



**HAL**  
open science

# Etude de fiabilité des modules d'électronique de puissance à base de composant SiC pour applications hautes températures

Ludi Zhang

► **To cite this version:**

Ludi Zhang. Etude de fiabilité des modules d'électronique de puissance à base de composant SiC pour applications hautes températures. Electronique. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2012. Français. NNT: . tel-00988235

**HAL Id: tel-00988235**

**<https://theses.hal.science/tel-00988235>**

Submitted on 7 May 2014

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

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



# THÈSE

PRÉSENTÉE A

**L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1**

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR

Par Ludi, ZHANG

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : Électronique

\*\*\*\*\*

## **ETUDE DE FIABILITE DES MODULES D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE À BASE DE COMPOSANT SIC POUR APPLICATIONS HAUTES TEMPERATURES**

\*\*\*\*\*

**Soutenue prévue le :** 17 Janvier 2012

**Après avis des rapporteurs :**

M. Dominique Planson

Professeur à l'INSA, Lyon

M. Stéphane Lefebvre

Professeur des universités, CNAM, Cachan

**Devant la commission d'examen formée de :**

M. Eric Woirgard

Professeur, Université Bordeaux 1

Mme. Alexandrine Guedon-Gracia

Maître de Conférence, Université Bordeaux 1

M. Dominique Planson

Professeur à l'INSA, Lyon

M. Stéphane Lefebvre

Professeur des universités, CNAM, Cachan

M. Vincent Bley

Maître de Conférence, Université Paul Sabatier, Laplace

M. Jean-Michel Vinassa

Professeur, Université Bordeaux 1



A mes parents  
A ma famille et aux amis...  
Merci pour leur compréhension et leur soutien.



# Remerciements

Je remercie Monsieur le Professeur P. FOUILLAT, directeur de l'IMS de Bordeaux, pour son accueil chaleureux dans son laboratoire.

Je remercie Monsieur le Professeur Eric WOIRGARD, mon directeur de thèse, pour m'avoir permis de travailler au sein de son équipe.

Je tiens à remercier avec beaucoup de sincérité Madame Alexandrine GUEDON-GRACIA qui a participé à l'encadrement de mes travaux.

Je ne remercierai jamais assez Stéphane AZZOPARDI pour son excellent encadrement, sa disponibilité, sa gentillesse et pour tout ce qu'il m'a apporté durant la thèse.

Je remercie vivement Monsieur Jean-Yves DELETAGE, ingénieur de recherche, pour ses conseils précieux quant à l'utilisation du logiciel ANSYS.

Je remercie tous les membres du laboratoire IMS et en particulier les membres de l'équipe puissance que j'ai eu du plaisir à côtoyer durant ces quelques années.

Je remercie tous les doctorants que j'ai côtoyé durant toutes ces années et grâce à qui j'ai passé de très agréables moments : Wissam, Kai, Wei, Si Yu, Nicolas, Yassine, Hassan, Riadh, Hyacinthe, Warda, Ramzi, Akram, Kamal, Youssef, Montassar, François.

Je tiens à remercier particulièrement Monsieur Dominique PLANSON, Professeur à l'INSA (lyon) et Monsieur Stéphane LEFEBVRE, Professeur des universités, CNAM, Cachan pour avoir accepté de juger ce travail et d'en être les rapporteurs.

Un infini remerciement à mes parents Jianliang ZHANG et Xiaofeng TONG qui m'accompagnent depuis tant d'années. Je leur dédie ce mémoire en témoignage de la confiance et du soutien qu'ils m'ont toujours attesté.



# Table des matières

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>22</b>
<b>CHAPITRE I : ETAT DE L'ART DES MODULES DE PUISSANCE POUR APPLICATIONS HAUTE TEMPERATURE .....</b>	<b>27</b>
<b>1. Introduction .....</b>	<b>27</b>
<b>2. Contexte de l'étude.....</b>	<b>28</b>
2.1 La haute température et les besoins applicatifs .....	28
2.1.1 La haute température .....	28
2.1.2 Les besoins applicatifs .....	29
2.2 Présentation des composants de puissance en SiC .....	32
2.2.1 Histoire du carbure de silicium (SiC) .....	32
2.2.2 Propriétés du SiC.....	33
2.2.2.1 Cristallographie .....	33
2.2.2.2 Propriétés physiques du SiC .....	34
<b>3. Constitution d'un module de puissance .....</b>	<b>38</b>
3.1 Les puces semi-conductrices .....	41
3.2 L'alliage de brasage .....	42
3.2.1 Brasures traditionnelles basse et haute température .....	44
3.2.2 Brasures sans plomb basse et haute température .....	44
3.3 Substrats .....	45
3.3.1 Substrats Céramiques AlN.....	47
3.3.2 Substrats céramique Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> .....	48
3.4 Semelles.....	48
3.4.1 Fonction.....	48
3.4.2 Matériaux utilisés pour les semelles.....	49
3.5 Connexions électriques .....	50
3.6 Encapsulation.....	52
3.7 Les solutions de refroidissement .....	53
<b>4. Technologies d'assemblage à haute température .....</b>	<b>55</b>
4.1 Solutions avec des brasures haute température .....	55
4.2 Soudure par phase liquide transitoire .....	55
4.3 L'assemblage par frittage d'argent .....	56
4.3.1 Avantage et propriétés de frittage de nano-poudre d'argent.....	57
4.4 L'assemblage par nano poteau de cuivre .....	58
4.4.1 Caractéristique dimensionnelle des nano poteaux .....	59
4.4.2 Applications et avantages.....	59
<b>5. Fiabilité des modules de puissance .....</b>	<b>60</b>
5.1 Introduction à la notion de fiabilité et de durée de vie.....	60
5.2 Brasure haute température et basse température .....	61
5.2.1 Trou de brasures « lacunes » .....	62
5.2.2 Le phénomène de délaminage de la brasure .....	62
5.2.3 Fracturation de la brasure.....	63
5.3 Substrat céramique métallisé.....	63
5.4 Fil de câblage.....	64
5.5 Critères de choix des technologies .....	65
<b>6. Conclusion partielle.....</b>	<b>66</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>67</b>



<b>CHAPITRE II : PRESENTATION DU PROJET SiC-HT<sup>2</sup> ET ETUDES PRELIMINAIRES .....</b>	<b>72</b>
1. Introduction .....	72
2. Présentation du projet SiC-HT <sup>2</sup> .....	72
2.1 Les participants .....	73
2.2 Les enjeux des composants de puissance .....	74
3. Modélisation numérique du comportement des modules .....	75
3.1 Généralités sur la simulation par la méthode des éléments finis .....	75
3.2 Le logiciel ANSYS .....	76
3.3 Description du modèle .....	77
3.3.1 Géométries .....	77
3.3.2 Symétrie .....	78
3.3.3 Maillage .....	78
3.3.4 Conditions aux limites .....	79
3.4 Modélisation du comportement des matériaux utilisés dans les assemblages .....	79
3.4.1 Observation sur les matériaux sélectionnés .....	80
3.4.2 Modélisation du comportement des alliages de brasure .....	80
3.4.2.1 La théorie de la viscoplasticité .....	81
3.4.2.2 Loi d'Anand .....	82
3.4.3 Modélisation du comportement des métallisations .....	84
4. Caractérisation des matériaux d'assemblages .....	85
4.1 Caractérisation électrique de diode Schottky en SiC aux différentes températures .....	85
4.1.1 Appareils utilisés et conditions de mesure .....	85
4.1.2 Résultats des caractérisations statiques .....	87
4.2 Caractériser le paramètre mécanique Module d'Young .....	88
4.2.1 La contrainte et les déformations .....	88
4.2.2 Module d'Young .....	89
4.2.3 Lamelles de substrat céramique en traction .....	90
4.2.3.1 Appareils utilisés et conditions de l'expérimentation de traction .....	90
4.2.3.2 Mesure la propriété mécanique Module d'Young .....	93
4.3 Caractériser le paramètre thermomécanique CDT .....	97
4.3.1 Coefficient de dilatation thermique (CDT) .....	97
4.3.2 Appareils utilisés .....	98
4.3.3 Mesure des paramètres CDT .....	100
4.3.3.1 Conditions de mesure .....	100
4.3.3.2 Analyse des résultats expérimentaux .....	101
5. Conclusion partielle .....	104
Références bibliographiques .....	105
<b>CHAPITRE III : ETUDES THERMIQUES .....</b>	<b>108</b>
1. Introduction .....	108
2. Principes et théorie .....	108
2.1 La source de chaleur .....	108
2.2 Théorie de la diffusion .....	109
2.3 Modes de transfert de la chaleur .....	110
2.3.1 Le mode de la conduction .....	111
2.3.2 Le mode de la convection .....	112
2.4 Notion de résistance thermique $R_{th}$ .....	113
3. Mesure thermique .....	113
3.1 Présentation du véhicule de test .....	113
3.2 Description du banc de mesure .....	116
3.2.1 Calibrations du composant .....	117
3.2.1.1 Dispositif de la calibration .....	117

3.2.1.2	Méthode utilisée .....	117
3.2.1.3	Moyen mis en œuvre .....	119
3.2.2	Mesure de résistance thermique .....	120
3.3	Analyse les résultats expérimentaux .....	122
3.3.1	Matrice des véhicules de tests réalisés : .....	122
3.3.2	Les résultats de calibration .....	123
3.3.3	Les résultats de mesure $R_{th}$ .....	124
<b>4.</b>	<b>Simulation thermique .....</b>	<b>125</b>
4.1	Modèles Éléments finis .....	125
4.1.1	Représentation géométrique .....	126
4.1.2	Choix des matériaux et caractéristiques physiques .....	126
4.1.3	Maillage .....	127
4.1.4	Chargements et Conditions aux limites .....	129
4.2	Présentation et analyse des résultats de simulations thermiques .....	129
4.3	Comparaison des résultats de simulations thermiques avec les mesures expérimentales .....	131
4.3.1	Des points de mesures .....	131
4.3.2	Corrélation du modèle numérique expérimental .....	133
4.4	Influence de la structure des assemblages .....	134
4.4.1	Effet du fil de câblage .....	134
4.4.2	Description du modèle avec drain thermique puce (Pseudo DBC) .....	135
4.4.2.1	Géométries et paramètres thermiques .....	135
4.4.2.2	Chargement et condition aux limites .....	136
4.4.2.3	Points de mesure .....	136
4.4.2.4	Résultats de simulation .....	137
4.5	Influence des paramètres de convection 'h' .....	138
<b>5.</b>	<b>Conclusion partielle .....</b>	<b>140</b>
	Références bibliographiques .....	141
 <b>CHAPITRE IV : METHODOLOGIE ET FIABILITE DES MODULES DE PUISSANCE</b>		
<b>..... 144</b>		
<b>1.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>144</b>
<b>2.</b>	<b>Méthodologie .....</b>	<b>144</b>
2.1	Critères de défaillance .....	144
2.1.1	Définition .....	144
2.1.2	Choix du critère de défaillance .....	144
2.2	Impédance thermique .....	145
<b>3.</b>	<b>Test de vieillissement accéléré : cycles thermiques passif .....</b>	<b>147</b>
<b>4.</b>	<b>Les méthodes d'analyse et moyens mis en œuvre .....</b>	<b>148</b>
4.1	Imagerie et microscopie par Rayons X .....	149
4.2	Microscopie acoustique à balayage .....	149
4.3	Analyse par micro section .....	150
<b>5.</b>	<b>Mesure expérimentale .....</b>	<b>152</b>
5.1	Matrice de véhicules de test et stratégie expérimentale .....	152
5.2	Résultats des tests de vieillissement .....	154
5.2.1	Evaluation électrique des composants .....	154
5.2.2	Evaluation d'impédance thermique du module .....	154
5.3	Visualisations et analyses des résultats .....	155
5.3.1	Vieillissement des brasures entre la semelle et le substrat métallisé .....	155
5.3.2	Vieillissement des brasures entre la puce et le substrat .....	156
<b>6.</b>	<b>Simulation numérique .....</b>	<b>158</b>
6.1	Présentation du modèle 3D utilisé .....	158
6.1.1	Maillage .....	160
6.1.2	Critère de défaillance .....	161
6.2	Influence des contraintes résiduelles .....	162

6.3	Simulation de l'essai de vieillissement accéléré .....	165
6.3.1	Simulation des cycles thermiques -55°C/+180°C .....	165
6.3.2	Calcul de la densité d'énergie déformation durant les cycles thermiques.....	166
7.	Conclusion partielle.....	169
	Références bibliographiques .....	170
	<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>172</b>
	<b>ANNEXE (A) PROPRIETES DES ALLIAGES EUTECTIQUES.....</b>	<b>175</b>
	<b>ANNEXE (A) PROPRIETES DES ALLIAGES EUTECTIQUES.....</b>	<b>176</b>



# Liste des abréviations et des symboles

## Abréviations

SiC	Carbure de Silicium
SOI	Silicon On Insulator
EHA	Electro Hydraulic Actuators
EMA	Electro Mechanical Actuators
JFET	Transistor à Effet de Champ à Jonctions (Junction Field Effect Transistor)
MOSFET	Transistor à Effet de Champ à Métal Oxyde (Metal Oxyde Semiconductor Field Effect Transistor)
PCB	Printed Circuit Board
GTO	Gate Turn Off Thyristor
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
AlN	Substrat céramique : Nitrure d'aluminium
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Substrat céramique : Nitrure de silicium
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Substrat céramique : Alumine
BeO	Substrat céramique : Oxyde de béryllium
DBC	Substrat céramique dont les métallisations sont en cuivre (Direct Bond Copper)
AMB	Technologie d'assemblage par brasure des métallisations sur la céramique (Active Metal Brazing)
CuC	Carbure de Cuivre
TLPB	Transient Liquid Phase Bonding
LTJT	Low Temperature Joining Technique
AuSi	Brasure or silicium
AuGe	Brasure or germanium
AuSn	Brasure or étain
SnPb	Brasure étain plomb
CEM	Capacité à réduire les émissions électromagnétiques
AESE	Le pôle mondial Aéronautique Espace Systèmes Embarqués
ASTECH	Le pôle de compétitivité aérospatial ASTech Paris Région
PEGASE	Le pôle de compétitivité aérospatial Pégase
MEB	Microscope Electronique à Balayage
EDX	Energy Dispersive X-ray analysis
VT	Véhicule de test
R <sub>x</sub>	Rayons X

## Grandeurs et notations électrique

$R_{ON}$	Résistance spécifique à l'état passant d'un composant ( $m\Omega.cm^2$ )
$V_{ak}$	Tension entre l'anode et la cathode d'une Diode (V)
$I_a$	Courant de conduction dans la Diode (A)
$I_S$	Courant de saturation (A)
$K$	Constante de boltzman (dans dimension)

## Grandeurs et notations thermique

$CDT(\alpha)$	Coefficient de dilatation thermique ( $ppm.^{\circ}C^{-1}$ ou $ppm.K^{-1}$ )
$T$	Température ( $^{\circ}C$ ou K)
$\Delta T$	Variation de température ( $^{\circ}C$ ou K)
$P_d$	Puissance dissipée dans le composant (W)
$V$	Tension aux bornes du composant (V)
$I$	Courant traversant le composant (A)
$P_{dm}$	Puissance moyenne dissipée (W)
$k$	Conductivité thermique ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
$c$	Chaleur spécifique ( $J/kg.K$ )
$\rho$	Densité ( $kg/m^3$ )
$q$	Densité de flux de chaleur ( $W/m^2$ )
$E$	Quantité de chaleur (J)
$h$	Coefficient d'échange thermique ( $W/m^2.K$ )
$R_{th}$	Résistance thermique ( $^{\circ}C.W^{-1}$ )
$T_j$	Température de jonction ( $^{\circ}C$ ou K)
$Z_{th}$	Impédance thermique ( $^{\circ}C/W$ )

## Grandeurs et notations mécanique

$\sigma$	Contrainte de traction ou de compression (Pa)
$\tau$	Contrainte de cisaillement (Pa)
$\varepsilon$	Déformation (sans dimension)
$\varepsilon_n$	Déformation longitudinale (sans dimension)
$\varepsilon_L$	Déformation latérale (sans dimension)
$\Delta L$	Déplacement de la longueur (m)
$L$	Longueur du solide (m)
$E$	Module d'Young (Pa)
$s$	Résistance à la déformation ( $Pa^{-1}$ )
$A$	Facteur pré-exponentiel ( $s^{-1}$ )
$Q$	Energie d'activation ( $kJ.mol^{-1}$ )
$R$	Constante de gaz parfaits ( $kJ.mol^{-1}.K^{-1}$ )
$\xi$	Multiplicateur de contraintes (sans dimension)
$m$	Sensibilité à la contrainte de la vitesse de déformation (sans dimension)
$h_0$	Constante de durcissement/adoucissement (MPa)

$\hat{s}$	Coefficient de la valeur de saturation de la résistance à la déformation (MPa)
n	Sensibilité à la déformation de la valeur de saturation de la résistance à la déformation (sans dimension)
a	Sensibilité de la consolidation ou de l'adoucissement avec la vitesse déformation
W	Densité volumique d'énergie de déformation (J/m <sup>3</sup> )
N	Nombre de cycles thermiques

## **Grandeurs et notations diverses**

R(t)	Probabilité de survie à l'instant t
f(t)	Densité de défaillance
$\lambda(t)$	Taux de défaillance

## Liste des figures

Figure I-1 : Module de puissance vue en coupe.....	25
Figure I-2 : Limites en température des constituants d'un module de puissance.....	26
Figure I-3 : Exemple de profil paramétré de cyclage actif.....	27
Figure I-4 : Présentation du profil des températures pour un système placé sur le réacteur.....	28
Figure I-5 : Développement d'un système de forage autonome.....	29
Figure I-6 : Arrangement tétraogonal entre un atome de carbone et quatre atomes de silicium.....	31
Figure I-7 : Représentation des ploytypes 3C, 4H et 6H.....	32
Figure I-8 : Limite de la résistance spécifique à l'état passant en fonction de la tension de claquage pour les composants Si et SiC.....	33
Figure I-9 : Tenue en tension de matériaux semi-conducteurs en fonction de la température.....	34
Figure I-10 : Comparaison des tailles de wafers de qualité équivalente pour le Si, SiC et AsGa.....	35
Figure I-11 : Comparaison les tailles de composant entre un onduleur tout-SiC et un tout-Si.....	35
Figure I-12 : Hiérarchie d'assemblage en électronique.....	36
Figure I-13 (a) : Vue éclatée d'un module de puissance 6,5 kV- 1200 A.....	38
Figure I-13 (b) : Une représentation simplifiée d'un module de puissance.....	38
Figure I-14 : IGBT 3,3 kV, 50 à 100 A & Diode 3,3 kV, 100A.....	39
Figure I-15 : L'ordre de brasure entre des éléments du module de puissance.....	40
Figure I-16 : Exemple de profil de refusion d'un alliage Sn <sub>5</sub> Pb <sub>95</sub> .....	41
Figure I-17: Substrat céramique avec des métallisations.....	44
Figure I-18: Comparaison des caractéristiques principales pour les céramiques les plus utilisées.....	45
Figure I-19: Substrat céramique AlN avec la métallisation Al.....	46
Figure I-20: Assemblage AMB (Céramique Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> métallisation Cu).....	46
Figure I-21: Présentation des besoins élémentaires de connexions pour un module de puissance.....	48
Figure I-22 : Connecteurs externes brasés sur la métallisation du substrat.....	49
Figure I-23 : Connexion électrique par fils de bonding sur la métallisation d'un semi-conducteur.....	49
Figure I-24 : Connexion électrique par rubans sur la métallisation d'un semi-conducteur.....	50
Figure I-25 : Module de puissance rempli de gel silicone.....	51
Figure I-26 (a) : Refroidissement simple face.....	52
Figure I-26 (b) : Refroidissement double face.....	52
Figure I-27 : Substrat brasé sur refroidisseur (PEARL).....	52
Figure I-28 : Conception d'assemblage pour des applications haute température.....	54
Figure I-29 : Principe de la soudure par phase liquide transitoire.....	55
Figure I-30 : Technologie d'assemblage à basse température réalisée avec de la pâte d'argent.....	56
Figure I-31 : Comparaison de la conductivité électrique entre les matériaux d'interconnexions communes avec le frittage de Nano-Ag.....	56
Figure I-32 : Comparaison de la conductivité thermique entre les matériaux d'interconnexions communes avec le frittage de Nano-Ag.....	57
Figure I-33 : Caractéristique dimensionnelle des nano poteaux de cuivre.....	58



Figure I-34 : Courbe du taux de défaillance d'un produit en fonction du temps.....	59
Figure I-35 : Les interfaces d'assemblage de puissance.....	60
Figure I-36 : Evolution du délaminage de la brasure puce tous les 100 cycles - 55°C/+150°C.....	61
Figure I-37 : Fissuration de brasure puce – substrat.....	62
Figure I-38 : Fissure de la céramique AlN métallisée Cu.....	62
Figure I-39 : Influence de l'épaisseur des métallisations par rapport la fiabilité.....	63
Figure I-40 : Défaillances des fils de câblage.....	64
Figure II-1 : Modèle utilisé pour les simulations thermiques et thermomécaniques.....	76
Figure II-2 : Représentation d'un quart de l'assemblage.....	77
Figure II-3 : Le cône de la distribution température de l'assemblage (K).....	78
Figure II-4 : Les trois phases d'un essai de fluage.....	80
Figure II-5 : Allure générale d'une courbe d'écrouissage en traction.....	84
Figure II-6 : Traceur TEK 371A.....	84
Figure II-7 : Test avec un conditionneur d'air pulsé en température contrôlée.....	85
Figure II-8 : Connexion entre le véhicule de test et le traceur.....	85
Figure II-9 : Caractéristiques électriques statiques en polarisation directe de la diode Schottky SiC à des températures comprises entre 25°C et 200°C.....	86
Figure II-10 : Application les deux forces $F_y$ et $F_x$ exercée sur la surface S.....	87
Figure II-11 : Déformations des contraintes de traction.....	88
Figure II-12 : Diagramme contrainte-déformation.....	89
Figure II-13 : Machine de caractérisation mécanique INSTRON 5565.....	90
Figure II-14 : Mors spécifiques (caoutchouc).....	90
Figure II-15 : Mesure par le capteur de la force et l'extension mètre.....	91
Figure II-16 : (a) Substrat céramique $Si_3N_4$ avant découpe.....	91
Figure II-16 : (b) Lamelles de substrat $Si_3N_4$ .....	91
Figure II-17 : Traction sur la surface S.....	92
Figure II-18 : Courbes charge - déplacement pour deux profils différents ( $Si_3N_4$ ).....	93
Figure II-19 : Courbes contrainte de traction - déformation pour deux profils différents ( $Si_3N_4$ ).....	94
Figure II-20 : Courbes charge-déplacement avec deux profils différents (AlN).....	95
Figure II-21 : Courbes contrainte de traction-déformation avec deux profils différents (AlN).....	96
Figure II-22 : Représentation graphique du coefficient de dilatation thermique.....	97
Figure II-23 : Profilomètre ALTISURF 500.....	98
Figure II-24 : (a) Thermal Chuck.....	99
Figure II-24 : (b) Sondes et le plateau chauffant.....	99
Figure II-25: Echantillons de mesure CDT.....	99
Figure II-26: Mesure lors d'une montée en température.....	100
Figure II-27: Diagonale à mesurer.....	100
Figure II-28 : Résultats originaux de l' $Au_{97}Si_3$ .....	101
Figure II-29 : Résultat après le filtrage gaussien 0.08 mm.....	101
Figure II-30 : Résultat après redressement sur deux parties.....	102
Figure II-31 : Coefficient dilatation thermique pour différents types de matériaux.....	103
Figure III-I : Photographie du véhicule de test.....	114
Figure III-2 (a) : Connecteur électrique externe.....	115
Figure III-2 (b) : Molybdène.....	115
Figure III-3: Différentes résistances thermiques dans un module de puissance.....	115
Figure III-4: Banc de mesure de résistance thermique et l'impédance thermique.....	116
Figure III-5: Dispositif de la calibration.....	117

Figure III-6: La tension de seuil en fonction de la température.....	118
Figure III-7: Schéma de calibration de la jonction d'un assemblage.....	119
Figure III-8: Calibration de jonction en fonction de la température.....	120
Figure III-9: Deux phases pour mesurer de résistance thermique.....	121
Figure III-10: Intervalles de chauffe du composant et de mesure.....	121
Figure III-11: Les paramètres surveillés pour la mesure de la résistance thermique.....	122
Figure III-12: Résultats de calibration pour le 1 <sup>er</sup> lot de véhicule de test.....	123
Figure III-13: Résultats de calibration pour le 2 <sup>ème</sup> lot de véhicule de test.....	124
Figure III-14: Résultats expérimentaux de la résistance thermique pour différents modèles d'assemblages.....	125
Figure III-15: Modèle utilisé pour les simulations thermiques.....	126
Figure III-16: Modèle géométrique maillé des assemblages avec fil de câblage.....	128
Figure III-17 : Convergence de la température de jonction en fonction de la taille minimale des éléments du maillage.....	128
Figure III-18 : La température de jonction en régime transitoire et permanent.....	129
Figure III-19 : Un exemple des distributions de température pour le modèle 5.....	130
Figure III-20 : Résultats de simulation thermique pour six modèles différents.....	131
Tableau III-21 : Module de puissance monté sur une boîte à eau par l'interface thermique double face.....	132
Figure III-21 a : Image infrarouge d'un module de puissance durant la mesure $R_{th}$ .....	133
Figure III-21 b : Image du module de puissance monté sur la boîte à eau.....	133
Figure III-22 : Comparaison des résultats expérimentaux et de simulation pour les résistances thermiques d'assemblage.....	133
Figure III-23 : Les résultats de répartition de flux thermique (W) dans l'assemblage.....	135
Figure III-24 : Modèle avec drain thermique puce.....	136
Figure III-25 : Température de jonction en régime permanent dans les différents modèles.....	137
Figure III-26 : Comparaison des résultats des points de mesure sur différents modèles à 40s.....	138
Figure III-27 : Température maximale dans la puce en fonction du coefficient d'échange thermique.....	139
Figure III-28 : Température dans la semelle en fonction du coefficient d'échange thermique.....	139
Figure IV-1 : Exemple de caractéristique d'impédance thermique.....	145
Figure IV-2 : Exemple d'évolution d'impédance thermique à l'état initial et l'état après 71 cycles thermique.....	146
Figure IV-3 : Cycles thermiques appliqués aux véhicules de test.....	147
Figure IV-4 a : Enceinte climatique utilisée.....	147
Figure IV-4 b : Deux thermocouples utilisés.....	147
Figure IV-5 : Cycle thermique appliqué aux véhicules de test.....	148
Figure IV-6 : Vue générale de l'outil d'analyse par rayons X.....	149
Figure IV-7 a: Vue générale de l'outil d'analyse acoustique.....	149
Figure IV-7 b: Mise en œuvre d'une analyse acoustique.....	149
Figure IV-8 : Principe de fonctionnement de la microscopie acoustique.....	150
Figure IV-9 : Vue générale de l'outil d'analyse par un microscope électronique à balayage.....	151
Figure IV-10 a : Image MEB du substrat céramique AlN métallisé en cuivre.....	151
Figure IV-10 b : Spectre de la répartition des éléments dans le substrat AlN.....	151
Figure IV-11 : Organigramme de la stratégie expérimentale.....	153
Figure IV-12 a : Résultat au rayon X pour VT7.....	155

Figure IV-12 b : Résultat au rayon X pour VT11.....	156
Figure IV-13 : Résultat de l'analyse par rayon X pour les deux composants avec le même type de brasure $Au_{97}Si_3$ .....	156
Figure IV-14 : Résultat au rayon X pour les deux composants avec différents types de brasure.....	157
Figure IV-15 : Résultat d'analyse par microscopie acoustique dans le joint de brasure puce/substrat après 71 cycles.....	158
Figure IV-16 : Modèle utilisé pour les simulations thermomécaniques.....	159
Figure IV-17 : Convergence de la densité d'énergie de déformation inélastique dissipée dans la brasure haute température en fonction de la taille minimale des éléments du maillage.....	162
Figure IV-18 : Profil de refusion pour les brasures $Sn_5Pb_{95}$ et $Au_{88}Ge_{12}$ .....	163
Figure IV-19 : Mise en évidence des contraintes résiduelles.....	164
Figure IV-20 a : Distributions de la densité d'énergie déformation pendant la phase de refusion.....	165
Figure IV-20 b : Zone critique dans la brasure puce/substrat.....	165
Figure IV-21 : Densité d'énergie de déformation durant la refusion, la phase de stockage et les trois cycles thermiques.....	165
Figure IV-22 : Profil des cycles thermique $-55^{\circ}C/+180^{\circ}C$ .....	166
Figure IV-23 : Densité d'énergie de déformation dans la brasure.....	166
Figure IV-24 : Densité d'énergie de déformation accumulée au cours de 3 cycles.....	167
Figure IV-25 : Densité d'énergie de déformation durant les cycles thermiques.....	167
Figure IV-26 : Evolution des contraintes (Von Mises) en fonction du temps pendant les chocs thermiques.....	168

## Liste des tableaux

Tableau I-1 : Propriétés physiques des matériaux semi-conducteurs à 25°C.....	39
Tableau I-2 : Propriétés physiques d’alliage étain/plomb à 25°C.....	42
Tableau I-3 : Exemple de quelques alliages sans plomb à 25°C.....	43
Tableau I-4 : Caractéristiques des propriétés physiques des céramiques isolantes.....	44
Tableau I-5 : Propriétés physiques de quelques matériaux pour la semelle.....	47
Tableau I-6 : Température du procédé d’assemblage et de refusion de plusieurs matériaux soudés par phase liquide transitoire.....	55
Tableau I-7: Résumés des critères de choix des technologies.....	64
Tableau II-1 : Les paramètres géométriques de l’assemblage.....	76
Tableau II-2 : Récapitulatif des matériaux employés dans les assemblages.....	79
Tableau II-3 : Valeurs des constantes du modèle d’Anand pour l’alliage Sn <sub>5</sub> Pb <sub>95</sub> .....	83
Tableau II-4 : Valeurs du module d’Young en fonction de la température.....	83
Tableau II-5 : Comparaisons des valeurs expérimentales et les valeurs théoriques du Module d’Young de substrat céramique.....	96
Tableau II-6 : Les résultats CDT pour différents types de puce.....	102
Tableau II-7 : Les résultats CDT pour différents types de brasure.....	102
Tableau II-8 : Les résultats CDT pour différents types de substrat céramique.....	102
Tableau III-1 : Les paramètres utilisés dans le logiciel ANSYS.....	110
Tableau III-2 : Quelques valeurs du coefficient d’échange h suivant le type de convection.....	112
Tableau III-3 : Matrice des véhicules de test réalisés.....	122
Tableau III-4 : Différents matériaux d’assemblage pour le 1 <sup>er</sup> lot de véhicule de test.....	123
Tableau III-5 : Différents matériaux d’assemblage pour le 2 <sup>ème</sup> lot de véhicule de test.....	123
Tableau III-6 : Les paramètres géométriques des éléments.....	126
Tableau III-7 : Propriétés thermiques des éléments.....	127
Tableau III-8 : Caractéristiques techniques pour le ruban d’interface thermique.....	132
Tableau III-9 : Comparaison des résultats de simulation thermique en fonction des fils de câblage.....	134
Tableau III- 10 : Paramètres géométriques et propriétés des matériaux pour le modèle Pseudo DBC.....	135
Tableau III- 11 : Les chargements et les conditions aux limites.....	136
Tableau III-12 : Différents modèles à simuler.....	137
Tableau IV-1 : Différents matériaux d’assemblage pour le 1 <sup>er</sup> lot de véhicule de test.....	152
Tableau IV-2 : Différents matériaux d’assemblage pour le 2 <sup>ème</sup> lot de véhicule de test.....	152
Tableau IV-3: Test électriques sur les composants avant et après vieillissement.....	154
Tableau IV-4 : Résultats du nombre de cycles subi et de l’état de l’assemblage pour lot 1...154	154
Tableau IV-5 : Résultats du nombre de cycles subi et de l’état de l’assemblage pour lot 2...155	155
Tableau IV- 6 : Propriétés physiques des matériaux d’assemblage pour les simulations thermomécaniques.....	159
Tableau IV-7 : Paramètres d’Anand-Viscoplasticité de la brasure Sn <sub>5</sub> Pb <sub>95</sub> et de la brasure Sn <sub>97</sub> Ag <sub>3</sub> .....	161

# Liste des équations

Equation I-1.....	33
Equation I-2.....	59
Equation I-3.....	59
Equation I-4.....	59
Equation II-1.....	82
Equation II-2.....	82
Equation II-3.....	82
Equation II-4.....	87
Equation II-5.....	87
Equation II-6.....	87
Equation II-7.....	88
Equation II-8.....	89
Equation II-9.....	91
Equation II-10.....	98
Equation II-11.....	98
Equation III-1.....	108
Equation III-2.....	108
Equation III-3.....	109
Equation III-4.....	110
Equation III-5.....	111
Equation III-6.....	111
Equation III-7.....	112
Equation III-8.....	113
Equation III-9.....	113
Equation III-10.....	118
Equation III-11.....	118
Equation III-12.....	118
Equation III-13.....	120
Equation III-14.....	132
Equation IV-1.....	146
Equation IV-2.....	162
Equation IV-3.....	168



# Introduction générale

Depuis le début des années 2000, les progrès en électronique de puissance permettent de développer des convertisseurs plus performants et plus fiables. L'électronique de puissance joue un rôle de plus en plus important dans de nombreux domaines : le ferroviaire, voitures électriques et hybrides, le forage pétrolier et l'aéronautique.

Dans le domaine de l'aviation, généralement, on place les convertisseurs d'électronique de puissance au plus près des actionneurs. Dans ce cas particulier, la température ambiante de fonctionnement des composants est très élevée (200°C environ au voisinage du réacteur). Il faut également prendre en compte la phase de décollage et d'atterrissage du vol, pendant ces phases, la température du réacteur peut varier de -55°C à +200°C. Pour répondre à ces applications, un intérêt considérable est porté sur le développement des modules de puissance fonctionnant à haute température avec une densité de puissance élevée. Dans ce cas, des améliorations des assemblages du module de puissance sont obligatoires, et sont apportées notamment grâce à l'utilisation de nouvelles technologies d'assemblage et de nouveaux matériaux pouvant supporter des contraintes thermiques élevées.

Les composants semi-conducteurs de puissance normalement sont réalisés dans des technologies silicium (Si). Leur température limite de fonctionnement est inférieure à 200°C. De nouvelles technologies carbure de silicium (SiC) et SOI (silicon-on-insulator) permettent de concevoir des convertisseurs de puissance fonctionnant à haute température ambiante (plus de 200°C) à destination notamment de l'industrie aéronautique. D'autres domaines d'applications comme le forage pétrolier et les applications militaires ont besoin d'électronique fonctionnant avec des températures de jonction supérieures à 300°C.

Malheureusement, l'adaptation des nouvelles technologies ne consiste pas en une simple substitution de composant silicium par des composants carbure de silicium (SiC). Au niveau du composant, il faut caractériser leur comportement électrique (chute de tension directe, vitesse de commutation) à ces températures extrêmes. Au niveau de l'assemblage, le principal problème reste la tenue à haute température et aux cycles de variation de la température de l'assemblage. La différence entre les coefficients de dilatation thermique des différents matériaux de l'assemblage (puce SiC, brasure, substrat céramique, métallisation, support semelle) peut entraîner des défaillances dans les joints brasés, puis diminuer fortement la durée de vie de l'assemblage.

Le travail présenté dans ce manuscrit a pour but de pouvoir contribuer à l'évolution des technologies employées pour les modules de puissance à base de composant SiC pour des applications hautes températures.

La première partie du mémoire est consacrée à un état de l'art des composants carbure de silicium (SiC). Par la suite, une synthèse des différents constituants d'un module de puissance et différentes technologies d'assemblage à haute température est réalisée. Les différents constituants sont présentés en détail avec leurs performances et leurs limites. La fiabilité des modules de puissance est notamment présentée dans la dernière partie de ce chapitre.

Ensuite, la deuxième partie du mémoire concerne la présentation du projet SiC-HT<sup>2</sup>, puis la modélisation numérique du comportement des modules est décrite de manière détaillée avant d'aborder les simulations numériques. Ce chapitre traite également des différentes caractérisations des matériaux d'assemblage : la caractérisation électrique du composant SiC, la caractérisation mécanique des substrats céramiques et la caractérisation thermomécanique pour les différents matériaux d'assemblage.

Dans la partie suivante, une étude thermique de l'assemblage est réalisée par les méthodes expérimentales et des simulations. Notre objectif est la réalisation de véhicules de test permettant l'identification des méthodes de simulation et la modélisation des performances thermiques de l'assemblage.

Dans la dernière partie du mémoire, les vieillissements accélérés et les simulations thermomécaniques sont effectués pour étudier la fiabilité de l'assemblage. Dans un premier temps, les vieillissements accélérés sont présentés en détail, ainsi que les méthodes d'analyses et leurs résultats. Dans un deuxième temps, les simulations de ces vieillissements accélérés et les résultats sont abordés.

Enfin, nous présentons les conclusions et les perspectives que nous voyons à ces travaux de thèse.

Les travaux présentés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre du projet national SiC-HT<sup>2</sup> « Composants de puissance SiC pour applications hautes tensions et hautes températures ». Le projet SiC-HT<sup>2</sup> regroupe plusieurs acteurs industriels et académiques, ils sont détaillés dans le chapitre II du mémoire. Ce projet a pour objectif d'étudier et de développer les étapes nécessaires au procédé d'élaboration des composants de puissance SiC pour application hautes température et hautes tensions. La tâche du laboratoire d'IMS est intégrée dans le lot 4 (packaging) du projet, sur l'étude de nouveaux matériaux pour applications des modules de puissance en environnement sévère haute température par l'outil



de simulation thermique et thermomécanique. Ensuite, les résultats de simulations seront confrontés à ceux issus d'expérimentations permettant de réajuster les modèles de simulation. Cette étude devra permettre de s'orienter vers une fiabilité de la durée de vie de l'assemblage de puissance.



---

# Chapitre I : Etat de l'art des modules de puissance pour applications haute température.

---

## SOMMAIRE

1.	Introduction .....	27
2.	Contexte de l'étude.....	28
2.1	La haute température et les besoins applicatifs.....	28
2.2	Présentation des composants de puissance en SiC.....	32
3.	Constitution d'un module de puissance .....	38
3.1	Les puces semi-conductrices .....	41
3.2	L'alliage de brasage .....	42
3.3	Substrats .....	45
3.4	Semelles.....	48
3.5	Connexions électriques .....	50
3.5	Encapsulation.....	52
3.6	Les solutions de refroidissement .....	53
4.	Technologies d'assemblage à haute température .....	55
4.1	Solutions avec des brasures hautes température.....	55
4.2	Soudure par phase liquide transitoire .....	55
4.3	L'assemblage par frittage d'argent .....	56
4.4	L'assemblage par nano poteau de cuivre .....	58
5.	Fiabilité des modules de puissance .....	60
5.1	Introduction à la notion de la fiabilité et de durée de vie.....	60
5.2	Brasure haute température et basse température.....	61
5.3	Substrat céramique métallisé.....	63
5.4	Fil de câblage.....	64
5.5	Critères de choix des technologies .....	65
6.	Conclusion partielle.....	66
	Références bibliographiques .....	67

# Chapitre I : Etat de l'art des modules de puissance pour applications haute température

## 1. Introduction

Les modules de puissance sont très répandus dans les nombreux domaines, en particulier pour les applications des convertisseurs de puissance (un interrupteur bidirectionnel en courant, un onduleur ou un pont redresseur). Un module électronique de puissance est constitué de plusieurs éléments tels que des puces semi-conducteurs, des brasures, des matériaux isolants, des connexions électriques, des supports mécaniques et l'encapsulation. Les puces semi-conducteurs sont brasées sur un substrat céramique métallisé, le substrat céramique est ensuite fixé sur une semelle qui assure le maintien mécanique de l'assemblage et le transfert thermique vers la source froide. Les connexions électriques à l'intérieur du module de puissance sont assurées par des fils de câblage, ou bonding. Enfin, l'assemblage est mis en boîtier et encapsulé grâce à un gel silicone pour protéger les constituants du module de puissance des agressions externes (Figure I-1). Pour maintenir la température de jonction des composants en dessous d'une valeur critique pendant le cycle de fonctionnement, le module de puissance est fixé sur un système de refroidissement.

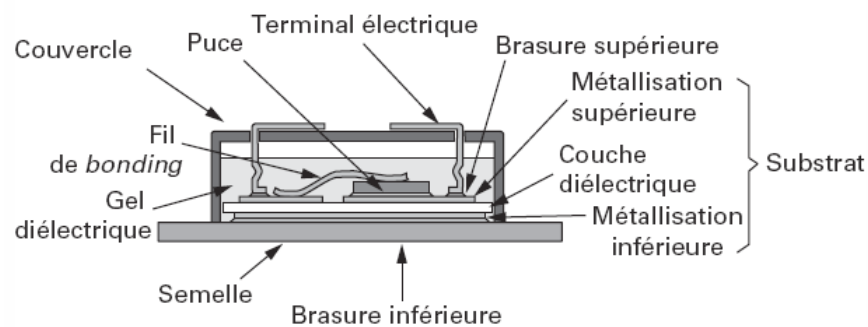


Figure I-1 : Module de puissance vue en coupe

Depuis le début des années 2000, dans de nombreux domaines tels que le ferroviaire, l'avionique et le forage pétrolier, un intérêt considérable est porté sur le développement de modules de puissance avec une densité de puissance élevée et fonctionnant à haute température (supérieure à 150°C). Pour répondre à ce besoin, des améliorations sur le conditionnement du module de puissance sont à apporter notamment grâce à l'utilisation de nouvelles technologies de brasage et de nouveaux matériaux pouvant supporter des contraintes thermiques élevées.

## 2. Contexte de l'étude

### 2.1 La haute température et les besoins applicatifs

#### 2.1.1 La haute température

Parmi l'ensemble des contraintes subies par un assemblage de puissance, la température de fonctionnement et les cycles thermiques sont généralement considérés comme des éléments fondamentaux impactant sur la fiabilité et la durée de vie des dispositifs à semi-conducteurs de puissance.

La criticité de la température conduit les fabricants à définir une limite d'emploi des modules de puissance (150 à 175°C) [Wond-99]. Cette limitation est alors fixée par les performances des matériaux, notamment les semi-conducteurs en silicium (Si).

Nous pouvons présenter la haute température comme le seuil à partir duquel la température de fonctionnement des matériaux dépasse, ou s'approche de leurs limites fonctionnelles (Figure I-2). Les températures limites sont fixées entre 150°C et 175°C pour les semi-conducteurs de puissance en Silicium(Si), et entre 500°C et 550°C pour les semi-conducteurs de puissance en Carbure de Silicium (SiC). La figure I-2 propose une comparaison des températures environnementales dans les différents types de matériaux qu'on utilise pour un assemblage de puissance.

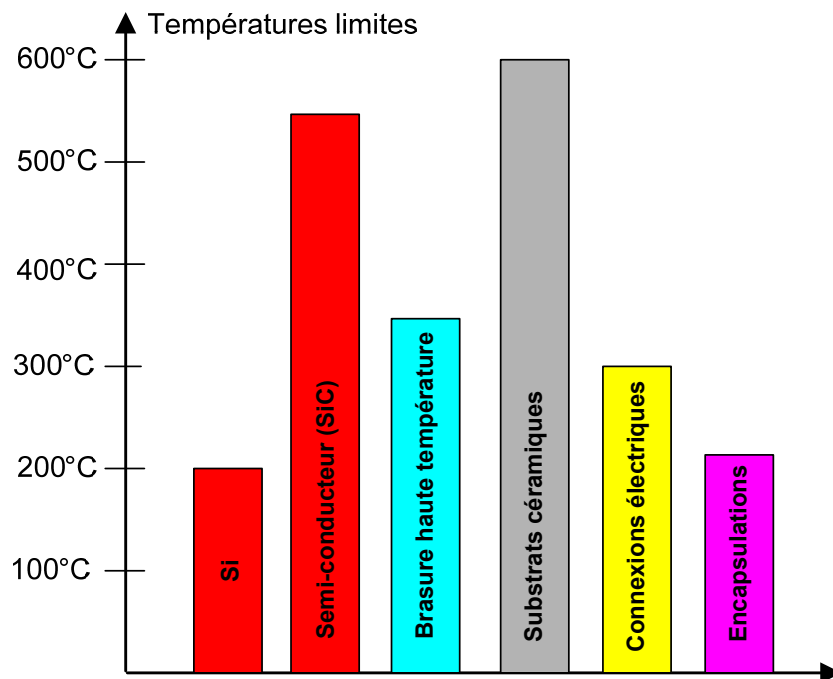


Figure I-2 : Limites en température des constituants d'un module de puissance [Wond-99, Clus-98, Kyoc-04, Plik-04, Clus-00, Amag-02]

En termes de contraintes thermiques, les modules de puissance peuvent être considérés comme étant soumis durant leur période d'utilisation, à deux champs de température distincts superposés : un champ de température externe dû au milieu extérieur (passif) (Figure I-4), et un champ de température interne provenant de l'échauffement des composants en fonctionnement (actif) (Figure I-3).

L'utilisation de système de refroidissement permet de réduire de manière significative la température dans la boîte et donc d'augmenter le niveau des températures maximales de fonctionnement. Cependant, leurs niveaux dans certaines applications atteignent des valeurs relativement élevées pouvant conduire à des défaillances prématurées. Pour la qualification des équipements destinés à de telles applications, il est d'usage de faire fonctionner leurs composants suivant des profils de puissance cycliques, représentatifs des conditions réelles d'utilisation. On parle alors de profils de cyclages actifs dont un exemple paramétré est donné à la figure I-3. Ce profil est défini par les niveaux de puissance dissipée, les temps de marche et d'arrêt.

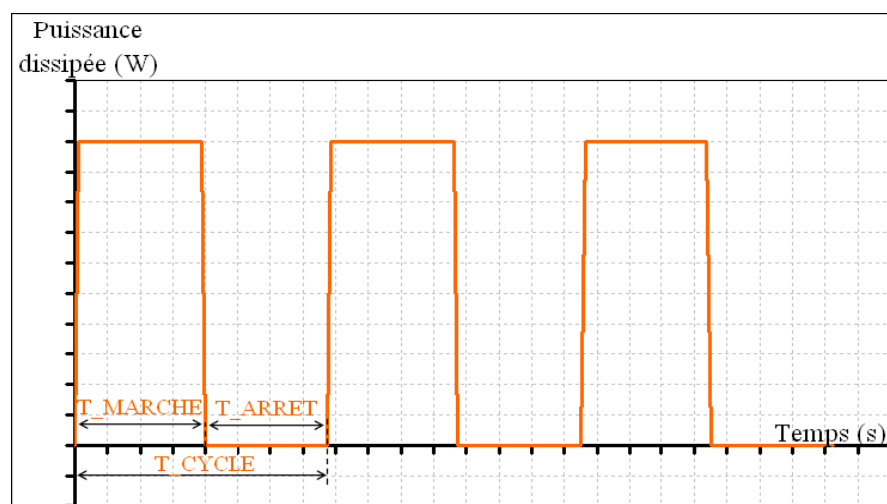


Figure I-3 : Exemple de profil paramétré de cyclage actif

## 2.1.2 Les besoins applicatifs

La haute température est l'un des enjeux principaux dans les nombreux domaines d'application pour le développement de l'électronique de puissance.

### Application aéronautique

Afin d'assurer leur bon fonctionnement, les avions actuels utilisent différentes formes d'énergies. Les avions consomment de l'énergie sous forme hydraulique, pneumatique, électrique et thermique.

De nouvelles solutions apparaissent avec la perspective d'un avion plus électrique. On assiste par exemple au remplacement des actionneurs principalement hydrauliques par des actionneurs électro-hydrauliques (Electro Hydraulic Actuators : EHA), ou électromécanique (Electro Mechanical Actuators : EMA).

Dans cette perspective, le réacteur pourrait devenir un vecteur pour la génération d'énergie électrique, à travers la mise en place de génératrices intégrées à l'arbre du réacteur. Les systèmes développés devront alors respecter les spécifications contraignantes du secteur aéronautique en termes de durée de vie. Cette évolution technologique nécessite le développement de convertisseurs de puissance robustes pour des environnements sévères (rayonnement, fort cyclage, haute température, chocs, vibrations...).

Parmi ces contraintes, le profil des sollicitations thermiques environnementales est défini à partir d'un ensemble de données expérimentales synthétisées dans la norme DO160 pour la qualification des matériels embarqués. La figure I-4 propose une extrapolation du profil des températures (passif) environnementales les plus sévères, lorsque le matériel est dans un environnement non pressurisé et non régulé en température, avec une température ambiante maximale de 200°C. Ce profil est utilisé comme référentiel des contraintes en température de cette étude, portant sur l'intégration d'un convertisseur de puissance placé sur le réacteur.

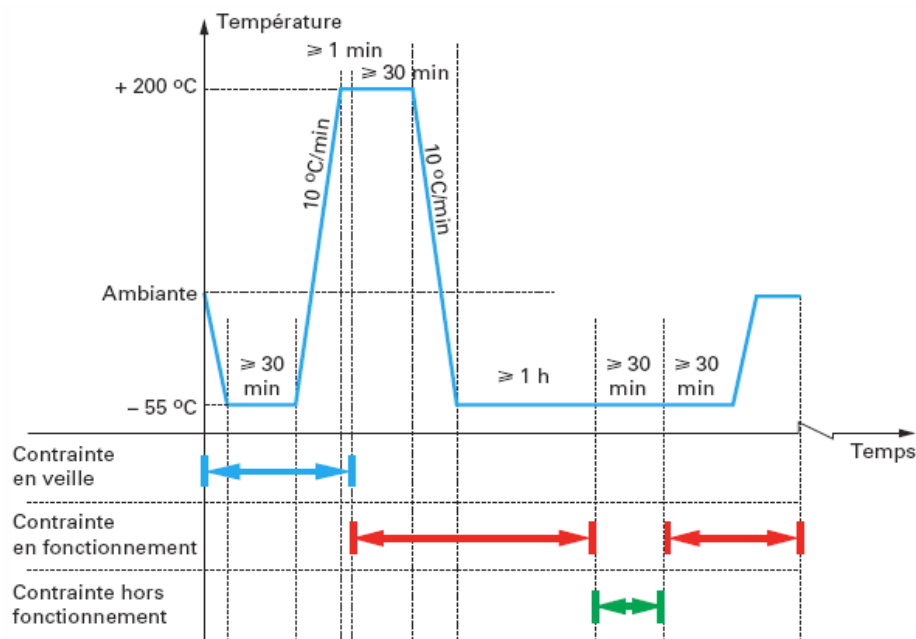


Figure I-4 : Présentation du profil des températures pour un système placé sur le réacteur (DO160)

## Domaine automobile

Le marché automobile est caractérisé par une très forte concurrence conduisant les constructeurs à proposer des véhicules de plus en plus communicant, plus confortables, et plus sécurisés.

Les efforts s'organisent pour optimiser la gestion de l'énergie, et rechercher des solutions pour atteindre ces objectifs. Une alternative peut être l'utilisation des systèmes électriques, qui, associée aux contraintes environnementales (chocs, vibrations, température...), amène à développer des solutions avec des densités de puissance élevées dans des environnements sévères.

## Autre domaines

L'utilisation de modules de puissance à semi-conducteur ne se limite pas au domaine du transport. Des ambiances sévères nous amène à présenter les applications pour le domaine particulier du forage. L'augmentation du prix du pétrole conduit à optimiser l'exploitation des gisements, avec le développement de solutions pour le forage à l'horizontale (Figure I-5). Cette alternative permet alors d'améliorer le rendement de l'extraction, tout en réduisant l'impact sur l'environnement.



Figure I-5 : Développement d'un système de forage autonome [Bosw-98]

Dans cette perspective, l'intégration de puissance est un moyen de contrôler les actionneurs, d'une puissance de quelques kilowatts sous plusieurs centaines de volts, et permettant l'orientation et / ou le déplacement de la tête de forage, à partir d'un même puits principal vers de multiples zones riches en ressources naturelles (figure I-5).

Il est cependant important de noter la singularité de ce domaine d'emploi, en grande partie conditionné par la définition d'une durée de vie relativement courte (quelques centaines



d'heures pour le forage), associée à des niveaux de contraintes sévères, avec une température ambiante élevée ( $>200^{\circ}\text{C}$ ) et des sollicitations mécaniques extrêmes (qualification des matériels : 10 000 chocs de 250g durant 2ms...) [Ging-00 ;Olde-04]. De plus, les produits développés doivent être adaptés à la géométrie particulière des matériels de forage (fût d'un diamètre total de moins de 50 cm), celle-ci conduisant à une intégration élevée des systèmes. Ce domaine d'application est un nouveau challenge vers le développement de convertisseurs de puissance adaptés aux conditions environnementales extrêmes.

Cette présentation de quelques-unes des applications utilisant l'électronique de puissance n'est certes pas exhaustive, mais elle permet de rendre compte de l'importance de développer des systèmes adaptés à la haute température et aux cyclages thermiques. Ainsi, les paragraphes suivants tentent de faire une synthèse des différentes évolutions technologiques pour le développement de convertisseurs de puissance adaptés aux fonctionnements à haute température. Cette présentation sera limitée au seul module de puissance (éléments actifs et assemblage).

## 2.2 Présentation des composants de puissance en SiC

Depuis quelques années (2001) les composants de puissance en carbure de silicium (SiC) ont commencé à être commercialisés. En particulier les diodes Schottky en SiC correspondent aujourd'hui à un marché significatif. De plus des transistors JFET de puissance en SiC sont disponibles sous forme d'échantillons industriels. Ces deux derniers composants permettent de concevoir la plupart des architectures de convertisseurs de puissance jusqu'à 2-3 kV.

Il faut toutefois souligner que 2 catégories d'applications vont tirer avantage de l'utilisation de composant SiC :

- Une première catégorie d'application correspond à l'amélioration des performances, notamment en termes d'efficacité énergétique, voire de réduction de la masse et du volume des convertisseurs des systèmes embarqués.
- La seconde catégorie correspond aux applications pour lesquelles les composants en silicium (Si) ne sont pas utilisables : **les applications hautes températures ou à hautes tensions.**

### 2.2.1 Histoire du carbure de silicium (SiC)

La découverte du SiC est attribuée à Berzelius en 1824. Sur terre, ce matériau n'existe pas sous forme naturelle. En 1905, Moissan découvrit un de ces échantillons sur une météorite.

En 1955, Lely développa une méthode de synthèse de SiC monocristallin [Lely-55]. Par la suite, cette méthode a été approfondie par **Tairov** et **Tsvetkov** [Tair-78]. Leurs travaux permettent la croissance par sublimation du SiC à partir d'un germe. Cette méthode fut nommée : méthode de Lely modifiée.

Depuis les travaux de Tairov et Tsvetkov, le SiC a eu un intérêt grandissant dans la réalisation de composants de puissance grâce à ses propriétés physiques exceptionnelles.

## 2.2.2 Propriétés du SiC

### 2.2.2.1 Cristallographie

Bien que le SiC monocristallin se compose d'autant d'atomes de silicium que d'atomes de carbone, il existe plusieurs structures cristallines suivant la disposition des atomes sur la base de la liaison Si-C. On parle alors de polytype. La figure I-6 représente un arrangement tétragonal entre un atome de carbone et quatre atomes de silicium, la distance entre deux atomes de silicium est de  $3,08 \text{ \AA}$ , et alors qu'elle est de  $1,89 \text{ \AA}$  entre un atome de silicium et un atome de carbone.

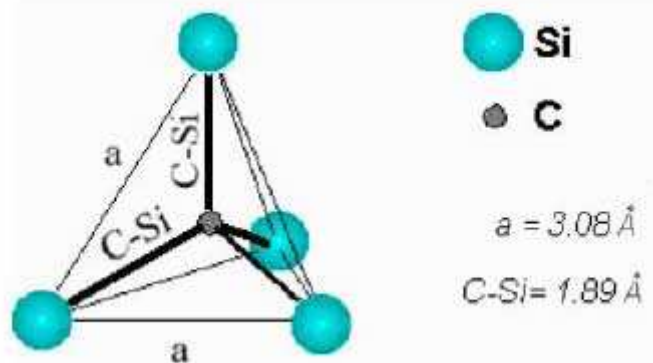


Figure I-6 : Arrangement tétragonal entre un atome de carbone et quatre atomes de silicium

Le SiC monocristallin se présente sous la forme de polytypes, il en existe environ 200 différents. Les plus utilisés en électronique de puissance sont les polytypes hexagonaux (4H et 6H). Le polytype est identifié par le nombre de plans cristallins compacts d'une séquence et le type cristallographique. Les trois polytypes les plus utilisés dans la recherche (3C, 4H et 6H) sont représentés sur la figure I-7.

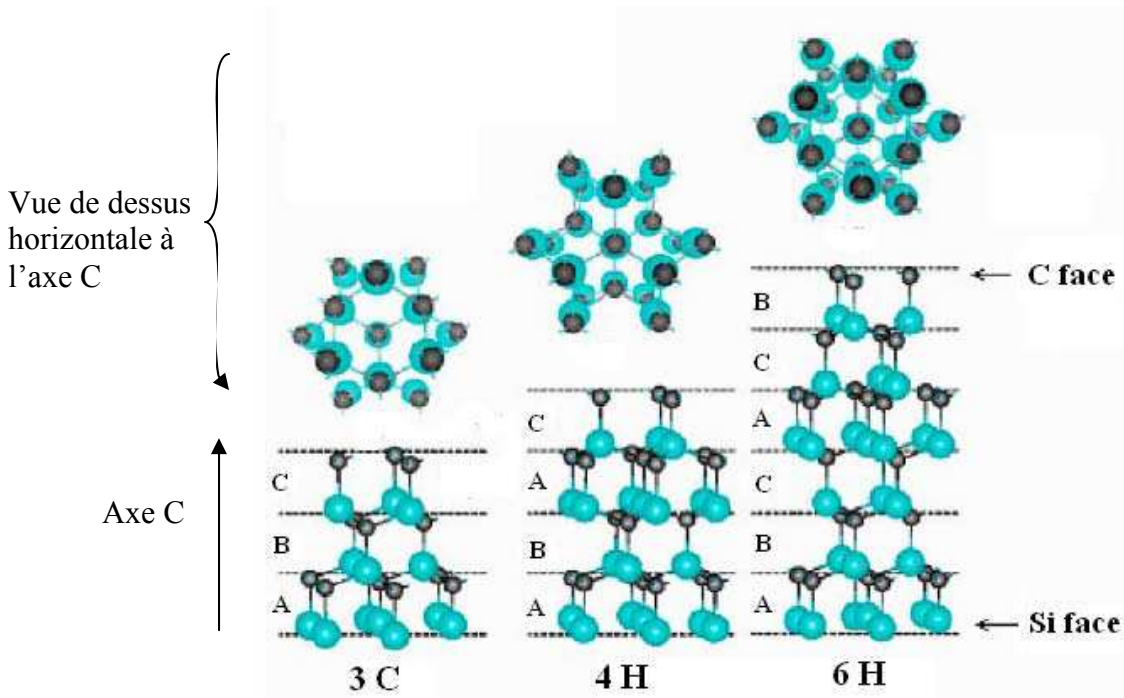


Figure I-7 : Représentation des polytypes 3C, 4H et 6H

### 2.2.2.2 Propriétés physiques du SiC

#### Pertes en conduction

Un avantage décisif des composants en SiC est la réduction des pertes à l'état passant. Le carbure de silicium, lui, possède une rigidité diélectrique dix fois plus importante que celle du silicium. Ce qui signifie que pour une tenue en tension donnée, un composant avec la même structure en SiC sera plus performant puisque l'épaisseur de la couche de drift qui tient la tension sera réduite avec un dopage plus élevé. Ces améliorations permettront donc de réaliser un composant avec un calibre en courant plus important et des pertes à l'état passant considérablement réduites. La formule suivante permet de déterminer la résistance spécifique à l'état passant d'un composant unipolaire de type n :

$$R_{ON} = \frac{4V_B^2}{\epsilon\mu_n E_C^3} \quad (\Omega.m^2) \quad \text{Equation I-1}$$

La figure I-8 montre la résistance spécifique à l'état passant en fonction de la tenue en tension :

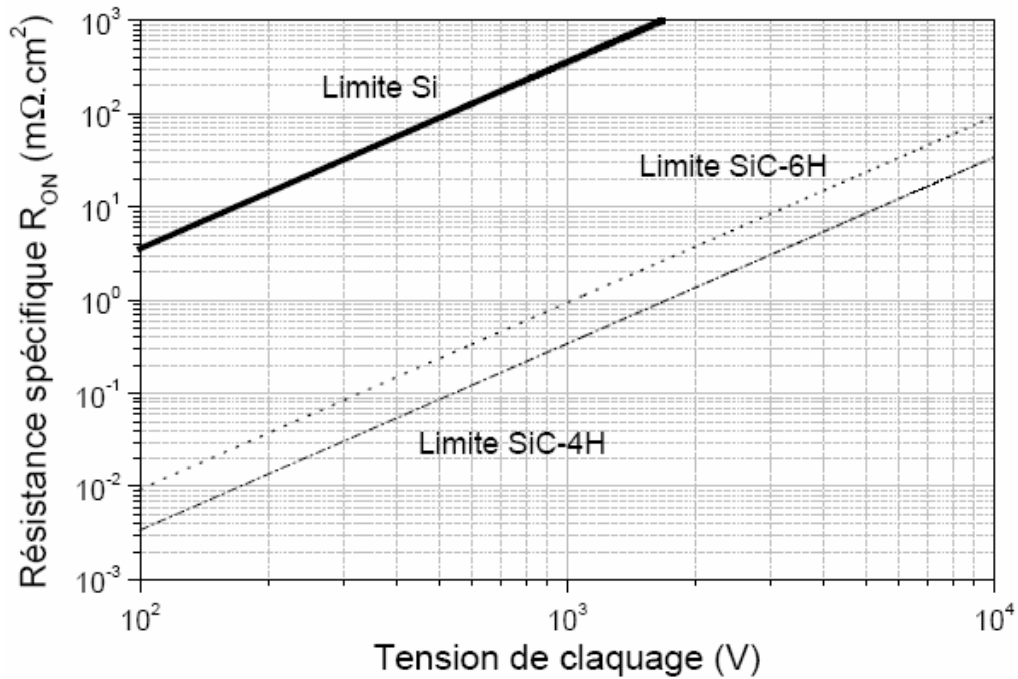


Figure I-8 : Limite de la résistance spécifique à l'état passant en fonction de la tension de claquage pour les composants Si et SiC [ICSCRM-07, ECPE-07]

Nous voyons clairement, pour une tension donnée, que la résistance spécifique à l'état passant est plus faible de trois décades en faveur du SiC (4H).

L'état de l'art actuel du refroidissement des puces par conduction thermique sans fluide correspond à une densité de puissance de 300 W/cm<sup>2</sup>. Il est clair que, pour maintenir une température de jonction compatible avec une fiabilité acceptable et une densité de courant maximale de 150A/cm<sup>2</sup>, il ne faut pas dépasser une chute de tension à l'état passant de 2V, soit une résistance d'environ 15mΩ.cm<sup>2</sup>, ce qui correspond à une tenue en tension maximale d'environ 200 V pour le silicium et 2-3 kV pour le SiC. Cela montre que si l'on veut exploiter pleinement les potentialités du SiC pour la réalisation de composants unipolaires (JFET ou MOSFET) capables de fonctionner à haute tension, il va être nécessaire d'améliorer la performance thermique du packaging au-delà de 300 W/cm<sup>2</sup>.

### Température maximale

Avec une bande interdite trois fois supérieure et un coefficient de conductivité thermique plus grand d'un facteur trois par rapport au Si, ces propriétés lui confèrent donc une plus grande capacité à fonctionner à haute température. En réunissant tous ces avantages, cela amène également à la réduction de l'encombrement des dispositifs de puissance puisque le

comportement en haute température permet de réduire de manière significative les systèmes de refroidissement.

D'une manière générale, la limite théorique en température du silicium est de 150°C pour les composants hautes tensions (tension de claquage d'environ 1000 V), contre 250°C environ pour les composants dont la tension de claquage est inférieure à 100 V [Wond-99]. La réalisation des composants hautes tensions (supérieure 200V) devant fonctionner à haute température (supérieure à 200°C) nécessite l'utilisation de matériaux semi-conducteurs à grand Gap. La figure I-9 montre les températures maximales d'utilisation théorique de différents matériaux semi-conducteurs, en fonction de la tension de claquage, lorsque le courant de génération thermique est pris comme limite en température.

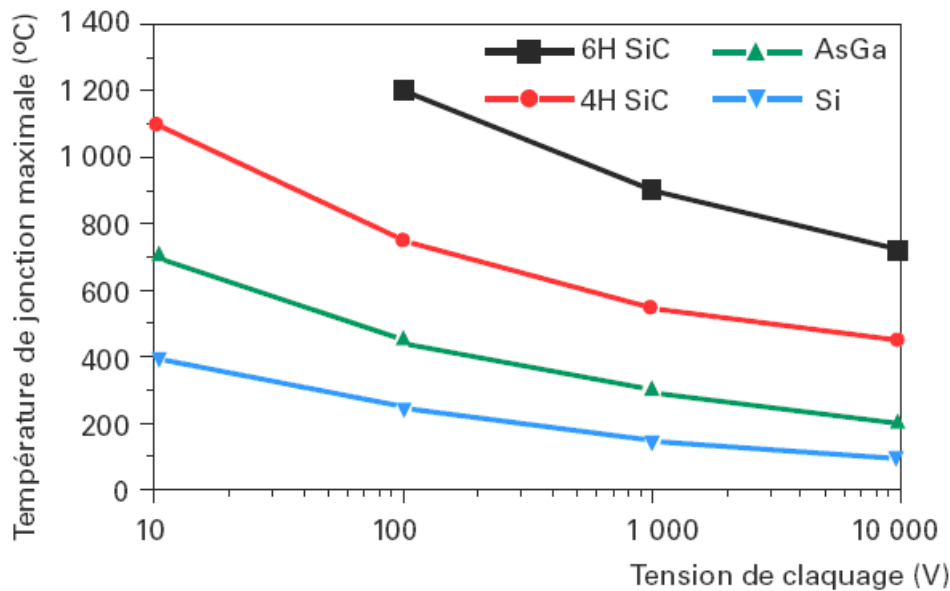


Figure I-9 : Tenue en tension de matériaux semi-conducteurs en fonction de la température [Wond-99, Rich-05, Diah-07, Berg-08, Mena-08]

### L'évolution de la taille des Wafers et des composants

La figure I-10 compare l'évolution de la taille des wafers SiC, reflet de la montée en puissance des composants réalisés, à ceux en Si et en GaAs. Toutefois, les difficultés rencontrées pour la mise en œuvre de wafers SiC, présentant un taux de défauts encore trop élevé, ainsi que les difficultés de passivation, de tenue d'oxydes, limitent toujours le développement de composants SiC de forte puissance.

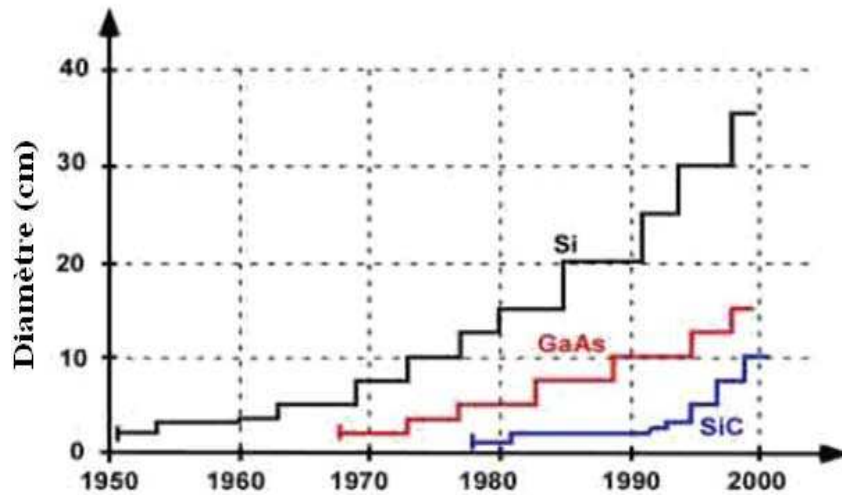


Figure I-10 : Comparaison des tailles de wafers de qualité équivalente pour le Si, SiC et AsGa [Rich-04]

L'augmentation du niveau d'intégration des modules de puissance conduit à développer de nouvelles solutions d'intégration. En effet, les besoins en densité de courant, en tension, et en gestion thermique laissent apparaître des limitations quant à l'utilisation des solutions d'assemblage conventionnelles. La figure I-11 présente un exemple d'intégration de composants «tout-SiC», en comparaison avec la solution «tout-Si» conventionnellement utilisée.

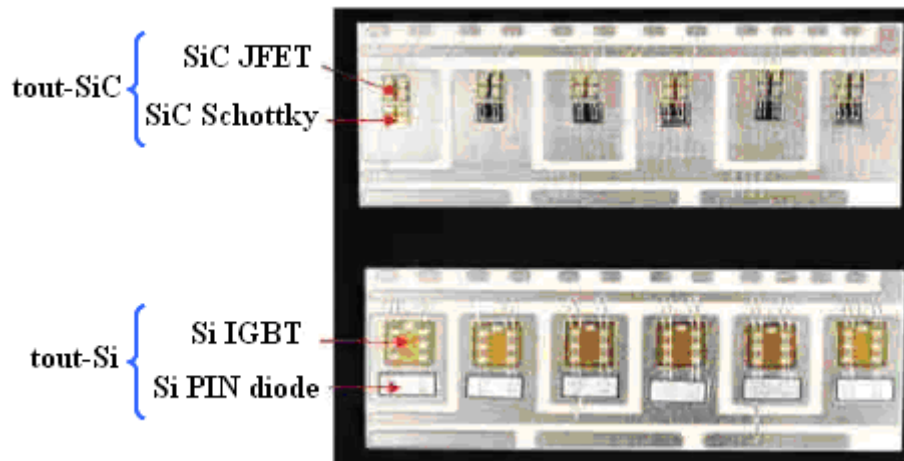


Figure I-11 : Comparaison les tailles de composant entre un onduleur tout-SiC et un tout-Si [Chan-03]

La réduction de la taille des éléments actifs confirme l'augmentation incontournable de la densité de puissance des convertisseurs du futur.

### 3. Constitution d'un module de puissance

#### Panel des technologies d'assemblage actuellement utilisées

Le domaine de développement des technologies grand public renforce la tendance des fabricants à choisir des solutions de miniaturisation et de densification des systèmes et circuits en accord avec les impératifs de la demande client. Le domaine de recherche essentiel pour satisfaire à cette demande, est celui parfois trop négligé du « packaging ». L'assemblage représente la part la plus importante du volume occupé par la fonction électronique, et ce quel que soit le domaine d'application de cette fonction. Le schéma suivant (Figure I-12) représente la classification standard des différents niveaux de packaging auxquels sont confrontés les fabricants de produits électroniques.

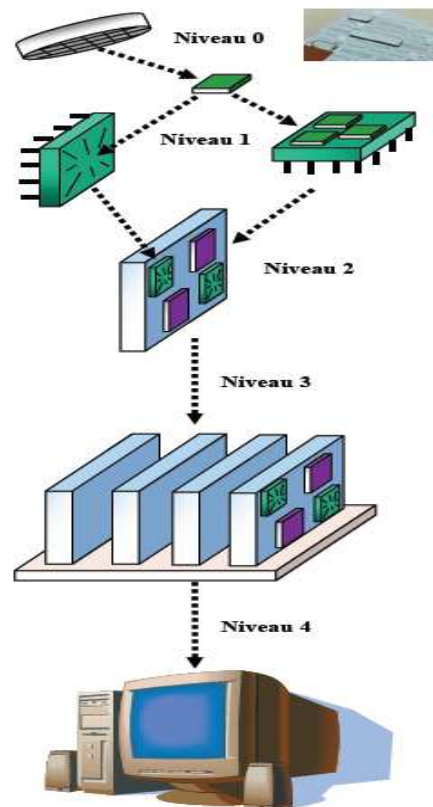


Figure I-12 : Hiérarchie d'assemblage en électronique [Peyr-06]

La structure des différents types d'assemblage menant à l'élaboration d'un système complet réalisant l'interface homme-électronique peut se définir selon quatre principaux niveaux d'interconnexion :

- Niveau 0 : Prise de connexion de la puce, permettant aux signaux de la puce, de sortir du silicium (bonding ou flip-chip)

- Niveau 1 : Liaisons puces – extérieur, assurant les deux fonctions (alimentation et transfert de signaux). Il s'agit principalement du type de conditionnement de la puce électronique à encapsuler (boîtiers).
- Niveau 2 : Liaison des éléments de premier niveau sur des substrats et des cartes (PCB) permettant d'associer des fonctions complexes entre elles.
- Niveau 3 : Association des cartes de niveau 2 en systèmes accessibles à l'utilisateur. C'est le niveau assurant l'interface Homme-Machine.

Le principal but de la conception d'assemblage en électronique est d'assurer les fonctions suivantes :

- Alimenter en énergie le circuit afin d'assurer son fonctionnement.
- Distribuer les signaux vers la puce et permettre la sortie de ces signaux vers l'extérieur de la puce.
- Evacuer les calories générées par le fonctionnement propre de la puce.
- Protéger le circuit intégré des environnements hostiles.

### Module électronique de puissance

Un module électronique de puissance est considéré comme un circuit de puissance constitué de plusieurs éléments tels que des puces semi-conducteurs (éléments actifs) assurant la fonction électrique, d'un substrat isolant permettant à la fois l'isolation électrique et l'évacuation des calories dissipées (pertes dans les puces), et joue le rôle de circuit imprimé. L'ensemble est ensuite reporté sur le refroidisseur par l'intermédiaire d'un support métallique (semelle), ce qui assure le maintien mécanique de l'assemblage et le transfert thermique vers la source froide. Les connexions électriques à l'intérieur du module de puissance sont généralement assurées par des fils de câblage, ou bonding. Enfin, l'assemblage est mis en boîtier et encapsulé grâce à un gel silicone pour protéger les constituants du module de puissance des agressions externes. (Figure I-13).



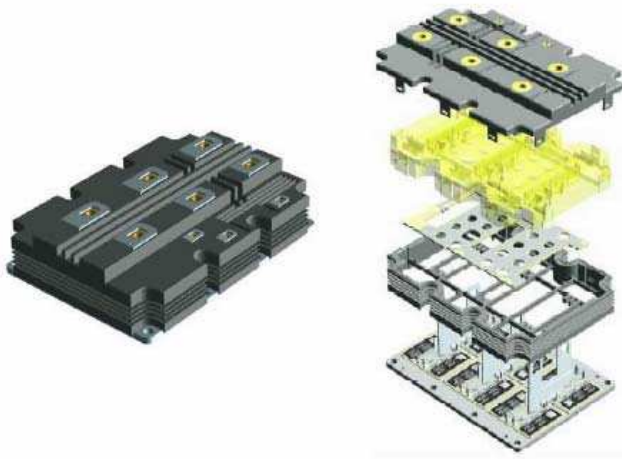


Figure I-13 (a) : Vue éclatée d'un module de puissance 6,5 kV- 1200 A [Bour-06]

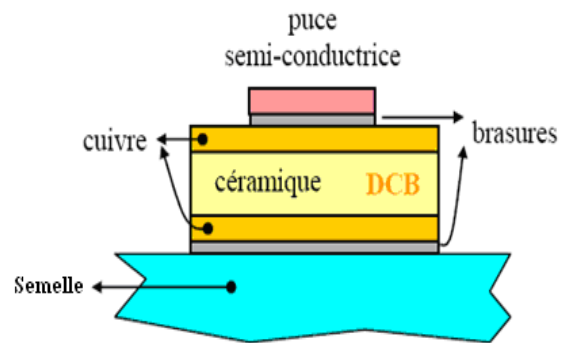


Figure I-13 (b) : Une représentation simplifiée d'un module de puissance [Alla-05]

L'intégration de puissance est habituellement présentée en trois sous-ensembles:

- Les éléments semi-conducteurs (packaging niveau 0)
- L'assemblage, composé du substrat isolant métallisé, de la semelle, des connexions électriques, et des brasures permettant le maintien mécanique de l'ensemble (packaging niveau 1).
- La protection du dispositif avec le boîtier et le gel (packaging niveau 2).

Le cas de la brasure est particulier car elle assure plusieurs fonctions simultanément. En effet, elle permet l'assemblage des différents constituants, et participe à la circulation du flux thermique entre les éléments actifs et la semelle. De plus, elle assure la connexion entre le semi-conducteur et le substrat métallisé relié aux connexions de puissance extérieures.

De la même manière, le substrat assure d'une part une isolation électrique entre les éléments actifs et la semelle, et doit d'autre part permettre l'évacuation des pertes vers la semelle.

Cet assemblage complexe est soumis à de nombreuses contraintes lors de son utilisation. Le niveau potentiellement élevé de la température, auquel s'associe un cyclage thermique (passif ou actif), conduit à de nombreuses modifications touchant l'ensemble des constituants du module de puissance.

- Dégradation des propriétés électriques
- Dégradation des propriétés thermiques
- Dégradation des propriétés mécaniques

Dès lors, les performances des modules puissance sont fortement diminuées.

### 3.1 Les puces semi-conductrices

Les puces sont les éléments actifs d'un assemblage de puissance. Elles sont composées d'un matériau semi-conducteur de quelques centaines de micromètres d'épaisseur, associé à deux métallisations, dont l'une sur la face arrière permet le brasage avec le support métallisé du substrat isolant, l'autre sur la face supérieure où sont réalisées les interconnexions électriques (fils de câblage).

Les semi-conducteurs ont connu une grande évolution : des thyristors aux GTO (Gate Turn Off Thyristor) pour enfin arriver à l'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) qui est l'interrupteur de base de la plupart des convertisseurs actuels [Shen, Chap, Lecl-94, Letu-99] (Figure I-14).

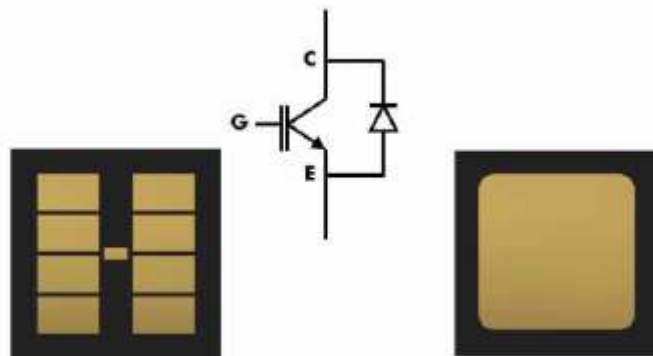


Figure I-14 : IGBT 3,3 kV, 50 à 100 A & Diode 3,3 kV, 100A [Bour-06]

Les puces semi-conductrices peuvent être fabriquées à partir de plusieurs types de matériaux tels que le silicium (Si), le carbure de silicium (SiC), le nitrure de gallium (GaN) ayant des propriétés bien différentes (Tableau I-1)

Matériaux	Energie de Gap (eV)	Conductivité thermique (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Tenue diélectrique (kV.cm <sup>-1</sup> )	Mobilité électron (cm <sup>2</sup> /v.s)	Mobilité Trous (cm <sup>2</sup> /v.s)
Si	1,1	150	200	600	600
SiC-3C	2,2	450	1200	-	-
SiC-4H	3,26	450	2000	600-750	115
SiC-6H	3	450	2400	50-370	101
GaN-3C	3,27	130	1000	1000	850
GaN-2H	3,29	130	3300	900	850
Diamant	5,45	2000-2200	5600	1900	850

Tableau I-1 : Propriétés physiques des matériaux semi-conducteurs à 25°C [Nall-02, Diah-07]

A l'heure actuelle, le besoin d'augmenter la densité de puissance ainsi que le fonctionnement à haute température conduisent à un intérêt croissant pour les composants de puissance grand gap. Les composants à base de carbure de silicium présentent des propriétés très prometteuses. Ce nouveau matériau ouvre, des perspectives très intéressantes pour des puces semi-conductrices. Ses paramètres caractéristiques permettent d'obtenir :

- Un champ électrique de claquage huit fois plus grand que celui du silicium
- Une conductivité thermique et une énergie de gap trois fois plus grande que celles du silicium

Les diodes Schottky SiC haute température (600 et 1200V) et les transistors JFET haute température sont aujourd'hui disponibles dans le commerce. Le développement des puces SiC a été initialement fortement ralenti par le niveau élevé de défauts dans les wafers, interdisant des rendements de fabrication élevés.

### 3.2 L'alliage de brasage

L'assemblage d'un module de puissance est assuré par des brasures entre chacun des constituants (semi-conducteurs, substrat céramique, connexions, semelle). Spécifiquement dans le domaine de l'intégration de puissance, les brasures des puces et des connecteurs sur le substrat assurent le maintien mécanique, permettant la circulation du flux thermique, ainsi que la bonne qualité du contact électrique. La connectique externe de puissance peut aussi être concernée par cette opération. La brasure est donc l'un des acteurs essentiels pour assurer la fiabilité d'un module de puissance.

L'assemblage par brasage consiste à assembler deux solides à l'aide d'un alliage de brasure de température de fusion bien inférieure à celle des deux solides à assembler.

L'assemblage par brasure entre des éléments du module est réalisé selon l'ordre suivant (Figure I-15) :

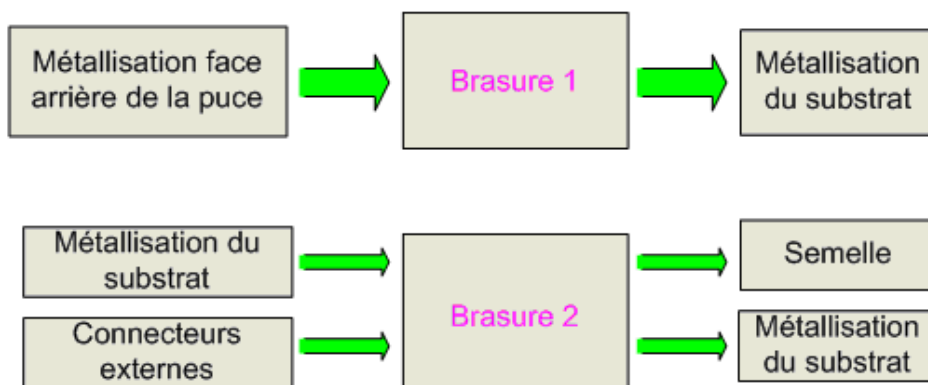


Figure I-15 : L'ordre de brasure entre des éléments du module de puissance

La brasure 1 est la brasure haute température, la température de fusion est supérieure à 250°C, on utilise généralement Sn<sub>5</sub>Pb<sub>95</sub>, Pb<sub>95.5</sub>Ag<sub>2.5</sub>Sn<sub>2</sub>, Au<sub>80</sub>Sn<sub>20</sub>, Au<sub>88</sub>Ge<sub>12</sub> ou Au<sub>97</sub>Si<sub>3</sub> pour la brasure haute température. La brasure 2 est la brasure basse température, la température de fusion est inférieure à 250°C, on utilise généralement Sn<sub>97</sub>Ag<sub>3</sub> ou Sn<sub>96.5</sub>Ag<sub>3</sub>Cu<sub>0.5</sub>.

L'assemblage de la face arrière des puces sur le substrat et du substrat sur la semelle est effectué par des brasures dont l'épaisseur varie entre quelques dizaines et une centaine de micromètres.

Le brasage de deux éléments s'opère de la façon suivante :

- dépôt de la pâte à braser entre les deux éléments par sérigraphie.
- refusion de l'ensemble suivant le profil (Figure I-16) adapté à une température au moins égale à la température « liquidus » de l'alliage (température à laquelle l'alliage est totalement fondu). Le contrôle du profil de refusion permet de limiter la formation d'intermétalliques qui fragilisent la brasure ;
- refroidissement jusqu'à la température ambiante.

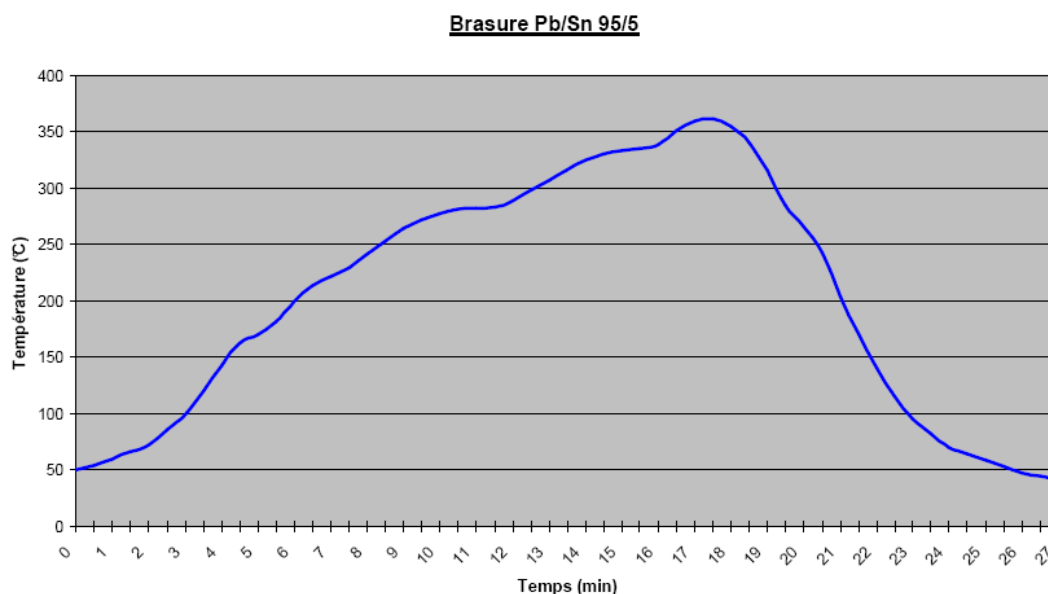


Figure I-16 : Exemple de profil de refusion d'un alliage Sn<sub>5</sub>Pb<sub>95</sub> [HCM]

Selon l'ordre du procédé de brasure (Figure I-15), les puces sont tout d'abord fixées sur le substrat par la brasure 1, et la brasure 2 assure par la suite l'assemblage entre le connecteur externe sur le substrat ou le substrat sur la semelle. La température « liquidus » de la brasure 2 doit être inférieure d'au moins 40°C de celle de la première afin d'éviter sa refusion. Les températures de fusion pour assurer que l'opération de brasage soit sélective, sont généralement [Shen] :

- Entre 200 – 350°C pour la brasure 1
- Entre 160-270°C pour la brasure 2

L'alliage utilisé pour réaliser cette brasure doit satisfaire plusieurs critères que sont :

- Bonne mouillabilité entre les différents matériaux (cuivre, aluminium, silicium ou SiC...).
- Faible résistivité électrique pour l'assemblage de la puce semi-conductrice (circulation du courant vers la puce).
- Bonne conductivité thermique pour assurer l'évacuation des calories dissipées au sein des puces.
- Un coefficient de dilatation thermique (CDT) proche des éléments assemblés.
- Bonne tenue mécanique de la brasure.

### 3.2.1 Brasures traditionnelles basse et haute température

En électronique, l'alliage le plus souvent utilisé pour la brasure est le composé étain / plomb, et plus particulièrement le  $\text{Sn}_{63}\text{Pb}_{37}$  dont la température de fusion est modérée (183 °C). Toutefois, l'alliage  $\text{Sn}_{63}\text{Pb}_{37}$  n'est pas adapté pour des applications haute température car sa température de refusion n'excède pas 200 °C. Pour le domaine de la haute température (supérieure à 200 °C), des alliages à très forte teneur en plomb sont nécessaires. À titre d'exemple, on peut citer l'alliage  $\text{Pb}_{95,5}\text{Ag}_{2,5}\text{Sn}_2$  dont la température de refusion maximale est de 300°C. Le tableau I-2 récapitule les propriétés physiques de quelques alliages Sn/Pb.

Alliage	Température de fusion (°C)	CDT (ppm/°C)	Conductivité thermique (W/m.K)	Module d'Young (GPa)	Résistivité électrique ( $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ )
$\text{Sn}_{63}\text{Pb}_{37}$	183	25	51	16	14,5
$\text{Pb}_{95,5}\text{Ag}_{2,5}\text{Sn}_2$	300	30	23	13.8	28.6
$\text{Sn}_5\text{Pb}_{95}$	308	28,9	133,84	16	

Tableau I-2 : Propriétés physiques d'alliage étain/plomb à 25°C [Indi]

### 3.2.2 Brasures sans plomb basse et haute température

Le plomb est un métal lourd très toxique, il peut causer des dommages sur le système nerveux et sur la circulation sanguine. Une directive européenne RoHS (Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electric equipment) est entrée en vigueur en 2006 sous l'égide du Parlement européen. Cette directive vise à réduire l'utilisation de

substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques, dont le plomb. Elle ne s'applique pas encore aux secteurs tels que l'avionique, l'automobile et le militaire.

La majorité des alliages sans plomb utilisables en électronique contiennent de l'étain (Sn) qui en est souvent le principal constituant. L'étain fondant à 232°C, des éléments d'alliage tels que le bismuth (Bi), l'indium (In), le zinc (Zn), le cuivre (Cu) ou l'argent (Ag) lui sont rajoutés pour diminuer la température de fusion [Gued-05].

Le tableau I-3 présente une synthèse des principaux alliages sans plomb, en comparaison avec l'alliage eutectique de référence Sn<sub>63</sub>Pb<sub>37</sub>.

Alliage	Température de fusion (°C)	CDT (ppm/°C)	Conductivité thermique (W/m.K)	Module d'Young (GPa)	Résistivité électrique (μΩ.cm)
Sn <sub>63</sub> Pb <sub>37</sub>	183	25	51	16	14,5
Sn <sub>99,3</sub> Cu <sub>0,7</sub>	227				10 à 15
Sn <sub>96,5</sub> Ag <sub>3,5</sub>	221	22	33 @ 85°C		12,3
Sn <sub>96,5</sub> Ag <sub>3</sub> Cu <sub>0,5</sub>	222	23	55		10 à 15
Au <sub>80</sub> Sn <sub>20</sub>	280	16	58	68	15,93
Au <sub>88</sub> Ge <sub>12</sub>	356	13	44 @ 85°C	73	
Au <sub>97</sub> Si <sub>3</sub>	363	12	27 @ 85°C	83	

Tableau I-3 : Exemple de quelques alliages sans plomb à 25°C [Indi, Gued-05, Mena-08, Copp-07]

Les deux alliages binaires qui suscitent le plus d'intérêt sont les alliages Sn<sub>96,5</sub>Ag<sub>3,5</sub> et Sn<sub>96,5</sub>Ag<sub>3</sub>Cu<sub>0,5</sub>. L'alliage Sn<sub>96,5</sub>Ag<sub>3</sub>Cu<sub>0,5</sub> semble être un des meilleurs candidats au remplacement de l'eutectique SnPb. Il réalise un compromis entre ses qualités et son coût.

Pour des applications où les températures sont très supérieures à 200 °C, les brasures à base d'or comme l'alliage Au<sub>80</sub>Sn<sub>20</sub> pourraient supporter ces niveaux de contraintes thermiques. L'alliage AuSn semble aussi être un bon candidat pour les assemblages en haute température.

### 3.3 Substrats

Le substrat intègre les pistes conductrices et assure une **isolation électrique** entre les parties actives du module (semi-conducteurs, métallisations d'interconnexion ...), et le support sur lequel le module de puissance est placé. Il doit aussi favoriser l'extraction des calories des puces vers le système de refroidissement. Enfin, son rôle d'un point de vue thermomécanique est d'homogénéiser les coefficients de dilatation thermique (CDT) entre la

semelle et les puces. Pour remplir cette fonction, il existe plusieurs alternatives : les diélectriques organiques et les céramiques.

Les études de robustesse réalisées sur les substrats organiques démontrent une limite de température d'utilisation inférieure à 180°C dans la majorité des cas, les substrats céramiques sont un choix naturel pour les applications à haute température.

De nombreux substrats céramiques sont aujourd'hui disponibles ( $Al_2O_3$ , AlN,  $Si_3N_4$ ), associés à des métallisations en cuivre ou en aluminium (sur céramique AlN).

L'isolation électrique par un substrat céramique métallisé permet de développer des systèmes aux spécifications thermiques et électriques adaptées aux besoins de l'intégration de puissance. Le principe en est d'associer un isolant céramique (Nitrure de silicium  $Si_3N_4$ , Nitrure d'aluminium AlN, Alumine  $Al_2O_3$ ...) à de fines couches métallisées (principalement en cuivre, ou aluminium) sur chacune des deux surfaces, comme présenté dans la figure I-17.



Figure I-17: Substrat céramique avec des métallisations

Le choix de la céramique, dont les principales performances sont présentées dans le tableau I-4, se fait entre l'alumine ( $Al_2O_3$ ), le nitrure d'aluminium (AlN), et le nitrure de silicium ( $Si_3N_4$ ). Les propriétés de l'oxyde de béryllium (BeO) sont données à titre indicatif, son utilisation étant extrêmement restreinte en raison de sa toxicité, et d'un coût dix fois supérieur à celui de l' $Al_2O_3$ .

Matériaux	CDT (ppm/°C)	Conductivité thermique (W/m.K)	Module d'Young (GPa)	Contrainte maximale à la flexion (MPa)	Tension de claquage (kV/mm)
$Al_2O_3$	7,5-8,1	20-30	300-400	250-300	11-16
AlN	4,2-5,2	170-260	300-310	300-500	14-17
$Si_3N_4$	2,7-3,4	60	300	>700	15
BeO	6,8-7,5	250	300-350	170-250	10-14

Tableau I-4 : Caractéristiques des propriétés physiques des céramiques isolantes [Clus-98 ;Lost-00 ; Kyoc-04]

### 3.3.1 Substrats Céramiques AlN

Les [Miya-90] fait une comparaison des caractéristiques principales pour les céramiques plus utilisées, et il met en avant les propriétés exceptionnelles de l'AlN, notamment sa conductivité thermique et ses propriétés diélectriques :

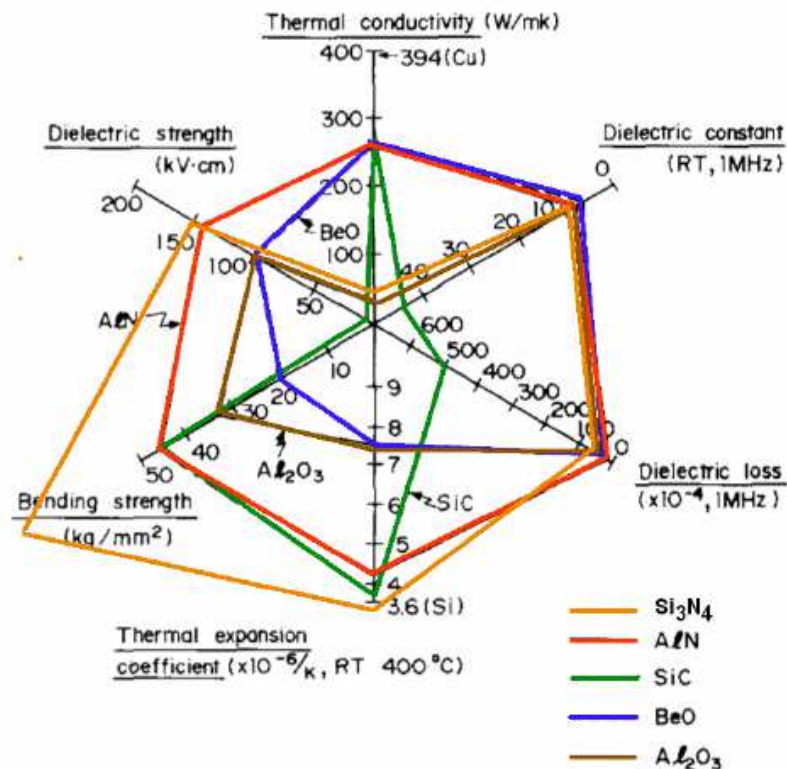


Figure I-18: Comparaison des caractéristiques principales pour les céramiques les plus utilisées [Miya-90]

Le Nitrure d'Aluminium(AlN) métallisé avec une fine couche d'aluminium, comme présenté dans la figure I-19, et d'apparition beaucoup plus récente, avec un coût comparable à celui de l'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Sa conductivité thermique est d'environ 10 fois celles de l'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, il permet un gain important de la réduction de la résistance thermique et donc une augmentation des densités de puissance dans les assemblages ainsi qu'une diminution de l'amplitude d'élévation de la température [Mitic-99]. L'AlN présente une très bonne rigidité diélectrique (17 kV.mm<sup>-1</sup>).



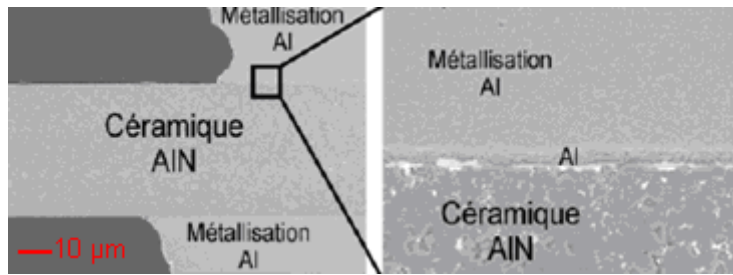


Figure I-19: Substrat céramique AlN avec la métallisation Al [Dupont-06]

### 3.3.2 Substrats céramique $\text{Si}_3\text{N}_4$

Pour les applications à fortes amplitudes de cyclages thermiques, de nombreux fournisseurs proposent aujourd'hui des substrats en Nitrure de Silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Le principal intérêt des substrats en nitrure de silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) consiste en leur très grande résistance mécanique, son excellente tenue mécanique et son coefficient de dilatation thermique très proche de celui du carbure de silicium (SiC).

Cette propriété de grande résistance mécanique leur permet, d'autre part, un assemblage directement sur le dissipateur sans que l'on ait recours à une semelle rigide épaisse, permettant l'élimination de la brasure de grande surface correspondante. Le développement de substrats DCB sur  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ne semble cependant pas possible, et leur réalisation nécessite de venir braser, par l'intermédiaire d'une brasure très haute température Ag-Cu, le cuivre (Cu) sur la céramique (figure I-20). On parle alors de substrats AMB (Active Metal Brazing).

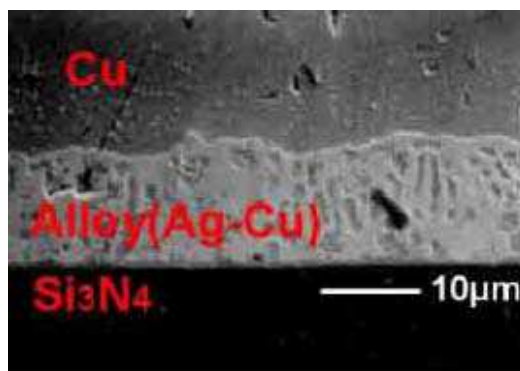


Figure I-20: Assemblage AMB (Céramique  $\text{Si}_3\text{N}_4$  métallisation Cu) [Kyoc-04]

## 3.4 Semelles

### 3.4.1 Fonction

La semelle est brasée sur la métallisation inférieure du substrat céramique puis assemblée sur le système de refroidissement. Elle assure le maintien mécanique de l'assemblage. Par ailleurs, elle doit avoir de bonnes propriétés mécaniques (un coefficient de dilatation thermique proche des constituants de l'assemblage, une bonne rigidité et un faible poids...) et

thermiques (une bonne conductivité thermique...). L'épaisseur typique d'une semelle est de quelques millimètres.

### 3.4.2 Matériaux utilisés pour les semelles

Les matériaux utilisés pour la réalisation des semelles sont le cuivre qui est souvent employé dans les assemblages de module de puissance où le facteur économique est important. Néanmoins, ses propriétés mécaniques rendent son utilisation critique lors de cycles thermiques de grande amplitude, avec un coefficient de dilatation thermique très éloigné de ceux des autres constituants de l'assemblage. Des matériaux plus récents, comme l'AlSiC (matrice d'aluminium renforcée de particules de carbure de silicium), le cuivre molybdène (CuMo), ou les composites CuC (carbure de cuivre). Les propriétés physiques de ces différents matériaux sont présentées dans le Tableau I-5 :

	<b>Cu</b>	<b>Al</b>	<b>Cu<sub>60</sub>C<sub>40</sub></b>	<b>Al<sub>37</sub>SiC<sub>63</sub></b>
<b>Densité (g/cm<sup>3</sup>)</b>	8.9	2.7	6	4
<b>Module d'Young (GPa)</b>	130	70	75	230
<b>Conductivité thermique (W/m.K)</b>	400	218	360 (plan) 140 (verticale)	175
<b>Coefficient de dilatation (ppm/°C)</b>	17	23	9-10 (plan) 17 (verticale)	8

Tableau I-5 : Propriétés physiques de quelques matériaux pour la semelle [Copp-07, Zweb-06, Saum, ICMCB]

Le cuivre (Cu) a été très employé, en raison de sa conductivité thermique élevée, sa facilité de mise en forme, et son coût relativement faible, mais son coefficient de dilatation est élevée (17 ppm/°C) par rapport aux substrats céramiques.

Le coefficient de dilatation thermique de l'Al<sub>37</sub>SiC<sub>63</sub> (8 ppm/°C) est compatible avec ceux de substrats diélectriques couramment employés dans les modules de forte puissance, mais la conductivité thermique de l'Al<sub>37</sub>SiC<sub>63</sub> est la moitié de celle du Cu.

Les composites CuC, ont une très bonne conductivité thermique (360 W/m.K), avec des rigidités mécaniques relativement élevées et des coefficients de dilatation (9-10 ppm/°C) proches de ceux des substrats.

### 3.5 Connexions électriques

Il y a deux types de connexions électriques dans un module de puissance :

- Les connexions internes, assurant la circulation du courant de puissance et de commande au sein du module de puissance,
- Les connexions externes, permettant de raccorder électriquement le module de puissance (figure I-21).

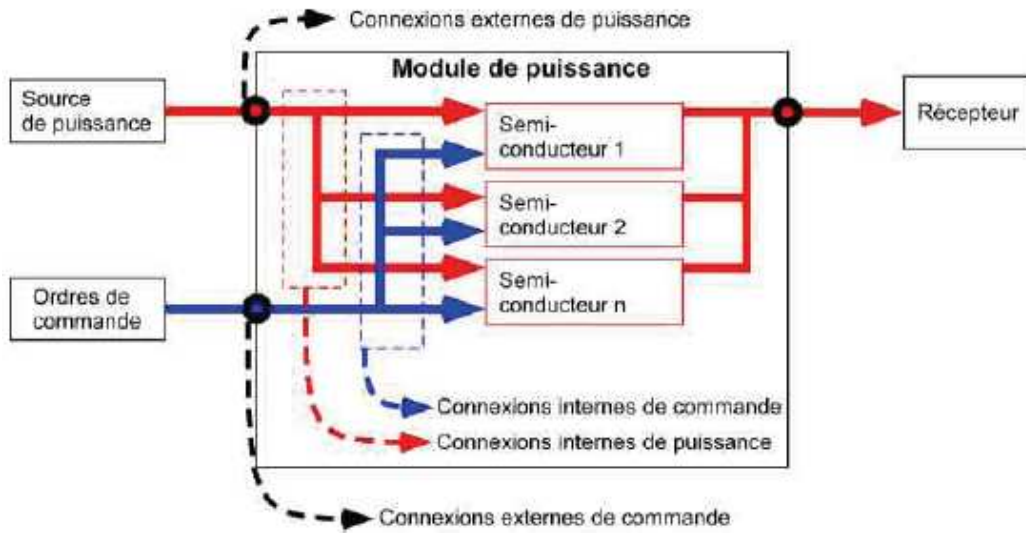


Figure I-21: Présentation des besoins élémentaires de connexions pour un module de puissance.

#### Les connexions externes

La connexion entre le module de puissance et l'extérieur est traditionnellement réalisée par l'intermédiaire d'un connecteur brasé sur la métallisation du DBC (Figure I-22).

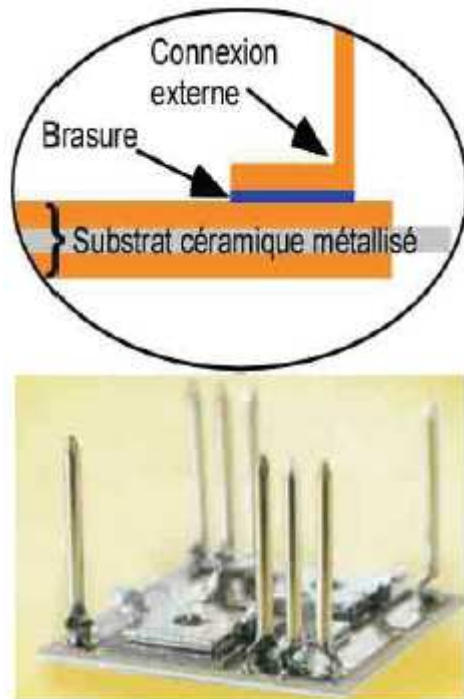


Figure I-22 : Connecteurs externes brasés sur la métallisation du substrat [Schu-00]

#### Les connexions internes

Les liaisons électriques au sein du module sont habituellement réalisées par des fils en aluminium, soudés généralement par ultrason à température ambiante (fils de bonding), et d'une section comprise entre 100 et 500 $\mu\text{m}$  [Amro-05] dans le cas de module de puissance (figure I-23).

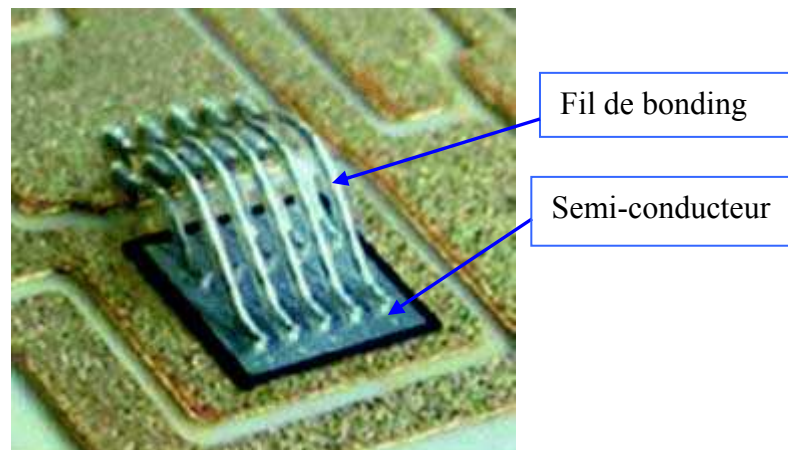


Figure I-23 : Connexion électrique par fils de bonding sur la métallisation d'un semi-conducteur [Amro-05]

La composition des fils de bonding diffère selon les fabricants. Les fils de bonding, parcourus par de forts courants à des fréquences de plus en plus élevées, sont associés en parallèle afin de limiter leur auto-échauffement. Ainsi, les densités de courant évaluées dans les fils de bonding de 300 $\mu\text{m}$  de diamètre d'un module de puissance s'élèvent à 8 kA/cm<sup>2</sup>, soit

encore loin des limites fonctionnelles de l'aluminium de l'ordre de 30 à 35 kA/cm<sup>2</sup>, pour une longueur de 1cm dans l'air.

Pour des courants importants dans une puce, les fils de bonding mis en parallèle peuvent être remplacés par un ruban (Figure I-24). Bien qu'il soit moins flexible qu'un fil de bonding, le ruban offre des performances électriques intéressantes. De plus, sa mise en place sur une métallisation d'une puce est moins coûteuse que celle de plusieurs fils de bonding. Le ruban, généralement en aluminium, a une épaisseur de quelques centaines de micromètres et une largeur de quelques millimètres. Pour éviter la corrosion de l'aluminium, des rubans en Al/Ni ont été réalisés [Onuk-02]. Par ailleurs, pour minimiser les contraintes thermomécaniques dans le ruban dues aux différences des coefficients de dilatation entre l'aluminium et le silicium, des rubans en aluminium (50 µm d'épaisseur) recouverts de cuivre (150 µm d'épaisseur) ont été développés [Luec-04]. Le cuivre a un coefficient de dilatation plus proche du silicium et du carbure de silicium (SiC) que l'aluminium.

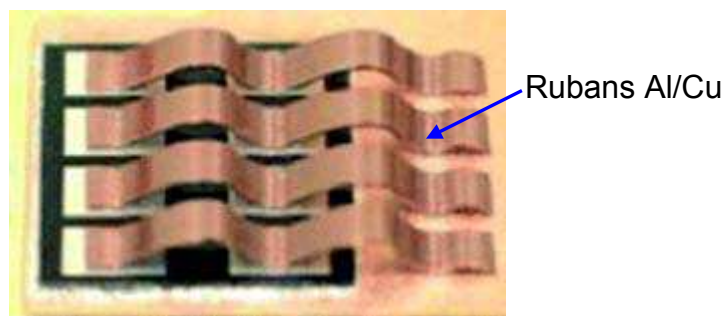


Figure I-24 : Connexion électrique par rubans sur la métallisation d'un semi-conducteur [Amro-05, Luec-04]

### 3.6 Encapsulation

L'encapsulant généralement employé dans les modules de puissance est le gel silicone. L'encapsulation (matériau au-dessus de la passivation puce, des connectiques, des substrats,...) possède plusieurs fonctions (Figure I-25), d'une part assurer l'isolation électrique autour de la connectique de la (ou des) puce(s). Elle est généralement requise dans les modules très hautes tensions (> 1,2 kV) et forte puissance. De plus, un second rôle est d'éliminer la présence d'air dans les modules de puissance qui apparaît comme gênant lors d'un fonctionnement à haute tension (car la rigidité diélectrique de l'air est faible ~3 kV/mm) mais aussi à haute température (créant des problèmes d'oxydation).



Figure I-25 : Module de puissance rempli de gel silicone [Rich-05]

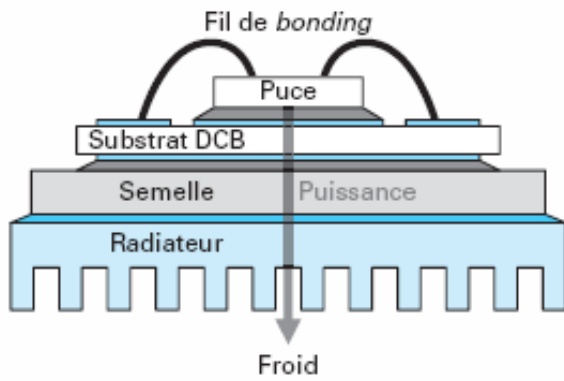
Ce matériau polymère se présentant sous forme liquide est polymérisé à température ambiante ou à haute température. Les produits standards de gel silicone ont un CDT très élevé de l'ordre de 200 ppm/°C, une conductivité thermique faible autour de  $0,15 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  et une tenue diélectrique entre 15 et 20 kV/mm. Par ailleurs, ils ont une température d'utilisation limitée à 200 °C.

### 3.7 Les solutions de refroidissement

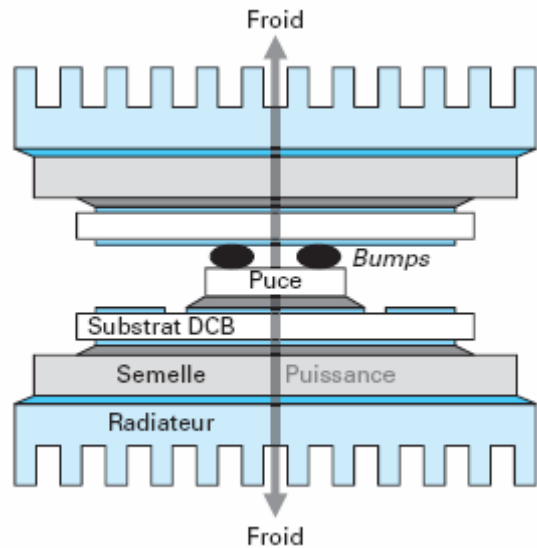
Notons que pour maintenir la température de jonction des composants en dessous d'une valeur critique pendant le cycle de fonctionnement, le module de puissance est fixé sur un système de refroidissement. Celui-ci doit avoir de bonnes performances thermiques, un faible poids et un minimum d'interface entre les puces et le refroidisseur.

L'extraction des pertes générées par les composants actifs se fait par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur amené sous le module.

La solution classique consiste à venir visser une plaque froide parcourue par le fluide sous la semelle et éventuellement directement sous le substrat. Dans le cas de la technologie « wire bonding », le flux thermique de la puce est dissipé par la face arrière de cette dernière (Figure I-26 a). Grâce aux technologies d'interconnexion 3D, le flux thermique de la puce peut être évacué par la face arrière et supérieure de celle-ci (Figure I-26 b).



I-26 a : Refroidissement simple face



I-26 b : Refroidissement double face

Figure I-26 : Flux thermique dans un module de puissance avec les refroidissements simple face et double face

Dans le cadre des plaques froides, un bon contact entre le module et le boîtier passe par l'insertion d'une interface thermique qui évite les bulles d'air très faiblement conductrices (très mauvaises conductivités thermiques de l'ordre de quelques W/m.K). Une solution est présentée en brasant le substrat sur le refroidisseur (figure I-27).

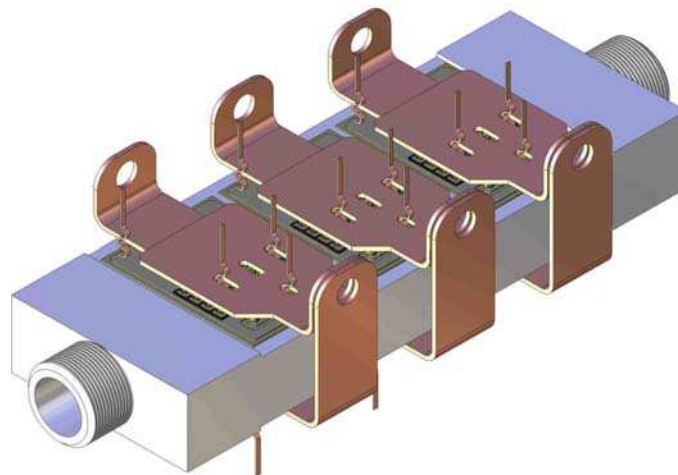


Figure I-27 : Substrat brasé sur refroidisseur (PEARL) [Merm-06]

Le principal défaut de cette solution est que les deux éléments (substrat et refroidisseur) deviennent indissociables. On ne peut plus changer les modules en cas de vieillissement prématuré.



## 4. Technologies d'assemblage à haute température

### 4.1 Solutions avec des brasures haute température

Concernant les techniques d'assemblage, la brasure est encore la méthode la plus utilisée (Figure I-28). Dans le cas où la température d'emploi est nettement supérieure à 200°C, des solutions d'assemblage sans plomb économiques et fiables ne semblent pas encore disponibles. Seules, les brasures à l'or comme les alliages  $Au_{88}Ge_{12}$ ,  $Au_{97}Si_3$  et  $Au_{80}Sn_{20}$ , dont le coût limite grandement les domaines d'utilisation, pourraient supporter ces niveaux de contraintes thermiques, sous réserve d'une résolution des problèmes liés à la création d'intermétalliques qui fragilise néanmoins l'assemblage [Clus-98, Tsai].

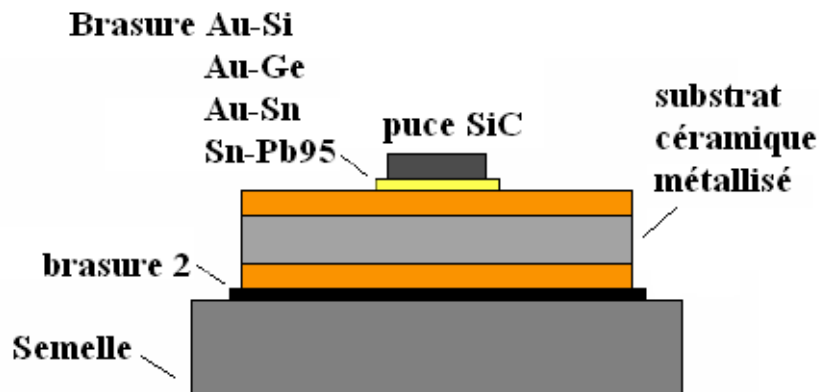


Figure I-28 : Conception d'assemblage pour des applications haute température

### 4.2 Soudure par phase liquide transitoire

Pour augmenter la température de refusion des joints à base d'or au-delà de 300°C, il suffit que la mise en œuvre de ces derniers ne se fasse pas par un procédé de brasage classique mais plutôt par une technique basée sur la **soudure par phase liquide transitoire** encore appelée sous le terme de **Transient Liquid Phase Bonding (TLPB)**. Cette technique utilise (étain ou indium) à faible température de fusion qui permet de joindre deux métaux de base en or (Au) à température de fusion élevée. En appliquant une température supérieure à celle du point de fusion de l'étain ou l'indium et une pression, l'étain (ou l'indium) diffuse dans l'or et entraîne la formation de composés intermétalliques riches en or (Figure I-29).



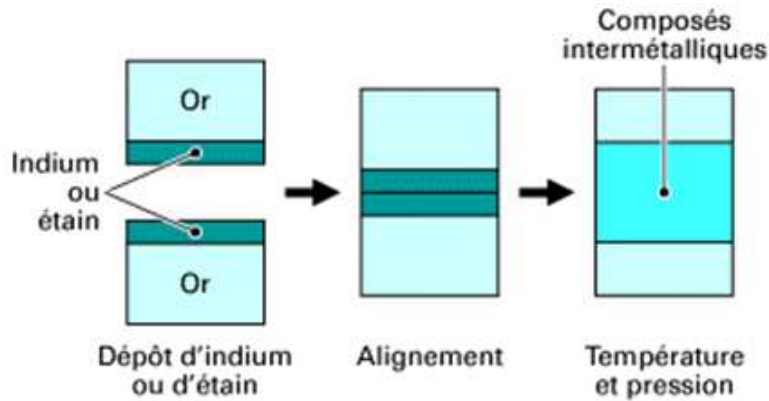


Figure I-29 : Principe de la soudure par phase liquide transitoire

La présence de composés intermétalliques permet d'obtenir un joint avec une température de refusion au-delà de 300°C (Tableau I-6), ce qui est intéressant pour les assemblages hautes température.

Matériaux	Température du procédé d'assemblage (°C)	Température de refusion (°C)
or / indium	200	495
or / étain	450	900
argent / indium	175	880
Argent / étain	250	600
Cuivre / indium	180	307
Cuivre / étain	280	415

Tableau I-6 : Température du procédé d'assemblage et de refusion de plusieurs matériaux soudés par phase liquide transitoire [Welc-05]

### 4.3 L'assemblage par frittage d'argent

La tenue à l'environnement haute température, impose de considérer des technologies alternatives, notamment des techniques LTJT (Low temperature Joining Technique) [Mert-04], qui consistent à réaliser des interfaces fines sous la puce par frittage de poudre d'argent à des températures modérées. Toutefois, la fiabilité des technologies LTJT reste encore à démontrer, même si des essais ont récemment montré que la durée de vie d'un assemblage avec la technologie LTJT serait vingt fois supérieure à celle obtenue avec un assemblage brasé classique.

Dans l'état actuel des technologies, le procédé utilisé met en œuvre des nano-poudres d'argent, cuites en atmosphère contrôlée à des températures inférieures à 250°C, sous une pression de plusieurs dizaines de méga Pascal (MPa) (Figure I-30).

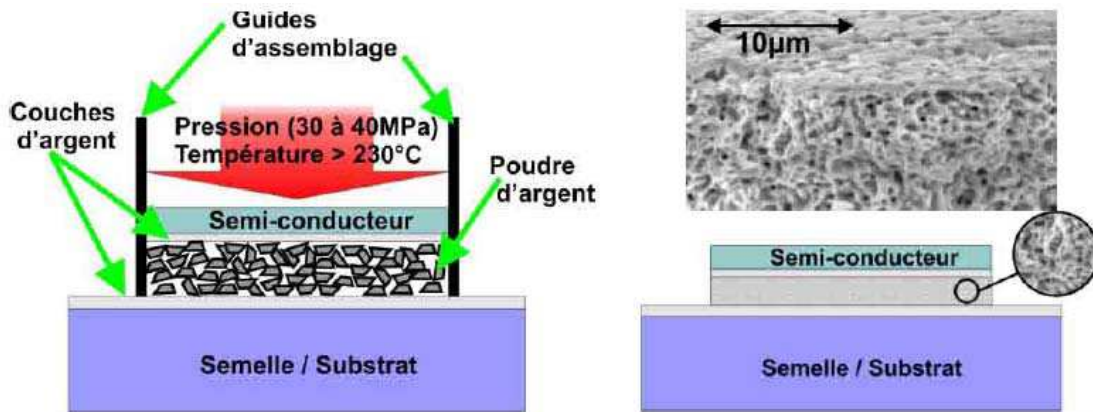


Figure I-30 : Technologie d'assemblage à basse température réalisée avec de la pâte d'argent [Amro-05]

Une fois réalisée, les joints peuvent supporter des températures proches du point de fusion de l'argent, c'est-à-dire 961°C.

#### 4.3.1 Avantage et propriétés de frittage de nano-poudre d'argent

##### Performance Electrique

La technologie par frittage de poudre d'argent, présente des conductivités électriques de l'ordre de 3-5 fois supérieures à celles des brasures en température 25°C. (Figure I-31)

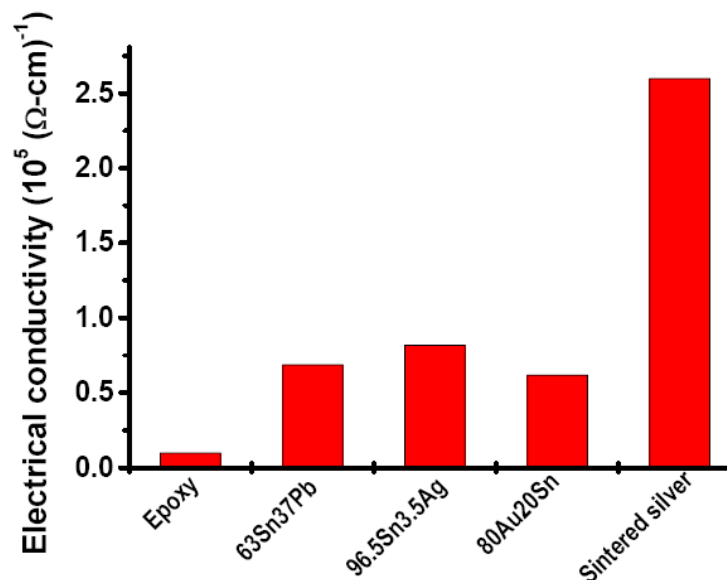


Figure I-31 : Comparaison de la conductivité électrique entre les matériaux d'interconnexions communes avec le frittage de Nano-Ag [Guo-05]

### Performance Thermique

La connexion par frittage de poudre d'argent, présente des conductivités thermiques de l'ordre de 3 fois supérieures à celles des brasures (Figure I-32). En plus, l'uniformité du joint d'argent élimine les points chauds du dispositif d'électronique de puissance.

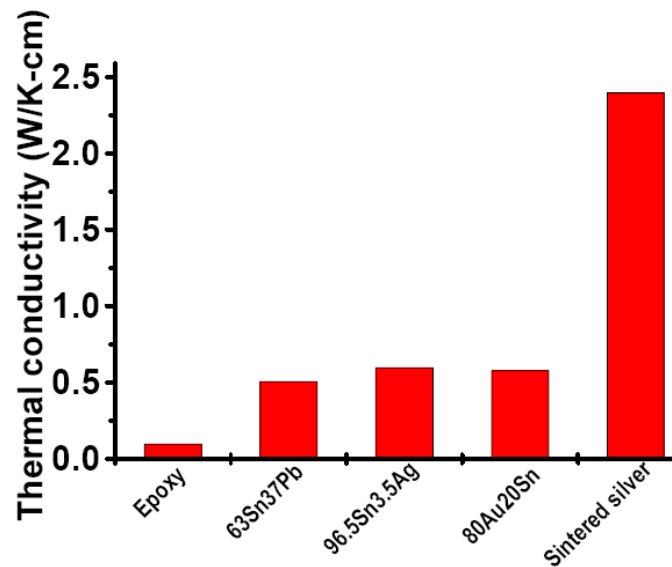


Figure I-32 : Comparaison de la conductivité thermique entre les matériaux d'interconnexions communes avec le frittage de Nano-Ag [Guo-05]

### Fiabilité

Pour la connexion face arrière du composant, un matériau plus doux peut être intéressant, puisqu'il transfère moins de contraintes thermomécaniques en raison des différents coefficients de dilatation entre la puce et le substrat. Les tests réalisés lors d'un cyclage actif avec de fortes variations de la température de jonction (amplitude de 130°C avec un maximum de 170°C) sembleraient confirmer une durée de vie de l'assemblage très élevée par rapport à celle obtenue avec un assemblage conventionnel avec brasures.

D'un autre côté, cette technologie dans sa forme actuelle est difficilement utilisable pour la réalisation de l'ensemble des connexions à l'intérieur des modules de puissance, notamment pour les connecteurs de puissance et de commande. Cette technologie nécessite des travaux d'approfondissements afin d'être pleinement opérationnelle pour l'assemblage des modules de puissance.

## **4.4 L'assemblage par nano poteau de cuivre**

Le nano poteau est un élément d'interconnexion électrique et mécanique. Le principe réside dans une nano structure constituée de deux surfaces métalliques, sur lesquelles sont déposés des nano poteaux de cuivre par croissance électrolytique à travers une membrane

d'alumine poreuse. L'interconnexion est ensuite effectuée par pressage des surfaces l'une contre l'autre. De cette manière est réalisée l'interpénétration et l'enchevêtrement des nano poteaux, qui crée une liaison électronique et mécanique.

#### 4.4.1 Caractéristique dimensionnelle des nano poteaux

- Longueur = 2 – 60  $\mu\text{m}$
- Diamètre = 20 – 200 nm
- Densité = 1 milliard/ $\text{cm}^2$

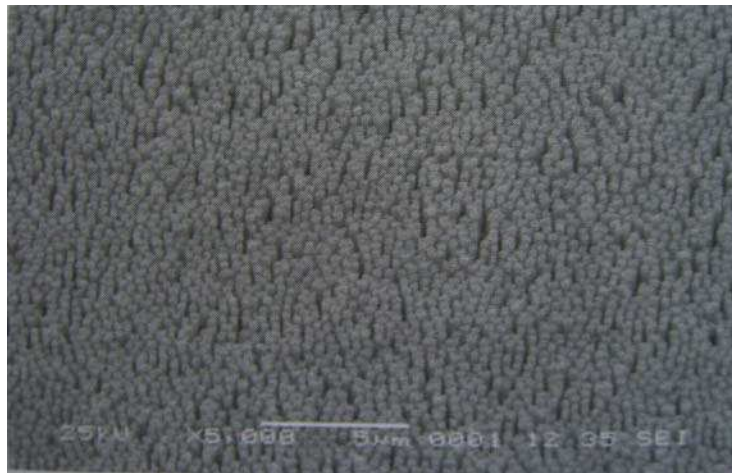


Figure I-33 : Caractéristique dimensionnelle des nano poteaux de cuivre [Mena-08]

#### 4.4.2 Applications et avantages

Le procédé est simple et économique. Il est envisagé dans des applications d'électronique de puissance et de micro électronique. Il répond effectivement à un besoin d'intégration tridimensionnelle et permet l'amélioration de solutions technologiques innovantes telles que, les contacts sans brasure : procédé à froid, on peut donc économiser de l'énergie, et diminuer la contrainte thermique sur la puce durant le procédé d'assemblage. Une fois réalisé, les joints peuvent supporter des températures proches du point de fusion de cuivre, c'est-à-dire 1084°C.

Le refroidissement double face par un assemblage hermétique permet la circulation d'un fluide de refroidissement monophasique ou diphasique.

## 5. Fiabilité des modules de puissance

### 5.1 Introduction à la notion de fiabilité et de durée de vie

L'ingénieur définit le plus souvent la fiabilité comme « l'aptitude d'un dispositif ou d'un système à accomplir une fonction requise dans des conditions données et pour une période de temps donnée ».

Si l'on soumet à un test de fiabilité sous des conditions opérationnelles spécifiées  $N_0$  échantillons d'un même produit, et qu'au bout d'un temps  $t$ ,  $N_s(t)$  échantillons restent opérationnels, le calcul de la fiabilité est le suivant :

- La **probabilité de survie  $R(t)$**  à l'instant  $t$  s'écrit :

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N_0} \quad \text{Equation I-2}$$

- La **densité de défaillance  $f(t)$**  qui correspond à la fréquence des défaillances observées pendant un intervalle de temps  $\Delta t$  s'écrit :

$$f(t) = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t} \quad \text{Equation I-3}$$

- Le **taux de défaillance  $\lambda(t)$**  qui correspond au rapport entre la densité de défaillance  $f(t)$  et la probabilité de survie  $R(t)$  au début de l'intervalle  $\Delta t$  s'écrit :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad \text{Equation I-4}$$

C'est la représentation du taux de défaillance en fonction du temps qui conduit à la courbe bien connue en forme de **baignoire** que l'on rencontre souvent lors de l'étude de fiabilité d'un produit industriel. Il y a trois types de défaillances distinctes, selon la durée de fonctionnement (Figure I-34) :

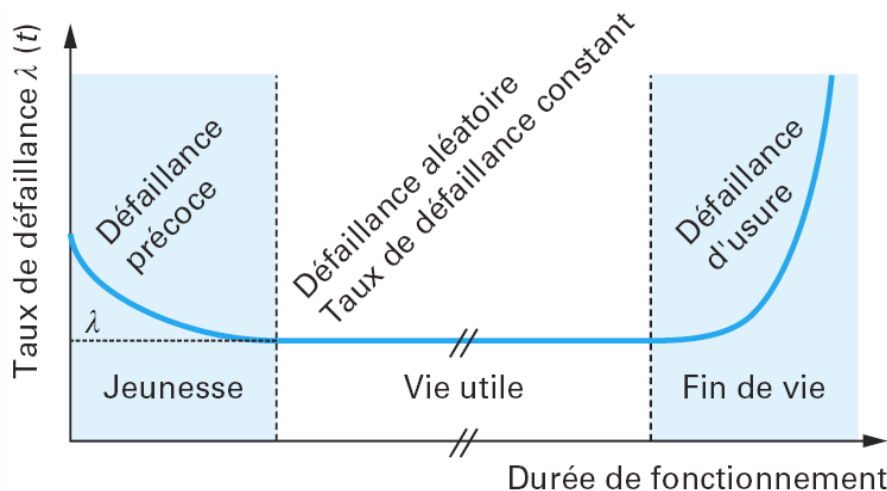


Figure I-34 : Courbe du taux de défaillance d'un produit en fonction du temps

- de jeunesse ou défaillance précoce, le taux de défaillance est décroissant avec le temps d'utilisation sous contraintes du dispositif. C'est le cas des défaillances induites par une mauvaise fabrication, un mauvais transport, une mauvaise utilisation.
- de vie utile ou défaillance aléatoire, le taux de défaillance est constant ( $\lambda$ ), et donc indépendant du temps d'utilisation sous contraintes du dispositif.
- de fin de vie ou défaillance d'usure, le taux de défaillance augmente avec le temps d'utilisation sous contraintes du dispositif.

Les modes de défaillance des modules de puissance sont nombreux. Dans notre cas, nous nous limiterons essentiellement aux interfaces d'assemblage et fil de câblage (Figure I-35).

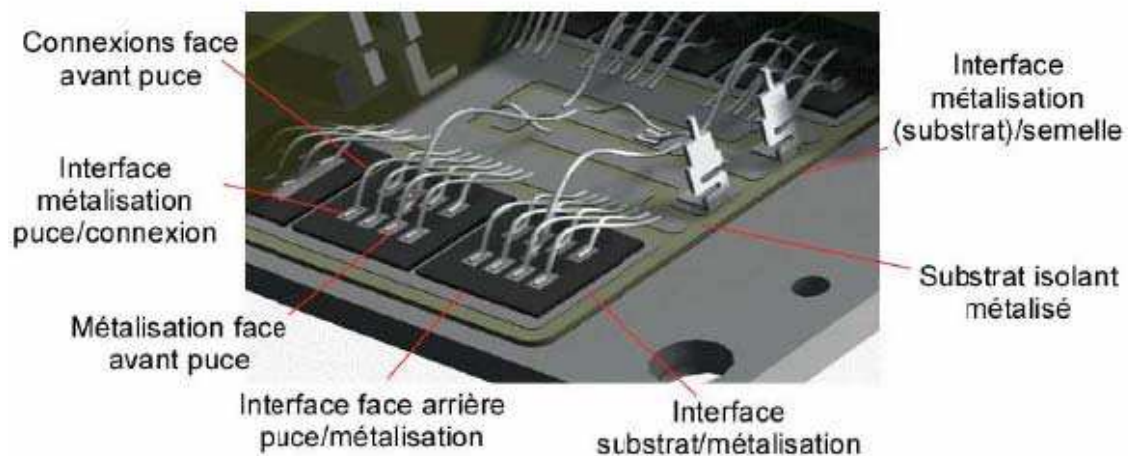


Figure I-35 : Les interfaces d'assemblage de puissance

## 5.2 Brasure haute température et basse température

Les différents éléments sont reportés par brasage de deux matériaux différents. La brasure haute température est utilisée pour le report de puce-substrat (l'interface face arrière puce / métallisation de substrat). La brasure basse température est utilisée pour le report de substrat-semelle (l'interface substrat métallisation / semelle métallisation). Dans notre cas, les métaux d'apport sont des brasures AuGe, SnPb et AuSi utilisées pour les applications haute température.

On recense deux problématiques dans l'électronique de puissance sur les brasures : les trous de brasure (lacunes) et le phénomène de délaminage.

Le premier est issue du processus de brasage car lors d'un report d'une grande surface à brasier des bulles de gaz vont être emprisonnées dans la brasure et dégradent ainsi la surface d'échange pour l'évacuation de la chaleur.

### 5.2.1 Trou de brasures « lacunes »

Durant le processus d'assemblage on peut retrouver des lacunes dans la brasure puce-substrat métallisé et substrat métallisé-semelle.

Les lacunes dans la brasure peuvent prendre de nombreuses formes géométriques mais on les classe en deux groupes en fonction de leurs impacts : les trous chauds et les trous froids. Le trou chaud est caractérisé par le fait que la brasure n'est pas mouillée sur le composant actif puce.

Le trou de brasure fait apparaître localement une augmentation de la température car la résistance thermique est localement plus importante [Ciampolini-99]. Jacob [Jacob-95] donne comme seuil maximum à ne pas dépasser 5 à 10% des lacunes sous la puce sous risque de sérieusement dégrader les performances thermiques du composant. La localisation des inclusions dans la brasure substrat métallisé-semelle ont moins d'impact thermique, mais ont pour effet d'augmenter globalement la résistance thermique de l'assemblage.

### 5.2.2 Le phénomène de délaminage de la brasure

Ce phénomène est dû à la différence de coefficient de dilatation entre le substrat métallisé et la semelle et la puce. Le substrat qui introduit des contraintes mécaniques importantes dans la brasure. Les contraintes sont principalement localisées à la périphérie de la brasure. Le délaminage prend naissance à la périphérie de la brasure et se propage ensuite vers le centre (Figure I-36).

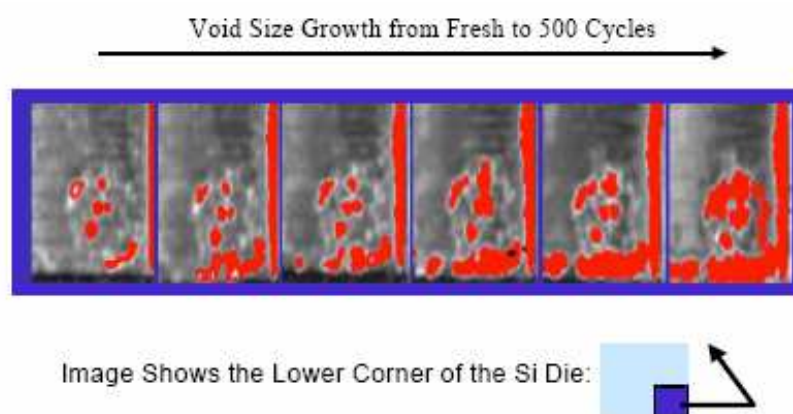


Figure I-36 : Evolution du délaminage de la brasure puce tous les 100 cycles - 55°C/+150°C [Katsis-03]

Ce phénomène modifie la résistance thermique de l'assemblage. Son impact est important lorsqu'il est localisé dans la brasure entre la puce-substrat [Katsis-03]. L'analyse par



microscopie acoustique permet de mettre en évidence, sans avoir à réaliser de micro section, le phénomène de délaminage [Burgess-84].

### 5.2.3 Fracturation de la brasure

Le mode de dégradation le plus classique lié aux cyclages thermiques est bien sûr celui de fissuration de la brasure comme le montre la Figure I-37. Ces résultats ont été obtenus pour un cyclage passif entre  $-40^{\circ}\text{C}$  et  $120^{\circ}\text{C}$  d'un assemblage par brasure sans plomb ( $\text{SnCu}_{0.7}$ ) dont la température de fusion est  $227^{\circ}\text{C}$ .

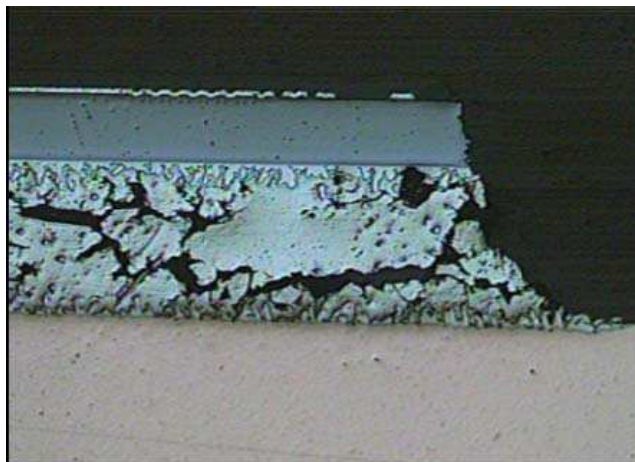


Figure I-37 : Fissuration de brasure puce - substrat

### 5.3 Substrat céramique métallisé

Les céramiques  $\text{Al}_2\text{O}_3$  métallisées en cuivre sont les premiers substrats [Burgess-84],[Ciappa-01] employés et sont les plus courants dans les assemblages de puissance.

Le mode de défaillance des céramiques métallisées cuivre est dû à un écrouissage du cuivre par cyclage thermique qui va augmenter jusqu'à limite de rupture de la céramique [Schu-03], et créer une fissure dans la céramique (Figure I-38).

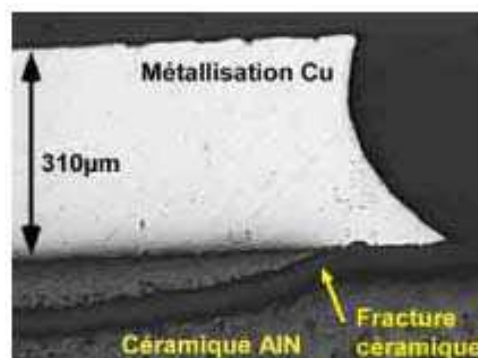


Figure I-38 : Fissure de la céramique AlN métallisée Cu [Dupond-06]



La fissure va se propager avec le cyclage thermique. La fissure de la céramique entraîne non seulement une augmentation de la résistance thermique de l'assemblage mais une diminution sensible de la tenue diélectrique de la céramique.

La figure I-39 montre l'influence de l'épaisseur des métallisations pour différentes géométries de surface pour des substrats AlN de 635  $\mu\text{m}$ , les métallisations fines tenant mieux au cyclage que les épaisses. Des résultats similaires ont été largement démontrés [Sch-03, Dal-95, Mit-99].

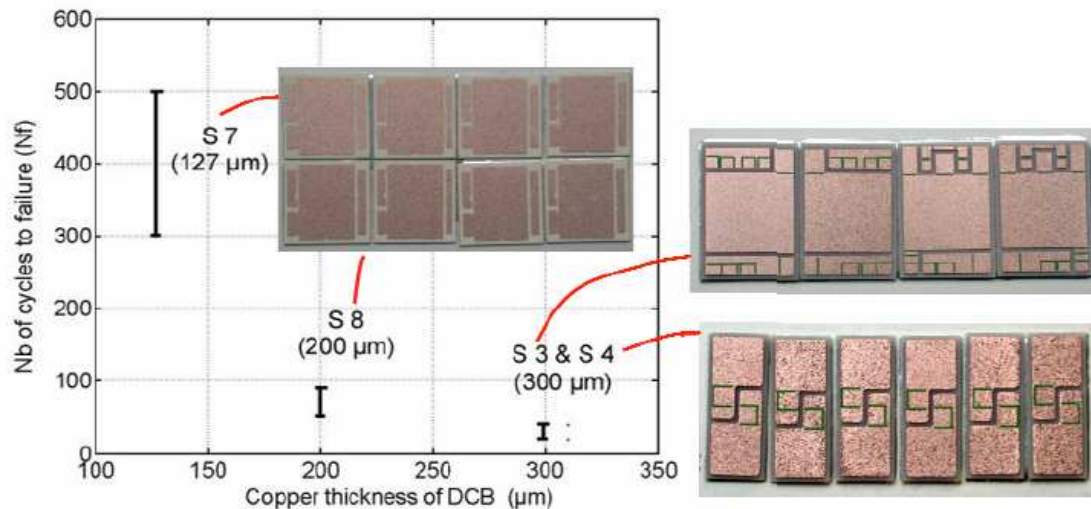


Figure I-39 : Influence de l'épaisseur des métallisations par rapport la fiabilité

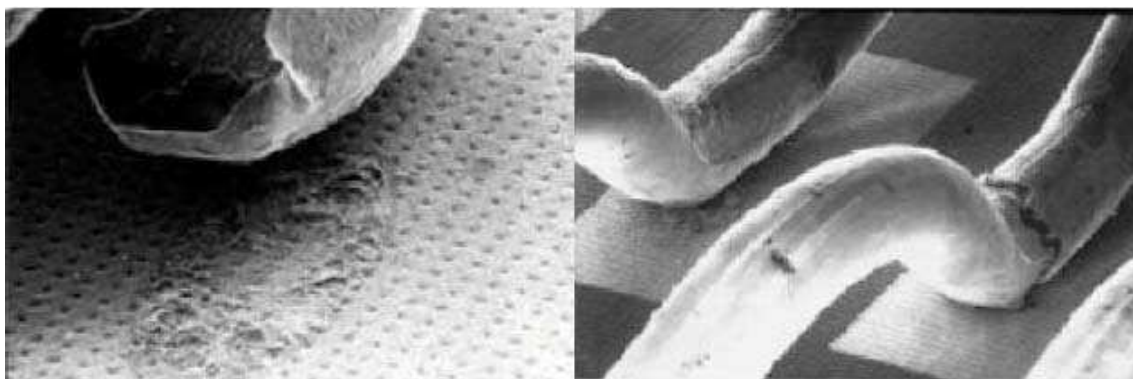
## 5.4 Fil de câblage

Les problèmes relatifs dus à la tenue des bondings vis-à-vis des cycles thermiques ont largement été étudiés et décrits dans la littérature [Ciap-02, Lefr-03].

L'optimisation du processus de câblage permet d'avoir les soudures de bonne qualité et permet également d'augmenter la durée de vie par rapport au cyclage thermique. Takashi [Taka-02] montre que le processus de câblage comporte deux paramètres importants : la force d'appui et l'énergie appliquée pour la soudure. Le résultat d'optimisation du processus permet de limiter la contrainte sur le composant. L'énergie nécessaire au soudage ne doit pas être trop importante pour minimiser les contraintes résiduelles dans la soudure. La forme du fil de câblage est un paramètre important pour assurer une bonne durabilité des soudures. On remarque que dans le cas de notre assemblage les soudures sont en aluminium – métallisation en aluminium (fil de câblage – métallisation de la puce) ce qui élimine la formation d'intermétalliques fragilisant la soudure comme on peut le rencontrer dans les soudures or – aluminium.

### Délaminage de fils de câblage

Depuis le début des composants de puissance le phénomène de levée des fils de câblage à été observé [Lamb-92]. Ce phénomène expliqué par [Onuk-00] est dû aux contraintes thermo-mécaniques dues à l'échauffement et au refroidissement rapide du composant actif lors de son fonctionnement. La déconnexion du fil de câblage est due à l'apparition de micro fissures au niveau de la soudure entre le fil de câblage et la puce (Figure I-40). Dans notre cas, la puce SiC recouverte d'une métallisation en aluminium, la différence de coefficient de dilatation entre le fil de câblage et la puce située juste en dessous de la métallisation induit des contraintes thermiques qui, au cours des cycles, génèrent ces micro fissures et finalement son décollement.



(a) Décollement des fils de câblage

(b) Fissuration des fils de câblage

Figure I-40 : Défaillances des fils de câblage [Ciappa-01]

## 5.5 Critères de choix des technologies

Les critères pris en compte dans le choix des technologies sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Assemblages	Matériaux
<ul style="list-style-type: none"><li>• Capacité d'amélioration du niveau d'intégration;</li><li>• Capacité à améliorer le refroidissement des puces (nombre d'interfaces du composant vers le fluide caloporteur);</li><li>• Fiabilité (faibles différences des coefficients de dilatation, analyse de défaillance);</li><li>• Capacité à réduire les émissions électromagnétiques (CEM);</li><li>• Processabilité (Automatisation);</li><li>• Coût de revient.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tenue mécanique (Rigidité, limites d'élasticité, Résistance aux efforts, accélérations, chocs et vibrations);</li><li>• Tenue thermique (plages d'utilisation, ...);</li><li>• Performances thermiques (conductivités capacités calorifiques);</li><li>• Performances électriques (résistivités, rigidité diélectrique, permittivité);</li><li>• Densités (masse volumique);</li><li>• Tenue aux décharges partielles;</li><li>• Résistance à la fatigue thermomécanique;</li><li>• Toxicité;</li><li>• Coût de revient.</li></ul>

Tableau I-7: Résumés des critères de choix des technologies

## 6. Conclusion partielle

Au cours de ce chapitre, nous avons pu voir les éléments d'un module de puissance, les matériaux associés et les technologies existantes.

Au niveau des technologies, les modules doubles face semblent être les plus intéressants et les plus performants. Pourtant dans notre cas, on commence par la technologie plus classique : substrat métallisé, avec des nouveaux matériaux puces en SiC et les semelles CuC.

Parallèlement au choix de technologie, on s'est aussi focalisé sur les critères de choix des matériaux. Le matériau indispensable à l'heure actuelle est le silicium et pour un futur proche le carbure de silicium qui ont la particularité d'être des matériaux durs mécaniquement. La définition des matériaux du module est faite sur des critères thermomécaniques en cherchant des matériaux aux caractéristiques mécaniques proches de celle du carbure de silicium tout en surveillant leur conductivité thermique. Pour le substrat, les céramiques les plus prometteuses sont le nitrure d'aluminium et le nitrure de silicium. Le deuxième est moins performant d'un point de vue thermique mais plus solide et possède l'avantage de pouvoir être utilisé sans semelle, ce qui est un gain de masse évident.

L'étude des modes de défaillances montre que la fatigue thermomécanique engendre de nombreuses défaillances au sein de l'assemblage, en particulier sur les délaminages des brasures et sur l'apparition de fissures dans les assemblages. L'étude expérimentale en vieillissement permettra de définir l'impact des cyclages thermiques sur les assemblages.

## Références bibliographiques

- [Alla-05] B. Allard, L. Dupont, "Composants à semi-conducteur de puissance pour des applications à haute température de fonctionnement", EDP Sciences, 2005
- [Amag-02] M. Amagai, "Mechanical Reliability in Electronic Packaging", *Microelectronics Reliability*, Vol. 42, 2002, pages: 607-627
- [Amro-05] R. Amro, "Double-sided low-temperature joining technique for power cycling capability at high temperature. - European Conference on Power Electronics and Applications, p. 1-10, Septembre 2005.
- [Berg-08] D. Bergogne, "Towards an airborne high temperature SiC inverter", *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, p. 3178-3183, Juillet 2008.
- [Bosw-98] S. Bosworth, H. S. El-Sayed "Key Issues in Multilateral Technology", *Oilfield Review*, 1998.
- [Bour-01] B. Boursat, F. Breit, "Improved Power Chip Electrical Connection", *Conférence EPE*, 2001.
- [Bour-06] B. Boursat, "Comprendre les problèmes de procédé de l'électronique de puissance," *Alstom PEARL*, Janvier 2006.
- [Burgess-84] Burgess, J.; Carlon, R.; Glascock, H., II; Neugebauer, C.; Webster, H. "Solder Fatigue Problems in Power Packages" *IEEE Transactions on Component, Hybrids and Manufacturing Technology*, Vol. 7, Issue 4, 1984, pp. 405-410
- [Chan-03] H. R. Chang, E. Hanna, "Development and Demonstration of Silicon Carbide (SiC) Inverter Module in Motor Drive", *Conference ISPSD*, Cambridge, 2003.
- [Chap] P. Chapas, M. Debruyne, "Composants de l'électrotechnique en traction ferroviaire", *Technique de l'ingénieur*, D5530
- [Ciampolini-99] L. Ciampolini, M. Ciappa, P. Malberti, P. Regli, W. Fichtner, "Modelling thermal effects of large contiguous voids in solder joints", *Microelectronics Journal*, Vol. 30, No.11, 1999, pp. 1115-1123
- [Ciap-02] M. Ciappa, "Selected Failure Mechanisms of Modern power Modules", *Microelectronics Reliability*, Vol. 42, 2002, pages : 653-667.
- [Ciappa-01] M. Ciappa, *Some Reliability Aspects of IGBT Modules for High-Power Application*. Konstanz, Germany: Hartung-Gorre, 2011.
- [Clus-98] P. McCluskey, D. Das, "Packaging of Power Electronics for High Temperature Applications", *Advancing Microelectronics*, Vol. Jan./Feb. 1998, pages : 19-24.
- [Clus-00] P. McCluskey, K. Mensaha, "Reliable Use of Commercial Technology in High Temperature Environments", *Microelectronics Reliability*, Vol. 40, 2000
- [Copp-07] L. Coppola, "Survey on high-temperature packaging materials for SiC-based power electronics modules", *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, p. 2234-2240, Juin 2007.
- [Diah-07] S. Diahm, "Etude de comportement sous haute température de matériaux polyamides en vue de la passivation de composants de puissance à semi-conducteur grand gap", *Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse*, 282 P., Décembre 2007.
- [Drei-94] P. L. Dreinke, D. M. F. King, "An Overview of High Temperature Electronic Device Technologies and Potential Application", *IEEE transactions on components, Packaging, and manufacturing Technology*, Vol. Dec. 1994, pages: 594-604.
- [Dupont-06] L. Dupont, "l'étude de la durée de vie des assemblages de puissance dans des environnements haute température et avec des cycles thermiques de grande amplitude", *thèse de Doctorat de l'ENS de Cachan*, juin 2006
- [ECPE-07] T.P. Chow, "Progress, Trends and Reliability of High-Voltage SiC and GaN Power Devices", *ECPE, 2nd SiC User Forum-Potential of SiC in Power Electronic Applications*, Copenhagen, Denmark, 6-7 Sept. 2007.

- [Eise-04] R. Eisele and T. Senyildiz, "Thermal Design of Power Modules in Electrical power Steering Applications", Séminaire ECPE, Mai 2004.
- [EPTC] "DCB Substrates as a Base for Power MCM's", Conférence EPTC, Singapour, Vol.3 pages 315 - 320
- [Ging-00] B. Gingerich and P. Brusius, "Application Targeted by Reliable High Temperature Electronics", Conference HITEC, 2000.
- [Gued-05] A. Guédon-Gracia, "La Conception Thermo-Mécanique Optimisée d'Assemblages sans Plomb", Thèse de docteur de l'Université Bordeaux 1, 2005
- [Guo-05] F.B. Guo, "Low-Temperature Sintering of Nanoscale Silver Paste for Semiconductor Device Interconnection", Virginia, October 2005
- [Hase-04] K. Hase, G. Lefranc, "A Solder Bumping Interconnect Technology for High-Power Devices", Conférence EPE, Aachen, Germany, 2004.
- [HCM] Données par l'entreprise d'HCM
- [ICMCB] Données par le laboratoire d'ICMCB
- [ICSCRM-07] Rump Session "SiC,GaN state of the art", ICSCRM-07, Kyoto, Japan, October 14-19,2007
- [Indi] INDIUM CORPORATION, "Indalloy speciality alloys", <http://www.indium.com>.
- [Jacob-95] P. Jacob, M. Held, P. Scasso, W. Wuchen, "Reliability testing and analysis of IGBT Power semiconductor modules", IEEE colloquium on Propulsion Drives, 1995, pp. : 4/1-4/5
- [Katsis-03] Dimosthenis C. Katsis, "Thermal characterization of Die-Attach Degradation in the Power Mosfet", Thèse of Blacksburg, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003
- [Kyoc-04] Kyocera, "Kyocera Power Module Substrate Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> AMB Substrate", Kyocera Corporation, AMB vers6.1, 2004.
- [Lamb-92] H. de Lambilly and H. Keser,, "Failure Analysis of Power Modules; A Look at the packaging and reliability of Large IGBTs", IEEE/CHMT International Electronics manufacturing Technology Symposium, 1992.,pp. 366-370.
- [Lecl-94] J. Leclercq, "Electronique de puissance – Eléments de technologie", Technique de l'ingénieur, traité Génie électrique D3 220, 1994
- [Lefr-03] G. Lefranc, "Aluminium bond wire properties after 1 billion mechanical cycles", Microelectronics Reliability, vol.43, pp.1833-1838, 2003.
- [Lely-55] J.A. Lely, Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft e.V, 32, 229, 1955
- [Letu-99] P. Leturcq, "Composants semi-conducteurs de puissance : caractères propres", Traité Génie Electrique D 3100, 1999
- [Lost-00] A.B. Lostetter, F. Barlow, et al., "An Overview to Integrated Power Module design for High Power Electronics packaging", Microelectronics Reliability, Vol. 40, 2000, pages : 365-379.
- [Luec-04] LUECHINGER (C.) - Large aluminum ribbon bonding : An alternative interconnect solution for power module applications. - International Symposium on Microelectronics, Long Beach, 2004.
- [Mena-08] L. MENAGER, "Contribution à l'intégration des convertisseurs de puissance en 3D", Thèse de doctorat de L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Décembre 2008
- [Merm-06] M. Mermet-Guyennet, "New structure of power integrated module", CIPS 2006, Naples, june 2006
- [Mert-04] C. Mertens, J. Rudzki,"Top-Side Chip Contacts with Low Temperature Joining Technique (LTJT)", Conférence CIPS, 2004.
- [Mitic-99] G.Mitic, R. Beinert, "Reliability of AlN Substrates and their Solder Joints in IGBT Power Modules", Microelectronics & Reliability, Vol. 39 1999, pp. 1159-1164.
- [Miya-90] Miyashiro, Fumio, Iwase, Nobuo, "High thermal conductivity aluminium nitride ceramic substrates and packages" IEEE transactions on components, hybrids, and manufacturing technology 13 (2), pp.313-319.

- [Nall-02] F. Nallet, "SiC pour l'électronique de puissance du futur", Techniques de l'ingénieur, R03, 2002
- [Olde-04] F. Oldervol, F. Strisland, "Wire-bond failure mechanisms in plastic encapsulated microcircuits and ceramic hybrids at high temperatures", Microelectronics Reliability, 2004.
- [Onuki-00] J. Onuki, M. Koizumi, M. Suwa, "Reliability of thick Al wire bonds in IGBT modules for traction motor drives" IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 23, Issue 1, 2000, pp.108-112.
- [Onuk-02] J. Onuki, "High-strength and high-speed bonding technology using thick Al-Ni wire". -Materials Transactions, vol. 43, n° 8, p. 2157-2160, 2002.
- [Peyr-06] D. Peyrou, "Étude théorique et expérimentale des techniques d'assemblage et mise en boîtier Pour l'intégration de microsystèmes radio-fréquences", thèse de docteur de l'université Pau Sabatier de Toulouse, décembre 2006
- [Plik-04] B. Plikat, "High Temperature Packaging Outline", Séminaire ECPE, Mai 2004.
- [Reic-01] R. Reicher, W. Smetana, "A fritless Copper Conductor System for Power Electronic Applications", Microelectronics Reliability, Vol. 41, Issue 4, April 2001, pages : 491-498.
- [Rich-04] J. Richmond, S. Hodge, "Silicon Carbide Power Applications and Device Roadmap", Power Electronics Europe, Issue 7, 2004, pages: 17-21.
- [Rich-05] F. Richardeau and S. LEFEBVRE, "Technologies des composants semiconducteurs pour l'électronique de puissance : Etat de l'art," Rapport FIDUCOHT, Toulouse, 2005.
- [Saum] D. L. Saums, B. Edward, K. Fennessy, R. Hay, G. J. Sundberg, "Internal CVD Diamond Thermal Vias for High Heat Flux Spreading in CTE Compatible Semiconductor Package Components", High Temperature
- [Scho-00] H.P. Schoner, P. Hille, "Automotive Power-New challenges for power Electronics", IEEE, 2000.
- [Schu-00] J.Schultz-Harder and K.Exel,"Process for producing a Ceramic-Metal Substrate", Curamik Electronics GmbH, German, Number of Patent Vserion 6,093,443, Jul 2000
- [Schu-03] J. Schutz-Harder, K. exel, "Recent developments of direct bonded copper (DBC) substrates for power modules", International Conference on Electronics Packaging Technology, 2003, pp. 491-496
- [Shen] W.W. Sheng, R.P. Colino, Power electronics modules – Handbook Design and Manufacture
- [Tair-78] Yu.M. Tairov and V.F. Tsvetkov, J. Cryst. Growth, 43, 209, (1978)
- [Taka-02] Y. Takahashi, M. Inoue, "Numerical study of wire bonding analysis of interfacial deformation between wide and pad" Journal. Electronic of Packaging, Vol. 14, 2002, pp.27-36
- [Tsai] J. Y. Tsai, C. R. Kao, "A Study of Different Microstructure from the Reaction of Au20Sn Solder Deposited on Ni".
- [Welc-05] W. Welch, J. Chae et K. Najafi - Transfer of metal MEMS packages using a wafer-level solder transfer technique. - IEEE Transactions on Advanced Packaging, vol. 28, n° 4, p. 643-649, Novembre 2005.
- [Wond-99] W. Wondrak, "Physical Limits and Lifetime Limitations of Semiconductor Devices at High temperature", Microelectronics Reliability, Vol. 39, 6-7, June-July 1999b, pages: 1113-1120.
- [Zweb-06] C. Zweben, "Thermal Materials Solve Power Electronics Challenges", Power Electronics Technology, February 2006



---

# Chapitre II : Présentation du projet SiC-HT<sup>2</sup> et études préliminaires

---

## SOMMAIRE

1.	Introduction .....	72
2.	Présentation du projet SiC-HT <sup>2</sup> .....	72
2.1	Les participants .....	73
2.2	Les enjeux de composant de puissance .....	74
3.	Modélisation numérique du comportement des modules .....	75
3.1	Généralités sur la simulation par la méthode des Eléments finis .....	75
3.2	Le logiciel ANSYS .....	76
3.3	Description du modèle .....	77
3.4	Modélisation du comportement des matériaux utilisés dans les assemblages .....	79
4.	Caractérisation des matériaux d'assemblages .....	85
4.1	Caractérisation électrique de diode Schottky en SiC aux différentes températures .....	85
4.2	Caractériser le paramètre mécanique Module d'Young .....	88
4.3	Caractériser le paramètre thermomécanique CDT .....	97
5.	Conclusion partielle .....	104
	Références bibliographiques .....	105



# Chapitre II : Présentation du projet SiC-HT<sup>2</sup> et études préliminaires

## 1. Introduction

Pour étudier un mode de défaillance donné, l'emploi d'un modèle numérique par rapport à une expérimentation apporte l'avantage de simuler la valeur avec un coût faible dans des temps acceptables. La problématique qui se pose ici concerne la mise en place des méthodes de simulation capables d'évaluer le comportement thermique et thermomécanique des modules de puissance afin de pouvoir par la suite estimer leur fiabilité.

L'évaluation de la défaillance par fatigue des brasures passe par trois étapes :

La première étape concerne le choix de la méthode de résolution. Les modèles utilisés peuvent être analytiques, et faire appel à la méthode des éléments finis pour l'étude thermique. Le choix doit se faire après une étude des possibilités de chaque méthode par rapport à l'objectif fixé.

La deuxième concerne, pour l'étude de la fiabilité en fatigue, dans le choix de la loi de comportement du matériau. Plusieurs modèles existent avec chacun leurs avantages et leurs inconvénients. Nous verrons pour chacun d'entre eux leur domaine de validité.

La dernière étape concerne l'identification paramétrique de ces lois au moyen d'essais. Les campagnes de tests doivent alors être correctement établies afin d'obtenir les résultats pertinents qui deviendront les entrées des modèles.

## 2. Présentation du projet SiC-HT<sup>2</sup>

La majeure partie des travaux présentés dans ce manuscrit ont été réalisés dans le cadre de la participation au projet national SiC-HT<sup>2</sup> (Composants de puissance SiC pour applications Hautes Tensions et Hautes Températures) qui est piloté par Hispano-Suiza et se déroule entre trois pôles de compétitivité aéronautique (AESE, ASTECH, PEGASE). SiC-HT<sup>2</sup> est un projet collaboratif novateur et stratégique ayant pour objectif d'étudier et de développer les différentes étapes nécessaires au procédé d'élaboration des composants de puissance SiC (carbure de silicium) pour des applications hautes températures et hautes tensions.

Stratégiquement, SiC-HT<sup>2</sup> constituera un jalon important dans la mise en place à terme d'une filière technologique française. Les applications concernées sont l'aérospatiale,

l'aéronautique civile et militaire, la propulsion navale, le transport ferroviaire, les réseaux de distribution électrique, l'automobile, la domotique, l'exploitation pétrolière, et la propulsion nucléaire.

Ce projet visait à développer une nouvelle technologie de modules de puissance spécifiques pour des applications hautes tensions et hautes températures. Nous allons dans un premier temps lister les participants dans ce projet et détailler les enjeux du projet.

## 2.1 Les participants

Le projet est porté par quatre grands industriels français pour lesquels la technologie SiC constitue un enjeu majeur. Elle devra être génératrice de retombées économiques importantes et de créations d'emplois.

SiC-HT<sup>2</sup> est partie intégrante de la stratégie globale de recherche de **HISPANO-SUIZA**, centre d'expertise du groupe SAFRAN. Le marché espéré pour une nouvelle génération d'équipements et systèmes basée sur la technologie SiC.

**SCHNEIDER** envisage de son côté, grâce à SiC-HT<sup>2</sup>, de renforcer le segment des parafoudres (protection surtension de réseaux de distribution électrique).

Issue de la valorisation du centre d'excellence d'**ALSTOM-Tarbes**, la création d'une société dans les Hautes-Pyrénées devrait générer 100 nouveaux emplois d'ici 2012-2015 avec un marché de 25 à 30 M€.

Enfin, pour **EUROCOPTER**, SiC-HT<sup>2</sup> permettra de réduire de façon significative la masse des systèmes électriques des hélicoptères, ce qui ouvrira un nouveau marché pour l'utilisation d'hélicoptère légers et moyen tonnage pour le transport des passagers.

Des PME innovantes **IBS**, **HCM** se positionneront comme fournisseurs de technologies :

Au terme du projet, IBS aura développé les technologies lui permettant d'accéder au marché de la fabrication de composants de puissance SiC.

HCM participera à l'industrialisation des composants en fournissant les équipements de l'aéronautique, du militaire, du spatial et du ferroviaire.

Des laboratoires de recherche de renommée internationale (**AMPERE**, **ICMCB**, **IMS**, **LAPLACE**, **IFSTTAR (INRETS)**, **SATIE** et **ISL**) assureront la génération de connaissances « amont » et de valeur au niveau de l'excellence scientifique et technologique française.

SiC-HT<sup>2</sup> permettra donc, au travers de sa dimension nationale offerte par trois pôles AESE, ASTECH et PEGASE, de créer un contexte unique afin de permettre aux industriels français de développer leurs technologies et de garantir que les recherches scientifiques et technologiques entreprises dans ce projet déboucheront réellement sur des applications industrielles porteuses et ciblées.

## **2.2 Les enjeux des composants de puissance**

Les composants de puissance constituent un élément clé dans la chaîne de conversion de puissance :

- ils permettent de contrôler avec précision le couple intensité-tension pour les systèmes de génération, stockage, gestion d'énergie électrique.
- ils s'intègrent dans une chaîne comportant des moteurs et/ou alternateurs, du stockage d'énergie et du contrôle-commande destiné à réguler l'ensemble.
- ils sont caractérisés par leur tenue en tension, en courant, en température et par les pertes qu'ils engendrent.

Les applications des composants de puissance se découpent de la manière suivante :

- les composants pour applications basses tensions (sujet du programme ALL-G2REC, essentiellement stockage et adaptation des énergies renouvelables) ;
- les composants pour applications hautes tensions et hautes températures. Il s'agit du sujet du projet ici présenté, SiC-HT<sup>2</sup>.

Dans le cas des applications hautes tensions et hautes températures, l'entrée du SiC (carbure de silicium monocristallin) sur le marché des composants de puissance constitue une rupture technologique dont la pré-industrialisation est déjà en cours (études amonts soutenues depuis 10 ans par les Pouvoirs Publics et le GIRCEP). En effet, certaines applications avec ce type de composants qui ne pouvaient être envisagés avec le silicium deviennent réalisables.

De sérieux verrous technologiques liés au SiC sont cependant encore à lever afin de pouvoir fonctionner dans des conditions opérationnelles exigeantes. Les propriétés suivantes sont exigées :

- tenue à de forts rapports di/dt, protections périphériques et passivation ;

- tenue aux hautes températures (de 200°C à 300°C à court/moyen terme, puis de 400°C à 600°C) ;
- tenue aux hautes tensions (1.2 kV, 10 kV, 20 kV puis 30 kV. Actuellement, aucun composant SiC n'est annoncé en commercialisation avec ces calibres en tension).

Forte de ces propriétés, la technologie SiC apportera des gains de performance significatifs surclassant les différentes familles de produits actuellement commercialisées. Pour des raisons stratégiques, de nombreux industriels français sont donc fortement intéressés par un accès à ce type de composants. SiC-HT<sup>2</sup> leur permettra d'accélérer des développements ambitieux afin d'être compétitifs face à une concurrence mondiale agressive, et de développer une source alternative assurant un approvisionnement pour des marchés spécifiques non couverts par les acteurs existants. A terme, une filière technologique française/européenne devra pouvoir fournir des composants électroniques de puissance et augmenter la compétitivité française/européenne vis-à-vis des Etats-Unis et du Japon : SiC-HT<sup>2</sup> en est un jalon important.

### **3. Modélisation numérique du comportement des modules**

#### **3.1 Généralités sur la simulation par la méthode des éléments finis**

L'objectif de base de la méthode des éléments finis est de trouver une solution approchée à des problèmes de géométrie et de chargement complexes. La Modélisation par Eléments Finis (MEF) est largement employée dans l'industrie et dans des domaines très divers. La modélisation par éléments finis permet d'évaluer le comportement des modules de puissance, que ce soit pour des problèmes thermiques, mécaniques, électromagnétiques voire même souvent multi-physiques, cette méthode est utilisée afin de trouver des solutions.

La méthode des éléments finis inclut les trois disciplines, la modélisation des problèmes physiques, l'analyse numérique et l'informatique appliquée :

- la modélisation : consiste à mettre en équations les phénomènes fondés sur la répartition spatiale des grandeurs physiques (ce sont les équations aux dérivées partielles), ou encore à formuler les lois d'interaction entre ces grandeurs,
- l'analyse numérique : consiste à élaborer des procédures de calcul spécifiques, ou à utiliser au mieux les algorithmes généraux existants, pour résoudre numériquement les équations des modèles physiques,

- l'informatique : consiste à développer des logiciels permettant de construire et de manipuler les données numériques, en agencant comme il faut des modules de résolution, des gestionnaires de base de données, et des interfaces homme-machine. Une analyse numérique donne un point de vue différent par rapport à une solution analytique. En effet, une solution numérique donne une réponse précise pour un domaine et des conditions aux limites précises. Au contraire, la solution analytique permet de voir l'influence de chaque paramètre sur la solution. Concernant la solution numérique, il faudra faire plusieurs calculs en utilisant des valeurs des paramètres différents afin d'en estimer l'influence sur la solution.

### **3.2 Le logiciel ANSYS**

Les simulations par éléments finis ont été effectuées grâce au logiciel ANSYS. Le déroulement des simulations se fait en trois étapes.

Tout d'abord le « preprocessing » qui est la phase durant laquelle la géométrie du modèle va être construite avec son maillage et le choix du type d'éléments utilisés. On va également définir les comportements des différents paramètres matériaux ainsi que les conditions aux limites dans le logiciel de simulation thermique et thermomécanique ANSYS.

La seconde phase est l'étape de calcul ou Solution durant laquelle les chargements, les instructions et conditions de simulations sont définies et le calcul effectué par le calculateur.

Enfin, la dernière phase appelée post-processing, est l'étape où sont traités et extraits les résultats issus du calcul.

Le logiciel permet deux types d'approches de la simulation. La première est le mode interactif au travers du GUI (Graphic User Interface), où toutes les commandes sont accessibles par des menus et effectuées les unes après les autres par l'utilisateur.

La seconde approche, se fait au travers de scripts de commande écrits par l'utilisateur et exécutés par le calculateur. Ce mode de fonctionnement, bien que moins convivial du point de vue de l'environnement de travail permet une modification et un suivi plus aisé des paramètres physiques. Le plus gros avantage est de permettre l'exécution de la simulation en mode batch qui est un mode automatique effectué en tâche de fond sur la machine de calcul. Cela a pour avantage, sur certaines machines, d'accélérer le calcul en limitant le travail du système au calcul et à la sauvegarde du résultat. Le calculateur se trouve alors soulagé de la tâche d'affichage et gagne en rapidité. Ce mode est également préféré pour de grosses simulations demandant plusieurs jours de calcul et des écritures importantes sur les disques.

### 3.3 Description du modèle

#### 3.3.1 Géométries

Un modèle 3D d'un assemblage de puissance en haute température est implémenté dans le logiciel ANSYS. Cet assemblage comporte différents matériaux ayant des propriétés particulières. On a rajouté le fil de câblage dans le nouveau modèle.

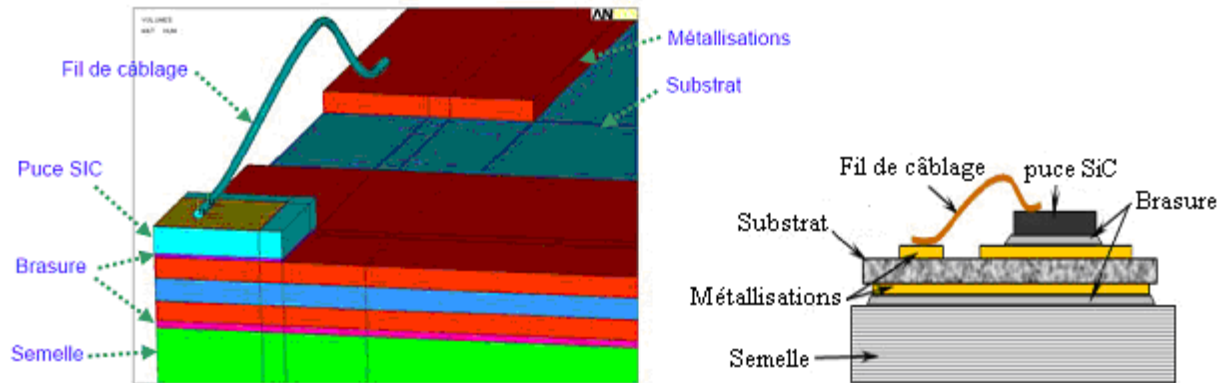


Figure II-1 : Modèle utilisé pour les simulations thermiques et thermomécaniques

Les paramètres géométriques sont marqués dans le tableau ci-dessous (Tab II-1) :

Elément	Matériaux	Surface (mm <sup>2</sup> )	Epaisseur
Fil de câblage	Au /Al	125 µm de diamètre	
Métallisation face avant de la puce	Au /Al	3 * 3	6 µm pour Al, 2 ou 3 µm pour Au
Puce	SiC	3,64 * 3,64	0,4 mm
Brasure haute température	AuGe / SnPb / AuSi	3,64 * 3,64	50 µm
Métallisation face avant du substrat	Cu /Al	30*10	300 µm (Cu) 400 µm (Al)
Substrat céramique	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> / AlN	30*30	320 µm (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ) 1 mm (AlN)
Métallisation face arrière du substrat	Cu /Al	30*30	300 µm (Cu) 400 µm (Al)
Brasure base température	SnAg / SAC / AuSn	30*30	100 µm
Semelle	CuC / Cu - diamant	40*40	4 mm

Tableau II-1 : Les paramètres géométriques de l'assemblage

### 3.3.2 Symétrie

Le temps de calcul prend ici toute son importance en vue du couplage avec les méthodes fiabilistes qui demanderont un nombre d'appels conséquents pour résoudre le problème. Il est possible de réduire la taille des modèles par l'utilisation des symétries, par la répétition de séquences de structure ou par l'utilisation d'éléments axisymétriques. L'assemblage possède deux symétries selon les axes 'x' et 'y' (figure II-2), seulement un quart du système peut être modélisé.

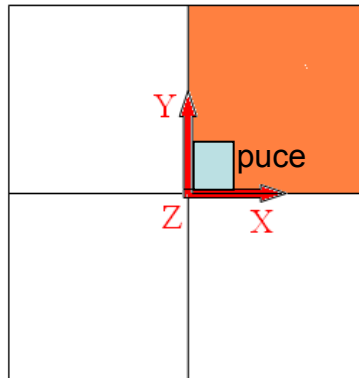


Figure II-2 : Représentation d'un quart de l'assemblage

### 3.3.3 Maillage

Afin de se rapprocher le plus de la réalité, les simulations ont été réalisées avec des modèles géométriques tridimensionnels des structures analysées. Les différents maillages ont été réalisés avec des briques et quadratiques. Les interfaces entre les différentes couches sont supposées parfaites. Le modèle global est maillé grossièrement. Pourtant la partie cône de la distribution en température (figure II-3) doit être maillée finement afin d'obtenir des résultats de simulation corrects et précis.

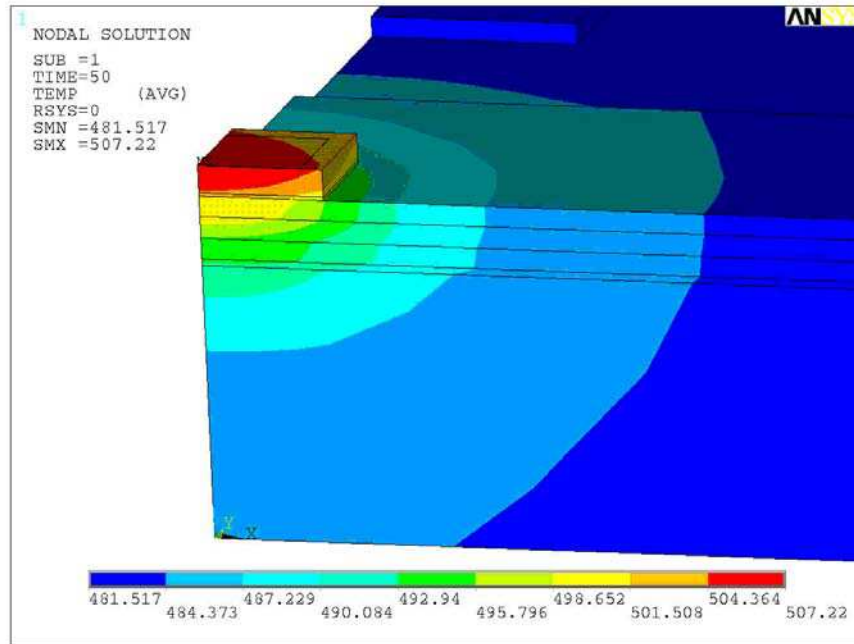


Figure II-3 : Le cône de la distribution température de l'assemblage (K)

### 3.3.4 Conditions aux limites

#### Simulations thermiques

La condition aux limites consiste à imposer sur la face inférieure de l'assemblage (face inférieure de la semelle) une température constante fixée à 25°C. Cette température est également la température de référence ( $T_f$ ) de la simulation.

#### Simulations thermomécaniques

Pour les simulations thermomécaniques, les conditions aux limites sont les suivantes :

- Les nœuds de l'axe x sont bloqués selon la direction y
- Les nœuds de l'axe y sont bloqués selon la direction x
- L'origine du repère est bloquée dans toutes les directions.

### 3.4 Modélisation du comportement des matériaux utilisés dans les assemblages

Il existe dans la littérature de nombreuses lois de comportement avec différents niveaux de sophistication. Un matériau donné peut être modélisé par une ou plusieurs de ces lois selon la nature des sollicitations auxquelles il est soumis.



### 3.4.1 Observation sur les matériaux sélectionnés

Les matériaux retenus à l'issue de la proposition des solutions d'assemblage sont récapitulés dans le Tableau II-2 :

Pièces	Matériaux
Puces diode	SiC
Fil de câblage	Al, Au
Brasure haute température	Au <sub>88</sub> Ge <sub>12</sub> , Au <sub>97</sub> Si <sub>3</sub> , Sn <sub>5</sub> Pb <sub>95</sub>
Brasure basse température	Sn <sub>97</sub> Ag <sub>3</sub> , SnAgCu, Au <sub>80</sub> Sn <sub>20</sub>
Métallisation	Al, Cu
Substrats	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , AlN
Semelles	Cu <sub>60</sub> C <sub>40</sub>

Tableau II-2 : Récapitulatif des matériaux employés dans les assemblages

Les puces et les substrats céramiques ont des comportements thermo-élastiques avec rupture brutale sans déformation permanente, ils sont thermo-élastiques linéaires fragiles.

Enfin, les semelles ont en raison de leur épaisseur relativement importante, un niveau de contraintes très inférieure à leur limite d'élasticité. Un modèle thermo-élastique linéaire est par conséquent suffisant pour décrire leur comportement.

L'analyse des défaillances a montré que les métallisations en cuivre et aluminium pouvaient plastifier considérablement à l'issue de cyclages thermiques passifs, jusqu'à rupture mécanique des substrats. Elles ont un comportement thermoélasto-plastique.

Les brasures, sont soumises à des températures absolues de fonctionnement supérieures à la moitié de leur point de fusion. Leurs déformations viscoplastiques (par fluage) deviennent prédominantes sur leurs déformations élastiques et plastiques instantanées. La prise en compte de ces trois types de déformation est nécessaire à la bonne approximation de leur comportement, elles sont supposées thermoélasto-viscoplastiques.

Les assemblages étant soumis à des chargements cycliques, les lois de comportement ci-dessus devront de préférence être capables de rendre compte des principaux phénomènes mis en jeu.

### 3.4.2 Modélisation du comportement des alliages de brasure

L'endommagement par fatigue thermomécanique des brasures est un des modes principaux de défaillance de modules. Les lois de comportement des brasures employées pour leur modélisation sont directement impliquées dans les procédures d'évaluation de durée de

vie des assemblages, leur choix et la détermination de leurs paramètres constituent des points déterminants pour la pertinence des analyses de fiabilité.

### 3.4.2.1 La théorie de la viscoplasticité

La théorie de la viscoplasticité décrit notamment l'écoulement par fluage de la matière, qui dépend essentiellement du temps. On distingue trois moyens pour la caractérisation de la viscoplasticité : les essais de fluage, d'écrouissage et de relaxation.

Il est généralement admis qu'un matériau est susceptible de fluer pour des températures supérieures à  $T_f/2$ . Il convient de caractériser avec lois de comportement du fluage. Le fluage conduit à une température donnée sous charge constante [Sain-95] fait apparaître trois phases présentées sur la figure II-4 ci-dessous :

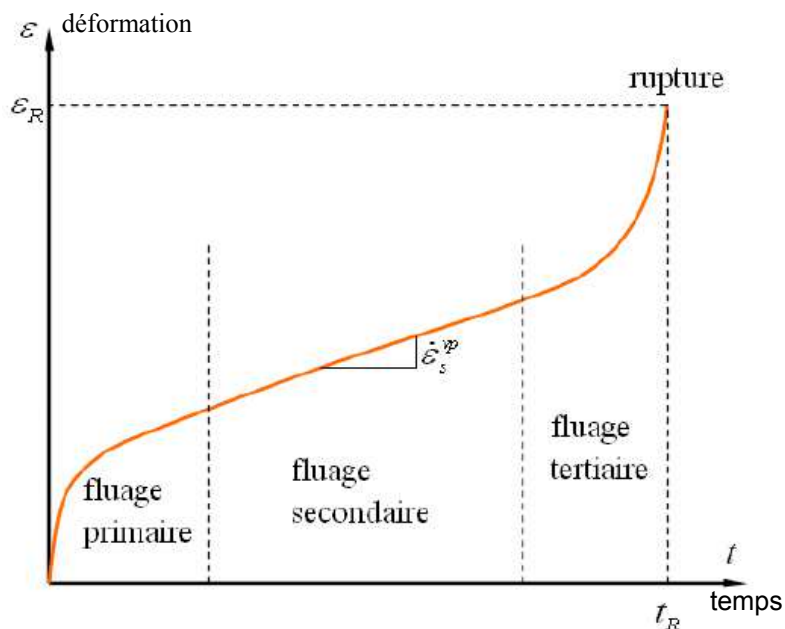


Figure II-4 : Les trois phases d'un essai de fluage

- le fluage primaire pendant lequel la vitesse de déformation diminue
- le fluage secondaire pour lequel la vitesse de déformation est constante au cours du temps
- le fluage tertiaire caractérisé par une augmentation de la vitesse de déformation jusqu'à la rupture.

A basse température, c'est en général le fluage primaire et le fluage secondaire qui sont prépondérants. Lorsque la température augmente, le fluage secondaire s'établit plus rapidement, et le fluage tertiaire prend plus d'importance [Fran-93].

### 3.4.2.2 Loi d'Anand

Le modèle d'Anand permet de représenter à la fois le fluage primaire, le fluage secondaire et l'érouissage des matériaux viscoplastiques. Il a été montré [Wang-01] que ce modèle pouvait être avantageusement employé pour la modélisation du comportement des brasures.

Lors des simulations effectuées, les matériaux constituant l'assemblage sont considérés comme des milieux homogènes et isotropes. On considère également, que à l'exception des alliages de brasage, les matériaux formant les assemblages (cuivre, silicium) restent dans leur domaine d'élasticité durant leur cycle de vie ou conditions de test. Les alliages utilisés pour former les brasures en électronique, ont un comportement viscoplastique, ainsi que des propriétés thermomécaniques dépendantes de la température, mais aussi de la durée des sollicitations mécaniques. Une des caractéristiques importantes de ces alliages, vient du fait que leur température d'utilisation se situe au delà de la moitié de la température de fusion de l'alliage exprimé en Kelvin. On se situe donc toujours à haute température pour ces alliages. Ainsi, il est nécessaire de prendre en compte le fluage qui apparait à ces températures et qui dépend également du temps. La discussion sur la modélisation des assemblages en électronique apportée par Gracia [Gued-05], nous montre que le modèle proposé par Anand [Brow-89] est la meilleure solution à adopter pour prendre en compte le comportement complexe des alliages de brasure aux températures d'utilisation et de test courants (-55°C/+150°C) en électronique.

La modélisation apportée par Anand se fait au travers de trois équations (II-1 ; II-2 ; II-3) prenant en compte la réponse mécanique des matériaux en fonction du temps. Ce modèle utilise une seule variable interne appelée résistance à la déformation qui est notée  $s$ . C'est un paramètre qui a les dimensions d'une contrainte mais qu'on ne peut pas mesurer. Le modèle d'Anand est valable pour des matériaux n'ayant pas subi de déformation entraînant un endommagement et permet de prendre en compte, entre autre, la dépendance à la température.

Le fluage secondaire du matériau est obtenu par une modification de la forme sinus hyperbolique proposée par Garofalo pour le fluage secondaire. Avec l'emploi de la fonction sinus hyperbolique, ce modèle permet une meilleure approximation du fluage secondaire à la fois pour les faibles et les fortes contraintes.

Vitesse de déformation plastique :

$$\frac{d\varepsilon_p}{dt} = A \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \left[ \sinh\left(\frac{\xi\sigma}{s}\right) \right]^{\frac{1}{m}} \quad \text{Equation II-1}$$

- A : Facteur pré-exponentiel (s<sup>-1</sup>)
- Q : Energie d'activation (kJ/mol)
- R : Constante de gaz parfaits (kJ/mol.K)
- ξ : Multiplicateur de contraintes (sans dimension)
- σ : Contrainte équivalente
- s : Résistance à la déformation (Pa<sup>-1</sup>)
- m : Sensibilité à la containte de la vitesse de déformation (sans dimension)

Vitesse de résistance à la déformation plastique :

$$\dot{s} = \left[ h_0 \left| 1 - \frac{s}{s^*} \right|^a \cdot \text{sign}\left(1 - \frac{s}{s^*}\right) \right] \cdot \frac{d\varepsilon_p}{dt} \quad \text{Equation II-2}$$

- $\dot{s}$  : Vitesse de résistance à la déformation
- $h_0$  : Constante de durcissement/adoucissement (MPa)
- $s^*$  : Valeur de saturation de la résistance à la déformation (MPa) associé à une valeur de T et de  $\frac{d\varepsilon_p}{dt}$
- $a > 1$  : Sensibilité de la consolidation ou de l'adoucissement avec la vitesse de déformation

Valeur de saturation de la résistance à la déformation :

$$s^* = \hat{s} \left[ \frac{\dot{\varepsilon}_p}{A} \cdot e^{\left(\frac{Q}{RT}\right)} \right]^n \quad \text{Equation II-3}$$

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

- n : Sensibilité à la déformation de la valeur de saturation de la résistance à la déformation (sans dimension)

L'application de ce modèle se fait au travers de 9 paramètres. Le tableau II-3 donne les valeurs des neuf constantes utilisées pour l'alliage Sn<sub>5</sub>Pb<sub>95</sub>, ainsi que son module d'Young associé en fonction de la température.

Constante	Valeur
C1 : S <sub>0</sub>	15,09Mpa
C2 : Q/R	15583K
C3 : A	3,25.10 <sup>12</sup> s <sup>-1</sup>
C4 : ξ	7
C5 : m	0,143
C6 : h <sub>0</sub>	1787Mpa
C7 : δ	72,73Mpa
C8 : n	4,37.10 <sup>-3</sup>
C9 : a	3,73

Tableau II-3 : Valeurs des constantes du modèle d'Anand pour l'alliage Sn<sub>5</sub>Pb<sub>95</sub> [Wang-01]

Température (K)	Module d'Young
298	15,7 GPa
373	13,6 GPa
473	10,7 GPa
600	100 kPa

Tableau II-4 : Valeurs du module d'Young en fonction de la température [Wang-01]

Les 9 paramètres du modèle d'Anand permettent de décrire le comportement d'un matériau de brasure au travers des 3 équations du comportement. Ce modèle est directement intégré dans ANSYS, le logiciel de simulation multi-physique par éléments finis utilisé dans notre étude. Le calcul de ces paramètres d'Anand est très complexe, donc nous avons dans notre cas utilisé les valeurs trouvées dans la littérature.

### 3.4.3 Modélisation du comportement des métallisations

Les métallisations sont supposées thermoélasto-plastiques. D'un point de vue expérimental, le comportement élasto-plastique se met généralement en évidence lors d'essais de traction, par la présence sur les courbes contrainte/déformation d'un domaine d'élasticité linéaire, au-delà duquel la courbe chute progressivement jusqu'à la rupture. L'allure généralement observée est présentée à la figure II-5.

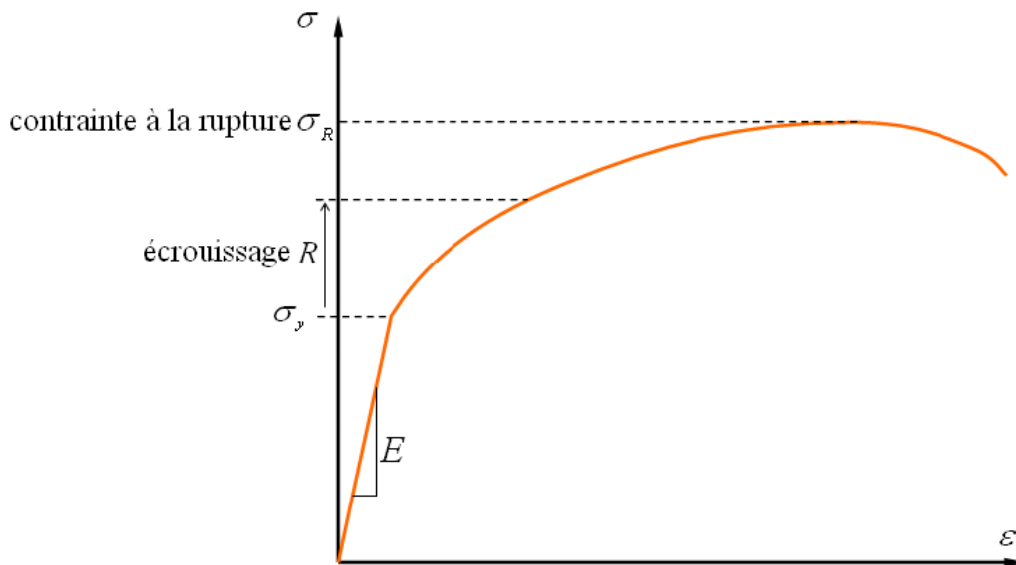


Figure II-5 : Allure générale d'une courbe d'érouissage en traction [Estr]

## 4. Caractérisation des matériaux d'assemblages

### 4.1 Caractérisation électrique de diode Schottky en SiC aux différentes températures

#### 4.1.1 Appareils utilisés et conditions de mesure

La caractérisation électrique statique en mode de polarisation directe est réalisée à l'aide du traceur TEK 371A. Ce traceur permet d'effectuer la caractérisation de composant en régime pulsé et peut atteindre au maximum une puissance de 3000W. Généralement, la durée des impulsions est 300  $\mu$ s. La caractérisation de composants en mode pulsé permet d'atteindre des courants élevés et de limiter les problèmes d'auto-échauffement du composant. La figure II-6 montre une photographie du traceur TEK 371A.

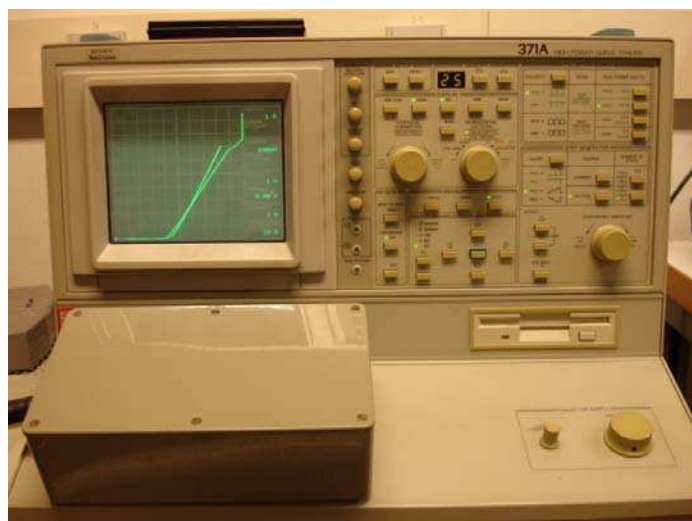


Figure II-6 : Traceur TEK 371A

Les mesures ont été réalisées à différentes températures. Pour chauffer le composant entre 25°C et 200°C, nous avons utilisé un conditionneur (TEMPTRONIC) à air pulsé. La Figure II-7 montre le véhicule de test en température contrôlée avec un conditionneur.

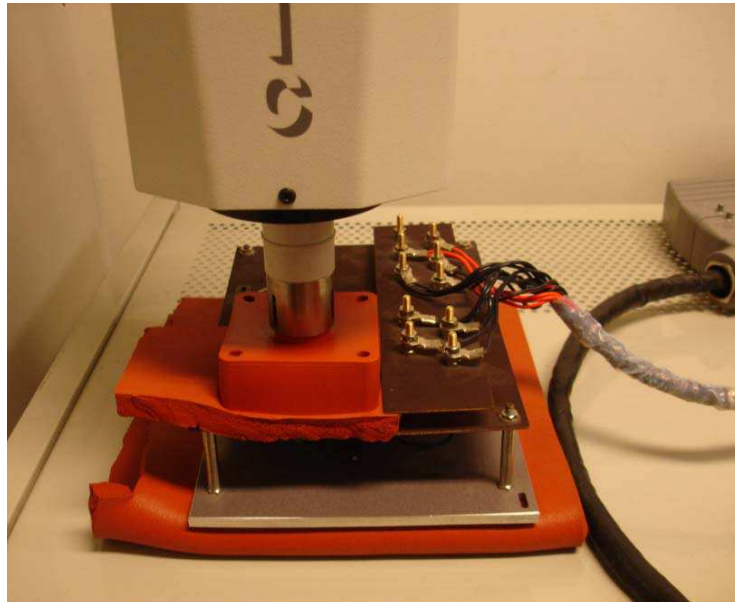


Figure II-7 : Test avec un conditionneur d'air pulsé en température contrôlée

La connexion entre le véhicule de test et le traceur de courbes statiques comprend trois fils (Figure II-8) : les trois fils blancs pour la connexion des deux broches de la diode (deux fils pour anode et un fil pour cathode), on utilise deux fils en parallèle reliés à l'anode pour diminuer les pertes dans les fils de bonding d'Al. L'utilisation des entrées « sense » sur ce traceur permet de tenir compte de la différence de potentiel apparaissant dans les fils reliant le composant au traceur.

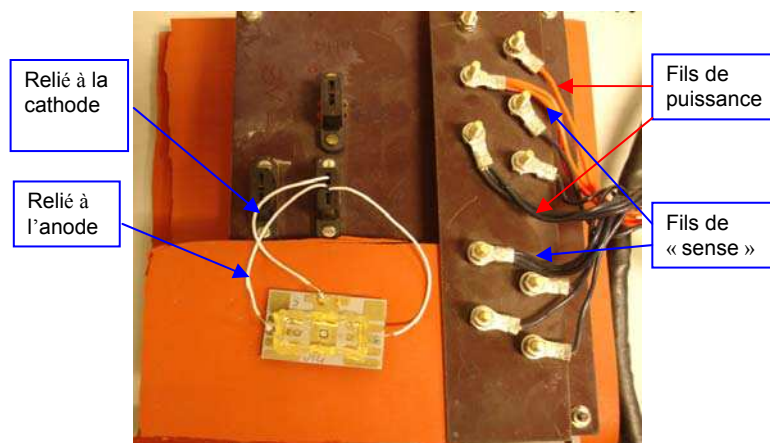


Figure II-8 : Connexion entre le véhicule de test et le traceur

## 4.1.2 Résultats des caractérisations statiques

Figure (II-9) montre les caractéristiques statique ( $I_a$ - $V_{ak}$ ) pour la diode Schottky SiC à des températures compris entre 25°C et 200°C. La diode SiC peut travailler à très haute température (au-dessus de 200°C), ici on s'arrête jusqu'à 200°C, car il y des gels (encapsulant) au-dessus de la puce.

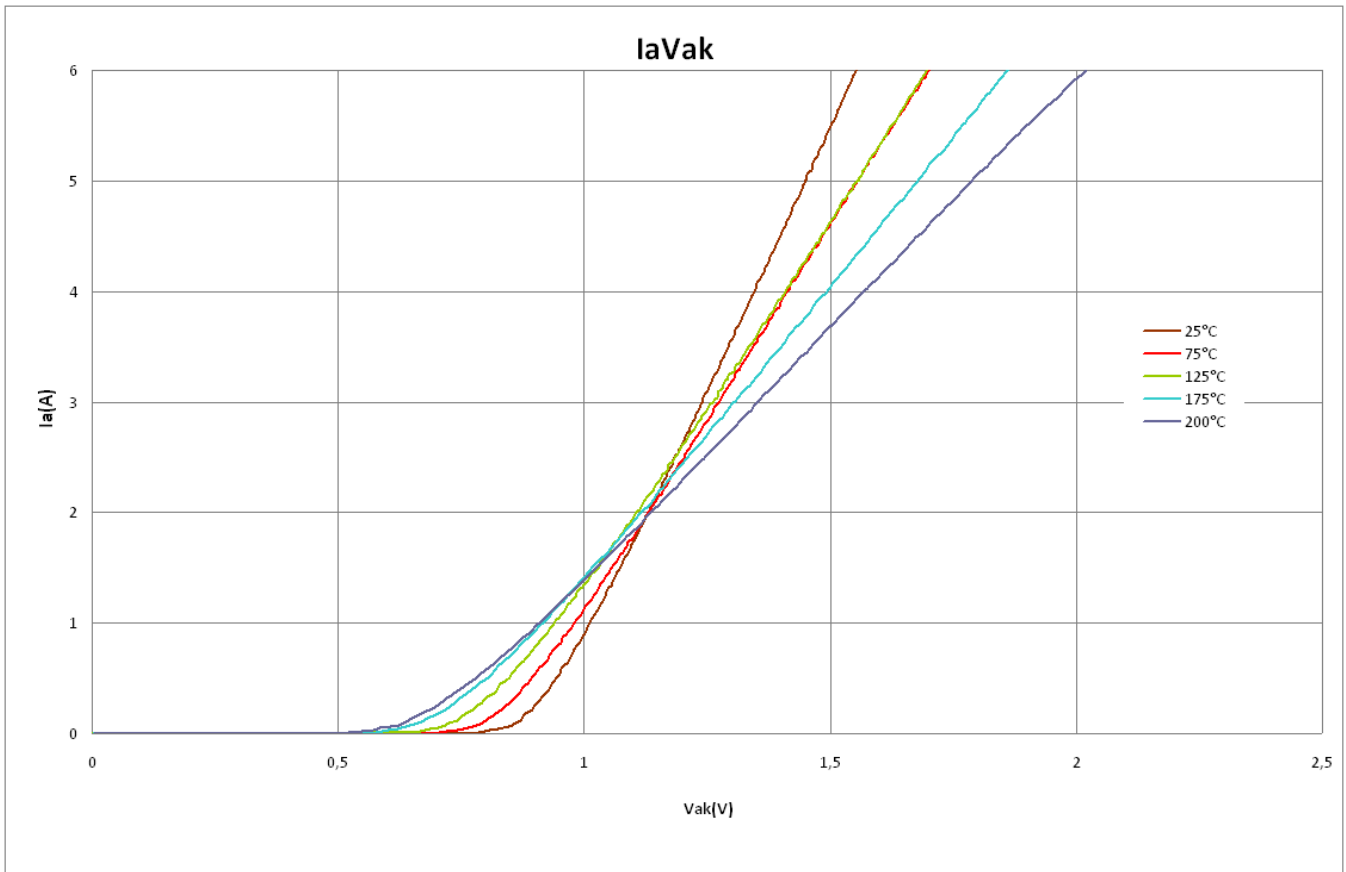


Figure II-9 : Caractéristiques électriques statiques en polarisation directe de la diode Schottky SiC à des températures comprises entre 25°C et 200°C

On remarque que les tensions de seuil diminuent quand la température augmente. On trouve que les caractéristiques électriques statiques de la diode SiC sont différentes de celle du Silicium. Il a eu trois zones différentes : En fort courant (ici environ 2 A), les tensions  $V_{ak}$  augmentent quand la température augmente (coefficient de la température positif). À faible courant, les tensions  $V_{ak}$  diminuent quand la température augmente (coefficient de la température négatif). Pour le « Point des concours » au voisinage de 2 A, les tensions  $V_{ak}$  ne bougent pas quand la température augmente (coefficient de la température zéro).



## 4.2 Caractériser le paramètre mécanique Module d'Young

### 4.2.1 La contrainte et les déformations

#### Les contraintes

Si une force  $F_y$  est exercée perpendiculairement à une surface  $S$  (Figure II-10), on définit la **contrainte** de traction ou de compression, selon le sens de la force, par :

$$\sigma = \frac{F_y}{S} \quad \text{Equation II-4}$$

$\sigma$  est la contrainte exprimée en Pascal (Pa) ou en ( $\text{N}/\text{m}^2$ ).

Si une force  $F_x$  est exercée parallèlement à la surface  $S$  (Figure II-10), on définit la **contrainte de cisaillement** par :

$$\tau = \frac{F_x}{S} \quad \text{Equation II-5}$$

La figure ci-dessous est un cas qui met en application les deux forces  $F_y$  et  $F_x$  exercées sur la surface  $S$ .

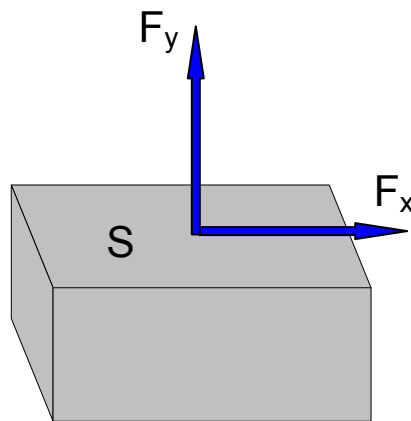


Figure II-10 : Application des deux forces  $F_y$  et  $F_x$  exercées sur la surface  $S$

#### Les déformations

La déformation d'un matériau solide résulte d'une contrainte de traction ou de compression (Figure II-11), la **déformation longitudinale** ( $\epsilon_n$ ) en traction se définit par :

$$\epsilon_n = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{Equation II-6}$$

Où :

- $\Delta L$  exprime le déplacement de la longueur en mètre (m)
- $L$  est la longueur du solide en mètre (m)
- $\epsilon_n$  est la déformation longitudinale (sans unité)

La déformation latérale ( $\epsilon_L$ ) en traction se définit par :

$$\epsilon_L = \frac{-\Delta W}{W} \quad \text{Equation II-7}$$

Où :

- $\Delta W$  exprime le déplacement de la largeur en mètre (m)
- $W$  est la largeur du solide en mètre (m)
- $\epsilon_L$  est la déformation latérale (sans unité)

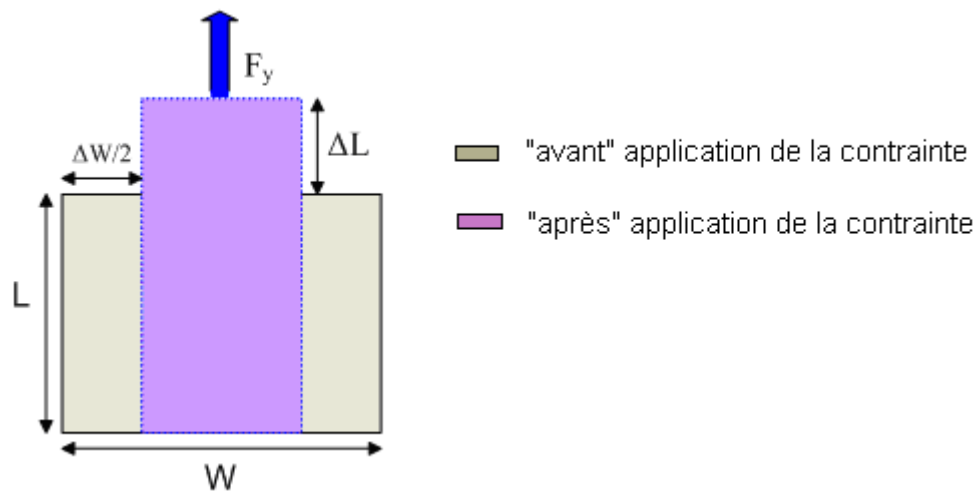


Figure II-11 : Déformations des contraintes de traction

## 4.2.2 Module d'Young

Le module d'Young ou module d'élasticité est la constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et de la déformation pour un matériau élastique isotrope.

Le physicien Thomas Young avait remarqué que le rapport entre la contrainte de traction appliquée à un matériau et la déformation qui en résulte (un allongement relatif) est constant, tant que cette déformation reste petite et que la limite d'élasticité (Figure II-12) du matériau n'est pas atteinte.

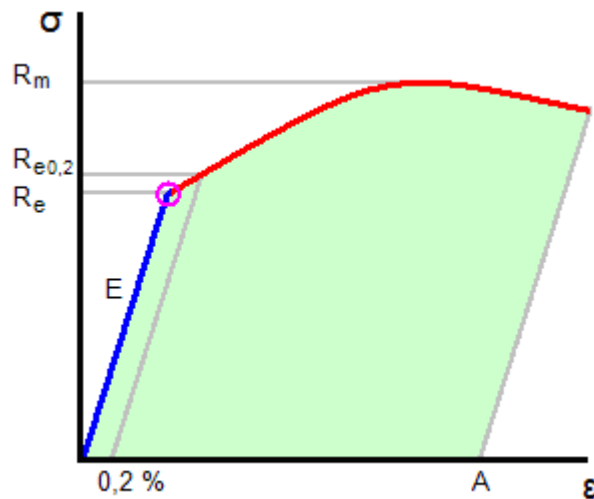


Figure II-12 : Diagramme contrainte-déformation

La loi d'élasticité est la loi de Hooke :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{Equation II-8}$$

Où :

- $\sigma$  est la contrainte (en unité de pression)
- $E$  est le module de Young (en unité de pression)
- $\varepsilon$  est déformation (sans unité)

### 4.2.3 Lamelles de substrat céramique en traction

#### 4.2.3.1 Appareils utilisés et conditions de l'expérimentation de traction

Les substrats céramiques sont des matériaux élastiques fragiles, ceci implique que l'expérimentation en traction ne sera pas simple à réaliser. Pour pouvoir appliquer les contraintes mécaniques, nous avons fait l'acquisition d'une machine de caractérisation mécanique « INSTRON 5565 » (Figure II-13). Elle a une capacité de charge allant jusqu'à 5000 N. Cette machine est associée à une enceinte thermique permettant de fixer une température pour chaque essai. Elle peut fournir des températures dans l'intervalle  $[-100^{\circ}\text{C}, +300^{\circ}\text{C}]$ .



Figure II-13 : Machine de caractérisation mécanique INSTRON 5565

Les tests seront à température contrôlée. Vu la fragilité des barrettes de substrat céramique, nous sommes obligés d'adapter les accessoires de la machine mécanique à notre application. Dans ce cadre, des mors spécifiques (caoutchouc) sont utilisés pour éviter toute cassure avant de commencer les tests (Figure II-14).

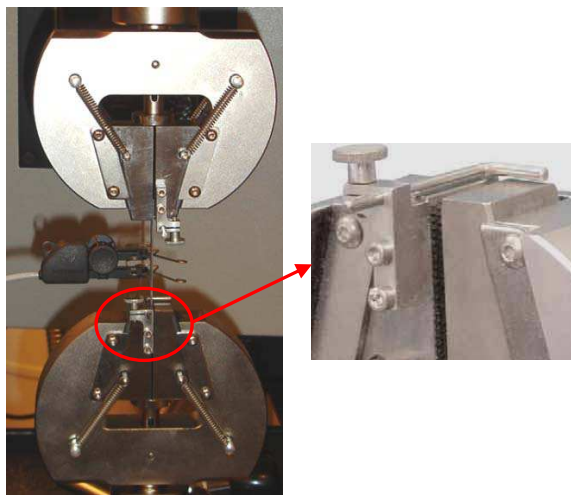


Figure II-14 : Mors spécifiques (caoutchouc)

La vitesse de déplacement de la traverse est de  $100 \mu\text{m}/\text{min}$ . Toutes les mesures sont effectuées à température ambiante  $25^\circ\text{C}$ . La machine est équipée du capteur de force 5000 N, et les déplacements sont mesurés par l'extension mètre (Figure II-15).

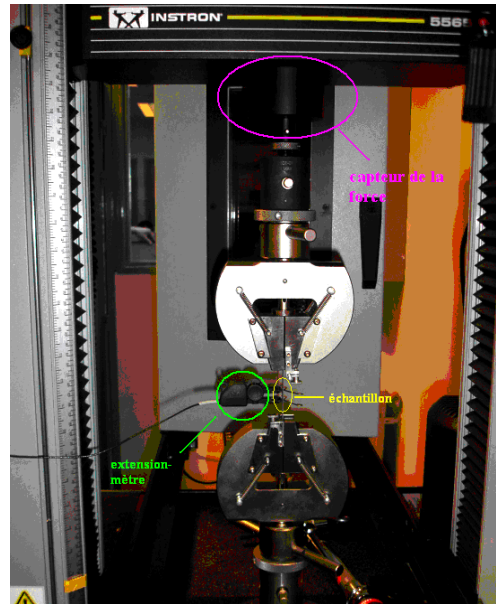


Figure II-15 : Mesure par le capteur de la force et l'extensiomètre

Les lamelles de substrat céramique sont obtenues en découpant des substrats entiers (Figure II-16). La longueur des lamelles doit être supérieure à 5 cm pour se fixer entre les deux mors.



(a)



(b)

Figure II-16 : (a) Substrat céramique  $\text{Si}_3\text{N}_4$  avant découpe, (b) lamelles de substrat  $\text{Si}_3\text{N}_4$

Lorsqu'on veut appliquer une contrainte de traction, on applique une force  $F$  uniformément sur la surface  $S$  (Figure II-17). La valeur de la contrainte mécanique appliquée  $P$  est donnée par l'expression suivante :

$$P = \frac{F}{S} \quad \text{Equation II-9}$$

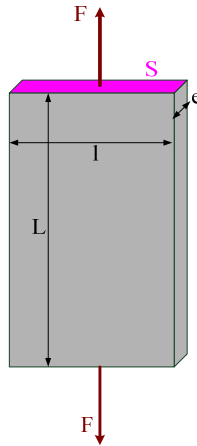


Figure II-17 : Traction sur la surface S

#### 4.2.3.2 Mesure la propriété mécanique Module d'Young

##### (a) Céramique $\text{Si}_3\text{N}_4$

Nous plaçons les échantillons constitués de lamelle en céramique  $\text{Si}_3\text{N}_4$  de dimension 4,53 mm de largeur et 0,64 mm d'épaisseur entre les deux mors de la machine de traction. Puis nous appliquons une pression en traction linéaire sur ces échantillons. Les forces sont détectées par le capteur de la force. Nous avons étudié deux types de profil de mesure, le premier ayant une vitesse de mesure 200  $\mu\text{m}/\text{min}$  (profil 1) et le deuxième ayant une vitesse de mesure 100  $\mu\text{m}/\text{min}$  (profil 2).

Nous pouvons tracer la courbe force-déplacement à partir des charges de force relevées par le capteur de la force et le déplacement de la traverse relevé par l'extensomètre pour les deux types de profil de mesure (Figure II-18). La charge de la force et le déplacement total sont linéaires dans la partie utile de mesure (avant la rupture de l'échantillon).

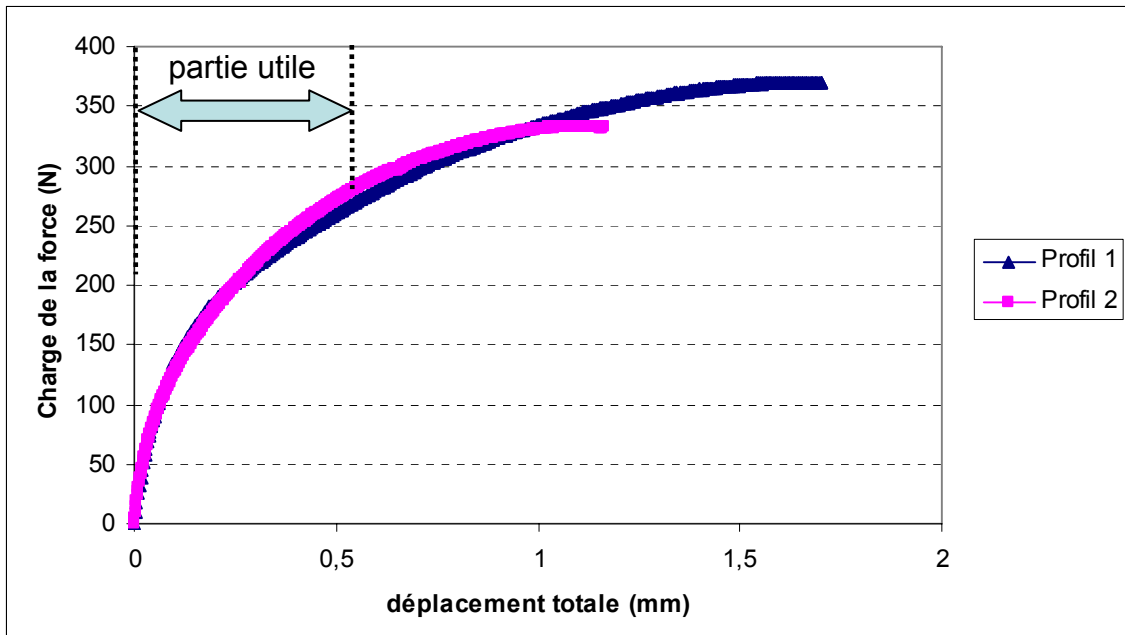


Figure II-18 : Courbes charge - déplacement pour deux profils différents ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )

Pour calculer le paramètre module d'Young, les courbes contraintes déformations (Figure II-19) sont tracés à partir des courbes précédentes de la partie linéaire (Figure II-18) :

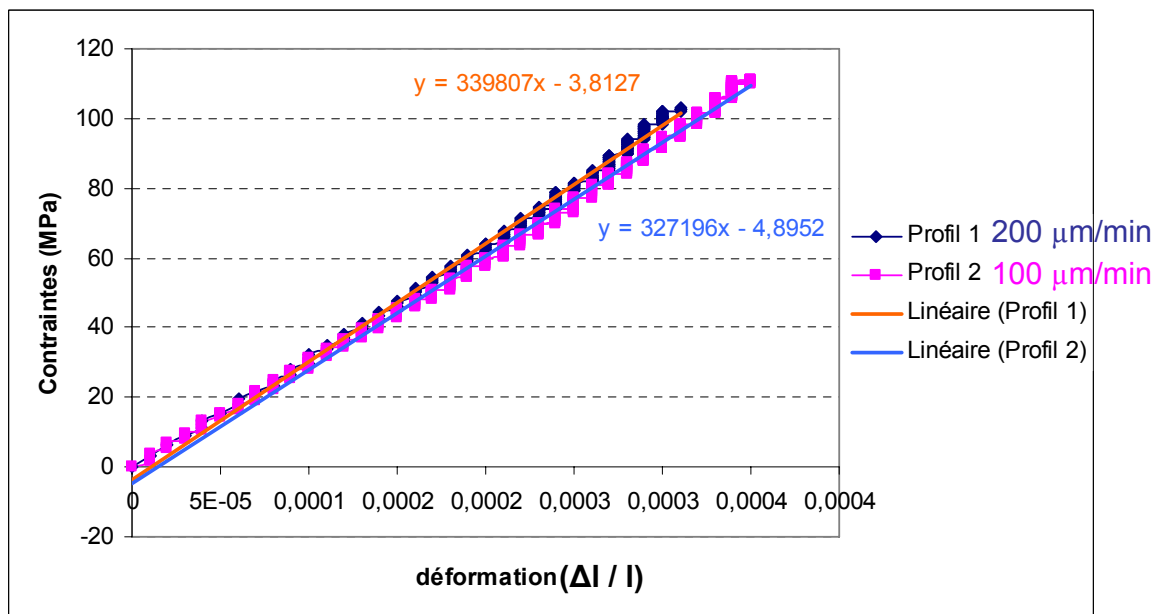


Figure II-19 : Courbes contrainte de traction - déformation pour deux profils différents ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )

Le module d'Young peut être calculé avec le rapport de contrainte et de déformation. On en déduit ici, le module d'Young du  $\text{Si}_3\text{N}_4$  :

	Profil 1	Profil 2
Module d'Young de $\text{Si}_3\text{N}_4$	339 (GPa)	327 (GPa)

La valeur théorique de module d'Young de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  est 314 GPa, donc la valeur expérimentale du profil 2 est plus proche de la valeur théorique. C'est-à-dire que la vitesse de la traverse doit être la plus faible possible pour avoir plus de précision.

### (b) Céramique AlN

On fait la même mesure que la céramique  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . La largeur de lamelle en céramique AlN est 4,75 mm, l'épaisseur est 1 mm, la vitesse de la traverse pour le profil 1 est 200  $\mu\text{m}/\text{min}$ , pour le profil 2 est 100  $\mu\text{m}/\text{min}$ .

Nous pouvons tracer la courbe force-déplacement à partir des charges de force relevées par le capteur de la force et le déplacement de la traverse relevée par l'extensomètre pour les deux profils de mesure (Figure II-20). La charge de la force et le déplacement totale sont linéaires dans la partie utile de mesure (avant la rupture d'échantillon).

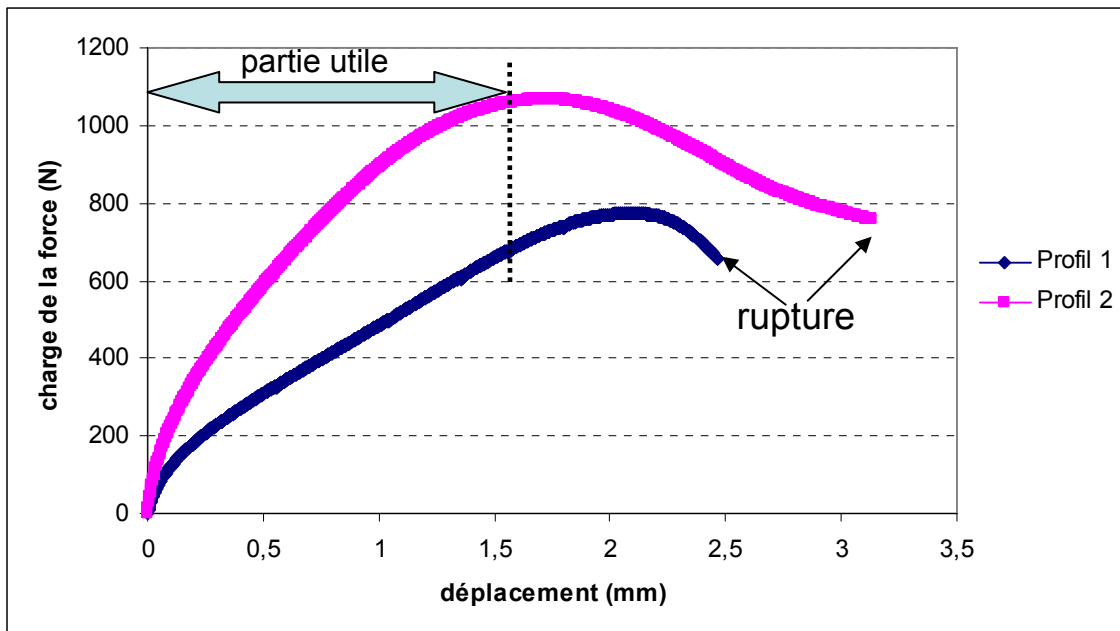


Figure II-20 : Courbes charge-déplacement avec deux profils différents (AlN)

Pour calculer le paramètre module d'Young, les courbes contraintes déformations (Figure II-21) sont tracés à partir des courbes précédentes de la partie linéaire (Figure II-20) :



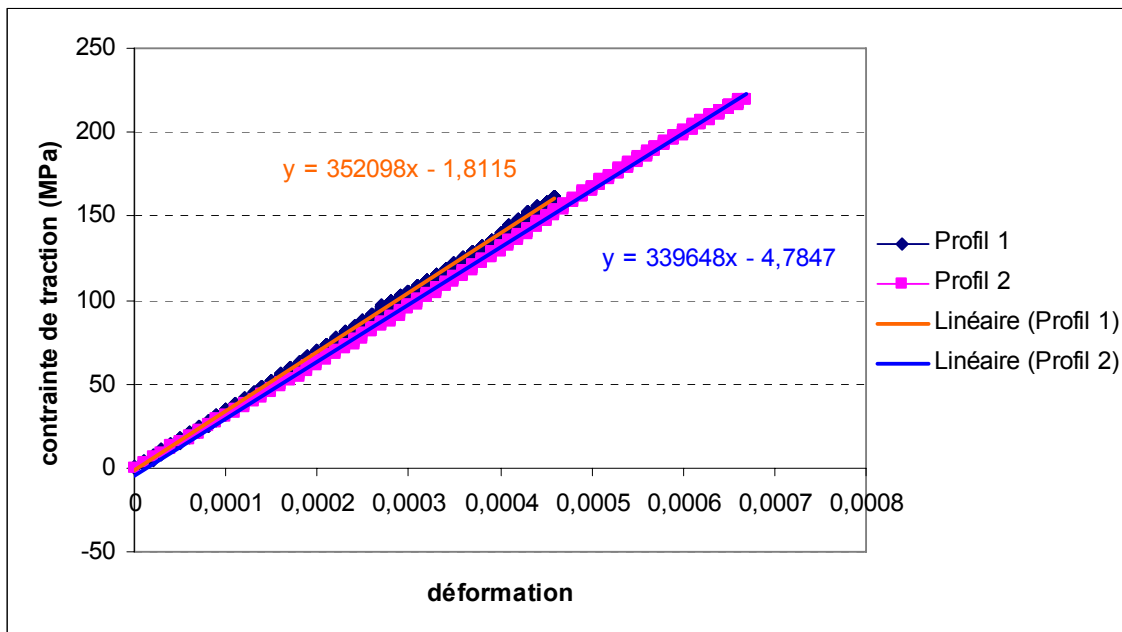


Figure II-21 : Courbes contrainte de traction-déformation avec deux profils différents (AIN)

On en déduit ici, le module d'Young d'AIN :

	Profil 1	Profil 2
Module d'Young d'AIN	352 (GPa)	339 (GPa)

La valeur théorique de module d'Young d'AIN est 310 GPa, donc la valeur expérimentale du profil 2 est plus proche de la valeur théorique. C'est-à-dire que la vitesse de la traverse doit être la plus faible possible pour avoir plus de précision.

### (C) Conclusions

Le tableau (II-5) montre les comparaisons des valeurs expérimentales et les valeurs théoriques de Module d'Young de substrat céramique :

	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>		AIN	
	Profil 1	Profil 2	Profil 1	Profil 2
<b>Valeur d'expérimentale de Module d'Young (GPa)</b>	339	327	352	339
<b>Valeur théorique de Module d'Young (GPa)</b>	314		310	

Tableau II-5 : Comparaisons des valeurs expérimentales et les valeurs théoriques du Module d'Young de substrat céramique

Pour les tests réalisés sur plusieurs types de mesure, on peut conclure que :

- on n'a pas eu beaucoup de déformation sur ces deux types de substrat (AlN et Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)
- la longueur de lamelle sous test n'a pas d'effet sur les valeurs obtenues
- la vitesse de la traverse doit être la plus faible possible
- le mors adapté à notre type d'éprouvette est : le caoutchouc
- les valeurs obtenues proches des valeurs théoriques

### 4.3 Caractériser le paramètre thermomécanique CDT

Du fait de l'inadéquation des coefficients de dilatation thermique des différents matériaux assemblés, l'assemblage subit des déformations, d'où l'apparition de contraintes thermomécaniques dans les joints de brasure. Ces dernières peuvent conduire à la dégradation de ces joints, ainsi que créer des difficultés pour les assemblages.

#### 4.3.1 Coefficient de dilatation thermique (CDT)

Le coefficient de dilatation thermique  $\alpha$  (CDT) définit la relation de proportionnalité qui existe entre l'allongement relatif  $\Delta l/l$  d'un matériau pour une variation de température  $\Delta T$ , et s'exprime en ppm/°C ou (ppm/K).

Ce coefficient varie en fonction de la température, c'est pourquoi il a été défini deux types de coefficient de dilatation thermique, comme illustré sur la figure (Figure II-22). Ce coefficient est pratiquement constant sur une large plage de température pour certains matériaux comme les métaux ou les céramiques.

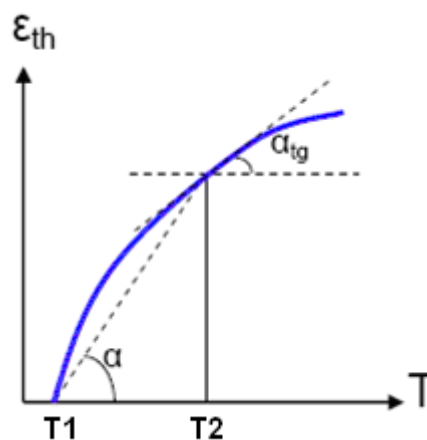


Figure II-22 : Représentation graphique du coefficient de dilatation thermique

- Le coefficient de dilatation, dit classique ou moyen ( $\alpha$ ) caractérise la déformation moyenne du matériau sur une plage de température.
- Le coefficient de dilatation tangentiel ou différentiel ( $\alpha_{tg}$ ) caractérise la dilatation du matériau à une température donnée.

L'élongation relative du matériau est alors donnée par la formule suivante :

$$\varepsilon = \int_{T_0}^{T_1} \alpha_{tg} dT \quad \text{Equation II-10}$$

Cependant, sur une plage de température limitée, où le coefficient de dilatation thermique varie peu avec la température, la formule précédente peut se simplifier :

$$\varepsilon = \alpha(T_1 - T_0) = \alpha\Delta T \quad \text{Equation II-11}$$

### 4.3.2 Appareils utilisés

Le « profilo-mètre » est utilisé dans les tests de déformation et caractérisation. Ce « profilo-mètre » ALTISURF 500 (Figure II-23) permet de faire des mesures d'état de surface (surface 3D, profil 2D, ou statique) en température contrôlée jusqu'à 300°C.

Un faisceau lumineux issu d'une lampe halogène (lumière blanche, polychromatique) passe par une fibre optique jusqu'à une sonde passive. Cette sonde passive possède une lentille, le rôle de cette lentille est de décomposer le faisceau lumineux en longueurs d'ondes monochromatiques

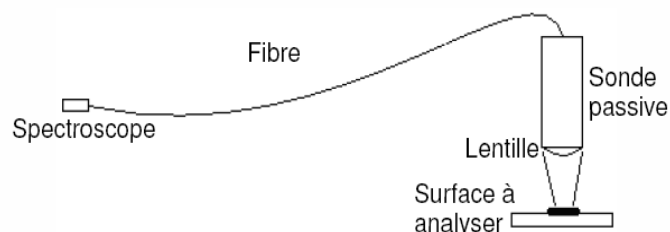


Figure II-23 : Profilomètre ALTISURF 500

Le profilo-mètre est équipé de deux sondes pour faire les mesures : une sonde 300  $\mu\text{m}$  dont la résolution est de 10nm et la distance de travail est de 4,5 mm (mesure à température ambiante) ; une sonde 3 mm dont la résolution est de 100nm et la distance de de travail est de 38 mm (mesure de l'ambiante à haute température, cas plus intéressant).

Une enceinte thermique, contrôlée par un « Thermal Chuck », nous permet de maîtriser la température (figure II-24 (a)) jusqu'à 300°C. Dans les expériences de thermomécanique, ce « Thermal Chuck » est utilisé pour fournir la montée et la descente de la température (25°C-275°C-25°C), refroidissement avec l'air.



Figure II-24 : (a) Thermal Chuck



(b) Sondes et le plateau chauffant

Les échantillons de mesure (Figure II-25) sont placés sur le plateau chauffant (Figure II-24 b).

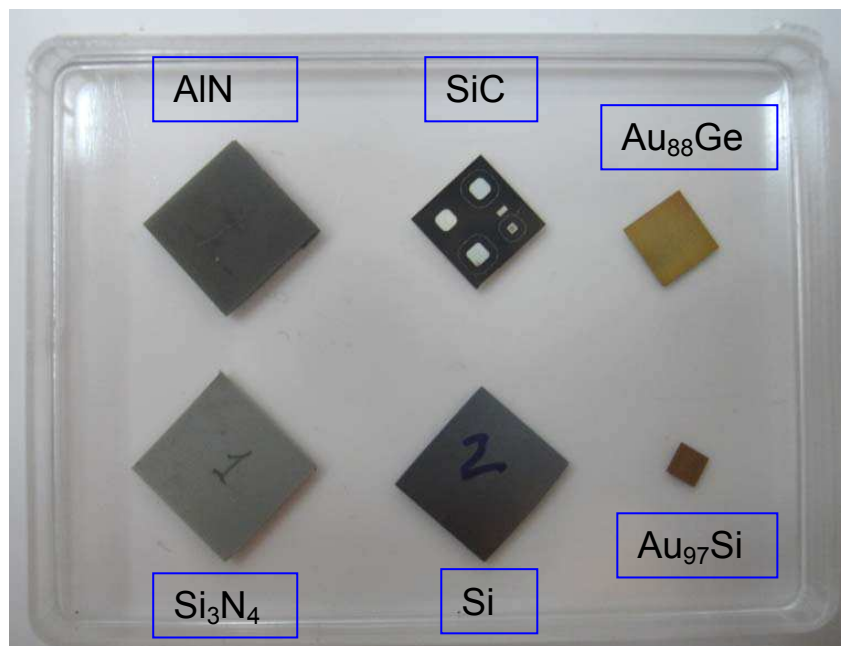


Figure II-25: Echantillons de mesure CDT

Afin de mesurer localement la température et son évolution, nous avons choisi d'insérer un thermocouple dans l'enceinte thermique pendant les expériences. Cette méthode est utile pour déterminer la température dans l'enceinte thermique mais elle est difficile à mettre en place en temps réel.

Ce thermocouple est placé de manière à ce que sa tête soit proche du composant, afin de mesurer la température autour du composant.

### 4.3.3 Mesure des paramètres CDT

#### 4.3.3.1 Conditions de mesure

La température de l'enceinte thermique variera donc de l'ambiante ( $25^{\circ}\text{C}$ ) à  $275^{\circ}\text{C}$ . Un palier de 2min est respecté tous les  $50^{\circ}\text{C}$  (Figure II-26). Les mesures sont faites tous les  $50^{\circ}\text{C}$ , après 2 min de palier.

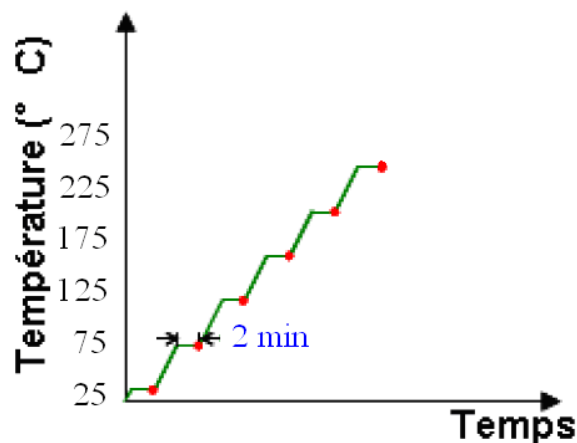


Figure II-26: Mesure lors d'une montée en température

Deux diagonales de chaque échantillon sont mesurées, comme le montre la figure II-27

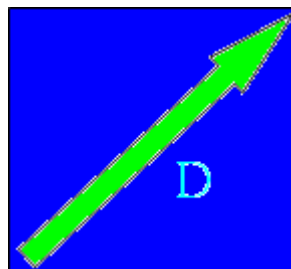


Figure II-27: Diagonale à mesurer

Après on doit définir :

- les **fréquences d'échantillonnage**, par exemple 100Hz pour AlN , et 1000Hz pour l' $\text{Au}_{98}\text{Si}_2$ .
- la **vitesse de mesure** dépend de la fréquence d'échantillonnage et du pas de mesure, soit : la vitesse de mesure  $\leq$  fréquence d'échantillonnage \* pas
- le **pas de mesure**, doit être le plus petit possible pour avoir les meilleures précisions de mesure en plan XY.

#### 4.3.3.2 Analyse des résultats expérimentaux

Les mesures brutes sont ensuite traitées par le logiciel « Altimap ». Les opérateurs de données du logiciel sont utilisés pour traiter et rendre plus exploitables les données originales (Figure II-28).

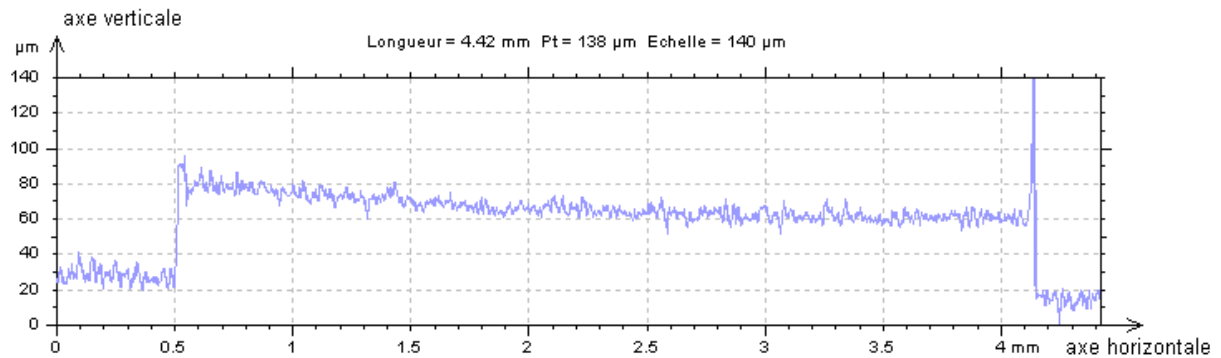


Figure II-28 : Résultats originaux de l' $\text{Au}_{97}\text{Si}_3$

Deux étapes de traitement sont réalisées pour relever les déformations thermiques d'échantillon dans ces expériences.

Dans la première étape, à partir des données brutes, nous extrayons le profil de surface en supprimant la rugosité, images des imperfections de la surface. Un opérateur de filtrage gaussien est utilisé (Figure II-29). Le résultat de la diagonale D verticale de l' $\text{Au}_{97}\text{Si}_3$  est pris comme exemple.

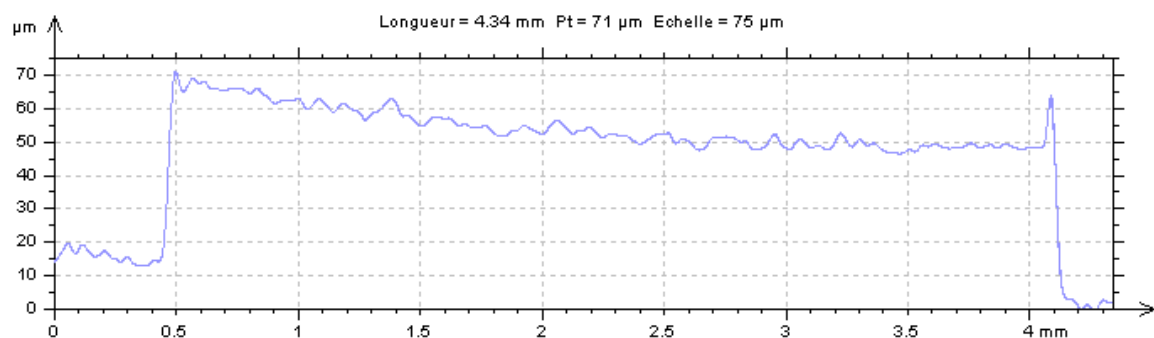


Figure II-29 : Résultat après le filtrage gaussien 0,08 mm

La surface du plateau chauffant n'est pas plate et le profil de surface d'échantillon n'est pas symétrique. Dans la deuxième étape, un traitement de redressement est donc effectué sur deux parties choisies (Figure II-30).

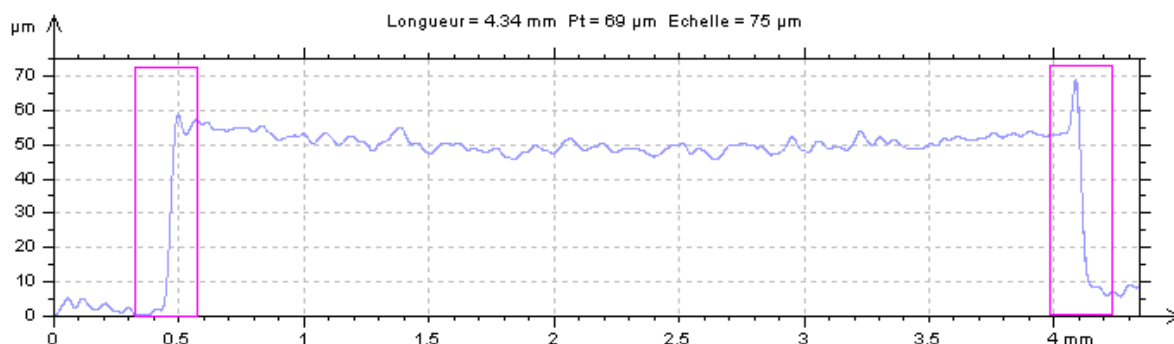


Figure II-30 : Résultat après redressement sur deux parties

Les résultats expérimentaux pour les puces :

Configuration		Si	SiC
Conditions de mesure	Fréquence d'échantillonnage	1000 Hz	1000 Hz
	Vitesse de mesure	250 µm/s	250 µm/s
	Vitesse de retour	250 µm/s	250 µm/s
	Pas de mesure	0,5 µm	0,5 µm
Résultats CDT	$\alpha_{25^{\circ}\text{C}-125^{\circ}\text{C}}$	8,3 ppm/°C	9,4 ppm/°C
	$\alpha_{125^{\circ}\text{C}-275^{\circ}\text{C}}$	6,12 ppm/°C	6,21 ppm/°C

Tableau II-6 : Les résultats CDT pour différents types de puce

Les résultats expérimentaux pour les brasures :

Configuration		Au <sub>97</sub> Si <sub>3</sub>	Au <sub>88</sub> Ge <sub>12</sub>
Conditions de mesure	Fréquence d'échantillonnage	1000 Hz	1000 Hz
	Vitesse de mesure	250 µm/s	250 µm/s
	Vitesse de retour	250 µm/s	250 µm/s
	Pas de mesure	1 µm	1 µm
Résultats CDT	$\alpha_{25^{\circ}\text{C}-125^{\circ}\text{C}}$	28,7 ppm/°C	27,6 ppm/°C
	$\alpha_{125^{\circ}\text{C}-275^{\circ}\text{C}}$	26,8 ppm/°C	24,5 ppm/°C

Tableau II-7 : Les résultats CDT pour différents types de brasure

Les résultats expérimentaux pour les substrats céramiques :

Configuration		Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	AlN
Conditions de mesure	Fréquence d'échantillonnage	100 Hz	100 Hz
	Vitesse de mesure	250 µm/s	250 µm/s
	Vitesse de retour	250 µm/s	250 µm/s
	Pas de mesure	2,5 µm	2,5 µm
Résultats CDT	$\alpha_{25^{\circ}\text{C}-125^{\circ}\text{C}}$	9,23 ppm/°C	15,7 ppm/°C
	$\alpha_{125^{\circ}\text{C}-275^{\circ}\text{C}}$	7,43 ppm/°C	5,2 ppm/°C

Tableau II-8 : Les résultats CDT pour différents types de substrat céramique

## Analyses et conclusions :

La figure (II-13) montre les comparaisons des valeurs expérimentales et les valeurs théoriques de coefficients de dilatation thermique pour différents types de matériaux d'assemblage :

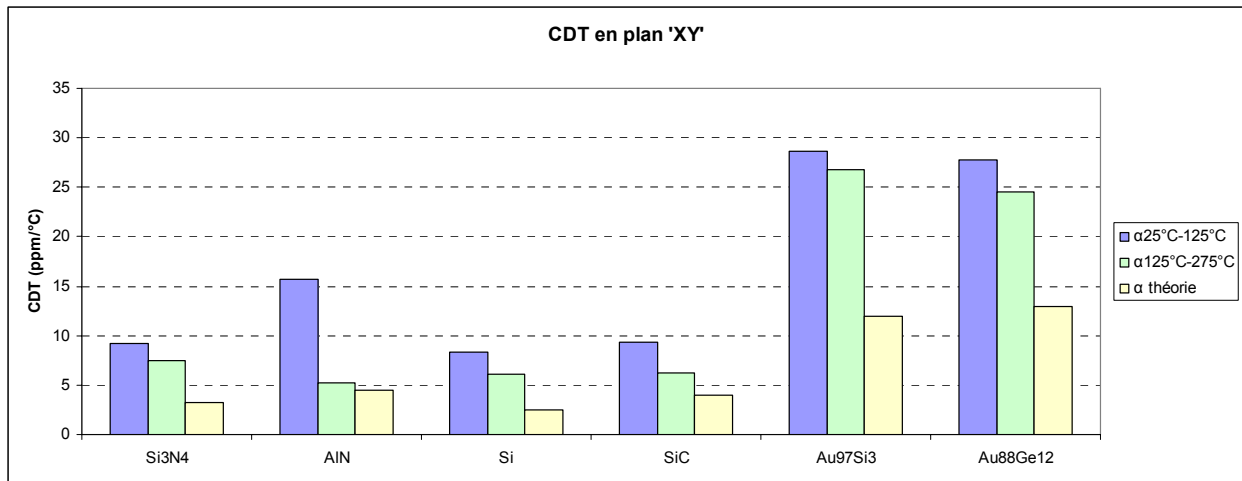


Figure II-31 : Coefficient dilatation thermique pour différents types de matériaux

Pour les tests réalisés sur plusieurs types de mesure, on peut conclure que :

- Le Coefficient de Dilatation Thermique (CDT) varie en fonction de la plage de température. La valeur du CDT est plus faible sur la plage de température la plus haute.
- Peu de déformations ont été observées sur les matériaux de la puce et du substrat. Au contraire, il y a beaucoup de déformation sur les matériaux constituant la brasure. Le CDT de la brasure est donc plus important que ceux de la puce et du substrat.
- Les valeurs obtenues sont plus grandes que les valeurs théoriques. Cette différence est sûrement due à la précision des mesures. Plusieurs types d'incertitudes sont à prendre en compte pendant la phase de mesure :

- Résolution du profilomètre
- Positionnement correct sur la diagonale de l'échantillon.

Si ce n'est pas le cas, il est impossible d'observer la déformation des mêmes points de l'échantillon pendant toute la mesure.

- Pas de mesure

Il est nécessaire de choisir un pas de mesure le plus petit possible, tout en veillant à obtenir un temps de mesure raisonnable.



## 5. Conclusion partielle

Dans ce chapitre, le principe d'analyse de la conception thermomécanique des modules de puissance par la méthode des éléments finis a été introduit. Les méthodes par éléments finis, pouvant s'enrichir les modèles de comportement et maillage, s'adapter les géométries et matériaux, renseigner l'évaluation paramétrique, évoluer le développement restent un moyen sûr et de plus en plus rapide pour l'évaluation du comportement des brasures.

Dans un premier temps, le comportement thermomécanique des assemblages a été investigué. Trois classes de lois de comportement ont été définies pour l'ensemble des matériaux présents dans les assemblages : loi de thermoélasto-plasticité à écrouissages isotrope et cinématique non-linéaires combinés pour les métallisations en cuivre et en aluminium, loi de thermoélasto-viscoplasticité pour les brasures, et la loi d'élasticité linéaire pour les puces, les céramiques et les semelles.

Plusieurs types de caractérisation ont été effectués pour différents types des matériaux : les caractérisations électriques pour le composant en SiC, les caractérisations mécaniques pour les substrats céramiques, et les caractérisations thermomécaniques pour les composants, substrats céramiques, et les différents types de brasure.

## Références bibliographiques

- [Brow-89] S. B. Brown, K. H. Kim, L. Anand, "An Internal Variable Constitutive Model for Hot Working of Metals", International Journal of Plasticity, 5, pp. 95-130, 1989.
- [Estr] Essai de traction, site internet,  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage\\_%28Th%C3%A9orie%29#Essai\\_de\\_traction](http://fr.wikipedia.org/wiki/Soudage_%28Th%C3%A9orie%29#Essai_de_traction)
- [Fran-93] D. Francois, A. Pineau, A. Zaoui, "Comportement Mécanique des Matériaux –Tome 2", Edition HERMES, 1993.
- [Gued-05] A. Guédon-Gracia, "La Conception Thermo-Mécanique Optimisée D’assemblages sans Plomb", Thèse de docteur de l’Université Bordeaux 1, 2005
- [Sain-95] F. Saint-Antonin, "Essais de fluage", Techniques de l’Ingénieur – vol. M140, 1995
- [Wang-01] G. Z. Wang, Z. N. Cheng, K. Becker, J. Wilde, "Applying Anand Model to Represent the Viscoplastic Deformation Behavior of Solder Alloys", Journal of Electronic Packaging - Vol 123, September 2001.



---

# Chapitre III : Etudes thermiques

---

## SOMMAIRE

<b>1.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>108</b>
<b>2.</b>	<b>Principes et théorie.....</b>	<b>108</b>
2.1	La source de chaleur.....	108
2.2	Théorie de la diffusion .....	109
2.3	Modes de transfert de la chaleur.....	110
2.4	Notion de résistance thermique $R_{th}$ .....	113
<b>3.</b>	<b>Mesure thermique .....</b>	<b>113</b>
3.1	Présentation du véhicule de test.....	113
3.2	Description du banc de mesure .....	116
3.3	Analyse les résultats expérimentaux.....	122
<b>4.</b>	<b>Simulation thermique .....</b>	<b>125</b>
4.1	Modèles Éléments finis .....	125
4.2	Présentation et analyse des résultats de simulations thermiques .....	129
4.3	Comparaison des résultats de simulations thermiques aux mesures expérimentales .....	131
4.4	Influence de la structure des assemblages.....	134
4.5	Influence des paramètres de convection 'h' .....	138
<b>5.</b>	<b>Conclusion partielle.....</b>	<b>140</b>
	<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>141</b>

# Chapitre III : Etudes thermiques

## 1. Introduction

Ce chapitre porte sur l'analyse du comportement thermique des prototypes de modules de puissance développés pour les applications haute température. Cette analyse, qui repose sur la simulation thermique par la méthode des éléments finis a pour finalité l'optimisation de la conception des différents prototypes suivant un critère de performance thermique. Pour juger des performances thermiques des structures d'assemblage, les résistances thermiques et les impédances thermiques seront utilisées comme référence.

## 2. Principes et théorie

### 2.1 La source de chaleur

En fonctionnement, les composants de puissance dissipent de l'énergie sous forme de chaleur. Lorsqu'un courant électrique traverse un semi-conducteur, une partie de la puissance électrique (pertes par conduction et commutation) est dissipée sous forme d'énergie thermique [Rems-01]. Cette chaleur se déplace vers le corps le plus froid grâce à deux mécanismes de transfert essentiellement, qui sont la conduction et la convection. La quantité de puissance dégagée est sous la forme :

$$P_d = V \cdot I \quad \text{Equation III-1}$$

Avec :

- $P_d$  : La puissance dissipée (W)
- $V$  : La tension aux bornes du composant (V)
- $I$  : Le courant traversant le composant (A)

Lorsque le courant varie en fonction du temps, la puissance dissipée moyenne est sous la forme :

$$P_{dm} = \frac{1}{t} \int_{t_1}^{t_2} V(t)I(t)dt \quad \text{Equation III-2}$$

Avec :

- $P_{dm}$  : La puissance moyenne dissipée (W)

- $t$  : La période de l'onde (s)
- $V(t)$  : La tension aux bornes du composant (V)
- $I(t)$  : Le courant instantané traversant le composant (A)
- $t_1$  et  $t_2$  : Les limites du temps de passage du courant (s)

## 2.2 Théorie de la diffusion

Nous nous intéressons aux phénomènes de diffusion thermique dans notre assemblage. La diffusion est un mécanisme de transport passif très courant dans la nature. Il désigne le transport de matière, par mouvements moléculaires aléatoires, d'un point de forte concentration de matière vers un point de faible concentration de matière à l'intérieur d'un système. C'est le résultat d'un gradient de concentration qui tend à uniformiser la concentration à l'intérieur du système.

La plupart du temps, pour les milieux isotropes, le mécanisme de la diffusion moléculaire est modélisé par les lois de Fick, établies en 1855 par analogie avec la diffusion thermique responsable du transfert de chaleur par conduction. Les équations de Fick (en unidimensionnel) sont présentées.

La première loi de Fick s'exprime par :

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad \text{Equation III-3}$$

Où  $F$  est le flux de l'espèce diffusante,  $C$  la concentration,  $D$  le coefficient de diffusion qui est une caractéristique typique du matériau,  $x$  la coordonnée de l'espace normale à la section. La première loi de Fick, qui est purement phénoménologique, appelle plusieurs remarques :

(1) les vecteurs  $F$  et le gradient de concentration sont de sens contraires ( $D > 0$ ), ce qui signifie que le flux s'établit des régions de forte concentration vers les régions de plus faible concentration ;

(2) le flux de diffusion est proportionnel au gradient de concentration.

La capacité d'analyser la diffusion thermique par des éléments finis dans les logiciels commerciaux peut être utilisée pour résoudre l'équation de Fick. Le logiciel de simulation par

éléments finis ANSYS utilisé peut être employé directement pour la modélisation de la diffusion de la chaleur dans les assemblages des multi-matériaux.

L'équation de la diffusion de la chaleur calculée dans ANSYS est la suivante :

$$\rho \cdot c \left( \frac{\delta T}{\delta t} + v_x \frac{\delta T}{\delta x} + v_y \frac{\delta T}{\delta y} + v_z \frac{\delta T}{\delta z} \right) = \ddot{q} + k_x \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + k_y \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + k_z \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \quad \text{Equation III-4}$$

Où T est la température, ρ la densité, c la chaleur spécifique, v le vecteur vitesse du transport de masse, q le taux de génération de chaleur par unité de volume et k<sub>i</sub> la conductivité thermique selon la direction i.

La capacité thermique massique c est appelée chaleur spécifique et s'exprime en J/kg.K. Elle peut être également définie comme la quantité d'énergie nécessaire que l'on doit apporter à un volume du matériau équivalent à une unité de masse pour élever sa température d'une unité de température.

En résumé, les caractéristiques de modélisation thermique du logiciel ANSYS ont été adaptées pour l'analyse de la diffusion de la chaleur par les paramètres comme illustrés dans le tableau suivant :

Paramètre	Température	Densité	Conductivité thermique	Chaleur Spécifique
Diffusion Thermique	T	ρ	k	c

Tableau III-1 : Les paramètres utilisés dans le logiciel ANSYS

## 2.3 Modes de transfert de la chaleur

Il existe trois modes de transfert de la chaleur :

- la conduction qui se situe à l'intérieur de matériaux solides ou entre deux matériaux solides en contact,
- la convection qui est le résultat de l'effet d'un fluide sur un solide de température différente,
- le rayonnement qui est un phénomène complexe qui se passe de support matériel.

Le rayonnement est un phénomène qui n'a que très peu d'incidence dans la plupart des domaines de l'électronique. Concernant l'électronique de puissance, il n'est généralement pas pris en compte. La conduction qui est le mode de transfert de chaleur principal dans un système de puissance, 90% de chaleur est transférée par un effet de conduction. La

convection joue un rôle peu important dans un système de puissance, 10% de chaleur est transférée par convection.

### 2.3.1 Le mode de la conduction

Dans un milieu continu, on définit le transfert de chaleur qui s'effectue toujours de la zone chaude vers la zone froide par l'équation de Fourier [Four-22] (Equation III-5), la densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température :

$$q = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \quad \text{Equation III-5}$$

$$q = \frac{dP}{dA} = \frac{d^2 E}{dA \cdot dt} \quad \text{Equation III-6}$$

Avec :

$\frac{\partial T}{\partial n}$	Gradient de température suivant la normale de l'aire considérée,
E(J)	Quantité de chaleur,
P (W)	Flux de chaleur ou quantité de chaleur par unité de temps à travers la surface A(m <sup>2</sup> ),
q (W/m <sup>2</sup> )	Densité de flux de chaleur ou flux de chaleur par unité de surface,
$\lambda$ (W/m.K)	Conductivité thermique du milieu.

La conduction thermique utilise les mêmes lois que la conduction électrique si l'on utilise les analogies suivantes :

Température	->	Potentiel électrique
Chaleur	->	Quantité d'électricité
Flux de chaleur	->	Courant électrique
Densité de flux de chaleur	->	Densité de courant électrique

La conduction se produit également entre deux solides en contact. Une interface entre deux solides n'étant pas parfaite, le contact réel s'effectue uniquement entre certains points des surfaces, représentant un pourcentage de surface assez faible par rapport à l'aire totale. Ainsi, il apparaît une résistance thermique, même entre deux matériaux identiques. L'espace entre les points de contact est occupé par l'air ou autre fluide de conductivité thermique



généralement plus faible [Lecl-94], [Degi-99]. Cette résistance de contact peut être améliorée de plusieurs façons :

- en améliorant la planéité de surface en contact,
- en appliquant une forte pression de serrage entre les deux solides,
- par l'utilisation d'un fluide ayant une conductivité thermique élevée afin de combler les espaces, ou un intercalaire thermique.

Ces résistances de contact sont très difficiles à évaluer.

### 2.3.2 Le mode de la convection

La convection est le mode de transfert de chaleur d'un solide vers un fluide. Généralement en électronique de puissance, elle est utilisée afin d'évacuer les calories produites par l'échauffement d'un composant. La convection dite naturelle, qui se fait généralement entre le solide considéré et l'air ou l'eau ambiant a un effet assez limité car son pouvoir d'extraction est très faible. On lui préfère souvent la convection forcée pour laquelle, le fluide est brassé par un ventilateur ou une pompe et parfois même régulé par un circuit de refroidissement. Cela permet ainsi une extraction beaucoup plus importante. Cet échange peut être quantifié par un coefficient d'échange 'h' et approximé par l'équation III-7. Il dépend entre autre, du type de fluide, de la vitesse et du type d'écoulement.

$$P = h \cdot A \cdot \Delta T \quad \text{Equation III-7}$$

Avec :

- h Coefficient d'échange thermique 'h' en unité W/m<sup>2</sup>.K
- A Surface d'échange ;
- P Flux de chaleur ;
- ΔT Différence de température entre le solide et le fluide.

Le tableau III-2 donne quelques valeurs du coefficient h suivant le type de convection.

Configuration	h (W/m <sup>2</sup> .K)
<b>Convection naturelle</b>	
Convection libre à air	5 à 25
Convection libre à eau	100 à 900
<b>Convection forcée</b>	
Convection forcée à air	10 à 500
Convection forcée à eau	100 à 15 000

Tableau III-2 : Quelques valeurs du coefficient d'échange h suivant le type de convection [Lagr]

## 2.4 Notion de résistance thermique $R_{th}$

La résistance thermique de conduction d'un élément exprime sa résistance au passage d'un flux de conduction thermique. Pour chaque configuration, en régime permanent, la résistance thermique  $R_{th}$  est évaluée à partir de la température de jonction (température maximale) de la puce  $T_j$ , la température du fluide de refroidissement  $T_{ref}$ , et la puissance  $P$  dissipée dans le composant, par la relation :

$$R_{th} = \frac{T_j - T_{ref}}{P} \quad \text{Equation III-8}$$

Cette résistance thermique de conduction s'exprime en °C/W (ou K/W).

La résistance thermique est définie par rapport à des surfaces isothermes. La géométrie de ces surfaces dépend de la géométrie de l'objet dans lequel la conduction thermique se produit.

Ainsi, on pourra définir une résistance thermique d'un matériau de conductivité thermique  $\lambda$  (W/m.K) d'épaisseur  $E$  et de section  $S$ , de la manière suivante :

$$R_{th} = \frac{E}{\lambda \cdot S} \quad \text{Equation III-9}$$

## 3. Mesure thermique

### 3.1 Présentation du véhicule de test

Tout d'abord, il est nécessaire de posséder des véhicules de test représentatifs de l'application future. Dans notre cas, ces échantillons ont été réalisés en utilisant différentes pates à braser. Les véhicules de test utilisés pour l'étude qui nous concerne sont issus des tests paramétrés sur la performance thermique et la durée de vie. Ainsi, tous les véhicules de test n'ont pas la même qualité de brasage.

L'utilisation de ces véhicules de test (Figure III-I) est de servir de modèle pour la création de sa représentation 3D par éléments finis.

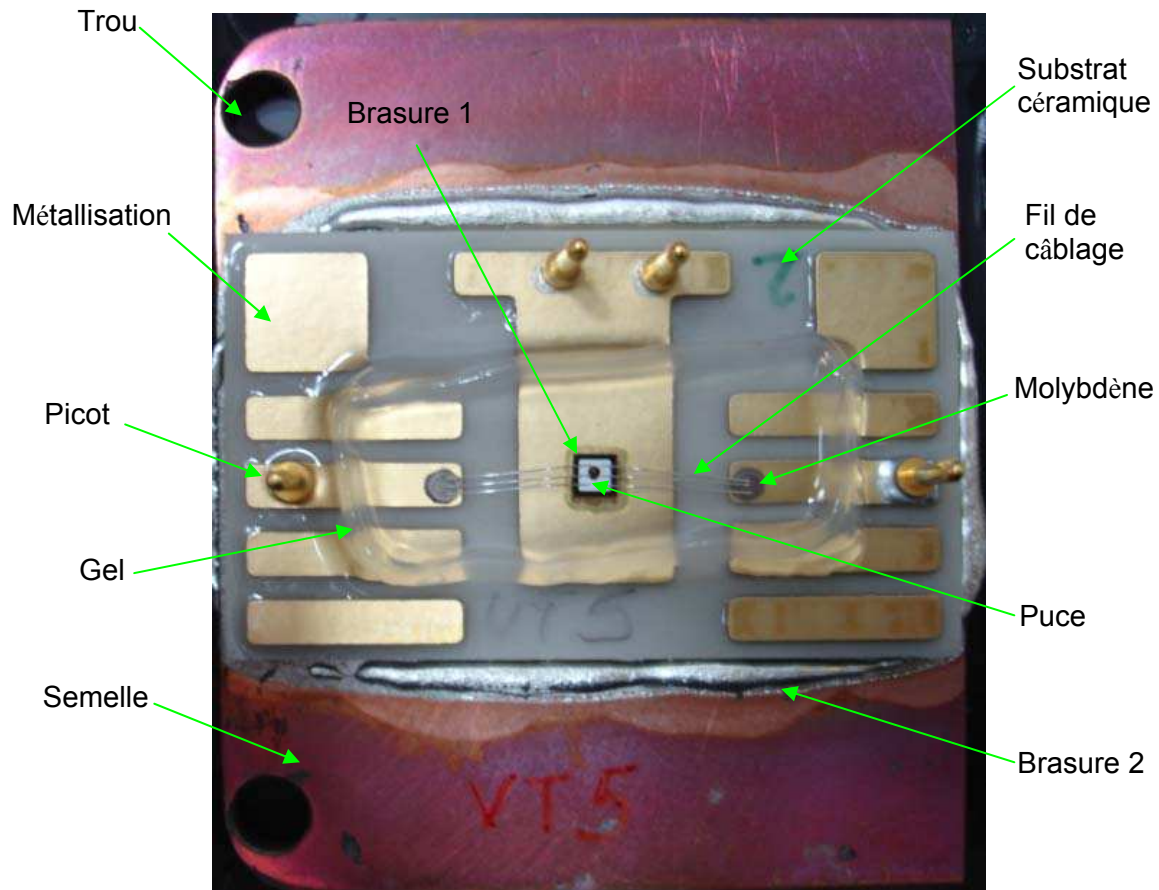


Figure III-I : Photographie du véhicule de test

D'un point de vue électrique, les composants à semi-conducteurs, identifiés comme les mieux adaptés à une température élevée de fonctionnement, seront intégrés dans les véhicules de test. Ici, on prend une diode Schottky SiC.

D'un point de vue assemblage, le véhicule de test devra permettre une évaluation des performances thermiques dans un assemblage adapté.

- Les puces SiC sont reportées sur des substrats métallisés par la technique de brasage haute température. La haute température de fonctionnement du matériel nécessite une brasure qui présente une température de fusion au moins supérieure à 250°C. Comme nous l'avons dit précédemment, trois types de brasure ( $\text{Au}_{88}\text{Ge}_{12}$ ,  $\text{Au}_{97}\text{Si}_3$ ,  $\text{Sn}_5\text{Pb}_{95}$ ) ont été utilisés pour la fabrication de ces modules.
- Ensuite, les substrats métallisés sont reportés sur des semelles par la technique de brasage basse température. La brasure sélectionnée, est un alliage  $\text{Sn}_{97}\text{Ag}_3$ , sa température de fusion est 220°C.
- L'assemblage des connecteurs électriques externes (Figure III-2 a) et molybdène (Figure III-2 b) pour adapter les fils de câblage sont réalisés avec un alliage  $\text{Sn}_5\text{Pb}_{95}$ .

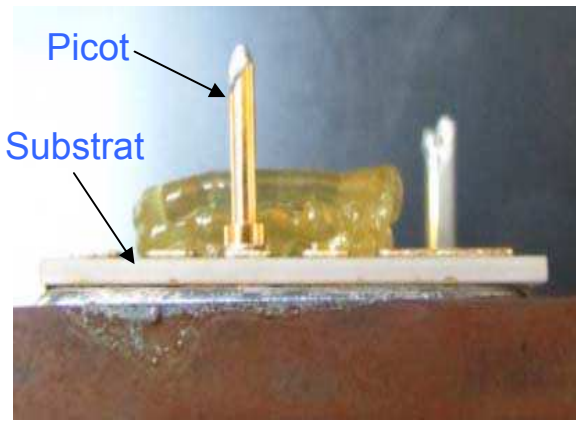


Figure III-2 a: Connecteur électrique externe

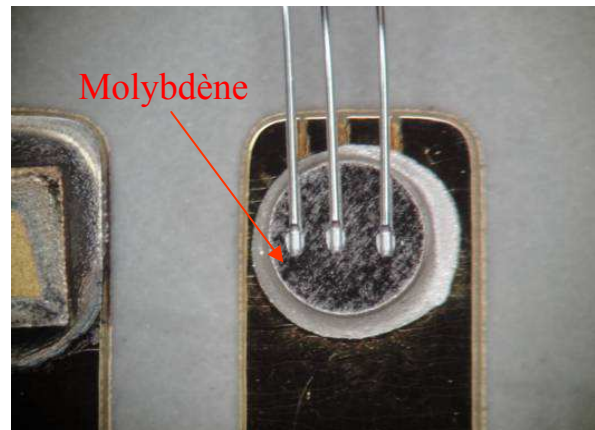


Figure III-2 b: molybdène

La résistance thermique d'un dispositif (en °C/W ou en K/W) est la résistance qu'il offre à l'évacuation des calories qui lui sont apportées, ou qu'il génère. Elle est définie entre deux points qui servent de référence de température. Dans le cas d'un composant semi-conducteur assemblé dans un boîtier, plusieurs résistances thermiques sont quantifiables en fonction des couches que le flux de chaleur traverse. La Figure III-3 illustre ces différentes résistances pour un module de puissance, monté sur un radiateur, qui dissipe à l'état passant une puissance ( $P_{dis}$ ).

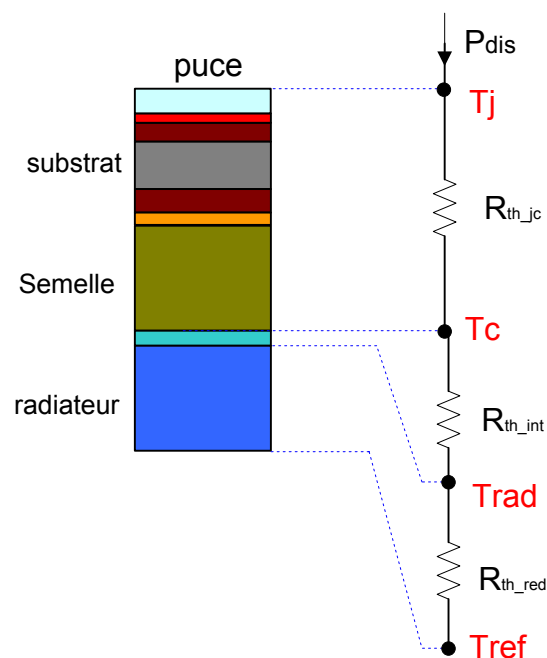


Figure III-3: Différentes résistances thermiques dans un module de puissance

On distingue alors :

- La résistance thermique entre la jonction et le boîtier notée  $R_{th_{jc}}$  (en anglais « junction to case thermal resistance »). Elle est définie entre la température de jonction  $T_j$  (température maximale dans la puce) et la température extérieure au boîtier  $T_c$ .

- La résistance thermique entre la face extérieure du boîtier et le radiateur, notée  $R_{th\_int}$ . Le plus souvent, il s'agit de la résistance de l'interface d'adhésion du boîtier du module de puissance sur le dissipateur.
- La résistance thermique entre la face avant du radiateur et la face arrière du radiateur, notée  $R_{th\_red}$ . Il s'agit de la résistance thermique du dissipateur.

### 3.2 Description du banc de mesure

Le banc de mesure (Figure III-4) est composé d'un analyseur thermique (ANATECH PHASE 10), d'une alimentation externe et d'une boîte à eau avec un cryostat.



Figure III-4: Banc de mesure de résistance thermique et l'impédance thermique

- L'analyseur thermique de type phase 10 de la société Analysis Tech permet de caractériser thermiquement un assemblage ou un composant actif.
- Le générateur de tension permet de fournir la tension d'alimentation.
- L'alimentation externe permet de faire des tests en utilisant des courants plus importants.
- Le module de puissance est monté sur une boîte à eau par une interface thermique double face. La boîte à eau est reliée à un **cryostat** qui permet de maintenir à une température de consigne l'eau circulant dans la boîte à eau. Pendant la mesure, le fond du module de puissance est maintenu à une température quasiment constante.

La mesure de résistance thermique se déroule en deux phases. La première est la **calibration** du composant, et la seconde est la **caractérisation thermique de l'assemblage**.

### 3.2.1 Calibrations du composant

#### 3.2.1.1 Dispositif de la calibration

Le dispositif de la calibration (Figure III-5) est composé d'un bain de liquide diélectrique, d'un ventilateur, d'un thermocouple et d'une source de chaleur. L'appareil possède plusieurs voies de mesures.

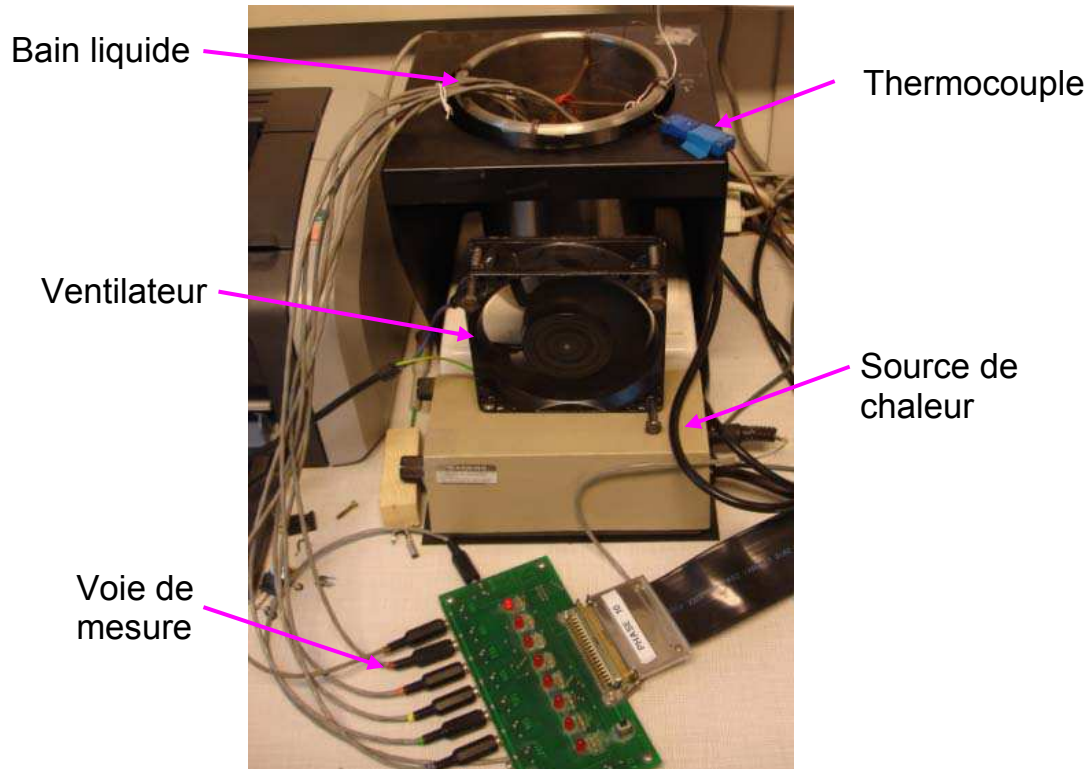


Figure III-5: Dispositif de la calibration

#### 3.2.1.2 Méthode utilisée

La méthode la plus communément utilisée pour mesurer la température dans un composant à semi-conducteur, est d'utiliser la chute de tension à l'état passant d'une jonction P-N du composant. Dans un cas de la diode en type silicium, il existe une relation linéaire entre la tension aux bornes d'une jonction P-N ( $V_d$  pour la diode) et la température (Figure III-6).

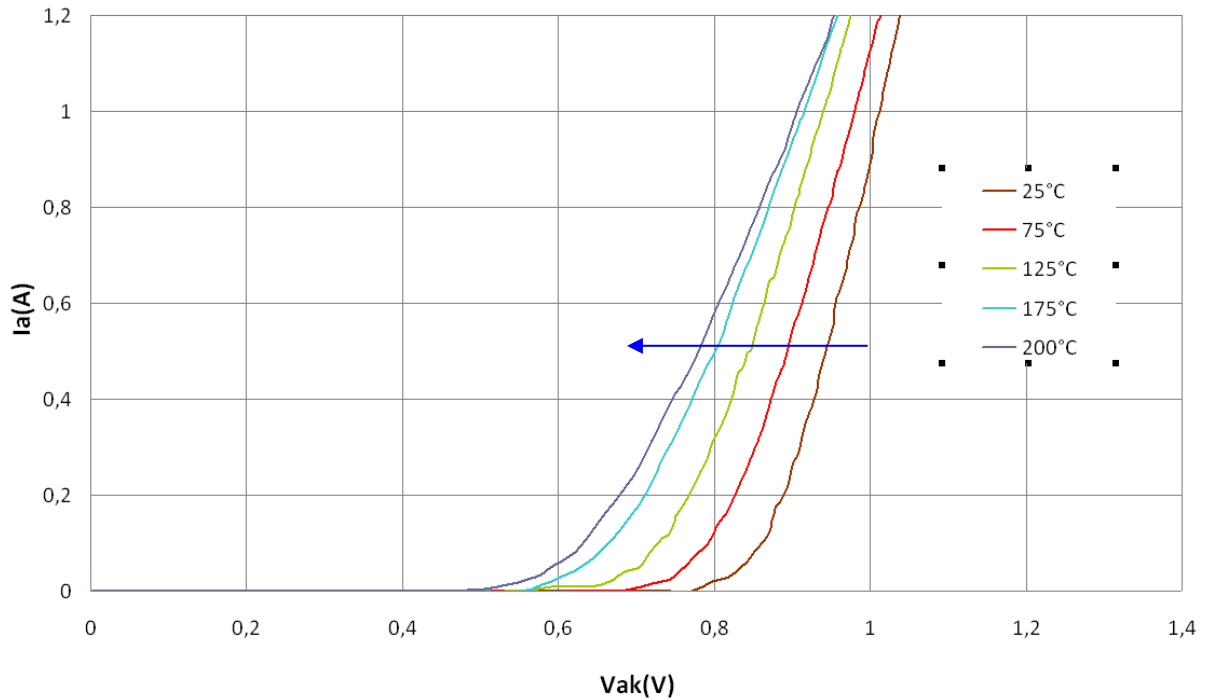


Figure III-6: La tension de seuil en fonction de la température

Les équations III-10 et III-11, montrent la dépendance en température de la tension aux bornes d'une jonction P-N.

$$I_D = I_S \left[ \exp \frac{qV_d}{KT} - 1 \right] \quad \text{Equation III-10}$$

$$V_d = \frac{KT}{q} \ln \left[ \frac{I_D}{I_S} \right] \quad \text{Equation III-11}$$

Avec:

- $V_d$  : Tension aux bornes de la jonction P-N
- $I_D$  : Courant direct parcourant la jonction P-N
- $I_S$  : Courant de saturation
- $K$  : Constante de Boltzman
- $T$  : Température locale
- $q$  : Charge des porteurs

Cette dépendance, que Sulima [Suli-05] a redémontré est linéaire (Equation III-12)

$$\left. \frac{\Delta V_d}{\Delta T} \right|_{I_D=cte} = \frac{1}{T} \left[ V_d - \frac{Eg}{q} \right] \quad \text{Equation III-12}$$



Une fois la jonction calibrée, nous connaissons l'équation exacte de la droite  $V_d = f(T)$  et il est possible de déduire à tout moment la température de jonction à partir de la valeur de sa tension  $V_d$ .

### 3.2.1.3 Moyen mis en œuvre

La calibration permet de définir avec précision les valeurs de l'équation de la droite et retrouver la valeur de température de jonction dans la phase de mesure. Le schéma de calibration est simple (Figure III-7).

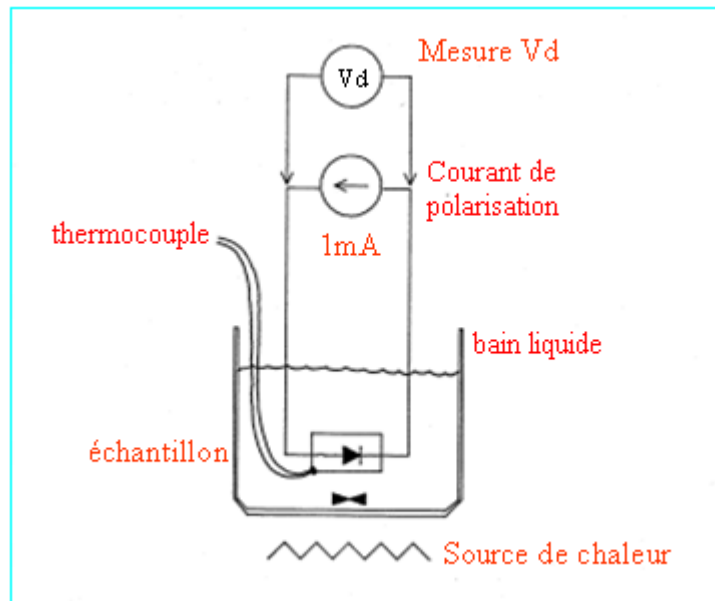


Figure III-7: Schéma de calibration de la jonction d'un assemblage (c.f. Fig III-5)

Le composant diode Schottky SiC sous test est relié à l'appareil de mesure qui surveille régulièrement la tension aux bornes de la jonction à calibrer. Pour cela un faible courant de 1mA vient polariser la jonction. Un thermocouple placé sur le boîtier au plus près de la diode relève également la température en permanence.

Les véhicules de test sont placés dans un bain liquide diélectrique agité en permanence. La température du liquide diélectrique est montée par la source de chaleur progressivement à 90°C. Une fois cette température atteinte, la chauffe du bain est arrêtée. Ensuite, la phase de refroidissement est réalisée par le ventilateur pour descendre jusqu'à la température ambiante du liquide. Pendant cette période qui peut durer plusieurs heures, on relève tous les 5°C la température et la tension aux bornes de la jonction. On obtient une courbe de la tension aux bornes de la diode en fonction de la température de jonction (Figure III-8).



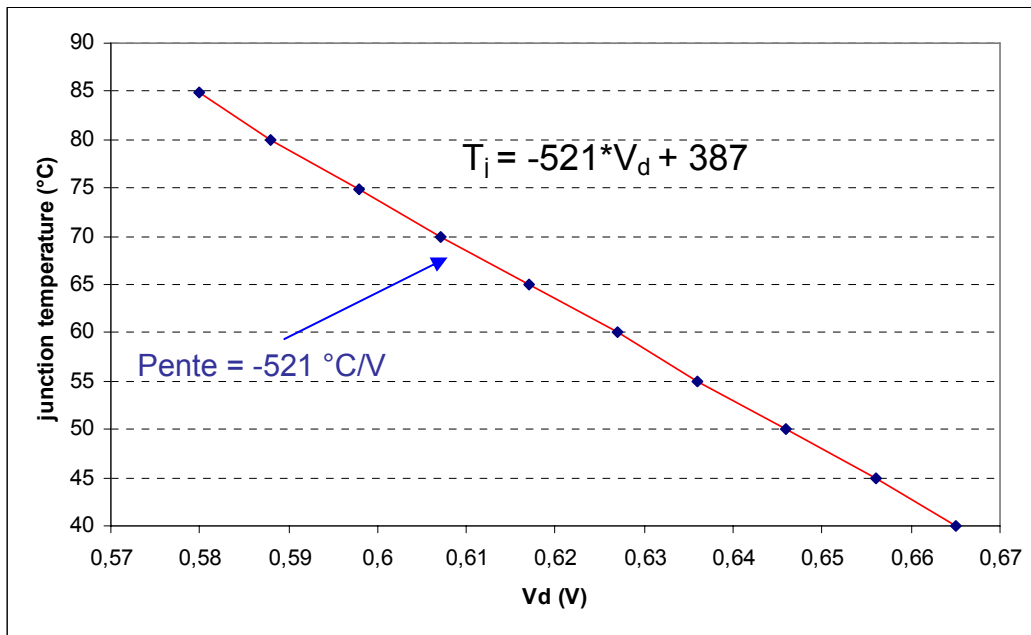


Figure III-8: Calibration de jonction en fonction de la température

La relation peut être exprimée mathématiquement par l'équation III-13 :

$$T_j = m \cdot V_d + T_0 \quad \text{Equation III-13}$$

Avec :

- $T_j$  : la température de jonction
- $m$  : la pente en  $^{\circ}\text{C}/\text{V}$
- $V_d$  : Tension de seuil de la diode
- $T_0$  : la température ordonnée à l'origine

La pente qui sera utilisée lors de la mesure de résistance thermique d'assemblage pour déterminer la température de jonction. La pente 'm' et la température  $T_0$  sont collectivement appelés les «paramètres de calibration».

### 3.2.2 Mesure de résistance thermique

La mesure de la résistance thermique se compose de deux phases : une pour chauffer le composant, l'autre pour effectuer la mesure (Figure III-9).

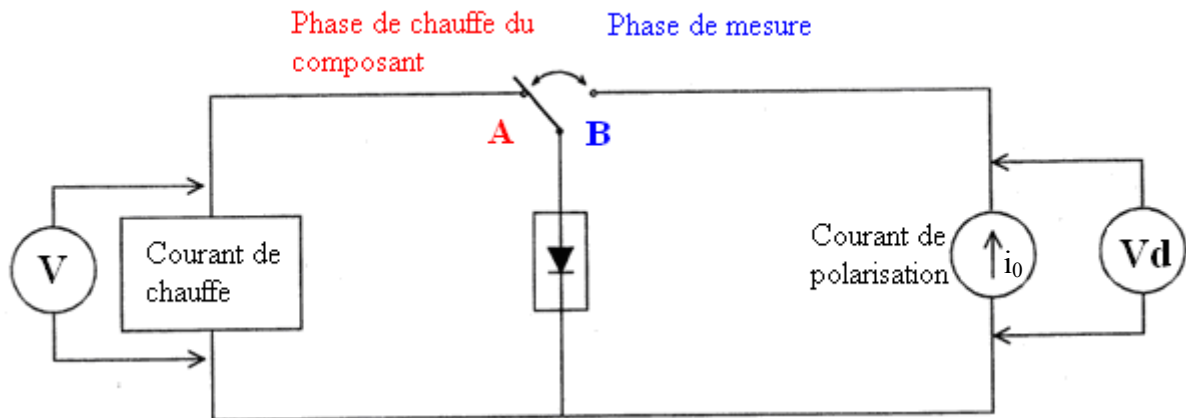


Figure III-9: Deux phases pour mesurer de résistance thermique

La phase de chauffe du composant (A) est plus longue que la phase de mesure (Figure III-10).

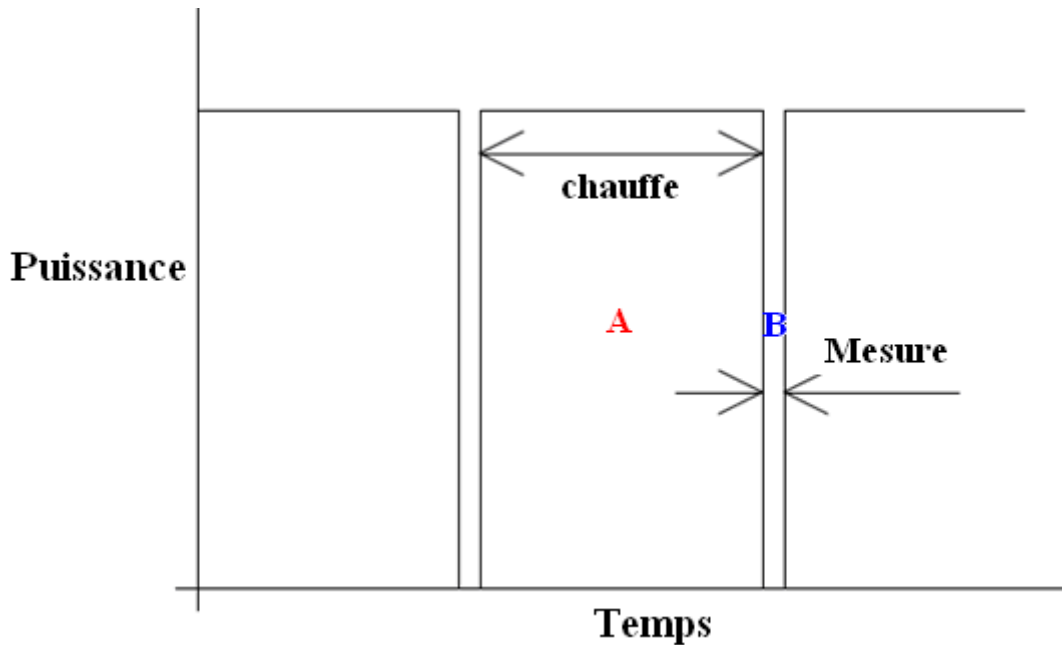


Figure III-10: Intervalles de chauffe du composant et de mesure

La mesure de résistance thermique consiste simplement à exciter le composant de manière continue jusqu'à ce qu'il atteigne un équilibre thermique. Le banc de mesure surveille la température de jonction du composant  $T_j$ , la tension aux bornes du composant  $V_j$ , la température de référence  $T_r$ , la résistance thermique d'assemblage instantanée  $Inst\_R_{th}$ , la résistance thermique d'assemblage moyen  $Ave\_R_{th}$ , et la puissance  $P$  (Figure III-11).

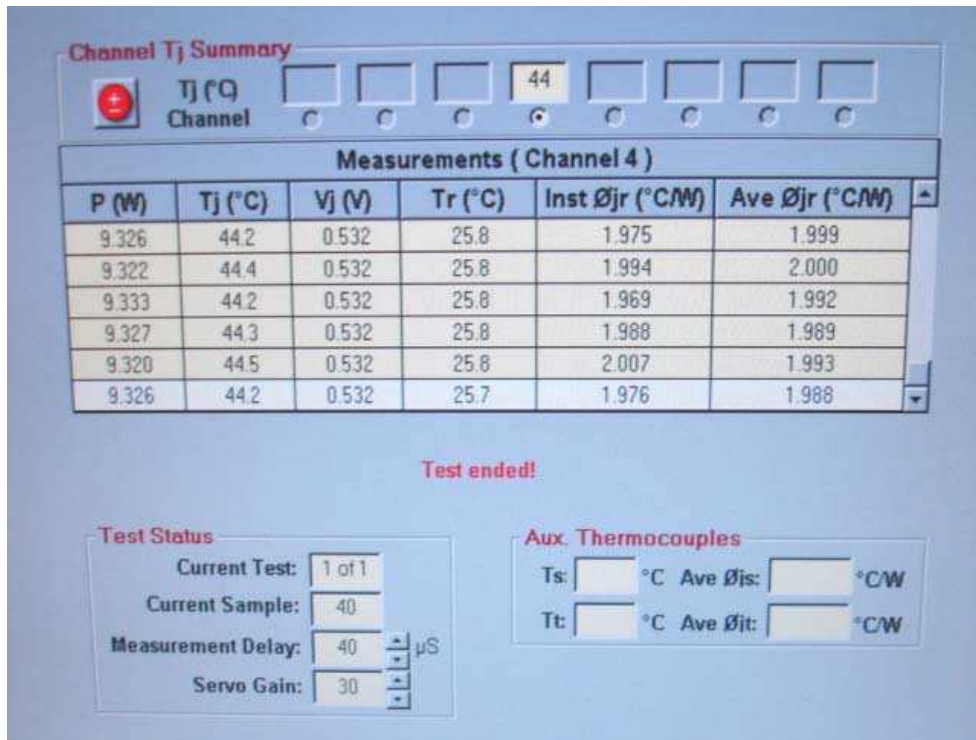


Figure III-11: Les paramètres surveillés pour la mesure de la résistance thermique

### 3.3 Analyse les résultats expérimentaux

#### 3.3.1 Matrice des véhicules de tests réalisés :

On a 12 puces (Diode), donc on peut réaliser 12 véhicules de tests. Un véhicule de test est constitué d'une puce SiC, d'un substrat céramique et d'une semelle CuC.

On a réalisé 3 types de brasure différente sur deux types de substrat différent :

	<b>Au<sub>88</sub>Ge</b>	<b>Au<sub>97</sub>Si</b>	<b>SnPb<sub>95</sub></b>
<b>Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub></b>	2	2	2
<b>AlN</b>	2	2	2

Tableau III-3 : Matrice des véhicules de test réalisés

Il y a deux séries de véhicules de test, (VT1, VT12, VT2, VT3, VT4, VT5), et (VT11, VT6, VT7, VT8, VT9, VT10). Les deux séries sont identiques. Par série, il y a trois types de brasages différents (SnPb, AuGe et AuSi) et deux types de substrats métallisés différents (Cu-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> et Al-AlN).

1<sup>er</sup> lot de véhicule de test :

	VT1	VT12	VT2	VT 3	VT4	VT5
<b>Puce</b>	D1	D12	D2	D3	D4	D5
<b>Brasure puce</b>	SnPb <sub>95</sub>	SnPb <sub>95</sub>	Au <sub>88</sub> Ge	Au <sub>88</sub> Ge	Au <sub>97</sub> Si	Au <sub>97</sub> Si
<b>Fil de câblage</b>	Al (125µm)	Al (125µm)	Al (125 µm)	Al (125µm)	Al (125µm)	Al (125µm)
<b>Substrat</b>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 320µm Cu 300µm	AlN 1mm Al 400µm	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 320µm Cu 300µm	AlN 1mm Al 400µm	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 320µm Cu 300µm	AlN 1mm Al 400µm
<b>Semelle</b>	CuC	CuC	CuC	CuC	CuC	CuC

Tableau III-4 : Différents matériaux d'assemblage pour le 1<sup>er</sup> lot de véhicule de test

2<sup>ème</sup> lot de véhicule de test :

	VT11	VT6	VT7	VT 8	VT9	VT10
<b>Puce</b>	D11	D6	D7	D8	D9	D10
<b>Brasure puce</b>	SnPb <sub>95</sub>	SnPb <sub>95</sub>	Au <sub>88</sub> Ge	Au <sub>88</sub> Ge	Au <sub>97</sub> Si	Au <sub>97</sub> Si
<b>Fil de câblage</b>	Al (125µm)	Al (125µm)	Al (125 µm)	Al (125µm)	Al (125µm)	Al (125µm)
<b>Substrat</b>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 320µm Cu 300µm	AlN 1mm Al 400µm	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 320µm Cu 300µm	AlN 1mm Al 400µm	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 320µm Cu 300µm	AlN 1mm Al 400µm
<b>Semelle</b>	CuC	CuC	CuC	CuC	CuC	CuC

Tableau III-5 : Différents matériaux d'assemblage pour le 2<sup>ème</sup> lot de véhicule de test

### 3.3.2 Les résultats de calibration

1<sup>er</sup> lot de véhicule de test :

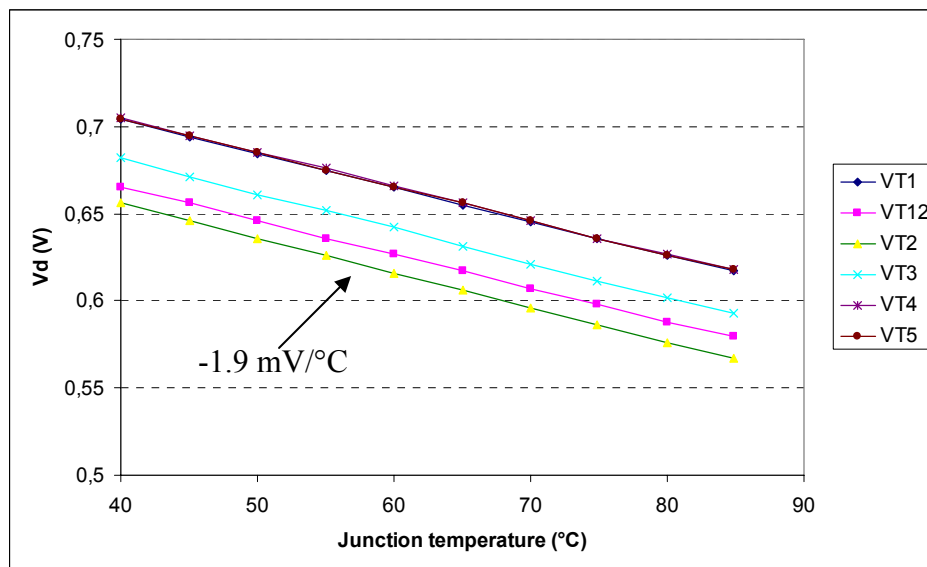


Figure III-12: Résultats de calibration pour le 1<sup>er</sup> lot de véhicule de test

La droite  $V_d = f(T)$  a une pente de  $-1,9 \text{ mV}/^\circ\text{C}$  pour les composants diodes Schottky SiC. Cette valeur est proche de la valeur théorique des composants de puissance en Si. On utilise cette valeur de pente pour mesurer les résistances thermiques d'assemblage.

2<sup>ème</sup> lot de véhicule de test :

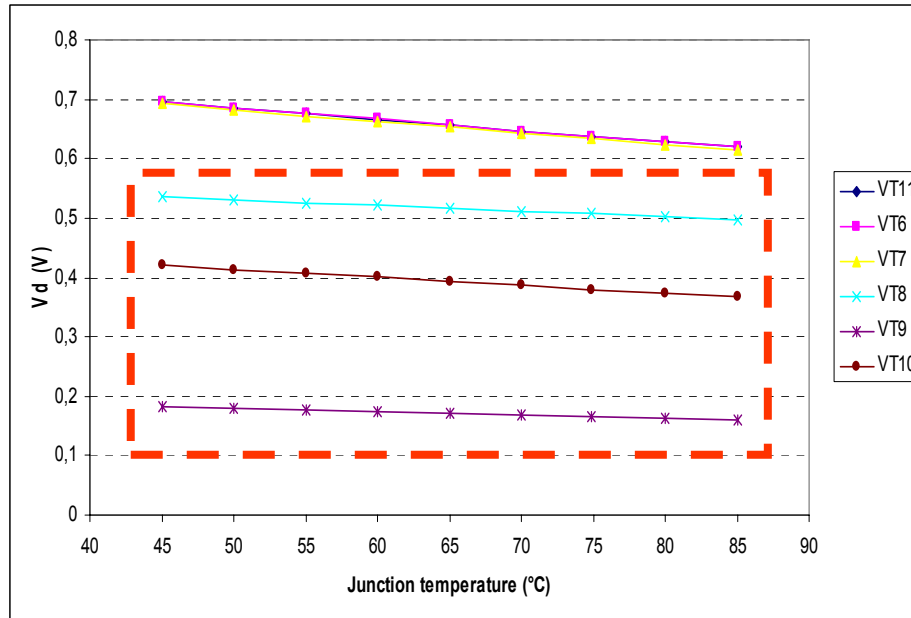


Figure III-13: Résultats de calibration pour le 2<sup>ème</sup> lot de véhicule de test

Les résultats de 2<sup>ème</sup> lot sont identiques à ceux du 1<sup>er</sup> lot de véhicule de test, sauf VT9, VT10, ils ont une tension de seuil  $V_d$  très faible, on considère que ces puces ne fonctionnent pas correctement.

### 3.3.3 Les résultats de mesure $R_{th}$

La Figure III-14 représente les résultats expérimentaux de la résistance thermique pour différents modèles d'assemblage.

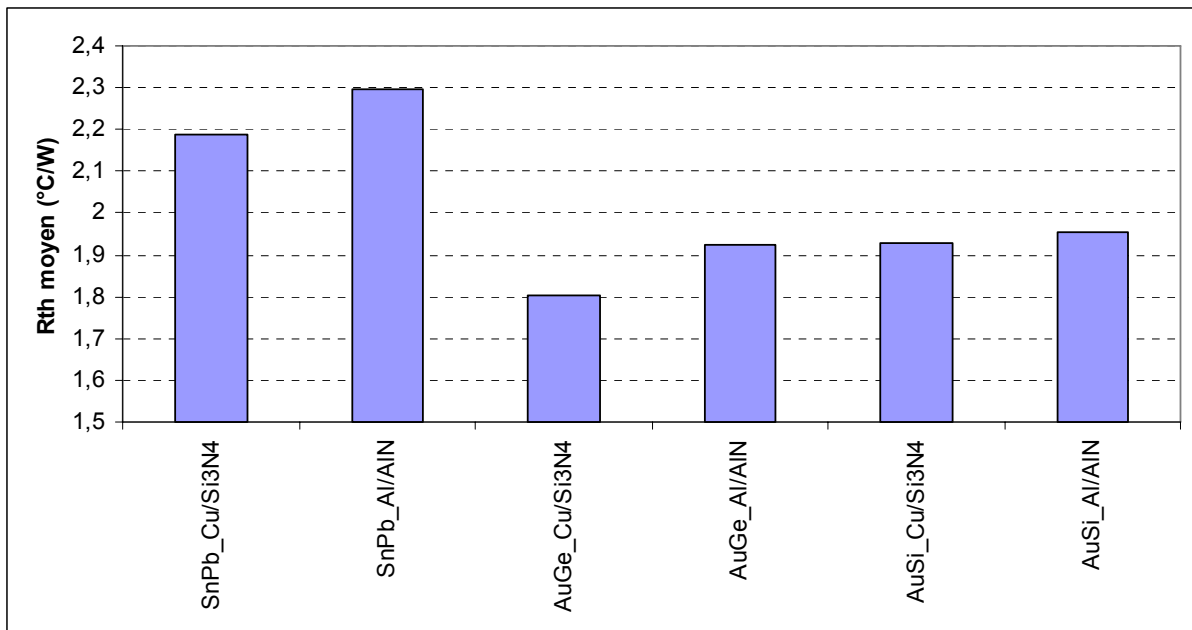


Figure III-14: Résultats expérimentaux de la résistance thermique pour différents modèles d'assemblages

Les mesures de résistance thermique faites sur les différents types de l'assemblage ont montré une meilleure performance thermique de l'assemblage composé de substrat céramique  $\text{Si}_3\text{N}_4$  métallisé en cuivre avec une brasure  $\text{Au}_{88}\text{Ge}_{12}$  pour le report de puce. Et l'assemblage composé de substrat céramique  $\text{AlN}$  métallisé en aluminium avec une brasure  $\text{Sn}_5\text{Pb}_{95}$  pour le report de puce présente une résistance thermique élevée signifiant une mauvaise dissipation thermique de l'assemblage.

## 4. Simulation thermique

La simulation thermique permet d'avoir une distribution de la température d'assemblage. La résistance thermique et l'impédance thermique sont les paramètres de quantification des performances thermiques de l'assemblage, elles peuvent être aussi le critère de défaillance pour évaluer de la durée de vie de l'assemblage de puissance.

### 4.1 Modèles Éléments finis

Nous présentons ici le modèle thermique des assemblages de puissance à base de composant  $\text{SiC}$  ainsi que les conditions aux limites de calcul, la localisation de la puissance injectée et les propriétés thermiques des matériaux de l'assemblage.

### 4.1.1 Représentation géométrique

La modélisation thermique du module de puissance est réalisée avec le logiciel ANSYS. Le modèle 3D est représenté à la Figure III-15. Cet assemblage comporte différents matériaux ayant des propriétés particulières. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'assemblage multicouche qui réalise la fonction thermique du composant.

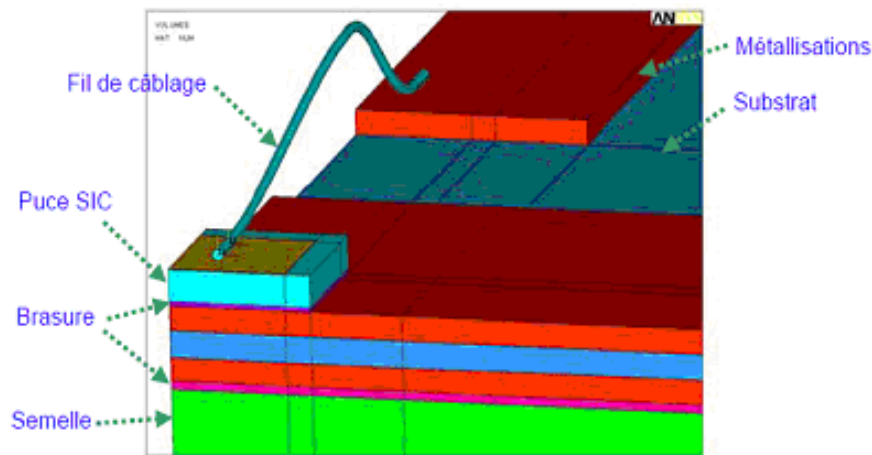


Figure III-15: Modèle utilisé pour les simulations thermiques

### 4.1.2 Choix des matériaux et caractéristiques physiques

Les paramètres géométriques sont marqués dans le tableau ci-dessous (Tableaux III-6) :

Nom de l'élément	Matériaux	Surface (mm)	Epaisseur (μm)
Fil de câblage	Au/Al	125μm en diamètre	
Métallisation face avant de la puce	Au/Al	3 * 3	6μm pour Al, 2 ou 3 μm pour Au
Puce	SiC	3,64 * 3,64	400μm
Brasure haute température	AuGe/SnPb /AuSi/AuSn/Frittage d'Ag	3,64 * 3,64	50μm
Métallisation face avant du substrat	Cu/Al	30*10	300μm pour Cu 400μm pour Al
Substrat céramique	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /AlN	30*30	320μm pour Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 1mm pour AlN
Métallisation face arrière du substrat	Cu/Al	30*30	300μm pour Cu 400μm pour Al
Brasure base température	SAC/AuSn	30*30	1 mm
Semelle	CuC/Cu - diamant	40*40	4 mm

Tableau III-6 : Les paramètres géométriques des éléments

Pour effectuer des simulations thermiques il faut disposer pour chaque matériau de la capacité thermique, de la conductivité thermique et de la densité. Les propriétés thermiques

des matériaux utilisés pour la simulation numérique de l'assemblage sont décrites dans le Tableau III-7.

Elément	Matériau	Capacité thermique (J/(kg.K))	Conductivité thermique (W/(m.K))	Densité (kg/m <sup>3</sup> )
Métallisation de la puce face avant	Al <sup>[1]</sup>	900	210	2700
Fil de câblage	Al <sup>[1]</sup>	900	210	2700
	Au <sup>[1]</sup>	128	301	19300
Puce	SiC <sup>[2]</sup>	750	450	3100
	Si <sup>[3]</sup>	750	146	2330
Brasure haute température	Sn <sub>5</sub> Pb <sub>95</sub> <sup>[4]</sup>	133.84	23	11060
	Au <sub>88</sub> Ge <sub>12</sub> <sup>[5]</sup>	128-150 <sup>[1]</sup>	44@85°C	14670
	Au <sub>97</sub> Si <sub>3</sub> <sup>[5]</sup>	128-150 <sup>[1]</sup>	27@85°C	15400
Substrat céramique métallisé	Cu <sup>[1]</sup>	385	398	8930
	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> <sup>[3]</sup>	800	60	3290
	Cu	385	398	8930
	Al <sup>[1]</sup>	900	210	2700
	AlN <sup>[3]</sup>	750	190	3300
	Al	900	210	2700
Brasure basse température	Sn <sub>97</sub> Ag <sub>3</sub> <sup>[3]</sup>	200	33	7360
Drain semelle	Cu <sub>60</sub> C <sub>40</sub> <sup>[7]</sup>	430,2	360 dans le plan// [1]  140 dans l'épaisseur	6256

Tableau III-7 : Propriétés thermiques des éléments

Référence des paramètres :

- [1] Paramètres issus des références [Matweb]
- [2] Paramètres issus des références [Accu, Toku-07]
- [3] Paramètres issus des références [Zéan-09]
- [4] Paramètres issus des références [Gued-05]
- [5] Paramètres issus des références [Indi]
- [6] Paramètres issus des références [Copp-07]
- [7] Paramètres issus des références [ICMCB]

#### 4.1.3 Maillage

Afin de se rapprocher le plus de la réalité, les simulations ont été réalisées avec des modèles géométriques tridimensionnels. En raison des symétries que présentent ces dernières,



le volume modélisé a été réduit à un quart d'échantillon. Les maillages ont été réalisés avec des briques quadratiques. Les zones de puce et du joint brasé haute température font l'objet d'un maillage plus dense que le reste de la structure, car c'est la région qui représente la zone d'intérêt principal (cône de température) de la simulation (Figure III-16). Les interfaces entre les différentes couches ont supposées parfaites.

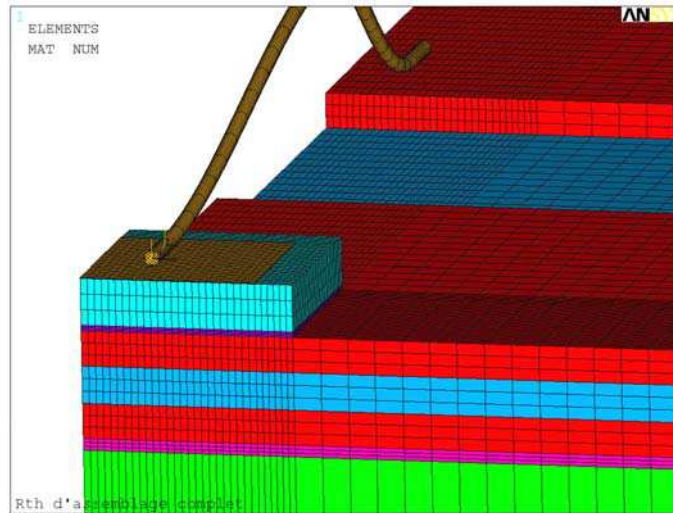


Figure III-16: Modèle géométrique maillé des assemblages avec fil de câblage

Ces différents maillages ont été adoptés après une étude de convergence sur la taille minimale des maillages des différents modèles. La figure III-17 ci-dessous montre l'évolution de la température de jonction calculée pour un type de brasure Sn<sub>5</sub>Pb<sub>95</sub> en fonction de la taille minimale des éléments utilisés pour le maillage de l'ensemble multi couches. Elle montre que la température de jonction ne varie beaucoup en fonction de la taille minimale des mailles, une stabilisation de la température de jonction distribuée est observée dans l'assemblage pour des tailles minimales d'éléments en dessous de 60,7 μm. Avec des tailles minimales d'éléments en dessous de cette valeur, l'erreur relative de maillage reste inférieure à 0,4 %.

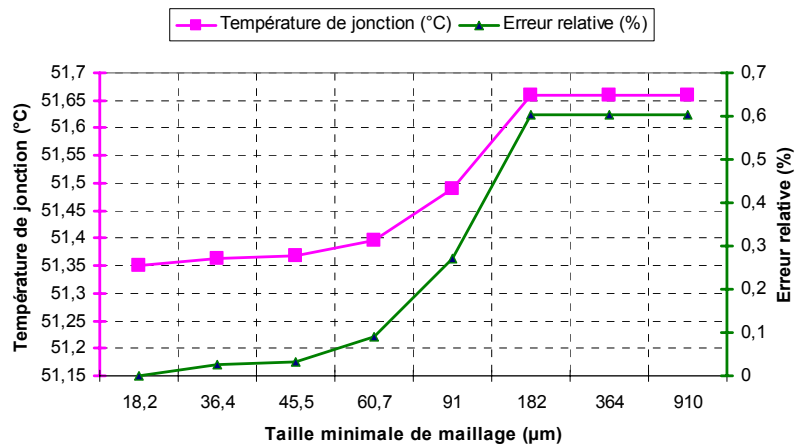


Figure III-17 : Convergence de la température de jonction en fonction de la taille minimale des éléments du maillage

#### 4.1.4 Chargements et Conditions aux limites

##### Chargements

Une puissance thermique de 10W (valeur expérimentale) est injectée dans le volume du composant diode Schottky SiC avec l'épaisseur 0,4 mm.

##### Conditions aux limites

La condition aux limites est imposée sur la face inférieure des assemblages (face inférieure de la semelle), avec une température constante fixée à 25°C, cette température est aussi la température de référence ( $T_f$ ).

#### 4.2 Présentation et analyse des résultats de simulations thermiques

Nous étudierons la performance thermique de l'assemblage à partir de la température de jonction de la puce  $T_j$  en régime permanent et la résistance thermique de l'assemblage  $R_{th}$ .

Pour atteindre le régime permanent, le temps doit être supérieur à 4 secondes. La Figure III-18 représente la température de jonction en régime transitoire et permanent :

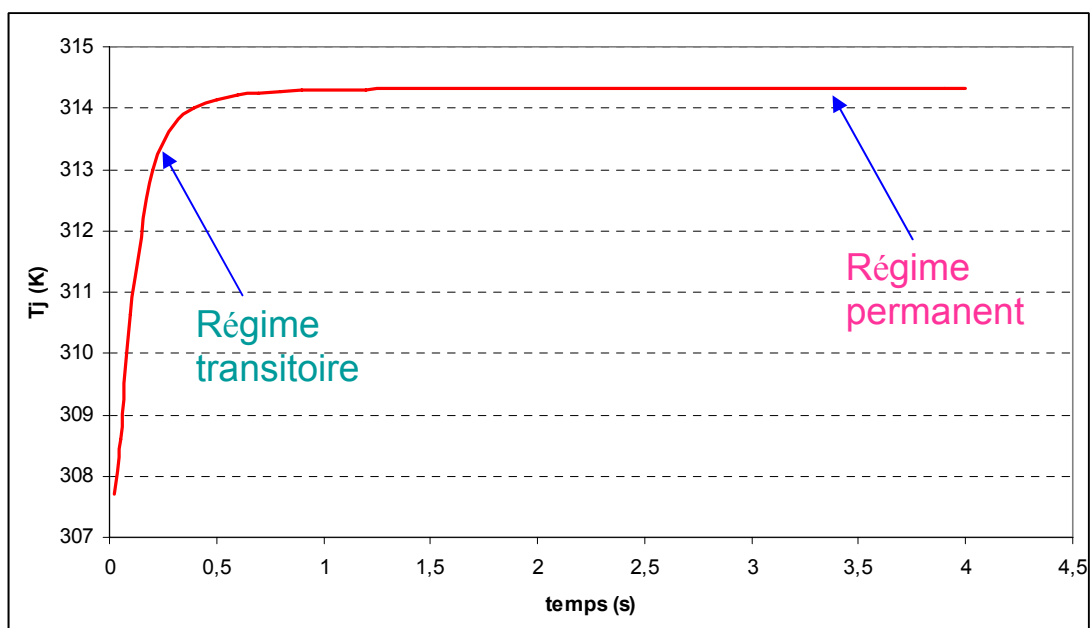


Figure III-18 : La température de jonction en régime transitoire et permanent

Trois types de brasure ( $Au_{88}Ge_{12}$ ,  $Au_{97}Si_3$ ,  $Sn_3Pb_{95}$ ) et deux types de substrats céramique métallisés ( $Cu/Si_3N_4/Cu$ ,  $Al/AlN/Al$ ) ont été réalisés afin de déterminer l'impact thermique d'assemblage :

- Modèle 1 : Brasure  $Au_{88}Ge_{12}$ , Substrat céramique métallisé Cu/ $Si_3N_4$ /Cu
- Modèle 2 : Brasure  $Au_{88}Ge_{12}$ , Substrat céramique métallisé Al/AlN/Al
- Modèle 3 : Brasure  $Au_{97}Si_3$ , Substrat céramique métallisé Cu/ $Si_3N_4$ /Cu
- Modèle 4 : Brasure  $Au_{97}Si_3$ , Substrat céramique métallisé Al/AlN/Al
- Modèle 5 : Brasure  $Sn_5Pb_{95}$ , Substrat céramique métallisé Cu/ $Si_3N_4$ /Cu
- Modèle 6 : Brasure  $Sn_5Pb_{95}$ , Substrat céramique métallisé Al/AlN/Al

La Figure III-19 ci-dessous présente un exemple des distributions de température pour le modèle 5 :

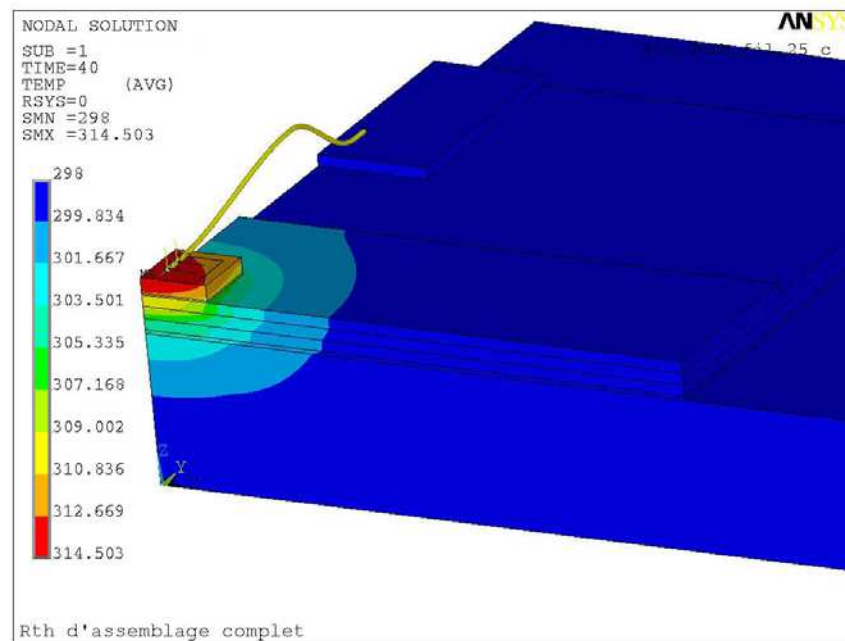


Figure III-19 : Un exemple des distributions de température pour le modèle 5

La température maximale de l'assemblage est la température de jonction de puce  $T_j$ , localisée au centre de la face supérieure de la puce. La température de jonction  $T_j$  monte à  $41,5^\circ C$ , la résistance thermique de l'assemblage est  $1,65^\circ C/W$ . On compare avec les valeurs expérimentales, la température de jonction de mesure est  $43,1^\circ C$ , la résistance thermique de l'assemblage expérimentale est  $2,152^\circ C/W$ .

Les résultats des températures de jonction et des résistances thermiques sont résumés pour les six modèles dans la Figure III-20.

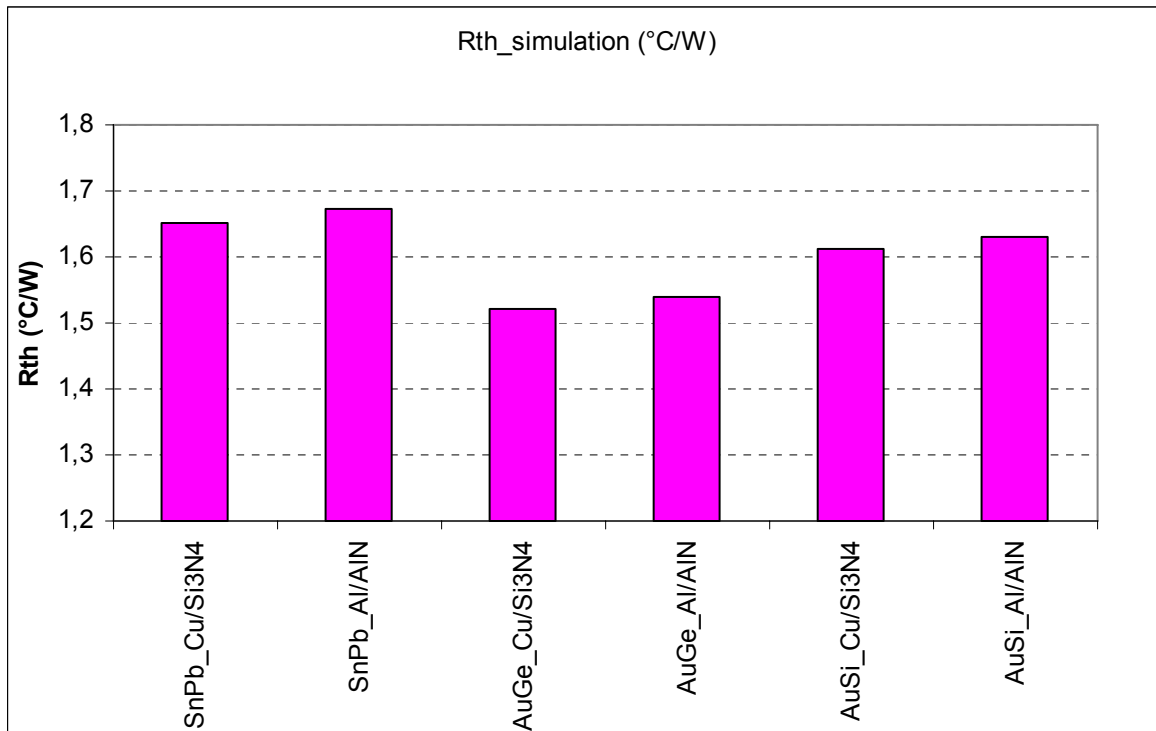


Figure III-20 : Résultats de simulation thermique pour six modèles différents

Les résultats de la température de jonction montrent que le modèle (Brasure  $\text{Au}_{88}\text{Ge}_{12}$ , substrat métallisé  $\text{Cu}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}$ ) présente la meilleure performance thermique. Le modèle (Brasure  $\text{Sn}_5\text{Pb}_{95}$ , Substrat métallisé  $\text{Al}/\text{AlN}/\text{Al}$ ) est moins performant thermiquement que les autres. Il apparaît que la brasure  $\text{Au}_{88}\text{Ge}_{12}$  est le meilleur choix au niveau des performances thermiques pour des configurations de substrat métallisé identiques,  $\text{Au}_{97}\text{Si}_3$  est le second choix.

### 4.3 Comparaison des résultats de simulations thermiques avec les mesures expérimentales

Nous avons mesuré les performances thermiques du module de puissance à l'aide d'un analyseur thermique (ANATECH PHASE 10) afin de caractériser la résistance et son impédance thermique. Les résultats de simulations sont comparés avec les résultats expérimentaux.

#### 4.3.1 Des points de mesures

Pour mesurer la résistance thermique du module de puissance, nous devons effectuer deux mesures de température, la première est la température de jonction de puce qui est localisée sur la puce diode Schottky SiC, la seconde est la température de référence  $T_f$  qui est située au

milieu de l'interface thermique double collant (Figure III-21). Le module de puissance est monté sur une boîte à eau avec un ruban d'interface thermique double face.

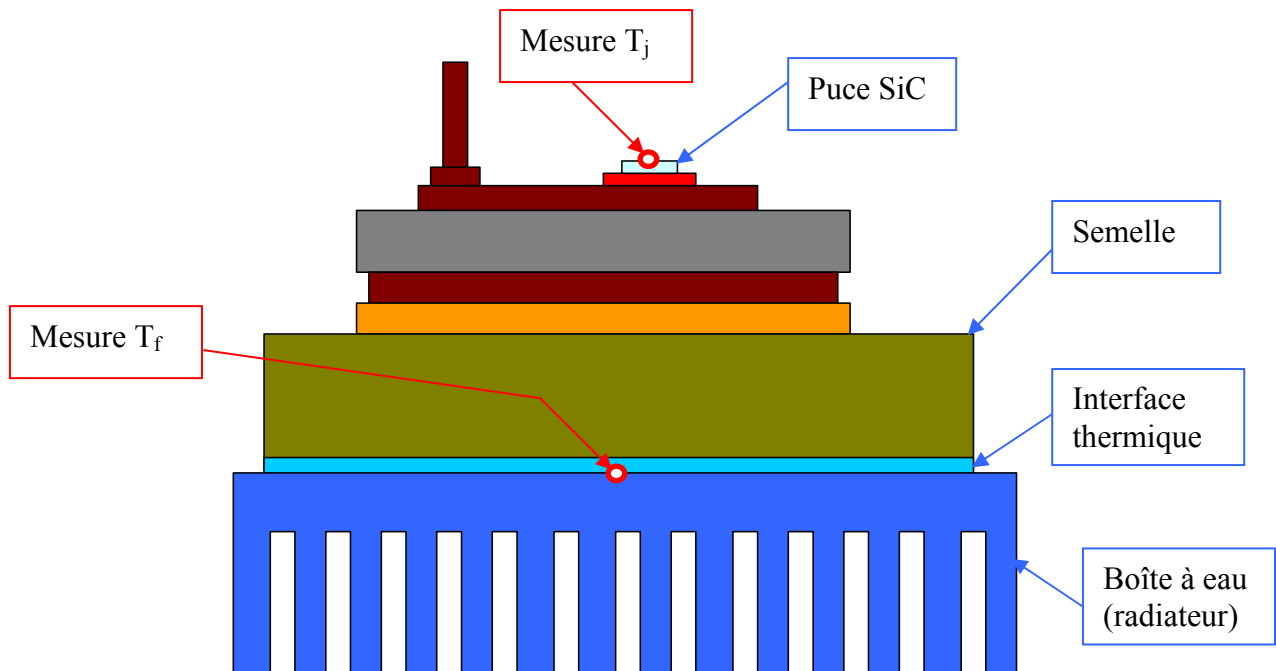


Tableau III-21 : Module de puissance monté sur une boîte à eau par l'interface thermique double face

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques techniques d'un ruban d'interface thermique double face :

<b>Conductivité thermique :</b>	1 W/m.K
<b>Epaisseur :</b>	0,15 mm
<b>Surface d'utilisation :</b>	30 mm * 30 mm
<b>Température d'utilisation :</b>	-45°C / +170°C
<b>Tension d'isolation :</b>	3 kV

Tableau III-8 : Caractéristiques techniques pour le ruban d'interface thermique

La résistance thermique du ruban d'interface thermique est calculée par l'équation III-14 :

$$R_{th} = \frac{E}{\lambda \cdot S} = 0,17(K / W)$$

Vu que la valeur de la résistance thermique du ruban thermique collant double face n'est pas faible, donc on ne peut pas l'ignorer.

La (Figure III-21 a) présente une image infrarouge du module de puissance (Figure III-21 b) durant la mesure de la résistance thermique. La température maximale se trouve dans la puce, et les chaleurs se dissipent par la brasure jusqu'à la semelle d'assemblage.

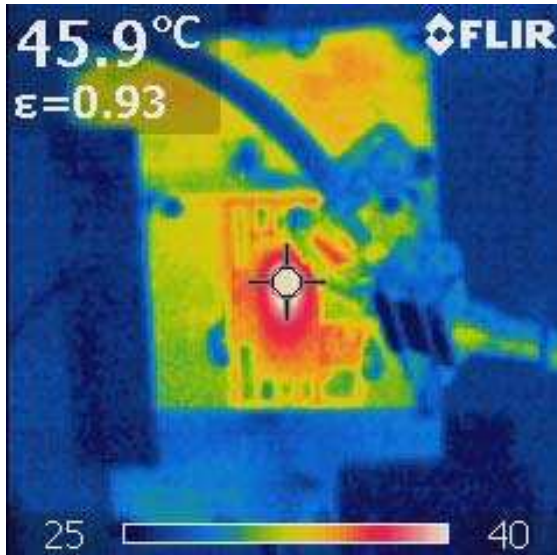


Figure III-21 a : Image infrarouge d'un module de puissance durant la mesure  $R_{th}$

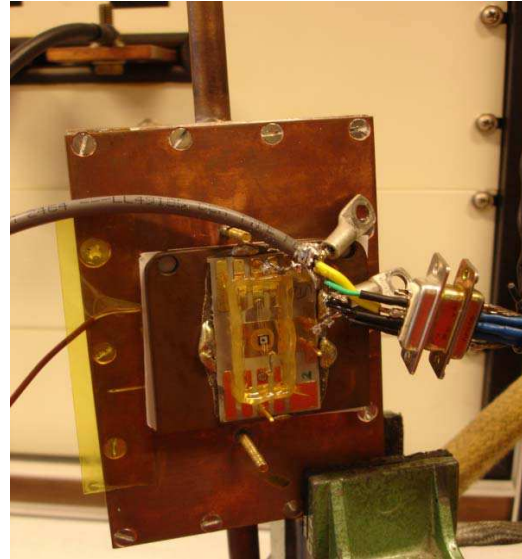


Figure III-21 b : Image du module de puissance monté sur la boîte à eau

### 4.3.2 Corrélation du modèle numérique expérimental

La Figure ci-dessous (Figure III-22) présente la comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats de simulation pour les différents modèles de résistances thermique d'assemblage.

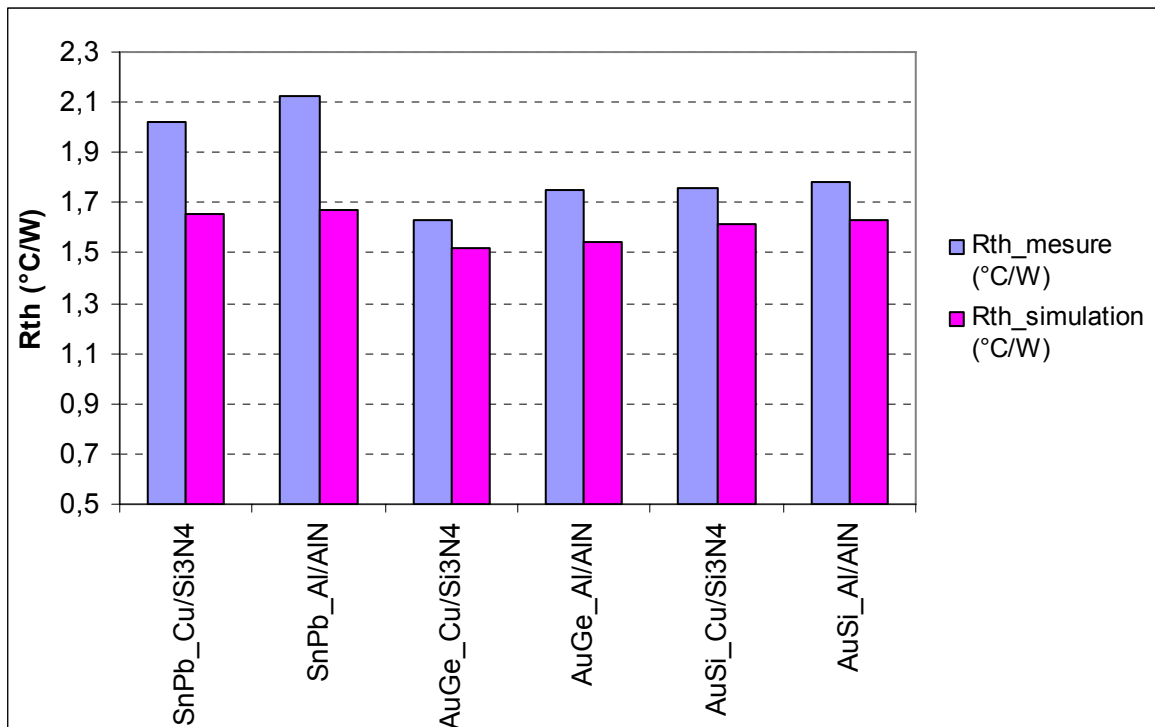


Figure III-22 : Comparaison des résultats expérimentaux et de simulation pour les résistances thermiques d'assemblage

Les résultats expérimentaux et de simulation montrent la même tendance pour les différents modèles, ainsi les simulations numériques sont validées par les expérimentations. Cependant les valeurs expérimentales sont plus élevées, car dans la simulation numérique les interfaces sont considérées comme parfaites et les matériaux homogènes, ce qui peut diminuer les valeurs de la résistance thermique. De plus, en réalité la brasure entre le substrat et la semelle comporte des lacunes, ce qui contribue à l'augmentation de la résistance thermique.

## 4.4 Influence de la structure des assemblages

### 4.4.1 Effet du fil de câblage

Les pertes se dissipent par flux thermique à travers les fils de câblage et la brasure, et par convection naturelle. On constate que la convection naturelle par l'air est négligeable sur les résultats thermiques de l'assemblage. Deux géométries d'assemblage ont été réalisées afin de déterminer l'impact thermique des fils de câblage :

- Modèle A : Brasure Sn<sub>5</sub>Pb<sub>95</sub>, Substrat métallisé Cu/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Cu **sans fil de câblage** ;
- Modèle B : Brasure Sn<sub>5</sub>Pb<sub>95</sub>, Substrat métallisé Cu/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Cu **avec fil de câblage** ;

Le résultat de la température de jonction est résumé pour les deux modèles dans le Tableau III-9.

	<b>Modèle A (sans fil)</b>	<b>Modèle B (avec fil)</b>
<b>T<sub>j</sub> (K)</b>	314,527	314,503
<b>R<sub>th</sub> (°C/W)</b>	1,6527	1,6503

Tableau III-9 : Comparaison des résultats de simulation thermique en fonction des fils de câblage

Les résultats de simulation thermique pour les deux modèles sont similaires, il n'y a pas d'influence thermique des fils de câblage. On peut donc supprimer la modélisation des fils de câblage sans modifier la réponse thermique de l'assemblage.

La Figure III-23 représente les résultats de répartition du flux thermique dans l'assemblage, la valeur maximale est située en périphérie de la face inférieure de la brasure. On trouve que l'essentiel du flux thermique transite à travers la brasure, ça peut aussi expliquer les résultats d'influence du fil de câblage.

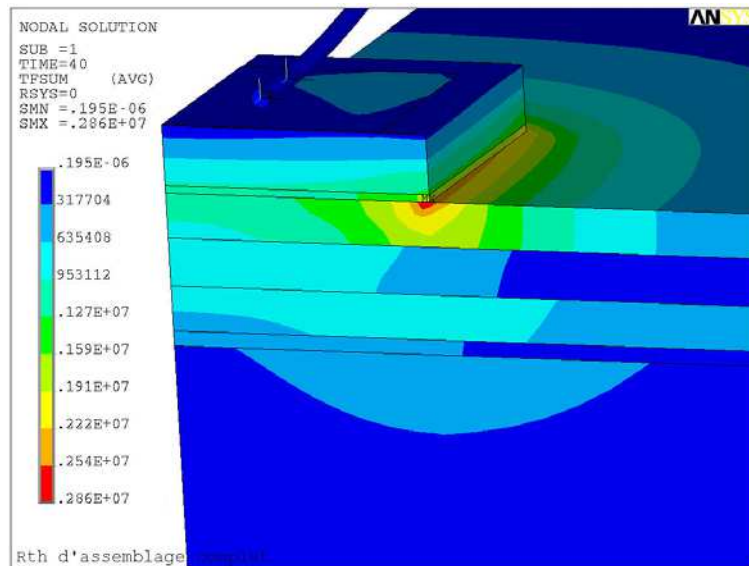


Figure III-23 : Les résultats de répartition de flux thermique (W) dans l'assemblage

## 4.4.2 Description du modèle avec drain thermique puce (Pseudo DBC)

### 4.4.2.1 Géométries et paramètres thermiques

On ajoute un drain thermique (Cu-diamant) entre la brasure et la métallisation sur la face supérieure du substrat pour diminuer la température de jonction de la puce. Le Cu-diamant est un nouveau matériau utilisé dans les modules de puissance avec une très bonne conductivité thermique. La figure ci-dessous (Figure III-24) présente le modèle avec drain thermique.

Les tailles de géométrie et propriétés thermiques sont détaillées dans le tableau III-10 :

Elément	matériau	Surface	épaisseur	Capacité thermique (J/kg.K <sup>-1</sup> )	Conductivité (W.m.K <sup>-1</sup> )	Densité (kg.m <sup>-3</sup> )
Puce	SiC <sup>[2]</sup>	3.64 x 3.64	0.4	750	450	3100
Brasure	Au <sub>88</sub> Ge <sub>12</sub> <sup>[5]</sup>	3.64 x 3.64	50µm	129	44@85°C	14670
Drain – puce Cu/C	Cu-diamant <sup>[7]</sup>	variable	variable	422,7	450 – 500	7322
Substrat céramique métallisé	Cu <sup>[1]</sup>	30 x 30	0.400	385	393	8920
	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> <sup>[3]</sup>	30 x 30	0.320	660	90	3200
	Cu	30 x 30	0.400	385	393	8920
Drain semelle	CuC <sub>40</sub> <sup>[7]</sup>	40 x 40	A définir	430,2	360 dans le plan// [1] 140 dans plan verticale	6256

Tableau III- 10 : Paramètres géométriques et propriétés des matériaux pour le modèle Pseudo DBC



Référence de paramètre :

- [1] Paramètres issus des références [Matweb]
- [2] Paramètres issus des références [Accu, Toku-07]
- [3] Paramètres issus des références [Zéan-09]
- [5] Paramètres issus des références [Indi]
- [7] Paramètres issus des références [ICMCB]

#### 4.4.2.2 Chargement et condition aux limites

Les chargements et les conditions aux limites sont listés dans le tableau III-11 :

Profil de Perte dans la puce (volume)	Condition de refroidissement sur la semelle	Condition de refroidissement sur le reste de la structure
	Convection type : $T_f = 200^\circ\text{C}$ $h = 2\,000\text{ W/m.K}$	Pas d'échange (adiabatique)

Tableau III- 11 : Les chargements et les conditions aux limites

#### 4.4.2.3 Points de mesure

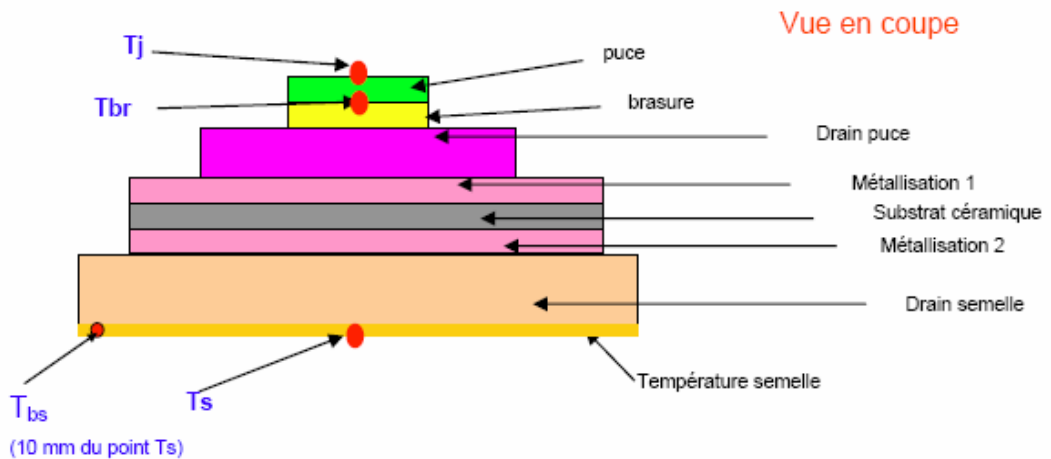


Figure III-24 : Modèle avec drain thermique puce

Points particuliers où les mesures seront relevées :

- $T_j$  : La température jonction de puce
- $T_{br}$  : La température d'interface entre la puce et la brasure
- $T_s$  : La température au fond de la semelle CuC
- $T_{bs}$  : Le point se localise à 10 mm du point de mesure de  $T_s$

#### 4.4.2.4 Résultats de simulation

La figure III-25 montre les résultats de simulation :

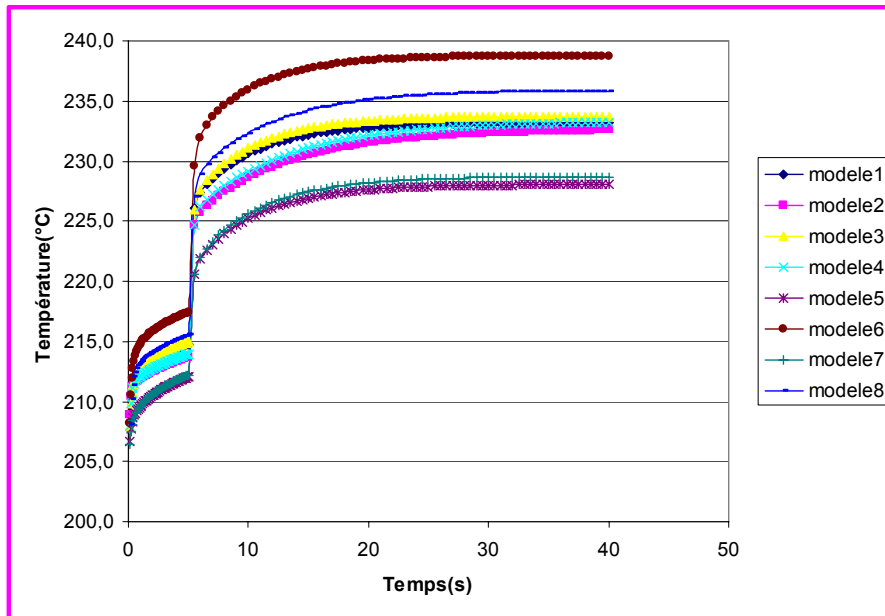


Figure III-25 : Température de jonction en régime permanent dans les différents modèles

La température de jonction se stabilise environ à 40 s, la température de jonction dépend l'amplitude maximale de la puissance injectée.

La valeur minimale de température jonction de puce est présentée par le modèle 5 (Tableau III-12).

Modèle	Drain puce (mm)	Drain semelle (mm)	Tj(°C) @40s	Tbr(°C) @40s	Ts(°C) @40s	Tbs(°C) @40s
1	Taille:0 Epaisseur:0	Epaisseur:3	233,2	230,2	213,2	210,1
2	Taille:0 Epaisseur:0	Epaisseur:5	232,6	229,6	211	209,7
3	Taille:5*5 Epaisseur:2	Epaisseur:3	233,7	230,6	213	210
4	Taille:5*5 Epaisseur:2	Taille: Epaisseur:5	233,2	230,1	210,2	209,7
5	Taille:10*10 Epaisseur:2	Taille: Epaisseur:3	228	225	212,2	210
6	Taille:5*5 Epaisseur:4	Taille: Epaisseur:3	238,8	235,6	213	210
7	Taille:10*10 Epaisseur:4	Taille: Epaisseur:3	228,7	225,6	212,1	210
8	Taille:5*5 Epaisseur:3	Taille: Epaisseur:4	235,8	232,7	211,7	209,7

Tableau III-12 : Différents modèles à simuler

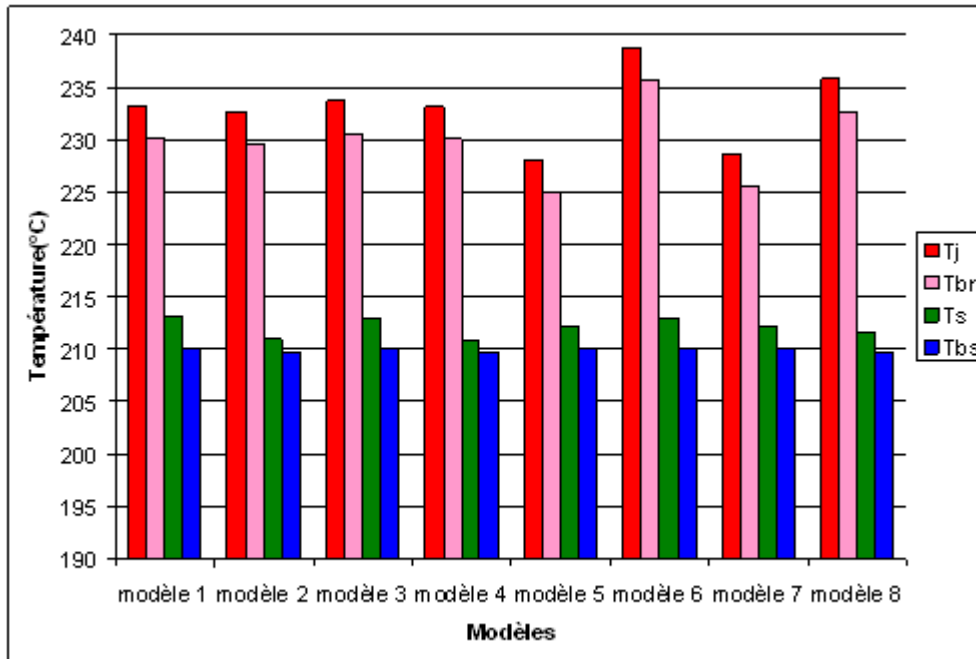


Figure III-26 : Comparaison des résultats des points de mesure sur différents modèles à 40s

$T_j$  est plus faible pour le modèle 5, pour diminuer la température de jonction puce, il faut utiliser le drain thermique avec épaisseur fine et une grande surface.

#### 4.5 Influence des paramètres de convection ‘h’

L’extraction de la chaleur générée dans la puce se fait principalement par conduction de la brasure jusqu’au fond du module de puissance. Dans la réalité ou dans la mesure thermique, le module de puissance est reporté sur un radiateur à l’aide d’une colle thermique et la dissipation se fait par conduction jusqu’à un radiateur. Notre modélisation du module de puissance s’arrêtant à la semelle CuC, le reste de l’interface a été modélisé par un coefficient de transfert thermique (h). Le coefficient de transfert thermique (ou coefficient d’échange thermique) est un flux thermique au travers d’une surface d’échange (c.f. Equation III-7). Il permet de calculer l’intensité de l’énergie échangée par unité de surface et unité de temps en fonction de la différence de température de part et d’autre de la surface d’échange.

Une étude paramétrée en fonction du coefficient d’échange thermique a été menée. Les résultats de la température maximale d’évaluation dans la puce sont représentés dans la figure III-27. Les résultats de la température d’évaluation dans la semelle sont représentés dans figure III-28.

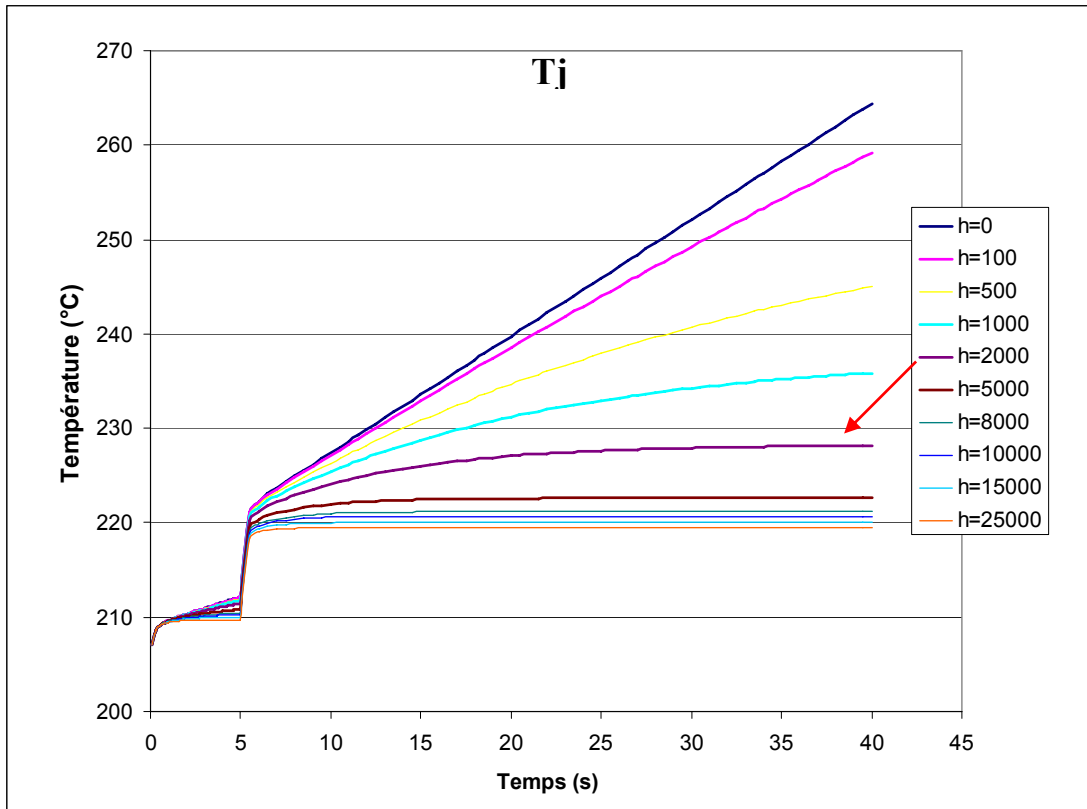


Figure III-27 : Température maximale dans la puce en fonction du coefficient d'échange thermique

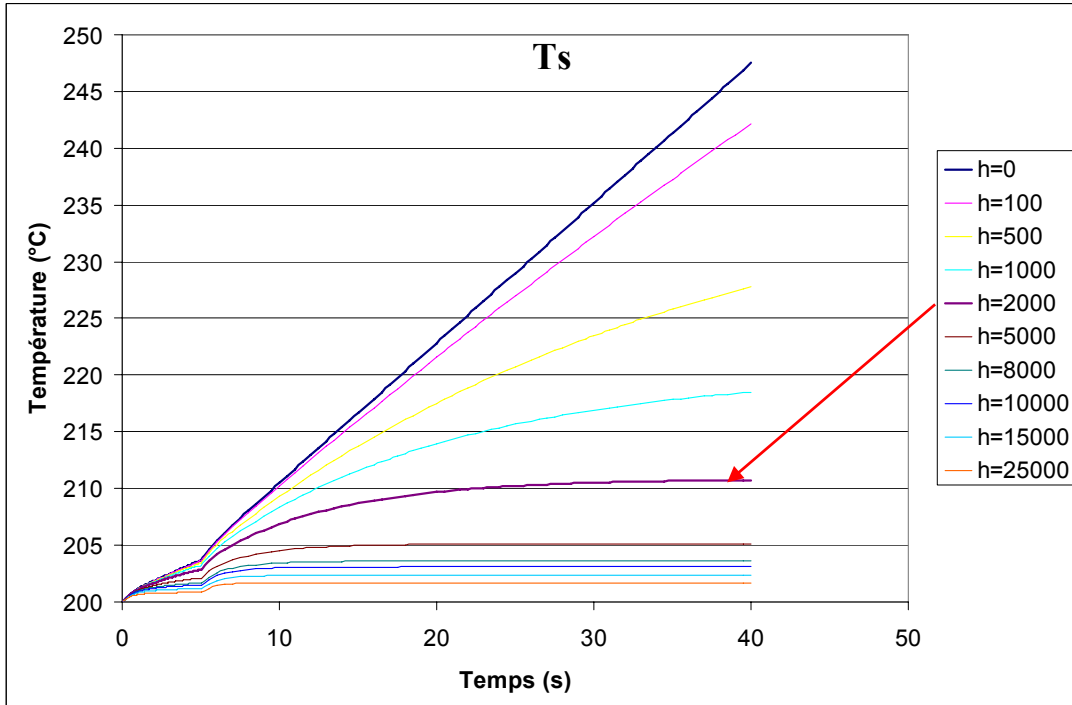


Figure III-28 : Température dans la semelle en fonction du coefficient d'échange thermique

Donc on peut conclure :

- La température de jonction ( $T_j$ ) et la température dans la semelle ( $T_s$ ) qui dépendent beaucoup des valeurs de coefficient d'échange thermique 'h'.
- Les températures diminuent quand la valeur 'h' augmente.
- Entre ces deux cas extrêmes (0 et 25000 W/ m<sup>2</sup>.K), on trouve que les températures seront stables (en régime permanent) au bout de quelques secondes si les coefficients d'échanges thermiques sont supérieurs à 2000 W/m<sup>2</sup>.K.

## 5. Conclusion partielle

Dans ce chapitre, les études thermiques de l'assemblage ont été présentées. Les mesures de résistance thermique ont été effectuées par un analyseur ANATECH PHASE 10, et on compare avec les résultats fournis par la simulation thermique, on a bien trouvé la même tendance parmi différents modèles de l'assemblage. La brasure AuGe<sub>12</sub> avec le substrat Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> métallisé en cuivre présente la meilleure performance thermique.

Le modèle Pseudo DBC (avec drain thermique) a été étudié, on trouve que les tailles de drain thermique joue un rôle important pour la température de jonction de puce, il faut qu'il ait une épaisseur fine et une grande surface pour avoir la meilleure performance thermique. Le paramètre d'échange 'h' a une influence importante pour la température de jonction de puce, il faut qu'il soit supérieur à 2000 W/m<sup>2</sup>.K pour avoir une bonne performance thermique.

## Références bibliographiques

- [Accu] <http://accuratus.com>
- [Copp-07] L.Coppola,D.Huff,F.Wang,R.Burgos,and D.Boroyevich, “Survey on High-Temperature Packaging Materials for SiC-Based Power Electronics Modules”, Blacksburg,VA 24061 USA, 2007
- [Degi-99] A.Degiovanni, “Transmission de l’énergie thermique. Conduction” - . Techniques de l’Ingénieur BE 8 200. Traité Génie énergétique 04-1999.
- [Four-22] J.Fourier, Théorie analytique de la chaleur, Paris, 1822
- [ICMCB] Les paramètres physiques fournis par le laboratoire d’ICMCB
- [Indi] [www.indium.com](http://www.indium.com)
- [Gued-05] A. Guédon-Gracia, “La Conception Thermo-Mécanique Optimisée D’assemblages sans Plomb”, Thèse de docteur de l’Université Bordeaux 1, 2005
- [Lagr] P.-Y. Lagrée, cours ENSTA, Le coefficient d’échange, son importance dans les transferts thermiques. La conduction.
- [Lecl-94] J. Leclercq. Électronique de puissance. Éléments de technologie - . Techniques de l’Ingénieur, Traité Génie électrique D 3 220. 12-1994.
- [Matweb] [www.matweb.com](http://www.matweb.com)
- [Rems-01] R. Remsburg, “Thermal design of electronic equipment”, edition Springer, 2001
- [Suli-05] P.-Y. Sulima. Contribution à la modélisation analytique tridimensionnelle de l’auto-échauffement dans les transistors bipolaires à hétérojonction de type Si/SiGe. PhD thesis, Université Bordeaux 1, 2005.
- [Toku-07] H. Tokuda, “Investigation of a SiC Module with a High Operating Temperature for Power Applications”, IEEE, 9<sup>th</sup> EPTC 2007
- [Zéan-09] A. Zéanh, “Contribution à l’amélioration de la fiabilité des modules IGBT utilisés en environnement aéronautique”, thèse de doctorat de l’université de Toulouse, 2009



---

# Chapitre IV : Méthodologie et fiabilité des modules de puissance

---

## SOMMAIRE

1.	Introduction .....	144
2.	Méthodologie.....	144
2.1	Critères de défaillance .....	144
2.2	Impédance thermique .....	145
3.	Test de vieillissement accéléré : cycles thermiques passif -55°C/+180°C .....	147
4.	Les méthodes d'analyse et moyens mis en œuvre.....	148
4.1	Imagerie et microscopie par Rayons X.....	149
4.2	Microscopie acoustique à balayage .....	149
4.3	Analyse par micro section.....	150
5.	Mesure expérimentale .....	152
5.1	Matrice de véhicules de test et stratégie expérimentale .....	152
5.2	Résultats des tests de vieillissement .....	154
5.3	Visualisations et analyses des résultats .....	155
6.	Simulation numérique .....	158
6.1	Présentation du modèle 3D utilisé.....	158
6.2	Influence des contraintes résiduelles.....	162
6.3	Simulation de l'essai de vieillissement accéléré .....	165
7.	Conclusion partielle.....	169
	Références bibliographiques .....	170



# Chapitre IV : Méthodologie et fiabilité des modules de puissance

## 1. Introduction

Le comportement de la fiabilité des modules de puissance ou d'un matériau peut être étudié par des essais d'accélération du mécanisme de défaillance. Les essais accélérés thermiques sont utilisés au laboratoire IMS pour reproduire un endommagement cumulé similaire en opération réelle pour une durée de temps plus réduite. Pendant la durée de vie de l'assemblage, les contraintes thermomécaniques fatiguent les joints brasés de l'assemblage. Cela s'exprime en particulier, sous la forme d'une fissure dans la brasure et la propagation de fissure conduise finalement à la défaillance par rupture de contact [Dele-03]. La fissure entraîne une augmentation de la résistance thermique de l'assemblage.

Dans ce chapitre, une étude expérimentale de vieillissement par cyclage thermique  $-55^{\circ}\text{C}/+180^{\circ}\text{C}$  est tout d'abord réalisée. Ensuite, nous présentons une approche numérique par éléments finis avec le logiciel ANSYS pour étudier la problématique de la fatigue thermique de l'assemblage.

## 2. Méthodologie

### 2.1 Critères de défaillance

#### 2.1.1 Définition

Il est nécessaire de définir un critère de défaillance afin d'identifier l'apparition de défaillance. Le critère de défaillance est défini par le choix du paramètre indicateur du vieillissement. Il faut fixer la valeur limite de ce paramètre, au delà de laquelle on considère la défaillance comme existante.

#### 2.1.2 Choix du critère de défaillance

Les critères sont définis en trois principales caractéristiques des assemblages que sont les performances thermiques (résistance thermique ou impédance thermique), les joints de brasure et les tenues mécaniques.

Dans notre cas, c'est l'impédance thermique de l'assemblage qui a été utilisée comme paramètre représentatif du vieillissement du cyclage thermique passif. En pratique, la

défaillance est considérée comme occurrente après une augmentation de 20% de la valeur de l'impédance thermique.

## 2.2 Impédance thermique

L'impédance thermique est définie comme la différence de température entre les deux surfaces isothermes divisée par le flux de puissance entrant (Equation IV-1)

$$Z_{th} = \frac{T_j(t) - T_c(t)}{P(t)} \quad \text{Equation IV-1}$$

L'impédance thermique est différente de la résistance thermique (en régime permanent), elle est spécifique pour une durée et une puissance donnée.

La mesure de l'impédance thermique est un moyen efficace et non destructif de caractériser l'échantillon. Cela permet d'évaluer les performances thermiques de l'assemblage et d'en détecter la défaillance au cours du temps. Nous appliquons un échelon de puissance thermique dans la puce et relevons les valeurs d'impédance thermique au cours du temps. Comme un assemblage est un empilement de matériaux de résistances et capacités thermiques différentes, il faut un certain temps pour traverser l'ensemble de l'assemblage et atteindre l'équilibre, qui correspond à la résistance thermique. Un exemple de la caractérisation thermique de l'assemblage est présenté dans figure IV-1, il est tracé en semi log.

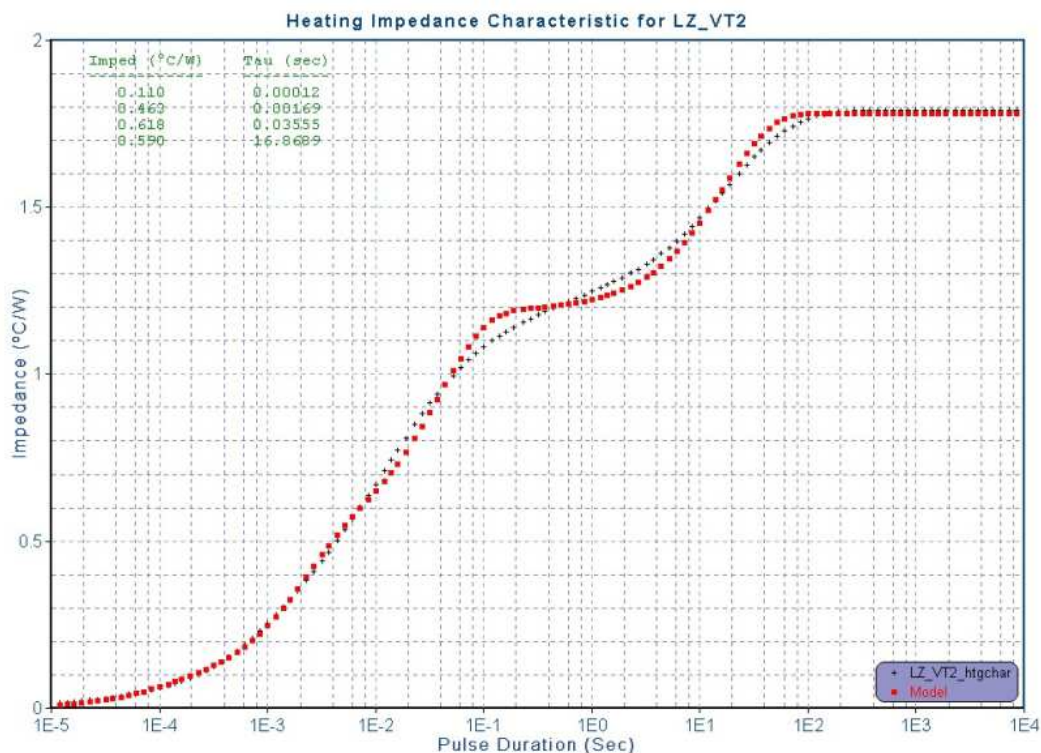


Figure IV-1 : Exemple de caractéristique d'impédance thermique

Ces courbes peuvent donc être utilisées dans le domaine de la fiabilité. En effet, elles peuvent permettre de déterminer lors d'un vieillissement accéléré de composant, où se situe la partie défaillante du module. On voit par exemple, sur la figure IV-2 la représentation de l'évolution de la courbe de  $Z_{th}$  d'un assemblage à l'état initial et de l'état après 71 cycles thermiques ( $t_1$ ). L'augmentation de la résistance du joint brasé entre la semelle et le substrat céramique se répercute de manière visible sur la courbe et est atteint au bout de 52 ms.

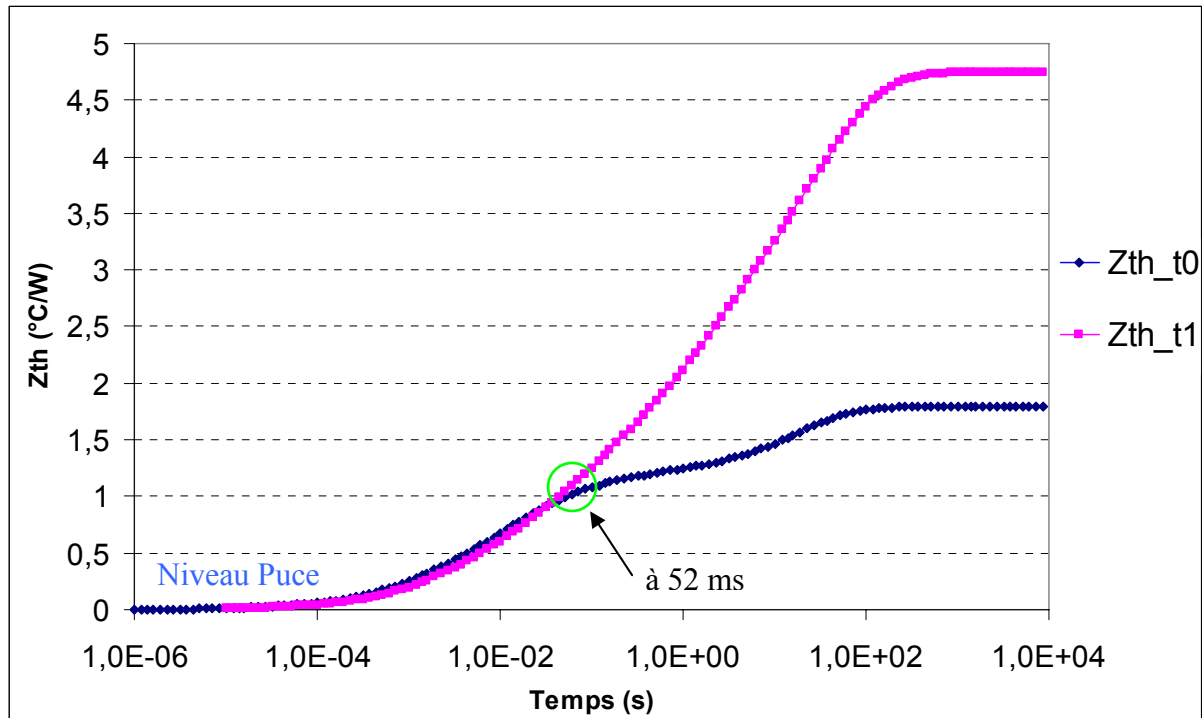


Figure IV-2 : Exemple d'évolution d'impédance thermique à l'état initial et l'état après 71 cycles thermique

Il reste cependant difficile de déterminer avec précision à quel moment se situe la dégradation dans la brasure puce/substrat. Mais, il faut compter un intervalle du temps inférieur à 52 ms pour analyser les défaillances au niveau du la brasure puce / substrat après vieillissement. La figure IV-3 présente un exemple d'évolution d'impédance thermique à l'état initial ( $t_0$ ) et après vieillissement. La dégradation thermique dans la brasure semelle/substrat a déjà commencé après 71 cycles ( $t_1$ ), par contre on ne trouve pas de défaillance dans la brasure puce/substrat après 400 cycles ( $t_3$ ).

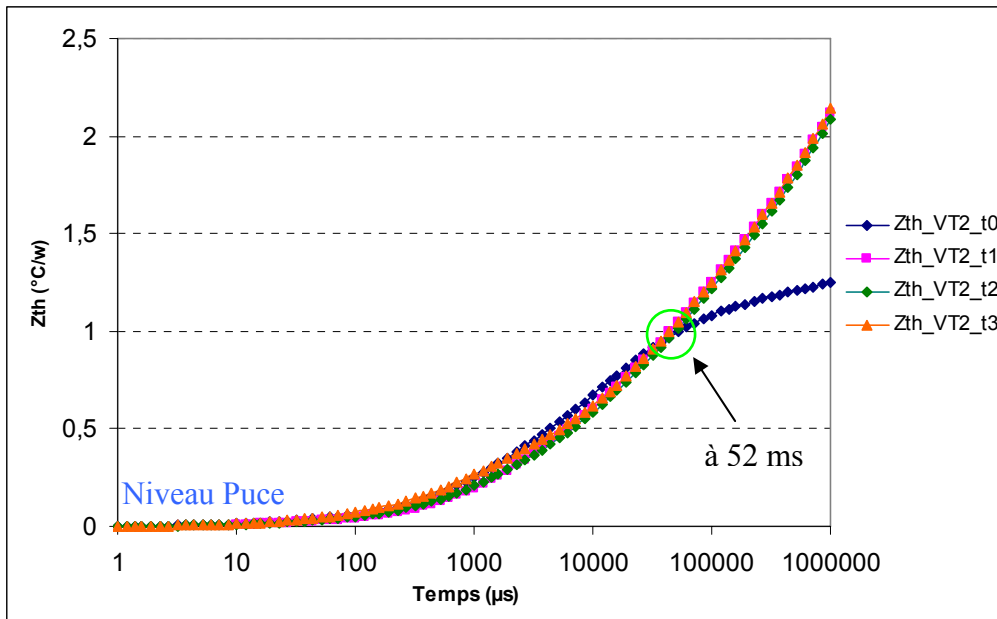


Figure IV-3 : Cycles thermiques appliqués aux véhicules de test

### 3. Test de vieillissement accéléré : cycles thermiques passif

Le cyclage thermique en choc air-air est réalisé dans une enceinte climatique (CLIMATS) constituée de deux chambres, chaudes et froides (Figure IV-4 a). La chambre chaude est réglée à une température de  $+180^{\circ}\text{C}$ , la chambre froide est réglée à la température de  $-55^{\circ}\text{C}$ .

La nacelle, contenant les composants, est basculée dans l'une ou l'autre chambre suivant un temps défini par l'utilisateur afin de réaliser le cyclage thermique du véhicule de test. Afin de contrôler la température au sein de véhicule de test, on a utilisé deux types de thermocouple différents : le premier est un thermocouple externe (Fluke), le second est le thermocouple intégré dans la machine enceinte climatique (Figure IV-4 b).



Figure IV-4 a : Enceinte climatique utilisée

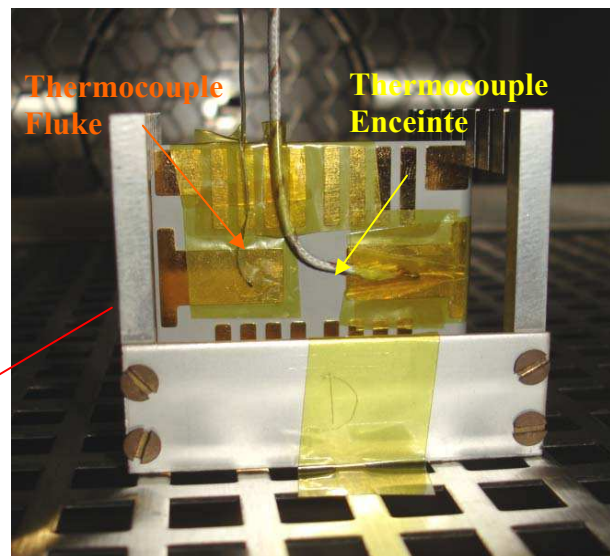


Figure IV-4 b : Deux thermocouples utilisés

Les températures de consigne et des deux thermocouples sont présentées dans figure IV-5. La durée d'un cycle est de 60 minutes, avec des paliers thermiques de 30 minutes à  $-55^{\circ}\text{C}$  et à  $180^{\circ}\text{C}$ . La pente de température est environ  $68^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , ce qui caractérise le cyclage en chocs thermiques.

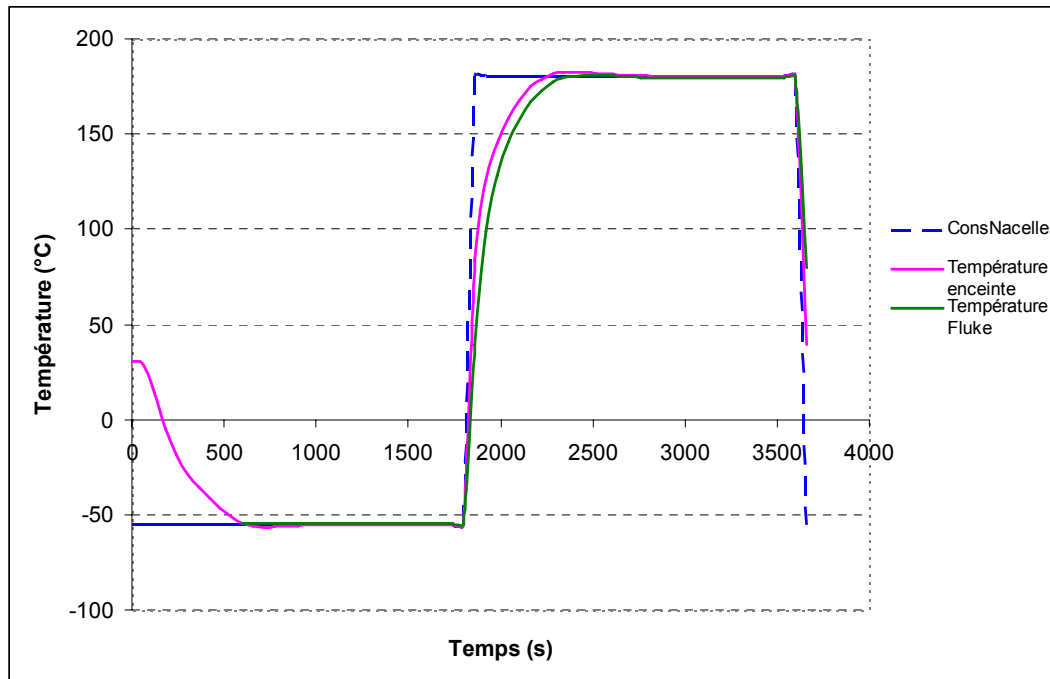


Figure IV-5 : Cycle thermique appliqué aux véhicules de test

#### 4. Les méthodes d'analyse et moyens mis en œuvre

L'évolution des technologies d'assemblage nécessite des techniques et des outils qui permettent la détection des défauts et l'analyse des défaillances. Les brasures permettant le report des puces et des substrats céramiques ne sont pas accessibles visuellement aux opérateurs. Plusieurs techniques sont aujourd'hui disponibles, on peut les classer en deux catégories : la première est une méthode d'analyses non destructive comme l'analyse par rayons X, l'analyse par l'évolution d'impédance thermique de l'assemblage ou l'analyse par la microscopie acoustique à balayage ; la seconde est une méthode d'analyse destructive nécessitant une micro section. L'analyse non destructive permet de réaliser des observations plus rapides que les observations des micros sections de l'état de l'assemblage. Les échantillons restent fonctionnels après l'analyse, et on peut poursuivre leur vieillissement ce qui est apprécié dans le cas où le nombre d'échantillons disponibles est limité.

## 4.1 Imagerie et microscopie par Rayons X

La figure IV-6 présente un analyseur de rayons X « FEIN FOCUS ». La technique consiste à mesurer à l'aide d'un détecteur l'atténuation produite par la traversée de l'objet à observer, sur des rayons X émis à partir d'une source. La puissance émise dépend de la densité et de l'épaisseur du matériau traversé. La méthode de radiographie par rayon X est l'application de la radiographie par transmission. Elle permet de détecter par exemple des lacunes de brasure, des fils de câblage cassés.



Figure IV-6 : Vue générale de l'outil d'analyse par rayons X

## 4.2 Microscopie acoustique à balayage

Le microscope acoustique (PVA TePla SAM 300) est présenté dans la figure IV-7 a. Les ondes acoustiques émises par la sonde acoustique (Figure IV-7 b) se propagent dans les matériaux. Un bras mécanique est asservi suivant les trois directions à contrôler.



Figure IV-7 a: Vue générale de l'outil d'analyse acoustique

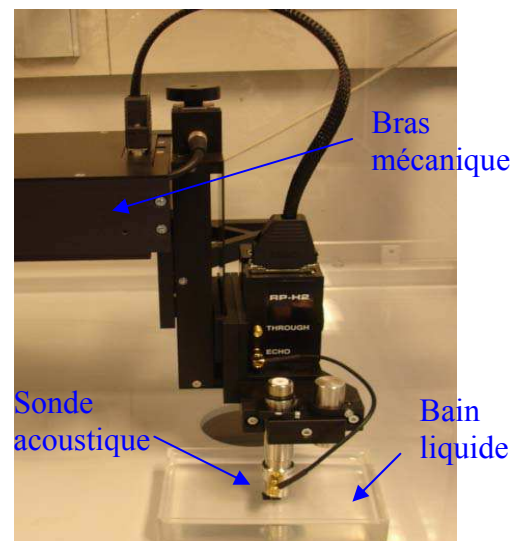


Figure IV-7 b: Mise en œuvre d'une analyse acoustique

Le principe de fonctionnement de la microscopie acoustique est présenté dans la figure IV-8. Les ondes acoustiques se propagent à travers le matériau, une part de l'énergie continue à traverser l'objet, et l'autre part de l'énergie se réfléchit au niveau de l'interface du matériau. Le système mesure les fronts d'onde réfléchis en profondeur.

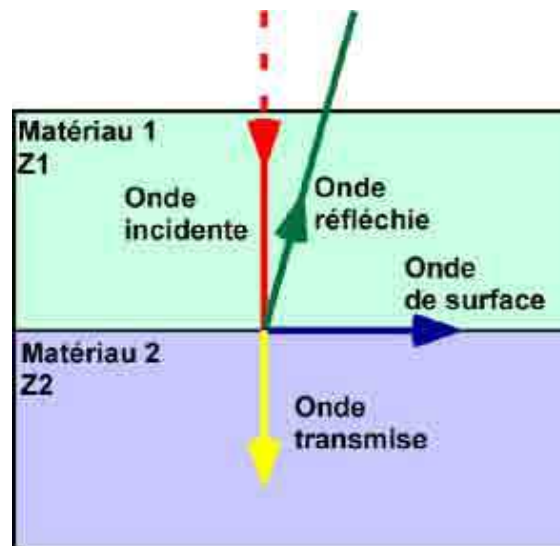


Figure IV-8 : Principe de fonctionnement de la microscopie acoustique

L'échantillon est plongé dans un liquide, généralement de l'eau, qui sert de vecteur de transmission acoustique, l'air atténuant l'onde acoustique. L'analyse acoustique est parfaitement adaptée à la détection des défauts de lacune ou de délaminage dans la brasure, car l'onde acoustique est totalement réfléchi sur ces interfaces. Au contraire de l'analyse par rayons X, l'analyse acoustique permet une sélection des interfaces de l'assemblage.

### 4.3 Analyse par micro section

Afin d'analyser les mécanismes de défaillance, les composants sont préparés pour subir des micros sections. La micro section est une technique destructive qui nous permet d'étudier la structure interne du composant.

Les composants à analyser sont enrobés auparavant avec des processus de découpage pour éviter d'engendrer des contraintes mécaniques. Les enrobages sont découpés près des zones à analyser par la scie diamantée pour diminuer le temps de polissage. Ensuite, des papiers à base de carbure de silicium sont utilisés pour effectuer les polissages du composant jusqu'aux endroits d'analyse, puis les composants ont été observés et analysés avec un microscope électronique à balayage (MEB) (Figure IV-9)





Figure IV-9 : Vue générale de l'outil d'analyse par un microscope électronique à balayage

Le MEB permet d'observer les différentes couches présentes aux interfaces. Avant de passer au MEB, on fait une métallisation d'Ag sur les zones qu'on ne visualise pas. Après on fait un dépôt de Cu sur les zones qu'on va visualiser.

Ensuite, le composant est étudié par analyse EDX (Energy Dispersive X-ray Analysis) afin de définir la répartition des éléments dans les couches de l'assemblage. On fait une analyse sur un substrat céramique AlN avec la métallisation cuivre, après l'étude EDX, on a trouvé qu'il y a des particules blanches dans le substrat AlN (Figure IV-10 a). Ces particules sont le matériau Yttrium ('Y') qui est présenté dans la Figure (IV-10 b), L'yttrium peut améliorer la tenue mécanique du substrat AlN.

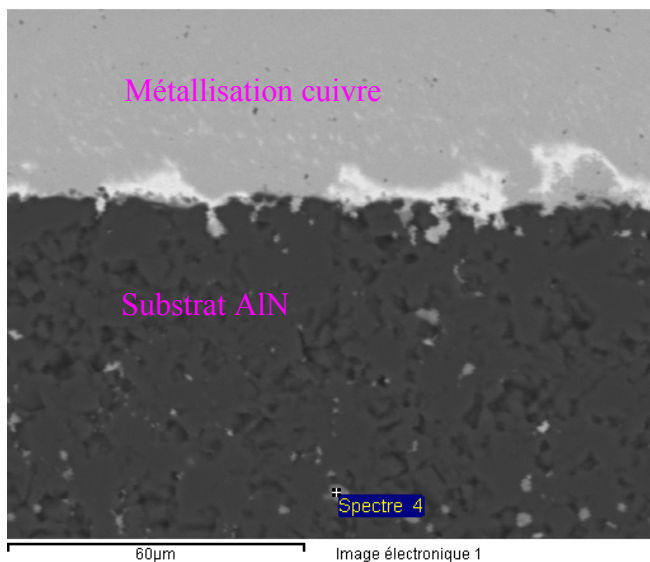


Figure IV-10 a : Image MEB du substrat céramique AlN métallisé en cuivre

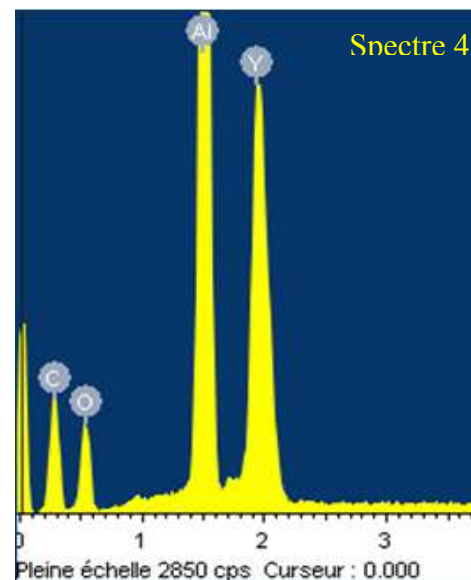


Figure IV-10 b : Spectre de la répartition des éléments dans le substrat AlN



## 5. Mesure expérimentale

### 5.1 Matrice de véhicules de test et stratégie expérimentale

Les choix de conception des véhicules de test sont effectués pour l'application haute température. Nous avons déjà présenté dans le chapitre III 3.3 deux séries de véhicules de test, (VT1, VT12, VT2, VT3, VT4, VT5), et (VT11, VT6, VT7, VT8, VT9, VT10). L'objectif est comprendre les mécanismes de défaillance afin d'envisager des solutions technologiques d'assemblage haute température permettant d'améliorer la durée de vie du module de puissance sous des contraintes thermiques entre -55°C et +180°C.

1<sup>er</sup> Lot de véhicule de test :

	<b>VT1</b>	<b>VT12</b>	<b>VT2</b>	<b>VT 3</b>	<b>VT4</b>	<b>VT5</b>
<b>Puce</b>	D1	D12	D2	D3	D4	D5
<b>Brasure puce</b>	SnPb <sub>95</sub>	SnPb <sub>95</sub>	Au <sub>88</sub> Ge	Au <sub>88</sub> Ge	Au <sub>97</sub> Si	Au <sub>97</sub> Si
<b>Fil de câblage</b>	Al (125µm)	Al (125µm)	Al (125 µm)	Al (125µm)	Al (125µm)	Al (125µm)
<b>Substrat</b>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 320µm Cu 300µm	AlN 1mm Al 400µm	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 320µm Cu 300µm	AlN 1mm Al 400µm	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 320µm Cu 300µm	AlN 1mm Al 400µm
<b>Semelle</b>	CuC	CuC	CuC	CuC	CuC	CuC

Tableau IV-1 : Différents matériaux d'assemblage pour le 1<sup>er</sup> lot de véhicule de test

2<sup>ème</sup> Lot de véhicule de test :

	<b>VT11</b>	<b>VT6</b>	<b>VT7</b>	<b>VT 8</b>	<b>VT9</b>	<b>VT10</b>
<b>Puce</b>	D11	D6	D7	D8	D9	D10
<b>Brasure puce</b>	SnPb <sub>95</sub>	SnPb <sub>95</sub>	Au <sub>88</sub> Ge	Au <sub>88</sub> Ge	Au <sub>97</sub> Si	Au <sub>97</sub> Si
<b>Fil de câblage</b>	Al (125µm)	Al (125µm)	Al (125 µm)	Al (125µm)	Al (125µm)	Al (125µm)
<b>Substrat</b>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 320µm Cu 300µm	AlN 1mm Al 400µm	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 320µm Cu 300µm	AlN 1mm Al 400µm	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 320µm Cu 300µm	AlN 1mm Al 400µm
<b>Semelle</b>	CuC	CuC	CuC	CuC	CuC	CuC

Tableau IV-2 : Différents matériaux d'assemblage pour le 2<sup>ème</sup> lot de véhicule de test

## Stratégie expérimentale

La figure IV-11 représente la stratégie expérimentale pour analyser les défaillances dans les joints brasés puce/substrat au cours des vieillissements.

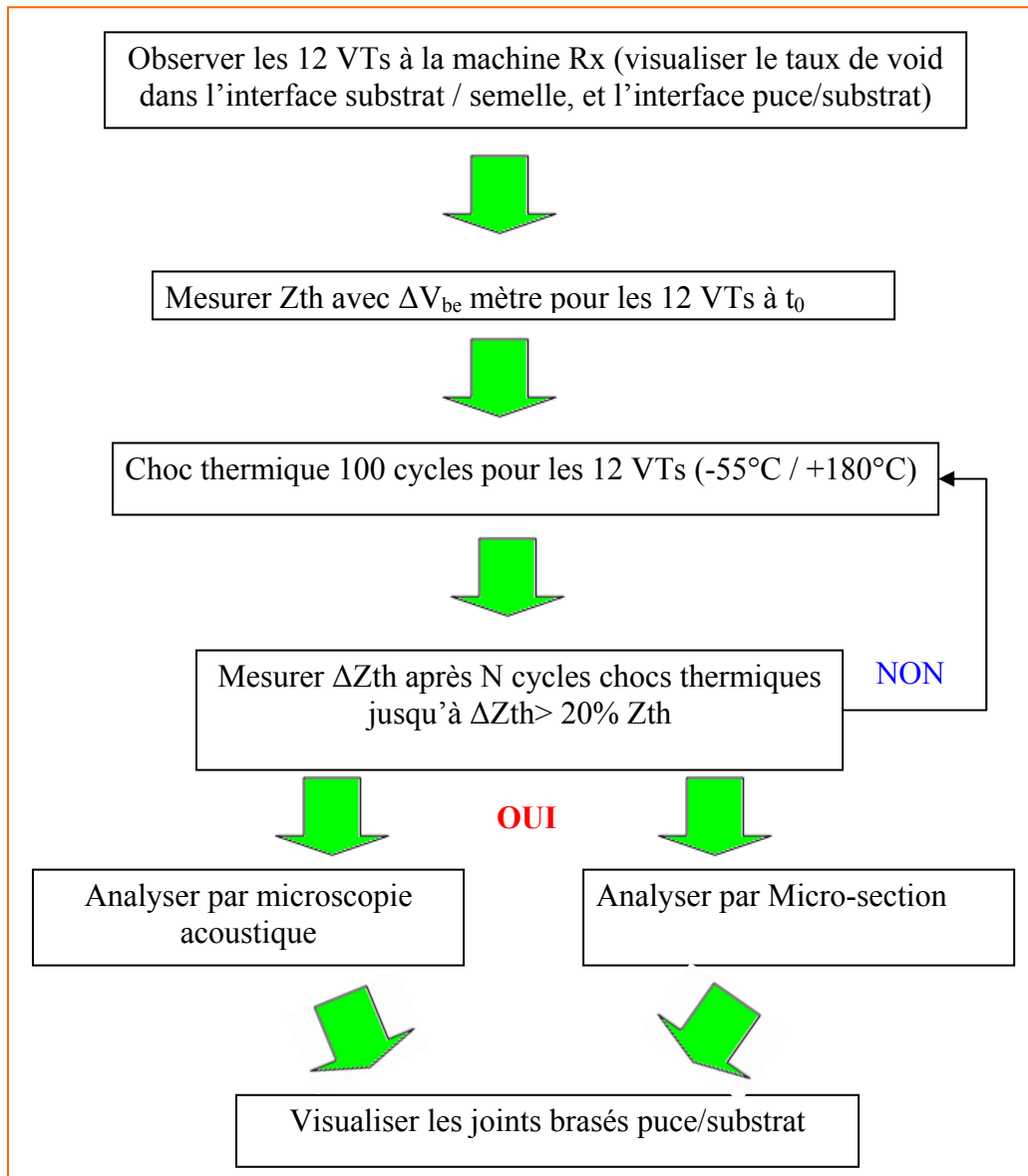


Figure IV-11 : Organigramme de la stratégie expérimentale

Dans un premier temps, nous avons passé tous les véhicules de test au microscope par Rayons X pour avoir les taux de lacunes à l'état initial, puis mesurer les impédances thermiques de l'assemblage avec la machine  $\Delta V_{be}$  mètre pour tous les véhicules de test. Ensuite, les véhicules de test sont passés aux cyclages thermiques -55°C/+180°C. La défaillance est considérée comme occurrente après une augmentation de 20% de la valeur de l'impédance thermique. Les analyses par microscopie acoustique sont effectuées pour

visualiser l'état des joints brasés puce/substrat, et notamment l'apparition d'un phénomène de délaminage.

## 5.2 Résultats des tests de vieillissement

### 5.2.1 Evaluation électrique des composants

Les véhicules de test ont subi 400 cycles thermiques  $-55^{\circ}\text{C} / +180^{\circ}\text{C}$ . Les mesures électriques avant et après les vieillissements sont effectuées sur les modules des véhicules de test et sont résumés dans le tableau IV-3 :

Echantillons	Diodes SiC	Vd (V) initial	Vd (V) vieilli
VT1	D1	0,73	0,74
VT12	D12	0,695	0,698
VT2	D2	0,685	0,689
VT3	D3	0,714	0,714
VT4	D4	0,734	0,735
VT5	D5	0,734	0,734
VT11	D11	0,733	0,734
VT6	D6	0,734	0,734
VT7	D7	0,730	0,731
VT8	D8	0,551	0,551
VT9	D9	0,19	0,19
VT10	D10	0,448	0,449

Tableau IV-3: Test électriques sur les composants avant et après vieillissement

La chute de tension aux bornes de chaque diode n'a pas évolué au cours du vieillissement.

### 5.2.2 Evaluation d'impédance thermique du module

Deux lots de vieillissements ont été effectués. Les tableaux IV-4 et IV-5 montrent les résultats du nombre de cycles subis par les modules durant ces vieillissements accélérés jusqu'à 400 cycles thermiques.

#### Lot 1 :

Véhicules de test	Puce SiC	Nombre de cycles	Etats
VT1	D1	400	Non défaillant
VT12	D12	400	Non défaillant
VT2	D2	400	Non défaillant
VT3	D3	400	Non défaillant
VT4	D4	400	Non défaillant
VT5	D5	400	Non défaillant

Tableau IV-4 : Résultats du nombre de cycles subi et de l'état de l'assemblage pour lot 1

## Lot 2 :

Véhicules de test	Puce SiC	Nombre de cycles	Etats
VT11	D11	400	Non défaillant
VT6	D6	400	Non défaillant
VT7	D7	400	Non défaillant
VT8	D8	400	Non défaillant
VT9	D9	400	Non défaillant
VT10	D10	400	Non défaillant

Tableau IV-5 : Résultats du nombre de cycles subi et de l'état de l'assemblage pour lot 2

Les résultats des tests de vieillissement nous montrent qu'il n'y a pas de défaillance pour tous les véhicules de test au bout de 400 cycles thermiques. Il faut encore augmenter le nombre de cycles thermiques pour peut-être créer des défaillances dans les joints brasés puce/substrat. Donc on ne peut pas conclure pour faire la comparaison sur les différentes technologies de brasure utilisées d'un point de vue de la fiabilité.

### 5.3 Visualisations et analyses des résultats

#### 5.3.1 Vieillissement des brasures entre la semelle et le substrat métallisé

##### Etats initiaux

L'analyse par rayon X, des brasures situées entre la semelle et le substrat céramique métallisé démontre que leur qualité initiale n'est pas acceptable (présence de beaucoup de bulles d'air). Les images présentées dans la figure IV-12 correspondent à deux exemples de résultats de l'analyse par rayon X : le véhicule de test numéro 7 (VT7) avec une mauvaise qualité de brasure (Figure IV-12 a), et le véhicule de test numéro 11 avec une qualité moyenne de brasure (Figure IV-12 b).

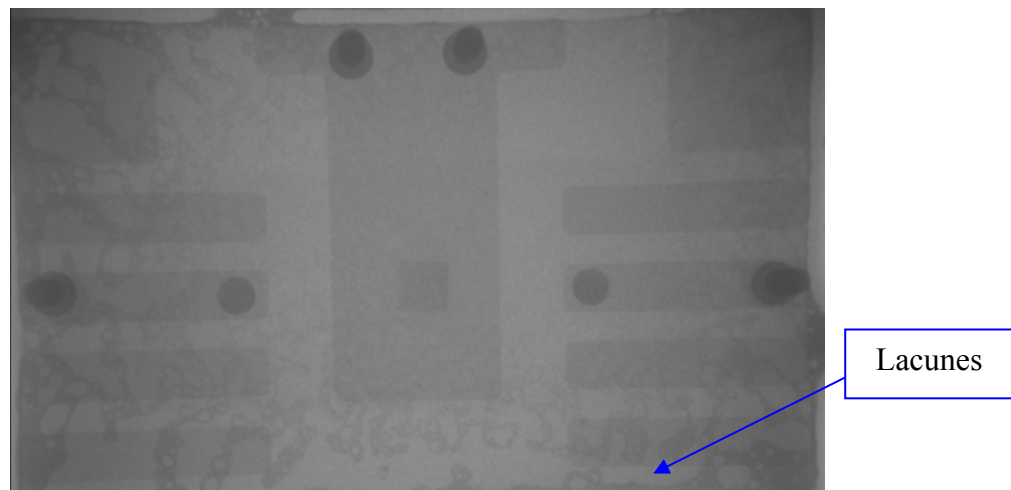


Figure IV-12 a : Résultat au rayon X pour VT7

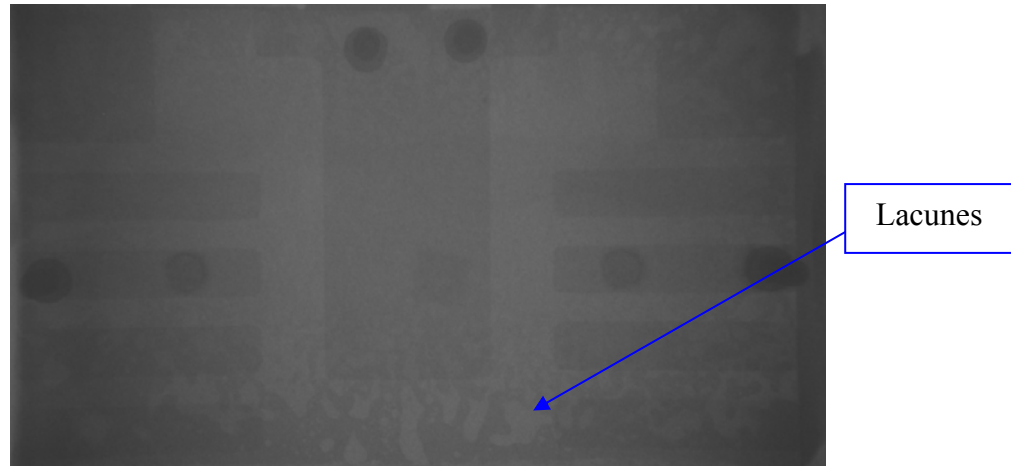


Figure IV-12 b : Résultat au rayon X pour VT11

Dans notre cas, nous nous intéressons qu'à la brasure puce/substrat pour la suite, car les qualités de fabrication du report de substrat vers la semelle n'est pas convenable.

### 5.3.2 Vieillessement des brasures entre la puce et le substrat

#### Etats initiaux

Les deux composants sont équipés du même type de brasure  $Au_{97}Si_3$  (Figure IV-13), mais leur substrat céramique métallisé est différent : substrat  $Si_3N_4$  en métallisation cuivre pour VT9, substrat AlN en métallisation Aluminium pour VT10.

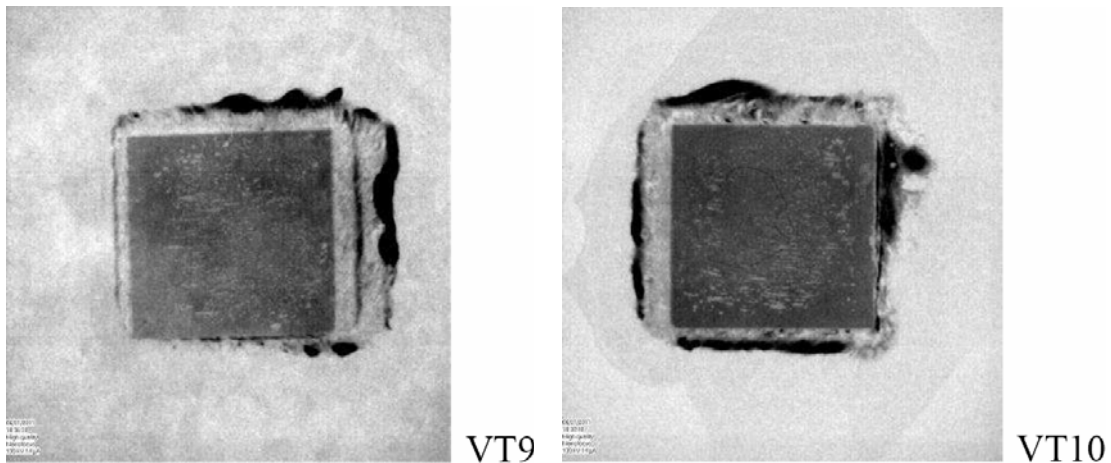


Figure IV-13 : Résultat de l'analyse par rayon X pour les deux composants avec le même type de brasure  $Au_{97}Si_3$

Nous listons aussi les observations par rayon X sur les deux composants avec différents types de brasure: brasure  $Au_{88}Ge_{12}$  pour VT7, brasure  $Sn_5Pb_{95}$  pour VT11 (Figure IV-14).

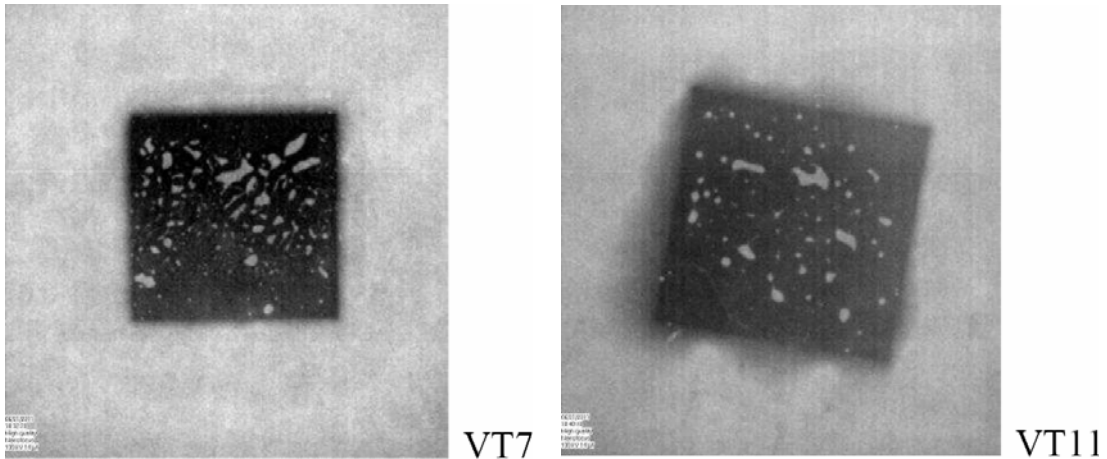


Figure IV-14 : Résultat au rayon X pour les deux composants avec différents types de brasure

Nous trouvons que le taux de lacunes dans les joints brasés dans les deux cas est acceptable.

### **Etats après 71 cycles (t<sub>1</sub>)**

Une analyse par rayons X a été faite avant de débiter le cyclage thermique. L'image obtenue présente tous les défauts du véhicule test dans la mesure où les rayons X traversent la totalité de l'assemblage contrairement à l'analyse acoustique dont l'image obtenue est une coupe dans l'assemblage. Par conséquent, il s'avère difficile de comparer les deux types d'analyses pour un suivi de l'état de joint de brasure. La référence est l'analyse acoustique obtenue à  $t_1$  pour suivre l'apparition de délaminage dans le joint de brasure. La prochaine analyse acoustique est faite à  $t_2$  (200 cycles), si les résultats sont identiques à ceux obtenus à  $t_1$ , nous pourrions affirmer qu'il n'y a pas eu de délaminage dans le joint de brasure.

Nous exposons un exemple de résultat d'analyse avec le microscope acoustique sur un véhicule de test VT9 après 71 cycles (Figure IV-15), on observe quelques lacunes dans la brasure.

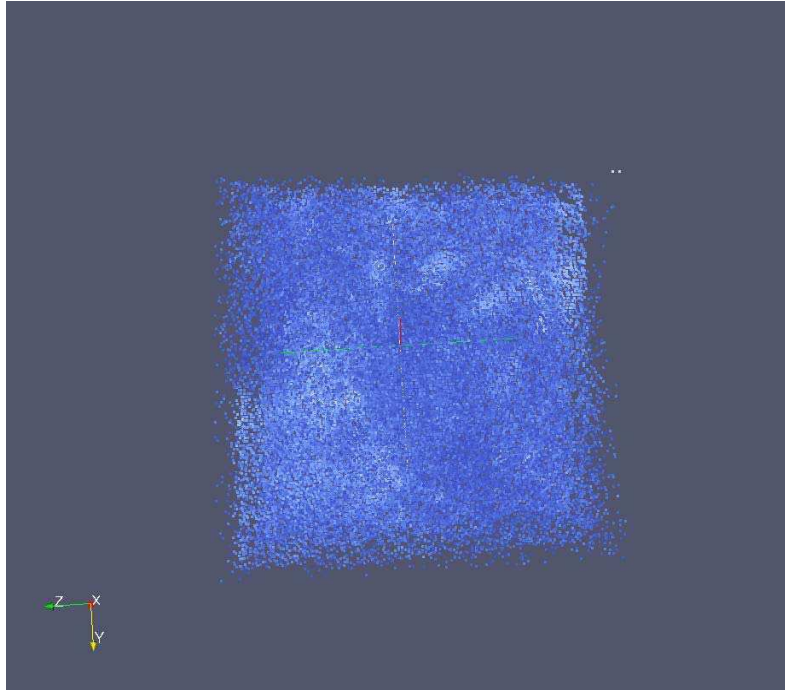


Figure IV-15 : Résultat d'analyse par microscopie acoustique dans le joint de brasure puce/substrat après 71 cycles

## 6. Simulation numérique

### 6.1 Présentation du modèle 3D utilisé

Le modèle complet d'assemblage est constitué par la puce SiC, la brasure puce/substrat, le substrat métallisé, la brasure substrat/semelle et la semelle. Ce modèle complet (Figure IV-16) a déjà été utilisé pour les simulations thermiques de comparaisons des résistances thermiques de l'assemblage (cf. chapitre III.4.1).

Les fils de câblage n'ont pas été pris en compte dans la simulation. Les résultats des simulations (cf. chapitre III.4.4) ont montré que la présence de ces fils n'a aucune influence sur l'évacuation des calories provenant de la puce, ni sur les densités d'énergies de déformations accumulées dans les joints de brasure puce/substrat [Gued-05].

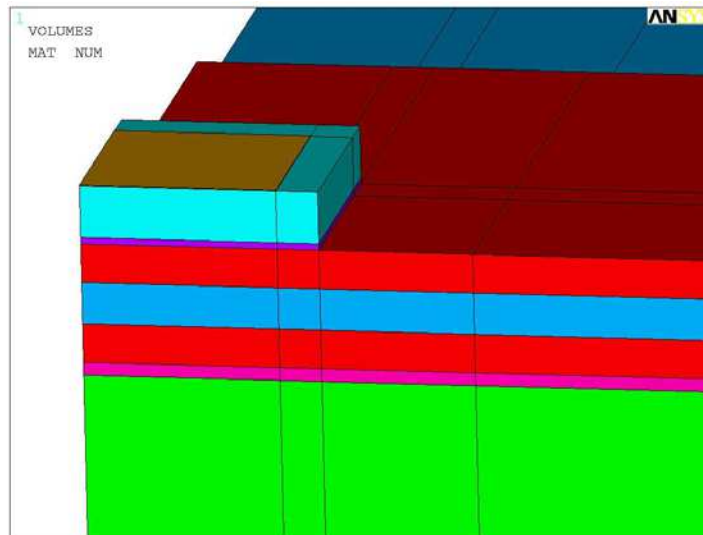


Figure IV-16 : Modèle utilisé pour les simulations thermomécaniques

Pour les simulations thermomécaniques, les conditions aux limites de ce modèle sont les suivantes :

- Les nœuds de l'axe x sont bloqués selon l'axe y,
- Les nœuds de l'axe y sont bloqués selon l'axe x,

Les propriétés thermomécaniques des matériaux d'assemblage sont recensées dans le tableau suivant (Tableau IV-6):

Elément	matériau	Module d'Young (GPa)	Coefficient de poisson	CDT (ppm/°C)
Puce	SiC <sup>[2]</sup>	410	0,14	4
	Si <sup>[6]</sup>	130	0,22	2,5
Brasure haute température	Sn <sub>5</sub> Pb <sub>95</sub> <sup>[3]</sup>	16	0,44	28,9
Substrat céramique métallisé	Cu <sup>[1]</sup>	110	0,34	16,4
	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> <sup>[6]</sup>	310	0,27	3,3
	Al <sup>[1]</sup>	68	0,36	25,5
	AlN <sup>[6]</sup>	344	0,25	4,5
Brasure basse température	Sn <sub>97</sub> Ag <sub>3</sub> <sup>[6]</sup>	55.8 @180°C	0,4	30,2
Drain semelle	Cu <sub>60</sub> C <sub>40</sub> <sup>[6,7]</sup>	75	0,3	8,5

Tableau IV- 6 : Propriétés physiques des matériaux d'assemblage pour les simulations thermomécaniques



La brasure présente un comportement thermoélasto-viscoplastique en raison d'une température d'utilisation proche de sa température de fusion ( $0,5 \leq T_u/T_f \leq 0,84$ ). Le comportement viscoplastique de la brasure est modélisé par loi d'Anand (cf. chapitre II.3.4.2). Nous avons utilisé les différents types de brasure dans le projet SiC-HT<sup>2</sup>, mais le calcul de ces constantes d'Anand est très complexe pour tous les types de brasure. L'exemple du Sn<sub>5</sub>Pb<sub>95</sub> fourni par [Want-01] et Sn<sub>97</sub>Ag<sub>3</sub> sont présentés (Tableau IV-7)

Constante	Sn <sub>5</sub> Pb <sub>95</sub> <sup>[8]</sup>	Sn <sub>97</sub> Ag <sub>3</sub> <sup>[9]</sup>
C1 : S <sub>0</sub> (MPa)	15,09	5,07
C2 : Q/R (K)	15583	12548,68
C3 : A (s <sup>-1</sup> )	3,25e <sup>12</sup>	3,0877e <sup>8</sup>
C4 : ξ	7	7
C5 : m	0,143	0,27
C6 : h <sub>0</sub> (MPa)	1787	2503
C7 : ŝ (MPa)	72,73	28,08
C8 : n	4,37.10 <sup>-3</sup>	0,08
C9 : a	3,73	3,17

Tableau IV-7 : Paramètres d'Anand-Viscoplasticité de la brasure Sn<sub>5</sub>Pb<sub>95</sub> [Wang-01] et de la brasure Sn<sub>97</sub>Ag<sub>3</sub> [ITRI-99, Brad-07]

- 
- [1] Paramètres issus des références [Matweb]
  - [2] Paramètres issus des références [Accu]
  - [3] Paramètres issus des références [Gued-05]
  - [4] Paramètres issus des références [Indi]
  - [5] Paramètres issus des références [Copp-07]
  - [6] Paramètres issus des références [Zéan-09]
  - [7] Paramètres issus des références [ICMCB]
  - [8] Paramètres issus des références [Wang-01]
  - [9] Paramètres issus des références [ITRI-99, Brad-07]
  - [10] Paramètres issus des références [Yu-Ch-09]

### 6.1.1 Maillage

Le modèle complet est maillé avec l'élément structurel SOLID45, sauf les joints de brasure qui sont maillés avec l'élément VISCO107. Ces différents maillages ont été adoptés après une étude de convergence sur la taille minimale des éléments des différents modèles. La figure IV-17 ci-dessous montre l'évolution de la densité d'énergie de déformation calculée dans un type de brasure Sn<sub>5</sub>Pb<sub>95</sub> en fonction de la taille minimale des éléments utilisés pour le maillage de l'ensemble des couches. Elle montre qu'une stabilisation de la densité d'énergie de déformation est constatée dans la brasure pour des tailles minimales d'éléments en

dessous de 40  $\mu\text{m}$ . Avec des tailles minimales d'éléments en dessous de cette valeur, l'erreur relative reste inférieure à 5 %.

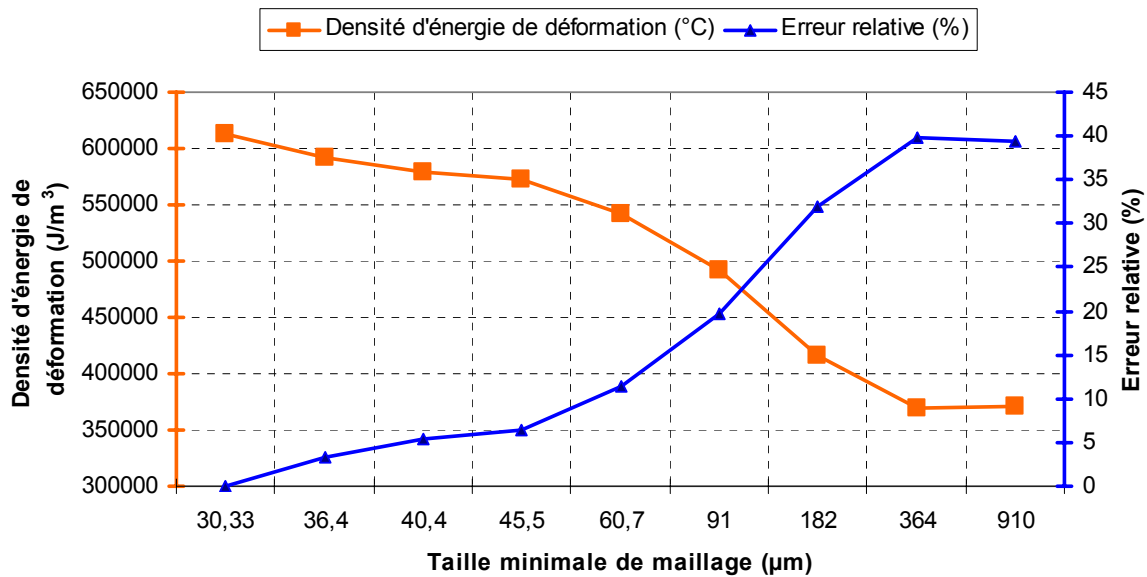


Figure IV-17 : Convergence de la densité d'énergie de déformation inélastique dissipée dans la brasure haute température en fonction de la taille minimale des éléments du maillage

### 6.1.2 Critère de défaillance

Le critère de défaillance utilisé pour les simulations thermomécaniques est lié à la densité volumique d'énergie de déformation dépensée dans les joints brasés qui va s'accumuler au cours des chocs thermiques. Les simulations des tests de vieillissement doivent permettre de quantifier la valeur de la densité d'énergie de déformation par cycle. Connaissant le nombre de chocs menant à la défaillance, nous allons pouvoir déduire la valeur de la densité d'énergie de déformation accumulée avant la défaillance du module. La densité d'énergie de déformation est définie par l'équation suivante :

$$W = \int_{\varepsilon_{ij}^{ini}}^{\varepsilon_{ij}^{fin}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad \text{Equation IV-2}$$

Avec,

- W : La densité volumique d'énergie de déformation
- $\sigma$  : Les contraintes inélastiques (plastiques et fluage)
- $\varepsilon$  : Les déformations inélastiques

Ce calcul peut être réalisé automatiquement par le logiciel d'ANSYS à l'aide de la commande plwk (plastic work). Il s'agit d'un équivalent au calcul de l'intégrale des valeurs de contrainte inélastique en fonction de la déformation inélastique.

## 6.2 Influence des contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles sont présentes dans la majorité des matériaux utilisés en microélectronique. Ces contraintes internes sont un paramètre important de la microélectronique en général, car elles peuvent être responsables de plusieurs types de problème comme la mauvaise adhésion d'une couche ou la forte courbure d'une plaquette suite à un dépôt. Ces contraintes résiduelles peuvent entraîner la modification des caractéristiques d'une couche telle que sa résistivité électrique ou sa capacité à propager des fissures par fatigue.

Nous devons savoir quelle est la conséquence du processus de fabrication sur un assemblage de puce nue. Le procédé de refusion est simulé afin de calculer les densités d'énergie de déformation, contraintes résiduelles et déformations dues à la fabrication de l'assemblage. La figure IV-18 montre le profil de température mesuré durant le procédé de refusions pour les brasures Sn<sub>5</sub>Pb<sub>95</sub> et Au<sub>88</sub>Ge<sub>12</sub>.

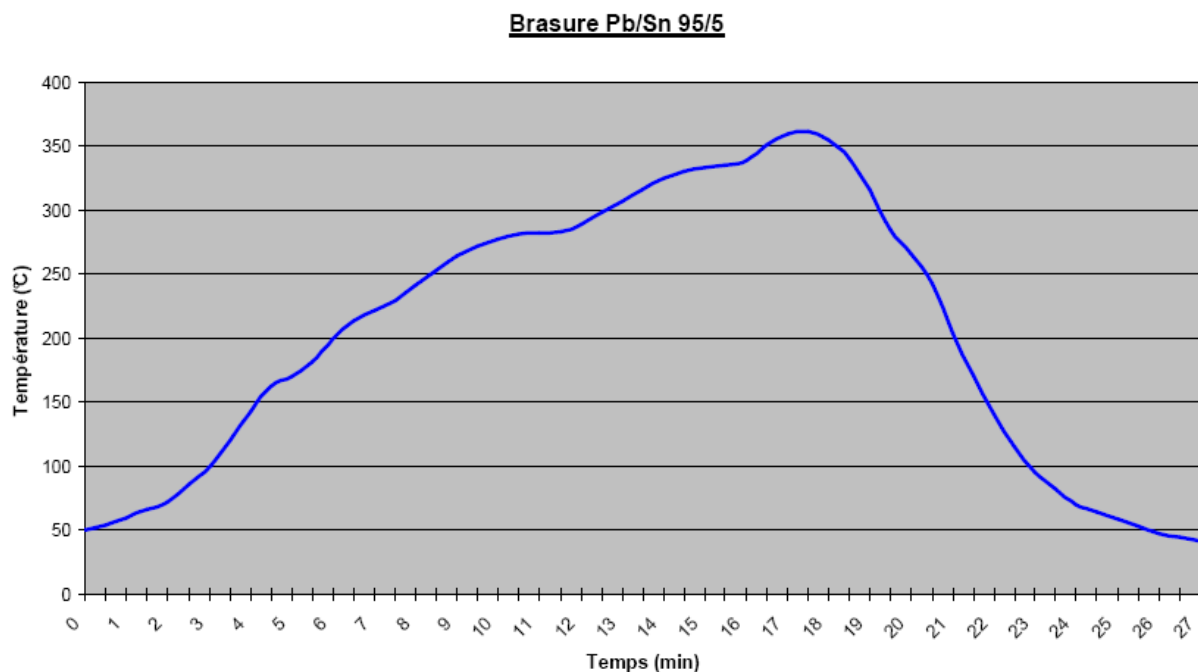


Figure IV-18 : Profil de refusion pour les brasures Sn<sub>5</sub>Pb<sub>95</sub> et Au<sub>88</sub>Ge<sub>12</sub> [HCM]

L'accumulation de densité d'énergie de déformation dans la brasure est synonyme de fatigue. En effet, tout au long de sa vie, un assemblage va accumuler de l'énergie de déformation jusqu'au point de rupture.

Une certaine fatigue se trouve présente au sein de l'assemblage dès sa phase de conception. La question que l'on se pose maintenant est de savoir si ce paramètre sera ou non négligeable sur le calcul de sa durée de vie. Cela revient à savoir si lors d'une simulation de test de vieillissement on doit prendre en compte ou non la densité d'énergie de déformation accumulée durant le processus de refusion.

La position généralement adoptée dans la plupart des études est de ne pas prendre en compte cette énergie résiduelle car elle est considérée comme négligeable. Pour cela, la simulation du procédé d'assemblage et une série de simulation de vieillissement permet de justifier l'influence de processus de fabrication de l'assemblage.

Un modèle va subir le processus de refusions puis une série de test de vieillissement, pendant qu'un autre identique subira directement le test de vieillissement (figure IV-19).

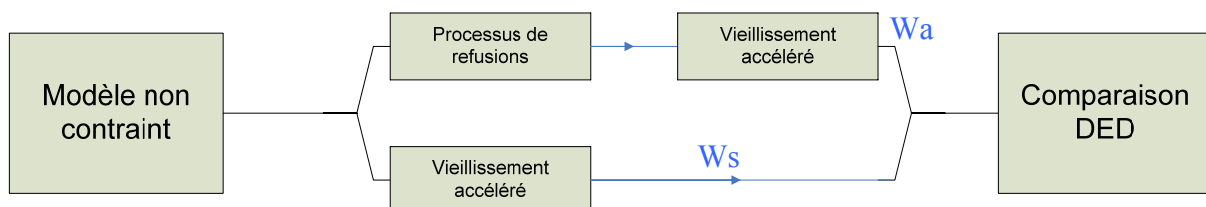


Figure IV-19 : Mise en évidence des contraintes résiduelles

La différence de densité d'énergie de déformation entre les deux résultats,  $W_a$  résultat de la prise en compte des contraintes résiduelles et  $W_s$  résultat sans la prise en compte de ces contraintes résiduelles permettra de conclure sur la nécessité de la prise en compte des contraintes résiduelles sur le calcul de la durée de vie d'un assemblage.

Le procédé d'assemblage de la puce SiC sur le substrat est divisé en deux parties :

- Une montée en température de l'ambiante (25°C) à la température de fusion de 310°C pour la brasure  $Sn_5Pb_{95}$ .
- Une descente en température jusqu'à l'ambiante avec une pente conforme au profil de refusion utilisé pour le report de puce.

Les simulations sont réalisées pour le procédé d'assemblage. Tout d'abord, la montée température à 310°C est simulée avec une température de référence de 25°C, car à cette température les matériaux ne sont ni contraints, ni déformés. Ensuite, le retour progressif de

310°C à l'ambiante est simulé, la température de référence devient égale à la température de fusion de la brasure Sn<sub>5</sub>Pb<sub>95</sub>.

La figure (IV-20 a) présente les distributions de la densité volumique d'énergie de déformation dans l'assemblage pendant la phase du procédé d'assemblage. La valeur maximale se situe à l'endroit de la couche de brasure sous le coin de la puce (Figure IV-20 b), c'est l'endroit le plus soumis à fatigue thermique et le plus contraint.

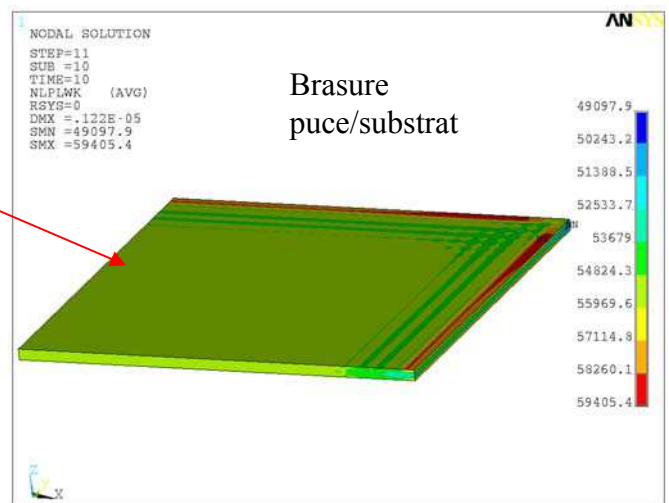
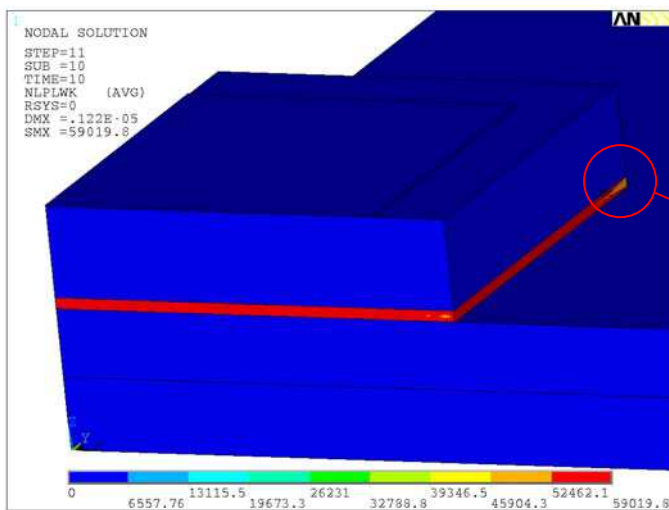


Figure IV-20 a : Distributions de la densité d'énergie déformation pendant la phase de refusion

Figure IV-20 b : Zone critique dans la brasure puce/substrat

Un stockage de deux jours à température ambiante est ajouté après la phase de refusion, car les cycles thermiques ne sont pas effectués juste après le procédé d'assemblage. Il est donc intéressant de calculer la densité d'énergie déformation dans le joint brasé durant cette phase et la phase de refusion pour déduire ses influences sur le vieillissement des joints (cyclage thermique). La figure suivante (Figure IV-21) représente la densité d'énergie déformation durant la phase de refusion, la phase de stockage et la phase de cyclage thermique dans le joint brasé puce/substrat.

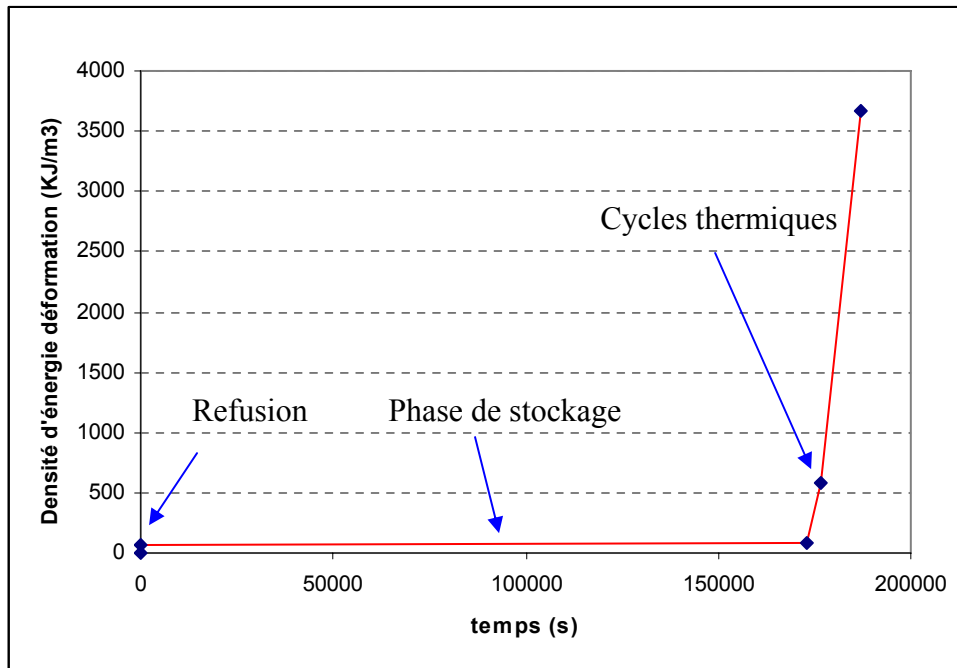


Figure IV-21 : Densité d'énergie de déformation durant la refusion, la phase de stockage et les trois cycles thermiques

En conclusion, d'après les résultats des simulations, les influences de la phase de refusion et de la phase de stockage sont négligeables par rapport la phase de cyclage thermique, car le rapport entre  $W_a$  (résultat de la prise en compte des contraintes résiduelles) et  $W_s$  (résultat sans la prise en compte de ces contraintes résiduelles) est égale à environ 1.

### 6.3 Simulation de l'essai de vieillissement accéléré

#### 6.3.1 Simulation des cycles thermiques $-55^{\circ}\text{C}/+180^{\circ}\text{C}$

Les cycles chocs thermiques entre  $-55^{\circ}\text{C}/+180^{\circ}\text{C}$  sont simulés. La durée d'un cycle est de 60 minutes, avec des paliers thermiques de 30 minutes à  $-55^{\circ}\text{C}$  et à  $180^{\circ}\text{C}$  (Figure IV-22). Les contraintes et déformations résiduelles ne sont pas prises en compte dans cette simulation.

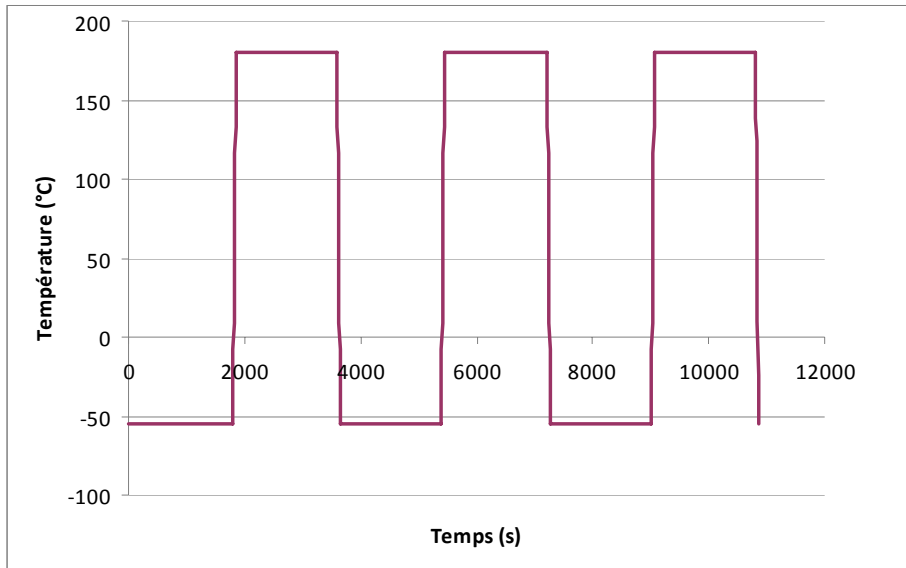


Figure IV-22 : Profil des cycles thermique -55°C/+180°C

### 6.3.2 Calcul de la densité d'énergie déformation durant les cycles thermiques

La valeur maximale de la densité volumique est située dans la brasure puce/substrat, comme on le voit sur la figure IV-23, c'est l'endroit le plus contraint dans le joint brasé, et dans lequel la probabilité d'apparition des premières fissures est la plus importante.

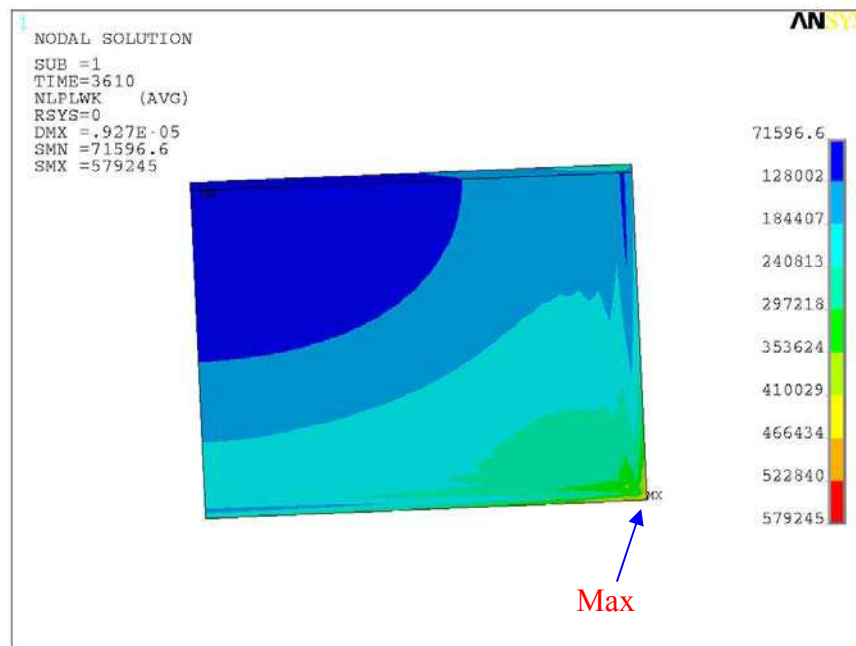


Figure IV-23 : Densité d'énergie de déformation dans la brasure

La figure IV-24 nous permet de visualiser l'accumulation de la densité d'énergie de déformation dans le joint brasé en fonction du temps. On observe que l'accumulation de la densité d'énergie de déformation dans le joint brasé apparaît lors du changement de la phase de cycle thermique.

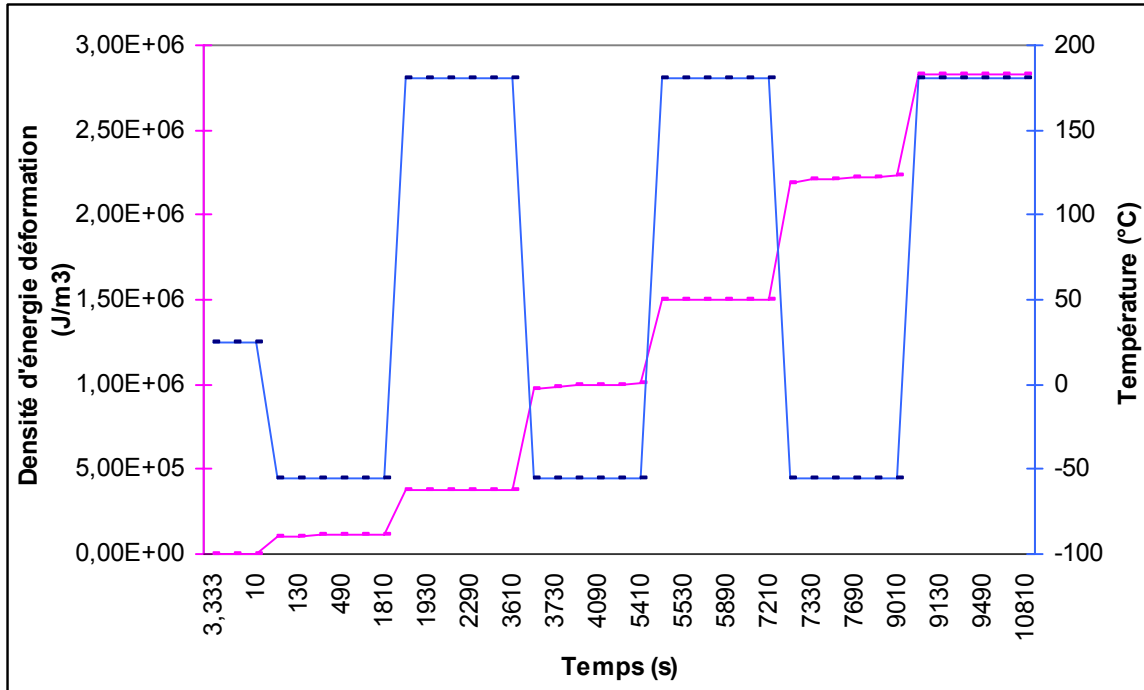


Figure IV-24 : Densité d'énergie de déformation accumulée au cours de 3 cycles

La Figure IV-25 nous permet de visualiser l'accumulation de la densité d'énergie de déformation dans le joint brasé en fonction du nombre de cycles subis par l'assemblage.

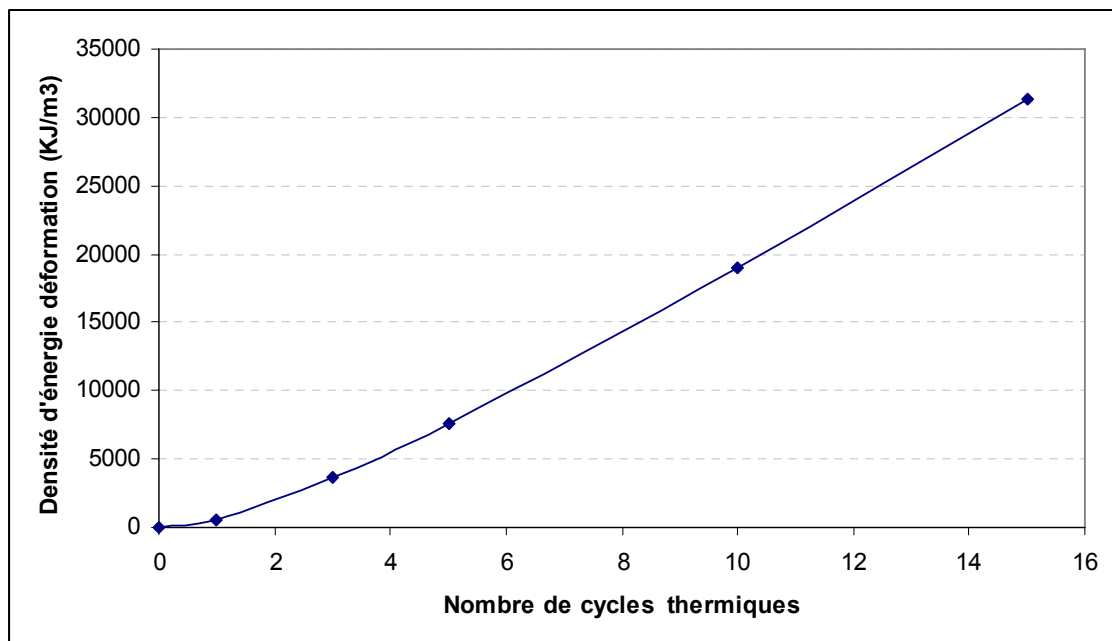


Figure IV-25 : Densité d'énergie de déformation durant les cycles thermiques



En exprimant l'accumulation de la densité d'énergie de déformation en fonction du nombre de cycles, on obtient l'équation suivante :

$$W = 2,13 \cdot 10^6 \cdot N - 1,72 \cdot 10^6 \quad \text{Equation IV-3}$$

Avec,

W : densité d'énergie déformation (J/m<sup>3</sup>)

N : nombre de cycles thermiques

Sur la figure IV-26, on peut voir l'évolution des contraintes (von mises) sur un nœud dans la brasure qui se situe à l'endroit présentant le plus de densité d'énergie de déformation, en fonction du temps pendant les chocs thermiques. On visualise l'augmentation de la contrainte lors de la phase de refroidissement. À chaque palier de température, la contrainte est en partie relâchée. La contrainte se cumule un peu durant la phase de cycle thermique.

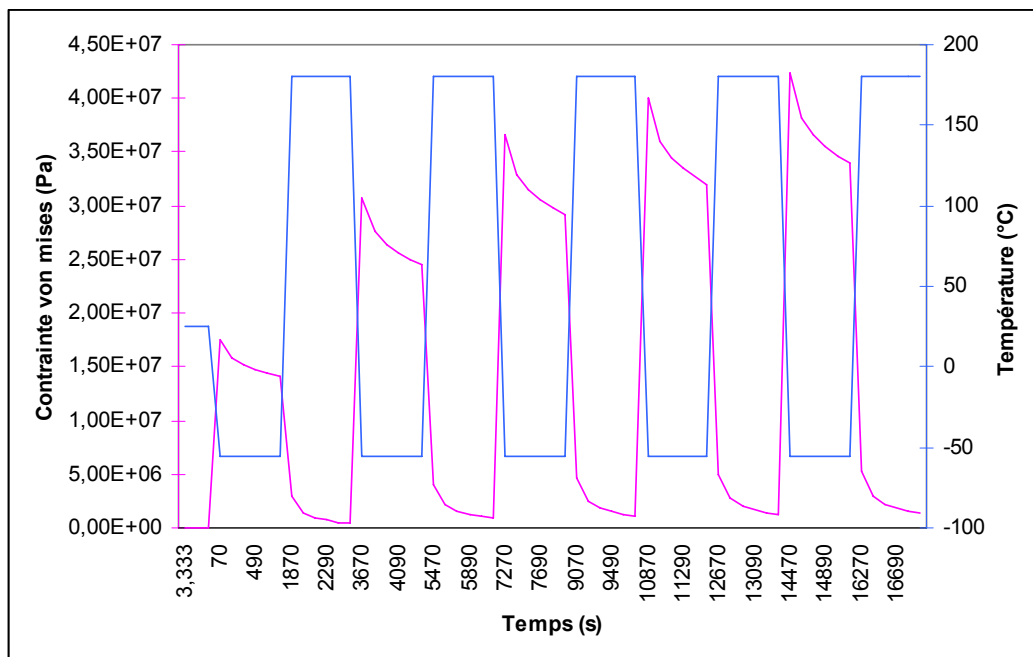


Figure IV-26 : Evolution des contraintes (Von Mises) en fonction du temps pendant les chocs thermiques.

## 7. Conclusion partielle

Le vieillissement par cyclage thermique de l'assemblage a été étudié expérimentalement, et par simulations numériques. Les tests de cyclage thermiques - 55°C/+180°C ont été effectués sur tous les véhicules de test. Le critère de défaillance a été choisi pour une augmentation d'impédance thermique de 20%, les nombres de cycles ont été montés à 400, et nous n'avons trouvé aucune défaillance dans les joints brasés puce/substrat. Les simulations thermomécaniques de l'assemblage sont réalisées afin d'analyser et de confirmer la zone critique de l'assemblage. La valeur de la densité d'énergie de déformation est calculée, connaissant le nombre de chocs menant à la défaillance, nous allons pouvoir en déduire la valeur de la densité d'énergie de déformation accumulée avant la défaillance du module.

## Références bibliographiques

- [Accu] <http://accuratus.com>
- [Brad-07] E. Bradley, C. A. Handwerker, J. Bath, R. D. Parker, R. W. Gedney, "Lead-Free Electronics iNEMI Projects Lead to Successful Manufacturing", Wiley-IEEE Press, 2007.
- [Copp-07] L.Coppola, D.Huff, F.Wang, R.Burgos and D.Boroyevich, "Survey on High-Temperature Packaging Materials for SiC-Based Power Electronics Modules", Blacksburg,VA 24061 USA, 2007
- [Dele-03] Delétage J.Y., "ÉTUDE DE LA DURÉE DE VIE D'ASSEMBLAGES MICROÉLECTRONIQUES PAR L'UTILISATION DE SIMULATIONS, DE MODÈLES DE DÉGRADATION ET DE CIRCUITS INTÉGRÉS SPÉCIFIQUES DE TEST", Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I, 2003
- [ICMCB] Les paramètres physiques fournis par le laboratoire d'ICMCB
- [Indi] [www.indium.com](http://www.indium.com)
- [ITRI-99] ITRI, "Mechanical properties of solders and solder joints", International Tin Research Institute, Publication No. 656, 1999
- [Gued-05] A. Guédon-Gracia, "La Conception Thermo-Mécanique Optimisée D'assemblages sans Plomb", Thèse de docteur de l'Université Bordeaux 1, 2005
- [Matweb] [www.matweb.com](http://www.matweb.com)
- [Toku-07] H. Tokuda, "Investigation of a SiC Module with a High Operating Temperature for Power Applications", IEEE, 9<sup>th</sup> EPTC 2007
- [Zéan-09] A. Zéanh, "Contribution à l'amélioration de la fiabilité des modules IGBT utilisés en environnement aéronautique", thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2009
- [Yu-Ch-09] D. Yu, X. Chen "Applying Anand model to low-temperature sintered nanoscale silver paste chip attachment", Materials and Design 30, 4574-4579, 2009



# Conclusion générale et perspectives

L'ensemble des travaux effectués dans le cadre de cette thèse a eu pour objectif de contribuer à l'étude de la fiabilité de modules de puissance à base du composant SiC pour des applications hautes températures. Dans ce mémoire, nous avons présenté différentes études expérimentales et numériques afin d'aboutir à une conception optimale des modules de puissance pour une l'application haute température. La démarche adoptée est exposée dans quatre chapitres.

Le premier chapitre a été consacré à la présentation des différents constituants d'un module de puissance, un état de l'art des composants de puissance en carbure de silicium, un état de l'art des technologies d'assemblage de puissance à haute température et la notion de fiabilité des modules de puissance. Concernant les techniques d'assemblage, la brasure est encore la méthode la plus utilisée. Dans le cas où la température d'utilisation est nettement supérieure à 200°C, les brasures hautes températures comme les alliages  $\text{Au}_{88}\text{Ge}_{12}$ ,  $\text{Au}_{97}\text{Si}_3$ ,  $\text{Au}_{80}\text{Sn}_{20}$  et  $\text{Sn}_5\text{Pb}_{95}$  sont employées pour supporter ces cyclages thermiques. Pourtant dans notre cas, nous commençons par les technologies d'assemblage de puissance classique à la base de DBC modèle avec des nouveaux matériaux la puce SiC et la semelle CuC.

L'étude des modes de défaillances montre que la fatigue thermomécanique engendre de nombreuses défaillances au sein de l'assemblage notamment au niveau des interfaces formant l'assemblage ou de l'interconnexion (puce/substrat, substrat/semelle, fils de câblage) lors du fonctionnement du module de puissance. Ces défaillances se manifestent par des délaminages de brasure et par l'apparition de fissures dans les assemblages. C'est la raison pour laquelle, du point de vue de la fiabilité, les règles de conception, le choix des matériaux et des technologies d'assemblage sont cruciaux.

Le second chapitre a été consacré à la modélisation et l'identification des lois de comportement des différents matériaux. Le comportement thermophysique des éléments constitutifs du module a été défini à partir de données bibliographiques. Nous avons pu ainsi tenir compte de ces comportements dans notre modélisation par éléments finis des modules de puissance. Parallèlement au choix de technologie, on s'est aussi focalisé sur les critères de choix des matériaux. Le matériau choisi pour le composant actif est le carbure de silicium (SiC), le choix des matériaux du module s'est effectué sur des critères thermomécaniques en cherchant des matériaux aux caractéristiques mécaniques proches de celle du carbure de silicium tout en surveillant leur conductivité thermique. Pour le substrat, les céramiques les

plus prometteuses sont le nitrure d'aluminium et le nitrure de silicium. Le deuxième est moins performant d'un point de vue thermique mais plus solide et possède l'avantage de pouvoir être utilisé sans semelle, ce qui est un gain de masse évident.

Dans ce chapitre, le principe d'analyse de la conception numérique des modules de puissance par la méthode des éléments finis a été introduit. Les méthodes par éléments finis, permettent d'exploiter les modèles de comportement et de maillage, d'adapter les géométries et les matériaux, et d'étudier l'influence de l'évaluation paramétrique.

Plusieurs types de caractérisation ont été effectués pour différents types de matériaux, la première partie de ce travail nous a permis de confirmer la fonctionnalité à plus de 200°C des diodes Schottky SiC, intégrées dans un module de puissance adapté. La caractérisation électrique statique en mode de polarisation directe réalisée pour le composant en SiC nous montre que les tensions de seuil diminuent quand la température de travail augmente. La caractéristique tension aux bornes de la diode SiC en fonction de la température, présente trois zones différentes avec la première avec un coefficient de température positif, la deuxième avec un coefficient de température négatif et la troisième avec un coefficient nul. Par la suite, des caractérisations mécaniques et thermomécaniques sur les différents matériaux sont effectuées. Les valeurs obtenues sont comparées avec les valeurs bibliographiques. Les vitesses de mesure et le pas de mesure doivent être les plus faibles possible pour optimiser la précision.

Dans le chapitre suivant, nous avons présenté la réalisation des véhicules de test pour les modules de puissance par la société HCM. Nous avons effectué une étude thermique sur l'assemblage de puissance dans l'objectif d'évaluer l'influence de certains paramètres (géométriques et technologiques) sur la performance thermique de l'assemblage. Les mesures de résistance thermique ont été effectuées par un analyseur ANATECH PHASE 10, et on compare avec les résultats fournis par la simulation thermique, la même tendance a été constatée parmi différents modèles de l'assemblage. Un assemblage utilisant une brasure AuGe<sub>12</sub> avec un substrat Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> métallisé en cuivre présente la meilleure performance thermique.

Le modèle Pseudo DBC (avec drain thermique) a été étudié. Certaines règles de conception peuvent alors être proposées afin d'améliorer la performance thermique de l'assemblage, et nous trouvons que les tailles du drain thermique jouent un rôle important pour la température de jonction de puce. Il est nécessaire qu'il ait une épaisseur fine et une grande surface pour avoir la meilleure performance thermique. Le paramètre d'échange 'h' a une influence importante pour la température de jonction de puce, il est judicieux qu'il soit

supérieur à  $2000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  pour la surface inférieure de la semelle pour optimiser les performances thermiques.

Dans le dernier chapitre, l'étude expérimentale en vieillissement par cyclage thermique permettra de définir l'impact thermique sur les assemblages. Les tests de cyclages thermiques  $-55^\circ\text{C}/+180^\circ\text{C}$  ont été effectués sur tous les véhicules de test. Le critère de défaillance a été choisi dès l'apparition d'augmentation d'impédance thermique de 20%. Les nombres de cycles ont été montés à 400. En toute rigueur, le nombre de cycles thermiques réalisés dans l'assemblage n'est pas suffisant pour créer des défaillances dans les joints brasés puce/substrat, donc nous ne pouvons pas trouver les influences de la nature des joints brasés utilisées sur la durée de vie de l'assemblage. Les simulations thermomécaniques de l'assemblage sont réalisées afin d'analyser et confirmer la zone critique de l'assemblage. La valeur de la densité d'énergie de déformation est calculée au cours des chocs thermiques, connaissant le nombre de chocs menant à la défaillance, nous allons pouvoir en déduire la valeur de la densité d'énergie de déformation accumulée avant la défaillance de l'assemblage.

Les perspectives de cette thèse sont de finaliser le nombre de cycles thermiques pour créer des défaillances dans les joints brasés et analyser les influences de la composition des brasures sur les robustesses des modules de puissance. Pour en finir sur le cas de la tenue de la brasure haute température, les prochaines études devront donc tenter de trouver des solutions alternatives, par exemple la nouvelle technologie LTJT (Low Temperature Joining Technique). Par la suite, une étude de comparaison de la performance thermique et de la fiabilité des modules de puissance sera réalisée entre les technologies alternatives et les technologies classiques pour les applications haute température.

# **ANNEXES**



## ANNEXE (A) PROPRIETES DES ALLIAGES EUTECTIQUES

Température Eutectique	Composition des alliages eutectique (% massique)										Densité gm/cm <sup>3</sup>	Résistivité électrique μΩ.cm	Coefficient de conductivité thermique W/cm °C @ 85°C	Coefficient d'expansion thermique μm/m par °C @ 20 °C	Limite élastique PSI	Module de cisaillement PSI	Module de Young E PSI x1e6	Elongation %	Dureté Brinell										
																				Transition Liquide - Solide									
																				°C									
10,7	63	Ga	22	In	16	Sn					6,5																		
15,7	76	Ga	25	In							6,35																		
47	45	Bi	23	Pb	19	In	8,3	Sn	5,3	Cd	9,16	38,22	0,15	25	5400			37,5	16,5										
58	49	Bi	21	In	18	Pb	12	Sn			9,01	70,78	0,1	23	6300			20	16,5										
60	51	In	33	Bi	17	Sn					7,88	52,12		22	4850				11										
61,5	62	In	31	Bi	7,5	Cd					8,02																		
70	50	Bi	27	Pb	13	Sn	10	Cd			9,58	43	0,18	22	5990	300		120	14,5										
72	66	In	34	Bi							7,99																		
77,5	49	Bi	42	In	10	Cd					8,49																		
79	57	Bi	26	In	17	Sn					8,54																		
81	54	Bi	30	In	16	Sn					8,47																		
92	52	Bi	40	Pb	8,2	Cd					10,25																		
93	44	In	42	Sn	14	Cd					7,46		0,36	24	2632				4,8										
95	53	Bi	32	Pb	16	Sn					9,71																		
96	52	Bi	30	Pb	18	Sn					9,6	74,78	0,13		5200			100	15,5										
96	46	Bi	34	Sn	20	Pb					8,99																		
100	50	Bi	28	Pb	22	Sn					9,44																		
108	52	In	46	Sn	1,8	Zn					7,27																		
109	67	Bi	33	In							8,81																		
118	52	In	48	Sn							7,3	14,7	0,34	20	1720	1630		83	4,5										
123	74	In	26	Cd							7,62																		
124	56	Bi	45	Pb							10,44	43	0,04		6400			37,5	15										
135	57	Bi	42	Sn	1	Pb					8,58																		
138,3	58	Bi	42	Sn							8,56	38,22	0,19	15	8000	500		55	23										
143,3	97	In	3	Ag							7,38	7,48	0,73	22	800				2										
144	60	Bi	40	Cd							9,31																		
145	51	Sn	31	Pb	18	Cd					8,45		0,35	24	6263														
177	68	Sn	32	Cd							7,68																		
179	63	Sn	36	Pb	1,4	Ag					8,41	14,45	0,5	27	7000	7540													
183	63	Sn	37	Pb							8,4	14,96	0,5	25	7500	6200	4,35	37	17										
199	91	Sn	9	Zn							7,27	11,47	0,61		7940			32,5	21,5										
217	90	Sn	10	Au							7,78				7280			1,1											
217	96	Sn	3,8	Ag	0,7	Cu					7,4																		
217	96	Sn	3,9	Ag	0,6	Cu					7,4																		
221	97	Sn	3,5	Ag							7,36	10,75	0,33	30	5620			73	40										
227	99	Sn	1	Cu							7,31																		
227	99	Sn	0,7	Cu							7,31																		
266	83	Cd	17	Zn							8,35																		
280	80	Au	20	Sn							14,51		0,57	16	40000	40000	8,57	2											
303	98	Pb	2,5	Ag							11,33	20			4400	2900		42											
309	98	Pb	1,5	Ag	1	Sn					11,28	28,67	0,23	30	4420			23	9,5										
313	91	Pb	4	Sn	4	Ag	1	In			11,05																		
356	88	Au	12	Ge							14,67		0,44	13	26835	26825	10,6												
363	97	Au	3,2	Si							15,4		0,27	12	36975	31900	12												
382	95	Zn	5	Al							6,6																		
424	55	Ge	45	Al							3,71																		
525	45	Ag	38	Au	17	Ge					10,58																		
577	88	Al	12	Si							2,66																		
780	72	Ag	28	Cu							10,01																		
890	80	Au	20	Cu							15,67																		
950	82	Au	18	Ni							15,92																		
217	96	Sn	4	Ag	0,5	Cu					7,4																		

Rm: 1 P.S.I = 6894 (Pa) = 6894 N/m<sup>2</sup> = 0.06894 Bar.