unité du récepteur

Layers		Test Article #1		
#	Description	material	Thickness	solidity
1	electrode layer	Cu	0.81	1.00
2	DBC Cu layer	Cu	0.13	1.00
3	DBC ceramic	ALN	0.64	1.00
4	DBC Cu layer	Cu	0.13	1.00
5	Matrix	Cu	0.75	0.60
6	Manifold	A42	5.00	0.18
7	Cu/DBC Cu	Cu	0.38	1.00
8	ceramic/A42	A42	1.55	1.00
9	cu/DBC Cu	Cu	0.38	1.00
		Total	9.76	mm

Le tableau 2.2 représente les composantes d'un multicouche, visant une compensation des forces pour éviter la courbure lors des changements de température. On utilise le *Direct Bounded Copper (DBC)*, qui est un procédé dans lequel le cuivre et l'AlN sont directement liés. Ce procédé permet d'avoir de bonnes propriétés thermiques et mécaniques des substrats céramiques DBC. Citons parmi lesquels :

- Bonne résistance mécanique, une bonne adhérence et une bonne résistance à la corrosion.
- Une excellente isolation électrique et une bonne conductivité thermique de l'interface de collage : $k = 24 \text{ w/m.K}$ [15]

On remarque que la couche d'échangeur (#5) et de l'acier A-42 (#6) ont une solidité⁴ inférieure à 1. En effet, ils sont micro-usinés à l'intérieur et le volume total se compose d'un volume de la matière V_1 et d'un volume de vide V_2 . Ainsi, on peut définir l'épaisseur massique comme l'épaisseur de volume v_1 de la matière qui peut s'écrire comme suite :

$$e_m = \frac{V_1}{\text{longueur} \times \text{largeur}} \quad (2.16)$$

2.4.2 Méthodologie et résultats

Pour que les couches restent indéformables plastiquement, il faut que chaque matériau reste dans son domaine élastique (Figure 2.8). Pour cela, on va calculer les contraintes de traction et de

⁴ La solidité présente la fraction de la matière sur le volume totale dans un volume

cisaillement pour chaque couche. Et on va les comparer avec les limites de sollicitation admissibles pour voir l'état de déformation de chaque couche.

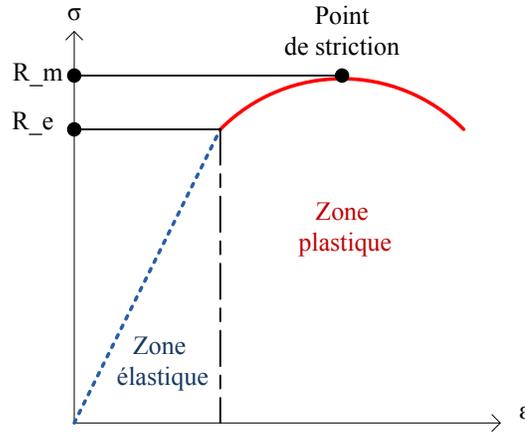


Figure 2.8 Courbe caractéristique de matériaux

On définit la limite admissible comme étant la résistance de rupture corrigée d'un coefficient de sécurité k' choisi. La valeur de coefficient de sécurité choisie est $k'=1.5$ afin de prendre en compte les incertitudes dans cette analyse (les caractéristiques du matériau, les chargements réels). On choisit donc la limite admissible suivante :

$$\text{limite admissible} = \frac{R_e}{k'} = \frac{R_e}{1.5} \quad (2.17)$$

Pour que la conception du substrat soit valide, il faut que chacun de ces matériaux respecte la condition suivante :

$$R_e > k' \cdot |\sigma_{\max}| \quad (2.18)$$

En se basant sur les calculs analytiques qui ont été faits à la section (2.3.1), on peut avoir la valeur des forces parallèles à l'interface des couches. L'équation qui lie les contraintes de cisaillement maximales [18] et les forces pour une section plane rectangulaire est,

$$\tau_i = \frac{3}{2} \times \tau_{\text{moy}} = \frac{3}{2} \times \frac{F}{S} \quad (2.19)$$

Avec F étant les forces parallèles à l'interface des couches, S étant la section droite (Figure 2.9).

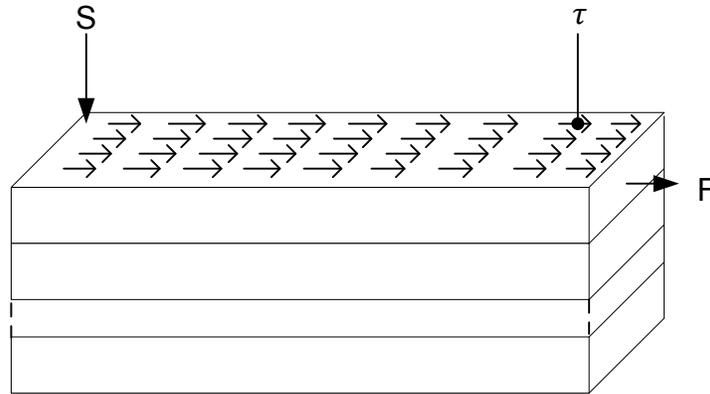


Figure 2.9 Représentation schématique des contraintes de cisaillement dans les couches

Moyennant le script *Matlab*[®] (Annexe B-1), les contraintes de cisaillement dans les différentes couches du substrat sont calculées et peuvent être présentées par la figure 2.10.

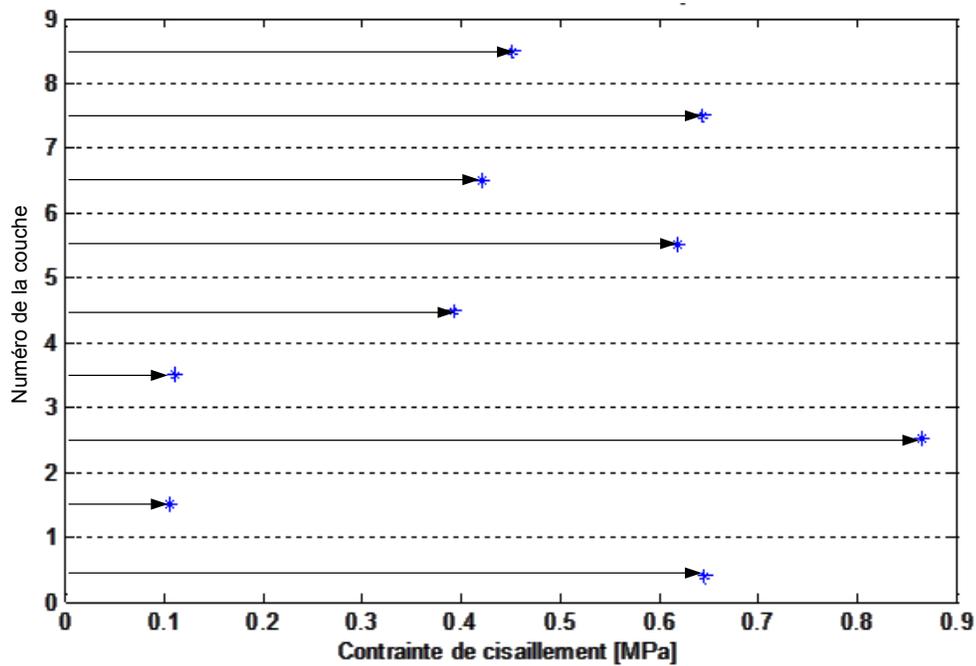


Figure 2.10 Distribution des contraintes de cisaillement $|\tau|$ pour $\Delta T=65$

On remarque que les contraintes de cisaillement moyennes sont faibles ($|\tau_{moy}|_{Max} < 2 \text{ MPa}$) par rapport à la résistance au cisaillement de l'époxy $\tau_{max} = 40 \text{ MPa}$ [26]. C'est pour cela, on va étudier que les contraintes de tension dans toute la suite de l'analyse.

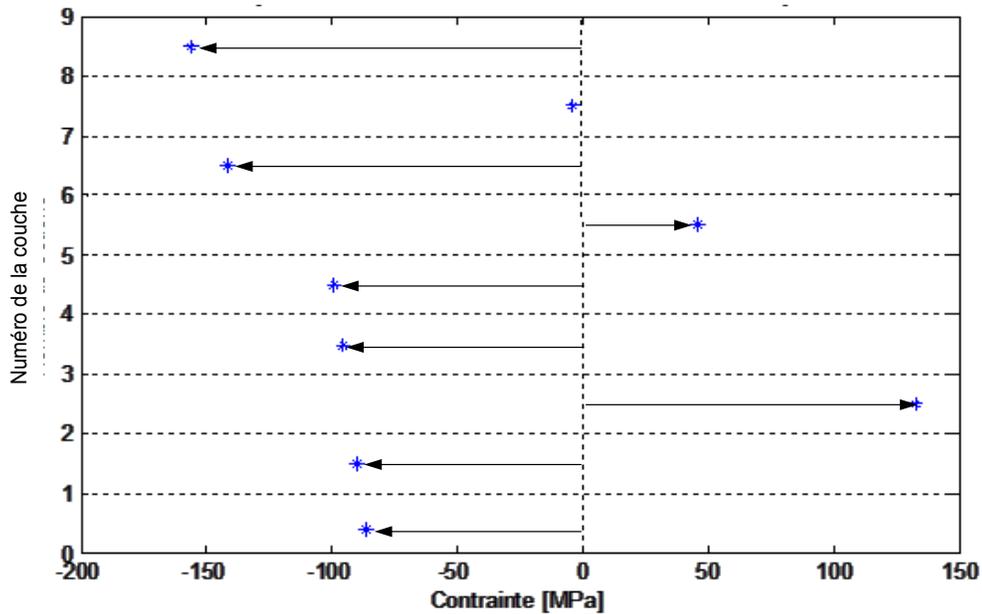


Figure 2.11 Distribution de la contrainte moyenne parallèle à l'interface des couches

La figure 2.11 montre la distribution des contraintes de tension dans chaque couche du substrat. En effet, la couche 3 d'AlN et la couche 6 d'acier A42 sont soumises à des contraintes de tensions et à cause de leurs petits coefficients d'expansion thermique. Ainsi, des contraintes de compression induites dans le reste des couches en cuivre vu son CTE le plus élevée. On remarque que les contraintes de tensions dans les couches d'acier A42 et d'AlN sont compensées par les contraintes de compressions des autres couches. Conséquemment, on a obtenu la valeur de la courbure du substrat qui est :

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = 2.75 \text{ E} - 5 \text{ mm}^{-1} \quad (2.20)$$

Aussi, le coefficient d'expansion thermique effectif de la couche d'électrode $\alpha_{\text{eff}} = 5.3 \text{ e}^{-6} \text{ K}^{-1}$ est proche de CTE des cellules de germanium $\alpha_{\text{Ge}} = 6 \text{ e}^{-6} \text{ K}^{-1}$. Et, une petite déflexion de $\delta = 0.08 \text{ mm}$ (Annexe B-2) par rapport à l'épaisseur du substrat $e_{\text{subs}} = 9.6 \text{ mm}$. Par la suite, notre structure reste presque plane suite à cette combinaison des épaisseurs qui provoque la compensation des moments et des contraintes.

Étudions maintenant la résistance de chaque couche, vu que dans le cas réel, le substrat va être soumis des chargements réels. Par conséquent, on se sert du critère de résistance Von Mises. La contrainte équivalente de Von Mises peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + 3. \tau_{XY}^2} = \sqrt{2. \sigma_X^2 + 3. \tau_{XY}^2} \quad (2.21)$$

Le tableau 2.3 cite les limites élastiques de chaque matériau (résistance à la rupture), les contraintes équivalentes de Von Mises dans chaque couche ainsi que la limite admissible de chaque matériau.

Tableau 2.3 Valeurs de différentes contraintes dans les couches du substrat

# Couche	Re [MPa]	σ_{VM} [MPa]	$M.S = \frac{Re}{k'.\sigma_{VM}}$	Interprétation
1 Électrode en Cu	33.3 [6]	122	0,182	Le cuivre est dans la zone de la déformation plastique.
2 DBC Cuivre	33.3	127	0,175	
3 DBC AlN	1333 [5]	188	7	Le nitrure d'aluminium résiste
4 DBC Cuivre	33.3	135	0,16	Le cuivre est dans la zone de la déformation plastique.
5 Échangeur en Cu	33.3	139	0,15	
6 Acier A42	286 [6]	64	4.41	L'acier résiste
7 Cuivre	33.3	199.5	0,11	Le cuivre est dans la zone de la déformation plastique.
8 Acier A42	286	5.2	55	L'acier résiste
9 Cuivre	33.3	220	0,1	Le cuivre atteint la contrainte de rupture $R_m = 210$ MPa

On remarque qu'au niveau des couches de cuivre, les contraintes induites dépassent les limites de contraintes composées admissibles par ce matériau. Conséquemment, le cuivre entre dans la zone de déformation plastique. Donc, il faut trouver des solutions pour diminuer ces contraintes induites et avoir ainsi un substrat non déformable. Dans l'analyse qui suit, on va étudier l'effet de variation d'épaisseur massique des couches 5 et 6 sur les contraintes induites et le coefficient d'expansion thermique effectif. On a choisi ces deux couches, car ce sont les seules qui sont usinées à l'intérieur. Vu que la variation des contraintes dans chaque couche est proportionnelle à la variation de la température, toute l'étude des contraintes qui suit va être en fonction du ratio

$$\frac{\text{Contrainte}}{\Delta T}$$

L'objectif maintenant est d'étudier l'influence de la variation des épaisseurs massiques des deux couches micro- usinés #5 et #6 sur les contraintes induites dans les couches du récepteur en opération.

Effet de la variation d'épaisseur massique d'échangeur de chaleur sur les contraintes induites

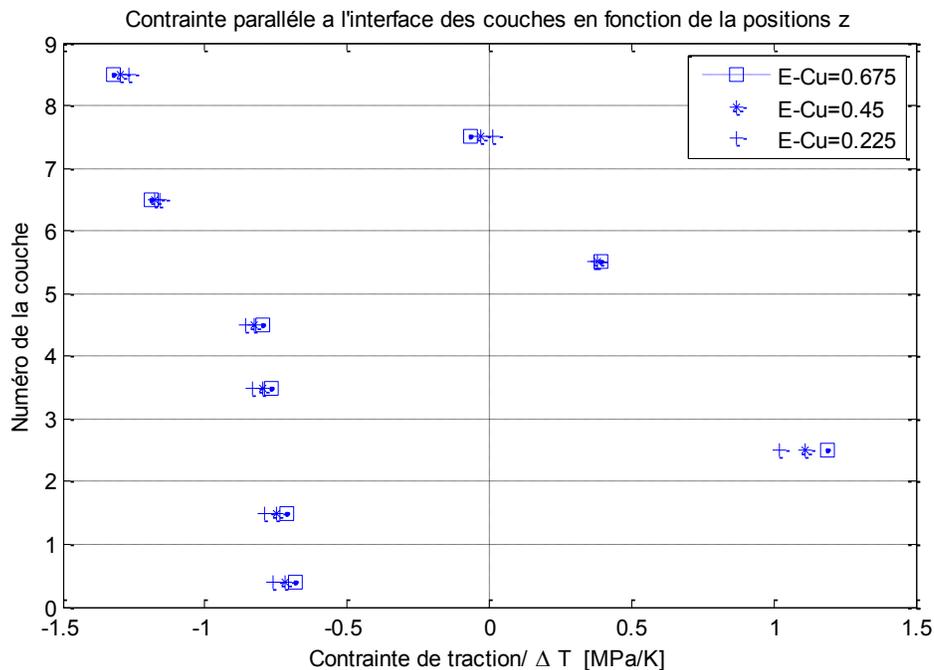


Figure 2.12 Représentation schématique de l'effet de variation d'épaisseur de la couche 5 sur la variation des contraintes

La figure 2.12 montre la variation des contraintes moyennes induites dans le cas de l'augmentation de l'épaisseur d'échangeur de chaleur (E-Cu) de 0.45 mm et suite à sa diminution de 0.25 mm avec les mêmes conditions. On peut observer que dans les deux cas la variation maximale des contraintes atteint 5%. On peut conclure, en se basant sur ces légères variations des contraintes, que la variation de l'épaisseur massique n'influe pas sensiblement sur les valeurs des contraintes dans les matériaux.

Effet de la variation d'épaisseur massique de l'acier A42 sur les contraintes induites

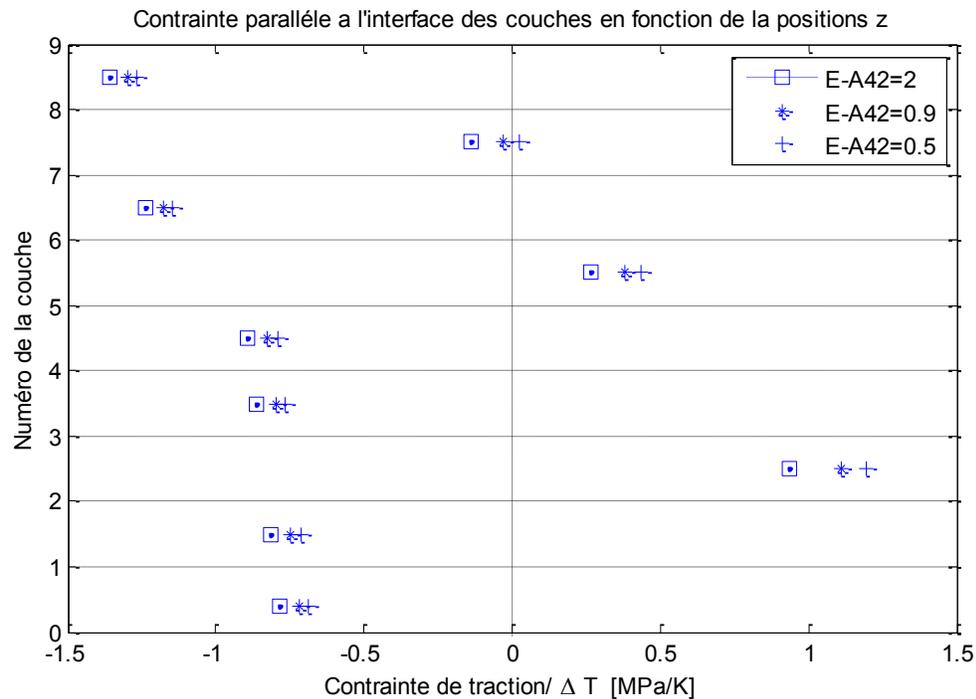


Figure 2.13 Représentation schématique de l'effet de variation d'épaisseur de la couche 6 d'acier sur la variation des contraintes

La figure 2.13 illustre la variation des contraintes parallèles à l'interface des couches en fonction de la variation de l'épaisseur (E-A42) de la couche 6 avec les mêmes conditions. On peut remarquer que la variation moyenne des contraintes atteint 10%. Donc, la variation de l'épaisseur massique n'influe pas sensiblement sur les valeurs des contraintes dans les matériaux. On guise en conclusion, la variation de l'épaisseur massique des ceux couches #5 et #6 n'influe pas considérablement sur les contraintes induites dans les couches.

Étude de l'impact de ΔT sur la courbure, α_{eff} et les contraintes induites dans chaque couche

La figure 2.14 montre que la variation de la courbure κ est linéaire par rapport à ΔT .

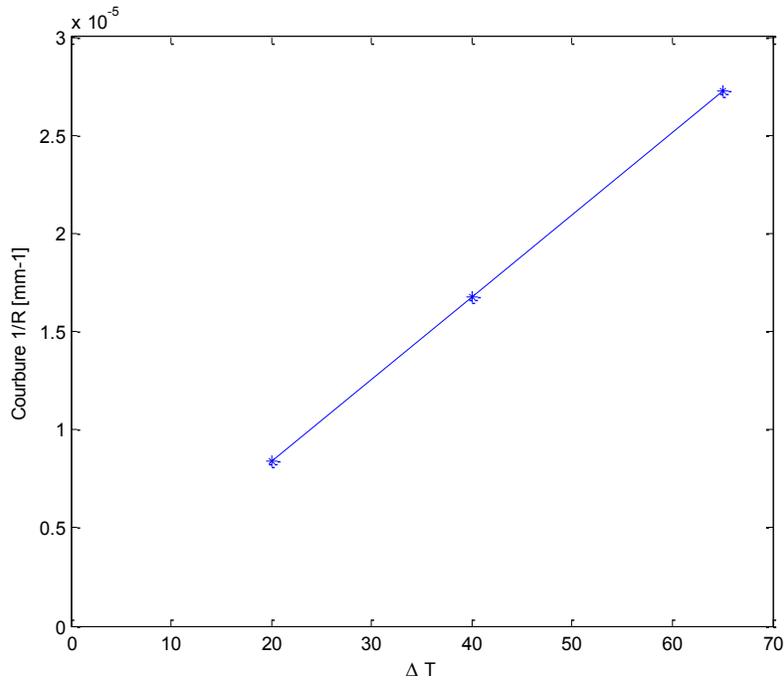


Figure 2.14 Variation de la courbure en fonction d'augmentation de la température

C'est une variation linéaire et la relation qui lie ces paramètres peut s'écrire comme suit:

$$\beta = \frac{\frac{1}{\bar{R}}}{\Delta T} = \frac{\frac{1}{\bar{R}_1} - \frac{1}{\bar{R}_2}}{\Delta T_1 - \Delta T_2} = \frac{(0.20 - 0.50)10^{-4}}{50 - 120} = 4.3 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (2.32)$$

D'où,

$$\kappa = \frac{1}{\bar{R}} = \beta \times \Delta T \quad (2.33)$$

Par la suite, on peut avoir la valeur de courbure pour chaque ΔT .

Étude de l'influence de variation d'épaisseur massique des deux couches 5 et 6 sur la courbure, α_{eff} de la structure

La figure 2.15 montre l'effet de variation d'épaisseur massique des deux couches 5 et 6 sur la courbure et le coefficient d'expansion thermique effectif de la première couche du substrat (électrode).

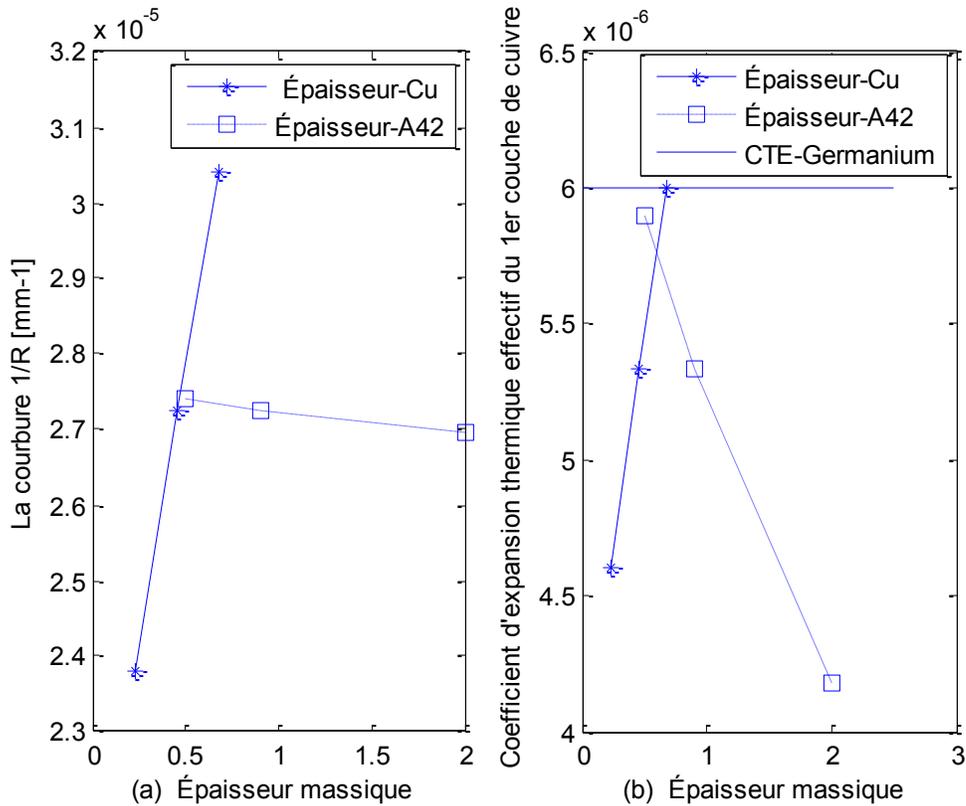


Figure 2.15(a) Variation de la courbure en fonction d'épaisseur massique (b) Variation de α_{eff} en fonction d'épaisseur massique

En remarque que la courbure κ et α_{eff} sont proportionnels à l'augmentation d'épaisseur massique de la couche de cuivre (échangeur de chaleur) et inversement proportionnel à l'augmentation d'épaisseur massique de la couche d'acier. En effet, κ augmente de $0.9 \text{ e}^{-5} \text{ mm}^{-1}$ on doublant l'épaisseur de cuivre, contrairement à l'augmentation de l'épaisseur d'acier qui n'a pas d'influence importante sur la courbure κ . Cette variation est petite de sorte que le substrat va être toujours plan.

Par contre, le coefficient d'expansion thermique diminue considérablement quand on augmente e_{m-A42} (diminution de 25 % suite à une augmentation de 200 % de e_{m-A42}), et augmente avec l'augmentation de e_{m-Cu} (augmentation de 25 % suite à une augmentation de 100 % de e_{m-Cu}).

2.4.3 Solution pour le changement de la résistance de cuivre :

La procédure d'assemblage va être composée de deux procédures de thermocompressions et un collage par soudage au lieu d'une seule procédure de thermocompression. En effet, la procédure d'assemblage de différentes couches de chaque unité va être comme la montre la figure 2.16 La

première phase consiste a assembler par thermocompression les deux parties [DBC Cu, DBC ALN, DBC Cu] et [Échangeur, A42, Cu]. Une fois que ces deux parties sont prêtes, la couche d'électrode et la dernière couche de cuivre sont assemblées avec ces deux parties par les couches de soudure (étain+argent).

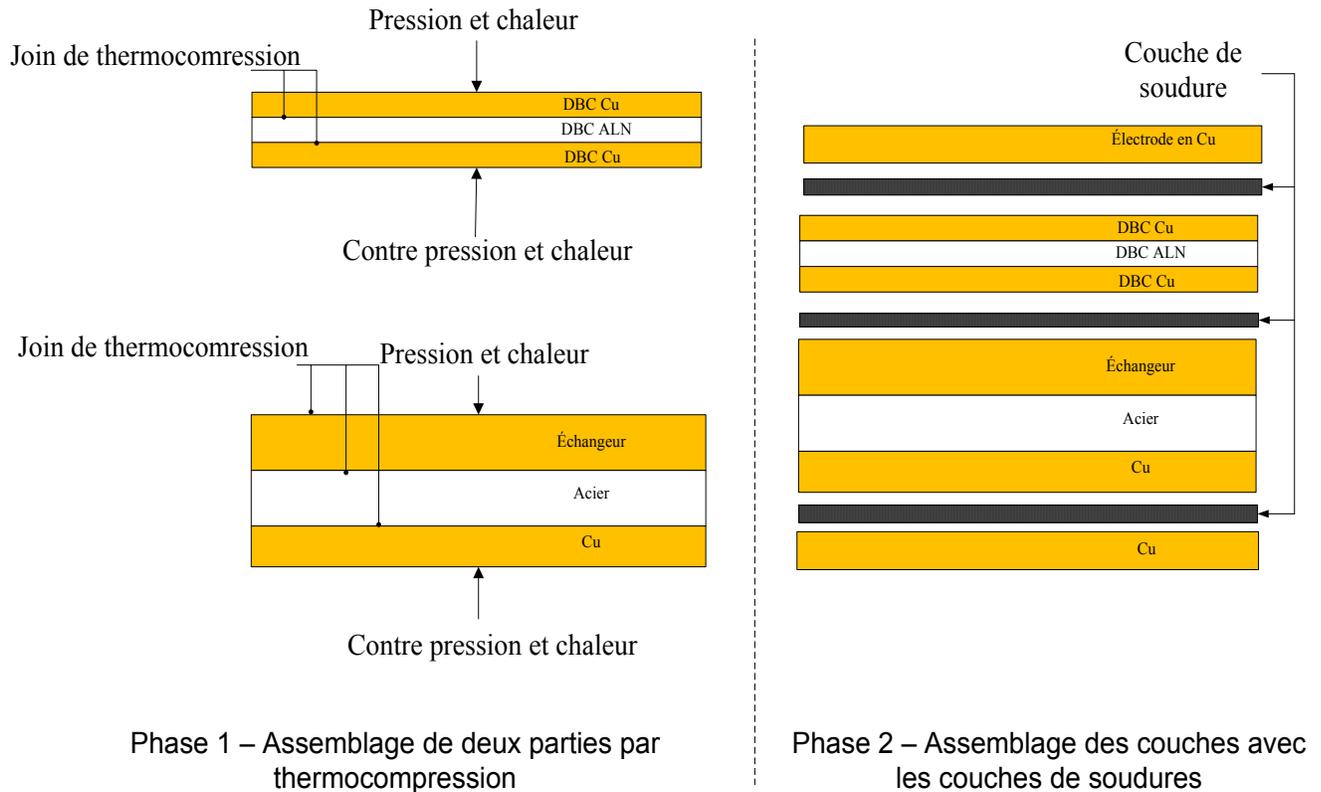


Figure 2.16 Les deux phases d'assemblage des couches de chaque unité du récepteur

La thermocompression avec un refroidissement lent consiste a un recuit sous pression constante, qui est un procédé correspondant à un cycle de chauffage. Celui-ci consiste en une augmentation graduelle en température suivie d'un refroidissement lent et contrôlé. Cette procédure permet de modifier les caractéristiques physiques du matériau. Après cette procédure de fabrication, il y aura des contraintes induites dans la matière, sous l'effet de contraintes mécaniques ou thermiques, intervenant dans les étapes de fabrication et d'assemblage des matériaux. Par la suite, les caractéristiques des couches de cuivre dans le récepteur ont changé. Ainsi, le cuivre va devenir moins rigide et il y aura des contraintes induites dans les couches de récepteur inférieures à celles qu'on a calculées.

En plus, les joints de soudure peuvent être en mesure de maintenir la résistance thermique de la structure à un niveau acceptable, tout en réduisant les contraintes mécaniques induites par la différence d'expansion thermique entre deux couches collées ensemble. Par conséquent, les unités du récepteur après leurs fabrications vont être précontraintes à leur état initial. Ce qui va compenser les contraintes thermomécaniques induites lors de l'application, et ainsi les contraintes induites dans le récepteur seront inférieures à celles qu'on a obtenues analytiquement.

2.5 Conclusion

Ce travail a porté sur une étude de conception du récepteur. Dans un premier volet, une étude analytique des contraintes et de la déformation d'une structure multicouche a été réalisée dans les deux cas : l'étape de fabrication par thermocompression et l'étape de l'opération au cours de cycle jour/nuit. Cela visait à déterminer les paramètres de la déformation d'une structure multicouches pour chaque cas. Les premières observations de l'étude analytique ont montré, tout d'abord, que la détermination des paramètres du coefficient d'expansion thermique du substrat est très importante. Ceci, a été démontré en analysant la variation des contraintes induites dans le bilame en fonction de $\Delta\alpha$. Moyennant cette étude, on peut avoir les variations des contraintes dues à tous changements dans la géométrie du substrat et ainsi contrôler l'état des contraintes induites. Par la suite, on a étudié la conception d'une unité du récepteur en opération pour avoir l'état de contraintes dans ces différentes couches. Aussi, pour avoir la variation de la courbure et de coefficient d'expansion thermique effectif total du substrat. Finalement, suite à la grande variation du coefficient d'expansion thermique effectif de la couche d'électrode qui suit la variation d'épaisseur massique choisie, on a pu mettre l'accent sur l'importance de la valeur exacte de l'épaisseur 'effective' pour chacune des couches d'acier et d'échangeur de chaleur. Donc, il faudrait suivre une méthode de calcul précise de cette épaisseur des couches micro-usinées à l'intérieur. Pour cela, dans le prochain chapitre, on va étudier et établir une relation qui calcule l'épaisseur massique exacte pour modéliser une couche usinée.

3 ÉTUDE DE L'INFLUENCE DU MICROUSINAGE SUR LA DÉFORMATION THERMOMÉCANIQUE

3.1 Effet de micro-usinage intérieur sur la dilatation thermique de l'échangeur

3.1.1 Objectif et description de la méthode utilisée :

L'échangeur est constitué d'un ensemble de microcanaux rectangulaires. Dans cette étude on veut vérifier si la structure usinée influe sur la dilatation de l'échangeur. La description théorique de l'allongement des volumes usinés à l'intérieur est connue. Pour cette raison, on est intéressé à une approche expérimentale permettant de déterminer l'allongement thermique de ces volumes.

3.1.2 Modèle théorique et hypothèses générales

L'hypothèse est que le volume d'un corps creux ou usiné à l'intérieur, d'un matériau homogène, varie par dilatation de la même quantité que celui d'un corps plein. Donc, considérant le cas de l'échangeur de chaleur qui est en cuivre, supposé homogène, micro-usiné avec des ailettes à l'intérieur.

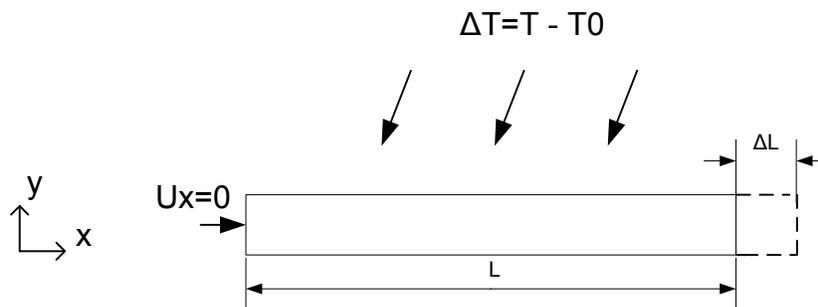


Figure 3.1 Dilatation linéaire d'un corps plein

Vu que la dilatation doit être la même dans tous les sens, on va étudier la dilatation linéaire suivant l'axe x du microéchangeur. L'échangeur est maintenu bloqué en translation selon x d'un côté et libre de l'autre côté (Figure 3.1). La dilatation linéaire suivant l'axe x d'échangeur de longueur initiale L est ΔL . La longueur finale d'échangeur après l'application d'un chargement thermique ΔT est $L_f = L(1 + \alpha \cdot \Delta T)$ avec un allongement $\Delta L = \alpha \cdot \Delta T \cdot L$.

Attentes et hypothèses comportementales

L'échangeur est une structure rectangulaire de dimensions 154*60*10 mm en cuivre. La température ambiante est de $T_0 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$. Si on chauffe jusqu'à la température $T = 51 \text{ }^\circ\text{C}$, on s'attend à avoir un allongement linéaire selon x de

$$\Delta L = \alpha \cdot \Delta T \cdot L = 17,4 \cdot 10^{-6} \cdot 28 \cdot 154 = 75 \text{ } \mu\text{m} \quad (3.1)$$

C'est l'allongement d'un bloc de cuivre après l'application d'un $\Delta T = 28 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.1.3 Plan d'observation des comportements

La technique consiste à chauffer le microéchangeur avec une plaque chauffante, il est bloqué en translation suivant x d'un côté par une barre épaisse, parfaitement immobile, et libre de l'autre côté. Conséquemment, la coté libre qui est en contact avec un comparateur à cadran va se dilater.

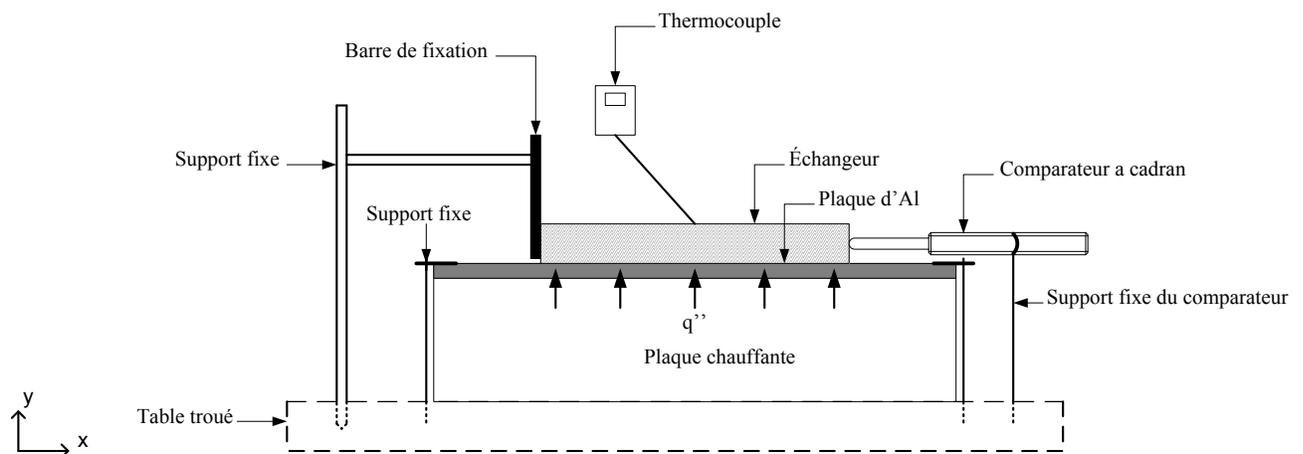


Figure 3.2 Montage de mesure expérimentale de la dilatation d'échangeur

On met une plaque d'aluminium entre l'échangeur et la plaque chauffante pour maintenir une température uniforme dans l'échangeur (Figure 3.2). Un thermocouple est placé pour mesurer et

contrôler notamment la température de l'échangeur. On a commencé par chauffer l'échangeur et noté le déplacement de l'aiguille du comparateur avec sa température correspondante.

3.1.4 Observations et interprétations

La figure 3.3 représente le montage de mesure de la dilatation d'échangeur installé dans le laboratoire d'optique de l'Institut Interdisciplinaire d'Innovation Technologique.

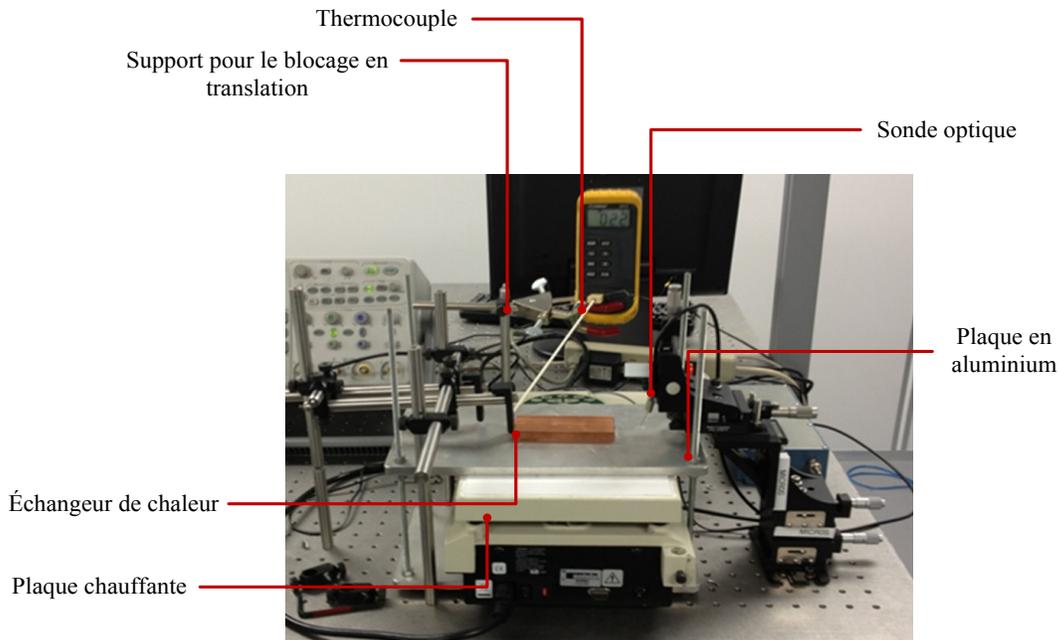


Figure 3.3 Le montage de mesure de la dilatation thermique de l'échangeur

Validation des résultats avec la répétitivité

Afin de s'assurer d'avoir de bons résultats, les tests de dilatation effectués sur le microéchangeur sont répétés. Ces répétitions permettent d'avoir une erreur de répétition. La figure 3.4 représente la variation du déplacement longitudinal de l'échangeur en fonction de la température. Le tableau 3.1 illustre les mesures de déplacement du comparateur et de la température correspondante.

Tableau 3.1 Tableau de Mesures de déplacement d'échangeur

T[C]	Déplacement [μm]				
	#1	#2	#3	#4	#5
23	203	203	203	203	203
33	249	244	246	249	249
45	267	259	272	264	267
51	279	277	282	284	279

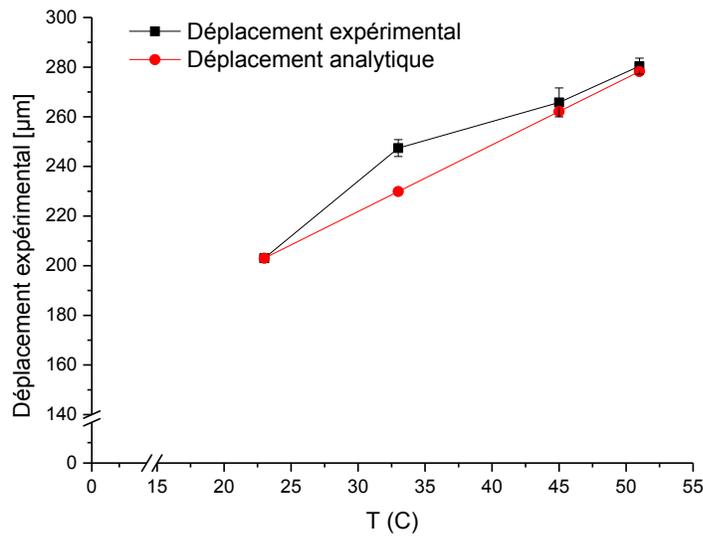


Figure 3.4 Variation du déplacement longitudinal de l'échangeur en fonction de la température

D'après les mesures de déplacement (Figure 3.4), on obtient un allongement moyen final de $\Delta L = 77 \mu\text{m}$ après l'application d'un $\Delta T = 28 \text{ }^\circ\text{C}$. Par la suite, l'erreur relative de ce calcul est définie par :

$$\text{erreur} = \left| \frac{77-75}{77} \right| \times 100 = 2.5 \% \quad (3.2)$$

Cette erreur provient de l'incertitude des appareils de mesures comme le thermomètre et le comparateur à cadran. Donc, après avoir effectué cinq tests, il en résulte que l'erreur relative maximale n'excède pas 3%.

3.1.5 Conclusion :

Moyennant cette étude expérimentale, on peut conclure que l'usinage à l'intérieur d'une structure n'influe pas sur sa dilatation thermique, car le corps dilaté conserve toujours une forme semblable à sa forme primitive. Ainsi, on peut modéliser chaque volume machiné V_1 par son volume plein représentatif effectif V_2 vu que la dilatation doit être la même pour V_1 et V_2 comme le montre la figure 3.5. Mais, il faut utiliser la bonne épaisseur pour avoir les mêmes contraintes dans les deux volumes si on limite sa déformation. Dans tout le reste de cette étude, on va donner l'adjectif « effective » pour cette épaisseur.

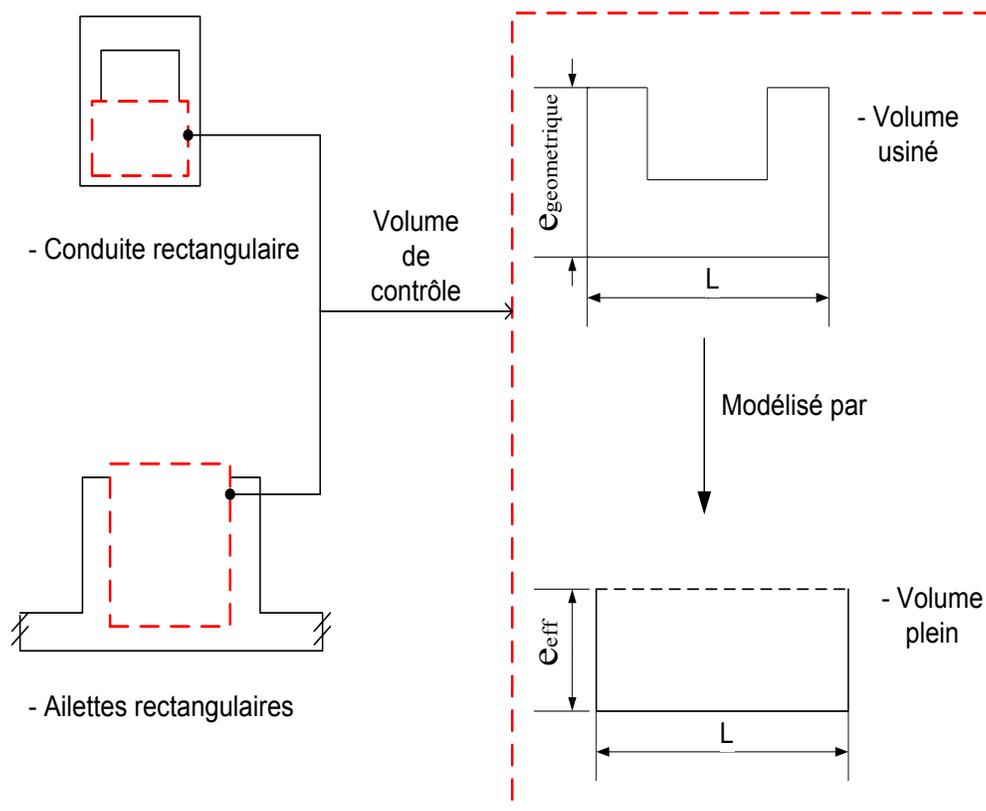


Figure 3.5 Schéma de la modélisation d'un volume micro-usinée avec un volume plein

Pour notre récepteur, l'approche adoptée pour le refroidissement est celle des microcanaux avec des sections droites rectangulaires. Cependant, on peut le modéliser le volume de contrôle des ailettes de l'échangeur par un volume plein en utilisant l'épaisseur effective adéquate qui respecte ses contraintes induites. Dans la prochaine partie, on va élaborer la méthode de calcul de l'épaisseur effective pour représenter le volume de contrôle des ailettes de l'échangeur.

3.2 Effet de micro-usinage intérieur sur la déformation thermo-mécanique de l'échangeur

3.2.1 Mise en contexte

Le substrat de chaque unité du récepteur est un empilement des différents matériaux et un échangeur de chaleur. L'approche adoptée pour le refroidissement est celle des microcanaux. La géométrie de ces dernières influe sur les contraintes induites dans la structure du récepteur, donc sur le coefficient d'expansion thermique effectif des couches. D'après les résultats du chapitre précédent, la variation de l'épaisseur 'effective' d'une couche influe sur le coefficient d'expansion thermique effectif final de chaque couche. Pour cela, afin de calculer le coefficient d'expansion thermique de la couche d'électrode d'une façon précise, il faut modéliser notre échangeur par un volume plein représentatif. Conséquemment, il faut calculer son épaisseur effective ou la rigidité effective de la structure. Le calcul de l'épaisseur effective était choisi dans cette étude.

3.2.2 Méthodologie

Introduction

Le but de la présente étude est de modéliser un volume usiné par son volume plein représentatif. L'épaisseur de ce dernier doit être calculée en suivant une approche similaire au principe de la méthode d'optimisation structurale évolutive. Ce principe est basé sur « l'élimination de la matière qui n'intervient pas dans la résistance de la structure » [19]. Autrement dit, si on découpe la structure V , les éléments qui ont des faibles contraintes sont supprimés et les faibles contraintes supportées par ces éléments sont redistribuées dans le volume qui reste de la structure V' . Ainsi, on calcule l'épaisseur de V' qui présente l'épaisseur effective de V .

Définition d'épaisseur effective

L'épaisseur effective e_{eff} d'un corps creux C_1 est égale à l'épaisseur du corps plein C_2 , à condition que les forces appliquées par C_1 et C_2 soient égales. On va étudier l'approche de calcul d'épaisseur effective des ailettes ou des conduites rectangulaires (Figure 3.6).

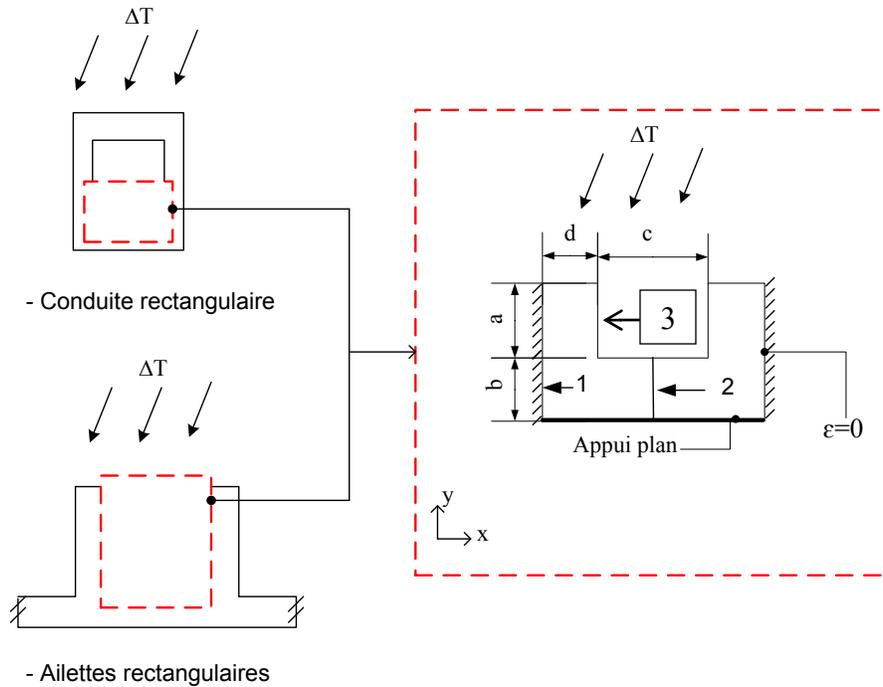


Figure 3.6 Volume de contrôle à modéliser

L'expression de la déformation peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \cdot \Delta T = \frac{F}{e_{eff} \cdot w \cdot E} + \alpha \cdot \Delta T \quad (3.3)$$

avec, F étant la force de la réaction moyenne sur les deux arrêts 1 et 2, w est la largeur du volume de contrôle et E, α et ΔT sont respectivement le module d'Young, le coefficient d'expansion thermique et la variation de la température moyenne appliquée. La condition de symétrie est appliquée, donc le déplacement des extrémités est nul,

$$\varepsilon = 0 \quad (3.4)$$

$$e_{eff} = - \frac{F}{\alpha \cdot \Delta T \cdot w \cdot E} \quad (3.5)$$

Par la suite, un modèle numérique a été réalisé pour mesurer la force de réaction issue de l'application d'un chargement thermique $\Delta T=50^\circ C$. Les calculs numériques effectués nous ont permis d'avoir les valeurs de l'épaisseur effective en fonction des facteurs de formes $(\frac{a}{b}; \frac{c}{b}; \frac{d}{b})$. Ainsi, on peut écrire la relation entre l'épaisseur massique et l'épaisseur effective comme suite :

$$k = \frac{e_{eff}}{e_m} \quad (3.6)$$

avec k étant le facteur de correction. Conséquemment, on peut corriger les épaisseurs massiques prises dans le chapitre précédent pour qu'elles soient égales aux valeurs des épaisseurs effectives.

Simulation numérique

Le but est d'analyser le comportement de la structure suite à un chargement thermique (Figure 3.6). L'approche consiste à appliquer un $\Delta T = 50 \text{ °K}$ sur le volume et empêcher le déplacement des deux arrêtes 1 et 2 suivant x . Pour chaque combinaison des facteurs de forme de cette géométrie (a/b , c/b , d/b), on a calculé les forces exercées sur l'arrête 1. Ensuite, on a utilisé l'équation 3.5 pour calculer l'épaisseur effective e_{eff} et le facteur de correction k pour chaque cas. Ainsi, on a eu la variation de facteur de correction en fonction des différentes combinaisons (a/b , c/b , d/b).

Géométrie et maillage

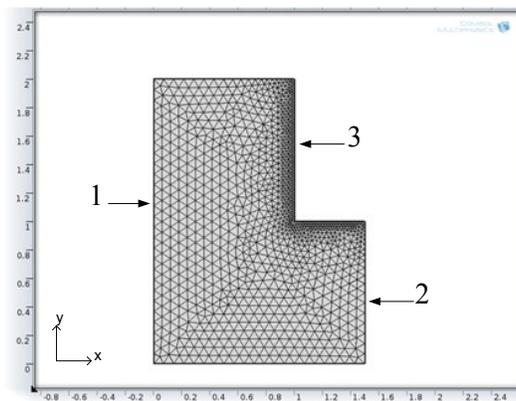


Figure 3.7 Maillage du volume de contrôle de la structure

Tableau 3.2 Caractéristiques du maillage utilisé

Nature et nombre d'éléments de maillage	35608 éléments triangulaires
Qualité de l'élément de maillage⁵ maximale	0.9553
Taux de croissance maximale⁶	2.644
Taux de croissance moyenne	1.2

⁵ La qualité de l'élément de maillage est une quantité sans dimension comprise entre 0 et 1, où 1 représente un élément parfaitement régulier, et 0 représente un élément dégénéré.

⁶ La valeur du taux de croissance est une mesure locale supérieure ou égale à 1, indiquant le taux de croissance de la taille de l'élément maximal entre deux éléments voisins.

Chargement imposé et conditions aux limites

Les conditions initiales et les conditions aux limites de cette étude numérique 2D sont :

- Une symétrie sur les deux arrêtes 1 et 2 ($\varepsilon = 0$) (Figure 3.7) et un appui plan sur la face inférieure.
- La température initiale est $T_0 = 300$ K
- Augmentation de température à $T = 350$ K

Les hypothèses de cette étude sont:

- On reste dans le domaine élastique des matériaux
- Le cuivre est thermoélastique linéaires isotrope

3.2.3 Résultats et interprétations

Variation de contrainte

La figure 3.8 montre qu'il y a une zone où les contraintes induites selon x sont faibles (couleur bleu ciel) parce que la matière est partiellement libre sur l'arrêt 3. Ainsi, l'épaisseur effective sera plus faible que l'épaisseur massique puisqu'une portion de la matière a une faible contrainte.

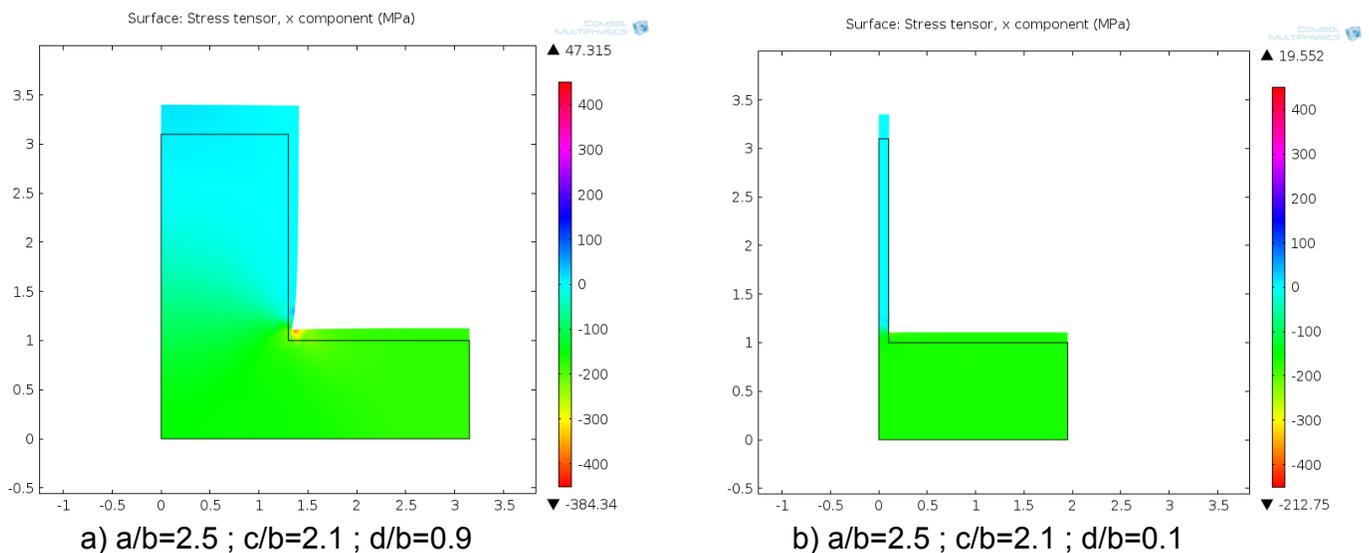


Figure 3.8 Exemple de distribution de contrainte selon l'axe x dans la structure en fonction des différentes combinaisons de facteurs de forme (a) et (b)

Les facteurs de formes d'une structure sont les paramètres principaux pour le calcul des contraintes induites. Cette section met en évidence la variation de coefficient de correction k en fonction de la variation des facteurs de formes (figure 3.9). Dans une première analyse, les résultats montrent que pour l'ensemble des facteurs de correction, l'allure de la variation est similaire. Prenant un de ces cas, ou $a/b=1.3$.

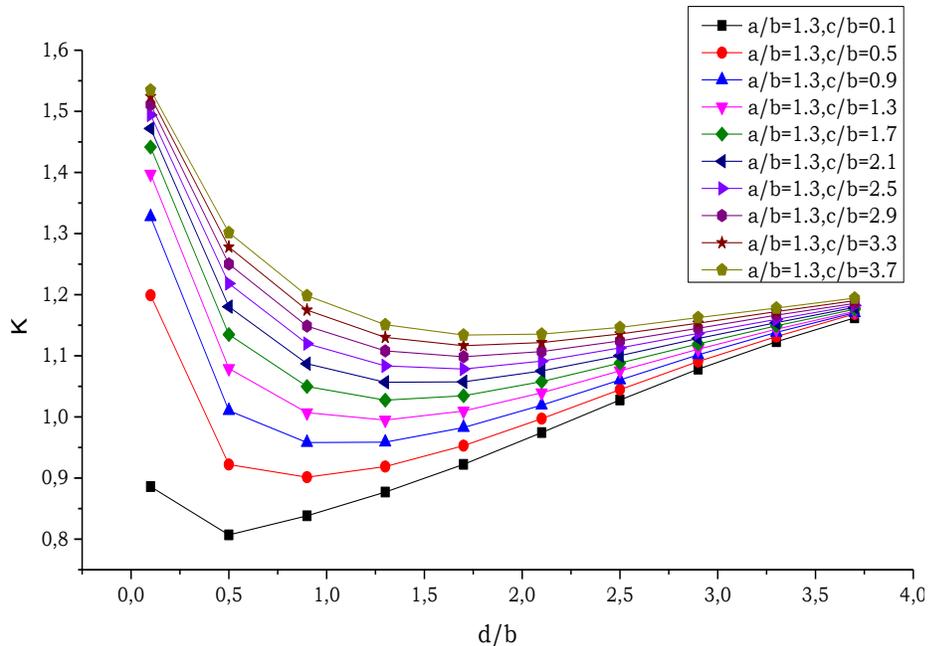


Figure 3.9 Variation du facteur k en fonction des facteurs de formes (a/b , c/b , d/b)

$k < 1$ Dans ce cas on a : $e_{eff} < e_m$ et il faut enlever de la matière dans le volume plein équivalent pour avoir les mêmes contraintes induites (Fig. 3.10). En effet, pour toutes les combinaisons des facteurs de formes, le ratio a/b est assez important dans ce cas. Or, l'allongement libre de l'arrêt 3 (Figure 3.7) peut relaxer les contraintes induites selon l'axe x . Par la suite, on aura des éléments de la structure qui ont une contrainte faible. Donc, les contraintes moyennes ne sont pas distribuées uniformément dans la structure (volume 1). Il faut supprimer ces éléments et redistribuer uniformément les contraintes dans le volume qui reste (volume 2) pour avoir l'épaisseur effective.

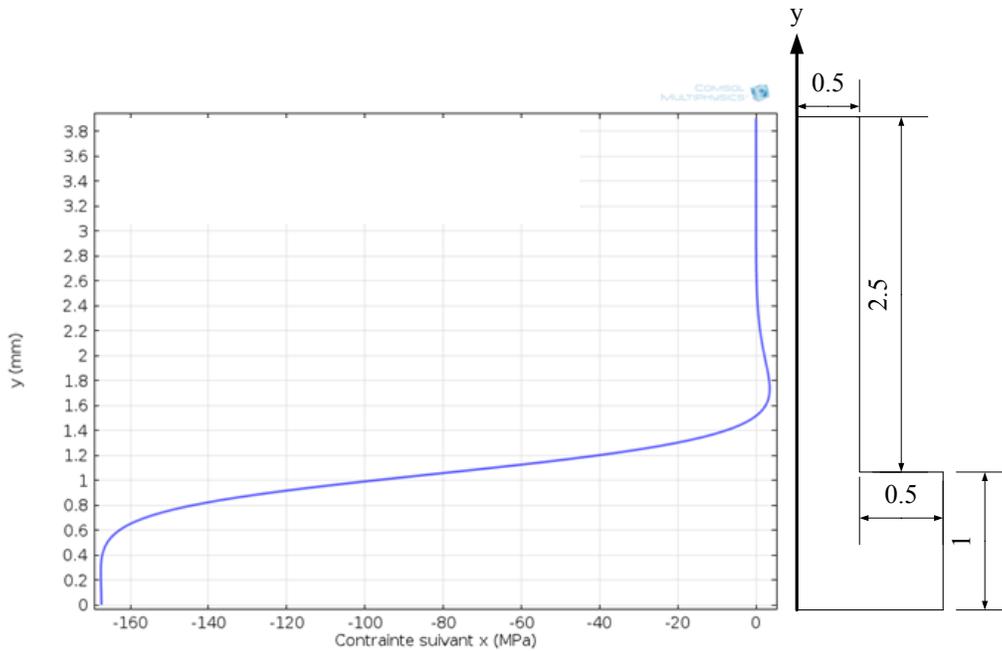


Figure 3.10 Variation de contrainte axiale σ_x selon y sur l'arrêt 1 pour une combinaison des facteurs de forme donnant $k < 1$

$k \geq 1$ Dans ce cas on a : $e_{eff} > e_m$ et il faut rajouter de la matière dans le volume plein équivalent pour avoir les mêmes forces induites (Fig. 3.11).

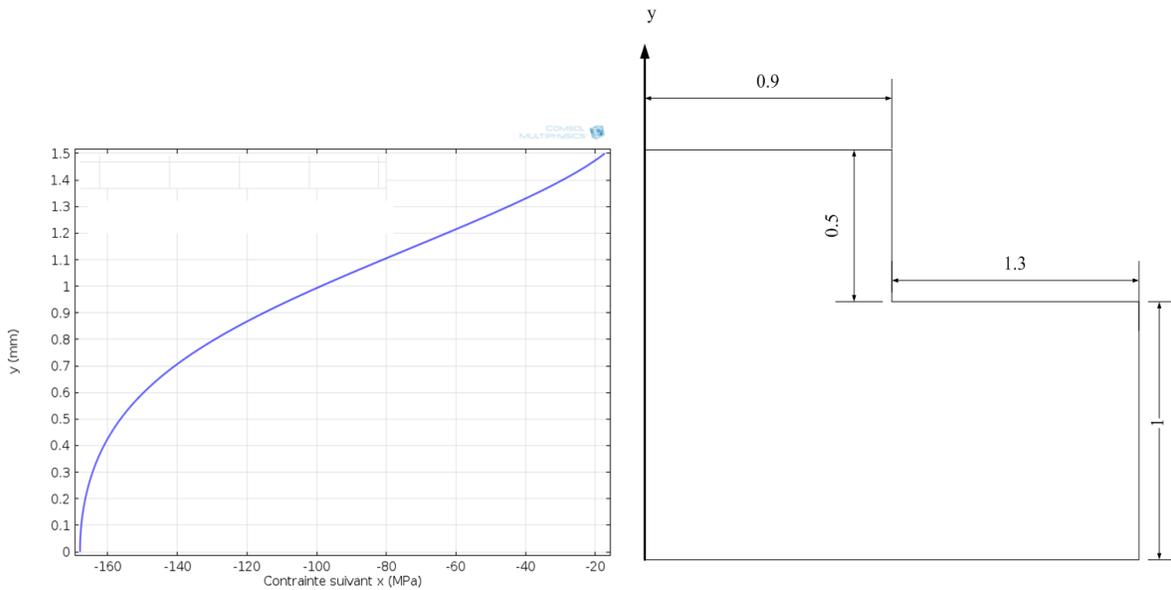


Figure 3.11 Variation de contrainte axiale σ_x selon y sur l'arrêt 1 pour une combinaison des facteurs de forme donnant $k > 1$

Dans ce cas, pour toutes les combinaisons des facteurs de formes, le ratio a/b est assez faible. Par la suite, il y aura des contraintes importantes distribuées dans tout le volume d'une manière non uniforme. D'où l'intérêt de rajouter de la matière pour redistribuer les contraintes induites uniformément dans le volume. L'usinage du canal dans ce cas ne réduit pas notablement la force totale appliquée par l'expansion thermique, donc son comportement mécanique est équivalent à une couche pleine se rapprochant de l'épaisseur totale de la couche.

3.2.4 INTERPRÉTATIONS

Selon cette étude, on peut modéliser chaque géométrie avec microcanaux ou conduite rectangulaire, par un volume plein avec une épaisseur effective tout en respectant l'état des contraintes induites dans la matière. Pour notre récepteur, l'approche adoptée pour le refroidissement est celle des microcanaux avec une section droite rectangulaire. Cependant, on peut le modéliser par un volume plein en utilisant l'épaisseur effective adéquate qui respecte les contraintes induites dans l'échangeur (Figure 3.12).

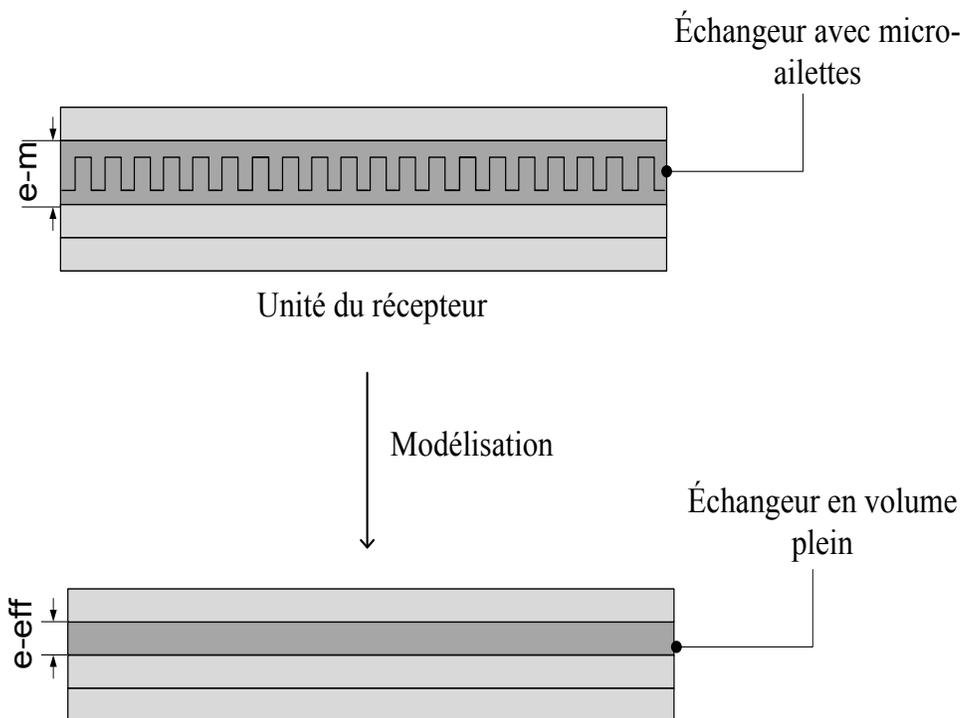


Figure 3.12 Modélisation du récepteur réel en un substrat avec des couches pleines

3.2.5 CONCLUSION

Le besoin de calculer l'épaisseur effective d'un volume rectangulaire nous a poussés à développer une approche pour remplacer un solide usiné à l'intérieur par un solide plein équivalent. À partir de cette étude numérique, on a pu présenter la variation du facteur de correction k en fonction des facteurs de forme géométrique de volume. Conséquemment, on peut modéliser l'échangeur de chaleur par un volume plein est ainsi extraire le coefficient d'expansion thermique effectif. Cependant, il serait intéressant d'étudier d'autres configurations de formes pour avoir la variation des facteurs de corrections avec lesquels on peut modéliser ces structures par des volumes pleins.

4 L'ANALYSE DES CONTRAINTES THERMO - MÉCANIQUES DANS LES COUCHES D'ÉPOXY

4.1 Problèmes

Le choix de l'époxy adéquat dans le récepteur est nécessaire afin d'avoir un bon collage et une meilleure conductivité thermique. Le but de ce chapitre est d'identifier et varier les paramètres mécaniques qui contrôlent les contraintes induites dans l'époxy. Ainsi, on peut diminuer ces contraintes et fixer les critères nécessaires de choix d'époxy conducteur et isolant électrique dans le récepteur.

4.2 Méthodologie

Le volume d'étude représentatif du récepteur se compose de deux époxys, conducteur et isolant électrique comme le montre la figure 4.1. La non-concordance des coefficients de dilatation thermique de ces dernières va permettre d'apporter des modifications dimensionnelles suite à des contraintes induites dans leur couche. Ainsi, les changements de température dans ces joints collés vont causer des différents états de contraintes induites dans la couche des deux époxys.

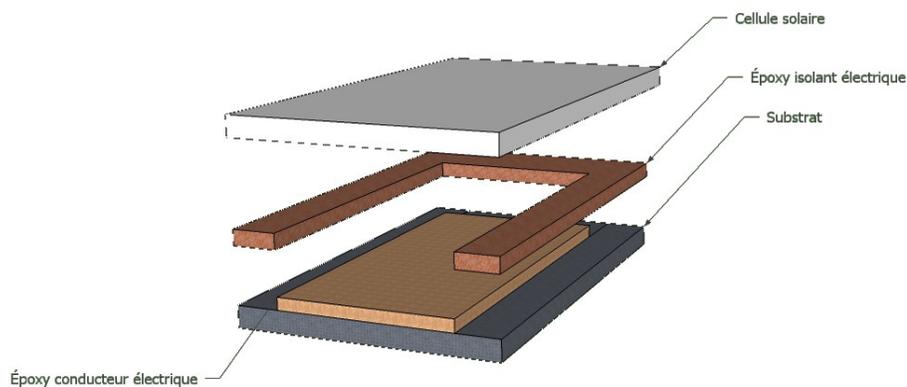


Figure 4.1 Vue exposée du volume élémentaire représentatif

Pour étudier les paramètres de choix de l'époxy, on va commencer par l'identification des paramètres des contraintes générales. La force induite dans la couche d'époxy peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\epsilon_{\text{total}} = \epsilon_{\text{th}} + \epsilon_{\text{m}} = \frac{\sigma}{E} + \alpha \cdot \Delta T = \frac{F}{t \times w \times E} + \alpha \cdot \Delta T \quad (4.1)$$

où E est le module d'Young, ϵ est la déformation, w et t sont respectivement la largeur et l'épaisseur de la couche d'époxy. On peut alors varier ces paramètres pour voir leurs influences sur l'état des contraintes induites dans la couche des deux époxy. On va commencer par l'étude des comportements de volume de contrôle présenté par la figure 4.2.

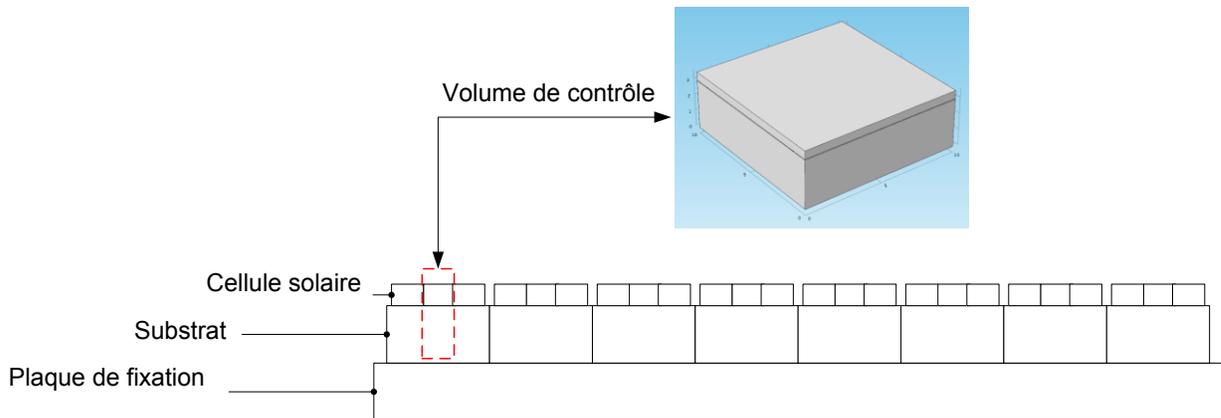


Figure 4.2 Volume de contrôle du récepteur pour l'étude des époxy

Ce volume représente une cellule montée sur un substrat ou on va appliquer une variation de température. Les dimensions de la structure sont présentées dans la figure 4.3.

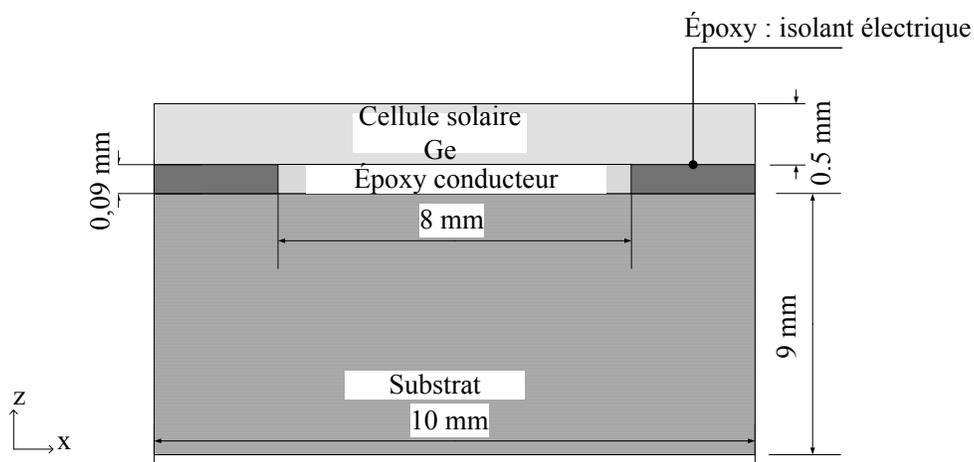


Figure 4.3 Un volume de contrôle de dimensions : $10 \times 10 \times 9,55$ mm
Les propriétés des matériaux du volume se trouvent dans le tableau 4.1. Le reste des propriétés des deux époxy utilisé sont présentées dans l'annexe D.

Tableau 4.1 Les propriétés des matériaux de la puce [17], [20]

Propriétés	Ge	Époxy conducteur E1000	Époxy isolant ME7159	Substrat	Unité
Coefficient de dilatation thermique	$6.1e^{-6}$	$39e^{-6}$	$120e^{-6}$	$6.5e^{-6}$	1/K
Capacité calorifique à pression constante	310	1800	1800	329.3	J/(kg.K)
Masse volumique	5323	2300	2300	3452	kg/m ³
Conductivité thermique	58	12.6	11.4	263.25	W/(m.K)
Module de Young	$103e^9$	$3.5e^9$	$3.5e^9$	$208.100e^9$	Pa
Coefficient de Poisson	0.3	0.2	0.2	0.3	1

Modélisation:

- Méthode des éléments finis utilisant Comsol[®] multiphysics 4.3a
- Physique: thermomécanique structurelle
- La loi de comportement: thermoélastique linéaire
- Température uniforme, $T_{\text{initial}} = 300 \text{ K}$
- Régime établi

Les conditions aux limites prises dans la simulation numérique, présentées par figure 4.4, sont:

- Blocage d'un point et du déplacement suivant l'axe Z de la face inférieure du volume pour que le système soit statique
- Symétrie des deux côtés
- La condition périodique sur deux faces: T_{scr} : température de la source est égale à T_{rcp} : température de la destination et l'égalité des déplacements $U_{\text{scr}} = U_{\text{rcp}}$

- La température appliquée est $T = 350 \text{ °K}$ qui est inférieure à la température de transition vitreuse⁷ des deux époxy.

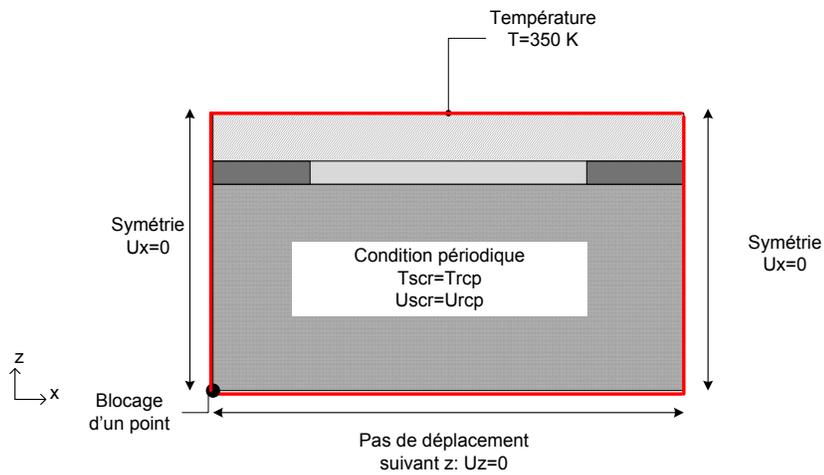


Figure 4.4 Géométrie et conditions aux limites

Maillage :

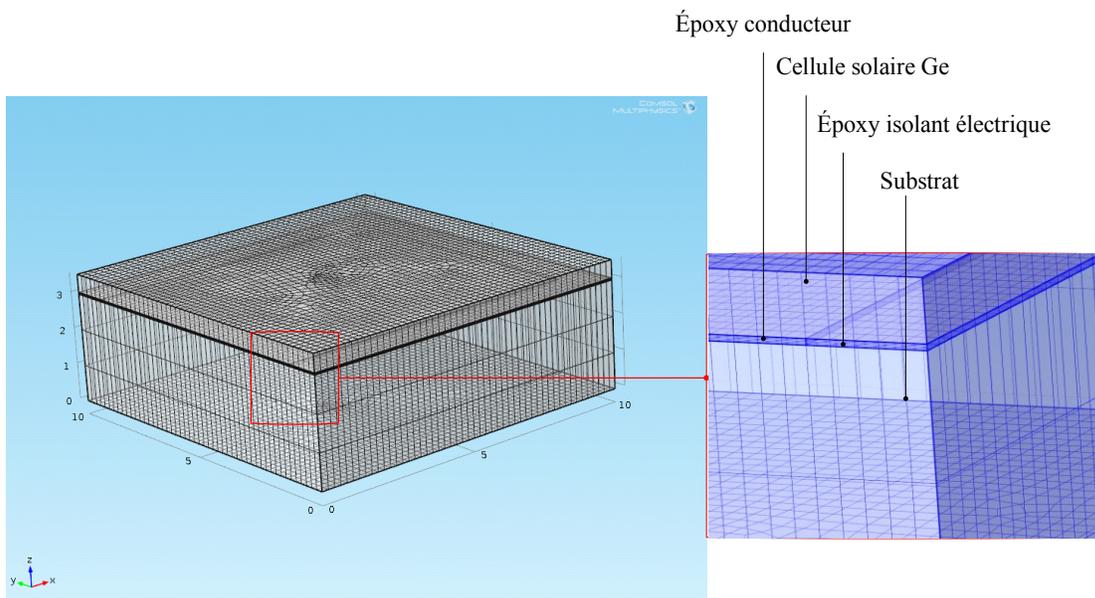


Figure 4.5 Maillage du volume de contrôle

Les détails du maillage final adopté dans cette étude sont:

- Nombre d'éléments: 30415

⁷ La température de transition vitreuse d'un matériau est la température à partir de laquelle le matériau va passer d'un état vitreux (solide rigide) à l'état caoutchouteux.

- Les éléments de la couche des époxy sont extrêmement fins comme le montre la figure 4.5.

Résultats et discussion:

Comme l'époxy isolant a un coefficient de dilatation thermique supérieur à celui d'époxy conducteur, donc il a tendance à s'allonger plus vite (Figure 4.7), tandis que l'isolant est comprimé lorsqu'on a appliqué un ΔT . En effet, l'époxy isolant se dilate autour de trois côtés de la cellule, ce qui entraîne une contrainte de tension sur l'époxy conducteur. Il y aura donc une compression dans l'époxy isolant et une contrainte de traction dans l'époxy conducteur. La Figure 4.7 montre la différence de déplacement selon l'axe Y entre les deux époxy.

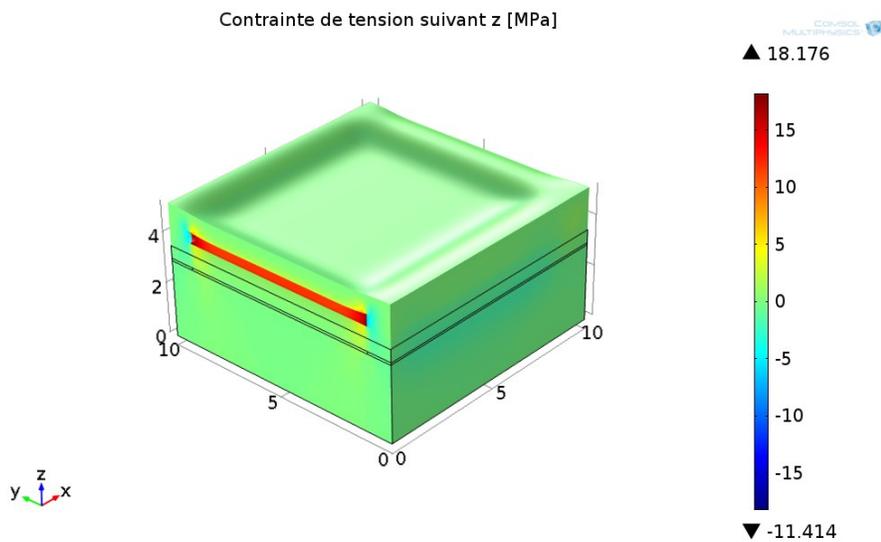


Figure 4.6 Le volume de contrôle en déformation

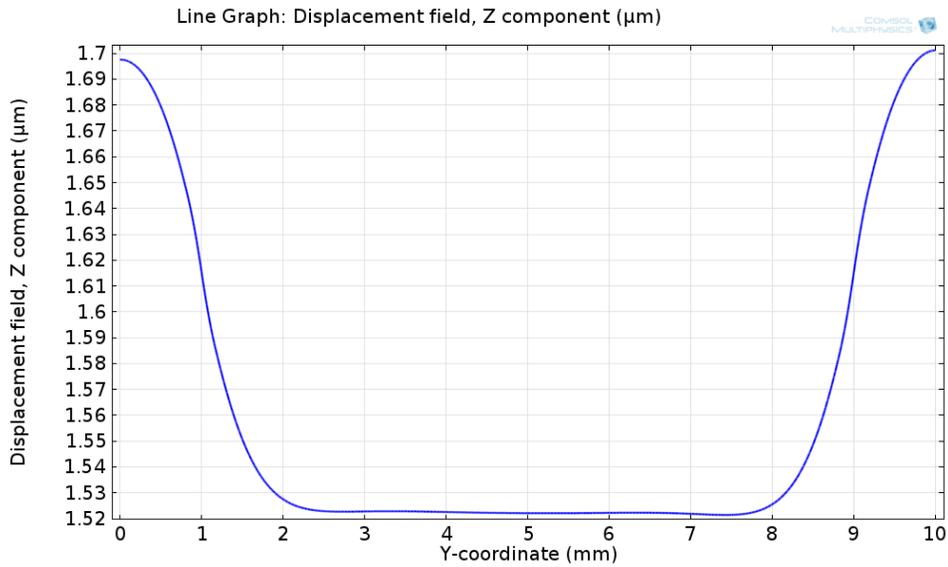


Figure 4.7 Déplacement suivant z dans la couche des deux époxy suivant l'axe y

En plaçant les lignes de l'étude 1 et 2 dans la couche d'époxy (Figure 4.8) suivant l'axe y, on peut ainsi avoir les valeurs des contraintes de tensions induites dans la couche des deux époxy le long de ces deux lignes.

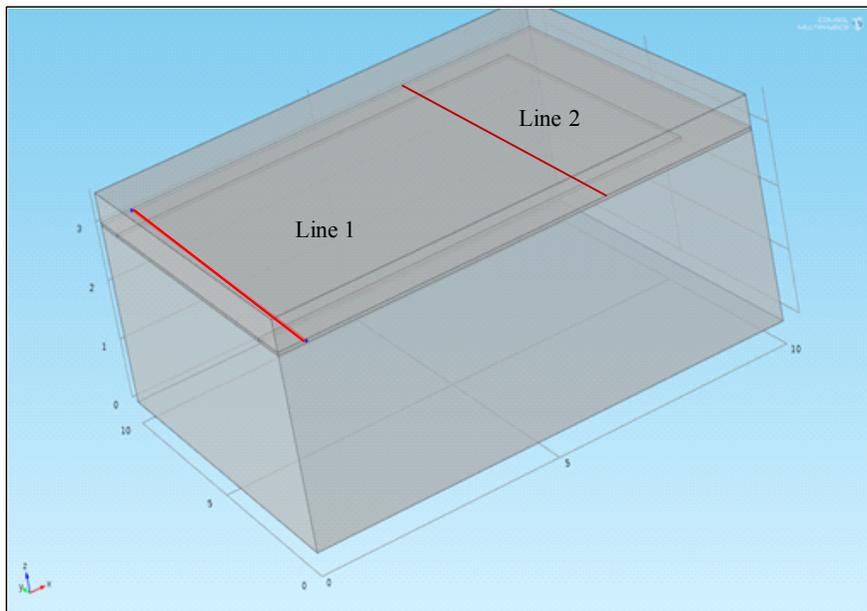


Figure 4.8 Identification des deux lignes le long desquelles les données sont extraites

Dans une première analyse, les résultats montrent que l'allure de la variation des contraintes suivant l'axe Y dans la couche des époxy est la même suivant les deux lignes 1 et 2. Conséquemment, la variation des contraintes est uniforme dans la couche des deux époxy.

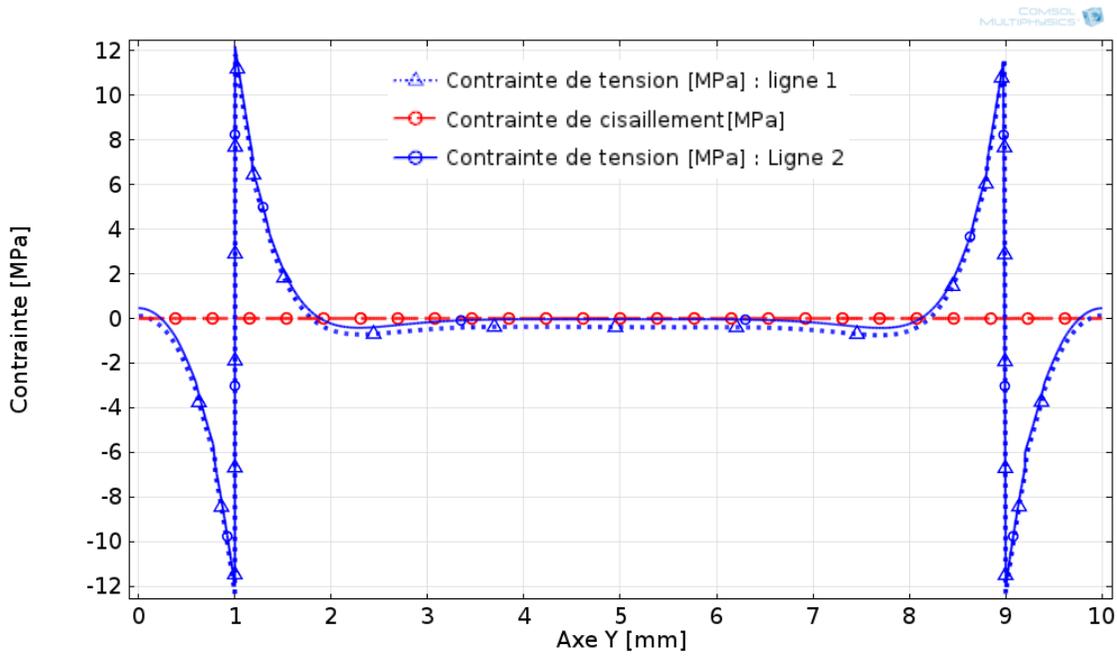


Figure 4.9 Variation des contraintes induites (tension suivant z et cisaillement) dans l'époxy en fonction de la position de l'axe y

À l'interface entre les deux époxy, l'époxy conducteur est sous tension alors que l'époxy isolant est en compression comme le montre la figure 4.9. La contrainte de cisaillement τ est toujours inférieure à 1 MPa. Conséquemment, les deux époxy sont encore dans la zone de sécurité qui est en dessous de la résistance au cisaillement donnée par la fiche des spécifications des deux époxy qui est 6.9 MPa [20]. Mais, la contrainte de traction induite dans l'époxy conducteur, à l'interface entre les deux époxy, est proche de la limite de la résistance de l'époxy en traction qui est de 12.4 MPa (Annexe D). Il faut donc trouver une méthode pour diminuer ces contraintes.

4.3 Influence des paramètres sur la distribution des contraintes dans la couche d'époxy :

Pour diminuer les contraintes induites dans la couche des époxy, on va varier certains paramètres géométriques et de propriétés matérielles comme la largeur et l'épaisseur de la couche

d'époxy ainsi que le coefficient d'expansion thermique et le module de rigidité des deux époxy utilisés.

4.3.1 Influence de l'épaisseur de la couche d'époxy sur la contrainte de tension

On se basant sur la simulation faite précédemment, on va changer l'épaisseur de la couche d'époxy afin de voir son influence sur les contraintes de tractions induites dans l'époxy conducteur. On note à chaque fois la valeur maximale de contrainte de tension subie par l'époxy conducteur dans la zone de contact avec l'époxy isolant. Après avoir changé l'épaisseur plusieurs fois, on a obtenu la variation de la contrainte maximale de tension à l'interface entre les deux époxy en fonction de l'épaisseur de la couche d'époxy comme le montre la figure 4.10.

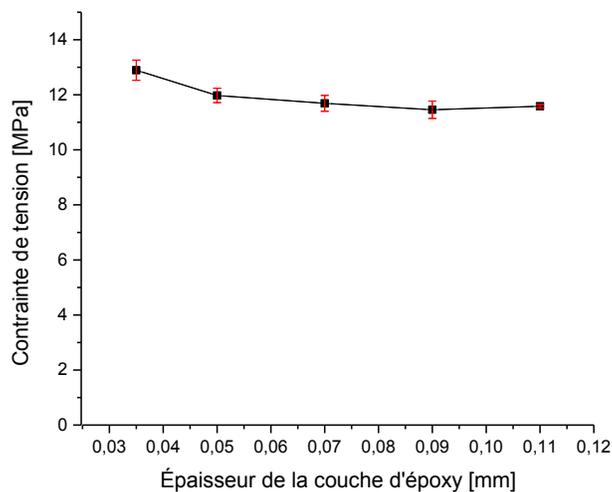


Figure 4.10 Variation de la contrainte de traction en fonction de l'épaisseur d'époxy

On constate sur la figure 4.10 que les contraintes ne varient pas sensiblement lors de changements de l'épaisseur de la couche des époxy. Vu que l'objectif est de diminuer les contraintes de tensions, alors on doit trouver un autre paramètre qui affecte plus la valeur de ses contraintes.

4.3.2 Influence de la largeur de la couche d'époxy sur la contrainte de traction

Dans cette étude, on va modifier la largeur de la couche d'époxy isolant pour avoir la variation de la contrainte de tension dans la couche d'époxy.

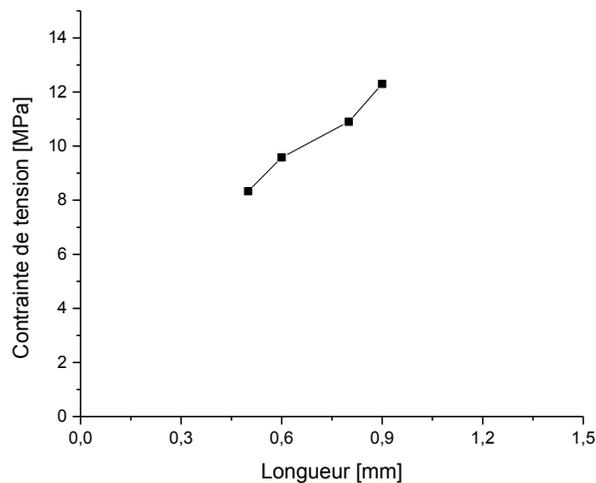


Figure 4.11 Variation de la contrainte de traction en fonction de la largeur de la couche d'époxy

On note, d'après la figure 4.11, qu'on peut réduire d'un tiers la contrainte en utilisant une demi-largeur de la couche d'époxy. Il confirme qu'on peut changer ce paramètre pour que l'époxy conducteur électrique reste dans la zone de sécurité et ainsi résister à la fatigue thermique avec des contraintes induites inférieures à 12 MPa.

4.3.3 Influence du changement époxy sur la contrainte de traction

Dans cette partie, on va étudier la variation des contraintes relative au changement d'époxy. On va changer le coefficient d'expansion thermique de l'époxy isolant et voir son influence sur l'état de contraintes induites. La figure 4.12 montre les résultats de cette étude.

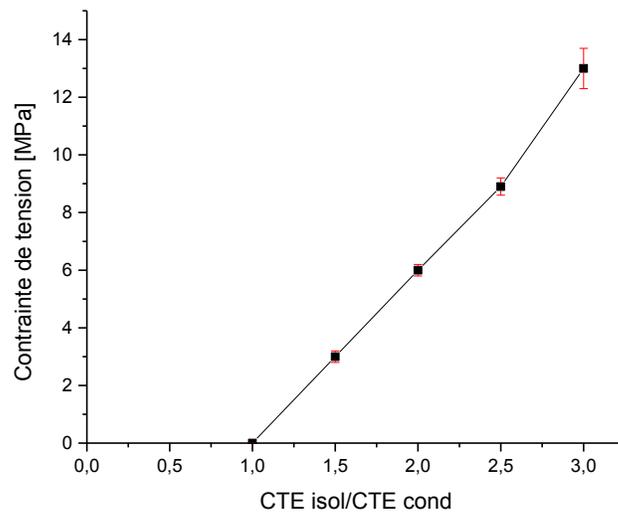


Figure 4.12 Variation de la contrainte de tension en fonction de ratio des CTE des époxy

On peut remarquer la grande influence du rapport des CTE sur l'état de contrainte de tension dans la couche d'époxy. Pour cela, on doit utiliser deux époxy avec deux coefficients de dilatation proches et évitant ainsi les contraintes importantes de traction. Prenons le cas d'époxy isolant 930-4, qui possède un coefficient d'expansion thermique de $27.10^{-6} \text{ K}^{-1}$ proche à celui de l'époxy conducteur $38.10^{-6} \text{ K}^{-1}$. On a répété la même simulation numérique précédente en utilisant cette résine époxy avec $50 \mu\text{m}$ d'épaisseur. La variation des contraintes de tensions est présentée par la figure 4.13.

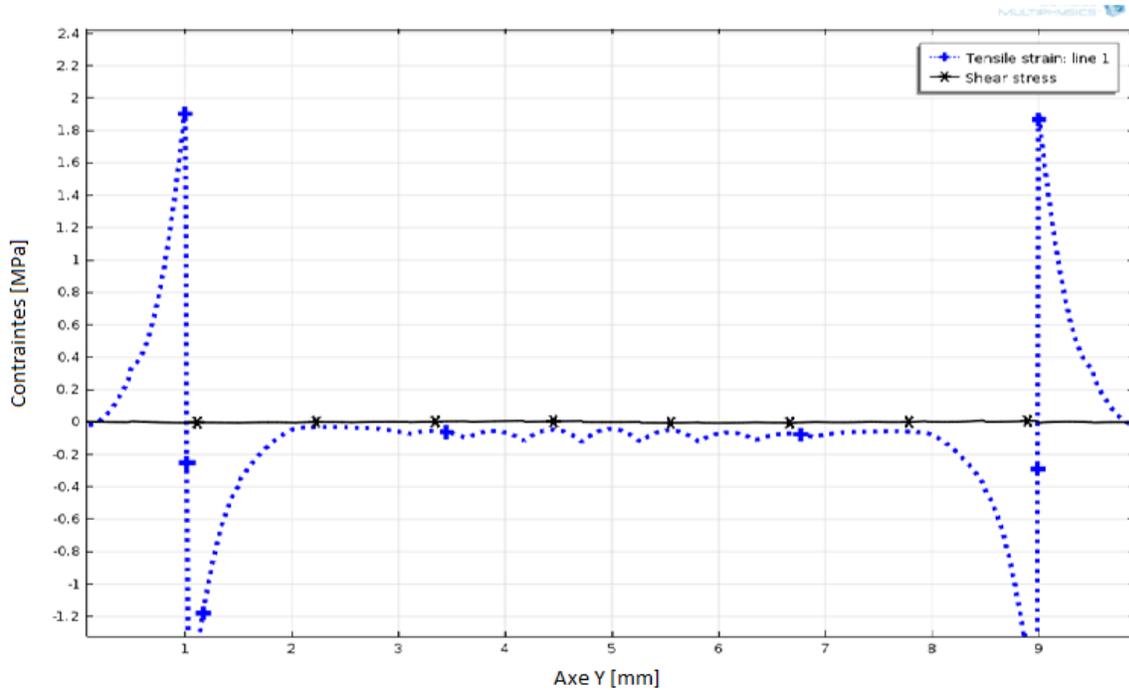


Figure 4.13 Contrainte induite dans l'époxy en fonction de la position sur l'axe y dans la couche des époxys

On note que l'époxy isolant a un coefficient de dilatation thermique proche de l'époxy conducteur. La figure 4.13 montre que la contrainte à l'interface entre ces deux a diminué jusqu'à atteindre $\sigma_{interface} < 2 \text{ MPa}$. Par la suite, plus la différence d'expansion thermique entre les deux époxys $\Delta\alpha = \alpha_{conducteur} - \alpha_{isolant}$ diminue, plus les contraintes de l'interface diminuent. Dans ce cas, l'époxy 930-4 est adéquat pour ce récepteur.

4.3.4 Influence du module de Young sur la contrainte de traction

Finalement, on va varier le rapport des modules d'Young des deux époxys de même CTE afin de voir son influence sur ses contraintes subites (Figure 1.14).

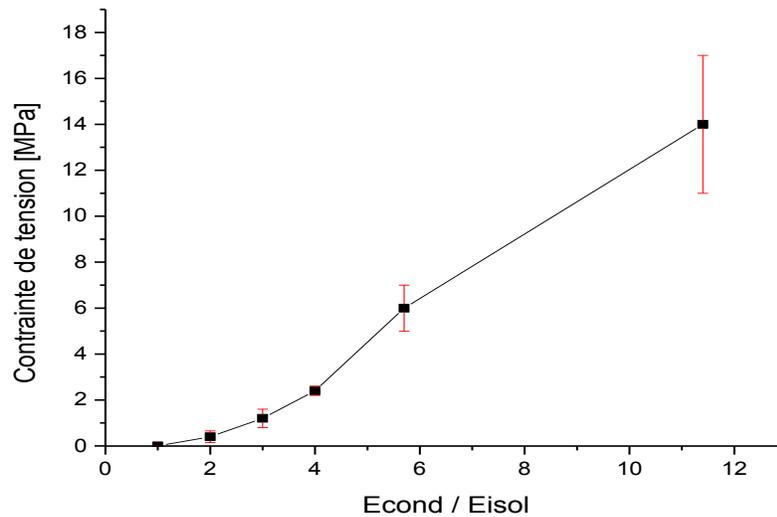


Figure 4.14 Variation de la contrainte de tension en fonction du ratio des modules de rigidité des époxy

Ce graphique montre que les contraintes de traction induites ne sont pas très sensibles à l'augmentation du ratio des modules d'Young. Il y aura un changement significatif des contraintes sauf si on augmente ce ratio d'un facteur de deux ou plus.

4.4 Conclusion

On peut conclure que le paramètre qui influe le plus sur l'état de contrainte de traction dans la couche d'époxy est la différence de CTE entre les deux époxy, soit $\Delta\alpha = \alpha_{conducteur} - \alpha_{isolant}$. Donc, on peut utiliser deux époxy avec deux CTE proches pour diminuer les contraintes de tensions et assurer ainsi leur résistance. Pour cela, l'utilisation de l'époxy isolant 930-4 est mieux que ME7159-LV pour notre application.

5 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES DE L'ADHÉSION ET DE L'INTERCONNEXION DES CELLULES SUR LE RÉCEPTEUR

5.1 Mise en contexte et problématique

On ne peut pas se baser seulement sur des résultats numériques pour la validation de la conception du récepteur. Les expériences sont sans doute les plus fiables, avec ses mesures non extrapolées. Pour cela, cette étape consiste à faire des tests expérimentaux sur des échantillons représentatifs du récepteur. Ceci va nous permettre de valider les critères de choix de l'époxy conducteur qui lie les cellules solaires du récepteur pour s'assurer de sa tenue mécanique et de son bon fonctionnement sous un chargement thermique élevé. En plus, on va définir la température maximale supportée par les composants du récepteur et par les liaisons électriques entre les cellules solaires. Dans cette étude, les puces de Si seront utilisées au lieu de cellules de Ge.

5.2 Méthodologie

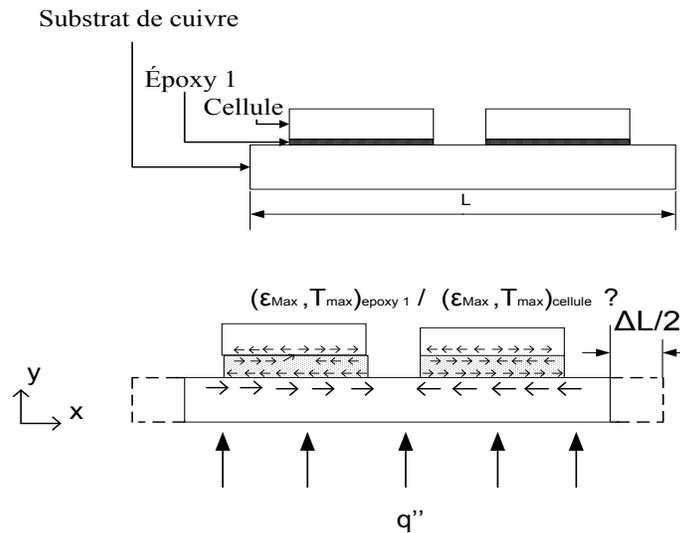
La première phase est la préparation des échantillons des tests thermiques. Tout d'abord, on a élaboré une méthodologie d'étalement d'une couche uniforme d'époxy sur une surface de cuivre avec un minimum de défauts de collage. Ensuite, on a nettoyé les puces solaires en Si de toute sorte d'imperfection pour avoir une bonne surface de collage. Enfin, une fois les échantillons ont été prêts, on a commencé les tests thermiques. Dans cette étude, on va s'intéresser aux allongements bilatéraux de l'époxy provoqués par la dilatation thermique de l'ensemble. On va suivre un plan d'expériences qui est basé sur les hypothèses suivantes :

- Matériaux élastiques linéaires
- Structure libre, sans contraintes, à $T_0 = 23 \text{ °C}$

Test #1

C'est un test thermique sur un substrat de cuivre sur lequel des puces solaires sont collées par l'époxy EK1000. Ces puces en Si sont de dimensions $10.45 \times 6.35 \text{ mm}^2$. On chauffe l'ensemble

avec une plaque chauffante (Figure 5.1). Suite à la dilatation de la structure, il y aura un allongement suivant les trois directions. On veut étudier la résistance des puces et de l'époxy EK1000. Et, dégager la température limite supportée par l'ensemble à partir de laquelle il y aura une rupture de contact entre l'époxy/puce, l'époxy/substrat ou une fracture éventuelle des puces.



→ Contrainte de cisaillement

Figure 5.1 Échantillon pour test #1

En chauffant le substrat de cuivre, un changement de température ΔT va provoquer l'allongement de la structure ε_{Cu} . Cet allongement peut s'écrire sous la forme suivante:

$$\varepsilon_{Cu} = \frac{\Delta L}{L} = \varepsilon_{thermique} + \varepsilon_{mecanique} = \alpha_{Cu} \times \Delta T + \frac{\sigma_{Cu}}{E_{Cu}} \quad (5.1)$$

D'après le chapitre deux, la contrainte induite dans le silicium peut s'exprimer comme suite :

$$\sigma_{Cu} = \frac{\Delta T * \Delta \alpha}{\left(\frac{1}{E_{Cu}} + \frac{1}{E_{Si}} * \frac{e_{Cu}}{e_{Si}} \right)} = 0 \quad (car \ e_{Si} \ll e_{Cu}) \quad et \quad \sigma_{Si} = - \frac{\Delta T * \Delta \alpha}{\left(\frac{1}{E_{Si}} + \frac{1}{E_{Cu}} * \frac{e_{Si}}{e_{Cu}} \right)} \quad (5.2)$$

On peut calculer l'allongement dû à ces contraintes induites.

Test #2

C'est la même procédure suivie pour le test #1, sauf qu'on veut tester la résistance de l'époxy à tenir le contact électrique entre deux puces. Ainsi le critère de conception recherchée est l'allongement limite d'époxy-2 ($\epsilon_{\text{époxy-2}}$) à partir duquel il y aura rupture d'époxy 2.

Test expérimental

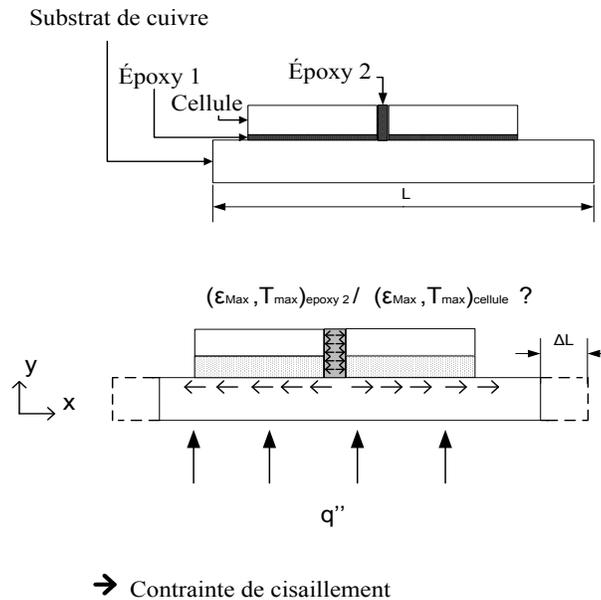


Figure 5.2 Échantillon pour test#2

Pour cet échantillon, on peut exprimer l'allongement de l'époxy 2 par :

$$\epsilon_{\text{époxy}} = \epsilon_{\text{thermique}} + \epsilon_{\text{mecanique}} = \alpha_{\text{époxy}} \times \Delta T + \frac{\sigma_{\text{époxy}}}{E_{\text{époxy}}} \quad (5.3)$$

$$\text{Avec } \sigma_{\text{époxy}} = \frac{\Delta T * \Delta \alpha}{\left(\frac{1}{E_{\text{époxy}}} + \frac{1}{E_{Si}} * \frac{e_{\text{époxy}}}{e_{Si}} \right)}$$

Test #3

Le troisième test thermique est fait sur deux substrats de cuivres montés sur une plaque d'aluminium. Dans le récepteur, chaque deux unités sont distantes d'un écart (gap) de 30 μm , sur laquelle deux cellules solaires sont collées par l'époxy pour assurer la conduction électrique (Figure 5.3). Ainsi, l'objectif de la présente expérience est de mesurer l'écart limite à partir de

laquelle il y aura une rupture de jonction entre les deux puces solaires maintenues sur l'écart qui est assuré par l'époxy conducteur électrique EK1000.

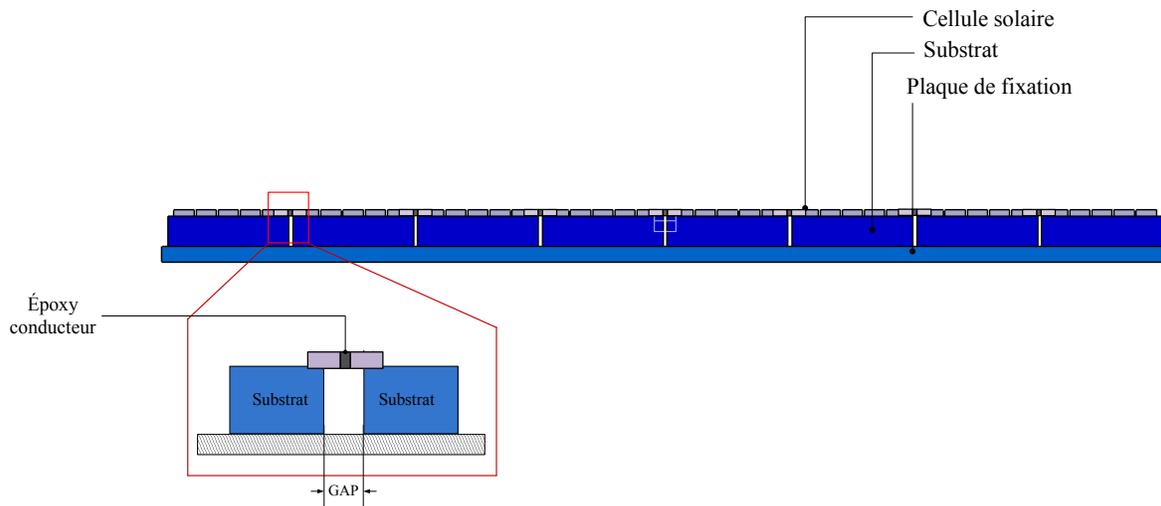


Figure 5.3 Présentation de l'écart d'étude (Gap) de test #3

L'échantillon pour le test #3 est présenté par la figure 5.4. Ce sont deux substrats de cuivre distants de $gap_i = 30 \mu\text{m}$ fixés sur une plaque d'aluminium. On bloque le déplacement de deux substrats vers le haut par deux vis de fixation. On place deux goupilles distantes de $L = 80 \text{ mm}$ pour limiter l'allongement latéral de la plaque d'aluminium. Les deux plaques sont placées sur deux boulons et isolées par l'air, afin de s'assurer que seule la dilatation d'aluminium mène à augmenter la distance entre les deux substrats de cuivre qui ne se chauffent pas.

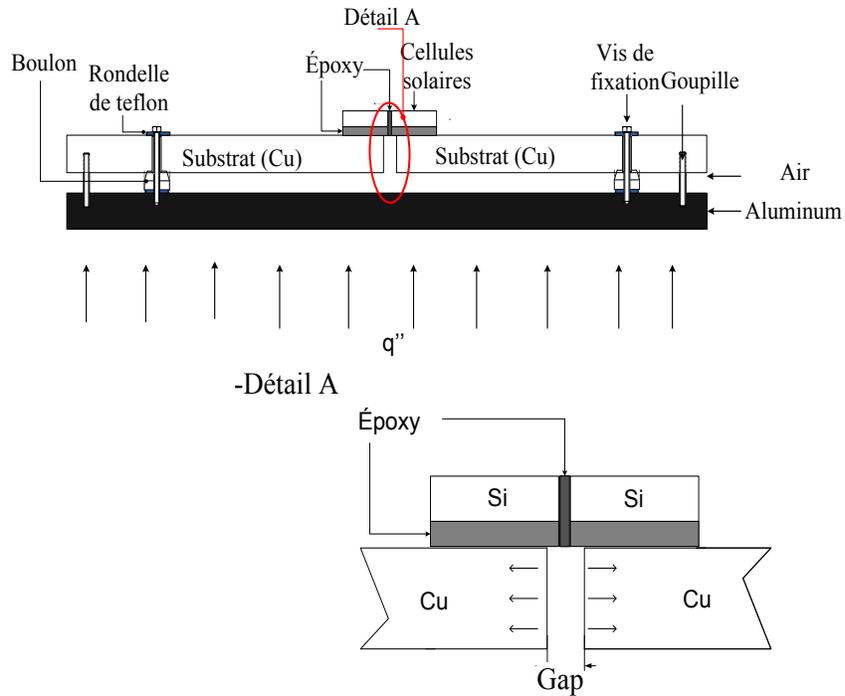


Figure 5.4 Échantillon pour le test#3

Ainsi, l'écart peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\text{Gap} = [\alpha_{\text{Al}} \cdot \Delta T_{\text{Al}} \cdot L_{\text{Al}}] - 2 \cdot [\alpha_{\text{Cu}} \cdot \Delta T_{\text{Cu}} \cdot L_{\text{Cu}}] \quad (5.4)$$

Étude de la résistance thermique de l'échantillon pour les tests#3

Le but est de s'assurer que le montage de test #3 est fonctionnel. En effet, seul l'aluminium doit dilater thermiquement et augmenter ainsi l'écart entre les deux plaques de cuivres. Cependant, la température de cuivre T_2 sera inférieure à la température de la plaque d'aluminium T_1 . On va vérifier l'hypothèse de l'isolation de deux substrats de cuivre en effectuant un test sur l'échantillon présenté dans la figure 5.5.

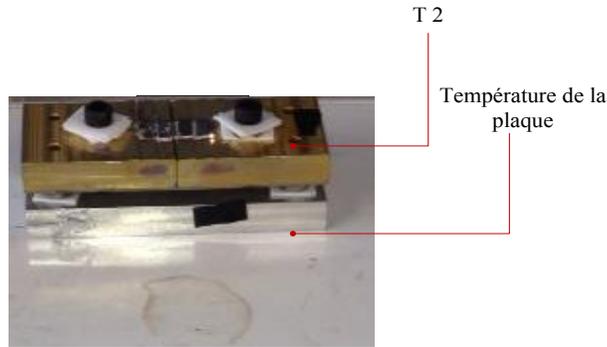


Figure 5.5 Échantillon pour le test #3

Cette hypothèse est validée en comparant les températures mesurées du cuivre et de la plaque chauffante. La figure 5.5 trace la variation de la température de la plaque de cuivre en fonction de température de la plaque chauffante.

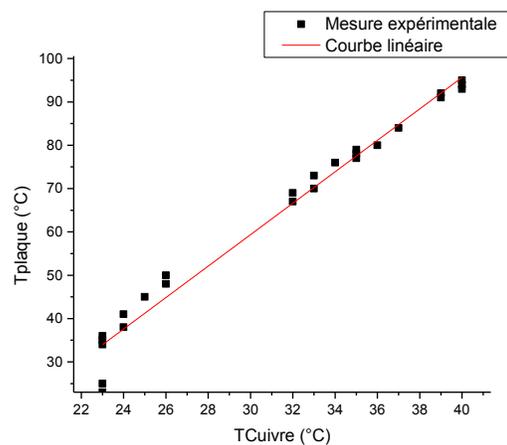


Figure 5.6 Variation de la température de cuivre en fonction de la température de la plaque

On remarque que c'est une courbe linéaire, par la suite on peut extraire l'équation de cette courbe par la méthode de régression linéaire. On obtient :

$$T_{\text{surface de la plaque}} = 3.63 \times T_{\text{cuivre}} - 49 \quad (5.11)$$

Vu la résistance thermique élevée, la température au point #1 de mesure qui est sur la plaque de cuivre doit être toujours très faible devant la température de la plaque chauffante. Par la suite, l'hypothèse de l'isolation de deux substrats de cuivre est validée.

5.3 Procédure de préparation des échantillons

La procédure de préparation des échantillons décrite dans la section précédente est divisée en trois parties. Premièrement, l'élaboration d'une méthode d'étalement d'une couche uniforme d'époxy. Deuxièmement, le nettoyage des puces solaires des impuretés avant le collage. Finalement, collage des puces sur les substrats de cuivre et application de cycle thermique pour la cuisson d'époxy. Ces étapes sont décrites en détail dans les sections qui suivent.

5.3.1 Étalement d'époxy

La première phase de préparation des échantillons de trois tests est d'élaborer une méthode précise, pour étaler une couche d'époxy uniformément réparti entre les puces solaires et le substrat en cuivre. Par la suite, le but est d'avoir un minimum des défauts, notamment des vides, afin de diminuer la résistance thermique de ces couches.

Méthodologie :

On a développé deux méthodes qu'on va appliquer en utilisant des lamelles de verre pour que l'état de collage final de chaque méthode soit visible.

Méthode #1

La première méthode suivie consiste à coller deux lamelles de verre pour qu'on puisse identifier la présence des défauts possibles. Elle est décrite par la figure suivante :

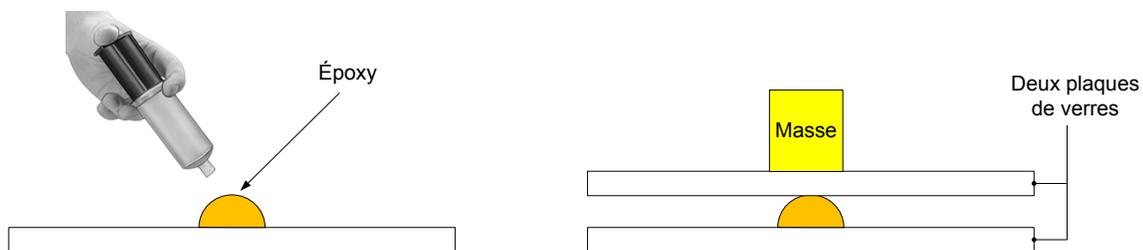


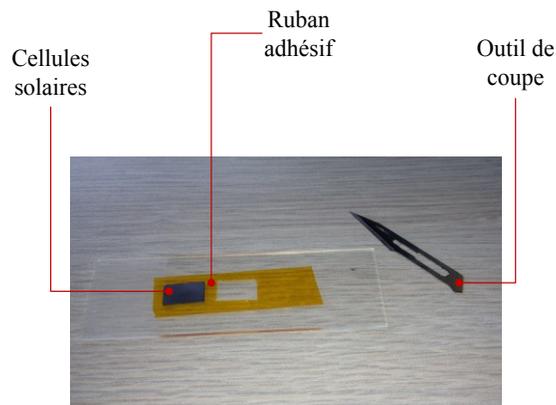
Figure 5.7 Procédure d'étalement d'une couche d'époxy avec une épaisseur uniforme

On tire plusieurs doses pour remplir la seringue de 50-60 ml avec l'époxy. Ensuite, plaçant une goutte d'époxy sur la surface de verre qui est équivalente à 0.1 ml sur lequel on met l'autre

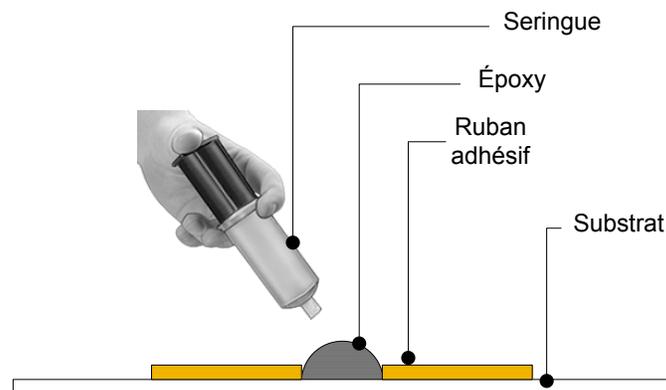
lamelle de verre et on applique une masse $M=96$ g. Après avoir atteint l'épaisseur voulue, on enlève la masse appliquée et laissant l'époxy se cuire à température ambiante. On aura ainsi une couche pleine avec un minimum de défauts, mais l'uniformité ne reste pas garantie. C'est la raison pour laquelle on a développé la méthode #2 décrite prochainement.

Méthode #2

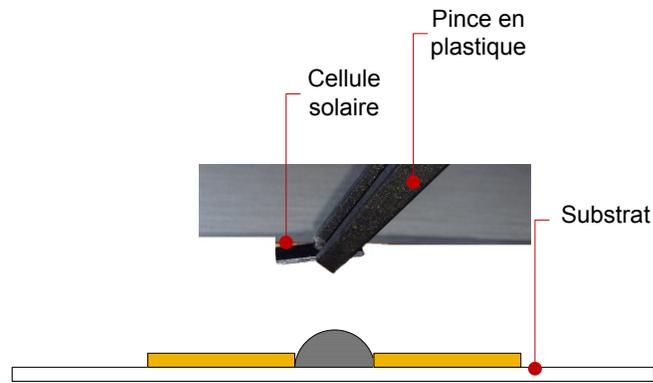
Pour s'assurer de l'uniformité de la couche d'époxy final, on a développé cette méthode sur des lamelles de verre, décrite par les étapes suivantes :



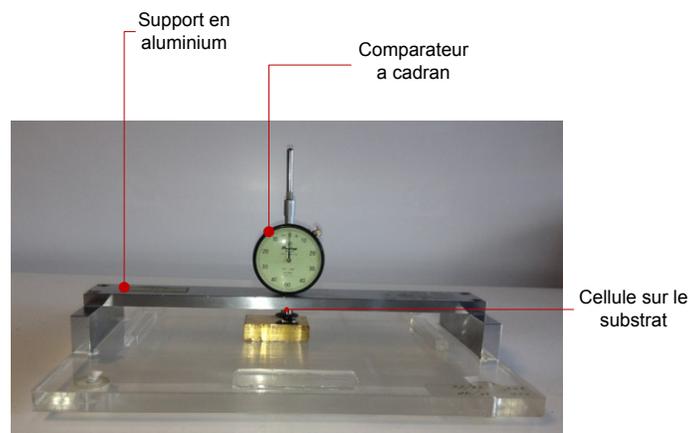
(a) Un ruban adhésif est collé sur la surface où seront collées les puces solaires. Ensuite, on enlève une partie du ruban qui a une surface inférieure à la surface d'une puce par un outil de coupe.



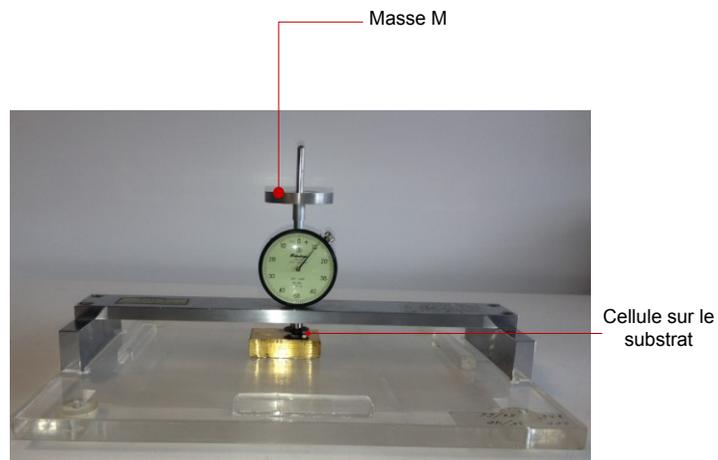
(b) Une goutte d'époxy est déposée sur la surface de verre qui est équivalente à 0.1 ml d'époxy par une seringue.



(c) Plaçant la puce au centre de la boule ronde d'époxy par une pince plastique.



(d) On met l'ensemble sur un comparateur à cadran, on place le palpeur au centre de la puce et on le calibre à zéro.



(e) Une masse M est placée sur le comparateur et on tire le déplacement de la puce avec le temps requis pour l'étalement.

Comparaison de deux méthodes :

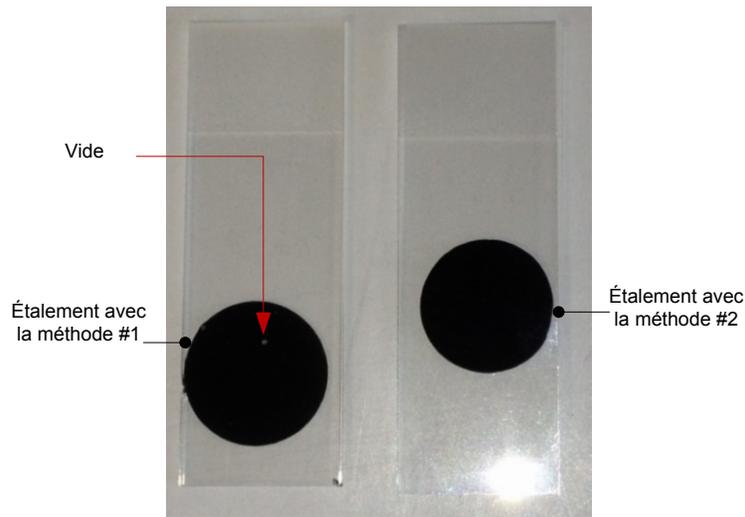


Figure 5.8 Comparaison de deux échantillons collés avec la méthode #1 et #2

La figure 5.8 montre qu'avec la méthode #2 on n'aura pas des défauts visibles, et on aura un étalement uniforme avec une épaisseur contrôlée. On obtient une couche d'époxy uniforme sur toute la surface de puce, avec une épaisseur de $110\ \mu\text{m}$ (figure 5.9). Cette méthode sera donc adaptée pour la préparation des échantillons de tests.

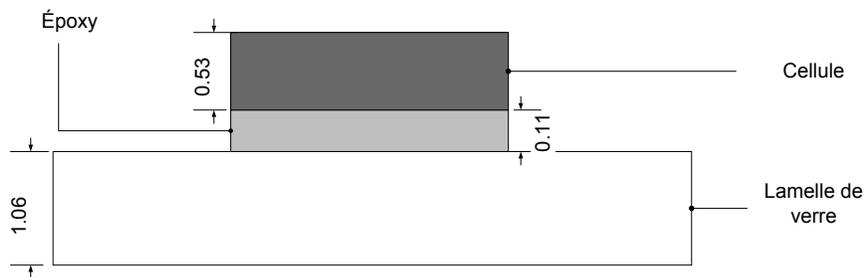


Figure 5.9 Résultat d'étalement d'époxy

5.3.2 Nettoyage des puces solaires des impuretés

Une gaufre de silicium est prise, et on l'a découpée en petits rectangles de dimensions 10.45×6.35 mm comme la montre la figure 5.10. Après découpage avec la scie, on a eu des impuretés à

l'interface entre l'autocollant et le silicium. Ils sont des petits grains de Si qui sont collés à la surface. Ils sont issus de la procédure après la procédure de séchage qui suit le découpage avec la scie.

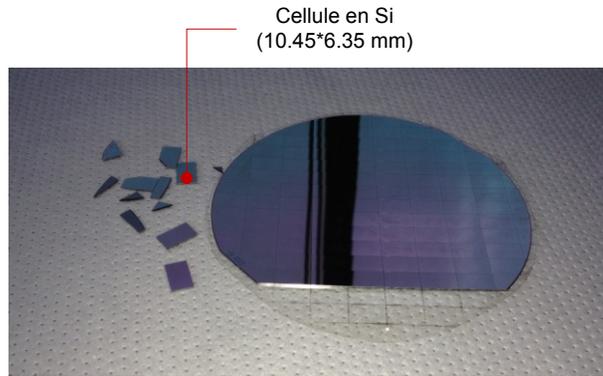


Figure 5.10 Gaufre de Silicium coupée en morceaux

Pour nettoyer les puces de ses impuretés, on va utiliser un bain ultrason (figure 5.10), et on va suivre la démarche suivante :



Figure 5.11 Nettoyage des puces solaire

On met les puces solaires dans un b cher, et on ajoute l'isopropanol. On met le b cher dans le bain ultrason pendant 5 minutes. On répète cette étape en utilisant l'acétone est l'eau respectivement comme le montre la figure 5.12.

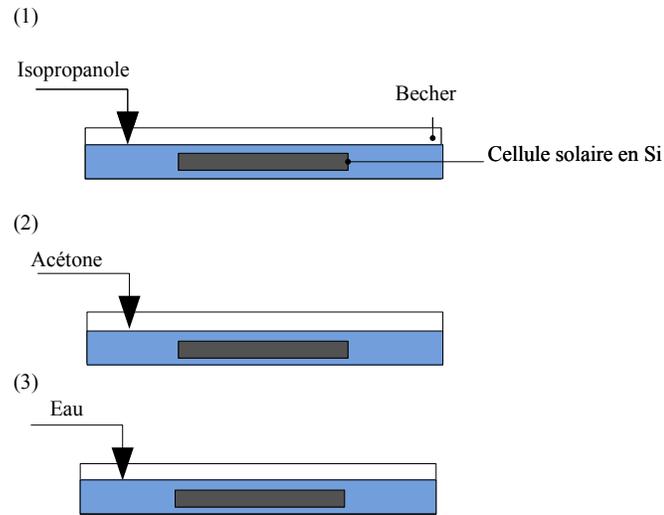


Figure 5.12 Procédure de nettoyage des puces solaire

Résultats de nettoyage

On peut voir l'état de chaque puce avant et après le nettoyage en utilisant un microscope optique ($\times 5$).

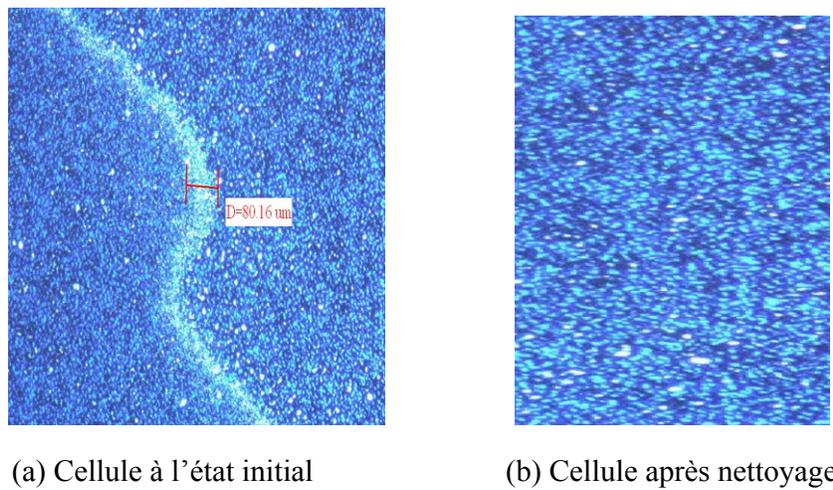


Figure 5.13 État d'une puce solaire avant et après le nettoyage

La figure 5.13 montre clairement que l'IPA et l'acétone ont attaqué les petites particules de Si (a). On aura ainsi des surfaces propres (b) et prêtes pour le collage d'époxy.

5.3.3 Cuisson d'époxy et préparation des échantillons

Après avoir nettoyé les puces solaires et les collées sur les substrats de cuivre en utilisant l'époxy EK1000, on a mis ces échantillons dans le four afin de cuire l'époxy. On programme ce four pour faire le cycle thermique décrit par la figure 5.14.

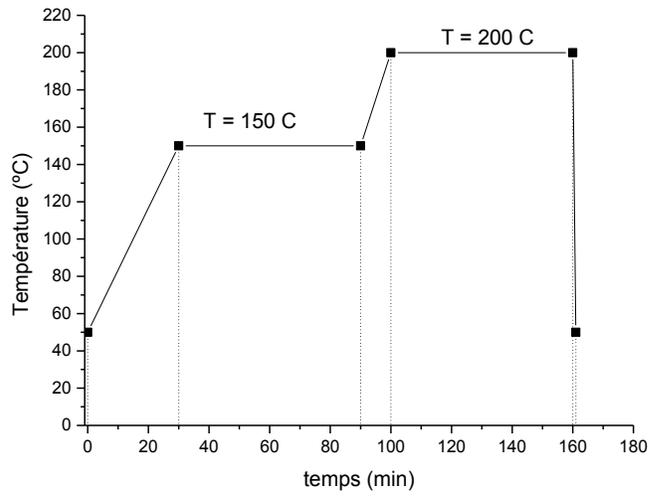


Figure 5.14 Cycle thermique pour faire cuire l'époxy EK1000

Ce cycle est inscrit parmi les propriétés de l'époxy (annexe D). On effectue une cuisson de 150°C et 200 °C pendant 1h chacun.

5.4 Plan d'observation des comportements : Résultats et interprétations

5.4.1 Correction de l'afficheur de la plaque chauffante

Ce test, présenté par la figure 5.15, a pour but de tracer la variation de température du bloc de cuivre (échantillon pour les tests #1 et #2) en fonction de la température de la plaque chauffante.

Ainsi, on aura la différence de température $\Delta T = T_{\text{plaque}} - T_{\text{cuivre}\#1}$.



Figure 5.15 Montage de mesure de la variation de température de la plaque chauffante et du bloc de cuivre

La figure 5.16 présente la courbe de variation de la température. On remarque que c'est une courbe linéaire, par la suite on peut extraire l'équation de cette courbe par la méthode de régression linéaire. On obtient :

$$T_{\text{échantillon \#1}} = 0.78 \times T_{\text{affichée}} - 14 \quad (5.13)$$

Par la suite, on va utiliser la température affichée par le thermocouple dans tous les tests qui suit appliquée sur l'échantillon #1.

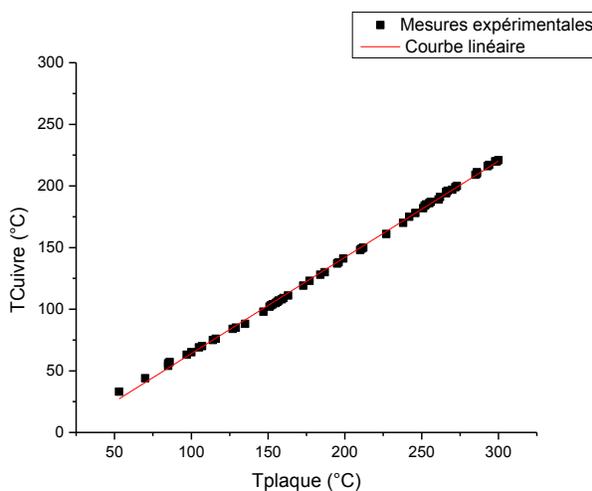


Figure 5.16 Variation de la température de la plaque en fonction de température de cuivre

5.4.2 Résultats

Résultats des tests #1 et #2

Après avoir effectué les tests #1 et #2, on a remarqué qu'à $T_{\text{plaque}} \in [300 \text{ °C}, 450 \text{ °C}]$, il y a rupture de la liaison entre l'époxy et la puce, comme le montre la figure suivante :

Zone de décollage d'époxy

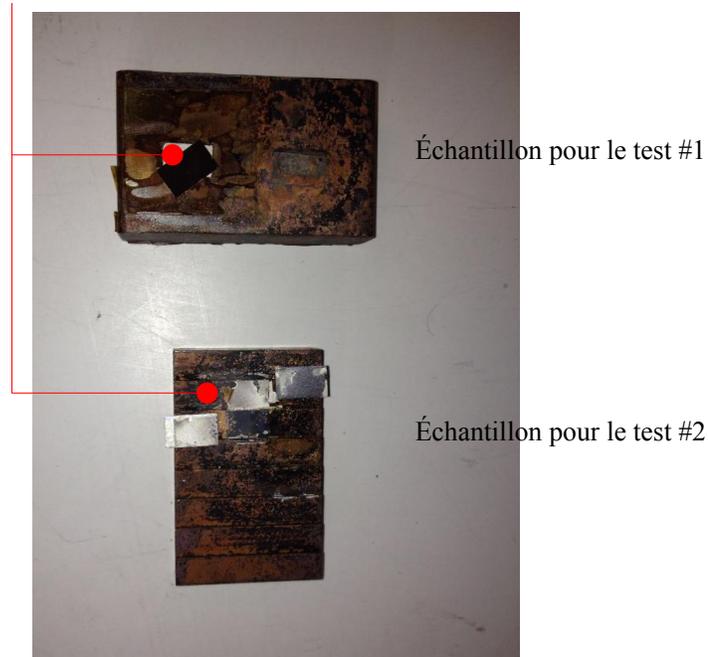


Figure 5.17 Résultats des tests thermiques à $T \in [300 \text{ °C}, 450 \text{ °C}]$

L'idée est de diminuer la température graduellement pour voir la température limite maximale supportée par l'époxy des trois échantillons (#1, #2 et #3). Pour l'échantillon des tests #1 et #2, la température de la plaque chauffante est maintenue à 300 °C. C'est-à-dire, d'après l'équation 5.13, l'échantillon a une température de :

$$T_{\text{surface de la plaque}} = 0.78 \times T_{\text{affichée}} - 14 = 0.78 \times 300 - 14 = 220 \text{ °C} \quad (5.17)$$

La liaison d'époxy a résisté. Le calcul de la résistance thermique R_{th} est utile pour s'assurer que la couche d'époxy est bien uniforme et sans défauts. Pour cela, on a mis l'échantillon #1 sur la plaque chauffante et on a effectué les mesures suivantes:

Tableau 5.1 Mesure de la température sur l'échantillon de test #1

$T_{surface} [^{\circ}C]$	$T_{cellule\ 1} [^{\circ}C]$	$T_{cellule\ 2} [^{\circ}C]$
66	65	65
67	66	66
68	67	67
70	69	69

Vu que la température de surface est proche en tous point la température de la surface de deux puces solaires, on peut interpréter que la couche d'époxy est étalée uniformément et sans défauts majeurs.

Résultats de test #3

On installe deux thermocouples pour mesurer la température sur le substrat de cuivre et sur la plaque d'aluminium (Figure 5.). Afin de s'assurer d'avoir de bons résultats, ce test thermique est effectué trois fois sur trois échantillons de test #3. Ces répétitions permettent d'avoir une erreur de répétition. À chaque fois, on mesure l'écart Gap_{Exp} par une jauge d'épaisseur.



Figure 5.18 Mesures effectuées sur l'échantillon pour le test #3

Le tableau 5.2 illustre les mesures de la température à la surface de cuivre et sur le bloc d'aluminium ainsi que l'écart correspondant.

Tableau 5.2 Mesures de l'allongement de l'écart entre deux blocs de cuivre

$T_{\text{cuivre}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{aluminium}} [^{\circ}\text{C}]$	$\text{Gap}_{\text{Exp}} [\mu\text{m}]$		
		#1	#2	#3
23 ± 1	32	< 30	< 30	< 30
24 ± 1	44 ± 1	< 30	< 30	< 30
30 ± 1	56 ± 1	< 30	< 30	< 30
34 ± 1	71 ± 1	< 30	< 30	< 30
51 ± 2	113 ± 1	$\in [30,40]$	$\in [30,40]$	$\in [30,40]$
53 ± 1	137 ± 1	$\in [40,50]$	$\in [40,50]$	$\in [40,50]$
59 ± 1	146 ± 2	$\in [60,70]$	$\in [60,70]$	$\in [60,70]$
65 ± 2	166 ± 1	$\in [60,70]$	$\in [60,70]$	$\in [60,70]$
69 ± 2	176 ± 2	$\in [70,80]$	$\in [70,80]$	$\in [70,80]$
96 ± 1	187 ± 1	$\in [80,90]$	$\in [80,90]$	$\in [80,90]$
114 ± 2	207 ± 1	$\in [90,100]$	$\in [90,100]$	$\in [90,100]$
135 ± 2	232 ± 1	$\in [100,110]$	$\in [100,110]$	$\in [100,110]$

On a eu rupture de contact dans la dernière mesure. Donc, on peut conclure que l'écart limite supporté par l'époxy, pour les puces qui sont liées sur la surface qui sépare les unités du récepteur, est :

$$\Delta\text{Gap}_{\text{limite}} = \text{Gap}_{\text{Exp.limite}} - \text{Gap}_i = 70 \mu\text{m} \quad (5.18)$$

Résultats finals

D'après les tests thermiques faits, on peut conclure que la température maximale supportée par l'époxy qui est 230 °C (Figure 5.19).

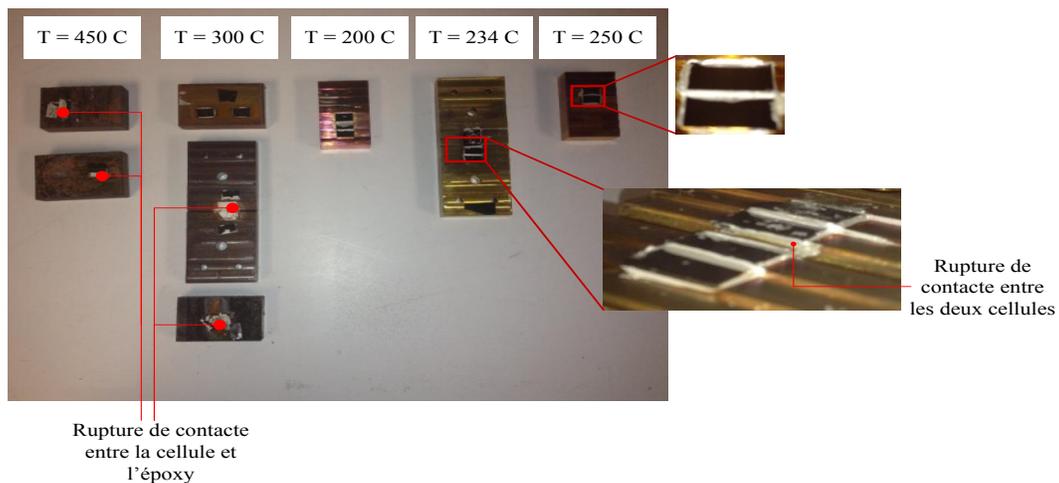


Figure 5.19 Résultats des tests thermiques sur les échantillons

Prenant un coefficient de sécurité qui est égal à $k = 1.5$, la valeur de la température maximale permise pour que l'époxy EK1000 soit dans la zone sécuritaire est $T_{lim} = 153$ °C. Conséquemment, la déformation maximale supportée par l'époxy est :

$$\varepsilon_{max} = \Delta T \cdot \Delta \alpha = (T_{max} - T_{amb})(\alpha_{Cu} - \alpha_{Si}) = 12.5 \cdot 10^{-6}(153 - 23) = 0.167\% \quad (5.19)$$

Or, la déformation maximale qui serait subite par l'époxy en opération peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\varepsilon_{\text{époxy}} = \Delta T \cdot \Delta \alpha = (T_{max} - T_{amb})(\alpha_{\text{électrode-eff}} - \alpha_{Ge}) = 0.4 \cdot 10^{-6} \times 120 = 0.0048\% \quad (5.20)$$

Donc, la déformation maximale permise est supérieure à la déformation maximale réelle que l'époxy peut avoir. D'où la validation de l'utilisation de l'époxy dans la conception proposée. Aussi, avec les essais répétitifs sur les échantillons de test #3, on peut conclure à l'intervalle de l'écart limite à partir duquel l'époxy entre dans la zone risquée de rupture qui est :

$$\Delta \text{Gap}_{\text{limite}} \in \left[\frac{70}{1.5}, \frac{80}{1.5} \right] = [46 \mu\text{m}, 53 \mu\text{m}] \quad (5.21)$$

5.4.3 Interprétations

Après avoir répété les tests sur plusieurs échantillons pour les trois tests #1, #2 et #3, les observations suivantes ont été réalisées:

- La déformation maximale supportée par l'époxy est $\varepsilon_{max} = 0.167\%$ qui est supérieure à la déformation maximale que l'époxy en opération peut avoir
- Pour les échantillons du test #3, l'écart limite à partir de laquelle l'époxy entre dans la zone risquée de rupture qui est $\Delta \text{Gap}_{\text{limite}} \in [\mp 46 \mu\text{m}, \mp 53 \mu\text{m}]$

D'où la validation de l'utilisation de l'époxy conducteur électrique EK1000 dans la conception du récepteur.

5.5 Conclusion

Après avoir validé l'utilisation de l'époxy EK1000 et défini ses limites d'utilisation, on peut estimer la marge de l'allongement de l'époxy. Ce dernier peut s'écrire comme suit:

$$\varepsilon_{\text{marge}} = \varepsilon_{\text{max}} - \varepsilon_{\text{époxy}} = \mathbf{0,162\%} \quad (5.22)$$

Cette marge est disponible pour accommoder soit la fatigue thermique que le système subit au cours de l'opération ou la variation de la température spatiale qu'on a négligée dans l'étude de la courbure du récepteur. C'est-à-dire, cette marge d'allongement important peut compenser certains allongements thermiques dus aux conditions réelles non prises en comptes dans l'approche analytique comme la variation de la température spatiale $\Delta T_{\text{spatial}}$ entre les couches. Donc, on peut valider la fiabilité des liaisons électriques et du collage des cellules sur les substrats qui sont assurés pas l'époxy EK1000. En plus, la température limite est très supérieure à la température maximale qui va atteindre le récepteur. Donc, on va rester toujours dans une zone sécuritaire. Conséquemment, on a **validé** la conception du récepteur qui doit être fonctionnel et fiable sous chargement thermomécanique réel.

6 CONCLUSION GÉNÉRALE

Sommaire

Ce travail a porté sur une étude du comportement thermomécanique d'un récepteur du système photovoltaïque concentré qui sera installé à l'Université de Sherbrooke. En premier lieu, une étude thermomécanique analytique sur la structure multicouche a été faite. Deux configurations géométriques de ces structures sont analysées. Celle de fabrication où les moments de flexion sont négligés, et la configuration de l'état du récepteur en application. Pour chaque configuration, le modèle analytique est simulé à l'aide du logiciel *MatLab*® qui calcule les contraintes induites dans les différentes couches, le coefficient d'expansion thermique effectif de la structure et le rayon de courbure finale lorsque la structure multicouche subit un chargement thermique ΔT . D'abord, on a montré que la déflexion est très faible pour une structure multicouche conçue pour le récepteur étudié. Ensuite, pour effectuer le calcul analytique et numérique sur le récepteur y compris son échangeur avec ses microcanaux, il a fallu modéliser ce dernier par un volume plein. Or, la forme des microcanaux usinés dans une couche influe sur le coefficient d'expansion thermique effectif final de la structure multicouche. Conséquemment, on a développé une méthode de calcul de cette épaisseur pour corriger l'épaisseur massique normale et obtenir ainsi l'épaisseur effective de la structure en considérant la présence des zones usinées dans les couches. On a défini un facteur de correction k en fonction des facteurs de forme des géométries usinées comme les ailettes ou les canaux rectangulaires.

En deuxième lieu, l'étude expérimentale sur des échantillons du récepteur a montré les limites de la résistance des liaisons électriques et du collage entre les cellules et le substrat assurés par l'époxy. La température critique obtenue est supérieure à la température maximale qu'on peut atteindre dans le récepteur qui est 150 C, ainsi la conception du récepteur est validée. Ceci va permettre de commencer les tests expérimentaux sur le récepteur en opération, et contrôler toujours les paramètres de fonctionnement comme la température et la courbure.

Contributions

Le travail présenté dans ce projet a contribué, premièrement, à l'élaboration d'un programme *Matlab*® qui calcule les contraintes induites et le rayon de courbure des structures multicouches.

Deuxièmement, l'approche numérique utilisée a permis de définir un facteur de correction pour déterminer les épaisseurs effectives des couches usinées en fonction des facteurs de formes géométriques. Conséquemment, les chercheurs peuvent utiliser ces graphiques pour prédire la déformation et la courbure d'assemblage multicouche avec des géométries usinées rectangulaires, telles que des canaux ou des ailettes. De plus, l'étude numérique a permis de fixer le critère principal de choix des époxy qui seront utilisées dans le récepteur. Ces époxy doivent avoir deux coefficients thermiques proches pour limiter les contraintes induites.

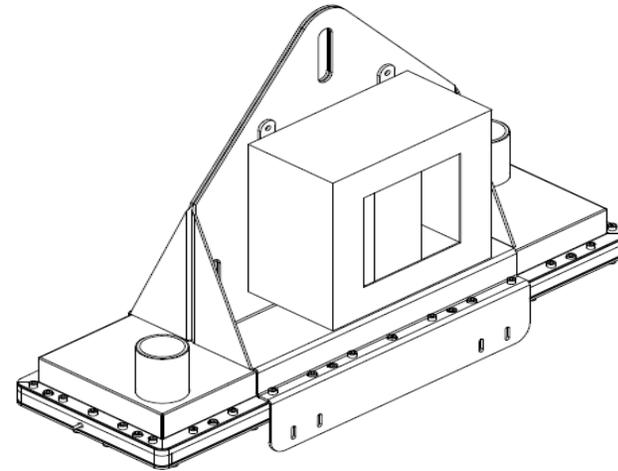
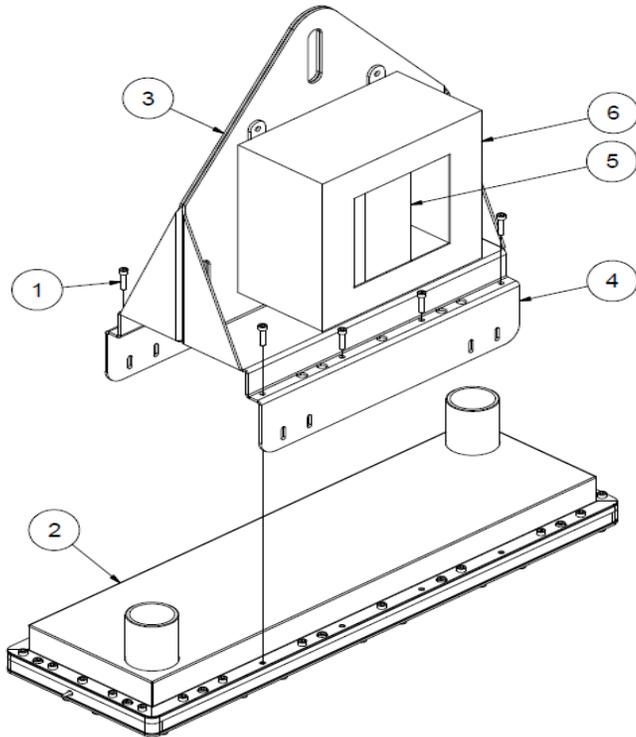
Au niveau expérimental, la réussite d'étalement d'une couche mince et uniforme d'époxy a permis de définir une méthode d'étalement qui peut être bénéfique pour les chercheurs. Aussi, les tests thermiques ont permis d'avoir la température critique pour le récepteur et valider conséquemment la conception adoptée. Cette contribution est intéressante, vu que cette confirmation déduit le risque de passer aux tests de mesures expérimentales sur le récepteur en application.

Perspectives

Le présent travail peut être approfondi et amélioré. Les éléments qui pourraient être ajoutés sont :

- Prendre en compte la variation de température entre les différentes couches du récepteur. Cette variation est relative à la géométrie de l'échangeur de chaleur et au transfert de chaleur par conduction et convection.
- Élaborer une méthode pour calculer les contraintes induites dans une structure multicouche à la fin de la procédure l'assemblage par thermocompression, en considérant la déformation plastique des matériaux. Prendre en compte aussi la variation des propriétés des matériaux, comme la limite élastique, en fonction de la température.
- Les graphiques de variation du coefficient de correction pour l'épaisseur effective définis dans cette étude sont applicables pour les volumes rectangulaires. Afin d'élargir cette plage d'application, une étude paramétrique en considérant d'autres géométries pourrait être menée.
- Utiliser le microscope acoustique pour caractériser le soudage entre les différentes couches du récepteur pour identifier s'il y a des défauts à l'interface de collage.

ANNEXE A : Conception du récepteur



Item	Part Number	Title	Qty	Description	Rev
6	R-SW800-SS40-0171	EXM Nema 4-12 Enclosure	1	EXM P/N 5412ESCHW080804	00
5	R-SW800-SS40-0165	DAQ	1	4 Slots DAQ	00
4	R-SW800-SS40-0118	Receiver Support Bracket	1		00
3	R-SW800-SS40-0114	Receiver Support Assembly	1		00
2	R-SW800-SS40-0112	Gen II DRA Assembly	1		00
1	ANSI B18.3 - No. 10 - 24 UNC - 7/8 HS HCS	Hexagon Socket Head Cap Screw	8		

Approximate Weight:	N/A
Designed by:	Richard Norman
Drawn by:	Philippe Dauphin
Date Modified:	2013-10-16
Approved by:	
Date:	
Status:	Work in Progress
Page:	1 of 2
Scale:	1:4
All dimensions are in inches unless otherwise specified	
<p>©2013 Gestion TechnoCap Inc. Proprietary Warning: The information contained herein is proprietary to Gestion TechnoCap Inc. and may not be used, reproduced or disclosed to others except as specifically permitted in writing by Gestion TechnoCap Inc. The recipient of this document, by its retention and use, agrees to protect the same and the information contained therein from loss, theft or compromise.</p>	

Title: Receiver and Support Assembly	Project/Model: R-SW800-SS40	Part Number: R-SW800-SS40-0023	Rev: 00	B
--------------------------------------	-----------------------------	--------------------------------	---------	---

ANNEXE B-1 Script *Matlab*® pour le calcul analytique

Script MatLab® #1 Calculer la déformation d'une structure bilame

```
% initialisation

clc
clear all;
close all;
format long
%N3 = courbell(200*10e-6,200*10e-6,2*10e-6,3*10e-6)
%N1 = courbeanal(20,20,5,5,17,4);
N8 = courbeanal10(17,4,5,5);
%N7 = courbeanal100(17,4);
%N1 = courbeanal(20,20,5,5,17,4);
%loglog(N1(2,:),N1(1:,:),'r*','Linewidth',3);hold on
loglog(N8(2,:),N8(1:),'b-','Linewidth',2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function N8 = courbeanal10(alpha1,alpha2,e1,e2)

J= e1/e2;
ind=1;
    for L=0:0.1:100
        alphaeffanal=(alpha1*(10^-6))+(((alpha2-alpha1)*(10^-
6)))/(1+(L*J));
        K8(ind)=alphaeffanal;
        G8(ind)=L;
        ind=ind+1;
    end

N8=[K8;G8];
Return

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

Script MatLab® #2 Calculer la déformation d'une structure

```
multicouche : durant la fabrication

clc
clear all;
close all;
format long;
%%
deltaT=150;
n = input('Entrer le nombre des couches: ');
```

```

for i=1:n
    e(i)=input('l''épaisseur est : ');
    E(i)=input('le module de rigidité est : ');
    alpha(i)=input('le coefficient d''expansion est : ');
end

%%
b(1,1)=0;
%%%%%%%%%%%%remplissage de A
for i=1:n
    if mod(i,2)==0
        A(1,i)=e(i);
    else
        A(1,i)=e(i);
    end
    %%%%%%%%%%%%%remplissage de B
for j=2:n
    b(j,1)=alpha(j)-alpha(j-1);
    if i==j
        A(j,i)=(-1/E(i));
        A(j,i-1)=1/E(i-1);
    else
        A(j,i)=0;
    end
end
end
end
%%

for i=1:n
    for j=1:n
M(i,j)=A(i,j)
B(i)=b(i,1)*deltaT
    end
end

%%%%%%%%%%%%% Calcul des contraintes normale au couches
u=M \ B'

%%%%%%%%% Calcul de la contrainte de cisaillement interfaciale

for i=1:n-1
L(i)=(u(i)*e(i))/60;
end
L

%%%%%%%%% Calcul de la coefficient d'expansion thermique effective du
multicouches

alphaeff=alpha(1)+(u(1))/(deltaT*E(1))

```

Script MatLab® #3

Calculer de déformation d'une structure multicouche qui subit un chargement thermique: Récepteur au cours de l'opération

```
clc
clear all;
close all;
format long;

%b=60;%%%largeur du substrat en mm

deltaT=50; % différence de la température appliqué

n = input('Entrer le nombre des couches: ');

for i=1:n
    d(i)=input('l''épaisseur est : '); % en mm
    E(i)=input('le module de rigidité est : ');% en MPa
    alpha(i)=input('le coefficient d''expansion est : ');
    Mu(i)=input('le coefficient de poisson est : ');
end

%remplissage du matrice A

%%% 1er ligne
for i=1:n
    A(1,i)=1;
end
A(1,n+1)=0;

%%%2ieme ligne
A(2,1)=d(1)/2;
for i=2:n
    S1=0;
    for j=1:i-1
        xxx=d(j);
        S1=S1+xxx;
    end
    A(2,i)=S1+(d(i)/2);
end
A(2,n+1)=0;
for i=1:n
    sum=(E(i)/(1-Mu(i)))*(d(i)^3/12);
    A(2,n+1)=A(2,n+1)+sum;
end

b(1,1)=0;
b(2,1)=0;

%%%remplissage de b
i=1
for j=3:n+1
    b(j,1)=alpha(i+1)-alpha(i);
```

```

        i=i+1;
    end

    %%% Suite du matrice A
    for i=3:n+1
        for j=1:n+1
            A(i,j)=0;
        end
    end
    for j=3:n+1
        for i=1:j
            if i==j
                A(j,i-1)=(-1/(d(i-1)*E(i-1)))*(1-Mu(i-1));
                A(j,i-2)=(1/(d(i-2)*E(i-2)))*(1-Mu(i-2));
            else
                A(j,i)=0;
            end
        end
        A(j,n+1)=(d(i-2)-d(i-1))/2;
    end
    for i=1:n+1
        for j=1:n+1
            M(i,j)=A(i,j);
            B(i)=b(i,1)*deltaT;
        end
    end

    %%% Résultats des forces
    u=M \B'
    x(1)=d(1)/2;
    for i=2:n
        S2=0;
        for j=1:i-1
            xx=d(j);
            S2=S2+xx;
        end
        x(i)=S2+(d(i)/2);
    end

    %%% Contraintes induite

    for i=1:n
        S(i)=(u(i)/d(i))+(E(i)*x(i)*u(n+1));
    end

```

ANNEXE B-2 Calcul analytique de rayon de courbure pour un bilame

L'étude qui suit contient une méthode de calcul de rayon de courbure d'une bande bimétallique soumise à un chauffage uniforme. Soit un bilame constitué de deux matériaux différents (Figure B-2.1).

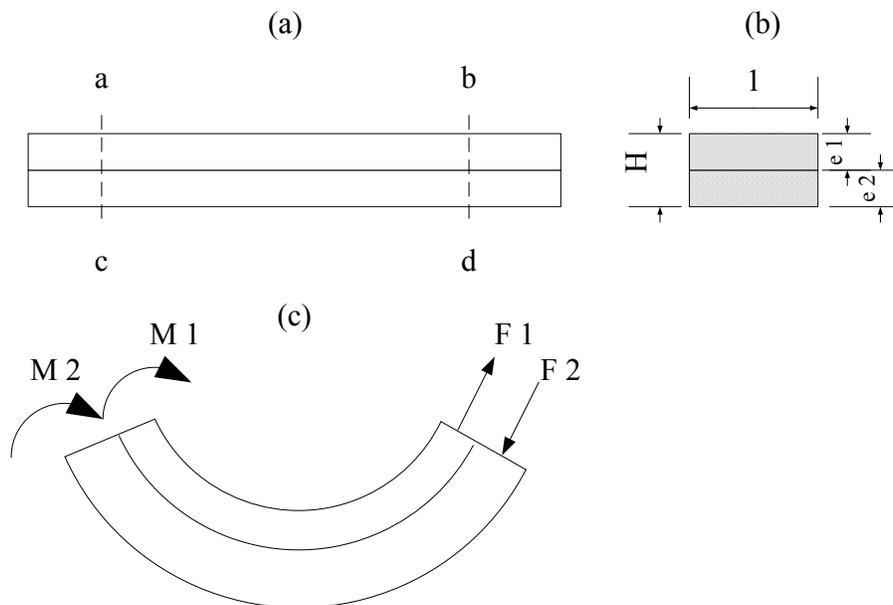


Figure B-2.1 Déformation d'un bilame suite à un chargement thermique ΔT

L'équilibre des forces donne :

$$F_1 = F_2 = F \quad (1)$$

Prenant ρ = rayon de courbure de la structure bilame, $E_1 I_1$ = la rigidité en flexion du métal (1), $E_2 I_2$ = la rigidité en flexion du métal (2), donc,

$$M_1 = \frac{E_1 I_1}{\rho} \quad \text{et} \quad M_2 = \frac{E_2 I_2}{\rho} \quad (2)$$

L'équilibre des moments peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{Fh}{2} = M_1 + M_2 \quad (3)$$

En substituant (2) dans (3), on obtient :

$$\frac{Fh}{2} = \frac{E_1 I_1 + E_2 I_2}{\rho} \quad (4)$$

En utilisant (1) et (4) on obtient,

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\Delta\alpha\Delta T}{\frac{h}{2} + \frac{2(E_1 I_1 + E_2 I_2)}{h} \cdot \left(\frac{1}{E_1 e_1} + \frac{1}{E_2 e_2}\right)}$$

Posant, $m = \frac{e_1}{e_2}$ et $n = \frac{E_1}{E_2}$. Sachant que $I_1 = \frac{e_1^3}{12}$ et $I_2 = \frac{e_2^3}{12}$, donc,

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\Delta\alpha\Delta T}{h \times \left[\frac{1}{2} + \frac{2(E_1 I_1 + E_2 I_2)}{h^2} \cdot \left(\frac{1}{E_1 e_1} + \frac{1}{E_2 e_2}\right) \right]}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\Delta\alpha\Delta T}{h \times \left[\frac{1}{2} + \frac{2}{h^2} \left(E_1 \frac{e_1^3}{12} + E_2 \frac{e_2^3}{12} \right) \cdot \left(\frac{1}{E_1 e_1} + \frac{1}{E_2 e_2}\right) \right]}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\Delta\alpha\Delta T}{h \times \left[\frac{1}{2} + \frac{2}{h^2} \left(\frac{e_1^2}{12} + n \times m \times \frac{e_1^2}{12} + \frac{1}{n \times m} \frac{e_2^2}{12} + \frac{e_2^2}{12} \right) \right]}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{6\Delta\alpha\Delta T}{h \times \left[\frac{6}{2} + \frac{12}{h^2} \left(\frac{e_1^2}{12} + n \times m \times \frac{e_1^2}{12} + \frac{1}{n \times m} \frac{e_2^2}{12} + \frac{e_2^2}{12} \right) \right]}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{6\Delta\alpha\Delta T}{h \times \left[3 + \frac{1}{h^2} \left(e_1^2 + n \times m \times e_1^2 + \frac{1}{n \times m} e_2^2 + e_2^2 \right) \right]}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{6\Delta\alpha\Delta T}{h \times \left[3 + \frac{1}{\left(\frac{e_2}{e_2}\right)^2 (e_1 + e_2)^2} \left(e_1^2 + n \times m \times e_1^2 + \frac{1}{n \times m} e_2^2 + e_2^2 \right) \right]}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{6\Delta\alpha\Delta T}{h \times \left[3 + \frac{1}{e_2^2 (m+1)^2} \left(e_1^2 + n \times m \times e_1^2 + \frac{1}{n \times m} e_2^2 + e_2^2 \right) \right]}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{6\Delta\alpha\Delta T}{h \times \left[3 + \frac{1}{(m+1)^2} \left(\frac{e_1^2}{e_2^2} + n \times m \times \frac{e_1^2}{e_2^2} + \frac{1}{n \times m} \frac{e_2^2}{e_2^2} + \frac{e_2^2}{e_2^2} \right) \right]}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{6\Delta\alpha\Delta T}{h \times \left[3 + \frac{1}{(m+1)^2} \left(m^2 + (n \times m) \times m^2 + \frac{1}{n \times m} + 1 \right) \right]}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{6\Delta\alpha\Delta T}{h \times \left[3 + \frac{1}{(m+1)^2} \left(m^2(1 + (n \times m)) + \left(\frac{1}{n \times m} + 1\right) \right) \right]}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{6\Delta\alpha\Delta T(m+1)^2}{h \times \left[3(m+1)^2 + \left(m^2(1+(nm)) + \left(\frac{1}{nm} + 1 \right) \right) \right]}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{6\Delta\alpha\Delta T(m+1)^2}{h \times \left[3(m+1)^2 + (1+(nm)) \left(m^2 + \frac{1}{nm} \right) \right]}$$

Par la suite, le rayon de courbure peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{6\Delta\alpha\Delta T(1+m)^2}{h(3(1+m)^2 + (1+mn)(m^2 + \frac{1}{mn}))}$$

Relation entre déflexion et courbure

Vu que la courbure est proportionnelle à la différence de l'allongement des métaux et inversement proportionnelle à l'épaisseur totale de la structure. On peut calculer la déflexion δ du bilame en utilisant l'expression de la courbure. On a ABC est un arc de cercle de rayon ρ (Figure B-2.2).

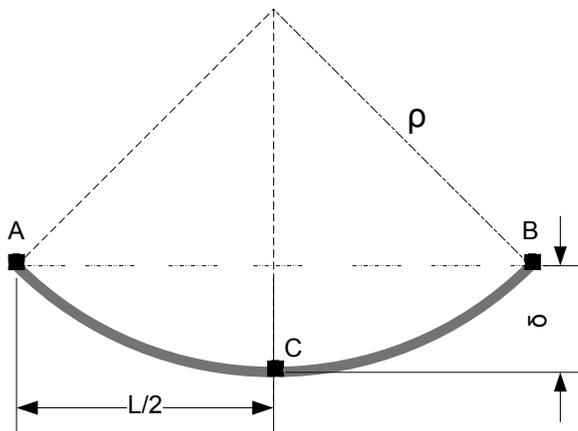


Figure B-2.3 Déflexion d'une bande

Par la suite,

$$\left(\frac{L}{2} \right)^2 + (\rho - \delta)^2 = \rho^2$$

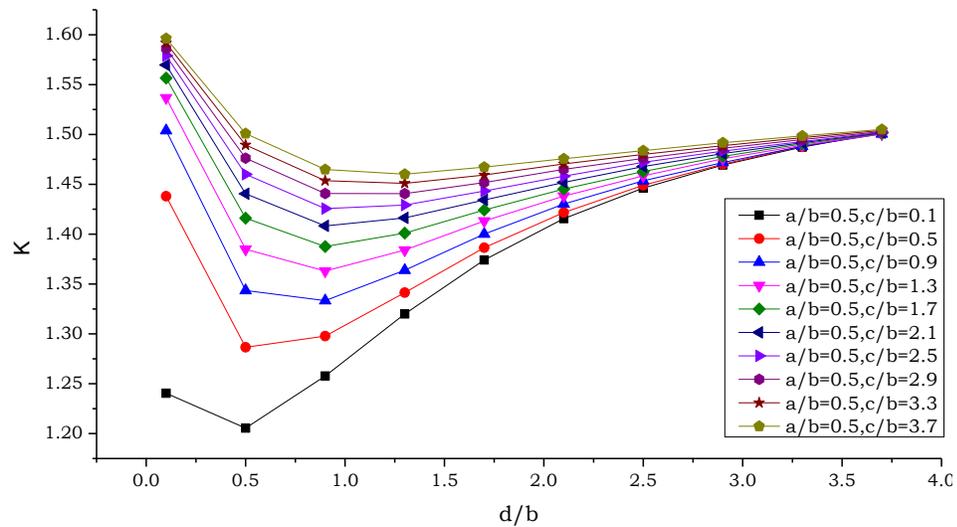
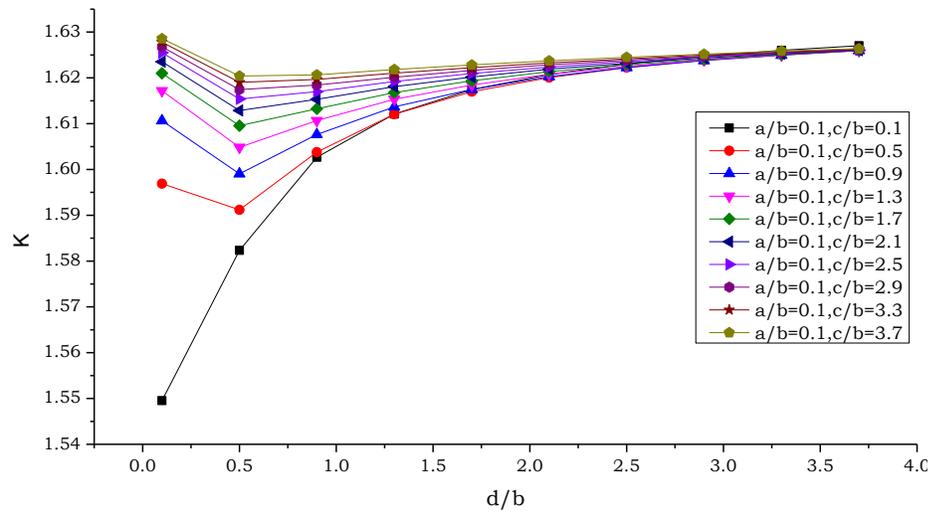
Or la déflexion δ est supposé très petite dans notre cas, par la suite (1) devient,

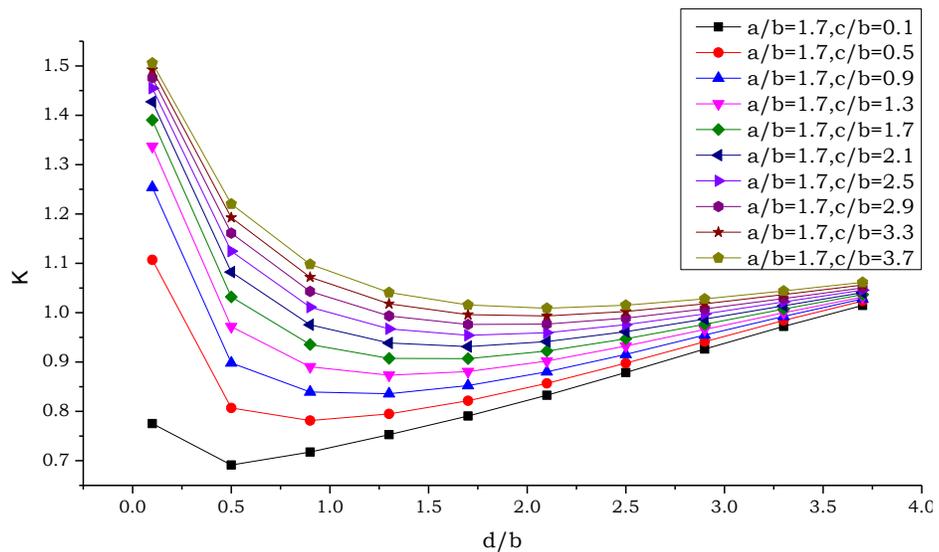
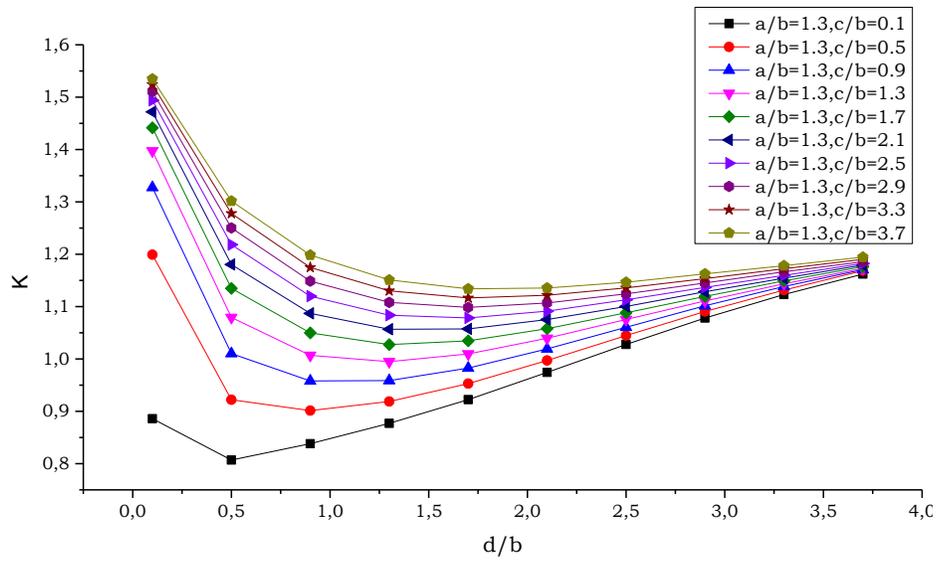
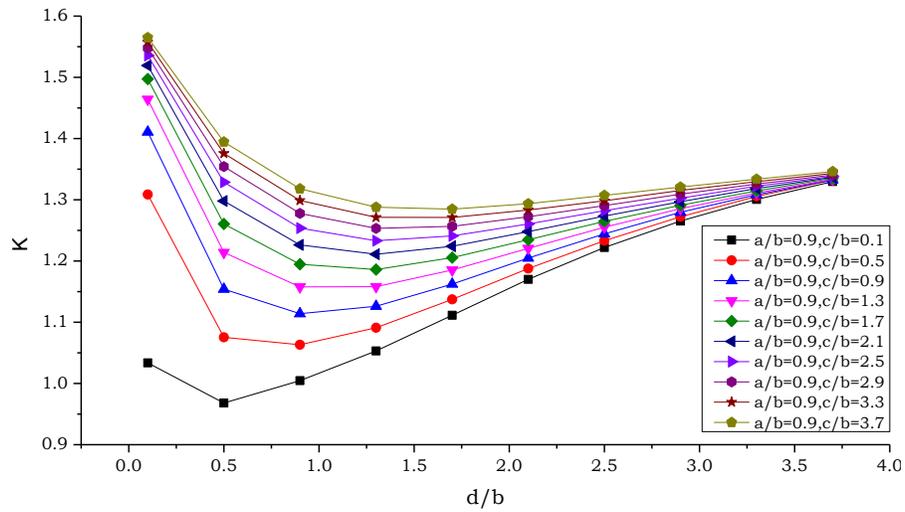
$$\left(\frac{L}{2} \right)^2 = 2 \rho \delta$$

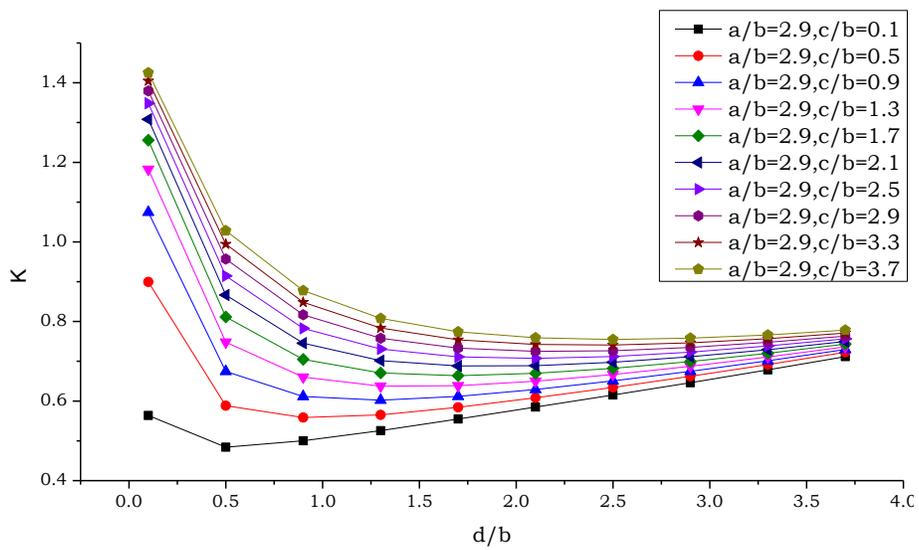
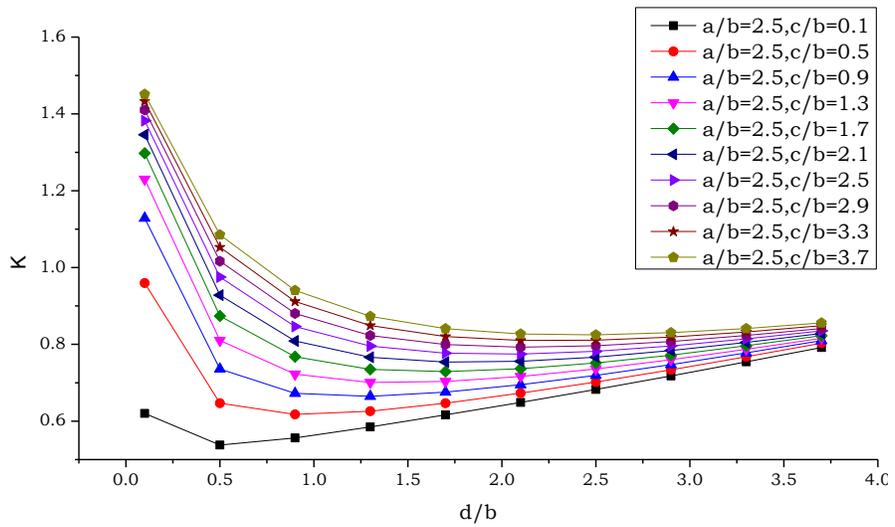
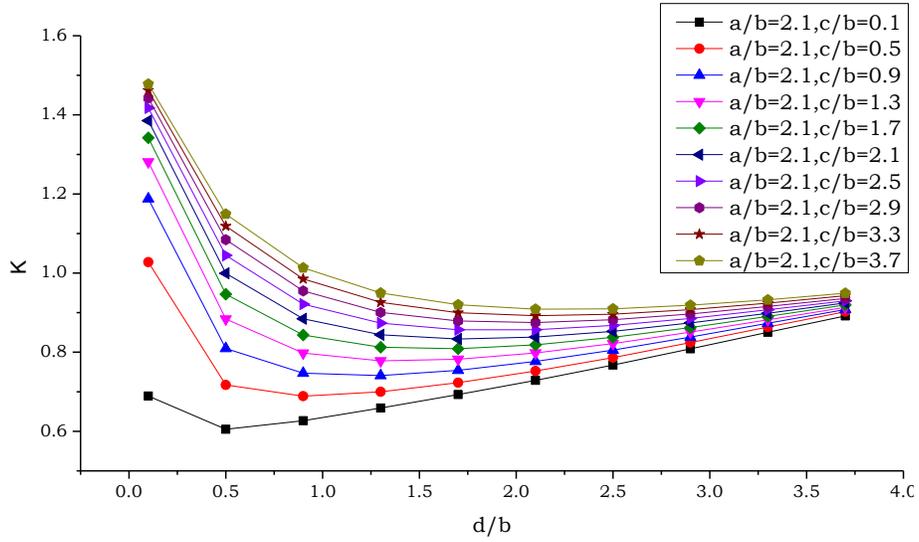
$$\frac{L^2}{8\rho} = \delta$$

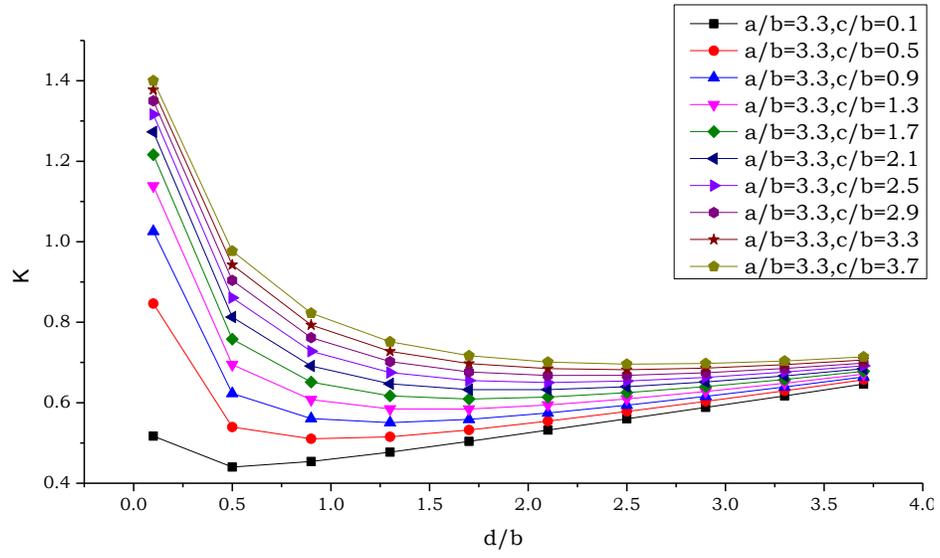
ANNEXE C : Variation du facteur k en fonction des facteurs de formes (a/b, c/b, d/b)

Dans le cas des conduites ou des ailettes rectangulaires, on peut se servir de ces graphiques pour avoir le facteur de correction de l'épaisseur effective adéquat pour la structure étudié. Les courbes suivantes représentent la variation de facteur de correction k en fonction des différentes combinaisons des facteurs de formes.









ANNEXE D : PROPRIÉTÉS DES ÉPOXY



EPO-TEK® EK1000

Technical Data Sheet
For Reference Only
High Conductivity Epoxy

Date: Nov 2013
Rev: VII
No. of Components: Single
Mix Ratio by Weight: N/A
Specific Gravity: 3.34
Pot Life: 2 Weeks Dry Time: ≤ 1 Day
Shelf Life: One year at -40°C

Recommended Cure: 150°C/1 Hour plus
200°C/1 Hour (post cure)

Minimum Alternative Cure(s):
may not achieve performance properties below
200°C / 30 Minutes

NOTE: Container(s) should be kept closed when not in use. Filled systems should be stirred thoroughly before mixing and prior to use.

Product Description: EPO-TEK® EK1000 is a silver-filled adhesive that exhibits exceptional thermal and electrical conductivity along with a shiny silver appearance designed for the demanding requirements of high power LED die attach applications. It is the single component version of EPO-TEK® EK2000.

Typical Properties:

To be used as a guide only, not as a specification. Different batches, conditions & applications yield differing results.
Cure condition: varies as required * denotes test on lot acceptance basis Data below is not guaranteed.

PHYSICAL PROPERTIES:			
* Color (before cure):	Silver		
* Consistency	Smooth thixotropic paste		
* Viscosity (23°C): @ 100 rpm	1,800 - 3,600 cPs		
Thixotropic Index:	3.6		
* Glass Transition Temp:	≥ 80 °C (Dynamic Cure:20-200°C/ISO 25 Min; Ramp -10-200°C @ 20°C/Min)		
Coefficient of Thermal Expansion (CTE):			
Below Tg:	38 x 10 ⁻⁶ in/in°C		
Above Tg:	94 x 10 ⁻⁶ in/in°C		
Shore D Hardness:	66		
Lap Shear @ 23°C:	1,010		
Die Shear @ 23°C initial:	≥ 10 Kg	3,400 psi	
Die Shear @ 23°C after 1000 hrs 85°C/85%R:	≥ 5 Kg	1,700 psi	
Degradation Temp:	357 °C		
Weight Loss:	@ 200°C	0.09 %	
	@ 250°C	0.94 %	
	@ 300°C	1.70 %	
OperatingTemp:	: Continuous:	- 55°C to 200°C	
	Intermittent:	- 55°C to 300°C	
Storage Modulus:	273,528 psi		
Ion Content:	Cl:	≤ 10 ppm	NA ⁺ : 2 ppm
	NH ₄ ⁺ :	6 ppm	K ⁺ : 0 ppm
* Particle Size:	≤ 45 microns		

ELECTRICAL AND THERMAL PROPERTIES:	
Thermal Conductivity (150°C/1 Hour):	12.6 W/mK
Thermal Conductivity (150°C/1 Hour+200°C/1 Hour):	26.3 W/mK
Thermal Conductivity (125°C/2.5 Hours+150°C/36 Minutes+200°C/15 Minutes):	35.5 W/mK
* Volume Resistivity @ 23°C:	≤ 0.00009 Ohm-cm

Epoxies and Adhesives for Demanding Applications™

This information is based on data and tests believed to be accurate. Epoxy Technology, Inc. makes no warranties (expressed or implied) as to its accuracy and assumes no liability in connection with any use of this product.

EPOXY TECHNOLOGY, INC.
14 FORTUNE DRIVE, BILLERICA, MA 01821 (978) 667-3805 FAX (978) 663-9782
www.epotek.com



AI TECHNOLOGY INC
 70 Washington Road
 Princeton Jct., NJ 08550
 (609) 799-9388 fax (609) 799-9308
 E-Mail: ait@aittechnology.com
 Internet: <http://www.aittechnology.com>

**PRIMA-BOND
 ME7159**

**Stress-Free, Ultra High
 Thermally Conductive
 Reworkable
 Epoxy Paste Adhesive**

IDEAL FOR:

- High Power Die Attach
- Substrate and Component
- Reworkability
- Mismatched CTE's

DESCRIPTION:

ME7159 is a reworkable, diamond filled, electrically insulating and thermally conductive epoxy paste adhesive. It exhibits outstanding flexibility for bonding materials with highly mismatched CTE's (i.e., alumina to aluminum, silicon to copper). The ultra high thermal conductivity of this diamond filled material makes it useful for bonding high-powered, large area die and components.

It can be readily reworked at 80-100°C.

AVAILABILITY:

ME7159 is available in syringes for automatic needle dispense applications or in jars. Both viscosity and thixotropic index can be modified to your specific needs.

APPLICATION PROCEDURES:

- (1) Thaw for 30 minutes before opening jar.
- (2) Dispense adhesive onto clean substrate.
- (3) Pre-bake dispensed adhesive at 60°C for 30 to 60 minutes to achieve optimum bonding. Pre-bake not needed in all applications.**
- (4) Cure according to one of the recommended schedules.

TYPICAL PROPERTIES*

Electrical Resistivity (150 °C/ 30 min)	>1x10 ¹⁴ ohm-cm
Dielectric Strength (Volts/mil)	>750
Glass Transition Temp.(°C)	-25
Current Carrying Capabilities	N/A
Lap-Shear Strength	1000 psi 6.9 N/mm ²
Device Push-off Strength	1800 psi 12.4 N/mm ²
Hardness (Type)	80 (A)
Cured Density (gm/cc)	2.3
Thermal Conductivity	80 Btu-in/hr-ft ² -°F 11.4 W/m-°C
Linear Thermal Expansion Coeff. (ppm°C)	120
Maximum Continuous Operation Temp. (°C)	150
Avg. Viscosity(0.5 rpm, 24°C) (Brookfield DV-1,spindle CP51)	310,000 cp

* Properties given are typical values and not intended for use in preparing specifications. The user is advised to evaluate the product in the manner the product is intended to be used in manufacturing and in the final product.

CURE SCHEDULES:

Temperature	Time
80°C	8 hr
100°C	4 hr
125°C	2 hr
150°C	30 min

** For higher temperature curing, above 125°C and/or bonding area of over 1cm x 1cm, it is recommended that the dispensed adhesive be pre-baked, open-faced without parts, at 60°C for 30 minutes before parts are mounted and cured.

SHELF LIFE:

Storage temperature	Shelf Life
-40°C	1 yr
0°C	3 mo
25°C	8 hr

The information contained herein is believed to be reliable. All recommendations or suggestions are made without guarantee inasmuch as conditions and methods of commercial use are beyond our control. Properties given are typical values and not intended for use in preparing specifications. The user is advised to evaluate the product in the manner the product is to be used in manufacturing and in the final product. Under no circumstance shall A.I. Technology be liable for accidental, consequential or other damages arising from the use or handling of this product.

While AI Technology owns all proprietary rights of material formulations of its products, specific usage in the manufacturing of certain products may involve patent of other companies.

PRODUCT DATA SHEET

REV. C @ 12/09/02



EPO-TEK[®] 930-4

Technical Data Sheet

For Reference Only
Thermally Conductive Epoxy

Number of Components:	<u>Two</u>	<u>Frozen Syringe</u>	Minimum Bond Line Cure Schedule*:	
Mix Ratio By Weight:	100:3.3		150°C	10 Minutes
Specific Gravity:		1.36	100°C	4 Hours
Part A	1.31		80°C	6 Hours
Part B	1.02			
Pot Life:	1 Day	6 Hours		
Shelf Life:	One year at 23°C	Six months at -40°C		

Note: Container(s) should be kept closed when not in use. For filled systems, mix contents of each container (A & B) thoroughly before mixing the two together. *Please see Applications Note available on our website.

Product Description:

EPO-TEK[®] 930-4 is a two component, thermally conductive epoxy, formulated with a very fine boron-nitride filler particle. Also available in a single component frozen syringe.

EPO-TEK[®] 930-4 Advantages & Application Notes:

- Recommended for applications where heat dissipation and insulating properties are essential; attaching heat sinks on PCB; heat-sinking in hybrids such as DIP or TO-cans; kovar, aluminum or ceramic packaging.
- Semiconductor applications: die-attach inside plastic IC packages using JEDEC format; die bonding power devices; thermally conductive underfill and glob top for flip-chip assembled die.
- Adhesion to ferrous and non-ferrous metals, ceramic, glass, semiconductor materials and most plastics is excellent.
- Designed for many production methods such as screen printing techniques, automated dispensing, pin transfer or manual applications by hand or spatula.
- Ease of use: long pot-life with low temperature cure of 80°C possible.
- Color change characteristic that indicates the epoxy has reached optimum cure - it goes from an off-white color to an amber color - depending on cure cycle and epoxy thickness.

Typical Properties: (To be used as a guide only, not as a specification. Data below is not guaranteed. Different batches, conditions and applications yield differing results; Cure condition: 150°C/1 hour; * denotes test on lot acceptance basis)

Physical Properties:	
*Color: Part A: Ivory Part B: Amber	Die Shear Strength @ 23°C: ≥ 15 Kg / 5,100 psi
*Consistency: Smooth paste	Degradation Temp. (TGA): 425°C
*Viscosity (@ 20 RPM/23°C): 12,000 – 17,000 cPs	Weight Loss:
Thixotropic Index: 2.4	@ 200°C: 0.10 %
*Glass Transition Temp.(Tg): ≥ 90°C (Dynamic Cure	@ 250°C: 0.33 %
20 - 200°C /ISO 25 Min; Ramp -10 - 200°C @ 20°C/Min)	@ 300°C: 0.73 %
Coefficient of Thermal Expansion (CTE):	Operating Temp:
Below Tg: 27 x 10 ⁻⁶ in/in/°C	Continuous: - 55°C to 200°C
Above Tg: 136 x 10 ⁻⁶ in/in/°C	Intermittent: - 55°C to 325°C
Shore D Hardness: 85	Storage Modulus @ 23°C: 607,651 psi
Lap Shear Strength @ 23°C: > 1,927 psi	*Particle Size: ≤ 20 Microns
Thermal Properties:	
Thermal Conductivity: 1.67 W/mK	
Electrical Properties:	
Dielectric Constant @ 23°C (1 KHz): 3.73	Volume Resistivity @ 23°C: ≥ 2 x 10 ¹³ Ohm-cm
Dissipation Factor @ 23°C (1KHz): 0.004	

EPOXY TECHNOLOGY, INC.
14 Fortune Drive, Billerica, MA 01821-3972 Phone: 978.667.3805 Fax: 978.663.9782
www.EPOTEK.com

Epoxyes and Adhesives for Demanding Applications™

This information is based on data and tests believed to be accurate. Epoxy Technology, Inc. makes no warranties (expressed or implied) as to its accuracy and assumes no liability in connection with any use of this product.

Rev. V
08/2008

ANNEXE E-1 DOSSIERS TECHNIQUES DES ÉCHANTILLONS DES TESTS EXPÉRIMENTAUX

Demande

Usinage de 25 pièces qui ont toutes la forme parallélépipédique suivante :

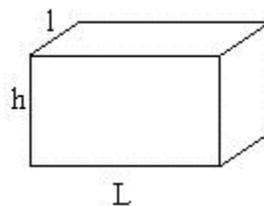
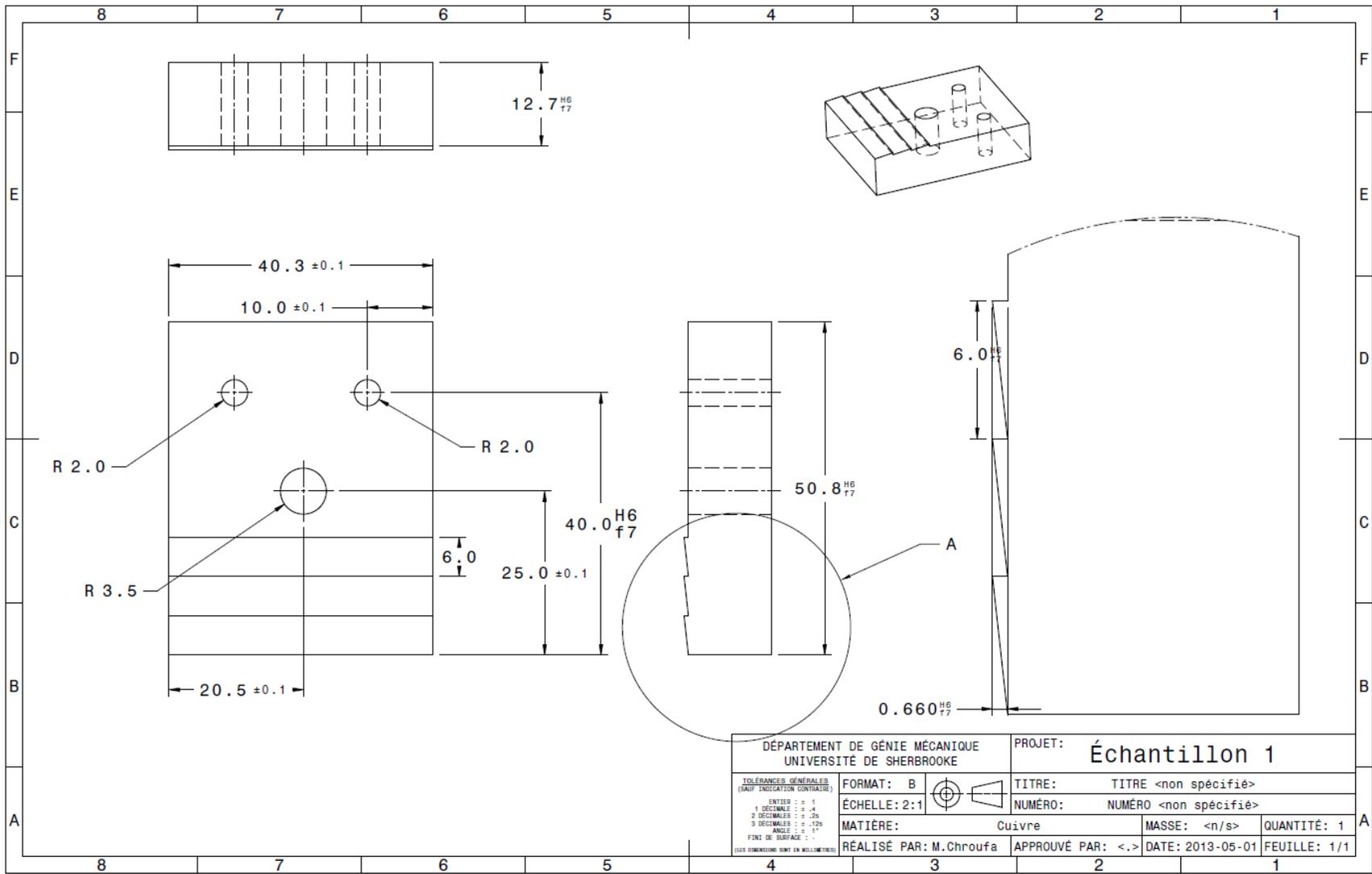
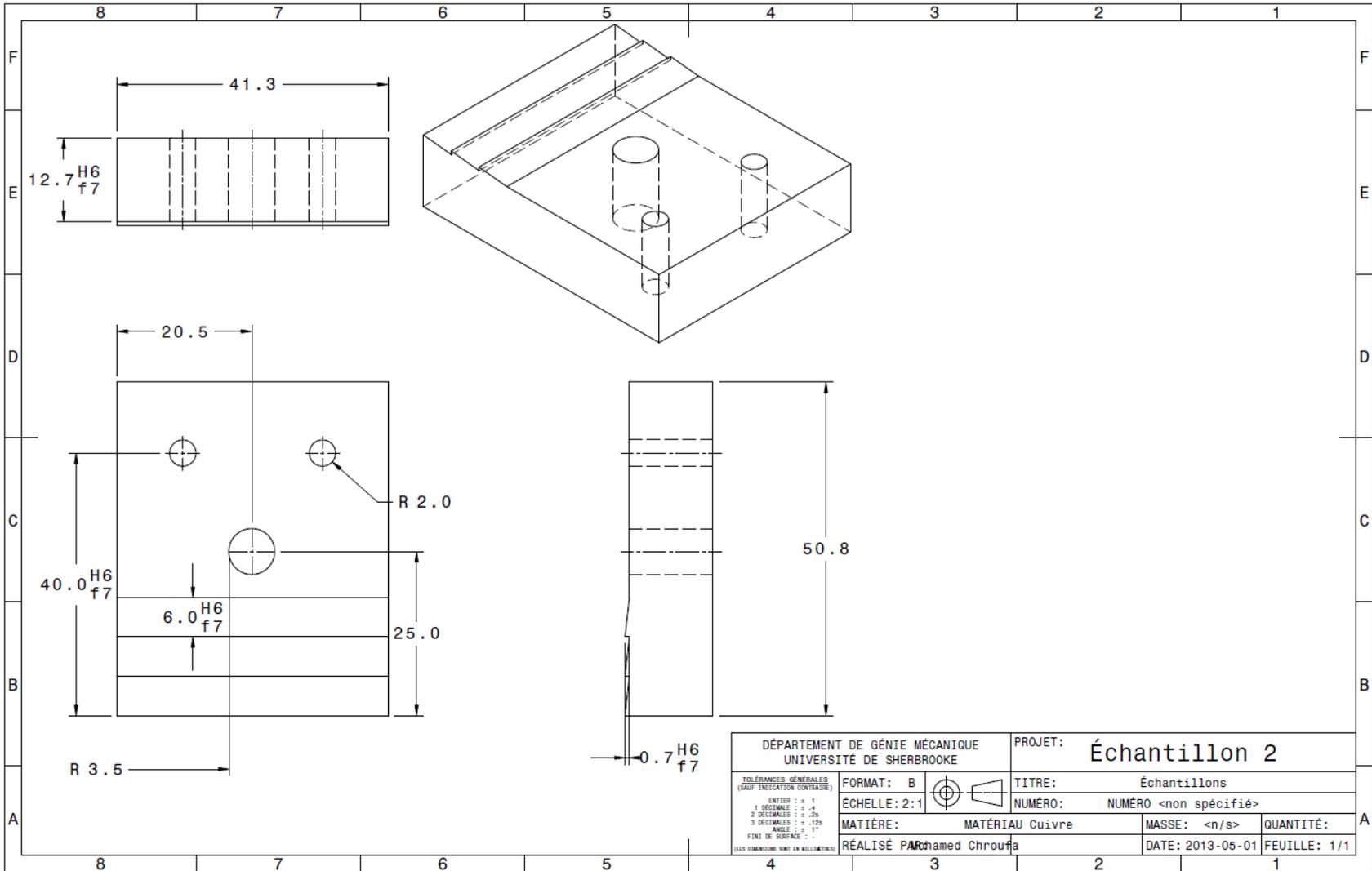


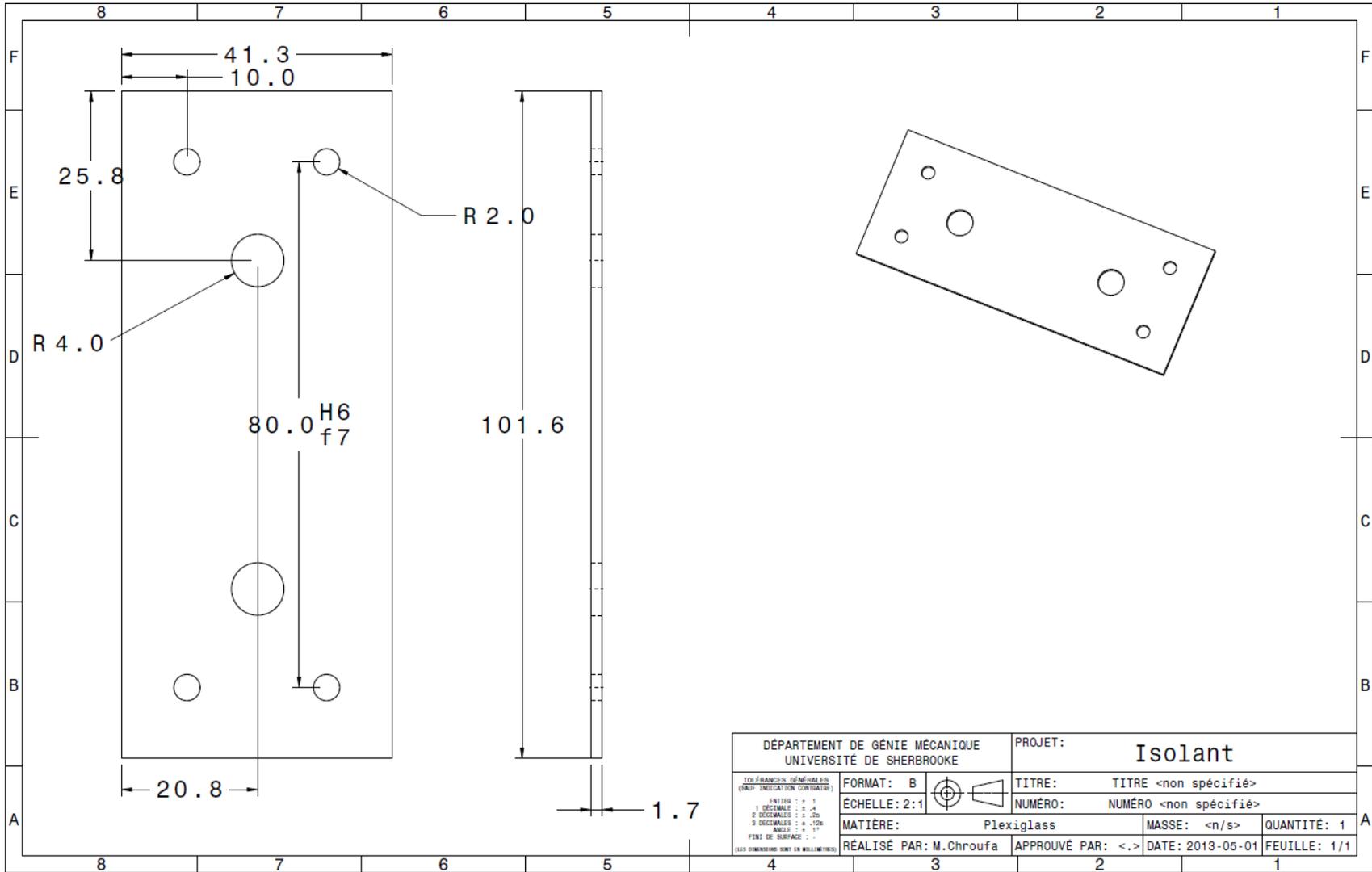
Tableau E-1 2 Nombre et dimensions des échantillons

Nom	Nombre	Dimensions (L ×h ×l) [mm]
Échantillon 1	5	12.7*41.275*50.8
Échantillon 2	5	12.7*41.275*50.8
Échantillon 3	5	12.7*30.17*50.8
Échantillon 4	5	12.7*41.275*50.8
Plaque d'isolant	5	1.67*41.27*101.6
Plaque d'Aluminium	5	12.7*41.275*101.6

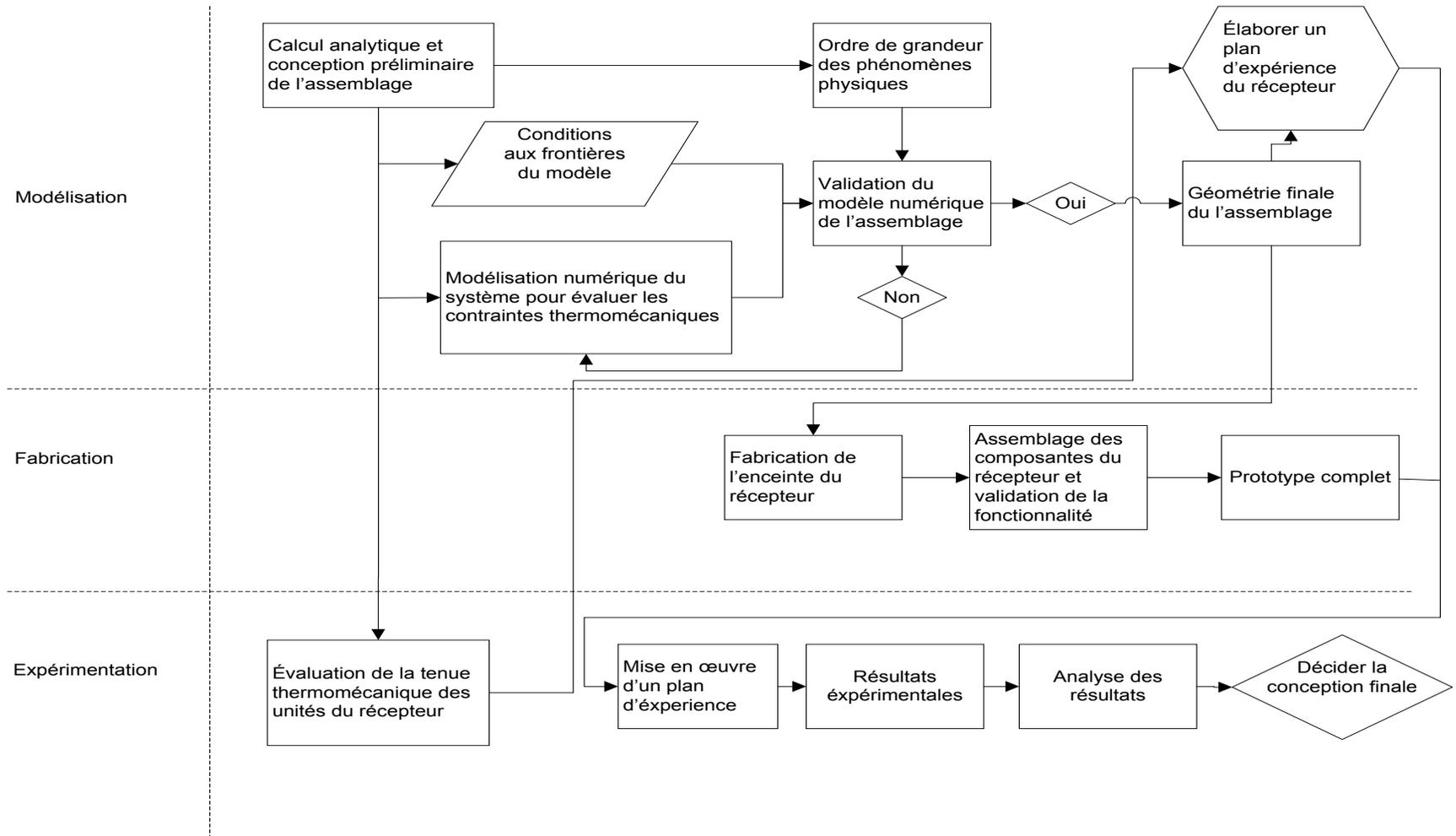


DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE		PROJET: Échantillon 1	
TOLÉRANCES GÉNÉRALES (SAUF INDICATION CONTRAIRE)		FORMAT: B	TITRE: TITRE <non spécifié>
ENTRÉE : ± 1 1 DÉCIMALE : ± 0.4 2 DÉCIMALES : ± 0.25 3 DÉCIMALES : ± 0.125 ANGLE : ± 1° FINI DE SURFACE : - (LES DIMENSIONS SONT EN MILLIMÈTRES)		ÉCHELLE: 2:1	NUMÉRO: NUMÉRO <non spécifié>
Matière: Cuivre		MASSE: <n/s>	QUANTITÉ: 1
RÉALISÉ PAR: M.Chroufa		APPROUVÉ PAR: <.>	DATE: 2013-05-01 FEUILLE: 1/1





ANNEXE E-2 - Procédure des tests sur le récepteur réel



ANNEXE F MICROSCOPE ACOUSTIQUE

F-1 Mise en contexte

Les caractéristiques thermiques des dispositifs électromécaniques sont en relation étroite avec température. Par conséquent, l'analyse de la gestion thermique est importante pour la conception des joints des composantes avec la soudure. Il est bien connu que les défauts de soudure (vides) sont inévitables. Le choc thermique provoqué par les vides de soudure est très critique sur la performance et la fiabilité des dispositifs. Le microscope acoustique, présenté dans la figure F.1, permet d'identifier des défauts et les faiblesses d'un produit. Vu que cette étape n'engendre pas des contraintes supplémentaires pour le produit en question. Conséquemment, le terme contrôle non destructif prend tout son sens.

Principe de fonctionnement :

On met l'échantillon à tester dans un bain d'eau, car l'eau est nécessaire à la transmission de l'onde sonore vers l'objet. Le transducteur envoie une onde sonore qui a la capacité de traverser les matériaux M selon leurs impédances acoustiques Z . A chaque onde ultrasonique, des échos sont reçus par le système de traitement d'image. Chaque écho étant associé à un changement d'impédance acoustique, et donc du matériau. Lorsque l'impédance acoustique du matériau est nulle, cas de l'air, la totalité de l'énergie est réfléchi qui est typiquement associée à la présence de délamination ou des fissures. C'est par l'observation de la phase et de l'amplitude de l'écho que l'on qualifiera les défauts.

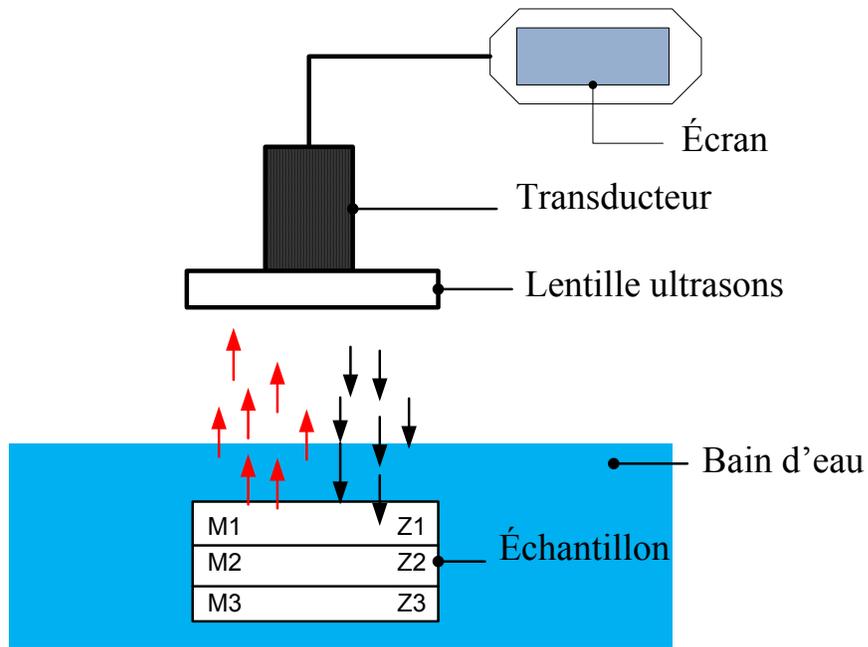


Figure F.1 Principe de fonctionnement du microscope acoustique

Le choix de la fréquence influe sur la résolution et sur la pénétration. Comme la montre la figure F.2, plus la fréquence est élevée plus la pénétration est courte.

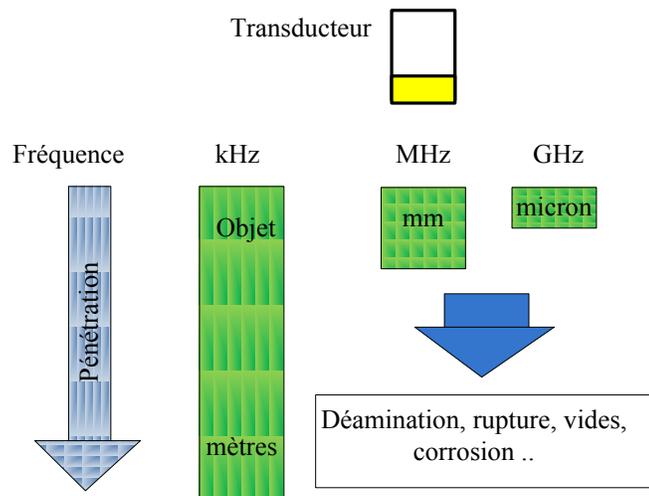


Figure F.2 La pénétration des ondes sonores en fonction de la fréquence du transducteur

Par exemple, dans le domaine microélectronique, la résolution est essentielle. Ce qui implique l'utilisation des fréquences élevées, avec en contrepartie moins de pénétration.

On va utiliser le microscope acoustique pour caractériser le soudage entre les différentes couches du récepteur, pour identifier s'il y a des défauts à l'interface de soudure. Il est bien connu que les défauts de soudure (vides) sont inévitables, le but est de minimiser ses défauts pour diminuer la résistance thermique [24] et augmenter ainsi la performance du récepteur.

F-2 La possibilité des défauts de soudage

Vue le coefficient d'expansion thermique élevé de l'acier A42 a haut température, au lieu d'assembler toutes les couches par diffusion, on va assembler l'échangeur par diffusion et la couche d'électrode, Cu/DBC ALN/Cu et la dernière couche de cuivre par soudage (Figure F.3). Puisque la diffusion peut être généralement parfaite et sans bulles d'air, la soudure est beaucoup plus probable à avoir du vide.

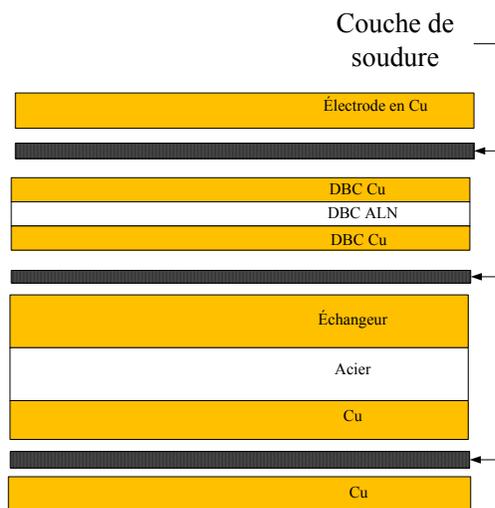


Figure F.3 Assemblage d'une unité du récepteur

F-3 Impact thermique des vides

Les vides sont des isolants thermiques, la chaleur qui traverse les cellules doit circuler autour des vides pour se diriger vers la plaque froide et ainsi le liquide de refroidissement.

Conséquemment, la section droite de conduction thermique va être réduite et le chemin de chaleur va être plus long. Par la suite, les vides vont augmenter l'impédance thermique et donc la température dans les couches.

F-4 Contrôle non destructif d'un multicouche

Vu que le récepteur du système photovoltaïque est un multicouche des différents matériaux, parmi lesquelles on trouve les couches de soudure. On doit avoir une technique qui permet de contrôler l'état de la soudure dans le récepteur. Pour cela, on trouve que le microscope acoustique est adéquat pour répondre à ce besoin. On doit s'assurer que le microscope acoustique va fournir des informations précises sur l'état de surface à l'interface des couches (couches de soudure).

F-5 EXPÉRIMENTATIONS

Échantillons des tests

L'échantillon a testé est un multicouche qui est soudé avec une couche de cuivre, comme la montre la figure F.4. Bien que l'objectif des unités réelles du récepteur soit de ne pas avoir des vides, l'objectif de cet échantillon est d'avoir beaucoup de vides de différentes tailles pour voir ce qui pourrait être détecté par le microscope acoustique.

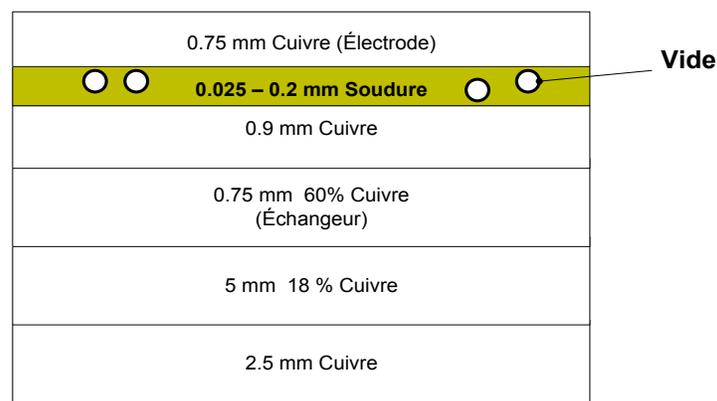


Figure F.4 L'échantillon a testé sur le microscope acoustique

Le microscope a deux transducteurs pour deux fréquences séparées, 15 MHz (rapide mais avec faible résolution) et 230 MHz (plus lent avec une haute résolution). Pour cela, on a effectué deux tests en utilisant un de ces transducteurs.

Essai #1

On utilisant un transducteur de 230 MHz, on a obtenu une bonne résolution. Par contre, la procédure était lente.

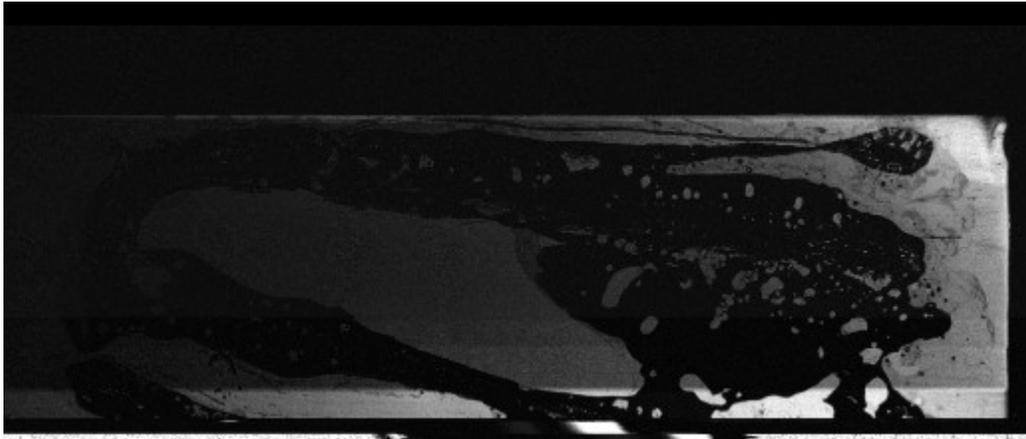


Figure F.5 État d'interface de soudure en utilisant in transducteur de 230 MHz

La figure F.5 montre l'état de l'interface soudée. Les parties blanches et noires présentent respectivement le vide et la soudure.

Essai #2

On a changé le transducteur de 15 MHz, la résolution était de 200 micromètres qui est inférieur à celle du transducteur 230 MHz. Mais, le temps de test est plus rapide.

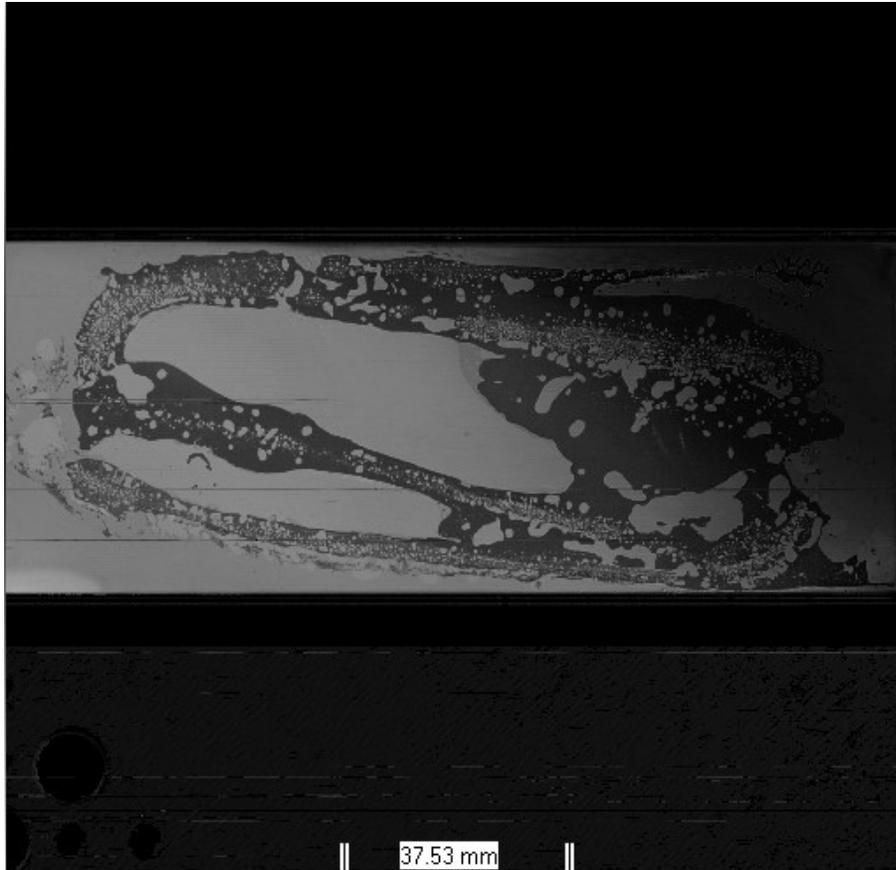


Figure F.6 État d'interface de soudure en utilisant in transducteur de 15 MHz

La figure F.6 montre l'état d'interface, vu que cette résolution est bonne aussi. On doit utiliser ce transducteur pour tester les unités du récepteur. Et, dans le cas de plusieurs interfaces, l'image montre les vides de chaque interface avec différentes couleurs.

F-6 Conclusion

Les résultats obtenus sont satisfaisants, le transducteur de 15 MHz est suffisant pour la vérification des interfaces de soudure du récepteur. Conséquemment, ce microscope acoustique est **adéquat** pour les tests sur les unités du récepteur.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] Kinsey, G. S., Pien, P., Hebert, P. et Sherif, R. A. (2009). Operating characteristics of multijunction solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, volume 93, numéro 6–7, p. 950-951.
- [2] Royne, A., Dey, C. J. et Mills, D. R. (2005). Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, volume 86, numéro 4, p. 451-483.
- [3] La bibliothèque de l'OMNT. <https://www.biblio-omnt.fr/biblio/index.php/recherche> (page consultée le 09 septembre 2012).
- [4] Promes-cnrs, Comportement de cellules solaires sous très forte concentration. <http://www.promes.cnrs.fr/index.php?page=comportement-de-cellules-solaires-sous-tres-forte-concentration> (page consultée le 09 septembre 2012).
- [5] Araki, K., Uozumi, H. et Yamaguchi, M. (2002). A simple passive cooling structure and its heat analysis for 500× concentrator PV module. Dans *Photovoltaic Specialists Conference, 2002. Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE* p. 1568-1571.
- [6] Tuckerman, D.B, Pease, R.F. (1981). High performance heat sinking for VLSI. *IEEE Electron Device Lett*, pp.126 - 129.
- [7] Riddle, R., Contolini, R.J., Bernhardt, A.F. (1991). Design calculations for the microchannel heat sink. *Proc National Electronic*, pp.161 -171.
- [8] Harms, T.M, Kazmierczak, M.J, Gerner, F.M. (1999). Developing convective heat transfer in deep rectangular microchannels, *Int. J. Heat Fluid Fl.*, pp. 149-157.
- [9] Owhaib, W., Palm, B.(2004). Experimental investigation of single-phase convective heat transfer in circular microchannels, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, pp.105–110.
- [10] G. Martinelli, M.Stefancich. (2007) *Solar Cell Cooling*, chapitre 7, Springer Series in Optical Sciences. Springer Berlin, Heidelberg, Allemagne, p.133-134.
- [11] Van Kessel, T., Abduljabar, A., Alyahya, A., Alyousef, B., Badahdah, A., Khonkar, H., Kirchner, P., Martin, Y., Manzer, D., Moumen, N., Prabhakar, A., Picunko, T., Sandstrom, R., Al-Saaedi, Y., Wacaser, B. et Guha, S. (2010). Multi receiver concentrator photovoltaic testing at extreme concentrations. Dans *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010 35th IEEE* p. 498-502.

- [12] Luque, Antonio, L., André, V. (2007) Multijunction Concentrator Solar Cells, chapitre 10, Springer Series in Optical Sciences. Springer Berlin, Heidelberg, Allemagne, p.67-87.
- [13] Ndao, S., Peles, Y. et Jensen, M. K. (2009). *Multi-objective thermal design optimization and comparative analysis of electronics cooling technologies*. International Journal of Heat and Mass Transfer, volume 52, numéro 19–20, p. 4317-4326.
- [14] Shaw, L. L. (1998). Thermal residual stresses in plates and coatings composed of multi-layered and functionally graded materials. Composites Part B: Engineering, volume 29, numéro 3, p. 199-210.
- [15] Tong hsing electronic ind., LTD. DPC Substrate Supply - Smaller, Thinner Plating. http://metallized-ceramic.ready-online.com/dbc_fr.html (page consulté le 1er septembre 2013)
- [16] MICROCERTEC. <http://www.microcertec.com/fiche-materiaux-fr-6-nitru-re-d-aluminium-aln.html> (page consulté le 17 octobre 2013)
- [17] Matweb. Online Materials Information Resource. <http://www.matweb.com/> (page consultée le 17 octobre 2013).
- [18] Remy, N. Étude générale des sollicitations. <http://www.grenoble.archi.fr/cours-en-ligne/remy/L3C-03-cisaillement.pdf> (page consultée le 01 septembre 2013).
- [19] Optis, Groupe de recherche en optimisation des structures de l'Université de Sherbrooke. http://mecano.gme.usherb.ca/~jmdrouet/optis/a_voir_fra.html (page consultée le 02 décembre 2013).
- [20] In MasterBond.com. Master Bond High Tensile Strength Epoxy Adhesives. <http://www.masterbond.com/properties/high-tensile-strength-epoxy-compounds>. (page consultée le 15 septembre 2013).
- [21] Zhang, T., Zhu, Q., Huang, W. L., Xie, Z. et Xin, X. (2008). Stress field and failure probability analysis for the single cell of planar solid oxide fuel cells. Journal of Power Sources, volume 182, numéro 2, p. 540-545.
- [22] Zhang, X. C., Xu, B. S., Wang, H. D., Jiang, Y. et Wu, Y. X. (2006). Modeling of thermal residual stresses in multilayer coatings with graded properties and compositions. Thin Solid Films, volume 497, numéro 1–2, p. 223-231.
- [23] Zhang, X. C., Xu, B. S., Wang, H. D., Wu, Y. X. et Jiang, Y. (2007). Residual stress distributions within high-temperature coatings. Surface and Coatings Technology, volume 201, numéro 15, p. 6660-6662.

- [24] Zhu, N. (1999). Thermal impact of solder voids in the electronic packaging of power devices. Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 1999. Fifteenth Annual IEEE, p. 22-29.
- [25] Marie-Caroline Saro, Soitec. <http://www.soitec.com/fr/news/communiqués-de-presse/record-mondial-cellule-solaire-1373> (page consulté le 27 mars 2014)
- [26] Cnlbricol. <http://cnlbricol.com.cnlanton.com/ResineEpoxy.pdf> (page consulté le 27 janvier 2014)