

UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE  
UFR INFORMATIQUE – ELECTRONIQUE – ELECTROTECHNIQUE – AUTOMATIQUE

THESE

Présentée à



L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE  
Spécialité : Micro-ondes et Micro-technologies

Par

Mehdi HAFAR

**ETUDE ET REALISATION DE MATRICES DE  
MICROCAPTEURS INFRAROUGES EN TECHNOLOGIE  
SILICIUM POUR IMAGERIE BASSE RESOLUTION**

Soutenue le 29 novembre 2007 devant la commission d'Examen

**Membres du jury :**

**Président :**

**Rapporteurs :**

**Directeurs de thèse :**

**Examineurs :**

M. T. LASRI

M. E. GAVIOT

M. J.Y. FOURNIOLS

M. D. LECLERCQ

Mme P. GODTS

Mme V. MANCIER

M. H. MEZDOUR

M. K. ZIOUCHE

IEMN – USTL

Université du Maine – Le Mans

INSA / LAAS Toulouse

IEMN – USTL

IEMN – USTL

Université de Reims

Chef d'entreprise PHOREXY

IEMN – USTL



A ma famille,  
A Julie qui m'a toujours soutenu.



## Remerciements

Ce travail a été effectué à l'Université des Sciences et Technologies de Lille I, au Département Hyperfréquences et Semiconducteurs (DHS) de l'Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN) dirigé par Monsieur A. CAPPY.

Monsieur le Professeur T. LASRI, Directeur des Etudes Doctorales et Professeur à l'USTL, me fait l'honneur de présider mon jury d'examen et de juger l'ensemble de mon travail, qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je remercie Monsieur E. GAVIOT, Professeur à l'Université du Maine, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de juger mon travail.

Je tiens à remercier Monsieur J-Y. FOURNIOLS, Professeur à l'INSA de Toulouse, pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux en qualité de rapporteur.

J'adresse mes remerciements à Madame P. GODTS, Chargée de recherche au CNRS, pour sa disponibilité, ses discussions fructueuses et ses nombreux conseils tout au long de mon travail de thèse, ainsi que sa bonne humeur.

J'exprime toute ma gratitude envers Monsieur le Professeur D. LECLERCQ qui a dirigé ce travail, pour la qualité de son encadrement, sa disponibilité et sa compétence scientifique rigoureuse qui m'ont permis de mener à bien cette étude, ainsi que pour ses qualités humaines.

Je tiens particulièrement à remercier Monsieur K. ZIOUCHE, Maître de Conférence à l'USTL, pour son aide et ses précieux conseils lors de la partie technologique des microcapteurs sans lesquels ils n'auraient pas pu être réalisés, ainsi que pour son amitié.

Mes remerciements vont également à Madame V. MANCIER, Maître de Conférence à l'Université de Reims, pour avoir accepté de participer à ce jury de thèse.

Monsieur H. MEZDOUR, Chef d'entreprise PHOREXY, a accepté de participer à ce jury, je lui en suis reconnaissant.

Ce travail n'aurait pas été possible sans l'aide et la disponibilité du personnel de la centrale de technologie. Je remercie Mesdames C. LEGRAND, P. LEFEBVRE, A.FATTORINI et Messieurs A. LEROY, T. GEHIN, P. TILMANT, C. BOYAVAL.

Je tiens à remercier également Monsieur R. RINGOT, pour son aide et ses conseils lors des gravure STS-ICP et Monsieur B. VERBEKE pour sa disponibilité lors de nombreuses soudures et sa bonne humeur quotidienne, ainsi que les membres de l'équipe CARNOT : R.JOORIS et L. MATTHEWS.

Je remercie toute les personnes que j'ai côtoyées à l'IEMN et plus particulièrement, les doctorants : Romain, Mikael, Anthony, Oussama, Salim, Kamel, Nicolas V., Nicolas D., Jean-Claude, Marie, Elisabeth, Michelle, Vianney, François, Cyrille, Thomas et tous les autres pour leur sympathie tout au long de l'année.



## TABLE DES MATIERES





# Table des matières

Liste des symboles .....	3
Introduction générale .....	7
<b>Chapitre I : Etat de l'art des dispositifs de vision infrarouge.....</b>	<b>9</b>
1 Introduction.....	11
2 Les capteurs unitaires.....	11
2.1 Les capteurs pyroélectriques.....	11
2.2 Les microcapteurs thermoélectriques.....	13
3 Les capteurs imageants.....	16
3.1 Les matrices microbolométriques.....	16
3.2 Les réseaux de microcapteurs thermoélectriques.....	19
3.3 Les caméras à capteurs pyroélectriques.....	21
3.4 Les matrices de microcantilevers.....	22
4 Conclusion.....	24
Bibliographie du chapitre I.....	29
<b>Chapitre II : Modélisation des microcapteurs de rayonnement infrarouge.....</b>	<b>33</b>
1 Introduction.....	35
2 Microcapteur infrarouge multi-membranes 1 <sup>ère</sup> génération (2002-2005).....	35
2.1 Description et principe de fonctionnement du microcapteur.....	35
2.2 Réalisation de ces microcapteurs en technologie silicium.....	36
3 Structure des microcapteurs infrarouge mono-membrane de nouvelle génération .....	39
4 Choix des matériaux pour la thermopile.....	40
5 Principe de modélisation des microcapteurs IR.....	42
5.1 Hypothèses et simplifications du modèle .....	43
5.2 Détermination du profil de température le long de la membrane .....	46
6 Etude de différentes configurations de microcapteurs.....	53
6.1 Définitions des principales caractéristiques à optimiser.....	53
6.2 Etude d'un microcapteur comportant une seule zone absorbante.....	55
6.3 Etude d'un microcapteur à deux zones.....	58
6.4 Etude d'un microcapteur à trois zones.....	62
6.5 Etude d'un microcapteur à quatre zones.....	64
6.6 Etude d'un microcapteur à six zones .....	67
6.7 Conclusion .....	71
7 Nouvelle structure permettant d'optimiser la détectivité spécifique .....	73
7.1 Paramètres influents dans l'optimisation des microcapteurs.....	73
7.2 Nouvelle modélisation pour l'optimisation .....	75
7.2.1 Calcul de la conductivité thermique de la nouvelle couche équivalente .....	75
7.2.2 Résultats des simulations des microcapteurs optimisés.....	78
8 Conclusion.....	80
Bibliographie du chapitre II.....	83

### **Chapitre III : Réalisation technologique des microcapteurs infrarouges.....85**

1	Introduction.....	87
2	Les étapes technologiques .....	87
2.1	Nettoyage des substrats.....	87
2.2	Réalisation de la membrane et de la couche de polysilicium .....	88
2.3	Gravure des pistes de la thermopile.....	88
2.4	Métallisation de la sonde Platine (PT1000).....	91
2.5	Métallisation des thermoéléments et des plots d'accès en or .....	92
2.6	Dépôt de la partie absorbante.....	94
2.7	Réalisation de la partie réfléchissante.....	96
2.8	Micro-usinage du substrat par la face arrière.....	97
3	Réalisation des microcapteurs à détectivité spécifique améliorée.....	101
4	Conclusion .....	102
	Bibliographie du chapitre III.....	105

### **Chapitre IV : Réalisation technologique des microcapteurs infrarouges.....107**

1	Introduction.....	109
2	Banc de mesure .....	110
2.1	Détermination de la sensibilité à l'éclairement .....	111
2.2	Etude de l'influence de la température d'air.....	112
2.3	Détermination du coefficient d'influence lié à la vitesse d'air .....	112
3	Caractérisation des microcapteurs à pistes rectilignes.....	113
3.1	Sensibilité à l'éclairement.....	113
3.2	Influence de la température d'air .....	114
3.3	Coefficient d'influence lié à la vitesse d'air .....	115
3.4	Conclusion .....	115
4	Caractérisation des microcapteurs à détectivité spécifique améliorée.....	116
5	Conclusion sur les microcapteurs .....	117
6	Applications.....	118
6.1	Première application : la domotique .....	118
6.2	Seconde application : Mesure directe des échanges radiatifs entre surfaces .....	120
7	Perspectives : Etude d'un microcapteur sub-millimétrique .....	122
8	Conclusion .....	123
	Bibliographie du chapitre IV .....	126

	Conclusion générale.....	131
	Annexes .....	133
	Liste des figures et tableaux.....	147
	Glossaire .....	151

## LISTES DES SYMBOLES



**Symboles standards**

A	Surface irradiée	(cm <sup>2</sup> )
a	Absorptivité	
a <sub>abs</sub>	Absorptivité zone absorbante	
a <sub>ref</sub>	Absorptivité zone réfléchrice	
B	Coefficient	
C <sub>Ta</sub>	Coefficient de dépendance à la température d'air	(W/(m <sup>2</sup> .°C))
C <sub>u</sub>	Coefficient d'influence à la vitesse de déplacement d'air	(W.s/m <sup>3</sup> )
C <sub>Tsub</sub>	Coefficient de dépendance à la température du substrat	(μV/°C)
d	Distance cible-capteur	(cm)
D*	Détectivité spécifique	(m.Hz <sup>1/2</sup> .W <sup>-1</sup> )
e	Epaisseur	(Å)
e <sub>t</sub>	Epaisseur totale	(μm)
e <sub>n</sub>	Epaisseur de la couche n	(μm)
E	Eclairement énergétique	(W/m <sup>2</sup> )
F <sub>pp</sub>	Facteur de forme entre deux plaques parallèles	
F <sub>cp</sub>	Facteur de forme entre une plaque et le capteur	
h <sub>sup</sub>	Coefficient d'échange en face avant	(W/m <sup>2</sup> .K)
h <sub>inf</sub>	Coefficient d'échange en face arrière	(W/m <sup>2</sup> .K)
i	Largeur de l'interpiste	(μm)
I	Courant de polarisation	(A)
K <sub>ref</sub>	Echanges entre la membrane et le milieu extérieur dans la zone réfléchrice	
K <sub>abs</sub>	Echanges entre la membrane et le milieu extérieur dans la zone absorbante	
K' <sub>ref</sub>	Echanges entre la membrane et le milieu extérieur dans la zone réfléchrice lors de l'optimisation de D*	
K' <sub>abs</sub>	Echanges entre la membrane et le milieu extérieur dans la zone absorbante lors de l'optimisation de D*	
M	Emittance	(W/m <sup>2</sup> )
N	Nombre de thermocouples	
NETD	Noise Equivalent Temperature Dependence	(K)
Q	Charge électronique	(C)
p	Coefficient de pyroélectricité	(nC/cm <sup>2</sup> K)
p	Largeur de piste	(μm)
P <sub>1</sub>	Largeur de la piste du matériau 1	(μm)
P <sub>2</sub>	Largeur de la piste du matériau 2	(μm)
R <sub>el</sub>	Résistance électrique interne du microcapteur	(Ω)
S <sub>E</sub>	Sensibilité à l'éclairement	(μV/(W/m <sup>2</sup> ))
S <sub>surf</sub>	Surface du capteur	(m <sup>2</sup> )
T	Température	(°C)
T <sub>s</sub>	Température du microcapteur	(°C)
T <sub>a</sub>	Température de l'air	(°C)
T <sub>sub</sub>	Température du substrat	(°C)
T <sub>C</sub>	Température de la cible	(°C)
T <sub>c</sub>	Température de Curie	(°C)
T <sub>P</sub>	Température de la plaque supportant le capteur	(°C)
V	Tension électrique	(V)
Y <sub>tot</sub>	Conductance thermique totale	(W/°C)
Y <sub>eq</sub>	Conductance thermique équivalente	(W/°C)
Z	Facteur de mérite	(K <sup>-1</sup> )

**Symboles grecs**

$\alpha$	Pouvoir thermoélectrique	(V/°C)
$\alpha_1$	Pouvoir thermoélectrique du matériau 1	(V/°C)
$\alpha_2$	Pouvoir thermoélectrique du matériau 2	(V/°C)
$\Delta T$	Différence de température	(°C ou K)
$\Delta f$	Bande passante	(Hz)
$\Delta V$	Différence de f.e.m.	(V)
$\epsilon_i$	Emissivité de la surface i	
$\epsilon_{abs}$	Emissivité de la zone absorbante	
$\epsilon_{ref}$	Emissivité de la zone réfléchrice	
$\epsilon_C$	Emissivité de la cible	
$\epsilon_p$	Emissivité de la plaque support	
$\epsilon_S$	Emissivité du capteur	
$\epsilon_r$	Permittivité relative du matériau	
$\phi$	Densité de flux énergétique	(W/m <sup>2</sup> )
$\phi_{netR}$	Densité de flux radiatif	(W/m <sup>2</sup> )
$\Phi_{netR}$	Flux de rayonnement absorbé	(W/m)
$\Phi_{inf}$	Flux de convection sur la face inférieure	(W/m)
$\Phi_{sup}$	Flux de convection sur la face supérieure	(W/m)
$\gamma_{abs}$	Constante de propagation dans la zone absorbante	(m <sup>-2</sup> )
$\gamma_{ref}$	Constante de propagation dans la zone réfléchrice	(m <sup>-2</sup> )
$\gamma'_{abs}$	Constante de propagation dans la zone absorbante lors de l'optimisation de D*	(m <sup>-2</sup> )
$\gamma'_{ref}$	Constante de propagation dans la zone réfléchrice lors de l'optimisation de D*	(m <sup>-2</sup> )
$\lambda$	Conductivité thermique	(W/m.K)
$\lambda_{eq}$	Conductivité thermique équivalente	(W/m.K)
$\lambda'_{eq}$	Conductivité thermique équivalente lors de l'optimisation de D*	(W/m.K)
$\lambda_{eqabs}$	Conductivité thermique de la zone absorbante	(W/m.K)
$\lambda_{eqref}$	Conductivité thermique de la zone réfléchrice	(W/m.K)
$\lambda'_{eqabs}$	Conductivité thermique de la zone absorbante lors de l'optimisation de D*	(W/m.K)
$\lambda'_{eqref}$	Conductivité thermique de la zone réfléchrice lors de l'optimisation de D*	(W/m.K)
$\rho$	Résistivité électrique	(Ω.m)
$\rho_{Poly}$	Résistivité électrique du polysilicium	(Ω.m)

**Constantes**

k	Constante de Boltzmann	1,38.10 <sup>-23</sup> J/K
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	5,67.10 <sup>-8</sup> W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup>
$\lambda_{Si}$	Conductivité thermique du silicium comprise entre 120 et 140	(W/m.K)

## INTRODUCTION GENERALE

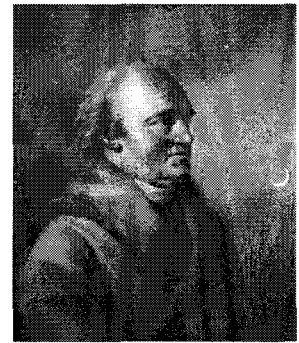




## Introduction générale

De nos jours, l'imagerie infrarouge trouve de plus en plus d'applications dans de nombreux domaines tels que l'astronomie, la climatologie, la sécurité des personnes et des biens, l'agroalimentaire, la médecine, l'industrie et même le sport.

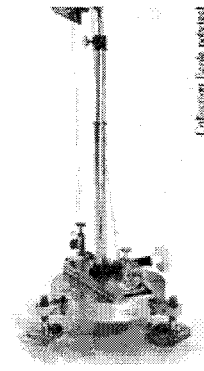
C'est en 1800 que William Herschel\* a découvert l'existence du rayonnement infrarouge à l'aide d'un thermomètre dont l'ampoule avait été noircie. En déplaçant ce thermomètre dans le spectre de rayonnement issu d'un prisme éclairé par le soleil il observa que l'élévation de température la plus forte était obtenue pour des couleurs situées en deçà du rouge (Infrarouge).



Portrait de William Herschel

En 1851 Macedonio Melloni \*\* a mis au point le premier capteur de rayonnement infrarouge « moderne ». Il s'agissait d'une thermopile composée de thermocouples bismuth-antimoine dont les soudures chaudes étaient disposées derrière un corps noir absorbant. L'appareil de mesure était un galvanomètre astatique extrêmement sensible, réalisé par Léopoldo Nobili \*\*\* directement connecté sur la thermopile. Ce dispositif de mesure est généralement connu sous le nom de « Thermomultiplicateur de Melloni ».

Depuis lors, des progrès importants ont été obtenus notamment en terme de sensibilité grâce aux microtechnologies, mais le principe utilisé pour réaliser des capteurs thermiques de rayonnement infrarouge n'a pas changé. Il consiste à mesurer la variation de température d'un corps absorbant éclairé par le rayonnement à mesurer. L'état de l'art concernant les capteurs IR imageants et non imageants constitue la première partie de ce travail.



Thermopile de Melloni

Le travail de recherche qui nous a été confié a été initié par une action régionale concertée (ARC) en ingénierie urbaine. L'axe dans lequel s'est impliquée notre équipe a pour titre : « Habitat, Qualité d'ambiance et Cadre de vie » et avait comme acteurs la région Nord - Pas-de-Calais, et des laboratoires régionaux LML, LAMH.

Notre action s'intitulait : « Etude et réalisation de réseaux de micro-capteurs thermoélectriques en technologie silicium destinés à introduire des fonctionnalités innovantes à faible coût dans l'habitat social. ». Elle était destinée à améliorer la qualité de vie dans l'habitat et plus particulièrement celle des personnes à mobilité réduite. L'objectif de cette étude décrite au chapitre IV était de mettre au point un système de détection de présence fiable afin de pouvoir, dans une phase ultérieure, automatiser certaines fonctions selon l'occupation des différentes pièces de l'habitat.

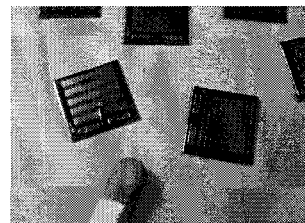
La détection de présence d'une personne n'est pas chose facile. Il faut pouvoir discriminer par exemple un animal domestique d'un enfant. C'est pourquoi l'analyse d'image IR basse résolution semble prometteuse mais, pour la mettre en oeuvre dans le grand public, il

est nécessaire de faire sauter le verrou technologique du coût des matrices imageantes classiques.

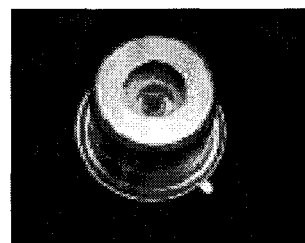
Une analyse des dispositifs de vision IR existant sur le marché montre qu'une part importante du coût de fabrication des matrices de microcapteurs IR est due au boîtier qui comporte une fenêtre transparente au rayonnement infrarouge et qui contient la plupart du temps un gaz rare permettant d'améliorer les performances du microcapteur encapsulé.

A l'IEMN, nous développons depuis quelques années des microcapteurs de rayonnement infrarouge dont l'originalité est qu'ils peuvent fonctionner à l'air libre, sans boîtier de protection. Ces capteurs réalisés sur membranes multiples ont été modélisés et optimisés lors de la Thèse de Doctorat de M. Boutchich en 2002. Cependant, leur fonctionnement nécessite pour des raisons de périodicité, la présence de plusieurs piliers de silicium par capteur. En conséquence ils sont difficilement miniaturisables ce qui est un frein pour la réalisation de matrices imageantes.

La question qui nous a alors été posée et qui constitue l'essentiel de ce travail était : « Est-il possible de réaliser des microcapteurs de rayonnement infrarouge sur membrane unique et ne nécessitant pas de boîtier de protection ? ». La réponse à cette question fait donc l'objet de ce mémoire.



*Capteur IEMN non encapsulé*



*Capteur classique encapsulé  
(Dexter)*

\* William Herschel (né Friedrich Wilhelm Herschel) est un compositeur et astronome germano-britannique, né à Hanovre le 15 novembre 1738 et décédé le 25 août 1822. Il découvre la planète Uranus en 1781 et l'existence du rayonnement infrarouge en 1800.

\*\* Macedonio Melloni (1798-1854), professeur de physique à l'université de Parme en 1824, se réfugie à Paris après la révolution en 1831. En 1839, il devient directeur du Conservatoire des arts et métiers de Naples et de l'Observatoire météorologique du Vésuve.

\*\*\* Léopoldo NOBILI, physicien italien (1787-1835), inventa le galvanomètre "astatique" qui permit d'obtenir des galvanomètres insensibles au champ magnétique terrestre. Il fut professeur de physique au Musée Royal de Physique et d'Histoire Naturelle de Florence.

# Chapitre I

## Etat de l'art des dispositifs de vision infrarouge

### Table des matières

1	Introduction.....	11
2	Les capteurs unitaires.....	11
2.1	Les capteurs pyroélectriques.....	11
2.2	Les microcapteurs thermoélectriques.....	13
3	Les capteurs imageants.....	16
3.1	Les matrices microbolométriques.....	16
3.2	Les réseaux de microcapteurs thermoélectriques.....	19
3.3	Les caméras à capteurs pyroélectriques.....	21
3.4	Les matrices de microcantilevers.....	22
4	Conclusion.....	24
	Bibliographie du chapitre I.....	29



## 1 Introduction

Les premiers capteurs infrarouges dits refroidis sont apparus dans les années 1950. Ils sont essentiellement de deux types : les photodétecteurs à puits quantiques à base de matériaux III-V (AlGaAs/GaAs) [1], [2], [3] et les photodiodes à base de HgCdTe [4], [5], [6]. L'avantage des photodétecteurs est leur temps de réponse court lors de l'exposition de rayonnement infrarouge et l'adaptation à la détection de longueurs d'ondes particulières. Il est possible d'ajuster la transition électronique d'une paire électron-trou avec le gap du semiconducteur. Malgré leur grande sensibilité, ces deux types de capteurs ont un inconvénient majeur : ils nécessitent d'être refroidis à 77 K pour les photodiodes et à moins de 50 K pour les photodétecteurs afin de limiter le courant d'obscurité qui perturbe le signal. Cela entraîne un encombrement important du système et augmente considérablement le coût de l'ensemble capteur-système de refroidissement. Ces détecteurs sont essentiellement utilisés dans le domaine militaire et l'aérospatial. C'est pour cette raison que de nombreuses recherches ont porté sur le développement des détecteurs infrarouges non-refroidis. Les coûts ont été considérablement réduits et le marché du détecteur infrarouge s'est développé, ce qui a permis désormais de réaliser et commercialiser des caméras infrarouges autour de 25000 euros. Les applications visées sont tournées vers l'imagerie infrarouge pour la surveillance, la détection de défauts par contraste infrarouge dans le bâtiment, dans le suivi des chaînes de montage où la température joue un rôle important.

Dans ce chapitre, seuls les différents types de capteurs infrarouges non-refroidis seront présentés : les capteurs utilisés individuellement et les capteurs associés en matrice.

## 2 Les capteurs unitaires

Dans le cadre de la détection infrarouge, deux types de capteurs sont couramment utilisés : les capteurs pyroélectriques et les microcapteurs thermoélectriques.

### 2.1 Les capteurs pyroélectriques

Le phénomène de la pyroélectricité est connu depuis longtemps et a été observé par Théophrastus en -315 [7]. En effet, il est le premier à avoir décrit une pierre, la tourmaline, ayant la propriété d'attirer des petits bouts de bois lorsqu'elle subit un changement de température [8]. Le principe de fonctionnement des capteurs pyroélectriques est basé sur le phénomène de polarisation électrique spontanée en fonction de la température et en absence de tout champ électrique, dans les cristaux démunis de centre de symétrie. Les matériaux couramment utilisés sont des oxydes de plomb [9], [10], [11] avec une structure cristalline pérovskite (cubique face centrée). C'est le cas des cristaux suivants : TGS, LiTaO<sub>3</sub>, BST, PST, PZT (tableau 1). La température de Curie de ces matériaux joue un rôle important. En effet, elle correspond à une phase de transition du matériau. Si la température ambiante est supérieure à la température de Curie du matériau, alors sa structure cristalline est centrosymétrique et paraélectrique donc non polaire. Dans le cas contraire, une distorsion apparaît, ce qui engendre un dipôle électrique élémentaire dans chaque cellule cristalline et la phase ferroélectrique apparaît.

Matériaux	$p$ (nC/cm <sup>2</sup> K)	$\epsilon_r$	$\tan \delta$	$T_c$ (°C)
TGS	35	30	0,01	50
LiTaO <sub>3</sub>	20	60	0,003	618
BST [12] (Ba <sub>0,67</sub> Sr <sub>0,33</sub> TiO <sub>3</sub> )	350	5000	0,01	17
PST [13] (Pb(Sc <sub>x</sub> Ta <sub>1-x</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	500	8000	0,01	25
PZT (Pb(ZrTi)O <sub>3</sub> )	31	12	0,01	300

Tableau 1 : Caractéristiques des matériaux pyroélectriques

Les matériaux pyroélectriques sont définis par  $p$  le coefficient de pyroélectricité,  $\epsilon_r$  la permittivité relative du matériau,  $\tan \delta$  la tangente de l'angle des pertes diélectrique et  $T_c$  la température de Curie. Le photocourant mesurée est de la forme :

$$I = p \cdot A \cdot \left( \frac{dT}{dt} \right) \tag{I.1}$$

- Avec  $I$  : le courant de polarisation (A)
- $p$  : le coefficient de pyroélectricité (C/cm<sup>2</sup>K)
- $A$  : la surface irradiée (cm<sup>2</sup>)
- $T$  : la température (K)
- $t$  : le temps (s)

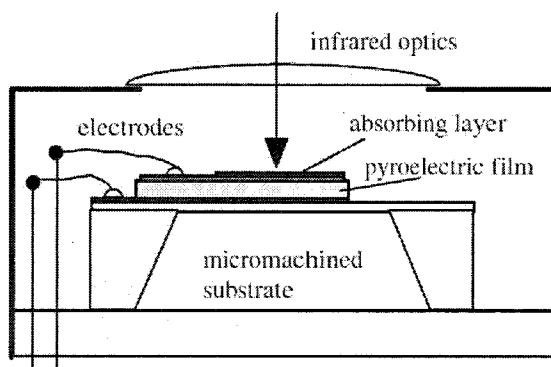


Figure 1 : Vue en coupe d'un capteur pyroélectrique

Lorsque le capteur (figure 1) est exposé au rayonnement issu d'une source chaude, des charges superficielles apparaissent sur les faces du matériau, ceci engendre un champ électrique interne qui déplace les charges mobiles jusqu'à la neutralisation des charges surfaciques. Cette variation de température permet d'obtenir un signal électrique important mais qui devient évanescant au cours du temps (figure 2). Ce capteur n'est donc efficace que lors de régimes thermiques transitoires. Il n'est alors possible de détecter que des objets ou personnes en mouvement à l'aide d'une lentille de Fresnel multi-zone. Grâce à cette lentille, le signal est renouvelé à chaque changement de zone par la source chaude. Mais, si elle n'est plus en mouvement, le signal est interrompu : ce qui représente un inconvénient majeur dans le cadre de la

vision infrarouge en continu. Pour détecter la présence de personnes immobiles, il est indispensable de lui associer un obturateur mécanique.

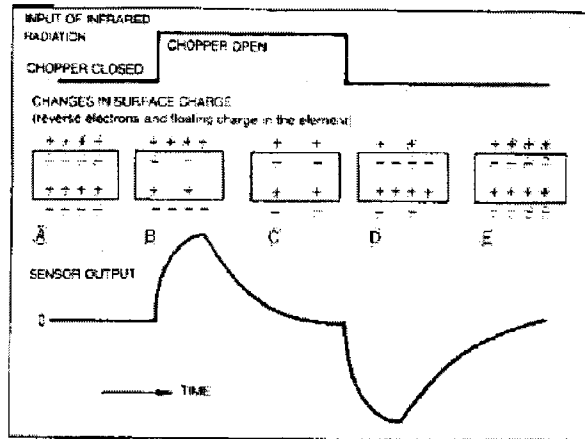


Figure 2 : Phénomène évanescent de la pyroélectricité

## 2.2 Les microcapteurs thermoélectriques

Tout d'abord, un peu d'histoire sur la thermoélectricité ... En 1821, Seebeck a découvert l'effet thermoélectrique qui depuis porte son nom et a mis au point le premier thermocouple [14], [15]. En 1829, Nobili [16] a réalisé la première thermopile en associant plusieurs thermocouples en série. Et c'est en 1833 que Melloni [17] a optimisé les matériaux et créé le couple bismuth/antimoine qui est toujours utilisé.

Un thermocouple est composé de deux conducteurs différents (figure 3). L'effet Seebeck met en évidence la génération d'une f.e.m. par ce thermocouple soumis à une différence de température  $\Delta T$  entre deux jonctions consécutives. La relation suivante permet de calculer cette différence de potentiel notée  $v$  :

$$v = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T \tag{I.2}$$

avec  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  les coefficients Seebeck des matériaux 1 et 2  
 $\Delta T$  : la différence de température entre les deux jonctions

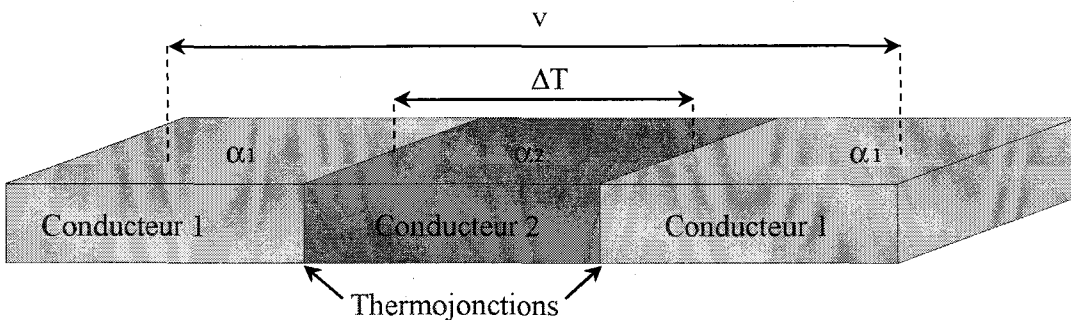


Figure 3 : Dessin d'un thermocouple

Pour obtenir un signal important, les thermocouples peuvent être disposés en série afin de constituer une thermopile.

$$V = N \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T \quad (I.3)$$

Avec  $N$  : le nombre de thermocouples

Avec  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  les coefficients Seebeck des matériaux 1 et 2

$\Delta T$  : la différence de température entre les deux jonctions

Les microcapteurs de rayonnement IR classiques sont conçus de façon à privilégier une grande différence de température associée à un faible nombre  $N$  de thermocouples. Dans ce cas, les structures utilisées sont de type membrane [18] ou poutre encastrée [19], ce qui limite le nombre de thermocouple. Les jonctions chaudes sont placées au centre de la membrane ou à l'extrémité de la poutre et les jonctions froides sur le substrat massif (figures 4 et 5). La technologie silicium est souvent utilisée pour son faible coût et ses procédés de réalisation standards.

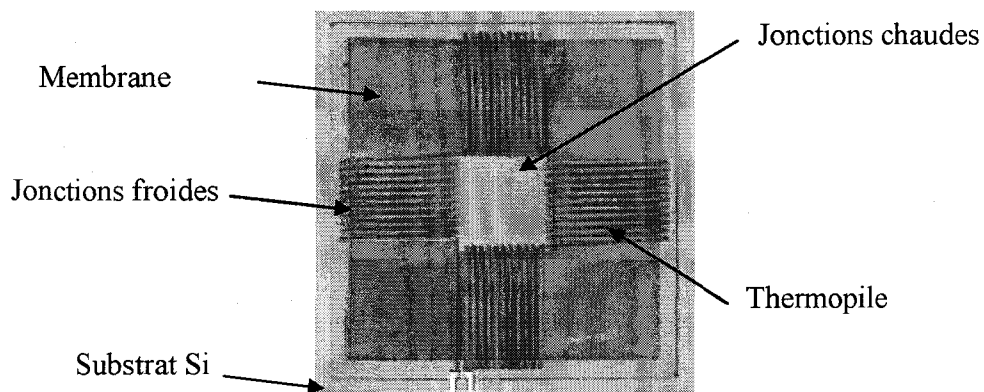


Figure 4 : Microcapteur sur membrane

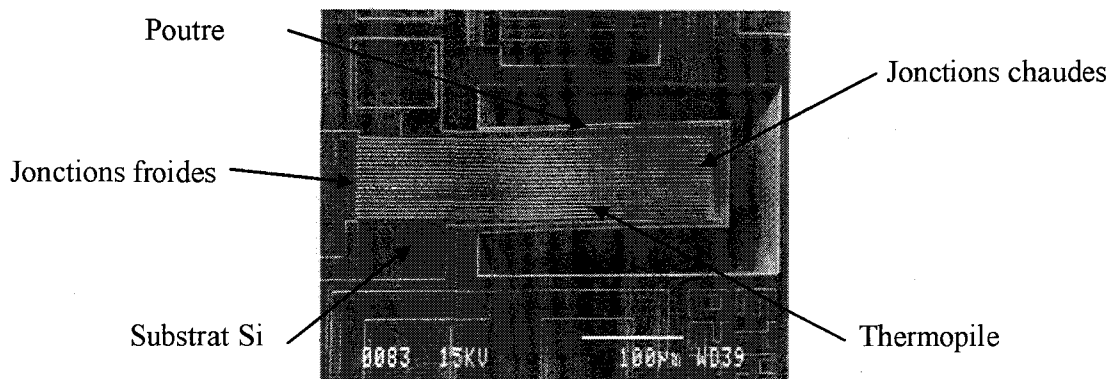


Figure 5 : Microcapteur à poutre encastrée

Les sociétés Heimann (Allemagne) [20] et Dexter (Etats-Unis) [21] commercialisent des microcapteurs thermoélectriques sur membrane. La société Dexter fabrique aussi des capteurs basés sur une technologie couches minces avec des thermocouples constitués d'antimoine et de bismuth (tableau 2).



Paramètres	Technologie Couches Minces	Technologie Silicium
Température maximale	100 °C	125 °C
Bruit	Faible	Elevé
Temps de réponse	Long	Court
Tension de sortie	Elevée	Faible
Coût	Elevé	Faible

Tableau 2 : Comparaison des performances des microcapteurs entre technologie couche minces et technologie silicium[20]

La comparaison des technologies couches minces et silicium montre un net avantage à la technologie silicium. En effet, cette dernière présente un temps de réponse court avec une température de fonctionnement élevée (125°C) et un faible coût. Malgré un bruit élevé et une tension de sortie faible, cette technologie reste la plus intéressante.

A l'IEMN, nous avons développé un concept original consistant à réaliser une thermopile constituée d'un nombre N très élevé de microthermocouples soumis à de faibles différences de température  $\Delta T$ . Ces microthermocouples sont distribués sur toute la surface du microcapteur, ce qui permet d'ajuster ses dimensions suivant l'application visée (figure 6) [22].

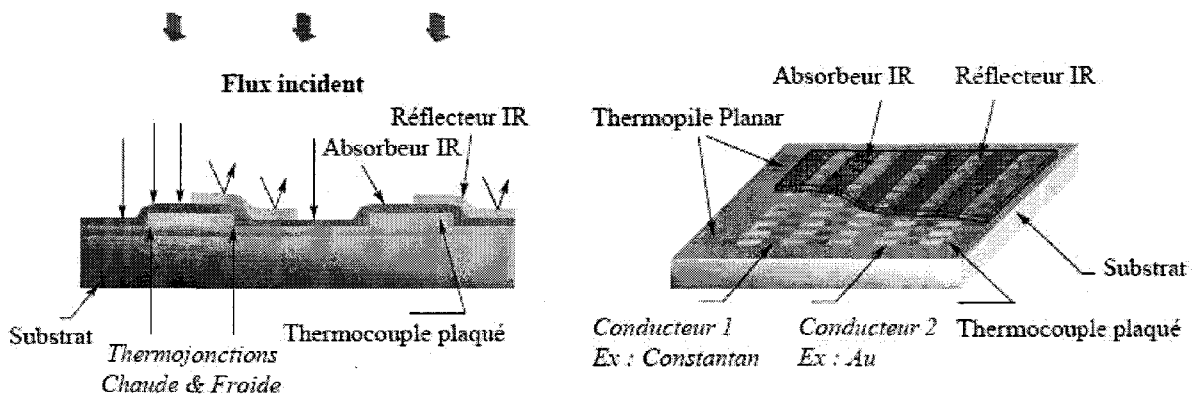


Figure 6 : Thermopile à structure distribuée [22]

Par ailleurs, contrairement aux capteurs infrarouges classiques (figure 7), il n'y a pas nécessité d'encapsuler ces microcapteurs, ce qui réduit les coûts et permet de les utiliser pour effectuer des bilans radiatifs sur des surfaces, comme nous le décrivons dans le chapitre IV sur les applications possibles des microcapteurs (figure 8).

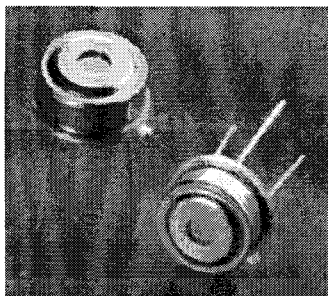


Figure 7 : Capteur thermoélectrique classique

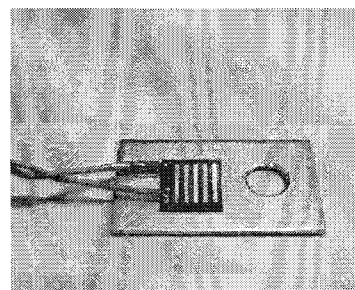


Figure 8 : Capteur IR IEMN collé sur une surface plane

### 3 Les capteurs imageants

Les capteurs infrarouges peuvent être associés en matrice de manière à pouvoir former une image thermique. Quatre types de détecteurs sont généralement utilisés : les microbolomètres, les capteurs à thermopiles, les capteurs pyroélectriques et les microcantilevers.

#### 3.1 Les matrices microbolométriques

Le premier bolomètre a été mis au point en 1880 par Langley [23]. Les microbolomètres sont des microcapteurs thermiques résistifs. Le principe de fonctionnement [24] est basé sur la mesure de la variation de la résistance électrique de la membrane lorsque cette dernière est exposée au rayonnement infrarouge. Par conséquent, elle doit être constituée d'un matériau présentant un coefficient thermique de résistance élevé (TCR). L'injection d'un courant est nécessaire pour mesurer cette résistance. Ce courant parcourant la membrane provoque un échauffement [25], ce qui est un inconvénient majeur. C'est pour cette raison que les microbolomètres sont régulés en température à l'aide d'un module à effet Peltier. Pour augmenter le signal, une cavité optique résonnante en  $\lambda/4$  est réalisée (figure 9). Ce capteur est encapsulé de manière à le protéger des courants de convection et pour obtenir une bonne isolation thermique, un vide résiduel est nécessaire. La réalisation de ce type de capteur sous forme matricielle, destinée à l'imagerie infrarouge, est entièrement compatible avec la technologie CMOS (figures 10 et 11).

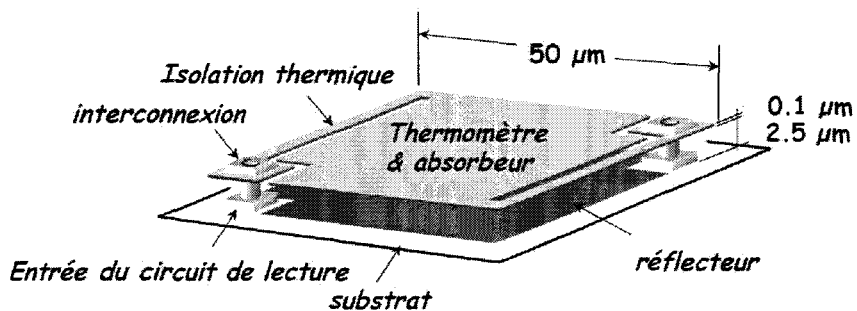


Figure 9 : Dessin d'un microbolomètre (CEA-Léti)

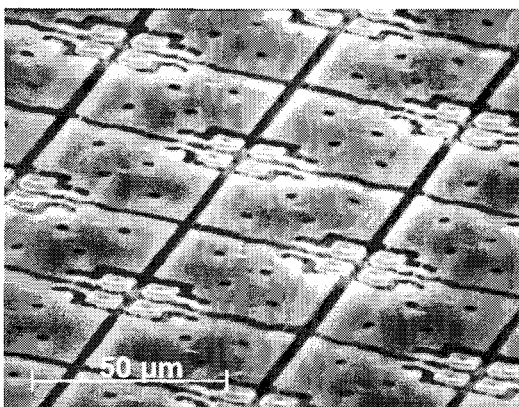


Figure 10 : Matrice de microbolomètres

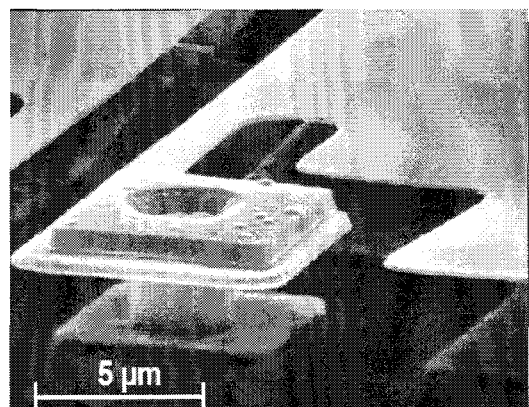


Figure 11 : Détail de l'interconnexion

Plusieurs filières technologiques ont été développées depuis 1980 : la filière "oxyde de vanadium", la filière "silicium amorphe" et la filière "céramique ferroélectrique" (figure 12) [26].

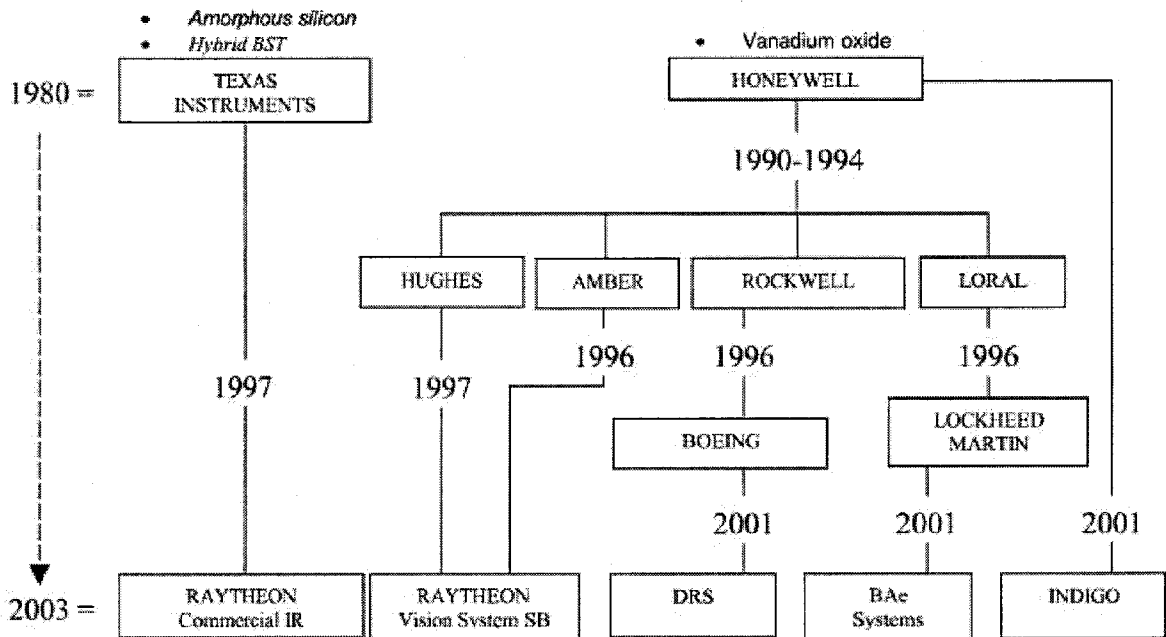


Figure 12 : Historique du développement des microbolomètres non-refroidis

La première filière a été développée par Honeywell et est maintenant produite par Raytheon. Le choix de l'oxyde de vanadium ( $Vo_x$ ) est motivé par un TCR élevé (compris entre -1,5 et -2%/K), ainsi que sa résistivité électrique et une bonne reproductibilité en production. L'objectif actuel est de réduire la taille du pixel à  $25 \mu m$  [27], [28].

La seconde filière « silicium amorphe » développée par Texas Instrument et maintenant par Raytheon et le CEA-Léti [29] est orientée vers des coûts de fabrication faibles pour un développement à grande échelle et non vers des hautes performances. Le silicium amorphe est un bon candidat pour les microbolomètres : il possède un TCR élevé (-2,5%/K), comme l'oxyde de vanadium, mais sa résistivité est supérieure.

La troisième filière développée par Texas Instrument puis par Raytheon, est basée sur un microbolomètre hybride pyroélectrique/ferroélectrique. La structure est composée d'une matrice de détecteurs élémentaires en strontium et barium (BST), hybridée par microbilles sur un circuit de lecture. Cette structure hybride limite l'isolation thermique du détecteur et donc les performances potentielles alors que le coût de fabrication est élevé. Des efforts sont en cours pour produire le détecteur en couches minces avec les performances du matériau céramique massif.

Les caractéristiques des différentes matrices microbolométriques disponibles sur le marché sont résumées ci-dessous (tableau 3). Le prix de ces dispositifs est compris entre 20 et 50 k€ en fonction de la résolution, de la qualité de l'optique et du système de traitement des images associé.

Fabricants	Technologie	Domaine spectral ( $\mu\text{m}$ )	Résolution (pixels)	NETD (mK)
Raytheon	$\text{VO}_x$	8 - 14	320x240	50
Boeing	$\text{VO}_x$	8 - 14	320x240	50
Honeywell	$\text{VO}_x$	8 - 14	328x245	50
Sofradir	a-Si	8 - 14	320x240	36 (1 <sup>ère</sup> génération)
			640x480	85 (2 <sup>ème</sup> génération) < 80

Tableau 3 : Caractéristiques des matrices microbolométriques

Dans le domaine de la recherche, une équipe espagnole dirigée par Enrique Iborra de l'Université de Madrid [30] a développé des microbolomètres à base de  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{O}_y$  amorphe sur une structure en silicium suspendue (figure 13). Les principaux avantages de ce matériau résident dans le grand coefficient thermique de résistance ( $\text{TCR} = -4\%/K$ ) et la possibilité de dépôt par pulvérisation cathodique à basse température ( $50^\circ\text{C}$ ).

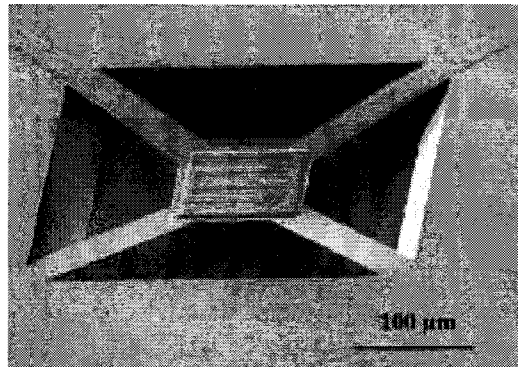


Figure 13 : Microbolomètre à base de  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{O}_y$  amorphe

Une équipe de recherche aux Etats-Unis, à l'université du Texas à Arlington [31], met au point des microbolomètres souples sur polyimide (figures 14 et 15). Le principal intérêt est de pouvoir les utiliser sur des surfaces non planes. Le polyimide sert de support et le matériau pour le microbolomètre est à base de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$  dont le coefficient TCR est de  $-3,4\%/K$ . Une encapsulation à l'aide de polyimide réduisant les contraintes sur le substrat est envisagée de manière à pouvoir protéger les microcapteurs.

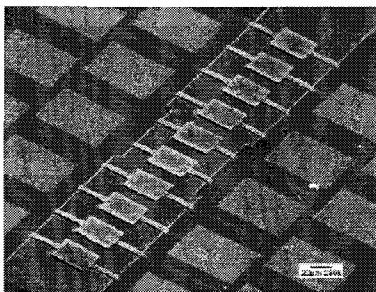


Figure 14 : Matrice de microbolomètres polyimide d'une résolution de  $1 \times 10$  pixels

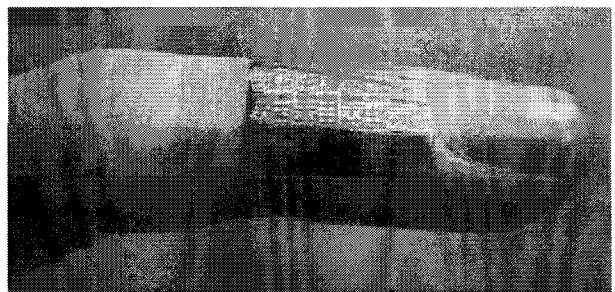


Figure 15 : Matrice de microbolomètres posée sur un doigt

### 3.2 Les réseaux de microcapteurs thermoélectriques

En premier lieu, nous décrivons les travaux menés par des équipes de recherche dans des laboratoires universitaires et par la suite, nous présenterons les réseaux de microcapteurs à thermopile disponibles dans le commerce.

Les microcapteurs thermoélectriques, décrits précédemment, peuvent aussi être assemblés en matrice afin d'être intégrés dans des systèmes pour l'imagerie infrarouge. Ce sont principalement des microcapteurs sur membrane qui sont employés. Christophe Escriba [18] au cours de sa thèse de doctorat au LAAS à Toulouse en 2005 a développé une structure classique (figure 16) décrite dans le paragraphe 2.2. La résolution de ces réseaux était de : 2x8, 3x3 et 8x8 pixels Au centre de recherche scientifique et technologique de Trento en Italie en 2006, Carlos Calaza [32] a mis au point le même type de structure à grande différence de température avec une résolution de 16x16 pixels (figures 17 et 18).

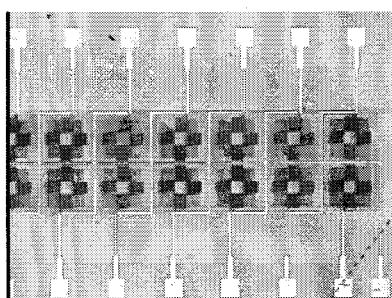


Figure 16 : Matrice de microcapteurs 2 x 8 éléments [18]

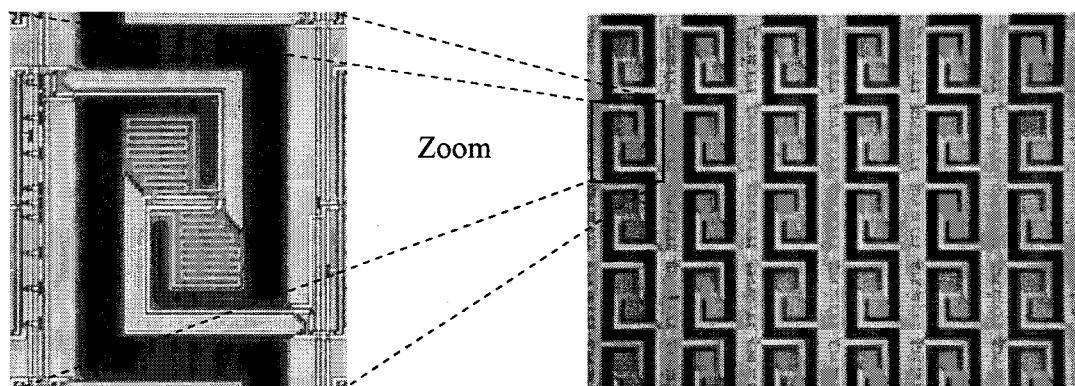


Figure 17 : Microcapteur unitaire réalisé en Italie [32]

Figure 18 : Matrice de microcapteurs  
16 x 16 pixels [32]

La matrice suivante (figure 19), plus originale, est composée d'une triple structure dont deux suspendues obtenues à l'aide de couches sacrificielles a été développée par Fote pour la NASA [33]. Le couple utilisé pour la thermopile est Bi-Te et Bi-Sb-Te. L'objectif est d'obtenir la différence de température la plus élevée possible. Pour y parvenir, une première structure suspendue est réalisée, de manière à obtenir une bonne isolation thermique, une sensibilité élevée et un temps de réponse rapide. Les jonctions chaudes de la thermopile sont placées au centre de la première structure suspendue où se situe le point le plus chaud. Une seconde structure suspendue permettant d'étendre à environ 100 % la surface active du capteur est en contact thermique avec ces jonctions chaudes. Des matrices avec une résolution de 128x128 ont été développées en 2001 [34], cependant, la réalisation de ce type de structure est très délicate.

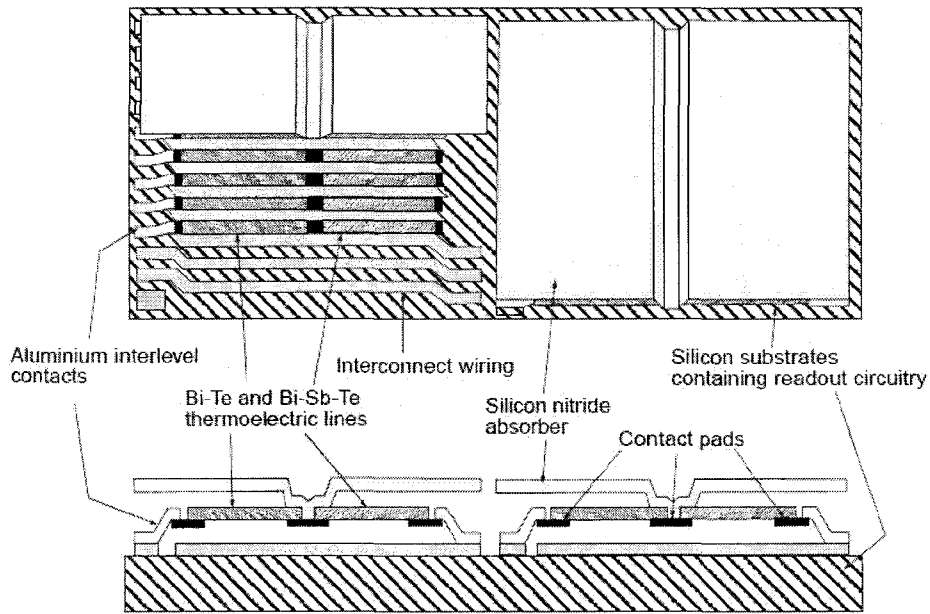


Figure 19 : Microcapteurs à thermopile à double structure suspendue

Les industriels qui commercialisent ce type de capteur à thermopile ont choisi une architecture classique. C'est le cas de la société allemande Heimann avec des matrices de faible résolution (3x3, 1x8 et 1x16) où le couple thermoélectrique employé est Al/polysilicium dopé P [35]. La société américaine DEXTER propose des matrices allant jusqu'à 32x32 pixels (figure 20).

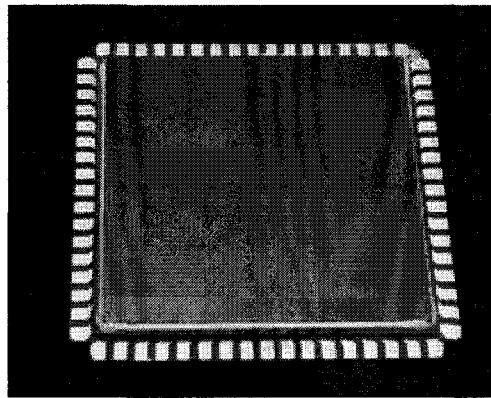


Figure 20 : Matrice 32x32 de la société DEXTER [20]

Dans le commerce, une entreprise anglaise Devantech [36] propose une caméra infrarouge linéaire TPA81 à thermopiles avec 8 pixels arrangés en ligne verticale, munie d'une électronique incorporée et une lentille de silicium (figure 21). Elle est capable de mesurer la température de 8 points voisins jusqu'à une distance de 2 m. L'électronique de son module permet de contrôler un servomoteur pour construire une image thermique. Le coût de cette caméra est de 77,50 euros. Mais pour réaliser cette image, la matrice linéaire doit être fixée sur un système mobile lui permettant de pivoter pour scruter l'espace. Ainsi, il est possible d'obtenir une image de 32x8 pixels avec 32 pas sur 180°.

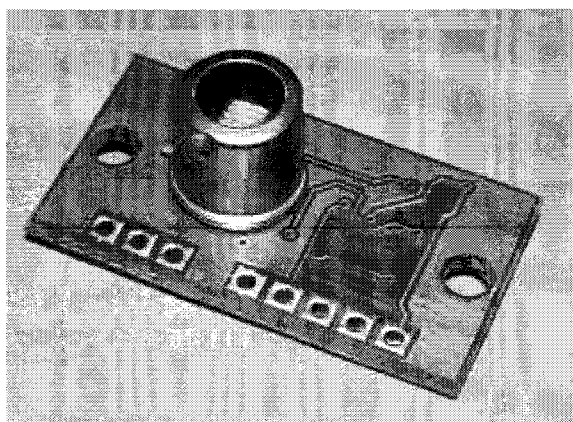


Figure 21 : Caméra linéaire Devantech

### 3.3 Les caméras à capteurs pyroélectriques

Dans le commerce, des caméras linéaires infrarouges pyroélectriques sont distribuées par la société Impac France [37]. L'utilisation des matrices linéaires (figure 22) et d'un obturateur fonctionnant à une fréquence fixe est privilégiée dans ces caméras de type PYROLINE (figure 23).

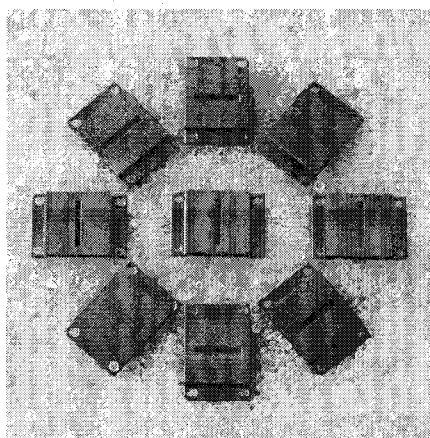


Figure 22 : Matrices linéaires pyroélectriques

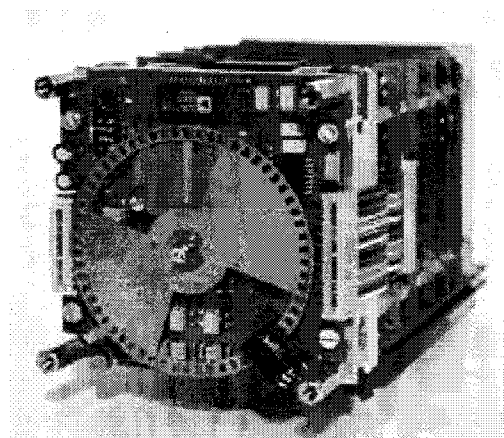


Figure 23 : Caméra pyroélectrique de type PYROLINE

Elles sont destinées à des applications industrielles pour des mesures de températures sans contact et très rapides pour des objets en déplacement sur un tapis roulant, par exemple. Les fréquences de mesure sont 256 Hz et 512 Hz. Leur coût reste élevé, compris entre 3000 € et 10000€ suivant la résolution et le système de traitement d'images associé.

Les différents modèles disponibles sur le marché sont présentés ci-dessous (tableau 4) :

Modèles	Domaine spectral ( $\mu\text{m}$ )	Résolution (Pixels)	Fréquence de mesure (Hz)	NETD (K)	Angles d'ouvertures
PYROLINE 128L	8 - 14	128x1	256	0,5 - 1,5	40° (option 56°)
PYROLINE 256L	8 - 14	256x1	256	0,5 - 1,5	40° (option 56°)
PYROLINE 128LS/128HZ	8 - 14	128x1	128	0,1 - 0,2	40° (option 56°)
PYROLINE 128LS/512HZ	8 - 14	128x1	512	0,5 - 2	40° (option 56°)
PYROLINE 256LS/512HZ	8 - 14	256x1	512	0,5 - 2	40° (option 56°)
PYROLINE 128M	3 - 5	128x1	256	0,5 - 1,5	60° (option 40°)
PYROLINE 256M	3 - 5	256x1	256	0,5 - 1,5	60° (option 40°)
PYROLINE 128G	4,8 - 5,2	128x1	256	1 - 3	60° (option 40°)
PYROLINE 265G	4,8 - 5,2	256x1	256	1 - 3	60° (option 40°)
PYROLINE 128N	1,4 - 1,8	128x1	256	1 - 3	60° (option 40°)
PYROLINE 256N	1,4 - 1,8	256x1	256	1 - 3	60° (option 40°)

Tableau 4 : Récapitulatif des caméras pyroélectriques commercialisées

### 3.4 Les matrices de microcantilevers

Depuis la fin des années 90, le développement des microsystèmes a connu un essor considérable. Ces MEMS (Micro-Electrical-Mechanical-System) ont touché divers domaines comme l'automobile avec les accéléromètres ou encore l'aéronautique avec les gyroscopes. En ce qui concerne la détection infrarouge, la Société SARCON a développé un microcapteur dont le principe de fonctionnement est basé sur les propriétés de déformation d'un microbilame. Ce dernier est composé d'aluminium et de carbure de silicium [38] (figures 24, 25 et 26). Le déplacement en déflexion de cette poutre encastrée est observé lorsque celle-ci est exposée à un rayonnement infrarouge. Trois types de lecture de ce déplacement ont été exploités : l'effet capacitif, l'effet piézoélectrique et la lecture avec un laser et un photodétecteur. La formation de l'image est réalisée directement à partir des microcantilevers. Une lecture directe peut être effectuée lorsque le cantilever comporte une couche piézoélectrique.

Les microbilames les plus performants sont constitués d'aluminium et de  $\text{SiO}_2/\text{SiON}$  [39] (figure 27). Pour ce dispositif, l'effet capacitif de chaque pixel permet de reconstituer l'image thermique. Les caméras développées ont une résolution comprise entre 16x16 et 60x120 pixels.



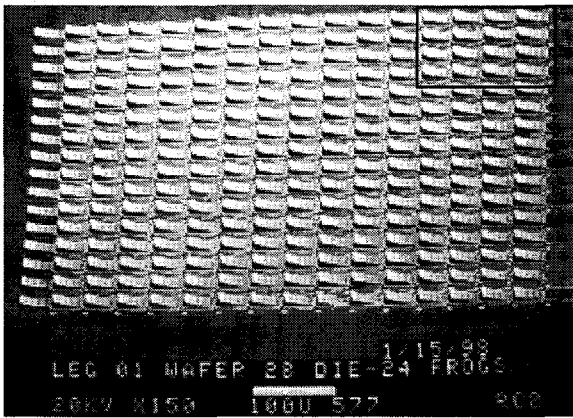


Figure 24 : Matrice de 16x16 pixels

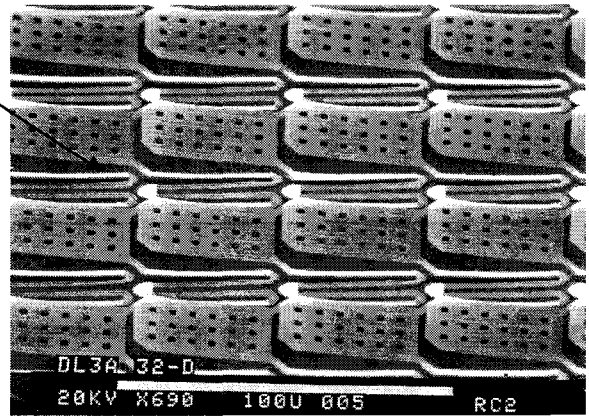


Figure 25 : Zoom de la matrice 16 x16 pixels

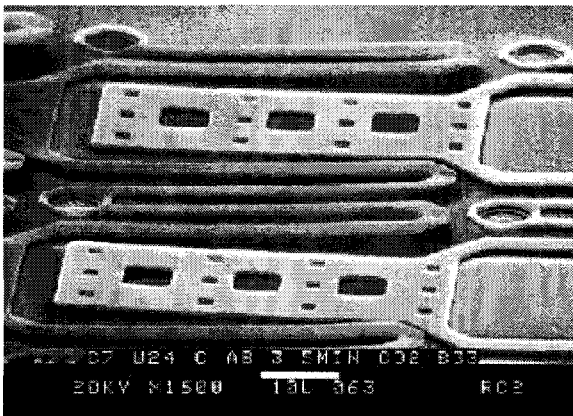


Figure 26 : Deux pixels au repos

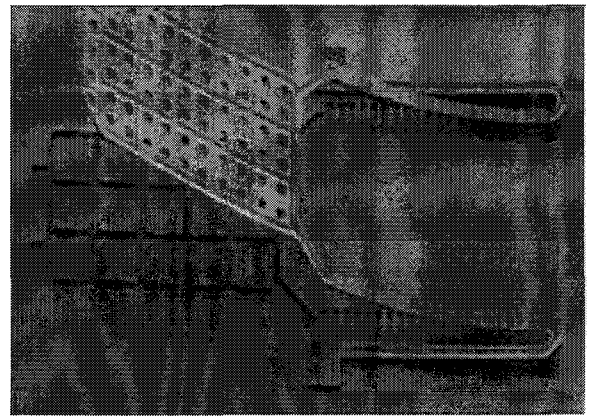


Figure 27 : Microcantilever à base de Al et SiO<sub>2</sub>/SiON

Un autre type de caméra utilise aussi des microcantilevers composés de microbilames d'aluminium et de nitrure de silicium (SiN<sub>x</sub>) [40] (figures 28 et 29). La lecture des pixels est réalisée par un laser avec une cellule CCD. Le laser balaye les microcantilevers et en fonction de la déflexion de la poutre, le faisceau lumineux est dévié, ainsi la cellule CCD qui mesure la déviation et en déduit l'intensité du signal (figure 30). Les matrices réalisées pour ce dispositif sont de 256x256 pixels. Cette dernière solution demande un dispositif conséquent et coûteux.

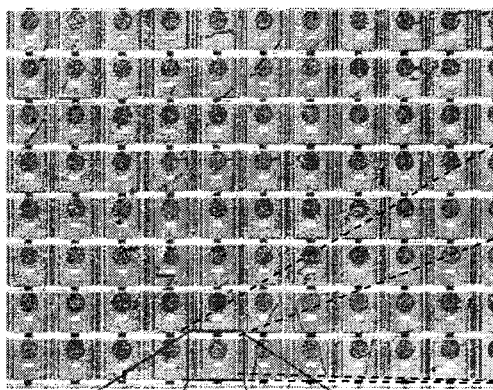


Figure 28 : Matrice de microcantilevers [40]

Zoom

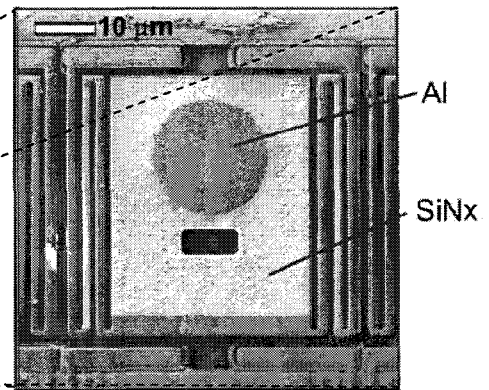


Figure 29 : Photographie d'un pixel [40]

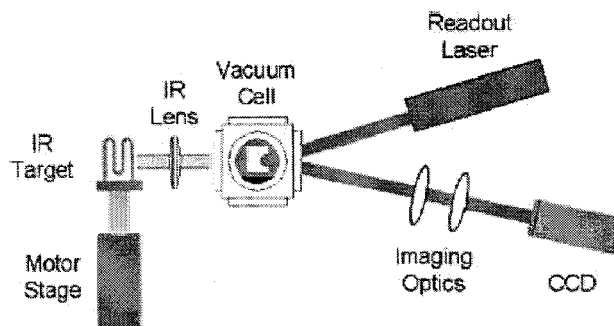


Figure 30 : Schéma du dispositif utilisé pour la caméra infrarouge [40]

## 4 Conclusion

L'objectif principal de notre travail est de pouvoir détecter une personne même immobile et si possible analyser ses déplacements dans un local à l'aide d'un réseau de microcapteurs. Ce réseau doit être à faible coût de manière à pouvoir être intégré dans un système destiné au grand public. A titre de comparaison, les caractéristiques essentielles des différents types de matrices pouvant être utilisées en imagerie infrarouge sont présentées dans le tableau 5.

Types de Matrices	Bolométrique	Thermopile	Pyroélectrique	Cantilever
Résolution (pixels)	320x240 640x480	32 x 32	1x128 1x256	320x240
Défectivité spécifique (cm.Hz <sup>1/2</sup> /W)	2.10 <sup>8</sup>	0,56 - 6.10 <sup>8</sup>	7.10 <sup>8</sup>	1.10 <sup>8</sup>
Temps de réponse (ms)	10 - 20	20 - 50	15 - 20	5 - 10
NETD (mK)	20 - 70	< 300	40 - 80	20
Coût (k€)	20 - 50	15	< 10	5 - 15

Tableau 5 : Caractéristiques des microcapteurs infrarouges

Les critères énoncés dans le cahier des charges ne permettent pas d'employer des capteurs pyroélectriques puisqu'ils ne détectent que les sources chaudes en mouvement, à moins d'employer un dispositif complexe comme un obturateur. Les matrices constituées de microcantilevers ne sont pas disponibles en grandes quantités et semblent délicates à mettre en œuvre.

Les microbolomètres présentent des performances intéressantes : un temps de réponse faible et une défectivité spécifique élevée. Cependant, le bruit total constitué du bruit thermique et du bruit en 1/f est élevé. Par ailleurs, une régulation en température est indispensable pour compenser son auto-échauffement. Il est nécessaire d'encapsuler le microcapteur sous vide dans un boîtier métallique muni d'une fenêtre transparente au rayonnement infrarouge (Ge ou Si) pour l'immuniser contre la convection et augmenter sa sensibilité. Pour toutes ces raisons, un système de visée basé sur ces microbolomètres est complexe à mettre en œuvre, ce qui induit un coût trop élevé pour les applications "habitat social". C'est pourquoi les matrices à thermopile nous paraissent être les plus appropriées.

En effet, ces microcapteurs possèdent des performances moyennes par rapport aux autres microcapteurs mais dans le cadre de notre application, elles nous semblent suffisantes. Ils présentent aussi quelques avantages par rapport aux microbolomètres : l'absence de bruit en 1/f, ils ne sont pas polarisés et ne sont pas placés sous vide, mais sont malgré tout encapsulés. Cette encapsulation permet de les isoler de l'environnement extérieur par un boîtier muni d'une fenêtre en germanium ou en silicium aminci. Une étude réalisée par la société américaine Dexter [21] a montré que le choix du gaz lors de l'encapsulation d'un microcapteur modifiait trois paramètres importants : la tension de sortie, la sensibilité électrique et le temps de réponse. Les variations mesurées ont permis de déterminer des coefficients multiplicateurs de ces grandeurs en fonction du gaz utilisé dans le boîtier (tableau 6).

Gaz utilisés	Coefficients multiplicateurs
Azote (N <sub>2</sub> )	1,00
Argon (Ar)	1,10
Xenon (Xe)	1,55
Néon (Ne)	0,90

Tableau 6 : Coefficients multiplicateurs des paramètres du capteur en fonction du gaz utilisé

L'encapsulation du microcapteur est une opération onéreuse, ce qui rend le coût de telles matrices incompatibles avec des détecteurs grand public. C'est pourquoi, dans la suite de ce travail nous décrivons le développement de matrices à thermopile non encapsulées basées sur un concept original imaginé et breveté par notre équipe [41].



## BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE I



## Bibliographie du chapitre I

- [1] G. Sarusi, "QWIP or other alternative for third generation infrared system", *Infrared Phys. & Technol.* Vol.44, pp.439-444, 2003
- [2] L.J. Kozlowski et al, "LWIR 128\_128 GaAs/AlGaAs multiple quantum well hybrid focal plane array", Vol. 38, pp.1124-1130, 1991.
- [3] S.D. Gunapala et al, "Recent developments and applications of quantum well infrared photodetector focalplane arrays", *Opto-Electronics Review*, Vol. 8, pp.150-163, 2001.
- [4] M.B. Reine, "Photovoltaic detectors in HgCdTe", in: P. Capper, C.T. Elliott (Eds.), *Infrared Detectors and Emitters, Materials and Devices*, Chapman & Hall, London, 2000.
- [5] J.L. Tissot, "Advanced IR detectors technology development at CEA/Léti", *Infrared Phys. & Technol.* Vol.43, pp. 223-228, 2002
- [6] P. Norton, "HgCdTe infrared detectors, *Opto-Electronics Review*", Vol. 10, pp.159-174, 2002.
- [7] S. B. Lang, "Ferroelectrics", Vol. 7, pp. 213-234, 1974.
- [8] E.R. Caley, J.F.C., "Theophrastus on stones", The Ohio State U., Colombus, 1956.
- [9] C.M. Hanson, Hybridpyroelectric-ferroelectric bolometer arrays, in: P.W. Kruse, D.D. Skatrud (Eds.), *Semiconductors and Semimetals*, Vol. 47, Academic Press, San Diego, 1997, pp. 123-174.
- [10] P. Muralt, "Micromachined infrared detectors based on pyroelectric thin films," *Rep. Prog. Phys.*, vol. 64, pp. 1339-1388, 2001
- [11] D. Akai et al, "Pyroelectric infrared sensors with fast response time and high sensitivity using epitaxial Pb(Zr, Ti)O<sub>3</sub> films on epitaxial  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Si substrates", *Sensors and Actuators A* 130-131 (2006) pp. 111-115
- [12] C.M. Hanson, "Uncooled thermal imaging at Texas Instruments", *Proceedings of SPIE* 2020 (1993)330-339.
- [13] R.K. McEwen, P.A. Manning, "European uncooled thermal imaging sensors", *Proceedings of SPIE*3698 (1999) 322-337.
- [14] R.A. Smith, F.E. Jones, R.P. Chasmar, "The Detection and Measurement of Infrared Radiation", Clarendon, Oxford, 1958.
- [15] P.W. Kruse, L.D. McGlauchlin, R.B. McQuistan, "Elements of InfraredTechnology", Wiley, NewYork, 1962.
- [16] E.S. Barr, "Historical survey of the early development of the infrared spectral region", *American Journal of Physics* 28 (1960) 42-54.
- [17] E.S. Barr, "The infrared pioneers — II. Macedonio Melloni", *InfraredPhysics* 2 (1962) 67-73.

- [18] C. Escriba, “Conception, Réalisation et Caractérisation de capteurs infrarouges à thermopiles: Application à la détection de présence passive dans l'habitat”, Thèse de doctorat, LAAS, décembre 2005
- [19] D. Moser, “CMOS Flow sensors”, thèse de doctorat, janvier 1993, Swiss Federal Institute of Technology
- [20] Heimann Sensor GmbH, Grenstrasse 22, 01109 dresden (DE)  
<http://www.heimanssensor.com>
- [21] Dexter Research Center, Inc., 7300 Huron River, Dexter, MI. 48130 U.S.A.  
<http://www.dexterresearch.com>
- [22] M. Boutchich, K. Ziouche, M. Ait-Hammouda Yala, P. Godts and D. Leclercq, “Package-free infrared microsensor using polysilicon thermopile”, *Sensors and Actuators*. 120(1), pp. 52-58, 2005.
- [23] E.S. Barr, “The Infrared Pioneers — III. Samuel Pierpont Langley”, *InfraredPhysics* 3 (1963) pp.195–206.
- [24] R.A. Wood, “Uncooled thermal imaging with monolithic silicon focal planes”, *Proceedings of SPIE* 2020 (1993) 322–329.
- [25] X. Gu et al, “On-chip compensation of self-heating effects in microbolometer infrared detector arrays”, *Sensors and Actuators, A* 69 (1998) pp.92-96
- [26] J.L. Tissot, “Infrared Physics & Technology”, 46 (2004) pp.147–153
- [27] C. Chen, X. Yi, X. Zhao, B. Xiong, “Characterizations of VO<sub>2</sub>-based uncooled microbolometer linear array,” *Sensor and Actuators A*, vol. 90, pp. 212-214, 2001
- [28] W. Radford et al, “sensitivity improvements in uncooled microbolometer FPAs”, *Proceedings of SPIE* 3698 (1999) 119–130.
- [29] B. Fièque et al., “Uncooled microbolometer detector: Recent developments at Ulis”, *Infrared Physics & Technology* 49 (2007) 187–191
- [30] Iborra et al, “IR Uncooled bolometers based on amorphous Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>O<sub>y</sub> micromachined structures”, *Journal of microelectromechanical systems*, Vol. 11, No. 4, August 2002
- [31] S.A. Dayeh et al. , “Micromachined infrared bolometers on flexible polyimide substrates”, *Sensors and Actuators A* 118 (2005) 49–56
- [32] C. Calaza et al, “An uncooled infrared focal plane array for low-cost applications fabricated with standard CMOS technology”, *Sensors and Actuators A* 132 (2006) 129–138
- [33] M.C. Fote, E.W. Jones, T. Caillat, “Uncooled thermopile infrared detector linear arrays with detectivity greater than 10<sup>9</sup> cmHz<sup>1/2</sup>/W”, *IEEE Transactions on Electron Devices* 45 (1998) 1896-1902.
- [34] M.C. Fote, S. Gaalema, “Progress towards high-performance thermopile imaging arrays”, *Proceedings of SPIE* 4369 (2001) 350–354.



[35] M. Simon, "Thermopile linear array sensors and modules with short time constant and high sensitivity", Proceeding Sensor conference 2007 Nuremberg.

[36] Devantech, <http://www.robot-electronics.co.uk>

[37] IMPAC FRANCE, <http://www.impactinfrared.com>

[38] Grbovic et al., "Uncooled infrared imaging using bimaterial microcantilever arrays", Appl. Phys. Lett. 89, 073118 (2006)

[39] Scott R. Hunter, "High sensitivity uncooled microcantilevers infrared imaging array", SPIE Conference Proceedings Infrared technology and Applications XXXII, 19 avril 2006, Vol. 6206

[40] L.R. Senesac et al., "IR imaging using uncooled microcantilever detectors", Ultramicroscopy 97 (2003) 454 451–458

[41] P. Godts, E. Gaviot, D. Leclercq, B. Verbeke, Brevet européen (FR2781931), UTSL



## Chapitre II

### Modélisation des microcapteurs de rayonnement infrarouge

#### Table des matières

1	Introduction .....	35
2	Microcapteur infrarouge multi-membranes 1 <sup>ère</sup> génération (2002-2005) .....	35
2.1	Description et principe de fonctionnement du microcapteur .....	35
2.2	Réalisation de ces microcapteurs en technologie silicium .....	36
3	Structure des microcapteurs infrarouge mono-membrane de nouvelle génération .....	39
4	Choix des matériaux pour la thermopile .....	40
5	Principe de modélisation des microcapteurs IR .....	42
5.1	Hypothèses et simplifications du modèle .....	43
5.2	Détermination du profil de température le long de la membrane .....	46
6	Etude de différentes configurations de microcapteurs .....	53
6.1	Définitions des principales caractéristiques à optimiser .....	53
6.2	Etude d'un microcapteur comportant une seule zone absorbante .....	55
6.3	Etude d'un microcapteur à deux zones .....	58
6.4	Etude d'un microcapteur à trois zones .....	62
6.5	Etude d'un microcapteur à quatre zones .....	64
6.6	Etude d'un microcapteur à six zones .....	67
6.7	Conclusion .....	71
7	Nouvelle structure permettant d'optimiser la détectivité spécifique .....	73
7.1	Paramètres influents dans l'optimisation des microcapteurs .....	73
7.2	Nouvelle modélisation pour l'optimisation .....	75
7.2.1	Calcul de la conductivité thermique de la nouvelle couche équivalente .....	75
7.2.2	Résultats des simulations des microcapteurs optimisés .....	78
8	Conclusion .....	80
	Bibliographie du chapitre II .....	83



## 1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la modélisation des microcapteurs de rayonnement infrarouge. Pour cela, les travaux et résultats antérieurs de l'équipe Microcapteurs thermiques seront rappelés. Le principe de fonctionnement de ces microcapteurs est original et a fait l'objet d'un dépôt de brevet (USTL/CNRS) [1]. Le rayonnement infrarouge échangé entre la cible et le capteur est transformé en une variation spatiale et périodique de température à l'aide d'une alternance de zones absorbantes et réfléchissantes. Ce champ de température ainsi généré est transformé en f.e.m. par une thermopile planaire. Pour obtenir une bonne sensibilité, ce microcapteur doit être réalisé sur membrane. Le procédé de fabrication a été mis au point et validé en technologie silicium avec le concours du LAAS (Toulouse) et de l'IEF (Orsay) dans le cadre d'un regroupement des plateformes technologiques mises en place par le CNRS sous la dénomination INTERLAB. De nombreux microcapteurs de ce type ont été étudiés et réalisés dans le cadre de la thèse de doctorat de Mohamed Boutchich en 2002 [2], [3].

Dans le but de fabriquer des matrices, une nouvelle approche sera proposée en étudiant un microcapteur sur membrane unique sans encapsulation. Les résultats des simulations permettront de définir les dimensions des microcapteurs à réaliser pour une imagerie thermique basse résolution. Nous discuterons ensuite de l'intérêt de développer des microcapteurs submillimétriques afin de réaliser une imagerie thermique moyenne résolution.

## 2 Microcapteur infrarouge multi-membranes 1<sup>ère</sup> génération (2002-2005)

### 2.1 Description et principe de fonctionnement du microcapteur

La structure tridimensionnelle (figure 1) de surface  $6 \times 5 \text{ mm}^2$ , est réalisée à partir de la gravure du substrat de silicium jusqu'aux membranes bicouches ( $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ ) à contraintes mécaniques compensées. Afin de minimiser l'encombrement du microcapteur, les piliers soutenant les membranes doivent présenter des flancs droits.

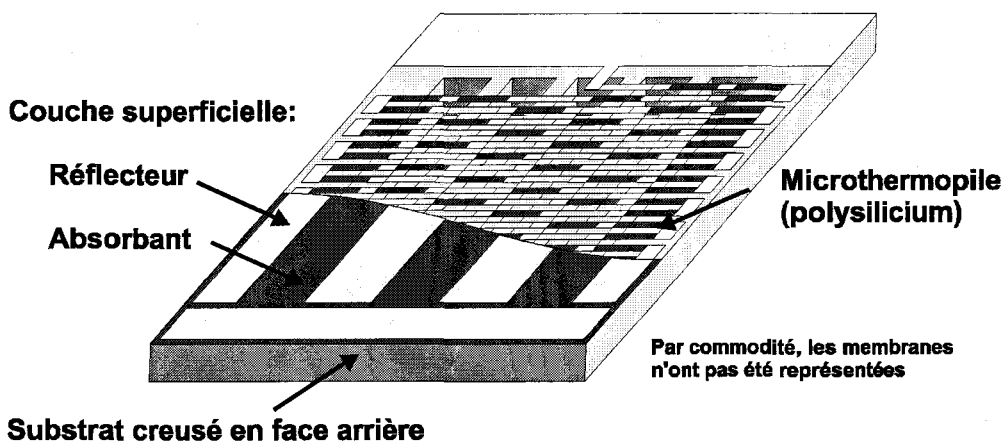


Figure 1 : Dessin d'un microcapteur écorché de dimension  $6 \times 5 \text{ mm}^2$

L'absorbant obtenu par dépôt de résine polyimide possède des propriétés spectrales adaptées au domaine infrarouge ainsi qu'une bonne compatibilité au procédé couches minces utilisé, notamment le dépôt des réflecteurs en or. La thermopile a été réalisée en polysilicium dopé N et P afin de bénéficier d'un pouvoir thermoélectrique important [4]. Les jonctions des microthermocouples qui la constituent sont localisées au milieu des membranes, ce qui permet de délivrer un maximum de tension.

A l'intérieur de chaque bande absorbante, le flux radiatif incident est converti en chaleur, ce qui génère les zones "chaudes" (figure 2a). Au niveau des réflecteurs, il n'y a pratiquement pas de rayonnement absorbé, ce qui permet de créer les zones "froides". Les écarts de température ( $\Delta T$ ) (figure 2b) entre ces deux types de zones sont alors convertis en f.e.m. (V) par la thermopile représentée figure 2a.

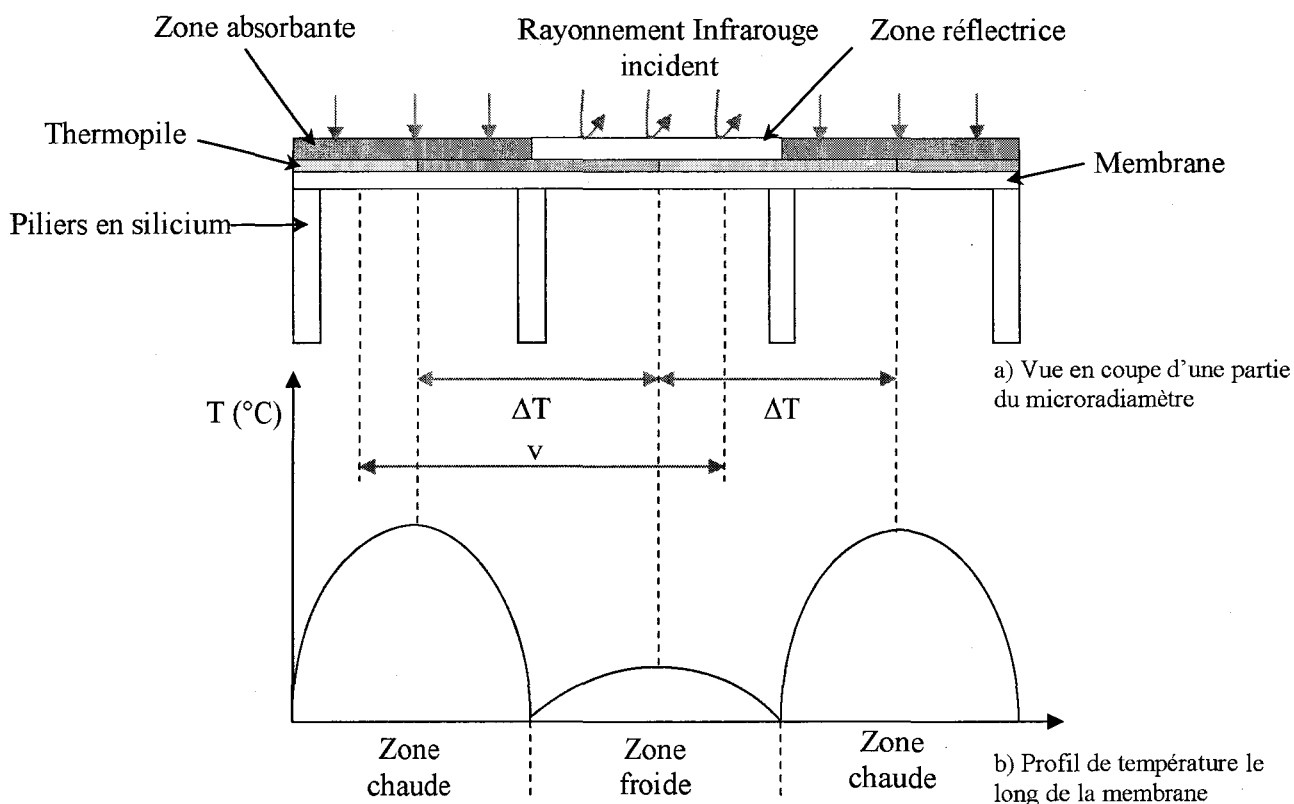


Figure 2 : Principe simplifié du fonctionnement du radiomètre IR

## 2.2 Réalisation de ces microcapteurs en technologie silicium

Suivant les directives de fonctionnement d'INTERLAB, seuls des procédés de fabrication standards sur silicium ont été utilisés. La réalisation des microcapteurs a requis 12 opérations différentes avec 8 niveaux de masquage. Les premières étapes ont été prises en charge par le LAAS. Sur des substrats 3 pouces d'orientation cristalline (110), des repères ont été tout d'abord gravés pour permettre d'aligner les membranes suivant le plan d'attaque au KOH à flancs droits. En effet, en réalisant les ouvertures avec une orientation de  $54,70^\circ$  par rapport au méplat, les plans cristallins (111), les plus denses qui sont gravés moins rapidement que les autres, permettent d'obtenir les flancs droits. Selon le process de membrane développé par le LAAS, l'oxydation des substrats a été effectuée sur une épaisseur de  $1,4 \mu\text{m}$ , suivie d'un dépôt de nitrure de  $0,5 \mu\text{m}$ . Pour constituer les matériaux de la thermopile, une couche de

polysilicium de  $0,33 \mu\text{m}$  a été déposée puis dopée par implantation suivant une mosaïque de zones N et P (figure 3). Enfin, le réseau linéique des 100 microthermocouples d'une largeur de  $70 \mu\text{m}$  a été gravé.

Les wafers ont été ensuite transmis à l'IEMN pour les étapes suivantes. Afin d'assurer la continuité électrique de la thermopile, des plots de contacts en or ont été déposés par lift-off sur les jonctions PN. La couche absorbante ( $15 \mu\text{m}$ ) a été obtenue par dépôt à la tournette d'une résine polyimide liquide photosensible. Cette couche a été partiellement recouverte par la technique de lift-off de bandes réfléchissantes en or.

La gravure profonde au KOH à  $80^\circ\text{C}$  en face arrière a été effectuée à l'IEF. Cette dernière étape a permis de libérer les membranes et de creuser les traits de prédécoupe autour des microcapteurs (figure 3).

L'étalonnage a été enfin effectué à l'IEMN. La sensibilité au flux de rayonnement infrarouge est comprise entre  $50$  et  $55 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$  et la température équivalente de bruit est voisine de  $0,26 \text{mK}$ . Le facteur de dispersion et la qualité de fabrication sont donc excellents puisque ces résultats qui sont parfaitement reproductibles coïncident avec les valeurs prévues par la modélisation avec une erreur inférieure à  $5\%$ .

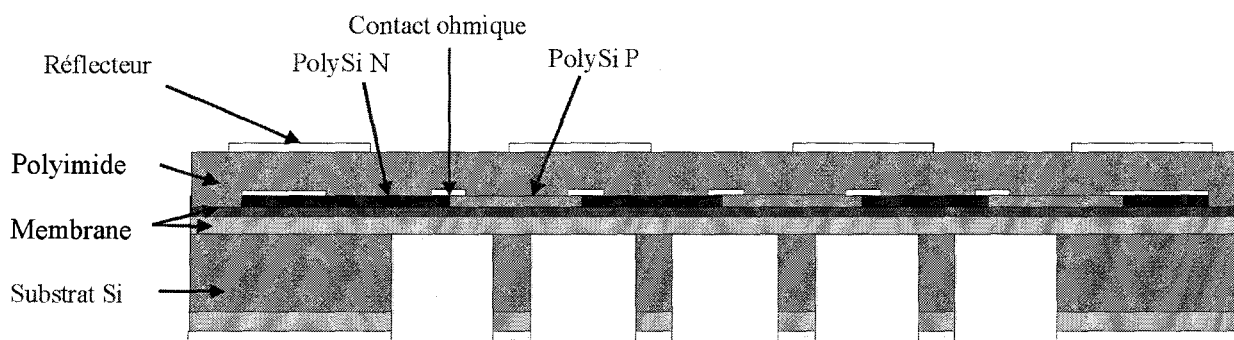


Figure 3 : Dessin de profil du microcapteur (rapport des dimensions non représentatif)

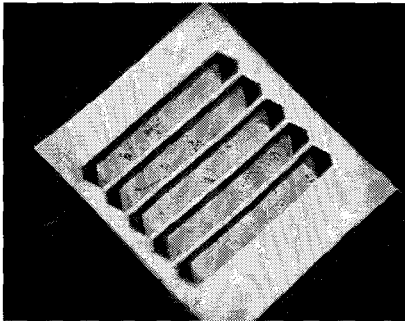
Trois séries de microcapteurs ont été réalisées avec les caractéristiques et les performances présentées ci-dessous (tableau 1). Le NETD représente le Noise Equivalent Thermal Difference, soit la plus petite différence de température que le microcapteur est capable de détecter.

Type de Microcapteurs	Surface totale ( $\text{mm}^2$ )	Nombre de membranes	Largeur des membranes ( $\mu\text{m}$ )	Sensibilité ( $\mu\text{V}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$ )	Résistance électrique ( $\text{k}\Omega$ )	NETD (mK) à 300 K
A	6 x 5	5	970	72	398	0,18
B	6 x 6	4	634	47	500	0,32
C	3 x 3	3	220	17	93	0,38

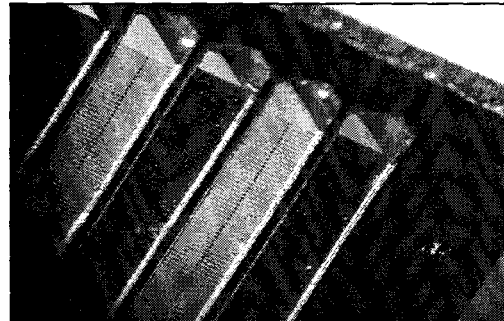
Tableau 1 : Caractéristiques et performances des microcapteurs multi-membranes

Ces microcapteurs possèdent des sensibilités importantes allant jusqu'à  $72 \mu\text{V}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$  et des résistances internes inférieures à  $500 \text{k}\Omega$ .

Rappelons que l'objectif de ce travail est de réaliser de petites matrices de capteurs de rayonnement infrarouge, ce qui nécessite des pixels de très petites tailles. Les dimensions des microcapteurs multi-membranes ne peuvent pas être fortement réduites en raison de la présence des piliers supportant les membranes. En effet, lorsque la largeur de la membrane devient très petite, le creusement total du substrat n'est plus possible car la solution de gravure humide ne peut plus circuler dans les fentes inter-piliers (figures 4 et 5). La libération des membranes par gravure sèche profonde (ICP) permet de mener plus loin la miniaturisation mais le problème de gravure des fentes très étroites à travers tout le substrat restera toujours un facteur limitant.



*Figure 4 : Face arrière du microcapteur*



*Figure 5 : Zoom de la face arrière du microcapteur*

Une nouvelle structure a donc été imaginée en essayant de concevoir ces microcapteurs sur une membrane unique tout en préservant ses capacités d'immunité à la convection, sans avoir recours à l'encapsulation.



### 3 Structure des microcapteurs infrarouge mono-membrane de nouvelle génération

Dans le cadre de ce travail, le développement de matrices de microcapteurs est motivé par le besoin de réaliser une imagerie infrarouge basse résolution, à faible coût. Par rapport aux microcapteurs de 1<sup>ère</sup> génération, il est indispensable de réduire les dimensions pour augmenter la résolution de la caméra infrarouge et diminuer les coûts de fabrication. La solution envisagée est la réalisation de chaque microcapteur sur membrane unique (figure 6).

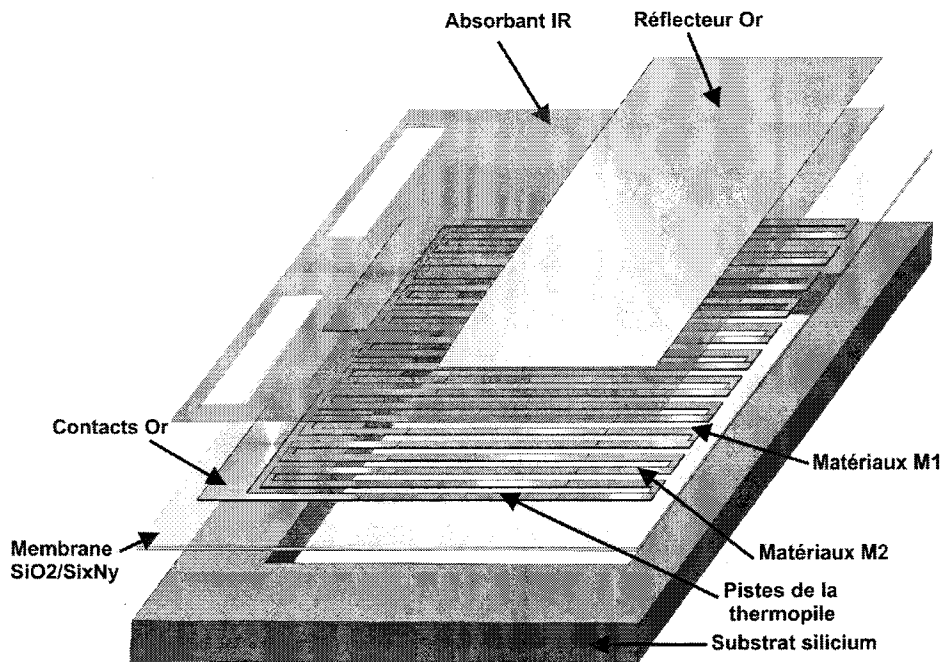


Figure 6 : Vue éclatée du microcapteur 3x3 mm<sup>2</sup>

A partir de ce nouveau concept (figure 7), les problèmes à résoudre sont nombreux :

- Un tel capteur peut-il fonctionner ?
- La sensibilité sera-t-elle suffisante ?
- Quels doivent être le nombre et la longueur optimaux des zones absorbantes et réfléchissantes ?
- La tenue mécanique de la membrane sera-t-elle suffisante sans les piliers ?

L'étude et les solutions apportées à toutes ces questions font l'objet de la suite de ce chapitre.

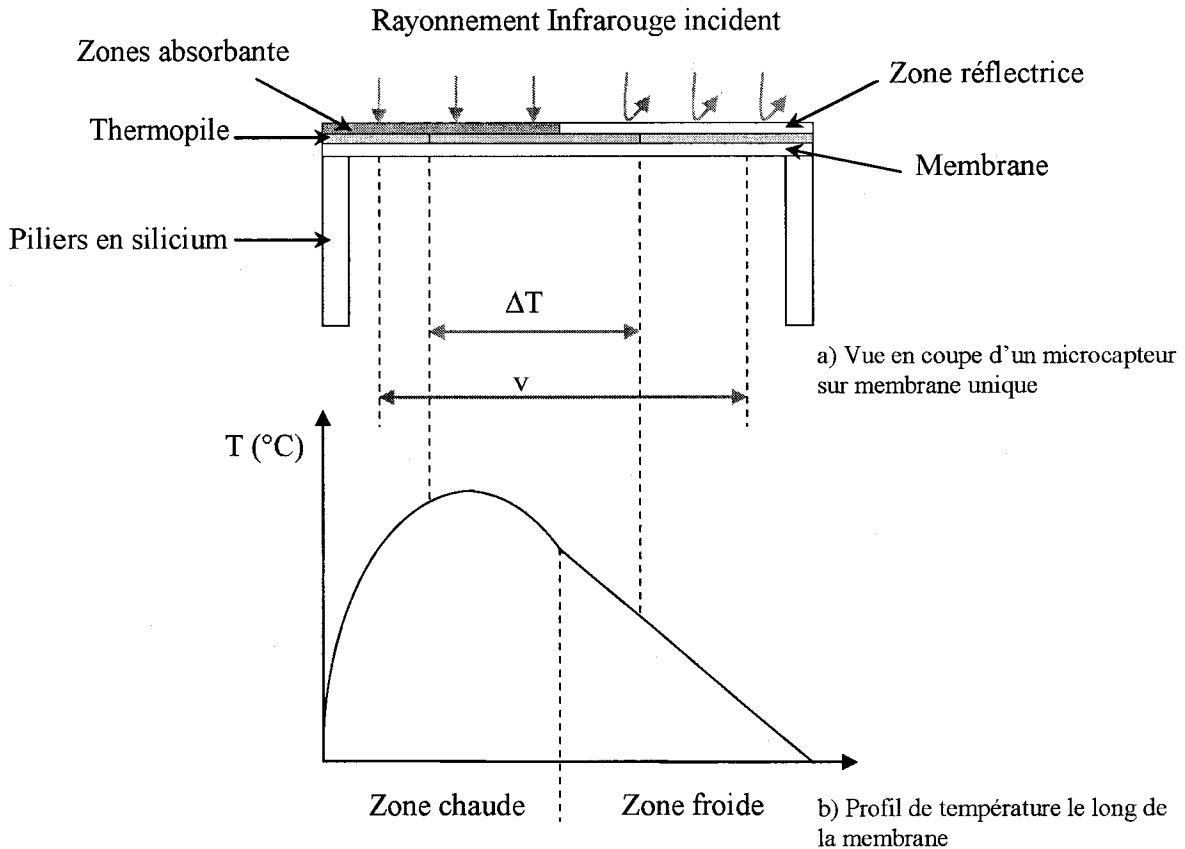


Figure 7 : Principe simplifié du fonctionnement d'un microcapteur IR nouvelle génération

#### 4 Choix des matériaux pour la thermopile

Quatre choix de couples de matériaux pour les thermocouples s'offraient à nous :

- thermocouple polysilicium N/P dopé par implantation
- thermocouple polysilicium P/Or dopé par implantation
- thermocouple polysilicium N/Or dopé par implantation
- thermocouple polysilicium N/Or dopé in-situ

Le facteur de mérite est le paramètre principal permettant de sélectionner le couple thermoélectrique optimal. En effet, le coefficient Seebeck n'est pas l'unique critère déterminant pour obtenir un thermocouple efficace. Il faut aussi qu'il soit un bon conducteur électrique afin de réduire les résistances ohmiques et le bruit de Johnson. C'est pour cette raison qu'est introduite la notion de facteur de mérite  $Z$  qui prend en compte l'antagonisme entre la conductivité électrique et le coefficient Seebeck (figure 8).

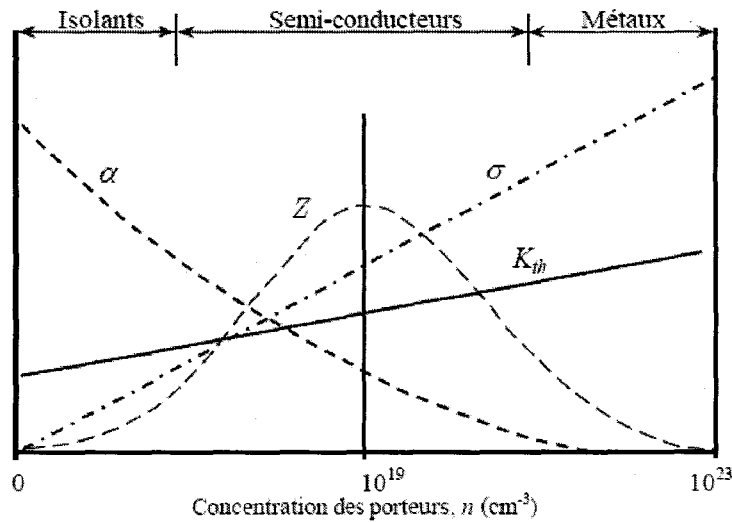


Figure 8 : Facteur de Mérite Z en fonction de la concentration des porteurs  $n$  (cm<sup>-3</sup>)

$$Z = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)^2}{(\sqrt{\rho_1 \cdot \lambda_1} + \sqrt{\rho_2 \cdot \lambda_2})^2} \quad (II.1)$$

- $\alpha_i$  : Coefficient Seebeck du matériau i
- $\rho_i$  : Résistivité électrique du matériau i
- $\lambda_i$  : Conductivité thermique du matériau i

Le tableau 2 résume les caractéristiques [5] des matériaux utilisables pour la réalisation de la thermopile et les facteurs de mérite calculés pour les quatre couples de matériaux cités précédemment.

Matériaux	Polysilicium N implanté	Polysilicium P implanté	Polysilicium N in-situ	Or
Coefficient Seebeck ( $\mu$ V/K)	154,5	-196,3	266,0	-1,9
Résistivité électrique ( $\Omega$ .cm)	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$22 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$
Conductivité thermique (W/(m.K))	34,5	34,5	29	314
Facteur de Mérite des couples thermoélectriques				
Polysilicium N/P implantés	$3,8 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$			
Polysilicium P implanté/or	$3,0 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$			
Polysilicium N implanté/or	$3,4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$			
Polysilicium N in-situ/or	$1,1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$			

Tableau 2 : Caractéristiques des matériaux de la thermopile et le facteur de mérite associé

Les facteurs de mérite correspondant aux matériaux utilisables mettent en évidence que le thermocouple polysilicium dopé N/P par implantation est le plus intéressant. Il possède le facteur de mérite le plus élevé, mais il nécessite d'utiliser un 3<sup>ème</sup> matériau pour contourner la barrière électronique des jonctions N/P. Des contacts ohmiques en or sont donc nécessaires et la résistance électrique est très élevée. La réalisation de ce type de thermocouple est complexe et augmente les coûts des microcapteurs. Il est également possible de réaliser des thermocouples polysilicium N implanté/or ou dopé P implanté/or mais pour des raisons de coûts, ces procédés n'ont pas été retenus. La fabrication de thermocouples polysilicium dopé N in-situ/or est beaucoup plus économique. Le facteur de mérite est inférieur à celui des autres thermocouples mais la simplification de la réalisation technologique compense largement cet inconvénient.

## 5 Principe de modélisation des microcapteurs IR

L'étude présentée sera structurée en 3 parties :

- Mise en place du modèle pour le cas simple d'un capteur comportant une seule membrane entièrement absorbante.
- Etude d'un capteur équipé d'une membrane comportant une partie réfléchissante et une partie absorbante.
- Etude d'un capteur équipé d'une membrane comportant plusieurs zones absorbantes et réfléchissantes.

Le microcapteur à réaliser (figures 9 et 10) est composé des matériaux suivants :

- une membrane bicouche  $\text{SiO}_2/\text{Si}_x\text{N}_y$
- une couche du polysilicium dopé N in-situ
- une couche d'or du second thermoélément
- une couche de polyimide servant d'absorbant IR
- une couche d'or pour les zones réfléchissantes

Dans le modèle développé, nous prendrons en compte l'ensemble de ces couches pour déterminer l'emplacement des jonctions permettant de compenser l'influence de la convection.

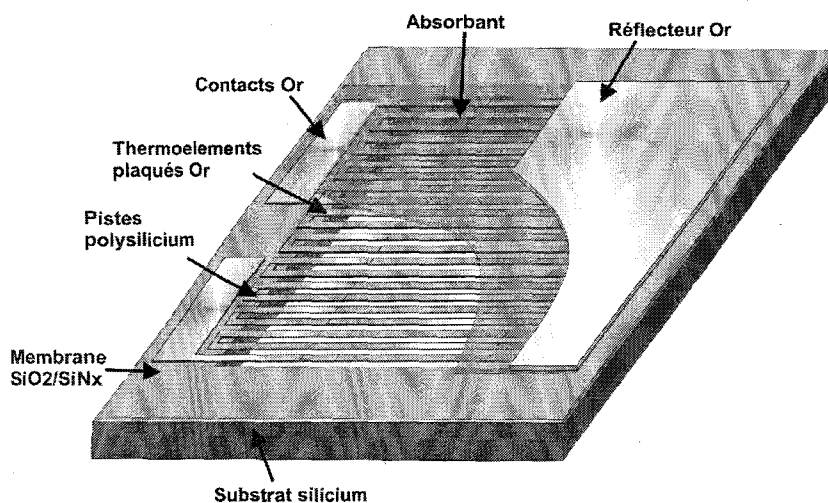


Figure 9 : Structure du microcapteur  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  sur membrane unique

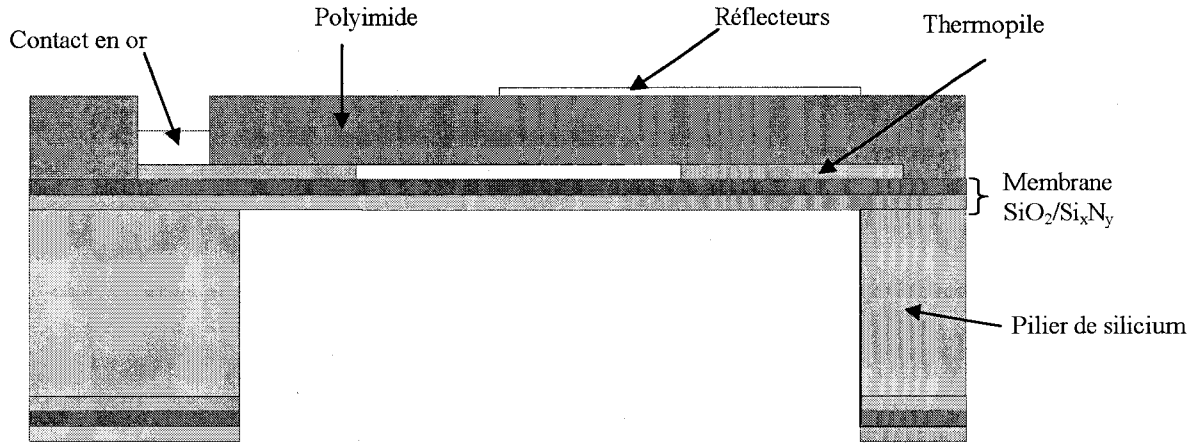


Figure 10 : Vue en coupe du microcapteur sur membrane unique

### 5.1 Hypothèses et simplifications du modèle

La structure du microcapteur est tridimensionnelle. Cependant, compte tenu de la conductivité thermique de la thermopile et du faible rapport d'aspect entre les pistes et la largeur du microcapteur, il est possible de considérer cette couche comme uniforme du point de vue thermique en déterminant une conductivité et une épaisseur moyennées. La température sera donc considérée comme constante suivant l'axe  $x$ , ce qui permet de réduire le problème à deux dimensions (figure 11).

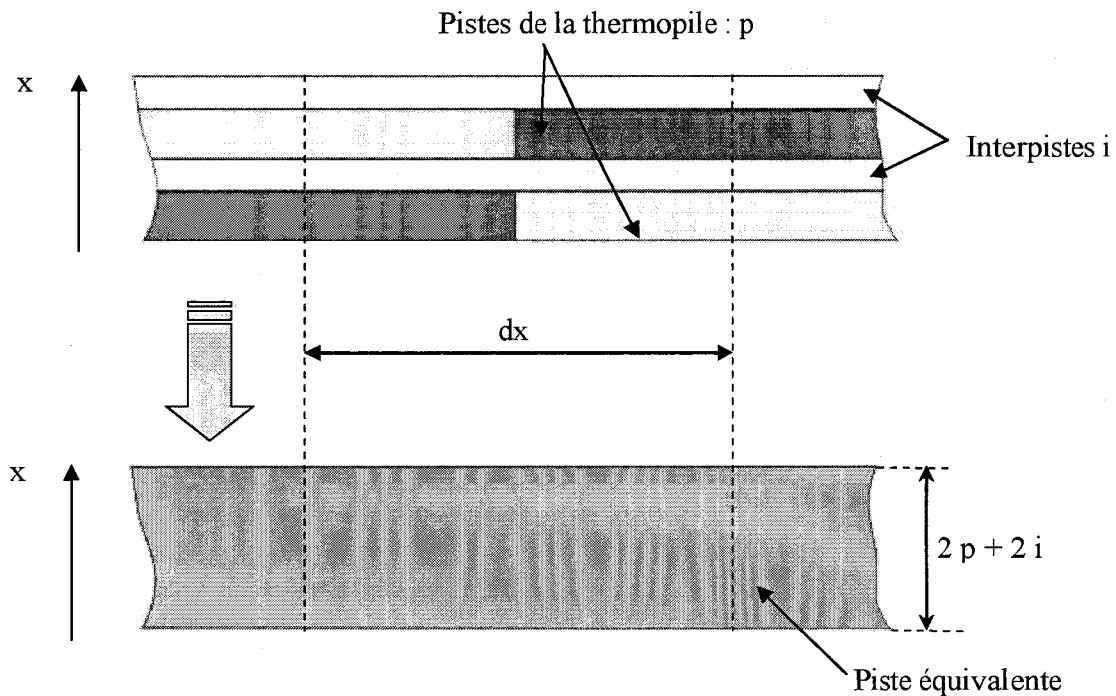


Figure 11 : Définition de la conduction thermique équivalente des pistes (Capteur vu de dessus)

Le modèle ayant été ramené à 2 dimensions, en introduisant la notion de couche équivalente suivant l'épaisseur (figure 12), il pourra encore être réduit d'une dimension.

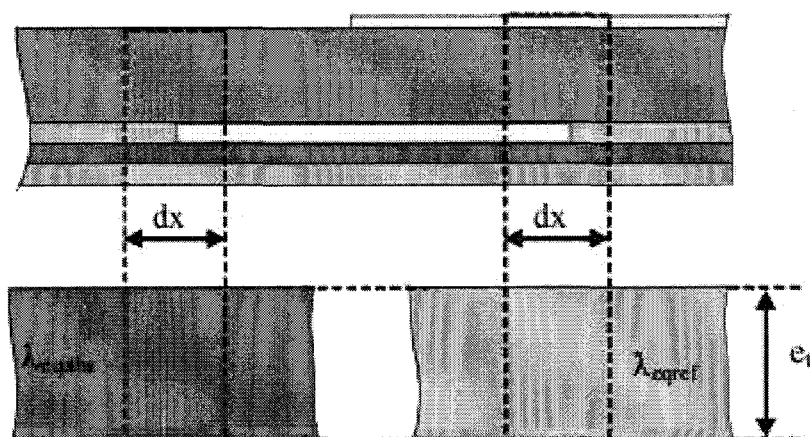


Figure 12 : Couche équivalente de la membrane (vue en coupe)

En fonction de la nature de la zone (absorbante ou réfléchissante), deux couches équivalentes sont définies.

La conductance thermique de la couche équivalente est égale à :

$$Y_{\text{tot}} = Y_A + Y_B + 2 \cdot Y_C \quad (\text{II.2})$$

Avec  $Y_A$  la conductance thermique de la piste polysilicium dopé N in-situ

$Y_B$  la conductance thermique de la piste d'or du second thermoélément

$Y_C$  la conductance thermique de l'interpiste

Pour simplifier les écritures, les différentes couches seront codifiées de la manière suivante :

- 1 : la couche d'oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ )
- 2 : la couche de nitrure de silicium ( $\text{Si}_x\text{N}_y$ )
- 3 : la couche du polysilicium dopé N in-situ
- 4 : la couche de titane (couche d'accrochage pour les thermoéléments en or)
- 5 : la couche d'or du second thermoélément
- 6 : la couche de polyimide
- 7 : la couche de titane (couche d'accrochage pour les réflecteurs)
- 8 : la couche d'or (couche d'or pour les zones réfléchissantes)

Les largeurs et les épaisseurs des différentes couches sont aussi codifiées :

$p$  : largeur de la piste de thermocouples

$i$  : largeur de l'interpiste

$e_n$  : épaisseur de la couche  $n$

$e_t$  : épaisseur totale de la membrane

Par conséquent,

La conductance thermique de piste de polysilicium sans thermoélément or  $Y_A$  est :

$$Y_A = \frac{(\lambda_1 \cdot e_1 + \lambda_2 \cdot e_2 + \lambda_3 \cdot e_3 + \lambda_6 \cdot e_6 + \lambda_7 \cdot e_7 + \lambda_8 \cdot e_8) \cdot p}{dx} \quad (\text{II.3})$$

La conductance thermique de piste polysilicium plaqué or est donnée par la relation suivante :

$$Y_B = \frac{(\lambda_1 \cdot e_1 + \lambda_2 \cdot e_2 + \lambda_3 \cdot e_3 + \lambda_4 \cdot e_4 + \lambda_5 \cdot e_5 + \lambda_6 \cdot e_6 + \lambda_7 \cdot e_7 + \lambda_8 \cdot e_8) \cdot p}{dx} \quad (\text{II.4})$$

La conductance thermique de l'interpiste  $Y_C$  est :

$$Y_C = \frac{(\lambda_1 \cdot e_1 + \lambda_2 \cdot e_2 + \lambda_6 \cdot e_6 + \lambda_7 \cdot e_7 + \lambda_8 \cdot e_8) \cdot i}{dx} \quad (\text{II.5})$$

À partir des équations II.2, II.3 et II.4, la conductance thermique totale est égale à :

$$Y_{\text{tot}} = Y_A + Y_B + 2 \cdot Y_C = \frac{\lambda_{\text{eq}} e_t \cdot (2 \cdot p + 2 \cdot i)}{dx} \quad (\text{II.6})$$

En combinant les équations précédentes,

$$p \cdot (2 \cdot \lambda_1 \cdot e_1 + 2 \cdot \lambda_2 \cdot e_2 + 2 \cdot \lambda_3 \cdot e_3 + \lambda_4 \cdot e_4 + \lambda_5 \cdot e_5 + 5 \cdot \lambda_6 \cdot e_6 + 2 \cdot \lambda_7 \cdot e_7 + 2 \cdot \lambda_8 \cdot e_8) + 2 \cdot i \cdot (\lambda_1 \cdot e_1 + \lambda_2 \cdot e_2 + \lambda_6 \cdot e_6 + \lambda_7 \cdot e_7 + \lambda_8 \cdot e_8) = 2 \cdot \lambda_{\text{eq}} e_t \cdot (p + i) \quad (\text{II.7})$$

$$\lambda_{\text{eq}} \cdot e_t = (\lambda_1 \cdot e_1 + \lambda_2 \cdot e_2 + \lambda_6 \cdot e_6 + \lambda_7 \cdot e_7 + \lambda_8 \cdot e_8) + [(\lambda_4 \cdot e_4 + \lambda_5 \cdot e_5) + 2 \cdot (\lambda_3 \cdot e_3)] \cdot \frac{p}{2 \cdot (p + i)} \quad (\text{II.8})$$

Cette expression de la conductance thermique équivalente prend en compte la zone réfléchrice. Par conséquent, elle sera notée :  $\lambda_{\text{eqref}} \cdot e_t$ .

La conductance thermique équivalente pour la zone absorbante est donc notée :

$$\lambda_{\text{eqabs}} \cdot e_t = (\lambda_1 \cdot e_1 + \lambda_2 \cdot e_2 + \lambda_6 \cdot e_6) + [(\lambda_4 \cdot e_4 + \lambda_5 \cdot e_5) + 2 \cdot (\lambda_3 \cdot e_3)] \cdot \frac{p}{2 \cdot (p + i)} \quad (\text{II.9})$$

## 5.2 Détermination du profil de température le long de la membrane

Après avoir défini les conductances équivalentes, le calcul du champ de température  $T(x)$  le long de la membrane est grandement simplifié.

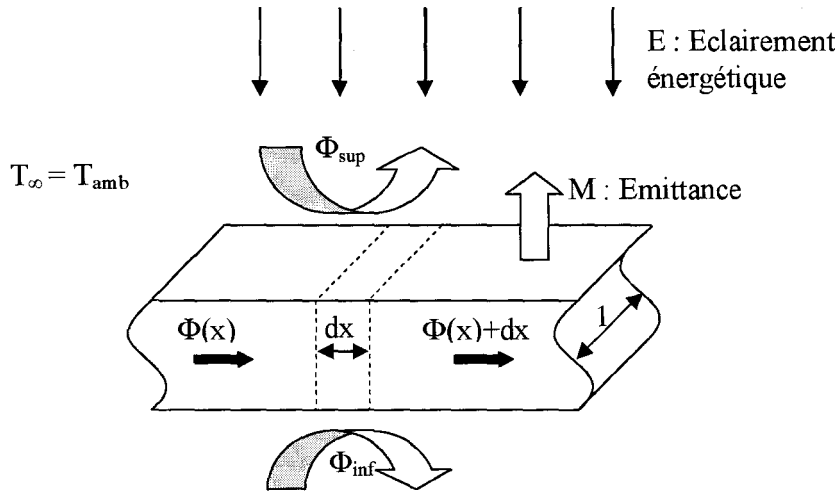


Figure 13 : Bilan thermique dans la membrane de largeur unitaire (section équivalente vue en coupe)

Sur cette cellule de largeur unitaire (figure 13), de longueur  $dx$  et en ramenant le système à une dimension, le bilan thermique peut s'écrire :

$$\Phi(x + dx) = \Phi(x) - \Phi_{sup} - \Phi_{inf} + \Phi_{netR} \quad (\text{W/m}) \quad (\text{II.10})$$

Avec

- $\Phi(x)$  le flux de conduction latéral se propageant dans la couche équivalente
- $\Phi_{sup} = h_{sup} \cdot (T(x) - T_a) \cdot dx$ , le flux convectif échangé par la face supérieure de la membrane
- $\Phi_{inf} = h_{inf} \cdot (T(x) - T_a) \cdot dx$ , le flux convectif échangé par la face inférieure de la membrane
- $\Phi_{netR} = (E - M) \cdot dx$ , le flux de rayonnement absorbé  
où  $E$  représente l'éclairement énergétique et  $M$  l'émission du capteur

L'introduction des deux coefficients d'échange  $h_{sup}$  et  $h_{inf}$  permet de prendre en compte les conditions réelles dans lesquelles seront placés les microcapteurs. Dans la littérature « microsystèmes » [6], [7], le coefficient  $h_{sup}$  utilisé dans ce cas est d'environ  $35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

Le second coefficient  $h_{inf}$  correspond à la conductance thermique de la lame d'air emprisonné entre la membrane et le support, soit :

$$h_{inf} = \frac{\lambda_{air}}{l_{air}} \quad (\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})) \quad (\text{II.11})$$

où  $\lambda_{air}$  représente la conductivité thermique de l'air ( $24 \cdot 10^{-3} \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ) et  $l_{air}$  l'épaisseur de la lame d'air. Dans le cas d'une lame d'air d'épaisseur de  $380 \mu\text{m}$ , la valeur du coefficient d'échange  $h_{inf}$  est de  $63 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .



La température de la membrane exprimée en Kelvin étant très proche de celle du substrat, la densité de flux radiatif net échangé par la membrane lorsqu'elle est soumise à un éclairage énergétique E s'exprime par :

$$\varphi_{\text{netR}} = a \cdot E - \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\text{sub}})^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{II.12})$$

Avec : a l'absorptivité de la surface du microcapteur  
 E l'éclairage énergétique (W/m<sup>2</sup>)  
 ε l'émissivité de la surface du microcapteur  
 σ la constante de Stefan-Boltzmann  
 T<sub>sub</sub> la température du substrat (K)

Soit sur l'élément dx de largeur unitaire :

$$\Phi_{\text{netR}} = \varphi_{\text{netR}} \cdot dx \quad (\text{W/m}) \quad (\text{II.13})$$

A partir de l'équation (II.10) et en dérivant par rapport à x, on obtient la relation suivante :

$$\frac{\Phi(x+dx) - \Phi(x)}{dx} = \frac{d}{dx} \Phi = -h_{\text{sup}} \cdot (T(x) - T_a) - h_{\text{inf}} \cdot (T(x) - T_{\text{sub}}) + \varphi_{\text{netR}} \quad (\text{II.14})$$

Le flux de conduction latéral circulant dans la couche thermoélectrique est régi par l'équation de Fourier :

$$\varphi = -\lambda \text{ grad } T \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{II.15})$$

Soit pour un flux circulant dans la membrane de largeur unitaire et d'épaisseur e<sub>t</sub> :

$$\Phi(x) = -\lambda_{\text{eq}} \cdot e_t \cdot \left( \frac{d}{dx} T \right) \quad (\text{W/m}) \quad (\text{II.16})$$

Établie à partir des équations (II.15) et (II.16), l'équation différentielle suivante permet de déterminer la distribution de la température :

$$\frac{d}{dx} \Phi = -\lambda_{\text{eq}} \cdot e_t \cdot \frac{d^2}{dx^2} T = -h_{\text{sup}} \cdot (T(x) - T_a) \cdot dx - h_{\text{inf}} \cdot (T(x) - T_{\text{sub}}) \cdot dx + \varphi_{\text{netR}} \quad (\text{II.17})$$

Soit encore :

$$\frac{d^2}{dx^2} T - \frac{(h_{\text{inf}} + h_{\text{sup}}) \cdot T(x)}{\lambda_{\text{eq}} \cdot e_t} = \frac{h_{\text{inf}} \cdot T_{\text{sub}} + h_{\text{sup}} \cdot T_a + \varphi_{\text{netR}}}{\lambda_{\text{eq}} \cdot e_t} \quad (\text{II.18})$$

qui se réduit à :

$$\frac{d^2}{dx^2} T - \gamma^2 \cdot T(x) = K \quad (\text{II.19})$$

en posant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma^2 = \frac{h_{\text{inf}} + h_{\text{sup}}}{\lambda_{\text{eq}} \cdot e_t} \end{array} \right. \quad (\text{II.20})$$

où  $\gamma$  représente la constante de propagation de la chaleur le long de la membrane

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{et } K = -\frac{h_{\text{inf}} \cdot T_{\text{sub}} + h_{\text{sup}} \cdot T_a + \Phi_{\text{netR}}}{\lambda_{\text{eq}} \cdot e_t} \end{array} \right. \quad (\text{II.21})$$

où  $K$  représente les échanges de chaleur entre la membrane et le milieu extérieur

La solution générale de cette équation différentielle du second ordre avec second membre est :

$$T(x) = A \cdot e^{\gamma \cdot x} + B \cdot e^{-\gamma \cdot x} - \frac{K}{\gamma^2} \quad (\text{II.22})$$

Ou encore :

$$T(x) = (A + B) \cdot \text{ch}(\gamma \cdot x) + (A - B) \cdot \text{sh}(\gamma \cdot x) - \frac{K}{\gamma^2} \quad (\text{II.23})$$

Les conditions limites permettent de déterminer les coefficients  $A$  et  $B$  qui sont fixés par les valeurs de température et de flux au point  $x = 0$ .

Soit, pour  $x = 0$ ,  $T(0) = T_0$ , ce qui donne :

$$A + B = T_0 + \frac{K}{\gamma^2} \quad (\text{II.24})$$

L'expression de la solution générale devient alors :

$$T(x) = \left( T_0 + \frac{K}{\gamma^2} \right) \cdot \text{ch}(\gamma \cdot x) + (A - B) \cdot \text{sh}(\gamma \cdot x) \quad (\text{II.25})$$

La dérivée de l'expression précédente s'écrit :

$$\frac{d}{dx} T = \left( T_0 + \frac{K}{\gamma^2} \right) \cdot \text{sh}(\gamma \cdot x) + (A - B) \cdot \text{ch}(\gamma \cdot x) \quad (\text{II.26})$$

Sachant que pour  $x = 0$ ,  $\Phi(0) = \Phi_0$  et en utilisant la relation (II.15), on obtient la relation suivante :

$$A - B = \frac{-\Phi_0}{\lambda_{\text{eq}} e_t} \quad (\text{II.27})$$

Les relations (II.23) et (II.26) permettent d'écrire le système suivant :

$$\begin{cases} T(x) = \left( T_0 + \frac{K}{\gamma^2} \right) \cdot \text{ch}(\gamma \cdot x) - \frac{\Phi_0}{\lambda_{\text{eq}} \cdot e_t} \cdot \text{sh}(\gamma \cdot x) - \frac{K}{\gamma^2} & \text{(II.28)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Phi(x) = -\lambda_{\text{eq}} \cdot e_t \cdot \left( T_0 + \frac{K}{\gamma^2} \right) \cdot \text{sh}(\gamma \cdot x) - \Phi_0 \cdot \text{ch}(\gamma \cdot x) & \text{(II.29)} \end{cases}$$

Soit encore sous forme matricielle [8]:

$$\begin{pmatrix} T(x) \\ \Phi(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{ch}(\gamma \cdot x) & \frac{-\text{sh}(\gamma \cdot x)}{\lambda_{\text{eq}} \cdot e_t} \\ -\lambda_{\text{eq}} \cdot e_t \cdot \text{sh}(\gamma \cdot x) & \text{ch}(\gamma \cdot x) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_0 \\ \Phi_0 \end{pmatrix} + \frac{K}{\gamma^2} \cdot \begin{pmatrix} \text{ch}(\gamma \cdot x) - 1 \\ -\lambda_{\text{eq}} \cdot e_t \cdot \text{sh}(\gamma \cdot x) \end{pmatrix} \quad \text{(II.30)}$$

Les microcapteurs étant composés de parties absorbantes et de parties réfléchissantes, le modèle met en œuvre deux systèmes de matrices correspondant à chacune de ces deux parties.

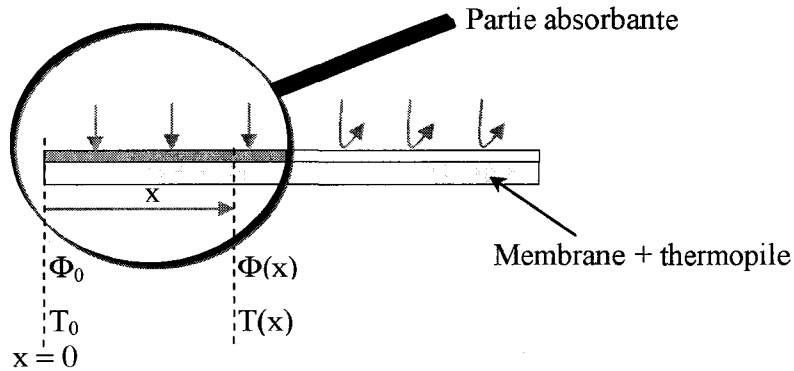


Figure 14 : Schéma utilisé pour le calcul du profil de température le long de la partie absorbante de la membrane

Pour les zones absorbantes (figure 14), le système matriciel s'écrit :

$$\begin{pmatrix} T(x) \\ \Phi(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) & \frac{-\text{sh}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x)}{\lambda_{\text{eqabs}} \cdot e_t} \\ -\lambda_{\text{eqabs}} \cdot e_t \cdot \text{sh}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) & \text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_0 \\ \Phi_0 \end{pmatrix} + \frac{K_{\text{abs}}}{(\gamma_{\text{abs}})^2} \cdot \begin{pmatrix} \text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) - 1 \\ -\lambda_{\text{eqabs}} \cdot e_t \cdot \text{sh}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) \end{pmatrix} \quad \text{(II.31)}$$

Soit :

$$\begin{pmatrix} T(x) \\ \Phi(x) \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{\text{abs}} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_0 \\ \Phi_0 \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{\text{abs}} \end{vmatrix} \quad \text{(II.32)}$$

En posant :

$$M_{\text{abs}} = \begin{pmatrix} \text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) & \frac{-\text{sh}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x)}{\lambda_{\text{eqabs}} \cdot \epsilon_t} \\ -\lambda_{\text{eqabs}} \cdot \epsilon_t \cdot \text{sh}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) & \text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) \end{pmatrix} \quad (\text{II.33})$$

$$M^{\text{r}}_{\text{abs}} = \frac{K_{\text{abs}}}{(\gamma_{\text{abs}})^2} \begin{pmatrix} \text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) - 1 \\ -\lambda_{\text{eqabs}} \cdot \epsilon_t \cdot \text{sh}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) \end{pmatrix} \quad (\text{II.34})$$

$$\gamma_{\text{abs}} = \sqrt{\frac{h_{\text{inf}} + h_{\text{sup}}}{\lambda_{\text{eqabs}} \cdot \epsilon_t}} \quad (\text{II.35})$$

$$K_{\text{abs}} = \frac{-(h_{\text{inf}} + h_{\text{sup}}) \cdot T_a + (\Phi_{\text{netR}})_{\text{abs}}}{\lambda_{\text{eqabs}} \cdot \epsilon_t} \quad (\text{II.36})$$

$$(\Phi_{\text{netR}})_{\text{abs}} = a_{\text{abs}} \cdot E - \epsilon_{\text{abs}} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{sub}})^4 \quad (\text{II.37})$$

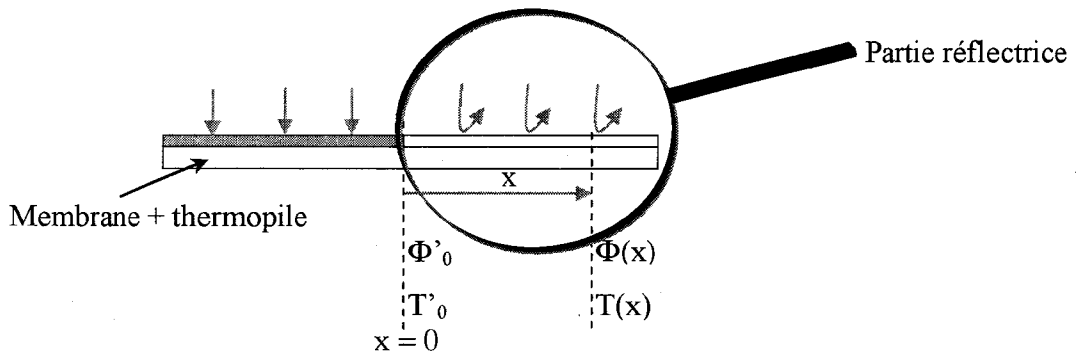


Figure 15 : Schéma utilisé pour le calcul du profil de température le long de la partie réfléchissante de la membrane

Pour les zones réfléchissantes (figure 15), la matrice devient :

$$\begin{pmatrix} T(x) \\ \Phi(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{ch}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) & \frac{-\text{sh}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x)}{\lambda_{\text{eqref}} \cdot \epsilon_t} \\ -\lambda_{\text{eqref}} \cdot \epsilon_t \cdot \text{sh}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) & \text{ch}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_0 \\ \Phi_0 \end{pmatrix} + \frac{K_{\text{ref}}}{(\gamma_{\text{ref}})^2} \begin{pmatrix} \text{ch}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) - 1 \\ -\lambda_{\text{eqref}} \cdot \epsilon_t \cdot \text{sh}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) \end{pmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Soit :

$$\begin{pmatrix} T(x) \\ \Phi(x) \end{pmatrix} = \left| M_{\text{ref}} \right| \cdot \begin{pmatrix} T_0 \\ \Phi_0 \end{pmatrix} + \left| M^{\text{r}}_{\text{ref}} \right| \quad (\text{II.39})$$

En posant :

$$M_{\text{ref}} = \begin{pmatrix} \text{ch}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) & \frac{-\text{sh}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x)}{\lambda_{\text{eqref}} \cdot e_t} \\ -\lambda_{\text{eqref}} \cdot e_t \cdot \text{sh}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) & \text{ch}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) \end{pmatrix} \quad (\text{II.40})$$

$$M'_{\text{ref}} = \frac{K_{\text{ref}}}{(\gamma_{\text{ref}})^2} \begin{pmatrix} \text{ch}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) - 1 \\ -\lambda_{\text{eqref}} \cdot e_t \cdot \text{sh}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) \end{pmatrix} \quad (\text{II.41})$$

$$\gamma_{\text{ref}} = \sqrt{\frac{h_{\text{inf}} + h_{\text{sup}}}{\lambda_{\text{eqref}} \cdot e_t}} \quad (\text{II.42})$$

$$K_{\text{ref}} = \frac{-(h_{\text{inf}} + h_{\text{sup}}) \cdot T_a + (\Phi_{\text{netR}})_{\text{ref}}}{\lambda_{\text{eqref}} \cdot e_t} \quad (\text{II.43})$$

$$(\Phi_{\text{netR}})_{\text{ref}} = a_{\text{ref}} \cdot E - \varepsilon_{\text{ref}} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{sub}})^4 \quad (\text{II.44})$$

Un capteur est constitué d'une succession de  $n$  zones absorbantes et réfléchissantes recouvrant la membrane. Il est possible de commencer l'étude par une zone absorbante ou une zone réfléchissante sur l'extrémité gauche de la membrane. Un microcapteur commençant par une zone absorbante est représenté schématiquement figure 16. Les frontières entre deux zones réfléchissantes et absorbantes sont notées : 1, 2, 3, ...  $i$ ,  $i+1$ , ...  $n$ ,  $n+1$ .

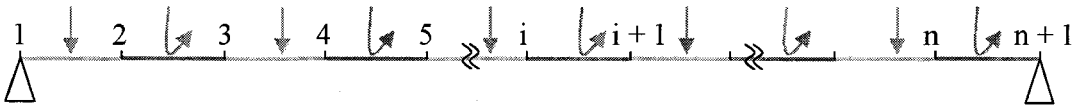


Figure 16 : Schéma d'un microcapteur commençant par une zone absorbante à l'extrémité gauche

Les relations matricielles ( $M_{\text{abs}}$ ,  $M'_{\text{abs}}$ ,  $M_{\text{ref}}$  et  $M'_{\text{ref}}$ ) ayant été définies précédemment, il suffit alors de les appliquer pour décrire la structure périodique du microcapteur commençant par une zone absorbante ou réfléchissante, soit, dans le cas général :

$$\begin{pmatrix} T_2 \\ \Phi_2 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{\text{abs}} \\ \text{ou} \\ M_{\text{ref}} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_1 \\ \Phi_1 \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{\text{abs}} \\ \text{ou} \\ M'_{\text{ref}} \end{vmatrix} \quad (\text{II.45})$$

$$\begin{pmatrix} T_3 \\ \Phi_3 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{\text{ref}} \\ \text{ou} \\ M_{\text{abs}} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_2 \\ \Phi_2 \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{\text{ref}} \\ \text{ou} \\ M'_{\text{abs}} \end{vmatrix} \quad (\text{II.46})$$

$$\begin{pmatrix} T_4 \\ \Phi_4 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{abs} \\ \text{ou} \\ M_{ref} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_3 \\ \Phi_3 \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{abs} \\ \text{ou} \\ M'_{ref} \end{vmatrix} \quad (\text{II.47})$$

⋮            ⋮            ⋮            ⋮

$$\begin{pmatrix} T_i \\ \Phi_i \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{abs} \\ \text{ou} \\ M_{ref} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_{i-1} \\ \Phi_{i-1} \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{abs} \\ \text{ou} \\ M'_{ref} \end{vmatrix} \quad (\text{II.48})$$

$$\begin{pmatrix} T_{i+1} \\ \Phi_{i+1} \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{abs} \\ \text{ou} \\ M_{ref} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_i \\ \Phi_i \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{abs} \\ \text{ou} \\ M'_{ref} \end{vmatrix} \quad (\text{II.49})$$

⋮            ⋮            ⋮            ⋮

$$\begin{pmatrix} T_n \\ \Phi_n \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{abs} \\ \text{ou} \\ M_{ref} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_{n-1} \\ \Phi_{n-1} \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{abs} \\ \text{ou} \\ M'_{ref} \end{vmatrix} \quad (\text{II.50})$$

$$\begin{pmatrix} T_{n+1} \\ \Phi_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{abs} \\ \text{ou} \\ M_{ref} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_n \\ \Phi_n \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{abs} \\ \text{ou} \\ M'_{ref} \end{vmatrix} \quad (\text{II.51})$$

La résolution de ce système matriciel permet de calculer les valeurs des flux et des températures qui constitueront les conditions limites aux frontières de chaque zone absorbante ou réfléchissante. Les jonctions des thermocouples sont situées sous chacune de ces zones. En notant les températures de ces jonctions  $T_{J0}, T_{J1}, \dots, T_{Jn}$  (figure 17), la tension délivrée par le microcapteur s'écrit :

Pour un nombre pair  $n$  de zones :

$$V = (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot [ (T_{J1} - T_{J0}) + (T_{J3} - T_{J2}) + (T_{J5} - T_{J4}) + \dots + (T_{J_{n+1}} - T_{J_n}) ] \quad (\text{II.52})$$

Pour un nombre impair  $n$  de zones :

$$V = (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot [ (T_{J1} - T_{J0}) + (T_{J3} - T_{J2}) + (T_{J5} - T_{J4}) + \dots + (T_{J_n} - T_{J_{n-1}}) ] \quad (\text{II.53})$$

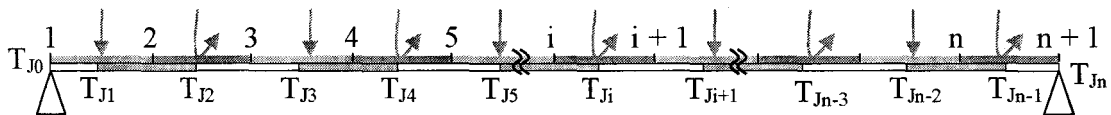


Figure 17 : Schéma d'un microcapteur avec plusieurs zones absorbantes et réfléchissantes

Il restera à déterminer pour chaque partie absorbante ou réfléchissante, les positions optimales des jonctions thermoélectriques afin de rendre maximale la tension délivrée et minimaux les différents facteurs d'influence du capteur qui sont décrits dans la partie suivante.

## 6 Etude de différentes configurations de microcapteurs

### 6.1 Définitions des principales caractéristiques à optimiser

Comme nous l'avons décrit dans le paragraphe précédent, la f.e.m. délivrée par un microcapteur du laboratoire est fonction de l'éclairement énergétique (E), de la température d'air (Ta), du coefficient d'échange thermique (h) représenté par la vitesse de l'air (u) circulant face au microcapteur et enfin de sa température de surface qui sera considérée comme voisine de la température du substrat (T<sub>sub</sub>).

Dans ces conditions la variation de la f.e.m. s'écrit :

$$dV = \left( \frac{\partial V}{\partial E} \right)_{T_a, T_{sub}, u = \text{ctes}} \cdot dE + \left( \frac{\partial V}{\partial T_a} \right)_{E, T_{sub}, u = \text{ctes}} \cdot dT_a + \left( \frac{\partial V}{\partial T_{sub}} \right)_{E, T_a, u = \text{ctes}} \cdot dT_{sub} + \left( \frac{\partial V}{\partial u} \right)_{E, T_a, T_{sub} = \text{ctes}} \cdot du \quad (\text{II.54})$$

Le mesurande étant l'éclairement énergétique E, la relation précédente peut encore s'écrire :

$$dV = S_E \cdot dE + \left( \frac{\partial V}{\partial T_a} \right)_{E, T_{sub}, u = \text{ctes}} \cdot dT_a + \left( \frac{\partial V}{\partial T_{sub}} \right)_{E, T_a, u = \text{ctes}} \cdot dT_{sub} + \left( \frac{\partial V}{\partial u} \right)_{E, T_a, T_{sub} = \text{ctes}} \cdot du \quad (\text{II.55})$$

Ou encore :

$$dV = S_E ( dE + C_{T_a} \cdot dT_a + C_{T_{sub}} \cdot dT_{sub} + C_u \cdot du ) \quad (\text{II.56})$$

Avec :

- S<sub>E</sub> : la sensibilité à l'éclairement énergétique E en μV/(W.m<sup>-2</sup>)

$$S_E = \left( \frac{\partial V}{\partial E} \right)_{T_a, T_{sub}, u = \text{ctes}} \quad (\text{II.57})$$

- C<sub>T<sub>a</sub></sub> : le coefficient d'influence de la température ambiante en W/(m<sup>2</sup> . °C)

$$C_{T_a} = \frac{1}{S_E} \left( \frac{\partial V}{\partial T_a} \right)_{E, T_{sub}, u = \text{ctes}} \quad (\text{II.58})$$

- C<sub>T<sub>sub</sub></sub> : le coefficient d'influence de la température du substrat en W/(m<sup>2</sup> . °C)

$$C_{T_{sub}} = \frac{1}{S_E} \left( \frac{\partial V}{\partial T_{sub}} \right)_{E, T_a, u = \text{ctes}} \quad (\text{II.59})$$

- $C_u$  : le coefficient d'influence de la vitesse d'air en  $W.s/m^3$

$$C_u = \frac{1}{S_E} \left( \frac{\partial V}{\partial u} \right)_{E, T_a, T_{sub} = \text{ctes}} \quad (\text{II.60})$$

Pour l'étude de chaque configuration de microcapteur, la même méthode de calcul va être mise en œuvre afin de déterminer la sensibilité à l'éclairement énergétique ( $S_E$ ) et le coefficient d'influence de la température ambiante ( $C_{T_a}$ ). Il s'agit en effet d'obtenir une sensibilité maximale et un coefficient d'influence de la température d'air proche de zéro, les deux autres coefficients d'influence  $C_{T_{sub}}$  et  $C_u$  n'étant pas pris en compte pour l'optimisation car il n'est pas possible de les annuler.

Pour déterminer la sensibilité à l'éclairement  $S_E$  suivant les relations,

$$S_E = \left( \frac{\partial V}{\partial E} \right)_{T_a, T_{sub}, h = \text{ctes}} \cdot dE \quad \text{ou} \quad S_E = \left( \frac{\Delta V}{\Delta E} \right)_{T_a, T_{sub}, h = \text{ctes}} \cdot dE \quad (\text{II.61})$$

le modèle est utilisé en appliquant deux valeurs très proches de l'éclairement énergétique  $E$  autour de  $1000 \text{ W/m}^2$  et en relevant les deux f.e.m. correspondantes. La f.e.m. délivrée  $V$  étant une fonction linéaire de  $E$ , cette méthode qui met en œuvre des variations non infinitésimales donne néanmoins des résultats exacts. Le coefficient d'influence de la température d'air ( $C_{T_a}$ ) est calculé autour de  $T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  suivant la même méthode puisque  $V$  est également une fonction linéaire de  $T_a$  :

$$C_{T_a} = \frac{1}{S_E} \left( \frac{\Delta V}{\Delta T_a} \right)_{E, T_{sub}, h = \text{ctes}} \cdot dT_a \quad (\text{II.62})$$

La sensibilité à l'éclairement n'est pas suffisante pour évaluer les performances d'un capteur car elle ne prend pas en compte sa résistance électrique interne. C'est pourquoi, la détectivité sera calculée, le but étant de caractériser le capteur par rapport à son bruit de fond et de qualifier son aptitude à détecter des signaux faibles. Afin de définir chaque capteur indépendamment de sa surface active, la détectivité spécifique [9] est privilégiée et s'écrit :

$$D^* = \frac{S_E}{\sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot S_{surf} \cdot R_{el} \cdot \Delta f}} \quad (\text{m.Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}) \quad (\text{II.63})$$

Avec  $S_E$  : la sensibilité à l'éclairement ( $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ )  
 $k$  : la constante de Boltzmann (J/K)  
 $T$  : la température (K)  
 $S_{surf}$  : la surface active du microcapteur ( $\text{m}^2$ )  
 $R_{el}$  : la résistance électrique interne ( $\Omega$ )  
 $\Delta f$  : bande passante (Hz)

Ce paramètre sera optimisé à l'aide d'une nouvelle structure de thermopile présentée par la suite.



## 6.2 Etude d'un microcapteur comportant une seule zone absorbante

Pour commencer cette analyse des différents profils de température le long de la membrane, nous allons nous attarder sur le cas d'une membrane étant uniquement recouverte d'absorbant infrarouge. Cette simulation correspond à une structure classique largement répandue dans les microcapteurs industriels. La différence essentielle entre un microcapteur industriel et un microcapteur IEMN est liée à l'encapsulation qui permet de maintenir l'air environnant la membrane à la température du substrat (figure 18 a). Dans le cas des capteurs non encapsulés de l'IEMN, il faut prendre en compte la température de l'air différente de celle du substrat (figure 18 b).

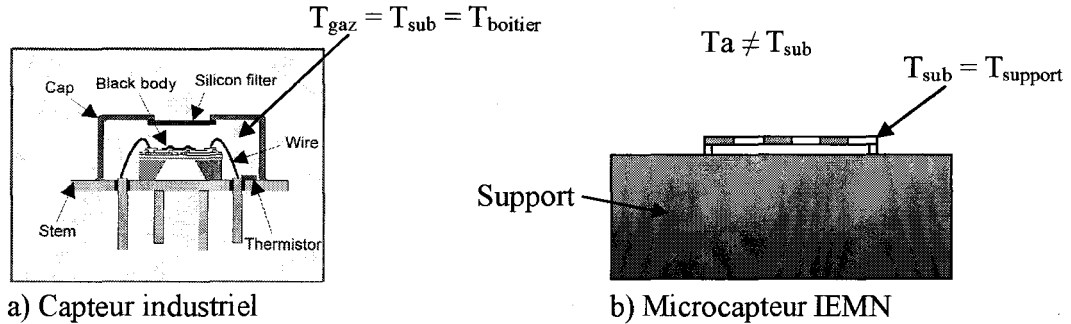


Figure 18 : Schéma comparatif entre des microcapteurs industriels et IEMN

Le microcapteur constitué d'une seule zone absorbante ( $n = 1$ ) est schématisé figure 19 :

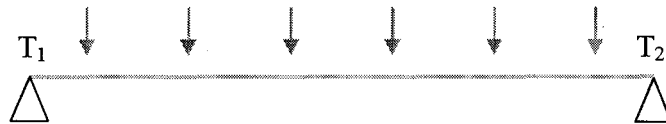


Figure 19 : Schéma d'une membrane munie d'une seule zone absorbante

Le système matriciel se réduit à :

$$\begin{pmatrix} T_2 \\ \Phi_2 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{\text{abs}} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_1 \\ \Phi_1 \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{\text{abs}} \end{vmatrix} \quad (\text{II.64})$$

Les extrémités de la membrane sont à la température du substrat, soient les conditions limites sont donc les suivantes :

$$\begin{aligned} \text{CL}_1 : T_1 &= T_{\text{sub}} \\ \text{CL}_2 : T_2 &= T_{\text{sub}} \end{aligned} \quad (\text{II.65})$$

Les flux  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$  sont calculés à partir des équations provenant de la relation matricielle précédente.

Le profil de température entre  $T_1$  et  $T_2$  est ensuite déterminé à l'aide de l'équation suivante issue de la relation matricielle (II.32) :

$$T(x) = \text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) \cdot T_{\text{sub}} - \frac{\text{sh}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x)}{\lambda_{\text{eqabs}} e_t} \cdot \Phi_1 + \frac{K_{\text{abs}}}{(\gamma_{\text{abs}})^2} \cdot (\text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) - 1) \quad (\text{II.66})$$

Le circuit thermoélectrique est composé d'un seul thermocouple par piste. La jonction chaude  $J_1$  (de température  $T_{J1}$ ) est disposée sous la membrane absorbante et les jonctions froides  $J_0$  et  $J_2$  sur le substrat (de température  $T_{J0} = T_{J2} = T_{\text{sub}}$ ). La tension délivrée par le thermocouple peut être exprimée à partir de la relation (II.53) avec  $n = 1$  :

$$V = (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot (T_{J1} - T_{\text{sub}}) \quad (\text{II.67})$$

L'évolution de la température de la membrane, liée à une variation de l'éclairement énergétique puis de la température d'air dans les conditions décrites au paragraphe 6.1, est représentée figure 20.

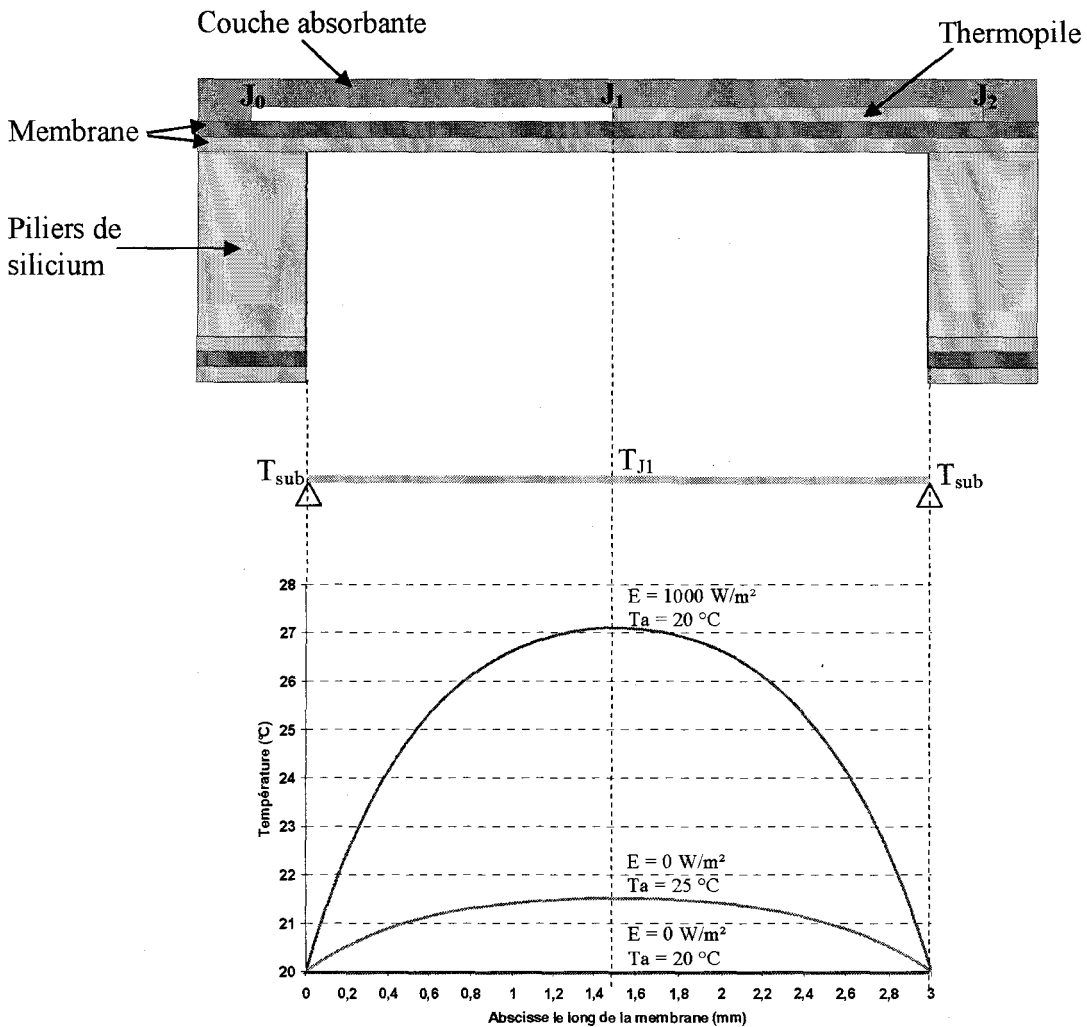


Figure 20 : Schéma du microcapteur et profils de température le long de la membrane

La courbe supérieure représente le profil de température lorsque le capteur est soumis à un éclairage énergétique ( $E = 1000 \text{ W/m}^2$ ) et la température d'air étant égale à la température du substrat ( $T_a = T_{\text{sub}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Le maximum de la température se situe au centre de la membrane et atteint environ  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ . Lorsque l'éclairage énergétique  $E$  est nul et que la température d'air est fixée  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , le maximum de température atteint  $21,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Il apparaît donc que ce type de capteur est extrêmement sensible à la température de l'air environnant, comme le montre la valeur élevée du coefficient de dépendance à la température d'air ( $C_{T_a}$ ) dans le tableau 3.

Lors de l'étude d'un cas extrême (figure 21) avec une longueur de membrane de  $15 \text{ mm}$ , on observe que la température maximale présente un palier. Par conséquent, malgré l'allongement de la membrane correspondant à une augmentation de la zone absorbante, la sensibilité à l'éclairage énergétique du microcapteur reste constante. Il existe donc une longueur optimale de membrane.

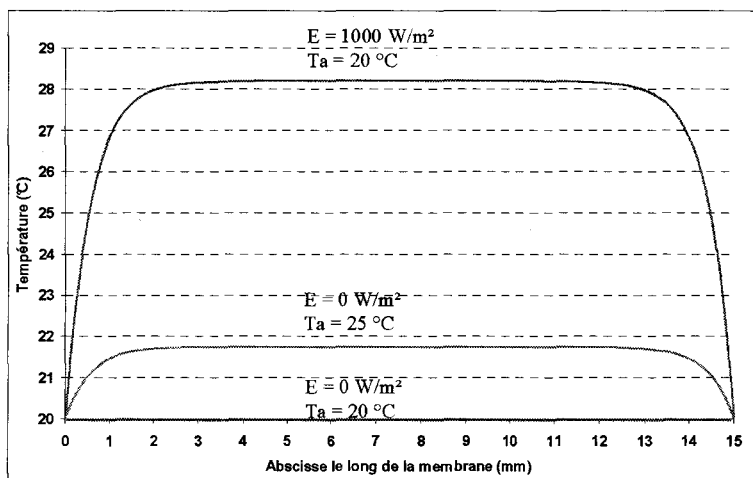


Figure 21 : Cas extrême d'une membrane de longueur 15 mm

Les résultats obtenus pour différentes longueurs de membrane sont résumés dans le tableau 3.

Longueur de la membrane (mm)	1	2	3	4	5	6	8	10	15
$S_E/\text{piste}$ ( $\mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ )	0,67	1,50	1,91	2,09	2,16	2,19	2,21	2,21	2,21
$C_{T_a}/\text{piste}$ ( $\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$ )	42,5	42,6	42,8	42,7	42,7	42,7	42,6	42,7	42,7

Tableau 3 : Caractéristiques d'un microcapteur muni d'une membrane toute absorbante

Pour cette membrane toute absorbante, les résultats montrent que le coefficient d'influence de la température d'air  $C_{T_a}$  est très élevé et constant quelle que soit la longueur. Par conséquent, il est indispensable d'encapsuler le microcapteur afin de l'isoler des variations de la température d'air qui perturbent la mesure. Cette solution entraîne un surcoût important sur le produit fini.

Pour pallier cette contrainte technique et économique, nous développons depuis plusieurs années des microcapteurs radiatifs infrarouges basés sur une distribution périodique de zones absorbantes et réfléchissantes. Cette structure, qui a fait l'objet d'un brevet [4], permet de compenser les effets de la température d'air, comme nous allons le démontrer par la suite.

### 6.3 Etude d'un microcapteur à deux zones

Le microcapteur constitué d'une zone absorbante et d'une zone réfléchissante est schématisé figure 22 :

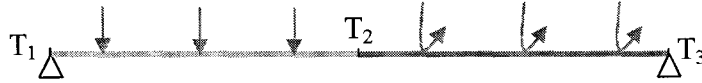


Figure 22 : Schéma d'un microcapteur à deux zones

Pour l'étude de cette configuration, le système matriciel s'écrit :

$$\begin{pmatrix} T_2 \\ \Phi_2 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{\text{abs}} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_1 \\ \Phi_1 \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{\text{abs}} \end{vmatrix} \quad (\text{II.68})$$

$$\begin{pmatrix} T_3 \\ \Phi_3 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{\text{ref}} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_2 \\ \Phi_2 \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{\text{ref}} \end{vmatrix} \quad (\text{II.69})$$

Les conditions limites aux extrémités de la membrane sont:

$$\text{CL}_1 : T_1 = T_{\text{sub}}$$

$$\text{CL}_2 : T_3 = T_{\text{sub}}$$

Il est alors possible de déterminer les flux  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  et la température  $T_2$ . L'équation suivante donne le profil de température entre  $T_1$  et  $T_2$  :

$$T(x) = \text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) \cdot T_{\text{sub}} - \frac{\text{sh}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x)}{\lambda_{\text{eqabs}} e_t} \cdot \Phi_1 + \frac{K_{\text{abs}}}{(\gamma_{\text{abs}})^2} \cdot (\text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) - 1) \quad (\text{II.70})$$

Entre  $T_2$  et  $T_3$ , on a :

$$T(x) = \text{ch}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) \cdot T_2 - \frac{\text{sh}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x)}{\lambda_{\text{eqref}} e_t} \cdot \Phi_2 + \frac{K_{\text{ref}}}{(\gamma_{\text{ref}})^2} \cdot (\text{ch}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) - 1) \quad (\text{II.71})$$

On positionne une jonction ( $J_1$  de température  $T_{J1}$ ) sous la zone absorbante et une autre ( $J_2$  de température  $T_{J2}$ ) sous la zone réfléchissante. Les jonctions froides  $J_0$  et  $J_3$  sont situées aux extrémités de la membrane sur le substrat ( $T_{J0} = T_{J3} = T_{sub}$ ). La tension délivrée par cette piste thermoélectrique peut être exprimée à partir de la relation (II.52) pour  $n = 2$ , ce qui donne :

$$V = (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot (T_{J2} - T_{J1}) \quad (II.72)$$

Le microcapteur est étudié dans les mêmes conditions de variations d'éclairement et de température d'air que précédemment. Les profils de température de membrane correspondants sont représentés figure 23.

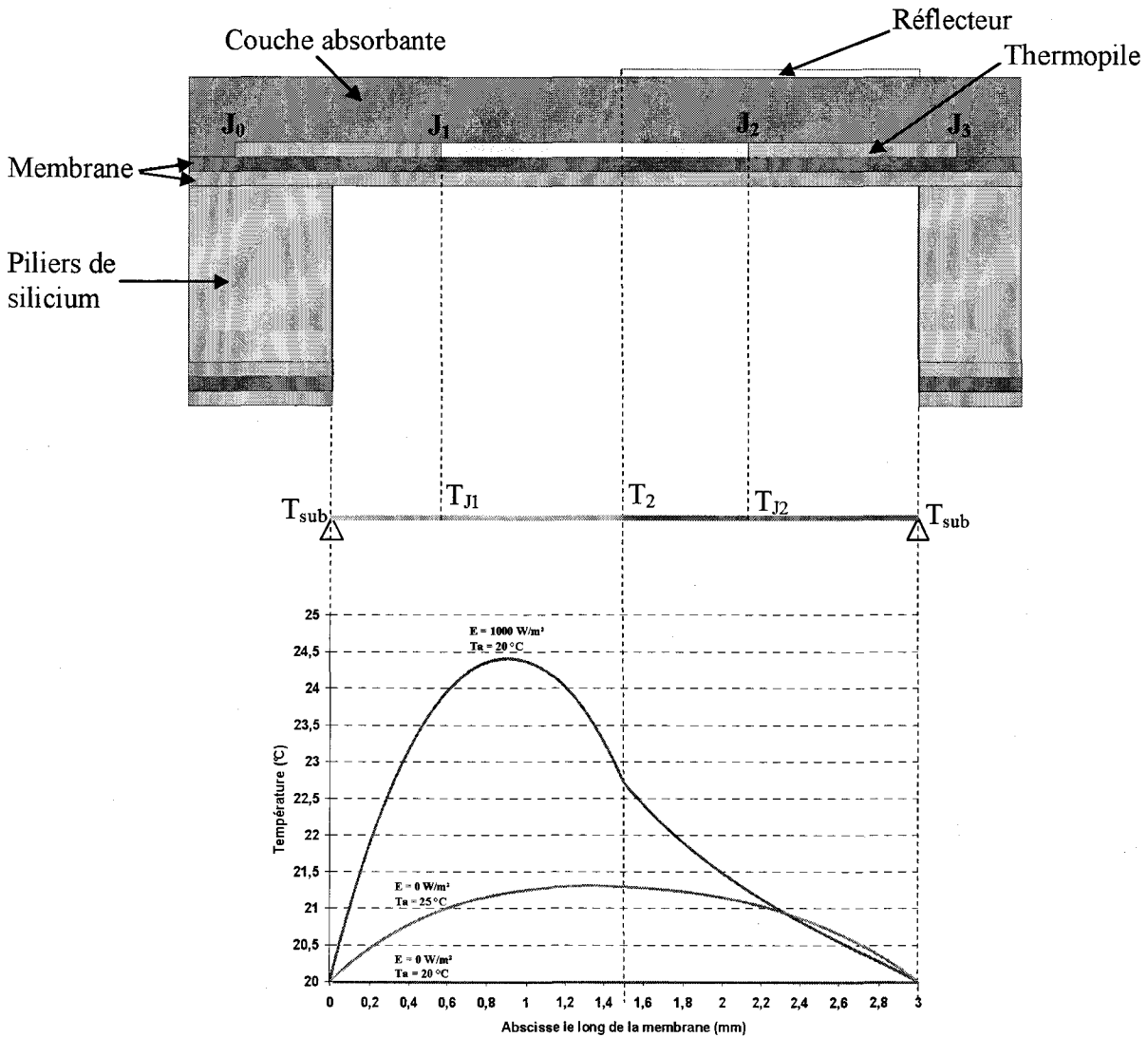


Figure 23 : Schéma d'un microcapteur avec deux zones différentes et profil de température le long de sa membrane

L'évolution spatiale de la température est totalement différente suivant que la zone est absorbante ou réfléchrice. Pour compenser l'influence de la température ambiante et optimiser la sensibilité, une méthode numérique de positionnement des jonctions a été développée. Un exemple mettant en œuvre cette méthode de calcul est proposé dans la partie suivante.

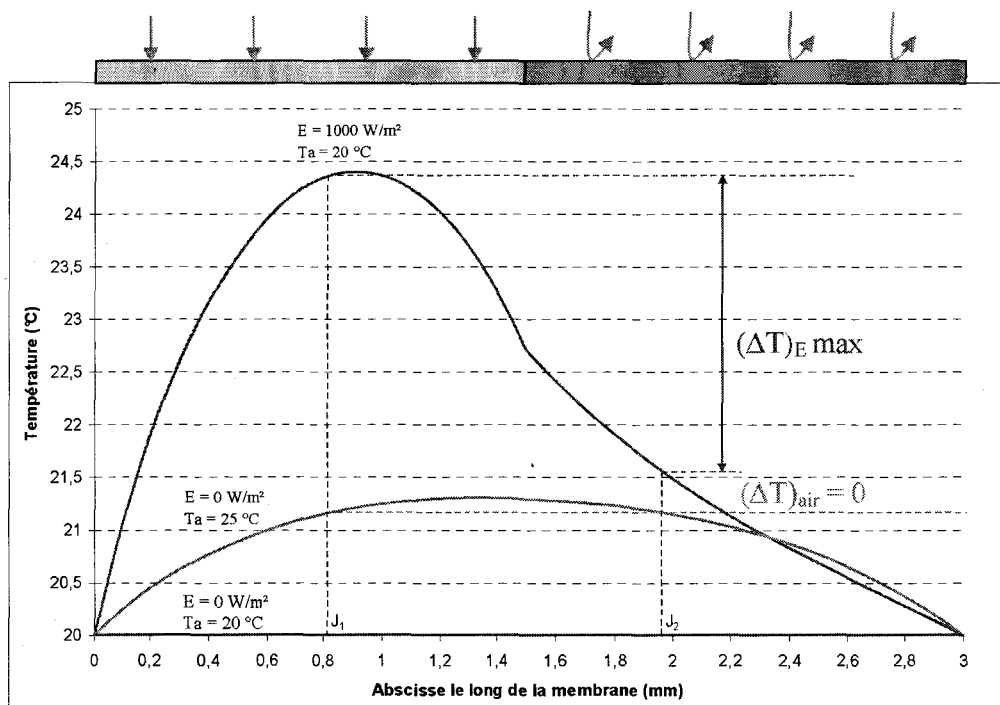


Figure 24 : Exemple de positionnement des jonctions

A partir des valeurs de températures calculées par le modèle (figure 24), ce programme établi sous "Mathcad" permet de déterminer les positions optimales des jonctions sous la zone réfléchrice et la zone absorbante. Il s'agit en effet d'obtenir un écart de température entre la jonction chaude et froide essentiellement généré par la variation de l'éclairement énergétique et non par la variation de la température d'air. Les données des températures de chaque abscisse sont stockées dans des tableaux pour chacune des deux courbes. Pour chaque position possible de la jonction chaude (par exemple  $J_1$ ) sous la zone absorbante, on recherche à partir du tableau de valeurs contenant les données où l'éclairement énergétique  $E = 0 \text{ W/m}^2$ , la position de la jonction froide ( $J_2$ ) pour laquelle la différence de température  $(\Delta T)_{\text{air}}$ , induite par la variation de la température d'air, est nulle. Pour chaque couple de jonction chaude et froide ainsi définies, on calcule à partir du tableau contenant les données où l'éclairement  $E = 1000 \text{ W/m}^2$ , l'écart de température  $(\Delta T)_E$  entre ces jonctions. L'objectif est de déterminer cet écart  $(\Delta T)_E$  maximum et les positions des jonctions correspondantes.

Pour la suite de l'étude, les longueurs de la membrane et des zones réfléchrices et absorbantes seront optimisées à partir de ce modèle pour obtenir une sensibilité à l'éclairement maximale.

En effet, le rapport entre la longueur de la zone absorbante et celle de la zone réfléchrice joue un rôle important. Pour des longueurs extrêmes de la zone absorbante (20 % ou 80 % de la longueur totale), la sensibilité est très faible. Les calculs ont montré que quelle que soit la

longueur de la membrane, la configuration optimale est obtenue lorsque la longueur de la zone réflectrice est égale à celle de la zone absorbante.

Les résultats du modèle établi avec des longueurs de zones égales sont résumés dans le tableau 4 :

Longueur de la membrane (mm)	1	2	3	4	5	6	10	15	20
Sensibilité/piste ( $\mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^2)$ )	0,12	0,43	0,79	1,12	1,38	1,59	1,96	2,07	2,09
$CT_a$ /piste ( $\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$ )	$< 0,1$								

Tableau 4 : Caractéristiques d'un microcapteur avec une zone absorbante et une zone réflectrice

Au-delà d'une longueur de membrane de 15 mm,  $S_E$  tend vers une limite de  $2,1\mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^2)$ . Par conséquent, pour des longueurs importantes (figure 25), il existe un grand nombre de couples de jonctions chaudes et froides répondant à la condition  $CT_a < 0,1$ . Cette valeur a été choisie afin qu'une variation de la température d'air de  $1^\circ\text{C}$  provoque la même variation de f.e.m. qu'une variation d'éclairement énergétique de  $0,1 \text{ W}/\text{m}^2$  (relation II.56) qui est une valeur extrêmement faible. En influence totale, cela représente par exemple une variation de température de cible de  $0,016^\circ\text{C}$  autour de  $27^\circ\text{C}$  (300K).

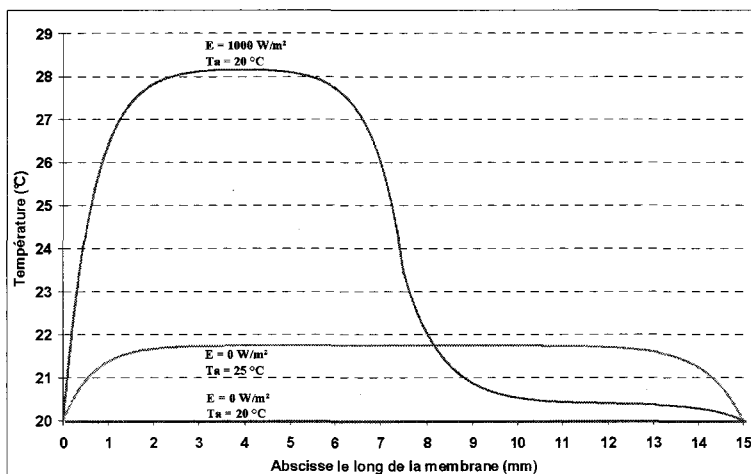


Figure 25 : Profils de température obtenue pour une membrane trop longue

### 6.4 Etude d'un microcapteur à trois zones

Ce microcapteur composé d'une zone centrale réfléchissante et de deux zones absorbantes est schématisé ci-dessous (figure 26) :



Figure 26 : Schéma d'un microcapteur à trois zones

Le système matriciel associé est:

$$\begin{pmatrix} T_2 \\ \Phi_2 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{\text{abs}} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_1 \\ \Phi_1 \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{\text{abs}} \end{vmatrix} \quad (\text{II.73})$$

$$\begin{pmatrix} T_3 \\ \Phi_3 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{\text{ref}} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_2 \\ \Phi_2 \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{\text{ref}} \end{vmatrix} \quad (\text{II.74})$$

$$\begin{pmatrix} T_4 \\ \Phi_4 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{\text{abs}} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_3 \\ \Phi_3 \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{\text{abs}} \end{vmatrix} \quad (\text{II.75})$$

Les conditions limites de part et d'autre de la membrane sont les suivantes :

$$\text{CL}_1 : T_1 = T_{\text{sub}}$$

$$\text{CL}_2 : T_4 = T_{\text{sub}}$$

Il est alors possible de déterminer les flux  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$  et les températures  $T_2$  et  $T_3$ . L'équation ci-dessous donne le profil de température entre  $T_1$  et  $T_2$  :

$$T(x) = \text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) \cdot T_{\text{sub}} - \frac{\text{sh}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x)}{\lambda_{\text{eqabs}} e_t} \cdot \Phi_1 + \frac{K_{\text{abs}}}{(\gamma_{\text{abs}})^2} \cdot (\text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) - 1) \quad (\text{II.76})$$

Entre  $T_2$  et  $T_3$ , on a :

$$T(x) = \text{ch}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) \cdot T_2 - \frac{\text{sh}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x)}{\lambda_{\text{eqref}} e_t} \cdot \Phi_2 + \frac{K_{\text{ref}}}{(\gamma_{\text{ref}})^2} \cdot (\text{ch}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) - 1) \quad (\text{II.77})$$

Et enfin  $T_3$  et  $T_4$  :

$$T(x) = \text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) \cdot T_3 - \frac{\text{sh}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x)}{\lambda_{\text{eqabs}} e_t} \cdot \Phi_3 + \frac{K_{\text{abs}}}{(\gamma_{\text{abs}})^2} \cdot (\text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) - 1) \quad (\text{II.78})$$



Les jonctions  $J_1$  et  $J_3$  sont placées sous chacune des zones absorbantes et la jonction  $J_2$  est située sous la zone réfléchrice. La jonction froide extrême est située sur le substrat ( $T_{J0}=T_{sub}$ ). La tension délivrée par une piste de la thermopile peut être exprimée à partir de la relation (II.53) pour  $n = 3$  qui donne :

$$V = (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot [ (T_{J1} - T_{sub}) + (T_{J3} - T_{J2}) ] \quad (II.79)$$

Les profils de température sont les suivants (figure 27) :

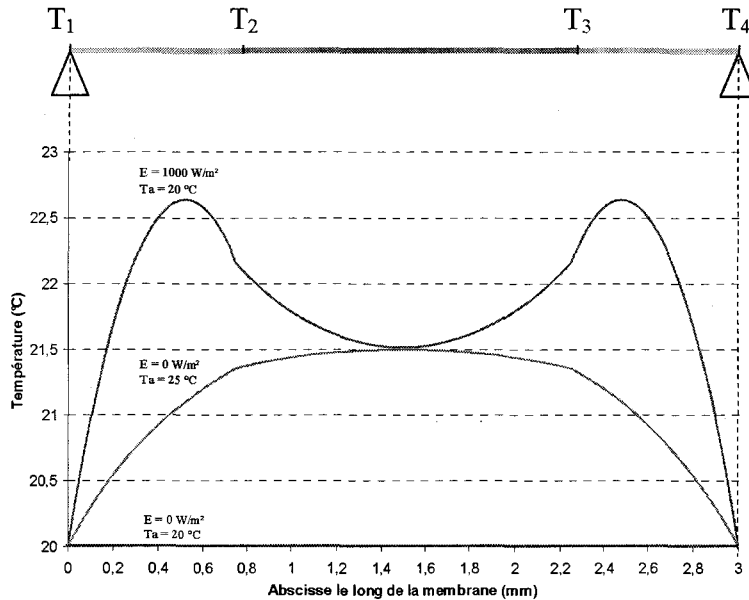


Figure 27 : Profils de température pour un microcapteur à trois zones

Les deux courbes présentent un axe de symétrie vertical. D'après notre méthode de recherche de positionnement des thermojonctions, il est indispensable de compenser chaque jonction par une autre. Dans le cas précis d'une membrane à trois zones, il existe forcément une jonction sur le substrat représentée par  $T_{sub}$  dans la relation II.79 qui ne peut pas être compensée par une autre jonction.

Le problème est le même lorsque le capteur est constitué de deux réflecteurs et un absorbant central. Cette symétrie ne permet pas non plus d'obtenir l'annulation de l'influence de la température ambiante.

Ce choix de structure n'est pas adapté à l'objectif défini. A partir de cet exemple, la généralisation est possible et par conséquent, les structures comportant un nombre impair de zones ne sont pas exploitables, et ne feront pas l'objet d'une étude.

## 6.5 Etude d'un microcapteur à quatre zones

Pour cette étude, le microcapteur est composé de deux zones réfléchissantes et de deux zones absorbantes. Il est schématisé ci-dessous (figure 28) :

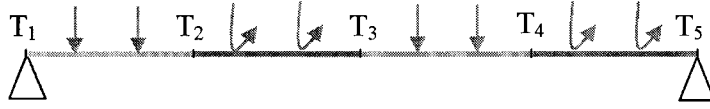


Figure 28 : Schéma d'un microcapteur à quatre zones

Le système matriciel associé est :

$$\begin{pmatrix} T_2 \\ \Phi_2 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{\text{abs}} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_1 \\ \Phi_1 \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{\text{abs}} \end{vmatrix} \quad (\text{II.80})$$

$$\begin{pmatrix} T_3 \\ \Phi_3 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{\text{ref}} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_2 \\ \Phi_2 \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{\text{ref}} \end{vmatrix} \quad (\text{II.81})$$

$$\begin{pmatrix} T_4 \\ \Phi_4 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{\text{abs}} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_3 \\ \Phi_3 \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{\text{abs}} \end{vmatrix} \quad (\text{II.82})$$

$$\begin{pmatrix} T_5 \\ \Phi_5 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{\text{ref}} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_4 \\ \Phi_4 \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{\text{ref}} \end{vmatrix} \quad (\text{II.83})$$

Les conditions limites de part et d'autre de la membrane sont :

$$\text{CL}_1 : T_1 = T_{\text{sub}}$$

$$\text{CL}_2 : T_5 = T_{\text{sub}}$$

Il est alors possible de déterminer les flux  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4, \Phi_5$  et les températures  $T_2, T_3$  et  $T_4$ .

L'équation suivante donne le profil de température entre  $T_1$  et  $T_2$  :

$$T(x) = \text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) \cdot T_{\text{sub}} - \frac{\text{sh}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x)}{\lambda_{\text{eqabs}} \epsilon_t} \cdot \Phi_1 + \frac{K_{\text{abs}}}{(\gamma_{\text{abs}})^2} \cdot (\text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) - 1) \quad (\text{II.84})$$

Entre  $T_2$  et  $T_3$ , on a :

$$T(x) = \text{ch}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) \cdot T_2 - \frac{\text{sh}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x)}{\lambda_{\text{eqref}} \epsilon_t} \cdot \Phi_2 + \frac{K_{\text{ref}}}{(\gamma_{\text{ref}})^2} \cdot (\text{ch}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) - 1) \quad (\text{II.85})$$

Entre  $T_3$  et  $T_4$  :

$$T(x) = \text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) \cdot T_3 - \frac{\text{sh}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x)}{\lambda_{\text{eqabs}} \epsilon_t} \cdot \Phi_3 + \frac{K_{\text{abs}}}{(\gamma_{\text{abs}})^2} \cdot (\text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) - 1) \quad (\text{II.86})$$

Enfin, entre  $T_4$  et  $T_5$  :

$$T(x) = \text{ch}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) \cdot T_4 - \frac{\text{sh}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x)}{\lambda_{\text{eqref}} \epsilon_t} \cdot \Phi_4 + \frac{K_{\text{ref}}}{(\gamma_{\text{ref}})^2} \cdot (\text{ch}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) - 1) \quad (\text{II.87})$$

Les jonctions  $J_1$  et  $J_3$  sont placées dans chacune des zones absorbantes et les jonctions  $J_2$  et  $J_4$  sont situées dans chacune des zones réfléchissantes. Les jonctions  $J_0$  et  $J_5$  sont situées sur le substrat ( $T_{J_0} = T_{J_5} = T_{\text{sub}}$ ). La tension délivrée par une piste de la thermopile peut être exprimée à partir de la relation (II.52) pour  $n = 4$ , ce qui donne :

$$V = (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot (T_{J_1} + T_{J_3} - T_{J_2} - T_{J_4}) \quad (\text{II.88})$$

Les profils de température d'un microcapteur à quatre zones dans les conditions de modélisation sont représentés figure 29.

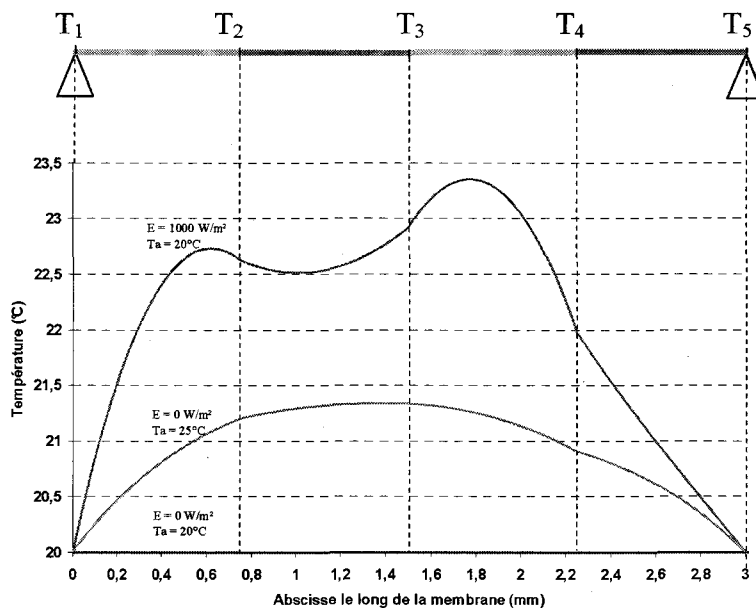


Figure 29 : Profils de température d'un microcapteur à quatre zones

Comme précédemment, le logiciel recherche les positions optimales des quatre jonctions situées sur la membrane de manière à annuler l'influence de la température d'air tout en maximisant la sensibilité à l'éclairement énergétique. Dans ce cas de figure à deux zones absorbantes et deux zones réfléchissantes, les points se compensent deux par deux (figure 30). Le point  $J_1$  est compensé par le point  $J_4$  et le point  $J_2$  par le point  $J_3$ .

L'ensemble des résultats obtenus est résumé dans le tableau ci-dessous :

Longueur de la membrane (mm)	1	2	3	4	5	6	10	15	20
$S_E$ /piste ( $\mu V/(W \cdot m^{-2})$ )	0,06	0,23	0,50	0,81	1,17	1,52	2,75	3,56	3,91
CTa/piste ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )	< 0,1								

Tableau 5 : Caractéristiques d'un microcapteur à 4 zones

Comme pour le microcapteur à deux zones, ce tableau rassemble les valeurs de la sensibilité à l'éclairement énergétique en fonction de la longueur de la membrane. L'évolution de la sensibilité suit les mêmes caractéristiques que dans le cas précédent avec une limite de l'ordre de  $4,0 \mu V/(W \cdot m^{-2})$  pour une longueur de membrane de 20 mm. Cette sensibilité maximale est doublée par rapport à celle d'une structure à deux zones.

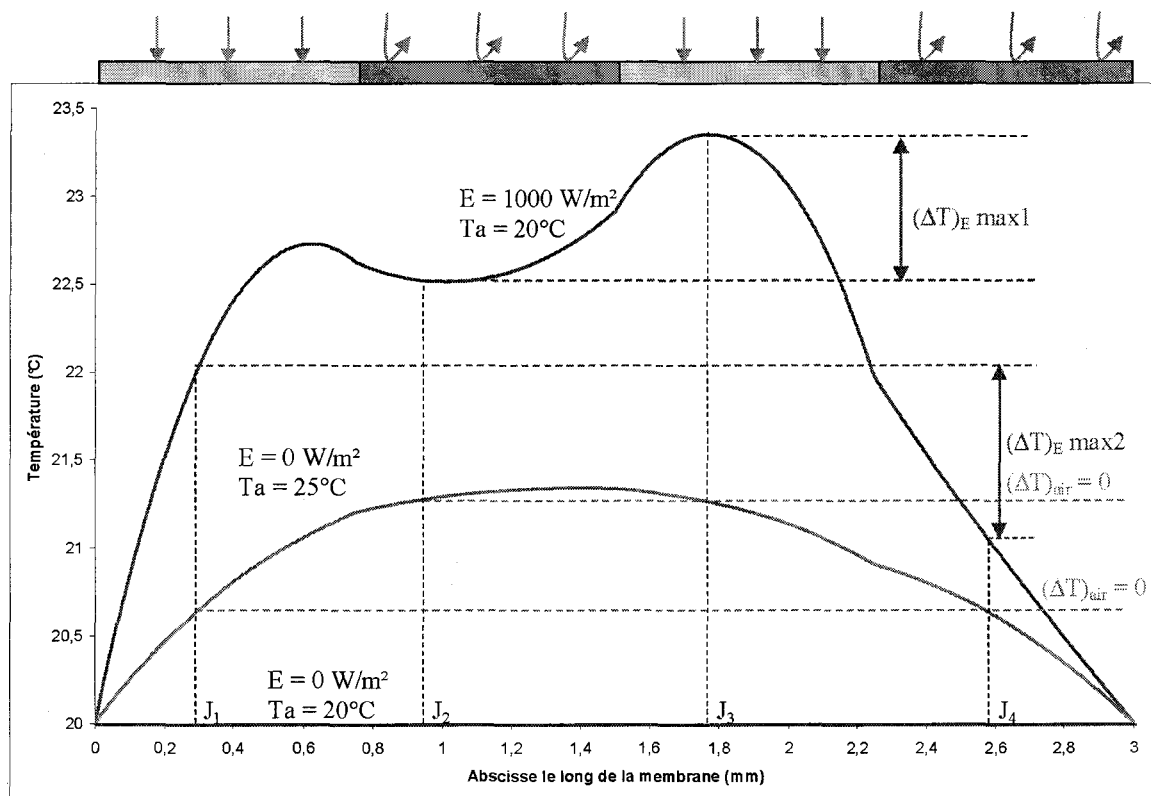


Figure 30 : Détermination de la position des thermojonctions pour un microcapteur à quatre zones

## 6.6 Etude d'un microcapteur à six zones

Le microcapteur composé de six zones est schématisé (figure 31).

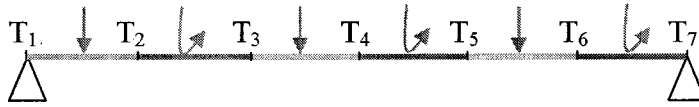


Figure 31 : Schéma d'un microcapteur à six zones

Le système matriciel associé est :

$$\begin{pmatrix} T_2 \\ \Phi_2 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{\text{abs}} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_1 \\ \Phi_1 \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{\text{abs}} \end{vmatrix} \quad (\text{II.89})$$

$$\begin{pmatrix} T_3 \\ \Phi_3 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{\text{ref}} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_2 \\ \Phi_2 \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{\text{ref}} \end{vmatrix} \quad (\text{II.90})$$

$$\begin{pmatrix} T_4 \\ \Phi_4 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{\text{abs}} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_3 \\ \Phi_3 \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{\text{abs}} \end{vmatrix} \quad (\text{II.91})$$

$$\begin{pmatrix} T_5 \\ \Phi_5 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{\text{ref}} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_4 \\ \Phi_4 \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{\text{ref}} \end{vmatrix} \quad (\text{II.92})$$

$$\begin{pmatrix} T_6 \\ \Phi_6 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{\text{abs}} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_5 \\ \Phi_5 \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{\text{abs}} \end{vmatrix} \quad (\text{II.93})$$

$$\begin{pmatrix} T_7 \\ \Phi_7 \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} M_{\text{ref}} \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_6 \\ \Phi_6 \end{pmatrix} + \begin{vmatrix} M'_{\text{ref}} \end{vmatrix} \quad (\text{II.94})$$

Les conditions limites de part et l'autre de la membrane sont :

$$\text{CL}_1 : T_1 = T_{\text{sub}}$$

$$\text{CL}_2 : T_7 = T_{\text{sub}}$$

Il est alors possible de déterminer les flux  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4, \Phi_5, \Phi_6, \Phi_7$  et les températures  $T_2, T_3, T_4, T_5$  et  $T_6$ .

L'équation suivante donne le profil de température entre  $T_1$  et  $T_2$  :

$$T(x) = \text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) \cdot T_{\text{sub}} - \frac{\text{sh}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x)}{\lambda_{\text{eqabs}} \epsilon_t} \cdot \Phi_1 + \frac{K_{\text{abs}}}{(\gamma_{\text{abs}})^2} \cdot (\text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) - 1) \quad (\text{II.95})$$

Entre  $T_2$  et  $T_3$ , on a :

$$T(x) = \text{ch}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) \cdot T_2 - \frac{\text{sh}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x)}{\lambda_{\text{eqref}} \epsilon_t} \cdot \Phi_2 + \frac{K_{\text{ref}}}{(\gamma_{\text{ref}})^2} \cdot (\text{ch}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) - 1) \quad (\text{II.96})$$

Puis, entre  $T_3$  et  $T_4$  :

$$T(x) = \text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) \cdot T_3 - \frac{\text{sh}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x)}{\lambda_{\text{eqabs}} \epsilon_t} \cdot \Phi_3 + \frac{K_{\text{abs}}}{(\gamma_{\text{abs}})^2} \cdot (\text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) - 1) \quad (\text{II.97})$$

Entre  $T_4$  et  $T_5$  :

$$T(x) = \text{ch}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) \cdot T_4 - \frac{\text{sh}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x)}{\lambda_{\text{eqref}} \epsilon_t} \cdot \Phi_4 + \frac{K_{\text{ref}}}{(\gamma_{\text{ref}})^2} \cdot (\text{ch}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) - 1) \quad (\text{II.98})$$

Enfin, entre  $T_5$  et  $T_6$  :

$$T(x) = \text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) \cdot T_5 - \frac{\text{sh}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x)}{\lambda_{\text{eqabs}} \epsilon_t} \cdot \Phi_5 + \frac{K_{\text{abs}}}{(\gamma_{\text{abs}})^2} \cdot (\text{ch}(\gamma_{\text{abs}} \cdot x) - 1) \quad (\text{II.99})$$

Entre  $T_6$  et  $T_7$ , on a :

$$T(x) = \text{ch}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) \cdot T_6 - \frac{\text{sh}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x)}{\lambda_{\text{eqref}} \epsilon_t} \cdot \Phi_6 + \frac{K_{\text{ref}}}{(\gamma_{\text{ref}})^2} \cdot (\text{ch}(\gamma_{\text{ref}} \cdot x) - 1) \quad (\text{II.100})$$

Les jonctions  $J_1$ ,  $J_3$  et  $J_5$  sont placées dans chacune des zones absorbantes et les jonctions  $J_2$ ,  $J_4$  et  $J_6$  sont situées dans chacune des zones réfléchissantes. Les jonctions  $J_0$  et  $J_7$  sont situées sur le substrat ( $T_{J_0} = T_{J_7} = T_{\text{sub}}$ ). La tension délivrée par une piste de la thermopile peut être exprimée à partir de la relation (II.52) pour  $n = 6$  qui donne :

$$V = (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot (T_{J_1} + T_{J_3} - T_{J_2} + T_{J_5} - T_{J_4} - T_{J_6}) \quad (\text{II.101})$$

Les profils de température d'un microcapteur à six zones dans les conditions de modélisation sont représentés figure 32.

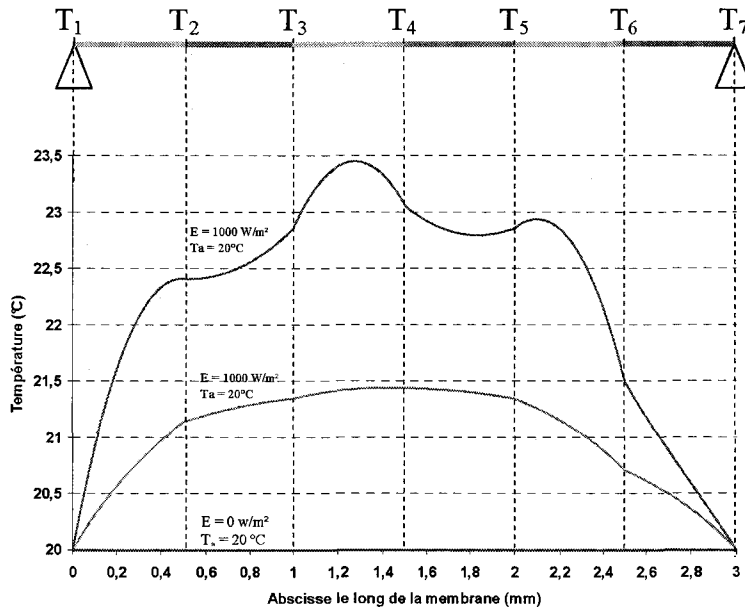


Figure 32 : Profils de température d'un microcapteur à six zones

Les longueurs des zones réflectrices sont égales à celles des zones absorbantes, comme dans le cas précédent. Par conséquent, seule la répartition de la température est différente le long de la membrane. Le cas d'une structure à six zones présente des profils de température complexes mais du même type que celle à quatre zones. La même méthode d'analyse sera employée. Les positions optimales des jonctions pour compenser les effets de la température ambiante sur les microcapteurs ont été déterminées (figure 33).

Comme pour la structure à quatre zones, les compensations en température se font par paires et par zones. Ainsi, trois paires sont définies qui déterminent trois  $\Delta T_{max}$  dont la somme est à l'origine de la f.e.m. délivrée par le microcapteur. L'ensemble des résultats est résumé ci-dessous (tableau 6) :

Longueur de la membrane (mm)	1	2	3	4	5	6	10	15	20
$S_E/\text{piste}$ ( $\mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ )	0,05	0,21	0,46	0,77	1,14	1,56	3,16	4,58	5,32
$CT_a/\text{piste}$ ( $\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$ )	< 0,1								

Tableau 6 : Caractéristiques d'un microcapteur à six zones

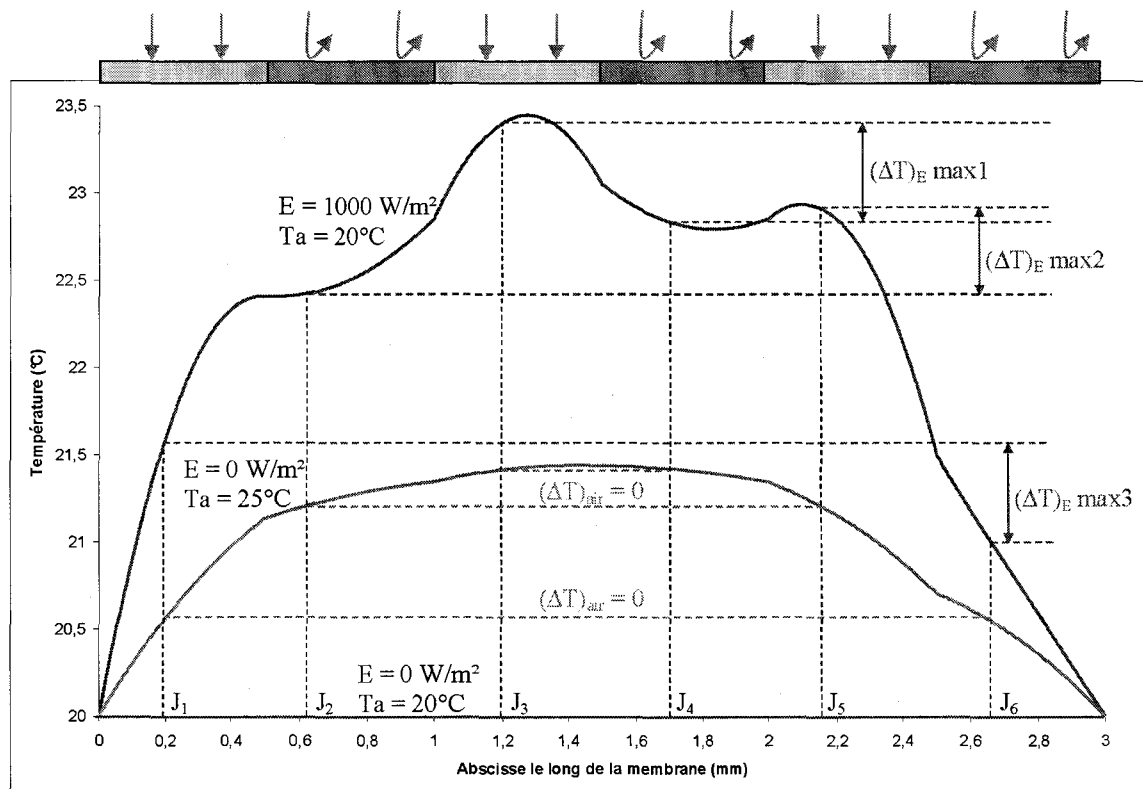


Figure 33 : Détermination de la position des jonctions pour une structure à six zones

Pour ce type de structure à six zones, la sensibilité à l'éclairement pour chaque piste tend vers  $6 \mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$  pour des longueurs de membrane importantes. Ce résultat démontre que la sensibilité dépend du nombre de zones réfléchissantes et absorbantes car cette valeur maximale représente près du triple de la sensibilité obtenue pour la structure à deux zones.



## 6.7 Conclusion

Les résultats obtenus précédemment sont résumés sous forme d'un graphique représentant l'évolution de la sensibilité à l'éclairement énergétique par piste en fonction de la longueur de la membrane (figure 34). Des capteurs comportant 10 et 12 zones absorbantes et réfléchissantes ont également été modélisés. Au-delà de 6 mm, ce sont les capteurs présentant un grand nombre de zones qui sont les plus performants. Par contre, pour des longueurs inférieures à 6 mm, la configuration avec deux zones (une absorbante et une réfléchissante) est la plus intéressante.

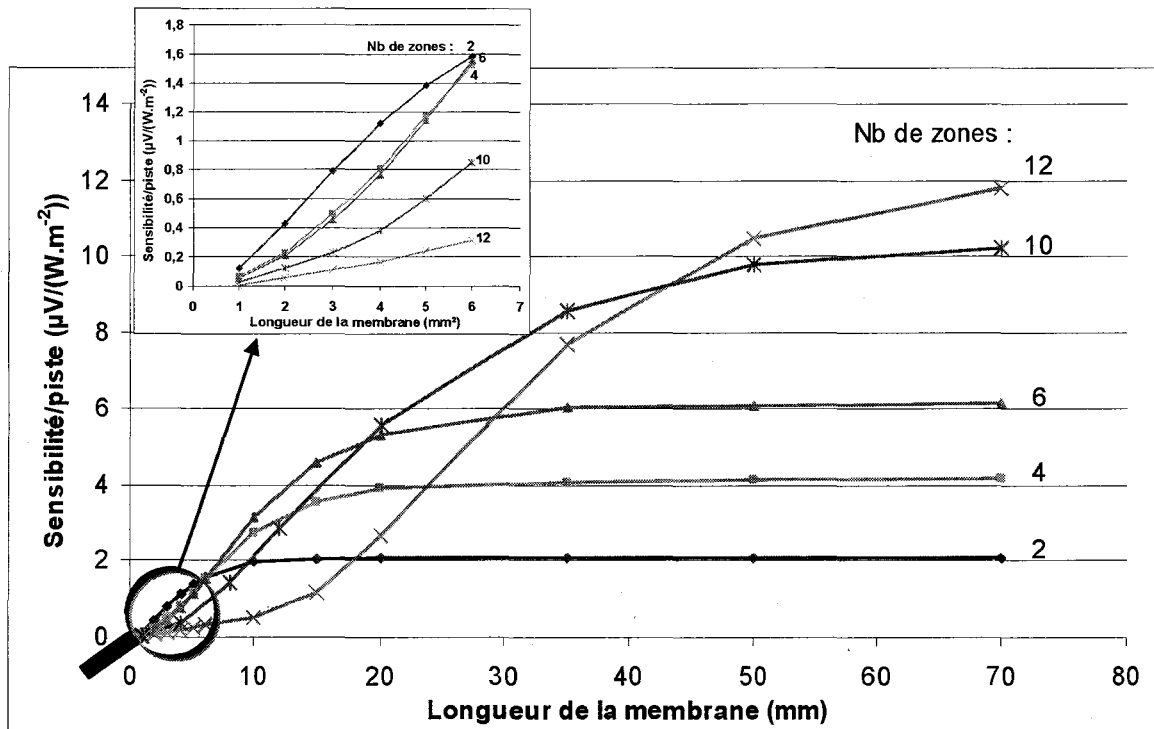


Figure 34 : Evolution de la sensibilité par piste en fonction de la longueur de la membrane

Les microcapteurs pour l'imagerie infrarouge sont le plus souvent constitués de pixels carrés. De plus, afin de limiter l'encombrement de la matrice, les dimensions des capteurs unitaires réalisés au laboratoire seront inférieurs à  $6 \times 6 \text{ mm}^2$ . Les résultats des sensibilités obtenues pour de tels microcapteurs sont résumés dans le tableau 7. La largeur de la piste de la thermopile est fixée à  $50 \text{ }\mu\text{m}$  et l'interpiste à  $20 \text{ }\mu\text{m}$ .

Longueur x largeur de la membrane (mm <sup>2</sup> )	1 x 1	2 x 2	3 x 3	4 x 4	5 x 5	6 x 6
<b>Microcapteur à deux zones, <math>C_{Ta} &lt; 0,1</math></b>						
$S_E$ /piste ( $\mu V/(W.m^{-2})$ )	0,12	0,43	0,79	1,12	1,38	1,59
Nombres de pistes	14	28	42	57	71	85
$S_E$ totale ( $\mu V/(W.m^{-2})$ )	1,68	12,04	33,18	63,84	97,98	135,15
<b>Microcapteur à quatre zones, <math>C_{Ta} &lt; 0,1</math></b>						
$S_E$ /piste ( $\mu V/(W.m^{-2})$ )	0,06	0,23	0,50	0,81	1,17	1,52
Nombres de pistes	14	28	42	57	71	85
$S_E$ totale ( $\mu V/(W.m^{-2})$ )	0,84	6,44	21,00	46,17	83,07	129,20
<b>Microcapteur à six zones, <math>C_{Ta} &lt; 0,1</math></b>						
$S_E$ /piste ( $\mu V/(W.m^{-2})$ )	0,05	0,21	0,46	0,77	1,14	1,56
Nb pistes	14	28	42	57	71	85
$S_E$ totale ( $\mu V/(W.m^{-2})$ )	0,70	5,88	19,32	43,89	80,94	132,60

Tableau 7 : Tableau récapitulatif des résultats de modélisation

L'évolution de la sensibilité totale des microcapteurs carrés en fonction de la surface de la membrane est représentée figure 35. Pour les configurations comportant deux, quatre, six dix et douze zones, ce graphique permet de choisir la structure adéquate en fonction des dimensions de la membrane à réaliser.

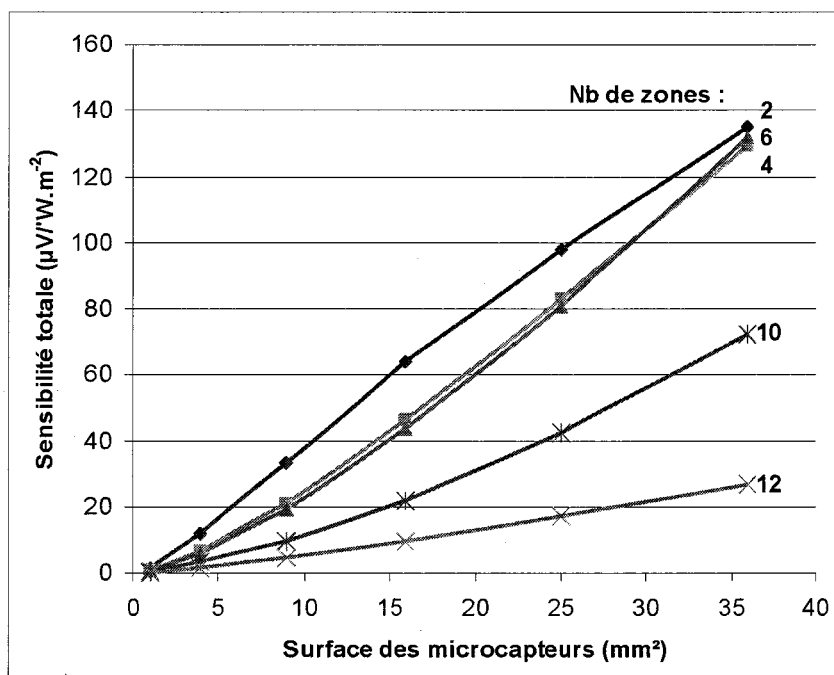


Figure 35 : Sensibilité totale des microcapteurs en fonction de leur surface

Il apparaît clairement que pour des surfaces inférieures à 6x6 mm<sup>2</sup>, la structure à deux zones est la plus performantes en terme de sensibilité. Compte tenu des résultats de modélisation, nous avons choisi de réaliser des microcapteurs 3x3 mm<sup>2</sup> à deux zones et 5x5mm<sup>2</sup> à deux et quatre zones (tableau 8). Bien que moins sensible, le capteur 5x5 mm<sup>2</sup> à quatre zones a également été réalisé afin de valider le modèle mathématique.

Pour comparer les performances de ces microcapteurs avec ses concurrents industriels, la détectivité spécifique D\* a été calculée à partir de la relation II.64.

Dimensions des microcapteurs	3x3 mm <sup>2</sup> (2 zones)	5x5 mm <sup>2</sup> (2 zones)	5x5 mm <sup>2</sup> (4 zones)
S <sub>E</sub> /piste (μV/(W.m <sup>-2</sup> ))	0,79	1,38	1,17
Nombre de pistes	42	68	68
S <sub>E</sub> totale (μV/(W.m <sup>-2</sup> ))	33,18	93,84	83,07
Résistance électrique interne (kΩ)	616	1662	1662
Détectivité spécifique D* (cm.Hz <sup>1/2</sup> .W <sup>-1</sup> )	1,55.10 <sup>7</sup>	1,60.10 <sup>7</sup>	1,42.10 <sup>7</sup>

Tableau 8 : Caractéristiques théoriques des microcapteurs donnés par le modèle

Les résultats de cette modélisation ont montré des sensibilités plus élevées que celles des microcapteurs multimembranes réalisés pendant la période 2002-2005. Cependant, les résistances électriques internes sont plus importantes ce qui limite la détectivité spécifique. Un capteur industriel performant et encapsulé présente une détectivité spécifique moyenne de l'ordre de 1.10<sup>8</sup> cm.Hz<sup>1/2</sup>.W<sup>-1</sup> ce qui est environ 6 fois plus performant que nos capteurs. Au cours de l'année 2007 (Dernière année de Doctorat), une nouvelle structure a été imaginée pour pallier ce problème et réduire la résistance électrique interne. Cette optimisation fait l'objet du paragraphe suivant.

## 7 Nouvelle structure permettant d'optimiser la détectivité spécifique

### 7.1 Paramètres influents dans l'optimisation des microcapteurs

L'objectif de cette optimisation est de réduire les résistances électriques internes du microcapteur. D'après la relation II.102 ci-dessous, ces résistances électriques dépendent de la résistivité du polysilicium, de la géométrie de la piste de la thermopile (longueur, largeur et épaisseur).

$$R_{el} = \frac{\rho_{poly} \cdot L}{2 \cdot e_{poly} \cdot l} \quad (\Omega) \quad (II.102)$$

avec

- $\rho_{poly}$  : la résistivité électrique du polysilicium dopé N in-situ (Ω.m)
- $e_{poly}$  : l'épaisseur de la couche de polysilicium déposé (m)
- L : la longueur de la piste de polysilicium (m)
- l : la largeur de la piste de polysilicium (m)

Sachant que les thermocouples sont composés de polysilicium N dopé in-situ et d'or, la piste est à moitié recouverte d'or.

Pour diminuer la résistance interne, il faut donc :

- Diminuer  $\rho_{\text{poly}}$  et  $L$ .
- Augmenter  $e_{\text{poly}}$  et  $l$ .

La résistivité du polysilicium ( $\rho_{\text{poly}}$ ) est difficile à modifier et nécessiterait de nombreux essais de dépôts pour déterminer les bons paramètres du process pour obtenir une valeur intéressante. De plus, pour diminuer la résistance électrique, il faut augmenter les doses des dopants ce qui diminue le coefficient Seebeck du polysilicium [10]. Il est possible d'augmenter l'épaisseur ( $e_{\text{poly}}$ ) mais seulement de 1500 Å pour atteindre une épaisseur de 6000 Å. Au-delà, il est difficile de déposer une épaisseur plus importante en une seule fois. Le recours à plusieurs dépôts entraînerait des interfaces entre les couches qui détérioraient la qualité du polysilicium final. De plus, une épaisseur trop importante de polysilicium augmente la conductivité thermique de la membrane ce qui réduit la sensibilité à l'éclairement énergétique. Le paramètre le plus souple à ajuster reste la largeur de la piste de polysilicium. En augmentant sa largeur, la résistance diminuera fortement. Il est possible d'élargir les parties du thermocouple constituées de polysilicium et de rétrécir la largeur des thermoéléments recouverts d'or sans modifier sensiblement leur résistance électrique. Les thermocouples réalisés seront alors disposés en quinconce comme le montre la figure 36.

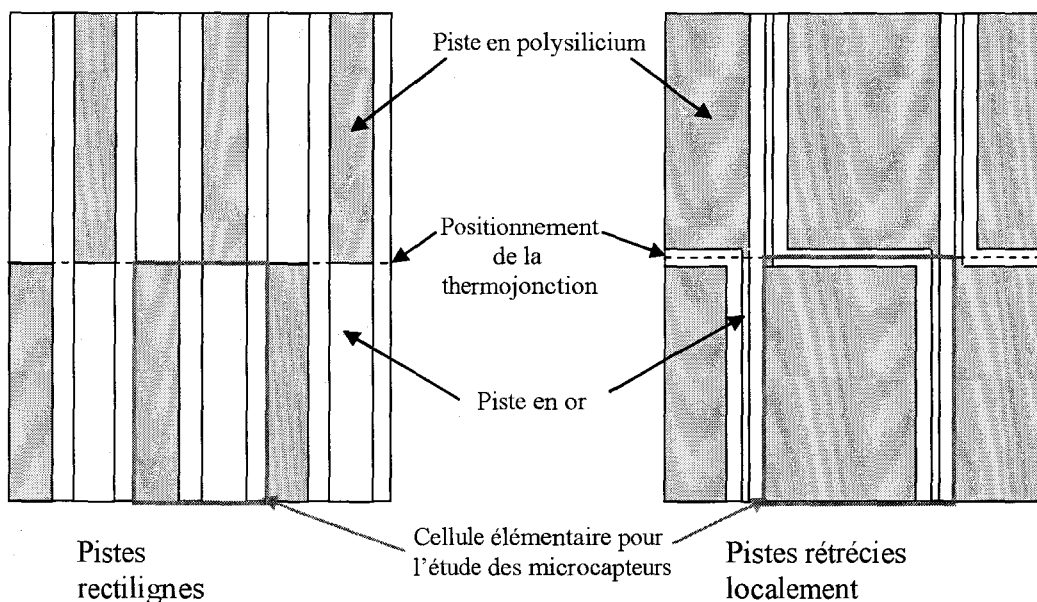


Figure 36 : Dessin du thermocouple en quinconce

## 7.2 Nouvelle modélisation pour l'optimisation

Par rapport au modèle développé précédemment, seule la conductivité thermique de la couche équivalente va être modifiée.

### 7.2.1 Calcul de la conductivité thermique de la nouvelle couche équivalente

Pour effectuer ce nouveau calcul de la conductivité thermique de la couche équivalente, la même nomenclature et les mêmes codifications des différents matériaux seront utilisées par souci de clarté.

La conductance thermique de la couche équivalente est égale à :

$$Y'_{\text{tot}} = Y'_A + Y'_B + 2 \cdot Y'_C \quad (\text{II.103})$$

Avec  $Y'_A$  : la conductance thermique de la piste de polysilicium dopé N in-situ ( $p_1$ )

$Y'_B$  : la conductance thermique de la piste d'or du second thermoélément ( $p_2$ )

$Y'_C$  : la conductance thermique de l'interpiste ( $i$ )

Rappelons que les différentes couches sont indicées de la manière suivante :

- 1 : la couche d'oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ )
- 2 : la couche de nitrure de silicium ( $\text{Si}_x\text{N}_y$ )
- 3 : la couche du polysilicium dopé N in-situ
- 4 : la couche de titane (couche d'accrochage pour les thermoéléments en or)
- 5 : la couche d'or (second thermoélément)
- 6 : la couche de polyimide
- 7 : la couche de titane (couche d'accrochage pour les réflecteurs)
- 8 : la couche d'or (couche d'or pour les zones réfléchissantes)

Les largeurs et les épaisseurs des différentes couches sont aussi codifiées :

$p_1$  : largeur de la piste en polysilicium

$p_2$  : largeur de la piste en polysilicium plaqué or

$i$  : largeur de l'interpiste

$e_n$  : épaisseur de la couche n

$e_t$  : épaisseur totale de la membrane

La conductance thermique de piste polysilicium plaqué or est donnée par la relation suivante :

$$Y'_A = \frac{(\lambda_1 \cdot e_1 + \lambda_2 \cdot e_2 + \lambda_3 \cdot e_3 + \lambda_6 \cdot e_6 + \lambda_7 \cdot e_7 + \lambda_8 \cdot e_8) \cdot p_1}{dx} \quad (\text{II.104})$$

La conductance thermique de piste sans thermoélément or  $Y'_B$  est :

$$Y'_B = \frac{(\lambda_1 \cdot e_1 + \lambda_2 \cdot e_2 + \lambda_3 \cdot e_3 + \lambda_4 \cdot e_4 + \lambda_5 \cdot e_5 + \lambda_6 \cdot e_6 + \lambda_7 \cdot e_7 + \lambda_8 \cdot e_8) \cdot p_2}{dx} \quad (\text{II.105})$$

La conductance thermique de l'interpiste  $Y'_C$  est :

$$Y'_C = \frac{(\lambda_1 \cdot e_1 + \lambda_2 \cdot e_2 + \lambda_6 \cdot e_6 + \lambda_7 \cdot e_7 + \lambda_8 \cdot e_8) \cdot i}{dx} \quad (\text{II.106})$$

À partir des équations II.104, II.105 et II.106, la conductance thermique totale est :

$$Y'_{\text{tot}} = Y'_A + Y'_B + 2 \cdot Y'_C = \frac{\lambda'_{\text{eq}} e_t \cdot (p_1 + p_2 + 2 \cdot i)}{dx} \quad (\text{II.107})$$

En combinant les équations précédentes, l'équation suivante est obtenue :

$$\begin{aligned} & \lambda_1 \cdot e_1 \cdot (p_1 + p_2 + 2 \cdot i) + \lambda_2 \cdot e_2 \cdot (p_1 + p_2 + 2 \cdot i) + \lambda_3 \cdot e_3 \cdot (p_1 + p_2) + (\lambda_4 \cdot e_4 + \lambda_5 \cdot e_5) \cdot p_1 + \\ & \lambda_6 \cdot e_6 \cdot (p_1 + p_2 + 2 \cdot i) + \lambda_7 \cdot e_7 \cdot (p_1 + p_2 + 2 \cdot i) + \lambda_8 \cdot e_8 \cdot (p_1 + p_2 + 2 \cdot i) = \lambda'_{\text{eq}} \cdot e_t \cdot (p_1 + p_2 + 2 \cdot i) \end{aligned} \quad (\text{II.108})$$

Finalement, on a :

$$\lambda'_{\text{eq}} \cdot e_t = \lambda_1 \cdot e_1 + \lambda_2 \cdot e_2 + \lambda_6 \cdot e_6 + \lambda_7 \cdot e_7 + \lambda_8 \cdot e_8 + \frac{\lambda_3 \cdot e_3 \cdot (p_1 + p_2) + (\lambda_4 \cdot e_4 + \lambda_5 \cdot e_5) \cdot p_1}{p_1 + p_2 + 2 \cdot i} \quad (\text{II.109})$$

Cette expression correspond à la conductivité thermique de la couche équivalente dans la zone réfléchissante, elle sera notée :  $\lambda'_{\text{eqref}} \cdot e_t$ . Dans la zone absorbante, elle est notée :  $\lambda'_{\text{eqabs}} \cdot e_t$ .

$$\lambda'_{\text{eqabs}} \cdot e_t = \lambda_1 \cdot e_1 + \lambda_2 \cdot e_2 + \lambda_6 \cdot e_6 + \frac{\lambda_3 \cdot e_3 \cdot (p_1 + p_2) + (\lambda_4 \cdot e_4 + \lambda_5 \cdot e_5) \cdot p_1}{p_1 + p_2 + 2 \cdot i} \quad (\text{II.110})$$

Après avoir déterminé les conductivités thermiques de la nouvelle couche équivalente pour les deux différentes zones du microcapteur, le modèle reste le même. Finalement, les matrices avec lesquelles les profils de température seront déterminés sont les suivantes :

○ pour les zones réfléchrices :

$$\begin{pmatrix} T(x) \\ \Phi(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{ch}(\gamma'_{\text{ref}} \cdot x) & \frac{-\text{sh}(\gamma'_{\text{ref}} \cdot x)}{\lambda'_{\text{eqref}} \cdot e_t} \\ -\lambda'_{\text{eqref}} \cdot e_t \cdot \text{sh}(\gamma'_{\text{ref}} \cdot x) & \text{ch}(\gamma'_{\text{ref}} \cdot x) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_0 \\ \Phi_0 \end{pmatrix} + \frac{K'_{\text{ref}}}{(\gamma'_{\text{ref}})^2} \cdot \begin{pmatrix} \text{ch}(\gamma'_{\text{ref}} \cdot x) - 1 \\ -\lambda'_{\text{eqref}} \cdot e_t \cdot \text{sh}(\gamma'_{\text{ref}} \cdot x) \end{pmatrix} \quad (\text{II.111})$$

Soit :

$$\begin{pmatrix} T(x) \\ \Phi(x) \end{pmatrix} = \left| (M'_{\text{ref}})_2 \right| \cdot \begin{pmatrix} T_0 \\ \Phi_0 \end{pmatrix} + \left| (M'_{\text{ref}})_2 \right| \quad (\text{II.112})$$

$$\text{En posant : } \left\{ \begin{array}{l} (M'_{\text{ref}})_2 = \begin{pmatrix} \text{ch}(\gamma'_{\text{ref}} \cdot x) & \frac{-\text{sh}(\gamma'_{\text{ref}} \cdot x)}{\lambda'_{\text{eqref}} \cdot e_t} \\ -\lambda'_{\text{eqref}} \cdot e_t \cdot \text{sh}(\gamma'_{\text{ref}} \cdot x) & \text{ch}(\gamma'_{\text{ref}} \cdot x) \end{pmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{II.113})$$

$$(M'_{\text{ref}})_2 = \frac{K'_{\text{ref}}}{(\gamma'_{\text{ref}})^2} \cdot \begin{pmatrix} \text{ch}(\gamma'_{\text{ref}} \cdot x) - 1 \\ -\lambda'_{\text{eqref}} \cdot e_t \cdot \text{sh}(\gamma'_{\text{ref}} \cdot x) \end{pmatrix} \quad (\text{II.114})$$

$$\gamma'_{\text{ref}} = \sqrt{\frac{h_{\text{inf}} + h_{\text{sup}}}{\lambda'_{\text{eqref}} \cdot e_t}} \quad (\text{II.115})$$

$$K'_{\text{ref}} = \frac{-(h_{\text{inf}} + h_{\text{sup}}) \cdot T_a + (\Phi_{\text{netR}})_{\text{ref}}}{\lambda'_{\text{eqref}} \cdot e_t} \quad (\text{II.116})$$

$$(\Phi_{\text{netR}})_{\text{ref}} = a_{\text{ref}} \cdot E - \varepsilon_{\text{ref}} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{sub}})^4 \quad (\text{II.117})$$

○ Pour les zones absorbantes :

$$\begin{pmatrix} T(x) \\ \Phi(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{ch}(\gamma'_{\text{abs}} \cdot x) & \frac{-\text{sh}(\gamma'_{\text{abs}} \cdot x)}{\lambda'_{\text{eqabs}} \cdot e_t} \\ -\lambda'_{\text{eqabs}} \cdot e_t \cdot \text{sh}(\gamma'_{\text{abs}} \cdot x) & \text{ch}(\gamma'_{\text{abs}} \cdot x) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_0 \\ \Phi_0 \end{pmatrix} + \frac{K'_{\text{abs}}}{(\gamma'_{\text{abs}})^2} \cdot \begin{pmatrix} \text{ch}(\gamma'_{\text{abs}} \cdot x) - 1 \\ -\lambda'_{\text{eqabs}} \cdot e_t \cdot \text{sh}(\gamma'_{\text{abs}} \cdot x) \end{pmatrix} \quad (\text{II.118})$$

Soit :

$$\begin{pmatrix} T(x) \\ \Phi(x) \end{pmatrix} = \left| (M'_{\text{abs}})_2 \right| \cdot \begin{pmatrix} T_0 \\ \Phi_0 \end{pmatrix} + \left| (M'_{\text{abs}})_2 \right| \quad (\text{II.119})$$

En posant :

$$(M_{\text{abs}})_2 = \begin{pmatrix} \text{ch}(\gamma'_{\text{abs}} \cdot x) & \frac{-\text{sh}(\gamma'_{\text{abs}} \cdot x)}{\lambda'_{\text{eqabs}} \cdot e_t} \\ -\lambda'_{\text{eqabs}} \cdot e_t \cdot \text{sh}(\gamma'_{\text{abs}} \cdot x) & \text{ch}(\gamma'_{\text{abs}} \cdot x) \end{pmatrix} \quad (\text{II.120})$$

$$(M'_{\text{abs}})_2 = \frac{K'_{\text{abs}}}{(\gamma'_{\text{abs}})^2} \begin{pmatrix} \text{ch}(\gamma'_{\text{abs}} \cdot x) - 1 \\ -\lambda'_{\text{eqabs}} \cdot e_t \cdot \text{sh}(\gamma'_{\text{abs}} \cdot x) \end{pmatrix} \quad (\text{II.121})$$

$$\gamma'_{\text{abs}} = \sqrt{\frac{h_{\text{inf}} + h_{\text{sup}}}{\lambda'_{\text{eqabs}} \cdot e_t}} \quad (\text{II.122})$$

$$K'_{\text{abs}} = \frac{-(h_{\text{inf}} + h_{\text{sup}}) \cdot T_a + (\varphi_{\text{netR}})_{\text{abs}}}{\lambda'_{\text{eqabs}} \cdot e_t} \quad (\text{II.123})$$

$$(\varphi_{\text{netR}})_{\text{abs}} = a_{\text{abs}} \cdot E - \varepsilon_{\text{abs}} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{sub}})^4 \quad (\text{II.124})$$

Les deux relations matricielles (II.112 et II.119) vont permettre de reprendre une nouvelle étude des microcapteurs. Le but de la modélisation reste toujours le même : annuler les effets de la température d'air et maximiser la sensibilité à l'éclairement énergétique. La résistance déterminée par la géométrie des pistes de la thermopile est fixée à 100 kΩ. À partir de la relation II.102, il est possible de calculer la largeur de la piste de polysilicium pour toutes les dimensions de microcapteurs. La largeur de la piste en or a été fixée à 10 μm et celle de l'interpiste à 5 μm pour des raisons technologiques.

### 7.2.2 Résultats des simulations des microcapteurs optimisés

Comme pour la première étude, l'objectif de la modélisation est de pouvoir compenser les effets de la température d'air tout en ayant le maximum de sensibilité à l'éclairement énergétique. Les longueurs des zones absorbantes et réfléchissantes, de la membrane sont des paramètres qui seront ajustés à l'aide du modèle. Les profils de température le long de la membrane, étant du même type que précédemment, ne sont pas représentés. La même méthode de positionnement des jonctions est employée. Les résultats résumés dans le tableau 9 sont obtenus pour des longueurs de zones absorbantes et réfléchissantes égales.



<b>Microcapteur constitué de deux zones, <math>C_{Ta} &lt; 0,1</math>, <math>R_{ei} = 100 \text{ k}\Omega</math></b>						
Longueur de la membrane (mm)	1	2	3	4	5	6
Largeur $l_{\text{poly}}$ ( $\mu\text{m}$ )	80	130	200	270	340	410
$S_E/\text{piste}$ ( $\mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ )	0,16	0,53	0,95	1,30	1,55	1,72
Nombres de pistes	20	26	26	26	26	26
$S_E$ totale ( $\mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ )	3,20	13,78	24,70	33,80	40,30	44,72
<b>Microcapteur constitué de quatre zones, <math>C_{Ta} &lt; 0,1</math>, <math>R_{ei} = 100 \text{ k}\Omega</math></b>						
Longueur de la membrane (mm)	1	2	3	4	5	6
Largeur $l_{\text{poly}}$ ( $\mu\text{m}$ )	80	130	200	270	340	410
$S_E/\text{piste}$ ( $\mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ )	0,07	0,29	0,15	0,93	1,30	1,73
Nombres de pistes	20	26	26	26	26	26
$S_E$ totale ( $\mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ )	1,40	7,54	3,90	24,18	33,80	44,98
<b>Microcapteur constitué de six zones, <math>C_{Ta} &lt; 0,1</math>, <math>R_{ei} = 100 \text{ k}\Omega</math></b>						
Longueur de la membrane (mm)	1	2	3	4	5	6
Largeur $l_{\text{poly}}$ ( $\mu\text{m}$ )	80	130	200	270	340	410
$S_E/\text{piste}$ ( $\mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ )	0,05	0,20	0,40	0,73	1,06	1,52
Nombres de pistes	20	26	26	26	26	26
$S_E$ totale ( $\mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ )	1,00	5,20	10,66	18,98	27,56	39,52

Tableau 9 : Résultats des sensibilités obtenues pour des microcapteurs optimisés

Plus la longueur de la membrane augmente et plus la sensibilité à l'éclairement augmente jusqu'à atteindre une valeur limite. En fixant la résistance interne à 100 k $\Omega$ , le nombre de pistes est de 26 pour la majorité des cas étudiés alors que les longueurs de membranes varient. Les microcapteurs optimisés à réaliser auront donc les caractéristiques résumées dans le tableau 10.

Dimensions des microcapteurs	3x3 mm <sup>2</sup> (2 zones)	5x5 mm <sup>2</sup> (2 zones)	5x5 mm <sup>2</sup> (4 zones)
Largeur $l_{\text{poly}}$ ( $\mu\text{m}$ )	200	340	340
$S_E/\text{piste}$ ( $\mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ )	0,95	1,55	1,30
Nombres de pistes	26	26	26
$S_E$ totale ( $\mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ )	24,70	40,30	33,80
DéTECTIVITÉ SPÉCIFIQUE $D^*$ ( $\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ )	$2,86\cdot 10^7$	$2,80\cdot 10^7$	$2,35\cdot 10^7$

Tableau 10 : Caractéristiques théoriques des microcapteurs optimisés à réaliser

## **8 Conclusion**

Les modélisations effectuées pour cette nouvelle génération de microcapteurs à membrane unique ont montré des résultats intéressants. Les sensibilités à l'éclairement énergétique obtenues sont supérieures à celles obtenues pour les structures multi-membranes réalisées en 2002. De plus, les simulations montrent que l'effet de la température ambiante peut être compensé. Le modèle a permis de choisir les dimensions des microcapteurs pour une imagerie infrarouge basse résolution. Compte tenu des dimensions des microcapteurs, une lentille de moyenne qualité en polyéthylène est suffisante.

La sensibilité à l'éclairement énergétique obtenue est moindre pour les microcapteurs optimisés. Le choix de réduire considérablement les résistances électriques internes des microcapteurs conduit à ce résultat mais la détectivité spécifique est presque doublée. De plus, une résistance faible permet de faciliter l'intégration du microcapteur dans un système de mesure standard.

## BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE II



## **Bibliographie du chapitre II**

- [1] P. Godts, E. Gaviot, D. Leclercq, B. Verbeke, Brevet européen (FR2781931), UTSL-CNRS.
- [2] M. Boutchich, "Microcapteurs de rayonnement infrarouge en technologie silicium", Thèse de doctorat USTL, décembre 2002
- [3] E. Gaviot, "Conception et Optimisation des radiomètres thermiques à absorption différentielle distribuée", Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, USTL, 1997
- [4] M. Boutchich et al, "Characterization of phosphorus and boron heavily doped LPCVD polysilicon films", IEEE Electron device letters, Vol. 23, NO. 3, March 2002
- [5] M. Yala-Aithammouda, "Etude et réalisation de microcapteurs de flux thermique en technologie silicium", Thèse de doctorat USTL, juin 2007
- [6] Ronald P. Manginell et al, "Finite Element Modeling of a Microhotplate for Microfluidic Applications", International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, San Juan, 1999.
- [7] Ankur Jain et al, "Design , fabrication and thermal characterization of a MEMS device for control of nerve cell growth", Proceedings of IMECE'03, 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Washington, D.C., November 16-21, 2003
- [8] D. Leclercq, "Contribution à l'étude de l'effet Peltier dans les circuits bimétalliques à électrodes plaquées. Application à la conception de nouveaux capteurs ", Thèse d'Etat USTL, octobre 1991
- [9] G. Asch & Collaborateurs, "Les capteurs en instrumentation industrielle", Edition Dunod, Paris, 1982
- [10] M. Boutchich et al, "Characterization of phosphorus and boron heavily doped LPCVD polysilicon films", IEEE Electron Device Letters, Vol. 23, NO. 3., March 2002



## **Chapitre III**

### **Réalisation technologique des microcapteurs infrarouges**

#### **Table des matières**

1	Introduction .....	87
2	Les étapes technologiques .....	87
2.1	Nettoyage des substrats .....	87
2.2	Réalisation de la membrane et de la couche de polysilicium .....	88
2.3	Gravure des pistes de la thermopile .....	88
2.4	Métallisation de la sonde Platine (PT1000) .....	91
2.5	Métallisation des thermoéléments et des plots d'accès en or .....	92
2.6	Dépôt de la partie absorbante .....	94
2.7	Réalisation de la partie réflectrice .....	96
2.8	Micro-usinage du substrat par la face arrière .....	97
3	Réalisation des microcapteurs à détectivité spécifique améliorée .....	101
4	Conclusion .....	102
	Bibliographie du chapitre III .....	105





## 1 Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons la réalisation technologique des microcapteurs unitaires ainsi que des matrices de microcapteurs.

Deux types de microcapteurs de surface  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  à deux zones, une réflectrice et une absorbante ont été fabriqués. Une série est développée sur membrane de même surface et l'autre série sur une membrane plus large de  $5 \times 3 \text{ mm}^2$ .

Ces deux configurations permettent d'analyser les phénomènes thermiques se produisant en limite de membrane, effets qui n'ont pas été pris en compte dans le modèle.

Des microcapteurs  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  à deux zones et quatre zones ont été réalisés pour pouvoir comparer les sensibilités correspondantes et valider le modèle établi au chapitre précédent.

Des matrices carrées ( $3 \times 3$  pixels) et rectangulaires ( $5 \times 2$  pixels) composées de microcapteurs de dimensions  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  sont fabriquées sur le même substrat que les microcapteurs unitaires.

Les opérations de réalisation sont effectuées à partir de substrats de silicium, polis double face, de diamètre 3 pouces, d'épaisseur  $380 \mu\text{m}$ , d'orientation cristalline  $\langle 100 \rangle$  et de dopage intrinsèque. Un jeu de six masques a été mis au point pour la fabrication complète d'un microcapteur dont la structure est rappelée figure 1.

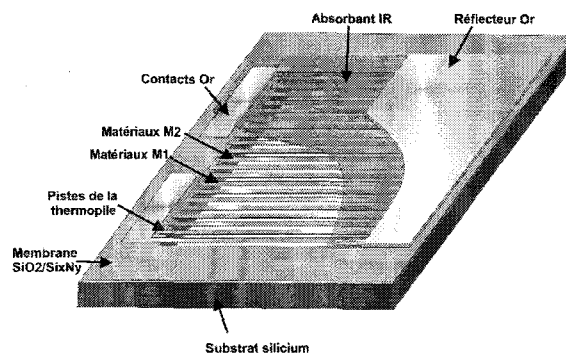


Figure 1 : Schéma d'un microcapteur (vue écorchée)

## 2 Les étapes technologiques

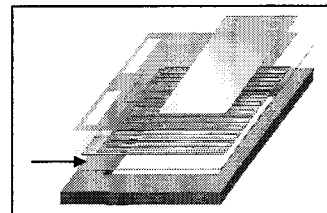
### 2.1 Nettoyage des substrats

Chaque substrat de silicium, fourni par la société Siltronix<sup>®</sup>, est méticuleusement nettoyé pour éviter les pollutions avant le début du processus de fabrication. Il est tout d'abord plongé dans un mélange appelé « Piranha » ( $40 \% \text{H}_2\text{SO}_4$  et  $60 \% \text{H}_2\text{O}_2$ ) qui permet de retirer toutes les substances organiques de la surface du substrat. Pendant cette phase de nettoyage, l'eau oxygénée ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) crée un oxyde de surface. C'est pour cette raison qu'un second bain d'acide fluorhydrique (HF) de 2 à 3 min est nécessaire pour éliminer l'oxyde de silicium créé. Le substrat est ensuite rincé à l'eau désionisée et séché sous flux d'azote.

## 2.2 Réalisation de la membrane et de la couche de polysilicium

Après ce nettoyage, trois opérations successives sont effectuées dans les fours de LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) pour réaliser :

- une croissance thermique d'oxyde humide de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) de  $0,8 \mu\text{m}$ ,
- un dépôt de nitrure de silicium peu contraint ( $\text{Si}_x\text{N}_y$ ) de  $0,6 \mu\text{m}$  d'épaisseur,
- un dépôt de polysilicium dopé N in-situ avec une épaisseur de  $4500 \text{ \AA}$  (figure 2).



Les deux premières couches vont jouer le rôle mécanique de support de la membrane. En effet, l'association des couches  $\text{SiO}_2/\text{Si}_x\text{N}_y$  permet d'obtenir une membrane peu contrainte. L'oxyde de silicium est fortement contraint en compression avec les valeurs de  $-300 \text{ MPa}$ , alors que la contrainte du nitrure de silicium est en tension avec des valeurs de  $+520 \text{ MPa}$ . Par conséquent, la combinaison des deux types de matériaux permet de compenser les contraintes et ainsi obtenir une contrainte résiduelle proche de  $50 \text{ MPa}$  [1] pour les épaisseurs déterminées.

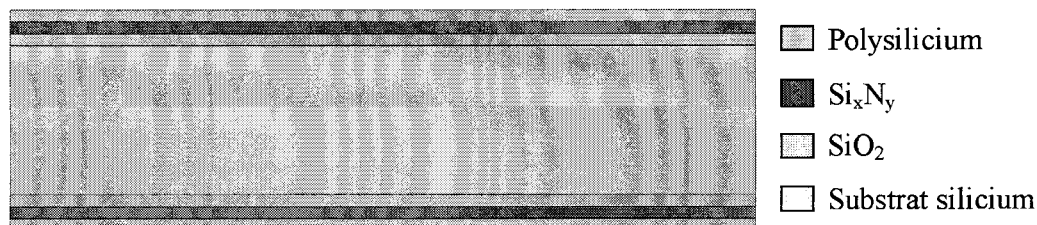


Figure 2 : Dépôts des couches  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_x\text{N}_y$  et du polysilicium dopé N in-situ

## 2.3 Gravure des pistes de la thermopile

Les pistes de polysilicium sont ensuite gravées suivant le masque n°1 (figure 3).

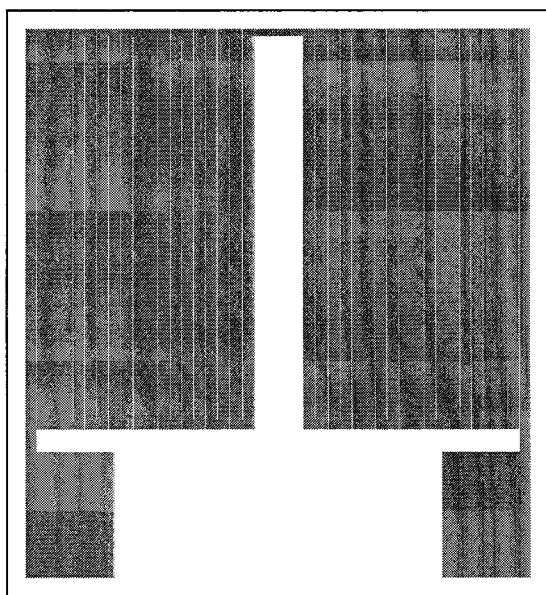
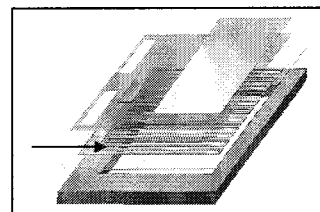


Figure 3 : Masque n°1 Gravure des pistes de polysilicium

Pour cela, la résine positive AZ1518 est tout d'abord répartie par centrifugation à l'aide d'une tournette (figure 4) sur une face du substrat (figure 5) suivant les paramètres lithographiques du tableau 1.

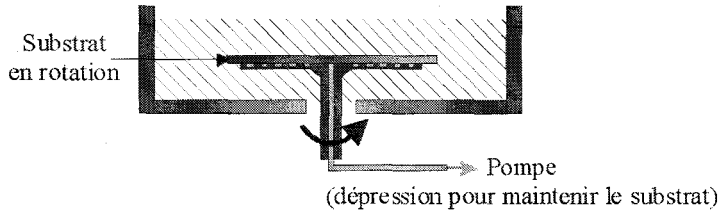


Figure 4 : Schéma de principe d'une tournette

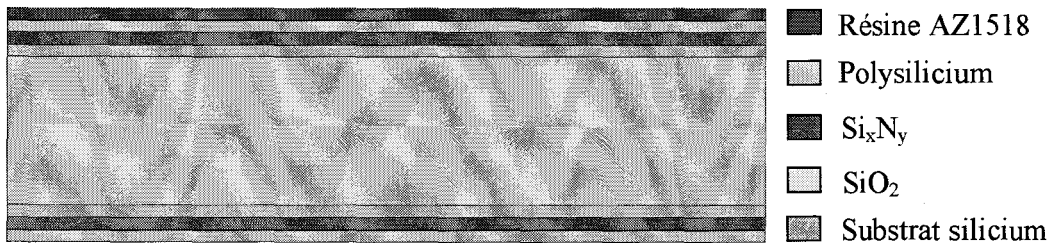


Figure 5 : Dépôt de la résine AZ1518

Vitesse de rotation	2500 rpm
Accélération	3000 rpm.s <sup>-1</sup>
Durée de centrifugation	10 s
Temps de recuit plaque à 110°C	60 s

Tableau 1 : Paramètres lithographiques pour le dépôt de résine AZ1518

L'étape de photolithographie consiste à insoler la résine à travers le masque n°1 à l'aide d'un aligneur double-face modèle MA6 de la société Karlsüss. La résine est ensuite révélée (figure 6) suivant les paramètres énoncés dans le tableau 2. Les motifs des pistes thermoélectriques sont donc définis dans la résine et leur continuité, déterminante pour le fonctionnement du microcapteur, est contrôlée au microscope optique.

Durée d'insolation UV 365 nm 11.5 mW/cm <sup>2</sup>	1,9 s
Temps de révélation MIF 726 pur	50 s
Rinçage	Eau désionisée
Séchage	Azote
Epaisseur	1,5 µm

Tableau 2 : Paramètres lithographiques pour l'insolation et la révélation de la résine AZ1518

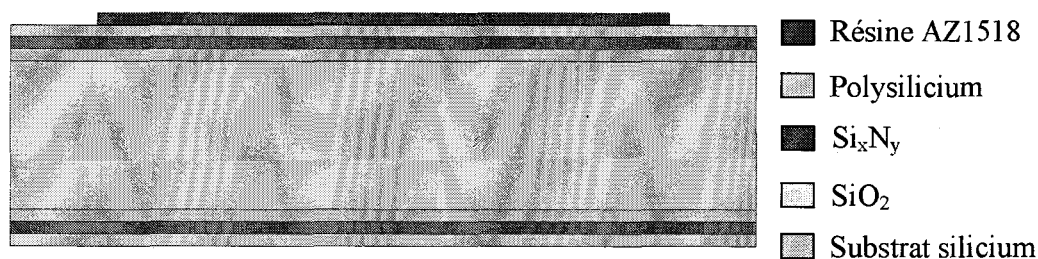


Figure 6 : Révélation de la résine après insolation

La gravure des pistes dans la couche de polysilicium (figure 7) est réalisée par gravure ionique réactive (RIE) dans un bâti Oxford Plasmab 80<sup>+</sup>. L'attaque physico-chimique est effectuée par le bombardement ionique d'un plasma composé de deux gaz fluorés : l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) et le tétrafluorure de carbone (CF<sub>4</sub>). La fin de la gravure est déterminée par un interféromètre permettant de contrôler le passage à la couche suivante [2]. Les paramètres de gravure sont résumés dans le tableau 3.

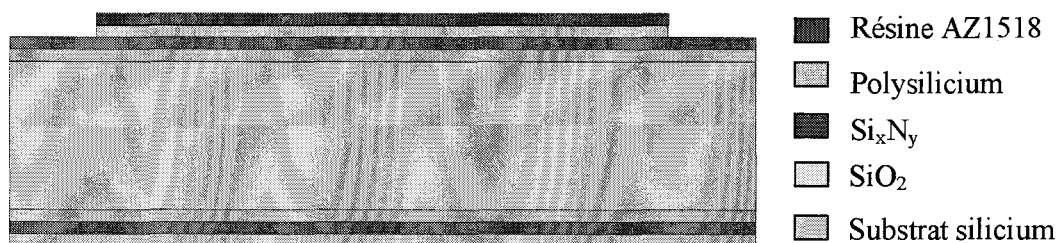


Figure 7 : Gravure de la piste de polysilicium

SF <sub>6</sub> (sccm)	20
CF <sub>4</sub> (sccm)	10
Puissance RF (W)	80
Pression (mTorr)	50
Tension DC (V)	138
Temps de gravure (s)	140
Épaisseur de polysilicium gravée (Å)	4500
Épaisseur de résine gravée (Å)	3000

Tableau 3 : Paramètres de gravure RIE de la piste de polysilicium

Un nettoyage à l'acétone permet de retirer la résine, suivi d'un rinçage à l'alcool et un séchage sous azote (figure 8). Il est possible alors de passer à l'étape suivante : le dépôt de la sonde platine.

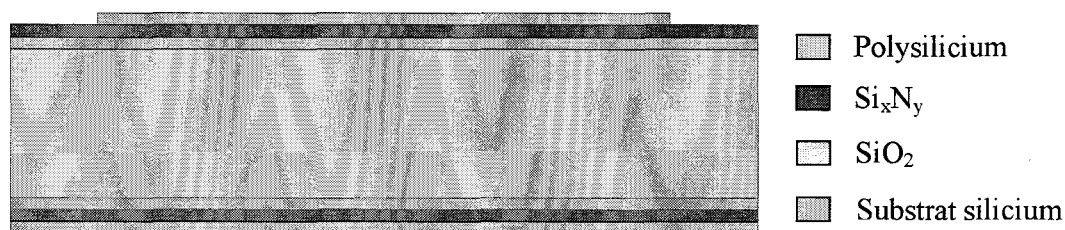


Figure 8 : Réalisation des pistes de polysilicium

## 2.4 Métallisation de la sonde Platine (PT1000)

Cette sonde va permettre de mesurer la température du microcapteur pour réaliser la compensation de soudure froide. C'est une résistance électrique placée au centre du microcapteur directement sur le nitrure de silicium. Pour cette étape, l'alignement du substrat est effectué à l'aide des motifs précédents. La résine est déposée puis insolée avec le masque n°2 (figure 9).

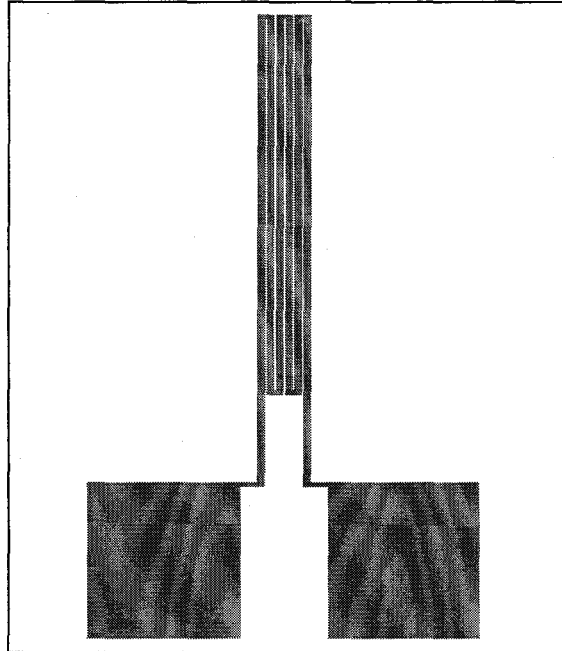


Figure 9 : Masque n°2 Dépôt de la sonde platine

La métallisation est réalisée par lift-off. Pour cela, un profil en casquette avec la résine AZ1518 est nécessaire (figure 10). Les paramètres lithographiques correspondants sont détaillés dans le tableau 4. Seul un contrôle rigoureux au microscope permet de déterminer la fin de la révélation. Dans un bâti d'évaporation MECA 2000, sont déposées une couche d'accrochage de titane (Ti) de 200 Å puis une couche de platine (Pt) de 1000 Å. Pour obtenir un meilleur accrochage de ces couches sur le nitrure de silicium, une légère gravure à l'argon ( $Ar^+$ ) précède le dépôt [3], [4].

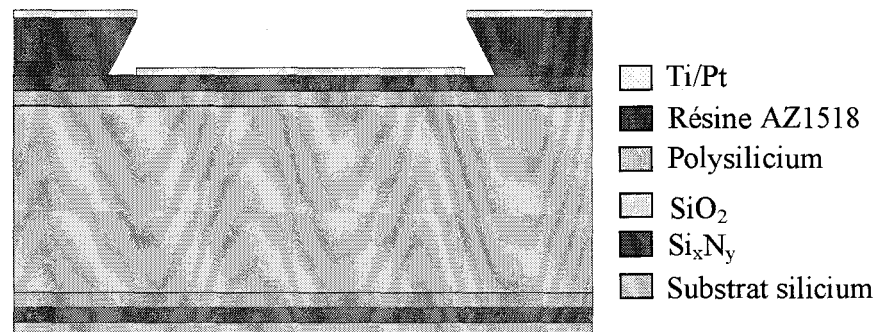


Figure 10 : Profil en casquette obtenu avec la résine AZ1518 pour la réalisation de la sonde platine

Vitesse de rotation	2000 rpm
Accélération	3000 rpm.s <sup>-1</sup>
Durée de centrifugation	10 s
Temps de recuit plaque à 110°C	60 s
Durcissement surface résine MIF 326	35 s
Insolation UV 365 nm 11.5 mW/cm <sup>2</sup>	5,0 s
Recuit plaque à 120°C	60 s
Révélation AZ400/Eau DI (1/3)	50 s
Rinçage	Eau désionisée
Séchage	Azote
Epaisseur	2,5 µm

Tableau 4 : Paramètres lithographiques d'un profil casquette avec la résine AZ1518

Le wafer est plongé dans un bain d'acétone pour terminer l'opération de lift-off et évacuer le métal en excès déposé sur la résine. Suit un nettoyage à l'acétone et à l'alcool, puis un séchage sous azote [5]. Les résistances électriques des sondes en platine sont mesurées sous pointes. Les valeurs légèrement supérieures à 1000 Ω sont dues aux résistances de contact qui seront améliorées après la métallisation d'or sur les plots d'accès.

## 2.5 Métallisation des thermoéléments et des plots d'accès en or

Les thermocouples plaqués sont composés de la piste en polysilicium recouverte de thermoéléments en or qui constitue le deuxième matériau thermoélectrique. Pour cette étape, le masque n°3 est utilisé (figure 11).

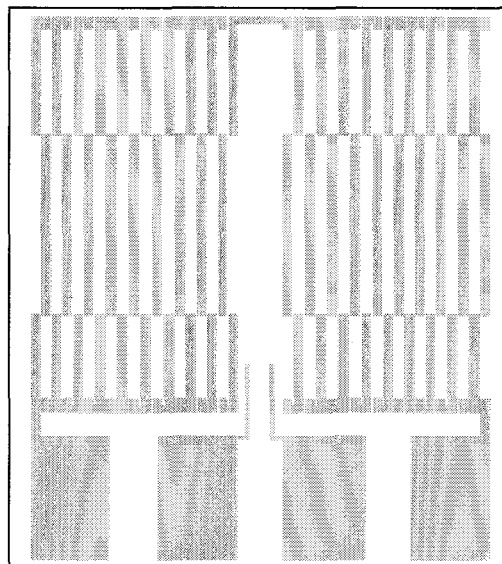
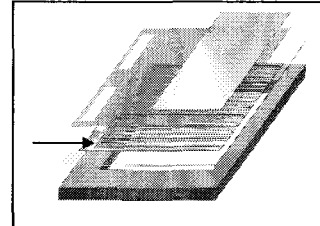


Figure 11 : Masque n°3 Dépôt des thermoéléments et des plots d'accès en or

Le dépôt d'or (1500 Å) par évaporation se déroule dans les mêmes conditions que pour la sonde platine. Le lift-off est obtenu par un profil en casquette identique avec la résine AZ1518 (figure 12). Seule l'épaisseur de la couche d'accrochage en titane est différente (1000Å).

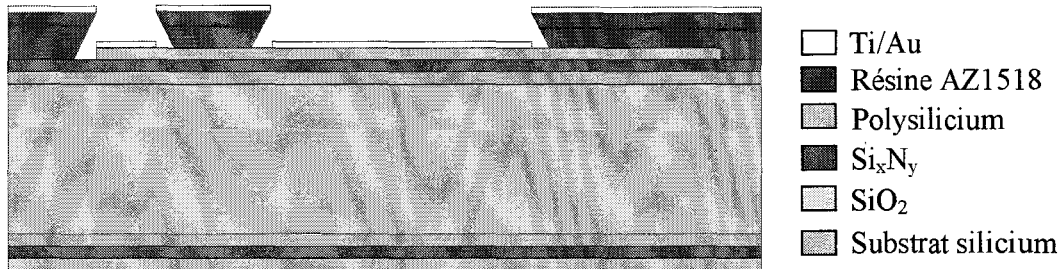


Figure 12 : Profil en casquette de la résine AZ1518 lors de la métallisation Ti/Au

Le profil de métallisation d'un thermoélément et d'un plot d'accès est illustré figure 13.

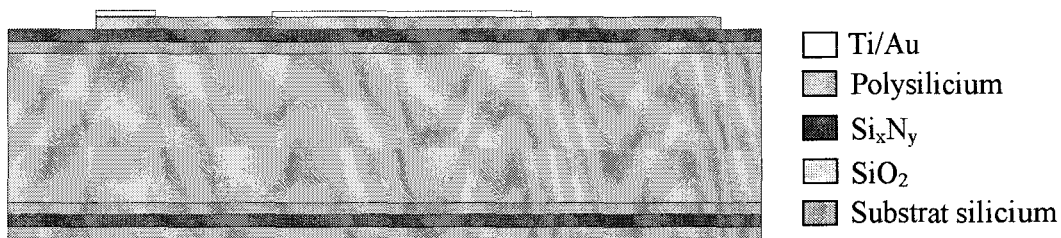


Figure 13 : Métallisation d'un thermoélément et d'un plot d'accès en or par lift-off

Dès cette étape, il est possible de mesurer sous pointes les résistances électriques internes qui sont de 650 kΩ pour les microcapteurs de dimensions 3x3 mm<sup>2</sup> et 1800 kΩ pour ceux de 5x5 mm<sup>2</sup>. En général, on procède à un recuit flash pour que l'or déposé diffuse dans le polysilicium afin d'obtenir un meilleur contact ohmique au niveau des plots d'accès. Ce recuit est composé d'une rampe de montée en température d'une minute pour atteindre 300°C, puis d'un palier d'une minute, et pour finir d'un retour à la température ambiante en une minute. Cependant, cette opération dégrade légèrement l'état de surface de l'or. C'est pourquoi on préfère opérer ce recuit en même temps que le traitement thermique du polyimide lors de l'étape suivante. L'aspect des pistes en or est alors très peu dégradé (figures 14 et 15).

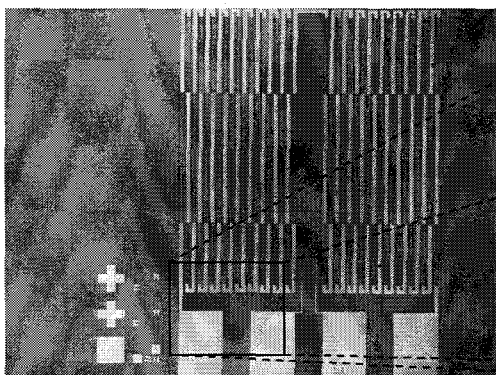


Figure 14 : Thermopile polysilicium/or



Figure 15 : Zoom sur les pistes métallisées en or

## 2.6 Dépôt de la partie absorbante

Des études antérieures [6], [7], [8] ont montré que le choix du polyimide PI-2731, fabriqué par l'entreprise HD Microsystems [9], permettait d'obtenir de bons résultats avec une absorptivité dans l'infrarouge proche de 0,9. Il est photosensible négatif et son épaisseur est proche de 10  $\mu\text{m}$  après polymérisation. Il est utilisé comme une résine, déposé sur la tournette à l'aide d'une seringue après avoir employé un promoteur d'adhérence adéquat. Un pré-étalement obtenu à vitesse lente est indispensable pour obtenir une épaisseur homogène sur tout le substrat. Après le recuit, le polyimide est insolé à travers le masque n°4 (figure 16) qui permet de réaliser des ouvertures afin de dégager les plots de contact de la thermopile et de la sonde platine. La révélation est effectuée avec le développeur DE-9040 et le nettoyage avec la solution de rinçage spécifique RI-9180 (figure 17). Tous les paramètres de dépôts [10] sont précisés dans le tableau 5. Avant la polymérisation, l'épaisseur du polyimide est d'environ 20  $\mu\text{m}$ .

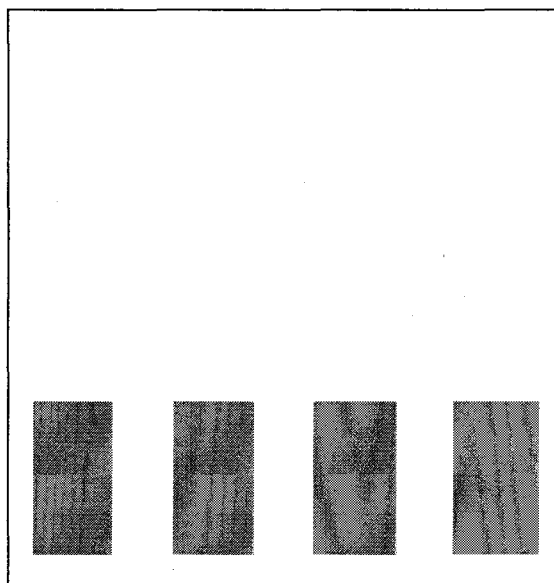
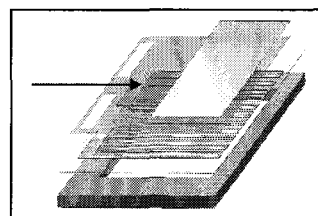


Figure 16 : Masque n°4 Ouverture des plots de contact

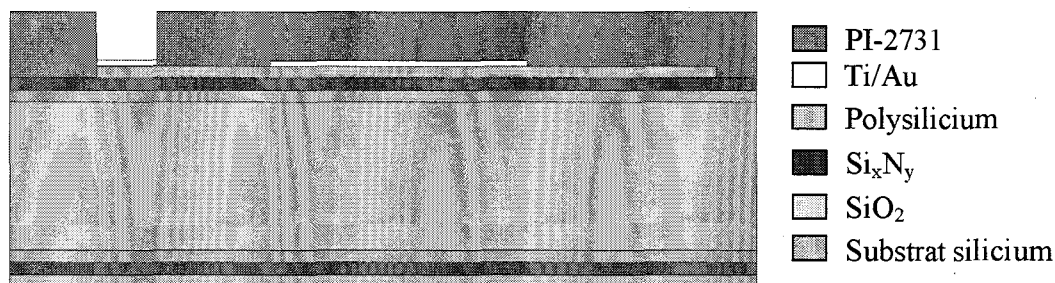


Figure 17 : Ouverture du polyimide pour les plots de contact



Paramètres d'étalement du Polyimide PI-2731	
Vitesse de rotation (rpm)	500
Accélération (rpm/s)	500
Temps de centrifugation (s)	90
Conditions de durcissement du polyimide après le dépôt	
Plaque chauffante	Four à convection
60°C pendant 3 min puis 95°C pendant 3min	55°C pendant 75 min
Insolation UV 365 nm 11.5 mW/cm <sup>2</sup>	23 s
Révélation du polyimide	
Développeur DE9040	150
Rinse RI9180	30
Séchage tournette	30 s à 1000 rpm

Tableau 5 : Paramètres de dépôt du polyimide PI-2731

La polymérisation du polyimide est effectuée par un traitement thermique dans un four tubulaire sous une atmosphère contrôlée (air ou azote). Ce recuit est détaillé dans la figure 18.

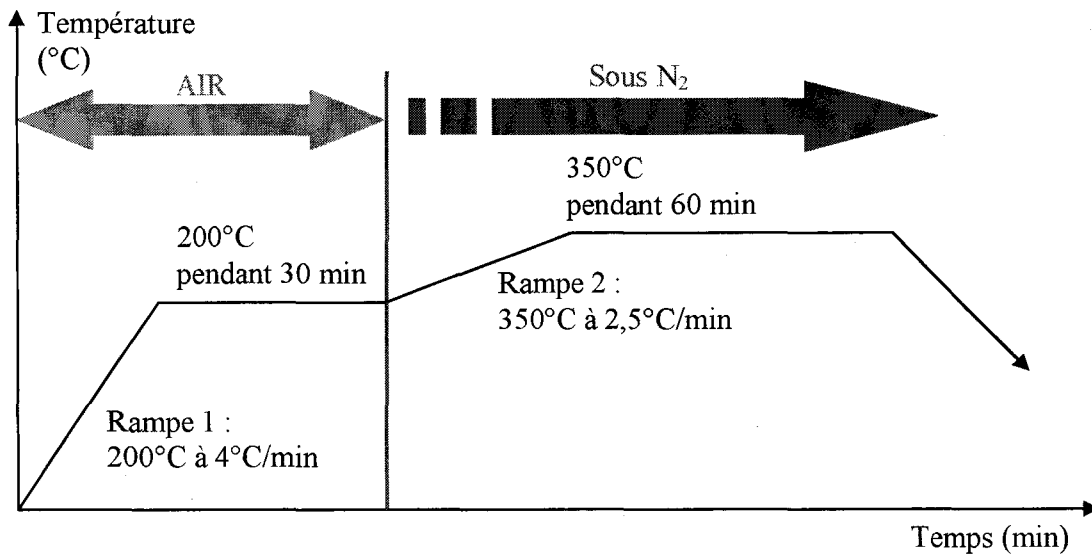


Figure 18 : Traitement thermique du polyimide

Après la polymérisation, le polyimide a atteint l'épaisseur voulue d'environ 10  $\mu\text{m}$  (figure 19). De plus, le contact ohmique au niveau des plots d'accès a été amélioré.

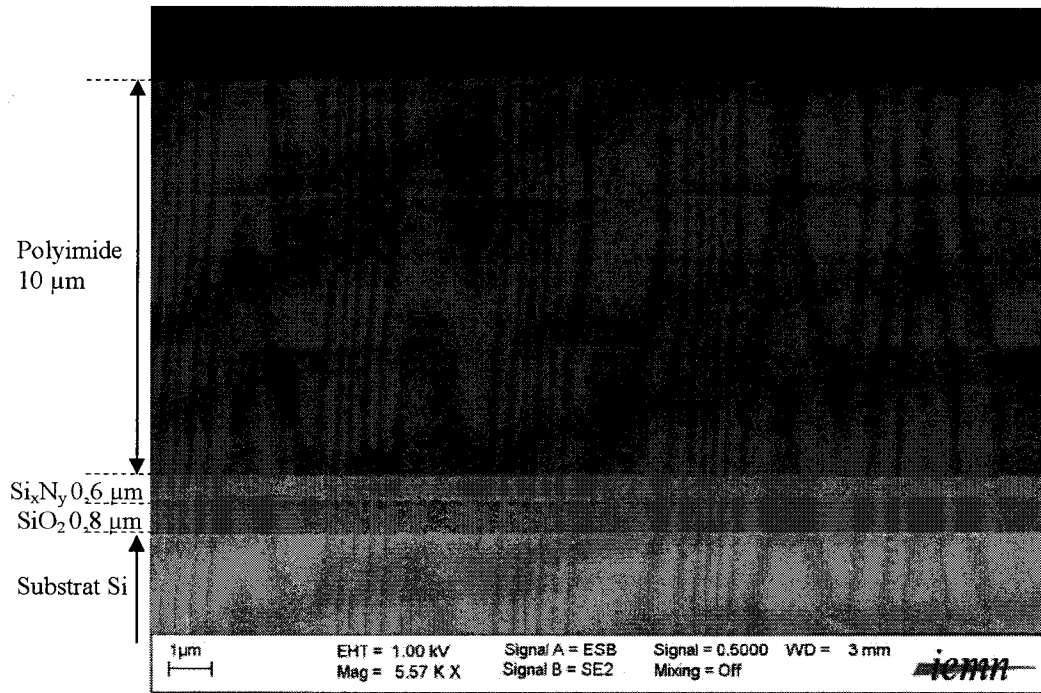


Figure 19 : Photographie des différentes couches du microcapteur (MEB)

## 2.7 Réalisation de la partie réfléchissante

Cette étape de métallisation des réflecteurs et d'épaississement des plots est constituée d'un dépôt d'or réalisé par lift-off avec le masque n°5 (figure 20).

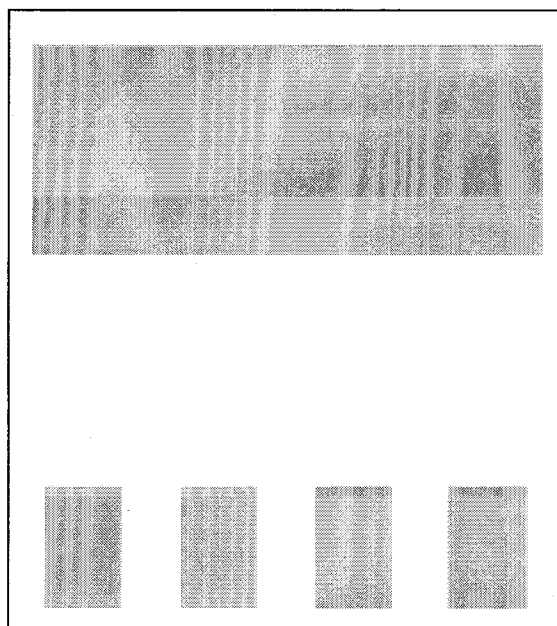
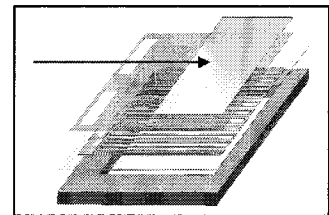


Figure 20 : Masque n°5 Dépôt des réflecteurs Or

Un profil en casquette de la résine AZ1518 est effectué, comme précédemment pour le dépôt des pistes. Cette fois, le dépôt par évaporation de 700 Å d'or est précédé d'une couche d'accrochage de 200 Å de titane. Un bain d'acétone termine le lift-off. Le substrat est nettoyé dans un bain d'alcool et séché sous azote. Le schéma en coupe d'un microcapteur est représenté (figure 21) ainsi qu'une photographie d'une partie d'une matrice 5x2 (figure 22).

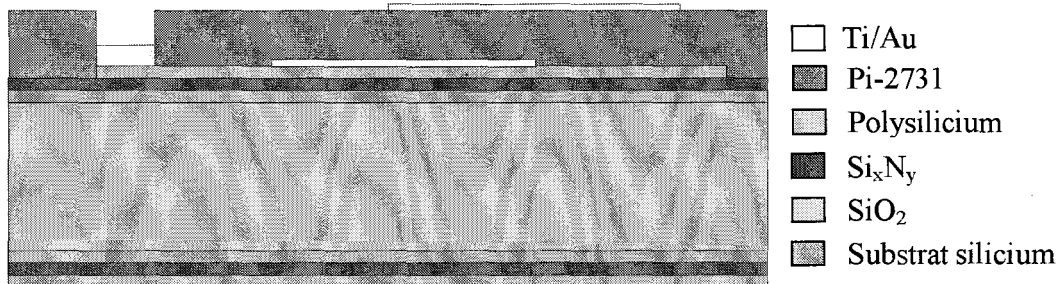


Figure 21 : Réalisation des réflecteurs en or et épaisseur des plots de contact

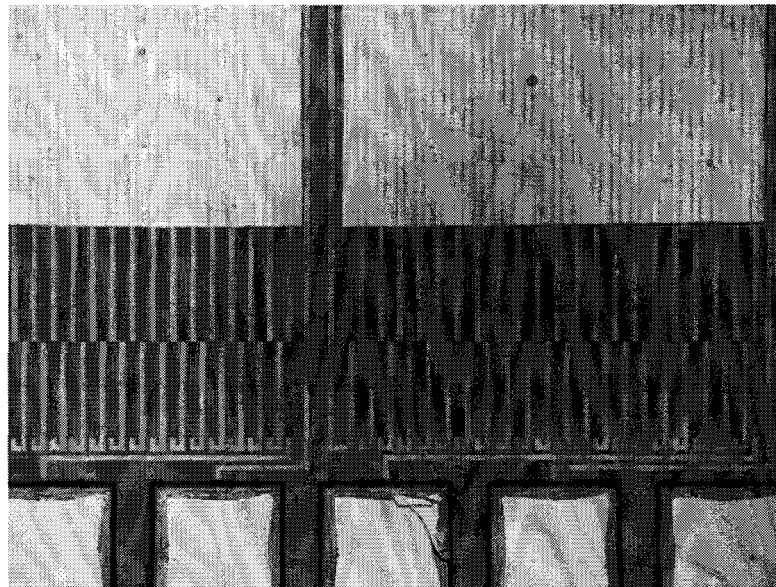
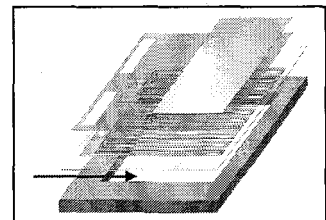


Figure 22 : Photographie d'une partie d'une matrice de microcapteur 5x2

## 2.8 Micro-usinage du substrat par la face arrière

L'objectif de cette étape est de dégager la membrane, ainsi que d'usiner les traits de découpe du microcapteur par creusement du substrat en face arrière. Il est important de protéger la face avant pour ne pas détériorer les réalisations précédentes et en particulier les réflecteurs. Pour cela, une couche de résine AZ1518 est simplement déposée et recuite à 110°C pendant une minute (figure 23).



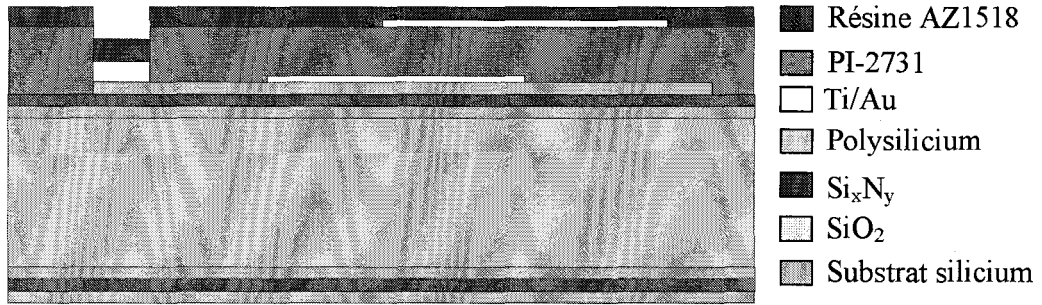


Figure 23 : Protection de la face avant par une couche de résine

Le micro-usinage par la face arrière est effectué dans le bâti de gravure profonde et sèche de la société STS (Surface Technology System) par ICP (Inductive Coupled Plasma). Le bâti permet de creuser le substrat suivant des flancs droits. En effet, ces capteurs étant destinés à être fortement miniaturisés, sous forme de matrices, il est impératif que le volume creusé dans le substrat soit parfaitement parallélépipédique. Une gravure chimique au KOH aurait donné de mauvais résultats puisque le volume obtenu dépend de l'orientation des plans cristallins du substrat de silicium. Afin de réaliser un masque résistant à la gravure profonde par ICP, une étape de photolithographie à l'aide du masque n°6 (figure 24) est réalisée sur la face arrière du substrat (figure 25). Les paramètres de dépôt d'induction de résine sont donnés dans le tableau 6.

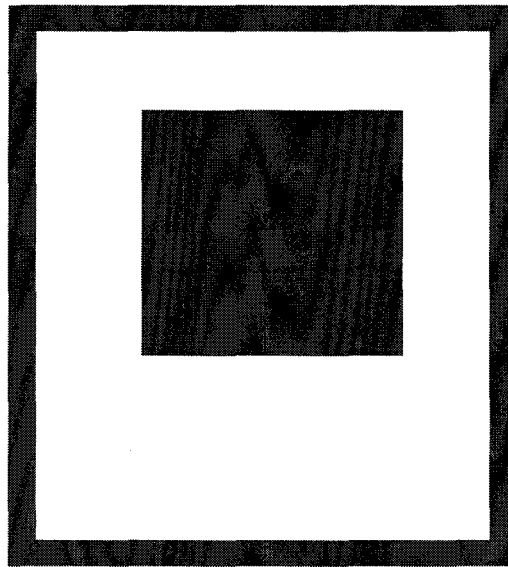


Figure 24 : Masque n°6 Ouverture des membranes face arrière

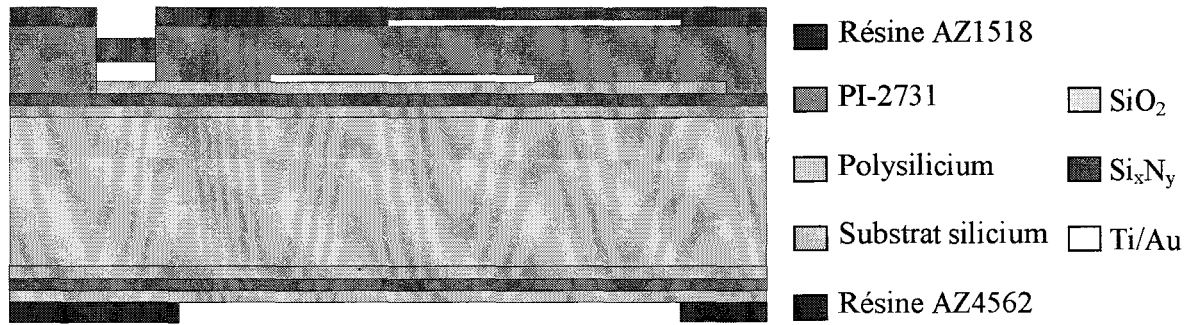


Figure 25 : Ouverture de la résine pour la gravure du bicouche SiO<sub>2</sub>/Si<sub>x</sub>N<sub>y</sub>

Vitesse de rotation	1500 rpm
Accélération	3000 rpm.s <sup>-1</sup>
Durée de centrifugation	40 s
Temps de recuit plaque à 110°C	3 min
Insolation UV 365 nm 11.5 mW/cm <sup>2</sup>	18 s
Temps de recuit plaque à 110°C	3 min
Révélation AZ351B/Eau DI (1/3)	50 s
Temps de recuit à l'étuve à 100°C	70 min
Rinçage	EDI
Séchage	N <sub>2</sub>
Epaisseur déposée	8 μm

Tableau 6 : Paramètres lithographiques pour la définition des ouvertures de membranes

Au lieu d'orienter le substrat directement sur le masque, l'aligneur MA6 double-face permet de prendre une photographie des motifs du masque et l'alignement du substrat est effectué à partir de cette photographie.

Les couches d'oxyde et de nitrure de silicium, ainsi que de polysilicium (figure 26) sont ensuite gravées dans le bâti de gravure sèche par RIE suivant les paramètres du tableau 7. Le plasma est composé de deux gaz fluorés: le tétrafluore de carbone (CF<sub>4</sub>) et le trifluorométhane (CHF<sub>3</sub>).

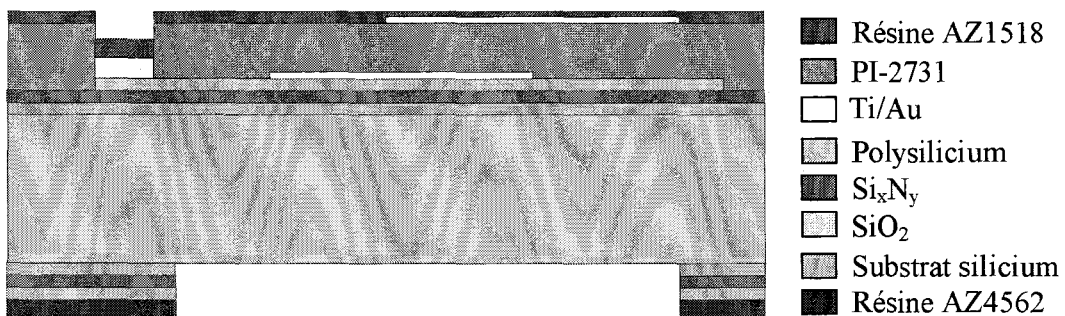


Figure 26 : Gravure des couches SiO<sub>2</sub>, Si<sub>x</sub>N<sub>y</sub> et polysilicium par RIE

CHF <sub>3</sub> (sccm)	20
CF <sub>4</sub> (sccm)	20
Puissance RF (W)	180
Pression (mTorr)	50
Temps de gravure (min)	42
Epaisseur de matériau gravée (Å)	13000

Tableau 7 : Paramètres de gravure RIE de la bicouche SiO<sub>2</sub>/Si<sub>x</sub>N<sub>y</sub>

L'ouverture dans ces couches étant opérée, l'étape suivante consiste à effectuer la gravure profonde du silicium (figure 27) à l'aide du bâti STS-ICP. La température du support du wafer est fixée à 10°C afin de minimiser l'échauffement de la face avant et de mieux contrôler la gravure. Pour réaliser cette opération et obtenir des flancs droits, le procédé BOSCH [11], [12], [13], [14] est utilisé (Annexe 1). Quelques photographies de capteurs ainsi réalisés sont présentées figures 28, 29, 30 et 31.

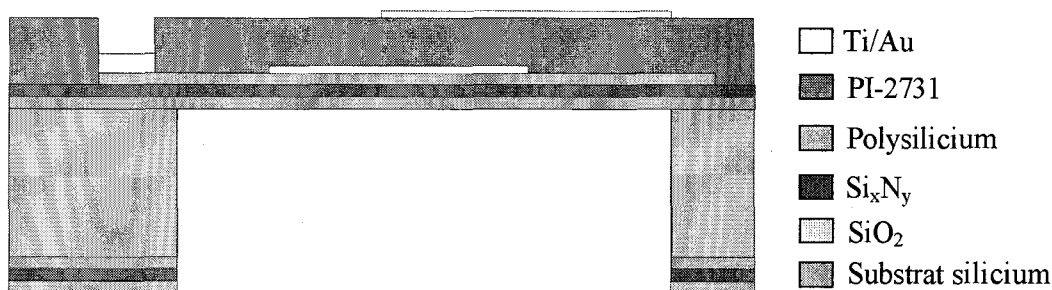


Figure 27 : Réalisation de la membrane par gravure ICP

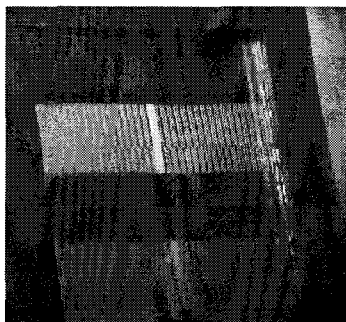


Figure 28 : Face arrière d'un microcapteur

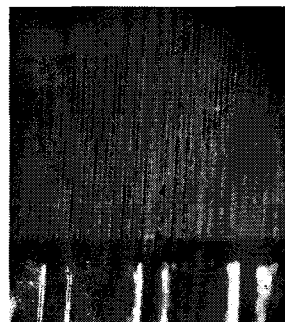


Figure 29 : Face avant d'un microcapteur

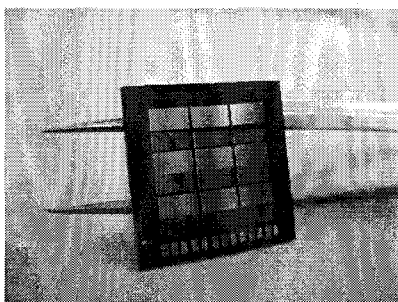


Figure 30 : Matrice 3x3 microcapteurs (face avant)

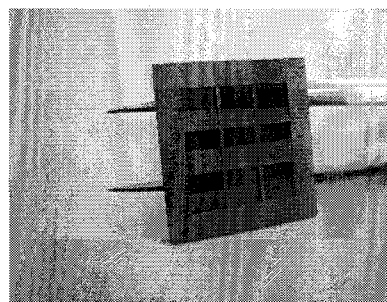


Figure 31 : Matrice 3x3 microcapteurs (face arrière)

### 3 Réalisation des microcapteurs à détectivité spécifique améliorée

Le modèle analytique modifié (chapitre II) a permis de définir une structure pour les microcapteurs à détectivité spécifique optimisée. Dans ce cas, la topologie de la piste thermoélectrique est variable : la largeur des thermoéléments plaqués en or/polysilicium est rétrécie et celle des thermoéléments en polysilicium est augmentée. Un nouveau jeu de masques a donc été réalisé. Le masque n°1 est modifié de façon à prendre en compte la largeur variable des pistes de polysilicium. La sonde platine située au centre de la membrane et définie par le masque n°2 prend la place de deux pistes. Par conséquent, seule la moitié de ces microcapteurs sera munie d'une sonde platine. La réduction de la largeur des pistes en or est prévue sur le masque n°3. Le masque n°4 permettant l'ouverture du polyimide au niveau des plots de contact a subi des changements uniquement au niveau des microcapteurs ne possédant pas de sonde platine. Le masque n°5 d'épaissement métallique des plots a été modifié aux mêmes endroits. Le masque n°6 reste inchangé. Les étapes de fabrication demeurent identiques. Quelques photographies de réalisations sont présentées ci-dessous (figures 32, 33, 34 et 35).

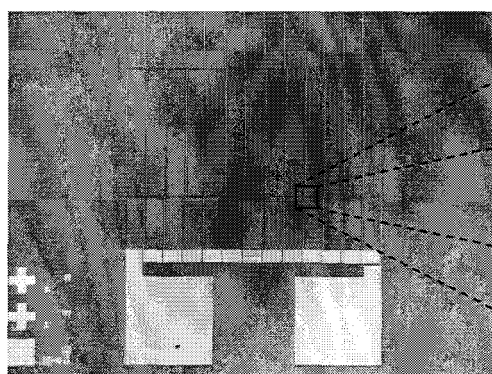


Figure 32 : Microcapteur 3x3 mm<sup>2</sup>

Zoom

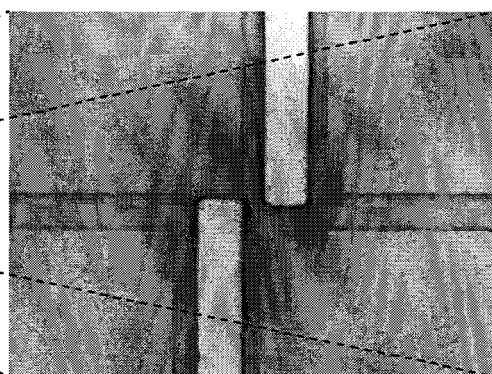


Figure 33 : Thermojonction Polysilicium N/Or

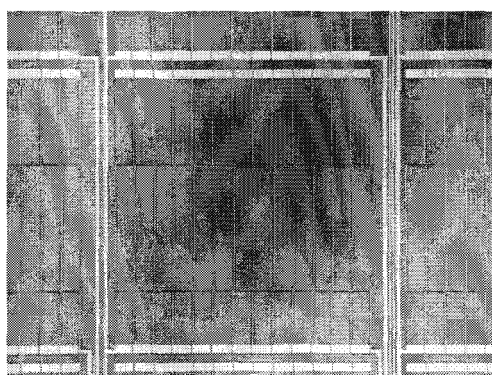


Figure 34 : Vue d'ensemble d'une matrice de microcapteurs

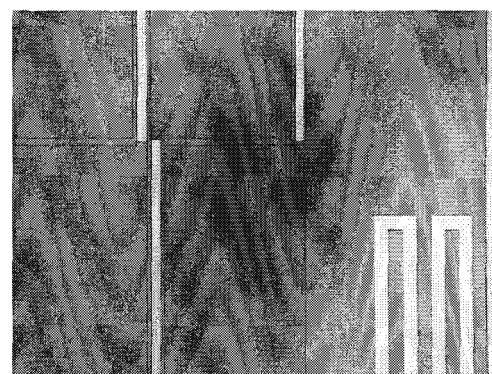


Figure 335 : Sonde platine et thermopile

## **4 Conclusion**

Certains procédés utilisés pour la réalisation des microcapteurs ont été mis au point préalablement au cours de précédents travaux. Cependant dans le cadre de la thèse, la plupart des étapes ont été perfectionnées, notamment pour assurer la robustesse des membranes et la bonne reproductibilité des microcapteurs composant les matrices. Ainsi, le procédé de fabrication des membranes développé initialement avec le concours du LAAS (Toulouse) et de l'IEF (Orsay) a été adapté à la technique de libération par gravure profonde de type ICP. Enfin, de manière générale, chaque étape a été optimisée dans le but de rendre maximal le rendement de fabrication qui est de l'ordre de 90% par wafer.



## BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE III



## **Bibliographie du chapitre III**

- [1] C. Escriba, "Conception, Réalisation et Caractérisation de capteurs infrarouges à thermopiles : Applications à la détection de présence passive dans l'habitat", Thèse de doctorat LAAS, décembre 2005
- [2] H. Sawin Herbert, "A review of Plasma Processing Fundamentals", Solid State Technology (April 1985) 211-216
- [3] A. Richardt, A.M. Durand, "Le vide", Editions In Fine, 1994
- [4] A. Richardt, A.M. Durand, "La pratique du vide et les dépôts de couches minces", Editions In Fine, 1994
- [5] J.R. Lothian, F. Ren, S.J. Pearton, U.K. Chakrabarti, C.R. Abernathy, A. Katz, "Trilayer lift-off metallization process using low temperature deposited SiNx", Journal of Vacuum Science and Technology, B 10(6), Nov/Dec 1992.
- [6] M. Boutchich, "Microcapteurs de rayonnement infrarouge en technologie silicium", Thèse de doctorat USTL, décembre 2002
- [7] A. Ebonguè, "Conception et réalisation de microradiomètres thermiques sur substrats polymères adaptés à la sécurité des biens et des personnes en milieu industriel", Thèse de doctorat USTL, décembre 2002
- [8] K. Ziouche, "Elaboration de nouveaux procédés de fabrication de microcapteurs de rayonnement. Application à la réalisation de microradiomètres UV et IR", Thèse de doctorat USTL, octobre 1999
- [9] HDMICROSYSTEMS, <http://www.hdmicrosystems.com>
- [10] M. Yala-Aithammouda, "Etude et réalisation de microcapteurs de flux thermique en technologie silicium", Thèse de doctorat USTL, juin 2007
- [11] F. Lärmer, A. Schilp, "Method of Anisotropically Etching Silicon", German Patent DE4241045.
- [12] J.K. Bhardwaj, H. Ashraf, "Advanced Silicon Etching Using High Density Plasmas" Proceeding SPIE Micromachining and Microfabrication Process Technology, Vol. 2639, pp.224-233, (1995)
- [13] A. Ayon et al, Journal Electrochemical Society, Vol.146, No.1, pp339-349, 1999
- [14] J. Hopkins et al, MRS Fall Meeting, Boston MA, Dec. 1998



## Chapitre IV

### Caractérisation, applications et perspectives

#### Table des matières

1	Introduction .....	109
2	Banc de mesure .....	110
2.1	Détermination de la sensibilité à l'éclairement .....	111
2.2	Etude de l'influence de la température d'air .....	112
2.3	Détermination du coefficient d'influence lié à la vitesse d'air .....	112
3	Caractérisation des microcapteurs à pistes rectilignes .....	113
3.1	Sensibilité à l'éclairement .....	113
3.2	Influence de la température d'air.....	114
3.3	Coefficient d'influence lié à la vitesse d'air.....	115
3.4	Conclusion.....	115
4	Caractérisation des microcapteurs à détectivité spécifique améliorée.....	116
5	Conclusion sur les microcapteurs.....	117
6	Applications .....	118
6.1	Première application : la domotique.....	118
6.2	Seconde application : Mesure directe des échanges radiatifs entre surfaces .....	120
7	Perspectives : Etude d'un microcapteur sub-millimétrique .....	122
8	Conclusion.....	123
	Bibliographie du chapitre IV.....	127



## 1 Introduction

Les résultats de modélisation présentés au chapitre II ont permis de montrer que la f.e.m. (V) délivrée par un microcapteur est proportionnelle au flux net d'origine radiative effectivement absorbé par son revêtement constitué d'une succession de zones absorbantes et réfléchissantes.

En considérant que la surface du capteur est à température sensiblement uniforme et est assimilable à un corps gris, le flux net s'exprime à l'aide de la relation classique :

$$\Phi_{\text{net}} = a_s \cdot (E - \sigma T_s^4) \quad (\text{IV.1})$$

avec  $a_s$  l'absorptivité de la surface du microcapteur  
 $E$  l'éclairement énergétique ( $\text{W}/\text{m}^2$ )  
 $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ )  
 $T_s$  la température moyenne de la surface du capteur (K)

En introduisant une constante de proportionnalité notée B, la f.e.m. peut s'écrire :

$$V = B \cdot \Phi_{\text{net}} = B \cdot a_s (E - \sigma T_s^4) = B \cdot a_s \cdot E - B \cdot a_s \cdot \sigma T_s^4 \quad (\text{IV.2})$$

En remplaçant le produit  $B \cdot a_s$  par la sensibilité du capteur ( $S_E$ ) la relation précédente devient :

$$V = S_E E - B \cdot a_s \cdot \sigma T_s^4 \quad (\text{IV.3})$$

Ou encore , puisque  $B = S_E / a_s$

$$V = S_E \cdot (E - \sigma T_s^4) \quad (\text{IV.4})$$

Cette relation permet de montrer de façon simple que la tension délivrée par le capteur est bien proportionnelle à l'éclairement énergétique E mais que la courbe  $V = f(E)$  ne passe pas zéro car elle est affectée d'une ordonnée à l'origine fonction de la température du capteur ( $T_s^4$ ). La valeur de la sensibilité  $S_E$  pourra donc être directement déduite de la pente de cette courbe.

Les influences de la température ambiante ( $T_a$ ) et de la vitesse de l'air (u) environnant le microcapteur seront évaluées comme nous l'avons montré au chapitre II à l'aide des relations suivantes :

-  $C_{T_a}$  : coefficient d'influence de la température ambiante en  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

$$C_{T_a} = \frac{1}{S_E} \left( \frac{\partial V}{\partial T_a} \right)_{E, T_{\text{sub}}, u = \text{ctes}} \quad (\text{IV.5})$$

-  $C_u$  : coefficient d'influence de la vitesse d'air en  $\text{W} \cdot \text{s}/\text{m}^3$

$$C_u = \frac{1}{S_E} \left( \frac{\partial V}{\partial u} \right)_{E, T_a, T_{\text{sub}} = \text{ctes}} \quad (\text{IV.6})$$

## 2 Banc de mesure

Ce banc de mesure spécifique a été réalisé au laboratoire en 1998 et utilisé à de nombreuses reprises [1], [2], [3], [4].

La source de chaleur est composée d'une plaque de 20x20 cm<sup>2</sup> régulée en température entre 20 et 100 °C (figure 1). Cette cible est recouverte d'une peinture noire qui lui donne les propriétés d'absorber et d'émettre dans le domaine infrarouge avec une émissivité  $\epsilon_c$  proche de 0,95. Le microcapteur est fixé sur une plaque de même surface que la source chaude. La température de la plaque support, mesurée à l'aide d'un thermocouple, est gardée constante grâce à un circuit de refroidissement à eau. Afin de minimiser les perturbations qui pourraient être induites par le rayonnement infrarouge de cette plaque support, celle-ci est recouverte d'un film aluminium d'émissivité  $\epsilon_p$  voisine de 0,1. Les deux plaques sont placées face à face sur des axes parallèles à une distance  $d$ .

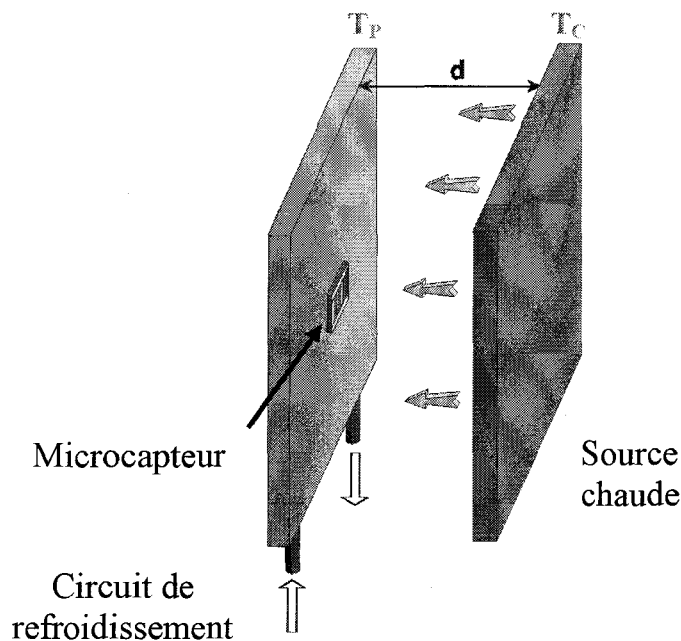


Figure 1 : Banc de caractérisation des microcapteurs de rayonnement

Dans ces conditions, l'éclairement énergétique  $E$  reçu par le microcapteur s'écrit [1],[5]:

$$E = F_{CP} \cdot \sigma \cdot (\epsilon_c \cdot T_c^4 + 0,01 \cdot T_p^4) \quad (\text{IV.7})$$

avec  $F_{CP}$  : le facteur de forme microcapteur/cible

$\sigma$  : la constante de Stefan-Boltzmann

$T_c, T_p$  : les températures de la cible et de la plaque support du microcapteur

$\epsilon_c$  : l'émissivité de la cible



La photographie du banc de mesure est présentée figure 2.

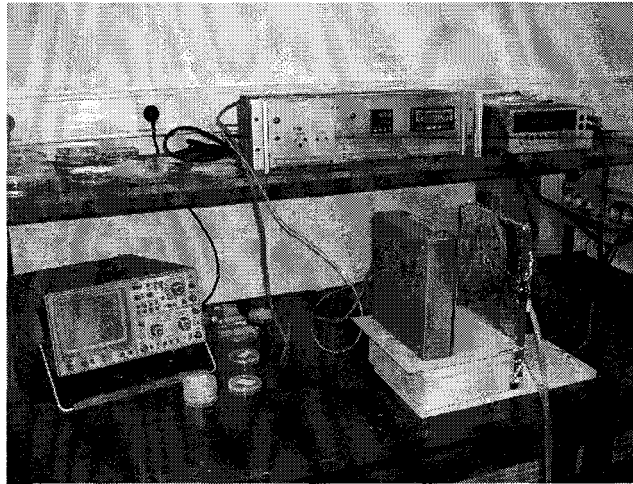


Figure 2 : Photographie du banc de caractérisation des microcapteurs

## 2.1 Détermination de la sensibilité à l'éclairement

Pour déterminer la sensibilité des microcapteurs à l'éclairement infrarouge, les deux plaques sont maintenues à une distance  $d$  constante de 3,5 cm de manière à ne pas modifier le facteur de forme. On fait varier la température de la cible ( $T_C$ ) et l'on mesure la tension de sortie ( $V$ ) des microcapteurs qui est tracée en fonction de l'éclairement  $E$  calculé à partir de  $T_C$  et de  $T_P$ , soit :

$$E = 0,91 \cdot \sigma \cdot (0,95 \cdot T_C^4 + 0,01 \cdot T_P^4) \quad (\text{IV.8})$$

Les courbes  $V(E)$  sont linéaires pour tous les microcapteurs ce qui valide bien le modèle et la relation IV-4. Un exemple est donné figure 3 et la sensibilité est égale à la valeur de la pente de la courbe. Par la suite, les valeurs de la sensibilité obtenues expérimentalement seront comparées aux valeurs théoriques calculées grâce au modèle établi au chapitre II.

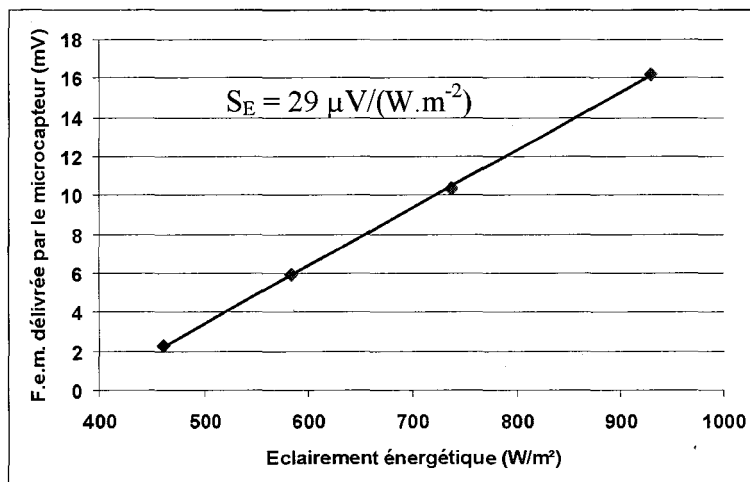


Figure 3 : Exemple de caractérisation d'un microcapteur  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  en fonction de l'éclairement énergétique  $E$

## 2.2 Etude de l'influence de la température d'air

De précédents travaux [5] ont montré que, pour une distance inférieure à 3,5 cm, les microcapteurs classiques sont sensibles à l'échauffement de la lame d'air entre le microcapteur et la cible. L'essentiel du travail de modélisation présenté dans le chapitre II a consisté à optimiser les structures des microcapteurs de manière à compenser l'influence de la température d'air. La vérification pratique de ces résultats s'effectue sur le banc de caractérisation en réduisant la distance séparant le microcapteur de la source chaude dont la température est fixée à 100°C. Ce rapprochement permet en effet, de soumettre le microcapteur à une température d'air plus élevée. Le montage expérimental utilisé est représenté figure 4.

Tout d'abord, l'évolution de la f.e.m. mesurée sera tracée en fonction de la distance et comparée avec la courbe théorique qui prend en compte le facteur de forme [5].

Pour deux distances de 2,5 cm, puis 1,5 cm, la température moyenne de la lame d'air  $T_a$  emprisonnée mesurée par thermocouple varie notablement de 40 °C à 70 °C. La f.e.m. délivrée par le microcapteur sera relevée dans chaque position de plaques et la valeur du terme  $\Delta V/\Delta T_a$  sera calculée pour chaque capteur. On remarquera que dans ces conditions, le facteur de forme varie très peu puisqu'il passe de 0,98 à 0,95.

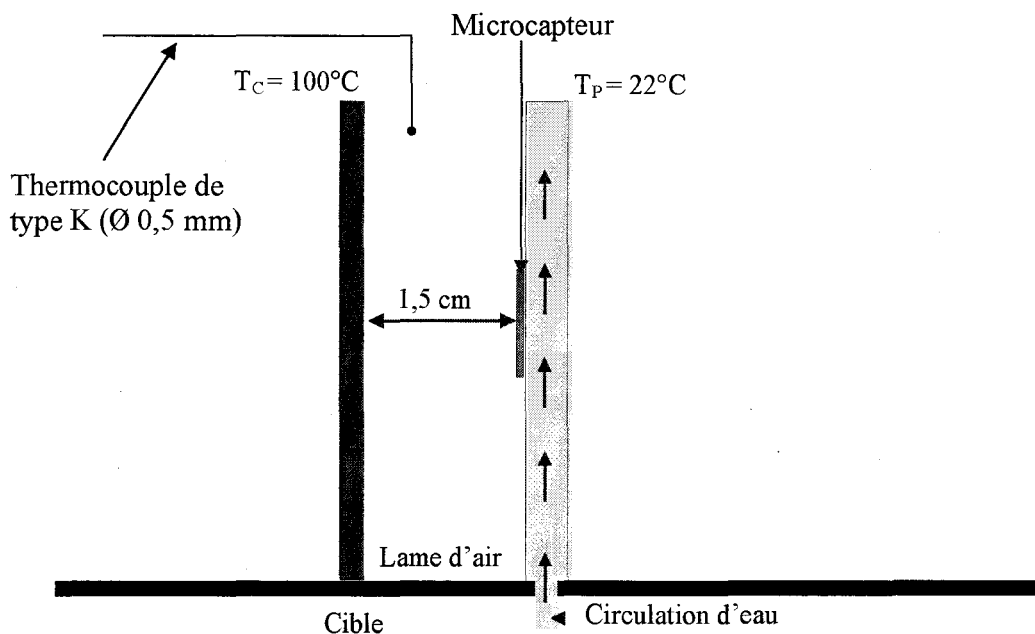


Figure 4 : Montage expérimental pour la détermination du  $C_{T_a}$

## 2.3 Détermination du coefficient d'influence lié à la vitesse d'air

Etudier les variations de f.e.m. par rapport à la vitesse d'air revient à prendre en compte le coefficient d'échange convectif  $h$  dont l'étude directe est complexe. La méthode de caractérisation est alors relativement simple : un ventilateur permet de faire varier la vitesse d'air qui est mesurée à proximité du microcapteur par un anémomètre. Les f.e.m. délivrées par le microcapteur seront relevées en fonction de la température de la cible et de la vitesse d'air.

### 3 Caractérisation des microcapteurs à pistes rectilignes

#### 3.1 Sensibilité à l'éclairement

Différents microcapteurs unitaires ou en matrice (tableau 1), ont été caractérisés et les sensibilités mesurées sont comparées aux valeurs théoriques calculées en fonction des paramètres topologiques correspondant à leurs structures et à leurs dimensions.

Dimensions des microcapteurs	3x3 mm <sup>2</sup>	3x3 mm <sup>2</sup> Membrane élargie	3x3 mm <sup>2</sup>	5x5 mm <sup>2</sup>	5x5 mm <sup>2</sup>
Type de microcapteur	Unitaire 2 zones sonde	Unitaire 2 zones sonde	Matrice 2 zones	Unitaire 2 zones sonde	Unitaire 4 zones sonde
Nombre de pistes	38	38	42	68	68
S <sub>E</sub> théorique (μV/(W.m <sup>-2</sup> ))	30,02	30,02	33,18	93,84	79,56
S <sub>E</sub> mesurée (μV/(W.m <sup>-2</sup> ))	28,00	29,50	32,00	92,40	78,00
Erreur sur S <sub>E</sub> (%)	7	2	4	2	2
Résistance électrique interne R <sub>eI</sub> (kΩ)	610	610	680	1760	1780
DéTECTIVITÉ spécifique théorique D* (cm.Hz <sup>1/2</sup> .W <sup>-1</sup> )	1,55.10 <sup>7</sup>	1,55.10 <sup>7</sup>	1,55.10 <sup>7</sup>	1,60.10 <sup>7</sup>	1,42.10 <sup>7</sup>
DéTECTIVITÉ spécifique Mesurée D* (cm.Hz <sup>1/2</sup> .W <sup>-1</sup> )	1,31.10 <sup>7</sup>	1,38.10 <sup>7</sup>	1,42.10 <sup>7</sup>	1,57.10 <sup>7</sup>	1,29.10 <sup>7</sup>
Erreur sur D*(%)	16	11	8	2	9

Tableau 1 : Caractéristiques des microcapteurs en fonction des paramètres topologiques

L'insertion d'une sonde de température en platine au centre de certains microcapteurs a réduit le nombre de pistes et par conséquent, leur sensibilité à l'éclairement énergétique. C'est le cas des microcapteurs unitaires 3x3 mm<sup>2</sup> et 5x5 mm<sup>2</sup>.

Ces résultats montrent que les valeurs de sensibilités théoriques et mesurées sont très proches à la fois pour les capteurs 3x3 mm<sup>2</sup> et 5x5 mm<sup>2</sup> à deux ou quatre zones ce qui permet de valider le modèle. Une erreur faible (2 %) est obtenue pour le capteur 3x3 mm<sup>2</sup> dont la membrane a été élargie dans le sens perpendiculaire aux pistes. Ce résultat confirme la cohérence du modèle qui, dans ce cas précis, comportait comme condition aux limites une membrane de longueur infinie suivant cette direction.

Les résistances internes de ces microcapteurs sont très élevées, en particulier, pour ceux de grandes dimensions. Par conséquent, les détectivités spécifiques sont faibles, atteignant au maximum 1,60.10<sup>7</sup> cm.Hz<sup>1/2</sup>.W<sup>-1</sup>.

### 3.2 Influence de la température d'air

Les tensions de sortie des microcapteurs relevées pour différentes distances sont présentées figure 5 et comparées aux courbes théoriques prenant en compte le facteur de forme (Annexe 3).

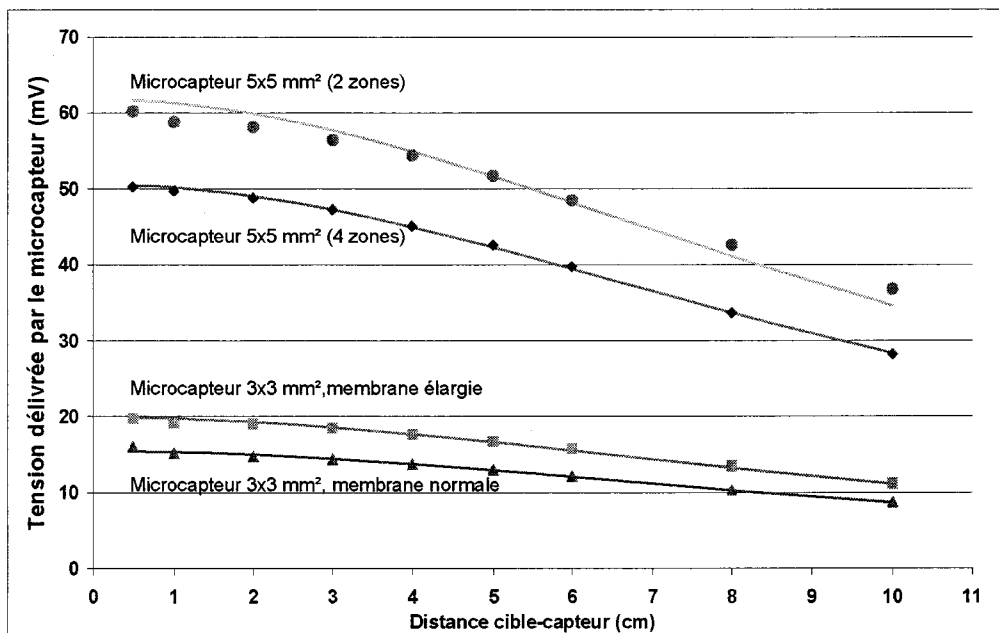


Figure 5 : Points de mesure et courbes théoriques de la tension de sortie en fonction de la distance cible- microcapteur

Le signal augmente lorsque le microcapteur se rapproche de la source chaude. Or, pour toutes les distances et pour tous les microcapteurs, les points de mesure suivent les courbes théoriques qui ne tiennent compte que de l'évolution du facteur de forme. Même pour une distance très faible, en l'occurrence 5 mm, les microcapteurs ne subissent donc pas l'influence de la température d'air. Ce dernier résultat important permet de valider complètement le modèle analytique développé précédemment.

Les variations de f.e.m. délivrées par les microcapteurs induites par les variations de température de la lame d'air (de 40°C à 70°C) sont enregistrées pour chaque capteur et le coefficient d'influence de la température ambiante ( $C_{Ta}$ ) est calculé suivant l'équation (IV.5). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 2.

Dimensions des microcapteurs	3x3 mm <sup>2</sup>	5x5 mm <sup>2</sup>	5x5 mm <sup>2</sup>
Type de microcapteur	2 zones	2 zones	4 zones
$\Delta V/\Delta T_a$ (mV/°C)	0,01	0,05	0,05
$C_{Ta}$ (W.m <sup>-2</sup> .°C <sup>-1</sup> )	0,39	0,58	0,58

Tableau 2 : Mesure de l'influence de la température d'air sur les microcapteurs

Ces résultats montrent une très faible dépendance de ces microcapteurs à la variation de la température. Les coefficients sont supérieurs à la valeur théorique prévue :  $0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$  mais restent néanmoins acceptables.

### 3.3 Coefficient d'influence lié à la vitesse d'air

En faisant varier la vitesse d'air, les f.e.m. délivrées par le microcapteur sont relevées et les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 3 :

Dimensions des microcapteurs	3x3 mm <sup>2</sup>	5x5 mm <sup>2</sup>	5x5 mm <sup>2</sup>
Type de microcapteur	2 zones	2 zones	4 zones
$C_u \text{ (W}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3})$	0,016	0,017	0,010

Tableau 3 : Coefficients d'influence lié à la vitesse d'air des microcapteurs

Le coefficient d'influence de la vitesse d'air ( $C_u$ ) calculé à l'aide de la relation (IV.6) présente des valeurs comprises entre 0,010 et 0,017 ( $\text{W}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Il est intéressant de remarquer que le microcapteur 5x5 mm<sup>2</sup> à quatre zones subit beaucoup moins l'influence de la vitesse d'air que celui à deux zones pour les mêmes dimensions. Ceci est la conséquence directe de l'augmentation du nombre de zones absorbantes et réfléchissantes.

### 3.4 Conclusion

Les résultats des caractérisations des microcapteurs (tableau 4) ont montré les caractéristiques suivantes :

- Leur sensibilité est élevée, en corrélation avec le modèle.
- Leur faible influence à la convection a été démontrée, quel que soit le microcapteur.
- La résistance interne reste très élevée.
- Leur détectivité spécifique est faible par rapport à la littérature où elle est de l'ordre de  $1.10^8 \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ .

Dimensions du microcapteur	3x3 mm <sup>2</sup>	3x3 mm <sup>2</sup> Membrane élargie	3x3 mm <sup>2</sup>	5x5 mm <sup>2</sup>	5x5 mm <sup>2</sup>
Type de microcapteur	Unitaire 2 zones	Unitaire 2 zones	Matrice 2 zones	Unitaire 2 zones	Unitaire 4 zones
Nombre de pistes	38	38	42	68	68
Résistance électrique interne $R_{ei} \text{ (k}\Omega\text{)}$	610	610	680	1760	1780
Sensibilité mesurée $S_E$ ( $\mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$ )	28,00	29,50	32,00	92,40	78,00
Détectivité spécifique $D^* \text{ (cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1})$	$1,31\cdot 10^7$	$1,38\cdot 10^7$	$1,42\cdot 10^7$	$1,57\cdot 10^7$	$1,29\cdot 10^7$
Temps de réponse (ms)	80	80	80	100	100

Tableau 4 : Résumé des caractéristiques des microcapteurs

## 4 Caractérisation des microcapteurs à détectivité spécifique améliorée

La sensibilité à l'éclairement et la détectivité spécifique de ces microcapteurs sont présentées dans le tableau 5 :

Dimensions du microcapteur	3x3 mm <sup>2</sup>	3x3 mm <sup>2</sup> Membrane élargie	3x3 mm <sup>2</sup>	5x5 mm <sup>2</sup>	5x5 mm <sup>2</sup>
Type de microcapteur	Unitaire 2 zones	Unitaire 2 zones	Matrice 2 zones	Unitaire 2 zones	Unitaire 4 zones
S <sub>E</sub> théorique (μV/(W.m <sup>-2</sup> ))	24,70	24,70	24,70	40,30	33,80
S <sub>E</sub> mesurée (μV/(W.m <sup>-2</sup> ))	20,44	19,85	20,25	36,25	31,61
Erreur (%)	17	20	18	10	6
Résistance interne R <sub>ci</sub> (kΩ)	125	117	120	125	190
Détectivité spécifique D* (cm.Hz <sup>1/2</sup> .W <sup>-1</sup> )	2,12.10 <sup>7</sup>	2,13.10 <sup>7</sup>	2,14.10 <sup>7</sup>	2,25.10 <sup>7</sup>	1,60.10 <sup>7</sup>
Temps de réponse (ms)	80	80	80	100	100

Tableau 5 : Caractéristiques des microcapteurs à détectivité spécifique améliorée

Les caractéristiques de ces microcapteurs améliorés montrent une réduction de la résistance interne associée à une détectivité spécifique D\* améliorée. Cependant, pour la sensibilité à l'éclairement, l'erreur entre les résultats de la mesure et du modèle analytique reste importante à cause de problèmes technologiques rencontrés.

Les coefficients d'influence à la température d'air et à la vitesse d'air sont résumés dans le tableau 6 :

Dimensions des microcapteurs	3x3 mm <sup>2</sup>	5x5 mm <sup>2</sup>	5x5 mm <sup>2</sup>
Type de microcapteur	2 zones	2 zones	4 zones
ΔV/ΔT <sub>a</sub> (mV/°C)	0,02	0,03	0,03
C <sub>Ta</sub> (W.m <sup>-2</sup> .°C <sup>-1</sup> )	1,22	1,02	1,02
C <sub>u</sub> (W.s.m <sup>-3</sup> )	0,028	0,032	0,012

Tableau 6 : Coefficients d'influence de la température et de la vitesse d'air des microcapteurs

Ces microcapteurs présentent une légère dépendance à la température d'air avec des valeurs de C<sub>Ta</sub> comprises entre 1,02 et 1,22 W.m<sup>-2</sup>.°C<sup>-1</sup>. Les valeurs de C<sub>u</sub> sont comprises entre 0,012 et 0,032 en fonction des dimensions des microcapteurs. Comme précédemment, le

microcapteur 5x5 mm<sup>2</sup> à quatre zones subit moins l'influence de la vitesse d'air que celui à deux zones : ce résultat était prévisible.

## 5 Conclusion sur les microcapteurs

Les microcapteurs réalisés présentent des caractéristiques qui sont comparées dans le tableau 7 :

Dimensions (mm <sup>2</sup> )	Microcapteurs non améliorés			Microcapteurs améliorés		
	3 x 3	5 x 5	5 x 5	3 x 3	5 x,5	5 x 5
Type de microcapteur	2 zones	2 zones	4 zones	2 zones	2 zones	4 zones
S <sub>E</sub> (μV/(W.m <sup>-2</sup> ))	32,00	92,40	78,00	20,25	36,25	31,61
R <sub>el</sub> (kΩ)	680	1760	1780	120	125	190
D* (cm.Hz <sup>1/2</sup> .W <sup>-1</sup> )	1,42.10 <sup>7</sup>	1,57.10 <sup>7</sup>	1,29.10 <sup>7</sup>	2,14.10 <sup>7</sup>	2,25.10 <sup>7</sup>	1,60.10 <sup>7</sup>
C <sub>Ta</sub> (W.m <sup>-2</sup> .°C <sup>-1</sup> )	0,39	0,58	0,58	1,22	1,02	1,02
C <sub>u</sub> (W.s.m <sup>-3</sup> )	0,016	0,017	0,010	0,028	0,032	0,012

Tableau 7 : Comparaison des caractéristiques des microcapteurs infrarouges

La sensibilité à l'éclairement des microcapteurs à détectivité améliorée est diminuée d'environ 37 % pour les microcapteurs 3x3 mm<sup>2</sup> et de près de 60 % pour les microcapteurs 5x5 mm<sup>2</sup>. En effet, le fait d'élargir les pistes de polysilicium pour diminuer la résistance électrique interne du microcapteur a aussi entraîné une réduction du nombre de thermocouples ce qui explique la chute de sensibilité à l'éclairement énergétique. La résistance électrique interne a été divisée environ par 5 pour les microcapteurs 3x3 mm<sup>2</sup> et jusqu'à 14 pour les microcapteurs 5x5 mm<sup>2</sup>. La méthode de pistes élargie a donc bien permis de réduire de manière significative la résistance interne. En conséquence, la détectivité spécifique a été améliorée de près de 33 % pour les microcapteurs 3x3 mm<sup>2</sup> et de 17 % à 30 % pour les microcapteurs 5x5 mm<sup>2</sup>.

Les microcapteurs non améliorés en détectivité présentent des coefficients d'influence à la température et à la vitesse d'air plus faibles que ceux des microcapteurs améliorés. Comme pour la sensibilité à l'éclairement énergétique, les problèmes rencontrés lors des réalisations technologiques sont à l'origine de ces différences observées. Il faut remarquer que le microcapteur à quatre zones présente un coefficient de dépendance à la vitesse d'air beaucoup plus faible que le même capteur comportant deux zones. Le nombre de zones pourra donc être augmenté au détriment de la sensibilité lorsque le microcapteur devra être soumis à des courants de convection importants.

## 6 Applications

### 6.1 Première application : la domotique

De nombreuses applications sont possibles dans le domaine de la détection humaine. Dans le cadre d'une Action de Recherche Concertée en Ingénierie Urbaine soutenue par la Région Nord-Pas-de-Calais (Annexe 4), un projet visant à améliorer le confort dans l'habitat social pour les personnes à mobilité réduite a été initié [6]. Notre laboratoire a proposé de détecter ces personnes, à l'aide de microcapteurs de rayonnement infrarouge, afin d'automatiser un système de chauffage ou dans le cadre de télésurveillance.

Pour cela, deux maisons témoins ont été équipées par des dispositifs munis de microcapteurs radiatifs IEMN mais aussi de détecteurs de présence grand public de type pyroélectrique. Ces dispositifs ont été placés de manière stratégique de façon à couvrir près de 55% de l'habitat (figure 6). Seules les deux chambres n'ont pas été équipées pour les respecter l'intimité des occupants.

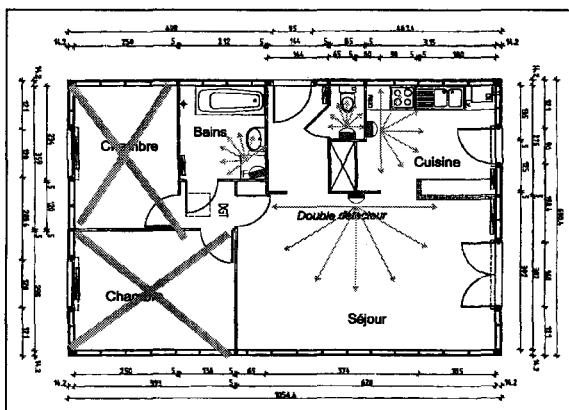


Figure 6 : Plan d'une maison test

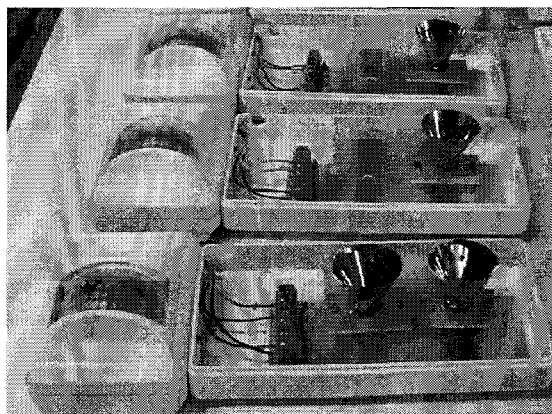


Figure 7 : Modules installés dans les maisons

Les flèches rouges sur le plan de la maison illustre le champ de vision des capteurs, par conséquent, la zone de détection.

Les modules (figure 7) installés dans les maisons témoins sont constitués d'un capteur pyroélectrique muni de sa lentille de Fresnel multi-zone et de microcapteurs IEMN équipés de cônes en acier inoxydable qui concentrent le rayonnement infrarouge avec un angle de visée de  $90^\circ$ . Ces modules sont connectés à un amplificateur de gain 1000 et à un datalogger afin de pouvoir récupérer les mesures à distance par télécommunications. Pour cette étude, les deux types de capteurs sont comparés et le résultat permettra de déterminer lequel est le mieux adapté pour cette application dans le domaine de la domotique.

L'enregistrement des signaux issus des modules est effectué dans la maison tout au long de la journée. La journée du lundi est représentée figure 8. Il est alors possible de suivre les déplacements des personnes pièce par pièce. Par exemple, le matin, les occupants de la maison se lèvent un peu avant 7h00 et se déplacent dans les pièces suivantes : la salle de bain, le salon et les toilettes. Dans le but d'automatiser un équipement domestique tel que le chauffage, il serait intéressant de préchauffer la salle de bain et le salon avant le réveil des locataires.



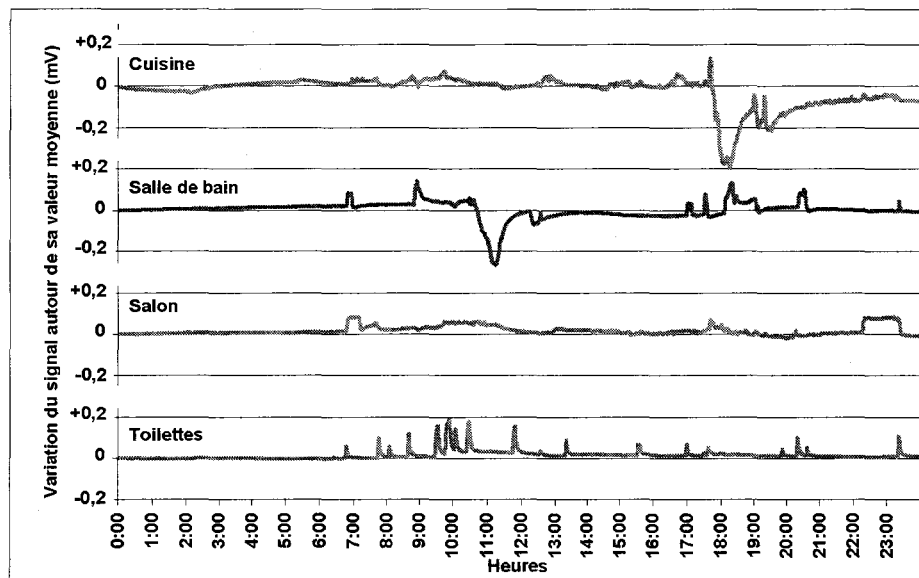


Figure 8 : Détection dans les différentes pièces de la maison (le lundi)

En s'intéressant uniquement à une seule pièce, il est possible de déterminer les habitudes des occupants. Par exemple, les signaux ont été enregistrés dans la cuisine pendant les cinq jours de la semaine (figure 9). L'analyse de cette famille de courbes montre une fréquentation de la cuisine vers midi manifestée par un pic positif (3 jours sur 5). Ensuite, une brusque chute du signal est observée, s'expliquant par la formation de condensation sur les fenêtres devant les capteurs. Ceci entraîne une chute de tension lors de l'évaporation de la couche d'eau condensée. Le même phénomène se répète en soirée entre 18h et 19h (4 jours sur 5). Ces phénomènes de condensation pourraient être réduits en déclenchant une VMC.

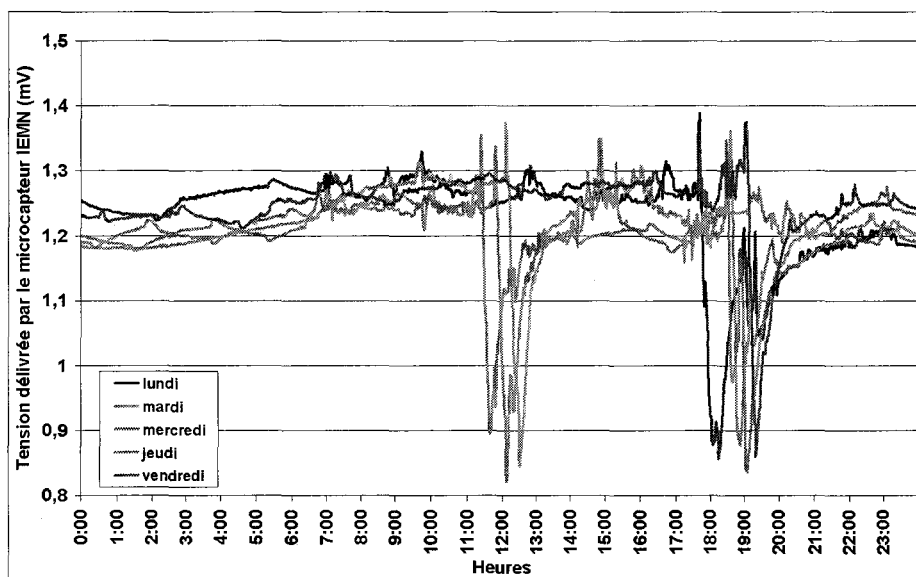


Figure 9 : Résultats illustrant la détection de présence dans la cuisine

L'efficacité du microcapteur IEMN est clairement mise en évidence durant une journée dans le salon (figure 10). Le capteur pyroélectrique détecte quelques passages dans la pièce (vers 18h) et l'arrivée et le départ de personnes dans le salon dans la soirée entre 22h et 23h30. Dans cette même période, le microcapteur IEMN détecte en continu la présence des personnes dans le salon dès leur arrivée jusqu'au départ.

Avant 22h, jusqu'à trois pics de présence sont enregistrés par le capteur pyroélectrique, alors que le microcapteur IEMN n'a rien observé. Cela s'explique simplement par le mode d'enregistrement des données. Pour les raisons techniques de stockage, les tensions ne sont relevées que toutes les minutes pour le microcapteur IEMN et le capteur pyroélectrique. Mais pour ce dernier, un compteur interne est utilisé : chaque passage d'une personne devant le capteur est comptabilisé et c'est le nombre de passage qui est mis en mémoire. Pour ce cas précis, les personnes ont pu passer devant les deux types de capteurs jusqu'à trois fois pendant une minute. Par conséquent, le capteur pyroélectrique a dénombré trois passages alors que le microcapteur IEMN n'a rien mesuré lors de l'enregistrement des données.

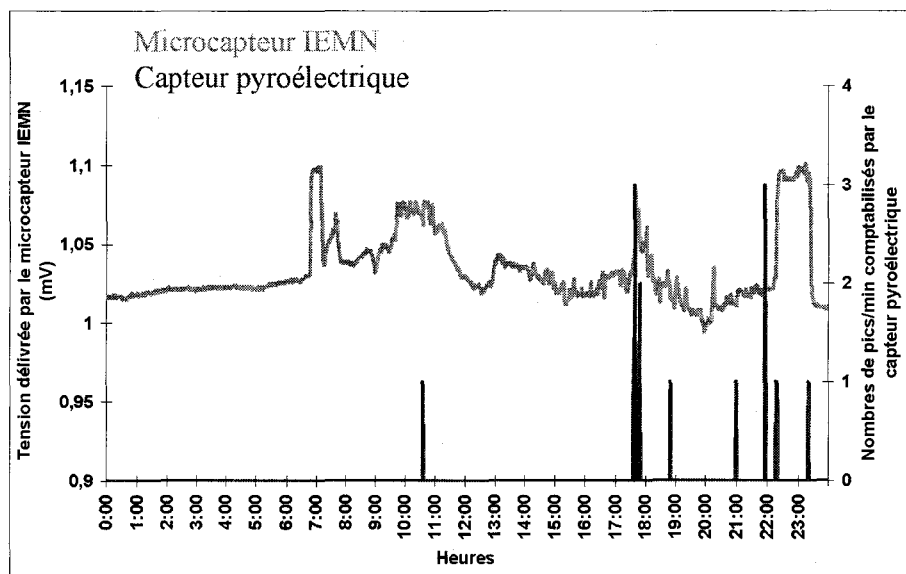


Figure 10: Comparaison entre un microcapteur IEMN et un capteur pyroélectrique dans le salon

Cette étude nous a permis de démontrer que les microcapteurs thermoélectriques sont adaptés pour cette application. Cependant, il est impossible de déterminer le nombre de personnes dans la pièce ou de discriminer une personne adulte, d'un enfant ou d'un animal domestique. C'est pour cette raison, que le développement des réseaux de microcapteurs infrarouges est intéressant en domotique de manière à pouvoir obtenir une image thermique basse résolution.

## 6.2 Seconde application : Mesure directe des échanges radiatifs entre surfaces

Comme nous l'avons montré précédemment les microcapteurs réalisés dans ce travail délivrent une tension directement proportionnelle aux échanges énergétiques d'origine radiative entre lui-même et son environnement (IV.4). Ces capteurs étant de type planaire, leur température est très proche de celle de la surface sur laquelle ils sont disposés. Il suffit donc de mesurer la f.e.m. issue du capteur pour en déduire immédiatement la valeur du flux

de rayonnement échangé entre cette surface et son environnement. Il faut remarquer que lorsque le capteur et son environnement sont à même température, la tension délivrée sera nulle quelle que soit la valeur de cette température.

De nombreuses applications découlent de cette particularité qui permet de détecter à distance et de façon extrêmement simple un déséquilibre thermique dans un volume à température quelconque.

- En détection d'incendie, lorsque la paroi visée par le capteur devient plus chaude que celle sur laquelle est fixé le microcapteur, celui-ci délivrera alors une tension positive.

- En détection de fuites ou d'humidité, dans ce cas, une paroi trop humide verra sa température diminuer en raison de l'évaporation et le signal délivré par le capteur sera négatif.

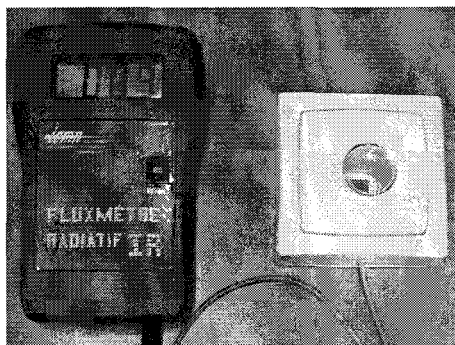
- En climatologie, ces microcapteurs permettent la mesure du rayonnement infrarouge transmis à travers la couche nuageuse et irradiant la mer ou les cultures (contribution à la mesure de l'effet de serre)

- La mesure de température peut être effectuée dans de nombreux équipements industriels tels que : séchoirs, dessiccateurs, fours, ....

Dans ce domaine, pour répondre à une demande industrielle de la société RayFlectiss, nous avons développé un prototype permettant de mesurer l'efficacité de stores de verrières destinés à limiter le rayonnement solaire pour le confort des occupants. Faute de capteurs adaptés, il n'existe pas d'appareils commercialisés permettant d'effectuer directement cette mesure, ce qui démontre tout l'intérêt de cet appareillage. Le système développé dans le cadre du stage de DUT de Romain Jooris [7] est équipé d'un microcapteur infrarouge de dimension  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  (figure 11) relié à un indicateur numérique (figure 12). La résolution du flux mesuré est de  $1 \text{ W/m}^2$ , l'étendue de mesure est comprise entre  $-1999$  et  $1999 \text{ W/m}^2$  et la sensibilité spectrale est pratiquement plate dans la bande de longueur d'onde  $5\text{-}20 \text{ }\mu\text{m}$ .



*Figure 11: Photographie du microcapteur placé dans son support*



*Figure 12: Démonstrateur industriel*

Un collimateur a été disposé devant le capteur afin de limiter l'angle de vision de ce dispositif à une surface de quelques mètres de store. Il est ainsi possible d'évaluer le confort thermique lié au rayonnement thermique, sous différents types de rideaux occultants, ce qui constitue un argument de vente décisif pour le fabricant.

## 7 Perspectives : Etude d'un microcapteur sub-millimétrique

Dans le cadre de cette étude théorique, seul un microcapteur à deux zones est pris en compte. L'objectif est d'évaluer les performances d'un capteur de petites dimensions en vue de réaliser un matrice de très petite taille. Les pistes de la thermopile sont dimensionnées pour obtenir une résistance électrique interne de 50 k $\Omega$ , la largeur de la piste d'or est de 10  $\mu\text{m}$ . L'ensemble des résultats de modélisation ainsi que les différents paramètres topologiques du microcapteur sont résumés dans le tableau 8.

Le choix des dimensions des microcapteurs a été motivé par l'état de l'art du marché actuel des microcapteurs infrarouges munis de thermopiles. En effet, les industriels leaders dans le domaine [8], [9], commercialisent des microcapteurs de dimensions comprises entre 100x100  $\mu\text{m}^2$  et 600x600  $\mu\text{m}^2$ .

Microcapteurs sub-millimétriques à deux zones			
Epaisseur de polysilicium (Å)	2000		
Epaisseur de la membrane SiO <sub>2</sub> /Si <sub>x</sub> N <sub>y</sub> (Å)	2800 [10]		
Epaisseur des réflecteurs (Å)	300		
Epaisseur du thermoélément en or (Å)	500		
Epaisseur de l'absorbant IR ( $\mu\text{m}$ )	5		
Résistance électrique (k $\Omega$ )	50		
Longueur de la membrane ( $\mu\text{m}$ )	100	250	500
Largeur de la piste de polysilicium ( $\mu\text{m}$ )	10	28	60
S <sub>E</sub> /piste ( $\mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^2)$ )	$3,97\cdot 10^{-3}$	$2,66\cdot 10^{-2}$	0,11
Nombres de pistes	6	10	12
S <sub>E</sub> totale ( $\mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^2)$ )	$2,38\cdot 10^{-2}$	0,27	1,32
DéTECTIVITÉ SPÉCIFIQUE D* (cm.Hz <sup>1/2</sup> .W <sup>-1</sup> )	$1,44\cdot 10^6$	$5,31\cdot 10^6$	$1,30\cdot 10^7$

Tableau 8 : Caractéristiques des microcapteurs sub-millimétriques

Les résultats obtenus montrent que la sensibilité à l'éclairement est plus faible que dans le cas de capteurs de plus grandes dimensions. Par contre la détectivité spécifique qui prend en compte la surface du capteur est peu affectée par cette réduction d'échelle. Les valeurs obtenues ( $0,14\cdot 10^7$  à  $1,30\cdot 10^7$  cm.Hz<sup>1/2</sup>.W<sup>-1</sup>) sont plus faibles que les valeurs de l'état de l'art ( $5,70\cdot 10^7$  à  $6\cdot 10^8$  cm.Hz<sup>1/2</sup>.W<sup>-1</sup>) obtenues avec des capteurs encapsulés sous gaz rare.

Une matrice de 16x16 microcapteurs munis de membranes de 500  $\mu\text{m}$  occuperait une surface de 10x10 mm<sup>2</sup>. Dans ce cas, pour former l'image, une lentille de bonne qualité sera nécessaire, ce qui limiterait peut-être l'utilisation de lentilles de Fresnel IR à bas prix.

## **8 Conclusion**

Les caractérisations des microcapteurs ont montré une bonne corrélation entre le modèle et les valeurs expérimentales et plus particulièrement dans le cas des microcapteurs non améliorés en détectivité spécifique. L'objectif de compenser l'effet d'une variation de température d'air a été démontré et vérifié.

Les dernières réalisations courant 2007 pour les microcapteurs à détectivité spécifique améliorée présentent des résultats relativement éloignés du modèle en raison de problèmes technologiques apparus durant les réalisations en salle blanche. Cependant, la détectivité spécifique a été augmentée de 50% et la résistance électrique interne divisée par 5 pour les microcapteurs 3x3 mm<sup>2</sup> et jusqu'à 14 pour les microcapteurs 5x5 mm<sup>2</sup>.

L'influence de la vitesse d'air est faible ce qui permet d'utiliser sans problèmes ces capteurs à l'air libre, sans fenêtre de protection, dans des conditions de convection naturelle. En régime de convection forcée, la sensibilité sera diminuée légèrement mais restera constante si le flux d'air l'est également.



## BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE IV





## **Bibliographie du chapitre IV**

- [1] Randrianarisoa H., "Etude et réalisation d'un banc de mesure pour capteurs de rayonnement infrarouge. Application à la caractérisation de microradiomètres," thèse de doctorat, décembre 1998, USTL
- [2] Yala-Aithammouda M., "Etude et réalisation de microcapteurs de flux thermique en technologie silicium", Thèse de doctorat USTL, juin 2007
- [3] Haffar M., Ait-Hammouda Yala M., Ziouche K., Godts P., Leclercq D., "New package-free infrared microsensors array for a low cost and low resolution thermal imager for indoor presence detection", Proceedings of SENSOR 2007, Nürnberg, Germany, may 22-24, 2007
- [4] Ziouche K., Yala M., Haffar M., Godts P., Leclercq D., "Mesure de température sans contact en milieu sale", Actes du Congrès de la Société Française de Thermique, SFT 2007, les Embiez, France, 29 mai-1er juin, 2007
- [5] Boutchich M., "Microcapteurs de rayonnement infrarouge en technologie silicium", Thèse de doctorat USTL, décembre 2002
- [6] Haffar M., Ait-Hammouda Yala M., Ziouche K., Godts P., Leclercq D., "Development of new thermal systems of human presence detection intended to introduce innovating functionalities into housing", Proceedings of 2005 Innovative Technologies for Infrastructure and Housing, Lille, France, october 12-13, 2005
- [7] Jooris R., "Conception et Réalisations électroniques", Stage de DUT GEIL, Juin 2007
- [8] Heimann Sensor GmbH, Grenstrasse 22, 01109 dresden (DE)  
<http://www.heimannsensor.com>
- [9] Dexter Research Center, Inc., 7300 Huron River, Dexter, MI. 48130 U.S.A.  
<http://www.dexterresearch.com>
- [10] Allègre G. et al, "A room temperature  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  membrane-type electrical substitution radiometer using thin film platinum thermometers", Meas. Sci. Technol. 18 (2007) pp.183-189



## CONCLUSION GENERALE



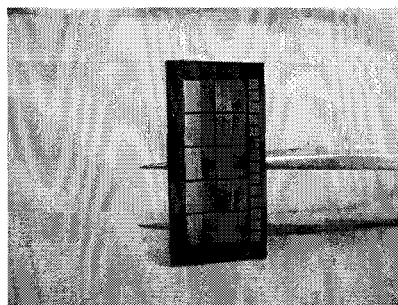
## Conclusion générale

Le travail qui nous avait été confié était de vérifier la faisabilité de matrices de microcapteurs infrarouge ne nécessitant pas d'encapsulation. Cette contrainte était destinée à faire baisser le coût de fabrication de ces capteurs afin de pouvoir les utiliser dans l'habitat social.

L'objectif à atteindre n'était pas d'égaliser les caractéristiques technologiques des capteurs existant sur le marché mais d'obtenir des performances suffisantes pour détecter la présence humaine à l'aide d'une image très basse résolution (3x3 ou 5x2 pixels).

Le premier problème à résoudre était de vérifier théoriquement la possibilité de réaliser des capteurs à absorption différentielle périodique, sur membrane unique, et insensibles à la température et aux mouvements de l'air environnant. Pour cela un modèle analytique matriciel a été élaboré et les solutions ont été obtenues pour différentes configurations de capteurs à l'aide d'un solveur (MathCad).

En limitant la taille des microcapteurs à 3x3 mm<sup>2</sup>, les performances optimales sont obtenues pour des structures comportant une seule zone absorbante et réflectrice. Plusieurs séries de capteurs de cette dimension ainsi que quelques capteurs de structures différentes ont été réalisés et caractérisés, ce qui a permis de valider le modèle mathématique. Les opérations technologiques permettant de réaliser ces microcapteurs ont entièrement été effectuées dans la centrale de technologie de l'IEMN. Certaines étapes ont nécessité beaucoup de travail, comme la mise au point du procédé de fabrication des membranes bicouches compensées de grandes dimensions (5x5 mm<sup>2</sup>).



*Matrice de 10 capteurs de 3x3 mm<sup>2</sup>*

Le problème essentiel qui est alors apparu pour cette famille de capteur était la résistance électrique élevée qui était nuisible pour obtenir une bonne détectivité spécifique et rendait délicate la réalisation des circuits électroniques exploitant le signal du capteur. C'est pour cette raison qu'une seconde famille de microcapteurs à détectivité spécifique améliorée a été réalisée. Pour réduire notablement la résistance électrique, la largeur des zones de la piste de polysilicium faiblement conductrice a été élargie au détriment des zones d'or. Nous avons vérifié que les capteurs ainsi obtenus présentent des performances suffisantes pour la détection de personne dans l'habitat standard.

Des matrices de 3x3 microcapteurs ont été réalisées et testées. Elle sont parfaitement fonctionnelles mais il reste encore à mettre au point un objectif à faible coût, à base de lentilles de Fresnel en polyéthylène pour exploiter pleinement le système de détection de présence.

Une collaboration en « Traitement d'image » est en cours de mise en place avec le Laboratoire d'Automatique de Lille (LAGIS).

Outre les applications induites par la mesure directe des échanges radiatifs présentée dans le chapitre IV, le faible coût de ces microcapteurs devrait également permettre la diffusion de la mesure de température sans contact dans l'équipement grand public tel que l'électroménager ou l'automobile.



## ANNEXES





## ANNEXE 1 : Présentation du procédé BOSCH

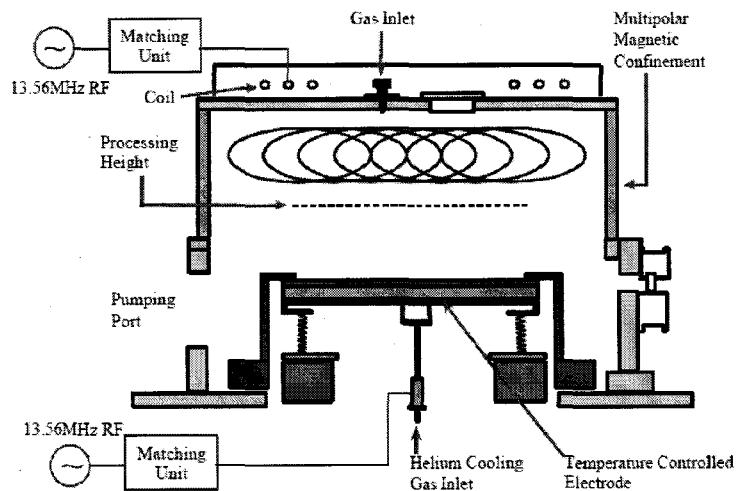


Figure 1 : Schéma du bâti de gravure STS-ICP

Le bâti de gravure STS-ICP est présenté figure 1. Il existe différentes techniques de passivation des flancs. Une technique consiste à passiver complètement le substrat par un dépôt de  $\text{SiO}_n$  qui est le résultat des différentes réactions chimiques entre  $\text{SF}_6$  et  $\text{O}_2$  en même temps que la gravure (figure 2). Le procédé mis au point par Lärmer et Schilp [3], [4], [5], [6] dit le procédé Bosch est différent. La passivation n'est pas continue mais volontairement alternée avec une phase de gravure du silicium.

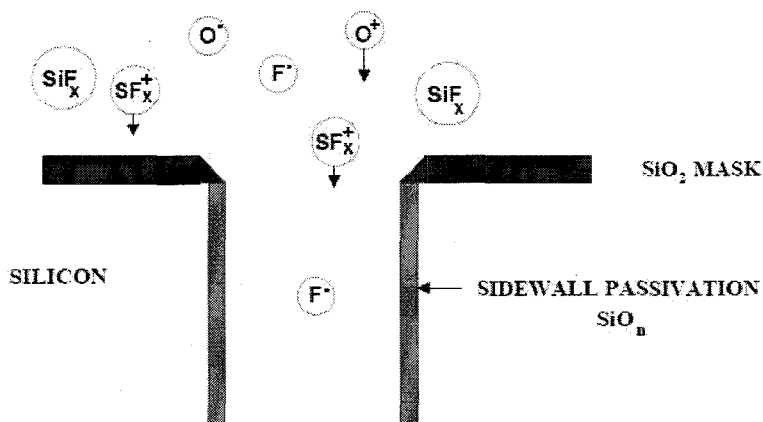


Figure 2 : Technique de gravure avec une passivation continue

Tout d'abord, un film de passivation est déposé sur le substrat avant la gravure du silicium. Lors de ce procédé, deux gaz fluororés vont entrer en jeu : l'hexafluorure de soufre ( $\text{SF}_6$ ) et le tétrafluore de carbone ( $\text{CF}_4$ ). Le gaz précurseur  $\text{CF}_4$  introduit dans la chambre est dissocié par le plasma. Il se forme des ions et des radicaux libres, qui entraîneront la déposition d'un film de passivation.



Ces deux réactions chimiques résument le phénomène de passivation des flancs. A partir du  $CF_4$ ,  $CF_x^\bullet$  est obtenu qui en s'adsorbant va former le film de passivation  $CF_2$  comme le montre le figure 3.

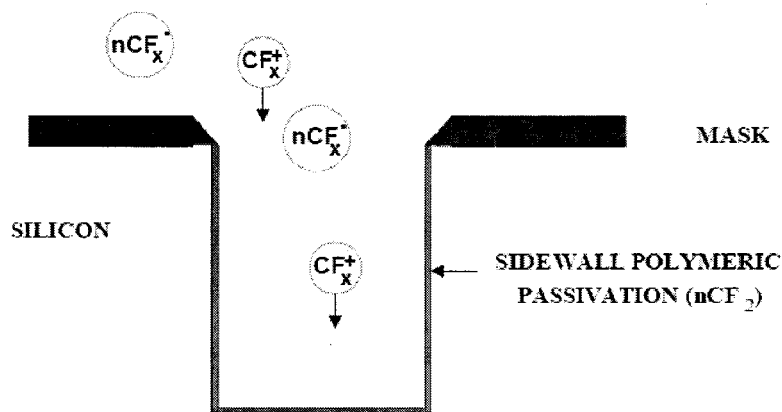
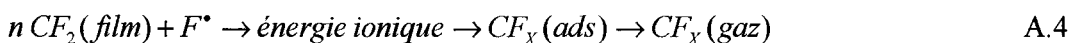


Figure 3 : Phase de passivation

Après cette étape de passivation, la phase de gravure est amorcée (figure 4).  $SF_6$  est dissociée en ions et radicaux libres qui vont réagir avec le film de passivation comme le montre l'équation suivante :



Le bombardement ionique permet de contrôler la directivité de la gravure en retirant le film de passivation sur les surfaces horizontales. Ces dernières sont exposées aux espèces chimiques réactives qui vont graver le silicium, alors que les surfaces verticales sont protégées par le film déposé lors de la phase de passivation. Puis, le cycle reprend par une phase de passivation. L'équilibre entre la phase de passivation et celle de gravure permet de contrôler l'anisotropie de la gravure.

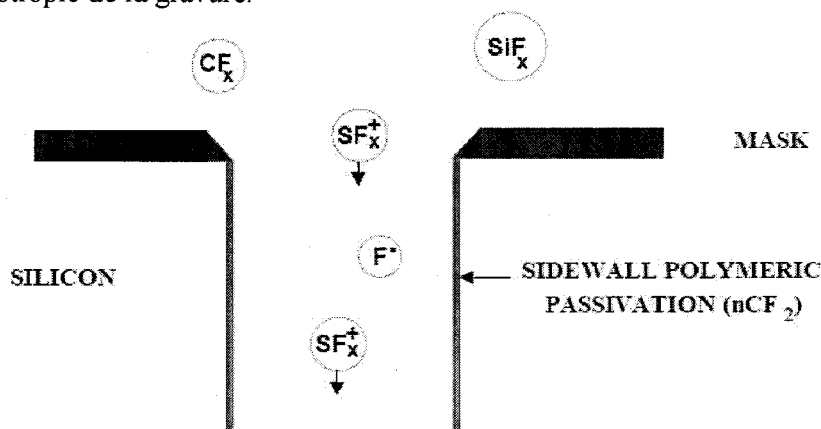


Figure 4 : Phase de gravure

Les paramètres de gravure ICP sont résumés dans le tableau 1 :

Débit de gaz (sccm)	Etapas du procédé Bosch	
	Passivation	Gravure
CF <sub>4</sub>	200	0
SF <sub>6</sub>	0	450
O <sub>2</sub>	0	0
Durée de l'étape (s)	2,2	3,0
Fréquence de travail du plateau (kHz)		
380		
Température du plateau supportant le substrat (°C)		
10		

Tableau 1 : Paramètres de gravure profonde STS-ICP

Ces paramètres permettent de graver le substrat avec une vitesse d'environ 5  $\mu\text{m}/\text{min}$ . Fixer la température du plateau où est placé le substrat permet de contrôler encore plus finement la gravure. Ce bâti n'est pas équipé de système de détection de fin d'attaque comme sur le bâti de gravure RIE. En effet, il est difficile de définir la fin d'attaque par le changement d'interface parce que la couche de passivation fausserait la mesure. Par conséquent, de nombreux essais ont permis de déterminer le temps de gravure nécessaire pour atteindre la membrane. Le masque utilisé étant en résine, il est préférable de graver par tranche de 15 min pour éviter un échauffement prolongé du substrat. L'échauffement pourrait détruire la résine et, ainsi la face arrière du wafer serait alors gravée sur sa totalité. De plus, l'échauffement pourrait modifier la vitesse de gravure et réduire l'anisotropie. Ces pauses tous les 15 min permettent de contrôler la fin de gravure en observant la transparence de la membrane.

## ANNEXE 2 : Gravure au bâti XeF<sub>2</sub>

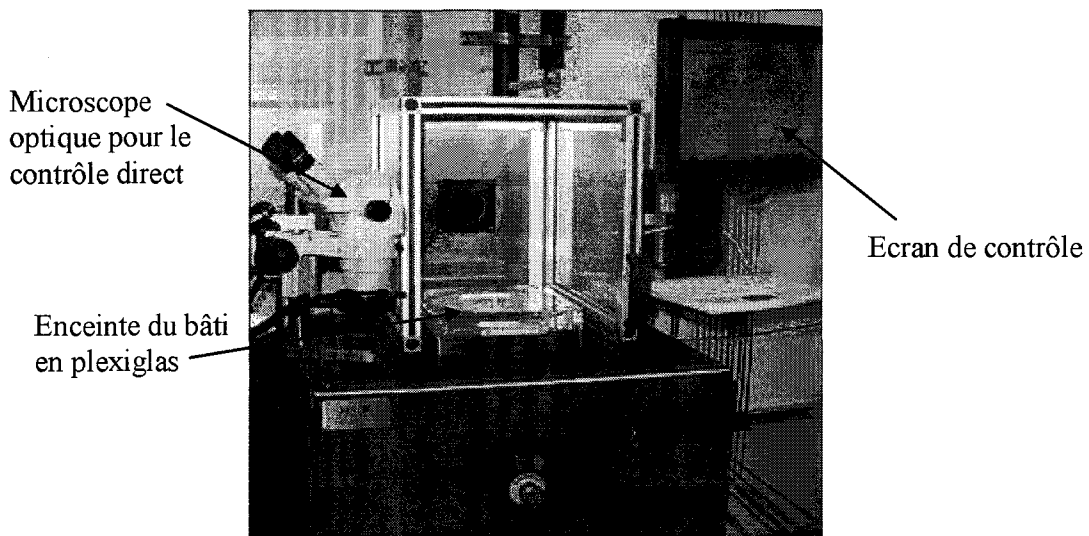


Figure 5 : Bâti de gravure au gaz XeF<sub>2</sub>

Le bâti de gravure XeF<sub>2</sub> (figure 5) peut être utilisé pour terminer la libération des membranes. En effet, malgré la sélectivité de la vitesse d'attaque du silicium 100 fois supérieure à celle de la couche d'arrêt composée d'oxyde de silicium, il arrive que la membrane ne soit pas complètement dégagée lors de la gravure ICP (figure 6). Il est intéressant de changer de type de gravure. La gravure en phase gazeuse est isotrope mais étant donné la taille des ouvertures des membranes, ce n'est pas critique dans notre cas. Le difluorure de xénon (XeF<sub>2</sub>), qui est très réactif avec le silicium, est introduit dans la chambre pendant un laps de temps fixé par l'utilisateur. Ensuite une phase de pompage est amorcée pour retirer le gaz qui a réagi avec la surface, du gaz est à nouveau introduit et le cycle recommence. L'utilisateur fixe lui-même le nombre de cycle.

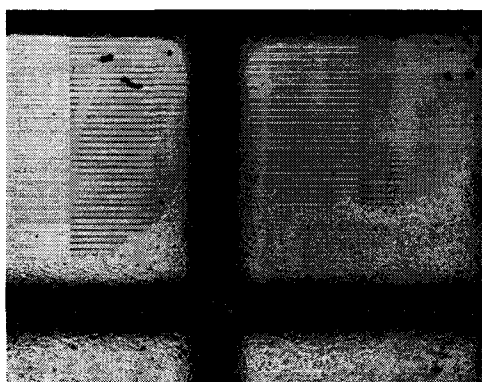


Figure 6 : Vue de la face arrière des membranes avant leurs libérations totales

## ANNEXE 3 : FACTEURS DE FORME MIS EN ŒUVRE POUR LA CARACTERISATION DES MICROCAPTEURS

Les facteurs de formes ou facteurs d'angles sont des quantités sans dimensions dont la valeur est comprise entre 0 et 1. Ils traduisent la part de rayonnement hémisphérique émis par un objet de surface  $S_1$  atteignant une surface  $S_2$  en tenant compte uniquement des formes des corps et de la distance les séparant (figure 7).

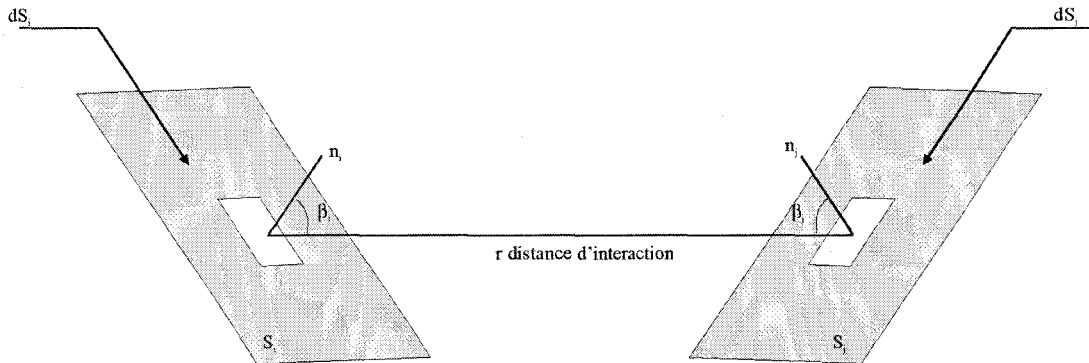


Figure 7 : Schéma de deux surfaces dans un espace mettant en évidence les facteurs de forme

Ils autorisent la simplification des expressions analytiques du flux échangé entre deux corps. On peut ainsi exprimer le flux échangé uniquement en fonction de l'émittance de la source, de sa surface et du facteur de forme source ( $S_i$ ), récepteur ( $S_j$ ) à l'aide de la relation suivante:

$$\phi_{ij} = M_i \cdot S_i \cdot F_{ij} \quad \text{A.5}$$

Avec :

$$F_{ij} = \frac{1}{S_i} \int_{S_i} \int_{S_j} \frac{\cos \beta_i \cdot \cos \beta_j \cdot dS_i \cdot dS_j}{\pi \cdot r^2} \quad \text{A.6}$$

Le calcul du facteur de forme nécessite la résolution de l'équation  $F_{ij}$ . Cependant, ces calculs sont long et requièrent de gros moyens de calculs. Il existe de nombreux abaques pour les déterminer rapidement mais elles sont inadaptées aux configurations utilisées dans le cadre de nos caractérisations. Nous avons mené les calculs pour les configurations spécifiques utilisées dans notre laboratoire.

### 1. Facteur de forme entre deux plaques carrées parallèles (figure 8)

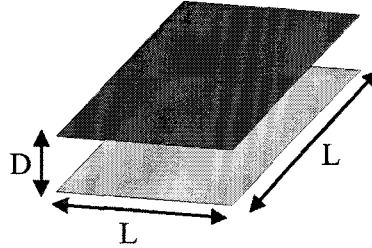


Figure 8 : Configuration plaques parallèles identiques

Le premier facteur de forme à déterminer correspond à l'interaction entre deux plaques parallèles de dimensions identiques, la cible et le support du capteur. Ce cas est traité de manière analytique dans l'ouvrage référencé [1] et conduit à la relation suivante :

$$F(\xi) = \frac{2}{\pi \cdot \xi^2} \cdot \ln\left(\frac{1 + \xi^2}{\sqrt{1 + \xi^2}}\right) + \frac{4}{\pi \cdot \xi} \left( \sqrt{1 + \xi^2} \cdot \text{Tan}^{-1}\left(\frac{\xi}{\sqrt{1 + \xi^2}}\right) - \text{Tan}^{-1}(\xi) \right) \quad \text{A.7}$$

La figure ci-dessous présente l'évolution du facteur de forme calculée à partir de la relation précédente pour des plaques présentant des dimensions respectives de 30x30cm<sup>2</sup>, 20x20cm<sup>2</sup> et 15x15cm<sup>2</sup>, la distance D varie de 0 à 5cm.

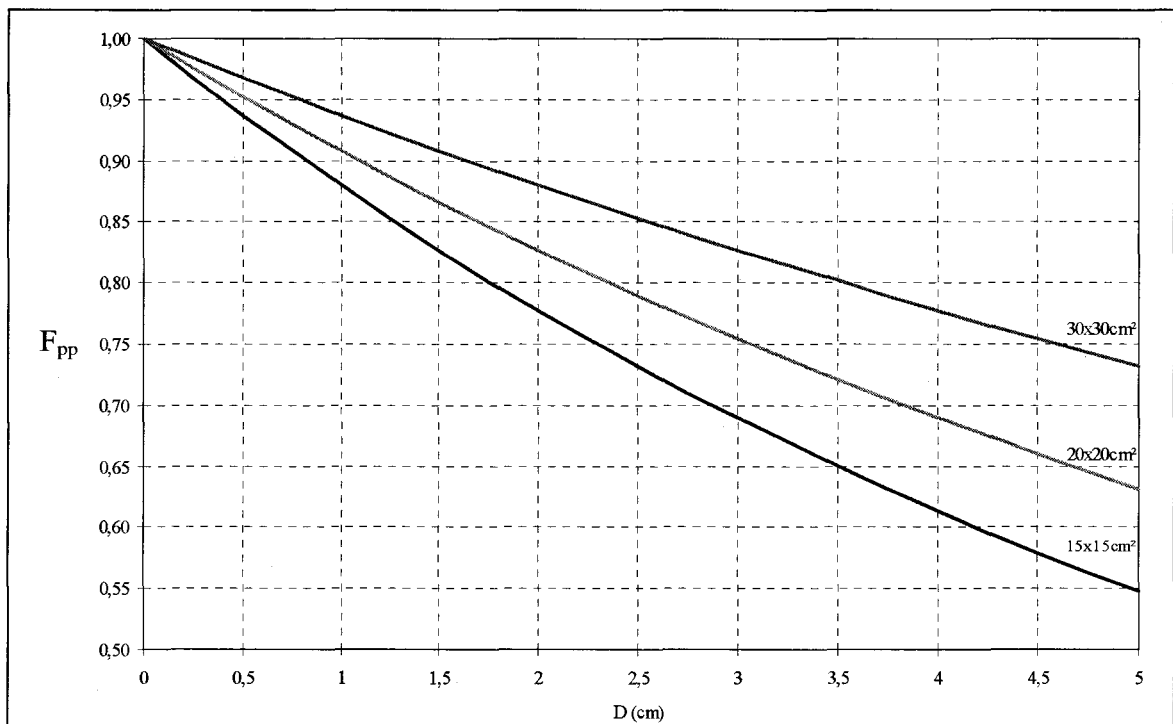


Figure 9 : Facteur de forme  $F_{pp}$  entre deux plaques parallèles identiques utilisées pour évaluer les performances

## 2. Facteur de forme entre une source de dimensions importantes et le capteur

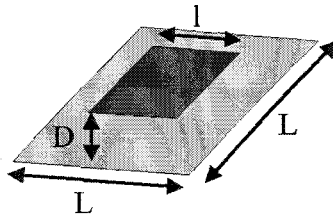


Figure 10 : Configuration plaque de grandes dimensions - capteur

Un travail de thèse précédent [2] a permis d'établir une équation analytique approchée permettant d'évaluer chaque point avec une précision de 5%.

$$F_{cp} = \frac{1}{1 + \xi \cdot D^2}$$

A.8

Cette expression valide pour  $l \leq L/5$  est vérifiée. Avec  $\xi = \frac{\pi}{S_p}$ ,  $S_p$  la surface de la plaque constituant la cible.

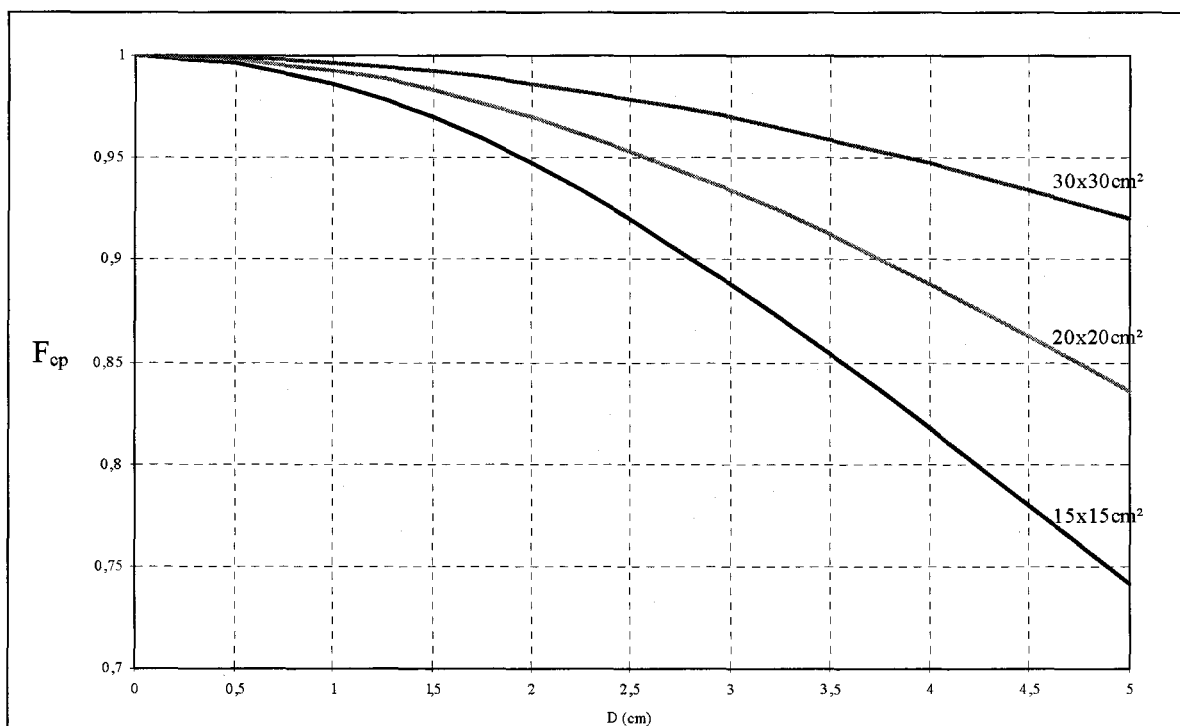


Figure 11 : Facteur de forme  $F_{cp}$  calculé pour un capteur de  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  et une plaque de surface allant de  $15 \times 15 \text{ cm}^2$  à  $30 \times 30 \text{ cm}^2$

## ANNEXE 4 : RESUME DU CONTRAT D'ACTION DE RECHERCHE CONCERTEE D'INGENIERIE URBAINE



Action de Recherche Concertée en Ingénierie  
Urbaine  
Avril 2004

### **Etude et réalisation de réseaux de microcapteurs thermoélectriques en technologie silicium destinés à introduire des fonctionnalités innovantes à faible coût dans l'habitat social.**

Dans le but d'améliorer la qualité de vie dans l'habitat et plus particulièrement celle des personnes à mobilité réduite, nous proposons de développer une gamme de modules électroniques permettant de détecter la présence d'une personne ou d'une partie de corps humain et de commander un actionneur électrique suivant différents critères établis en fonction de l'application. De même, un thermostat permettant de réguler le chauffage du logement, utilisable par un public présentant différents types de déficiences, sera également étudié.

Des démonstrateurs fonctionnant avec ou sans contact physique avec la personne seront mis au point. Ces dispositifs sont basés sur des réseaux de microcapteurs silicium qui seront réalisés à l'IEMN dans le cadre de ce travail. Les microcapteurs constituant l'élément de base de ces réseaux sont développés depuis cinq ans au laboratoire et ont fait l'objet de deux thèses. Le procédé de fabrication a été mis au point en collaboration avec le LAAS dans le cadre du démonstrateur "CNRS-INTERLAB". Un brevet Européen est en cours de dépôt.

De tels dispositifs sont originaux car, à l'heure actuelle, ces microcapteurs présentent le meilleur rapport performances / coût du marché à l'échelle internationale. De plus il n'existe pas au catalogue des fabricants de matériel électrique pour l'habitat, d'interrupteurs ou de détecteurs fonctionnant par détection de la chaleur humaine hormis les systèmes pyroélectriques uniquement utilisables pour détecter un corps chaud en déplacement. Les thermostats d'ambiance proposés par l'industrie nécessitent une programmation trop complexe pour le public visé, ce qui justifie une nouvelle approche du problème.

Les travaux à effectuer sont les suivants :

- Fabrication de plusieurs séries de microcapteurs spécifiques dans la centrale de technologie silicium de l'IEMN.
- Conception et réalisation de prototypes incluant l'électronique associée.
- Validation fonctionnelle des modules de détection et de commande.

Dans une seconde phase, un transfert de technologie vers une société de fabrication de microcapteurs en grande série (fonderie de silicium) sera entrepris. Puis des contacts seront pris avec des équipementiers électriques susceptibles d'intégrer les microcapteurs dans des modules standards distribués en grandes séries.

Contacts : [Pascale.GODTS@IEMN.Univ-lille1.fr](mailto:Pascale.GODTS@IEMN.Univ-lille1.fr)  
[Didier.LECLERCQ@Univ-lille1.fr](mailto:Didier.LECLERCQ@Univ-lille1.fr)

Institut d'Electronique de Microelectronique et de  
Nanotechnologie  
Département Hyperfréquences et Semiconducteurs  
Cité scientifique  
Avenue Poincaré - BP 69 - 59652 Villeneuve d'Ascq CEDEX  
Téléphone +33 3 20 43 67 05 - Fax +33 3 20 43 48 54





## **Bibliographie des annexes**

- [1] A.B de Vriendt, "La transmission de chaleur, volume 2. Introduction au rayonnement thermique", Gaëtan Morin éditeur.
- [2] F.Pollet, "Etudes théoriques et expérimentale de la radiométrie par adsorption différentielle distribuée appliqué au contrôle de température sans contact", thèse de doctorat, USTL, 1999.
- [3] F. Lärmer, A. Schilp, "Method of Anisotropically Etching Silicon", German Patent DE4241045.
- [4] J.K. Bhardwaj., H. Ashraf., "Advanced Silicon Etching Using High Density Plasmas" Proc. SPIE Micromachining and Microfabrication Process Technology, Vol. 2639, pp.224-233, (1995)
- [5] A. Ayon et al, Jn. Electrochem. Soc., Vol.146, No.1., pp339-349, 1999
- [6] J. Hopkins et al, MRS Fall Meeting, Boston MA, Dec. 1998



## LISTES DES FIGURES ET TABLEAUX



## Liste des figures

### Chapitre I

- Figure 1 : Vue en coupe d'un capteur pyroélectrique
- Figure 2 : Phénomène évanescent de la pyroélectricité
- Figure 3 : Dessin d'un thermocouple
- Figure 4 : Microcapteur sur membrane
- Figure 5 : Microcapteur à poutre encastrée
- Figure 6 : Thermopile à structure distribuée [22]
- Figure 7 : Capteur IR IEMN collé sur une surface
- Figure 8 : Capteur thermoélectrique classique
- Figure 9 : Dessin d'un microbolomètre (CEA-Léti)
- Figure 10 : Matrice de microbolomètres
- Figure 11 : Détail de l'interconnexion
- Figure 12 : Historique du développement des microbolomètres non-refroidis
- Figure 13 : Microbolomètre à base de  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}\text{O}_y$  amorphe
- Figure 14 : Matrice de microbolomètres polyimide d'une résolution de 1x10 pixels
- Figure 15 : Matrice de microbolomètres posée sur un doigt
- Figure 16 : Matrice de microcapteurs 2 x 8 éléments [18]
- Figure 17 : Microcapteur unitaire réalisé en Italie [31]
- Figure 18 : Matrice de microcapteurs 16 x 16 pixels [31]
- Figure 19 : Microcapteurs à thermopile avec une double structure suspendue
- Figure 20 : Matrice 32x32 de la société DEXTER [20]
- Figure 21 : Caméra linéaire Devantech
- Figure 22 : Matrices linéaires pyroélectriques
- Figure 23 : Caméra pyroélectrique de type PYROLINE
- Figure 24 : matrice de 16x16 pixels
- Figure 25 : Zoom de la matrice 16 x 16 pixels
- Figure 26 : Photo de deux pixels au repos
- Figure 27 : Microcantilever à base de Al et  $\text{SiO}_2/\text{SiON}$
- Figure 28 : Matrice de microcantilevers [40]
- Figure 29 : Photographie d'un pixel [40]
- Figure 30 : Schéma du dispositif utilisé pour la caméra infrarouge [40]

### Chapitre II

- Figure 31 : Dessin d'un microcapteur écorché de dimension 5x6 mm<sup>2</sup>
- Figure 32 : Principe simplifié du fonctionnement du radiomètre IR
- Figure 33 : Dessin de profil du microcapteur (rapport des dimensions non représentatif)
- Figure 34 : Face arrière du microcapteur
- Figure 35 : Zoom de la face arrière du microcapteur
- Figure 36 : Vue éclatée du microcapteur 3x3 mm<sup>2</sup>
- Figure 37 : Principe simplifié du fonctionnement d'un microcapteur IR nouvelle génération
- Figure 38 : Facteur de Mérite Z en fonction de la concentration des porteurs n (cm<sup>-3</sup>)
- Figure 39 : Dessin du microcapteur 3x3 mm<sup>2</sup> sur membrane unique
- Figure 40 : Vue en coupe du microcapteur sur membrane unique
- Figure 41 : Définition de la conduction thermique équivalente des pistes (Capteur vu de dessus)

- Figure 42 : Couche équivalente de la membrane (vue en coupe)  
Figure 43 : Bilan thermique dans la membrane de largeur unitaire (section équivalente vue en coupe)  
Figure 44 : Schéma utilisé pour le calcul du profil de température le long de la partie absorbante de la membrane  
Figure 45 : Schéma utilisé pour le calcul du profil de température le long de la partie réfléchissante de la membrane  
Figure 46 : Schéma d'un microcapteur commençant par une zone absorbante à l'extrémité gauche  
Figure 47 : Schéma d'un microcapteur avec plusieurs zones absorbantes et réfléchissantes  
Figure 48 : Schéma comparatif entre des microcapteurs industriels et IEMN  
Figure 49 : Schéma d'une membrane munie d'une seule zone absorbante  
Figure 50 : Schéma du microcapteur et profils de température le long de la membrane  
Figure 51 : Cas extrême d'une membrane de longueur 15 mm  
Figure 52 : Schéma d'un microcapteur à deux zones  
Figure 53 : Schéma d'un microcapteur avec deux zones différentes et profil de température le long de sa membrane  
Figure 54 : Exemple de positionnement des jonctions  
Figure 55 : Profils de température obtenue pour une membrane trop longue  
Figure 56 : Schéma d'un microcapteur à trois zones  
Figure 57 : Profils de température pour un microcapteur à trois zones  
Figure 58 : Schéma d'un microcapteur à quatre zones  
Figure 59 : Profils de température d'un microcapteur avec quatre zones  
Figure 60 : Détermination de la position des thermojonctions pour un microcapteur à quatre zones  
Figure 61 : Schéma d'un microcapteur à six zones  
Figure 62 : Profils de température d'un microcapteur à six zones  
Figure 63 : Détermination de la position des jonctions pour une structure à six zones  
Figure 34 : Evolution de la sensibilité par piste en fonction de la longueur de la membrane  
Figure 35 : Sensibilité totale des microcapteurs en fonction de leur surface  
Figure 36 : Dessin du thermocouple en quinconce

### Chapitre III

- Figure 1 : Schéma d'un microcapteur (vue écorchée)  
Figure 2 : Dépôts des couches  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_x\text{N}_y$  et du polysilicium dopé N in-situ  
Figure 3 : Masque n°1 Gravure des pistes de polysilicium  
Figure 4 : Schéma de principe d'une tournette  
Figure 5 : Dépôt de la résine AZ1518  
Figure 6 : Révélation de la résine après insolation  
Figure 7 : Gravure de la piste de polysilicium  
Figure 8 : Réalisation des pistes de polysilicium  
Figure 9 : Masque n°2 Dépôt de la sonde platine  
Figure 10 : Profil en casquette obtenu avec la résine AZ1518 pour la réalisation de la sonde platine  
Figure 11 : Masque n°3 Dépôt des thermoéléments et des plots d'accès en or  
Figure 12 : Profil en casquette de la résine AZ1518 lors de la métallisation Ti/Au  
Figure 13 : Métallisation d'un thermoélément et d'un plot d'accès en or par lift-off  
Figure 14 : Thermopile polysilicium/ or

- Figure 15 : Zoom sur les pistes métallisées en or
- Figure 16 : Masque n°4 Ouverture des plots de contact
- Figure 17 : Ouverture du polyimide pour les plots de contact
- Figure 18 : Traitement thermique de polyimide
- Figure 19 : Photographie des différentes couches du microcapteur (MEB)
- Figure 20 : Masque n°5 Dépôt des réflecteurs Or
- Figure 21 : Réalisation des réflecteurs en or et épaissement des plots de contact
- Figure 22 : Photographie d'une partie d'une matrice de microcapteur 5x2
- Figure 23 : Protection de la face avant par une couche de résine
- Figure 24 : Masque n°6 Ouverture des membranes face arrière
- Figure 25 : Ouverture de la résine pour la gravure du bicouche  $\text{SiO}_2/\text{Si}_x\text{N}_y$
- Figure 26 : Gravure des couches  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_x\text{N}_y$  et polysilicium par RIE
- Figure 27 : Réalisation de la membrane par gravure ICP
- Figure 28 : Face arrière d'un microcapteur
- Figure 29 : Face avant d'un microcapteur
- Figure 30 : Matrice 3x3 microcapteurs (face avant)
- Figure 31 : Matrice 3x3 microcapteurs (face arrière)
- Figure 32 : Microcapteur 3x3 mm<sup>2</sup>
- Figure 33 : Vue d'ensemble d'une matrice de microcapteurs
- Figure 34 : Thermojonction Polysilicium N/Or
- Figure 35 : Sonde platine et thermopile

#### Chapitre IV

- Figure 1 : Banc de caractérisation des microcapteurs de rayonnement
- Figure 2 : Photographie du banc de caractérisation des microcapteurs
- Figure 3 : Exemple de caractérisation d'un microcapteur 3x3 mm<sup>2</sup> en fonction de l'éclairement énergétique E
- Figure 4 : Montage expérimental pour la détermination du  $C_{Ta}$
- Figure 5 : Points de mesure et courbes théoriques de la tension de sortie en fonction de la distance cible- microcapteur
- Figure 6 : Plan d'une maison test
- Figure 7 : Modules installés dans les maisons
- Figure 8 : Détection dans les différentes pièces de la maison dans une journée
- Figure 9 : Résultats illustrant la détection de présence dans la cuisine
- Figure 10 : Comparaison entre un microcapteur IEMN et un capteur pyroélectrique dans le salon
- Figure 11 : Photographie du microcapteur placé dans son support
- Figure 12 : Démonstrateur industriel

## Liste des tableaux

### Chapitre I

- Tableau 1 : Caractéristiques des matériaux pyroélectriques
- Tableau 2 : Comparaison des performances des microcapteurs entre technologie couche minces et technologie silicium [20]
- Tableau 3 : Caractéristiques des matrices microbolométriques
- Tableau 4 : Récapitulatif des caméras pyroélectriques commercialisées
- Tableau 5 : Caractéristiques des microcapteurs infrarouges
- Tableau 6 : Coefficients multiplicateurs des paramètres du capteur en fonction du gaz utilisé

### Chapitre II

- Tableau 1 : Caractéristiques et performances des microcapteurs multi-membranes
- Tableau 2 : Caractéristiques des matériaux de la thermopile et le facteur de mérite associé
- Tableau 3 : Caractéristiques d'un microcapteur muni d'une membrane toute absorbante
- Tableau 4 : Caractéristiques d'un microcapteur avec une zone absorbante et une zone réfléchissante
- Tableau 5 : Caractéristiques d'un microcapteur à 4 zones
- Tableau 6 : Caractéristiques d'un microcapteur à 6 zones
- Tableau 7 : Tableau récapitulatif des résultats de modélisation
- Tableau 8 : Caractéristiques théoriques des microcapteurs donnés par le modèle
- Tableau 9 : Résultats des sensibilités obtenues pour des microcapteurs optimisés
- Tableau 10 : Caractéristiques théoriques des microcapteurs optimisés à réaliser

### Chapitre III

- Tableau 1 : Paramètres lithographiques pour le dépôt de résine AZ1518
- Tableau 2 : Paramètres lithographiques pour l'insolation et la révélation de la résine AZ1518
- Tableau 3 : Paramètres de gravure RIE de la piste de polysilicium
- Tableau 4 : Paramètres lithographiques d'un profil casquette avec la résine AZ1518
- Tableau 5 : Paramètres de dépôt du polyimide PI-2731
- Tableau 6 : Paramètres lithographiques pour la définition des ouvertures de membranes
- Tableau 7 : Paramètres de gravure RIE de la bicouche  $\text{SiO}_2/\text{S}_x\text{N}_y$

### Chapitre IV

- Tableau 1 : Caractéristiques des microcapteurs en fonction des paramètres topologiques
- Tableau 2 : Mesures de l'influence de la température d'air sur les microcapteurs
- Tableau 3 : Coefficient d'influence lié à la vitesse d'air des microcapteurs
- Tableau 4 : Résumé des caractéristiques des microcapteurs
- Tableau 5 : Caractéristiques des microcapteurs à détectivité spécifique optimisée
- Tableau 6 : Coefficients d'influence de la température et de la vitesse d'air des microcapteurs
- Tableau 7 : Comparaison des caractéristiques des microcapteurs infrarouges
- Tableau 8 : Caractéristiques des microcapteurs sub-millimétriques



## GLOSSAIRE



## GLOSSAIRE

### L'éclairement énergétique E

Il correspond à la densité de puissance incidente net radiatif (en  $W/m^2$ ) émis par une cible peut être calculé par la relation suivante :

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_C)^4 \quad (W/m^2)$$

Avec  $\varepsilon$  : l'émissivité de la cible

$\sigma$  : la constante de Stefan-Boltzmann

$T_C$  : la température de la cible (K)

### La sensibilité à l'éclairement E

Elle est égale au rapport entre la f.e.m. délivrée par le microcapteur et l'éclairement énergétique E.

$$S_E = \frac{V}{E} \quad (V/W \cdot m^{-2})$$

Avec V : la f.e.m. délivrée par le microcapteur (V)

E : l'éclairement énergétique ( $W/m^2$ )

### La responsivité $\mathcal{R}$

Elle correspond au quotient de la f.e.m. par le flux net radiatif.

$$\mathcal{R} = \frac{V}{\Phi} \quad (V/W)$$

Avec V : la f.e.m. délivrée par le capteur (V)

$\Phi$  : le flux net radiatif (W)

### Le Noise Equivalent Power (NEP)

Il correspond à la puissance minimale de densité de puissance détectée par le capteur.

$$NEP = \frac{\sqrt{4 \cdot k \cdot T_s \cdot R_{el}}}{\mathcal{R}} \quad (W/Hz^{1/2})$$

Avec k : la constante de Boltzmann

$T_s$  : la température du capteur

$R_{el}$  : la résistance électrique interne du capteur

$\mathcal{R}$  : Responsivité

### La détectivité D

Plus le capteur est capable de convertir la densité de puissance, plus son NEP est faible. Par conséquent, la notion de détectivité est introduite et correspond à l'inverse du NEP.

$$D = \frac{1}{\text{NEP}} \quad (\text{Hz}^{1/2}/\text{W})$$

### La détectivité spécifique D\*

Elle permet de comparer différents capteurs en prenant compte leur surface active.

$$D^* = \frac{S_E}{\sqrt{4 \cdot A \cdot k \cdot T \cdot R_{el}}} \quad (\text{m} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W})$$

Avec  $S_E$  : la sensibilité à l'éclairement énergétique (en  $\mu\text{V}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$ )

$A$  : la surface active du microcapteur ( $\text{m}^2$ )

$k$  : la constante de Boltzmann

$T$  : la température du microcapteur (K)

$R_{el}$  : la résistance électrique interne ( $\Omega$ )

### Le Noise Equivalent Temperature Difference (NETD)

Il représente la plus petite différence de température (en K) que le microcapteur est capable de détecter.

### Le Noise Equivalent Irradiance (NEI)

Cette densité de puissance équivalente de bruit correspond à la plus petite variation de densité de puissance détectable (en  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz}^{1/2})$ )

$$\text{NEI} = \frac{\sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R_{el}}}{S_E} \quad (\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{Hz}^{1/2})$$

Avec  $k$  : la constante de Boltzmann

$T$  : la température du capteur (K)

$R_{el}$  : la résistance interne électrique du microcapteur ( $\Omega$ )

$S_E$  : la sensibilité à l'éclairement du microcapteur ( $\text{V}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$ )

### Le temps de réponse

Il correspond au temps (en s) nécessaire pour que le signal de sortie du capteur, lorsque celui-ci est soumis à un éclairement brutal, atteigne 83 % de sa valeur finale,

---

**RESUME : ETUDE ET REALISATION DE MATRICES DE MICROCAPTEURS EN TECHNOLOGIE SILICIUM POUR IMAGERIE BASSE RESOLUTION**

---

La détection de présence humaine est devenu un enjeu important dans de nombreux domaines comme la domotique ou l'automobile, par exemple. Les détecteurs infrarouges grand public, actuellement disponibles sur le marché ne sont pas aptes à faire la distinction entre une personne ou un animal domestique de façon absolument fiable. Pour répondre à ce problème, les matrices imageantes infrarouges classiques sont beaucoup trop onéreuses et trop performantes. C'est pourquoi nous avons choisi de développer des réseaux de microcapteurs de rayonnement infrarouge de quelques pixels avec le souci permanent de minimiser au maximum le coût de fabrication.

Ces microcapteurs de type thermoélectrique, sont basés sur une structure originale permettant de les utiliser à l'air libre, sans encapsulation. Un modèle mathématique, prenant en compte les caractéristiques technologiques du microcapteur ainsi que son environnement thermique, a été mis au point et permet de définir la structure optimale à partir d'un cahier des charges.

Une étude approfondie a été menée pour chaque étape technologique nécessaire à la réalisation de ces microcapteurs, depuis la membrane compensée en contrainte, jusqu'au dépôt de la couche de polyimide constituant l'absorbant infrarouge.

Les résultats obtenus ont montré une bonne corrélation entre le modèle mathématique et les valeurs expérimentales. Des microcapteurs destinés à optimiser la sensibilité à l'éclairement puis la détectivité spécifique ont été étudiés et fabriqués. L'objectif initial de réaliser une matrice imageante infrarouge basse résolution et faible coût a été atteint.

**Mots clés :** Microcapteurs, Détecteurs de rayonnement infrarouge, thermocouples, imagerie infrarouge, silicium substrat, polyimides.

---

**ABSTRACT : STUDY AND REALIZATION OF MICROSENSORS ARRAYS IN SILICON TECHNOLOGY FOR LOW RESOLUTION IMAGERY**

---

The detection of human presence became an important issue in many fields like the house automation or automotive applications. The infra-red detectors currently available on the market are not able to make the distinction between a person or a pet in an absolutely reliable way. To answer this problem, the traditional infra-red arrays are too much expensive and too powerful. This is why we chose to develop networks of infra-red radiation microsensors of some pixels with the permanent concern to minimize to the maximum the manufacturing costs.

These thermoelectric sensors are based on an original structure making it possible to use them without packaging. A mathematical model, taking into account the technological characteristics of the microsensor, and its thermal environment, was developed and makes it possible to define the optimal structure.

A thorough study was undertaken for each technological step necessary to the realization of these microsensors, since the stress compensated membrane until the deposit of the polyimide layer constituting the infra-red absorbent.

The results obtained showed a good correlation between the mathematical model and experimental values. Microsensors intended to optimize the sensitivity to irradiance then the specific detectivity were studied and manufactured. The initial objective to produce low resolution and low costs infra-red arrays was reached.

**Key words:** Microsensors, infrared radiation detector, thermocouples, infrared imagery, silicon substrate, polyimides.



PPN: -120190109