



**HAL**  
open science

# Développement d'un banc de thermographie infrarouge pour l'analyse in-situ de la fiabilité des microsystemes

Chrystelle Fillit

► **To cite this version:**

Chrystelle Fillit. Développement d'un banc de thermographie infrarouge pour l'analyse in-situ de la fiabilité des microsystemes. Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2011. Français. NNT : 2011EMSE0600 . tel-00788682

**HAL Id: tel-00788682**

**<https://theses.hal.science/tel-00788682>**

Submitted on 15 Feb 2013

**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.

*NNT : 2011 EMSE 0600*

## THÈSE

présentée par

Chrystelle FILLIT

pour obtenir le grade de

Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

Spécialité : Science des Matériaux

### DÉVELOPPEMENT D'UN BANC DE THERMOGRAPHIE INFRAROUGE POUR L'ANALYSE DE LA FIABILITÉ DES MICROSYSTÈMES

soutenue à Saint-Étienne, le 15 février 2011

#### Membres du jury

Président :	Fabien NDAGIJIMANA	Professeur, PHELMA MINATEC INPG, Grenoble
Rapporteurs :	André CHRYSOCHOOS	Professeur, Université Montpellier II, Montpellier
	Patrick DELOBELLE	IR CNRS, FEMTO-ST, Besançon
Examineurs :	Karim INAL	Professeur, CMP, Gardanne
	Thierry LEPINE	Maître de Conférences, Institut d'Optique, Saint-Etienne
	Fabien VOLPI	Maître de Conférences, SIMAP, Grenoble INP
	Roland FORTUNIER	Professeur, ENISE, Saint-Etienne
	René FILLIT	Club Nanotechnologie, Saint-Etienne

**Spécialités doctorales :**

SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX  
 MECANIQUE ET INGENIERIE  
 GENIE DES PROCEDES  
 SCIENCES DE LA TERRE  
 SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT  
 MATHEMATIQUES APPLIQUEES  
 INFORMATIQUE  
 IMAGE, VISION, SIGNAL  
 GENIE INDUSTRIEL  
 MICROELECTRONIQUE

**Responsables :**

J. DRIVER Directeur de recherche – Centre SMS  
 A. VAUTRIN Professeur – Centre SMS  
 G. THOMAS Professeur – Centre SPIN  
 B. GUY Maître de recherche – Centre SPIN  
 J. BOURGOIS Professeur – Centre SITE  
 E. TOUBOUL Ingénieur – Centre G2I  
 O. BOISSIER Professeur – Centre G2I  
 JC. PINOLI Professeur – Centre CIS  
 P. BURLAT Professeur – Centre G2I  
 Ph. COLLOT Professeur – Centre CMP

**Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)**

AVRIL	Stéphane	MA	Mécanique & Ingénierie	CIS
BATTON-HUBERT	Mireille	MA	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BENABEN	Patrick	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	CMP
BERNACHE-ASSOLLANT	Didier	PR 0	Génie des Procédés	CIS
BIGOT	Jean-Pierre	MR	Génie des Procédés	SPIN
BILAL	Essaïd	DR	Sciences de la Terre	SPIN
BOISSIER	Olivier	PR 1	Informatique	G2I
BORBELY	Andras	MR	Sciences et Génie des Matériaux	SMS
BOUCHER	Xavier	MA	Génie Industriel	G2I
BOUDAREL	Marie-Reine	PR 2	Génie Industriel	DF
BOURGOIS	Jacques	PR 0	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BRODHAG	Christian	DR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BURLAT	Patrick	PR 2	Génie industriel	G2I
COLLOT	Philippe	PR 1	Microélectronique	CMP
COURNIL	Michel	PR 0	Génie des Procédés	SPIN
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR 1	Génie industriel	CMP
DARRIEULAT	Michel	IGM	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DECHOMETS	Roland	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
DESRAYAUD	Christophe	MA	Mécanique & Ingénierie	SMS
DELAFOSSÉ	David	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DOLGUI	Alexandre	PR 1	Génie Industriel	G2I
DRAPIER	Sylvain	PR 2	Mécanique & Ingénierie	SMS
DRIVER	Julian	DR 0	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
FEILLET	Dominique	PR 2	Génie Industriel	CMP
FOREST	Bernard	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	CIS
FORMISYN	Pascal	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
FORTUNIER	Roland	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
FRACZKIEWICZ	Anna	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GARCIA	Daniel	MR	Génie des Procédés	SPIN
GIRARDOT	Jean-Jacques	MR	Informatique	G2I
GOEURIOT	Dominique	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GRAILLOT	Didier	DR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
GROSSEAU	Philippe	MR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	MR	Génie des Procédés	SPIN
GUY	Bernard	MR	Sciences de la Terre	SPIN
GUYONNET	René	DR	Génie des Procédés	SPIN
HERRI	Jean-Michel	PR 2	Génie des Procédés	SPIN
INAL	Karim	PR 2	Microélectronique	CMP
KLÖCKER	Helmut	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
LAFOREST	Valérie	CR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
LERICHE	Rodolphe	CR CNRS	Mécanique et Ingénierie	SMS
LI	Jean-Michel	EC (CCI MP)	Microélectronique	CMP
LONDICHE	Henry	MR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
MALLIARAS	George Grégory	PR 1	Microélectronique	CMP
MOLIMARD	Jérôme	MA	Mécanique et Ingénierie	SMS
MONTHEILLET	Frank	DR 1 CNRS	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
PERIER-CAMBY	Laurent	PR 2	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Christophe	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Michèle	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean-Charles	PR 0	Image, Vision, Signal	CIS
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
SZAFNICKI	Konrad	MR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
THOMAS	Gérard	PR 0	Génie des Procédés	SPIN
TRIA	Assia	MA	Microélectronique	CMP
VALDIVIESO	François	PR 0	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
VAUTRIN	Alain	MR	Mécanique & Ingénierie	SMS
VIRICELLE	Jean-Paul	DR	Génie des procédés	SPIN
WOLSKI	Krzysztof	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
XIE	Xiaolan		Génie industriel	CIS

**Glossaire :**

PR 0 Professeur classe exceptionnelle  
 PR 1 Professeur 1<sup>ère</sup> catégorie  
 PR 2 Professeur 2<sup>ème</sup> catégorie  
 MA(MDC) Maître assistant  
 DR Directeur de recherche  
 Ing. Ingénieur  
 MR(DR2) Maître de recherche  
 CR Chargé de recherche  
 EC Enseignant-chercheur  
 IGM Ingénieur général des mines

Dernière mise à jour le : 13 septembre 2010

**Centres :**

SMS Sciences des Matériaux et des Structures  
 SPIN Sciences des Processus Industriels et Naturels  
 SITE Sciences Information et Technologies pour l'Environnement  
 G2I Génie Industriel et Informatique  
 CMP Centre de Microélectronique de Provence  
 CIS Centre Ingénierie et Santé

*NNT : 2011 EMSE 0600*

## THÈSE

présentée par

Chrystelle FILLIT

pour obtenir le grade de

Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne  
Spécialité : Science des Matériaux

### DÉVELOPPEMENT D'UN BANC DE THERMOGRAPHIE INFRAROUGE POUR L'ANALYSE DE LA FIABILITÉ DES MICROSYSTEMES

soutenue à Saint-Étienne, le 15 février 2011

#### Membres du jury

Rapporteurs :	André CHRYSOCHOOS	Professeur, Université Montpellier II, Montpellier
	Patrick DELOBELLE	IR CNRS, FEMTO-ST, Besançon
Examineurs :	Karim INAL	Professeur, CMP, Gardanne
	Fabien NDAGIJIMANA	Professeur, PHELMA MINATEC INPG, Grenoble
	Thierry LEPINE	Maître de Conférences, Institut d'Optique, Saint-Etienne
	Fabien VOLPI	Maître de Conférences, SIMAP, Grenoble INP
	Roland FORTUNIER	Professeur, ENISE, Saint-Etienne
	René FILLIT	Club Nanotechnologie, Saint-Etienne







# REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont été effectués au Centre des Sciences des Matériaux et des Structures de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, dirigée au cours de mon doctorat par Mr. Philippe Jeamet.

J'adresse mes plus sincères remerciements à mon directeur de thèse, Monsieur Roland Fortunier, pour m'avoir permis de réaliser ce travail mais aussi pour la confiance qu'il m'a accordée, mais aussi pour le temps nécessaire qu'il a su me consacrer malgré ses nombreuses responsabilités.

Je suis également reconnaissante pour le temps et le travail accordés par l'ensemble des membres du jury de ma thèse : Messieurs André Chrysochoos, Patrick Delobelle, Karim Inal, Fabien Ndagijimana, Thierry Lépine, Fabien Volpi. En particulier, je remercie Monsieur Fabien Ndagijimana d'avoir accepté d'être le président du Jury de cette thèse. J'adresse des remerciements très particuliers à Monsieur Fillit, qui est aussi et surtout mon père, qui a toujours cru en moi et a permis de transformer ce laborieux travail de thèse en une très forte complicité. Un très grand merci pour avoir encadré mon travail, pour sa disponibilité, ses conseils, son soutien et son aide.

Merci également aux autres personnes que j'ai côtoyées au cours de ces années passées à l'école des Mines et notamment l'ensemble du personnel d'SMS. J'aimerais également remercier tous les collègues, doctorants ou anciens doctorants que j'ai eu la chance de côtoyer, pour leur bonne humeur, leur amitié et tous ces bons moments passés ensemble, en premier lieu merci à Laurent, mon formidable collègue de bureau, pour ces trois années de complicité, pour sa présence, nos rires ; merci également à Christophe, Sergio, Prisca, Adeline et Quentin, Rémi, Rébecca, Alban, Adhish, Adrien, Emmanuel et tous les autres...

Enfin et surtout, je tiens à remercier les personnes sans lesquelles je ne serai jamais devenue ce que je suis. Tout d'abord, ma plus grande fierté, mes parents sans qui rien n'aurait été possible : ma mère pour la force et la présence indéfectible dont elle fait preuve jour après jour ; mon père pour la leçon de courage, d'optimisme et de persévérance qu'il m'a enseignée et pour le guide qu'il a toujours été et qu'il sera toujours.

Enfin, je tiens à terminer ces remerciements par une pensée très importante à mes yeux, pour Olivier, pour son amour, sa présence et surtout la patience dont il fait preuve à mon égard, bien que je ne sois pas toujours facile à vivre. Sa présence et ses encouragements m'ont été précieux pour arriver au terme de ce doctorat. Il restera mon indispensable force personnelle pour la réalisation de tous mes et nos projets de vie communs.





# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION</b>	<b>- 1 -</b>
<b>CHAPITRE 1</b>	
<b>FIABILITE DES MICROSYSTEMES</b>	<b>- 3 -</b>
<b>1. Les technologies MEMS</b>	<b>- 5 -</b>
1.1. Le micro-usinage en surface	- 5 -
1.2. Le micro-usinage en volume	- 7 -
1.3. Autres technologies spécifiques	- 8 -
1.4. L'encapsulation	- 10 -
<b>2. Domaines d'application des MEMS</b>	<b>- 11 -</b>
2.1. L'informatique	- 12 -
2.2. L'automobile	- 12 -
2.3. Les télécommunications	- 13 -
2.4. L'aérospatiale	- 14 -
2.5. L'optique	- 15 -
2.6. Le biomédical	- 16 -
<b>3. Mécanismes de défaillance des MEMS</b>	<b>- 17 -</b>
3.1. Notion de fiabilité	- 17 -
3.2. Différentes approches	- 20 -
3.3. Mécanismes de défaillance induits par le procédé de fabrication	- 22 -
3.4. Mécanismes de défaillance induits par le fonctionnement	- 23 -
3.5. Facteurs influençant les mécanismes de défaillance	- 27 -
<b>4. Tests de Fiabilité : Méthodes de diagnostic et d'analyse</b>	<b>- 28 -</b>
4.1. Les principaux tests	- 29 -
4.2. Diagnostic thermique de la fiabilité	- 33 -
<b>Bilan</b>	<b>- 37 -</b>

## CHAPITRE 2

### CONCEPTION ET DEVELOPPEMENT DU BANC HAUTE RESOLUTION - 39 -

<b>1. La thermographie Infrarouge</b>	<b>- 41 -</b>
1.1. Rappel sur les ondes électromagnétiques	- 41 -
1.2. Définition des grandeurs radiatives	- 43 -
1.3. Le rayonnement thermique	- 44 -
<b>2. Mesure de la température avec une caméra thermique</b>	<b>- 48 -</b>
2.1. De l'image à la température	- 48 -
2.2. Etude de la chaîne de mesure	- 49 -
2.3. L'étalonnage d'une caméra en température	- 56 -
<b>3. Banc de thermographie infrarouge pour l'analyse des microsystèmes</b>	<b>- 60 -</b>
3.1. L'objet thermique	- 60 -
3.2. La caméra infrarouge	- 62 -
3.3. L'objectif de microscope pour la thermographie infrarouge à haute résolution	- 66 -
3.4. Le système de commande et d'acquisition	- 70 -
<b>4. Etude des phénomènes perturbateurs et leur correction</b>	<b>- 71 -</b>
4.1. L'émissivité et sa détermination	- 72 -
4.2. L'effet Narcisse et la correction différentielle mise en œuvre	- 75 -
4.3. Traitements mis en œuvre pour la thermographie haute résolution	- 80 -
<b>5. Evaluation du banc de thermographie infrarouge</b>	<b>- 84 -</b>
5.1. Etude du temps d'intégration	- 84 -
5.2. Evaluation du bruit	- 84 -
5.3. Estimation de la résolution spatiale	- 87 -
<b>Bilan</b>	<b>- 89 -</b>

## CHAPITRE 3

### ETUDE DE COMPOSANTS D'EMETTEURS-RECEPTEURS - 91 -

<b>1. Etude d'une capacité variable MEMS-RF</b>	<b>- 93 -</b>
1.1. Présentation et fonctionnement de la capacité variable MEMS-RF	- 93 -
1.2. Le dispositif expérimental	- 97 -
1.3. Caractérisation thermique	- 98 -
1.4. Le mécanisme de rupture	- 105 -
<b>2. Etude d'un résonateur BAW-RF</b>	<b>- 113 -</b>
2.1. Présentation des résonateurs BAW-RF	- 113 -
2.2. Le dispositif expérimental	- 117 -
2.3. Caractérisation thermique	- 118 -
<b>Bilan</b>	<b>- 124 -</b>

## **CHAPITRE 4**

<b>ETUDE DE COMPOSANTS AVEC CONTACT ELECTRIQUE</b>	<b>- 127 -</b>
<b>1. Etude de micro-commutateurs MEMS-RF</b>	<b>- 129 -</b>
1.1. Présentation des commutateurs étudiés	- 130 -
1.2. Le dispositif expérimental	- 133 -
1.3. Caractérisation thermique des commutateurs	- 134 -
<b>2. Etude d'un tuner RF</b>	<b>- 146 -</b>
2.1. Présentation des Tuners d'impédance	- 146 -
2.2. Le dispositif expérimental	- 148 -
2.3. Caractérisation thermique	- 149 -
<b>3. Etude thermique du contact dans un micro-commutateur</b>	<b>- 152 -</b>
3.1. Présentation des micro-commutateurs	- 152 -
3.2. Le dispositif expérimental	- 154 -
3.3. Caractérisation thermique	- 155 -
<b>Bilan</b>	<b>- 158 -</b>
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES</b>	<b>- 161 -</b>
<b>REFERENCES</b>	<b>- 165 -</b>
<b>ANNEXE 1</b>	<b>- 179 -</b>
<b>ANNEXE 2</b>	<b>- 181 -</b>
<b>ANNEXE 3</b>	<b>- 183 -</b>
<b>ANNEXE 4</b>	<b>- 185 -</b>



# INTRODUCTION

LES MICROSYSTEMES se définissent comme des systèmes miniaturisés incorporant des capteurs, actionneurs et dispositifs de traitement de l'information. Ce terme est surtout employé en Europe alors que les américains parlent de MEMS (Micro Electro Mechanical Systems). Ces systèmes, de petites dimensions (comprises entre quelques micromètres et quelques millimètres) sont fabriqués à partir des technologies issues de la microélectronique.

La première publication concernant un MEMS opérationnel date de 1967 ; il s'agit de Nathanson et al. qui ont développé et fabriqué le transistor MOS à grille résonnante [Nathanson67], 10 ans après l'invention du circuit intégré à base de transistors. Cependant, l'intérêt pour les MEMS sera plus long à venir et concernera initialement les capteurs. C'est en effet au début des années 80, aux Etats-Unis et au Japon, que les premières applications font leur apparition sous la dénomination de MEMS. En Europe, le démarrage des activités a été plus tardif et les premières réalisations datent seulement du début des années 1990.

La technologie MEMS s'avère être une source de nombreux et nouveaux progrès technologiques. Les produits MEMS les plus populaires sont aujourd'hui les têtes d'imprimantes à jet d'encre [HP-net] et les accéléromètres [AD-net] qui commandent l'ouverture des airbags des voitures. Des applications plus complexes existent, comme les projecteurs numériques [TI-net], où les bobines sont remplacées par des supports numériques.

L'utilisation de procédés de fabrication collective empruntés à la microélectronique pour réaliser des systèmes complexes multifonctions et pluridisciplinaires par la combinaison de domaines multiples (électrique, mécanique, chimique, magnétique, optique...) laisse présager de nombreux avantages en termes :

- de miniaturisation des circuits et systèmes (aboutissant à un faible coût)
- d'intégration, motivée par l'utilisation des mêmes techniques que celles des circuits intégrés
- d'économie de puissance (circuits fonctionnant à de faibles puissances)
- de grandes performances (fort coefficient de qualité pour les composants passifs)
- de nouvelles fonctions : notamment l'utilisation de composants de type capacités variables ou inductances variables MEMS qui n'était précédemment pas envisageable.

Malgré le caractère plus qu'attractif et même révolutionnaire de ces composants MEMS, leur industrialisation tarde néanmoins en raison de quelques problèmes persistants. En effet, ces systèmes aussi intéressants soient-ils doivent être capables de remplir leur mission et posséder une fiabilité maîtrisée, contrôlée et prévisible. Or, il s'avère que, d'une part la complexité des procédés de fabrication nécessite de forts développements pour satisfaire une reproductibilité acceptable des performances avec des taux de rendements industriels et que, d'autre part, l'hétérogénéité des matériaux utilisés et les interfaces avec l'environnement extérieur constituent

de nouvelles inconnues concernant leur fiabilité. La fiabilité des MEMS s'avère être la problématique essentielle à améliorer.

C'est sur cette thématique de fiabilité que s'inscrit ce travail, et plus particulièrement sur son diagnostic en vue d'améliorations en phase de conception des structures MEMS. Il s'agit, de développer un outil innovant permettant un diagnostic rapide des défaillances des MEMS par mesures locales et quantitatives des pertes thermiques associées, afin d'optimiser les paramètres géométriques en vue de minimiser l'impact thermique sur leur fiabilité. Cet outil constitue donc une importante avancée pour détecter, mesurer et comprendre les mécanismes d'endommagement des MEMS.

Ce mémoire s'organise en 4 chapitres :

- Le **chapitre 1** vise à faire un état de l'art, sur la technologie MEMS, qui reprend les techniques de fabrication des MEMS ainsi que les principaux types d'applications. Puis nous traitons de leurs performances mais aussi des problématiques en termes de fiabilité pour permettre de bien positionner le problème.
- Le **chapitre 2** donne une description du banc de thermographie infrarouge haute résolution et in-situ développé. Ce banc permet l'analyse thermique quantitative des échauffements locaux pour le diagnostic rapide des problèmes de défaillance des MEMS.
- Le **chapitre 3** est consacré à la validation du banc de thermographie infrarouge à travers différentes études in-situ spécifiques développées et visant à quantifier la distribution thermique dans des MEMS.
- Le **chapitre 4** de ce manuscrit relate une application spécifique de la thermographie infrarouge. L'étude du contact électrique, à travers l'analyse thermique de différentes structures de micro-interrupteurs simples ou assemblés en circuit complet, est une approche originale basée sur la haute résolution et la sensibilité du dispositif mis en œuvre. L'analyse fine du contact électrique permet d'en évaluer le comportement mécanique, et ainsi de valider des designs technologiques et de définir les conditions d'actuation optimale afin de limiter les défaillances liées aux effets thermiques.

# CHAPITRE 1

## FIABILITE DES MICROSYSTEMES

<b>1. Les technologies MEMS</b>	<b>- 5 -</b>
1.1. Le micro-usinage en surface	- 5 -
1.2. Le micro-usinage en volume	- 7 -
1.3. Autres technologies spécifiques	- 8 -
1.4. L'encapsulation	- 10 -
<b>2. Domaines d'application des MEMS</b>	<b>- 11 -</b>
2.1. L'informatique	- 12 -
2.2. L'automobile	- 12 -
2.3. Les télécommunications	- 13 -
2.4. L'aérospatiale	- 14 -
2.5. L'optique	- 15 -
2.6. Le biomédical	- 16 -
<b>3. Mécanismes de défaillances des MEMS</b>	<b>- 17 -</b>
3.1. Notion de fiabilité	- 17 -
3.2. Différentes approches	- 20 -
3.3. Mécanismes de défaillance induits par le procédé de fabrication	- 22 -
3.4. Mécanismes de défaillance induits par le fonctionnement	- 23 -
3.5. Facteurs influençant les mécanismes de défaillance	- 27 -
<b>4. Tests de fiabilité : méthodes de diagnostic et d'analyse</b>	<b>- 28 -</b>
4.1. Les principaux tests	- 29 -
4.2. Diagnostic thermique de la fiabilité	- 33 -
<b>Bilan</b>	<b>- 37 -</b>





DANS CETTE PARTIE, nous présentons les technologies MEMS les plus classiques, pour avoir un aperçu de leur complexité technologique, leur potentiel d'application ainsi que de leurs principaux modes de défaillance, à la base du rendement médiocre des prototypes MEMS. Nous verrons alors que l'analyse de la fiabilité est pour les MEMS un domaine où il y a énormément à faire. Enfin, nous passerons en revue les différentes méthodes de test et de diagnostic de fiabilité des microsystèmes.

## 1. Les technologies MEMS

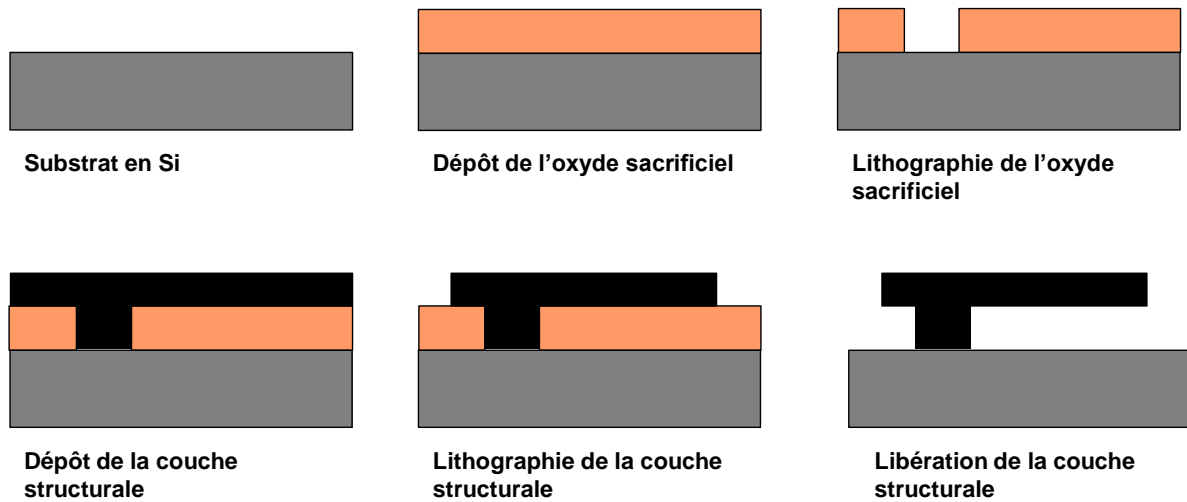
Le premier MEMS fut un résonateur en silicium à actionnement électrostatique fabriqué en 1967 par Dr. Harvey Nathanson [Nathanson67]. Vingt ans plus tard, Howe et Muller développaient l'usinage de surface du silicium, une des principales techniques employées aujourd'hui pour les MEMS commercialisés [Howe86]. Ceci montre bien le lien très étroit qui existe entre la notion même de MEMS et la technologie silicium. Cependant, depuis le début des années 90, d'autres techniques (LIGA, SU8, LTCC...) sont venues compléter les possibilités offertes par le silicium.

Il existe deux familles de technologies MEMS qui se démarquent :

- le micro-usinage en surface,
- le micro-usinage en volume.

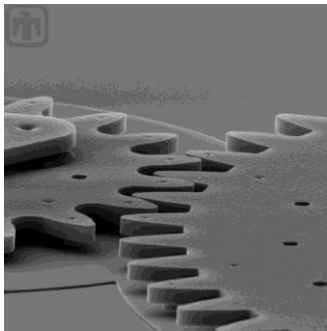
### 1.1. Le micro-usinage en surface

C'est la technique de microfabrication la plus directement dérivée de la technologie du circuit intégré. Il s'agit de superposer deux types de matériaux au dessus du substrat : les couches structurales et les couches sacrificielles, dont la géométrie est obtenue par photolithographie. Les couches sacrificielles sont dissoutes à la fin du procédé de fabrication, afin de libérer les couches structurales. Les couches sacrificielles sont souvent des oxydes ou des résines, et les couches structurales du polysilicium, des métaux ou des isolants non oxydés, tels que le nitrure de silicium. Le principe de base du micro-usinage de surface du silicium est présenté en Figure 1. Cette figure illustre les étapes fondamentales de fabrication qui sont le dépôt des couches, le transfert de forme et la gravure.

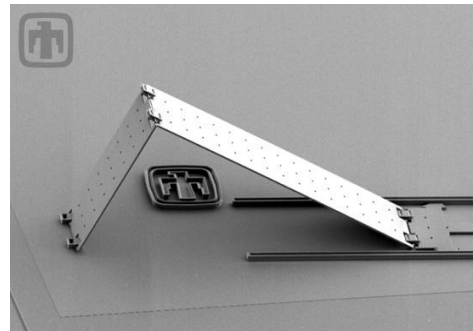


*Figure 1 : Etapes simplifiées de la technique du micro-usinage en surface*

A ce jour, cette technique demeure la plus performante en matière de complexité des formes géométriques réalisées et offre une grande densité d'intégration. Elle permet de fabriquer des faisceaux de poutres suspendues, des micromoteurs (Figure 2) ou encore des micromiroirs mobiles (Figure 3) [Sandia-net]. Notons que l'épaisseur de ce type de microstructures est de quelques  $\mu\text{m}$  seulement, développant par conséquent de très faibles puissances mécaniques dans le cas de microactionneurs.

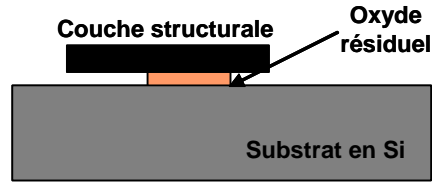


*Figure 2 : Micromoteur* [Sandia-net]



*Figure 3 : Micromiroir* [Sandia-net]

En revanche, le point critique de ce procédé se situe au niveau de la gravure chimique des couches sacrificielles. Il est d'autant plus difficile de contrôler si les oxydes ont été entièrement dissous par les solutions chimiques, que les structures sont larges et proches du substrat (Figure 4). De ce fait, la reproductibilité est difficile à maîtriser.



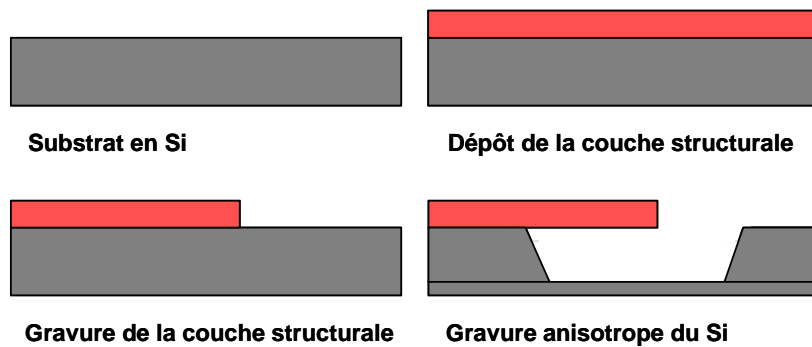
*Figure 4 : Résidus de la couche d'oxyde non dissoute lors de l'étape de gravure*

## 1.2. Le micro-usinage en volume

Le micro-usinage en volume ou bulk micromachining consiste à graver le substrat pour libérer la structure suspendue, ainsi on peut obtenir les formes recherchées pour un MEMS en travaillant le substrat brut [Kovacs98, Madou02]. Cette méthode est notamment utilisée :

- pour fabriquer des microstructures ayant un haut rapport de forme (rapport hauteur/largeur)
- pour la fabrication de membranes silicium en effectuant un usinage de volume par la face arrière d'un wafer.

Cette technique s'appuie sur une gravure chimique anisotrope et sélective du silicium. Différentes solutions peuvent être utilisées pour attaquer le silicium selon certains plans cristallins afin de libérer des structures (masses, membranes, poutres, ponts...) [Mardalhon03]. La Figure 5 illustre le principe de réalisation de ce type de gravure. Une ou plusieurs couches structurales sont déposées et gravées à la surface du silicium. Puis, en fin de procédé de fabrication, une attaque du silicium est réalisée pour libérer les structures mécaniques.



*Figure 5 : Principe du micro-usinage en volume*

La profondeur des cavités peut aller jusqu'à 100  $\mu\text{m}$  ou plus et la gravure peut s'effectuer aussi bien depuis la face avant que depuis la face arrière du wafer. La gravure en face arrière augmente le coût car elle impose des contraintes supplémentaires d'alignement et de polissage. Les formes géométriques obtenues sont peu complexes (polygones) et la densité d'intégration est faible. D'autre part les temps de gravure sont longs (quelques heures) et les solutions utilisées sont délicates à manipuler et polluantes. A l'heure actuelle, cette technique est bien maîtrisée et

permet, outre le dégagement des poutres, de réaliser des membranes très régulières avec une grande précision. Les premiers succès commerciaux ont d'ailleurs utilisé cette technique (têtes d'imprimantes, capteurs de pression ou d'accélération). Deux techniques sont principalement utilisées pour l'usinage en volume du silicium :

– **Le procédé DRIE (Deep Reactive Ion Etching)**

Ce procédé a été mis au point par la société Robert Bosch Corporation en 1995 [Bhardwaj95]. Elle permet un usinage en profondeur (plusieurs centaines de microns) du silicium grâce à un faisceau d'ions réactifs. Cette technique utilise en alternance un plasma C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> pour passiver les parois de la cavité silicium et un plasma SF<sub>6</sub> pour usiner le fond de la cavité. Ce type d'usinage est indépendant de l'orientation cristalline et permet d'obtenir de hautes parois verticales.

Depuis son développement en 1995, cette technique a été utilisée pour la fabrication de MEMS dans divers domaines : optique [Li03, Perregaux01], composants pour la microfluidique [Andersson01], ou encore capteurs [Aebersold06, Jang07, Neels09].

– **Le procédé HEXIL**

Ce procédé de micro-moulage couple l'usinage du silicium par DRIE avec des dépôts de couches minces classiques incluant une couche sacrificielle permettant de libérer les microstructures silicium de leur moule en fin de procédé [Keller94, Klaassen95]. L'originalité est donc l'utilisation d'une microstructure en silicium qui sert de moule pour fabriquer des parties d'un composant MEMS qui sont ensuite reportées sur un autre substrat, le moule en silicium étant ensuite réutilisable pour un autre moulage. Cette technique a été utilisée pour fabriquer des outils de micropositionnement tels que des micropinces [Keller98].

### 1.3. Autres technologies spécifiques

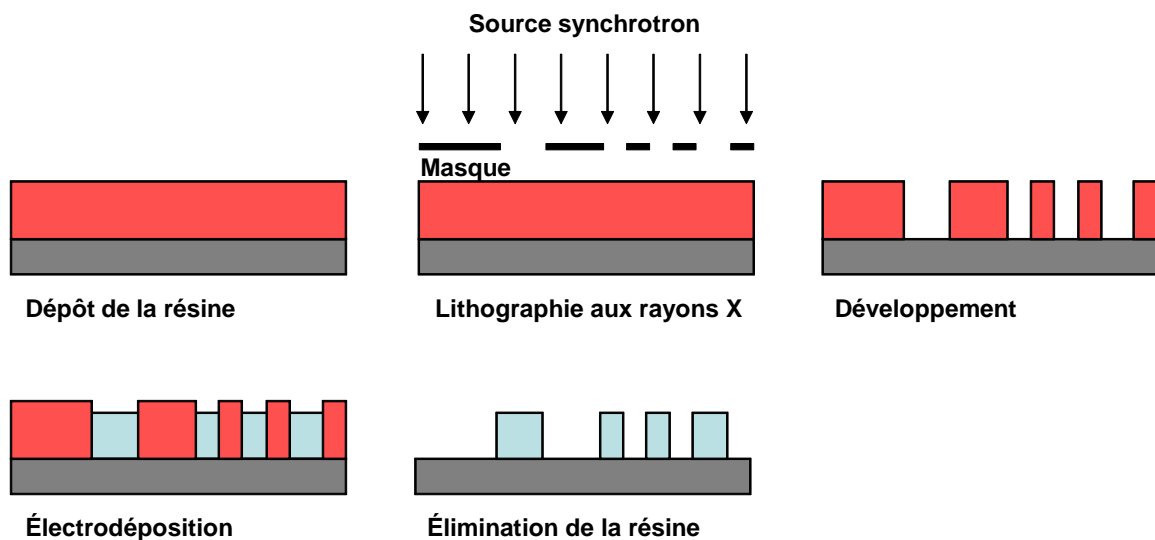
D'autres techniques plus spécifiques, car utilisant des technologies moulées, sont couramment employées et de part leurs performances, elles permettent la réalisation d'objets de haute précision.

– **Le procédé LIGA**

LIGA pour Lithographie, Galvanoformung, Abformung, est un procédé de fabrication de microstructures à très grand facteur de forme [Madou02, Banks-net]. On doit ce procédé à l'équipe d'Erwin Willy Becker et de Wolfgang Ehrfeld, de l'institut pour l'ingénierie de procédés nucléaires au centre nucléaire de recherche de Karlsruhe.

Ce procédé, originellement développé dans le cadre de travaux sur la séparation des isotopes de l'uranium, est aujourd'hui très important dans la fabrication des MEMS ; son intérêt est de travailler sur des couches épaisses jusqu'à 1mm. Son principe, comportant différentes étapes, est décrit en Figure 6 :

- la première étape est le dépôt d'une résine photosensible sur le substrat
- la résine est ensuite exposée à un rayonnement X émis à travers un masque photolithographique. La longueur d'onde du rayonnement, de quelques dizaines de nanomètre, permet d'obtenir une très bonne résolution ce qui est le principal atout de cette technologie.
- les zones exposées sont éliminées par dissolution chimique
- L'étape suivante est le dépôt électrolytique d'un métal dans le moule polymère.
- Ce dépôt métallique peut ensuite lui-même constituer un outil pour fabriquer des microstructures par emboutissage ou injection de polymères ou d'autres métaux [Bley91, Kupka00]



*Figure 6 : Principe du procédé LIGA*

Ce procédé permet de créer des microstructures 3D de géométrie très fine (au micromètre près, sur des épaisseurs jusqu'à 1 mm), en silicium ou en autres matériaux tels que métaux, céramiques, verres ou polymères... Les microstructures peuvent développer des puissances mécaniques satisfaisantes irréalisables avec les procédés de fabrication classiques, ce qui élargit considérablement le champ d'application des MEMS [Hormes03]. Il est en effet possible d'atteindre des valeurs d'efforts et de couple transmis non négligeables avec des vitesses de rotation importantes (plusieurs milliers de tours par minute). Les applications sont essentiellement mécaniques (joints, ressorts, engrenages, microrelais...), c'est pourquoi nous parlerons plutôt de microactionneurs. Cette technologie a donné naissance à de nombreuses applications et notamment dans le domaine médical à des outils de microchirurgie.

Le LIGA présente l'inconvénient majeur d'être coûteux compte tenu de la nécessité d'utiliser un synchrotron pour réaliser une lithographie profonde par rayons X. De plus, les masques servant de barrière aux RX sont difficiles à mettre en œuvre (Au/Si ou Be). En revanche, une fois le moule en métal achevé par électrodéposition, il devient aisé de procéder à une production en masse des pièces. D'autre part, ce type de procédé ne permet pas l'intégration des fonctions de traitement électronique. Les systèmes réalisés ne peuvent être qu'hybrides c'est-à-dire que la technologie liée au capteur ou à l'actionneur est différente de celle des fonctions de traitement électronique associées.

#### – Procédés dérivés

Le coût élevé de la technologie LIGA a conduit certains technologues à rechercher de nouveaux moyens d'usinage tridimensionnel. Ainsi est né le HARSE (High Aspect Ratio Silicon Etching) ou HARM (high-aspect-ratio micromachining) [Gormley00, Fu07, Mcnie00] dont le principe repose sur la lithographie par rayons ultraviolets de résines photosensibles. Cette technologie est aussi connue sous les noms de LIGA LIKE ou LIGA UV.

Les microsystèmes fabriqués grâce à cette technologie ont des domaines d'application variés : composants optiques [Hagerhorst-Trewhella89], micromoteurs [Seidemann03], composants pour la microfluidique [Ribeiro05] ou encore capteurs de pression [Hill07].

Les importants progrès réalisés ces dernières années dans les dispositifs optiques de lithographie des couches épaisses ainsi que dans la connaissance des résines, permettent d'atteindre des structures de quelques centaines de microns d'épaisseur. Les moules en résine ainsi réalisés permettent ensuite la fabrication des structures par électrodéposition. Si cette méthode ne permet pas encore d'atteindre la verticalité et les résolutions latérales du LIGA en revanche elle présente les avantages d'être bon marché, reproductible, et compatible avec les technologies microélectroniques. De plus, couplée à la technique des couches sacrificielles, elle offre la possibilité de créer de nouvelles structures complexes.

## 1.4. L'encapsulation

L'encapsulation (packaging) est une étape cruciale dans le process de fabrication des MEMS et est souvent une barrière critique à la phase de commercialisation, ceci du fait que les MEMS sont extrêmement sensibles aux conditions environnementales. Le packaging a 3 rôles principaux en servant à la fois :

- *de support mécanique* : en effet, en raison de la nature mécanique des MEMS, ils nécessitent d'être supportés et protégés contre les chocs thermiques et mécaniques, les vibrations, les fortes accélérations, les particules et autres dommages physiques que peuvent subir les MEMS durant le stockage et au cours de leur fonctionnement ;
- *de protection contre l'environnement* : la présence de l'humidité est la principale cause de corrosion et de dégradation des structures MEMS. Mais beaucoup d'éléments dans l'environnement peuvent endommager les MEMS ; entre autre, le packaging doit lui

assurer une protection contre les poussières, la pression, la température ainsi qu'une étanchéité aux gaz ;

- *de support de connexions avec le monde extérieur* : puisque le packaging est l'interface primaire entre le MEMS et le reste du circuit, il doit être capable d'assurer les connexions électriques.

La mise au point du packaging étant cruciale pour un MEMS, la considération thermique est également un point important à prendre en compte. En effet pour s'assurer d'un bon fonctionnement, la température du système ne doit pas augmenter de façon trop importante. La dissipation thermique est donc à prendre en considération et ceci à travers les résistances thermiques des différents matériaux qui constituent le circuit et le packaging et qui doivent être minimales ; les structures de couches minces, lisses et sans vide, permettent de réduire la résistance thermique des MEMS [Gerke99].

## 2. Domaines d'application des MEMS

LES MICROSYSTEMES sont utilisés dans de nombreux domaines d'application tels que l'informatique, l'automobile, la médecine, la biologie, les télécommunications, l'aérospatiale et le domaine militaire.

Spécificités	Avantages
Petites dimensions	Faible encombrement Faible consommation Haute sensibilité
Fabrication collective	Réduction des coûts Multiplication du nombre de composants Standardisation des performances
Intégration aux circuits intégrés	Amélioration des performances Multiplication des champs d'applications

**Tableau 1 : Spécificité des MEMS**

L'appellation MEMS est typiquement utilisée pour des microsystèmes fonctionnant dans le domaine mécanique. Il existe aussi des appellations spécifiques pour d'autres domaines des microsystèmes : MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems) dans le domaine optique, BIOMEMS dans le domaine biologique. Il existe énormément de prototypes de microsystèmes, cependant peu ont franchi la phase d'industrialisation. Les exemples d'applications présentés démontrent pourtant leur fort potentiel, alors même que l'on considère toujours cette technologie comme jeune, émergente et donc mal maîtrisée. Parallèlement, le nombre de conférences et de journaux dédiés aux MEMS croît et montre tout l'intérêt que les laboratoires leur accordent désormais. C'est à la vue de telles données que l'intérêt de mettre au point des méthodes d'analyse locale pour le diagnostic des MEMS prend sa juste valeur.



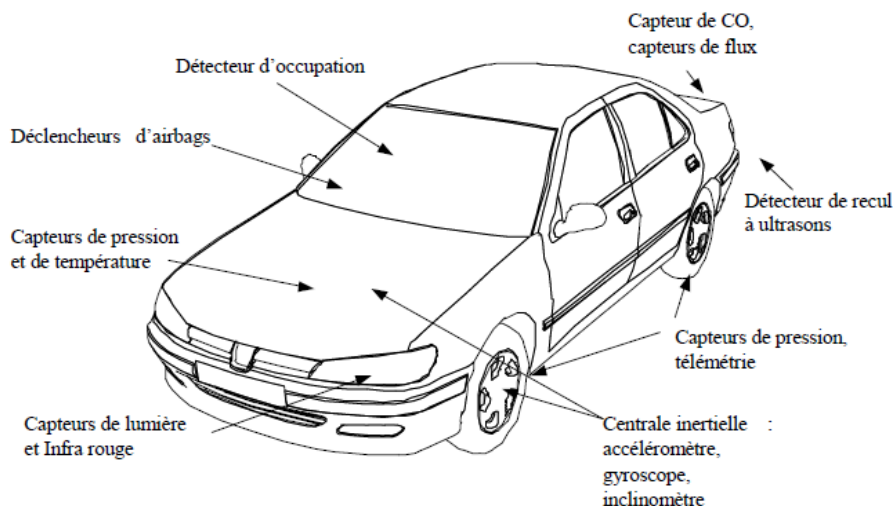
Les microsystèmes n'ont pas la prétention de remplacer tous les capteurs, mais ils ont certaines spécificités qui leur confèrent de réels avantages (Tableau 1) par rapport aux systèmes macroscopiques, leur permettant de remplacer certains dispositifs ce qui est à l'origine de leur forte potentialité industrielle.

## 2.1. L'informatique

Suivant la croissance rapide de l'informatique, de l'évolution de l'électronique et des dispositifs informatiques domestiques, les têtes d'imprimantes à jet d'encre [Boyd03], les disques durs des ordinateurs [Hong06] et les micro-miroirs des projecteurs vidéo, représentent aujourd'hui le plus grand marché des microsystèmes. Dans un avenir proche, les nouvelles générations d'écrans type DMD (Digital Micro-miroir Device) utilisant une matrice de micro-miroirs pour changer la direction de la lumière, vont remplacer l'écran plat TFT LCD (Thin Film Transistor Liquid Crystal Display) par sa qualité HDTV (Haute Définition Télévision) [Nguyen09].

## 2.2. L'automobile

Après l'informatique, l'industrie de l'automobile est un des grands domaines d'applications des dispositifs MEMS [Grace99]. D'après l'agence Wicht Technologie Consulting (WTC), le marché de capteurs pour l'automobile a atteint 1,6 milliards US dollars en 2006, ce qui le place au deuxième rang des applications des microsystèmes. Ce marché pourrait atteindre 2,3 milliards US dollars en 2011 [Dixon07].

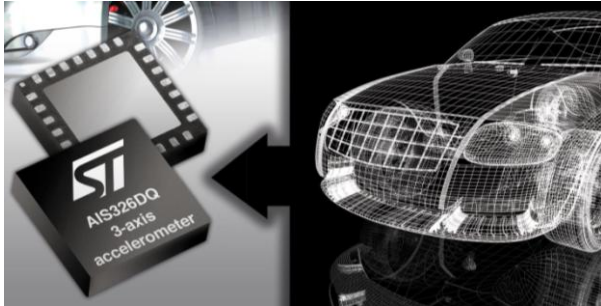


*Figure 7 : Application des MEMS dans l'automobile* [Charlot01]

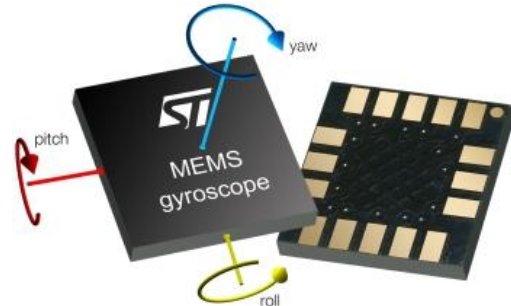
En effet, la part d'électronique embarquée dans les automobiles ne cesse de progresser pour remplacer les capteurs mécaniques en profitant des performances des microsystèmes en terme de taille donc d'encombrement, d'intégration et de coût. La multiplication des capteurs montre les

différentes possibilités d'application des MEMS à l'ensemble de l'automobile. La Figure 7 illustre différents exemples de capteurs.

Les accéléromètres ont été les premiers dispositifs microsystemes appliqués dans l'automobile et supplantent tous les autres systèmes pour commander l'ouverture des airbags en cas de choc (Figure 8).



**Figure 8 : L'accéléromètre AIS326DQ de STMicroelectronics [Loukil08]**



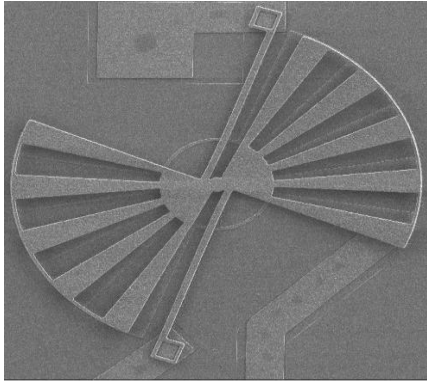
**Figure 9 : Gyromètre MEMS de STMicroelectronics [STM-net 2009]**

La micro-valve pour l'injection de fuel ou gaz, les capteurs piézo-résistifs MEMS pour mesurer la pression des pneus ou les gyromètres (Figure 9) utilisés avec le compteur kilométrique dans un système de position GPS (Global Positioning System), sont quelques autres exemples d'application des MEMS dans l'industrie automobile.

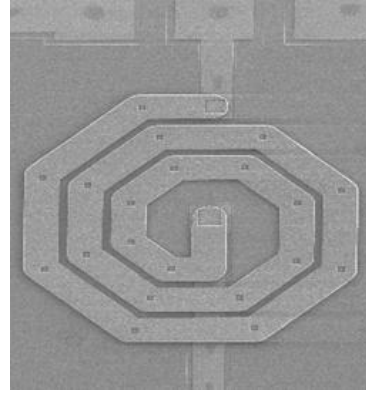
### 2.3. Les télécommunications

Le marché des télécommunications motive également le développement des microsystemes. Les applications visées concernent les éléments passifs ou actifs des circuits intégrés pour remplacer les dispositifs traditionnels [Lucyszyn04]. Ces systèmes ne comportent pas forcément de parties mécaniques, mais on les désigne par le terme de microsysteme RF (*Radio Frequency*) ou MEMS-RF.

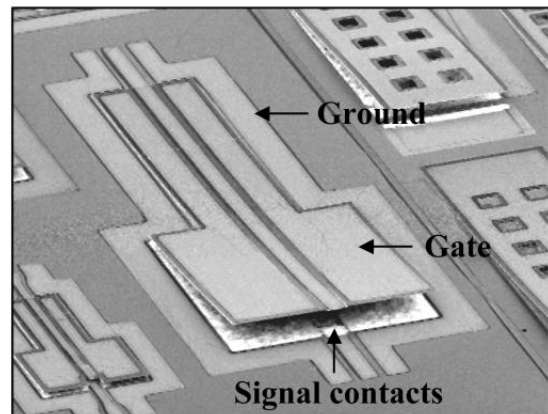
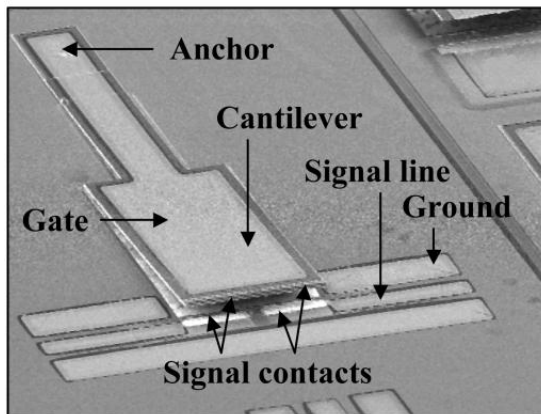
Les nouvelles générations d'appareils de télécommunications contiennent de nouveaux dispositifs tels que des commutateurs, des capacités variables (Figure 10), des inducteurs (Figure 11), des résonateurs et des filtres [Hector99, Nguyen98] et les microrelais (Figure 12) [Lafontan01]. Ils sont intégrés sur le même substrat afin d'augmenter la fréquence de fonctionnement, de sélectionner la fréquence, de diminuer les parasites et de diminuer la taille. Bien évidemment, les téléphones portables se trouvent parmi les appareils de télécommunications qui bénéficient de ces nouveaux dispositifs. Ainsi, le téléphone portable peut être équipé d'un minidisque dur ou d'un appareil photo numérique, avec des encombrements de plus en plus faibles.



*Figure 10 : Capacité variable RF (EPFL)*



*Figure 11 : Inductance RF (EPFL)*



*Figure 12 : Micro-relay RF [Adamschik02]*

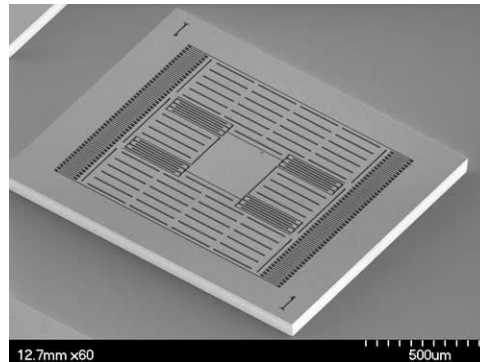
Actuellement, dans le monde plus de 120 organismes et 60 centres de recherche étudient les MEMS RF. D'après WTC, le marché des microsystèmes RF a atteint 450 millions de dollars US en 2007 et 1,1 milliard de dollars US en 2009 [WTC-net].

La recherche sur les microsystèmes RF en Europe a commencé à se développer dix ans plus tard qu'aux Etats Unis. De plus, les ressources publiques en Europe sont quatre fois plus petites qu'aux Etats Unis et deux fois plus petites qu'en Asie [Bouchaud07]. Cela révèle le défi pour l'Europe d'accélérer le développement des technologies de fabrication des microsystèmes RF, en particulier des commutateurs et des capacités variables.

## 2.4. L'aérospatiale

Les microsystèmes ont de nombreuses applications potentielles dans le domaine aérospatial. L'aérospatiale étant un domaine qui exige un haut niveau de sécurité et une grande fiabilité, le prix de ses dispositifs est élevé. Les dispositifs microsystèmes qui ont trouvé une application dans ce domaine concernent plus particulièrement : l'accéléromètre (Figure 13), le gyromètre, le micro-propulseur, les capteurs de pression, les capteurs thermiques [Cass09, Stark99, Sastry09]. D'autres capteurs fournissent des informations sur l'environnement des satellites et des vaisseaux spatiaux

comme la pression ou la température. Cependant, l'avancée actuelle des connaissances en fiabilité à court et à long termes n'est pas suffisante pour satisfaire aux normes spatiales.

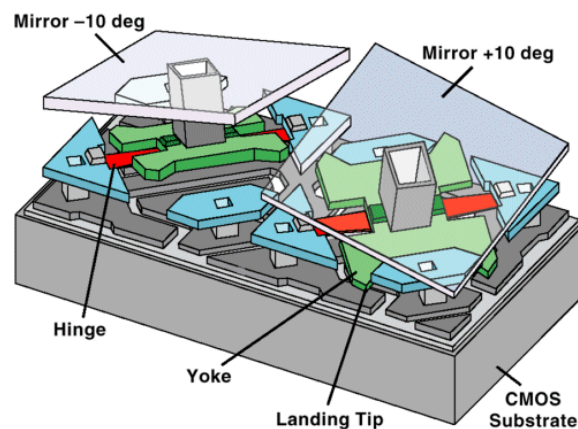


**Figure 13 : Micro-accélérateur RF [Polymtl-net]**

Dans l'avenir, les dispositifs microsystèmes réaliseront des tâches plus complexes que celles typiques d'un simple capteur ou actionneur, incluant en particulier des fonctions complexes avec leur propre alimentation et leur connexion sans fil avec le processeur central.

## 2.5. L'optique

Dans le domaine de l'optique, le développement des microsystèmes a été essentiellement marqué par l'industrialisation massive de projecteurs et systèmes à matrices de micro-miroirs. Ces systèmes sont composés d'un ensemble de micro-miroirs mobiles autour d'un axe pivotant leur permettant de basculer par attraction électrostatique. Ces micro-miroirs, associés chacun à un pixel, ont alors la capacité de changer la direction du faisceau lumineux par réflexion pouvant ainsi allumer ou éteindre un pixel. Les matrices de micro-miroirs DMD (*Digital Micromirror Device*) de Texas Instrument (Figure 14) dominent tous les secteurs de la projection et du cinéma numérique. Ce nouveau marché est, comme les autres, des plus prometteurs.



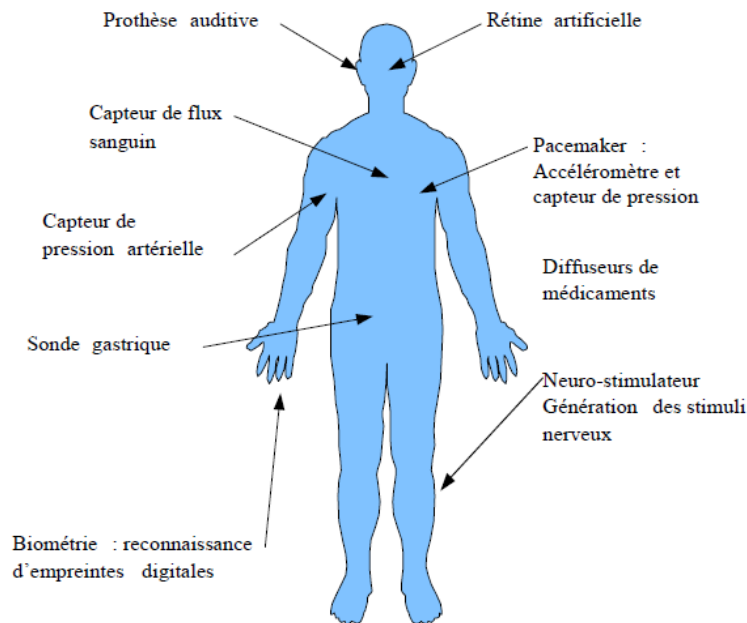
**Figure 14 : Vue schématique des micro-miroirs de Texas Instrument**

## 2.6. Le biomédical

Le biomédical est peut-être le domaine où l'intérêt des Microsystèmes est le plus important. En effet, grâce à la bio-compabilité du silicium et à la taille des MEMS, il est envisageable de créer des systèmes à implanter à l'intérieur du corps afin qu'ils remplissent l'acte médical souhaité [Joseph97] tel que :

- l'analyse et le contrôle des paramètres biologiques (flux sanguin, pH gastrique, taux de sucre...) [Trautmann06]
- l'injection automatique de médicaments
- des stimulations nerveuses
- le remplacement d'organe défaillant (rétines artificielles ou prothèses auditives)

La Figure 15 résume les applications potentielles des MEMS au service du biomédical.



**Figure 15 : Des MEMS dans le corps humain** [Charlot01]

Avec l'aide de MEMS, les domaines de la chimie, de la biologie et des applications liées à la santé se développent très vite. En ce qui concerne la santé humaine, les analyses et les soins font l'objet de demandes fréquentes. Actuellement de nombreux appareils relatifs à ces domaines contiennent des microsystèmes ; on peut notamment citer : le tensiomètre, le capteur d'analyse chimique du sang, le système de micro-injection et le dispositif de stimulation cardiaque (pacemaker).

Mais malgré leurs grandes spécificités, leurs innombrables applications et leurs hautes potentialités pour l'avenir, les microsystèmes présentent également certains inconvénients, notamment d'importants problèmes de fiabilité ainsi que leur inaccessibilité aux différents moyens de contrôle et de réparation, ce qui nécessite le développement de nouvelles méthodes d'analyse prédictive de leur fiabilité. Cette problématique est à l'origine de ce sujet de thèse.

### 3. Mécanismes de défaillance des MEMS

ANALYSER, estimer et comprendre les mécanismes de défaillance d'un microsystème sont des étapes importantes, voire essentielles, dans la phase de développement d'un produit. La problématique de la fiabilité des microsystèmes se situe dans l'identification [Charlot01] et la compréhension [Millet03] des mécanismes de défaillance afin d'optimiser la conception et la fabrication, pour ensuite envisager l'étude de la fiabilité. Néanmoins, cette étape s'avère difficile compte tenu du nombre important de facteurs influents : problèmes de conception, de fabrication, de manipulation ou d'utilisation.

Dans ce paragraphe, nous allons, dans un premier temps, lister et tenter de décrire les mécanismes de défaillance identifiés sur les microsystèmes, pour ensuite dégager et décrire les différents facteurs à l'origine des défaillances et dégradations des MEMS. Mais avant de commencer il semble important de définir la notion de fiabilité dans le domaine des MEMS et de résumer les aspects théoriques d'analyse de fiabilité.

#### 3.1. Notion de fiabilité

La fiabilité peut être définie comme le taux de défaillance d'un système et être employée pour l'analyse prédictive de performance [Stark99]. Si on désigne par  $T$  la variable aléatoire qui, à tout dispositif choisi au hasard dans la population, associe son temps de *bon fonctionnement* ou *sa durée de vie* avant une défaillance et que l'origine des temps,  $t = 0$ , est choisie lorsque le dispositif est mis en service pour la première fois, alors il est possible de définir la *fonction de défaillance*  $F$  pour tout  $t \geq 0$  par :

$$F(t) = P(T \leq t) \quad (1)$$

Le nombre  $F(t)$  représente la probabilité qu'un dispositif ait une défaillance avant l'instant  $t$ .

Cette fonction nous amène naturellement une fonction associée : la *fonction de fiabilité*  $R$  définie pour tout  $t \geq 0$  par :

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2)$$

$R(t)$  est la probabilité qu'un dispositif n'ait pas de défaillance avant l'instant  $t$ .

#### – Taux de défaillance

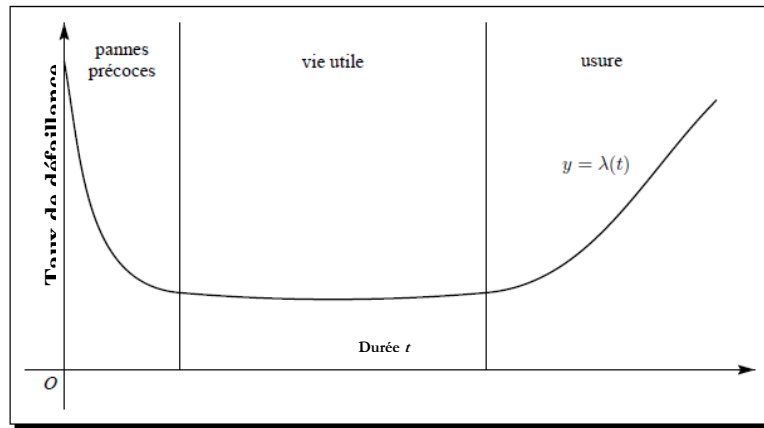
On appelle taux de défaillance instantané à l'instant  $t$  le nombre  $\lambda(t)$  définit pour tout  $t \geq 0$  :

$$\lambda(t) = \frac{F'(t)}{R(t)} = \frac{F'(t)}{1 - F(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)} \quad (3)$$

Connaissant  $R(t)$  ou  $F(t)$  on peut obtenir  $\lambda(t)$ . Inversement, si on connaît  $\lambda(t)$  on peut trouver  $R(t)$  et  $F(t)$  comme solutions des équations différentielles du premier ordre :

$$R'(t) + \lambda(t)R(t) = 0 \text{ et } F'(t) + \lambda(t)F(t) = \lambda(t) \quad (4)$$

Expérimentalement, les industries de la microélectronique ont constaté, que pour la plupart des systèmes, y compris pour les MEMS [Tanner97], la courbe représentative du taux de défaillance instantané  $t \rightarrow \lambda(t)$  a la forme donnée par la Figure 16. Ce modèle est connu sous la dénomination « *courbe en baignoire* » et a été au commencement développé pour modéliser les taux d'échec d'équipements mécaniques, mais a été depuis adopté par l'industrie du semi-conducteur.



**Figure 16 : Courbe baignoire**

La *courbe en baignoire* comporte trois régions distinctes de fiabilité :

- À gauche, la période de début de fonctionnement, où le taux de défaillance (ou d'avarie) instantané décroît avec le temps, car les pannes précoces dues à des défauts de fabrication ou de conception sont de moins en moins nombreuses. Pendant la durée de cette phase, des tests sous conditions extrêmes sont réalisés pour simuler la période de défaillance précoce, c'est la période *burn-in*.
- Au centre, la période de maturité, ou vie utile, où le taux d'avarie instantané reste à peu près constant ; pendant cette période, les pannes qui se produisent peuvent être considérées aléatoires.
- A droite, la période d'usure, où le taux d'avarie instantané augmente avec le temps, car les pannes dues à l'usure croissante du matériel sont de plus en plus fréquentes.

A partir de cette courbe le temps opérationnel peut être défini comme étant :

$$\text{Durée (opérationnelle)} = \text{Durée (pannes précoces)} + \text{Durée (vie utile)}$$

En pratique, chaque industriel définit ses propres procédures et tests spécifiques pour maximiser la fiabilité de chaque produit. La méthode traditionnelle pour déterminer le taux d'échec d'un produit passe par la réalisation de cycles de tests accélérés, donc à haute température, sur un échantillonnage de composants afin de déterminer leur durée de fonctionnement. Le taux d'échec obtenu sur l'essai de l'échantillon est alors extrapolé au moyen de modèles statistiques prédéterminés pour donner une évaluation du taux d'échec dans les conditions d'applications spécifiques. Bien qu'il y ait beaucoup d'autres méthodes de test pour caractériser la fiabilité d'un produit, le test de fonctionnement sur des échantillons est la méthode principalement employée par les industriels, pour estimer le taux d'échec des microsystèmes en service.

### – Prédiction du temps de défaillance

Il est parfois intéressant de parler de *durée moyenne entre deux défaillances* au lieu de *probabilité de défaillance*. Le *temps moyen entre pannes*, est la moyenne arithmétique du temps entre pannes d'un système réparable. Ce paramètre de fiabilité provient de l'expression « *Mean Time Between Failures* », désignée par le sigle *MTBF* qui signifie « *Temps moyen entre deux défaillances* ». L'expression anglaise est parfois traduite à tort en français par « *Moyenne des temps de bon fonctionnement* ». Mais le temps moyen entre deux défaillances intègre dans son calcul les temps de réparation et de maintenance, alors que la moyenne des temps de bon fonctionnement ne les intègre pas.

Le *MTBF* est la mesure du taux de défaillances aléatoires dans un lot de composants, à l'exclusion des pannes systématiques dues par exemple aux défauts de fabrication (*pannes précoces*) et à l'exclusion de l'*usure* due à leur utilisation. La valeur du *MTBF* ne peut être définie que dans un usage et un environnement donnés. Le temps moyen entre la panne et la remise en état de fonctionnement (comprenant les temps de diagnostic, d'approvisionnement, de réparation...) est appelé « *Temps moyen avant réparation* » (*Mean Time To Repair* ou *MTTR*) ou « *Temps moyen d'indisponibilité* » (*Mean Downtime* ou *MDT*).

### – Unité du taux de défaillance

Puisque, pour la plupart des systèmes,  $\lambda(t)$  est une petite quantité, des unités spéciales sont utilisées pour décrire la fiabilité. Le *MTBF* d'un composant ou d'un ensemble de composants peut être exprimé en heures, ou en son inverse, en *FIT* (*Failure In Time*) correspondant au taux de défaillances aléatoires qui peuvent être prévues en un milliard composants-heures d'opérations. Par exemple 1000 dispositifs pendant 1 million d'heures, ou 1 million de dispositifs pour 1000 heures chacun.

$$FIT = \text{Nombre de composants défaillants} \times \text{Durée cumulée de fonctionnement} \times 10^9$$

$$1FIT = \frac{1 \text{ défaillance}}{10^9 \text{ heures}}$$

Lorsqu'un système est composé de plusieurs composants, on fait le produit de tous les FIT de chacun des composants en supposant que la panne d'un seul composant provoque la panne du système. D'autres paramètres sont particulièrement employés dans l'industrie des semi-conducteurs pour les données statistiques des procédures tests. Le Tableau 2 résume les différents paramètres, ainsi que leur définition, employés pour décrire la fiabilité des dispositifs.



<b>Paramètres</b>	<b>Définitions - Descriptions</b>
Taux de défaillance ( $\lambda$ )	Nombre de défaillance par unité de temps.
Failure In Time ( <i>FIT</i> )	Taux de défaillance pour $10^9$ heures de dispositifs
Total Device Hours ( <i>TDH</i> )	Somme des dispositifs opérationnels multipliés par leur durée de fonctionnement
Temps moyen avant panne ( <i>MTTF</i> )	Temps moyen de fonctionnement avant panne et correspondant à l'inverse du taux de défaillance $\lambda$ .
Niveau de confiance ( <i>CL</i> )	Niveau de probabilité estimé pour le taux de défaillance de la population à partir des essais de fonctionnement sur des échantillons tests.
Facteur d'accélération ( <i>AF</i> )	Constante déterminée à partir de l'équation d'Arrhenius et employée pour l'extrapolation des taux de défaillance des conditions d'essai accéléré aux conditions normales d'utilisation.

**Tableau 2 : Paramètres de mesures pour l'analyse de la fiabilité des MEMS**

### 3.2. Différentes approches

Estimer la fiabilité d'un microsysteme est une étape primordiale. Mais du fait de l'hétérogénéité des matériaux, des processus de fabrication très divers ainsi que du fonctionnement dans des domaines d'énergies différents, la création des défauts et les mécanismes de défaillance sont souvent très variés et de ce fait très complexes.

Cependant, les travaux publiés jusqu'à aujourd'hui sur les mécanismes de dégradation des microsystemes montrent que l'on peut les scinder en deux groupes pour identifier d'une part les défaillances induites par le procédé de fabrication et d'autre part celles qui sont induites par le système complet [Muratet05].

#### – Fiabilité du procédé technologique

Nous nous intéresserons ici aux deux procédés de fabrication les plus couramment utilisés, décrits précédemment (le micro-usinage en volume et le micro-usinage en surface) et dont les étapes utilisées pour la fabrication des microsystemes sont sensiblement les mêmes (oxydation, dépôt, photolithographie, attaque chimique, gravure, implantation ionique et recuit). Il s'agit alors de caractériser les procédés technologiques utilisés pour réaliser des microsystemes en mesurant les paramètres géométriques et mécaniques des matériaux comme : le module de Young, la contrainte interne dans les couches, les conductivités thermiques... pour déterminer des zones défaillantes. Ainsi à chaque étape technologique, un certain nombre de défauts peut être rencontré (Tableau 3) [Castillejo98]. Chacun de ces défauts peut donner naissance à un défaut de la structure finale, [Mir99, Mir02]. Leur caractérisation permet donc de déterminer le rendement de la fabrication.

<b>Etapas technologiques</b>	<b>Défauts potentiels</b>
<b>Oxydation</b>	Rupture de liaison SiO <sub>2</sub> Température et durée d'oxydation
<b>Dépôt</b>	Présence de vide dans le réseau cristallin Température et durée de dépôt Microfissures et impuretés
<b>Photolithographie</b>	Résidus de résines photosensibles Particules contaminantes Présence d'ombres Mauvais alignement du masque
<b>Gravure</b>	Particules contaminantes Gravure inadéquate (durée, vitesse...)
<b>Implantation d'ions</b>	Densité des atomes dopants inadéquate
<b>Recuit</b>	Température de recuit non adéquate Coefficients d'expansion thermique très différents
<b>Libération des structures</b>	Gravure inadéquate (durée, vitesse...) Coefficients d'expansion thermique très différents Retrait des structures du liquide de gravure

**Tableau 3 : Etapes technologiques et défauts potentiels dans les MEMS**

– **Fiabilité du système complet**

Une fois que la technologie de fabrication est caractérisée et maîtrisée, il est nécessaire de caractériser la fiabilité d'un prototype proche du produit final, c'est à dire une fiabilité liée directement à son utilisation et à son domaine environnemental d'application [Dardalhon03]. Ceci passe par la mise en place de tests spécifiques destinés à prouver que le produit sera capable d'accomplir sa mission. Comme pour toute approche de fiabilité, il sera nécessaire d'analyser des distributions statistiques sur un nombre significatif de microsystèmes pour comprendre leurs mécanismes de défaillance.

Les nombreux travaux réalisés [Walraven03] ont permis d'extraire une classification des microsystèmes adaptée à la prédiction des mécanismes de défaillance en relation avec le mode de fonctionnement du dispositif (voir Tableau 4).

<b>Classe</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>
<b>Définition</b>	Dispositif immobile	Parties mobiles Pas d'impact Pas de frottement	Parties mobiles Impacts Pas de frottement	Parties mobiles Impacts Frottements
<b>Applications</b>	Capteurs de pression Têtes d'imprimante	Résonateurs Peignes Filtres	Micro-miroir Relais Valves	Micro-switch
<b>Mécanismes de défaillance</b>	Contamination Collage	Classe I + Fatigue mécanique	Classe II + Impacts	Classe III + Usure

**Tableau 4 : Classification des MEMS en fonction de leurs mécanismes de défaillance**

La première classe est constituée par les microsystèmes qui ne possèdent pas de parties mobiles. Les microsystèmes de la deuxième classe possèdent des parties mobiles mais ne subissent ni impact, ni frottement. Les microsystèmes composés de parties mobiles et subissant des impacts mais pas de frottement sont regroupés dans la troisième classe. Enfin, la dernière classe rassemble les microsystèmes avec des parties mobiles subissant des impacts et des frottements. Mais quelle que soit l'approche choisie pour étudier la fiabilité d'un microsystème, il est nécessaire de connaître les mécanismes de défaillance.

### 3.3. Mécanismes de défaillance induits par le procédé de fabrication

De nombreux travaux existent dans la littérature sur les défauts de fabrication des MEMS. Comme nous l'avons vu précédemment, toutes les étapes technologiques peuvent engendrer des mécanismes de défaillance [Castillejo98]. Nous allons présenter les principaux.

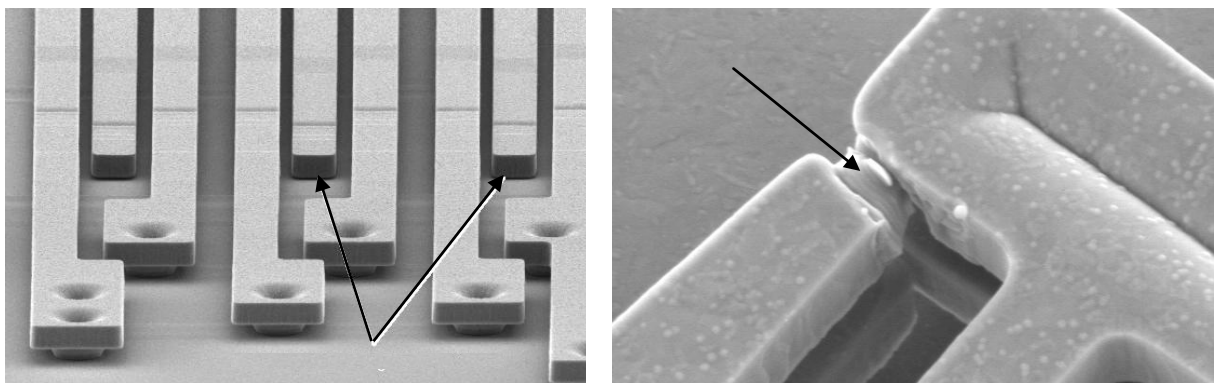
#### – Le collage

Les défauts de collage ou *stiction* peuvent être induits par le procédé de fabrication lui-même ou au cours du fonctionnement du microsystème.

Le phénomène de collage peut se produire entre deux structures ou entre une structure et le substrat. Quand il résulte du procédé de fabrication, il peut être dû :

(1) aux forces d'attraction exercées pendant le séchage de la structure c'est à dire après libération des structures. Le collage arrive quand on enlève le dispositif du liquide de gravure. Les parties mobiles ou les parties suspendues restent collées en raison de la force capillaire qui est affectée par l'humidité et la contamination de surface ;

(2) à cause d'une mauvaise gravure de la couche structurale (Figure 17).



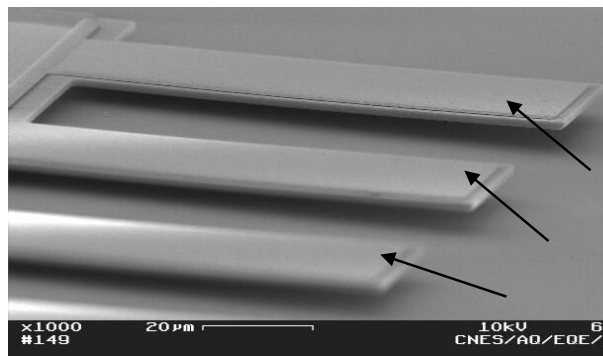
**Figure 17 : Collage d'un peigne d'accéléromètre avec le substrat à cause d'une mauvaise gravure de la couche structurale [Walraven03]**

– **Les ruptures**

Il s'agit des problèmes d'alignement des masques au cours des étapes de lithographie ou encore une surgravure pouvant entraîner des ruptures de parties suspendues.

– **Les contraintes résiduelles**

Quand les couches de polysilicium sont déposées, elles présentent fréquemment des contraintes résiduelles. Les procédés technologiques employés cherchent naturellement à minimiser ces contraintes. Mais au moment de la libération des couches sacrificielles, les structures vont se déformer sous l'effet de ces contraintes internes [Andrei08]. La Figure 18 montre un exemple de structure déformée sous l'effet des contraintes internes du matériau. Ces déformations peuvent entraîner des problèmes de non-alignement de structures (peignes interdigités), de collage par adhésion ou de court-circuit électrique.

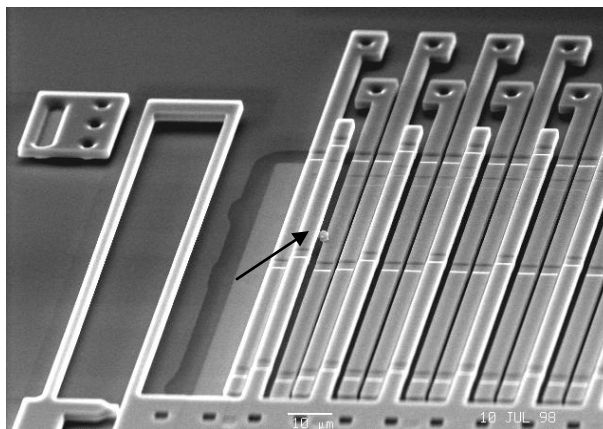


*Figure 18 : Exemple de problème rencontré lors de la libération sous l'effet des contraintes internes à la couche structurale [Dardalhon03].*

### 3.4. Mécanismes de défaillance induits par le fonctionnement

Différents travaux ont été réalisés pour identifier et classer les mécanismes de défaillance liés à l'utilisation des microsystemes. Les défauts en opération peuvent survenir dans différents domaines : mécanique, thermique, électrique et chimique [Nguyen09].

– **Problème de contamination**

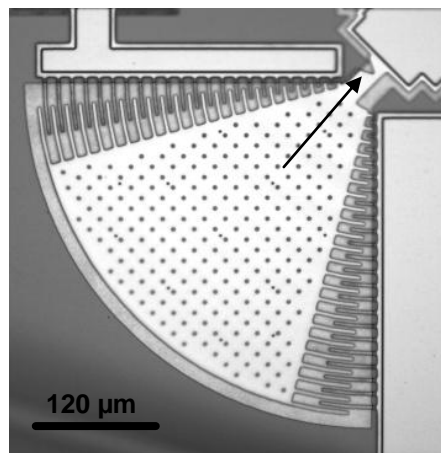


*Figure 19 : Contamination par des particules [Walraven03].*

Parmi les mécanismes de défaillance identifiés, les problèmes de contamination (Figure 19) sont très fréquents. Des particules peuvent totalement bloquer le mouvement du dispositif. Ces particules peuvent apparaître lors du processus de fabrication ou provenir de l'usure du matériau [Weiss05] ou éventuellement provenir de l'environnement quand le dispositif n'est pas encapsulé.

### – La fatigue mécanique

La fatigue mécanique est un phénomène lié aux efforts mécaniques ; elle est créée par des mouvements répétés de la microstructure qui tendent à diminuer sa résistance à la rupture en fonction du temps en déclenchant des mouvements de dislocations et la diffusion d'atomes jusqu'à provoquer une micro-rupture (Figure 20). De nombreux travaux ont été réalisés pour évaluer cette dégradation en fonction du nombre de cycles de fonctionnement [Kapels00, Bagdahn01, Muhlstein00]. Cette diminution de la résistance à la rupture (propagations de fissures) peut entraîner des problèmes de fonctionnement des microsystèmes. Ceci dépend du temps, du matériau, de la taille de grain, de la température et des conditions de sollicitation. On a montré que le développement d'une fissure peut être facilité par la présence d'oxyde (corrosion). Ainsi la fatigue mécanique des microsystèmes est fortement influencée par l'humidité.



**Figure 20 : Exemple de rupture induite par une microfissure** [Walraven03].

Certains matériaux comme le silicium cristallin et le polysilicium sont plus particulièrement sensibles à la fatigue mécanique. Le choix des matériaux est donc une étape essentielle pour la conception de la micro structure.

Le phénomène de *friction* est généré par le frottement de deux surfaces en contact. Le contact répété provoque des aspérités qui augmentent la contrainte. L'usure est la perte de matériau par le frottement. Le frottement solide est complexe car il fait intervenir la rugosité, les forces de surface et la présence éventuelle de lubrifiants. Ce mécanisme est alors difficilement modélisable par rapport au frottement fluide qui, lui, peut se modéliser en première approximation par une composante linéaire. Dans le domaine des microsystèmes, ce mécanisme de défaillance apparaît essentiellement dans les applications comportant des liaisons pivot comme les micro-moteurs électrostatiques ou les micromiroirs sur pivot. Ce mécanisme peut entraîner des problèmes d'usure mécanique, de la génération de débris qui peuvent, à leur tour, être assimilés à des

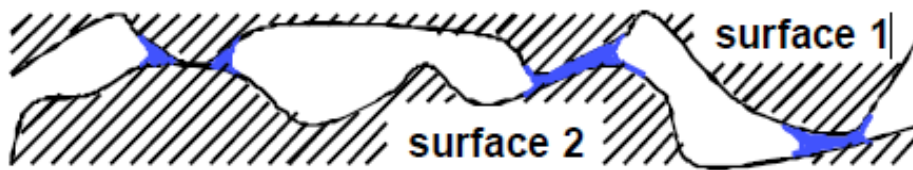
particules contaminantes. L'adhésion entre des couches dépend fortement de leur compatibilité chimique et mécanique.

La *délamination* des couches peut se produire lors de la fabrication ou durant le fonctionnement [Lau05]. Des *chocs* et des *vibrations* peuvent causer la rupture de parties mobiles.

#### – Le collage

Le collage est sans aucun doute le mécanisme de défaillance le plus répandu pour les microsystèmes usinés en surface. Il résulte d'une force électrostatique qui tend à coller des structures microscopiques entre elles ou au substrat après que leurs surfaces aient été mises en contact de manière intentionnelle ou non et alors qu'aucune tension n'est appliquée.

Compte tenu du rapport surface sur volume dans le domaine des MEMS, les forces de surface (les forces capillaires, les forces de Van Der Waals et les forces électrostatiques) jouent un rôle prédominant à l'origine du phénomène de collage. La condensation capillaire est l'effet physique qui se traduit par une condensation de la vapeur d'eau dans des pores ou fissures d'une surface lisse. Lorsque deux surfaces entrent en contact, une fine couche d'eau présentant une forte tension en surface, apparaît entre les points de contact et les maintient collés (Figure 21). Par conséquent, la probabilité de collage diminue avec de faibles humidités relatives, de fortes rugosités de surfaces [De Wolf04-1 et 2, Bowden50], ou en réduisant les surfaces de contact.



**Figure 21 : Collage dû aux forces capillaires [Dardalhon03]**

Le collage est un mécanisme de défaillance très bien connu dans le cas des interrupteurs MEMS RF exposés à une haute condition d'humidité [Mastrangelo97, Haluzan08]. L'humidité cause aussi le changement de la permittivité de la couche diélectrique ce qui affecte la tension d'actionnement (*pull-in*) et la tension de décollage. Les recherches de Reid [Reid02] ont montré que ces effets apparaissent après quelques milliards de cycles.

#### – Les effets électriques

La *surcharge* électrique peut occasionner le collage ou la rupture d'une partie suspendue, c'est le phénomène dit d'*auto-activation*. Il se produit quand il y a un transfert soudain de charge entre le dispositif MEMS et un équipement, ce qui provoque une rupture du diélectrique [Walraven03]. Puisque la tension d'actuation exigée est en général haute, typiquement de 10 à 30 V ou plus, un champ électrique très important est présent au niveau du diélectrique quand le pont (ou la poutre) est fléchi. En effet dans le cas des micro-interrupteurs, quand la charge accumulée dépasse une valeur critique (correspondant à la charge exigée pour actionner l'interrupteur), la force électrostatique devient supérieure aux forces de rappel mécanique, le pont s'abaisse et le MEMS

rentre alors en défaillance. Pour éviter le court-circuit, une ou les deux électrodes peuvent être couvertes par une couche diélectrique isolée. Lors du fonctionnement, après un nombre important de cycles, des charges résiduelles (piégées dans le diélectrique) peuvent s'accumuler dans ces couches diélectriques et affecter directement le comportement de l'interrupteur électrostatique, en particulier sa tension d'actionnement [De Wolf04-1 et 2, Bochobza02].

Il y a plusieurs façons de diminuer l'accumulation de charges dans le diélectrique et améliorer la longévité de l'interrupteur capacitif [Goldsmith07] :

- (1) réduire la tension d'actuation,
- (2) utiliser un design de la capacité permettant un compromis optimal entre le rapport des capacités et la durée de vie (typiquement en optimisant le coefficient diélectrique),
- (3) développer de nouveaux matériaux (par exemple, pour les électrodes).

L'*électromigration* consiste en un déplacement de matériau causé par un mouvement des ions dans un conducteur dû au « vent » provoqué par les électrons de conduction. Cet effet est important dans les applications où de fortes densités de courant sont présentes, comme dans notre cas où de fortes puissances RF sont mises en jeu. Cet effet est d'autant plus critique en hautes fréquences, car les courants se concentrent alors sur le bord du conducteur.

Les propriétés du matériau ont, comme les dimensions des structures, une grande influence sur la durée de vie du composant. La composition du matériau, l'orientation cristallographique des grains dans le métal, le type de dépôt, les recuits, l'interface avec les autres matériaux affectent aussi la pérennité des conducteurs [Bordas08].

### – Les effets thermiques

Le passage d'une forte puissance dans les dispositifs MEMS entraîne une élévation de leur température qu'il faut prendre en compte comme vecteur de défaillance.

L'effet principal des variations de température réside dans la modification des *contraintes résiduelles* et de leur gradient dans la membrane métallique. Cela se traduit dans la valeur de la constante de raideur. Le gradient de contrainte, variable en fonction de la température, est très fortement dépendant des conditions de dépôt des couches métalliques et diélectriques. Malheureusement, aucune règle universelle n'existe pour modéliser les dépôts, car ils diffèrent d'un matériel à un autre. Seule la réalisation de tests permet d'obtenir les paramètres voulus [Bordas08].

Un moyen pour éliminer l'effet du gradient de contrainte est de fabriquer le composant MEMS en utilisant une couche monocristalline sans contrainte résiduelle ou au contraire en choisissant une couche à forte contrainte [Duffy01]. Ces deux types de microsystemes ont montré une aptitude à tenir des hautes températures de l'ordre de 200°C et des cyclages en température sans dégradation de leur performance. Les données sur la tenue en température des interrupteurs sont encore peu mentionnées dans la littérature.

La différence de *coefficients de dilatation thermique* des différents matériaux qui composent un MEMS peut donner lieu à des déformations de la structure sous des contraintes thermiques. Les

surcharges thermiques peuvent occasionner la *fusion* des matériaux ainsi que l'évolution de leur *résistivité*. Les températures et les contraintes importantes subies par les structures sont aussi à l'origine des mécanismes de défaillance tels que l'électro-migration ou des transformations cristallines à l'intérieur des matériaux. Les défaillances liées aux surcharges thermiques s'expriment par des déviations paramétriques dans les domaines électriques et mécaniques, mais également des ruptures et des déformations permanentes.

Le phénomène de *fluage* se produit à des températures élevées quand un matériau soumis à une contrainte présente une déformation plastique évoluant dans le temps et pouvant conduire éventuellement à la rupture [Van Spengen03]. Ce phénomène est à l'origine de la diminution de la durée de vie de certains matériaux dont la température de fusion est faible.

#### – Les effets environnementaux

Suivant leur application, les MEMS sont amenés à fonctionner dans des environnements très sévères ; nous avons déjà mentionné le fait que la température et le taux d'humidité étaient des paramètres majeurs influençant la durée de vie des structures. Par ailleurs, dans le cas des applications aérospatiales, les effets radiatifs peuvent engendrer des micro-fissures et la dégradation irréversible des performances [Lau05, Li08].

Après ce rapide tour d'horizon décrivant les mécanismes de défaillances les plus fréquemment en cause dans les problèmes de fiabilité des MEMS, il s'agit à présent de déterminer les principaux facteurs influençant ces mécanismes de dégradation.

### 3.5. Facteurs influençant les mécanismes de défaillance

De très nombreux travaux s'intéressent aux mécanismes de dégradation des MEMS. Ainsi 18 mécanismes de défaillance différents ont été identifiés [De Wolf07]. Une autre difficulté dans l'analyse de la fiabilité des MEMS provient du fait que la majorité des publications réalisées cible un microsystème spécifique et que leurs conclusions ne sont pas forcément applicables à une autre application. De ce fait on trouve dans la littérature différentes classifications des modes et des mécanismes de défaillance des MEMS.

Les particularités essentielles des MEMS viennent du fait que ce sont des systèmes hétérogènes et de complexité très variée ; de plus, pour la plupart, ce sont des composants de puissance nécessitant l'énergie électrique pour fonctionner et possédant une structure mobile. Pourtant tous ces mécanismes de défaillances recensés peuvent être issus de causes similaires ou peuvent résulter d'une combinaison de plusieurs causes ; aussi il peut être intéressant, à partir des mécanismes de défaillance présentés précédemment, d'essayer d'en identifier les causes principales. Ainsi, on peut classer les modes de dégradation en 4 grandes catégories : la dégradation mécanique, électromécanique, la dégradation intrinsèque des matériaux et le packaging [Walraven05]. Le Tableau 5 résume ces principaux modes de dégradation et en dégage les paramètres qui en sont à l'origine.



<b>Mode de dégradation</b>	<b>Causes</b>	<b>Influencées par</b>
<b>Mécanique</b>	Concentration de contraintes Fatigue (cycles d'actuation) Contraintes thermiques et thermomécaniques	Design Tension d'actuation Température
<b>Electromécanique</b>	Effet « pull-in »	Puissance RF Tension d'actuation
<b>Dégradation des matériaux</b>	Transformations microstructurales Corrosion et érosion	Sollicitations mécaniques Conditions chimiques Température
<b>Packaging</b>	Scellage, isolation, protection	Conditions chimiques Température

**Tableau 5 : Paramètres influençant les mécanismes de défaillances des MEMS**

A partir de ce tableau on peut mettre en évidence que les processus les plus fréquemment en cause dans les mécanismes de dégradation des MEMS sont de nature : mécanique (contrainte mécanique), thermique, électrique et chimique (paramètres environnementaux) [Li08]. Parmi ces différents paramètres, dans la suite, nos travaux porteront plus spécifiquement sur le facteur température et les effets thermiques.

#### **4. Tests de Fiabilité : Méthodes de diagnostic et d'analyse**

LES MECANISMES de défaillance, que nous avons décrits précédemment, ne sont ni bien compris, ni faciles à contrôler dans le cadre d'un vieillissement accéléré [Mc Cluskey99]. Aussi, l'analyse de la fiabilité nécessite-t-elle des méthodes de plus en plus fines et localisées pour identifier : les ruptures mécaniques, les collages, l'usure, la délamination, les problèmes dus à l'environnement (vibrations, chocs, humidité, radiations, particules, température, décharges électrostatiques...), les contraintes (thermiques et résiduelles), les capacités parasites, les frottements sur les parties mobiles (damping). Ainsi, le diagnostic de ces différents défauts et leur connaissance permettraient d'envisager des procédés de conception qui tendraient à minimiser leur impact sur les performances des MEMS.

Pour permettre un bon comportement des MEMS sur le long terme, une bonne connaissance des caractéristiques mécaniques des couches minces et de chaque élément constituant la structure du MEMS est nécessaire. Pour cela des structures de test sont utilisées pour définir leurs propriétés. Un autre problème qui se pose est de réaliser des procédures de tests permettant de prévoir le comportement du microsystème à long terme.

Les tests de fiabilité constituent une étape indispensable en sortie de fabrication des microsystèmes pour pouvoir mettre en évidence les composants défaillants mais aussi et surtout pour permettre de valider le fonctionnement et garantir les spécifications, la qualité et la durée de vie des MEMS. Il n'est alors plus seulement question d'identifier des défaillances mais aussi de prédire un comportement qui risque de conduire à la défaillance. Les tests de fiabilité interviennent également tout au long du processus de conception mais avec la complexité croissante des MEMS, ils occupent une part de plus en plus importante.

Les tests de fiabilité des MEMS doivent prendre en compte les conditions de fonctionnement et environnementales auxquelles ces MEMS sont soumis. En effet, le MEMS et son boîtier seront soumis durant leur vie à de multiples sollicitations :

- Au niveau de la fabrication : contraintes thermo-mécaniques, vibrations (ex : nettoyage par ultrasons), chocs...
- Au niveau de la distribution : vibrations et chocs (transport), manutention, stockage (Température, humidité...)
- Au niveau de l'utilisation par le client : contraintes extérieures (variations de température, choc thermomécanique), vibrations (téléphone mobile), humidité, poussière, radiations (espace)

La fonction des tests de fiabilité consiste donc à reproduire chacune de ces sollicitations pour en déterminer les effets et de préférence dans des conditions in-situ et en temps réel.

Le paragraphe suivant va s'attacher à décrire les différentes techniques de tests des microsystèmes utilisées en microélectronique aux différentes étapes du cycle de vie du composant. L'idée est de faire un tour d'horizon de l'existant dans des techniques de caractérisation des MEMS pour s'assurer de l'originalité du développement de notre nouvelle méthode d'analyse.

#### **4.1. Les principaux tests**

L'analyse de la fiabilité est l'ensemble des techniques mises en œuvre pour mettre à jour les défauts des microsystèmes et remonter aux phénomènes les ayant engendrés. Ceci passe par différentes méthodes allant du simple contrôle optique en sortie de fabrication aux tests de vieillissement accéléré ou sous conditions environnementales difficiles.

##### **– Durée de vie en fonctionnement**

La durée de vie est définie en fonction du temps, c'est-à-dire par un certain nombre de cycles opérationnels du dispositif. La durée de vie varie avec l'application. Les interrupteurs doivent supporter au minimum quelques dizaines de millions de cycles de commutation. Dans des systèmes militaires, ils doivent supporter de longues périodes de stockage dans des conditions environnementales défavorables avant leur utilisation. Concernant les applications dans l'espace, les interrupteurs doivent parfois tenir plusieurs centaines de milliards de cycles. Certaines applications n'ont pas besoin d'une grande durée de vie. Par exemple, le système de conduite de missiles a seulement besoin d'environ 100 millions de cycles [Matmat09].

Malheureusement, la caractérisation de la durée de vie des interrupteurs reste encore très difficile. Sans méthode de vieillissement identifiée, la durée de vie des interrupteurs MEMS RF est caractérisée en temps réel : un ensemble d'interrupteurs est placé sous test et on mesure les performances RF périodiquement. Le nombre de cycles sans dégradation est noté et une probabilité est assignée à chaque classe de dégradation constatée. Clairement, ces procédures sont longues et coûteuses. [Ngyuen09]

### – Techniques d'observation

La première méthode d'analyse consiste en une caractérisation optique des structures MEMS pour en vérifier l'aspect général et détecter la présence éventuelle de fissures, ruptures, particules. Ces techniques regroupent toutes les méthodes d'observation classique telles que : la microscopie électronique à balayage, la microscopie à contraste de phase, l'interférométrie optique ou à modulation de phase, la vélocimétrie laser [Rembe01, De Wolf02]. Le principal avantage des méthodes d'observations est de pouvoir caractériser les réponses dynamiques des microsystèmes en fonctionnement sans les endommager.

### – Caractérisation de l'état de surface

Compte tenu des dimensions extrêmement réduites et de la structure en couches minces des MEMS, la nécessité d'une parfaite maîtrise de l'état de surface est une évidence. Par ailleurs, l'exposition à diverses conditions ambiantes, souvent extrêmes, affectent fondamentalement l'état de surface des composants aussi bien au niveau de leurs propriétés mécaniques (force d'adhésion) qu'électriques (déphasage) [Maboudian97]. La microscopie à force atomique (AFM) permet d'obtenir une première caractérisation de la topologie (rugosité) et des forces d'adhésion.

La microscopie à force Kelvin a l'intérêt particulier de permettre la caractérisation électrique de surface des diélectriques et notamment les effets de charge au niveau des aspérités de surface. Le comportement du diélectrique est analysé en réalisant une cartographie électrique de surface [Adrianus De Groot09].

La composition chimique des couches minces est déterminée grâce aux techniques analytiques standard telles que l'XPS, l'AES et le TOF-SIMS.

### – Résistance de contact

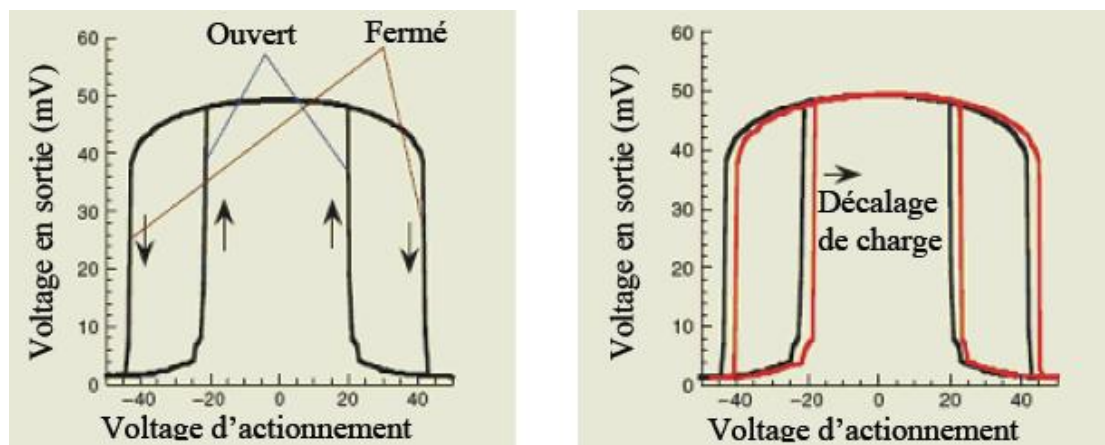
Dans le cas des micro-interrupteurs MEMS RF, la résistance du contact électrique est un paramètre critique dans les tests de fiabilité. La résistance de contact dépend de la taille de la surface en contact, de la force mécanique appliquée et de la qualité du contact métal/métal. La résistance de contact peut varier pendant l'opération et après un temps d'utilisation. La résistance de contact inclut donc la résistance de la couche métallique et la résistance de la contamination sur cette région du contact.

Les principaux mécanismes de défaillance des contacts électriques se résument à un endommagement de la surface de contact métallique, à la modification de sa rugosité ou bien encore de sa dureté ce qui est lié à une évolution microstructurale de la couche (texture, contrainte...) mais aussi à une modification mécanique (frottement). Ces deux derniers phénomènes arrivent lorsque deux métaux s'échauffent de façon répétée sur une même zone. Les mécanismes de défaillance résultent de l'impact des forces en jeu entre le haut et le bas du contact métallique. L'étude du contact électrique sera approfondie par la suite (cf. *Chapitre 4*).

### – Capacité électrique

Nous avons vu précédemment que la cause principale de collage (*stiction*) résulte de l'effet de charge dans le diélectrique conduisant à la variation de la tension d'actuation (la tension du *pull-in*) et affectant directement le comportement du composant. Les mesures de capacité sont réalisées sur des MEMS complets ou sur des structures tests de type métal-isolant-métal (MIM). Elles consistent à déterminer la variation de capacité entre l'état ouvert et l'état fermé du micro-interrupteur. Déterminée en fonction du nombre de cycles d'actuation, la variation de capacité caractérise la fiabilité du switch, un micro-interrupteur parfait devant donc présenter une variation indépendante du temps.

Des tests sont aussi nécessaires pour mesurer l'accumulation de charge sur le diélectrique. Ces tests sont très importants pour vérifier la durée de vie. La plupart des tests de charge mesure des variations de la tension d'actionnement, en particulier les tensions caractéristiques de *pull-in* et décollage (*release*). Quand on change la polarité de la tension d'actionnement, l'accumulation de charge dans le diélectrique aboutira à un changement asymétrique de ses tensions caractéristiques. Celle-ci change aussi les temps dans les états fermé et ouvert. Parfois, elle peut aussi, provoquer une mauvaise opération en augmentant la tension d'actionnement (Figure 22) [Nguyen09].



**Figure 22 : Tension d'actionnement à l'état normal et après accumulation de charges**  
[Nguyen09]

### – Fréquence de résonance

Le test de la fréquence de résonance est une estimation du rapport entre la constante de ressort mécanique et la masse efficace. La fréquence de résonance peut être mesurée en balayant la fréquence du signal d'actionnement dans l'état ouvert. On fournit un signal RF à l'entrée du dispositif et on mesure un signal détectable à la sortie. Il y a naturellement des petits signaux qui peuvent être détectés à la sortie du dispositif dans l'état ouvert mais cela dépend de l'isolation. Sous la résonance, l'isolation diminuera et un plus grand signal de sortie sera détecté. Dans ce cas aussi, une puissance RF trop importante peut augmenter les défaillances potentielles d'un dispositif de contact ohmique à la fréquence de résonance.

La plupart des interrupteurs MEMS RF ont des masses faibles et des hautes fréquences de résonance mécanique. Ils peuvent donc supporter des hauts niveaux de chocs et de vibrations sans défaillance. La fréquence de résonance pour des commutateurs typiques s'étend de 30kHz à plus de 300kHz, pouvant même arriver à quelques MHz. En outre, en encapsulant les dispositifs en présence d'un gaz, les valeurs de résonance mécanique sont réduites. Ceci permet une bonne tenue à des chocs pouvant dépasser  $1000 \text{ m.s}^{-2}$ . Les commutateurs ohmiques peuvent être plus vulnérables aux chocs au cours du fonctionnement, car des charges mécaniques supplémentaires peuvent endommager les contacts. Ainsi, il est nécessaire de faire des tests de chocs avec des dispositifs dans des conditions proches du mode d'opération de l'application.

#### – Tension d'actionnement et de décollage

Les tests des tensions d'actionnement et de décollage mesurent, respectivement, la tension minimale ( $V_{min}$ ) nécessaire pour fermer l'interrupteur et la tension maximale ( $V_{max}$ ) pour l'ouvrir (décoller). Ces tests sont utilisés particulièrement dans les dispositifs capacitifs et ils sont réalisés en fonctionnement. [Ebel07].

Le voltage très élevé peut causer des problèmes de fiabilité des interrupteurs capacitifs, car les propriétés de la couche diélectrique sont modifiées. Goldsmith [Goldsmith01] a montré que le temps de vie diminue quand on augmente la tension de 5 à 7V. Ainsi, il utilise un signal d'actionnement qui contient deux pulses avec des amplitudes différentes. Premièrement, un pulse grand amplitude est appliqué pendant un temps très court mais suffisant pour actionner l'interrupteur. Puis, un deuxième pulse plus long et de plus faible amplitude est appliqué pour fléchir la partie suspendue jusqu'à la position fermée. Cette technique minimise le temps d'application d'une tension élevée. De la même façon, Melle a démontré que la fiabilité d'un interrupteur peut être augmentée en optimisant la pente du signal d'actionnement [Melle07].

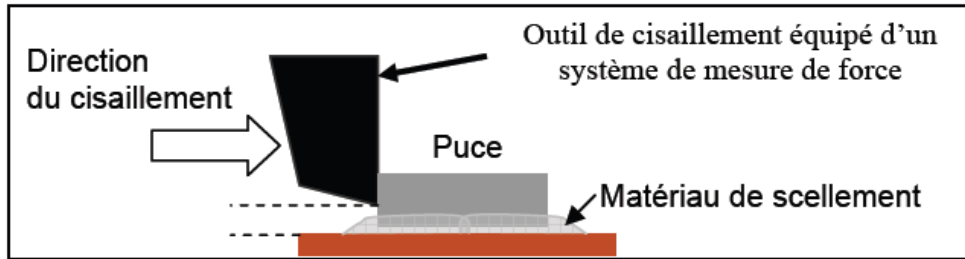
#### – Vitesse d'interruption

La vitesse d'interruption caractérise le temps nécessaire pour que l'interrupteur change d'état après un changement de la tension d'actionnement. C'est un test typique des études de fiabilité. Il s'agit d'une mesure simple qui donne des informations significatives sur les paramètres mécaniques du dispositif. Les mesures de la vitesse d'interruption peuvent aussi être utilisées pour évaluer la variation involontaire de certains paramètres. Dans le cas de composants non-hermétiques, ce test doit être réalisé dans une chambre avec un vide inférieur à 1 Torr pour réduire au maximum le coefficient d'amortissement.

La mesure de la vitesse d'interruption en fonction de la tension est plus compliquée pour les dispositifs diélectriques, car la charge électrique résiduelle du diélectrique fait varier la tension d'actionnement. Ce test est réalisé en fonctionnement.

#### – Contrainte de cisaillement à la rupture

La contrainte de rupture de cisaillement du composant MEMS, constitué de l'assemblage capot-substrat, peut être déterminée par des mesures utilisant des tests normalisés de cisaillement (Figure 23) [Peyrou06] :



*Figure 23 : Description du shear test*

#### – Herméticité du packaging

L'herméticité du packaging a été pendant longtemps une exigence spécifique aux applications militaires et spatiales. La définition et la mesure du niveau d'herméticité reposent encore aujourd'hui sur des normes et sur des hypothèses physiques (dimensions de la cavité, scellement, nature des gaz...) [Peyrou06].

Les tests d'encapsulation sont des mesures des fuites du boîtier du microsystème. Le volume d'encapsulation étant petit, ces mesures de fuites sont ordinairement basées sur la pénétration d'hélium. Une approche pour faciliter cette mesure est l'utilisation de capteurs de fuites spéciaux intégrés à l'interrupteur. Cette approche a été validée en utilisant des capteurs d'humidité, toutefois elle entraîne aussi l'accélération des défaillances [Van Spengen03].

Dans le cas des micro-interrupteurs, une autre approche pour la mesure de fuites dans des petits volumes est l'utilisation du système MEMS lui-même comme un moniteur de fuites. La vitesse d'interruption du dispositif change avec la pression à l'intérieur. Dans ce cas, le test peut être réalisé en plaçant l'interrupteur dans un environnement à haute pression ou à vide et en mesurant les variations de la vitesse d'interruption qui indiquent un changement de la pression à l'intérieur.

## 4.2. Diagnostic thermique de la fiabilité

Depuis les années 1940, donc depuis l'origine des microsystèmes, la température a été le principal paramètre à être étudié, analysé et contrôlé tout au long des processus de production jusqu'au banc de test, essentiellement à cause des conditions de production. Beaucoup d'études ont montré l'influence majeure de la température dans la fiabilité des MEMS ainsi que sa forte contribution dans les mécanismes d'endommagement. Aujourd'hui, en raison des améliorations des technologies de conception et des matériaux, l'influence de la température sur la fiabilité est largement contrôlée [Lall96, Duong05, Lafontan02, Kock09]. La prise en compte des effets thermiques dans les composants apparaît essentielle pour prédire leur performance et estimer leur durée de vie.

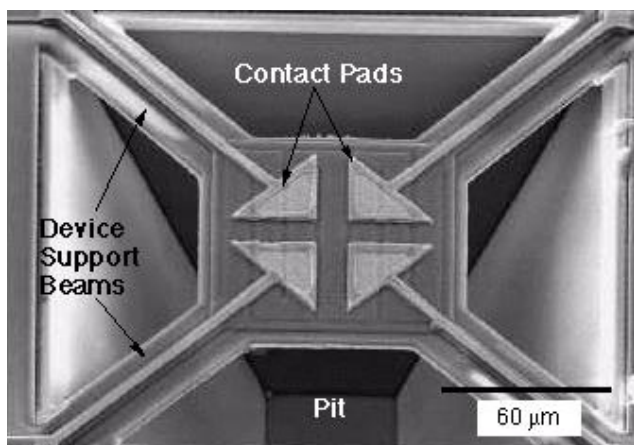
## – La thermique dans les MEMS

Il s'agit ici d'aborder une autre approche de la fiabilité des microsystèmes qui consiste à analyser et à caractériser leur comportement thermique. En effet, l'état thermique d'un composant résulte de la température ambiante et de son auto-échauffement. L'auto-échauffement est dû à la puissance dissipée par effet Joule. Il dépend de la classe de fonctionnement du système et des performances de celui-ci vis-à-vis du signal injecté.

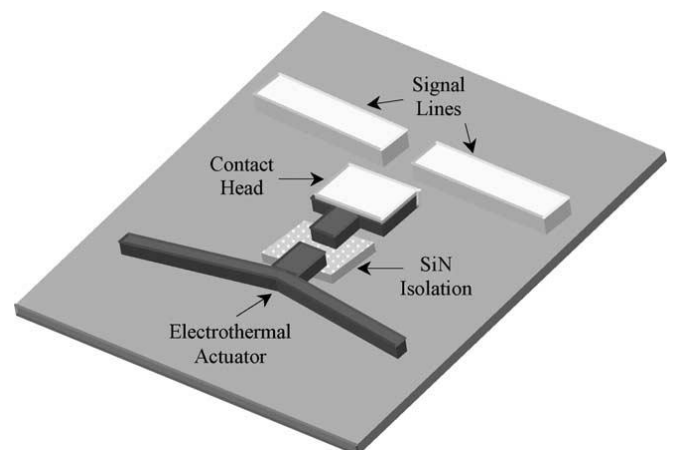
Ainsi, lorsque la puissance dissipée augmente, la température augmente, pouvant altérer de façon importante les performances du composant. La température est critique lorsqu'elle entraîne la destruction irréversible du microsystème. Cette température critique doit, bien entendu, être supérieure à la température d'échauffement opérationnelle mais dépend fortement des structures engendrées par le procédé de fabrication ainsi que de la nature des matériaux et donc de leurs caractéristiques thermiques.

Certains dispositifs comme des capteurs ou actionneurs sont conçus pour optimiser l'effet Joule afin d'améliorer leur efficacité. Pour d'autres composants (type micro-interrupteurs), au contraire, l'échauffement produit peut-être très nuisible pour leur performance et fiabilité en favorisant certains mécanismes d'endommagement, par conséquent l'effet Joule doit être réduit. Nous allons passer en revue quelques exemples de dispositifs MEMS dont le principe de fonctionnement est directement ou indirectement basé sur l'échauffement par Effet Joule, ainsi que présenter les effets parasites les plus communs générés par l'Effet Joule.

Certains dispositifs fonctionnent sur Micro-plaque-chauffante (Figure 24), tels que les sondes de gaz [Graf05, Zhang02], filtres optiques [Hohlfeld03], micro-propulseurs de combustible solide [Rossi02]. Les températures optimales pour le fonctionnement de ces dispositifs atteignent plusieurs centaines de degrés. Ainsi, afin de réduire de manière significative la puissance électrique de chauffage exigée, les structures résistives du réchauffeur sont placées sur une micro plate-forme d'isolement thermique (membrane).



*Figure 24 : Exemple de dispositif à micro-plaques chauffantes [Graf05]*



*Figure 25 : Micro-relais à actionnement électrothermique [Wang03]*

Une autre application très intéressante de l'effet Joule concerne l'actionnement électrothermique. Ce type d'actionnement a attiré tous les concepteurs de microsystèmes au fur et à mesure que les limitations des autres types d'actionneurs ont été rencontrées, et du fait que ce type d'actionnement a la capacité de développer d'importants déplacements et forces. L'actionnement électrothermique est basé sur la dilatation thermique d'un (ou deux) matériaux, résultant de l'effet Joule, pour effectuer la mise en action mécanique des structures. Les déplacements peuvent être verticaux ou horizontaux. De nombreux composants MEMS présentent un actionnement électrothermique comme des micro-relais (Figure 25) [Wang03] ou des micro-interrupteurs [Jiang06, Mayyas09].

Dans d'autres cas, au contraire, l'effet Joule doit être limité. En effet, l'énergie thermique peut favoriser le développement de défauts et donc, potentiellement, accélérer le processus de fatigue au cours de l'utilisation et entraîner un vieillissement précoce du composant. C'est le cas de nombreux dispositifs MEMS où la température est très préjudiciable, représentant jusqu'à 40% des causes de défaillance. La température influence fortement leurs performances et donc leur fiabilité en activant certains mécanismes tels que la corrosion des structures métalliques, la fissuration des parties mobiles, l'évolution microstructurale des contacts ou des interconnexions métallisées, la décharge électrostatique et la surcharge électrique.

Les industriels tentent de réduire les dégradations liées à l'échauffement par effet Joule par le choix des matériaux, favorisant la dissipation thermique, ou le développement de designs et structures adaptées [Bordas06] permettant de réduire les effets thermiques.

#### – Les méthodes d'analyse thermique

L'effet de la température sur la performance des composants et donc sur leur fiabilité fait l'objet de nombreux travaux qui s'appuient sur différentes approches et techniques d'analyses.

La plupart d'entre eux étudie les effets thermiques sur la fiabilité des MEMS à travers des modèles analytiques simples et des simulations numériques électrothermiques ou thermomécaniques [Zhu04, Yan03, ...] pour évaluer la chaleur induite par effet Joule ou résultant de transferts thermiques à travers la structure du MEMS.

D'autre part et malgré toutes les difficultés que pose la caractérisation expérimentale, différents moyens de mesures ont été développés pour évaluer la température au sein d'un microsystème. La microscopie optique en lumière polarisée permet de réaliser une cartographie du flux de température d'un composant soumis à de courtes excitations (mesure de la diffusivité par la méthode flash, strioscopie en éclairage incohérent). D'autres techniques sont basées sur l'imagerie par émission de radiations. Mais toutes ces méthodes ont pour principaux inconvénients soit d'être uniquement qualitative, soit de nécessiter un moyen d'excitation invasif (flash de lumineux, laser). La spectroscopie Raman [Aubry04] ou les techniques d'interférométrie [Pogany02 et 03] font également l'objet d'études et visent à estimer avec plus ou moins de précision des variations de températures dans les composants exposés à des flux d'ondes lumineuses.



D'autres méthodes s'appuient sur les microscopies à sonde locale. Un exemple type de microscopie à sonde locale est la microscopie à force atomique, dont l'objectif est d'obtenir la topographie de surface en contrôlant la force appliquée sur l'échantillon par une pointe de rayon de courbure nanométrique. Néanmoins, la microscopie thermique à sonde locale reste encore mal maîtrisée : les échanges thermiques entre la pointe et l'échantillon ne se restreignent pas au contact solide-solide, mais s'effectuent aussi par le transfert de gaz qui les sépare [Lefèvre06].

Les mesures de température de surface par thermographie infrarouge s'avèrent être les plus performantes pour donner des informations précises sur la distribution de la température dans les microsystèmes. Mais des problèmes de résolution spatiale, d'évaluation quantitative des températures et la nécessité de la sollicitation extrême des composants sont les principaux inconvénients auxquels sont confrontés les travaux utilisant la thermographie infrarouge ; c'est le cas de Coccetti qui détermine la cartographie thermique d'un micro-interrupteur RF à 6W avec une résolution spatiale de  $20\mu\text{m}^2$  [Coccetti05], ou de  $6\mu\text{m}^2$  sous une tension d'actuation sévère et pulsée [Kock09]. La problématique qui se pose alors vise à améliorer cette méthode de caractérisation (notamment en termes de résolution) pour l'adapter à la spécificité des microsystèmes.

## **Bilan**

LES MICROSYSTEMES n'échappent pas à l'étape cruciale de l'analyse de fiabilité. Pour cela, les structures sont observées et analysées au cours du procédé d'élaboration ainsi qu'en fin de fabrication au moyen de tests de vieillissement accéléré de façon à déterminer un comportement défaillant du dispositif à plus ou moins long terme. Il s'agit donc de prédire le fonctionnement pour pouvoir l'optimiser à la fois en fonction du rôle à remplir et de sa durée de vie désirée.

Les études de la fiabilité des microsystemes semblent donc comporter deux phases :

- la première concerne l'identification des mécanismes de défaillance à travers la réalisation de nombreux tests et analyses spécifiques ; ceci nécessitant le développement de méthodes et techniques de caractérisation de plus en plus fines, complexes et donc coûteuses ;
- à partir de là (donc des données expérimentales), la seconde phase s'attache à l'étude statistique d'apparition de ces défauts sur un grand échantillon de structures.

Dans ce contexte et pour répondre à la problématique essentielle que représente le diagnostic de la fiabilité et l'optimisation des MEMS, la solution proposée dans ce travail est de concevoir et développer une méthodologie nouvelle pour le diagnostic in-situ de l'état de fonctionnement réel et de la fiabilité des microsystemes.

La conception d'un banc de thermographie infrarouge de haute résolution associé à la mise en place d'une méthodologie d'analyse et de traitement des mesures infrarouges, permet de reconstituer des images thermiques de n'importe quel type de microsystemes en cours de fonctionnement normal ou pendant les tests de vieillissement accéléré, et ceci afin de réaliser une analyse prédictive fine et rapide de leur fiabilité.



## CHAPITRE 2

# CONCEPTION ET DEVELOPPEMENT DU BANC HAUTE RESOLUTION

<b>1. La thermographie infrarouge</b>	<b>- 41 -</b>
1.1. Rappel sur les ondes électromagnétiques	- 41 -
1.2. Définition des grandeurs radiatives	- 43 -
1.3. Le Rayonnement thermique	- 44 -
<b>2. Mesure de température avec une caméra thermique</b>	<b>- 48 -</b>
2.1. De l'image à la température	- 48 -
2.2. Etude de la chaîne de mesure	- 49 -
2.3. L'étalonnage d'une caméra en température	- 56 -
<b>3. Banc de thermographie infrarouge pour l'analyse de microsystemes</b>	<b>- 60 -</b>
3.1. L'objet thermique : les microsystemes	- 60 -
3.2. La caméra infrarouge	- 62 -
3.3. L'objectif de microscope pour la thermographie à haute résolution	- 66 -
3.4. Le système de commande et d'acquisition	- 70 -
<b>4. Etude des phénomènes perturbateurs et leur correction</b>	<b>- 71 -</b>
4.1. L'émissivité et sa détermination	- 72 -
4.2. L'effet « Narcisse » et la correction différentielle mise en œuvre	- 75 -
4.3. Traitements mis en œuvre pour la thermographie à haute résolution	- 80 -
<b>5. Evaluation du banc de thermographie infrarouge</b>	<b>- 84 -</b>
5.1. Etude du temps d'intégration	- 84 -
5.2. Evaluation du bruit	- 84 -
5.3. Mesure de la résolution spatiale	- 87 -
<b>Bilan</b>	<b>- 89 -</b>



CE CHAPITRE décrit la conception et la mise en œuvre d'un banc de thermographie infrarouge permettant, *via* une caméra infrarouge, une optique infrarouge spécifique et une méthode de traitement adaptée, des mesures in-situ, haute résolution et quantitatives de la distribution thermique des microsystemes, dans le but de localiser les échauffements puis en prédire et estimer les défaillances. Nous commencerons par présenter rapidement les notions de physique en thermographie infrarouge qui nous permettront de définir les grandeurs importantes pour réaliser des mesures quantitatives de champ de température. Ensuite, le banc de thermographie infrarouge développé lors de cette étude sera décrit et ses performances seront évaluées. Ainsi nous verrons comment mesurer un champ de température à l'aide d'une caméra infrarouge et les précautions qu'il faut prendre pour avoir une mesure quantitative la plus fiable possible. Enfin, l'optimisation du dispositif et des optiques infrarouges sera réalisée dans le but d'améliorer la résolution des mesures thermiques.

## 1. La thermographie Infrarouge

Comme beaucoup de technologies, la thermographie infrarouge est basée sur des phénomènes découverts il y a presque 200 ans. Le rayonnement infrarouge a été découvert par William Herschel en 1800. Mais ce n'est qu'en 1964 que la première caméra infrarouge fut développée, et ce n'est que dans le début des années 1980 qu'apparaissent les premières applications militaires. Cette technique de mesure est maintenant de plus en plus employée en mécanique des matériaux pour quantifier les transformations de phase, (Shaw97, Iadicola02a, Pieczyska04, Schlosser07), les phénomènes de plasticité (Louche99, Chrysochoos00, Louche01, Louche05, Giancane09) et le comportement en fatigue mécanique (Boulanger04, Doudard07).

Dans cette première partie nous présentons l'origine et les lois du rayonnement infrarouge, l'objectif étant d'introduire les notions physiques de base nécessaires pour notre étude [Gaussorgues99, Cabannes01, Pajani01].

### 1.1. Rappel sur les ondes électromagnétiques

La lumière ainsi que le rayonnement infrarouge sont des rayonnements électromagnétiques, usuellement modélisés par des ondes électromagnétiques. Une onde électromagnétique est un ensemble de 2 vecteurs orthogonaux indissociables, les champs électrique  $\vec{E}$  et magnétique  $\vec{B}$ , se propageant dans l'espace et dont les amplitudes varient sinusoidalement avec le temps.  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  sont perpendiculaires à la direction de propagation comme l'illustre la Figure 26 :

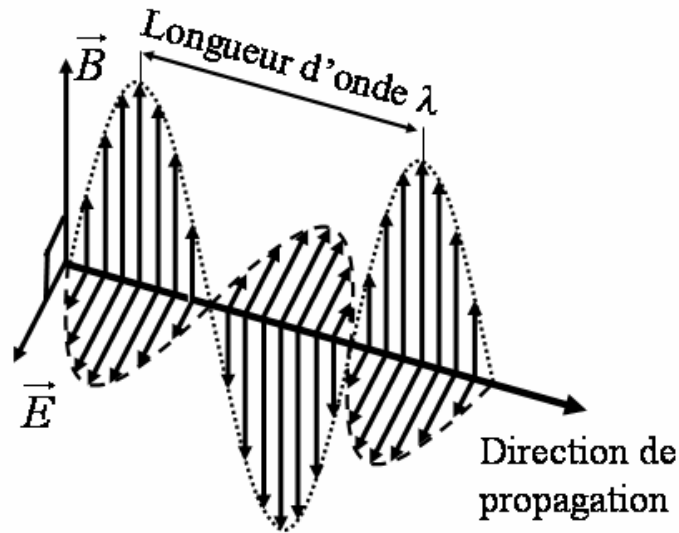


Figure 26. Onde électromagnétique [Berthel07]

Une onde électromagnétique d'une certaine largeur spectrale peut se décomposer en une superposition d'ondes monochromatiques de fréquences différentes. Trois paramètres importants caractérisent une onde monochromatique :

- sa longueur d'onde  $\lambda$  (en m) qui correspond à la distance entre deux crêtes d'une même oscillation
- sa vitesse de propagation  $c$  (égale à la vitesse de la lumière dans le vide :  $c=3.10^8$  m/s)
- sa fréquence  $f=c/\lambda$ . La fréquence indique le nombre d'oscillations par seconde.

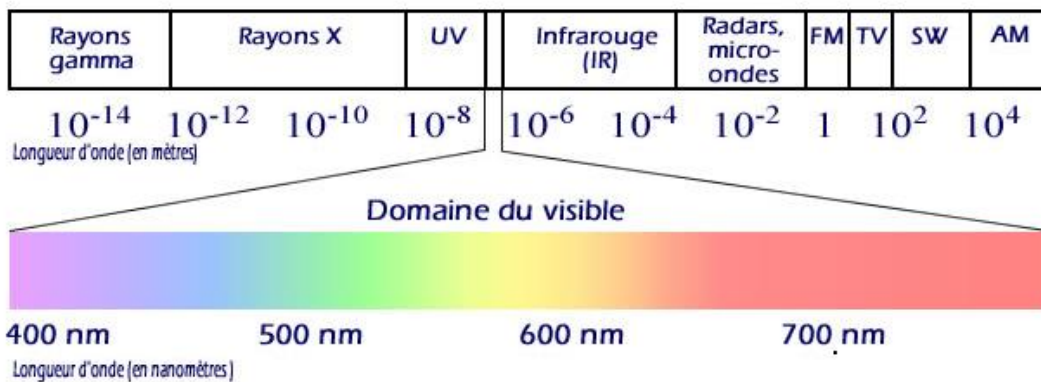


Figure 27. Le spectre électromagnétique [Lag-net]

La Figure 27 donne une représentation du spectre électromagnétique en fonction de la longueur d'onde du rayonnement. Le spectre électromagnétique est en effet souvent divisé artificiellement en gammes de longueur d'onde : ondes gamma, X, ultra-violet, visible, infrarouge, radio. Nous pouvons noter que le domaine visible s'étend de 0,4 à 0,8  $\mu\text{m}$  et la bande infrarouge de 0,8 à 1000 $\mu\text{m}$ .

## 1.2. Définition des grandeurs radiatives

Nous pouvons distinguer trois types de densité de puissance émise par un corps : l'intensité ou flux, la luminance et l'existance.

### – Le Flux $\Phi$

C'est la grandeur instantanée d'un débit de rayonnement, ou puissance instantanée rayonnée par une surface  $S$ . Le flux quantifie un débit émis par une source, transporté par un faisceau, ou absorbé par un récepteur. Dans le cas d'une source finie, invariante au cours du temps, le flux est l'énergie totale (pour toutes les longueurs d'ondes et dans toutes les directions) émise par cette source en une seconde et s'exprime donc sous la forme :

$$\Phi = \frac{de}{dt} \quad (\text{en W}) \quad (5)$$

### – La Luminance $L$

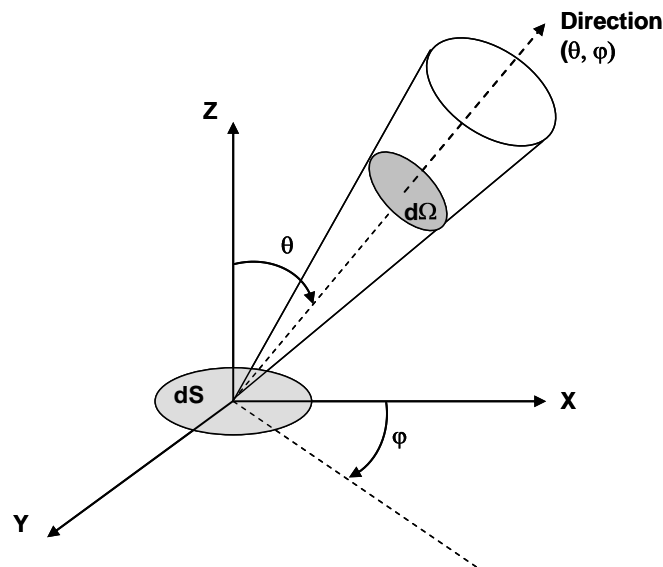


Figure 28. Luminance d'une source étendue  $dS$

La luminance ( $L$ ) est le flux émis ( $\Phi$ ) par unité d'angle solide ( $d\Omega$ ) autour d'une direction  $(\theta, \varphi)$ , et par unité de surface ( $dS$ ), par une source étendue ( $\theta$  est l'angle polaire entre une direction quelconque et la normale à  $dS$ ) :

$$L = \frac{d^2\Phi}{\cos\theta dS d\Omega} \quad (\text{en W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}) \quad (6)$$

La Figure 28 illustre la luminance d'une source étendue  $dS$ . La source est dite lambertienne si la luminance ne dépend pas  $\theta$  et  $\varphi$ , c'est-à-dire si elle est la même dans toutes les directions. La luminance permet de caractériser la perception du rayonnement par un observateur.



### – L'émittance R

L'émittance R (ou exittance) correspond au flux émis par unité de surface d'une source étendue dans tout un hémisphère. Il s'agit donc de la luminance intégrée sur toutes les directions d'un demi-espace :

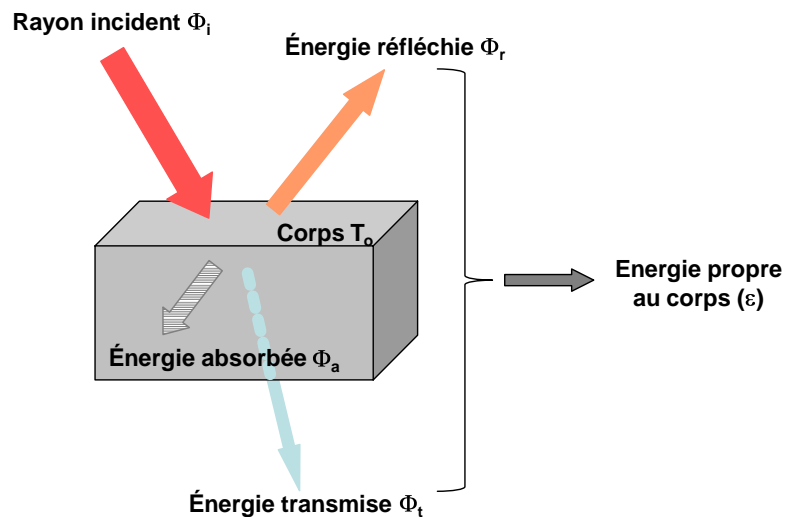
$$R = \frac{d\Phi}{dS} = \int_{\Omega} L \cos\theta \, d\Omega \quad (\text{en } \text{W}\cdot\text{m}^{-2}) \quad (7)$$

Pour une surface lambertienne, la luminance et l'émittance sont donc liées par la relation suivante :

$$R = L \pi \quad (8)$$

### 1.3. Le rayonnement thermique

Comme l'illustre la Figure 29, le rayonnement mesurable d'un corps en équilibre thermique dont la température est  $T_o$  résulte de la superposition de différents phénomènes :



*Figure 29. Bilan énergétique*

En effet, lorsqu'un rayonnement incident ( $\Phi_i$ ) rencontre un objet :

- le corps réfléchit une partie de l'énergie rayonnée ( $\Phi_r$ ) par le milieu ambiant,
- une autre partie du rayonnement est absorbée par l'objet ( $\Phi_a$ ),
- et dans le cas d'objet transparent, le reste est transmis ( $\Phi_t$ ).

Chacun de ces flux dépend de la longueur d'onde. Ils sont reliés par les relations suivantes :

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t \quad (9)$$

$$\Phi_a(\lambda) = \alpha(\lambda) \Phi_i(\lambda) \quad (10)$$

$$\Phi_r(\lambda) = \rho(\lambda) \Phi_i(\lambda) \quad (11)$$

$$\Phi_t(\lambda) = \tau(\lambda) \Phi_i(\lambda) \quad (12)$$

où  $\lambda$  est la longueur d'onde et  $\alpha$ ,  $\rho$  et  $\tau$  sont respectivement les facteurs d'absorption, de réflexion et de transmission. De ces relations nous pouvons également déduire l'expression suivante :

$$a(\lambda) + r(\lambda) + t(\lambda) = 1 \quad (13)$$

On peut noter que pour un corps opaque on a :  $\tau(\lambda) = 0$  et  $\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) = 1$  alors que pour un corps transparent on a :  $\alpha(\lambda) = 0$  et  $\rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$ .

### – Le corps noir

Nous venons de voir que les grandeurs radiatives utiles dépendent d'un grand nombre de facteurs et en particulier de la longueur d'onde (aspect chromatique), de la direction (aspect directionnel) mais aussi de la température  $T$ .

Dans le cadre des analyses par thermographie infrarouge, et pour simplifier dans un premier temps la démarche, nous faisons intervenir un « objet idéal », le corps noir, qui sert de référence pour étudier le rayonnement de corps réels.

Le corps noir (CN) est défini comme étant un corps qui, à une température donnée, émet par rayonnement tout le flux énergétique. Mais si le corps noir est un « émetteur parfait » il est aussi un « absorbeur parfait » en ayant pour propriété d'absorber l'intégralité du rayonnement incident qu'il reçoit, quelle qu'en soit la longueur d'onde et la direction.

Le corps noir étant maintenant défini, nous allons évoquer ses lois de rayonnement pour ensuite s'intéresser aux lois d'émission des corps réels.

Par convention, dans la suite de ce rapport, toutes les grandeurs relatives au corps noir seront notées avec l'exposant ° :  $L^\circ$ ,  $R^\circ$ , ...

### – La Loi de Planck

Planck a étudié le rayonnement thermique émis par un corps noir en équilibre thermique avec un thermostat. En 1901, il établit l'équation fondamentale du rayonnement qui exprime la densité

spectrale  $\frac{dR^\circ(\lambda, T)}{d\lambda}$  d'un corps noir en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  (en m) et de la température  $T$  (en K) :

$$\frac{dR^\circ(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (\text{en W.m}^{-3}) \quad (14)$$

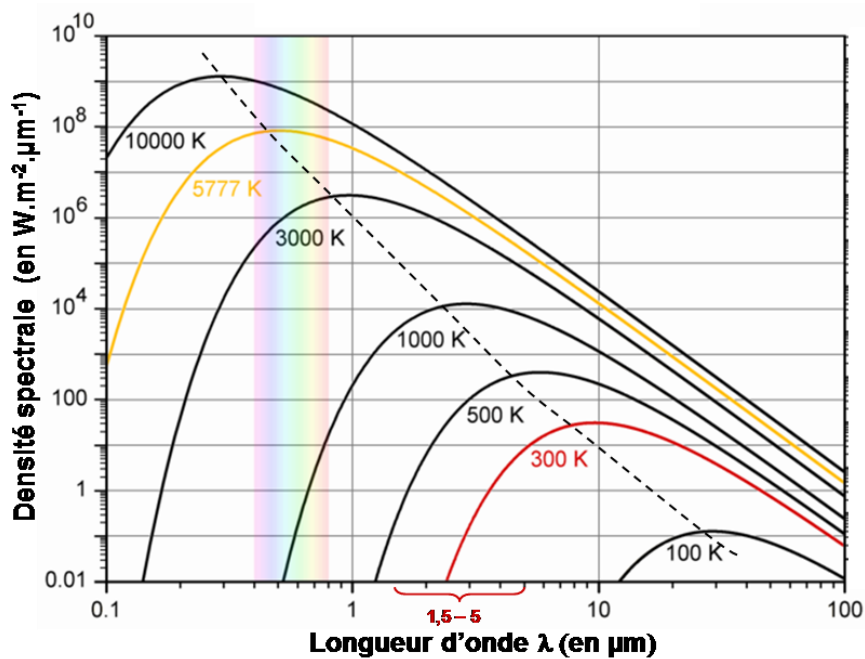
Les 2 constantes  $C_1$  et  $C_2$  sont reliées aux constantes physiques fondamentales :  $c$  la vitesse de la lumière,  $h$  la constante de Planck et  $k$  la constante de Boltzmann, sous la forme :

$$C_1 = 2\pi^5 \frac{15}{4} \frac{h^6}{15 \pi^5 k^3} = 3,74183210^{-16} \text{ (en W.m}^{-2}\text{)} \quad (15)$$

$$C_2 = \frac{ch}{k} = 1,4388.10^{-2} \text{ (en m.K)} \quad (16)$$

La Figure 30 illustre la loi de Planck à partir de la luminance pour différentes températures. Il est important de noter que :

- toutes ces courbes passent par l'origine et sont tangentes en ce point à l'axe des abscisses ;
- l'axe des abscisses est l'asymptote de ces courbes lorsque la longueur d'onde tend vers l'infini ;
- ces courbes passent toutes par un maximum qui est d'autant plus grand que la température est élevée ; la longueur d'onde correspondant à ce maximum est d'autant plus petite que la température du corps est élevée ;
- pour une longueur d'onde donnée, la luminance est d'autant plus élevée que la température est élevée.



*Figure 30. Distribution de la luminance du corps noir en fonction de la longueur d'onde pour différentes températures [Techno-net]*

Nous utiliserons dans le cadre de ce travail, une caméra fonctionnant dans la gamme de longueur d'onde comprise entre 1,5 et 5  $\mu\text{m}$ .

### – Les Loïs dérivées de la Loi de Planck

La loi de Wien définit la valeur  $\lambda_{\max}$  de la longueur d'onde pour laquelle l'exittance monochromatique  $R_{\lambda_{\max}}^{\circ}$  est maximum :

$$\lambda_{\max} T = 2898 \mu\text{m.K} \quad (17)$$

Cette relation permet de situer très rapidement le domaine infrarouge où se situe le rayonnement thermique, suivant la température, en sachant que l'exittance décroît très brutalement du côté des courtes longueurs d'onde et beaucoup moins vite du côté des grandes longueurs d'onde.

Un corps noir obéit également à la loi de Lambert (4). En intégrant l'équation de Planck sur tout le spectre électromagnétique nous obtenons la loi de Stefan-Boltzmann :

$$R^{\circ}(\lambda, T) = \sigma_o T^4 \quad (18)$$

où  $\sigma_o = 5,6703210^8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$  est la constante de Stefan-Boltzmann.

Ce sont ces deux dernières expressions qui permettent de relier le flux rayonné mesuré par un capteur infrarouge à la température du corps noir observé.

Le corps de référence en thermographie infrarouge étant défini, nous allons maintenant passer aux propriétés d'un objet réel.

### – Les corps gris

Le corps noir étant l'élément de référence du rayonnement, l'évaluation de l'émission d'un corps réel se fera par rapport à celle du corps noir placé dans les mêmes conditions de température et au moyen d'un facteur de comparaison appelé l'émissivité  $\varepsilon$ . Ce facteur exprime le rapport entre l'émission d'un objet réel et celle d'un corps noir. En effet, ce qui différencie un objet réel d'un corps noir est que le corps réel émettra toujours un flux inférieur au corps noir placé dans les mêmes conditions car son facteur d'absorption est différent de 1.

L'émissivité dépend du matériau, de sa surface, de la direction d'observation  $(\theta, \varphi)$ , de sa température  $(T)$  et de la longueur d'onde considérée  $(\lambda)$ . L'émissivité spectrale directionnelle est définie par le rapport de luminance du corps réel dans la direction  $(\theta, \varphi)$  et celle du corps noir de référence à la même température :

$$\varepsilon(\lambda, \theta, \varphi, T) = \frac{L_{\lambda}(\theta, \varphi, T)}{L_{\lambda}^{\circ}(T)} \quad (19)$$

Si pour un corps réel, son émissivité est constante quelle que soit la longueur d'onde, ce type de corps est dit « gris ». Cette approche permet de simplifier la résolution des problèmes. Lorsqu'il ne sera pas possible de considérer le corps comme gris pour l'ensemble du spectre, cette approximation pourra être réduite à des intervalles de longueur d'onde sur le spectre considéré.

## 2. Mesure de la température avec une caméra thermique

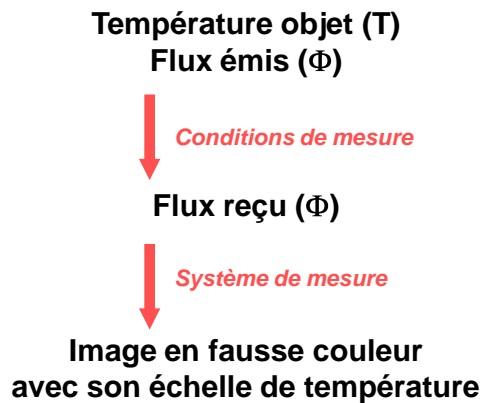
LA THERMOGRAPHIE infrarouge consiste à mesurer le rayonnement infrarouge émis par un corps. Dans ce chapitre, nous montrons que pour réaliser des mesures précises avec des caméras, il convient d'étudier à la fois les conditions de mesure ainsi que chaque partie du système en décrivant l'ensemble de la chaîne radiométrique. La connaissance du système de mesure passe également par le choix des paramètres et des conditions d'analyse, puis par une phase d'étalonnage afin de justifier notre choix.

### 2.1. De l'image à la température

Une image est une importante source d'informations sur la scène tridimensionnelle qu'elle représente. L'intensité de chaque pixel est liée à l'éclairement de la surface observée, mais aussi à sa réflectance, son orientation, ou encore sa température. Réaliser la mesure d'une de ces grandeurs suppose donc :

- que les conditions de mesure permettent de lier le flux reçu par le capteur à la grandeur d'intérêt.
- que la connaissance du système de mesure soit suffisante pour lier le flux incident à l'intensité du pixel (signal de sortie).

La mesure de la température, sans contact (Figure 31), avec une caméra thermique est donc une mesure indirecte.



*Figure 31. Principe de mesure de température sans contact*

Ces deux étapes sont régies par des effets bien différents :

- **conversion température-flux** : elle est représentée par la loi de Planck (introduite précédemment) et la prise en compte des différents facteurs d'influence (émissivité du matériau, réflexions). Ce sont les conditions de mesure, les propriétés du matériau observé et l'environnement qui déterminent la simplicité de la relation température-flux.

- **conversion flux-signal de sortie** : elle concerne la modélisation du système de mesure, composé d'un filtre, de son objectif, de la caméra et du bus de communication. C'est ici qu'interviennent la technologie utilisée et le détecteur de la caméra.

L'attention à porter à chacune de ces deux phases dépend de ce qu'on attend du système :

- Si les conditions de mesure ainsi que le système sont invariants, il est possible d'utiliser directement l'image pour repérer une température. C'est suffisant pour contrôler la stabilité d'une température ou pour déterminer la fin d'un chauffage. Cette application n'est pas à proprement parler de la mesure et reste très limitée quant à ses applications, puisqu'on ne peut repérer qu'un nombre restreint de températures.
- En analysant le système de manière plus précise, on accède à l'imagerie thermique. L'imagerie thermique est la représentation non quantitative du champ de température. On parle de champ de température apparente. La plupart du temps le système constructeur brut est étalonné (c'est-à-dire que la relation flux-signal de sortie est connue), mais ce flux est converti en température (apparente) sans se préoccuper des conditions réelles de mesure. Ceci est suffisant pour la surveillance, la détection de défauts par exemple, ou la reconnaissance de forme, mais insuffisant dans notre étude pour déterminer précisément la température des microsystèmes en fonctionnement.

Les mesures thermographiques ont été réalisées avec une caméra SC6000 SH (Annexe 1) conçue et fabriquée par la société FLIR. Les mesures de température passent par la connaissance de la chaîne d'acquisition, ce qui permet de lier ses caractéristiques physiques, géométriques et thermiques au flux reçu par le détecteur. Ceci nécessite également de connaître les conditions de mesure et le système de mesure puis de mettre en place une procédure d'étalonnage adéquate afin de lier les flux à l'image de la distribution de la température.

## 2.2. Etude de la chaîne de mesure

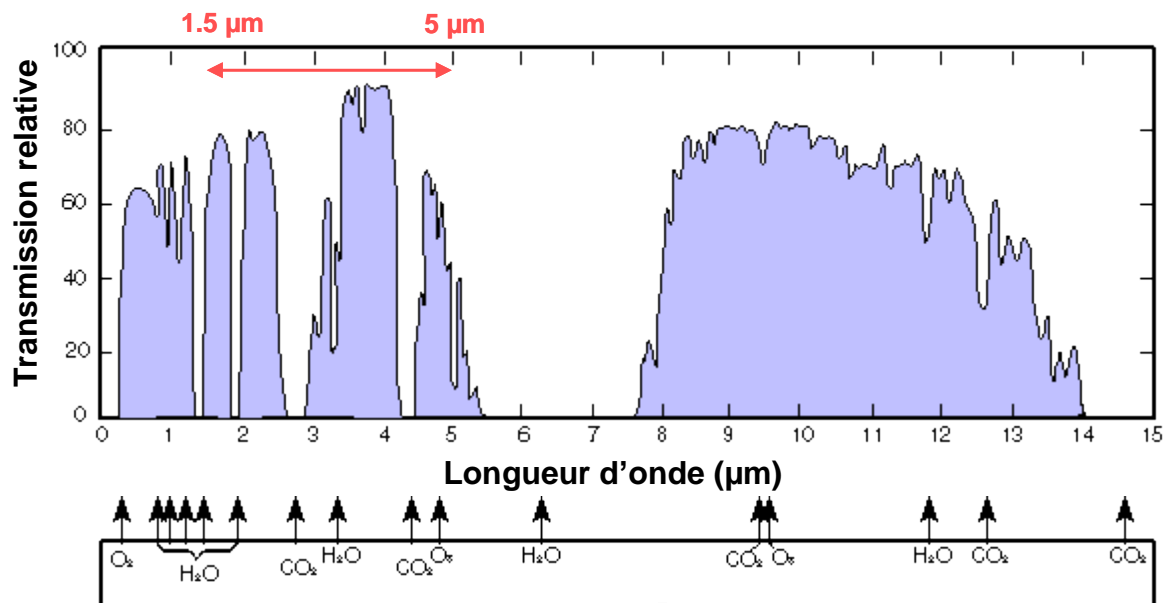
Il s'agit de décrire l'ensemble de la chaîne d'acquisition, des différentes sources rayonnantes au détecteur en passant par les différents facteurs extérieurs influençant la mesure dans le domaine spectral de fonctionnement de la caméra (1,5 à 5  $\mu\text{m}$ ).

### L'environnement

Le flux mesuré, issu d'une surface S, est la somme du flux thermique émis par S et d'un flux réfléchi, initialement émis par l'environnement. L'environnement est constitué de différentes sources :

- l'atmosphère environnante de l'échantillon influe sur les mesures, ainsi et dans une plus large mesure, c'est l'atmosphère du laboratoire d'analyse tout entier dont l'environnement doit être contrôlé et la température prise en compte,
- les autres « sources », issues de tout autre corps chaud, constituent une source de rayonnement. Le soleil est l'une de ces sources, la lumière du laboratoire aussi, ainsi que toute personne située dans l'environnement proche de la caméra.

Le milieu de transmission peut modifier le rayonnement qui le traverse. L'absorption de l'atmosphère est prise en compte par les constructeurs durant les phases d'étalonnage des appareils de thermographie. Néanmoins, dans notre cas, et pour le développement d'un système complexe, l'absorption atmosphérique est un facteur important à considérer. En effet, le spectre de l'atmosphère (Figure 32) montre que des raies d'absorption gênantes (notamment celles de l'eau) se situent dans la plage de 1,5 à 5  $\mu\text{m}$ .



*Figure 32. Absorption monochromatique de l'atmosphère*

## L'objet

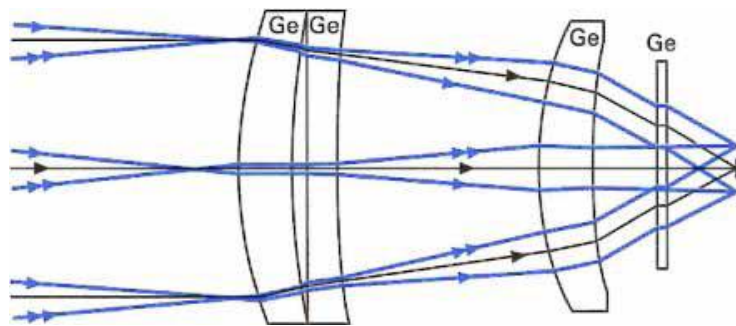
En général, l'objet est un modèle adapté spécifiquement pour l'étude, tant au niveau du design qu'au niveau dimensionnel (taille macroscopique à l'échelle centimétrique voire décimétrique, forme géométrique simple, surface plane et homogène...). De plus, des traitements de surface (usinage, peinture...) sont mis en œuvre pour améliorer les conditions et la sensibilité des mesures.

## L'objectif infrarouge

L'objectif sert à focaliser le rayonnement, issu d'un angle solide donné et d'une direction donnée, sur le pixel, et à augmenter la sensibilité du système selon son ouverture. Les principaux problèmes qu'il pose sont l'atténuation du rayonnement lorsqu'on s'éloigne du centre de l'image et les aberrations chromatiques.

L'objectif de Petzval, présenté dans la Figure 33, est l'un des plus utilisés dans l'infrarouge, chaque fois que l'on recherche la limite de diffraction sur une grande ouverture et un champ assez important. Dans la bande 3 à 5  $\mu\text{m}$ , on utilise des doublets en silicium/germanium pour corriger le chromatisme.

L'astigmatisme provenant du groupe de tête est partiellement compensé par le second groupe grâce à une translation de pupille. On laisse un peu d'astigmatisme résiduel pour compenser la courbure de champ de Petzval, qui représente l'aberration la plus sévère.



*Figure 33. L'objectif de Petzval [Pajani01]*

Dans notre chaîne thermographique, la partie « optique » est une composante essentielle puisqu'elle influence la résolution finale du système. L'objectif vendu avec la caméra n'est, dans notre cas, pas suffisant pour obtenir la résolution nécessaire à l'analyse thermique des microsystèmes. Aussi un objectif supplémentaire de type « objectif de microscope » sera ajouté pour atteindre la résolution spatiale visée.

## Détecteurs et technologies

La fonction d'un détecteur de rayonnement est d'absorber et de convertir l'énergie du rayonnement incident. La conversion produit soit des électrons dans la détection quantique, soit de la chaleur dans la détection thermique. Dans le cas des détecteurs quantiques et pour une composition spectrale déterminée, cette réponse varie linéairement avec le flux de rayonnement alors que les détecteurs thermiques ne présentent, en principe, pas de sélectivité spectrale du fait de leur sensibilité à l'énergie du rayonnement et non aux photons. Au niveau technologique, leur principale différence réside dans le fait que les détecteurs quantiques nécessitent un système de refroidissement mais pas les détecteurs thermiques [Gaussorgues99, Pajani01]. Les détecteurs se caractérisent par :



- **Leur sensibilité**, définie comme le rapport du signal  $V_d$  qu'il délivre au flux  $\Phi$  qu'il reçoit :

$$s = \frac{V_d}{\Phi} = \frac{V_d}{EA} \quad (\text{en V.W}^{-1}) \quad (20)$$

Avec A, la surface du détecteur et E son éclairement c'est-à-dire le flux surfacique incident.

- **Leur temps de réponse** induisant une fréquence maximale de fonctionnement.
- **Le minimum de flux détectable**, défini comme la *puissance équivalente au bruit* (PEB), flux induisant un signal  $V_n$  égal à la valeur efficace du bruit superposé au signal :

$$PEB = \frac{V_n}{s} = \frac{EA V_n}{V_d} \quad (\text{en W}) \quad (21)$$

La détection des faibles flux de rayonnement est limitée par le bruit propre du détecteur, fonction aléatoire se superposant à sa réponse au rayonnement incident.

- **La détectivité**  $D = \frac{1}{PEB}$  est l'une des grandeurs essentielles caractérisant les performances d'un détecteur. Elle définit la limite de détection. A partir de la détectivité, la détectivité spécifique  $D^*$  norme la détectivité à l'unité de bande passante et à l'unité de surface et permet ainsi de comparer des détecteurs entre eux. C'est un élément important de choix pour une caméra thermique. Il s'agit de rechercher la détectivité spécifique maximale.

La Figure 34 donne des exemples de détectivité spécifique de détecteurs utilisés en imagerie thermique et en thermographie. La détectivité spécifique dépend du mode de fonctionnement du détecteur, de la longueur d'onde, de la température du détecteur, de l'ouverture angulaire du faisceau incident et de la température de l'environnement du détecteur. Les courbes en tirets définissent le maximum théorique de  $D^*$ . La réponse spectrale du système dépend bien-sûr du matériau semi-conducteur utilisé : Si pour le visible, InSb ou PtSi pour la plage 2 à 5  $\mu\text{m}$ , HgTeCd entre 8 et 13  $\mu\text{m}$ .

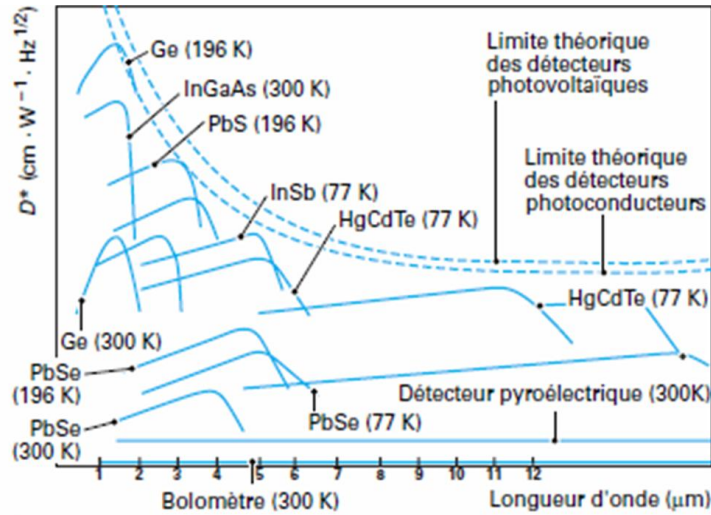


Figure 34. Détections spécifiques de quelques détecteurs [Pajani01]

Parmi les différents matériaux, l'antimoniure d'indium (InSb) est un composant photovoltaïque très stable et sa sensibilité est constante sur une très grande dynamique. C'est le meilleur détecteur pour la bande 2 à 5 $\mu\text{m}$ . De plus, par son haut rendement quantique (supérieur à 80 %), il est adapté à la thermographie rapide comme l'exige les mesures in-situ dans les microsystèmes.

Le fonctionnement du système de détection d'une caméra thermique peut se schématiser par la Figure 35. Le flux infrarouge traversant la lentille est converti en signal électrique par le détecteur. Ce signal est ensuite lui-même converti en signal numérique à l'aide d'un convertisseur. L'étape suivante consiste à corriger la non-uniformité du détecteur et aussi à remplacer les pixels « défectueux », étape qui fait partie du protocole d'étalonnage du constructeur. Le signal corrigé doit ensuite être traité au niveau informatique par un logiciel de traitement (ThermoCam, etc.) afin d'étalonner en température, enregistrer et finalement visualiser les champs de température sur une image en fausses couleurs.

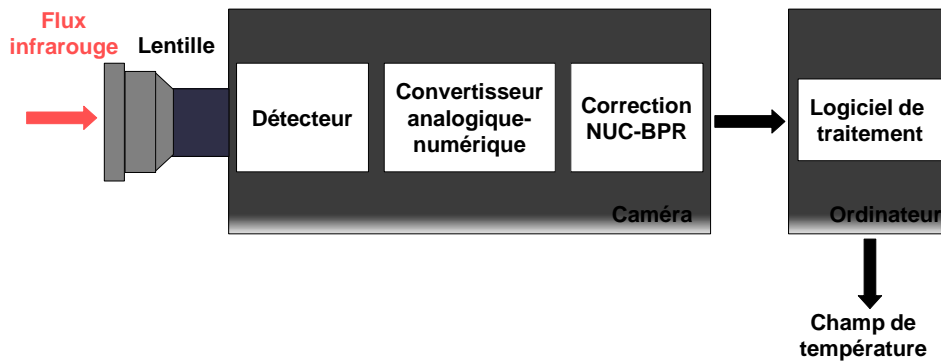


Figure 35. Principe du système de détection

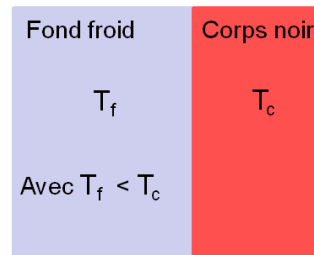
D'autres caractéristiques sont plus particulièrement spécifiques aux systèmes infrarouges : les deux principales sont le NETD et le MRTD [Gaussorgues99].

- La sensibilité thermique des systèmes infrarouges est représentée par le NETD (*Noise Equivalence Temperature Difference*) et est défini comme l'écart thermique  $\Delta T$  tel que le rapport signal sur bruit est égale à 1.

$$N.E.T.D. = \frac{4N^2 \sqrt{\Delta\nu}}{\tau_{op} \sqrt{A}} \cdot \frac{1}{\int d \frac{(dR/d\lambda)}{dT} D^* \epsilon d\lambda}$$

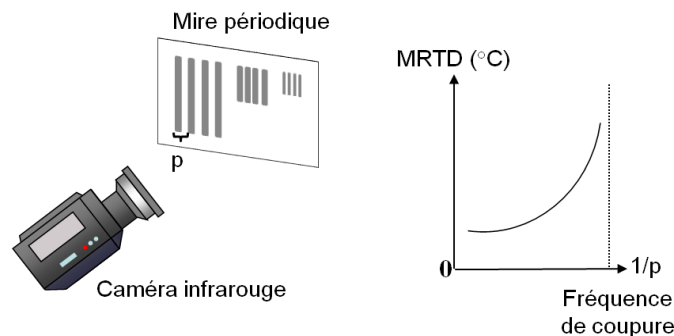
Avec  $N$  est l'ouverture de l'optique ;  $\Delta\nu$  est la bande passante électrique ;  $A$  correspond à la surface sensible du détecteur ;  $\tau_{op}$  le facteur de transmission de l'optique et  $D^*$  la détectivité spécifique du détecteur.

La mesure du NETD est présentée sur la Figure 36. Un corps noir à température définie  $T_c$  est superposé à un fond de température bien inférieure  $T_f$ . Le NETD fournit des informations importantes en termes de sensibilité des détecteurs infrarouges ; l'écart thermique entre le corps noir chaud et le fond froid doit être largement supérieur au NETD du système.



**Figure 36 : Mesure de l'écart de température équivalente au bruit (NETD)**

- Le **MRTD** (*Minimum resolvable temperature difference*) exprime la sensibilité d'une caméra thermique qui correspond à la différence minimale de température séparable. C'est une grandeur qui permet de relier la résolution thermique à la discrimination spatiale du système. La définition de ce critère de résolution thermique utilise la séparation visuelle dans l'image, des traits d'une mire objet à structure périodique (mire de Foucault) dont le contraste thermique sera aussi faible que possible. La sensibilité sera d'autant plus grand que le MRTD est petit. Cependant l'expérience montre que la MRTD augmente fortement avec la fréquence spatiale de la mire comme le présente la Figure 37, avec l'apparition d'une fréquence de coupure.



**Figure 37 : Mesure de l'écart minimum de température séparable (MRTD)**

Notre laboratoire possède trois caméras acquises au fur et à mesure de l'avancée des développements technologiques des constructeurs et des travaux menés en thermographie. Chaque caméra est utilisée, compte tenu de ses caractéristiques, à des applications spécifiques.

La caméra *Agema Thermovision 900 SW* est la première caméra thermique du laboratoire SMS. Son détecteur en InSb couvre la gamme spectrale de 2 à 5,6  $\mu\text{m}$  pour une gamme de température allant de -10 à 500°C. Du fait de sa faible résolution mais de sa large gamme de température, elle est utilisée spécifiquement pour les mesures d'émissivité des matériaux que l'on présentera en paragraphe 4.1. Les caractéristiques précises de cette caméra sont exposées en Annexe 2.

La caméra de FLIR *Merlin Mid*, a très vite été acquise par le laboratoire quand la forte demande industrielle a permis d'envisager la potentialité que pourraient apporter des mesures thermiques locales. Son détecteur en InSb possède une matrice de 320 x 256 pixels, il fonctionne dans la gamme des 3-5  $\mu\text{m}$ . Cette caméra est présentée de manière détaillée en Annexe 3.

La caméra *SC6000SH* de chez FLIR, est la dernière caméra achetée par le laboratoire pour répondre plus spécifiquement, du fait de ses caractéristiques (Annexe 1), aux performances requises dans la mise en place du banc de thermographie infrarouge haute résolution. La dimension de la matrice du détecteur est de 640 x 512 pixels, chaque pixel ayant une dimension de 25  $\mu\text{m}$ . De plus, la large gamme spectrale 1,5 - 5  $\mu\text{m}$ , ainsi que la haute fréquence numérique (jusqu'à 125 KHz, en fonction de la taille de la fenêtre) permettent d'assurer à la fois une haute sensibilité du système et une grande vitesse d'acquisition.

## **Bilan**

Le problème majeur posé en thermographie est l'analyse du rayonnement issu de la scène thermique. Il n'est, en effet, pas facile de réaliser des mesures quantitatives de champ de température du fait que de nombreux facteurs environnementaux et paramètres techniques peuvent, de manière conséquente, perturber les mesures. Ainsi, pour concevoir le banc de thermographie infrarouge tous les éléments de la chaîne de mesure doivent être pris en compte et un certain nombre de considérations doivent être faites :

- un objet de référence de type « corps noir » est utilisé pour la calibration du système ; la méthode d'étalonnage de la caméra thermique est présentée au paragraphe 2.3. ;
- le banc de thermographie infrarouge est aligné de telle sorte que la caméra infrarouge soit placée perpendiculairement à la surface à analyser (le paragraphe 3.4. décrit le montage du banc) ; ainsi et compte tenu de l'ouverture du système optique, la dépendance de l'émissivité par rapport à la direction d'observation ( $\theta, \varphi$ ) pourra être négligée ;
- l'émissivité de chaque échantillon sera déterminée expérimentalement au moyen de la méthode spécifique des « deux températures » présentée au paragraphe 4.1. ;
- les conditions environnementales (température ambiante, lumière...) seront contrôlées de façon à limiter au maximum aussi bien les rayonnements parasites que les variations de température ambiante entre les mesures ;
- les éventuels rayonnements parasites, propres au système lui-même, seront supposés constants durant une situation de mesure et devront être corrigés.

### 2.3. L'étalonnage d'une caméra en température

Avant d'être thermographique, une caméra infrarouge fournit une mesure radiométrique. Le détecteur jouant le rôle de convertisseur analogique digital du rayonnement incident, il convertit chaque photon reçu, dans une plage de longueur d'onde donnée, en un pulse analogique.

L'étape d'étalonnage est une phase très délicate mais primordiale pour l'utilisation d'une caméra infrarouge comme instrument de mesure de température. L'étalonnage consiste à établir la relation de correspondance entre les températures des objets observés et les signaux électriques délivrés par le capteur. Cette correspondance est effectuée expérimentalement en plaçant un corps noir devant la caméra et en relevant, en fonction de sa température, les valeurs du thermosignal de la caméra.

La validité de l'étalonnage dépend de l'absence de dérive de la caméra et de la qualité de la source de référence. L'étalonnage permet donc de définir la situation de référence à laquelle les situations de mesure seront ensuite ramenées. Le constructeur de la caméra propose deux méthodes d'étalonnage intégrées dans le logiciel de contrôle de la caméra. La première utilise un corps noir interne à la caméra, la seconde nécessite un corps noir externe qu'il faut présenter à la caméra.

La fonction liant le thermosignal au flux rayonnant de la scène thermique est linéaire, par contre la fonction entre la valeur thermique et la température réelle de l'objet est non-linéaire du fait que le rayonnement émis par le corps noir n'est pas linéaire à l'augmentation de température. Le thermosignal  $S$  est relié à la température  $T$  du corps noir par une loi d'étalonnage définie par le constructeur de la caméra et basée sur la loi de Planck.

L'étalonnage du signal vidéo consiste à faire correspondre le niveau thermique numérisé avec l'écart de température. Cet étalonnage est réalisé automatiquement par le logiciel de contrôle de la caméra. La Figure 38 présente un exemple d'étalonnage réalisé sur un corps noir dans la plage de température comprise entre 0 et 40°C.

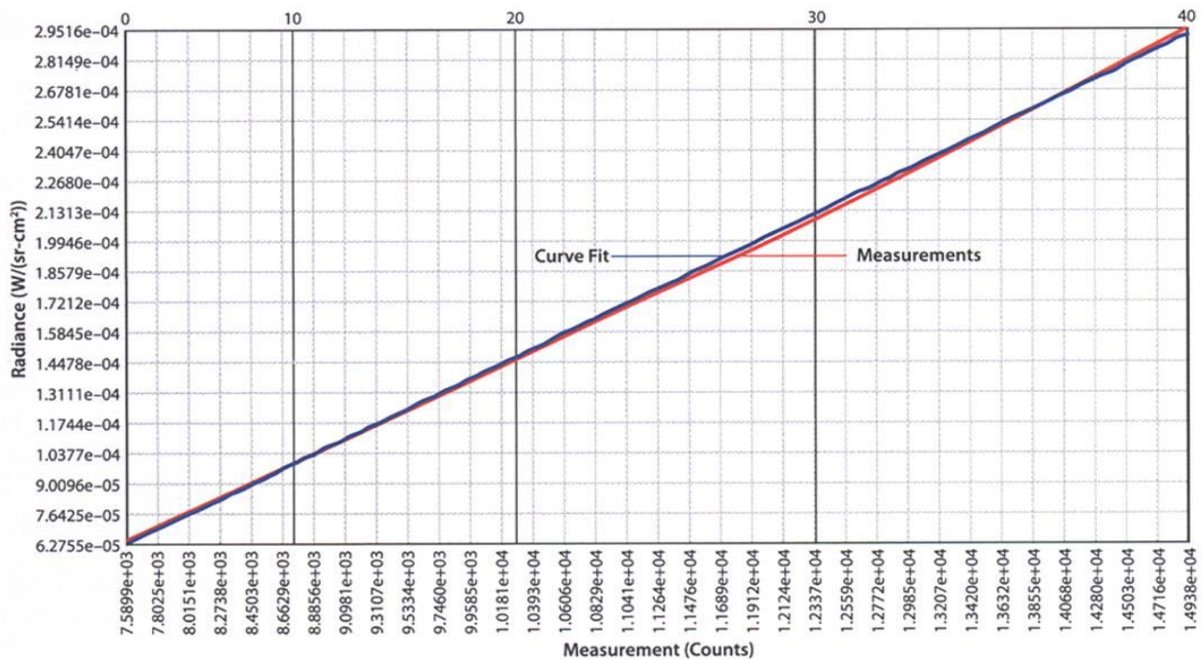


Figure 38. Courbe d'étalonnage sur un corps noir

L'étalonnage ainsi réalisé est spécifique aux paramètres et aux conditions de mesure. Afin de faire la correspondance entre le rayonnement mesuré et la température, il faut disposer d'étalonnages associés à chaque condition et configuration du banc de thermographie : utilisation de filtre pour spécifier la bande spectrale utilisée, objectif, temps d'intégration...

Parmi les 327 680 pixels de la matrice du détecteur, certains se dégradent et n'ont plus la même réponse que les autres. Par conséquent, et quelle que soit la scène thermique observée, cela se traduit pour certains par une saturation haute 16384 NN (Niveau Numérique) pour un système de numérisation de 14 bits comme celui de la caméra CS6000 HS, d'autres au contraire donnent une saturation basse de 0 NN. Ainsi, comme chaque pixel du détecteur a sa réponse propre, il s'agit d'appliquer en premier lieu une correction de non-uniformité (NUC : *Non-Uniformity Correction*). Cette correction consiste à appliquer une loi linéaire distincte pour chaque pixel afin d'uniformiser la réponse de la matrice du détecteur en l'alignant sur la réponse moyenne du détecteur, comme l'illustre la Figure 39.

Les pixels dont la réponse « s'éloigne trop » de la réponse moyenne sont alors considérés comme « défectueux ». Le logiciel *ThermaCAM* dispose d'une fonction qui consiste à remplacer le pixel défectueux par la valeur d'un pixel voisin non défectueux.

En pratique, la procédure constructeur est « simpliste » et ne nous semble pas suffisante quand plusieurs pixels sont défectueux dans une même zone. C'est en particulier vrai quand le flux reçu par la caméra est faible (ce qui est souvent notre cas dans les mesures thermiques sur des microsystemes compte tenu de leur dimension), ou quand la contribution interne et propre à la caméra (illustrant l'effet Narcisse) intervient fortement dans les conditions de mesure. Il faudra donc, en plus de la phase d'étalonnage, concevoir des procédures correctives pour s'affranchir, au maximum, des effets perturbateurs de façon à obtenir des mesures de température plus précises, nous permettant de mieux estimer les gradients thermiques.

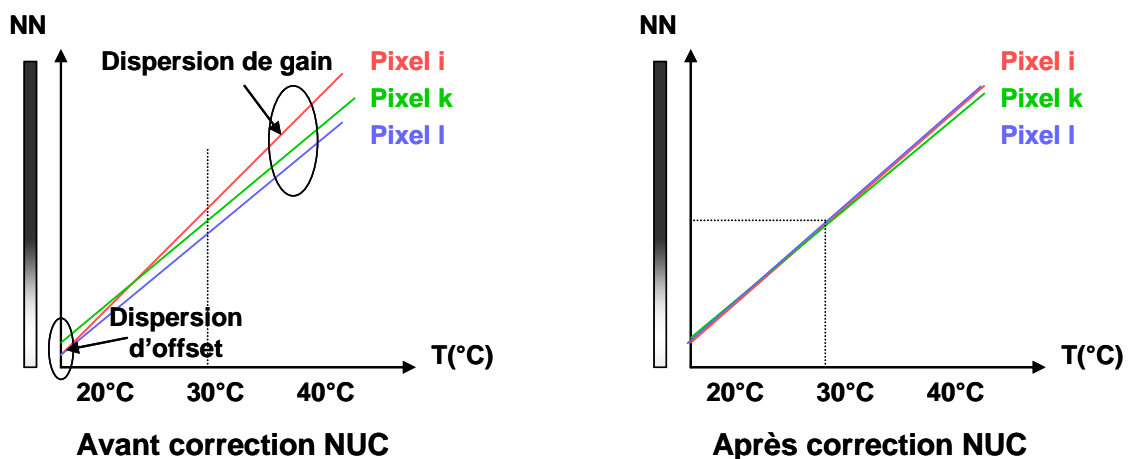


Figure 39. Illustration de la correction de non-conformité des pixels

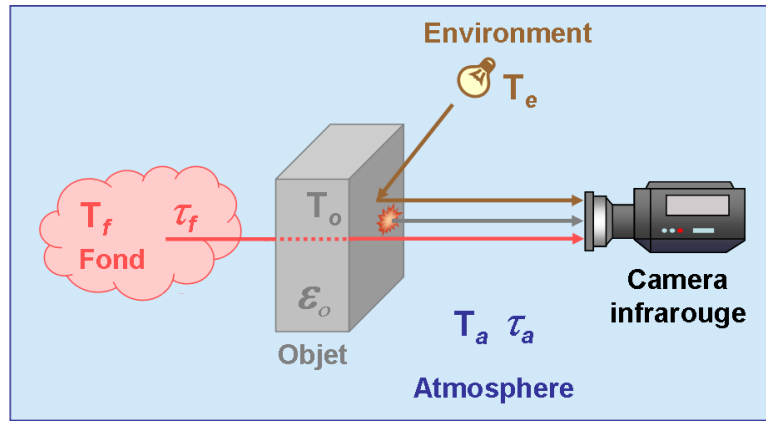


Figure 40. Schéma de principe d'une scène thermique

Par ailleurs, comme nous l'avons vu précédemment à travers les lois du rayonnement thermique, mais également par la description de la chaîne de mesure, le rayonnement mesuré par la caméra correspond à un rayonnement global qui résulte de la superposition de plusieurs composantes présentées schématiquement par la Figure 40 :

- le rayonnement spécifique à l'objet, qui dépend de sa température  $T_o$  et de son émissivité spectrale directionnelle  $\epsilon_o$ ,
- le rayonnement du fond à température  $T_f$  et transmis à travers l'objet, dans le cas d'objet partiellement transparent,
- le rayonnement issu de l'environnement de température  $T_e$  dont une partie est réfléchi sur l'objet, alors qu'une autre est absorbée par ce dernier,
- sans oublier l'influence de l'atmosphère qui atténue l'ensemble du rayonnement.

A partir de ce schéma on peut définir le rayonnement total reçu par la caméra par l'équation standard de la thermographie :

$$S_{mesurée} = \tau_a [\underbrace{\epsilon_o S(T_o)}_{\text{Objet}} + \underbrace{(1 - \epsilon_o) S(T_e)}_{\text{Environnement}} + \underbrace{\tau_f S(T_f)}_{\text{Fond}}] + \underbrace{(1 - \tau_a) S(T_a)}_{\text{Emis par l'atmosphère}} \quad (22)$$

Transmis par l'atmosphère

Cette relation peut facilement être généralisée au cas des objets multicouches ou, au contraire, elle peut être simplifiée dans le cas d'objets opaques pour lesquels le rayonnement du fond n'est pas transmis :

$$S_{mesurée} = \tau_a [\epsilon_o S(T_o) + (1 - \epsilon_o) S(T_e)] + (1 - \tau_a) S(T_a) \quad (23)$$

Si la finalité de la mesure consiste à évaluer la température  $T_o$  de l'objet à partir du rayonnement infrarouge détecté dans la bande spectrale  $\Delta\lambda$  de fonctionnement, il est nécessaire de déterminer les propriétés radiatives et l'état thermique de l'environnement et de l'atmosphère ainsi que

l'émissivité de l'objet. Dans la pratique, cela revient souvent à apprécier les principales contributions, quand cela est possible, d'en négliger d'autres et de poser des hypothèses puis de maîtriser les conditions de mesure afin d'annuler ou de diminuer les rayonnements perturbateurs pour les mesures thermiques.

Forts des informations issues à partir de la description de la chaîne d'acquisition thermographique, au niveau expérimental (après avoir pris le maximum de protection dans la conception du banc et pour la maîtrise des conditions de mesure) nous poserons les hypothèses suivantes :

- l'environnement de l'objet est proche d'un corps noir dont la température  $T_c$  est uniforme et constante grâce à l'utilisation de protections de type corps noir et à l'installation du banc de mesure dans une salle climatisée,
- l'atmosphère dans laquelle se propage le rayonnement est uniforme et sa température  $T_a$  est constante,
- le rayonnement mesuré par le détecteur est proportionnel au thermosignal délivré par la caméra.

De plus, pour chaque analyse, il faudra définir l'incertitude sur la valeur de la température mesurée, ces incertitudes étant bien-sûr une combinaison de divers éléments tels que :

- la méthode d'étalonnage,
- les conditions de mesure,
- l'opérateur lui-même, dans le choix du matériel et le respect des conditions de validité de correction des températures.

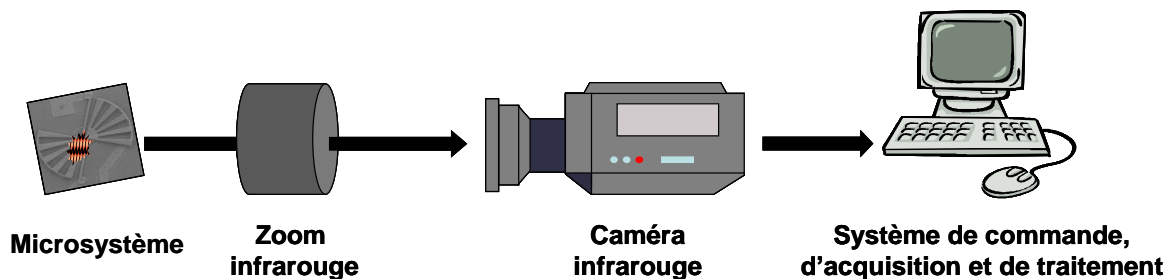


### 3. Banc de thermographie infrarouge pour l'analyse des microsystèmes

CETTE SECTION présente le banc de thermographie infrarouge développé à l'Ecole des Mines de Saint-Étienne, afin de répondre à la fois à un objectif de recherche expérimentale et à des demandes de partenaires industriels du secteur de la microélectronique dans le cadre d'études technologiques spécifiques. Compte tenu du champ d'application visé, le dispositif mis en place doit donc répondre à des critères majeurs qui sont : la haute résolution et des mesures thermiques quantitatives.

Le banc de thermographie infrarouge réalisé peut-être schématiquement représenté par la Figure 41 dont nous allons ensuite présenter et décrire chaque composante :

- le microsysteme à analyser,
- la caméra infrarouge sélectionnée,
- l'objectif de microscope infrarouge mis en œuvre,
- le système de commande et d'acquisition,
- le système de traitement développé.



*Figure 41. Banc de thermographie infrarouge.*

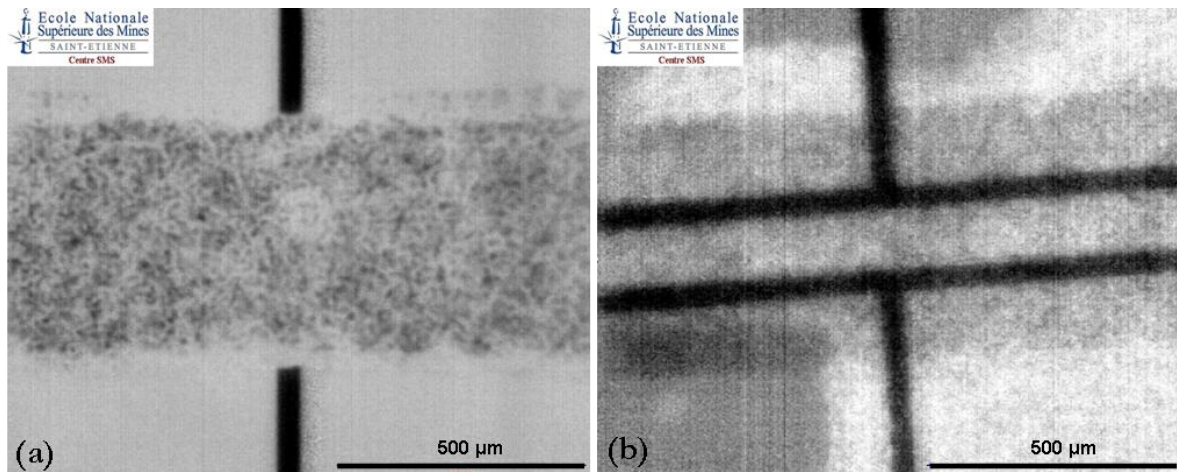
Afin de répondre aux objectifs des mesures, l'ensemble de la chaîne d'acquisition thermographique devra ensuite être optimisé pour corriger les effets perturbateurs.

#### 3.1. L'objet thermique

Dans le cas de l'étude des microsystèmes, les objets thermiques sont très complexes et hétérogènes, à la fois au niveau de leur design (structure multicouche), de leurs constituants (opaques ou non aux infrarouges) et de leur dimension à l'échelle du micron. Les mesures in-situ sont obligatoires et présentent le grand avantage de pouvoir se placer dans les conditions réelles de fonctionnement du composant. Dans le cas des microsystèmes nécessitant une source RF et/ou toute source de contrôle et d'actionnement complexe, les mesures seront réalisées directement sur le site de fabrication. Le banc de thermographie infrarouge a donc été conçu pour pouvoir être transportable et adaptable à d'autres configurations d'analyse.

La thermographie infrarouge ne permet de mesurer, en principe, qu'un champ de température de surface, sauf dans le cas de matériaux transparents (exemple du silicium). Les sources de chaleur, quant à elles, proviennent souvent de couches plus profondes. Ainsi, selon la configuration de l'échantillon, les mesures thermographiques sont réalisées en face avant ou en face arrière pour se placer en situation la plus adaptée et au plus proche des sources de chaleur. Ensuite, compte tenu des dimensions de l'objet et de l'épaisseur des couches minces, on estime que la température de surface mesurée par thermographie est tout à fait représentative des sources de chaleur.

Par exemple, la Figure 42 présente les images infrarouges d'un transistor sur substrat souple, développé à L'Ecole des Mines, au Centre de Micro-électronique de Provence du site Georges Charpak de Gardanne. En face avant (a) on visualise la grille du transistor, constituée d'un dépôt d'argent et opaque à l'infrarouge ; une partie de la piste conductrice en or, d'émissivité faible donc sombre, est apparente. En face arrière (b), le substrat souple étant transparent à l'infrarouge, la caméra « voit » les couches plus profondes : les pistes conductrices et la grille. Suivant l'objectif de l'analyse il faudra donc privilégier l'une ou l'autre des prises de vue par la caméra thermique.



**Figure 42. Images infrarouges d'un transistor (CMP Gardanne) vu en face avant (a) et en face arrière (b)**

De façon plus générale, toute source de chaleur produite est associée à un flux thermique qui pour une conduction pure est décrite par la loi de Fourier  $\Phi = -\kappa \text{ grad}(T)$  (en  $\text{W}/\text{m}^2$ ), où  $\kappa$  (en  $\text{W}/\text{mK}$ ) est la matrice des conductivités thermiques des différents matériaux mis en jeu. Les conditions aux limites et les transferts thermiques associés, par conduction, convection et radiation, produisent une distribution thermique instantanée de surface, dont la détection du rayonnement permettra, par mesure infrarouge, de déterminer la température locale.

Celle-ci sera d'autant plus exacte que nous serons placés dans les conditions suivantes :

- les objets avec une source de chaleur interne seront, en première approximation, supposés opaques dans la gamme spectrale de  $1,5$  à  $5 \mu\text{m}$ . Il nous suffit donc de connaître l'émissivité du matériau pour connaître le flux qu'il émet lorsque sa surface est à une température  $T$  donnée ;
- dans la plage de longueur d'onde considérée, l'objet est un corps gris (donc  $\epsilon$  ne varie pas avec la longueur d'onde) ;

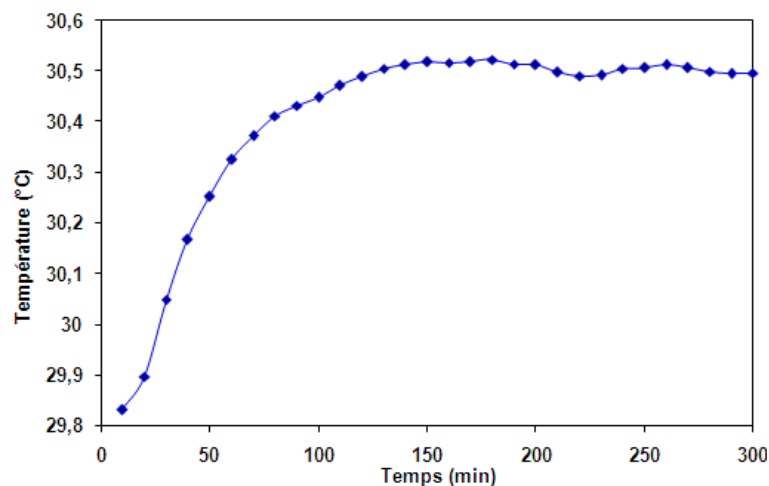
- les objets analysés étant de toute petite dimension et de faible épaisseur, nous considérons l'état de surface du matériau uniforme et les variations de cet état de surface, du fait de la température, sont négligées.
- La conduction thermique du ou des matériaux avec une source de chaleur interne est très grande et le temps de propagation de la chaleur dans l'épaisseur du film est négligeable par rapport au temps de la mesure.

### 3.2. La caméra infrarouge

Dans ce banc haute résolution, la caméra choisie doit répondre au mieux à toutes les exigences techniques spécifiques que nécessite l'analyse thermique dans les microsystèmes, en termes de gamme de longueur d'onde, de sensibilité et de rapidité. Elle doit donc se situer à la pointe des avancées technologiques du marché. Les détecteurs quantiques étant beaucoup plus performants que les détecteurs thermiques, nous avons opté pour une caméra qui possède un détecteur quantique en InSb avec une matrice de 640 par 512 pixels refroidis à 77K par un système Stirling ; son domaine spectral de fonctionnement est situé entre 1,5 et 5  $\mu\text{m}$ , ce qui permet de couvrir la plage de température allant de l'ambiante à quelques centaines de degrés. Par la suite, dans ce chapitre, toutes les mesures thermographiques présentées ont donc été réalisées avec la caméra FLIR SC6000 SH.

#### La dérive de la caméra

Nous avons observé une forte dérive de la caméra lors des premières heures de fonctionnement. Sur la Figure 43, nous suivons l'évolution de la température moyenne mesurée par la caméra qui observe un corps noir maintenu à température constante et uniforme d'environ 30°C, pendant les 5 premières heures de fonctionnement de la caméra. La température moyenne mesurée par la caméra dérive de plus de 0,7°C avant de se stabiliser.

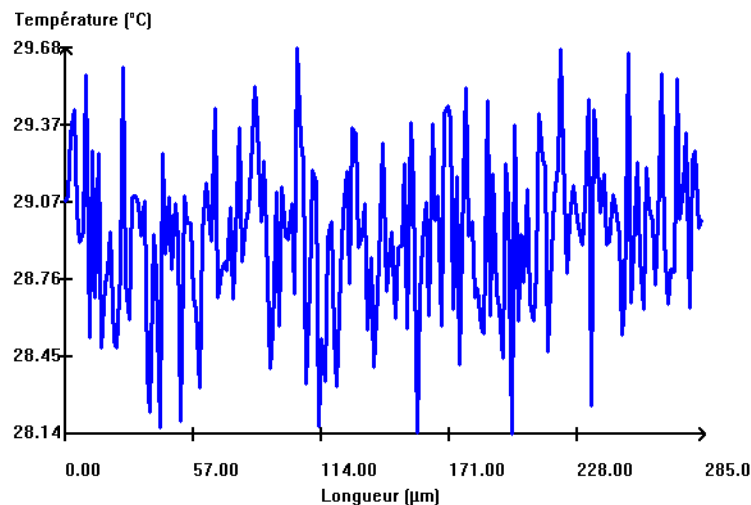


*Figure 43. La dérive de la caméra en début de fonctionnement*

Une phase de stabilisation d'un minimum de trois heures sera donc nécessaire, après avoir démarré la caméra, pour atteindre l'équilibre thermique et ainsi avoir des mesures thermiques fiables. De même, son étalonnage devra être réalisé après cette étape de stabilisation de la caméra c'est-à-dire 5 heures après la mise en route de la caméra.

### Le rapport Signal/Bruit

Comme nous l'avons montré précédemment, la caméra mesure le thermosignal qu'elle reçoit de l'objet thermique et de son environnement. Ceci se traduit par un signal au profil très bruité comme le montre la mesure le long d'un corps noir à 29°C, présentée dans la Figure 44. L'écart-type de cette mesure est de 0,472.



*Figure 44. Mesure du bruit de fond (avant étalonnage)*

L'objet thermique étudié doit donc avoir un rayonnement suffisant pour que le thermosignal correspondant ne soit pas noyé dans le bruit. Or, compte tenu des analyses que l'on veut réaliser, on ne peut pas négliger le fait que le signal en cours de fonctionnement des microsystèmes soit très faible. Ceci est d'autant plus important que le bruit fixe la résolution thermique de la caméra infrarouge et à partir de là, la précision des mesures thermiques.

La résolution thermique de l'instrument est définie par le coefficient NETD (cf. paragraphe 2.2. p.54). Dans le cas de notre dispositif, le NETD est estimé par le constructeur à 18 mK. Quant au MRTD, celui-ci n'a pas pu être mesuré au cours de ce travail car le laboratoire ne possède pas de mire périodique de type corps noir.

L'origine du bruit est due à deux phénomènes principaux :

- le bruit thermique lié à la nature même du rayonnement de Planck; ce bruit est considéré aléatoire,
- le bruit d'acquisition est un bruit propre à l'instrumentation, c'est un bruit électronique qui provient de toute la chaîne d'acquisition.

A ces deux phénomènes principaux peuvent s'ajouter les fluctuations des sources de chaleur environnementales.

Afin de réduire au maximum le niveau du bruit, inévitable en thermographie, il est nécessaire de mettre en place une procédure de post-traitement des mesures thermiques. De même, au niveau de la mise en place du banc, et une fois la caméra stabilisée, la quantification du bruit de la chaîne complète de mesure permettra de déterminer la résolution en température que nous pouvons atteindre. A partir de là, au niveau expérimental, la procédure des mesures thermiques devra rigoureusement suivre plusieurs étapes :

- l'étude de la stabilité de la caméra a permis de montrer qu'une phase de stabilisation d'au moins 3 heures est indispensable pour s'assurer de la précision des mesures thermiques,
- un étalonnage à chaque démarrage de la caméra et après la phase de stabilisation est aussi capital,
- par ailleurs, après les mesures thermiques, un traitement permettra de réduire les effets perturbateurs provenant des conditions expérimentales.

### La résolution

La caméra est équipée d'un objectif de 50 mm de focale, ce qui permet de couvrir un champ d'observation de  $18,2^\circ \times 14,6^\circ$ . D'autre part, l'objectif peut être équipé de bagues allonges qui permettent de faire varier le grandissement de l'image en éloignant l'objectif du détecteur. Le Tableau 6 reporte le grandissement de l'image (G) sur le détecteur par rapport à la dimension réelle de l'objet pour les différentes bagues utilisées. Pour chacun des cas nous avons également mesuré le diamètre des champs d'observation et la distance de l'objet pour obtenir une image nette sur le détecteur.

Objectif ( $f=50$ mm)	G	Résolution mesurée (mm)	Distance de l'objet (mm)	Diamètre maximal observable (mm)
+ bague 6 mm	0,25	0,43	300	71
+ bague 12 mm	0,38	0,25	220	48
+ bague 18 mm	0,54	0,13	200	30
+ bague 25 mm	0,64	0,06	190	26
+ bague 61 mm	1,43	0,03	180	11

*Tableau 6 : Champ d'observation*

Les photos infrarouges de la Figure 45 illustrent les possibilités de résolution de la caméra infrarouge constructeur. Il s'agit d'images infrarouges d'une même pièce de 2 centimes d'euro, réalisées à température ambiante de  $20^\circ\text{C}$  et dans les mêmes conditions expérimentales. Seule la position de l'objectif par rapport au détecteur change et par conséquent la distance objet-dioptré d'entrée différencie les deux images (l'image de droite avec le plus fort grandissement étant prise de plus près).

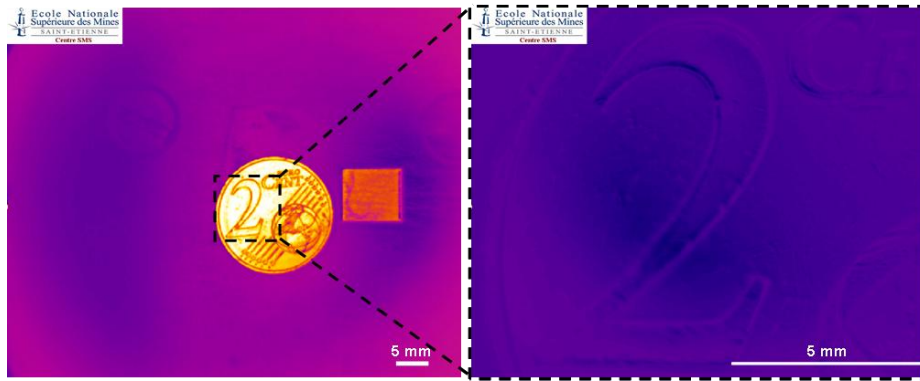


Figure 45. Images infrarouges avec le grandissement  $\times 0,25$  et  $\times 1,43$

Par ailleurs, ces photos permettent également de mettre en évidence les deux principaux effets perturbateurs caractéristiques des mesures de thermographie infrarouge (paragraphe 4.2.). La pièce observée étant à température uniforme, le contraste chromatique est dû d'une part à des différences d'émissivité (figure de gauche) et d'autre part au phénomène d'effet Narcisse (figure de droite) spécifique des objets réfléchissants en moyenne et haute résolution.

Il est essentiel de connaître la limite maximale de résolution de l'optique de la caméra thermique. Cette limite de résolution est définie par le critère de Rayleigh qui énonce que deux sources peuvent être résolues par un système optique si leur séparation angulaire (pour les petites ouvertures) est supérieure ou égale à :

$$\theta = 1,22\lambda \frac{f}{D} = 1,22\lambda N \quad (24)$$

avec  $N$  l'ouverture de l'optique,  $f$  sa distance focale et  $D$  le diamètre de la pupille.

On peut considérer que ce critère résulte de la nature ondulatoire de la lumière, qui fait que l'image d'un point source situé à l'infini et non résolu par le système optique, forme sur le détecteur une tache de diffraction élémentaire ou PSF (*Point Spread Function*), correspondant à un disque (disque d'Airy ou tache de diffraction) entouré d'anneaux concentriques. La Figure 46 donne l'image théorique ainsi que le profil de l'intensité lumineuse de la tache d'Airy. En fait, ce critère donne la limite de résolution pour une optique donnée, mais il est fortement conditionné par la qualité du signal mesuré et du rapport signal/bruit [DRUART 2009].

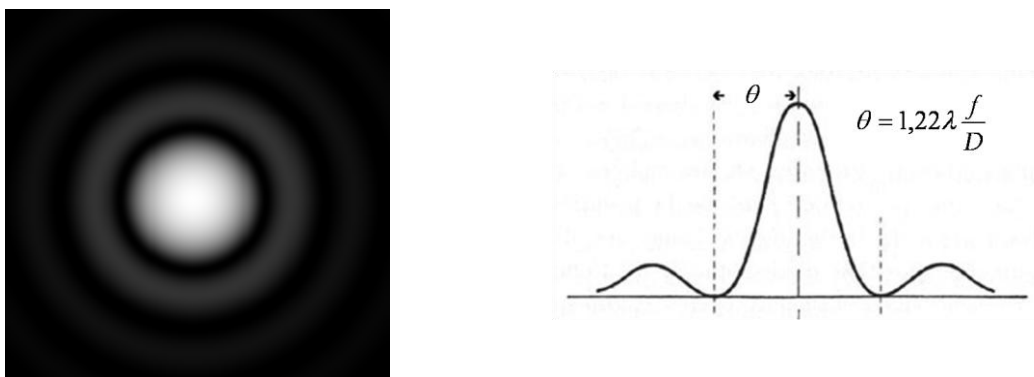


Figure 46. Représentation de la tache d'Airy et de son intensité lumineuse théorique

En considérant le cas du système optique de la caméra SC6000 SH comme un système optique parfait, limité par la diffraction, avec une longueur de focale  $f = 50$  mm et une ouverture  $N = 2,3$ , la résolution maximale théorique, c'est-à-dire le diamètre du disque d'Airy, est alors d'environ  $9,11 \mu\text{m}$  pour une longueur d'onde moyenne de  $3,25 \mu\text{m}$ . Toutefois, les possibilités réelles de la caméra thermique sont imposées par les limites physiques du détecteur, dont la résolution ne pourra pas être inférieure à la taille des pixels ( $25 \mu\text{m}$ ). Ainsi, un objet ne pourra être résolu que si son image au niveau du détecteur a une taille au moins égale à deux pixels, selon l'échantillonnage optimal de Nyquist-Shannon.

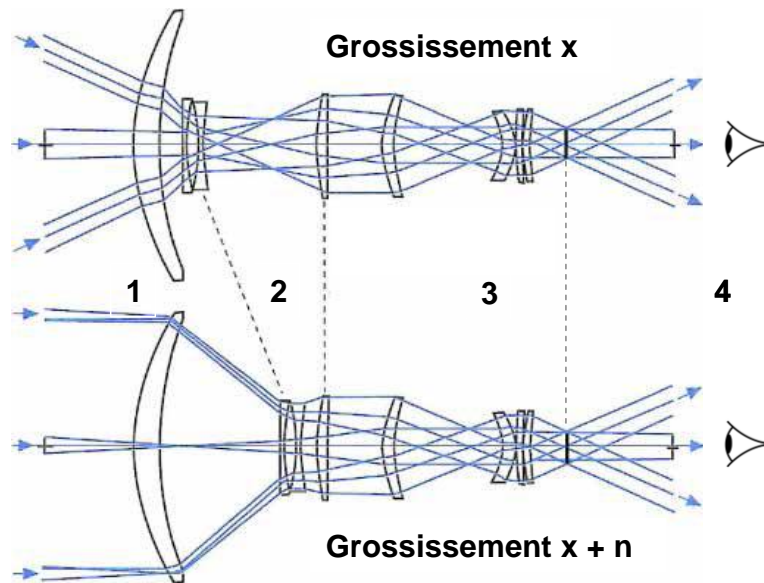
La résolution spatiale de la caméra seule, s'avère être très insuffisante pour l'analyse des distributions thermiques dans les microsystemes. Il est donc nécessaire d'augmenter la précision en mettant en place un système optique complémentaire permettant de réduire la dimension de la tache d'Airy, de façon à obtenir au niveau du détecteur, une image de taille égale ou supérieure à celle d'un pixel. L'optique additionnelle jouera alors le rôle d' « objectif de microscope infrarouge » pour réaliser un grandissement suffisant, de façon à atteindre la résolution spatiale souhaitée pour notre étude (de l'ordre de  $2 \mu\text{m}$ ). Le dispositif doit aussi être adaptable et modulable selon la dimension de l'objet thermique à analyser : circuit intégré complet ou composant isolé.

### **3.3. L'objectif de microscope pour la thermographie infrarouge à haute résolution**

Le système optique du dispositif est constitué de deux éléments : l'objectif propre de la caméra infrarouge, en position de son grandissement maximal et un objectif de microscope qui a pour finalité d'améliorer la résolution spatiale du banc de thermographie infrarouge. Le système optique est dimensionné pour définir la configuration optimale permettant d'obtenir la résolution la plus grande et la meilleure sensibilité au niveau du détecteur.

#### **Description et caractéristiques de l'objectif de microscope**

Un objectif de microscope est un système optique à grandissement continu et variable avec une mise au point sur l'objet.



*Figure 47. Schéma du principe de fonctionnement d'un objectif de microscope*

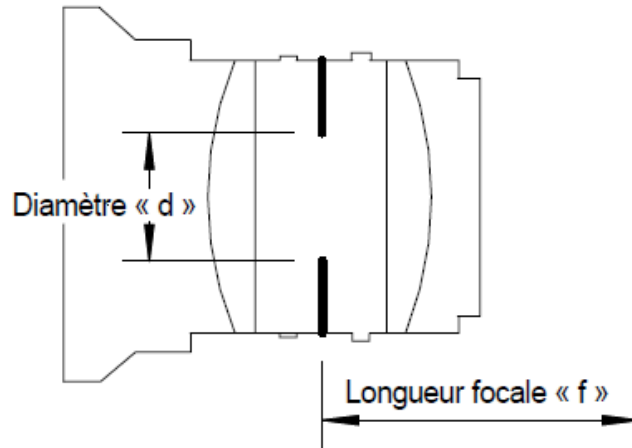
La Figure 47 montre un objectif afocal dans l'infrarouge. Les éléments peuvent être séparés en quatre groupes de lentilles alignés les uns derrière les autres :

- le groupe 1 comprend un objectif fixe ; il est de grande dimension et contrôle l'ouverture du système ; il peut jouer le rôle de protection contre l'environnement extérieur ;
- le groupe 2 assure le grandissement variable et la mise au point grâce à deux sous-groupes : un fixe et l'autre mobile ;
- le groupe 3 est fixe et compense les aberrations statiques résiduelles provenant des autres groupes ;
- le groupe 4, fixe également, correspond à l'oculaire.

Les éléments mobiles à l'intérieur du système font en sorte que la longueur focale varie. Une courte longueur focale correspond à un grand angle de vision, alors qu'une grande longueur focale correspond à un angle de vision réduit.

Dans le cas de l'objectif de microscope utilisé dans le dispositif de thermographie (Figure 48), une bague, graduée en ouverture, permet un réglage précis du diamètre de l'iris. En effet, comme l'aire d'un disque est proportionnelle au carré du diamètre, en augmentant le diamètre de l'ouverture, on augmente l'aire de l'ouverture de l'iris et par conséquent la sensibilité du dispositif. Ainsi, plus  $N$  est petit, plus l'ouverture est grande. Ainsi la valeur de l'ouverture est variable et continue de 1,2 à 16 de façon à permettre d'augmenter significativement la résolution du système. La focale de l'objectif est de 30 mm. Les lentilles de cet objectif sont en germanium, elles sont dimensionnées afin de limiter les aberrations géométriques et traitées pour éviter les effets parasites (traitements anti-reflets).





*Figure 48. L'objectif de microscope*

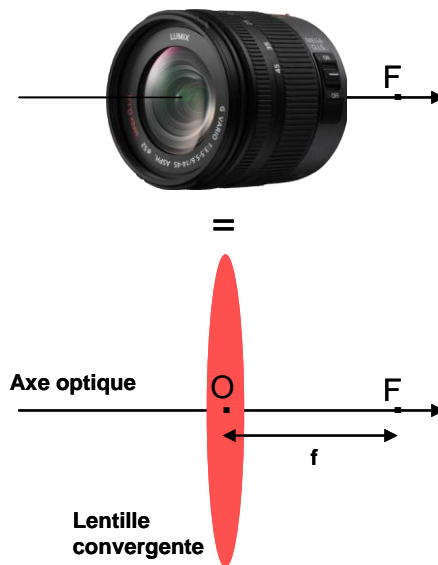
Au niveau d'un système optique complexe c'est le premier élément, donc dans notre cas, l'objectif de microscope, qui fixe la résolution de l'ensemble. Notre but étant d'atteindre une résolution suffisante (de l'ordre de  $2 \mu\text{m}$ ) pour des mesures thermiques sur microsystèmes, le choix de l'objectif a été orienté par sa limite de résolution théorique qui est estimée à  $2,19 \mu\text{m}$  dans le cas de son ouverture maximale.

### **Modélisation et optimisation**

Nous avons modélisé le système optique de façon à estimer sa résolution en fonction du positionnement du système global : caméra - objectif microscope - objet. C'est un critère indispensable pour l'optimisation des performances du banc de thermographie : haute résolution spatiale et haute sensibilité (c'est-à-dire pour l'obtention du maximum de flux radiatif sur le détecteur).

Pour cela, on utilise le logiciel *OSLO LT 6.5* de *Lambda researcher* pour concevoir le modèle en traçant des rayons dans un système déjà existant et en modifiant, petit à petit les surfaces, les indices de réfraction et les espacements, jusqu'à un résultat satisfaisant. Pour cela il faut pouvoir tracer le cheminement exact des rayons dans le système, y compris le cheminement de ceux qui ne se propagent pas dans le plan contenant le point source et l'axe optique. L'optimisation du système repose sur le choix des conditions et de ses spécifications (à partir des valeurs commerciales standard) en jouant sur les variables.

L'objectif de la caméra, comme celui de l'objectif de microscope, est constitué de plusieurs lentilles taillées dans du germanium et traitées de façon à réfléchir tout le rayonnement solaire (courtes longueurs d'onde). En première approximation, chaque objectif du système optique peut être assimilé à une lentille unique dont le foyer  $F$  se trouve à une distance  $f$  du centre de l'objectif ( $f$  étant égale à la focale de l'objectif) comme l'illustre la Figure 49.

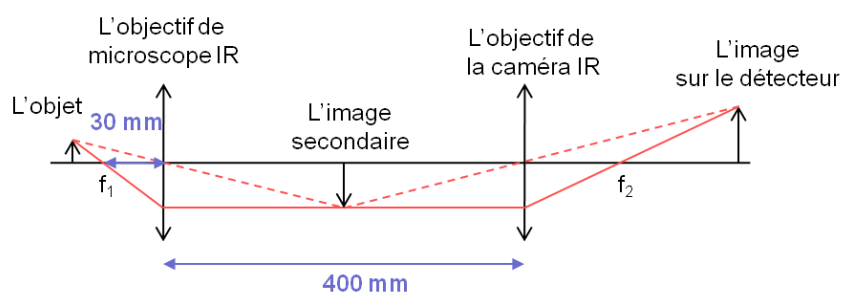


*Figure 49. Lentille équivalente*

Ensuite et compte tenu des quelques informations constructeurs que l'on peut obtenir, le dispositif optique peut être complexifié. Par ailleurs, les hypothèses des conditions de Gauss sont posées :

- les rayons lumineux incidents qui entrent dans l'objectif présentent un angle faible par rapport à l'axe de la lentille et sont peu écartés de l'axe optique,
- la lumière incidente est monochromatique (située dans la gamme 1,5 à 5  $\mu\text{m}$ ).

Pour concevoir notre système haute-résolution, nous partons de la représentation optique des rayons issus de l'objet traversant une optique composée de l'objectif de microscope et de l'objectif de la caméra (Figure 50).



*Figure 50. Schéma du dispositif optique*

Selon le résultat du modèle, dans la configuration optimale de la chaîne optique, c'est-à-dire pour un grossissement maximum, l'objectif de microscope infrarouge est positionné à 400 mm de la caméra. Ceci complexifie particulièrement les conditions d'analyse en accentuant l'apparition d'effets perturbateurs non négligeables, tel que l'effet Narcisse déjà évoqué, et que nous présenterons dans le paragraphe 4.2. La configuration obtenue n'est pas parfaite, du fait qu'il semble difficile, compte tenu de la confidentialité des optiques, de définir précisément la géométrie de notre dispositif.

### 3.4. Le système de commande et d'acquisition

Les caméras sont gérées par un ordinateur. Le thermosignal de la scène thermique est visualisé et enregistré, selon les cas, à partir des logiciels *ThermaCAM Researcher Professional 2.8 SR-3* ou *ThermaCAM RTools* développés par FLIR SYSTEMS. La numérisation s'effectue sur 14 bits c'est à dire sur  $2^{14}=16384$  Niveaux Numériques. L'image numérique a une taille maximale de 640\*512 pixels.

Un certain nombre de paramètres essentiels permettent de gérer l'utilisation du système de commande et d'acquisition en modifiant la tension du signal analogique de sortie afin d'optimiser sa dynamique :

- le gain (en dB et compris entre 1 et 30 dB) permet de dilater l'échelle de numérisation ;
- l'offset (en volt et compris entre 0 et 2,49 V) effectue une translation de l'échelle ;
- le temps d'intégration (réglable jusqu'à 9  $\mu$ s en fréquence d'acquisition maximale) permet d'ajuster le rapport S/B. Il correspond au temps durant lequel le capteur saisit le rayonnement entrant : plus celui-ci est faible, plus le temps d'intégration doit être long afin d'augmenter le signal reçu par le détecteur ;
- la cadence d'acquisition (réglable et pouvant atteindre 25 kHz) ;
- la bande spectrale utilisée peut être choisie par l'intermédiaire de filtres en fonction de la plage de température mesurée ;

Dans le logiciel d'acquisition, outre les paramètres numériques d'acquisition de la caméra, plusieurs autres informations importantes sont à fournir concernant les conditions environnementales spécifiques des mesures et l'objet d'analyse. Les principales sont présentées dans le Tableau 7.

Paramètres Caméra	Paramètres environnementaux	Paramètres objet
Ouverture de l'objectif	Température de l'air	Température
Vitesse et durée d'acquisition	Humidité relative	Emissivité
Nombre de mesures	Température de référence	Distance caméra-objet

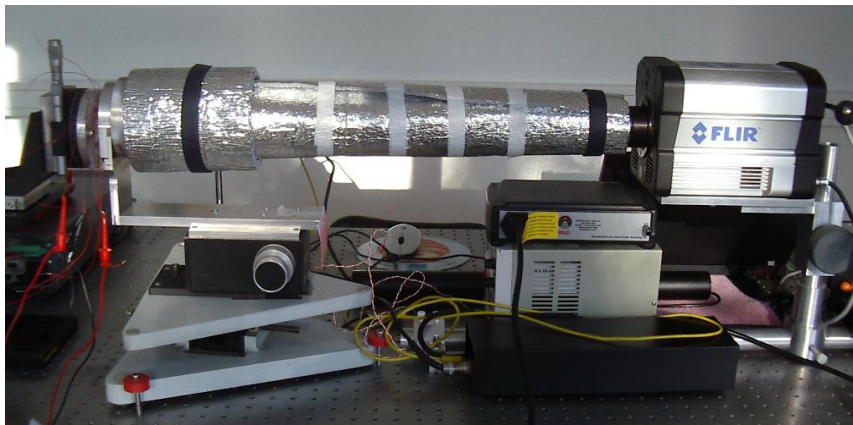
**Tableau 7 : Paramètres essentiels pour les mesures de thermographie infrarouge**

Après avoir fixé les variables inhérentes à la numérisation, aux conditions environnementales et à l'objet thermique, les mesures infrarouges sont réalisées à partir de l'acquisition d'une succession d'images pour constituer des films de plusieurs secondes et dont les paramètres d'enregistrement détermineront la précision des résultats. A chaque mesure sera associée une mesure dite de « référence », réalisée dans les mêmes conditions et dans un intervalle de temps très proche de la mesure réelle, de façon à considérer les éventuelles variations environnementales et instrumentales négligeables et ainsi pour ne tenir compte que des évolutions intrinsèques à l'objet thermique. Par ailleurs, pour s'affranchir du problème d'aliasing, la fréquence d'échantillonnage doit être supérieure à deux fois la fréquence de l'objet. L'effet de vignettage est atténué en

prenant soin, à chaque mesure, de positionner les objets thermiques au centre du champ d'observation de la caméra.

Les mesures peuvent être exprimées en Niveau Numérique (NN), en température ( $^{\circ}\text{C}$ ), ou en luminance ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ ). Le système de commande comporte également plusieurs fonctions pour analyser, exploiter et traiter les données infrarouges enregistrées par la caméra ; mais dans le cadre de nos travaux nous avons dû développer notre propre logiciel de traitement, afin de répondre plus spécifiquement à nos besoins.

La Figure 51 présente le dispositif expérimental mis en place pour l'analyse in-situ, haute résolution de la distribution thermique dans les microsystèmes.



*Figure 51. Banc de thermographie infrarouge*

Comme nous l'avons vu précédemment, les conditions environnementales sont des éléments essentiels dans le cadre des mesures thermiques à haute résolution. Si les phénomènes de dérive instrumentale peuvent être considérés comme négligeables après la période de stabilisation, il est absolument nécessaire de maîtriser la température, d'éliminer les sources lumineuses, les phénomènes de réflexions parasites et de s'assurer de la « pureté » de l'air. L'installation du banc de thermographie dans une salle grise vise à minimiser l'importance des aberrations thermiques stationnaires provenant de sources parasites.

#### **4. Etude des phénomènes perturbateurs et leur correction**

DANS LE CADRE de mesures thermographiques, les conditions influençant l'image obtenue sont multiples, par conséquent ce n'est qu'en identifiant et en étudiant chacun des phénomènes perturbateurs qu'il est possible de définir les conditions expérimentales optimales.

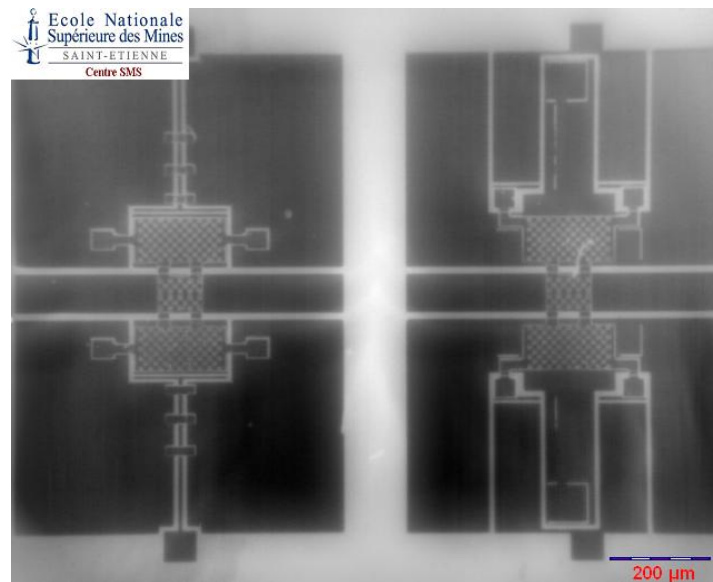
L'évaluation des distributions thermiques par thermographie infrarouge est basée sur des mesures du rayonnement infrarouge émis par l'ensemble de la scène thermique. L'étude des effets perturbateurs a permis d'évaluer les conditions expérimentales optimales pour les atténuer. Néanmoins, compte tenu que dans les MEMS les sources de chaleur sont de très faible intensité, le bruit résiduel de la caméra et celui de l'environnement peuvent être non négligeables voire très importants dans les mesures thermiques ; il est donc pratiquement impossible d'estimer

directement, à partir des mesures infrarouges, les distributions thermiques. La nécessité de traitement des images thermiques impose le développement d'outils correctifs et la mise en œuvre de méthodes pour reconstruire des images thermiques quantitatives.

L'émissivité et l'effet Narcisse étant les principaux effets perturbateurs, ils vont faire l'objet d'études spécifiques pour la mise en place de leur correction.

#### 4.1. L'émissivité et sa détermination

La problématique essentielle des mesures par thermographie infrarouge provient du rayonnement thermique qui dépend à la fois de la température et de l'émissivité de l'objet rayonnant. Comme nous l'avons vu précédemment, l'émissivité est à l'origine de la principale difficulté des mesures de température par thermographie infrarouge. La détermination de l'émissivité des objets regardés par une caméra infrarouge est la clé des analyses thermiques par thermographie.



*Figure 52. Image infrarouge en gradient d'émissivité*

Dans le cadre de nos travaux, la complexité qu'induit l'émissivité est d'autant plus importante et sa détermination d'autant plus difficile que les objets thermiques d'étude ont des dimensions très faibles et sont généralement constitués de plusieurs matériaux souvent complexes et spécifiques aux microsystèmes. Le recours aux tables de la littérature pour définir leur émissivité est impossible, de même que l'utilisation d'un revêtement à haute émissivité pour se rapprocher du cas idéal du corps noir. La détermination de l'émissivité est donc réalisée expérimentalement pour chaque objet et chaque matériau. La Figure 52 montre un micro-interrupteur (LAAS) type « bridge » en position off, maintenu à une température homogène donnée. Le contraste observé sur cette image infrarouge est dû, non pas aux différences de température mais seulement aux différences d'émissivité des matériaux. Les matériaux apparaissant en sombre ont une émissivité faible et les matériaux brillants ont une émissivité forte.

Il existe différentes techniques pour mesurer l'émissivité : celle-ci peut se faire soit par la mesure indirecte de la réflexion du corps (mesure de la réflectivité  $\rho$ , et  $\varepsilon=1-\rho$ ) soit par mesure directe du rayonnement d'un corps qui est alors comparé au rayonnement d'un corps noir à la même température. Dans le cadre de nos travaux, c'est une mesure par méthode directe qui a été employée. Elle est basée sur la relation (19), en considérant que l'émissivité  $\varepsilon$  est définie par le rapport du rayonnement du corps gris sur le rayonnement du corps noir à même température T, et en supposant que :

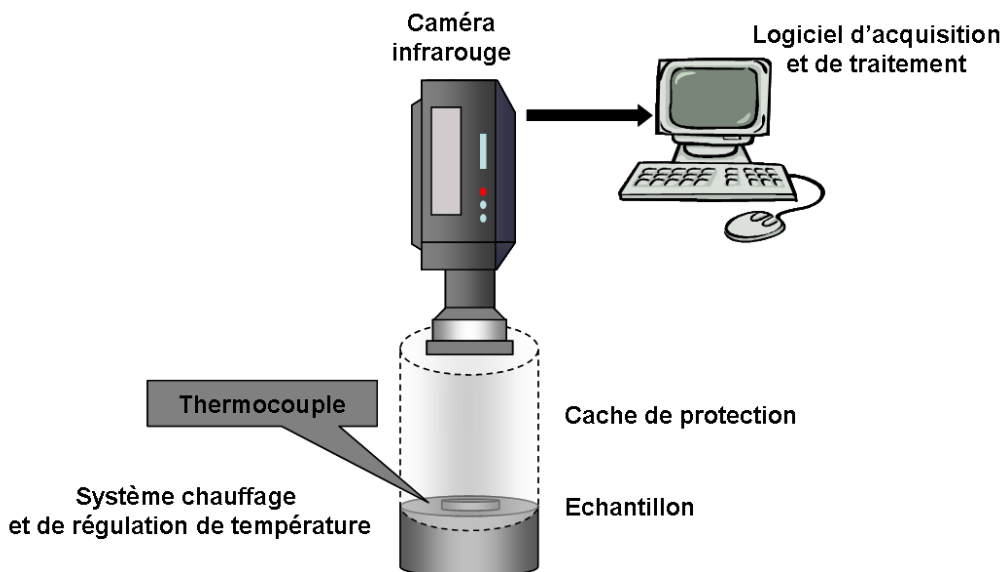
- l'objet est un corps gris et opaque,
- le facteur de transmission du rayonnement de l'objet dans l'environnement est voisin de 1,
- l'émissivité dépend peu de la température dans un écart de température faible,
- les réflexions de l'environnement sont négligeables du fait de la faible distance entre l'objectif de la caméra et l'objet, par ailleurs un capot protecteur est disposé autour de l'objet à analyser.

En supposant que la température de l'échantillon et de l'environnement restent constantes au cours du temps alors le rayonnement du corps noir et celui de l'échantillon sont aussi des constantes. Pour définir l'émissivité  $\varepsilon$ , il suffit donc de mesurer le rayonnement de l'échantillon pour deux valeurs connues et proches de la température du corps noir T1 et T2 :

$$\varepsilon = \frac{L_{\lambda}(T1)}{L_{\lambda}^{\circ}(T1)} = \frac{L_{\lambda}(T2)}{L_{\lambda}^{\circ}(T2)} = \frac{L_{\lambda}(T1) - L_{\lambda}(T2)}{L_{\lambda}^{\circ}(T1) - L_{\lambda}^{\circ}(T2)} \quad (25)$$

Le dispositif utilisé pour mesurer l'émissivité est présenté en Figure 53. La caméra est préalablement étalonnée avec un corps noir. Un système de chauffage permet la mise en température de l'échantillon et assure une répartition homogène et reproductible de la température. Pour être considéré comme homogène au cours de la mesure, l'environnement est écranté par une protection. Le rayonnement du corps noir est mesuré en filmant le corps noir à deux températures T1 et T2 données. Un thermocouple permet de contrôler l'uniformité de la température, puis dans les mêmes conditions, la caméra mesure le flux émis par l'échantillon.

Expérimentalement, les mesures d'émissivité sont réalisées sur des échantillons des mêmes matériaux composant le microsysteme et déposés sur un wafer. Les échantillons de test sont de petite taille et de forme régulière pour s'assurer de l'homogénéité thermique en surface et en profondeur au cours de la mesure. Les mesures de référence sont réalisées sur l'échantillon « froid » supposé en équilibre avec l'environnement. La moyenne sur une région d'intérêt permet d'avoir une bonne estimation de la température de l'environnement équivalente au corps noir. L'échantillon est ensuite porté à une température donnée ; après une phase de stabilisation, le rayonnement de l'échantillon est estimé par la caméra. Les variations d'émissivité en fonction de la température peuvent être évaluées en balayant la gamme de température utile.



**Figure 53. Schéma du dispositif de mesure de l'émissivité**

Les valeurs d'émissivité que nous avons obtenues sont regroupées dans le Tableau 8. Ces valeurs sont difficilement comparables avec les données bibliographiques, d'une part parce qu'elles sont fortement dépendantes des conditions expérimentales et des échantillons eux-mêmes, d'autre part parce que les matériaux testés sont très spécifiques à la microélectronique et donc pas ou peu traités dans la littérature.

Matériaux	Données bibliographiques [GAUSSORGUES 1999]	Mesures de $\varepsilon$ à 100°C
Au (électro-déposé)	/	0,16
Au (poli)	0,02	0,02
Ge (poli)	0,09	0,11
Al (poli)	0,04-0,06	0,06
Cu (poli)	0,03	0,05
Mg (poli)	0,07	0,09
Ni (poli)	0,05	0,03
Cr (poli)	0,10	0,15
Pt (poli)	0,05-0,10	0,08
Ag (poli)	0,02-0,03	0,02
PET	/	0,94
Verre	0,93	0,96
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2-0,3	0,45
AlSi4%	/	0,33
SiN	/	0,13
NiFe	/	0,27
CrNiAu	/	0,11
SiAlN	/	0,64
TiMo	/	0,15
BCB	/	0,52

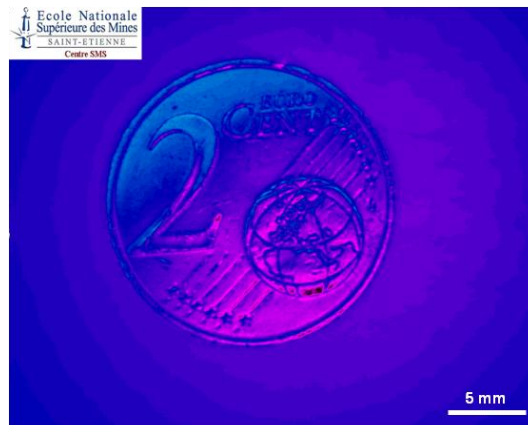
**Tableau 8 : Valeur de l'émissivité des matériaux testés par mesure directe et de quelques données bibliographiques**

Il ne s'agit, bien sûr que d'une estimation de l'émissivité « apparente » de l'objet ; en effet, l'angle d'observation n'est pas pris en compte du fait de la distance très réduite entre l'échantillon et l'objectif de la caméra, l'aspect directionnel de l'émissivité étant alors considéré comme négligeable.

## 4.2. L'effet Narcisse et la correction différentielle mise en œuvre

### Analyse de l'effet Narcisse

En thermographie infrarouge, l'image d'un objet homogène à température ambiante dans une pièce isotherme doit donner une image d'isoluminance. Seules les réflexions d'objets à une autre température permettent d'obtenir un contraste. Les réflexions du flux issu du milieu ambiant ont l'avantage d'augmenter le contraste (Figure 54), ce qui permet du point de vue imagerie de visualiser des détails très fins et parfois non distinguables en lumière visible. Cependant, pour faire des mesures thermographiques, il faut, en plus de l'étalonnage en température, connaître les propriétés optiques de l'objet observé et notamment sa réflectivité.



*Figure 54. Mise en évidence du phénomène de réflexion sur une image infrarouge*

L'effet Narcisse est causé par le rayonnement parasite du détecteur et/ou des optiques qui peuvent se réfléchir sur l'objet. L'effet Narcisse est tout particulièrement rencontré dans le cadre de mesures thermographiques sur des objets réfléchissants et cela d'autant plus que l'objectif d'entrée est proche de l'objet analysé.

L'optique ou l'échantillon lui-même réfléchit une partie du rayonnement émis par le détecteur [Horny02]. Celui-ci étant parfaitement aligné avec l'axe optique, il reçoit sa propre image superposée à l'objet situé dans le champ visuel (Figure 55). Le taux de rayonnement est directement lié à la différence de température entre le détecteur (refroidi à 77 K) et l'optique, à température ambiante.



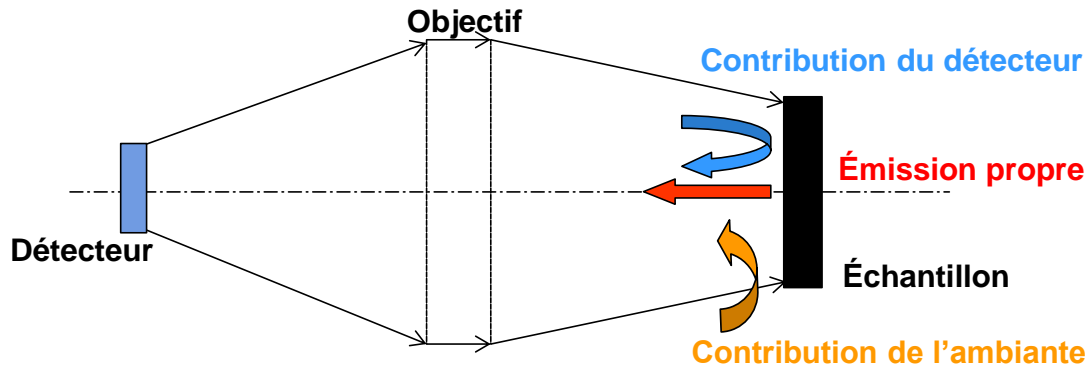


Figure 55. Les différentes contributions au thermosignal

Le système optique peut également émettre ou réfléchir un rayonnement non négligeable, soit vers le détecteur, soit vers une surface réfléchissante de l'objet. À l'image s'ajoute alors un rayonnement caractéristique de la cartographie thermique de l'optique.

Ce phénomène devient alors très important en haute résolution, puisque l'échantillon est positionné à très courte distance du dioptre d'entrée (parfois à moins de 18mm). Au niveau du champ des températures mesurées, on observe un halo caractéristique, bien que la scène thermique filmée par la caméra infrarouge soit uniforme. La mesure sur objet homogène (wafer) à température ambiante (20°C) est présentée en Figure 56. Ce halo est dû aux rayonnements propres des optiques, d'où l'allure circulaire des isovalues du champ perturbé. La distribution du rayonnement mesuré par la caméra thermique, exprimée en Niveau Numérique, forme une cuvette profonde au centre de l'image pour atteindre une valeur minimale correspondant à une température fictive de 18°C.

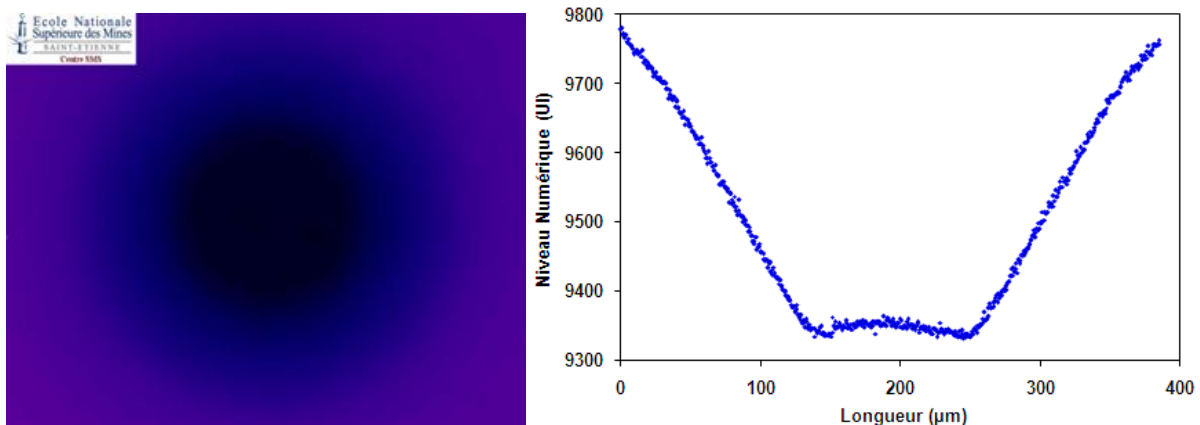
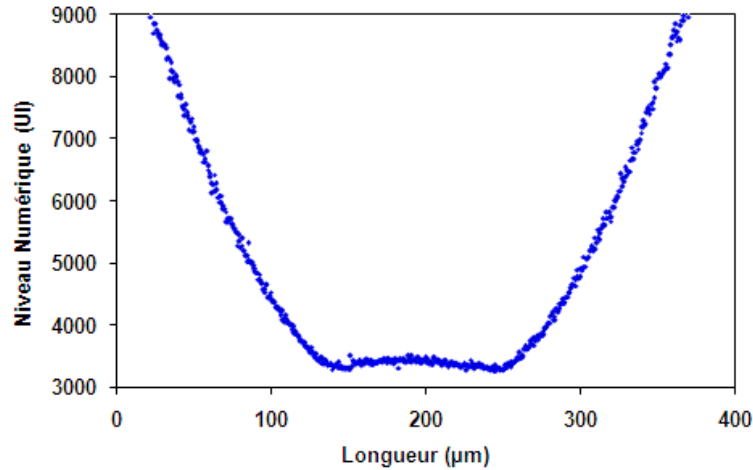


Figure 56. Illustration de l'effet Narcisse (gauche) et distribution du rayonnement infrarouge mesuré (droite)

L'effet Narcisse est d'autant plus marqué, et par conséquent la cuvette plus profonde, que dans une configuration donnée du dispositif (détecteur de la caméra et optiques), l'échantillon est réfléchissant. La Figure 57 représente la distribution thermographique d'une image d'un échantillon recouvert d'un dépôt brillant métallique et utilisé comme miroir. Le puits thermique,

au centre de l'image, est extrêmement important avec, au centre, un signal autour de 3500 UI correspondant à une température fictive d'environ 35°C inférieure. Ceci illustre l'influence très forte de la température du détecteur (77 K) dont on visualise sa propre image thermique sur l'échantillon.



*Figure 57. L'effet miroir quasi parfait*

La température a également une forte influence sur l'effet Narcisse. En effet, par rapport aux flux émis par un objet chaud, les contributions des rayonnements thermiques issus de l'environnement et du détecteur sont faibles ; l'effet Narcisse en sera d'autant plus réduit que la température de l'objet est élevée.

### **Correction de l'effet Narcisse**

Dans un premier temps observons un objet réfléchissant à température ambiante. Nous pouvons également observer que l'effet Narcisse dépend de l'émissivité du matériau. La Figure 58 illustre cette propriété en présentant les températures équivalentes au thermosignal reçu par la caméra pour deux échantillons d'émissivité différente : un échantillon de verre peint en noir à émissivité élevée ( $\epsilon = 0,9$ ) et un échantillon d'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  à émissivité plus faible ( $\epsilon = 0,45$ ). La mesure de l'ambiante sert de référence, alors que la courbe en rouge illustre le redressement du profil de température après correction de l'effet Narcisse dans le cas de la mesure sur le corps sombre.

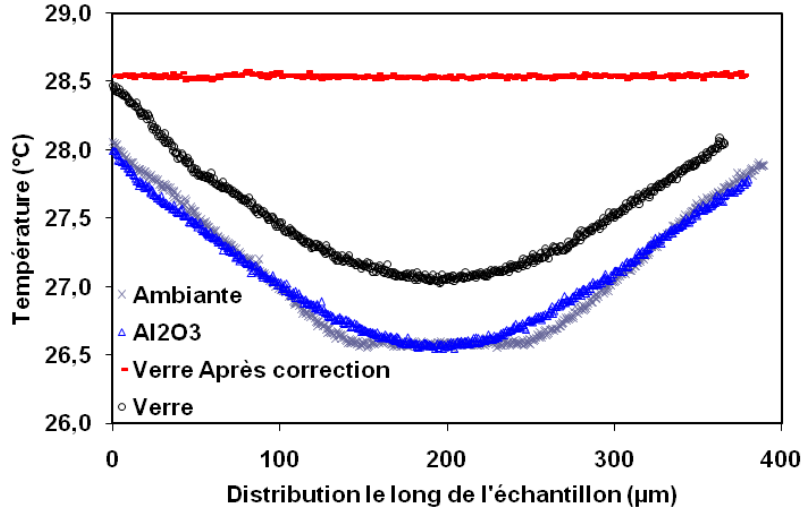


Figure 58. L'effet Narcisse sur différents échantillons

L'étalonnage de la caméra avec un corps noir n'est pas suffisant pour réaliser des mesures thermiques quantitatives et il est nécessaire de déterminer l'influence de l'effet Narcisse, d'en déduire les conditions expérimentales pour le réduire et aussi de définir les traitements correctifs.

Dans le cas d'objet opaque (sans transmission), le flux infrarouge mesuré par la caméra provient de la contribution de trois effets et peut s'écrire sous la forme :

$$S_{\text{caméra}} = \underbrace{\varepsilon_o S(T_o)}_{\text{Objet}} + \underbrace{\rho_e S(T_e)}_{\text{Environnement}} + \underbrace{\rho_{\text{détecteur}} S(T_{\text{détecteur}})}_{\text{Détecteur}} \quad (26)$$

A ces trois contributions peut être ajoutée une quatrième si on considère le flux non focalisé provenant de l'environnement interne de la caméra et lié essentiellement aux imperfections du système optique. Cet environnement n'est pas isotherme, il est influencé par la température du système de refroidissement (cycle de Stirling) et celle des composants électroniques internes. En simplifiant les écritures et en revenant à la notion de thermosignal, la scène regardée par la caméra se définit alors par :

$$S_{iOn} = \varepsilon_{Obj} S_i(T_{On}) + \rho_{Env} S_i(T_{Env}) + \rho_{Dét} S_i(T_{Dét}) + \rho_{Cam} S_i(T_{Cam}) \quad (27)$$

La scène thermique étant très réduite et parfaitement délimitée, la source de chaleur dans un MEMS est contrôlable et donc activable ou non à volonté. L'environnement étant rigoureusement contrôlé (salle climatisée et écrans de protection autour de la scène) la relation (27) sans source de chaleur (MEMS à l'état off) devient :

$$S_{iOff} = \tau_{Opt} F_{Opt} (\varepsilon_{Obj} S_i(T_{Off}) + \rho_{Env} S_i(T_{Env}) + \rho_{Dét} S_i(T_{Dét}) + \rho_{Cam} S_i(T_{Cam})) \quad (28)$$

d'où nous en déduisons :

$$S_{iOn} - S_{iOff} = \tau_{Opt} F_{Opt} \varepsilon_{Obj} S_i(T_{On-Off}) \quad (29)$$

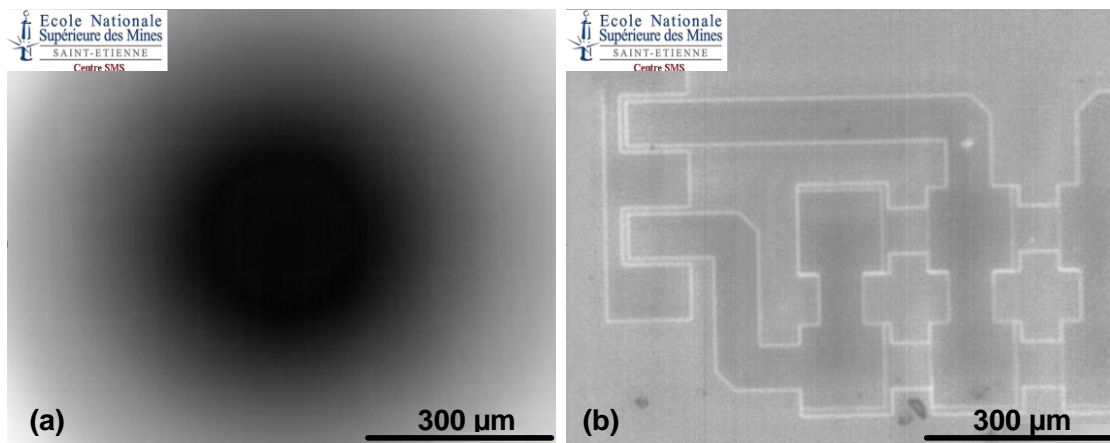
et

$$S_i(T_{On-Off}) = \frac{S_{iOn} - S_{iOff}}{\varepsilon_{Obj} \tau_{Opt} F_{Opt}} \quad (30)$$

$F_{opt}$  est la fonction de transfert instrumental du banc, incluant le grandissement et les ouvertures des optiques ;  $\tau_{opt}$  représente les atténuations le long du chemin optique (lentilles et atmosphère traversées). De ce fait, par différentiation contrôlée, la source de chaleur peut être déterminée avec précision sans les effets perturbateurs Narcisse et environnementaux. Un logiciel Micro'IR a été mis au point pour effectuer un tel traitement et sera présenté en 4.3.

Au niveau expérimental, corriger l'effet Narcisse consiste donc à réaliser pour chaque mesure  $M$ , une mesure de référence  $M_{ref}$  qui est une mesure de la scène thermique sans l'objet, qui prend en compte uniquement les contributions environnementales (fond et ambiant) et instrumentales (système optique et caméra infrarouge). Pour chacune des mesures, les moyennes temporelles et spatiales permettent de réduire le bruit ; il reste alors à soustraire la mesure et sa référence pour obtenir uniquement la contribution de l'objet d'analyse. Ceci nécessite, bien sûr, qu'entre mesure et référence, aucune variation environnementale, ni instrumentale n'ait lieu. Pour cela, les mesures doivent être réalisées après une phase de stabilisation puis entre une mesure et sa référence dans un intervalle de temps court.

Cette méthode différentielle est générique puisqu'elle s'applique chaque fois qu'il est possible d'obtenir une image de référence.



**Figure 59. Correction de l'effet Narcisse (échantillon du CEA)**

On peut illustrer l'efficacité du traitement correctif de l'effet Narcisse par la Figure 59, qui montre l'image obtenue sur un wafer en silicium. Avant correction (a), l'effet de la cuvette est fortement observé, on visualise très difficilement la gravure du microcircuit. Après correction de l'effet Narcisse, avec une mesure de référence et étalonnage en température, l'effet cuvette disparaît pour laisser apparaître la contribution thermique de l'objet seul (b).

Avec une moyenne de 28,54°C, le bruit du fond peut-être considéré comme négligeable, les fluctuations de l'ordre de 0,1°C étant dues à la variation d'émissivité entre les électrodes de platine et le substrat en  $TiO_2$ .

Limite de la correction de Narcisse :

- exceptée la source de chaleur, tout doit rester parfaitement constant entre les deux mesures ;
- dans le cas de petits décalages entre les 2 mesures (Off et On) l'image corrigée peut présenter un effet de bord avec un léger cerclage périphérique ;
- plus la source de chaleur est faible, plus cette méthode différentielle nécessite de bons rapports signal sur bruit pour les 2 mesures (mesure proprement dite et sa référence). Pour cela il est possible de procéder à une intégration sur un certain nombre de cycles (On-Off) d'autant plus nombreux que le signal utile de la source de chaleur est faible sachant que le rapport Signal/Bruit s'améliore en fonction de la racine carrée du nombre de cycles.

### **4.3. Traitements mis en œuvre pour la thermographie haute résolution**

L'analyse détaillée des effets perturbateurs propres à la thermographie haute résolution nous a permis de mettre en place des méthodes d'acquisition et de correction.

#### **Méthode d'acquisition**

Pour s'affranchir du bruit on fait appel à une technique de traitement du signal. Notre objectif est de choisir une méthode de filtrage capable d'améliorer le rapport signal sur bruit, c'est à dire, dans notre cas, d'éliminer les effets parasites liés à l'instrumentation elle-même (tels que les bruits aléatoires et stationnaires ainsi que l'effet Narcisse). L'efficacité de la méthode est jugée par comparaison des images infrarouges avant et après traitement. Par ailleurs, pour le développement d'un outil de diagnostic thermique, dans le cadre de tests de fiabilité sur les microsystèmes, la méthode de correction des données infrarouges doit répondre à certaines exigences comme la rapidité et la facilité de mise en œuvre ainsi que la capacité à s'adapter à toutes les mesures thermographiques réalisées sur le banc.

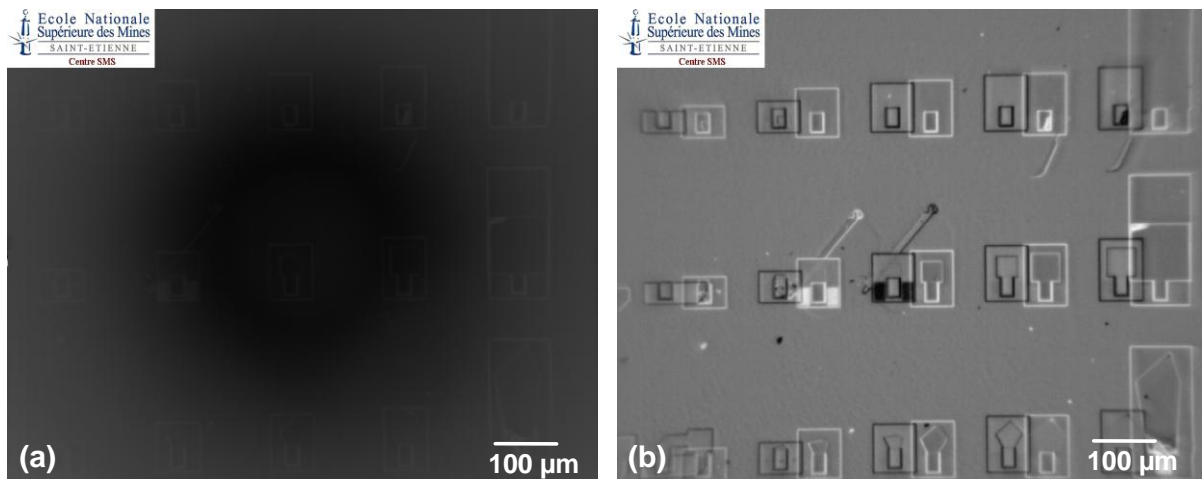
Parmi les techniques de correction et de traitement du signal, la méthode retenue consiste à procéder en 4 étapes:

- la première étape est la mesure d'un état de référence avec le MEMS au repos ;
- la deuxième étape est une mesure du même état de référence, mais avec le MEMS activé électriquement ;
- La troisième étape est la détection du signal propre au MEMS par la méthode différentielle. Celle-ci vise essentiellement à éliminer les effets perturbateurs environnementaux et l'effet Narcisse ;
- Une étape finale consistera à effectuer toutes les corrections liées à la fonction de transfert du banc haute résolution combinées éventuellement à des lissages.

Différents traitements de données complémentaires peuvent aussi être mis en œuvre, comme les lissages de plusieurs mesures pour améliorer la sensibilité. Ainsi, en moyennant temporellement un grand nombre d'images, on peut fortement améliorer le rapport signal/bruit des images.

La mesure de référence consiste à obtenir une prise de vue de l'environnement de l'objet sans la contribution effective de la source de chaleur de l'objet. La problématique qui se pose alors est d'arriver à s'affranchir de l'objet sans changer les conditions expérimentales, étant donné que la moindre modification viendrait perturber l'état thermographique de la mesure de référence. Par défocalisation du système optique, c'est-à-dire en changeant « la distance de prise de vue », on arrive à faire abstraction de l'objet avec une précision souvent convenable.

La Figure 60 montre un exemple de correction différentielle réalisée par soustraction de deux mesures après translation latérale de l'une par rapport à l'autre. De cette manière, on obtient la superposition de l'image du MEMS avec son image en négatif (b). L'avantage de cette méthode est d'éliminer la quasi totalité des effets perturbateurs environnementaux et Narcisse, les paramètres étant figés et les conditions de mesure étant parfaitement identiques entre les deux prises de vue. En effet, le fond obtenu est parfaitement plat et homogène. Par contre, la configuration de l'objet d'analyse est la principale limite à l'utilisation de cette méthode de correction, puisqu'elle nécessite de pouvoir translater l'échantillon sans qu'aucun autre phénomène parasite n'interfère. L'étendue du bruit de fond restant présente un écart-type de 0,00507. Ainsi, étant donnée la qualité des images obtenues, nous utilisons cette technique chaque fois que l'échantillon le permet.

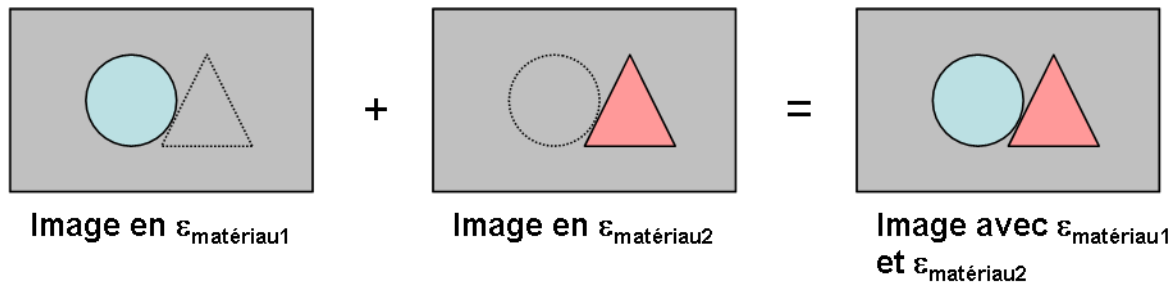


**Figure 60. Mesure brute avec les effets perturbateurs environnementaux et Narcisse (a) ; exemple de correction par translation latérale (b) (sur résonateur CEA)**

Un logiciel de traitement a été développé afin de répondre à nos besoins. Il permet, à partir des acquisitions de films infrarouges séquencés en images, de visualiser et de traiter numériquement les images avec un grand nombre d'outils pour l'analyse d'image et les représentations graphiques.

## Reconstitution d'une image thermique

Les images infrarouges préliminaires obtenues après la première phase de traitement permettent d'éliminer les effets parasites environnementaux et instrumentaux pour donner des cartographies dépendant directement des émissivités des différentes parties de l'objet. Elles permettront, dans un deuxième temps, après avoir effectué les mesures avec et sans source de chaleur, de reconstituer une image thermique quantitative sur tout le champ d'observation.



*Figure 61. Représentation schématique du procédé de reconstitution d'une image thermique*

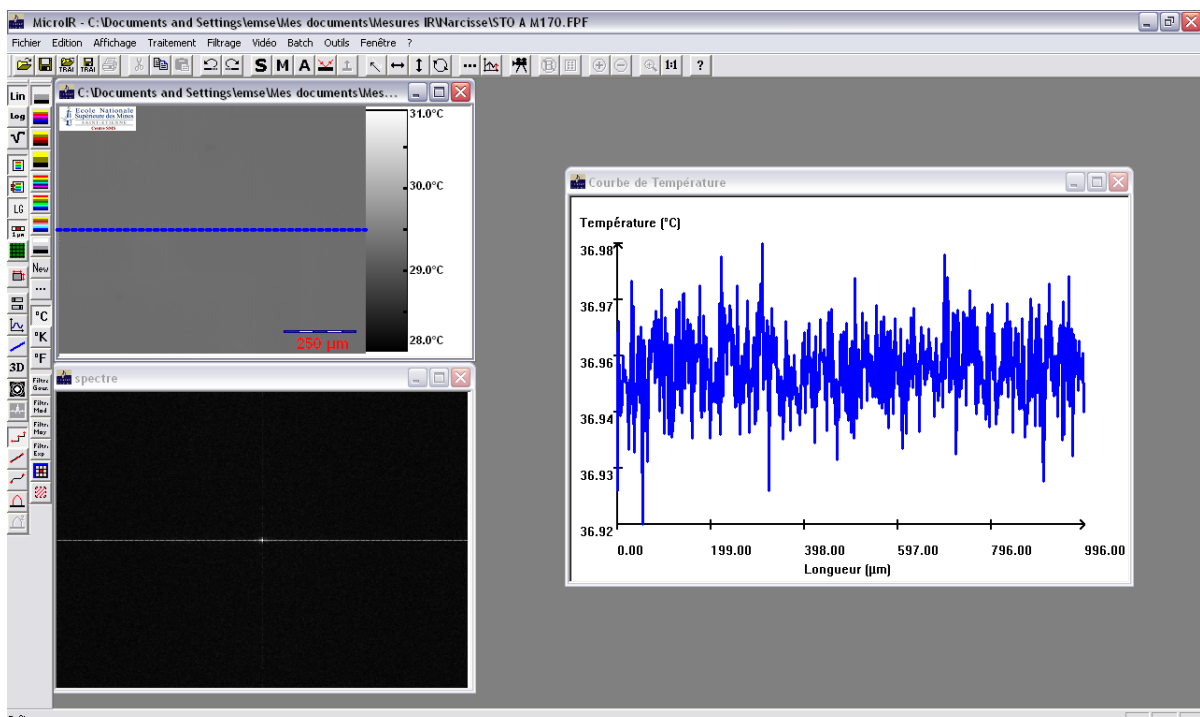
Pour cela, un algorithme de calcul a été développé. Il permet, à partir de l'image d'un objet présentant des matériaux d'émissivités différentes, de re-coloriser l'image de façon à faire correspondre, dans la gamme de couleur de l'échelle thermique du matériau de référence, les différents matériaux. Pour chaque matériau, on obtient donc une image en température du matériau considéré. Ceci nécessite d'avoir au préalable déterminé précisément, pour chaque matériau considéré, son émissivité mais aussi de calibrer l'ensemble des mesures infrarouges des différentes étapes dans les mêmes conditions expérimentales. Les différents traitements numériques étant effectués, un logiciel de traitement d'image (*Photoshop ou Paint Shop Pro*) permet, in-fine, de reconstruire une image thermique calibrée en combinant les images de chaque matériau pour tenir compte des propriétés d'émissivité propre à chacun, comme l'illustre la Figure 61.

## Outil de traitement

Pour s'affranchir de ce bruit on fait appel à une technique de traitement du signal. Les techniques envisagées étant nombreuses il faut choisir la mieux adaptée au problème posé. Notre objectif est de choisir une méthode de filtrage capable de débruiter le signal, qui consiste, dans notre cas, à éliminer les effets parasites liés à l'instrumentation elle-même (tels que les bruits aléatoires et stationnaires et l'effet Narcisse). L'efficacité de la méthode est jugée par comparaison des images infrarouges avant et après traitement. Par ailleurs, pour le développement d'un outil de diagnostic thermique dans le cadre de tests de fiabilité sur les microsystemes, la méthode de correction des données infrarouges doit répondre à certaines exigences, comme la rapidité et la facilité de mise en œuvre ainsi que la capacité à s'adapter à toutes les mesures thermographiques réalisées sur le banc.

Parmi les techniques de traitement du signal, la méthode retenue consistant à procéder au filtrage linéaire par moyenne dans le temps sur une série d'images, puis de lui soustraire la mesure de référence, est simple et s'avère très efficace pour corriger les mesures infrarouges. En effet, en moyennant temporellement un grand nombre d'images, on peut fortement améliorer le rapport signal/bruit des images ; la soustraction vise essentiellement à éliminer les effets perturbateurs environnementaux et surtout l'effet Narcisse ; c'est la phase la plus critique du traitement.

Un logiciel de traitement a été développé afin de répondre à nos besoins. Il permet, à partir des acquisitions de films infrarouges séquencés en images, de visualiser et de traiter numériquement les images afin d'obtenir des données quantitatives et de les représenter graphiquement (Figure 62).



*Figure 62. Logiciel de traitement MICRO'IR*

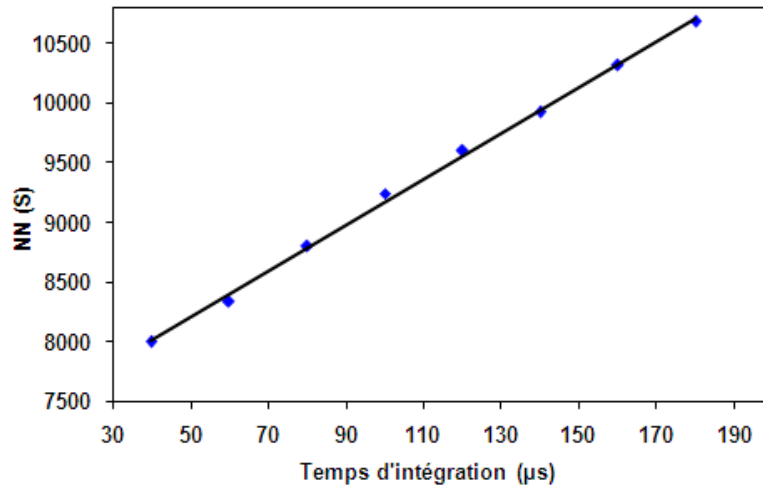


## 5. Evaluation du banc de thermographie infrarouge

DANS LE CADRE de la mise en place du banc de thermographie infrarouge et de façon à apprécier les performances du dispositif, nous allons étudier l'influence de différents paramètres caractéristiques du banc complet.

### 5.1. Etude du temps d'intégration

Nous avons vérifié que l'ajout de l'objectif de microscope ne modifie pas la proportionnalité du thermosignal au temps d'intégration. La Figure 63 représente le thermosignal d'un corps noir à température ambiante en fonction du temps d'intégration. Le signal est parfaitement calibré.

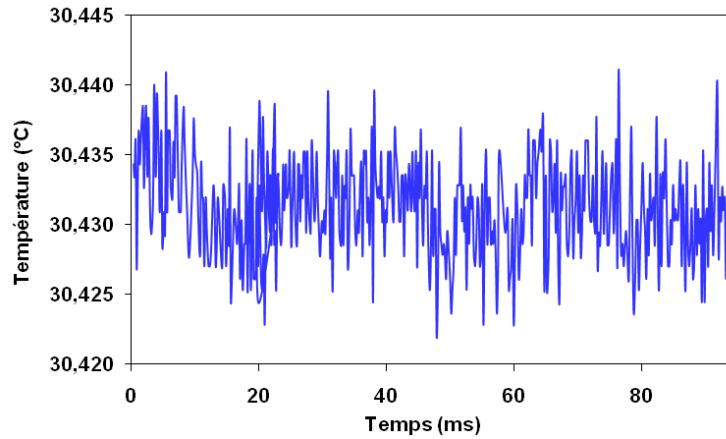


*Figure 63. Thermosignal d'un corps noir à 20°C*

### 5.2. Evaluation du bruit

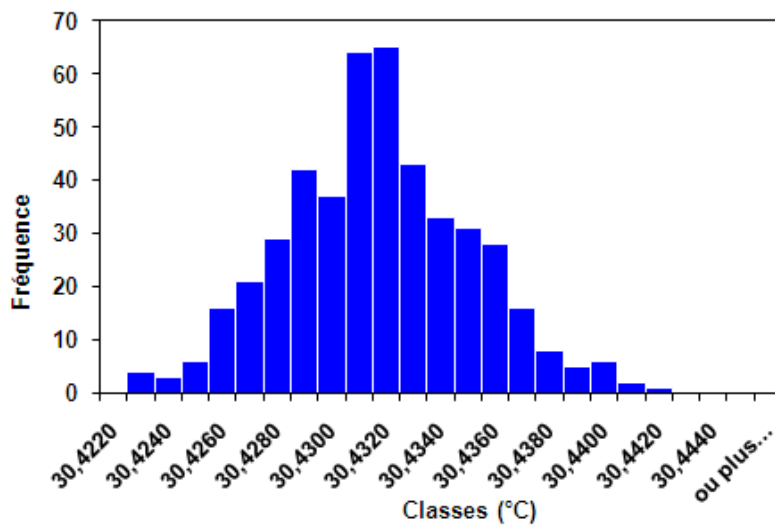
L'ajout de l'objectif de microscope infrarouge augmente les obstacles à la transmission du flux thermique entre l'échantillon et la caméra ; il est donc important de quantifier le bruit du dispositif complet pour déterminer la résolution thermique maximale que l'on peut atteindre.

Après la phase de stabilisation de la caméra, l'étude du bruit d'un pixel permet d'estimer, dans un premier temps, le bruit temporel du dispositif. La Figure 64 donne l'évolution d'un pixel dans une mesure d'observation d'un objet de référence (corps noir) aux environs de 30 °C.



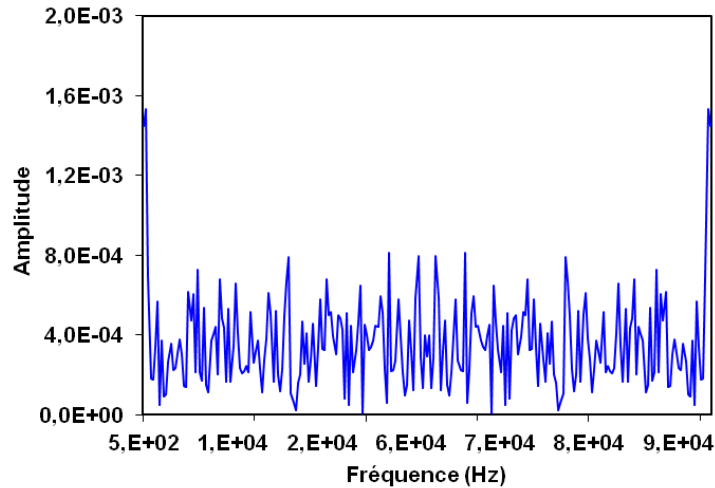
*Figure 64. Evolution d'un pixel (mesure sur un corps noir)*

Le bruit temporel est caractérisé par une distribution de la variation de température autour de sa valeur moyenne qui est de 30,433°C, comme le présente la Figure 65. L'écart type temporel pour ce pixel est de 0.027°C.



*Figure 65. Distribution du bruit d'un pixel (mesure sur un corps noir)*

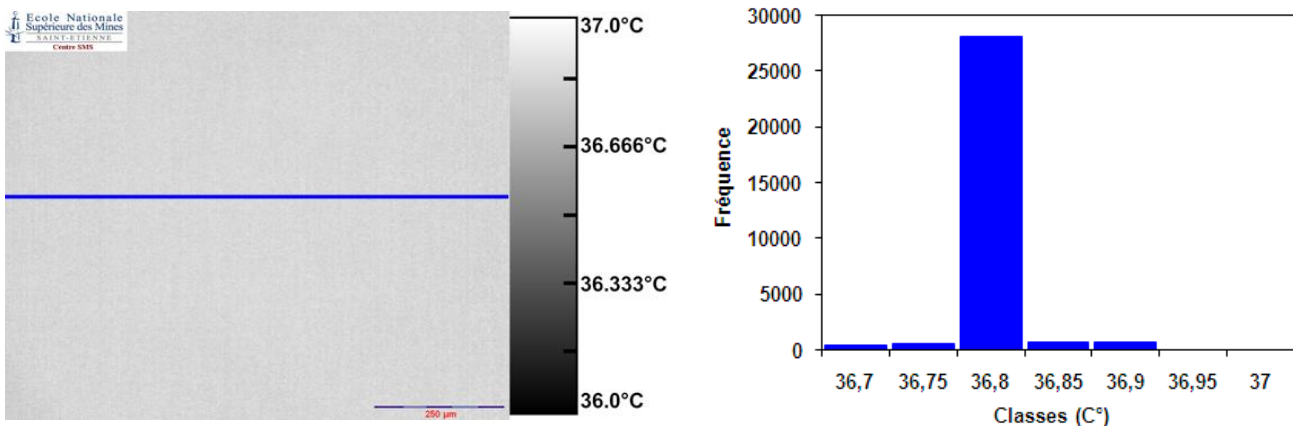
Il est important à présent de vérifier que le bruit d'un pixel n'évolue pas suivant certaines fréquences préférentielles. La transformation rapide de Fourier sur les 256 premiers points du signal de la Figure 64 est présentée sur la Figure 66. L'observation de ce spectre montre qu'aucune fréquence ne semble prédominante ; la densité spectrale peut donc être considérée comme constante. Nous pouvons donc estimer que nous sommes en présence d'un bruit blanc.



*Figure 66. Spectre de la transformation rapide de Fourier du bruit temporel*

Forts de ce résultat nous cherchons maintenant à caractériser le bruit spatial. Pour cela, et compte tenu de l'effet de bord dû à l'effet Narcisse, il est au préalable nécessaire de procéder à la correction des mesures d'une part en moyennant une centaine d'images afin de réduire fortement le bruit temporel puis d'autre part de le soustraire à la mesure de sa référence ambiante.

Après correction de l'effet Narcisse, la Figure 67 présente l'image d'une scène thermique homogène d'environ 37°C en fausse couleur pour faire ressortir les différences entre pixels. La distribution du signal se recentre autour de la moyenne thermique de la scène 36,8°C. L'étendue du bruit restant présente un écart type de 0,0092°C, en accord avec l'écart-type de 0,0083°C des fluctuations du bruit le long de la ligne bleue (Figure 67) représentées en Figure 68.



*Figure 67. Image thermique moyennée et corrigée d'un CN et distribution de température*

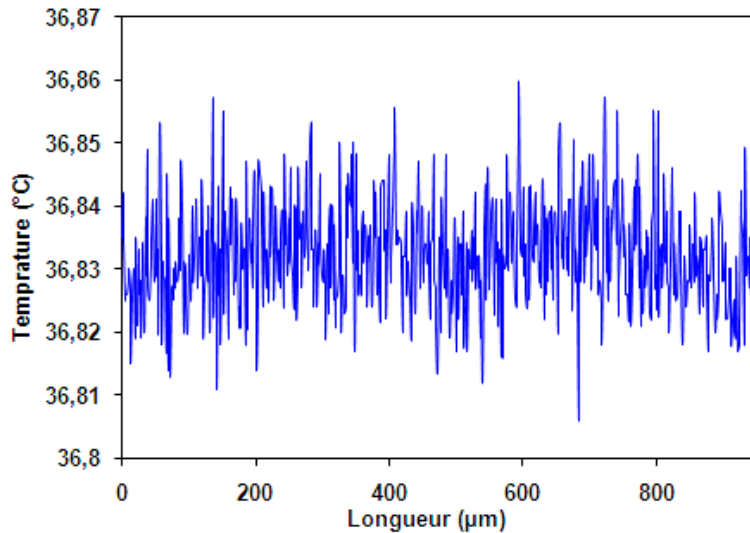


Figure 68. Fluctuations du bruit après correction sur image moyennée

### 5.3. Estimation de la résolution spatiale

Le dispositif mis en place a été conçu afin de présenter une très bonne résolution spatiale. Un point dans un plan objet de la caméra donne une tache dans le plan image qui ne devrait pas excéder la taille d'un pixel du détecteur. Nous avons précédemment estimé le diamètre de cette tache à 0,025 mm par calculs géométriques. Par ailleurs, le calcul du diamètre du disque d'Airy relatif à l'objectif infrarouge additionnel et fixant la résolution du système optique complet, permet d'estimer la résolution spatiale théorique à 2,19  $\mu\text{m}$ .

Il s'agit à présent de vérifier expérimentalement la valeur de la résolution spatiale. Une mesure thermographique résulte de la convolution du signal émis par l'objet par la fonction de transfert du banc de mesure. Dans le cas d'optiques idéales, cette fonction de transfert est assimilée à la tache d'Airy. Cette fonction de transfert peut être obtenue expérimentalement par la mesure d'un objet de dimension ponctuelle.

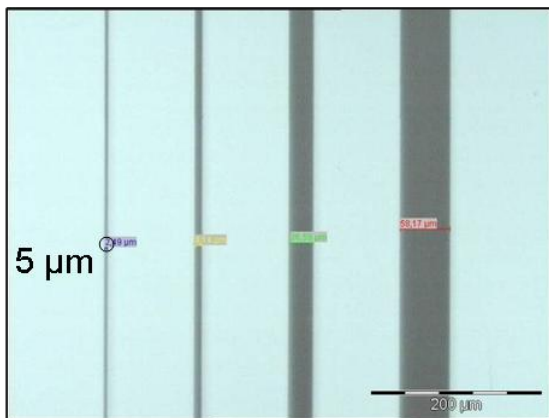


Figure 69. Mire étalon (image optique)

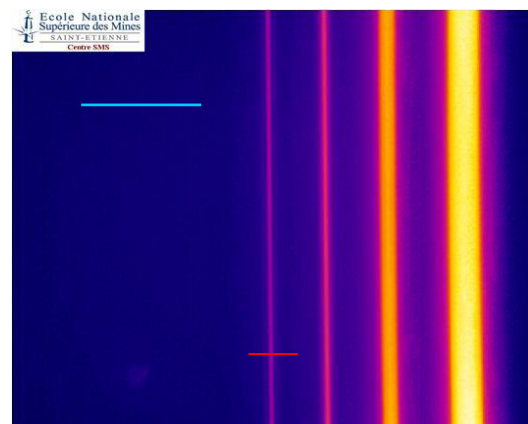
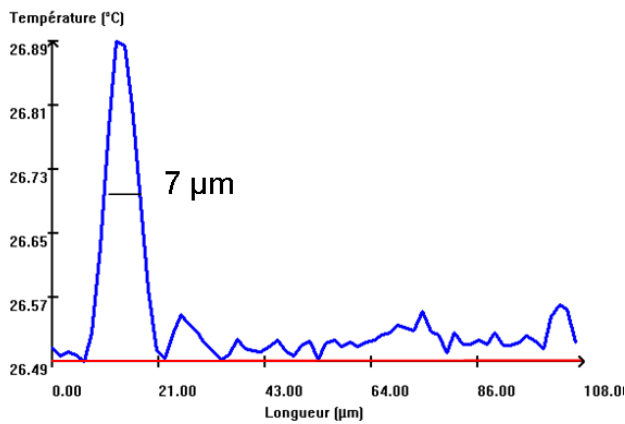


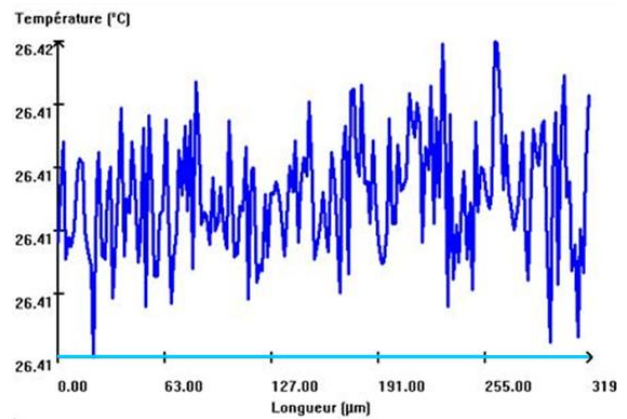
Figure 70. Mire étalon (image infrarouge)

Dans la pratique il s'agit de déterminer la fonction de réponse de la caméra sur un échantillon calibré. La grille étalon de la Figure 69 présente quatre raies gravées de taille calibrée à 5 µm, 10 µm, 30 µm, 60 µm et espacées de 100 µm. La Figure 70 montre l'image infrarouge de la mire étalon. Cette mesure a été réalisée, dans le cadre d'un round robin inter-laboratoire, à température ambiante. Donc, seul le gradient d'émissivité entre le verre des raies et le chrome de dépôt permet de distinguer des détails d'une dimension inférieure à 5 µm.

La Figure 71 présente la fonction de réponse de la caméra sur le profil de marche de la raie de 5µm (le long du trait rouge de la Figure 70). Comme prévu, l'image n'est pas une fente rectiligne mais un pic correspondant à une répartition spatiale de l'énergie. Le profil du thermosignal le long d'une ligne de fond, montre que l'amplitude du bruit de fond est négligeable (Figure 72) par rapport au signal. À mi-hauteur, la largeur du signal de la raie la plus fine est de 7 µm.



**Figure 71. Profil de marche de la raie de 5µm**



**Figure 72. Bruit de fond**

A partir de cette mesure infrarouge, on estime que le pic obtenu  $P(x)$  résulte de la convolution d'une fonction de type rectangle  $R(x)$ , par une gaussienne  $G(x)$  équivalente à la fonction d'Airy.

$$P(x) = (G \otimes R)(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(\tau) R(x - \tau) d\tau \quad (31)$$

Le produit de convolution de la fonction rectangle par une gaussienne est une fonction dont la largeur à mi-hauteur de  $P(x)$  est égale à la somme des largeurs. On peut ainsi en déduire, dans ces conditions spécifiques, une estimation de la résolution spatiale du banc de thermographie égale à 2 µm, différence entre la largeur observée (7 µm) et la largeur réelle (5 µm) assimilées à des gaussiennes. La vérification par la fonction de corrélation par transformée de Fourier sur le bruit de fond (Figure 72), valide de façon indépendante cette valeur en donnant une résolution spatiale de 1,8 µm.

L'estimation de la résolution spatiale par la mesure du MRTD aurait été plus générale mais ceci n'a pas pu être fait au cours de ce travail.

## **Bilan**

CE CHAPITRE a permis de décrire la conception et la mise en place de ce nouvel outil. Ceci a nécessité l'étude de la thermographie et de tous les éléments de la chaîne de mesure d'un système infrarouge afin de définir les conditions expérimentales optimales à respecter. Les phénomènes perturbateurs ont également été évalués pour permettre l'acquisition de mesures thermographiques fiables.

Les études menées dans ce chapitre ont permis de tirer quelques conclusions sur les conditions d'utilisation de la caméra infrarouge intégrée dans un ensemble plus complexe pour réaliser sa fonction « haute résolution » qui est estimée à  $2\ \mu\text{m}$ . Grâce au dimensionnement du système optique, le banc a été optimisé pour que les performances principales de la caméra puissent être adaptées à l'utilisation « haute résolution ». Parmi les solutions répondant aux problématiques expérimentales rencontrées, telles que l'effet Narcisse et la détermination de l'émissivité des différents matériaux, nous pouvons citer la mise en place d'une méthode expérimentale fiable et un procédé de traitement correctif efficace. Enfin, un outil de traitement a également été développé pour la reconstruction de la distribution quantitative des champs de température d'un objet à partir des mesures par thermographie infrarouge.



## CHAPITRE 3

# ETUDE DE COMPOSANTS D'EMETTEURS-RECEPTEURS

<b>1. Etude d'une capacité variable MEMS-RF</b>	<b>- 93 -</b>
1.1. Présentation et fonctionnement de la capacité variable MEMS-RF	- 93 -
1.2. Le dispositif expérimental	- 97 -
1.3. Caractérisation thermique	- 98 -
1.4. Le mécanisme de rupture	- 105 -
<b>2. Etude d'un résonateur BAW-RF</b>	<b>- 113 -</b>
2.1. Présentation des résonateurs BAW-RF	- 113 -
2.2. Le dispositif expérimental	- 117 -
2.3. Caractérisation thermique	- 118 -
<b>Bilan</b>	<b>- 124 -</b>





DEUX ETUDES spécifiques à des composants MEMS, issus des nouvelles architectures d'émetteurs-récepteurs, ont été réalisées par mesures thermographiques :

- l'analyse des mécanismes d'endommagement d'une capacité variable RF en collaboration avec l'EPFL,
- l'étude d'un résonateur RF de type BAW en partenariat avec le LETI.

Ce chapitre décrit les mesures réalisées puis présente les principaux résultats obtenus. L'analyse des cartographies de distribution thermique permet, d'une part de déterminer les échauffements standard de fonctionnement, et d'autre part de diagnostiquer d'éventuelles défaillances en localisant des élévations anormales de température, dans le but d'estimer les modes et les causes d'endommagement. La caméra infrarouge ne nous donne accès qu'au champ de température de surface, mais étant donné les très faibles épaisseurs des objets (quelques microns) et le temps d'analyse (quelques ms), il a été convenu d'estimer la température de surface équivalente à celle de la source thermique. Après avoir fixé l'émissivité, choisie uniforme et constante pendant la mesure, la mise en œuvre des traitements numériques exposés en Chapitre 2, paragraphe 4, permet d'extraire le champ de température de chaque image thermographique correspondant aux conditions d'actionnement étudiées. La distribution thermique quantitative est donc directement issue des films de thermographie infrarouge effectués durant les mesures et après application des traitements présentés au chapitre 2. Nous disposons alors d'une cartographie thermique réelle et caractéristique du fonctionnement du microsystème.

## **1. Etude d'une capacité variable MEMS-RF**

CETTE ETUDE a été menée en collaboration avec l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne qui a rencontré des problèmes de fiabilité avec l'un de ses composants MEMS. Ces problèmes de fiabilité survenaient rapidement et de façon répétée au cours des tests d'actionnement du composant en entraînant sa destruction irréversible. On a cherché à comprendre l'origine de ces problèmes de fiabilité au moyen de mesures thermiques. Cette étude fait suite aux travaux de thèse d'Alexandre Mehdaoui et les complète [Mehdaoui07a].

Cette étude se présente en plusieurs phases : nous présentons le composant MEMS étudié, son principe de fonctionnement et ses caractéristiques. Puis les mesures thermiques réalisées seront comparées à des simulations numériques par éléments finis, afin de s'assurer de leur validité. Enfin, des mesures infrarouges permettront de visualiser et de comprendre le processus d'endommagement que subissent les capacités variables dès le dépassement d'une tension d'actuation critique.

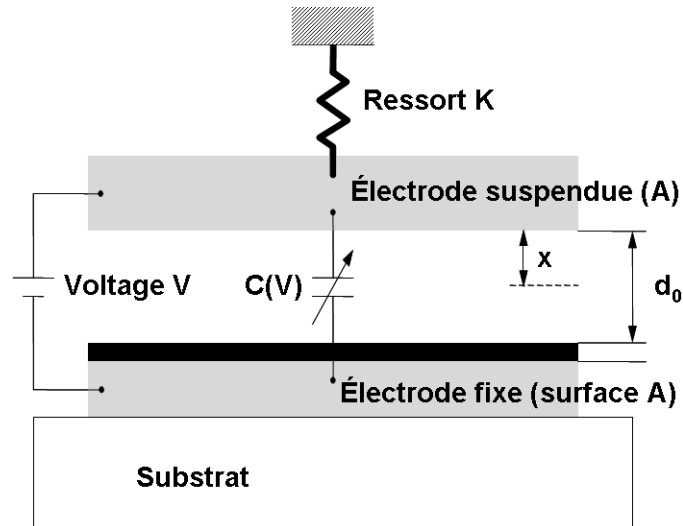
### **1.1. Présentation et fonctionnement de la capacité variable MEMS-RF**

En électronique, les composants capacités variables ont pour fonction de contrôler des paramètres électriques, et notamment la fréquence, dans de très nombreuses applications. Ces

composants tendent à être remplacés par les capacités variables MEMS plus performantes en termes de variation de capacité et de tenue en puissance.

Avant d'aborder les travaux réalisés, il est important de présenter le fonctionnement de la capacité variable MEMS et de définir ses principaux paramètres.

La structure simple de Tilman (Figure 73) permet de décrire le principe fondamental d'une capacité variable actionnée électrostatiquement [Tilman02].



**Figure 73. Schéma de fonctionnement d'une capacité variable MEMS**

Dans ce modèle, la capacité est constituée de deux électrodes parallèles de surface  $A$ . L'une est fixée au substrat et l'autre est suspendue au moyen d'un ressort de raideur  $k$  et mobile verticalement. L'application d'une tension entre les deux électrodes génère un champ électrostatique qui induit le déplacement de l'électrode mobile. En notant  $d_0$  le gap initial (hors tension) et  $x(V)$  le déplacement vertical de l'électrode supérieure, le gap courant vaut :

$$d(V) = d_0 - x(V) \quad (32)$$

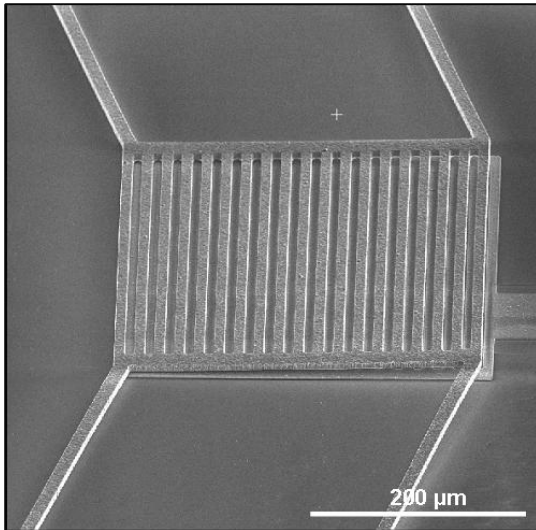
En négligeant les capacités parasites liées aux effets de bords, la capacité nominale  $C_0(V)$  entre les deux électrodes est définie par :

$$C_0 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (\text{en F}) \quad (33)$$

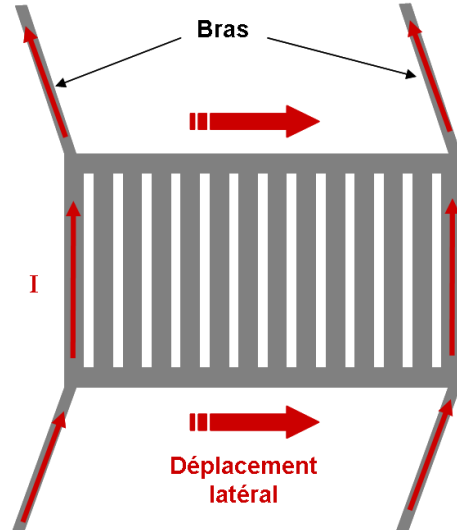
avec  $\epsilon_0$  la permittivité du vide et  $\epsilon_r$  la permittivité relative du diélectrique qui sépare les deux électrodes.

L'objectif est de développer des composants avec une grande variation de capacité (le tuning-range). Mais la plage de variation accessible est essentiellement limitée par l'effet de collage (pull-in) qui se produit quand les forces électrostatiques et élastiques ne sont plus maintenues en équilibre. Ceci se produit lorsqu'un déplacement critique est atteint. De nombreux travaux ont été réalisés dans le but d'accroître la plage de variation. Parmi ceux-ci, les travaux de Liu et Wilson ont apporté des solutions intéressantes par des variations latérales et rotationnelles de la surface des capacités variables [Liu01, Wilson01].

C'est en se basant sur ce modèle, que l'EPFL a développé deux nouveaux designs de capacité variable, une à déplacement latéral (Figure 74) et l'autre à déplacement rotationnel (Figure 75). Le matériau structural de la capacité est un alliage d'aluminium d'AlSi 4%, choisi pour sa légèreté et ses propriétés électriques et mécaniques. Dans les deux designs, la capacité variable est constituée de deux électrodes fragmentées : l'une est fixée au substrat et l'autre suspendue au dessus d'un gap d'air et maintenue en suspension par quatre ou deux bras actionneurs encrés au substrat de façon indépendante.



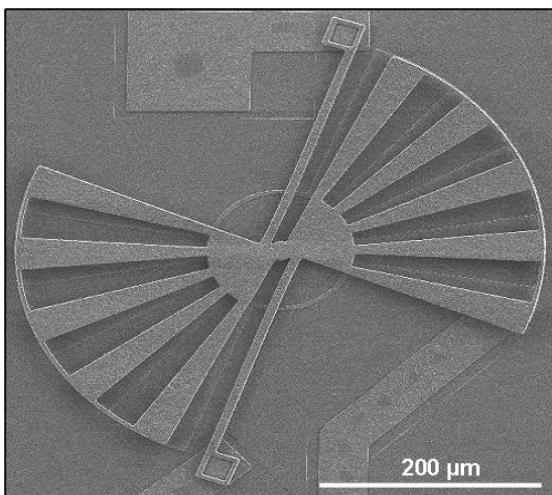
(a) Image MEB



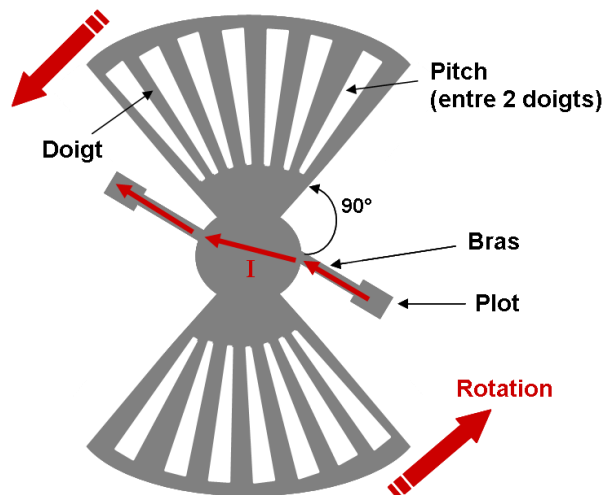
(b) Principe de fonctionnement

**Figure 74. Capacité variable latérale MEMS à actionnement électrothermique**

La Figure 74b et la Figure 75b illustrent le principe de fonctionnement des capacités variables latérales et rotationnelles. Leur actionnement est de type électrothermique, c'est-à-dire basé sur la dilatation thermique d'un matériau. En position initiale, les électrodes fragmentées sont décalées, la capacité est alors minimale. Puis, en dilatant les bras, on fait varier l'aire en regard des deux électrodes et on obtient une augmentation de la capacité.



(a) Image MEB



(b) Principe de fonctionnement

**Figure 75. Capacité variable rotationnelle MEMS à actionnement électrothermique**

Le déplacement est induit par un apport d'énergie thermique par effet Joule en appliquant un courant au niveau des bras actionneurs. Dans le cas de la capacité à déplacement latéral, les bras se dilatent et viennent pousser, de façon symétrique, l'électrode supérieure qui subit un déplacement vers la droite. Le principe est le même pour la capacité à déplacement rotationnel : l'expansion thermique induit au niveau des bras actionneurs génère un couple de forces produisant la rotation de la structure.

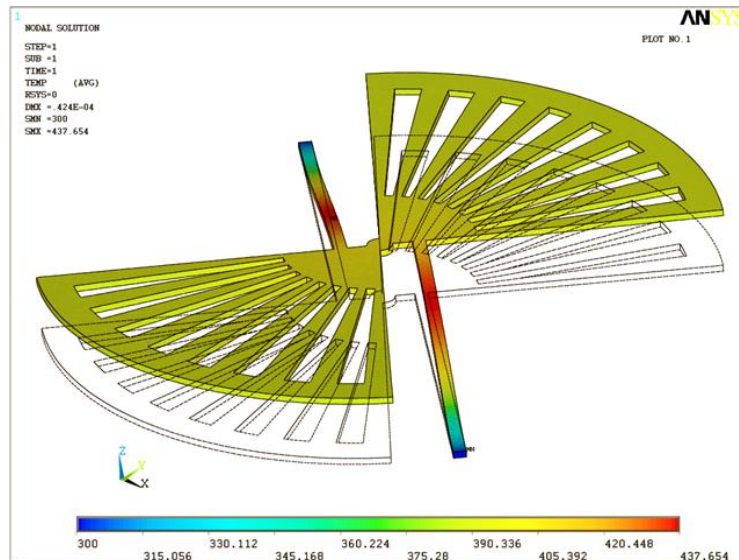
Après optimisation des designs, la longueur des actionneurs est égale à 200  $\mu\text{m}$  pour 8  $\mu\text{m}$  de largeur et 4  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. La puissance injectée nécessaire pour obtenir un déplacement maximal de 6  $\mu\text{m}$  est de 770 mW pour la capacité variable à actionnement électrothermique latéral. Dans le cas de l'actionnement électrothermique rotationnel, les bras d'actionnement sont placés à 90° du rayon des pales pour assurer une rotation optimale. Le maximum de rotation (7°) est atteint pour une puissance de 499 mW, qui correspond à une actuation de 1,3V et de 384 mA. Néanmoins, sous ces conditions, les capacités variables présentent une durée de vie très réduite.

La modélisation de l'actionnement par éléments finis permet d'étudier le comportement thermique de la structure de la capacité variable en fonction des paramètres d'actionnement. ANSYS est le logiciel de simulation multi-physique utilisé. Il permet de mener des analyses couplées mécanique-électrostatique et mécanique-thermique. Dans ce modèle on a adopté les propriétés mécaniques et physiques de l'aluminium pur, proche de celles de l'AlSi 4%. Ces valeurs sont reportées dans le Tableau 9.

<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>
Module de Young	70 GPa
Coefficient de Poisson	0,3
Résistivité	$2,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$
Coefficient d'expansion thermique	$23 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$
Conductivité thermique	$237 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

**Tableau 9 : Propriétés mécaniques et physiques de l'aluminium utilisées pour la modélisation de l'actionnement par éléments finis**

La Figure 76 montre la distribution thermique dans le cas d'une actuation de 1 V de la capacité variable à actionnement électrothermique rotationnel. Cette distribution de température est symétrique dans les deux bras d'actionnement. La température maximale simulée est de 164,5°C. Des résultats analogues ont été obtenus dans le cas de la capacité variable latérale.



*Figure 76. Distribution thermique simulée pour une tension d’actuation de 1V*  
[Mehdaoui07a]

Ces résultats n’expliquent pas les problèmes de défaillance rencontrés au cours des tests de fiabilité. En effet, la simulation indique un comportement thermique symétrique dans les deux bras, or les ruptures observées se produisent toujours au niveau de l’un des deux bras. C’est pourquoi il s’est avéré utile de réaliser des mesures expérimentales in-situ de la réponse thermique de la capacité, au moyen du dispositif de thermographie infrarouge présenté dans ce travail.

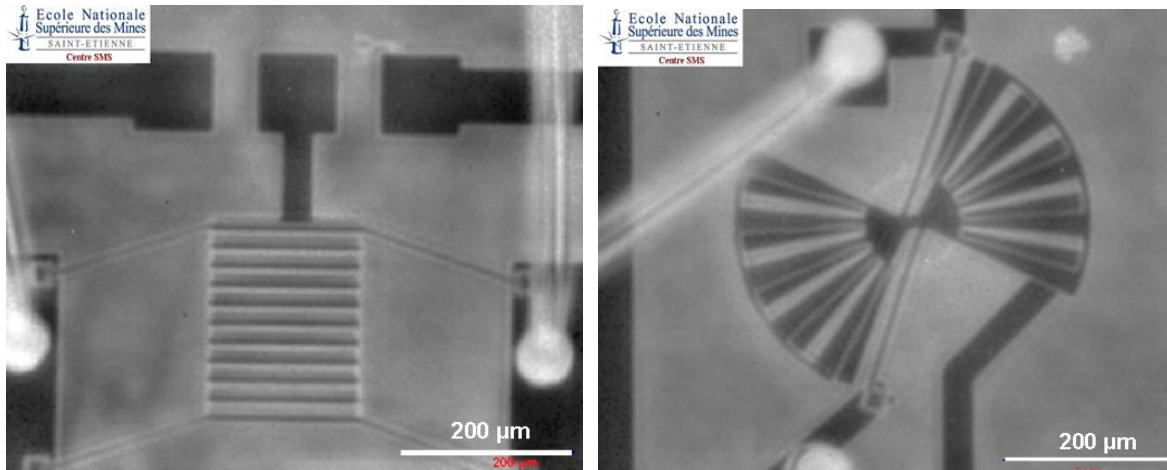
## 1.2. Le dispositif expérimental

### Réglage de la caméra thermique

Le banc infrarouge est monté en haute résolution et la caméra infrarouge est réglée afin de satisfaire les conditions optimales en termes de sensibilité. La résolution temporelle maximale atteinte est de 1ms.

### Les mesures infrarouges

L’ensemble des mesures thermiques a été réalisé sur le banc de thermographie infrarouge en configuration haute résolution. Les échantillons sont des capacités variables MEMS, à actionnement électrothermique, intégrées sur un boîtier céramique pour faciliter leur manipulation et permettre leur actionnement par l’application d’une tension. En fonction de la tension appliquée, on suit par thermographie infrarouge l’évolution de la température. A 0 V, l’image infrarouge en contraste d’émissivité de la Figure 77 permet d’avoir une bonne estimation de la résolution spatiale.



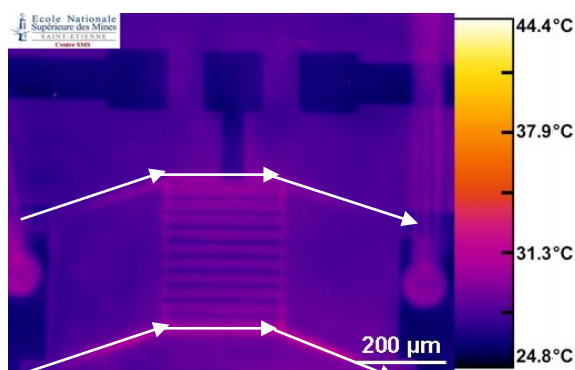
*Figure 77. Image infrarouge à 0 V des capacités variables latérale et rotationnelle*

Chaque film infrarouge est réalisé quelques secondes après l'application de la tension d'actionnement de la capacité variable, de façon à mesurer l'état thermique en régime stationnaire. En parallèle, l'intensité électrique traversant les actionneurs est enregistrée pour chaque mesure.

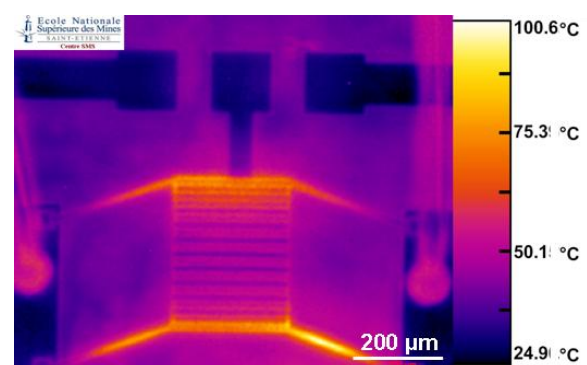
### 1.3. Caractérisation thermique

#### Capacité variable à actionnement électrostatique latéral

Après calibration en émissivité (avec l'émissivité de l'AlSi 4% déterminée à 0,33) et traitement des images infrarouges, les cartographies thermiques permettent de suivre les variations de température au sein de la structure en fonction des conditions d'actionnement appliquées. Les images thermiques de la capacité variable, correspondant à différentes tensions d'actionnement comprises entre 0,6 et 0,9 V, sont présentées dans les Figures 78 à 81.



*Figure 78. Mesure IR à 0,6 V 390 mA*



*Figure 79. Mesure IR à 0,7 V 430 mA*

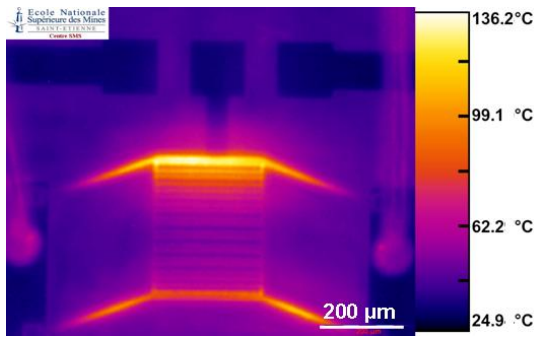


Figure 80. Mesure IR à 0,8 V 470 mA

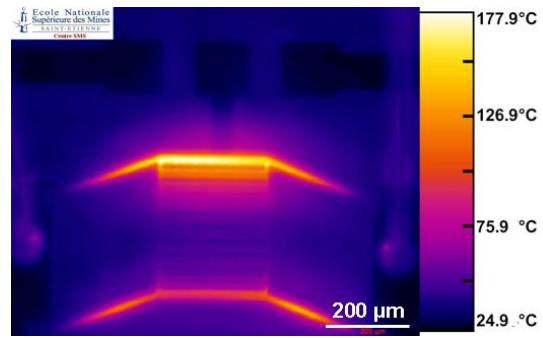


Figure 81. Mesure IR à 0,9 V 500 mA

L'étude des distributions thermiques le long des actionneurs (symbolisées par les flèches blanches sur la Figure 78) permet d'analyser l'augmentation de la température en fonction de l'intensité du courant transmis. La Figure 82 présente l'évolution de la température maximale des actionneurs en fonction de l'intensité du courant. Compte tenu des conditions expérimentales et des incertitudes au niveau de la détermination de l'émissivité, une erreur de 10% est estimée pour l'ensemble des valeurs. Il est ainsi possible de déterminer différentes phases dans le comportement thermique des capacités variables latérales en fonction des conditions d'actionnement. En dessous de 400 mA, le courant n'a que très peu d'influence sur la position de la capacité variable, l'allongement des actionneurs par dilatation thermique étant trop faible pour entraîner un déplacement significatif de l'électrode supérieure ; c'est le mode « stationnaire » ou de « latence thermique ». Puis, en fonction de la géométrie de la structure, la phase linéaire correspond à une augmentation linéaire de la température en fonction de l'intensité de courant transmis dans les actionneurs. Néanmoins dans cette plage, nous observons l'apparition d'une distribution non symétrique de la température dans les deux actionneurs.

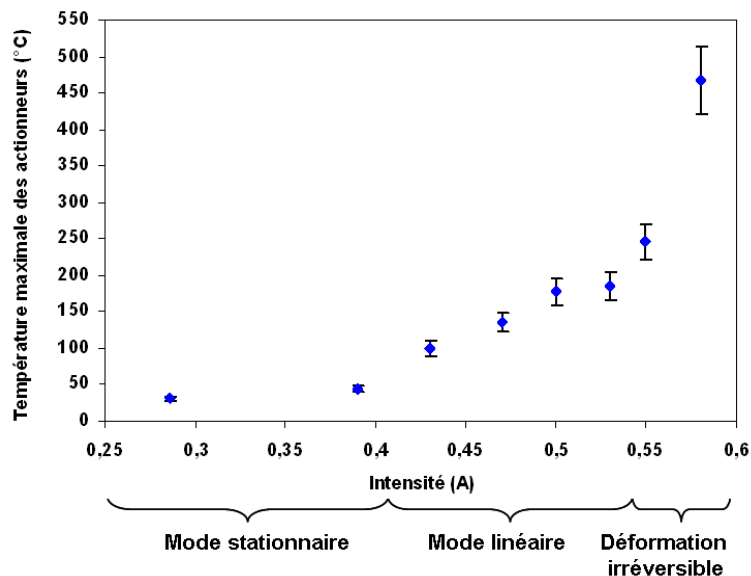


Figure 82. Evolution de la température maximale des actionneurs en fonction de l'intensité de courant



Au-delà de 550 mA, la distribution dissymétrique s'accroît et une déformation irréversible des actionneurs entraîne l'altération fonctionnelle de la capacité variable. Dans le cadre des mesures réalisées, la destruction systématique des capacités se produit pour un actionnement de 1,2 V, 580mA et la température maximale atteinte est alors de 467°C.

Ces résultats ont été confirmés par des observations optiques avant et après tests thermiques. Ces observations mettent en évidence le phénomène de « back bending », correspondant au fait que l'actionneur ne revient pas à sa position initiale après avoir été actionné. Ce phénomène résulte de l'application d'un trop fort courant dans les actionneurs [Comtois97].

De plus, il a également été observé, après tests thermiques, le flambement des bras actionneurs. Ce phénomène est, lui aussi, induit par l'application d'un courant trop important. La température générée par effet Joule est à l'origine d'une baisse de rigidité des actionneurs. En effet, lorsque le courant génère une température dépassant la température de transition de l'AlSi (400°C), la déformation plastique de la structure conduit à la transformation microstructurale des grains d'AlSi [Bahrami06]. Au niveau de l'actionneur, ceci se manifeste progressivement par la présence de traces visibles de la déformation. Ce phénomène ne dépend pas du nombre de cycles mais uniquement de la puissance appliquée à l'actionneur [Conant98].

### Capacité variable à actionnement électrostatique rotationnel

Après calibration et traitement, les cartographies thermiques pour chaque tension d'actionnement mesurée permettent de mettre en évidence l'élévation de température le long des deux bras d'actionnement. Les analyses thermiques de la capacité variable rotationnelle, correspondant à différentes tensions d'actionnement comprises entre 0,4 et 0,9 V, sont présentées de la Figure 83a à la Figure 87a. Les courbes (b) associées représentent les distributions de température de long des deux bras d'actionnement ; ces distributions sont symbolisées, sur la Figure 83a, par deux flèches blanches : une pleine pour l'actionneur d'entrée et l'autre en pointillés pour l'actionneur de sortie.

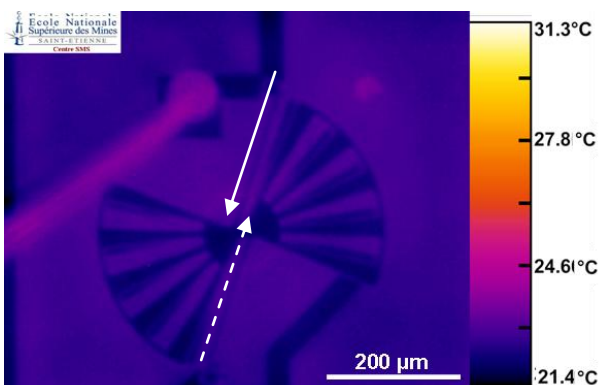
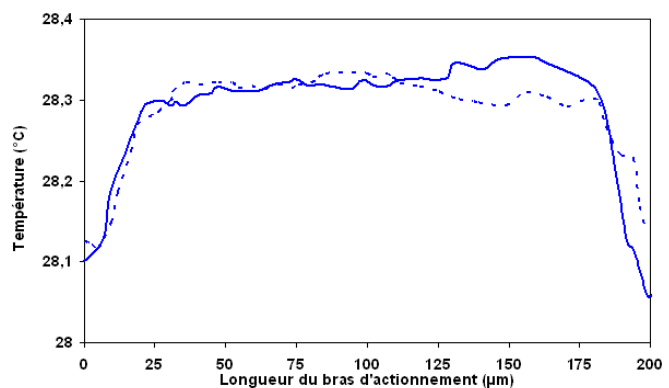


Figure 83a. Mesure IR à 0,4 V 225 mA



b. Distribution thermique le long des bras

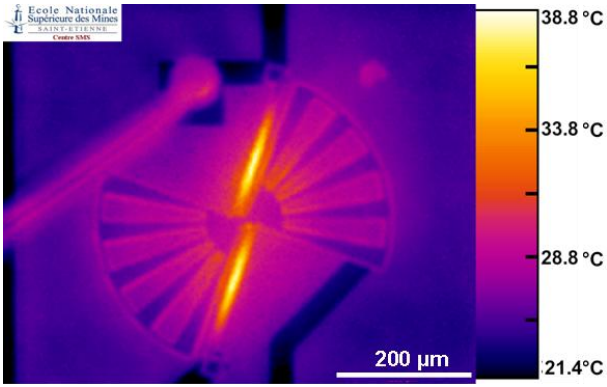
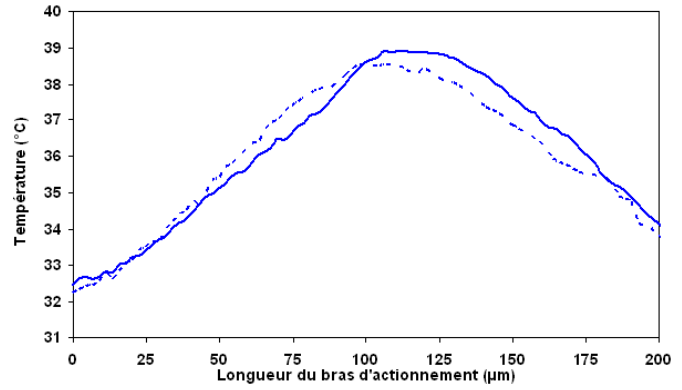


Figure 84a. Mesure IR à 0,6 V 313 mA



b. Distribution thermique le long des bras

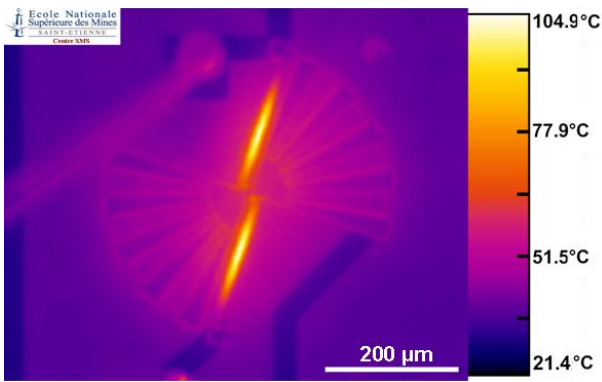
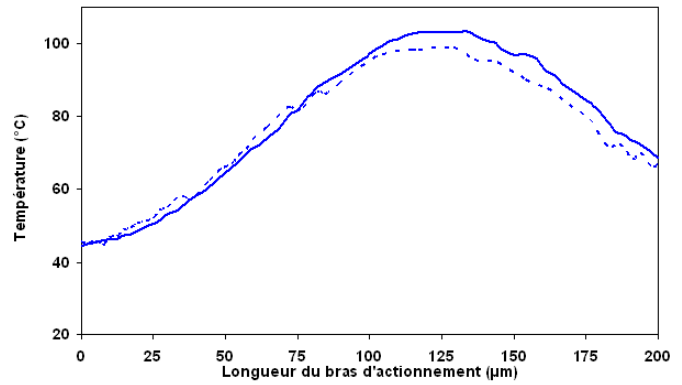


Figure 85a. Mesure IR à 0,7 V 350 mA



b. Distribution thermique le long des bras

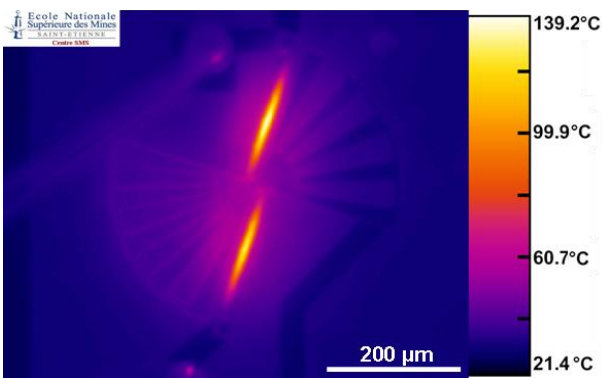
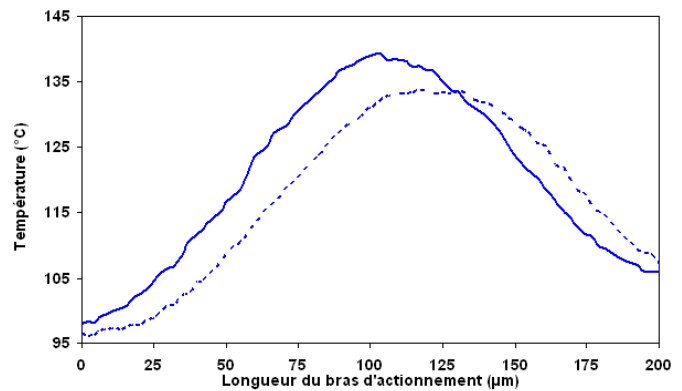


Figure 86a. Mesure IR à 0,8 V 380 mA



b. Distribution thermique le long des bras

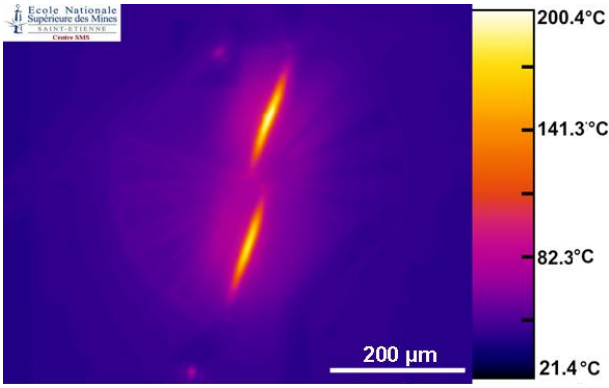
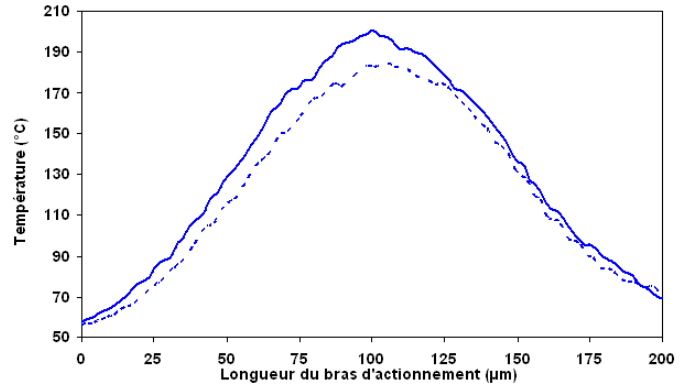


Figure 87a. Mesure IR à 0,9 V 424 mA



b. Distribution thermique le long des bras

De la même manière que dans le cas des capacités variables latérales, à partir d'un actionnement à 0,4 V, les mesures thermographiques mettent en évidence une différence de température significative, pouvant atteindre plus de 8°C le long des deux bras d'actionnement (Figure 83b à Figure 87b). On peut également noter que la distribution thermique est relativement localisée et quasiment symétrique dans les deux bras même si le bras d'entrée présente une température moyenne légèrement supérieure au bras de sortie. Au-delà de 0,4 V, les températures maximales mesurées au niveau des bras d'actionnement augmentent fortement, la distribution thermique prend l'allure d'une gaussienne et l'écart de température entre les actionneurs s'accroît. La Figure 88 représente l'écart de température maximale moyen entre les deux bras, avec une incertitude de 10% (conditions expérimentales, émissivité), en fonction de l'intensité du courant mesuré dans le cas d'un actionnement entre 0,4 et 1 V.

Cette différence de température résulte de la déformation de la structure de la capacité au cours de l'actionnement. En effet, les phénomènes de « back bending » et de flambage, déjà examinés dans le cas de la capacité variable latérale, ont été observés [Mehdaoui07b]. La Figure 89 est une image optique de la structure présentant le flambage des actionneurs après actionnement à 1,3V.

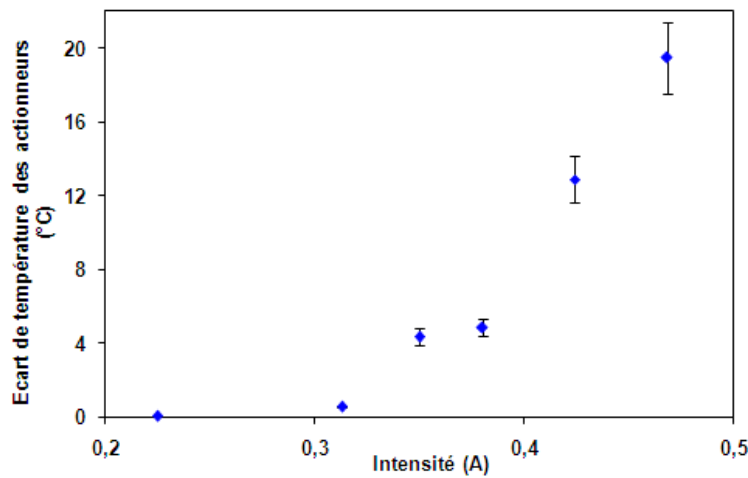
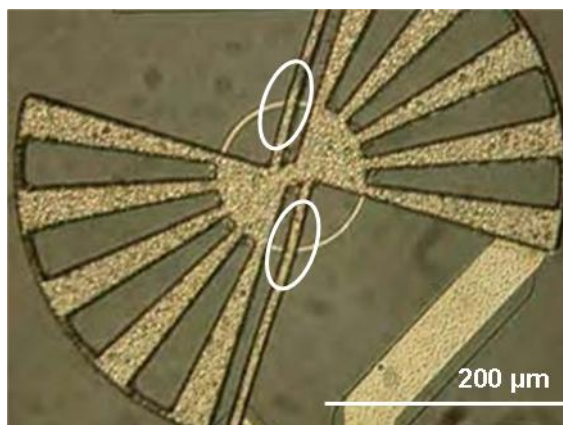


Figure 88. Ecart moyen de température maximale des bras en fonction de l'intensité

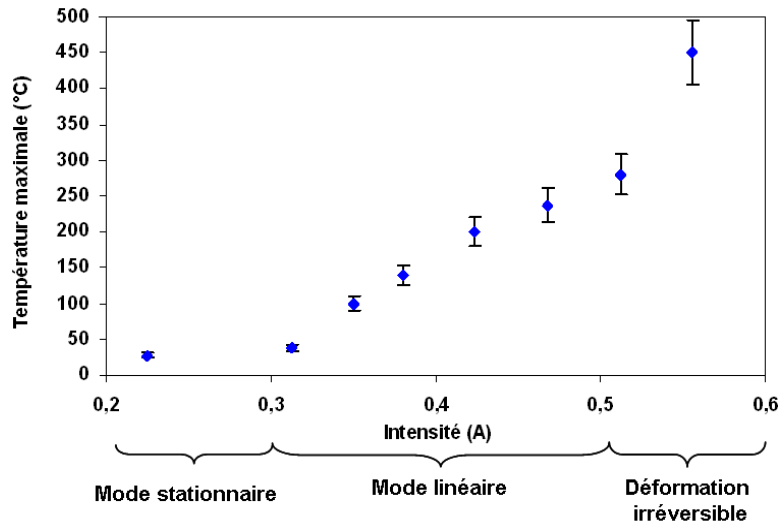


*Figure 89. Image optique du phénomène de flambage à 1,3 V*

De plus, les mesures profilométriques, menées à l'EPFL, ont montré que l'électrode supérieure se déplace dans le plan et hors plan. L'actionneur supérieur, correspondant à l'actionneur d'entrée du courant, a une inclinaison verticale vers le haut de plus de  $2 \mu\text{m}$  par rapport à l'actionneur inférieur dans les mêmes conditions de voltage [Mehdaoui07a]. L'explication qui a été présentée consiste à considérer que l'actionneur inférieur, moins déformé, reste plus proche du substrat, ce qui limite son échauffement. L'expansion thermique au niveau de l'actionneur supérieur est plus importante. Il subit donc plus de déformation et d'échauffement, ceci d'autant plus que la dissipation thermique vers le substrat est réduite : sa température augmente et entraîne un flambage jusqu'à la rupture irréversible. Ainsi, l'inclinaison de la structure induite par la déformation des actionneurs, a été présentée comme pouvant expliquer la différence de température entre les deux actionneurs, à l'origine de la destruction des capacités variables.

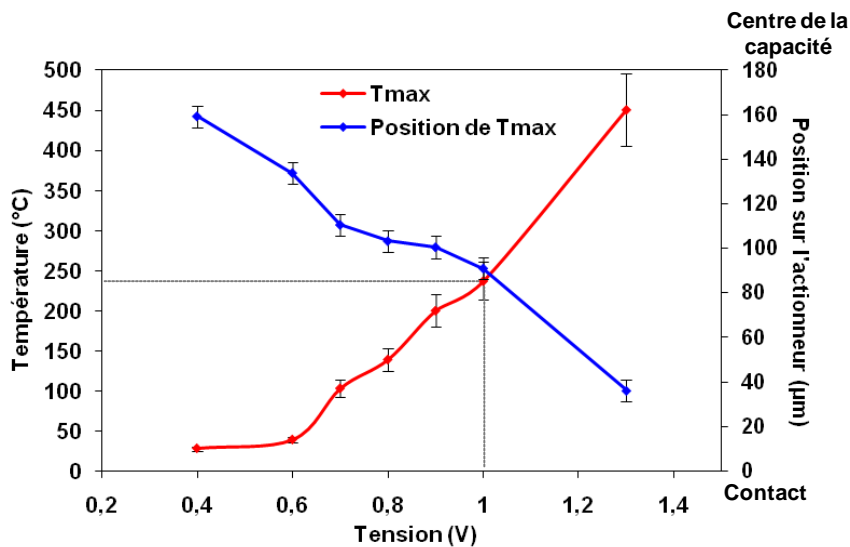
Au cours de notre étude nous cherchons à comprendre les mécanismes de déformation qui sont à l'origine de la destruction des capacités variables.

Il semblerait que le même phénomène soit à l'origine de la destruction des capacités variables latérales et rotationnelles. L'analyse des distributions thermiques des actionneurs permet de suivre l'évolution de la température maximale en fonction des conditions d'actionnement (Figure 90). L'augmentation de température semble présenter un profil similaire à celui mis en évidence précédemment pour la capacité variable latérale avec différentes phases thermiques. Le mode stationnaire, jusqu'à 300 mA, correspond à une position de l'électrode de la capacité variable peu dépendante du courant et correspondant probablement à la mise en compression de la structure mécanique de l'électrode supérieure. La phase linéaire s'étend jusqu'à 500 mA, durant laquelle l'électrode tourne proportionnellement en fonction du courant. Puis, sous l'effet de la température, il semblerait que des transformations microstructurales s'opèrent au niveau des actionneurs, entraînant la déformation irréversible de leur structure. L'altération fonctionnelle définitive de la capacité variable rotationnelle se produit pour un actionnement de 1,3 V soit 556 mA et la température maximale atteinte est alors de  $458^\circ\text{C}$ .



*Figure 90. Evolution de la température maximale des actionneurs en fonction de l'intensité du courant*

En s'intéressant maintenant à la position le long de l'actionneur d'entrée de la température maximale enregistrée en fonction de la tension appliquée (Figure 91), on peut remarquer que jusqu'à 1V, la température ne dépasse pas les 250°C, l'alliage reste stable et ceci correspond au domaine de fiabilité de la capacité. Par ailleurs, la localisation de l'échauffement maximum évolue. L'échauffement commence proche du centre de rotation de la capacité variable, puis il se déplace progressivement vers le centre de l'actionneur d'entrée au fur et à mesure que la température augmente avec l'augmentation de la tension appliquée. Au moment de la destruction de la capacité, lorsque la température maximale est atteinte, la zone d'échauffement maximal se déplace alors rapidement vers le début de l'actionneur d'entrée, c'est-à-dire très proche du plot d'encrage de l'actionneur sur le substrat qui correspond aussi à l'entrée du courant électrique dans l'électrode supérieure.



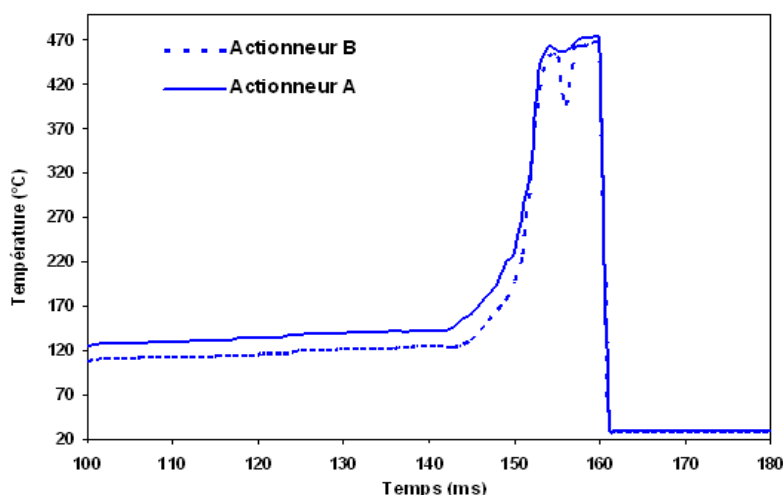
*Figure 91. Localisation de la température maximale de long de l'actionneur d'entrée*

## 1.4. Le mécanisme de rupture

Les mesures infrarouges réalisées nous permettent d'observer, en dynamique, la destruction des capacités variables. Ainsi, on peut, après avoir estimé la température maximale atteinte et suivi localement l'évolution de la température à la rupture de l'actionneur, essayer d'apporter des hypothèses quant aux mécanismes d'endommagement qui opèrent.

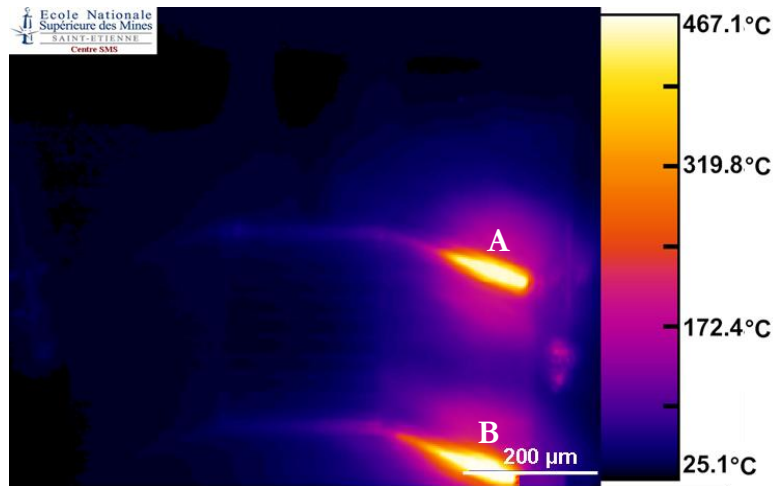
### Capacité variable à actionnement électrostatique latéral

Dans le cas de la capacité latérale, l'analyse infrarouge en dynamique permet de mettre en évidence que les deux actionneurs ont un comportement thermique analogue, comme le montre la Figure 92 qui représente l'évolution de la température au cours de la déformation de la capacité variable. Après mise sous tension à 1,2 V, les actionneurs se dilatent et s'échauffent progressivement pendant les premières 140 ms. Puis une augmentation brutale de température, suivie d'un palier de 10 ms, conduit à la destruction définitive des capacités. Le circuit étant rompu, la forte dissipation thermique vers le substrat ramène très rapidement (quelques ms) les actionneurs à la température ambiante.



*Figure 92. Evolution de la température au cours de la déformation à 1,2 V*

La Figure 93 montre une mesure thermique réalisée au cours de la rupture de la capacité variable correspondant à un actionnement à 1,2 V et 580 mA. La diffusion thermique au niveau des points chauds diminue légèrement la précision de la résolution. Par ailleurs, compte tenu des températures, dans la configuration de la caméra pour la mesure, il semble que la limite de saturation soit proche ; la mesure de la température maximale de 458°C peut alors être légèrement sous-estimée. Mais même sous-estimée, cette température est largement supérieure à la température de recristallisation de l'AlSi (300°C) [Lens04], ce qui justifie le phénomène de « back bending » et le flambage qui se produit dans les deux actionneurs.

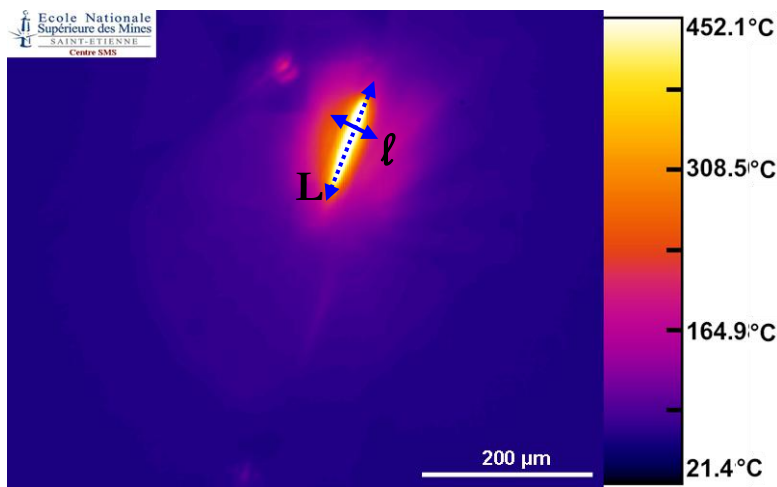


*Figure 93. Rupture de la capacité variable latérale à 1,2 V, 580 mA*

Par ailleurs, les mesures profilométriques, réalisées en dynamique par microscope à holographie digitale, qui ont été menées à l'EPFL, ont montré que l'électrode supérieure se déplace dans le plan et hors plan. L'inclinaison verticale vers le haut est estimée à plus de  $5\mu\text{m}$  pour une tension de 1 V [Mehdaoui07a]. Ce déplacement résulte de l'expansion thermique des actionneurs. Ce déplacement semble néanmoins particulièrement important pour expliquer l'origine de la déformation des actionneurs de la capacité variable, mais aussi l'évolution microstructurale des actionneurs conduisant à l'augmentation de la résistivité thermique et donc de la température jusqu'à emballement irréversible et rupture des actionneurs.

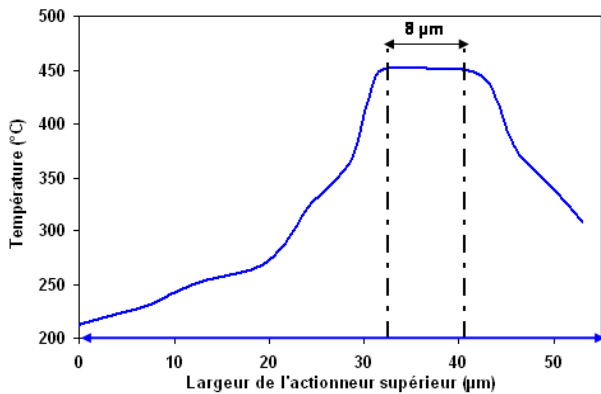
### Capacité variable à actionnement électrostatique rotationnelle

Au-delà d'un actionnement à 1 V et 450 mA, la température augmente brutalement, l'échauffement se localise essentiellement dans l'actionneur d'entrée ce qui accentue d'autant plus sa déformation. La tension de destruction irréversible des capacités rotationnelles est estimée à 1,3 V et 550 mA pour l'ensemble des capacités rotationnelles testées.

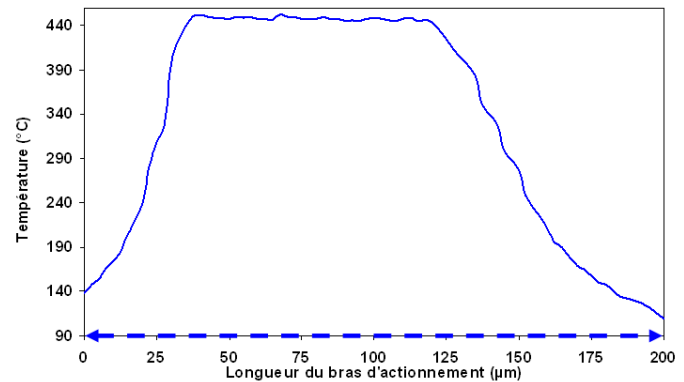


*Figure 94. Rupture de la capacité variable à 1,3 V, 550 mA*

La Figure 94 représente la mesure thermique juste avant rupture, et à cet instant la température maximale enregistrée est de 452°C. La dissipation thermique accentue le phénomène de diffusion et diminue légèrement la sensibilité en résolution de la mesure. Il en résulte que seul l'actionneur d'entrée se distingue de la scène thermique (quasi uniforme). La Figure 95 correspond à la distribution thermique dans le sens de la largeur ( $l$ ) de l'actionneur et cette distribution thermique est symbolisée par la flèche bleue sur la Figure 94. Il est ainsi possible, en mesurant la largeur du halo, d'évaluer l'impact de la diffraction du rayonnement dans l'air sur la mesure. La largeur de l'actionneur sur la cartographie thermique vaut 10  $\mu\text{m}$ , soit 2  $\mu\text{m}$  de plus que sa dimension réelle, les 2  $\mu\text{m}$  de différence correspondent à la résolution du banc de thermographie infrarouge.



**Figure 95. Distribution thermique de l'actionneur d'entrée en largeur**



**Figure 96. Distribution thermique le long de l'actionneur d'entrée**

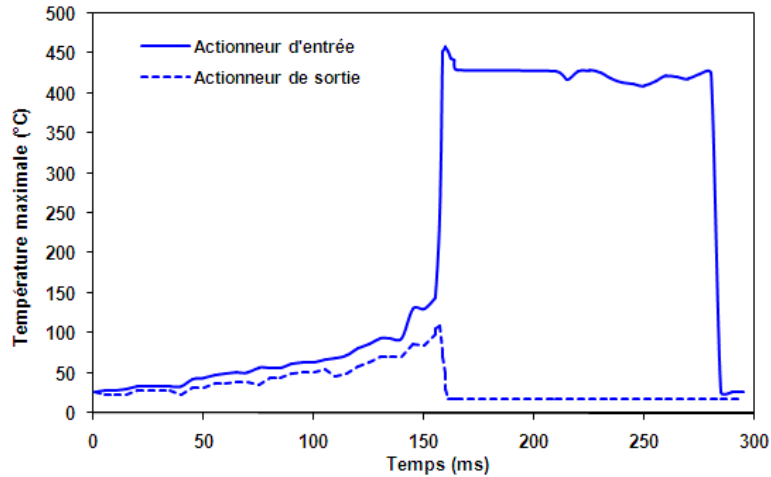
La Figure 96 représente la distribution thermique, en statique, le long de l'actionneur d'entrée, cette mesure correspond à la flèche ( $L$ ) en pointillés bleus sur la Figure 94. La présence du plateau de température, au niveau de la distribution thermique, semble signifier, qu'à cet instant, la température est non plus localisée mais relativement homogène le long de l'actionneur d'entrée.

Les mesures thermographiques en dynamique permettent de suivre en temps réel l'état thermique de la capacité en cours de fonctionnement. Il est ainsi possible de mesurer le profil de température avant, pendant et après déformation et contrôler la dégradation de la capacité variable. Les mesures thermiques sont prises toutes les 20 ms. La Figure 97 montre l'évolution de la température maximale au niveau des actionneurs soumis à une tension de 1,3 V. L'échelle des temps correspond à un temps relatif permettant d'estimer la rapidité du phénomène thermique. Après mise sous tension et durant les premières 150 ms, les actionneurs s'échauffent et se dilatent ; il est ainsi possible de suivre l'augmentation progressive de l'écart thermique entre les deux actionneurs. Juste avant rupture la température s'élève très brutalement dans l'actionneur d'entrée alors que parallèlement elle chute dans l'actionneur de sortie. Tant que la tension est maintenue, la température maximale reste relativement stable autour de 400°C.

Toutefois l'échelle des temps choisie est encore trop grossière pour que ce graphique rende compte de la propagation thermique le long de l'actionneur que l'on peut observer sur les acquisitions infrarouges. En effet, à partir des cartographies thermiques, il semble que le plateau



thermique observé résulte d'un point d'échauffement provenant non plus de l'actionneur lui-même mais du plot d'encrage de l'actionneur sur le substrat. La diminution de la tension ne permet plus de refaire fonctionner la capacité, elle est irréversiblement détruite. De plus le courant ne la traversant plus, il semblerait que des transformations microstructurales soient la cause de la rupture de l'actionneur d'entrée.

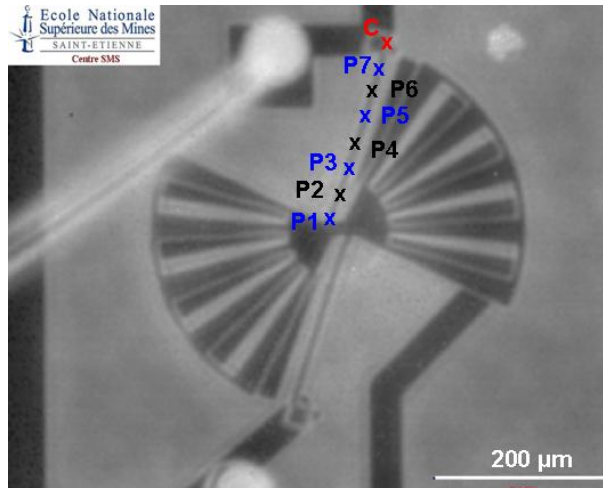


*Figure 97. Evolution de la température maximale des actionneurs au cours de leur déformation à 1,3 V*

### Analyse détaillée du mode de rupture de la capacité variable

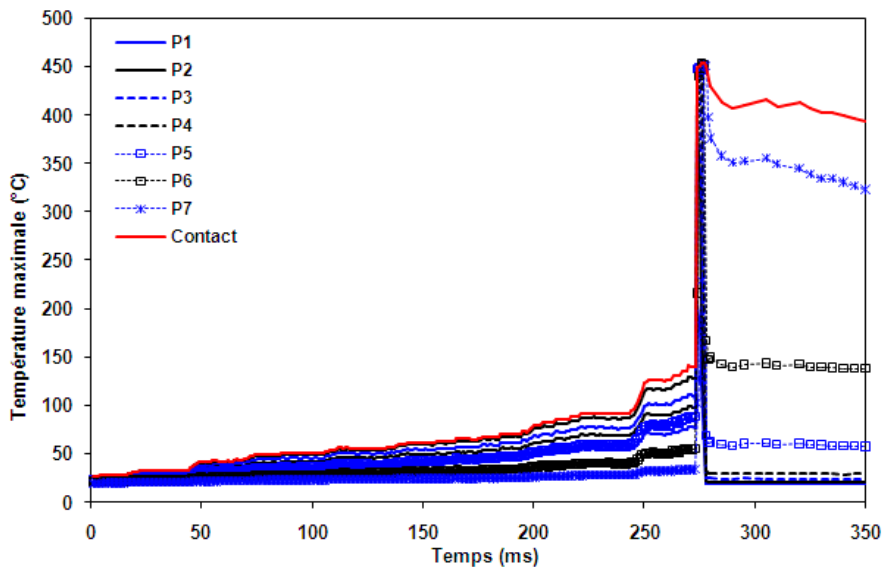
Comme la destruction de la capacité semble être provoquée par la rupture de l'actionneur d'entrée, il est, à présent, important de s'intéresser à la localisation précise du point chaud (correspondant à la température maximale enregistrée) le long de cet actionneur d'entrée, et ceci afin d'essayer de comprendre le mécanisme d'endommagement et de retrouver la zone de rupture sur l'actionneur. Les acquisitions ont lieu toutes les 1 ms. En prenant différents points de mesures le long de l'actionneur d'entrée, on peut mettre en évidence le phénomène de propagation thermique qui s'opère pendant la déformation de l'actionneur jusqu'à sa rupture.

La Figure 98 présente la localisation des huit points de mesure utilisés pour suivre le déplacement du point chaud. Sept points (nommés *P1* à *P7*) sont localisés sur le long de l'actionneur, le huitième (*C*), au niveau du contact électrique sur le plot d'encrage de l'actionneur d'entrée, sert de référence. Après mise sous tension, la valeur de la température enregistrée à chaque point permet de localiser la propagation de la chaleur au cours de la déformation jusqu'à rupture.



*Figure 98. Présentation des points de mesure pour la localisation du point chaud le long de l'actionneur d'entrée*

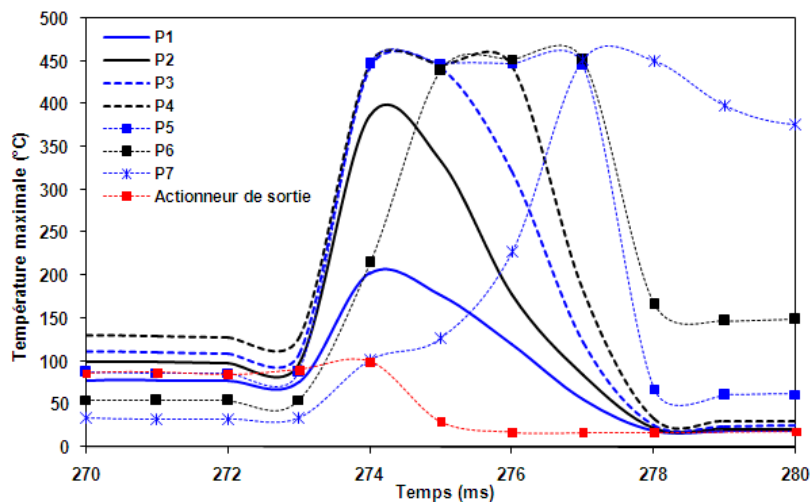
La Figure 99 donne l'évolution dans le temps des températures aux points P1, P2, ... P7 et C de l'actionneur d'entrée. On retrouve un profil thermique similaire à celui présenté sur la Figure 97. A l'instant initial, tous les points de mesure correspondent à la température ambiante. L'augmentation de température se fait ensuite progressivement, mais pas uniformément le long de l'actionneur. C'est au point de contact (C) le plus à l'extérieur du bras que la température est constamment maximale. L'augmentation très importante et brutale de la température est constituée d'un ensemble de pics thermiques propres à chaque point de mesure. Puis tous les points de mesure voient leur température diminuer rapidement à l'exception du point de contact dont la température maximale de 400°C reste stable tant que le courant est maintenu.



*Figure 99. Localisation de la propagation thermique le long de l'actionneur d'entrée en cours de rupture à 1,3 V*

L'analyse en temps réel de la propagation du front thermique permet de localiser plus précisément la position de la zone d'échauffement et donc la zone de transformation microstructurale.

La Figure 100 est un zoom de la Figure 99 de façon à localiser plus précisément la position de la zone d'échauffement ; on s'intéresse plus particulièrement à l'intervalle de temps compris entre 270 et 280 ms, correspondant au pic thermique où la température maximale enregistrée à chaque point est atteinte. Ce pic thermique illustre un phénomène très rapide, se produisant en moins de 10 ms. Les courbes de température en chaque point de mesure permettent de mettre en évidence le caractère non homogène et mobile du phénomène d'emballement thermique. En effet, c'est proche du centre (correspondant aux points *P3* et *P4* dans la région de contraintes et de températures maximales) que l'actionneur s'échauffe brusquement. En arrière (points *P1* et *P2*), plus on s'éloigne du « centre thermique » c'est-à-dire plus on se rapproche du centre de la capacité variable et de l'actionneur de sortie, plus la température maximale enregistrée est faible. En avant du centre thermique (points *P5*, *P6* et *P7*), tous les points présentent une température maximale estimée en moyenne à 450°C mais avec un léger décalage dans le temps, les points les plus proches du contact étant les plus en retard. Après être passé par leur maximum, tous les points de l'actionneur montrent une diminution de température d'autant plus rapide qu'ils se trouvent éloignés du contact, ce dernier reste stable aux environs de 400°C tant que le courant est appliqué. Il semble que ce « flash » thermique qui se propage très rapidement le long du bras, soit à l'origine de la transformation microstructurale et de la destruction des capacités. La vitesse de la propagation thermique est estimée à 30 mm/s.



**Figure 100. Propagation du pic thermique le long de l'actionneur d'entrée en cours de rupture à 1,3 V**

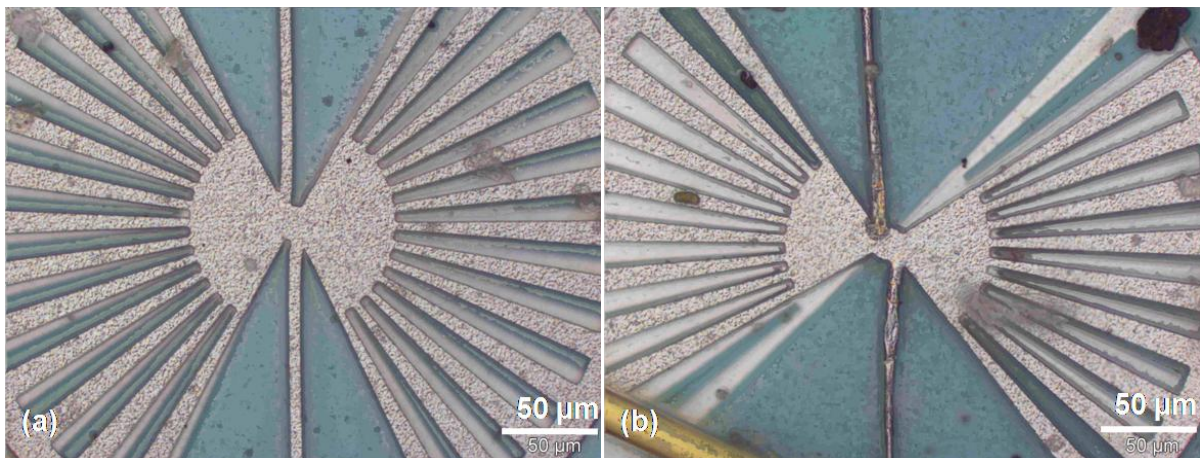
Toutes ces mesures nous permettent de dégager une hypothèse pour décrire le mécanisme d'endommagement irréversible des capacités. En effet, il semblerait que la rupture des capacités soit attribuable à une évolution microstructurale au niveau des actionneurs. Par ailleurs, l'augmentation des contraintes au sein des actionneurs sous l'action conjointe de la dilatation, de

la rotation et de l'inclinaison de l'électrode supérieure conduit au flambage de l'actionneur d'entrée et à la modification de la microstructure, entraînant une forte variation de la topologie locale et donc de la résistivité au cours des transformations exothermiques [Keller07]. La modification microstructurale provoque une augmentation brutale et très importante de la résistance dans la zone transformée. La résistance qui augmente avec la température peut expliquer la réaction en chaîne qui conduit à la propagation du « flash » thermique en avant le long de l'actionneur, au fur et à mesure de la transformation locale microstructurale (donc de l'augmentation de la résistivité) alors que parallèlement, en arrière, le courant diminuant (étant donnée que l'actuation est faite à tension imposée constante), la dissipation thermique vers le substrat permet une diminution rapide de température.

Pour conforter ce scénario, des observations complémentaires ont été réalisées.

### Etude microstructurale des actionneurs

Les transformations microstructurales des actionneurs produites au cours du fonctionnement de la capacité variable sont facilement observables sur les photos optiques présentées sur la Figure 101 avant actionnement (a) et après actionnement (b).

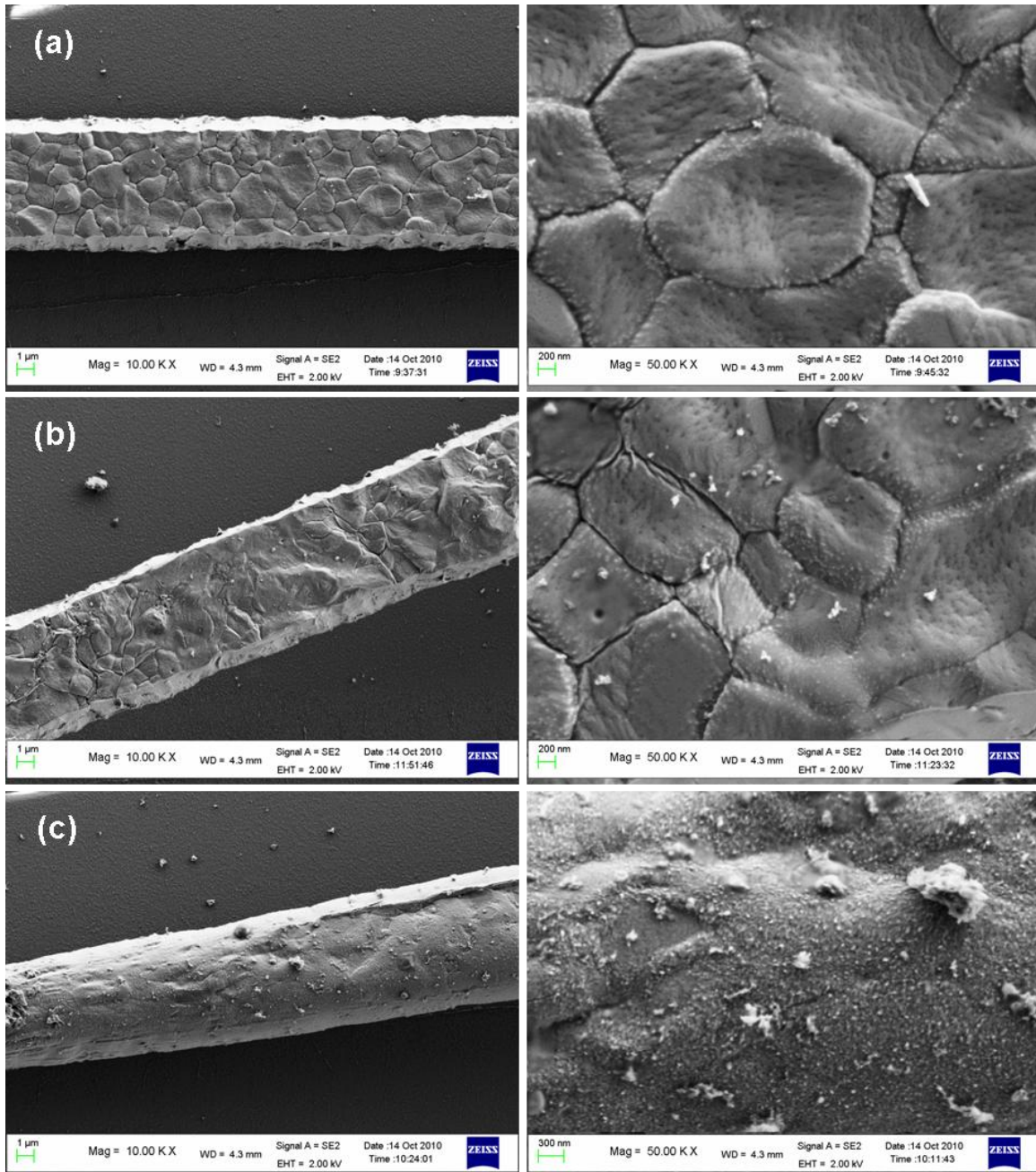


**Figure 101. Transformation morphologique des actionneurs : (a) avant actionnement, (b) après actionnement à 0,9 V**

Les observations microstructurales, par Microscopie Electronique à Balayage à haute résolution (MEB-FEG), mettent en évidence les transformations de la microstructure qui se produisent au niveau des actionneurs. La Figure 102 présente la structure initiale de l'actionneur d'entrée avant fonctionnement (a), au cours d'un actionnement à 1 V (b) et à 1,3 V (c). On y distingue nettement la microstructure initiale (a) dont les grains ont une forme équiaxiale et un diamètre de l'ordre de 2 µm. Au cours d'un actionnement à 1 V (b), sous l'action de la chaleur et des contraintes, la microstructure évolue et semble présenter des zones de recristallisation et de croissance de grains. Après un actionnement excessif de 1,3 V (c), l'actionneur présente une topologie très différente, presque cylindrique ; la rupture de l'actionneur se produit là où les contraintes sont maximales, la densité de courant et la température pourraient expliquer la fusion locale et le réarrangement topographique de la microstructure.

Ces observations confortent parfaitement notre hypothèse sur le mécanisme d'endommagement des capacités qui présentent deux phases :

- pour les actionnements inférieurs de 1 V, l'alliage reste stable, la microstructure évolue par croissance de grain et augmentation de la topologie locale ;
- pour des actionnements supérieurs à 1 V, les propriétés de l'alliage évoluent fortement, de fortes strictions apparaissent et engendrent une bifurcation avec accroissement brutal de la température se propageant le long de l'actionneur jusqu'à sa rupture.



**Figure 102. Microstructure de l'actionneur d'entrée (a) à l'état initial, (b) en cours d'un actionnement à 1 V et (c) à 1,3 V après rupture. Grossissement : à gauche 10000 et à droite 50000**

## 2. Etude d'un résonateur BAW-RF

DANS CETTE ETUDE le composant MEMS est un résonateur de type BAW-RF. Ce travail s'est déroulé dans le cadre d'un consortium de recherche de la région Rhône-Alpes associant deux laboratoires, l'IMEP de Grenoble-INP et le centre SMS de l'Ecole des Mines, en partenariat avec STMicroelectronics et le CEA-LETI. Les dispositifs auxquels nous nous sommes intéressés dans ce projet sont les nouveaux résonateurs à ondes acoustiques de volume (BAW pour Bulk Acoustic Wave), avérés depuis quelques années comme étant une solution de choix pour la réalisation de filtres sélectifs radiofréquences. L'objectif est d'analyser les mécanismes de défaillance de ces structures afin d'optimiser leur design et garantir un fonctionnement stable. Ce travail complète les travaux de thèse de Brice Ivira [Ivira06a].

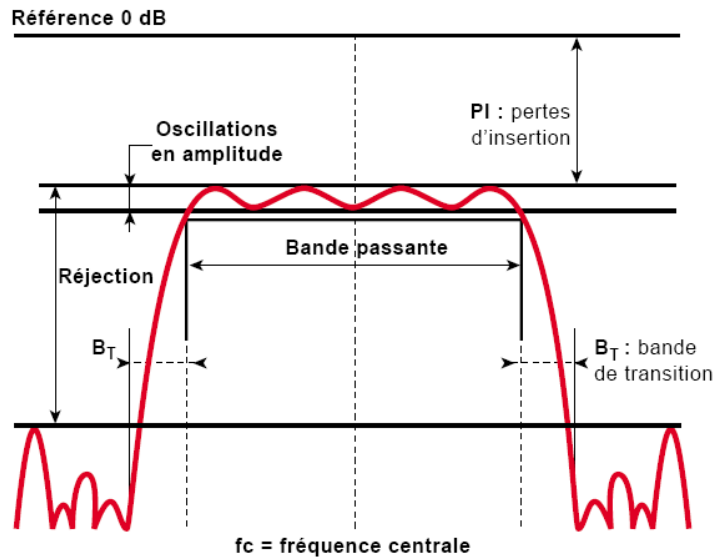
La stabilité en température étant une condition nécessaire de stabilité de fonctionnement d'un filtre BAW, l'estimation de la température par thermographie infrarouge au cours de mesures in-situ, permet d'en déterminer le profil thermique en fonction des conditions de fonctionnement.

Après la présentation du principe de fonctionnement et de la technologie BAW, ainsi que des problématiques associées, les mesures thermiques réalisées permettront d'optimiser la structure du résonateur BAW et de réduire les éventuels problèmes de fiabilité et de dégradation liés à l'échauffement.

### 2.1. Présentation des résonateurs BAW-RF

#### **Le rôle des résonateurs BAW dans un système de télécommunication sans fil**

Compte tenu de l'augmentation continue de l'occupation du spectre radiofréquence et afin de pouvoir assurer la cohabitation de tous les standards de la téléphonie mobile, des exigences de plus en plus strictes émergent, conduisant à des architectures plus sélectives. Les technologies actuelles sont remises en cause. Des solutions innovantes les remplacent afin de relever les nouveaux défis technologiques. Ainsi, c'est dans l'optique de réaliser des composants capables de sélectionner efficacement l'information, dans un spectre alloué spécifique, que les nouveaux filtres à base de résonateurs BAW sont développés. Ces résonateurs peuvent être utilisés soit individuellement, soit regroupés selon différentes architectures pour répondre aux exigences des fonctions de filtrage RF et d'oscillateur dans les téléphones cellulaires.



**Figure 103. Caractéristiques principales d'un filtre passe-bande RF [Ivira06a]**

Les caractéristiques principales d'un filtre sont définies sur la Figure 103. Le premier paramètre important lors de la conception du filtre est la fréquence centrale de la bande passante. Par ailleurs, les pertes d'insertion doivent être les plus faibles possibles au sein de la bande passante. En terme de puissance du signal, 3 dB de pertes d'insertion sont équivalents à 50% du signal perdu sous forme de chaleur principalement. Ces pertes réduisent la sensibilité de la chaîne de réception car diminuent le niveau d'amplification dans la chaîne d'émission. Ce besoin d'apport d'énergie supplémentaire conduit à une augmentation significative de la consommation et donc une réduction de l'autonomie des batteries.

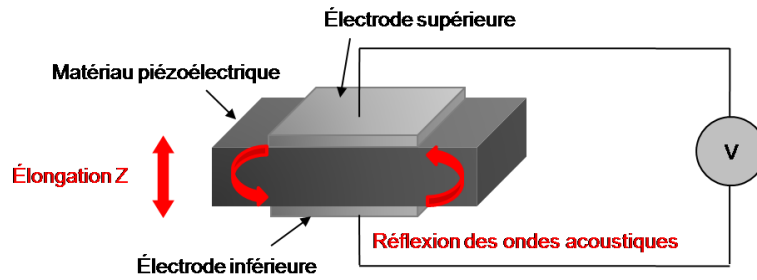
Une forte dissipation de puissance conduit également à l'auto-échauffement du filtre et entraîne une translation de la bande passante proportionnelle à la variation de la température du dispositif. L'aspect stabilité en température, ainsi que l'isolation ou le niveau d'atténuation en dehors de la bande sont aussi des paramètres importants pour éviter les interférences des communications, surtout avec le rapprochement des bandes. Cela signifie que la bande de transition doit être la plus étroite possible. De ce fait, pour permettre une bonne sélection des canaux, le décalage en fréquence en fonction de la température, de la puissance RF ou du champ électrique ou encore du vieillissement doit être connu et très faible pour avoir un dispositif opérationnel et fiable durant toute la durée de vie du composant.

### **Description structurelle et principe de fonctionnement des résonateurs BAW**

La structure de base est une capacité Métal-Isolant-Métal dont le diélectrique est un matériau piézoélectrique pris en sandwich entre deux électrodes métalliques de faible épaisseur comme l'illustre la Figure 104. Suite à l'application d'un champ électrique, le matériau piézoélectrique se déforme. La déformation générée se propage dans le matériau avec une vitesse  $v$  qui dépend des propriétés élastiques du matériau dans la direction de propagation :

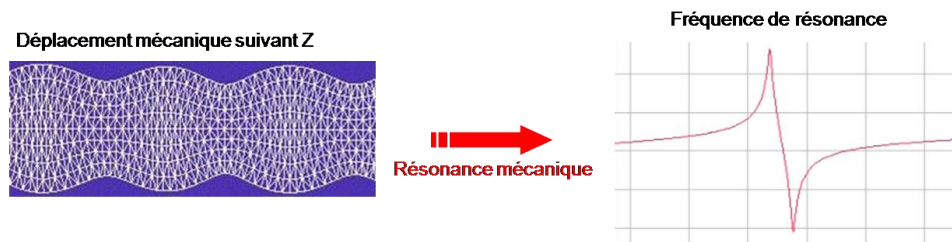
$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{34}$$

avec E le module d'élasticité et  $\rho$  la masse volumique.



*Figure 104. Structure d'un résonateur BAW*

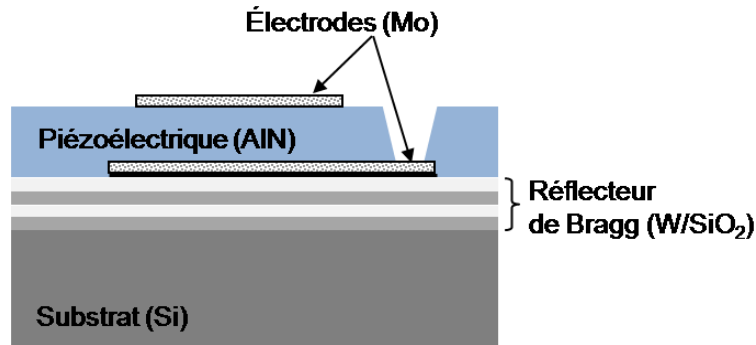
L'onde acoustique générée se propage dans une direction bien déterminée et lorsqu'elle rencontre une discontinuité acoustique, une onde réfléchiée se crée à l'interface des deux milieux. La fréquence de résonance est fixée par la longueur caractéristique de propagation de l'onde. La Figure 105 présente le principe de fonctionnement d'un résonateur BAW qui exploite donc les propriétés de la propagation d'ondes acoustiques de volume au sein d'une couche mince de matériau piézoélectrique, afin de réaliser des résonateurs dont la fréquence de fonctionnement est définie par l'épaisseur de cette couche mince. La maîtrise du dépôt des matériaux piézoélectriques en couches minces permet la réalisation de résonateurs BAW fonctionnant à des fréquences bien supérieures au GHz. Ces résonateurs garantissent de très bonnes performances pour les fonctions de filtrage dans les modules d'émission-réception des systèmes de télécommunication sans fil.



*Figure 105. Principe de fonctionnement du résonateur BAW*

Dans le cas de notre étude, les résonateurs de type SMR (Solidly Mounted Resonator) ou S-BAW se composent d'un film piézoélectrique en AlN, d'électrodes en Mo, avec un substrat en Si. Ce résonateur dispose, en dessous de l'électrode inférieure, d'un réflecteur de Bragg constitué d'un ensemble de couches dont l'impédance acoustique est alternativement forte et faible. Les ondes sont alors réfléchies vers la surface active, limitant ainsi les pertes acoustiques dans le substrat. Dans notre cas, le réseau de Bragg est conçu en associant le SiO<sub>2</sub> dont l'impédance acoustique est faible avec le W d'impédance acoustique forte. La structure du résonateur est présentée dans la Figure 106.





*Figure 106. Structure du résonateur BAW SMR avec réflecteur de Bragg*

### **Influence de la température dans les résonateurs BAW sous puissance RF**

Bien que la technologie BAW présente des propriétés très intéressantes, notamment une bonne tenue en puissance, plusieurs études consacrées aux aspects de fiabilité des résonateurs BAW ont mis en évidence le fait que la stabilité en température est une condition nécessaire à la stabilité globale d'un filtre BAW pour les applications à de fortes puissances. Aussi, les variations des paramètres de fonctionnement du BAW en fonction de la température doivent être connues et quantifiées pour déterminer les plages de puissance et de température dans lesquelles les dispositifs sont fonctionnels. En effet, il est bien connu que les variations de la température modifient les paramètres clés du résonateur [Lakin00] notamment la fréquence de résonance qui varie quasi-linéairement en fonction de la température du dispositif [Ben Hassine09].

Par ailleurs, une augmentation de la température réduit en général la durée de vie du dispositif et accélère son vieillissement en conduisant, dans les cas extrêmes de puissance, à la formation de fissures induites par des contraintes mécaniques RF et de brûlures dues à la température issue de l'auto-échauffement [Larson00]. Dans le cas du phénomène d'auto-échauffement sous puissance RF, les pertes d'énergie associées dépendent de la topologie du résonateur, notamment sa taille et sa fréquence de fonctionnement. R. Aigner montre que d'autres modes de défaillance, comme la formation de points chauds et la dégradation des métallisations, surviennent dans la partie du résonateur qui subit la plus forte densité de courant [Aigner05].

Pour définir correctement la source de chaleur dans un BAW, il est important de comprendre les phénomènes qui conduisent à la génération de chaleur dans un tel dispositif. D'une façon générale, dans le cas d'un dispositif piézoélectrique, il existe trois sources possibles de chaleur : l'échauffement par les pertes mécaniques, dû principalement aux variations mécaniques, l'échauffement par effet Joule et les pertes diélectriques qui constituent une source importante d'échauffement dans un matériau diélectrique [Thalhammer05]. Il a été montré la forte dépendance entre les pertes diélectriques et la fréquence : plus la fréquence du champ électrique est élevée, plus les frottements sont intenses et plus le dégagement de chaleur est important. La contribution de chaque mécanisme à la dissipation d'énergie varie en fonction de la fréquence du signal à l'entrée du dispositif [Leleu].

Afin de comprendre les variations des paramètres clefs de fonctionnement des résonateurs BAW, en vue de garantir leur stabilité, d'étudier leur fiabilité et de faciliter leur conception, le comportement thermique des dispositifs BAW a été étudié par thermographie infrarouge.

## 2.2. Le dispositif expérimental

La performance du banc de thermographie infrarouge développé, en termes de sensibilité thermique et de résolution spatiale, permet d'envisager de dresser la cartographie thermique de l'échauffement des résonateurs BAW en fonction de la fréquence de résonance. L'objectif de l'étude était de déterminer la température générée dans les résonateurs en fonction de la puissance réellement absorbée.

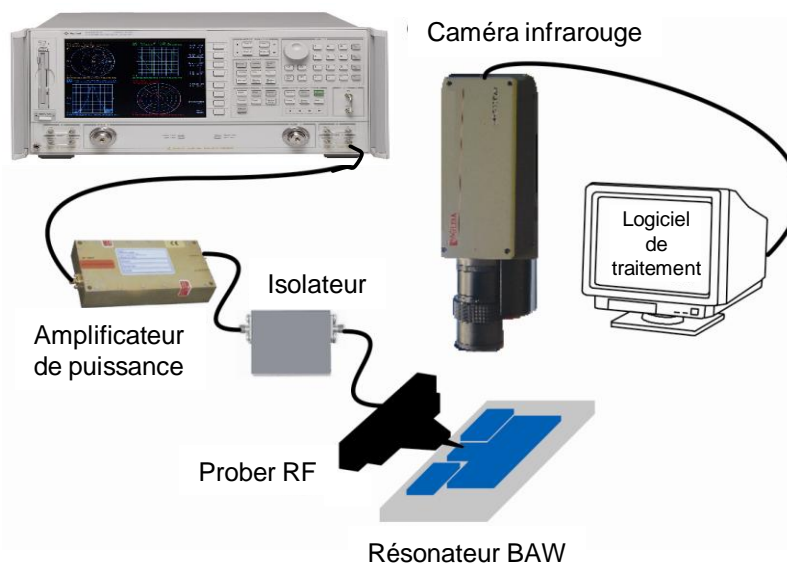
Cette étude est à l'origine du développement du banc de thermographie infrarouge et chronologiquement ce fut donc sa première mise en œuvre.

### Réglage de la caméra thermique

Le banc infrarouge est monté en haute résolution et la caméra infrarouge est réglée afin de satisfaire les conditions optimales en termes de sensibilité et de vitesse d'acquisition.

### Dispositif de caractérisation thermique et de puissance

Les mesures ont été réalisées à l'IMEP. Le banc de thermographie infrarouge a donc dû être adapté au dispositif de caractérisation RF spécialement conçu pour l'étude. Il s'agit de corrélérer en dynamique les cartographies thermiques avec le niveau de puissance absorbée et donc dissipée dans les filtres [Ivira08]. La Figure 107 représente le schéma du dispositif expérimental mis en place.

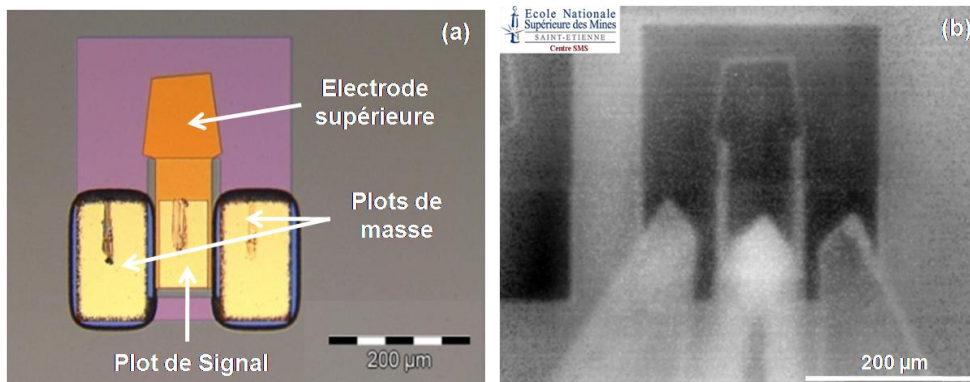


*Figure 107. Schéma du banc expérimental*

Le banc est équipé d'une source RF, spectralement pure et très stable en fréquence, qui est utilisée pour émettre un signal à la fréquence choisie et une puissance déterminée. Le signal émis est amplifié par un amplificateur de puissance qui peut délivrer une puissance de sortie allant jusqu'à 10W. La puissance délivrée par l'amplificateur de puissance est envoyée vers le résonateur via un isolateur. L'isolateur est utilisé à la sortie de l'amplificateur pour le protéger de la puissance réfléchiée par le résonateur. Un wattmètre permet de mesurer le niveau du signal à l'entrée et à la sortie du résonateur. Une sonde coplanaire, spécialement conçue pour notre étude alimente le résonateur tandis que la caméra thermique, via le dispositif optique haute résolution, analyse en dynamique la distribution de température générée par effet joule dans le résonateur.

Dans cette configuration, la puissance est évaluée de manière théorique, en considérant que la réponse électrique du résonateur est identique avec ou sans puissance. Or, compte tenu des températures mises en jeu dans les résonateurs, leurs caractéristiques changent avec la puissance appliquée. Le dispositif a donc été complété d'un coupleur directif, dont l'utilisation permet de récupérer l'onde réfléchiée par le résonateur et ainsi, avec une méthode de calibrage adaptée, de connaître en temps réel le coefficient de réflexion du composant en fonction de la puissance électrique appliquée. Le banc ainsi réalisé est capable de donner la température en fonction de la puissance RF pour n'importe quel résonateur.

Les échantillons sont des résonateurs BAW dont plusieurs structures ont été étudiées. La Figure 108 présente un exemple de résonateur BAW avec électrode supérieure apodisée, en image optique (a) et infrarouge (b). L'image infrarouge, en contraste d'émissivité, donne un aperçu de la résolution spatiale.



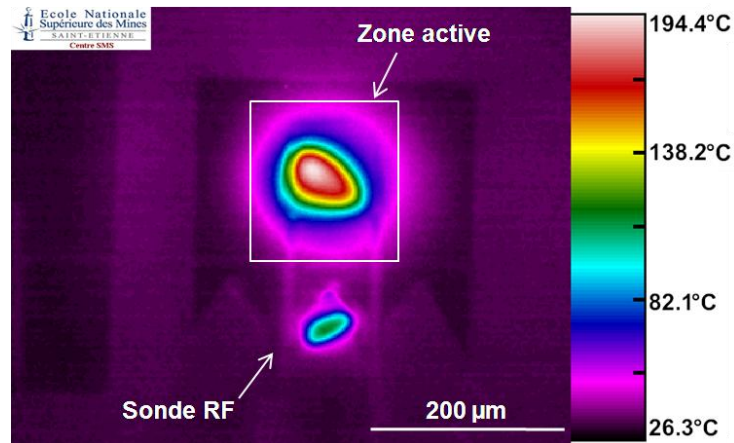
*Figure 108. Photo optique d'un résonateur BAW apodisé (a) et image infrarouge (b)*

### 2.3. Caractérisation thermique

Les films infrarouges sont réalisés quelques secondes après l'application de la tension d'actionnement de la capacité variable, de façon à considérer l'état thermique en équilibre stable. En parallèle, l'intensité électrique est enregistrée pour chaque mesure. L'émissivité de chacun des films minces mis en jeu dans les résonateurs a été déterminée à partir d'un échantillon étalon équivalent à l'empilement des multicouches du résonateur. Les travaux présentés complètent les études déjà publiées dans ce domaine [Fillit05, Ivira06b].

### Analyse de la puissance dissipée par auto-échauffement

En fonction de la puissance RF appliquée, on cherche à déterminer, par thermographie infrarouge, la température générée par auto-échauffement. La Figure 109 donne un exemple de la cartographie thermique obtenue pour un résonateur BAW soumis à une puissance de 1,4 W. La température est déterminée avec précision en fonction de la puissance absorbée mesurée et de la fréquence de résonance. On peut observer un échauffement maximum de l'ordre de 194°C, très localisé au niveau de la zone active, et qui s'explique par la bonne conductivité thermique de la structure multicouche du miroir acoustique.



*Figure 109. Résonateur BAW soumis à 1,4 W en résonance à 2,14 GHz*

On distingue aussi nettement l'échauffement de la micro-sonde RF au niveau du contact micro-sonde-plot. Cette dissipation importante dans ce contact ohmique signifie qu'une partie de la puissance délivrée en sortie de l'amplificateur est perdue, et n'est donc pas transférée au résonateur. Ces pertes peuvent être minimisées en optimisant les propriétés électriques des matériaux de contact. Le phénomène d'auto-échauffement induit des dérives des caractéristiques électriques du résonateur. Or les fréquences favorisant l'absorption de puissance se localisent entre la fréquence de résonance et l'antirésonance et correspondent au minimum du coefficient de réflexion. En dehors de cette plage de fréquence, le coefficient de réflexion étant élevé, la puissance électrique est fortement rejetée. La Figure 110 illustre ce phénomène en présentant les mesures des puissances incidentes et absorbées associées (notées P1, P2, P3 et P4) en fonction de la fréquence. Il est ainsi possible de connaître les puissances RF maximales et les fréquences mises en jeu dans les BAW. La puissance absorbée passe par un maximum situé autour de 2,1GHz et s'étend sur une fenêtre d'absorption d'environ 30 MHz de largeur.

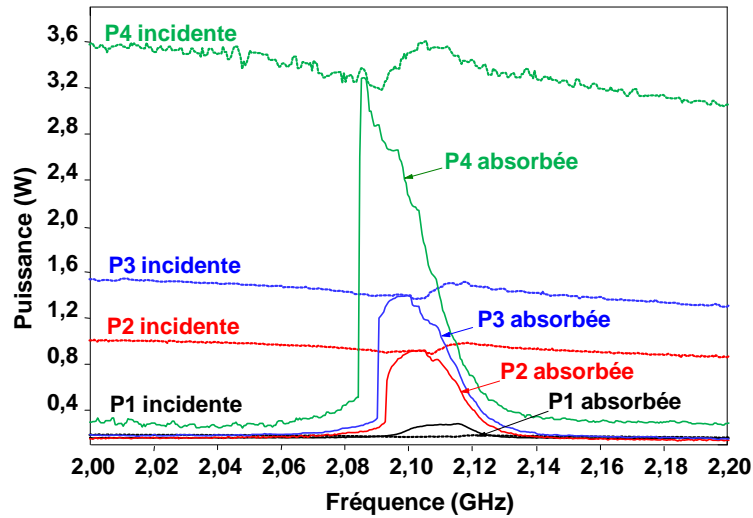


Figure 110. Puissances incidentes ( $P1=0,3\text{ W}$ ,  $P2=1\text{ W}$ ,  $P3=1,5\text{ W}$  et  $P4=3.6\text{ W}$ ) et puissances absorbées en temps réel en fonction de la fréquence [Ivira06]

En synchronisant la vitesse d'acquisition de la caméra thermique avec la vitesse de balayage de fréquence, les mesures thermiques réalisées en dynamique permettent de localiser et de suivre les variations de température en fonction de la puissance incidente et de la fréquence de résonance. La Figure 111 illustre le phénomène d'auto-échauffement spécifique à une fréquence de résonance, respectivement de 2,085, 2,092, 2,098, 2,103, 2,113 et 2,121 GHz.

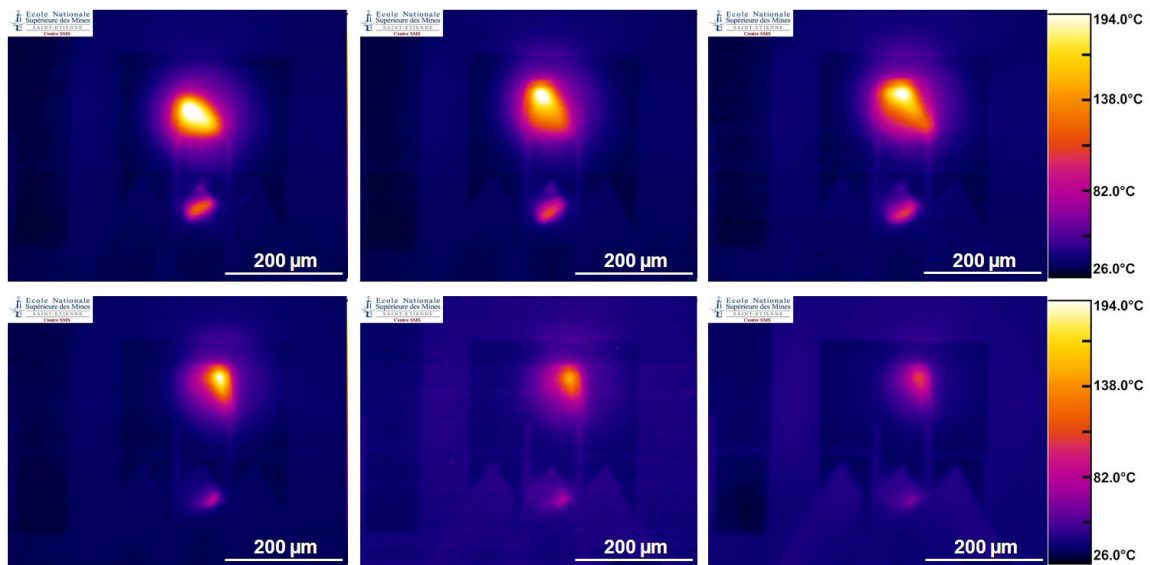
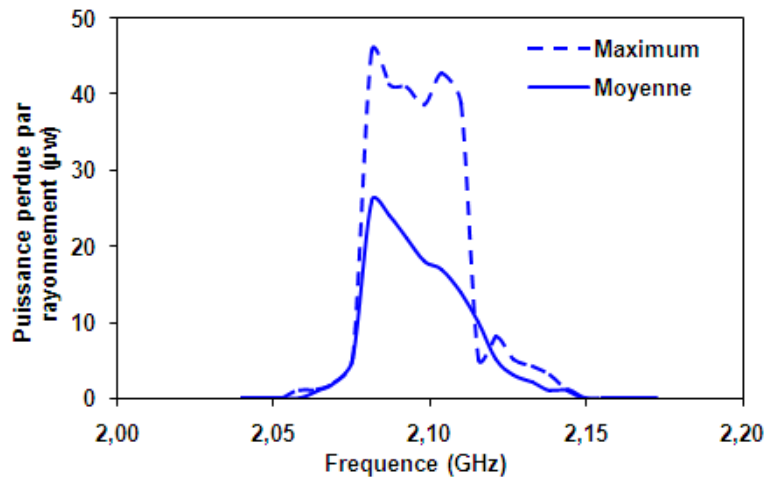


Figure 111. Dissipation thermique associée à la fréquence de résonance

L'échauffement est particulièrement important et très localisé au niveau du film piézoélectrique et de l'électrode supérieure, mais contre toute attente, n'est pas uniforme. Comme attendu, la température mesurée dépend de la fréquence et de la puissance de fonctionnement. La température maximale mesurée est de 194°C. Dans la Figure 111, pour faciliter la lecture, les cartographies thermiques ont toutes la même échelle de température. On observe également que

la localisation de l'échauffement évolue à la surface de l'électrode du résonateur et met en évidence les multi-modes de résonance. L'effet de la propagation de l'échauffement peut s'expliquer par des problèmes d'hétérogénéité de la zone active, comme des variations d'épaisseurs des films minces, la présence de contraintes résiduelles induites par le procédé de fabrication, ainsi qu'au cours du fonctionnement sous l'effet de la dilatation thermique différentielle des différents films minces. La propagation thermique correspond également avec le trajet du signal RF.



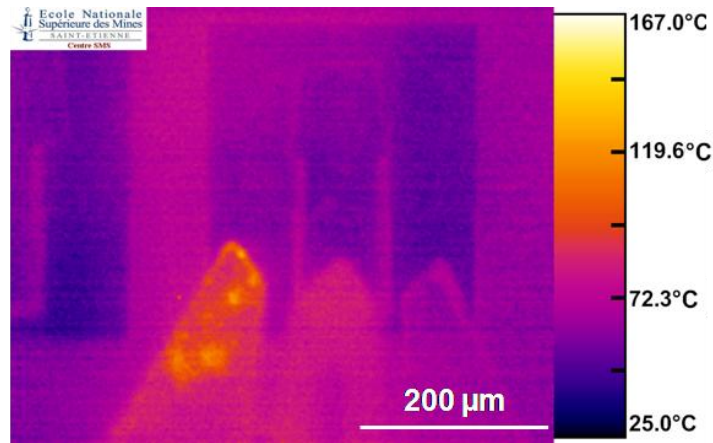
**Figure 112. Puissance perdue par rayonnement en fonction de la fréquence associée à une puissance incidente de 1,4 W**

A partir des mesures de température il est possible d'estimer les pertes thermiques associées aux dissipations moyennes et maximales par rayonnement en fonction de la fréquence (Figure 112). On retrouve la même allure de courbe que la caractérisation électrique (Figure 110). La puissance maximale perdue par rayonnement et la puissance maximale absorbée coïncident avec la même fréquence de résonance. Les pertes par rayonnement correspondent à une très faible fraction de la puissance absorbée totale.

### Mise en évidence de mécanismes de défaillance induits par la chaleur

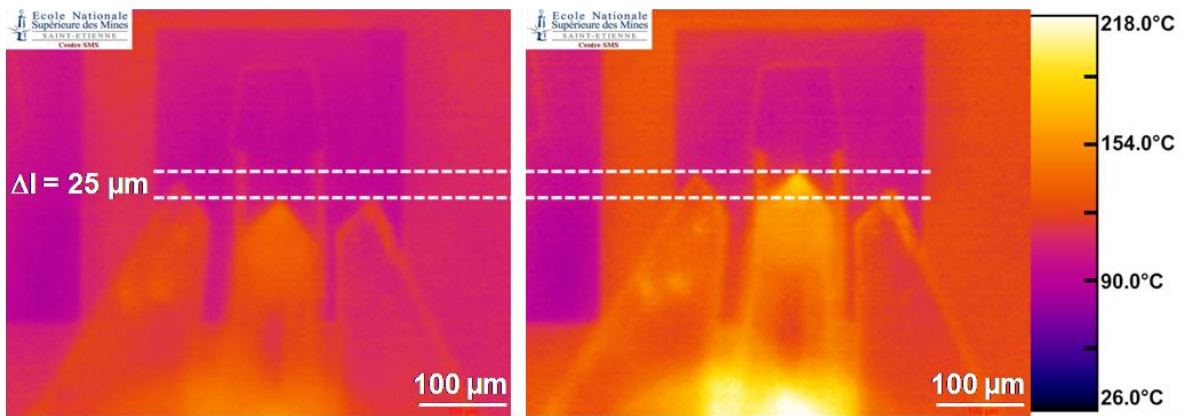
Les mesures thermiques sont également importantes pour étudier la fiabilité des résonateurs BAW. En effet, du point de vue de la fiabilité, il est intéressant de pouvoir rapidement mettre en évidence certains mécanismes de dégradation engendrés par les effets thermiques. L'observation des analyses infrarouges nous permet de distinguer deux phénomènes caractéristiques d'endommagement induits par la puissance en fonction des cycles de fonctionnement.

Le premier phénomène mis en évidence est présenté dans la Figure 113, il correspond à un échauffement anormal de la sonde RF qui conduit à sa déformation. Ceci se traduit dans un premier temps, par la présence de zones d'échauffement localisées au niveau de la sonde, alors que le résonateur reste relativement froid. Puis, sous l'action de la chaleur induite par de fortes puissances, l'analyse des mesures infrarouges a permis d'observer la déformation subie par la sonde, qui s'allonge par dilatation thermique.



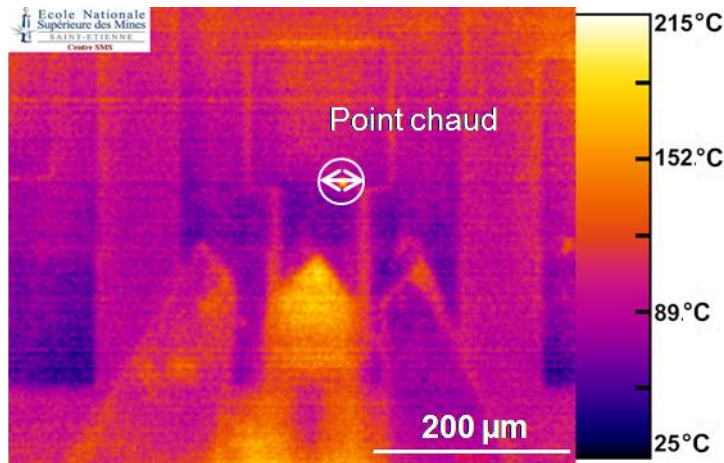
**Figure 113. Echauffement anormal des micro-sondes RF à 1,4 W.**

A partir des cartographies thermiques du résonateur (Figure 114), on peut estimer que l’allongement de la sonde RF est d’environ 25 μm. Sur la mesure de droite, dans la Figure 114 correspondant à l’allongement maximal mesuré, la caméra thermique est en limite de champ observable ; on peut donc penser que la température de la sonde est légèrement supérieure à la température maximale de 218°C enregistrée par thermographie infrarouge. La température de la sonde, de 210°C, déterminée à partir du coefficient de dilatation thermique de la sonde en Tungstène ( $4,5.10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ), confirme néanmoins parfaitement l’ordre de grandeur des mesures thermiques.



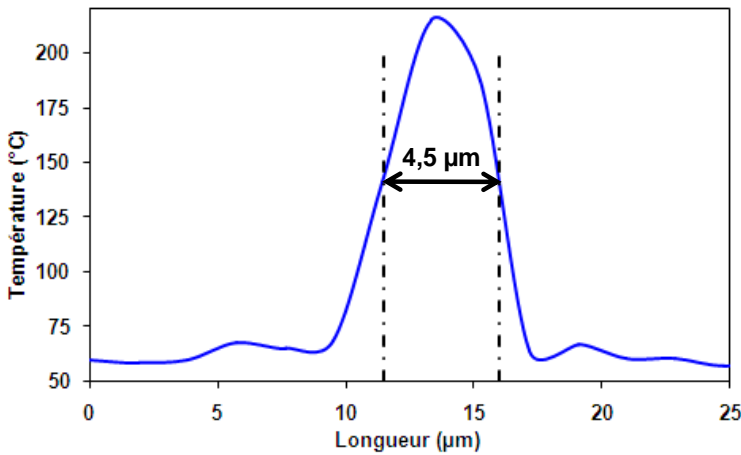
**Figure 114. Allongement de la sonde RF sous une puissance de 1,4 W.**

La Figure 115 illustre un autre endommagement caractéristique induit par les sollicitations sous forte puissance de 1,4 W. Il s’agit de l’apparition de points chauds très localisés au niveau de l’électrode supérieure alors que sa température moyenne, de l’ordre de 61°C, est relativement peu importante. Ce phénomène très rapide n’est visible que le temps de ces micro-claquages accompagnés de brulures locales de l’électrode et conduisant à son endommagement irréversible et ponctuel.

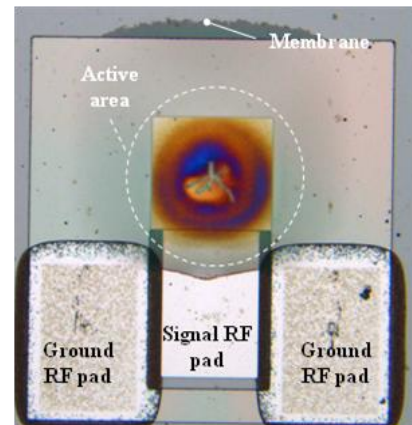


**Figure 115.** Apparition d'un point chaud très localisé sur l'électrode sous l'effet d'une puissance de 1,4 W.

La distribution thermique le long de la surface active de l'électrode montre qu'avec une largeur d'environ 4,5 μm, le point chaud est très localisé (soit inférieure à 2,5 μm compte tenu de la résolution du dispositif de 2 μm) et sa température atteint localement 215°C (Figure 116). Ce phénomène, à l'origine des problèmes de claquage du film piézoélectrique, est le principal mécanisme de détérioration des résonateurs. La Figure 117 est une photo optique du résonateur ayant été sollicité par une puissance RF excessive de 2,6 W. On peut observer que la zone active est presque entièrement « brûlée » sous l'action d'un champ électrique particulièrement intense au niveau de l'électrode. Par ailleurs, l'endommagement est très rapide, l'analyse du temps du flash thermique donnant une estimation supérieure de l'ordre de 60 ms.



**Figure 116.** Distribution thermique le long de l'électrode du résonateur soumis à 1,4 W



**Figure 117.** Dégradation de la zone active du résonateur soumis à une puissance RF de 2,6 W.

Les acquisitions réalisées ont permis de visualiser, en dynamique la dégradation de l'électrode supérieure. Ces mesures constituent une première base de données, utile au suivi des mécanismes de défaillance des résonateurs.



## Bilan

L'OBJECTIF de ce chapitre était de montrer la faisabilité de la méthode mise au point pour l'analyse thermique et de valider les performances du banc de thermographie infrarouge développé. Nous avons vu à travers deux études spécifiques que le dispositif mis au point permet de déterminer et de caractériser dans les conditions réelles de fonctionnement de microsystèmes, d'une part des effets thermiques anormaux illustrant des problèmes de fiabilité et d'autre part le comportement thermique d'un composant du fait de sa structure de façon à en optimiser le design. Deux composants MEMS issus des nouvelles architectures d'émetteur-récepteur ont été étudiés par mesures thermographiques in-situ.

L'étude thermique visant à caractériser le comportement thermique de différentes structures de MEMS-RF a permis de valider la haute résolution (2  $\mu\text{m}$ ) et la sensibilité du banc de thermographie en permettant de visualiser des effets thermiques très localisés et très rapides. Ce fut le cas en mettant en évidence différentes phases dans le processus d'endommagement que subissent les capacités variables dès le dépassement d'une tension d'actuation critique. L'analyse détaillée du mode de rupture de la capacité variable a permis de comprendre le mécanisme d'endommagement et de localiser la zone de rupture de l'actionneur. Les mesures infrarouges ont montré que la destruction des capacités variables est liée aux transformations microstructurales au niveau des actionneurs. L'étude du champ thermique nous renseigne également sur l'évolution microstructurale et sa vitesse de propagation.

L'étude de l'évolution localisée de la dissipation thermique en fonction de la fréquence de résonance d'un résonateur BAW et de la puissance absorbée, montre des problèmes d'hétérogénéité tels que des variations d'épaisseur des films minces ou la présence de contraintes résiduelles dans les électrodes. Enfin, l'évolution de la dissipation thermique permet de mettre en évidence divers modes de défaillance (thermique, mécanique et microstructural) mais tous activés par la chaleur.





## CHAPITRE 4

# ETUDE DE COMPOSANTS AVEC CONTACT ELECTRIQUE

<b>1. Etude de micro-commutateurs MEMS-RF</b>	<b>- 129 -</b>
1.1. Présentation des commutateurs étudiés	- 130 -
1.2. Le dispositif expérimental	- 133 -
1.3. Caractérisation thermique des commutateurs	- 134 -
<b>2. Etude d'un Tuner RF</b>	<b>- 146 -</b>
2.1. Présentation des Tuners d'impédance	- 146 -
2.2. Le dispositif expérimental	- 148 -
2.3. Caractérisation thermique	- 149 -
<b>3. Etude thermique du contact dans un micro-commutateur</b>	<b>- 152 -</b>
3.1. Présentation des micro-commutateurs	- 152 -
3.2. Le dispositif expérimental	- 154 -
3.3. Caractérisation thermique	- 155 -
<b>Bilan</b>	<b>- 158 -</b>



PARMI LES DIFFERENTS composants MEMS, notre étude se focalise ici plus particulièrement sur les micro-interrupteurs, type micro-commutateur. Ce sont des dispositifs réalisés en technologie MEMS et communément utilisés pour gérer des signaux radiofréquences. Ils se distinguent par de faibles pertes d'insertions et une faible consommation. Ils ont donc une faible résistance en fonctionnement et une forte résistance à l'arrêt.

Le matériau le plus utilisé pour réaliser le contact électrique est naturellement l'or pour sa faible résistivité électrique, sa résistance à l'oxydation et à la corrosion, ou encore sa facilité de dépôt avec les procédés de la microélectronique et des microsystèmes. Mais sa ductilité et son point de fusion relativement bas peuvent être la cause de nombreuses défaillances, telles que l'adhésion, la fusion, le transport de matière ou encore la hausse de la résistance électrique de contact.

Ce chapitre porte sur une application spécifique et originale de la thermographie infrarouge pour l'étude du contact électrique à travers l'analyse thermique de différentes structures de micro-commutateurs simples ou assemblés en circuit complexe. Le but est de mesurer et de quantifier la distribution thermique au niveau du contact électrique de façon à évaluer les mécanismes d'endommagement, de définir les conditions optimales de fonctionnement et ainsi améliorer les performances des micro-commutateurs.

Il s'agit de répondre à des demandes industrielles afin d'optimiser et de valider des designs technologiques spécifiques, visant à limiter les défaillances liées aux effets thermiques. Trois études spécifiques ont été réalisées :

- l'étude de différents designs technologiques de micro-commutateurs RF en collaboration avec le LAAS ;
- l'étude de fiabilité d'un tuner RF également en collaboration avec le LAAS ;
- l'analyse thermique du contact électrique en fonction des conditions de fonctionnement dans le cadre d'un partenariat industriel.

L'analyse des cartographies thermiques permet de déterminer les échauffements locaux en fonctionnement et de diagnostiquer d'éventuels modes de défaillance en localisant des élévations anormales de température et d'en déduire ainsi des mécanismes d'endommagement.

## **1. Etude de micro-commutateurs MEMS-RF**

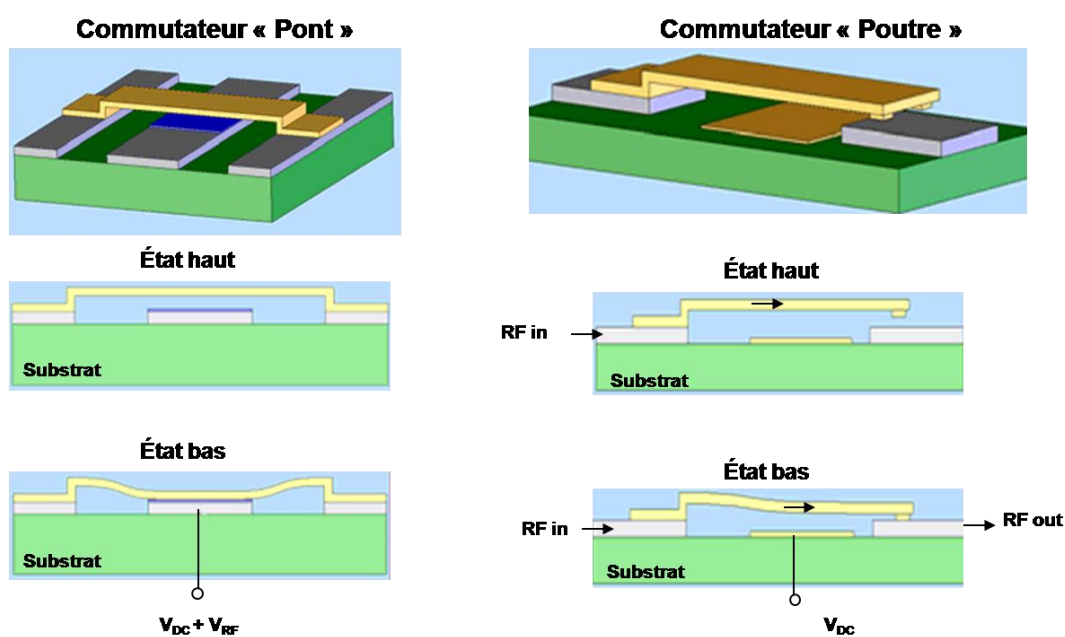
C'EST DANS LE CADRE du réseau d'excellence européen AMICOM que nous avons été amenés à travailler en collaboration avec le Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS sur l'étude de micro-commutateurs MEMS-RF. Il s'agissait d'analyser le profil thermique des commutateurs au cours d'actionnement en puissance RF afin de déceler, suivant l'état de fonctionnement, d'éventuels échauffements résultant de problématiques technologiques ou survenus lors de l'élaboration. Les structures optimisées seront développées de façon à réduire les échauffements détectés. Par ailleurs, les mesures thermiques permettent de déterminer la relation existant entre la puissance appliquée et la température engendrée, dans le but d'améliorer la tenue

en puissance des commutateurs. Cette étude complète les travaux de thèse de Chloé Bordas [Bordas08].

Dans ce premier paragraphe, nous présentons les commutateurs MEMS-RF étudiés, puis les résultats des mesures thermiques permettront de définir un design optimisé afin de déduire les éventuels problèmes de fiabilité et de dégradation liés à l'échauffement local des structures.

### 1.1. Présentation des commutateurs étudiés

Les commutateurs MEMS-RF se présentent généralement sous forme d'une poutre ou d'un pont mobile pouvant être actionné sous l'action d'une force électrostatique dans le but de modifier le trajet du signal RF entrant. Plusieurs méthodes d'actionnement existent mais nous nous limiterons à présenter les commutateurs à actionnement électrostatique développés au LAAS suivant leur propre procédé technologique. La Figure 118 illustre le principe de fonctionnement des commutateurs de type « Pont » et « Poutre ».



*Figure 118. Principe de fonctionnement des commutateurs type « Pont » et « Poutre » à actionnement électrostatique*

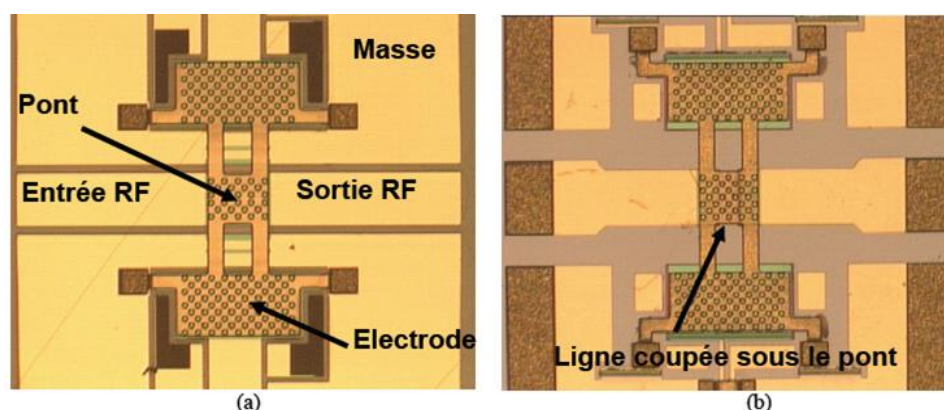
Il existe deux types de contacts : capacitif ou ohmique. A l'état haut ils présentent tous les deux une faible capacité (métal-air-métal). En position basse, le commutateur ohmique crée un court-circuit par un contact résistif, alors que le court-circuit engendré par le commutateur capacitif est dû à une forte valeur de capacité produite.

Les commutateurs étudiés dans le cadre de ce travail, sont des commutateurs MEMS capacitifs de type pont et à actionnement électrostatique.

Les commutateurs peuvent être montés soit en configuration série, soit en configuration parallèle par rapport à la ligne de signal RF, comme le montre le Tableau 10. Ces deux configurations vont être étudiées au cours des mesures thermiques.

Configuration	Circuit électrique équivalent Etat PASSANT	Circuit électrique équivalent Etat BLOQUE
Série	<p>Entrée ———— Sortie</p> <p style="text-align: center;">Etat bas</p>	<p>Entrée ———— Sortie</p> <p style="text-align: center;">Etat haut</p>
Parallèle	<p>Entrée ———— Sortie</p> <p style="text-align: center;">Etat haut</p>	<p>Entrée ———— Sortie</p> <p style="text-align: center;">Etat bas</p>

*Tableau 10 : Etat du circuit électrique (Passant ou Bloqué) en fonction de la configuration (Série ou Parallèle) et de l'état du commutateur (Haut ou Bas)*



*Figure 119. Commutateurs capacitifs MEMS RF à actionnement électrostatique du LAAS en configuration Parallèle (a) et Série (b) [Bordas08]*

Dans les deux cas, le pont est suspendu de 3  $\mu\text{m}$  au-dessus des lignes coplanaires. Afin d'éviter les courts-circuits entre la partie mobile et la ligne RF, la ligne est recouverte d'un diélectrique, du Benzocyclobutène (BCB). La différence entre les deux configurations réside dans la coupure de la ligne RF dans le cas des commutateurs série, comme l'illustre la Figure 119 montrant les photographies des deux designs. Ces commutateurs fonctionnent en tout ou rien, c'est-à-dire qu'ils n'ont que deux états de fonctionnement : Haut ou Bas. Suivant la configuration série ou parallèle, la position du commutateur induit un état Passant ou Bloqué du circuit électrique équivalent.

Les commutateurs fabriqués au LAAS sont dédiés à des applications de fortes puissances ; or le fonctionnement en puissance peut engendrer des problèmes importants de fiabilité liés en particulier à l'élévation de la température, qui peut entraîner l'échauffement des structures jusqu'à



leur déformation irréversible. Le collage du pont qui reste à l'état bas lorsqu'aucune tension n'est appliquée, constitue le mode de défaillance majoritairement observé dans les commutateurs.

Le but de l'analyse thermique est d'étudier l'impact du design de la structure sur la tenue en température, c'est-à-dire sur sa capacité à limiter l'échauffement local afin de réduire les causes de déformation, de collage et de destruction potentielle. En effet, des études antérieures ont montré qu'une structure dite « flexible » présente une meilleure capacité à amortir des variations de température et est donc moins apte à se déformer et à perdre ses performances [Nieminen04].

Outre la structure elle-même du commutateur, le substrat sur lequel le commutateur est fabriqué joue également un rôle important dans la dissipation de la chaleur et donc sur l'impact de la température sur le composant. Dans le cas des commutateurs développés au LAAS, les lignes coplanaires sont fabriquées sur du BCB, qui est un mauvais conducteur thermique ( $0,29 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ). Par conséquent, des vias thermiques ou « puits thermiques » ont été positionnés sur les lignes afin de les relier au silicium dont la conductivité thermique est 510 fois supérieure ( $148 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ), dans le but d'augmenter la dissipation thermique et de réduire les échauffements locaux. La Figure 120 représente la structure d'un commutateur qui possède des vias thermiques.

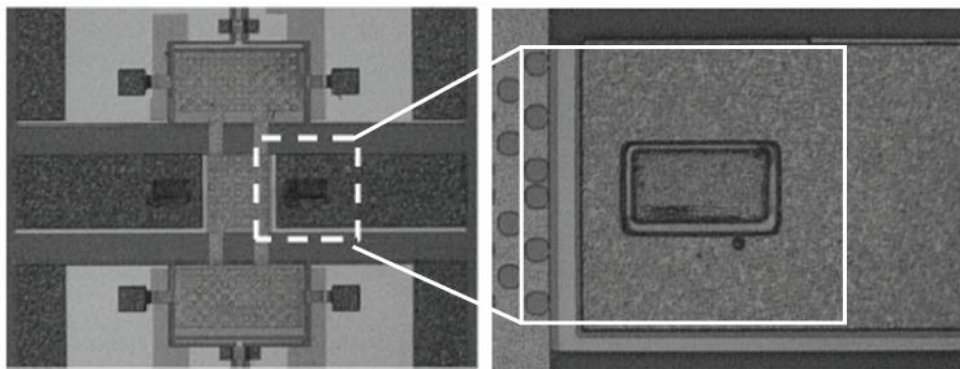


Figure 120. Structure d'un commutateur MEMS RF avec vias [Bordas08]

Toujours dans le but d'optimiser des commutateurs pour améliorer leur tenue en puissance et réduire les phénomènes de défaillance, il a été envisagé d'ajouter à certaines structures des contre-électrodes comme le montre la Figure 121. La descente du pont, de l'état initial à l'état bas, est réalisée grâce aux électrodes inférieures (a). Pour le passage de l'état bas à l'état haut, la tension est relâchée au niveau des électrodes inférieures et appliquée sur les contre-électrodes (b).

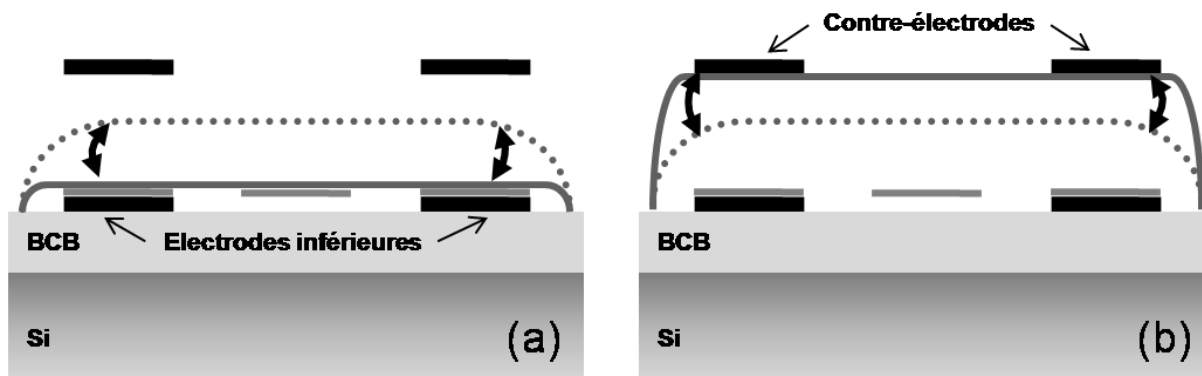
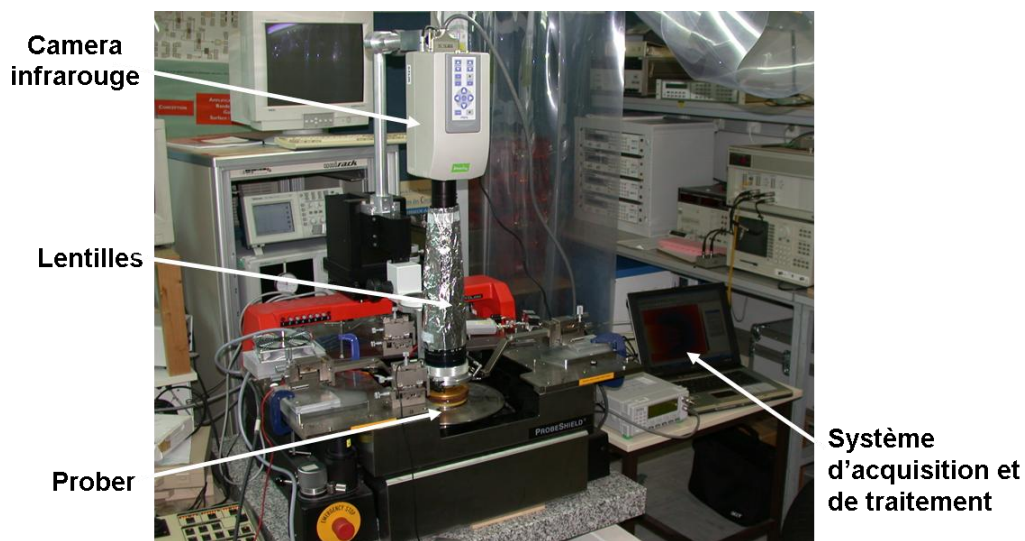


Figure 121. Fonctionnement d'un commutateur à contre-électrodes

Maintenant, l'objectif est d'étudier, par thermographie infrarouge, l'impact thermique de la puissance d'actionnement sur différentes structures de commutateurs, de façon à définir le design optimum.

## 1.2. Le dispositif expérimental

Pour les mesures thermiques in-situ, le banc de thermographie infrarouge en configuration haute résolution a été modifié pour s'adapter sur le prober de caractérisation en puissance des MEMS-RF. La Figure 122 montre le banc de thermographie mis en place dans la cadre de ces mesures. Ici c'est la caméra Merlin 900 de FLIR qui a été utilisée.



*Figure 122. Présentation du banc de thermographie infrarouge mis en place au LAAS*

Un amplificateur de puissance, commandé par un synthétiseur de fréquence, permet d'injecter un signal d'une fréquence de 10 GHz dont la puissance peut atteindre 5 W. La puissance de sortie est contrôlée, en sortie du commutateur, avec un Wattmètre.

Après actionnement et stabilisation, les mesures sont réalisées en régime stationnaire. Des mesures de référence de l'état du MEMS au repos sont effectuées entre chaque sollicitation en puissance.

### 1.3. Caractérisation thermique des commutateurs

Deux séries de mesures ont été conduites : la première consiste à caractériser l'aptitude de différentes structures à dissiper la chaleur dans le cas d'une puissance RF limitée à 1 W. Le design optimum a ensuite été testé au cours de la seconde série de mesures réalisées sous des puissances plus importantes comprises entre 1 et 4 W.

Malgré la complexité des structures en termes de géométrie et de diversité de matériaux et compte tenu que l'or électro-déposé joue un rôle prépondérant dans ces commutateurs, c'est l'émissivité de l'or électro-déposé de la structure des commutateurs, déterminée à 0,16, qui a été prise en compte dans les thermogrammes présentés.

#### Comportement thermique des structures

Les différentes structures des commutateurs sont testées dans les mêmes conditions de sollicitation et d'analyse. Le passage de la puissance RF dans le commutateur induisant un échauffement de la structure, il s'agit de comparer ces différents commutateurs suivant trois spécificités de design : la configuration série ou parallèle, l'état initial d'élaboration Haut ou Bas du pont des commutateurs et l'absence ou la présence de vias sur les lignes RF.

##### – Les configurations parallèles et séries

Après calibration et traitement des mesures par thermographie infrarouge, les cartographies thermiques des commutateurs permettent de comparer les configurations parallèles et séries.

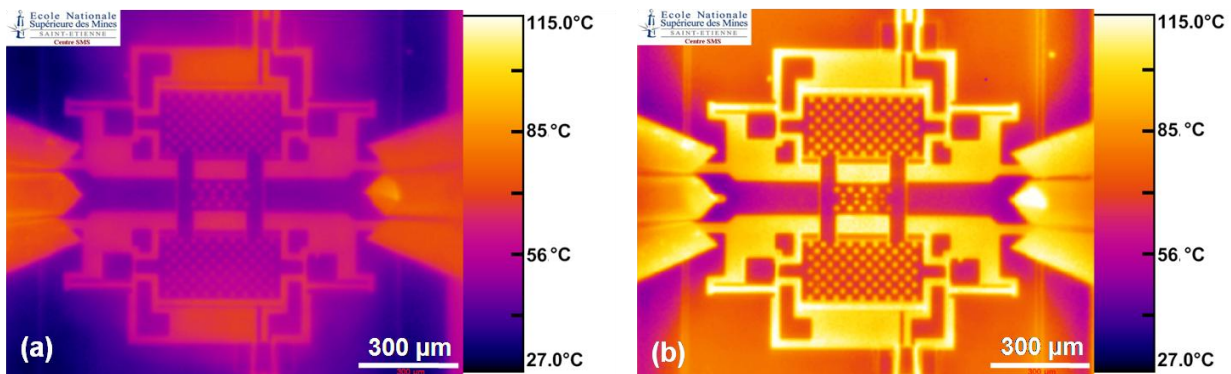


Figure 123. Configuration série Haut (état Bloqué) (a) et Bas (état Passant) (b)

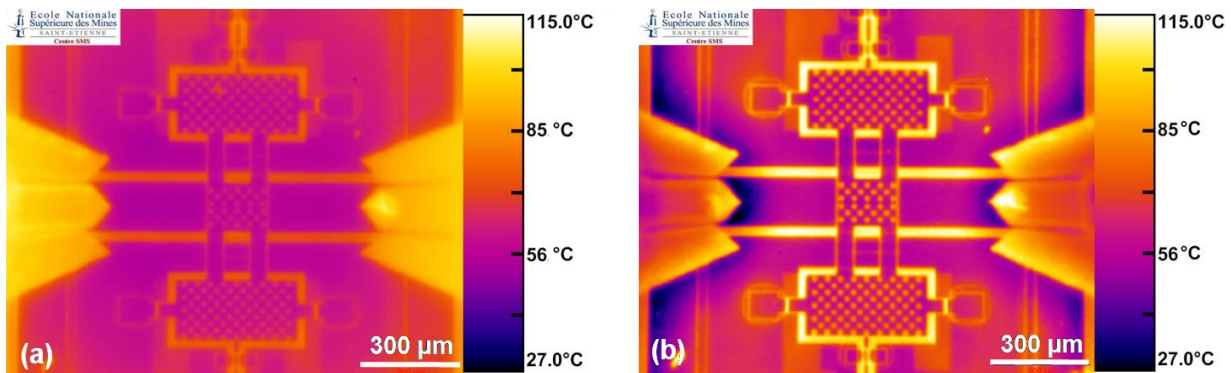
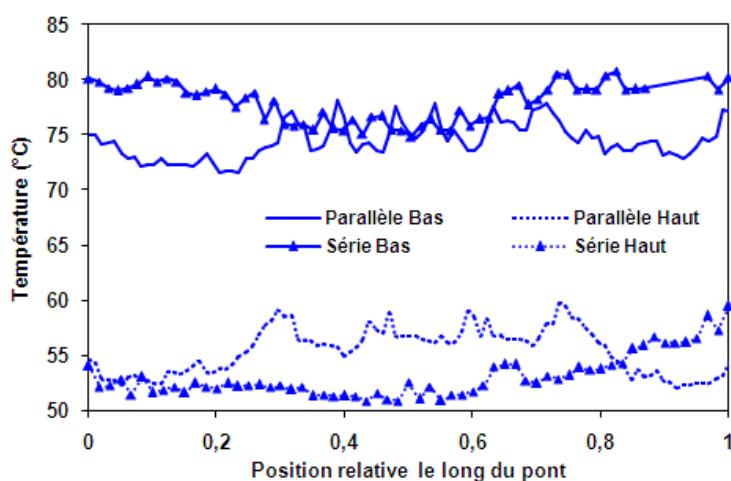


Figure 124. Configuration parallèle Bas (état Bloqué) (a) et Haut (état Passant) (b)

La Figure 123 présente les distributions de température d'un commutateur en configuration série pour les deux positions du pont : (a) en position Haut, donc à l'état Bloqué du circuit électrique, et (b) en position Bas correspondant à l'état Passant. La Figure 124 présente les distributions thermiques des commutateurs parallèles en position Bas (a) et Haut (b) correspondant respectivement aux états Bloqué et Passant de la puissance RF. Pour faciliter la lecture, les cartographies ont toutes la même échelle colorimétrique de température.

A partir des mesures thermiques, les distributions de température le long du pont du commutateur permettent de déterminer la température des structures en fonction de l'état de fonctionnement des commutateurs et donc de la position du pont. La puissance RF est bloquée quand, en configuration série le pont du commutateur est en position Haut (Figure 123a) et en position basse en configuration parallèle (Figure 124a). Les distributions thermiques correspondantes, présentées Figure 125, montrent que l'échauffement des structures est relativement faible en configuration série Haut, avec une température moyenne de la structure de 53°C, mais bien plus élevée (environ 74°C) en configuration parallèle Bas puisque le pont est en contact avec la ligne RF et est donc parcouru par le signal RF. Par contre, c'est l'inverse qui se produit lorsque la transmission du signal RF à travers la ligne est possible donc que le commutateur est passant c'est à dire à l'état Bas pour la configuration série et à l'état Haut pour la configuration parallèle : le commutateur parallèle Haut (Figure 124b) a une température moyenne de 55°C alors que la structure série Bas atteint en moyenne 78°C (Figure 123b).

L'échauffement mesuré des commutateurs est important et essentiellement dû à la puissance RF appliquée traversant le commutateur ; ainsi, en fonction de leur configuration et de leur état d'actionnement du pont, les structures supportent d'importantes variations de température. Par contre, il est difficile de déterminer si un design est thermiquement plus performant que l'autre. Il semble donc que la configuration, série ou parallèle, ne soit pas un facteur déterminant pour la dissipation thermique dans le cas d'une puissance RF de 1 W.



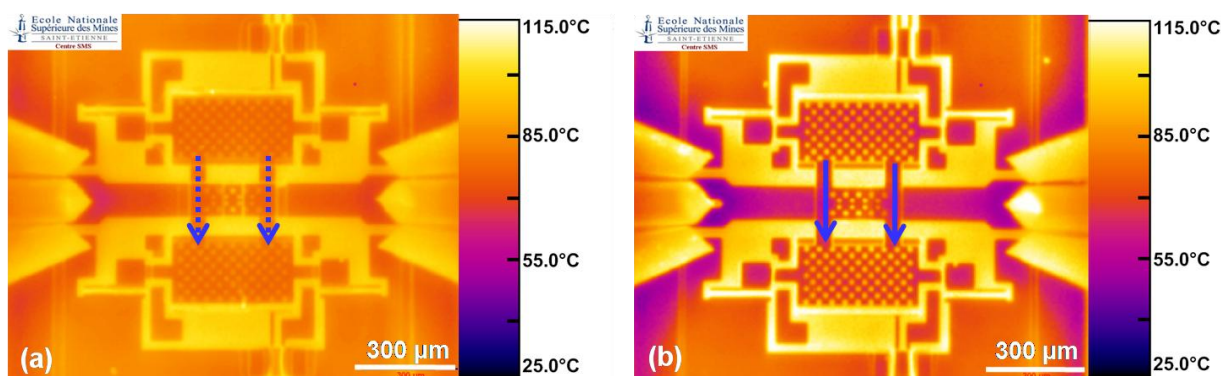
**Figure 125. Distribution thermique le long du pont en fonction de la configuration série ou parallèle du commutateur et de l'état Haut ou Bas du pont**

Par ailleurs, on peut également remarquer que la puissance RF entraîne un fort échauffement atteignant en moyenne, au niveau des micro-sondes, de 100°C à l'état bloqué et de 110°C à l'état passant quelle que soit la configuration série ou parallèle du commutateur. Ceci explique qu'à l'état bloquant, c'est à dire quand le signal RF ne traverse pas le commutateur, les structures s'échauffent de plus de 25°C au dessus de la température ambiante, du fait de la conduction thermique des matériaux. Ainsi, étant toujours soumis à une source de chaleur, les commutateurs ne passent jamais par un état « froid », ce qui peut être endommageable pour les matériaux et donc engendrer l'apparition de défaillances.

#### – Le rôle de l'état initial de la structure

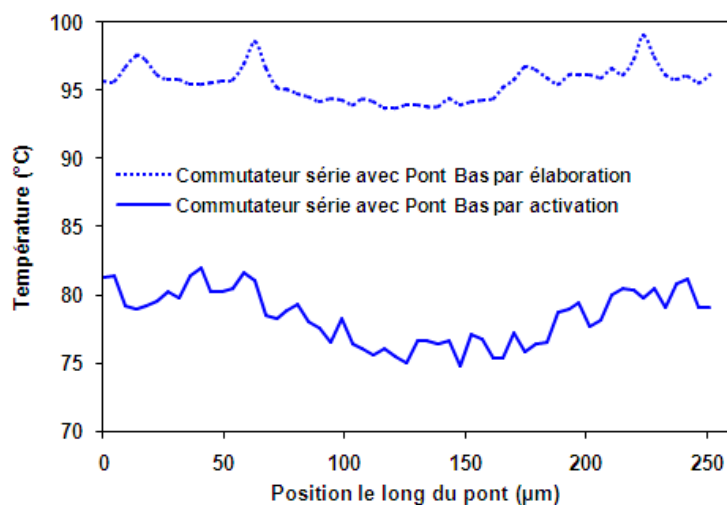
La seconde configuration étudiée concerne la contribution apportée par l'état initial du pont dans le comportement thermique de la structure des commutateurs. En effet, la structure peut être élaborée à l'état Haut ou à l'état Bas, en configuration série ou parallèle. Un commutateur à l'état initial Haut sera en position Bas après actionnement du pont et inversement un commutateur à l'état initial Bas sera en position Haut après actionnement du pont. Les mesures thermiques, réalisées sur ces différents commutateurs visent à étudier le comportement des structures en fonction de l'état d'élaboration de la position initiale Haut ou Bas du pont.

La Figure 126 présente les cartographies thermiques de commutateurs séries avec le pont Bas à l'élaboration donc l'état initial (a) et après actionnement (b). Ainsi, les mesures thermiques permettent de comparer deux états passant de la puissance RF, mais l'un induit par l'état initial du commutateur (a) et l'autre forcé par la commutation du pont (b). Elles permettent de mettre en évidence un échauffement notablement différent dans les deux structures au niveau du pont du commutateur. On observe que le pont du commutateur à l'état Bas en configuration initiale a une température plus élevée que le commutateur à l'état Bas après actionnement, ce qui signifie que le contact série est meilleur quand il est renforcé par une actuation électrostatique qui induit une augmentation de la pression de contact.



**Figure 126. Commutateurs séries avec pont Bas à l'élaboration (a) et après activation (b)**

La complexité du design et la structure trouée du pont conduisent à des perturbations de la mesure thermique, engendrées par la détection du diélectrique à travers les trous, du fait de la haute résolution du banc thermique.

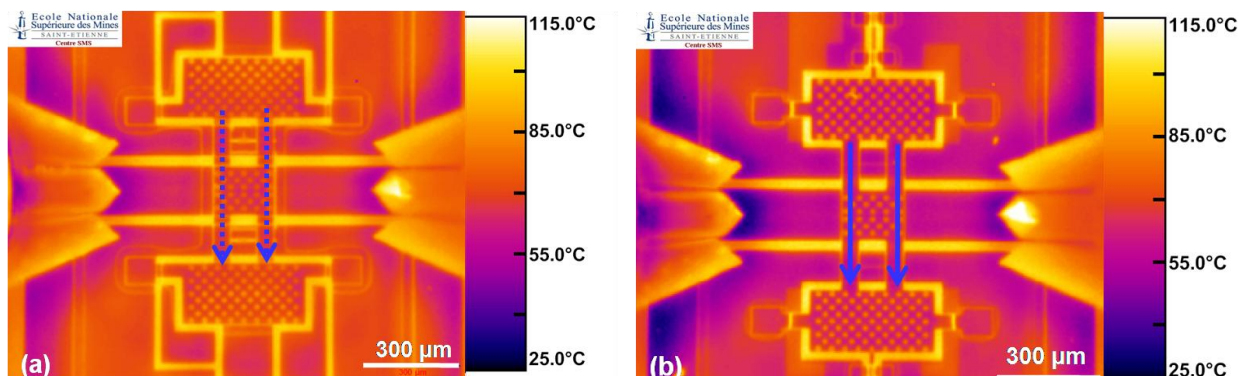


**Figure 127. Distributions thermiques le long du pont des commutateurs séries en fonction de la position Bas du pont par élaboration ou après activation**

L'estimation de la température du pont est donc obtenue en moyennant la température dans la partie centrale du pont, comme illustré par les flèches bleues sur la Figure 126. Le résultat des cartographies est confirmé par les distributions thermiques réalisées le long du pont des deux commutateurs (Figure 127). L'échauffement de la structure du commutateur en position Bas du pont après activation est moins important que lorsque la position Bas du pont est due à sa position initiale d'élaboration. L'écart moyen de température au niveau des ponts est de l'ordre de 17°C.

L'état initial de la structure agit sur la nécessité ou non de commutation du pont pour établir le passage de la puissance RF. La manière dont la position Bas du pont est appliquée semble donc avoir une influence sur le comportement thermique du commutateur. En effet, la différence essentielle réside dans le fait que la position Bas du pont est obtenue soit en cours d'élaboration des structures donc en position relativement libre, soit induite par l'actionnement, donc en position forcée au moyen de forces électrostatiques. Dans le premier cas, du fait des éventuelles imperfections dues au procédé d'élaboration ou aux déformations en fatigue induites par les cycles de commutation, la qualité du contact électrique n'est pas optimale. Dans le deuxième cas, au contraire, l'effort induit par l'actionnement électrostatique permet une meilleure compression des surfaces en contact, ce qui entraîne une meilleure conduction électrique et donc un échauffement de moindre intensité. La différence de température observée entre les deux configurations de la position du pont, libre ou forcée, peut être ainsi expliquée par une différence au niveau de la qualité du contact électrique entre le pont et la ligne RF : le commutateur dont le pont est Bas à l'élaboration présente un contact électrique de moins bonne qualité, donc s'échauffe plus, que celui où la position Bas du pont est forcée au moyen de l'actionnement électrostatique.

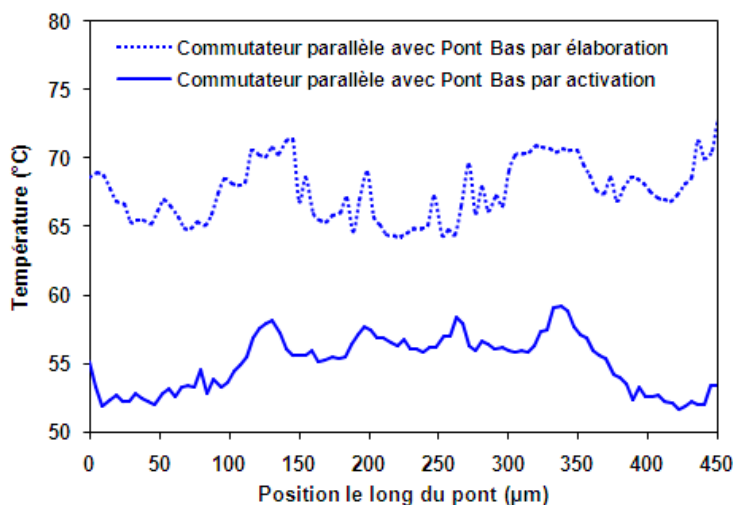
Des analyses thermiques ont également été menées sur des commutateurs parallèles. Les cartographies thermiques obtenues sur des structures en position Bas du pont, due à l'élaboration (a) ou induite par l'actionnement (b), sont présentées sur la Figure 128.



**Figure 128. Commutateurs parallèles avec pont Bas à l'élaboration (a) et après actionnement (b)**

La structure trouée du pont laisse percevoir le diélectrique en dessous du pont et conduit à des fluctuations de température importantes, sous forme de pics, induites par la différence d'émissivité du diélectrique et de l'or. Afin de corriger ces aberrations thermiques pour pouvoir estimer la température réelle du pont, l'évaluation de la température est réalisée, dans les deux cas, au moyen de plusieurs mesures thermiques le long du pont (comme l'illustre les flèches bleues sur la Figure 128), de façon à ne considérer, à chaque position du pont, que la valeur de la température réelle du pont et non pas celle de la ligne en BCB.

Les résultats semblent similaires à ceux obtenus sur les structures séries. La Figure 129 présente les distributions thermiques le long du pont dans les deux cas. Avec une température moyenne de 55°C, l'échauffement du pont, dans la configuration basse après actionnement, est moins important que lorsque la position basse est issue de l'état initial d'élaboration de la structure, dont la température moyenne est d'environ 68°C.

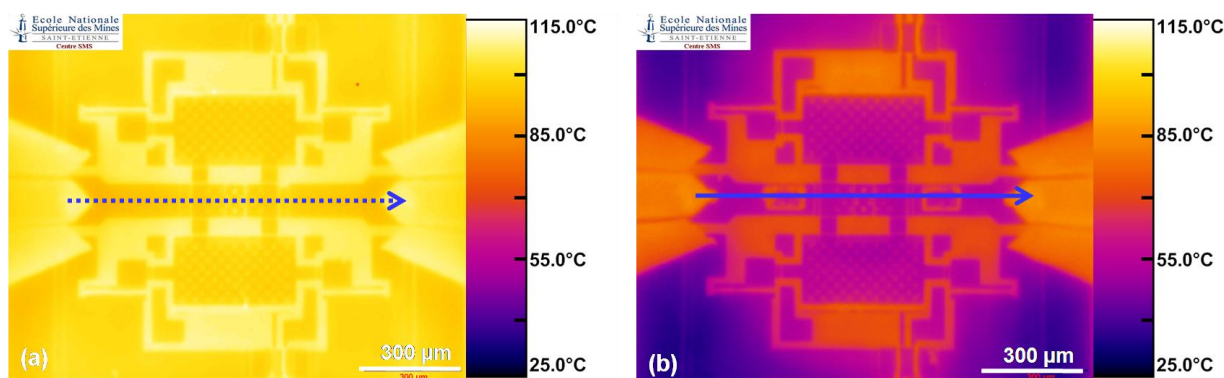


**Figure 129. Distributions thermiques le long du pont des commutateurs parallèles en fonction de la position Bas du pont par élaboration ou par activation**

L'échauffement est plus important quand le pont du commutateur est à l'état Bas du fait de l'élaboration. Il semble donc que, comme dans le cas des structures séries, la qualité du contact électrique entre le pont et la ligne RF ait une influence sur l'état thermique du commutateur. La conduction électrique entre le pont et la ligne RF est meilleure dans le cas où le contact électrique est renforcé par l'actionnement électrostatique du pont. De ce fait l'échauffement de la structure du commutateur est moins important. Ainsi, compte tenu des résultats obtenus, pour limiter l'échauffement des commutateurs, la structure optimale semble être une configuration parallèle élaborée à l'état Haut.

### – Le rôle des vias

Pour s'efforcer de réduire l'élévation de température, précédemment mise en évidence à l'état passant des commutateurs, des vias sont ajoutés sur de nouvelles structures. Par mesures infrarouges il est possible d'étudier le comportement thermique de ces nouvelles structures afin d'analyser l'efficacité des vias à dissiper la chaleur des commutateurs vers le substrat. Des mesures ont été réalisées sur ces nouveaux commutateurs en configuration série et parallèle. Des structures identiques mais sans via servent de références.

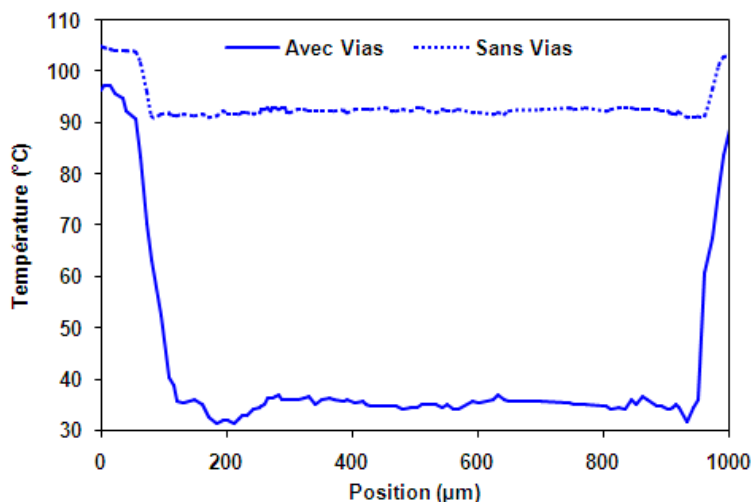


*Figure 130. Commutateurs séries sans via (a) et avec vias (b)*

La Figure 130 présente les cartographies thermiques obtenues sur les commutateurs série sans via (a) et avec vias (b). Dans les mêmes conditions de puissance, le commutateur possédant des vias semble nettement moins s'échauffer que celui qui n'en a pas.

De façon à estimer l'écart moyen de température dans les deux configurations, les distributions thermiques le long de la ligne RF (symbolisées par la flèche en pointillée (a) et la flèche pleine (b)) sont tracées en Figure 131. Avec une température moyenne de 37°C au niveau du pont, le commutateur avec vias s'échauffe nettement moins que celui sans via. L'écart moyen de température au niveau des structures est estimé à plus de 55°C, ce qui est relativement important. Ces résultats permettent donc de valider le rôle des vias à augmenter la dissipation thermique de la structure du commutateur vers le substrat, afin de réduire les échauffements locaux. A chaque extrémité des courbes, l'élévation brutale de température correspond à la chaleur produite par les micro-sondes RF. Comme précédemment, leur température moyenne est de l'ordre des 100°C ; cette valeur reste néanmoins approximative dans la mesure où la variation d'émissivité propre des sondes et due à leur inclinaison n'est pas prise en compte.

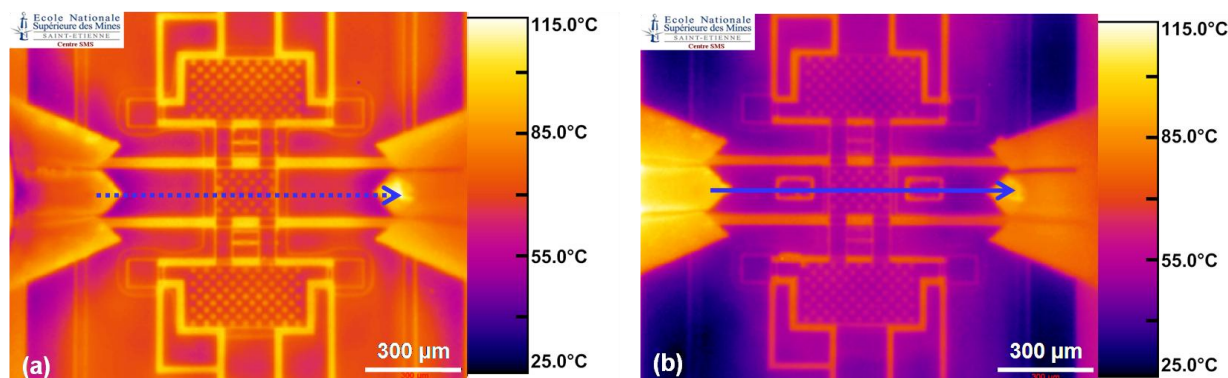




**Figure 131. Distribution thermique le long de la ligne RF des commutateurs séries sans et avec vias à l'état RF passant**

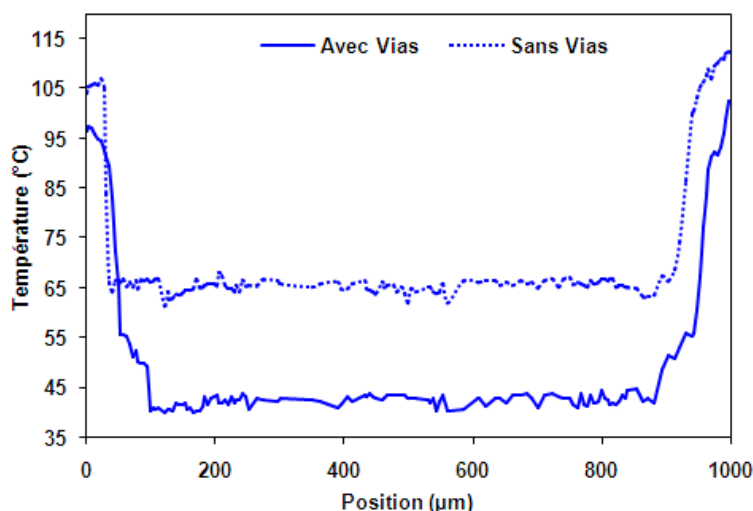
Il est également intéressant de noter que la température estimée au niveau de la ligne RF de la structure série sans via correspond à la température précédemment évaluée du pont d'une structure série élaborée à l'état Bas.

Dans les mêmes conditions, des commutateurs en configuration parallèle sont également testés à l'état passant.



**Figure 132. Commutateurs parallèles sans via (a) et avec vias (b)**

La Figure 132 présente les cartographies thermiques obtenues après traitement des mesures infrarouges sur des commutateurs parallèles sans via (a) et avec vias (b). Comme précédemment, l'échauffement des structures est nettement moins important pour des commutateurs avec vias que sans via.



**Figure 133. Distribution thermique le long de la ligne RF des commutateurs parallèles sans et avec vias à l'état RF passant**

Comme le montre Figure 133, les distributions thermiques le long de la ligne RF, représentées par les flèches bleues sur la Figure 132, permettent de déterminer les températures moyennes des commutateurs sans et avec vias respectivement estimées à 65°C et 42°C. La diminution de température engendrée grâce aux vias semble un peu moins importante que dans le cas précédent des commutateurs séries. Néanmoins ces résultats permettent de valider l'efficacité des vias à dissiper une grande partie de la chaleur générée par la puissance RF. Par ailleurs, et comme précédemment, on retrouve, à chaque extrémité des courbes, correspondant à la position des sondes RF, une température maximale de l'ordre de 100°C.

En bilan de cette première partie de l'étude, il est possible, grâce à la haute résolution des mesures thermiques, de définir le design optimum permettant de limiter l'échauffement du commutateur. Le Tableau 11 résume les températures moyennes au niveau du pont en fonction de la configuration (série ou parallèle), de l'état du commutateur (Haut ou Bas) et de la présence ou non de Vias sur la ligne RF. Avec une température en moyenne moins élevée, les structures parallèles sont à privilégier par rapport à la configuration série. Par ailleurs la position d'élaboration Haut du pont est préférable pour assurer en position Bas un meilleur contact électrique entre le pont et la ligne RF. Enfin la présence de vias, quelle que soit la configuration série ou parallèle, est particulièrement efficace pour réduire les échauffements locaux en augmentant la dissipation thermique vers le substrat.

Elaboration	Configuration	
	Série	Parallèle
Etat Bas	95°C	68°C
Etat Haut	78°C	55°C
<b>Avec vias</b>	<b>35°C</b>	<b>42°C</b>
Sans via	92°C	65°C

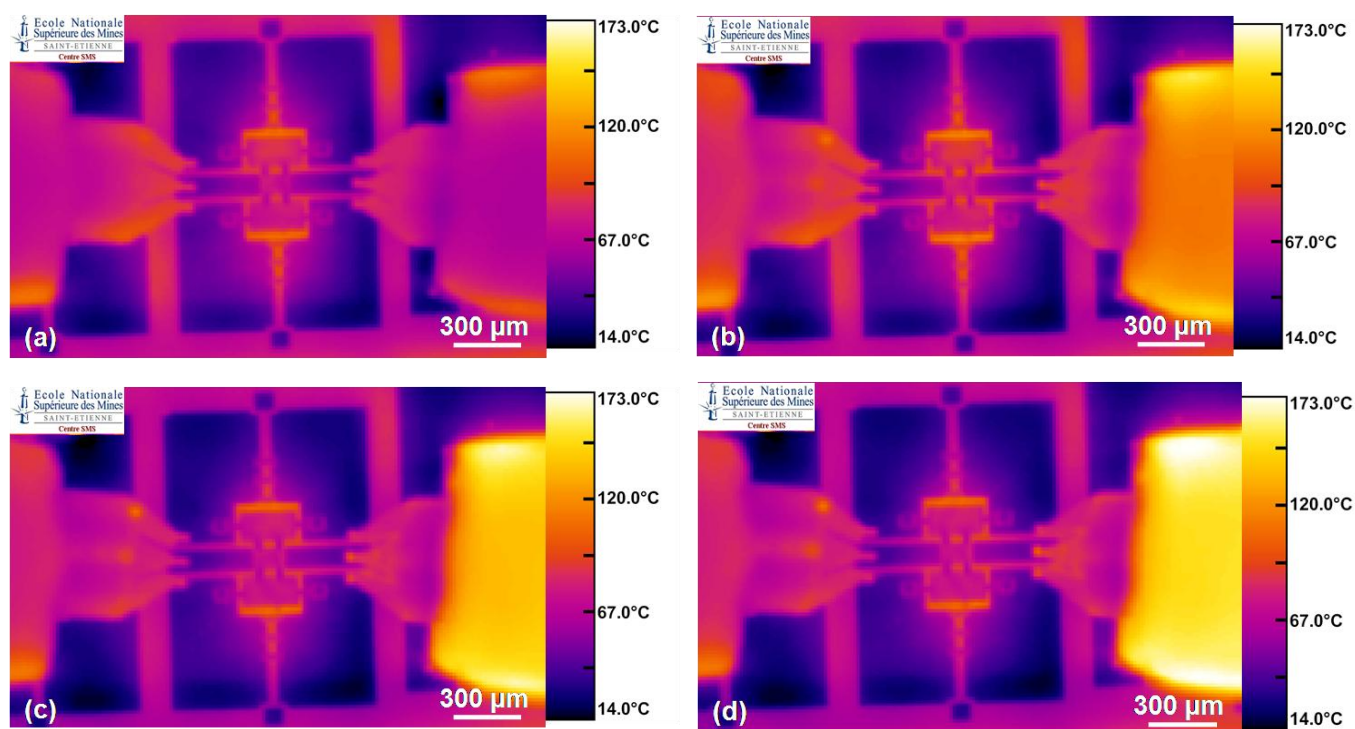
**Tableau 11 : Température moyenne du pont en fonction de la structure du commutateur**

## Comportement thermique sous puissance

La deuxième partie de l'étude concerne le comportement thermique des commutateurs sous forte puissance. Les mesures infrarouges ont été réalisées pour différentes valeurs de puissance comprises entre 1 et 4 W, sur des structures parallèles dont les ponts sont élaborés en position Haut. Par rapport aux commutateurs précédemment étudiés, des contre-électrodes ont été rajoutées sur l'ensemble des structures. La mise en place de contre-électrodes a pour objectif de permettre d'améliorer les temps de commutation et de réduire les phénomènes de défaillance survenant à forte puissance. Les mesures thermiques visent donc à analyser la contribution apportée par les contre-électrodes dans le comportement thermique des commutateurs suivant la position de commutation du pont.

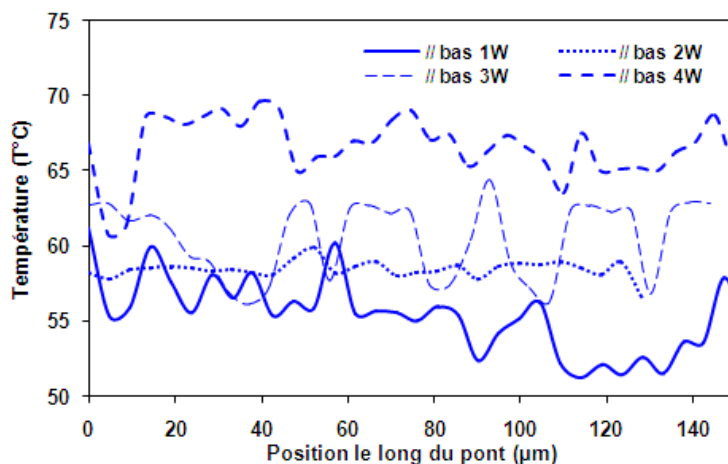
A cause de problèmes techniques d'adaptation du banc infrarouge sur le banc d'actionnement des commutateurs, les mesures thermiques n'ont pas pu être réalisées avec le objectif de microscope IR, la résolution du dispositif était alors de 25  $\mu\text{m}$ .

La Figure 134 donne les cartographies infrarouges obtenues sur la structure après commutation du pont, c'est-à-dire en position Bas (correspondant à l'état bloquant de la puissance RF) pour quatre cas de puissance allant de 1 W à 4 W. L'échelle thermique, identique dans les quatre cas, permet de mettre en évidence une augmentation significative de température dans le circuit en fonction de l'augmentation de la puissance appliquée. Ceci est particulièrement visible au niveau des micro-sondes RF, où seule la sonde de droite s'échauffe du fait de l'état bloquant du commutateur. Au niveau de la structure du commutateur, l'augmentation de température est beaucoup moins visible sur les cartographies à cause, d'une part de l'échauffement très importante de la sonde RF, et d'autre part de la faible résolution des mesures.



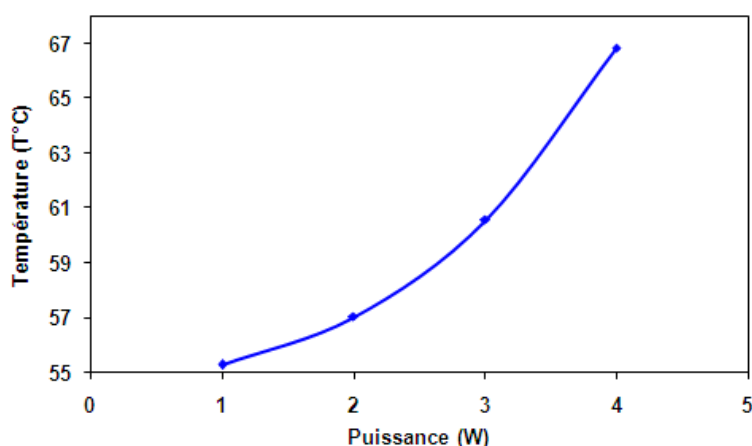
**Figure 134. Commutateur parallèle à pont Bas (état bloquant) à 1 (a), 2 (b), 3 (c) et 4 W (d)**

Par contre, à partir des mesures infrarouges, les distributions thermiques ont été évaluées sur le pont du commutateur. Elles sont présentées sur la Figure 135. On note une augmentation de température du commutateur de plus de 11°C entre une puissance appliquée de 1 W et 4 W.



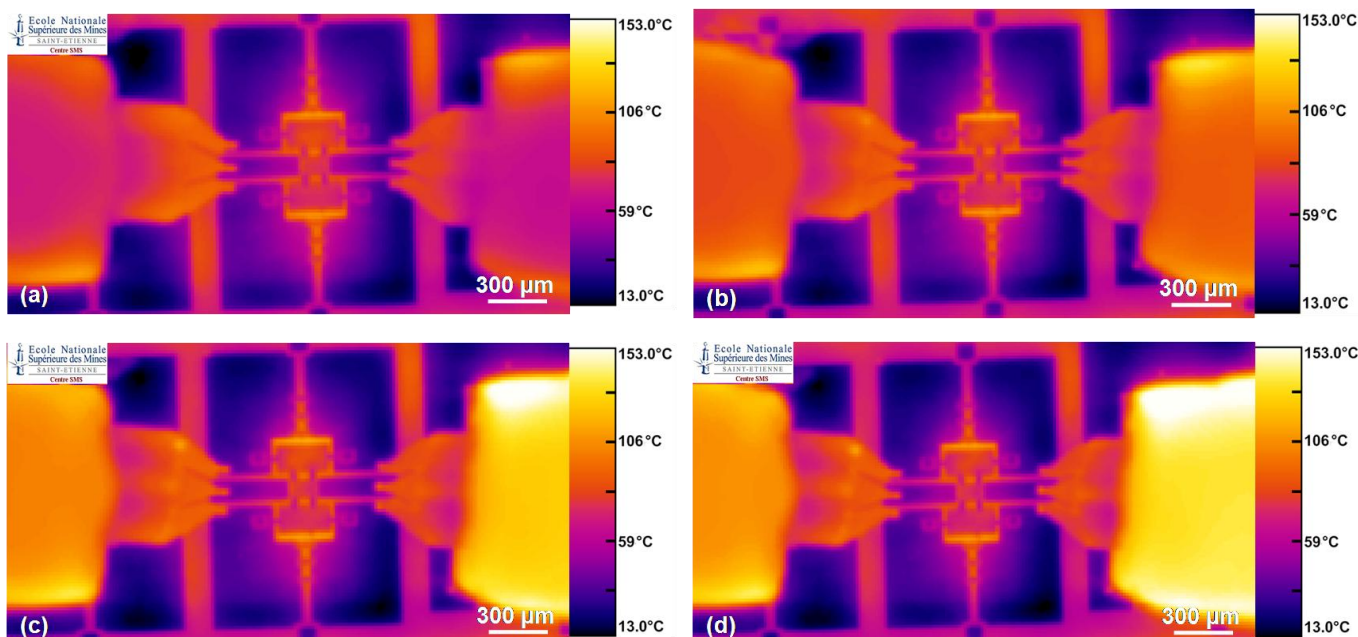
**Figure 135. Distribution thermique le long du pont du commutateur parallèle à l'état Bas en fonction de la puissance RF appliquée (en W)**

A cause de la faible résolution, les fluctuations thermiques enregistrées sont importantes. Par ailleurs, il est intéressant de remarquer la corrélation existant entre la température moyenne de la structure du commutateur et la puissance RF appliquée (Figure 136). Cette relation peut s'expliquer par une dégradation de la qualité du contact. En effet, il a été observé au cours de la thèse de Chloé Bordas, que l'augmentation du gap d'air entre la structure du pont et la ligne RF, attribuable à la puissance RF, conduit à la déformation du pont. La dégradation de la qualité du contact est donc due à une diminution locale de la pression de contact : c'est le phénomène d'auto-activation dû à la puissance RF [Rottenberg05].



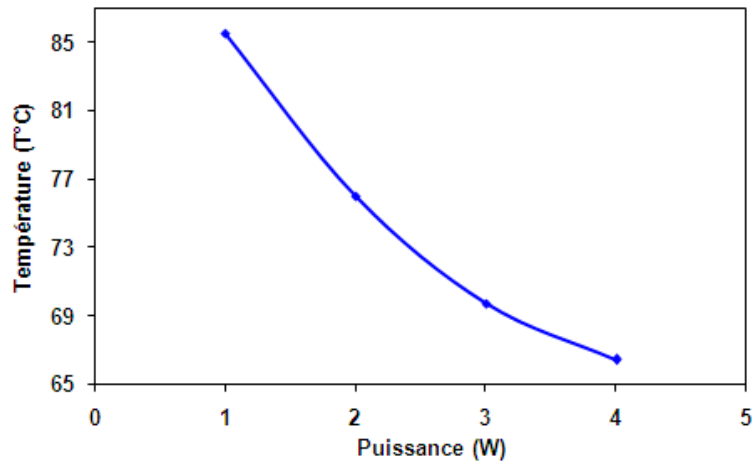
**Figure 136. Evolution de la température moyenne du pont du commutateur parallèle à l'état Bas en fonction de la puissance RF (en W)**

Des mesures similaires ont également été réalisées sur le commutateur après relâchement de la force électrostatique, donc en position Haut du pont correspondant à l'état passant du signal RF. Les cartographies thermiques du commutateur sous puissance entre 1 et 4 W, présentées dans la Figure 137, révèlent clairement l'état passant de la puissance du fait de l'échauffement de la micro-sonde gauche, bien que sa température reste toujours inférieure à celle de la micro-sonde d'entrée, à droite. Par contre, cette fois encore se pose le problème de la résolution spatiale des mesures thermiques qui ne permet pas de rendre visible l'évolution thermique au sein du commutateur.



**Figure 137. Commutateur parallèle à pont Haut (état passant) à 1 (a), 2 (b), 3 (c) et 4 W (d)**

L'analyse des distributions de température le long du commutateur met en évidence le comportement thermique des structures. La Figure 138 montre la diminution de la température moyenne le long du pont en fonction de la puissance RF appliquée. Ce phénomène s'explique par la présence des contre-électrodes dont l'objectif est de maintenir la position Haut du pont quelle que soit la puissance RF appliquée. En effet, le phénomène d'auto-activation, induit par la puissance RF, tend à attirer le pont en position Bas, ainsi au fur et à mesure que la puissance augmente, le potentiel des contre-électrodes renforce la position Haut du pont dont la structure se soulève de plus en plus, conduisant par la même occasion à limiter l'augmentation de température induite par le signal RF qui parcourt la ligne. Cette étude permet donc de valider le rôle et la performance des contre-électrodes, qui améliorent le fonctionnement du commutateur et limitent l'échauffement des structures qui pourrait s'avérer très endommageable à l'état passant pour de fortes puissances.



*Figure 138. Variation de la température moyenne du pont du commutateur parallèle à l'état Haut en fonction de la puissance RF (en W)*

Les caractérisations thermiques menées sur les commutateurs RF ont donc permis d'apporter de réelles réponses au comportement thermique des structures et d'en définir un design pour limiter l'effet thermique et optimiser leur conception.

## 2. Etude d'un tuner RF

CETTE ETUDE a été menée en partenariat avec le Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS) de Toulouse, dans le cadre du projet précédemment présenté portant sur l'étude des micro-commutateurs MEMS-RF.

Ici il s'agit d'étudier par thermographie infrarouge la fiabilité d'un système complexe constitué d'un ensemble de composants MEMS issus des nouvelles architectures d'émetteurs-récepteurs développées au LAAS dans le cadre des travaux de thèse de Chloé Bordas [Bordas08].

Ce paragraphe décrit la technologie et le fonctionnement de tuners à base de micro-commutateurs MEMS-RF précédemment étudiés en première partie de ce chapitre. Puis la caractérisation thermique par thermographie infrarouge permettra d'étudier la fiabilité des composants, afin d'en valider la conception et l'aptitude technologique d'intégration de circuit comportant de nombreux composants pour la réalisation d'un tuner.

### 2.1. Présentation des Tuners d'impédance

Les systèmes de télécommunications requièrent de plus en plus de compacité tout en intégrant toujours plus de fonctions. Le développement et l'intégration de systèmes reconfigurables, donc adaptables, est devenu indispensable pour satisfaire ces exigences. Parmi ces systèmes de plus en plus complexes, les tuners sont à l'origine du développement de réseaux d'adaptation en puissance reconfigurables.

Les tuners d'impédance sont des circuits produisant différentes impédances. Ils sont généralement constitués de composants actifs comme des diodes, des transistors, des commutateurs et des capacités variables. Cette technologie a déjà fait ses preuves grâce à la faible tension de commande (0-10 V), la vitesse de commutation (ns) et la facilité d'intégration avec d'autres composants. Par contre, ils présentent aussi certains inconvénients majeurs comme la production de bruit, de non-linéarité générée par les composants actifs qui s'ajoutent aux problèmes de fiabilité. De plus, des problèmes de résistance thermique et électrique se traduisent par des pertes thermiques importantes et non compatibles avec des applications portables.

Il existe plusieurs technologies de tuner mais nous nous limiterons dans cette étude à présenter celle développée par le LAAS. Dans la démarche de conception, les tuners sont développés à partir de commutateurs MEMS-RF. Par ailleurs, dans le but de maximiser les performances du tuner en terme notamment de couverture d'impédance, plusieurs paramètres importants entrent en jeu tels que : le nombre de commutateurs, la valeur de la capacité des commutateurs à l'état Haut et à l'état Bas, l'impédance des lignes de transmission, la permittivité diélectrique et la valeur des capacités fixes.

Après optimisation [Bordas08], le nombre de commutateurs qui constituent le tuner, a été limité à six afin de minimiser la complexité du circuit. Conformément à l'étude thermique des commutateurs simples, la configuration parallèle, plus stable thermiquement que la configuration série, a été choisie pour monter les commutateurs. Chaque commutateur est associé à une capacité fixe de type Métal-Isolant-Métal (MIM) qui est répartie sur les quatre ancrages. Cette

association décrite dans la Figure 139 est appelée « cellule vecteur ». Les commutateurs fonctionnant en tout ou rien suivant l'état Haut ou Bas du pont, le nombre maximal d'impédances synthétisées par le tuner est donc égale à 64 ( $2^6$ ). Des résistances en germanium, intégrées dans la structure de la « cellule vecteur », assurent une valeur d'impédance constante au niveau des commutateurs et les protègent des courts-circuits.

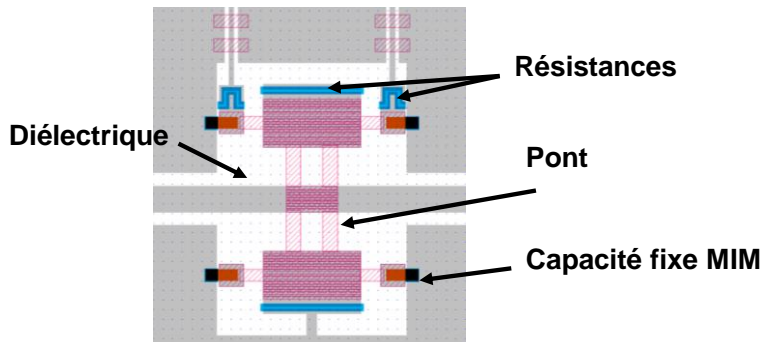


Figure 139. Description d'une « cellule varactor » : un commutateur parallèle avec une capacité fixe MIM

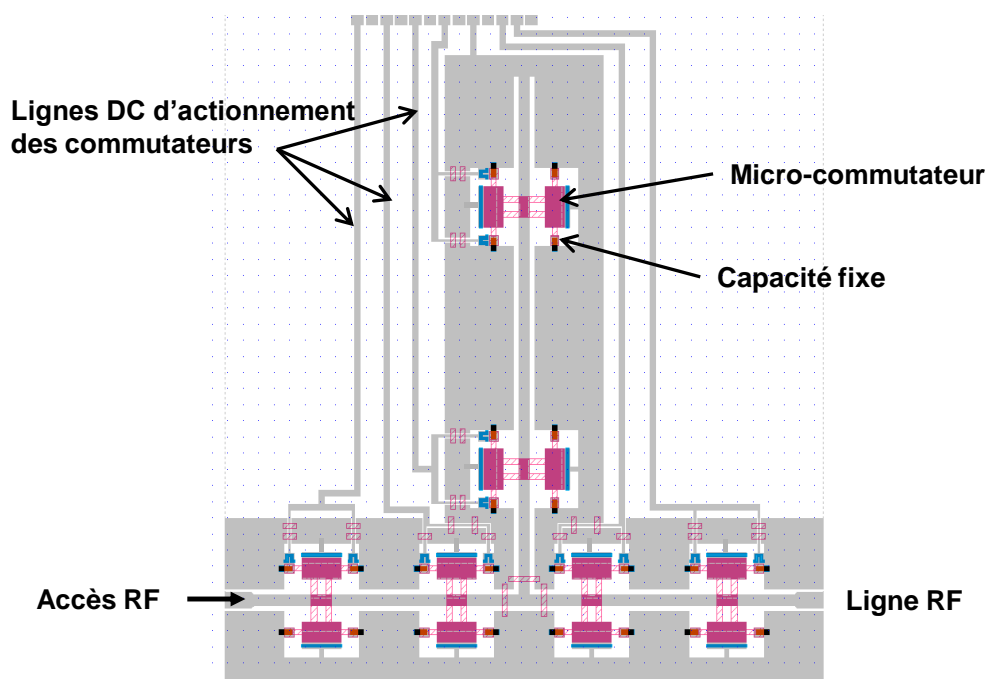


Figure 140. Schéma descriptif du Tuner complet constitué de 6 commutateurs avec capacité MIM

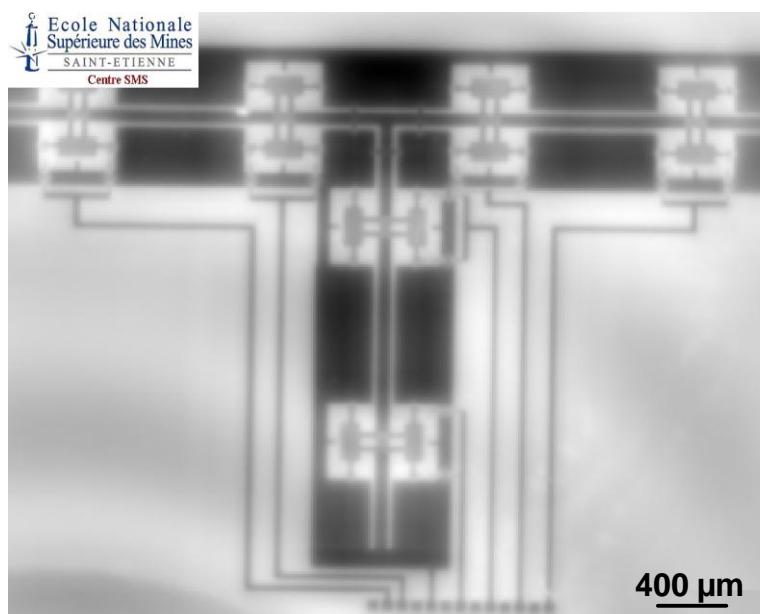
Après optimisation de la topologie, la Figure 140 illustre la structure complète du tuner. Ce tuner présente plusieurs avantages, comme une grande bande passante et une grande couverture en impédance, mais a pour inconvénients d'augmenter les pertes et l'encombrement avec l'augmentation du nombre de commutateurs. La conception de ces tuners a été réalisée pour une bande de fréquence autour de 20 GHz.



## 2.2. Le dispositif expérimental

L'objectif est de réaliser par thermographie infrarouge, la cartographie thermique de l'échauffement des Tuners MEMS-RF en fonction de la puissance appliquée. L'analyse de l'impact thermique de la puissance d'actionnement sur les différents commutateurs du tuner vise, d'une part à diagnostiquer des problèmes de fiabilité et d'autre part à définir le design optimum pour un maximum de performances.

Les mesures ont été réalisées au LAAS, mais pour des questions d'adaptabilité difficile entre les dispositifs de caractérisation RF et thermique, le banc de thermographie infrarouge n'a pas pu être monté en configuration de résolution maximale. A 0 W, l'image infrarouge en contraste d'émissivité de la Figure 141, donne un bon aperçu de la résolution spatiale atteinte pour les mesures dans cette configuration du banc.



*Figure 141. Image infrarouge du tuner à l'état Off*

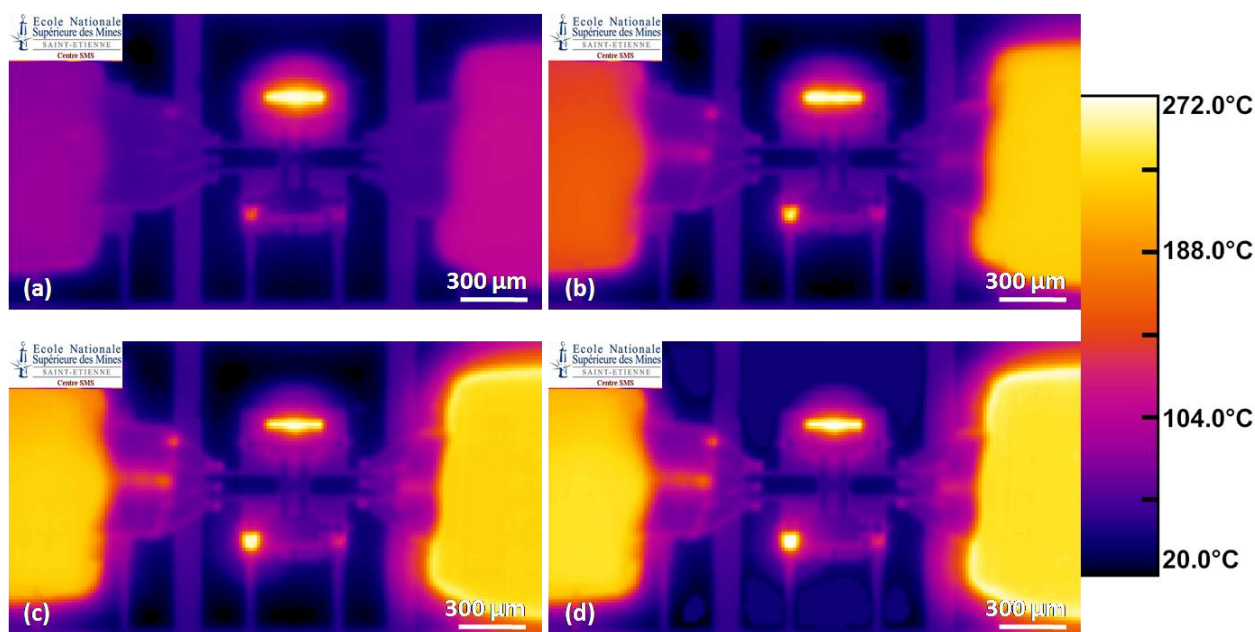
Le dispositif mis en place permet de corrélérer, en dynamique, les cartographies thermiques avec le niveau de puissance appliquée ; ainsi il est possible de suivre l'évolution de la température du tuner dans son ensemble mais également dans chacun des six commutateurs constituant le tuner.

### 2.3. Caractérisation thermique

L'étude thermique des tuners se déroule en plusieurs étapes : la première phase concerne l'analyse thermique des « cellules varactors » qui constituent le tuner afin de déterminer le comportement thermique des composants en fonction de la puissance appliquée. Ensuite, les profils de température de l'ensemble complet permettront de tester la tenue en puissance et de mettre en évidence d'éventuels problèmes de fiabilité liés à l'intégration des commutateurs.

#### Analyse des « cellules varactors »

Dans le cas d'applications d'adaptation d'impédance, la tenue en puissance est un paramètre critique. La tenue en puissance des commutateurs avec capacité fixe, développés pour être intégrés dans le tuner, est évaluée par analyse infrarouge. Dans ce cas, les circuits de test sont des wafers ne comportant que des « cellules varactors » indépendantes. La Figure 142 présente leur cartographie thermique obtenue en fonction de la puissance appliquée entre 1 et 4 W. L'échelle colorimétrique de température est identique pour les quatre cas de puissance. L'optimisation du design a permis de concevoir des commutateurs avec un comportement thermique relativement stable. En effet, la température moyenne enregistrée au niveau du pont est de 40°C, quelle que soit la puissance appliquée entre 1 et 4 W. Les images thermiques des « cellules varactors » mettent également en évidence l'échauffement très important au niveau des sondes RF.



*Figure 142. Cartographies thermiques des « cellules varactors » avec résistances en Ge, sous puissance de 1 (a), 2(b), 3(c) et 4 W(d).*

La stabilité thermique des commutateurs est assurée par les résistances en germanium qui s'échauffent très fortement dès la mise sous puissance. Elles jouent le rôle d'amortisseurs thermiques en concentrant les effets liés à la puissance. La température moyenne des résistances est de l'ordre 267°C ; à cette température les résistances en Ge présentent une bonne stabilité sous puissance, comme l'illustre la Figure 143, à travers leur linéarité thermique dans la gamme de

puissance testée entre 1 et 4 W. Ceci s'explique par la température de transition très élevée du germanium (840°C) [Ranieri09]. Tous les commutateurs analysés présentent une bonne stabilité thermique sous puissance.

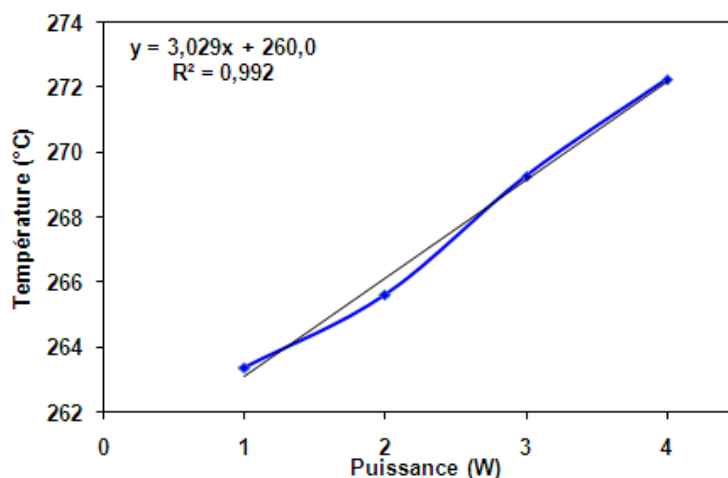


Figure 143. Evolution de la température des résistances en Ge en fonction de la puissance appliquée

### Analyse du système complet

Il s'agit à présent d'analyser le comportement thermique sous puissance d'un tuner complet, comportant six « cellules varactors » identiques. La Figure 144 donne la distribution thermique du tuner pour deux cas de puissance 1 W et 2 W. Afin de comparer les deux cartographies, leur échelle de température est identique.

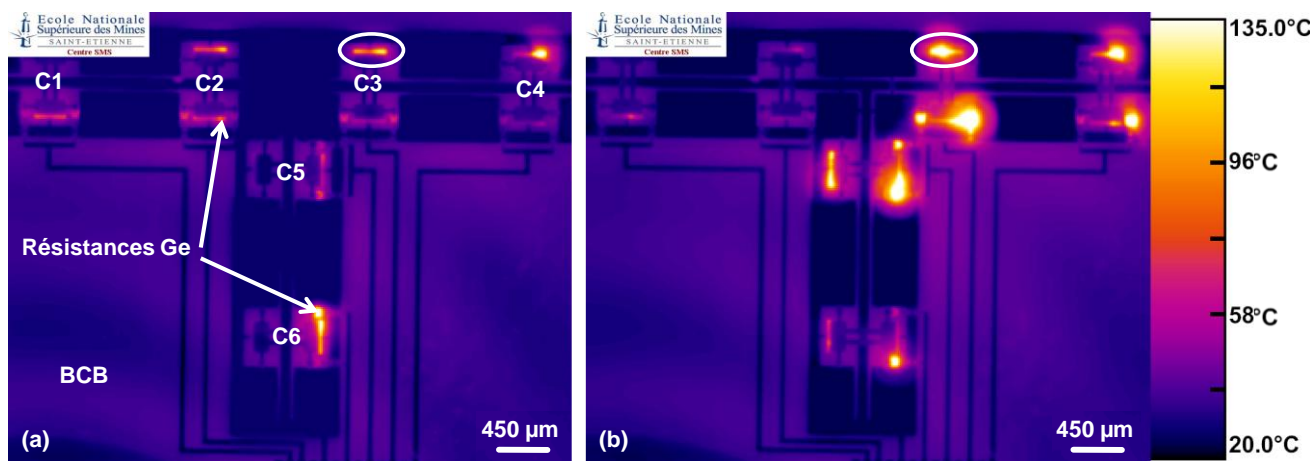
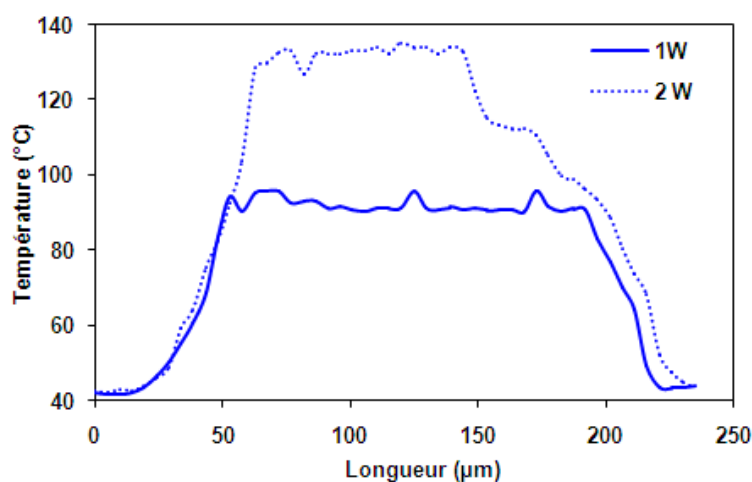


Figure 144. Mesures thermiques d'un tuner à six commutateurs avec capacité fixe sous une puissance de 1 W (a) et 2 W (b)

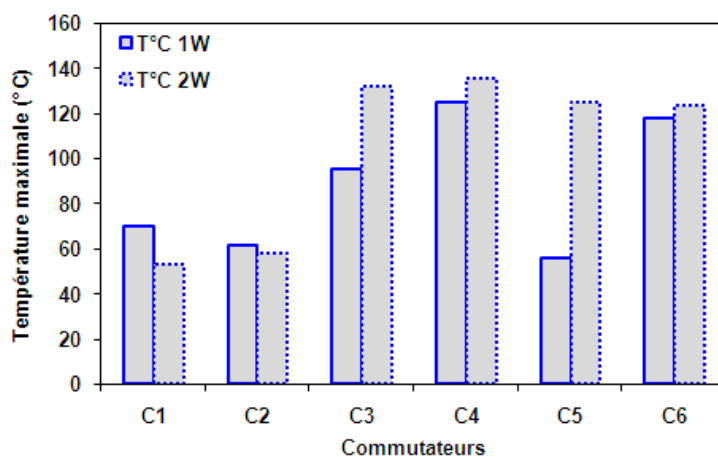
Sous une puissance de 1 W, il apparaît au niveau de chaque « cellule varactor », des zones d'échauffement bien localisées au niveau de la plupart des résistances en germanium. Leur température semble relativement homogène sur toute leur surface (Figure 145), alors que la

structure de l'ensemble des commutateurs a une température moyenne de 40°C. Par contre, lorsque le tuner est soumis à 2 W, les effets thermiques liés à la puissance deviennent hétérogènes au niveau des résistances, comme l'illustre la Figure 145 présentant l'exemple de la distribution de température dans la résistance en germanium (cerclée en blanc) du commutateur C3 à 1 et 2 W. Alors que l'état thermique est relativement homogène pour une puissance de 1 W, nous observons, pour une puissance de 2 W, un sur-échauffement conséquent et hétérogène au niveau des résistances. La température maximale des résistances mesurée est de 135°C.



**Figure 145. Distribution thermique le long de la résistance en germanium de la « cellule varactor » C3 sous une puissance de 1 et 2 W**

Les variations de température sont également très différentes entre les commutateurs. Les analyses thermiques réalisées montrent un échauffement intense des résistances de quatre commutateurs (C3, C4, C5 et C6), alors que les deux autres « cellules varactors » (C1 et C2) présentent une température plus faible sous 2 W que sous 1 W, ceci pouvant s'expliquer par le phénomène d'auto-activation des commutateurs. Ceci révèle un problème de fonctionnement du tuner lié à l'intégration des commutateurs dans le circuit. L'histogramme de la Figure 146 donne les valeurs de la température maximale enregistrée dans chacun des six commutateurs pour les deux cas de puissance testée.



**Figure 146. Evolution de la température maximale dans les 6 « cellules varactors » du tuner sous une puissance de 1 et 2 W**

### Défaillance par auto-activation

Les analyses thermiques ont également permis de mettre en évidence le phénomène d'auto-activation, largement en cause dans les problèmes de fiabilité des commutateurs MEMS-RF. Les films infrarouges, réalisés sous une puissance de 2 W, visualisent les variations de température au niveau des résistances en germanium associées à l'auto-commutation des commutateurs.

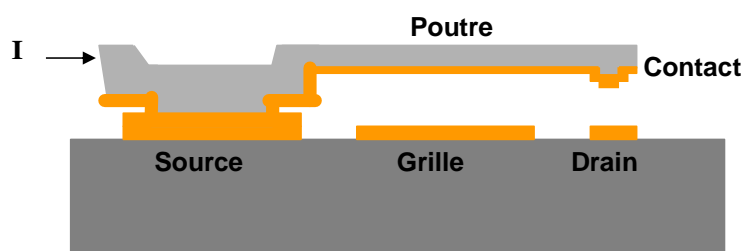
## 3. Etude thermique du contact dans un micro-commutateur

CETTE ETUDE a été menée en partenariat avec deux industriels. Des closes de confidentialité nous obligent à ne dévoiler aucune donnée technique concernant les composants étudiés. Le cadre du projet s'inscrit dans un effort global de fiabilisation de la filière de développement de micro-commutateurs intégrés. Le but de cette étude est d'analyser par thermographie infrarouge le comportement thermique du contact électrique, de la structure du commutateur et du wafer en fonction des conditions de fonctionnement.

Ce paragraphe présente succinctement la technologie et le fonctionnement des commutateurs. Puis la caractérisation thermique permettra d'étudier le comportement des structures au niveau du contact électrique afin d'en évaluer la conception, la fiabilité et l'aptitude opérationnelle des composants.

### 3.1. Présentation des micro-commutateurs

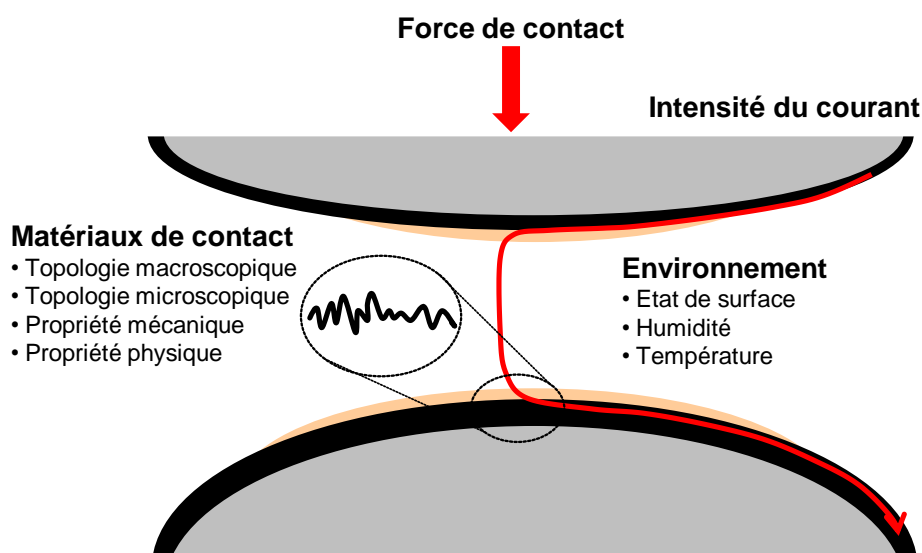
Dans sa forme la plus simple, un micro-commutateur est constitué d'une poutre et possède trois terminaux électriques : source, grille et drain (Figure 147). En appliquant une tension entre la grille et la source, on crée une force électrostatique entre l'électrode de la grille et la poutre, ce qui va abaisser la poutre jusqu'à créer un contact électrique entre les terminaux drain et source. Quand le micro-commutateur se ferme, le contact entre la poutre et l'électrode drain s'effectue au travers d'une partie « contact » située sur la surface inférieure de la poutre, près de son extrémité. Il existe également d'autres modes d'actionnement de la poutre. Dans le cadre de notre étude, la technologie du commutateur développé est basée sur un actionnement magnétique de la poutre. A l'aide d'un aimant, le champ magnétique permet d'attirer la poutre et de la maintenir en contact avec le drain, afin de fermer le circuit électrique.



*Figure 147. Principe de fonctionnement du commutateur étudié*

Dans les micro-commutateurs, la problématique principale engendrée par les cycles de commutation sur les structures mobiles est une dégradation des parties en contact. Or la fiabilité et les performances des micro-commutateurs reposent essentiellement sur la qualité des contacts électriques.

Le bon fonctionnement du micro-commutateur est gouverné par la qualité de son contact. Les études menées [Jensen03, Jensen04, Jensen05a, Mcgruer06, Kwon07] montrent que le contact est la principale source de défaillance des micro-commutateurs à contact ohmique. Des mécanismes de transformation des matériaux en contact tels que les phénomènes d'adhésion [Gregori06, Majumder05, Jensen05b, Duvivier10], de transfert de matériaux [Hyman99] et de dépôts organiques ou de contamination de surface peuvent apparaître et endommager sévèrement le commutateur en raison d'une forte hausse de la résistance de contact. Pour prévenir cette défaillance, il est alors important de tenir compte des effets thermiques dans les contacts électriques.



*Figure 148. Facteurs influençant la qualité du contact électrique*

D'une manière générale, les performances de contact sont gouvernées par différents facteurs importants tels que la force de contact, les matériaux de contact (couches minces et substrat), l'intensité du courant traversant le contact et l'environnement de fonctionnement du micro-commutateur. Ces facteurs qui affectent les performances de contact sont illustrés sur la Figure 148.

Le contact électrique s'établit lorsque les deux parties du contact viennent s'appuyer l'une contre l'autre avec une force suffisante pour provoquer le passage du courant. En raison de la présence des aspérités de surface et d'un film superficiel induit par la contamination de surface, le contact ne s'effectue généralement pas sur toute la « surface apparente » du contact, mais en un certain nombre de points de surface, appelés « contacts élémentaires », dépendant des facteurs précédemment décrits. La Figure 149 représente schématiquement l'interface du contact électrique.

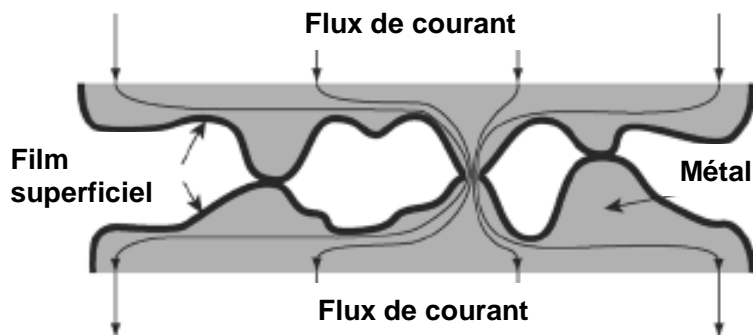


Figure 149. Le contact électrique

Sans rentrer dans la théorie du contact électrique, il est néanmoins important de noter que la qualité d'un contact électrique est assurée par une résistivité électrique faible et une faible rugosité. Dans le cadre de cette étude de fiabilité de micro-commutateurs, nous nous sommes focalisés sur l'étude thermique au niveau du contact électrique, afin d'évaluer son comportement thermique en fonctionnement pour en améliorer les performances.

### 3.2. Le dispositif expérimental

L'objectif est de réaliser la cartographie thermique des micro-commutateurs et de mesurer, en fonction des conditions d'actionnement appliquées, l'échauffement au niveau du contact électrique, ceci afin d'évaluer l'évolution des performances et de déterminer les problèmes de fiabilité engendrés en cours de fonctionnement. L'analyse de l'impact thermique de l'intensité du courant sur la résistance du contact sera également conduite.

L'ensemble des mesures thermiques a été réalisé sur le banc de thermographie infrarouge en configuration haute résolution. Les différents micro-commutateurs ont été intégrés sur un connecteur pour faciliter leur manipulation et permettre de les actionner indépendamment. De façon à permettre le passage du courant, les commutateurs sont maintenus en position basse grâce à un aimant. La Figure 150 présente l'image optique et l'image infrarouge en contraste d'émissivité du commutateur en absence de courant.

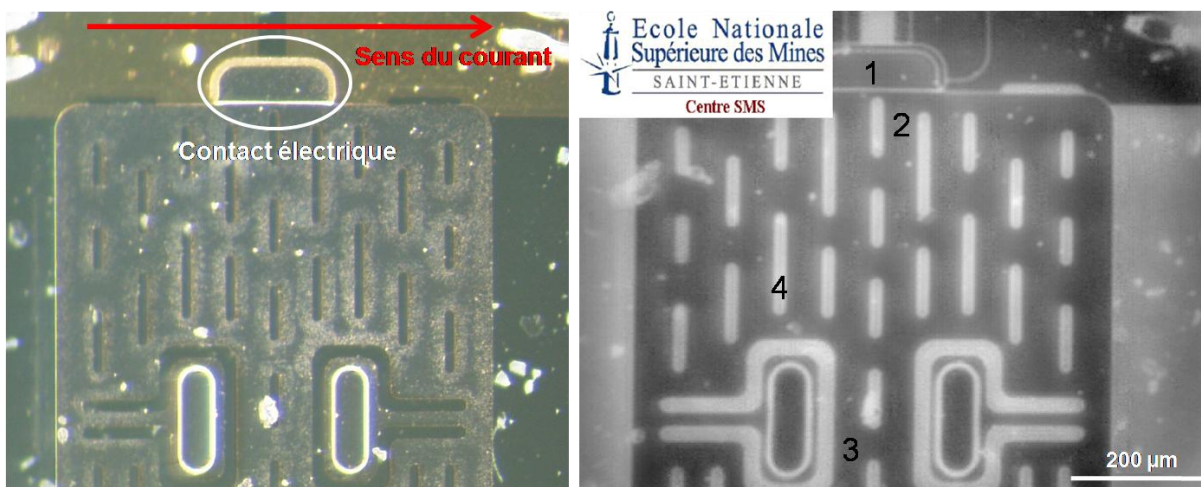


Figure 150. Image optique et infrarouge du commutateur à l'état Off

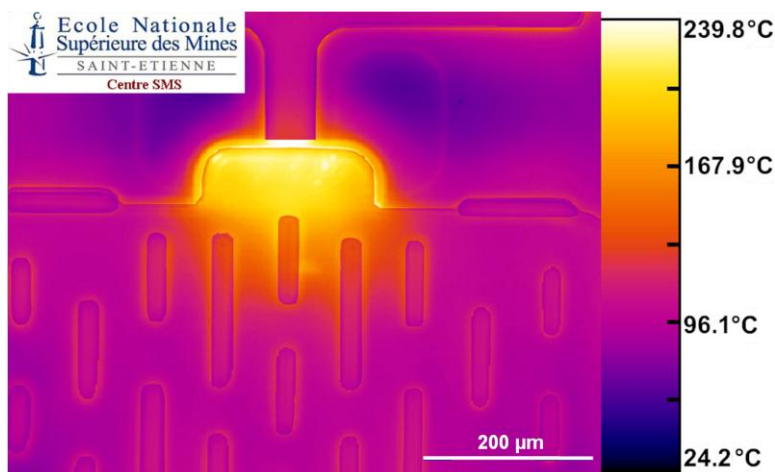
Une alimentation électrique commande l'intensité appliquée et mesure l'intensité du courant. En parallèle, des thermocouples contrôlent la température ambiante et celle au niveau du support des connexions des commutateurs.

Les mesures infrarouges sont synchronisées avec l'application du courant, de façon à filmer l'augmentation de température au niveau de toute la structure du commutateur et notamment au niveau du contact. L'état thermique est également mesuré en régime stationnaire, quelques secondes après la première mesure. Les mesures de référence de l'état du commutateur au repos sont effectuées avant toute alimentation électrique.

Afin de suivre l'évolution de la température au sein du commutateur, des mesures locales de température sont réalisées au niveau de différents points de référence répartis sur la structure du commutateur ; ces points sont notés de 1 à 4 sur la Figure 150 et dans la suite de l'étude.

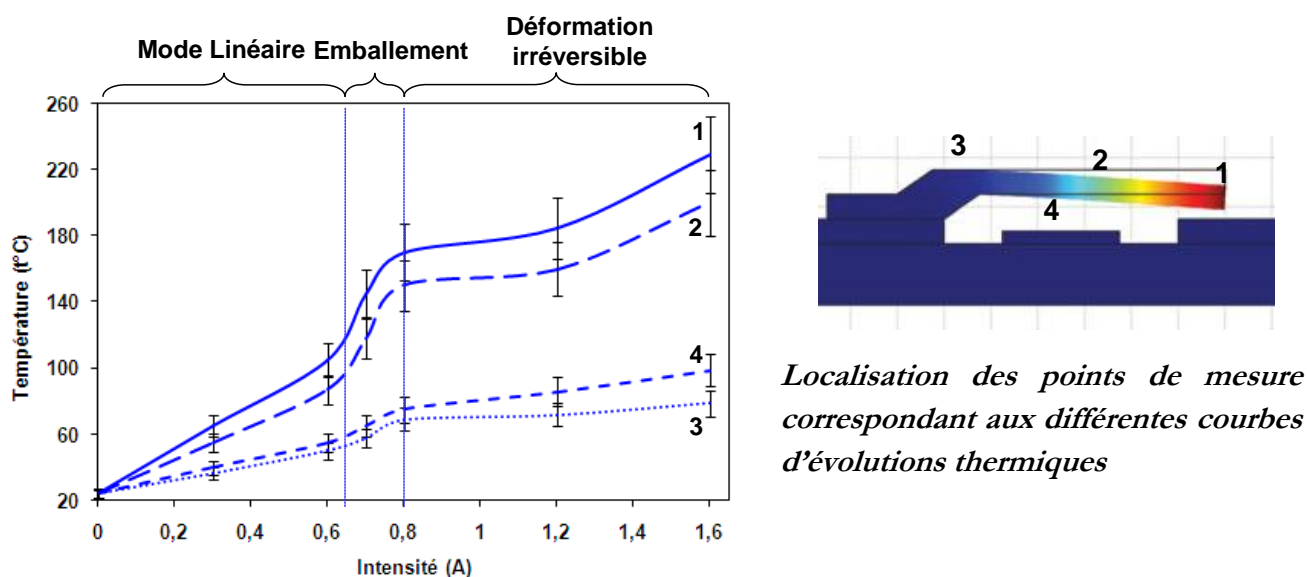
### 3.3. Caractérisation thermique

L'étude thermique des commutateurs consiste à évaluer la température dans toute la structure et notamment au niveau du contact électrique, afin de déterminer le comportement thermique du contact en fonction de l'intensité appliquée. L'objectif est donc de réaliser des cartographies fines de la distribution thermique des micro-commutateurs en prenant en compte l'émissivité des différents matériaux. Malgré la complexité de la structure, la Figure 151 donne un exemple d'une image thermique reconstituée et quantitative du contact électrique du commutateur traversé par un courant de 1,6 A. La température moyenne au niveau du contact (point de mesure 1) est de 210°C. Elle est de 90°C au niveau de la poutre (point 3).



*Figure 151. Image reconstituée de la distribution thermique au niveau du contact électrique traversé par un courant de 1,6 A*

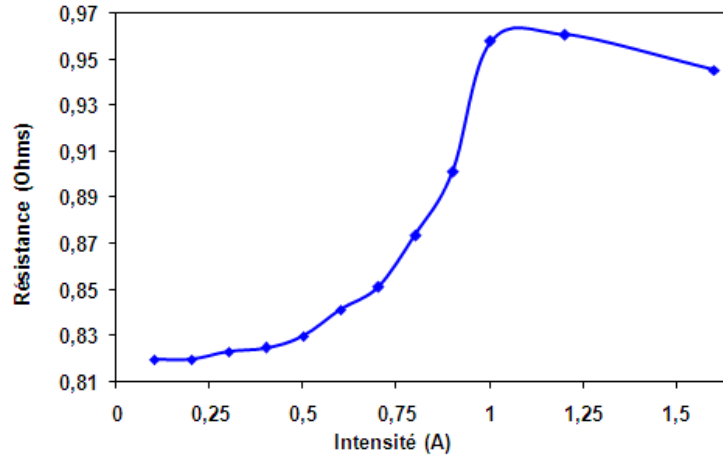




*Figure 152. Evolution de la température dans la structure du commutateur en fonction de l'intensité du courant appliqué*

A partir des cartographies thermiques des micro-commutateurs réalisées sous différentes conditions électriques, la Figure 152 présente l'évolution locale de la température au niveau de quatre points de mesures notés de 1 à 4 et situés respectivement au niveau du contact électrique, au niveau du début et de l'extrémité de la poutre et à travers la structure trouée de la poutre correspondant au diélectrique, sous la structure. Ces différents points de mesures sont représentés sur la figure de droite. Compte tenu des conditions expérimentales, une incertitude de 10% est estimée pour l'ensemble des valeurs.

L'étude des distributions thermiques au niveau de ces différents points permet d'analyser finement la température de la structure en fonction de l'intensité du courant transmis. On observe une augmentation significative de la température dans toute la structure du commutateur. Cette élévation de température résulte de la diffusion thermique de l'échauffement par effet joule du contact électrique lorsqu'il est parcouru par un courant. Il est ainsi normal de noter que les zones les plus éloignées du contact s'échauffent le moins. Par ailleurs, il est possible de déterminer différentes phases dans le comportement thermique des commutateurs suivant leurs conditions d'actionnement. Entre 0 et 0,6 A, la phase linéaire correspond à une augmentation linéaire de la température en fonction de l'intensité du courant transmis ; ceci correspondant à l'échauffement normal par effet joule du contact électrique. Au-delà de 0,6A, une augmentation importante de la température a lieu au niveau du contact et conduit à son altération fonctionnelle. Sous l'effet de la température, il semble que des transformations microstructurales se produisent, entraînant l'effondrement local des aspérités du contact et l'augmentation des phénomènes d'oxydation, la résistance de contact croit alors rapidement jusqu'à destruction irréversible du contact. La température maximale atteinte au niveau du contact électrique est alors de 239°C. Après ce stade, le contact restant soudé, la diminution de l'intensité ne permet pas de retrouver le fonctionnement normal du commutateur.



*Figure 153. Evolution de la résistance au cours du fonctionnement du commutateur*

L'étude de la résistance de contact sortirait du cadre du projet de thèse, néanmoins on peut justifier l'hypothèse de l'augmentation de la résistance de contact en évaluant la résistance électrique du commutateur. La résistance électrique mesurée correspond à la résistance du contact et des lignes conductrices entre l'alimentation et la poutre. Ne disposant pas de système d'acquisition en continu de la résistance en fonction du temps, les valeurs présentées correspondent à des mesures effectuées en mode quatre points à chaque variation de courant imposé. L'analyse de la résistance électrique en fonction des conditions d'actionnement du commutateur est présentée sur la Figure 153. La mise en évidence d'une augmentation importante de la résistance à partir de 0,6 A permet de justifier l'emballement thermique au niveau du contact électrique par l'élévation de la résistance de contact, en considérant que le circuit électrique reste stable durant les mesures. Cependant, la résistance du contact étant affectée par divers facteurs (rugosité, film d'oxyde, force magnétique, etc.), il est difficile dans le cadre de cette étude d'identifier l'origine de la dégradation du contact.

## **Bilan**

APRES AVOIR VALIDÉ les performances du dispositif de thermographie infrarouge à travers l'analyse de la fiabilité de différentes structures de MEMS, ce chapitre était destiné à l'étude thermique de composants MEMS avec contact électrique. Une nouvelle application de la thermographie infrarouge pour l'analyse du contact électrique a ainsi été prouvée. A travers des études spécifiques de micro-commutateurs simples ou assemblés en circuit complet, l'évaluation de la distribution thermique des composants vise à déterminer le comportement thermique des structures et des contacts électriques, à définir les conditions optimales de fonctionnement et ainsi améliorer les performances des micro-commutateurs, mais aussi à évaluer et comprendre les mécanismes d'endommagement des composants survenus sous l'effet de l'échauffement par effet Joule.

L'étude thermique visant à caractériser le comportement de différentes structures de commutateurs MEMS-RF a permis de valider l'efficacité des vias à dissiper la chaleur et de définir la configuration optimale. L'étude du champ thermique nous renseigne également sur les mécanismes dissipatifs accompagnant la commutation suivant la qualité du contact électrique. La tenue en puissance de la structure optimisée a ensuite été testée sous des puissances comprises entre 1 et 4 W.

D'autre part, l'évolution de la dissipation thermique dans un circuit complet en fonction de la puissance nous renseigne sur le fonctionnement d'un tuner d'impédance MEMS-RF et met en évidence des défaillances entraînant des échauffements particulièrement importants et localisés ainsi que le phénomène d'auto-activation.

Enfin, l'analyse quantitative de la distribution thermique au niveau du contact électrique permet de connaître la distribution thermique locale due à son échauffement par effet Joule en fonction des conditions de fonctionnement. Les cartographies thermiques réalisées prennent en compte les propriétés des différents matériaux. Il a également été mis en évidence différentes phases dans le processus d'échauffement du contact jusqu'à son endommagement irréversible, permettant ainsi de définir les conditions critiques de fonctionnement.





# CONCLUSION ET PERSPECTIVES

DANS CETTE ETUDE, les objectifs étaient de développer et de valider un dispositif de thermographie infrarouge en haute résolution ainsi qu'une méthodologie d'analyse et de traitement d'images infrarouges permettant de diagnostiquer finement et rapidement des défaillances dans les microsystèmes par mesures locales et quantitatives des pertes thermiques associées. L'originalité de cet outil est de permettre une analyse thermique in situ fine, sans interagir sur les composants MEMS, afin de réaliser des cartographies quantitatives des distributions thermiques et de pouvoir évaluer les mécanismes d'endommagement. Il est ainsi possible d'évaluer le comportement thermique des microsystèmes et leurs performances dans leurs conditions réelles de fonctionnement. Cet outil a permis d'étudier le comportement thermique du contact électrique et ainsi d'estimer la déformation locale du contact du fait de l'augmentation de la résistance électrique.

Dans un premier chapitre introductif, nous avons présenté le cadre de notre travail qui a comme problématique l'étude de la fiabilité des microsystèmes. A partir d'un tour d'horizon des différentes techniques de conception de microsystèmes, nous avons donné un aperçu de la complexité technologique et des développements nécessaires pour satisfaire les contraintes industrielles avec des taux de rendements industriels satisfaisants. Les différents exemples d'applications exposés démontrent toute la spécificité technologique et le fort potentiel des MEMS à toucher tous les secteurs industriels. Néanmoins, leur industrialisation se heurte à des problèmes de fiabilité persistants. Ainsi, l'étude des mécanismes de défaillance apparaît comme une étape cruciale au cours du processus d'élaboration des microsystèmes. En effet, la non standardisation des procédés de conception ainsi que la diversité des spécifications des microsystèmes font qu'il n'existe pas de modèle prédictif universel de défaillance, et de ce fait, que l'étude de fiabilité doit faire partie intégrante de la phase de conception, elle-même, des microsystèmes. Concernant les mécanismes de défaillance, nous avons présenté les principaux mécanismes de défaillance rencontrés dans la littérature à ce jour. Nous les avons divisés en deux groupes : ceux qui sont induits par la fabrication et ceux qui sont induits par le fonctionnement. Nous avons dégagé les principaux facteurs influençant la fiabilité et les performances. Enfin, nous avons passé en revue les différentes méthodes de tests et de diagnostics de fiabilité des microsystèmes. Ceci nous a conduits à considérer l'évolution de la température comme élément déterminant de l'état d'endommagement d'un microsystème, et à proposer une méthode innovante de diagnostic de la fiabilité.

Convaincus de la nécessité et des enjeux à diagnostiquer rapidement les microsystèmes défaillants, nous avons conçu et développé un nouveau dispositif permettant de réaliser, par thermographie infrarouge, des mesures in-situ des pertes thermiques associées à un endommagement local au sein d'un MEMS. Compte tenu du champ d'applications visées, le dispositif mis en place devrait répondre à deux objectifs : la haute résolution et des mesures thermiques quantitatives. Après avoir introduit les notions physiques de base nécessaires pour notre étude, la conception et la mise en œuvre d'un banc de thermographie infrarouge ont été

présentées. Pour cela, tous les éléments de la chaîne de mesure du système infrarouge ont été étudiés afin d'évaluer les phénomènes perturbateurs environnementaux et instrumentaux afin de définir les conditions expérimentales optimales. Ainsi, après dimensionnement et optimisation, l'association d'une caméra infrarouge à des optiques spécifiques, permet d'atteindre une résolution de 2  $\mu\text{m}$ . D'autres caractéristiques, telles que le temps d'intégration et l'évaluation du bruit, ont été étudiées afin d'apprécier les performances du dispositif mis au point. Nous avons également proposé une méthode d'analyse et de traitement des films infrarouges afin d'établir des cartographies de la distribution des champs de température d'un objet à partir des mesures par thermographie infrarouge.

La validation des performances du dispositif de thermographie infrarouge développé a été prouvée à travers plusieurs études spécifiques relatives à différents composants MEMS. Ces études visaient à diagnostiquer leur état de fonctionnement et leur fiabilité thermique afin d'en améliorer les performances et d'augmenter leur durée de vie. Les différents composants MEMS étudiés dans le cadre de collaborations industrielles et académiques, sont issus des nouvelles architectures d'émetteurs-récepteurs. L'analyse des cartographies de distribution thermique a permis de montrer l'intérêt du dispositif de thermographie infrarouge, d'une part pour déterminer les échauffements standard de fonctionnement, et d'autre part pour diagnostiquer d'éventuelles défaillances en localisant des élévations anormales de température, dans le but d'estimer les modes et les causes d'endommagement.

Les principaux résultats ont été de mettre en évidence et d'analyser le processus d'endommagement de capacités variables MEMS-RF. Les mesures infrarouges ont montré que la destruction des capacités est liée aux transformations microstructurales au niveau des actionneurs. L'étude du comportement thermique d'un résonateur BAW en fonction de la fréquence de résonance et de la puissance absorbée révèle des problèmes de fiabilité. Nous avons montré que les variations locales de la dissipation thermique au niveau des électrodes sont dues à des problèmes d'hétérogénéité d'épaisseur des films minces et à la présence de contraintes résiduelles. Par ailleurs, l'évolution de la dissipation thermique permet de mettre en évidence diverses défaillances induites par la chaleur.

Une fois les performances du dispositif validées, une application spécifique et originale de la thermographie infrarouge pour l'analyse du contact électrique a été démontrée. L'évaluation de la distribution thermique des composants vise à évaluer la distribution thermique au niveau du contact électrique. Il a ainsi été permis de caractériser le comportement de différentes structures de commutateurs MEMS-RF, d'en définir les configurations optimales pour limiter les effets thermiques et de tester leur tenue en puissance afin de définir les conditions optimales de fonctionnement. Des dissipations thermiques locales et importantes dans un tuner d'impédance MEMS-RF mettent en évidence des défaillances technologiques et de fonctionnement. Enfin, l'analyse quantitative de la distribution thermique au niveau du contact électrique permet d'évaluer son endommagement induit par échauffement par effet Joule en fonction des conditions de fonctionnement. Il a ainsi été mis en évidence différentes phases dans le processus d'échauffement du contact, jusqu'à son endommagement irréversible. Ceci permet ainsi de définir les conditions critiques de fonctionnement. L'augmentation de la résistance de contact semble être la cause principale de la destruction du contact électrique.

Les prolongements naturels de ce travail sont nombreux tant du point de vue de l'amélioration de l'outil mis en place, que de son utilisation afin d'affiner les analyses thermiques.

Une prochaine étape pourrait être l'amélioration des performances du banc de thermographie infrarouge. Ceci consisterait à optimiser les conditions d'analyse et la sensibilité des mesures thermiques en mettant en place le dispositif sous enceinte à atmosphère contrôlée, afin de limiter le phénomène d'absorption de l'atmosphère. Par ailleurs, compte tenu des progrès réalisés chaque jour dans le domaine des technologies infrarouges, on peut également envisager de faire constamment progresser l'outil, afin de caractériser de plus en plus finement les microsystèmes, par l'utilisation de caméras thermiques de pointe, au niveau du détecteur et de la vitesse d'acquisition. De plus, les cartographies thermiques pourraient être améliorées au niveau de leur précision par des techniques de traitement d'images fines et moins fastidieuses que la méthode d'assemblage d'images actuellement utilisée.

Un autre prolongement de ce travail pourrait passer par le couplage des mesures avec des modèles numériques par éléments finis, afin de mettre en place des modèles de comportement phénoménologique thermique. L'utilisation couplée de ces deux techniques permettrait d'une part d'affiner l'étude de la localisation thermique et d'autre part d'envisager d'étudier finement l'endommagement des matériaux de structure. Il serait en effet possible de connaître en chaque point de chaleur, l'état de déformation du matériau. De plus, il serait intéressant de relier les distributions thermiques aux champs d'énergie dissipée en fonction des conditions d'actionnement.

Après les MEMS, ce type de mesure est aujourd'hui envisagé pour l'analyse des stades précoces d'endommagement dans les matériaux, ainsi que pour l'optimisation des échanges thermiques dans les nouveaux composants microélectroniques tels que les architectures 3D.

D'autre part un nouveau système d'analyse couplant ce banc de thermographie haute résolution avec un diffractomètre à rayons-X est en cours de réalisation.





## REFERENCES

- [AD-net] <http://www.analog.com/technology/mems/>
- [ADAMSCHIK 2002] M. Adamschik et al. Diamond microwave micro relay. *Diamond and Related Materials*, vol.11, pp.672-676, 2002.
- [ADRIANUS DE GROOT 2009] W. Adrianus de Groot, J. R. Webster. Review of Device and Reliability Physics of Dielectrics in Electrostatically Driven MEMS Devices. *IEEE Transactions on device and materials reliability*, vol.9(2), pp.190-202, 2009.
- [AEBERSOLD 2006] J. Aebersold, K. Walsh, M. Crain, et al. Design, modeling, fabrication and testing of a MEMS capacitive bending strain sensor. *J. Phys. Conf. Ser.*, vol.34, pp.124-129, 2006.
- [AIGNER 2005] R. Aigner *et al.* Behavior of BAW devices at high power levels. *Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International*, pp.4, 2005.
- [ANDERSSON 2001] H. Andersson, W. Van Der Wijngaart et al. Hydrophobic valves of plasma deposited octafluorocyclobutane in DRIE channels. *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol.75(1-2), pp.136-141, 2001.
- [ANDREI 2008] A. Andrei, K. Krupa, M. Jozwik, P. Delobelle et al. AlN as an actuation material for MEMS applications: The case of AlN driven multilayered cantilevers. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.141(2), pp.565-576, 2008.
- [ARLOT] J.-E. Arlot. *La sphère céleste, les coordonnées, les télescopes, le rattachement*, IMCCE/UFE observatoire de Paris.
- [AUBRY 2004] R. Aubry, C. Dua et al. Temperature measurement by micro-Raman scattering spectroscopy in the active zone of AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* vol.27, pp.293-296, 2004.
- [BAGDAHN 2001] J. Bagdahn, J. Schischka et al. Sharpe, Fracture Toughness and Fatigue Investigations of Polycrystalline Silicon, *Proc. SPIE*, Vol.4558, pp.159-168, 2001.
- [BAHRAMI 2006] M. Bahrami, M. Tayefeh. Stochastic estimation of microactuator buckling. *Journal of physics International MEMS conference*, n°34, p.692-697, 2006.
- [BANKS-net] <http://www.dbanks.demon.co.uk/ueng/index.html>
- [BEN HASSINE 2009] N. Ben Hassine. Etude de la fiabilité des composants à ondes acoustiques de volume (BAW) pour des applications Radio Fréquence. Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble I, 276p. 2009.
- [BERTHEL 2007] B. Berthel. Mesures thermographiques de champs de dissipation accompagnant la fatigue à grand nombre de cycles des aciers. Th. Université Montpellier II. 202p. 2007.
- [BLASQUEZ 2001] G. Blasquez, C. Douziech, P. Pons Analysis characterisation and optimisation of temperature coefficient parameters in capacitive pressure sensors *Sensors and Actuators A*, vol.93, pp.44-47, 2001.

- [BLEY 1991] P. Bley, W. Bacher, W. Menz, J. Mohr. Description of microstructures in LIGA-technology. *Microelectronic Engineering*, vol.13(1-4), pp.509-512, 1991.
- [BHARDWAJ 1995] J. K. Bhardwaj, H Ashraf. Advanced silicon etching using high-density plasmas. *Proc. SPIE*, vol.2639, pp.224-233, 1995.
- [BOCHOBZA 2002] O. Bochobza-Degani, E. Socher, Y. Nemirovsky. On the effect of residual charges on the pull-in parameters of electrostatic actuators. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.97-98, pp. 563-568. April 2002.
- [BORDAS 2008] C. Bordas. Optimisation technologique de commutateurs MEMS RF capacitifs à tenue en puissance améliorée - Application à l'élaboration d'un synthétiseur d'impédances MEMS en bande K. Th. Toulouse III. 183p. 2008.
- [BOUCHAUD 2007] J. Bouchaud et al. RF MEMS roadmap. *Proceeding of the 37th European Microwave Conference*, Munich, pp.1141-1144, October 2007.
- [BOULANGER 2004] T. Boulanger. Analyse par thermographie infrarouge des sources de chaleur induites par la fatigue des aciers. Thèse, Université Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc, 2004.
- [BOYD 2003] J. Boyd. Epson Using MEMS to create advanced inkjet heads for POS printers. *Technology Newslines of Seiko Epson Corporation*, p.2, 2003. [http://www.epson.co.jp/e/newsroom/tech\\_news/tnl0302single.pdf](http://www.epson.co.jp/e/newsroom/tech_news/tnl0302single.pdf)
- [BOWDEN 1950] F.P. Bowden, D. Tabor. *Lubrication of Solids*. At the Clarendon Press, Oxford, pp.299, 1950.
- [CABANNES 2001] F. Cabannes. Température de surface : mesure radiative. *Techniques de l'Ingénieur*, R2 735, 17p. 2001.
- [CABANNES 1996] F. Cabannes. Température de surface : mesure radiative. *Techniques de l'ingénieur, Traité Mesures et Contrôle*, R2735, 19p. 1996.
- [CASS 2009] S. Cass MEMS in space. *IEEE Spectrum*, vol.38(7), version 1, pp.56-61, July 2001.
- [CASTILLEJO 1998] A. Castillejo, D. Veychard et al. Failure Mechanisms and Fault Classes for CMOS-Compatible Microelectromechanical Systems, *IEEE Int. Test Conference*, pp.541-550, 1998
- [CHANG 2003] C.P. Chang. MEMS for telecommunications: devices and reliability. *Proceedings of the Custom Integrated Circuits Conference*, pp.199-206, 2003.
- [CHARLOT 2001] B. Charlot, Modélisation de fautes et conception en vue du test structurel des microsystèmes, Th. INPG Grenoble, 177p, Mars 2001.
- [CHRYSOCHOOS 2000] A. Chrysochoos, J. M. Muracciole et B. Wattrisse. Experimental analysis of strain and damage localization. *Continuous damage and fracture*, Cachan, 23-27 Oct., pp.41-51, 2000.
- [COCCHETTI 2005] F. Cocchetti et al. Thermal analysis of RF-MEMS Switches for power handling front-end. *13th GAAS Symposium*, Paris, pp.513-516, 2005.

- [COMTOIS 1997] J.H. Contois, V.M. Britght. Application for surface-micromachined polysilicon thermal actuators and arrays. *Sensors and Actuators*, A58, p.19-25, 1997.
- [CONANT 1998] R.A. Conant, R.S. Muller. Cyclic fatigue testing of surface-micromachined thermal actuators. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Anaheim CA, vol.66, p.273-277, 1998.
- [DARDALHON 2003] M. Dardalhon. Contribution à l'analyse de la fiabilité de Microsystèmes. Th. Université Montpellier II, Décembre 2003.
- [DE WOLF 2002] I. De Wolf and W. M. van Spengen. Techniques to study the reliability of metal RF MEMS capacitive switches. *Microelectronics Reliability*, pp.1789-1794, 2002.
- [DE WOLF 2004-1] I. De Wolf. The reliability of RF-MEMS: failure modes, test procedures and instrumentation. *Proceedings of SPIE*, vol.5343, pp.1-8, 2004.
- [DE WOLF 2004-2] I. De Wolf. Instrumentation and methodology for MEMS testing, reliability assessment and failure analysis. *24th International Conference on Microelectronics*, vol.1, pp.57-63. May 2004.
- [DE WOLF 2007] I. De Wolf. MEMS reliability testing. *Micro&Nano Systems*. 1-4 Oct. 2007.
- [DIXON 2007] R. Dixon, J.Bouchaud. Prospects for MEMS in the automotive industry. *Sensors & Transducers Journal*, vol.86(12), pp.1778-1784, 2007.
- [DOUDARD 2007] C. Doudard, M. Poncelet *et al.* Determination of an HCF criterion by thermal measurements under biaxial cyclic loading. *Int. J. of Fatigue*, vol.29, pp.748-757, 2007.
- [DRUART 2009] G. Druart. Nouvelles briques de conception de systèmes intégrés pour la vision infrarouge. Th. Université d'Orsay, Paris XI. 254p. 2009.
- [DUONG 2005] Q.-H. Duong, L. Buchaillot, D. Collard, P. Schmitt, X. Lafontan *et al.* Thermal and electrostatic reliability characterization in RF MEMS switches. *Microelectronics and Reliability*, pp. 1790-1793, 2005.
- [DUFFY 2001] S. Duffy, C. Bozler *et al.* MEMS microswitches for reconfigurable microwave circuitry. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol.11(3), pp.106-108, Mars 2001.
- [DUVIVIER 2010] P.-Y. Duvivier. Étude expérimentale et modélisation du contact électrique et mécanique quasi statique entre surfaces rugueuses d'or : application aux micro-relais MEMS. Th. de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, Novembre 2010.
- [EBEL 2007] J.L. Ebel *et al.* RF MEMS testing beyond the S-parameters. *IEEE Microwave Magazine*, vol.8(6), pp.76-88, 2007.
- [FILLIT 2005] R.-Y. Fillit, Ivira *et al.* Structural and thermal investigation for FBAR reliability in wireless applications. *Reliability Physics Symposium*, 2005. *Proceedings*. 43rd Annual. 2005 *IEEE International*, April 17-21, pp.342-346, 2005.
- [FU 2007] C. Fu and H.Huang. Different methods for the fabrication of UV-LIGA molds using SU-8 with tapered de-molding angles. *Microsystem technologies*, pp.293-298, 2007.

- [GATARD 2006] E. Gatard. Analyse des phénomènes physiques dans les diodes p-i-n : Contribution à la modélisation électrothermique pour les applications de puissance RF et hyperfréquences. Th. Université de Limoges. 2006.
- [GAUSSORGUES 1999] G. Gaussorgues. La thermographie infrarouge : Principes Technologies Applications. Technique & Documentation, 4<sup>e</sup> ed. 587p. 1999.
- [GERKE 1999] R.D. Gerke, J. Bernstein, S. Kayali et al. MEMS Reliability Assurance Guidelines for Space Applications. Chap.8 : MEMS Packaging, pp.166-189, 1999.
- [GIANCANE 2009] S. Giancane, A. Chrysochoos, V. Dattoma and B. Wattrisse. Deformation and dissipated energies for high cycle fatigue of 2024-T3 aluminium alloy. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, vol. 52 (2), pp. 117-121, 2009.
- [GOLDSMITH 2001] C. Goldsmith et al. Lifetime characterization of capacitive RF MEMS switches. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Phoenix, vol.1, pp.227-230, May 2001.
- [GOLDSMITH 2007] C. Goldsmith, J.Maciél, J. McKillop. Demonstrating reliability. IEEE Microwave Magazine, vol.8(6), pp.56-60, 2007.
- [GORMLEY 2000] C. Gormley, A. Boyle, V. Srigengan, S. C. Blackstone. HARM processing techniques for MEMS and MOEMS devices using bonded SOI substrates and DRIE. Micromachining and Microfabrication Process Technology VI, Santa Clara, CA, USA, pp.98-110, 2000.
- [GRACE 1999] R.H. Grace. The growing presence of MEMS & MST in automotive applications Sensors Magazine, p.89-96, September 1999.  
<http://archives.sensormag.com/articles/0999/89/index.htm>
- [GRAF 2005] M. Graf, R. Juriscka et al. 3D nonlinear modeling of microhotplates in CMOS technology for use as metal-oxidebased sensors. Journal of Micromechanics and Microengineering, vol.15, pp.190-200, 2005.
- [GREGORI 2006] G. Gregori, D.R. Clarke. The interrelation between adhesion, contact creep, and roughness on the life of gold contacts in radio-frequency microswitches. J. Appl. Phys. 100, 2006.
- [GUPTA 1997] R. K. Gupta. Electrostatic pull-in test structure design for in-situ mechanical property measurement of microelectromechanical systems (MEMS). Th.: Massachusetts Institute of Technology, 68p. 1997.
- [HAGERHORST-TREWHELLA 1989] J. Hagerhorst-Trehwella, J.D. Gelorme, B. Fan et al. Polymeric optical waveguides. Integrated optics and Optoelectronics, Proc. SPIE, vol.1777, pp.379-386, 1989.
- [HALUZAN 2008] D.T. Haluzan et al. Stiction issues and actuation of RF LIGA-MEMS variable capacitors. Journal of Microsystem Technologies, 6 p. 2008.
- [HECTOR 1999] J. Héctor De Los Santos, Introduction to electromechanical microwave systems, Artech House, 215p, 1999.

- [HILL 2007] G.C. Hill, R. Melamud, et al. SU-8 MEMS Fabry-Perot pressure sensor. *Sensors and Actuators A : Physical*, vol.138(1), pp.52-62, 2007.
- [HOHLFELD 2003] D. Hohlfeld, H. Zappe. All-dielectric tunable optical filter based on the thermo-optic effect. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, vol.6(6), pp.504-511, 2003.
- [HONG 2006] B. Hong et al. Using MEMS-based storage in computer systems - device modeling and management. *ACM Transactions on Storage*, vol.2(2), pp.139-160, 2006.
- [HORMES 2003] J. Hormes, J. Gottert et al. Materials for LiGA and LiGA-based microsystems. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol.199, pp.332-341. 2003.
- [HORNY 2002] N. Horny. Applications des techniques inverses à la caractérisation thermo-physique de dépôts minces ; relations avec les contraintes mécaniques et d'adhérence. Th. Université Reims. 195p. 2002.
- [HOWE 1986] R.T. Howe, R.S. Muller. Resonant microbridge vapor sensor. *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.33, pp.499-506, 1986.
- [HP-net] <http://www.hp.com/oeminkjet/evaluate/index.htm>
- [HYMAN 1999] D. Hyman. Contact Physics of Gold Microcontacts for MEMS Switches. *IEEE transactions on components and packaging technologies*, Vol.22, No.3, pp.357-364, 1999.
- [IADICOLA 2002] M. A. Iadicola, and J. A. Shaw. The effect of uniaxial cyclic deformation on the evolution of phase transformation fronts in pseudoelastic NiTi wire. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol.13(2-3), pp.143-155, 2002.
- [IVIRA 2008] B. Ivira, R.-Y. Fillit, *et al.* Self-heating study of bulk acoustic wave resonators under high RF power. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, IEEE Transactions on Volume 55, Issue 1, January, pp.139-147, 2008.
- [IVIRA 2006a] B. Ivira. Fiabilité des résonateurs acoustiques de type BAW pour les applications dans le secteur des télécommunications. Thèse de l'Ecole Doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatismes et Traitement du Signal de Grenoble INP, 2006.
- [IVIRA 2006b] B. Ivira, R.Y. Fillit, Ph. Benechl, F. Ndagijimanal G. Parat and P. Ancey. BAW resonators reliability in the GHz range. *IEEE*, pp.3133-3136, 2006.
- [JANG 2007] J. Jang, S. T. Wereley. Gaseous slip flow analysis of a micromachined flow sensor for ultra small flow applications. *J. Micromech. Microeng.*, vol.17(2), pp.229-237, 2007.
- [JENSEN 2003] B.D. Jensen. Simultaneous electrical and thermal modeling of a contact-type RF-MEMS Switch. *Proceedings of IMECE'03*, Washington, D.C., 2003.
- [JENSEN 2004] B.D. Jensen, K.Huang, L.L.-W. Chow. Asperity heating for repair of metal contact RF MEMS switches. in *Proc. 2004 IEEE MTT-S international Microwave Symposium Digest*, vol. 3, pp.1939-1942, 2004.
- [JENSEN 2005a] B.D. Jensen, K. Huang, L.L.-W. Chow, K. Kurabayashi. Adhesion effects on contact opening dynamics in micromachined switches. *J. Appl. Phys.* 97, 2005.

- [JENSEN 2005b] B.D. Jensen, L.L.-W. Chow, K. Huang, K. Saitou. Effect of Nanoscale Heating on Electrical Transport in RF MEMS Switch Contacts. *Journal of Microelectromechanical Systems*, Oct. 2005 IEEE, vol. 14, No 5, pp.935-946, 2005.
- [JIANG 2006] L. Jiang, R. Cheun et al. SiC cantilever resonators with electrothermal actuation. *Sensors and Actuators A: Physical*, pp.376-386, 2006.
- [JOSEPH 1997] H. Joseph et al. MEMS in the medical world. *Sensors Magazine*, pp.47-51, April 1997. <http://archives.sensorsmag.com/articles/0497/medical/index.htm>
- [KAPELS 2000] H. Kapels, R. Aigner, J. Binder. Fracture Strength and Fatigue of Polysilicon Determined by a Novel Thermal Actuator, *Proc. IEEE Transactions on Electron Devices* vol.47, pp.1522-1528, 2000.
- [KELLER 1994] C. Keller, M. Ferrari. Milli-scale polysilicon structures. *Solid State Sensor and Actuator Workshop Technical Digest*, Hilton Head Island, USA, pp.132-137, 1994.
- [KELLER 1998] C.G. Keller. Microfabricated silicon high aspect ratio flexures for in plane motion. Ph.D. Thesis, Dept. of Materials Science and Mineral Engineering, Univ. of Calif. at Berkeley, 1998.
- [KELLER 2007] R.R. Keller, R.H. Geiss, N. Barbosa, A.J. Slifka, D.T. Read. Strain-Induced Grain Growth during Rapid Thermal Cycling of Aluminum Interconnects. *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol.38, n°13, pp.2263-2272, 2007.
- [KLAASSEN 1995] E. H. Klaassen, K. Petersen et al. Silicon fusion bonding and deep reactive ion etching; a new technology for microstructures. *Proc. Int. Solid State Sensors and Actuators Conf.*, pp.556-559, 1995.
- [KOCK 2009] H. Köck, V. Košel et al. IR thermography and FEM simulation analysis of on-chip temperature during thermal-cycling power-metal reliability testing using in situ heated structures. *Microelectronics Reliability*, vol. 49, pp.1132-1136, 2009.
- [KOVACS 1998] G. T. A. Kovacs, N. I. Maluf, K. E. Petersen. Bulk Micromachining of Silicon. *Proceedings of the IEEE*, vol.86(8), pp.1536-1551, 1998.
- [KUPKA 2000] R. K. Kupka, F. Bouamrane, C. Cremers, S. Megtert. Microfabrication: LIGA-X and applications. *Applied Surface Science*, vol.164(1-4), pp.97-110, 2000.
- [KWON 2007] H. Kwon, D.J. Choi et al. Contact materials and reliability for high power RF MEMS switches. *Proc. 20th IEEE MEMS 2007*, pp.231-234, 2007.
- [LAFONTAN 2001] X. Lafontan. Application des micro-technologies aux composants de commutation électrique : études et performances de micro-relais. Th. Université de Montpellier II, 203p, 2001.
- [LAFONTAN 2002] X. Lafontan, C. Le Touze et al. Environmental test bench for reliability studies: Influence of the temperature on RF switches with metallic membranes. *SPIE proceedings series*. Bellingham, WA, International, vol.4755, pp.624-633, 2002.
- [LAG-net] <http://www.lagunage.eu>

- [LAKIN 2000] K.M. Lakin, K.T. McCarron, J.F. McDonald. Temperature compensated bulk acoustic thin film resonators. *Ultra. Sym.*, pp.855-858, 2000.
- [LALL 1996] P. Lall. Tutorial: Temperature as an Input to Microelectronics, Reliability Models. *IEEE Transaction on reliability*, vol.45(1), 1996.
- [LARSON 2000] J.D. Larson *et al.* Power handling and temperature coefficient studies in FBAR duplexers for the 1900 MHz PCS Band. *Ultrasonics Symposium IEEE*, vol.1, pp.869-874, 2000.
- [LAU 2005] S. Lau *et al.* Avoiding MEMS failures. *IEE Electronics Systems and Software*, vol.3(5), pp.22-25, 2005.
- [LEFÈVRE 2006] S. Lefèvre, S. Volz. Nanoscale heat transfer at contact between a hot tip and a substrate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.49(1-2), pp.251-258, 2006.
- [LELEU] R. Leleu, Transferts de chaleur, *Techniques de l'ingénieur*, J1080.
- [LENS 2004] A. Lens. Mobilité des joints de grains dans les alliages Al-Mn et Al-Fe-Si : mesures expérimentales et analyses théoriques. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne. 2004.
- [LI 2003] J. Li, Q. X. Zhang, A. Q. Liu. Advanced fiber optical switches using deep RIE (DRIE) fabrication, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.102(3), pp.286-295, 2003.
- [LI 2008] Y. Li, Z. Jiang. An Overview of Reliability and Failure Mode Analysis of Microelectromechanical Systems (MEMS). *Handbook of Performability Engineering*, Springer London, 953-966, 2008.
- [LIU 2001] Q. Liu, Q.-A. Huang. Micromachined variable capacitors with laterally positioned suspended plates. *Micromachining and microfabrication Process Technology and Devices*, *Proceedings of SPIE*, vol. 4601, 2001.
- [LOUCHE 1999] H. Louche. Analyse par thermographie infrarouge des effets dissipatifs de la localisation dans les aciers. These, Université de Montpellier, 1999.
- [LOUCHE 2001] H. Louche and A. Chrysochoos. Thermal and dissipative effects accompanying LÄuders bands propagation. *Mater. Sci. Eng. A.*, vol.307, pp.15-22, 2001.
- [LOUCHE 2005] H. Louche, P. Vacherand et R. Arrieux. Thermal observations associated with the Portevin Le Chätelier effect in an Al-Mg alloy. *Materials Science and Engineering: A*, vol.404(1-2), pp.188-196, 2005.
- [LOUKIL 2008] R. Loukil. Le AIS326DQ de STMicroelectronics - Accéléromètre MEMS pour applications automobiles et industrielles, *Industrie et Technologies*, 2008. <http://www.industrie.com/it/electronique/accelerometre-mems-pour-applications-automobiles-et-industrielles.7537>
- [LUCYSZYN 2004] S. Lucyszyn. Review of radio frequency microelectromechanical systems technology. *IEEE Proceedings of Science, Measurement and Technology*, vol.151(2), pp.93-103, 2004.



- [MABOUDIEN 1997] R. Maboudian, R.T. Howe. Critical Review: Adhesion in surface micromechanical structures. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*. vol.15(1), pp.1-20, 1997.
- [MADOU 2002] M. J. Madou. *Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization*. 2nd édition CRC Press, 608p, 2002.
- [MAJUMDER 2005] S. Majumder, N.E. McGruer, G.G. Adams. Adhesion and contact resistance in an electrostatic MEMS microswitch. *Proc. 18th IEEE MEMS 2005*, pp.215-218, 2005.
- [MARDALHON 2003] M. Mardalhon. *Contribution à l'analyse de la fiabilité de microsystèmes*. Th. Université Montpellier II, 210p, 2003.
- [MASTRANGELO 1997] C.H. Mastrangelo. Adhesion-related failure mechanisms in micromechanical devices. *Tribology Letters*, vol.3(3), pp.223-238, 1997.
- [MATMAT 2009] M. Matmat, F. Coccetti et al. Capacitive RF MEMS analytical predictive reliability and lifetime characterization. *Microelectronics Reliability*, vol.49(9-11), pp. 1304-1308, 2009.
- [MAYYAS 2009] M. Mayyas, P. S. Shiakolas et al. Thermal cycle modeling of electrothermal microactuators. *Sensors and Actuators A: Physical*, pp.192-202. 2009.
- [MC CLUSKEY 1999] F.P. McCluskey, M. Pecht. Rapid reliability assessment using CADMAP-II. *proceedings of Modeling and Simulation of Micosystems*, San Juan, USA, 1999. <http://www.cr.org>.
- [MCGRUER 2006] N.E. McGruer, G.G. Adams, L. Chen, Z.J. Guao, Y. Du. Mechanical, thermal, and material influences on ohmic contact type MEMS switch operatio. *Proc. 19th IEEE MEMS 2006*, pp. 230-233, 2006.
- [MCNIE 2000] M. McNie, D. King, C. Vizard, A. Holmes, K. W. Lee. High aspect ratio micromachining (HARM) technologies for microinertial devices. *Microsystem Technologies*, vol.6(5), pp.184-188, 2000.
- [MEHDAOUI 2007a] A. Mehdaoui. *Capacités variables et inductances MEMS RF pour une intégration « ABOVE-IC »*. Thèse de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 175p. 2007.
- [MEHDAOUI 2007b] A. Mehdaoui, C. Fillit, D. Tsamados et al. Co-integration of Highly-Tunable MEMS capacitor and High-Quality Factor AlSi inductors. *8th International Symposium on RF-MEMS and RF-Microsystems*. Barcelona. pp.9-13. June 26-29, 2007.
- [MELCHERS 1987] R. E. Melchers, *Structural Reliability Analysis and Prediction*. Ellis Horwood Limited, England, 1987.
- [MELLE 2007] S. Melle et al. Investigation of stiction effect in electrostatic actuated RF MEMS devices. *Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems*, Toulouse, pp.173-176, 2007
- [MILLET 2003] O. Millet. *Vers une compréhension des mécanismes de défaillance des dispositifs microsystèmes*, Th. Université des sciences et technologies de Lille, 2003.

- [MIR 1999] S. Mir, B. Charlot, B. Courtois. Extending Fault-based Testing to Microelectromechanical Systems, IEEE, pp.64-68, 1999.
- [MIR 2002] S. Mir, B. Charlot. From Microelectronics to Integrated Microsystems Testing. Revue des systèmes, vol.2(1-2), pp.249-270, 2002.
- [MUHLSTEIN 2000] C.L. Muhlstein, S.B. Brown, R.O. Ritchie. High-Cycle Fatigue of Polycrystalline Silicon Thin Films in Laboratory Air, MRS Symposium Proc. 657, EE5.8.1-EE5.8.6, 2000.
- [MURATET 2005] S. Muratet. Conception, caractérisation et modélisation : Fiabilité prédictive de MEMS à actionnement électrothermique. Th. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 157p, 2005.
- [NATHANSON 1967] H. Nathanson et al. The Resonant Gate Transistor. IEEE Transactions on Electron Devices, vol.14(3), pp.117-133, 1967.
- [NEELS 2009] A. Neels, G. Bourban et al. Aging of MEMS - Correlation of Mechanical and Structural Properties. Proceedings of the Eurosensors XXIII conference, Procedia Chemistry 1, pp.820-823, 2009.
- [NGUYEN 1998] C. T.-C. Nguyen. Micromachined devices for wireless communications. Proceeding of IEEE, vol.86(8), pp.24-38, 1998.
- [NGUYEN 2009] H.-N. Nguyen. Technique alternative de test pour les interrupteurs MEMS RF, Th. INPG Grenoble, 145p, 2009.
- [NIEMINEN 2004] H. Nieminen, V. Ermolov et al. Design of a temperature-stable RF MEMS capacitor. IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, vol.13, No.5, pp.705-714. October 2004.
- [PAJANI 2001a] D. Pajani. Thermographie - Principes et mesures. Techniques de l'Ingénieur, RC3, R2740, 16p. 2001.
- [PAJANI 2001b] D. Pajani, L. Audaire. Thermographie : Technologies et applications. Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle, R2741, 29p. 2001.
- [PAPINI 1994] F. Papini, P. Gallet. Thermographie infrarouge : Image et mesure. Mesures physiques. Masson, 1994.
- [PERREGAUX 2001] G. Perregaux, S. Gonseth et al. Arrays of addressable high-speed optical microshutters. Proc. MEMS 2001, pp.232-235, 2001.
- [PEYROU 2006] D. Peyrou. Etude théorique et expérimentale des techniques d'assemblage et de mise en boîtier pour l'intégration de Microsystèmes RF. Th. Université Toulouse III, 249p. 2006.
- [PIECZYSKA 2004] E.A. Pieczyska, S.P. Gadaja and W.K. Nowackia. Thermomechanical investigation of martensite and reverse transformation in TiNi shape memory alloy. In Bulletin of the polish academy of technical sciences, vol.52-(3), pp.165-171, 2004

- [POGANY 2002] D. Pogany, S. Bychikhin et al. Extraction of spatio-temporal distribution of power dissipation in semiconductor devices using nanosecond interferometric mapping technique. *Appl. Phys. Lett*, vol.81(15), pp.2881-2883, 2002.
- [POGANY 2003] D. Pogany, V. Dubec et al. Single-shot thermal energy mapping of semiconductor devices with the nanosecond resolution using holographic interferometry. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, vol.23(10), pp.606-608, 2003.
- [POLYMTL-net] <http://www.polymtl.ca/mems/>
- [RANIERI 2009] V. Ranieri. Amélioration des performances du quartz par substitution de germanium au silicium dans le réseau cristallin. Thèse de l'Université Montpellier II. 160p, 2009.
- [REID 2002] J. R. Reid. Capacitive switch reliability issues. *Government Microelectronics Application Conference Digest (GOMAC'02)*, Monterey, pp. 4. 2002.
- [REID 2003] J. R. Reid, L. A. Starman. RF MEMS: switches, variable capacitors, and circuits. *IEEE course notes, AFRL/SNHA, Hanscom AFB, MA.* 2003.
- [REMBE 2001] C. Rembe, R. Kant and R. S. Muller. Optical Measurement Methods to Study Dynamic Behavior in MEMS. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol.4400, pp.127-137, 2001.
- [RIBEIRO 2005] J.C. Ribeiro, G. Minas et al. A SU-8 fluidic microsystem for biological fluids analysis. *Sensors and Actuators A : Physical*, vol.123-124, pp.77-81, 2005.
- [ROSSI 2002] C. Rossi. Micropropulsion for Space. *Sensors Update*, vol.10, pp.257-292, 2002.
- [ROTTENBERG 2005] X. Rottenberg, K. Brebels *et al.* MEMS capacitive series switches : optimal test vehicles for the RF self-biasing phenomenon. *The 18<sup>th</sup> IEEE Int. Conf. MEMS 2005*, pp.147-150, 2005.
- [RUNCIMAN] H. Runciman. Éléments de conception optique. *Techniques de l'Ingénieur, traité Électronique*, E4040, 18p. 1995.
- [SANDIA-net] <http://www.mems.sandia.gov/tech-info/mems-bib-general.html>
- [SASTRY 2009] D. V. K. Sastry. Radio Frequency Microelectromechanical Systems in Defence and Aerospace Defence, *Science Journal*, vol.59(6), pp.568-579, November 2009.
- [SCHLOSSER 2007] P. Schlosser, H. Louche, D. Favier and L.Orgeas. Image processing to estimate the heat sources related to phase transformations during tensile tests of NiTi tubes. *Strain*, vol.43, pp.260-271, 2007.
- [SEIDEMANN 2003] V. Seidemann, J. Edler et al. Linear variable reluctance (VR) micro motor with horizontal flux guidance: concept, simulation, fabrication and test *Transducers. International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 12th*, vol.2, pp.1415-1418, 2003.
- [SHAW 1997] J. Shaw and S. Kyriakides. On the nucleation and propagation of phase transformation fronts in a NiTi alloy. *Acta Mater*, vol.45, pp.683-700, 1997.

- [STARK 1999] B. Stark. MEMS Reliability Assurance Guidelines for Space Applications. National Aeronautics and Space Administration (NASA) and Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California Institute of Technology, 1999.
- [STRASSER 2002] M. Strasser, R. Aigner et al. Miniaturized thermoelectric generators based on poly-Si and poly-SiGe surface micromachining. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.97, pp.535-542, 2002.
- [STM-net 2009] STMicroelectronics annonce une nouvelle famille de gyroscopes MEMS mono et bi-axiaux. Geneva, 08 juin 2009.  
<http://www.st.com/stonline/stappl/cms/press/news/year2009/fra/p2387.htm>
- [TANNER 1997] D. M. Tanner, N. F. Smith, D. J. Bowman, W. P. Eaton, and K. A. Peterson, First Reliability Test of a Surface Micromachined Microengine Using SHiMMeR Proceedings of SPIE, vol.3224, pp.14-23, 1997.
- [TECHNO-net] <http://www.techno-science.net/forum/viewtopic.php?t=8922>
- [THALHAMMER 2005] R. Thalhammer and R. Aigner. Energy loss mechanisms in SMR-type BAW devices. *Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International*, pp.4, 2005.
- [TI-net] <http://www.dlp.com>
- [TILMAN 2002] I.C. Tilmans. MEMS components for wireless communications. 16th European conference on solid-state transducers. Sept. 15-18 2002.
- [TRAUTMANN 2006] A. Trautmann. Detachable silicon microneedle stamps for allergy skin prick testing. 19th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems 2006 (MEMS'06), Istanbul, pp.434-437, 2006.
- [VAN SPENGEN 2003] W. M. van Spengen. MEMS reliability from a failure mechanisms perspective. *Microelectronics Reliability*, vol.43, pp.1049-1060, 2003.
- [WALRAVEN 2003] J. A. Walraven. Failure Mechanisms in MEMS. ITC International test Conference, pp.828-833, 2003.
- [WALRAVEN 2005] J.A. Walraven. Failure Analysis Issues in Microelectromechanical Systems (MEMS). *Microelectronics Reliability*, vol.45, pp. 1750-1757, 2005.
- [WANG 2003] Y. Wang, Z. Li, D.T. McCormick. A micromachined RF microrelay with electrothermal actuation. *Sensors and Actuators A*, vol. 103, pp.231-236, 2003.
- [WEISS 2005] P. Weiss. MEMS & MOEMS reliability: wafer-level packaging and low temperature processing issues. *Proceedings of IEEE/LEOS Workshop on Fibres and Optical Passive Components*, pp.75-86, 2005.
- [WILSON 2001] J. Wilson, R. Bashirullah *et al.* Design of rotating MEMS tunable capacitors for use at RF and Microwave frequencies. *Design, Characterization and Packaging for MEMS and Microelectronics II. Proceedings of SPIE*, vol.4593, 2001.

[WTC-net] Wicht Technologie Consulting. RF MEMS market II 2005-2009. Your Experts in Microtechnology & Electronics, 2005. <http://www.wtc-consult.com/cms/cms/upload/PDF/rfmems2005.pdf>

[YAN 2003] X. Yan, N. E. McGruer *et al.* Finit element analysis of the thermal characteristics of MEMS switches. The 12<sup>th</sup> International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, Boston. Proceeding IEEE Transducers 03, pp.412-415, 2003.

[ZHANG 2002] R. Zhang, Y. Gu *et al.* Thermal measurement and analysis of micro hotplate array using thermography. Sensors & Actuators A: Physical, vol.100(2-3), pp.144-152, 2002.

[ZHU 2004] Y.Zhu, H. D. Espinosa. Effect of temperature on capacitive RF MEMS switch performance coupled-field analysis. J. Micromech. Microeng., vol.14, pp.1270-1279, 2004.





# ANNEXE 1

## **CARACTERISTIQUES CONSTRUCTEUR DE LA CAMERA SC6000 SH FLIR**





## ANNEXE 2

# **CARACTERISTIQUES CONSTRUCTEUR DE LA CAMERA AGEMA THERMOVISION 900**



## ANNEXE 3

# **CARACTERISTIQUES CONSTRUCTEUR DE LA CAMERA MERLIN MID FLIR**



## ANNEXE 4

# FONCTIONS MATLAB



#### – Calcul des coordonnées réduites

```
function R=PR03ExitanceCoorRed(l1,l2,T)
% l1 et l2 sont les bornes spectrales en m du domaine infrarouge observé
% T est la température de l'objet en °C

xa=l1*1E6*(T+273.15)/2898;
xb=l2*1E6*(T+273.15)/2898;
Za=efabry(xa);
Zb=efabry(xb);
R=5.67E-8*(T+273.15)^4*(Zb-Za);
```

#### – Calcul des coordonnées de fabry à partir des coordonnées réduites

```
function res=efabry(x)
res= quadl(@efun,1E-9,x)./ quadl(@efun,1E-9,5E2);
```

#### – Calcul de l'émissivité

```
% PR03EmissiviteT900
```

```
vtambiant(1)= input('t°C ambiante donnée par caméra : ');
vtbody(1)= input('t°C objet chaud donnée par caméra : ');
Tobjambiant= input('t°C réelle de référence (TC) : ');
Tobjchaud= input('t°C chaude réelle de référence (TC) : ');
% !!!Attention T en Celcius
d=length(vtambiant);
F=zeros(d,1);
for i=1:d
    F(i) = (PR03ExitanceCoorRed (2E-6,5E-6,vtbody(i)) - PR03ExitanceCoorRed (2E-6,5E-6,vtambiant(i))) / (PR03ExitanceCoorRed (2E-6,5E-6,Tobjchaud) - PR03ExitanceCoorRed (2E-6,5E-6, Tobjambiant));
end

E = mean(F)
```









N° d'ordre : .....

**Chrystelle FILLIT**

**DEVELOPMENT OF A HIGH RESOLUTION INFRARED THERMOGRAPHY  
BENCH FOR THE DIAGNOSTIC OF MEMS RELIABILITY**

Speciality : Material of Science

Keywords : Infrared thermography, high resolution, thermal distribution, emissivity, RF-MEMS, reliability, thermal behaviors.

Abstract :

Over the last few years, considerable effort has gone into the study of the failure mechanisms and reliability of MicroElectroMechanical Systems (MEMS). MEMS performance and reliability are affected by many parameters, such as the complex physical interactions between thermo-mechanical deformation, current flow, high power actuation and contact heating. In particular, temperature is a key issue for the design of a low loss and reliable MEMS. In order to improve device reliability it is essential to understand the thermal behaviours of RF-MEMS under standard or harsh current conditions.

In this work, we present a new approach to investigate the failure mechanism of MEMS. An original set-up has been developed to localise and measure the heat loss of MEMS during actuation. Thermal characterization has been performed using infrared thermography to investigate the thermal sensitivity of MEMS. A brand new infrared bench was developed for temperature distribution measurement. An infrared camera, operating in the 1,5 - 5  $\mu\text{m}$  bandwidth, was coupled to a new specific optic to reach an enhanced spatial resolution better than 2  $\mu\text{m}$ /pixel. This work presents several results obtained on different advanced RF-MEMS including RF-MEMS switches where failure mechanism had been diagnosed.

École Nationale Supérieure des Mines  
de Saint-Étienne

N° d'ordre : .....

**Chrystelle FILLIT**

**DEVELOPPEMENT D'UN BANC DE THERMOGRAPHIE INFRAROUGE  
POUR L'ANALYSE IN-SITU DE LA FIABILITE DES MICROSYSTEMES**

Spécialité: Science des matériaux

Mots clefs : thermographie infrarouge, haute résolution, distribution thermique, émissivité, MEMS-RF, fiabilité, comportement thermique

Résumé :

Au cours des dernières années, l'essor spectaculaire des microsystemes (ou MEMS), qui touche tous les domaines industriels, est à l'origine de nombreux et nouveaux progrès technologiques. Néanmoins, dans ce contexte prometteur de large envergure, la fiabilité des MEMS s'avère être la problématique à améliorer pour franchir la phase d'industrialisation à grande échelle. C'est dans le cadre de cette thématique de fiabilité des microsystemes, que s'inscrit ce travail.

La température étant un paramètre majeur entrant dans de nombreux mécanismes d'endommagement des MEMS, notre étude présente la conception et la réalisation d'un banc de thermographie infrarouge de haute résolution (2  $\mu\text{m}$ ), associé à la mise en œuvre d'une méthodologie d'analyse et de traitement des mesures infrarouges.

Ce dispositif innovant permet un diagnostic in-situ, sans contact et rapide des défaillances des MEMS par mesures locales et quantitatives des pertes thermiques associées. Cet outil constitue une avancée importante pour détecter, mesurer et comprendre les mécanismes d'endommagement des MEMS. Il nous permet de reconstituer des images thermiques de tout type de microsysteme en cours de fonctionnement ou soumis à des tests de vieillissement accéléré, et ceci afin de réaliser une analyse fine et rapide de leur fiabilité.

Ce travail apporte de nouveaux résultats en ce qui concerne la détection des mécanismes de défaillance de différents types de MEMS-RF et tout particulièrement des MEMS-RF avec contact électrique.