

UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE  
UFR INFORMATIQUE – ELECTRONIQUE – ELECTROTECHNIQUE –  
AUTOMATIQUE  
ECOLE DOCTORALE SCIENCES POUR L'INGENIEUR UNIVERSITE LILLE  
NORD-DE-FRANCE – 072

# THESE

Présentée par

**Charles SION**

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

Spécialité : Micro et Nano Technologies, Acoustique et Télécommunications

# REALISATION D'UNE CAMERA INFRAROUGE A BAS COÛT POUR APPLICATION GRAND PUBLIC

N° Ordre : 40641

**Dirigée par :** Didier LECLERCQ  
**Co – encadrant :** Pascale GODTS

Soutenue le 16 novembre 2011 devant la commission d'examen

## **Membres du Jury :**

### **Rapporteurs :**

Etienne GAVIOT  
Bruno BÊCHE

ENSIM Université du Maine  
Université de Rennes 1

### **Examineurs :**

Nader AKIL  
Mohamed BOUTCHICH  
Tuami LASRI  
Vincent SENEZ  
Arnaud CRASTES

PNO Consultants – Brussels  
Université Pierre et Marie Curie  
Université Lille 1 – USTL  
Université Lille 1 – USTL  
Société ULIS

## Remerciements

En préambule de ce mémoire, je remercie tous ceux qui m'ont soutenu, supporté, aidé pendant ces trois ans de vie et de recherche et sans qui je n'aurais pas pu réaliser ce travail,

Je remercie vivement Monsieur Etienne GAVIOT, Professeur à l'ENSIM du Mans et à l'Université du Maine, pour ses remarques pertinentes et pour tout l'intérêt qu'il a porté à mes travaux en qualité de rapporteur.

Monsieur Bruno BÊCHE, Professeur à l'Institut Universitaire de France (IUT Paris) et à l'Institut de Physique de Rennes a accepté de juger ce travail et d'en rédiger un rapport. Je lui exprime ici toute ma reconnaissance.

J'exprime également toute ma gratitude envers Monsieur Nader AKIL, Senior Consultant chez PNO Consultants, Bruxelles ainsi qu'à Monsieur Arnaud CRASTES, Customer Support Manager de la société ULIS pour avoir accepté de participer à ce jury.

Je tiens à remercier Monsieur Mohamed BOUTCHICH, Maître de conférences au laboratoire de Génie Electrique de Paris et à l'université Pierre et Marie Curie pour avoir accepté de faire partie de mon jury.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur Vincent SENEZ, Directeur de Recherche au CNRS et responsable de l'axe « Microtechnologies et microsystèmes » de l'IEMN pour avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie Monsieur Tuami LASRI, Directeur des Etudes Doctorales et Professeur à l'USTL, responsable du Groupe « MITEC » de l'IEMN, pour son suivi pendant mon parcours à l'université et sa participation au jury de cette soutenance.

Je remercie particulièrement Monsieur Katir ZIOUCHE, Maître de Conférences à l'USTL pour toute l'assistance qu'il m'a apportée pendant ces trois ans de recherche, pour mes enseignements, pour la réalisation effectuée en salle blanche et pour tous les conseils qu'il m'a donnés.

Je souhaite également remercier fortement Madame Pascale GODTS, Chargée de Recherches au CNRS et à l'IEMN, pour son soutien pendant toute la durée de ma thèse et pour son aide à la rédaction des différents posters, publications ou rapports qui ont été faits.

J'exprime toute ma gratitude à Didier LECLERCQ, Professeur à l'USTL, pour sa guidance pendant toute la durée de ma thèse ainsi que pour tous les enseignements qu'il m'a donnés. Je le remercie sincèrement pour tout ce qu'il a fait ou m'a permis de faire pendant ces trois ans. Les enseignements à l'IUT, les conférences auxquelles j'ai pu assister et la réalisation de ce travail de recherche n'auraient pas été possible sans son aide.

Je tiens à remercier ADIEN, REZKI, FRANCOIS, AUGUSTIN et tous les thésards qui m'ont accompagné et soutenu pendant ces trois ans pendant les périodes de déjeuner.

Je remercie également ABDELLATIF pour son aide pour l'utilisation du matériel de soudure CMOS et YANNICK pour son expertise qui m'a permis d'optimiser le modèle de simulation utilisé pour cette thèse.

# SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	3
Introduction générale .....	5
Bibliographie Introduction.....	9
Chapitre I : Etat de l'art des dispositifs de vision et de détection infrarouge .....	10
Capteurs unitaires .....	12
Capteurs thermiques .....	12
Capteurs quantiques.....	16
Dispositifs de vision non refroidi .....	22
Matrices à base de matériaux Ferroélectriques .....	24
Matrices à base de bolomètres.....	24
Matrices à base de thermopiles .....	26
Matrices à base de MEMS (cantilevers) .....	28
Bibliographie du chapitre I.....	29
Chapitre II : Modélisation et dimensionnement de la matrice infrarouge.....	31
Introduction.....	32
Principe .....	32
Hypothèses et simplifications.....	35
Bilan thermique .....	39
Méthode de calcul.....	46
Simulations numériques .....	50
Résultats.....	52
Bibliographie du Chapitre II.....	57
Chapitre III : Réalisation technologique des matrices de capteurs infrarouges .....	58
Introduction.....	59
Etapas technologiques .....	60
Nettoyage de substrat .....	60
Réalisation de la membrane .....	60
Gravure des pistes polysilicium .....	61
Métallisation des pistes et des contacts (Or) .....	65

Dépôt de la partie absorbante .....	66
Réalisation de la couche réflectrice.....	68
Gravure face arrière.....	69
Conclusion .....	71
Bibliographie du chapitre III .....	72
<b>Chapitre IV : Caractérisation des matrices et réalisation du système de vision infrarouge .....</b>	<b>73</b>
Introduction.....	74
Banc de mesure.....	75
Résultats de mesure .....	76
Imageur : Principe de fonctionnement .....	78
Objectif à lentille de Fresnel.....	84
Principe de fonctionnement des logiciels et résultats obtenus.....	89
1-Programme implanté dans le microcontrôleur.....	89
2-Programme implanté dans le PC.....	90
Bibliographie .....	93
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>94</b>
Liste des symboles et unités.....	95
Liste des figures et tableaux.....	98
Annexes .....	102

# Introduction générale

On désigne par infrarouge tout rayonnement dont la longueur d'onde est située entre  $0.78\mu\text{m}$  (limite du rayonnement visible de couleur rouge) et  $1\text{mm}$  (début des micro-ondes).

Les fréquences de l'infrarouge sont donc comprises entre  $300\text{ GHz}$  et  $300\text{ THz}$ .

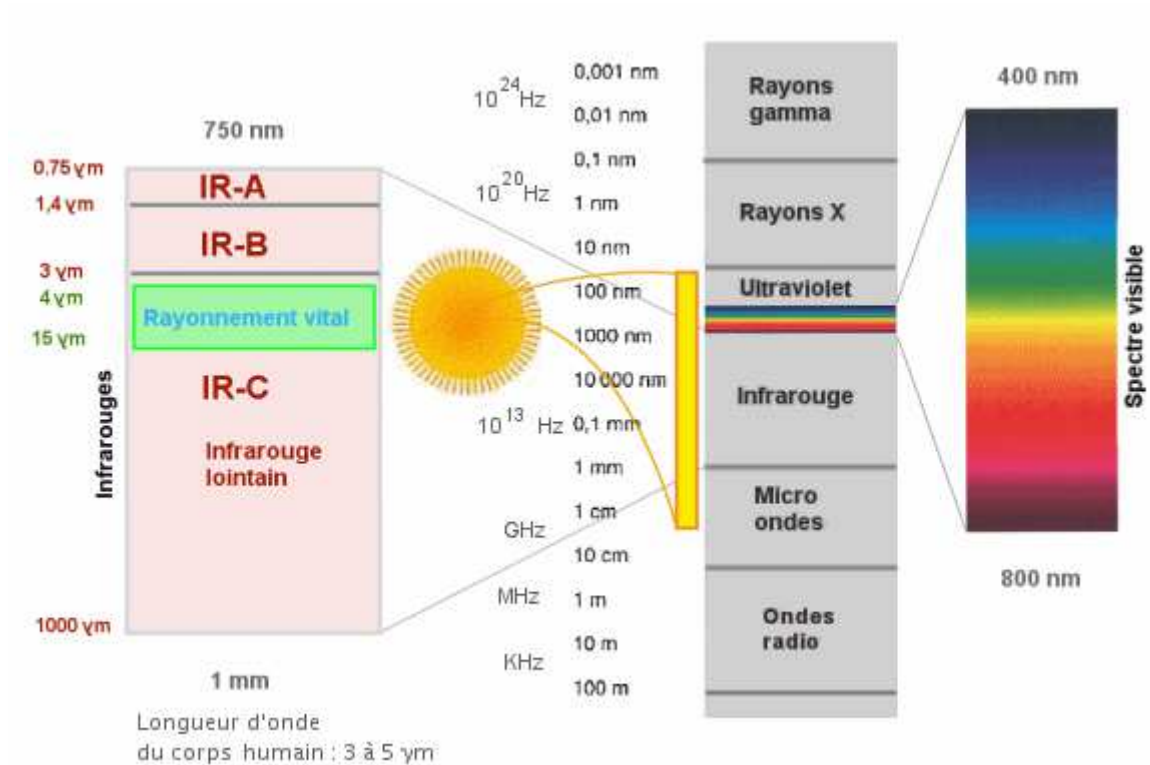


Figure 1 : Fréquences et longueurs d'onde du rayonnement. Zones de l'infrarouge.

L'infrarouge a été mis en évidence par William Herschel. En 1800, il démontre son existence en utilisant la dispersion de la lumière au travers d'un prisme. Il remarque en déplaçant un thermomètre tout au long du rayonnement diffracté que la température augmente du côté de la lumière rouge et que ce phénomène perdure même au-delà du spectre visible. Il appelle ce phénomène chaleur obscure.

« And here thermometer No1 rose, in 16 minutes,  $8\frac{3}{4}$  degrees, when its centre was  $1/2$  inch out of the visible rays of the sun[...] The first four experiments prove, that there are rays coming from the sun, which are less refrangible than any of those that affect the sight. They are invested with a high power of heating bodies, but with non of illuminating objects »[1].

L'expérience de Sir W.Herschel a ensuite été réutilisée par Thomas Johann Seebeck pour la création d'un nouveau type de thermomètre : le thermocouple basé sur l'effet qui a

pris son nom (voir annexe I : L'effet Seebeck). Le dispositif mis au point permet de déterminer la température à partir de l'influence du rayonnement infrarouge qui agit diversement sur des matériaux de types différents. Les travaux de Seebeck seront repris et améliorés par Nobili en 1829 qui imagine le principe de la thermopile en mettant plusieurs thermocouples en série pour ainsi augmenter son efficacité, puis par Melloni en 1831 qui étudiera de nouvelles combinaisons de matériaux pour réaliser la première thermopile [2] [3] .

On verra ensuite l'apparition de nouveaux types de détecteur infrarouge permettant d'imager les scènes à température ambiante, depuis le bolomètre de Langley en 1880 [4] jusqu'à la découverte des dispositifs à multi-puits quantiques dans la seconde moitié du 20<sup>e</sup> siècle.

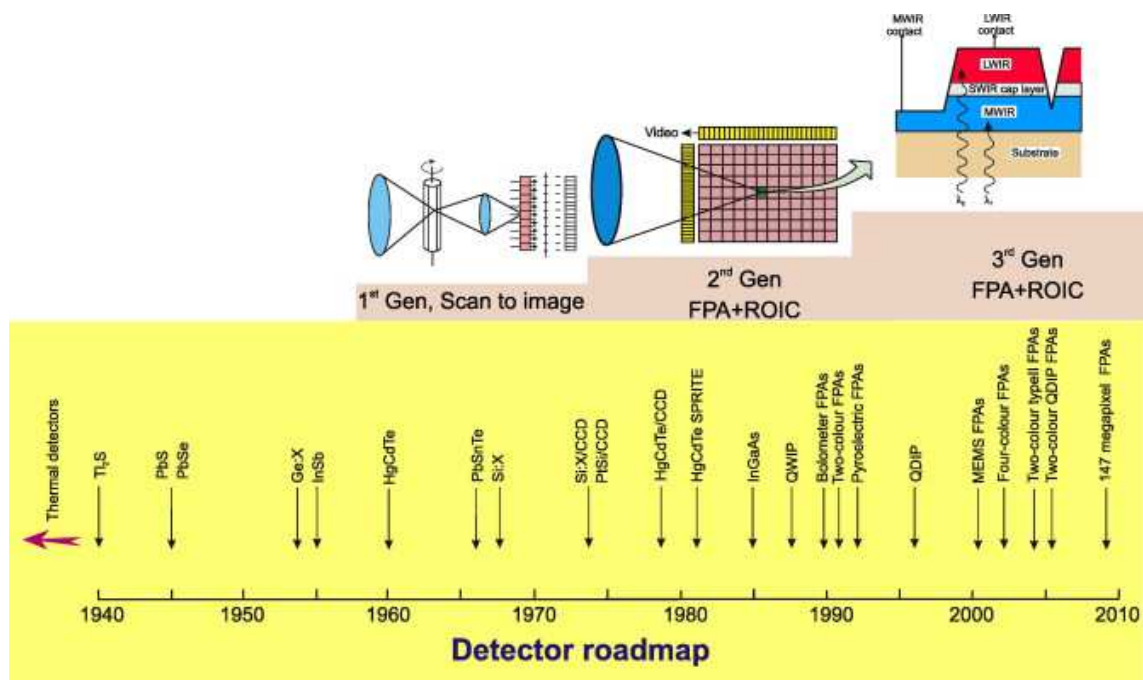


Figure 2 : Historique de la détection infrarouge. D'après Réf [5]

Aujourd'hui, l'infrarouge est divisé en plusieurs domaines :

- L'infrarouge proche : de  $0.78\mu\text{m}$  à  $1.4\mu\text{m}$ . La limite est posée par le pic d'absorption de l'infrarouge par l'eau. Cette longueur d'onde est employée pour la propagation de la lumière dans la fibre optique et les utilisations les plus courantes sont les lunettes de vision nocturne (basée sur l'amplification du rayonnement à la limite du visible).
- L'infrarouge à longueur d'onde courte (SWIR) : jusqu'à  $3\mu\text{m}$ . Ce domaine est occupé par les télécommunications longue distance.
- L'infrarouge à longueur d'onde moyenne (MWIR) : jusqu'à  $8\mu\text{m}$ . Utilisé principalement pour le guidage des missiles.

- L'infrarouge à longue longueur d'onde (LWIR) : jusqu'à 14µm. Le domaine qui va nous intéresser ici (voir plus bas), celui des détecteurs thermiques.

- L'infrarouge lointain : jusqu'à 1mm.

Chaque domaine correspond plus ou moins à une fenêtre de transparence du rayonnement infrarouge dans l'atmosphère (voir figure 3). La définition de ces domaines peut légèrement varier suivant les domaines d'application.

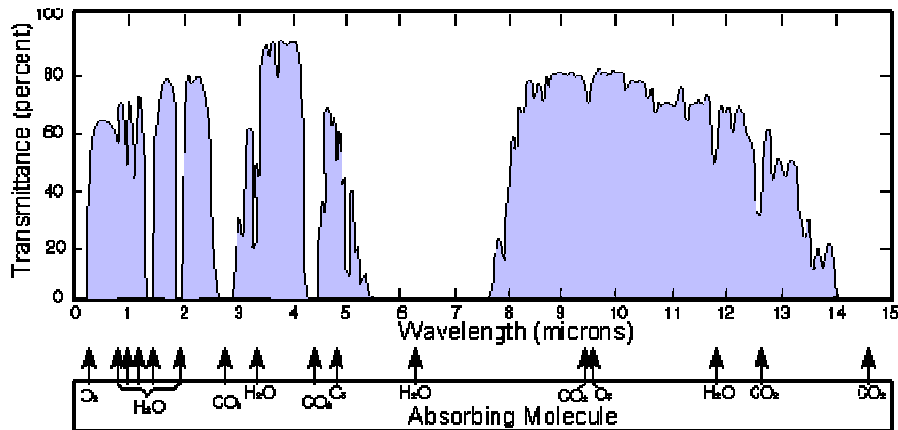


Figure 3 : Transparence atmosphérique de l'infrarouge

L'infrarouge est le rayonnement le plus souvent associé à la chaleur car le pic d'émission d'un organisme vivant se situe dans l'infrarouge et plus particulièrement dans la zone de LWIR. Cette relation a été mise en évidence par Planck dans la loi du rayonnement du corps noir aussi appelée loi de Planck.

Pour calculer la longueur d'onde correspondant au maximum du rayonnement émis par un objet à une température T, on utilise la loi de déplacement de Wien, un cas particulier de la loi de Planck :

$$\lambda_{\max} = \frac{h.c}{4,9651.k.T} = \frac{2.898.10^{-3}}{T} : \text{Loi du déplacement de Wien.}$$

avec h : constante de Planck = 6.626068 10<sup>-34</sup> J/s,

c : vitesse de la lumière = 3 10<sup>8</sup> m/s,

k : constante de Boltzmann = 1.381 10<sup>-23</sup> J/K,

T : température en Kelvin.

A la température de 31°C, température moyenne extérieure du corps humain, correspond  $\lambda_{\max}$  qui vaut 9.5µm. Par conséquent, pour détecter le rayonnement émis par un être vivant, il est nécessaire de travailler dans la gamme LWIR qui se situe entre 8 et 14 µm.

Dans ce cadre, l'objectif de ce mémoire est de montrer la réalisation d'un système de vision infrarouge à bas coût utilisant les technologies développées dans le laboratoire au cours des thèses précédentes de M.Boutchich [6] et M.Haffar [7].

Le système mis au point pour réaliser la caméra exploite le principe des thermopiles en utilisant la micro-fabrication en salle blanche afin d'augmenter la sensibilité du capteur.

La thermoélectricité a été préférée à d'autres types de fonctionnement pour des raisons de coût et de simplicité.

En effet, contrairement aux technologies de capteurs photoniques, une thermopile ne nécessite pas de système de refroidissement, ce qui réduit le coût du dispositif.

Par rapport aux autres détecteurs thermiques, la thermopile a aussi l'avantage de fonctionner sans systèmes annexes. Les bolomètres ont besoin d'une stabilisation en température et les pyromètres nécessitent un obturateur pour voir les sources de chaleur immobiles.

L'utilisation de thermopiles est donc naturelle pour un concevoir un système tout en cherchant à optimiser le coût de production.

Le projet de caméra infrarouge s'inscrit dans la continuité d'une ARC (Action Régionale Concertée) en ingénierie urbaine dans laquelle notre équipe a été impliquée au niveau de l'axe « Habitat, Qualité d'ambiance et Cadre de vie ».

L'objectif recherché de ce projet était l'installation de dispositifs infrarouges imageants permettant l'automatisation de l'habitat pour proposer une aide aux personnes ayant une mobilité réduite tout en respectant la vie privée des habitants.

Dans cette thèse, les différents dispositifs infrarouges existants seront tout d'abord présentés. Puis, concernant les microcapteurs développés dans le cadre de ce travail, la méthode d'optimisation pour améliorer leur sensibilité sera explicitée. La fabrication en salle blanche des matrices de microcapteurs composant la caméra sera ensuite décrite. L'électronique et l'optique nécessaires au bon fonctionnement seront enfin présentées ainsi que des résultats d'imagerie infrarouge.



## **Bibliographie Introduction**

- [1] William Herschel Experiments on the Refrangibility of the Invisible Rays of the Sun *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* (1800) 90, 284-292
- [2] E.S. Barr Historical survey of the early development infrared spectral region *Am.J.Phys.* 28 (1960) 42-54
- [3] E.S. Barr, The infrared pioneers—II.Macedonio Melloni, *Infrared Phys.*2 (1962) 67-73.
- [4] E.S. Barr, The infrared pioneers—III.Samuel Pierpont Langley, *Infrared Phys.*3 (1963) 195-206.
- [5] A. Rogalski Infrared detectors for the future *ACTA PHYSICA POLONICA A No. 3 Vol. 116* (2009)
- [6] M. Boutchich Microcapteurs de rayonnement infrarouge en technologie silicium *Thèse de doctorat de l'Université de Lille1* (2002)
- [7] M.Haffar Etude et réalisation de matrices de microcapteurs infrarouges en technologie silicium pour imagerie infrarouge basse résolution *Thèse de doctorat de l'Université de Lille1* (2007)

# **Chapitre I : Etat de l'art des dispositifs de vision et de détection infrarouge**

## **Capteurs unitaires**

### **Capteurs thermiques**

1. Bolomètres
2. Capteurs pyro-électriques
3. Thermopiles

### **Capteurs quantiques**

1. Capteurs photo-émissifs
2. Capteurs photo-conductifs
3. Capteurs photo-voltaïques
4. Capteur à multi-puits quantiques

## **Dispositifs de vision non refroidi**

### **Matrices à base de matériaux ferro-électriques**

### **Matrices à base de bolomètres**

### **Matrices à base de thermopiles**

### **Matrices à base de MEMS (cantilevers)**

## **Bibliographie du chapitre I**

Le système développé pour la caméra présentée dans le cadre de cette thèse utilise le principe de l'effet Seebeck (et donc des thermocouples).

Il existe cependant de nombreux autres types de détecteurs infrarouge : Photodiodes, puits quantiques, bolomètres, etc ... classés en deux catégories : les détecteurs quantiques et les détecteurs thermiques.

Tous ces détecteurs peuvent ensuite être assemblés en matrices pour réaliser un système de vision infrarouge.

Nous allons ici donner un aperçu du principe de fonctionnement des détecteurs unitaires pour se concentrer ensuite sur les matrices de détecteurs thermiques permettant de réaliser des caméras infrarouges ayant des caractéristiques assez similaires à celles du système que nous développons.

Les performances obtenus par les différents capteurs sont représentées sur le schéma suivant [1] :

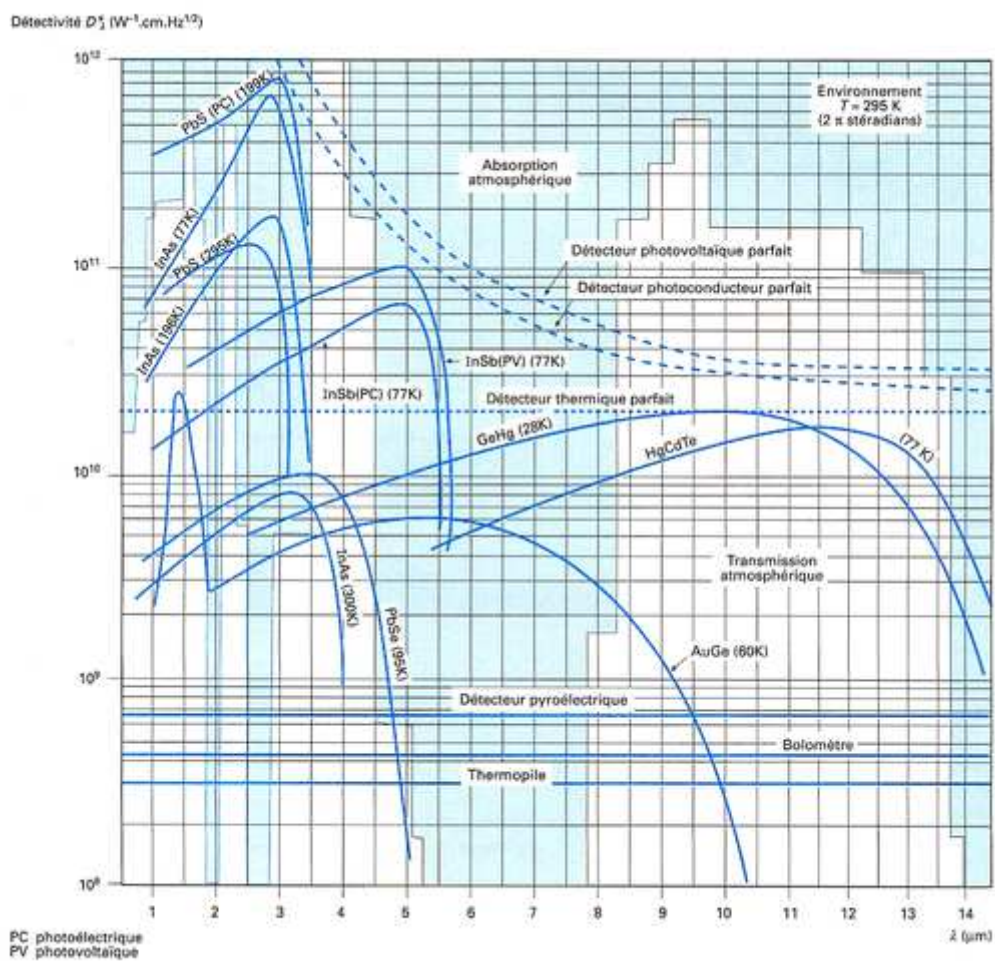


Figure 4 : Détectivité des différentes technologies de détection infrarouge

# Capteurs unitaires

## Capteurs thermiques

Dans le cas d'un détecteur thermique, le flux de rayonnement incident est mesuré grâce à l'élévation de la température d'un absorbeur de flux infrarouge.

Les capteurs thermiques peuvent donc être toujours représentés par un assemblage de blocs ayant des fonctions similaires :

- un absorbeur infrarouge
- un thermomètre
- un circuit isolé thermiquement

L'exposition à un rayonnement infrarouge de l'absorbeur va modifier sa température que l'on pourra mesurer à l'aide du transducteur.

En fonction de la nature du transducteur qui transforme l'élévation de la température en variation d'un signal électrique, le capteur thermique peut s'appeler bolomètre, capteur pyroélectrique ou thermopile. Dans les trois cas, les capteurs doivent permettre une détection entre 8 et 14 $\mu$ m correspondant à la gamme de longueur d'onde émise par le rayonnement humain mais aussi à une fenêtre de transparence de l'atmosphère.

Les grandeurs caractéristiques des capteurs infrarouges sont :

- la sensibilité ou réponse. C'est la variation attendue de la grandeur mesurée (tension, capacité ...) quand la température change,
- la constante de temps thermique, le temps nécessaire au système pour répondre à un stimulus,
- le NETD : Noise Equivalent Temperature Difference. C'est la plus petite température décelable par le capteur.

Nous allons par la suite définir le principe de fonctionnement de ses différents capteurs et comparer les performances obtenues dans la littérature.

### 1. Bolomètres

Un bolomètre est un capteur thermique utilisant une thermistance comme transducteur. La variation de la résistance de la partie thermosensible permet de déterminer la

différence de température entre le centre du capteur et le support du circuit considéré comme un puits thermique, c'est à dire à température constante.

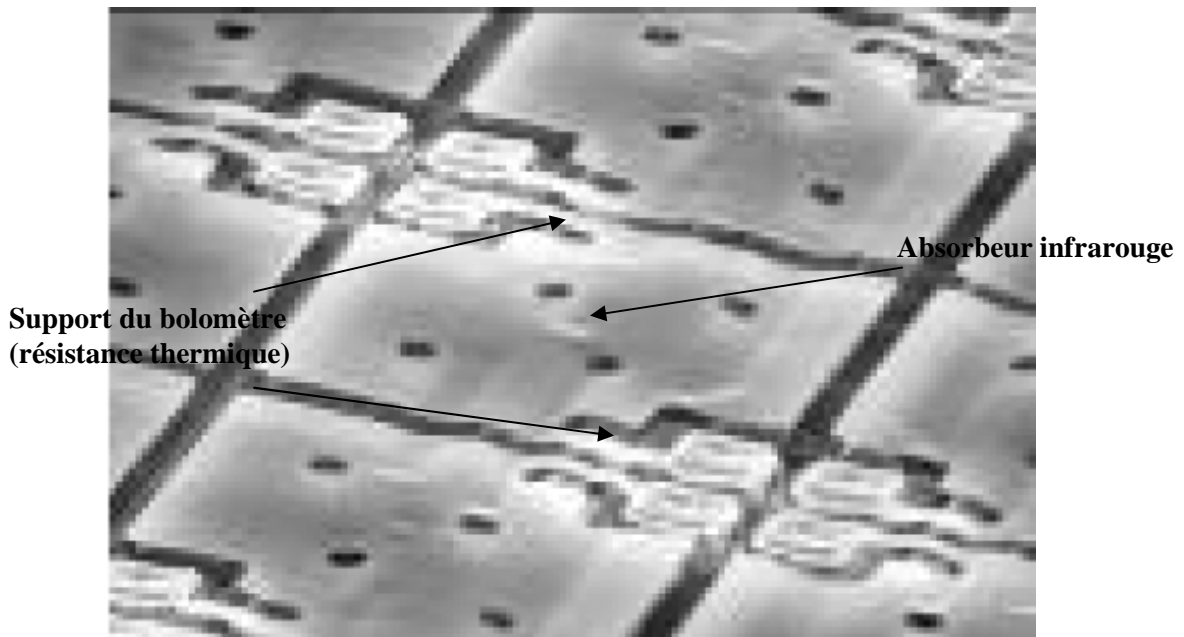


Figure 5 : image MEB d'une matrice de bolomètres [2]

La modélisation de la tension de sortie est dépendante de nombreux paramètres interconnectés et donc très difficile à effectuer en toute rigueur.

Néanmoins, une version simplifiée ignorant l'effet Joule permet de comprendre les phénomènes impliqués dans la mesure. Soit  $V_s$  la tension de sortie (en V) :

$$V_s = I \cdot \alpha \cdot R \cdot \Delta T \quad (\text{I.1})$$

Avec :

- $I$  : le courant de polarisation de la résistance (en A),
- $\alpha$  : le coefficient de température de la résistance (TCR) (en %/K)

$$\left( \alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} \right),$$

- $\Delta T$  : la différence de température entre la partie sensible et le circuit (en K).

On peut calculer la différence de température

$$\Delta T = \eta \cdot \beta \cdot A_D \cdot P_0 \cdot R_{th} \quad (\text{I.2})$$

avec :

- $\eta$  : le coefficient d'absorption,
- B : le coefficient de remplissage,
- $A_D$  : la surface sensible,
- $P_0$  : l'éclairement incident,
- $R_{th}$  : la résistance thermique entre absorbeur, thermomètre et circuit de lecture.

La tension délivrée est donc proportionnelle à la résistance thermique et au courant la traversant. Par contre, l'augmentation du courant de polarisation de la résistance s'accompagne d'une augmentation de bruit donc le rapport signal à bruit est proportionnel à R mais pas à I.

Dans le cas réel, la variation de température est non seulement due à l'éclairement mais aussi à un effet Joule induit par la mesure, on utilise alors une mesure pulsée où la polarisation n'est active que durant la mesure.

Les matériaux utilisés dans les bolomètres sont les métaux et les semi-conducteurs (ces derniers ayant un TCR dix fois supérieur). Le plus souvent, on utilise de l'oxyde de Vanadium ( $V_xO_y$ ) pour ses propriétés de thermistance non linéaire.

## 2. Capteurs pyroélectriques

Les matériaux pyroélectriques possèdent une polarisation naturelle qui varie avec la température. On peut donc réaliser des thermomètres très précis car sous l'effet d'une variation de température (avec  $T < \text{Température de Curie}$ ), un déplacement de charges peut être mesuré.

En réalisant une capacité avec de tels matériaux, on peut donc réaliser un détecteur infrarouge dont la variation de température est calculable à partir de la formule :

$$\Delta V = \frac{Cd}{Cd + Cp} \cdot z \cdot \frac{dE}{dT} \cdot \Delta T \quad (I.3)$$

avec :

- Cd : la capacité du détecteur (en F),
- Cp : la capacité parasite (en F),

- $z$  : l' épaisseur du matériau (en m),
- $dE/dT$  : la sensibilité du détecteur (en V/m.K),
- $\Delta T$  : l' échauffement (en K).

On voit ici que la réponse en tension du détecteur ne prend en compte que les variations de température. Il faut donc moduler le rayonnement incident à l'aide d'une pale qui va obturer partiellement le capteur sur une faible durée. Cette obturation va nécessiter un supplément de coût électrique et va réduire l'efficacité du rayonnement.

Pour limiter l'effet de cette réduction, il est nécessaire d'augmenter la résistance thermique du dispositif ou de diminuer la constante de temps. On peut abaisser la constante de temps en réduisant l'épaisseur du matériau mais cette modification entraîne une baisse de la réponse en tension (éq. (I.3)). Le détecteur nécessite donc des compromis pour avoir un rendement optimal.

Les matériaux les plus utilisés pour ce type de détecteur sont le Triglycine Sulfate (TGS) ou le Barium Strontium Titanate (BST).

Cependant le nécessaire recuit à 800°C de ces matériaux les rend peu compatibles avec la technologie CMOS et ils sont de ce fait de moins en moins utilisés pour la détection infrarouge industrielle.

### 3. Thermopiles

Les thermopiles sont des détecteurs infrarouges utilisant le principe de l'effet Seebeck.

Lorsqu'il existe une différence de température  $\Delta T$  entre 2 jonctions de deux matériaux différents, il se crée une différence de potentiel qui peut s'exprimer grâce à l'équation :

$$\Delta V = \alpha \cdot \Delta T \quad (I.4)$$

avec :

- $\alpha$  : coefficient Seebeck du matériau.

Les semi conducteurs, avec un coefficient Seebeck beaucoup plus élevé que celui des métaux, sont des matériaux privilégiés pour la réalisation de thermopiles.

Le niveau de réponse d'un thermocouple seul étant très faible, on associe ces derniers en série pour réaliser des thermopiles afin d'augmenter la sensibilité du capteur

thermique. Cependant, cette association entraîne une résistance électrique globale plus élevée et une résistance thermique plus faible, ce qui réduit son efficacité.

En effet, un tel capteur qui mesure un différentiel de température, pour être efficace, doit présenter une résistance thermique la plus élevée possible entre les zones « chaudes » et les zones « froides ». Le nombre maximum de thermocouples doit donc être optimisé afin d'obtenir un signal de sortie intéressant tout en limitant la perte de résistance thermique et en réduisant l'encombrement du dispositif.

### Capteurs quantiques

Les détecteurs quantiques utilisent la détection de l'excitation des photons incidents pour déterminer le signal entrant.

La recombinaison des paires électron-trou, le niveau d'excitation trop bas de certains photons (inférieurs à  $h\nu$ ) et la non-détection de certains photons peuvent expliquer les différences de sensibilités entre les dispositifs de l'état de la technique.

Le rapport entre les électrons mesurés et le rayonnement incident permet de définir une efficacité quantique  $Q = \text{intensité du courant } i / \text{Flux lumineux énergétique } F$ .

La détectivité  $D = 1/NEP$  est définie [1] comme étant l'inverse du bruit et la détectivité spécifique  $D^*$  pour une bande passante de 1Hz et une surface de  $1\text{cm}^2$ .

$$D^* = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \frac{h \cdot c}{\lambda} \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot f(\lambda_0) \cdot \sin^2(\alpha)}} \quad (I.5)$$

où  $\lambda$  et  $\lambda_0$  sont respectivement la longueur d'onde de travail et la longueur d'onde du seuil photoélectrique

On voit donc que pour augmenter la détectivité, les solutions sont de :

- diminuer la température à l'aide de systèmes de refroidissements, de nombreux détecteurs quantiques travaillent à 77K,
- rendre  $f(\lambda_0)$  minimale en ayant un seuil  $hc/\lambda$  élevé,
- réduire l'ouverture angulaire  $\alpha$ .



## 1. Détecteur photoémissif

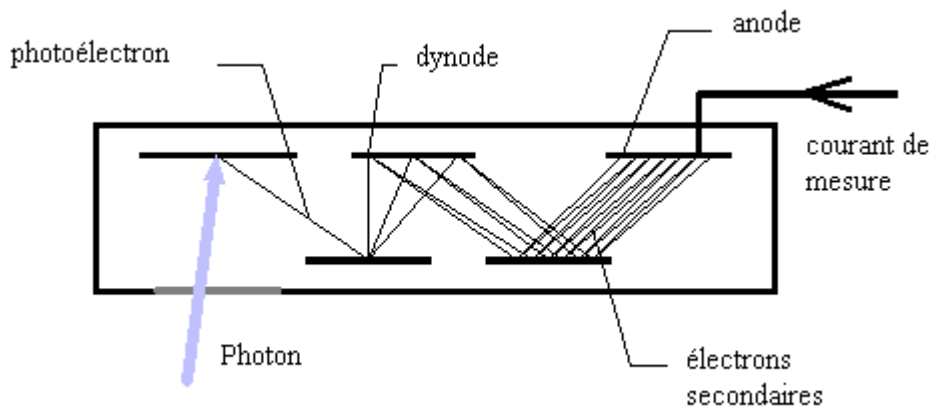
Le signal observé correspond à la mesure d'électrons arrachés à une cathode sous l'effet des photons incidents et d'une polarisation statique.

Ce détecteur est constitué d'une plaque métallique dans un tube à vide (cathode), reliée à une source de courant négative, et d'une électrode (anode).

Les photons incidents ayant une énergie suffisante arrachent les électrons à la cathode, ceux-ci seront captés par l'anode pour créer un courant.

Ces détecteurs sont sensibles dans l'ultraviolet, le visible et le proche infrarouge jusqu'à  $1 \mu\text{m}$ .

L'utilisation la plus courante de cet effet est le photomultiplicateur.



**Figure 6 : Principe Photomultiplicateur**

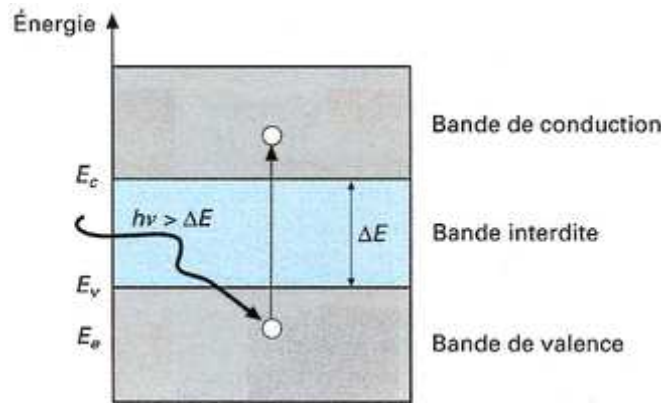
## 2. Détecteurs photoconducteurs

### Photoconductivité intrinsèque

Il s'agit de semi-conducteurs classiques avec leur bande de valence et leur bande de conduction séparées par une bande interdite de largeur  $E_g$ .

Ce sont des semi conducteurs de type III-V (InSb), II-VI (HgCdTe).

Dans le cas de la photoconduction intrinsèque, les photons incidents vont fournir aux électrons de la bande de valence suffisamment d'énergie ( $h\nu > \Delta E$ ) pour arriver en bande de conduction.



**Figure 7 : Schéma de principe de l'absorption d'un photon dans un semi-conducteur[2]**

Les différents types de matériaux utilisés correspondent à une application donnée, chaque matériau ayant des propriétés particulières.

Parmi les III-V, InSb et ses dérivés sont largement utilisés pour l'astronomie depuis le sol. Le premier détecteur date de 1952 [3] et aujourd'hui, les détecteurs peuvent intégrer des quantités de l'ordre de plusieurs millions de pixels [4].

HgCdTe est le matériau le plus répandu. Il a une large gamme d'applications car il peut détecter une large palette de longueur d'onde (de 5 à 20  $\mu\text{m}$ ). Cette technologie n'est utilisée que pour la détection infrarouge contrairement aux puits quantiques ou autres matériaux et cela réduit sa vitesse de développement par rapport aux autres notamment pour des questions de coût de fabrication. Cependant, HgCdTe est actuellement préféré aux autres composés car [5] :

- la bande spectrale couverte est plus importante,
- le rendement quantique est plus intéressant,
- le temps de réponse est plus rapide grâce à une meilleure permittivité.

Depuis 1959 et le premier détecteur de Lawson et al [6], les détecteurs à base de Tellure de Cadmium de Mercure ont bien évolué. Les axes de recherche de la technologie HgCdTe sont nombreux :

- fonctionnement à température plus haute [7],
- agrandissement des tailles de matrices pour réduction des coûts et amélioration des images [8],
- adaptation à la technologie Silicium plutôt que la technologie à base de wafers CdZnTe historiquement utilisé par la technologie HgCdTe [9].

Au niveau commercial, on trouve une large offre de capteurs infrarouges utilisant cette technologie chez BAE [10][11] ou même Sofradir [12][13] pour la France.

## Photoconductivité extrinsèque

Pour la photoconductivité extrinsèque, les impuretés situées dans la bande interdite du matériau introduisent des états intermédiaires facilitant la transition et diminuant l'énergie nécessaire aux électrons et donc la longueur d'onde d'absorption.

Les électrons libérés vont ensuite générer un courant à condition de ne pas se recombiner avec un trou de la bande de valence.

Ces types de photoconducteurs sont créés à base de Silicium et de Germanium et sont les plus utilisés pour les applications dont la longueur d'onde dépasse 20  $\mu\text{m}$ .

En effet, grâce aux états de transition situés dans la bande interdite, ces matériaux peuvent détecter des passages entre états beaucoup plus proches que dans le cas de la photoconductivité extrinsèque (de l'ordre de quelques dizaines de meV)

Detector	$(\Delta E)_{\text{int}}$ (meV)	$\lambda_c$ ( $\mu\text{m}$ )	$\lambda_c$ (T) $\mu\text{m(K)}$	$\eta(\lambda_c)$ (%)	$\Phi_B$ ( $\text{phcm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	NEP ( $\text{WHz}^{-1/2}$ )	$\lambda(\mu\text{m}); T(\text{K}); f(\text{Hz})$
Si:As	53.76	23	24–24.5 (5)	50(T) 20(L)	$9 \times 10^9$ $6.4 \times 10^7$	$0.88 \times 10^{-17}$ $4.0 \times 10^{-17}$	(19;6;1.6) (23;5;5)
Si:P	45.59	24/26.5	28/29 (5)	$\sim 30$ (T)	$2.5 \times 10^8$	$7.5 \times 10^{-17}$	(28;4.2;10)
Si:Sb	42.74	28.8	31 (5)	58(T) 13(L)	$1.2 \times 10^8$ $1.2 \times 10^8$	$5.6 \times 10^{-17}$ $5.5 \times 10^{-17}$	(28.8;5;5) (28.8;5;5)
Si:Ga	74.05	15.0	18.4 (5)	47(T)	$6.6 \times 10^8$	$1.4 \times 10^{-17}$	(15;5;5)
Si:Bi	70.98	17.5	18.5 (27)	34(L)	$< 1.7 \times 10^8$	$3 \times 10^{-17}$	(13;11;–) <sup>a</sup>
Ge:Li	9.98		125 (cale)		$8 \times 10^8$	$1.2 \times 10^{-16}$	(120;2;13)
Ge:Cu	43.21	23	29.5 (4.2)	50	$5 \times 10^{10}$	$1.0 \times 10^{-15}$	(12;4.2;1)
Ge:Be <sup>b</sup>	24.81	39	50.5 (4.2)	100 <sup>b</sup>	$1.9 \times 10^{10}$	$1.8 \times 10^{-16}$	(43;3.8;20)
Ge:Ga	11.32	94	114 (3)	34	$6.1 \times 10^9$	$5.0 \times 10^{-17}$	(94;3;150)
Ge:Ga <sup>b</sup>	11.32	94	114 (3)	$\sim 100$ <sup>b</sup>	$5.1 \times 10^9$	$2.4 \times 10^{-17}$	(94;3;150)
Ge:Ga <sup>b(s)</sup>	$\sim 6$	150	193 (2)	73 <sup>b</sup>	$2.2 \times 10^{10}$	$5.7 \times 10^{-17}$	(150;2;150)

Tableau 1 : Paramètres des détecteurs extrinsèques [14]

Le tableau 1 [14] présente les différents dopants utilisés pour la photoconductivité extrinsèque avec les performances et les longueurs d'onde concernées par chaque structure.

### 3. Détecteurs photovoltaïques

On réalise une jonction P-N avec deux semi-conducteurs. La différence de potentiel entre les deux matériaux crée un champ électrique. Du côté P, l'absorption de photons libère des électrons qui vont se déplacer vers la bande de conduction du matériau N. Du côté N, les photons vont créer un mouvement des trous vers le côté P.

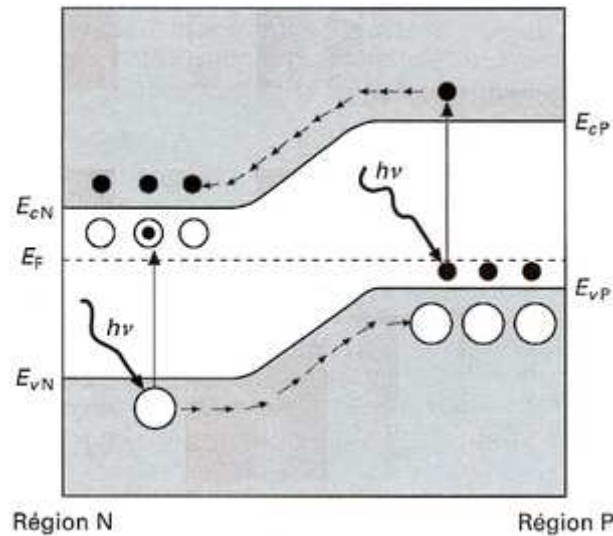


Figure 8 : Déplacement des paires électrons/trous dans un détecteur de type jonction P-N [2]

En l'absence de polarisation, le détecteur photovoltaïque délivre du signal et lorsqu'il est polarisé en inverse, il se comporte comme une photodiode.

Ce mode de fonctionnement est utilisé en assemblant des photoconducteurs dopés N ou P. Il existe donc des exemples d'utilisation de ce phénomène avec les matériaux déjà cités plus haut : HgCdTe ou jonction Schottky.

#### 4. Détecteurs à base de puits quantiques

Les détecteurs infrarouges à multi puits quantiques profitent de l'évolution des techniques de croissance des matériaux (telle que l'épitaxie par jets moléculaires [15]) pour faire croître des couches fines de semi-conducteurs ayant des bandes interdites de largeur différentes alternativement.

Le but est de créer une succession de puits (bande interdite faible) et de barrières (bande interdite élevée). Les électrons se retrouvent piégés dans les puits de potentiels et l'énergie fournie par les photons incidents leur permet de passer de l'état fondamental à des états transitoires dans le puits.

L'intérêt de cette technique est de pouvoir réaliser des puits ayant des transitions parfaitement adaptées à l'utilisation cherchée.

On trouve en figure 8 une représentation schématisée du multi puits quantiques avec les successions des couches de matériaux qui se répètent un certain nombre de fois pour permettre une amplification suffisante et donc un courant détectable en sortie.

La figure 9 montre la « coupe transversale » d'une structure à multi puits quantiques avec les variations successives de la bande interdite et les états liés dans les différents puits.

Chaque photon incident peut, si son énergie est suffisante, permettre à un électron de passer la barrière de potentiel et se déplacer. Les différents états représentatifs de l'état du puits permettent de contrôler le type de rayonnement que l'on peut absorber (la longueur d'onde étant liée à l'énergie par  $E = h.c / \lambda$ ).

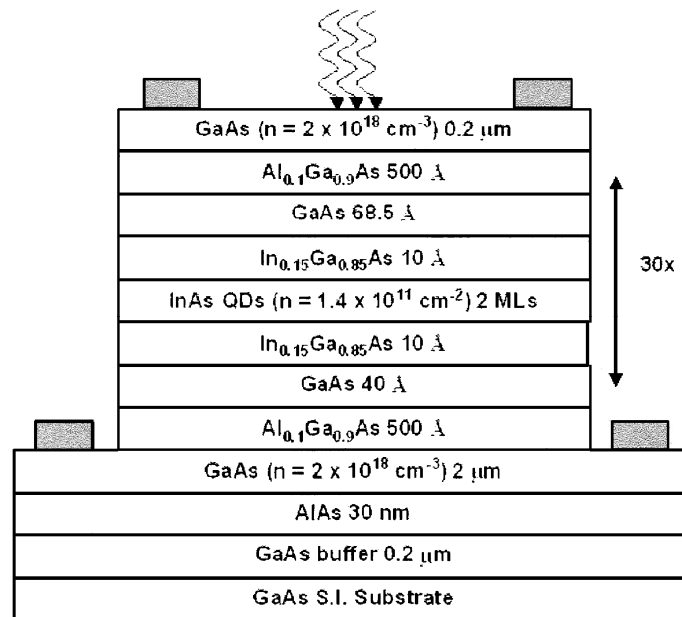


Figure 9 : Puits quantique : épaisseur des couches [16]

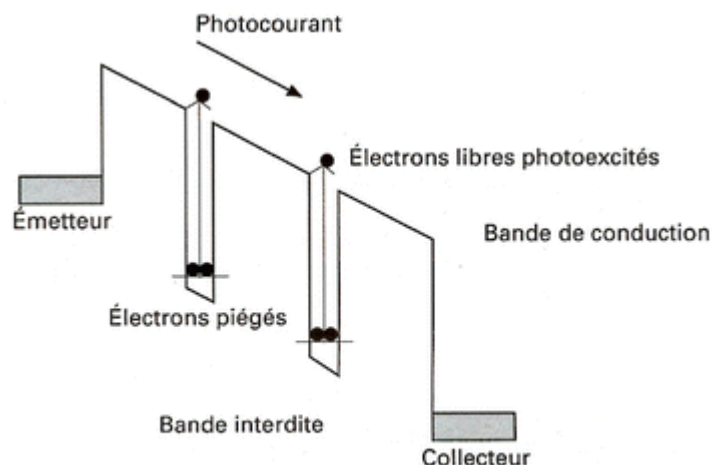


Figure 10 : Fonctionnement d'un détecteur à multi puits quantiques[2]

La première démonstration d'un détecteur à multi puits quantiques date de 1987 [17].

Les matériaux utilisés pour ces structures sont principalement GaAs/AlGaAs [16] mais d'autres combinaisons de matériaux peuvent être utilisées (SiGe/Si [18], InSb/GaAsSb [19]).

Les principaux avantages des multi-puits quantiques par rapport aux autres technologies sont :

- la disponibilité de larges wafers par rapport au HgCdTe donc possibilité de fabriquer des matrices plus grandes,
- une large bande spectrale si on superpose des puits quantiques ayant des pics d'absorption différents,
- des performances facilement reproductibles.

Par contre, les puits quantiques souffrent de certains désavantages :

- une faible efficacité quantique,
- ils nécessitent un refroidissement important (77K).

## **Dispositifs de vision non refroidi**

Dans les années 70, l'armée américaine décide de financer la recherche sur les caméras infrarouges dans le but d'équiper ses soldats d'appareils de vision élaborée. Pour réaliser cela, il fallait un système moins cher et plus transportable que les matrices de capteurs photoniques utilisées dans l'aérospatiale.

Deux technologies vont alors se disputer le marché : les capteurs pyroélectriques (à base de Barium et Strontium (BST)) et les bolomètres (à base d'oxyde de Vanadium VO<sub>x</sub>).

Après quinze ans de recherches, l'armée américaine décide d'arrêter le financement du premier projet pour se concentrer sur la recherche sur les bolomètres à base de VO<sub>x</sub> pour des raisons de plus grande fiabilité des capteurs.

Aujourd'hui, presque 80% de l'offre en caméra infrarouge est à base de VO<sub>x</sub> mais il existe d'autres technologies susceptibles de réaliser les mêmes performances.

L'objectif de cette thèse est de réaliser une caméra infrarouge pouvant concurrencer les autres technologies présentées ici. Le tableau suivant (Tableau 2) montre une estimation des performances des trois autres technologies susceptibles d'être utilisées dans les caméras infrarouges non refroidies [18].

<b>Performance and cost comparison</b>			
<b>Features</b>	<b>Microbolometers</b>	<b>Pyrometers</b>	<b>Microcantilever</b>
Ultimate sensitivity	20 mK	40 mK	3 mK
Response time	15–20 ms	15–20 ms	5–10 ms
Dynamic range	$10^4$	$10^3$	$>10^5$
Optics	large, expensive	large, expensive	small, cheap
Power requirements	low	low	low
Ease of fabrication	difficult	difficult	standard IC fabrication
Size	moderately small	moderately small	small
Cost of camera	\$20–50K	\$7–25K	\$5–15K

**Tableau 2 : Comparatif des technologies de matrices non refroidies pour l'imagerie infrarouge [20]**

## Matrices à base de matériaux Ferroélectriques

Les matériaux ferroélectriques sont des matériaux qui ont été magnétisés par un passage dans un champ magnétique.

Sous l'effet de la température, la polarisation du matériau va se modifier et on pourra mesurer la variation de température.

Le capteur unitaire de ce type de matrice se présente sous la forme suivante [21] :

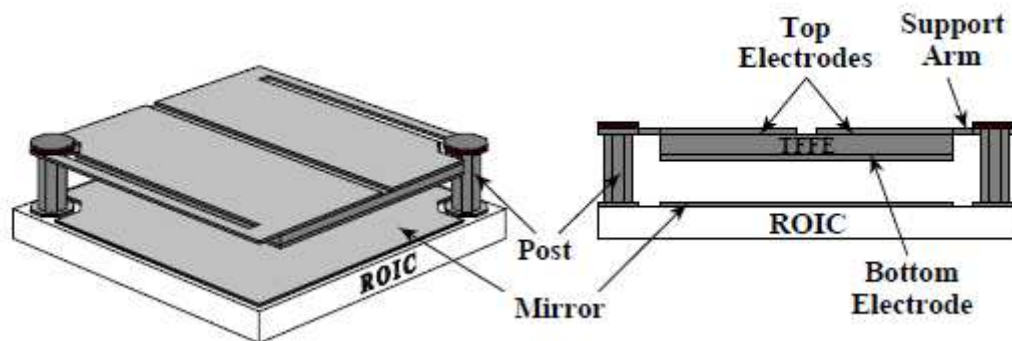


Figure 11 : Pixel dans une matrice de capteurs utilisant la pyroélectricité

Les miroirs permettent une absorption maximale du rayonnement infrarouge au niveau des électrodes grâce à un phénomène de résonance.

La variation de la valeur des capacités équivalentes au dispositif permet de déterminer la variation de température due au rayonnement.

L'avantage de ce type de système est la forte sensibilité du capteur. Cependant, il faut obturer le capteur de temps en temps pour permettre de « remettre à zéro » la variation de température. Cette obturation est coûteuse en termes de puissance lumineuse et de puissance électrique.

## Matrices à base de bolomètres

La plus grande partie de la recherche sur les dispositifs de vision infrarouge non refroidis est effectuée à partir de bolomètres. Les plus grandes compagnies à travers le monde utilisent les systèmes fonctionnant à partir de bolomètres, c'est-à-dire exploitant une variation de résistance électrique induite par un changement de température.

Les technologies les plus utilisées sont celles à base d'oxyde de Vanadium, comme chez DRS [22] [23] ou FLIR [24] ou de silicium amorphe comme ULIS [25] [26].



Les orientations de recherche dans ce domaine suivent plusieurs voies mais ont toutes pour but de réduire le coût encore trop important des dispositifs.

La réduction de la taille des pixels va dans ce sens. Aujourd'hui, les capteurs formant les pixels des matrices de bolomètres atteignent une taille de  $17\mu\text{m}$  [26] [27] et ont des NETD inférieurs à 100mK.

Les résolutions de telles matrices atteignent aujourd'hui près de  $640*480$  voire  $1024*768$  pixels, les caméras infrarouges à bolomètres sont donc proches du million de pixels. Grâce à ce grand nombre de pixels, les matrices à base de bolomètres peuvent avoir une représentation très réaliste des scènes filmées (figure 13).



**Figure 12 : Image vue par une matrice de bolomètres [26].**

Toutes ces avancées permettent de proposer un premier prix de caméra infrarouge situé aux alentours de 1000 Euros [24].

Le tableau suivant montre l'offre infrarouge disponible pour les petits pixels [27][28][29][30][31].

Fabricant	Technologie utilisée	Résolution de la matrice	Dimension d'un pixel ( $\mu\text{m}$ )	NETD (en mK)
FLIR	Oxyde de Vanadium $\text{VO}_x$	320*240	25	50
		320*240	25	
		640*480	17	
		640*480	17	
Raytheon	Oxyde de Vanadium $\text{VO}_x$	640*480	25	
		640*480	20	
DRS	Oxyde de Vanadium $\text{VO}_x$	640*480	17-25	<50 (25 $\mu\text{m}$ )
		320*240		
		1024*768	<17 (2012)	
		1920*1080		
BAE	Oxyde de Vanadium $\text{VO}_x$	640*480	28	<35
		1024*768	17	
ULIS	Silicium amorphe	640*480	17	46
		1024*768	17	
SCD	Oxyde de Vanadium $\text{VO}_x$	384*288	17	<35

**Tableau 3 : Etat de l'art des principaux fabricants de microbolomètres**

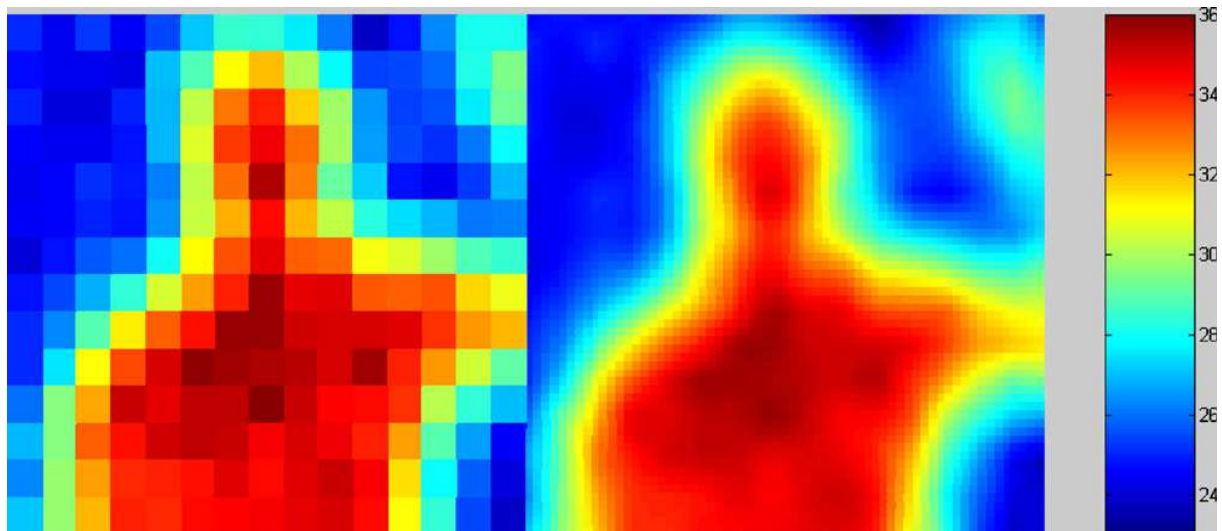
L'avantage des bolomètres est un temps de réponse court et une excellente sensibilité. La consommation de ce type de système est particulièrement élevée.

### **Matrices à base de thermopiles**

Les matrices de capteurs utilisant des thermocouples servant principalement à la mesure de température sans contact sont assez peu industrialisées en grande résolution mais leur potentiel d'optimisation est important.

Le nombre de capteurs peut donc énormément varier entre des matrices de tailles largement plus faibles que pour les bolomètres : de 100[32] à quelques milliers [33].

La figure 12 [34] présente une image obtenue à partir d'un capteur 16\*16 ayant un NETD de l'ordre de 490mK.



**Figure 13 : Représentation d'une image reçue par un capteur constitué d'une thermopile [34]**

Les paramètres modifiables sont beaucoup plus importants que pour les autres types de capteurs. Les performances des capteurs vont varier suivant : le type des matériaux utilisés pour le thermocouple, la position des jonctions chaudes/froides.

Le nombre de pixels implantés sur les matrices réalisées à partir de thermocouples est généralement moins élevé que celui des matrices bolométriques et la sensibilité est souvent plus faible. Néanmoins, les avantages principaux de ce type de système sont le prix et la consommation. En effet, les systèmes thermoélectriques ne nécessitent pas d'obturateur comme les pyromètres, et n'ont pas besoin de stabilisation en température comme les bolomètres.

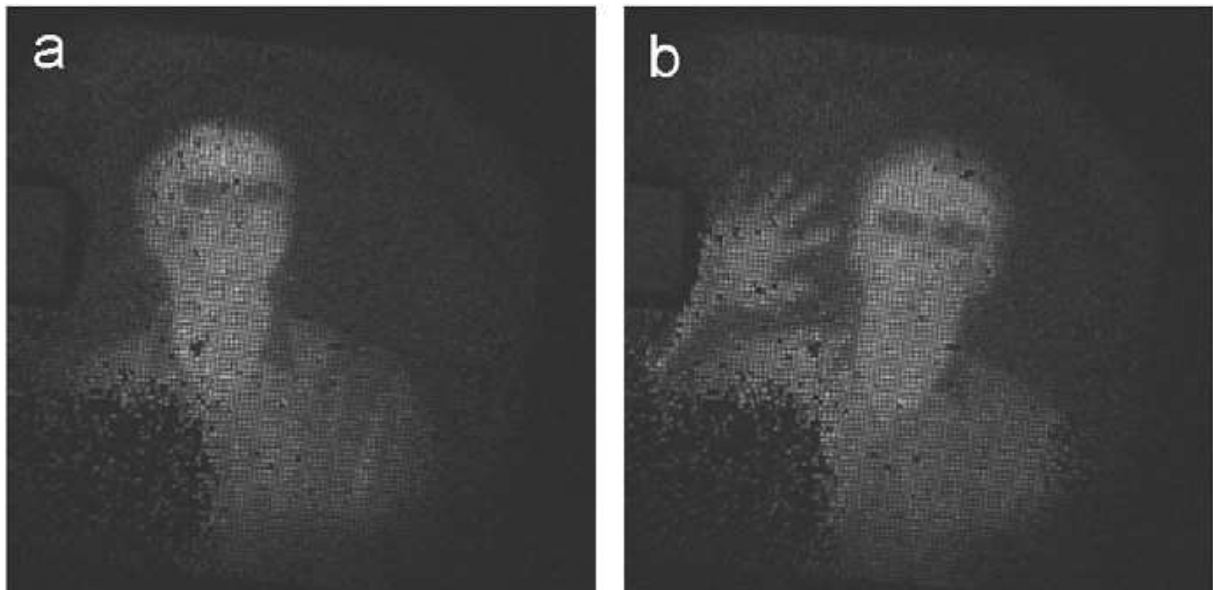
Les matrices à base de thermopile sont fabriquées en technologie silicium, ce qui rend leur réalisation plus aisée que la plupart des autres détecteurs infrarouges. Cependant, les imageurs réalisés à partir de ces matrices ont bien souvent un NETD supérieur aux autres systèmes de détection (de l'ordre de quelques centaines de mK) et un temps de réponse relativement important.

## Matrices à base de MEMS (cantilevers)

Les MEMS sont les dispositifs micro usinés développés dans les domaines de l'optique, la mécanique ou la fluïdique. Ils proposent de nouvelles solutions pour améliorer les systèmes existants.

Pour les caméras infrarouges, les matrices utilisant des MEMS possèdent un système de poutres suspendues permettant la variation en température d'un absorbeur infrarouge « collé » à un réflecteur d'un rayon visible. La déviation du rayon visible est mesurée à l'aide d'un CCD situé après une série de miroirs. L'échauffement et la déviation des poutres va permettre la transformation du rayon infrarouge en déviation visible.

Les résultats obtenus par ce type de dispositif sont potentiellement très bons avec des valeurs de NETD inférieures à 10mK en théorie [35]. Pour l'instant, les performances obtenues restent inférieures aux autres dispositifs proposés, de l'ordre de plusieurs centaines de mK [36].



**Figure 14 : Image donnée par une caméra de micro-cantilevers. [37]**

L'avantage d'une matrice de cantilevers est la mixité des possibilités au niveau de la mesure de la déviation. La mesure peut être piézoélectrique, optique, capacitive ou résistive. Toute amélioration dans la mesure peut donc se traduire par une meilleure sensibilité pour le dispositif total. Le principal défaut d'un tel système est la nécessité d'encapsulation de la partie microscopique pour garder une valeur référence de déviation.

## **Bibliographie du chapitre I**

- [1] Gilbert Gossorges <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/electronique-photonique-th13/optique-optoelectronique-42111210/detecteurs-infrarouges-e4060/detecteurs-quantiques-e4060niv10003.html>
- [2] Benoit Dupont, Antoine Dupret, Eric Belhaire, and Patrick Villard FPN Sources in Bolometric Infrared Detectors *IEEE SENSORS JOURNAL*, VOL. 9, NO. 8, AUGUST 2009
- [3] H. Walker, *Nature* V7A, 744 (1952)
- [4] Mike Davis and Mark Greiner Indium antimonide large-format detector arrays *Optical Engineering Vol 50 Issue 6 (2011)*
- [5] M. Razeghi Current status and trends of infrared detectors *Optoelectronic review* 6(3) 155-194 (1998)
- [6] WD Lawson, S Nielsen, EH Putley and AS Young, *J. Phys. Chem. Solids* 9, 325 (1959)
- [7] S. Velicu, CH Grein, PY Emelie, A Itsuno, JD Philips and P Wijewarnasuriya MWIR and LWIR HgCdTe Infrared Detectors Operated with Reduced Cooling Requirements *Journal of Electronic materials* Vol.39 N°7 (2010)
- [8] P. Norton HgCdTe infrared detectors *OPTO-ELECTRONICS REVIEW* 10(3), 159–174 (2002)
- [9] M. Carmody, J.G. Pasko, D. Edwall, E. Piquette, M. Kangas, S. Freeman, J. Arias, R. Jacobs, W. Mason, A. Stoltz, Y. Chen, and N.K. Dhar Status of LWIR HgCdTe-on-Silicon FPA Technology *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, Vol. 37, No. 9, 2008
- [10] <http://www.baesystems.com/>
- [11] Marion B. Reine History of HgCdTe infrared detectors at BAE Systems *Proc. of SPIE Vol. 7298 72982S-1* (2009)
- [12] <http://www.sofradir.com/>
- [13] Yann Reibel, Laurent Rubaldo, Cedric Vaz, Philippe Tribolet, Nicolas Baier, Gérard Destefanis MCT (HgCdTe) IR detectors: latest developments in France *Proc. of SPIE Vol. 7834 78340M-1* (2010)
- [14] N. Sclar Properties of doped silicon and Germanium infrared detectors *Progress in Quantum Electronics, Volume 9, Issue 3, 1984, Pages 149-257*
- [15] B. A. Joyce Molecular Beam Epitaxy *Reports on progress in Physics Volume 48* (1985)
- [16] R. V. Shenoia, R. S. Attaluri, A. Siroya, J. Shao, Y. D. Sharma, A. Stintz, T. E. Vandervelde, and S. Krishnab Low-strain InAs/InGaAs/GaAs quantum dots-in-a-well infrared photodetector *Journal of Vacuum Science & Technology B / Volume 26 / Issue 3 / (2008) / PAPERS FROM THE 25th NORTH AMERICAN CONFERENCE ON MOLECULAR BEAM EPITAXY*
- [17] Levine, B. F. Malik, R. J. Walker, J. Choi, K. K. Bethea, C. G. Kleinman, D. A. Vandenberg, J. M. Strong 8.2  $\mu\text{m}$  infrared intersubband absorption in doped GaAs/AlAs quantum well waveguides *Appl. Phys. Lett.* 50, p. 273-275 (1987)
- [18] M. Bonfanti, E. Grilli, M. Guzzi, M. Virgilio and G. Grosso, D. Chrastina, G. Isella, and H. von Känel, A. Neels Optical transitions in Ge/SiGe multiple quantum wells with Ge-rich barriers *PHYSICAL REVIEW B* 78, 041407\_R (2008)
- [19] M. Nobile, H. Detz, E. Mujagić, A. M. Andrews, P. Klang, W. Schrenk, and G. Strasser Midinfrared intersubband absorption in InGaAs/GaAsSb multiple quantum wells *APPLIED PHYSICS LETTERS* 95, 041102 (2009)

- [20] MEMS transform infrared imaging *Opto and Lasers Europe June 2003*
- [21] Charles M. Hanson, Howard R. Beratan, Diane L. Arbuthnot Uncooled Thermal Imaging with Thin-Film Ferroelectric Detectors *Proc. of SPIE Vol. 6940 694025-5* (2008)
- [22] <http://www.drsinfrared.com/>
- [23] Chuan Li, C.J. Han, George D. Skidmore, and Cory Hess DRS Uncooled VOx Infrared Detector Development and Production Status *Proc. of SPIE Vol. 7660, 76600V* (2010)
- [24] <http://www.flir.com/FR/>
- [25] <http://www.ulis-ir.com/>
- [26] Jean-Luc Tissot, Sebastien Tinnes, Alain Durand, Christophe Minassian, Patrick Robert, Michel Vilain et Jean-Jacques Yon High-performance uncooled amorphous silicon video graphics array and extended graphics array infrared focal plane arrays with 17- $\mu\text{m}$  pixel pitch *Optical Engineering 50(6), 061006* (June 2011)
- [27] Chuan Li, C.J. Han, George D. Skidmore, and Cory Hess DRS Uncooled VOx Infrared Detector Development and Production Status *Proc. of SPIE Vol. 7660, 76600V* · © 2010
- [28] <http://www.raytheon.com/>
- [29] S. H. Black, R. Kraft, A. Medrano, T Kocian, D. Bradstreet, R. Williams, T. Yang Advances in High Rate Uncooled Detector Fabrication at Raytheon *Proc. of SPIE Vol. 7660 76600X-1*(2010)
- [30] Richard Blackwell, Glen Franks, Daniel Lacroix, Sandra Hyland, and Robert Murphy Small Pixel Uncooled Imaging FPAs and Applications *Proc. of SPIE Vol. 7660, 76600V* · © 2010
- [31] U. Mizrahi, L. Bikov, A. Giladi, N. Shiloah, S. Elkind, T. Czyzewski, I. Kogan, S. Maayani, A. Amsterdam, I. Vaserman, Y. Hirsh and A. Fraenkel New Developments in SCD's 17 $\mu\text{m}$  VOx  $\mu$ -Bolometer Product Line
- [32] Andri Schaufelbühl, N. Schneeberger, Ulrich Münch, Marc Waelti, Oliver Paul, Oliver Brand, Henry Baltes, Christian Menolfi, Qiuting Huang, Elko Doering, and Markus Loepfe Uncooled Low-Cost Thermal Imager Based on Micromachined CMOS Integrated Sensor Array *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, VOL. 10, NO. 4, DECEMBER 2001*
- [33] Masaki Hirota, Yoshimi Ohta, Yasuhiro Fukuyama Low-cost thermo-electric infrared FPAs and their automotive applications *Proc. of SPIE Vol. 6940 694032-1* (2008)
- [34] C. Calaza, N. Viarani, G. Pedretti, M. Gottardi, A. Simoni, V. Zanini, M. Zen An uncooled infrared focal plane array for low-cost applications fabricated with standard CMOS technology *Sensors and Actuators A 132 (2006) 129–138*
- [35] Yang Zhao, Minyao Mao, Roberto Horowitz, Arunava Majumdar, John Varesi, Paul Norton, and John Kitching Optomechanical Uncooled Infrared Imaging System: Design, Microfabrication, and Performance *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, VOL. 11, NO. 2, APRIL 2002*
- [36] Zhengyu Miao, Qingchuan Zhang, Dapeng Chen, Zheyang Guo, Fengliang Dong, Zhiming Xiong, Xiaoping Wu, Chaobo Li, Binbin Jiao Uncooled IR imaging using optomechanical detectors *Ultramicroscopy 107 610–616* (2007)
- [37] Fengliang Donga, Qingchuan Zhanga, Dapeng Chenb, Zhengyu Miaoa, Zhiming Xionga, Zheyang Guoa, Chaobo Lib, Binbin Jiaob, Xiaoping Wua Uncooled infrared imaging device based on optimized optomechanical micro-cantilever array *Ultramicroscopy 108 (2008) 579–588*

# **Chapitre II : Modélisation et dimensionnement de la matrice infrarouge**

**Introduction**

**Principe**

**Hypothèses et simplifications**

**Equations**

**Méthode de calcul**

**Simulations**

**Bibliographie du chapitre II**

## **Introduction**

Le but de ce chapitre est le rappel des principes physiques inhérents au problème de la détection infrarouge : thermodynamique et rayonnement.

Les capteurs développés au laboratoire ont d'abord été multi-membranes [1] puis mono-membrane pour des raisons exposées plus longuement dans la thèse de Medhi HAFFAR [2]. Cette amélioration conduit à une réduction importante de l'encombrement de chaque microcapteur puisque les premières réalisations comportaient un pilier de silicium qui séparait les membranes absorbantes des membranes réfléchissantes alors que les capteurs actuels peuvent comporter plusieurs zones absorbantes-réfléchissantes sur une membrane unique.

C'est à partir de ces études que nous avons imaginé un système de détection imageant matriciel utilisant les capteurs mono-membrane comme pixel élémentaire, ce qui a été rendu possible par la taille réduite de ces éléments.

Dans ce chapitre, une explication rapide sur le fonctionnement du capteur sera faite puis nous expliciterons les méthodes de calcul, tout d'abord sous forme d'équations puis sous formalisme matriciel. Ensuite, les approximations choisies pour la simulation numérique seront justifiées. Enfin, nous verrons les résultats obtenus et les choix effectués pour la réalisation des matrices de capteurs.

Le programme de modélisation et optimisation des matrices a été développé en Visual Basic et se présente sous la forme d'une feuille « Excel ». Cette contrainte faisait partie du cahier des charges qui nous avait été donné en début de Thèse : Faire un logiciel doté d'une interface conviviale, permettant de fournir toutes les dimensions nécessaires à la réalisation de matrices de capteurs de dimensions précises et présentant des performances optimales.

## **Principe**

Ce microcapteur de rayonnement infrarouge fonctionne à partir d'un revêtement superficiel à différentiel d'absorption (absorbant : polyimide / réflecteur : or) et d'une thermopile qui convertit les différences de température induites en f.e.m. Seebeck (figure 14). Les jonctions des thermocouples sont alternativement disposées sous le réflecteur et sous



l'absorbant. La partie active du microcapteur est déposée sur une membrane de façon à l'isoler du substrat en silicium dont la conductivité thermique est élevée et ainsi les gradients thermiques sont plus importants.

La thermopile est constituée de pistes thermoélectriques en polysilicium recouvertes de thermoéléments plaqués en or. Le coefficient Seebeck du couple polysilicium/Or est d'environ  $300 \cdot 10^{-6}$  V/K. De manière à diminuer la résistance électrique globale du microcapteur, la largeur des pistes est élargie pour les parties essentiellement constituées de polysilicium et réduite pour le thermoélément plaqué or : typiquement  $135 \mu\text{m}$  et  $5 \mu\text{m}$  pour un capteur  $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ . Le calcul de la résistance prend en compte uniquement la partie en polysilicium étant donnée la très forte différence de conductivité électrique entre l'or et le polysilicium. Cette réduction de la résistance électrique permet de diminuer le bruit et donc d'améliorer le NETD défini plus loin dans ce mémoire.

Les différentes couches du capteur sont :

- la couche support de la membrane  $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$  faiblement contrainte,
- les lignes thermoélectriques en Polysilicium,
- les thermoéléments plaques Or/Titane déposés sur la ligne en polysilicium,
- la couche de Polyimide pour l'absorption du rayonnement et l'isolation électrique,
- le réflecteur composé d'une couche d'Or/Titane.

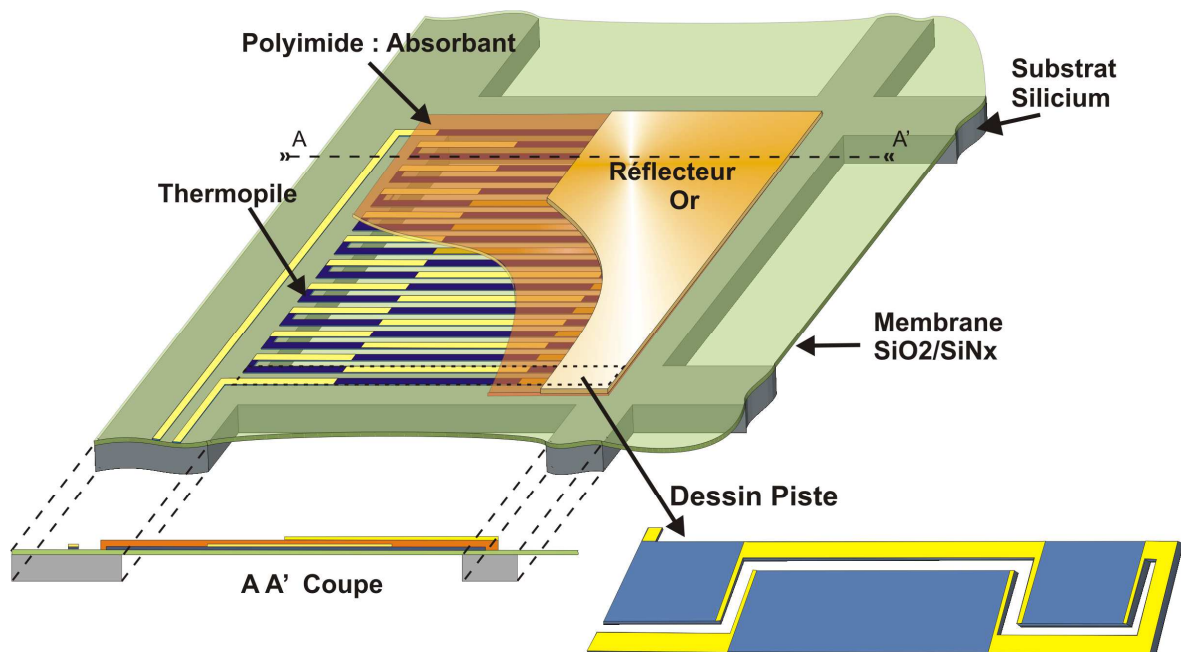


Figure 15 : Vue écorchée d'un micro-capteur IEMN

A titre d'exemple le profil de température calculé le long d'une ligne de la thermopile située sous un absorbant et un réflecteur de longueurs 1.5 mm est représenté figure 15 pour un flux de rayonnement de 1000 W/m<sup>2</sup>.

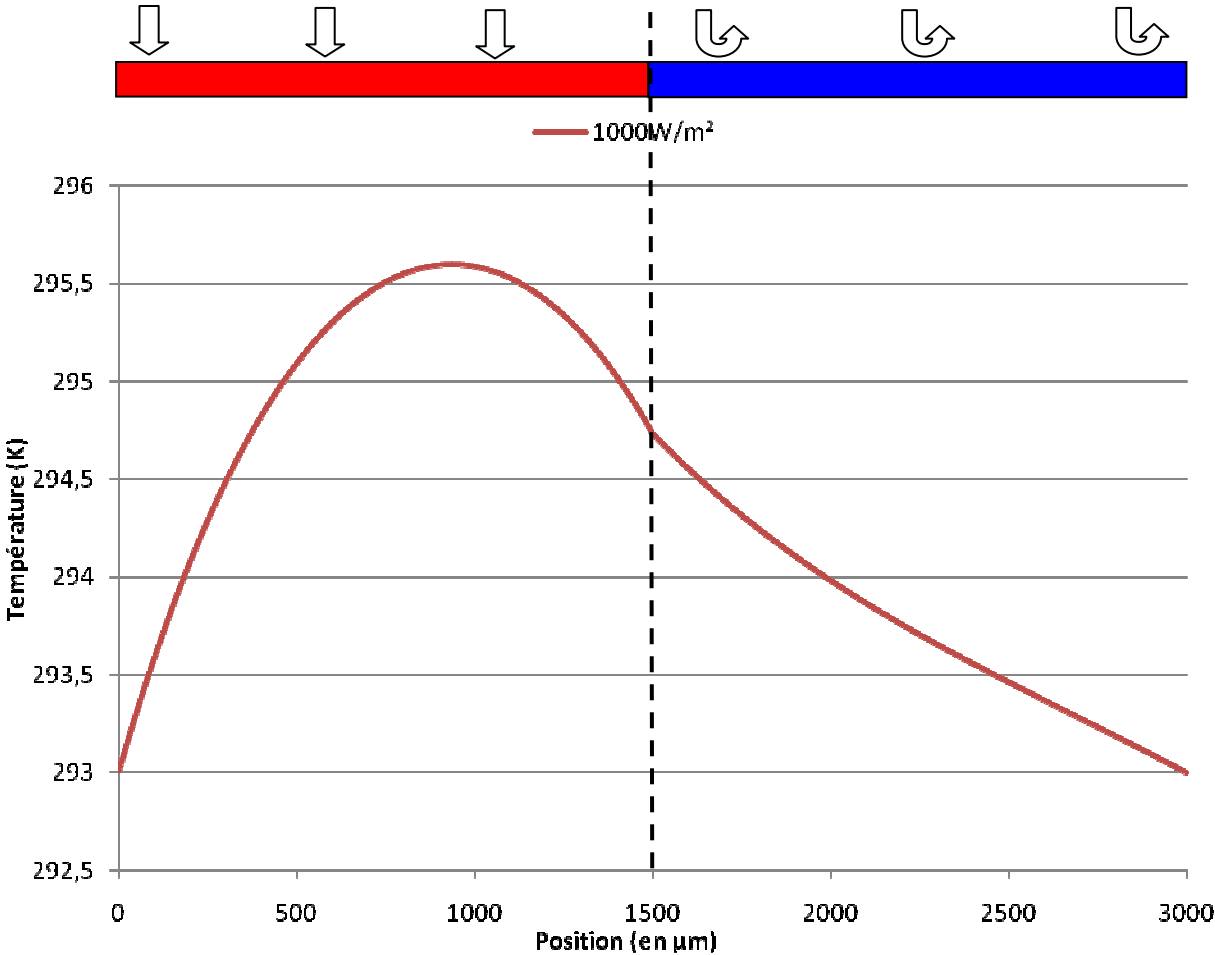


Figure 16 : Profil de température le long d'une ligne de 3mm pour E=1000W/m<sup>2</sup>

## **Hypothèses et simplifications**

Hypothèse 1 : Le substrat est un puits thermique à température fixe.

Cela permet de considérer que :

- les parties extrêmes des lignes thermoélectriques, situées sur le substrat, sont à la température du substrat,
- les capteurs de la matrice infrarouge, isolés entre eux par des piliers en silicium sont indépendants les uns des autres.

Hypothèse 2 : Les lois de comportement appliquées au flux thermique sont les mêmes qu'en physique classique malgré les dimensions microscopiques considérées et le rapport d'aspect important entre les dimensions latérales et les épaisseurs.

Les conductances des couches équivalentes sont calculées à partir des conductivités des matériaux massifs.

Hypothèse 3 : Le problème est tridimensionnel mais il est possible de le ramener à un problème à une dimension.

Les raisons sont les suivantes :

La température est supposée uniforme suivant la direction transverse aux pistes (axe y, figure 17), car la conductivité des matériaux thermoélectriques est très élevée par rapport à celle de l'air et la largeur des pistes est grande par rapport à celles des interpistes. La circulation du flux de chaleur s'effectue donc quasi intégralement dans le sens des lignes thermoélectriques.

Compte tenu des faibles épaisseurs (axe z), les couches de matériaux constituant le micro-capteur au niveau de la membrane peuvent être assimilées à une couche homogène dont l'épaisseur  $e_t$  et la conductivité thermique  $\lambda_{\text{éq}}$  équivalentes sont différentes sous les réflecteurs et sous les absorbants.

La simulation thermique de la partie active du micro-capteur est donc ramenée à l'étude d'un flux de chaleur dont la circulation s'effectue suivant l'axe x dans une couche homogène.

La cellule d'étude (fig. 17) utilisée pour la modélisation dont le but sera le positionnement exact des jonctions des thermocouples afin d'optimiser la sensibilité, se compose de 2 lignes (de largeurs alternativement  $l_1$  ou  $l_2$ ) et 2 interlignes de largeur  $l_i$ . La largeur équivalente de la cellule d'étude est donc :  $l_1 + l_2 + 2l_i$ .

Cette cellule comprend une partie de la membrane située sous l'absorbant et une partie sous le réflecteur, d'absorptivités respectives :  $a_A$  et  $a_R$  et de longueurs  $L_A$  et  $L_R$ .

La longueur équivalente de la cellule est :  $L_M = L_A + L_R$ .

De manière pratique, la longueur  $L_M$  étudiée est égale à 3 mm, cette valeur est justifiée plus loin.

Pour cette longueur de membrane, la sensibilité à l'éclairement en fonction du ratio longueur du réflecteur/longueur de la membrane a été calculée et l'optimum se situe à 50% (figure 16). On prendra donc  $L_A = L_R$ .

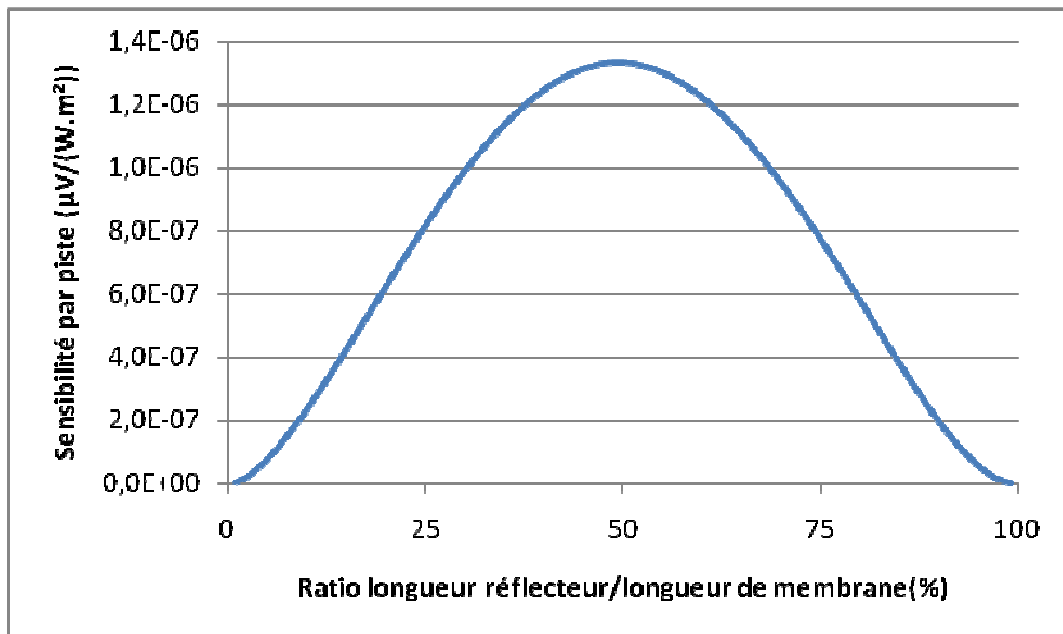
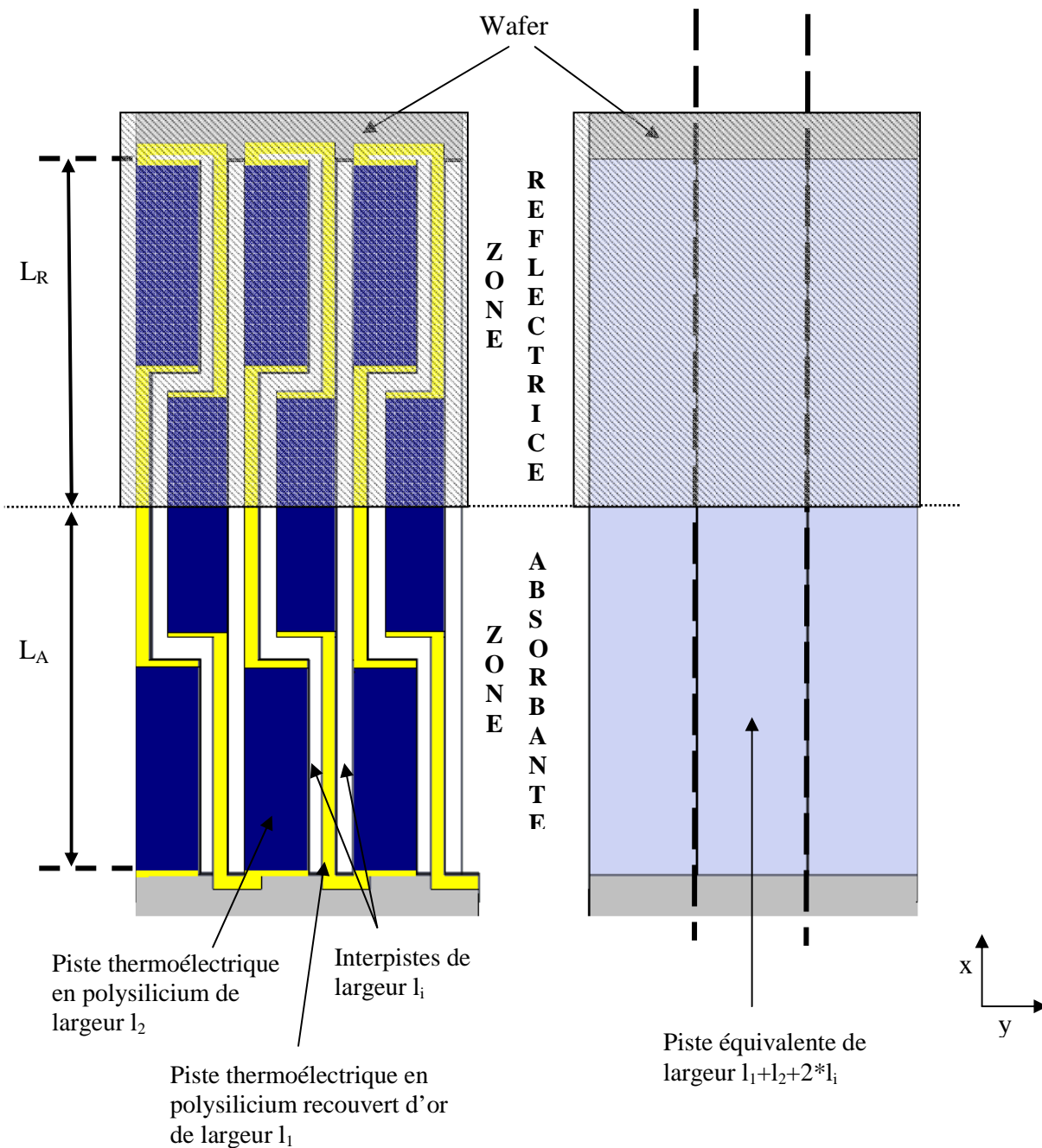


Figure 17 : Variation de sensibilité en fonction du ratio longueur du réflecteur/longueur de la membrane



**Figure 18 : Cellule d'étude : schéma des pistes vues de dessus. Représentation des largeurs de piste réelle (à gauche) et de la ligne équivalente (à droite) utilisée pour la simulation.**

Les 2 parties absorbante et réfléchissante de la membrane (fig 18) sont constituées des couches suivantes, soit pour la partie absorbante :

- le support de la membrane constituée des couches  $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$  faiblement contraintes d'épaisseurs  $e_{\text{SiO}_2}$  et  $e_{\text{SiN}_x}$  et de conductivités  $\lambda_{\text{SiO}_2}$  et  $\lambda_{\text{SiN}_x}$ ,

- les lignes thermoélectriques en Polysilicium, d'épaisseur  $e_{\text{polySi}}$ , de largeur  $l_{\text{polySi}}$  et de conductivité  $\lambda_{\text{polySi}}$ ,

- les thermoéléments plaqués Or/Titane déposés sur la ligne en polysilicium, d'épaisseurs  $e_{Ti}$  et  $e_{Au}$ , de largeur  $l_{Au}$  et de conductivités  $\lambda_{Ti}$  et  $\lambda_{Au}$ ,
- la couche de Polyimide pour l'absorption du rayonnement et l'isolation électrique, d'épaisseur  $e_{poly}$  et de conductivité  $\lambda_{poly}$ .

Pour le réflecteur, les mêmes couches sont présentes, auxquelles on ajoute :

- le réflecteur en Or/Titane, d'épaisseurs  $e_{Ti\text{réf}}$  et  $e_{Au\text{réf}}$  et de conductivités  $\lambda_{Ti\text{réf}}$  et  $\lambda_{Au\text{réf}}$ .

Couche	Epaisseur ( $\mu\text{m}$ )	Conductivité thermique
SiO <sub>2</sub>	0.8	1.4
SiN <sub>x</sub>	0.6	20
Polysilicium	0.45	35
Or thermoéléments/Titane	0.15 / 0.1	317 / 20
Polyimide	10	0.2
Or réflecteur / Titane	0.07 / 0.02	317 / 20

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des couches du capteur

Ces zones ont donc des épaisseurs différentes :

$$e_{\text{tabs}} = e_{\text{SiO}} + e_{\text{SiN}} + e_{\text{polySi}} + e_{\text{Ti}} + e_{\text{Au}} + e_{\text{poly}} \quad (\text{II.1})$$

$$e_{\text{tréf}} = e_{\text{SiO}} + e_{\text{SiN}} + e_{\text{polySi}} + e_{\text{Ti}} + e_{\text{Au}} + e_{\text{poly}} + e_{\text{Ti\text{réf}}} + e_{\text{Au\text{réf}}} \quad (\text{II.2})$$

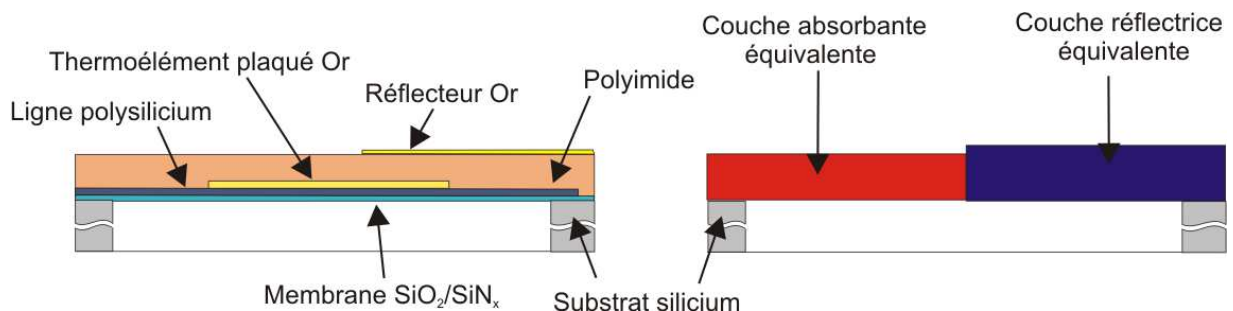


Figure 19 : Schéma des pistes vues en coupe AA' (rapport des dimensions non représentatif). Représentation des différentes couches (à gauche) et de la couche équivalente (à droite).

Le calcul des conductivités thermiques équivalentes de ces zones absorbantes et réfléchissantes s'effectue à partir de la valeur moyenne des conductivités thermiques des couches rapportées à leur structure respective et à leur volume correspondant.

Ainsi pour la zone relative au réflecteur on a la relation :

$$\lambda_{\text{éq réf}} \cdot e_{\text{tréf}} = \lambda_{\text{SiO}} \cdot e_{\text{SiO}} + \lambda_{\text{SiN}} \cdot e_{\text{SiN}} + \lambda_{\text{poly}} \cdot e_{\text{poly}} + \lambda_{\text{Tiréf}} \cdot e_{\text{Tiréf}} + \lambda_{\text{Auréf}} \cdot e_{\text{Auréf}} + \frac{\lambda_{\text{polySi}} \cdot e_{\text{polySi}} \cdot (l_{\text{polySi}} + l_{\text{Au}}) + (\lambda_{\text{Ti}} \cdot e_{\text{Ti}} + \lambda_{\text{Au}} \cdot e_{\text{Au}}) \cdot l_{\text{Polysi}}}{l_{\text{polysi}} + l_{\text{Au}} + l_i} \quad (II.3)$$

Pour la zone absorbante :

$$\lambda_{\text{éq abs}} \cdot e_{\text{tabs}} = \lambda_{\text{SiO}} \cdot e_{\text{SiO}} + \lambda_{\text{SiN}} \cdot e_{\text{SiN}} + \lambda_{\text{poly}} \cdot e_{\text{poly}} + \frac{\lambda_{\text{polySi}} \cdot e_{\text{polySi}} \cdot (l_{\text{polySi}} + l_{\text{Au}}) + (\lambda_{\text{Ti}} \cdot e_{\text{Ti}} + \lambda_{\text{Au}} \cdot e_{\text{Au}}) \cdot l_{\text{Polysi}}}{l_{\text{polysi}} + l_{\text{Au}} + l_i} \quad (II.4)$$

## Bilan thermique

Le bilan thermique observé sur une cellule peut donc être établi (figure 19) mais il convient d'expliciter les différents transferts de chaleur plus clairement avant de transcrire sous forme d'équations.

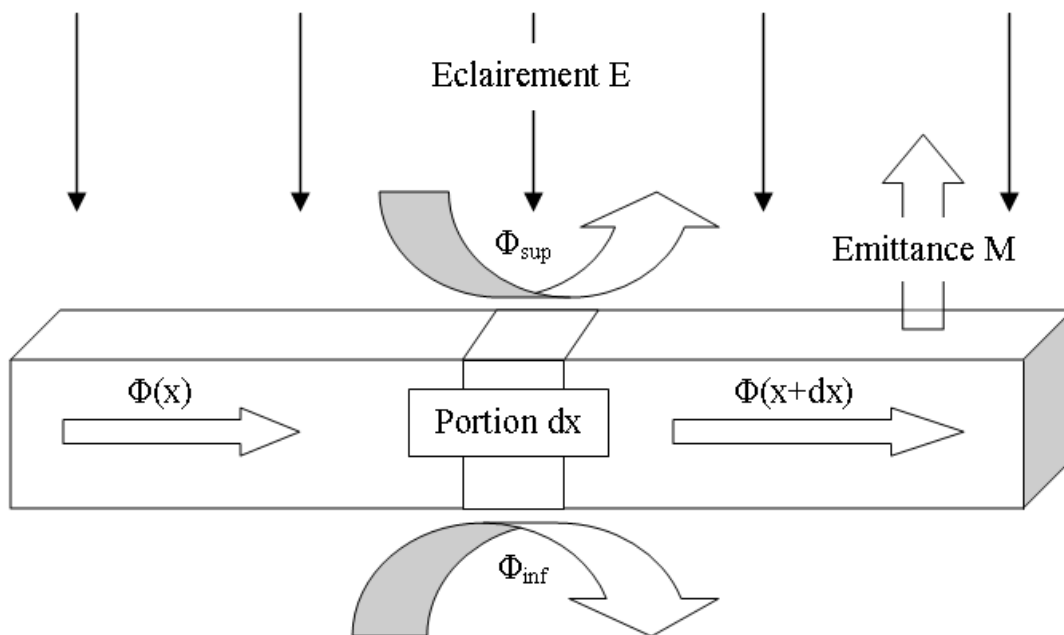


Figure 20 : Schéma équivalent du système sur une portion dx de la ligne de thermocouple

Le système étant réduit à une dimension suivant l'axe  $x$ , le flux de chaleur conductif se propageant dans la couche équivalente peut s'écrire  $\Phi(x)$ .

En notant  $S$  la surface active, la densité de flux ou flux surfacique  $\varphi$  s'écrit :

$$\varphi = \frac{\Phi}{S} \quad (11.5)$$

L'équation de Fourier permet d'exprimer  $\varphi$  en fonction de la variation de température  $T$  :

$$\varphi = -\lambda \text{grad}T \quad (11.6)$$

Dans le cas du système défini précédemment ramené à une dimension ( $x$ ), pour une largeur  $l$  unitaire, il est possible d'écrire :

$$\text{Grad}T = \frac{dT}{dx} \quad (11.7)$$

La surface active est :

$$S = e_t * l \quad (11.8)$$

Le flux conductif peut donc être déduit (avec  $l = 1$  m) :

$$\Phi = -\lambda_{eq} \cdot e_t \cdot \frac{dT}{dx} \quad (11.9)$$

Les flux convectifs  $\Phi_{sup}$  et  $\Phi_{inf}$  caractérisent l'échange thermique entre l'air environnant et les faces supérieure et inférieure du micro-capteur et sont proportionnels à la différence de température entre l'air ( $T_{air}$ ) et la température de la membrane au point considéré  $T(x)$ . En prenant la surface d'échange élémentaire  $l \cdot dx$  avec  $l = 1$  m, ces flux ont pour expression générale :

$$\Phi_{conv} = h \cdot (T(x) - T_{air}) \cdot dx \quad (11.10)$$

$h$  étant le coefficient d'échange.

Pour la face supérieure du capteur à l'air libre, nous prendrons pour le coefficient d'échange  $h_{sup}$  la valeur usuellement retenue de  $35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  [4][5] et la température d'air est la température ambiante notée  $T_{ext}$ .

Dans le cas de la face inférieure, l'épaisseur de la lame d'air  $e_{air}$  sous la membrane est déterminée par l'épaisseur du wafer, soit de  $380 \mu\text{m}$ , la température d'air est



proche de celle du support  $T_{sub}$  et un coefficient d'échange majoritairement basé sur la conduction peut s'écrire :

$$h_{inf} = \frac{\lambda_{air}}{e_{air}} \quad (11.11)$$

avec  $\lambda_{air}$  la conductivité thermique du milieu gazeux ou fluide en contact ( $\lambda_{air}=24.10^{-3}$  W/(m.K)). Dans ce cas,  $h_{inf}$  est proche à 63 W/(m<sup>2</sup>.K).

Les flux convectifs s'exerçant de part et d'autre de la surface élémentaire  $l.dx$  sont donc :

$$\Phi_{convtot} = h_{sup} \cdot (T(x) - T_{ext}) \cdot dx + h_{inf} \cdot (T(x) - T_{sub}) \cdot dx \quad (11.12)$$

Les flux issus des différents rayonnements sont alors :

- l'éclairement E par une source de rayonnement,
- l'émittance M du micro-capteur calculée à partir de la loi de Stefan-Boltzmann :

$$M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{sub}^4 \quad (11.13)$$

Avec :

- $\varepsilon$  l'émissivité du micro-capteur,
- $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann égale à  $5.67 \cdot 10^{-8}$  W.m<sup>2</sup>.K<sup>-4</sup>,
- $T_{sub}$  la température moyenne du micro-capteur.

Nous avons utilisé ici une expression approchée de la température de la membrane en prenant  $T_{sub}$  comme température de référence. En effet, le micro-capteur est très peu épais et non encapsulé sous vide ou sous un gaz isolant thermiquement, ceci implique que les variations spatiales de température le long de la membrane sont faibles comme nous le démontrerons à la fin de ce chapitre. Cette approximation se justifie dans l'équation de l'émittance car la température y est exprimée en Kelvin et apparaît à la puissance quatrième.

En considérant que le capteur est illuminé par la source de rayonnement en influence totale, la densité de flux absorbé, proportionnelle à l'absorptivité a du capteur, s'écrit :

$$E_{abs} = a \cdot E \quad (11.14)$$

Le flux net représentant le bilan en termes de flux de rayonnement sur la surface  $l.dx$  (avec  $l=1m$ ) peut donc s'exprimer :

$$\Phi_{ray} = (E_{abs} - M).dx = (a.E - \varepsilon.\sigma.T_{sub}^4).dx \quad (II.15)$$

L'équation générale du bilan thermique appliqué à cette portion  $l.dx$  et ramené à une dimension est alors :

$$\Phi(x + dx) = \Phi(x) - \Phi_{sup} - \Phi_{inf} + \Phi_{ray} \quad (II.16)$$

Soit :

$$\Phi(x + dx) - \Phi(x) = -h_{sup} \cdot (T(x) - T_{ext}).dx - h_{inf} \cdot (T(x) - T_{sub}).dx + (a.E - \varepsilon.\sigma.T_{sub}^4).dx \quad (II.17)$$

Les équations (II.9) et (II.17) permettent d'écrire l'équation différentielle du système :

$$-\lambda_{\acute{e}q}.e_t \cdot \frac{d^2T}{dx^2} = -h_{sup} \cdot (T(x) - T_{ext}) - h_{inf} \cdot (T(x) - T_{sub}) + (a.P_E - \varepsilon.\sigma.T_{sub}^4) \quad (II.18)$$

soit encore :

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{(h_{sup} + h_{inf})}{\lambda_{\acute{e}q}.e_t} T(x) = -\frac{h_{sup} \cdot T_{ext} + h_{inf} \cdot T_{sub} + (a.E - \varepsilon.\sigma.T_{sub}^4)}{\lambda_{\acute{e}q}.e_t} \quad (II.19)$$

Les solutions de cette équation différentielle du second ordre avec second membre nul sont de la forme :

$$T(x) = A.ch(\gamma x) + B.sh(\gamma x) - \frac{K}{\gamma^2} \quad (II.20)$$

ou

$$T(x) = A'e^{\gamma x} + B'e^{-\gamma x} - \frac{K}{\gamma^2} \quad (II.21)$$

Avec :

- A, B, A' et B' des constantes à définir,

$\gamma^2 = \frac{h_{inf} + h_{sup}}{\lambda_{\acute{e}q}.e_t}$  : la constante de propagation de la chaleur le long de la

membrane,

$$K = -\frac{h_{\text{sup}}.T_{\text{ext}} + h_{\text{inf}}.T_{\text{sub}} + (a.E - \varepsilon.\sigma.T_{\text{sub}}^4)}{\lambda_{\text{eq}}.e_t} : \text{un coefficient caractérisant}$$

les échanges de chaleur entre la membrane et le milieu extérieur.

Ainsi, à partir de l'équation (II.9), le flux circulant dans la portion dx considérée peut être déduit :

$$\Phi(x) = -\lambda_{\text{eq}}.e_t \cdot \frac{dT}{dx} = -\lambda_{\text{eq}}.e_t \cdot \gamma (A \text{sh}(\gamma.x) + B \text{ch}(\gamma.x)) \quad (\text{II.22})$$

Les constantes A et B sont déterminées par les conditions aux limites. En effet, La température du substrat en x=0 est  $T(0) = T_0$  donc  $A = T_0 + \frac{K}{\gamma^2}$ .

Pour déterminer B, c'est la valeur du flux en x=0 qui est utilisée :  $\Phi(0) = \Phi_0$ .

Il en ressort :

$$B = \frac{-\Phi_0}{\gamma \cdot \lambda_{\text{eq}} \cdot e_t}$$

Le système d'équations suivant régit la température et le flux circulant dans le micro-capteur peut alors s'exprimer :

$$\begin{cases} T(x) = \left(T_0 + \frac{K}{\gamma^2}\right) \text{ch}(\gamma.x) - \frac{\Phi_0}{\gamma \cdot \lambda_{\text{eq}} \cdot e_t} \cdot \text{sh}(\gamma.x) - \frac{K}{\gamma^2} \\ \Phi(x) = -\lambda_{\text{eq}} \cdot e_t \cdot \gamma \left(T_0 + \frac{K}{\gamma^2}\right) \text{sh}(\gamma.x) + \Phi_0 \cdot \text{ch}(\gamma.x) \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Cette écriture peut aussi se présenter :

$$\begin{pmatrix} T(x) \\ \Phi(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{ch}(\gamma.x) & -\frac{\text{sh}(\gamma.x)}{\gamma \cdot \lambda_{\text{eq}} \cdot e_t} \\ -\lambda_{\text{eq}} \cdot e_t \cdot \gamma \cdot \text{sh}(\gamma.x) & \text{ch}(\gamma.x) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_0 \\ \Phi_0 \end{pmatrix} + \frac{K}{\gamma^2} \begin{pmatrix} \text{ch}(\gamma.x) - 1 \\ -\lambda_{\text{eq}} \cdot e_t \cdot \gamma \cdot \text{sh}(\gamma.x) \end{pmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Selon le caractère absorbant ou réflecteur de la partie de cellule considérée, les valeurs des coefficients  $\lambda_{\text{eq}}$ ,  $\gamma$  et K seront différentes mais l'expression des matrices reste la même.

On appelle  $M_{abs}$  et  $M'_{abs}$  les matrices correspondant à la partie absorbante telles que :

$$M_{abs} = \begin{pmatrix} ch(\gamma_{abs} \cdot x) & \frac{-sh(\gamma_{abs} \cdot x)}{\gamma_{abs} \cdot \lambda_{\acute{e}qabs} \cdot e_{tabs}} \\ -\lambda_{\acute{e}qabs} \cdot e_{tabs} \cdot \gamma_{abs} \cdot sh(\gamma_{abs} \cdot x) & ch(\gamma_{abs} \cdot x) \end{pmatrix} \quad (11.25)$$

$$M'_{abs} = \frac{K_{abs}}{\gamma_{abs}^2} \begin{pmatrix} ch(\gamma_{abs} \cdot x) - 1 \\ -\lambda_{\acute{e}qabs} \cdot e_{tabs} \cdot \gamma_{abs} \cdot sh(\gamma_{abs} \cdot x) \end{pmatrix}$$

$$\text{avec } K_{abs} = -\frac{h_{sup} \cdot T_{ext} + h_{inf} \cdot T_{sub} + (a \cdot E - \epsilon \cdot \sigma \cdot T_{sub}^4)}{\lambda_{\acute{e}qabs} \cdot e_{tabs}}$$

$$\gamma_{abs}^2 = \frac{h_{inf} + h_{sup}}{\lambda_{\acute{e}qabs} \cdot e_{tabs}}$$

De même, les matrices relatives aux portions de cellules comportant des réflecteurs  $M_{réf}$  et  $M'_{réf}$  peuvent être définies comme suit :

$$M_{réf} = \begin{pmatrix} ch(\gamma_{réf} \cdot x) & \frac{-sh(\gamma_{réf} \cdot x)}{\gamma_{réf} \cdot \lambda_{\acute{e}qréf} \cdot e_{tréf}} \\ -\lambda_{\acute{e}qréf} \cdot e_{tréf} \cdot \gamma_{réf} \cdot sh(\gamma_{réf} \cdot x) & ch(\gamma_{réf} \cdot x) \end{pmatrix} \quad (11.26)$$

$$M'_{réf} = \frac{K_{réf}}{\gamma_{réf}^2} \begin{pmatrix} ch(\gamma_{réf} \cdot x) - 1 \\ -\lambda_{\acute{e}qréf} \cdot e_{tréf} \cdot \gamma_{réf} \cdot sh(\gamma_{réf} \cdot x) \end{pmatrix}$$

$$\text{avec } K_{réf} = -\frac{h_{sup} \cdot T_{ext} + h_{inf} \cdot T_{sub} + (a \cdot E - \epsilon \cdot \sigma \cdot T_{sub}^4)}{\lambda_{\acute{e}qréf} \cdot e_{tréf}}$$

$$\gamma_{réf}^2 = \frac{h_{inf} + h_{sup}}{\lambda_{\acute{e}qréf} \cdot e_{tréf}}$$

Ainsi, pour le système suivant (figure 20), constitué d'une zone d'absorption délimitée par  $0 \leq x \leq x_1$  et d'une zone réfléchrice par  $x_1 \leq x \leq x_2$ , les équations du problème sont représentées par les deux systèmes matriciels :

$$\begin{cases} T(x) = M_{abs} \cdot \begin{pmatrix} T_0 \\ \Phi_0 \end{pmatrix} + M'_{abs}, x \in [0 \quad x_1] \\ \Phi(x) \\ T(x) = M_{réf} \cdot \begin{pmatrix} T_1 \\ \Phi_1 \end{pmatrix} + M'_{réf}, x \in [x_1 \quad x_2] \\ \Phi(x) \end{cases} \quad (11.27)$$

où  $T_1$  et  $\phi_1$  sont les température et flux à l'abscisse  $x=x_1$  et  $T_2$  et  $\phi_2$  en  $x= x_2$ .

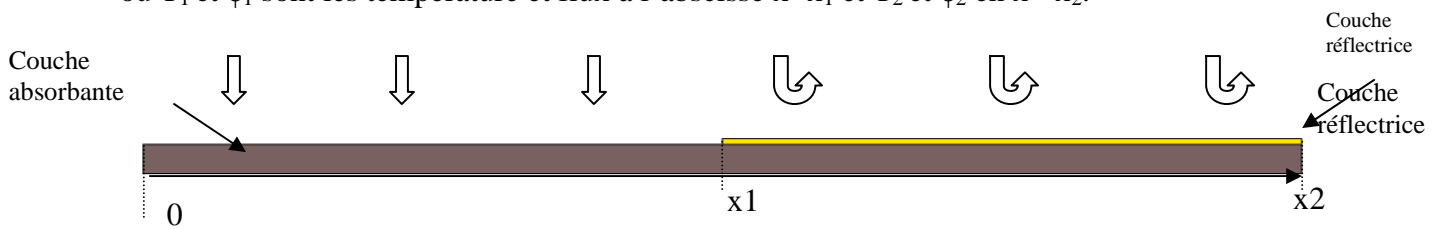


Figure 21 : Profil d'une ligne de thermocouple

Dans le cas d'un système alternant un nombre important de zones absorbantes et réfléchrices, il suffit de répéter le système matriciel précédent pour chaque doublet de zones absorbantes/réfléchrices.

La suite de cette étude va se concentrer sur l'étude des capteurs à deux zones. En effet, les travaux préalables (illustrés figure 21) ont montré une meilleure sensibilité totale pour des capteurs ayant un minimum de zones quelles que soient leurs surfaces [2].

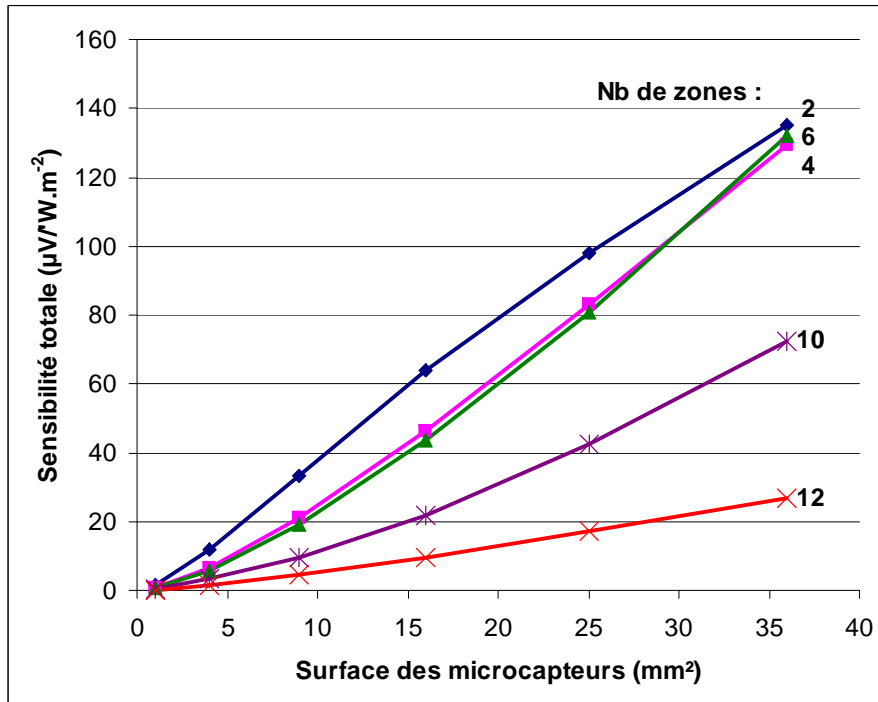


Figure 22 : Sensibilité totale suivant la surface et le nombre de zones d'un microcapteur

## Méthode de calcul

Connaissant le profil de température le long de la membrane, nous allons optimiser la position des jonctions chaudes et froides du thermocouple afin d'obtenir le maximum de différence de température entre les jonctions de manière à mesurer une tension disponible maximale aux bornes du micro-capteur. La f.e.m. pour un thermocouple composant la cellule s'exprime en fonction des pouvoirs thermoélectriques ( $\alpha_1$  et  $\alpha_2$ ) des matériaux et des températures ( $T_1$  et  $T_2$ ) des jonctions, soit :

$$\Delta V = (\alpha_2 - \alpha_1)(T_2 - T_1) \quad (II.28)$$

C'est entre le substrat et le point de température maximale sur la membrane que se trouve la différence de température maximale disponible. Or, si l'on dispose les jonctions thermoélectriques à ces endroits, le capteur est également sensible à d'autres paramètres tels que les variations de température d'air extérieur. En effet, la f.e.m. délivrée est fonction de l'éclairement  $E$ , de la température d'air  $T_{ext}$ , de la température moyenne du capteur, assimilable à celle du substrat  $T_{sub}$  et de la convection représentée par la vitesse d'air  $u$ . Il est possible de représenter ces dépendances par la variation de tension mesurée telle que :

$$dV = \frac{\partial V}{\partial E} .dE + \frac{\partial V}{\partial T_{ext}} .dT_{ext} + \frac{\partial V}{\partial T_{sub}} .dT_{sub} + \frac{\partial V}{\partial u} .du \quad (11.29)$$

Dans notre cas, il est important d'optimiser la réponse à l'éclairement tout en diminuant l'influence de la température extérieure. Ces deux facteurs sont directement dépendants du positionnement des jonctions des thermocouples.

Les caractéristiques suivantes seront définies :

La sensibilité du microcapteur à l'éclairement :

$$S_E = \frac{\partial V}{\partial E} \quad (11.30)$$

Le coefficient de dépendance à la température extérieure :

$$C_{T_{ext}} = \frac{I}{S_E} \frac{\partial V}{\partial T_{ext}} \quad (11.31)$$

Il faudra maximiser la sensibilité à l'éclairement  $S_E$  tout en minimisant le deuxième paramètre  $C_{T_{ext}}$ .

Ainsi, sachant que la tension délivrée est directement proportionnelle à l'écart de température ( $T_{j1}-T_{j2}$ ) entre les jonctions, nous chercherons à déterminer leurs positions correspondant à une variation de ( $T_{j1}-T_{j2}$ ) maximale en fonction de l'éclairement et minimale en fonction d'une variation de température extérieure.

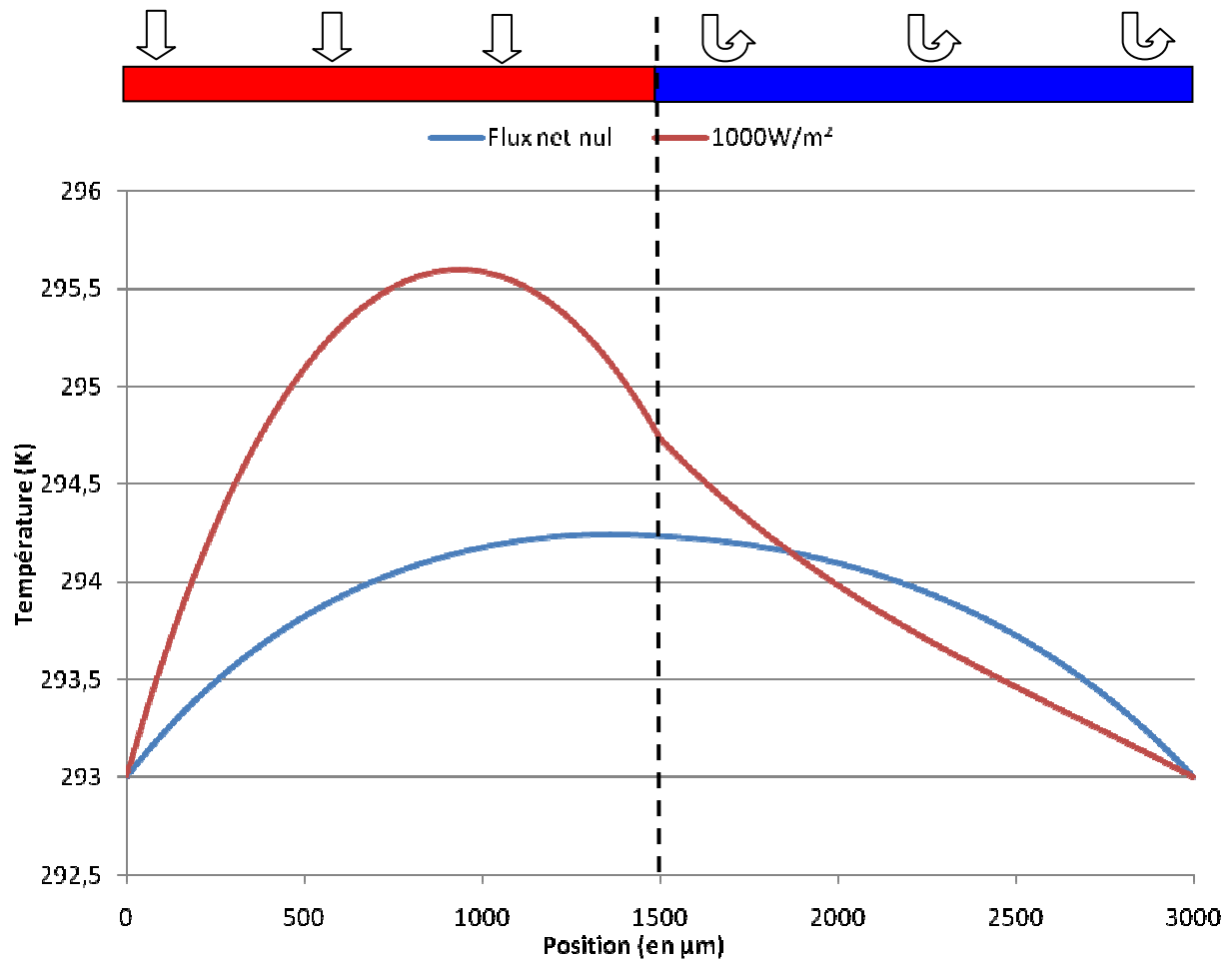
Pour faire cela, 2 profils de température seront calculés :

-En premier lieu, pour un éclairement égal à  $1000\text{W/m}^2$  avec des températures égales pour l'air et le substrat de façon à étudier essentiellement l'effet de l'éclairement,

-En second lieu, avec une température extérieure de  $5^\circ\text{C}$  supérieure à celle du substrat ( $20^\circ\text{C}$ ) et un flux net nul correspondant à un éclairement égal à  $418\text{W/m}^2$ , de manière à annuler les termes de rayonnement dans l'expression de la tension  $V$  et à étudier l'influence seule d'une variation de température d'air.

Les courbes de température le long de la membrane sont représentées figure 22. A l'aide de ces courbes, la position optimale des jonctions sera recherchée à l'aide du logiciel de modélisation, en reprenant les deux critères que nous avons définis :

- une différence de température entre jonctions la plus grande possible (courbe en rouge),
- une dépendance à  $T_{ext}$  la plus faible possible (courbe en bleue).



**Figure 23 : Profil de température le long d'une ligne de thermocouple de 3mm.**  
**En bleu :  $T_{sub}=20^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{air} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $E=418\text{W}/\text{m}^2$ .**  
**En rouge  $T_{air} = T_{sub}= 20^{\circ}\text{C}$  et  $E = 1000\text{W}/\text{m}^2$ .**

Sur la courbe à flux net nul (courbe bleue, fig.23), les couples de points (d'abscisses J1 et J2 sur la membrane) qui ont la même ordonnée à  $0.005^{\circ}\text{C}$  près sont repérés. Dans cette situation, la différence de température, induite entre ces points par une variation de température d'air, est quasi nulle.

Ensuite, parmi tous ces couples (repérés sur la figure 23 par les positions en abscisses J1 et J2), celui pour lequel la différence de température provoquée par un éclairement de  $1000\text{W}/\text{m}^2$  est maximale sera déterminée à l'aide des résultats représentés par la courbe rouge.

Une fois ce couple optimal trouvé, il suffit de faire varier l'éclairement pour trouver la sensibilité. Pour notre procédure de calcul, la variation d'éclairement est choisie égale à



1W/m<sup>2</sup>, c'est-à-dire que la différence de température entre les points J1 et J2 est à nouveau calculée pour un éclairement de 1001 W/m<sup>2</sup> au lieu de 1000 W/m<sup>2</sup>. La sensibilité est extraite à partir de l'accroissement de la différence de température.

Le coefficient de dépendance à la température d'air est calculé en faisant varier la température d'air de 0.1°C.

On remarquera que l'étude rapportée dans ce document va se concentrer sur les résultats obtenus avec une ligne de thermocouple de longueur égale à 3 mm.

La raison de ce choix est double :

- Les performances de la matrice réalisée dans le cadre de ce travail seront comparées aux résultats théoriques présentés lors d'une étude précédente [2],
- la sensibilité évolue linéairement pour des longueurs de ligne comprises entre 1 et 3 mm (voir figure 24). Par conséquent, en centrant l'étude sur la longueur de 3 mm, il est possible d'extrapoler aisément la valeur de sensibilité pour des longueurs plus petites réalisables en salle blanche. Nous avons pu vérifier le bienfondé de cette méthode lors de ce travail de recherche.

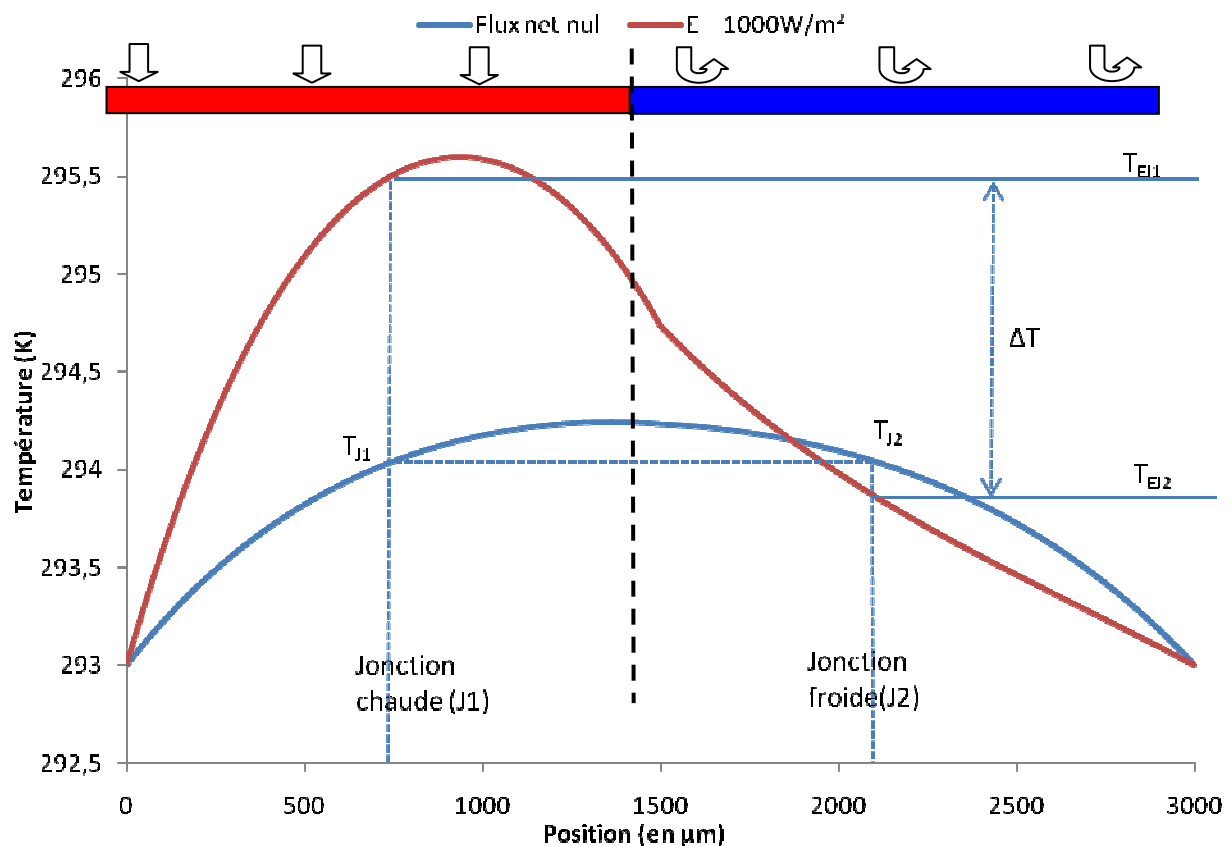


Figure 24 : Méthode de calcul des positions optimales des jonctions J1 et J2

## Simulations numériques

Après la position optimale des jonctions établies suivant la méthode précédente, il peut être intéressant de dimensionner d'autres variables géométriques telles que la longueur de membrane, la largeur des pistes et interpistes ainsi que les épaisseurs.

Ces paramètres interviennent dans l'expression des caractéristiques du micro-capteur telles que la sensibilité mais aussi dans celle du NETD.

Le NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) est la plus petite différence de température décelable par le capteur quand le signal égale le bruit. Il doit être le plus faible possible et est défini par :

$$NETD = \frac{U_B}{S_T} \quad (11.32)$$

avec  $S_T$  la sensibilité du capteur par rapport à la température de la cible.  $S_T$  peut donc s'exprimer de la manière suivante :

$$S_T = \frac{\partial V}{\partial T} = \frac{\partial V}{\partial E} \cdot \frac{\partial E}{\partial T} = S_E \cdot 4 \cdot \sigma \cdot T^3 \quad (11.33)$$

Le bruit généré par la thermopile vaut :

$$U_B = \sqrt{4 \cdot k \cdot T_{sub} \cdot R \cdot \Delta f} \quad (11.34)$$

avec  $k$  : la constante de Boltzmann,

$R$  : la résistance du capteur,

$\Delta f$  : la bande passante.

Le NETD du capteur peut alors s'exprimer :

$$NETD = \frac{\sqrt{4 \cdot k \cdot T_{sub} \cdot R \cdot \Delta f}}{4 \cdot S_E \cdot \sigma \cdot T^3} \quad (11.35)$$

Pour minimiser le NETD, il faut donc :

- soit diminuer la résistance,
- soit augmenter la sensibilité.

La résistance électrique dépend des caractéristiques géométriques des lignes thermoélectriques. Compte tenu du contraste de conductivité entre l'or et le polysilicium, les résistances des parties de pistes rétrécies en polysilicium recouvertes d'or sont négligeables et

la résistance globale tient compte principalement des dimensions des parties de pistes élargies en polysilicium seul. Elle peut être approximée par :

$$R = \frac{\rho_{poly\ si} \cdot L_{poly\ si}}{2 \cdot e_{poly\ si} \cdot l_{poly\ si}} \quad (II.36)$$

avec  $\rho_{poly\ si}$ ,  $e_{poly\ si}$ ,  $L_{poly\ si}$  et  $l_{poly\ si}$  respectivement la résistivité électrique, l'épaisseur, la longueur et la largeur de la piste en polysilicium.

## Résultats

L'évolution de la sensibilité en fonction de la longueur d'une ligne est représentée figure 24.

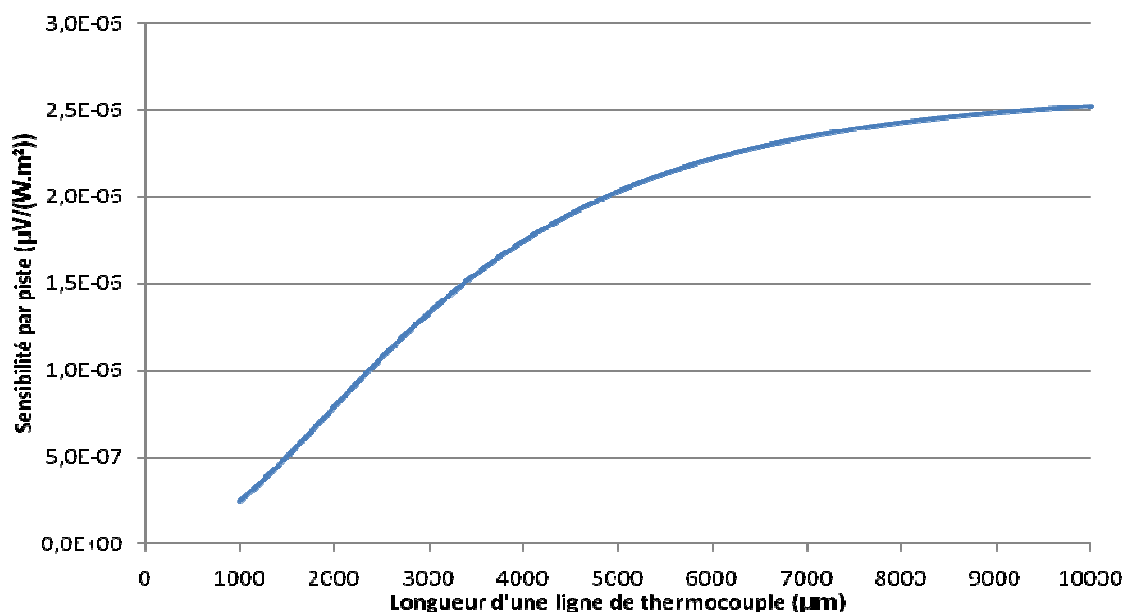


Figure 25 : Sensibilité par piste en fonction de la longueur d'une ligne de thermocouple.

On constate que la sensibilité augmente avec la longueur de la piste de manière plutôt linéaire jusqu'à une limite située vers 6mm puis apparaît une saturation. L'intérêt d'augmenter la longueur des pistes est cependant pondéré par deux inconvénients : l'augmentation de la résistance électrique et l'agrandissement de la taille totale du capteur. Ce dernier point est critique par rapport à l'application de caméra infrarouge car les dimensions de la matrice doivent être inférieures à 2cmx2cm.

Pour toutes ces raisons, nous avons décidé de limiter la taille d'un capteur unitaire à 3mm x 3mm pour avoir une résolution suffisante (au minimum 5x5 capteurs ou pixels) pour la caméra.

Les longueurs des membranes retenues sont donc de 3mm, 2mm et 1mm par capteur. Dans un premier temps, nous ne descendrons pas en dessous de 1mm pour des raisons de réalisation en salle blanche et de résolution de gravure. De même, le rapport d'aspect entre les largeurs et les épaisseurs des pistes et interpistes doit être maintenu pour garantir des transferts de chaleurs correspondant au modèle unidimensionnel établi.

Afin d'avoir des matrices de dimensions totales identiques, les choix retenus en terme de dimensionnement sont :

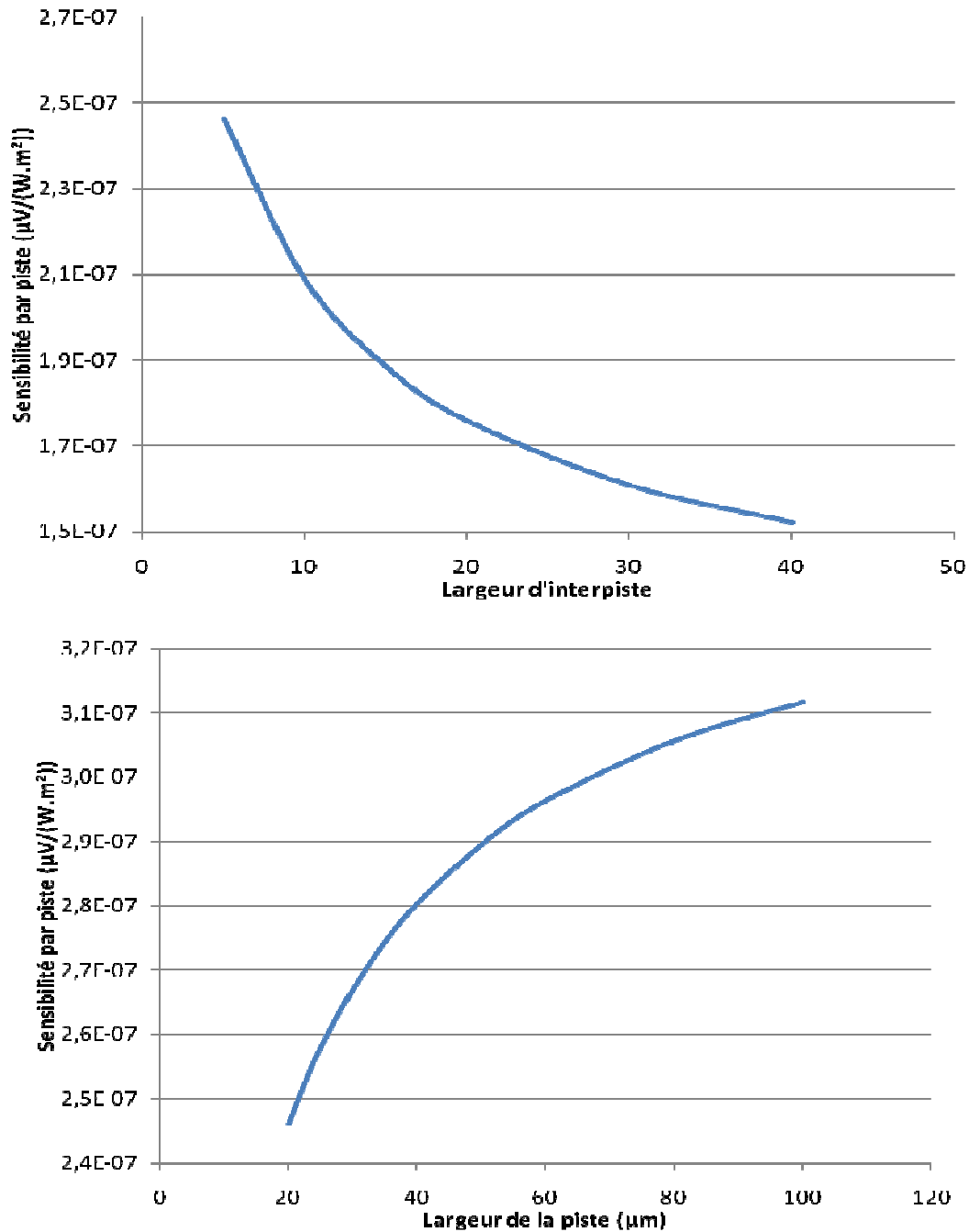
- matrice 5x5 de capteurs 3mmx3mm,
- matrice 7x7 de capteurs 2mmx2mm,
- matrice 10x10 de capteurs 1mmx1mm.

Ces trois matrices sont incluses dans le même carré de 1.85cm de côté permettant la modification rapide des masques pour réaliser le panel de matrices voulues.

Une fois la taille des capteurs choisie, il faut dimensionner les différentes largeurs des éléments du thermocouple :

- la largeur des pistes,
- la largeur des interpistes.

L'influence de ces dimensions sur la sensibilité par piste est représentée figure 25.



**Figure 26 : Variation de sensibilité en fonction des largeurs des lignes de thermocouple**

La sensibilité décroît lorsque la largeur de l'interpiste augmente. Nous allons donc essayer de diminuer au maximum cette largeur en respectant la limite technologique pour éviter tout contact entre les lignes thermoélectriques. Une largeur minimale de  $5\mu\text{m}$  pour l'interpiste a été décidée.

La sensibilité par piste augmente par contre avec la largeur de la piste élargie en polysilicium.

Cependant en calculant la sensibilité globale du microcapteur de dimension carrée, on voit que cette augmentation de la largeur des pistes est pénalisée par un nombre moindre de pistes (figure 26). En effet, le signal de sortie est directement proportionnel au nombre de pistes.

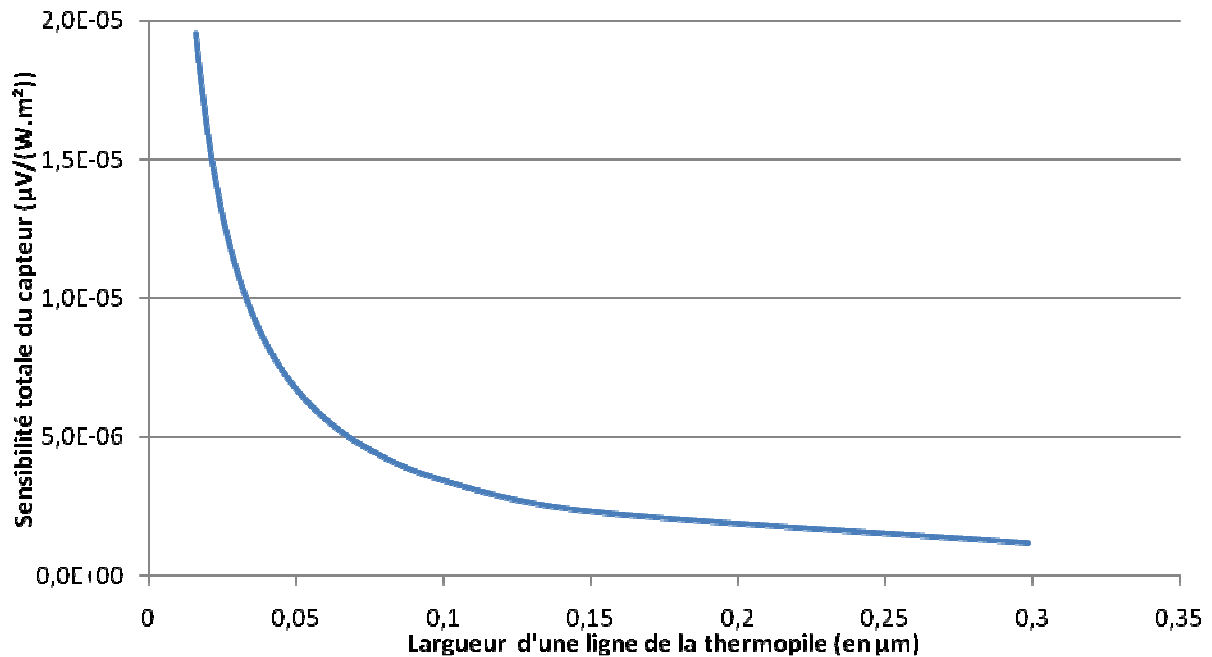


Figure 27 : Variation de la sensibilité totale d'un capteur 3mmx3mm en fonction de la largeur d'une ligne

Pour pouvoir comparer les trois types de capteurs qui seront réalisés, le nombre de lignes actives sera limité à 18 (soit 20 pistes moins les deux pistes extrêmes qui sont en partie sur le substrat).

- Les largeurs retenues sont :

Résolution de la matrice	Dimensions du capteur	Largueur de la piste en polysilicium	Largueur du thermoélément en Or	Largueur de l'interpiste
5x5	3mm x 3mm	135µm	5µm	5µm
7x7	2mm x 2mm	85µm	5µm	5µm
10x10	1mm x 1mm	35µm	5µm	5µm

Tableau 2: Dimensions des matrices

Il est également possible de faire varier l'épaisseur. Etant donné notre mode de calcul, faire varier l'épaisseur de toutes les couches est inutile puisqu'elles n'interviennent que dans les valeurs de  $\lambda_{\text{eq}}$ ,  $e_t$  et R.

Pour voir l'influence de ces changements sur la sensibilité par piste, seules des modifications sur l'épaisseur du polyimide ont été effectuées (figure 27). En effet, le polyimide est la couche de plus grosse épaisseur (>80% du total) et elle possède une conductivité très différente des autres donc une variation de l'épaisseur du polyimide aura un impact important sur le calcul et permettra de dégager une tendance.

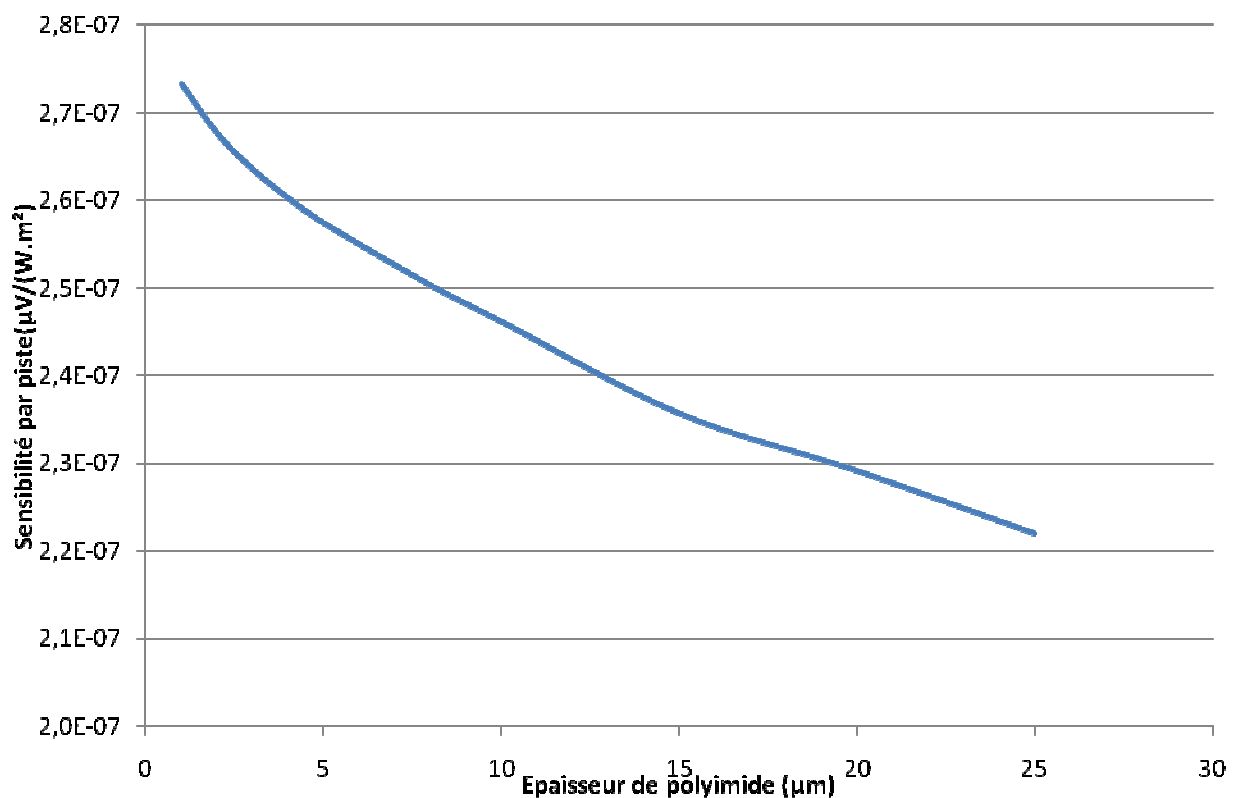


Figure 28 : Sensibilité par piste en fonction de l'épaisseur du polyimide

Pour une variation importante autour de la valeur initiale ( $10\mu\text{m}$ ), la sensibilité ne varie que d'environ 10%.

Les variations de conductivité électrique des matériaux n'ont que peu d'incidence sur la sensibilité du thermocouple. Par contre, l'effet sur la résistance électrique est important. Des études continuent dans le groupe pour processor des matériaux ayant des coefficients Seebeck équivalents mais avec une résistivité électrique plus faible.



## **Bibliographie du Chapitre II**

[1] M. Boutchich, "Microcapteurs de rayonnement infrarouge en technologie silicium", Thèse de doctorat USTL, décembre 2002

[2] M. Haffar « Etude et réalisation de matrices de microcapteurs infrarouges pour imagerie infrarouge basse résolution », thèse de doctorat USTL, décembre 2007

[3] Ronald P. Manginell, David A. Rosato, David A. Benson, Gregory C. Frye-Mason Finite Element Modeling of a Microhotplate for Microfluidic Applications *International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, San Juan, 1999*

[4] Timothy S Sammarco and Mark A Burns Heat-transfer analysis of microfabricated thermocapillary pumping and reaction devices *J. Micromech. Microeng.* **10** (2000) 42–55

# **Chapitre III : Réalisation technologique des matrices de capteurs infrarouges**

## **Introduction**

### **Etapas technologiques**

**Nettoyage de substrat**

**Réalisation de la membrane**

**Gravure des pistes polysilicium**

**Métallisation des pistes et des contacts (Or)**

**Dépôt de la partie absorbante**

**Réalisation de la couche réflectrice**

**Gravure face arrière**

## **Conclusion**

### **Bibliographie du chapitre III**

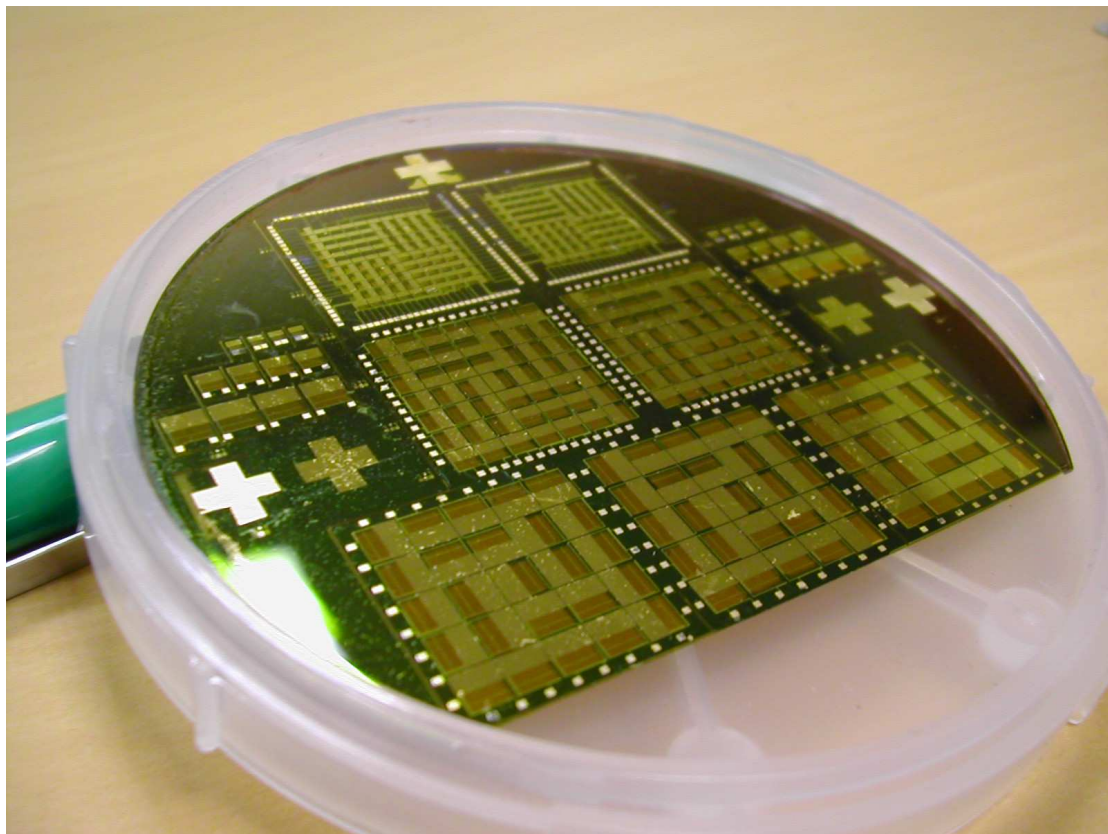
## Introduction

Dans cette partie, nous décrirons la réalisation en salle blanche des trois séries de matrices de microcapteurs qui ont pour résolution 5x5, 7x7 et 10x10 pixels avec des dimensions de capteurs respectivement égales à 3mm x 3mm, 2mm x 2mm et 1mm x 1mm.

Pour chaque étape technologique, les masques des trois séries seront présentés.

Pour la réalisation de ces matrices, nous utilisons un wafer de diamètre trois pouces, d'épaisseur 380µm, d'orientation cristalline <100> et de dopage intrinsèque.

Les masques concernent les couches suivantes : le Polysilicium, les Pistes en Or, le Polyimide, le Réflecteur en Or, la face arrière du substrat. D'autres étapes technologiques seront décrites dans ce chapitre mais comme elles ne comportent aucun motif et sont réalisées sur la plaque entière, aucun masque n'est nécessaire à leur élaboration.



**Figure 29 : Wafer vu de dessus : Résultat final**

## Étapes technologiques

### Nettoyage de substrat

Avant de commencer les opérations, il est nécessaire de s'assurer que le wafer n'est pas pollué par des substances nuisibles à la réalisation du microcapteur.

Pour supprimer ces couches superficielles, le wafer subit un nettoyage utilisant les procédés suivants :

- Immersion dans un mélange « Piranha » (40%  $H_2SO_4$ , 60%  $H_2O_2$ ) pour supprimer toutes les particules organiques qui se sont déposées sur le substrat,
- Immersion dans l'acide fluorhydrique (HF) pour supprimer la couche d'oxyde créée pendant la phase précédente.

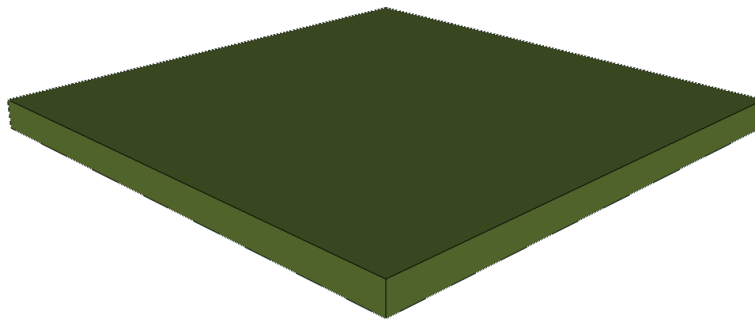
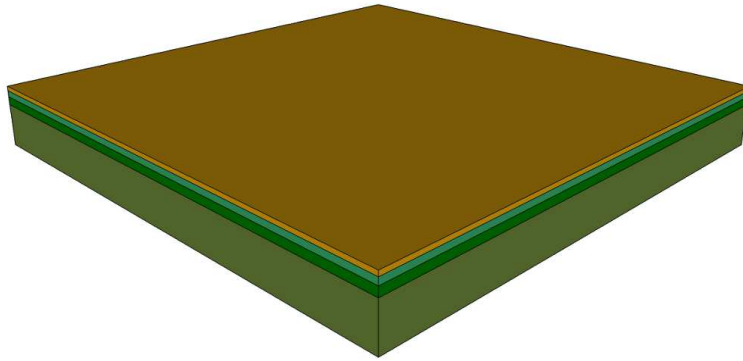


Figure 30 : Schéma du wafer avant dépôt

### Réalisation de la membrane

Pour créer la future membrane, trois passages en four LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) vont être nécessaires :

- Croissance thermique de  $SiO_2$  : 0,8  $\mu m$ ,
- Dépôt de  $Si_xN_y$  peu contraint : 0,6  $\mu m$ ,
- Dépôt de polysilicium dopé N : 0,45  $\mu m$ .



**Figure 31 : Wafer avec couches d'oxydes de silicium et polysilicium**

Parmi ces trois couches, les deux premières vont servir de support mécanique à la membrane car les contraintes en compression et en tension de ces deux couches se compensent [1].

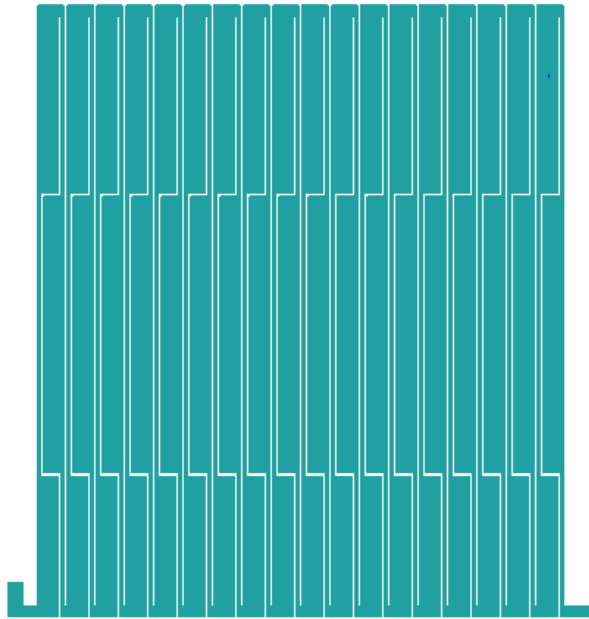
Le polysilicium sera utilisé constituer les pistes de la thermopile et sera gravé dans la phase suivante.

### **Gravure des pistes polysilicium**

La gravure des pistes de polysilicium nécessite une opération préalable : la réalisation du masque.

Pour chaque masque, il est nécessaire dans un premier temps de dessiner le motif voulu avec le logiciel CLEWIN et ensuite de faire réaliser le masque en chrome sur verre.

Le masque utilisé pour cette étape de gravure du polysilicium est représenté figure 31.



**Figure 32 : Masque de gravure du Polysilicium**

Ce masque permettra de fixer les motifs dans la résine préalablement déposée sur le wafer afin de protéger les futures pistes de polysilicium de la gravure ionique.

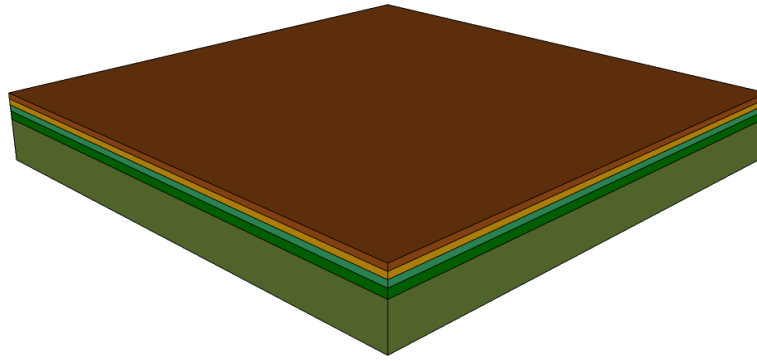
La suite de l'explication concerne toutes les étapes nécessaires à la réalisation des pistes en polysilicium.

Dans un premier temps, la résine positive AZ1518 est uniformément répartie sur le dessus du wafer grâce à une tournette au moyeu dépressurisé pour maintenir le wafer immobile. Les paramètres de cette étape sont définis dans le tableau 3.

Dépôt de résine AZ1518	
Vitesse de rotation	2500 rpm
Accélération	3000 rpm/s
Durée de centrifugation	10 s
Temps de recuit plaque à 110°C	60 s

**Tableau 3 : Paramètres lithographiques du dépôt de résine AZ1518**

Concernant cette enduction, le dépôt de résine est effectué sur la totalité de la surface du wafer (voir figure 32).



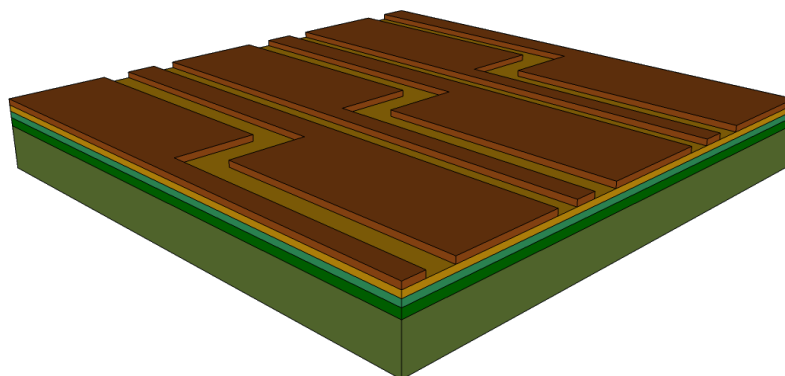
**Figure 33 : Wafer après résinage**

La résine va ensuite être insolée au travers du masque réalisé afin de sensibiliser les espaces interpistes. La révélation permettra ensuite de supprimer la résine aux endroits précédemment soumis à l'éclairement UV. Il y a donc transfert des motifs du masque sur la résine. Les produits et temps d'expositions de ce processus sont résumés dans le tableau 4.

Insolation et révélation résine AZ1518	
Durée d'insolation UV 365nm 11.5mW/cm <sup>2</sup>	1.9s
Temps de révélation MIF 726 pur	50s
Rincage	Eau désionisée
Séchage	Azote
Épaisseur finale	1.5 µm

**Tableau 4 : Paramètres lithographiques pour l'insolation et la révélation de la résine AZ1518**

Ici, seule la résine a été gravée et le wafer possède maintenant une surface de résine reproduisant le motif des pistes au dessus de la couche de polysilicium.



**Figure 34 : Wafer après usinage de la résine**

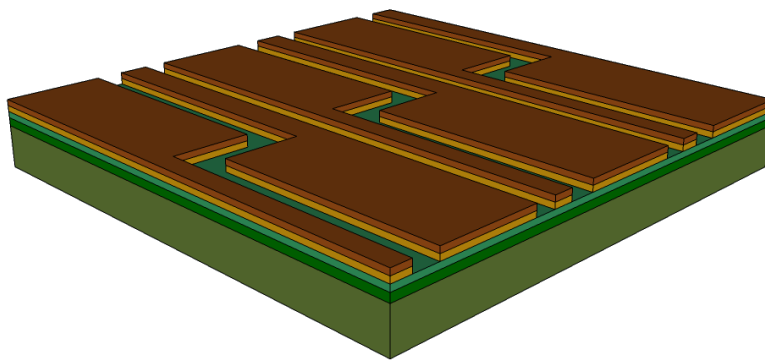
Une gravure ionique réactive de la couche de polysilicium est réalisée à l'aide d'un plasma composé de deux gaz : hexafluorure de soufre SF<sub>6</sub> et tétrafluorure de carbone CF<sub>4</sub>.

Cette étape s'arrête quand le bombardement atteint la couche inférieure [2]. Le tableau 5 résume les informations nécessaires à cette gravure.

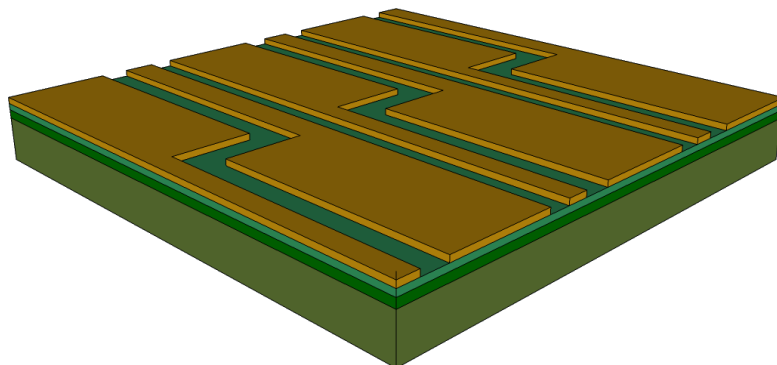
Gravure RIE (Reactive Ion Etching)	
SF <sub>6</sub>	20 sccm
CF <sub>4</sub>	10 sccm
Puissance RF	80 W
Pression	50 mTorr
Tension DC	138 V
Temps de gravure	140 s

**Tableau 5 : Paramètres de la gravure du polysilicium**

Les pistes de polysilicium sont gravées mais sont toujours recouvertes d'une fine couche de résine qui est retirée par nettoyage successif à l'acétone puis à l'alcool. Pour terminer le circuit est séché à l'azote.



**Figure 35 : Wafer après gravure du polysilicium**



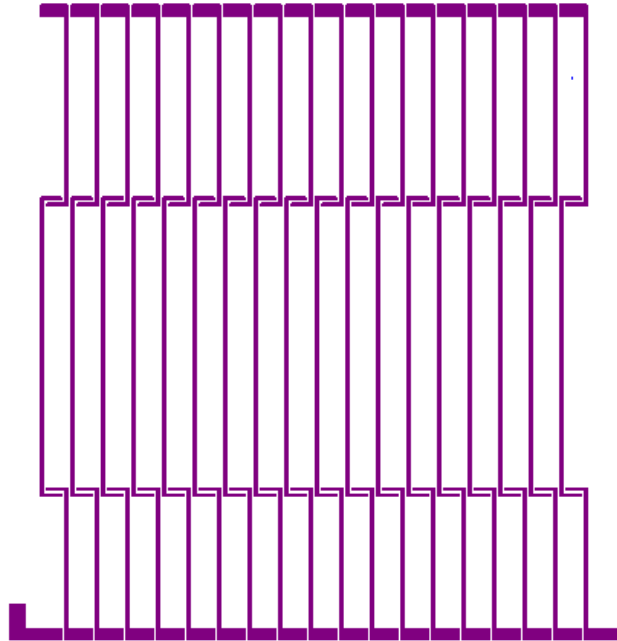
**Figure 36 : Wafer apres élimination de la résine**



## Métallisation des pistes et des contacts (Or)

Cette étape permet d'une part de réaliser les thermocouples plaqués en déposant les thermoéléments en or sur la piste de polysilicium, et d'autre part, de minimiser la résistance électrique de la thermopile.

Le masque utilisé pour cette étape de métallisation par lift-off est le suivant :



**Figure 37 : Masque des Pistes en Or**

Dans un premier temps, cette étape se déroule de la même façon que pour le polysilicium : dépôt de résine, insolation, révélation afin d'avoir sur le wafer de la résine aux endroits désirés. Cependant, le lift-off nécessaire au dépôt d'or impose un profil particulier pour la résine qu'on nomme « profil en casquette ». Les paramètres utilisés pour cette étape sont donnés dans le tableau 6.

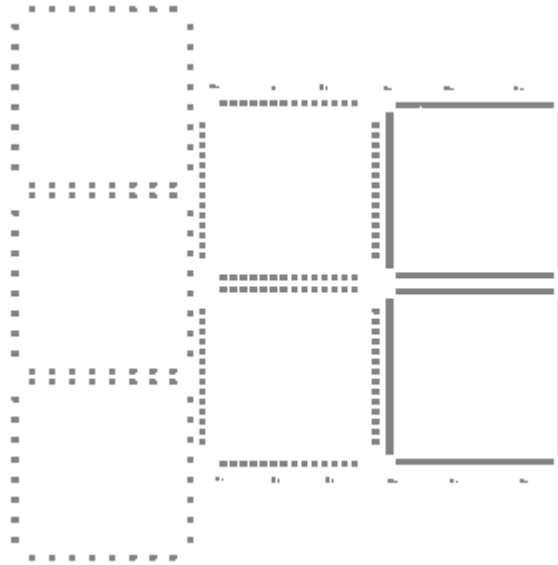
Dépôt résine AZ1518	
Vitesse de rotation	2000 rpm
Accélération	3000 rpm / s
Durée de centrifugation	10s
Recuit	60s à 110°C
Insolation et révélation	
Durcissement surface résine MIF 326	35s
Insolation UV 365nm 11.5W/cm <sup>2</sup>	5.0s
Recuit	60s à 120°C
Révélation AZ400 (dilué 1/3)	50s
Rincage	Eau désionisée
Séchage	Azote
Épaisseur finale de résine	2.5 µm

**Tableau 6 : paramètres lithographiques pour la métallisation des pistes et des contacts**

### **Dépôt de la partie absorbante**

La partie absorbante du capteur est composée de polyimide PI-2731. Ses propriétés (absorptivité de 0,9, épaisseur 10 µm après usinage) sont celles recherchées pour l'application présente et ont été mises en évidence lors de travaux précédemment effectués au laboratoire [3] [4] [5].

Contrairement aux autres couches, ce matériau est photosensible négatif et le masque réalisé est donc l'inverse du dépôt que l'on souhaite obtenir en fin d'étape.



**Figure 38 : Masque de la partie absorbante en Polyimide**

Dans un premier temps, le polyimide se dépose comme une résine, avec une seringue, puis il est dispersé sur le wafer grâce à la tournette. Pour obtenir un dépôt aussi homogène que possible, il est nécessaire de faire un pré-étalement à une vitesse plus faible.

Après le recuit, le masque est utilisé pour dégager les plots de contact nécessaires aux soudures. Une fois la résine insolée, la révélation est effectuée. Tous les détails de l'usinage du PI-2731 utilisé au laboratoire sont rappelés dans le tableau suivant.

Etalement du polyimide PI-2731	
Vitesse de rotation	500 rpm
Accélération	500 rpm/s
Temps de centrifugation	90s
Durcissement après dépôt	
Plaque chauffante	3min à 60°C 3min à 95°C
Four à convection	75min à 55°C
Insolation UV 365nm 11.5 mW/cm <sup>2</sup>	23s
Révélation	
Développeur DE9040	150s
Rinse RI9180	30s
Séchage tournette	30s – 1000 rpm

**Tableau 7 : paramètres de dépôt et de gravure du polyimide PI-2731**

Après l'usinage, il est nécessaire de polymériser le polyimide. Cette étape est réalisée dans un four tubulaire sous atmosphère contrôlée et s'effectue en deux parties :

- un premier recuit à 200°C, avec une pente à 4°C/min sous une atmosphère non contrôlée,
- un second recuit à 350°C sous diazote, avec une pente montante à 2,5°C/min et une durée au palier d'une heure.

Après ce passage en four, le polyimide présente une épaisseur d'environ 10µm.

### **Réalisation de la couche réfléchissante**

Pour cette étape, la technologie utilisée est la même que pour le dépôt de la partie couverte d'or, des pistes à deux exceptions près :

- le masque utilisé (fig.38),
- l'épaisseur des dépôts : 20nm de couche d'accrochage titane et 70nm d'or.



**Figure 39 : Masque pour les éléments réfléchissants**

Les étapes technologiques réalisées durant ce dépôt sont sensiblement les mêmes que celles pour la métallisation des contacts :

- dépôt de résine,
- insolation,
- révélation (profil en casquette),
- dépôt d'or/titane par évaporation sous vide,
- Lift-off.

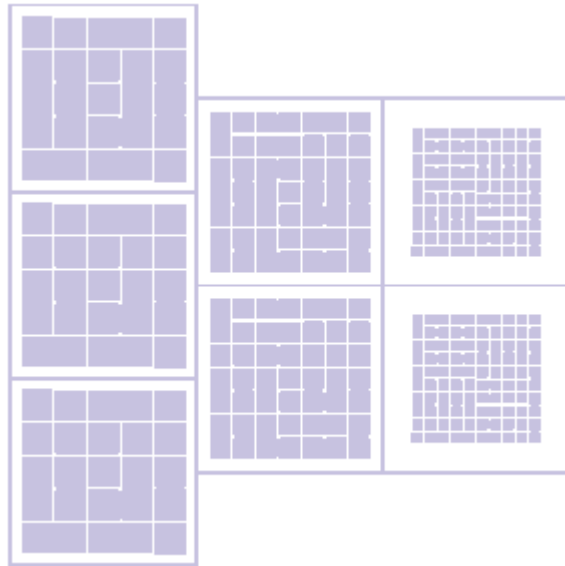
### **Gravure face arrière**

Il est nécessaire de graver le silicium du wafer dans toute son épaisseur pour obtenir une membrane composée des couches suivantes :

- membrane en  $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{SiO}_2$ ,
- pistes en polysilicium éventuellement recouvert d'or,
- couche absorbante (polyimide),
- réflecteur en or.

La gravure s'effectue par la face arrière, la face avant étant protégée durant cette phase à l'aide d'une couche de résine. La gravure doit être parfaitement anisotropique dans la direction de l'épaisseur pour que les bordures de silicium séparant les pixels de la matrice soient les plus larges possibles tout en gardant des membranes totalement dégagées.

La technique utilisée pour cela est une technique de gravure par plasma. Afin de protéger les futurs piliers, une étape de lithographie est nécessaire (utilisant une résine différente que sur la face avant). Elle est réalisée grâce au masque suivant (fig.39) et selon les paramètres donnés dans le tableau 6.



**Figure 40 : Masque pour la gravure de la face arrière**

Dépôt résine AZ4562	
Vitesse de rotation	1500 rpm
Accélération	3000 rpm/s
Durée de centrifugation	40s
Recuit sur plaque chauffante	3min à 110°C
Insolation et révélation	
Insolation UV 365nm 11.5mW/cm <sup>2</sup>	18s
Recuit sur plaque chauffante	3min à 110°C
Révélation AZ351B (dilué 1/3)	50s
Recuit en étuve	70min à 100°C
Rincage	Eau désionisée
Séchage	Azote
Epaisseur déposée	8 μm

**Tableau 8 : Paramètres lithographiques de la gravure face arrière**

Les couches inférieures d'oxyde déposées sur le substrat au début du process sont ensuite gravées par gravure sèche RIE (Reactive Ion Etching). Le plasma utilisé est alors un mélange de tétrafluore de Carbone(CF<sub>4</sub>) et de trifluoro méthane (CHF<sub>3</sub>). Les paramètres de gravure sont rappelés dans le tableau suivant.

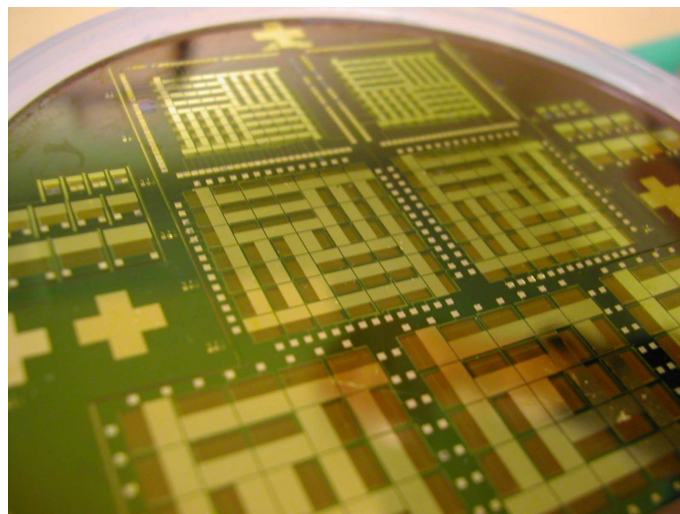
Paramètre de RIE	
CHF3	20 sccm
CF4	20 sccm
Puissance RF	180 W
Pression	50 mTorr
Durée gravure	42min

**Tableau 9 : paramètres de la gravure des couches d'oxydes face arrière**

Il reste maintenant à graver le silicium dans le bâti STS-ICP par procédé BOSCH (voir annexe 2).

Une fois cette dernière étape de gravure terminée, le wafer est terminée et prêt à être utilisé pour la réalisation de la caméra.

## **Conclusion**



**Figure 41 : vue de dessus des trois types de matrices réalisées**

Une série de wafers a donc été réalisée avec :

- 3 matrices de 5x5 pixels de 3mm x 3mm,
- 2 matrices de 7x7 pixels de 2mm x 2mm,
- 2 matrices de 10x10 pixels de 1mm x 1mm.

Une série de mesures sera menée afin de vérifier la validité du modèle défini dans le chapitre II puis la caméra sera réalisée compte tenu d'un dispositif pratique adapté.

### **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] M. Boutchich, "Microcapteurs de rayonnement infrarouge en technologie silicium", Thèse de doctorat USTL, décembre 2002

[4] 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

[5] 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



# **Chapitre IV : Caractérisation des matrices et réalisation du système de vision infrarouge**

## **Introduction**

## **Banc de mesure**

## **Imageur : principe de fonctionnement**

## **Objectif à lentille de Fresnel**

## **Principe de fonctionnement des logiciels et résultats obtenus**

### **1 – Programme implanté dans le microcontrôleur**

### **2 – Programme implanté dans le PC**

## **Introduction**

Dans ce chapitre, nous décrivons les méthodes utilisées pour estimer le potentiel du capteur matriciel, les résultats obtenus et la concordance de ceux-ci avec les simulations effectuées dans la partie II. Ensuite, nous présenterons l'imageur complet qui met en œuvre un microcontrôleur interfacé sur un PC à l'aide d'une liaison RS232.

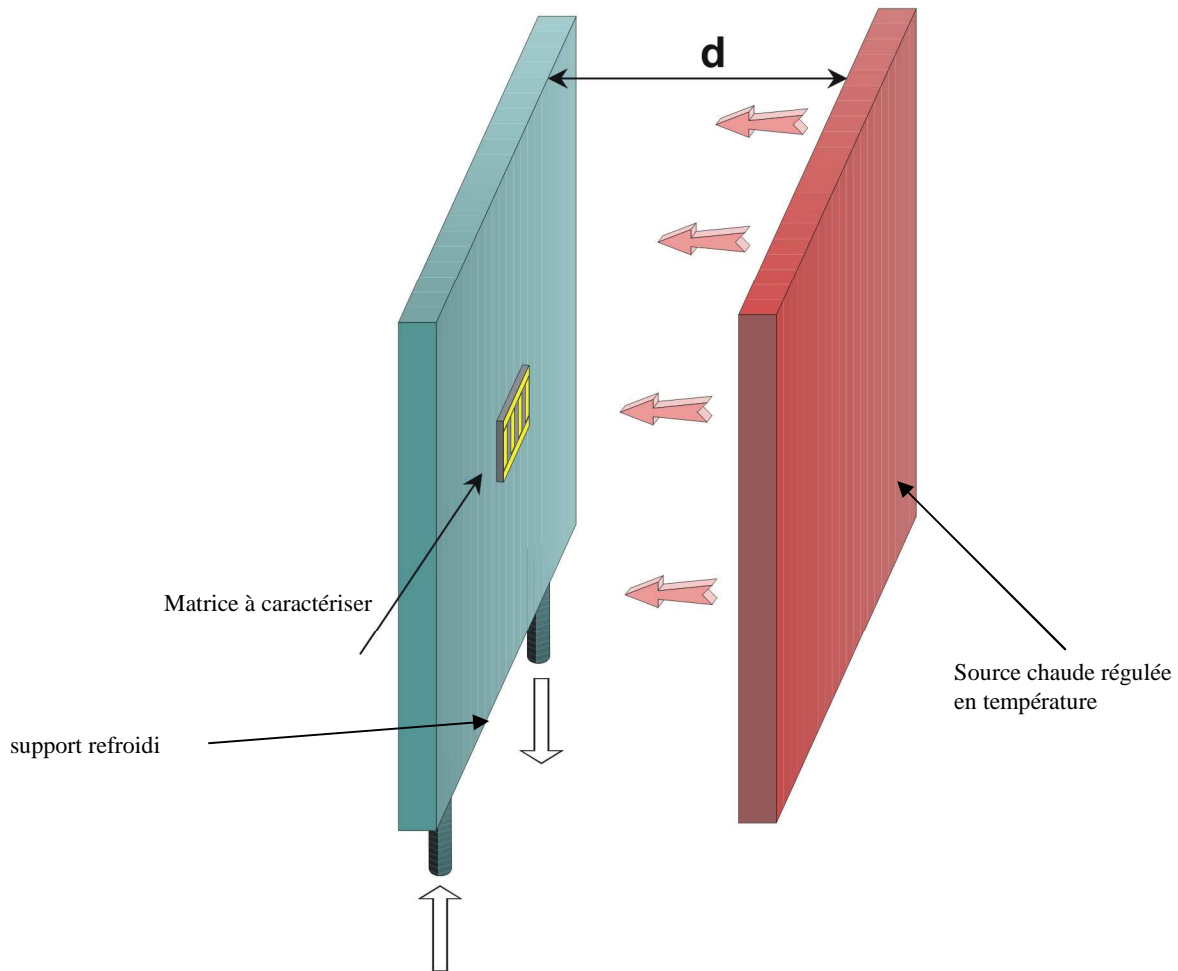
Pour pouvoir mesurer la sensibilité  $S_E$  d'un pixel de la matrice, il suffit d'utiliser la relation II.30 reliant la tension (V) délivrée par le capteur et l'éclairement (E)

Soit, pour rappel :

$$S_E = \frac{\partial V}{\partial E} \quad (\text{IV.1})$$

Pour cela il faut faire varier E tout en mesurant la tension V. Nous avons utilisé un banc de mesure destiné à la mesure de la sensibilité des capteurs de rayonnement. Leur immunité à la température d'air qui a été étudiée et démontrée lors de précédents travaux de recherche réalisés dans l'équipe [1].

## Banc de mesure



**Figure 42 : Banc de caractérisation des microcapteurs**

Ce schéma de principe montre les deux éléments principaux qui constituent le dispositif permettant de caractériser les matrices de capteurs.

Ces deux éléments sont :

- Une source chaude recouverte de peinture noire qui permet d'avoir une émissivité assez proche de 1 (0.95). Cette source de 20cm x 20cm est régulée en température et peut varier de 20°C à 100°C.
- Un support de même surface que la source chaude équipé d'un circuit de refroidissement permettant de limiter la montée en température du capteur et ainsi d'avoir une différence de température cible-support sensiblement constante pour chaque point de mesure. L'émissivité du support est assez proche de 0 (0.05).

Ces deux températures sont mesurées à l'aide de thermocouples type K, et la précision de mesure est de  $\pm 0,5$  °C .

Connaissant les émissivités de la source et de la cible, la valeur de l'éclairement énergétique illuminant les capteurs est déduite des mesures de température à l'aide de la relation suivante :

$$E = F_{CP} \cdot \sigma \cdot (\varepsilon_C T_C^4 + \varepsilon_P T_P^4) \quad (IV.2)$$

Avec  $F_{CP}$  : facteur de forme microcapteur cible (annexe 3)

$\sigma$  : constante de Stefan-Boltzmann

$T_C, T_P, \varepsilon_C, \varepsilon_P$  : les températures en K et les émissivités de la cible et du support capteur

Dans le cadre de cette expérience, la source est maintenue à 3,5cm du support. Dans ces conditions, le facteur de forme  $F_{CP} = 0,91$ . Pour chaque point de mesure, la température de la source  $T_C$  est fixée puis on mesure la tension  $V$  aux bornes du pixel ainsi que la température du support  $T_P$ .

La valeur de  $E$  est ensuite calculée de la façon définie par l'équation précédente ce qui permet de tracer la courbe de réponse de chaque pixel soit :  $V = f(E)$ . Si cette courbe est linéaire comme prévu théoriquement, la valeur de la sensibilité  $S_E$  peut être déduite de la pente de la droite résultante.

## **Résultats de mesure**

Les capteurs caractérisés dans cette partie sont tout d'abord les pixels d'une matrice 5x5 pixels de 3x3 mm<sup>2</sup> de surface collée sur un circuit imprimé permettant de connecter les plots de sortie de la matrice à un connecteur 26 points à l'aide de fils de cuivre de 100µm soudés à l'étain. La plaque de circuit imprimé en verre époxy de 1,6 mm d'épaisseur est collée sur le support métallique du banc de mesure refroidi par une circulation d'eau.

Certains capteurs présentent une résistance exagérément grande et ne sont pas inclus dans les résultats présentés car cette valeur de résistance est la preuve d'une coupure dans les pistes de thermocouples ou d'un problème au niveau de la soudure.

Pour chaque pixel, la température de la cible est ajustée successivement de 20°C à 100°C par paliers de 5°C. Pour chaque palier, la température du support et la tension délivrée

par le capteur sont relevées, afin de permettre de calculer l'éclairement E et de tracer la réponse suivante :

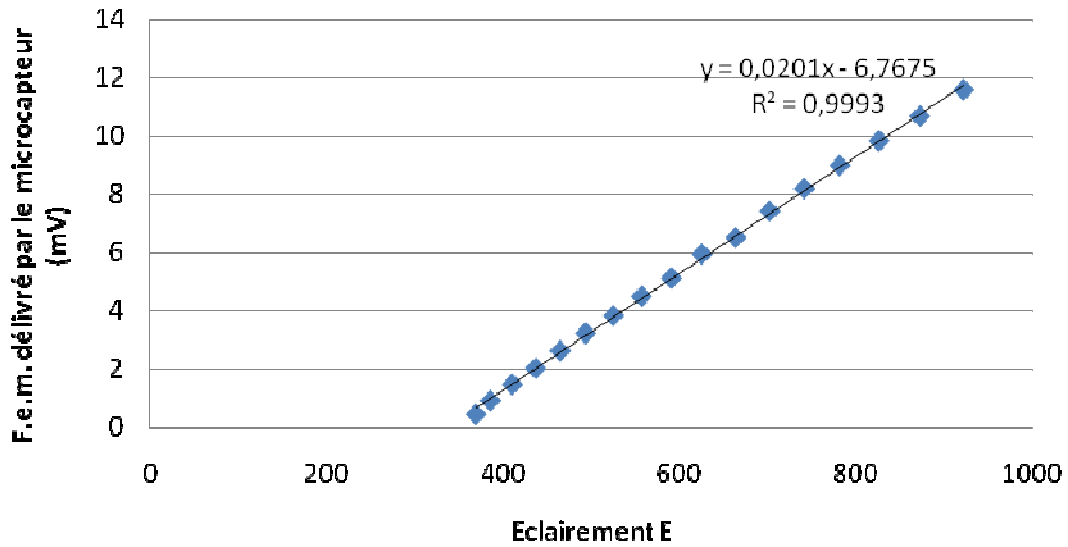


Figure 43 : Réponse d'un pixel 3x3 mm<sup>2</sup> d'une matrice 5x5 pixels

On observe que la courbe obtenue est bien une droite et confirme ainsi l'hypothèse de linéarité entre V et E. La pente de cette courbe correspond à la sensibilité, soit :

$$S_E = 20.1 \mu\text{V}/(\text{W.m}^2).$$

La valeur théorique de la sensibilité d'un capteur pour un capteur 3x3 mm<sup>2</sup> est de 20.6μV/(W.m<sup>2</sup>). La différence obtenue est fonction de plusieurs paramètres un peu aléatoires :

- La précision de l'épaisseur des dépôts des différentes couches et leur état de surface. Malgré le soin apporté à cette étape, on ne peut garantir à 100% une surface lisse. Cela a une influence sur l'épaisseur réelle et donc sur la résistance électrique ou thermique.
- La précision de gravure qui joue sur les dimensions des pistes et des plaquages.
- L'imprécision des valeurs théoriques des différentes conductivités thermiques et électrique, ainsi que des coefficients de Seebeck.

Cette même expérience a été réalisée pour la plupart des autres pixels de la matrice ainsi que sur les pixels de dimensions 2mm x 2mm d'une matrice 7x7. Les résultats obtenus sont répertoriés dans le tableau suivant :

Capteurs de la matrice 5x5	
Nombre de pixels	20
Sensibilité moyenne ( $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ )	18.9 (Théorique 20.1)
Ecart Type ( $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ )	0.72
Sensibilité maximum mesurée ( $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ )	20.1
Sensibilité minimum mesurée ( $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ )	17.4
Capteurs de la matrice 7x7	
Nombre de pixels	49
Sensibilité moyenne ( $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ )	11.4 (Théorique 11.6)
Ecart Type ( $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ )	1.27
Sensibilité maximum mesurée ( $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ )	13.06
Sensibilité minimum mesurée ( $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ )	7.3

**Tableau 10: Résumé des performances des capteurs d'une matrice 5x5 et d'une matrice 7x7**

Les capteurs sont donc conformes aux modélisations effectuées, confirmant les hypothèses choisies pour les calculs théoriques. La dispersion des sensibilités sur une même matrice est tout à fait acceptable.

Un imageur utilisant la matrice 7x7 pixels caractérisée précédemment a été réalisé et sa description fait l'objet du paragraphe suivant.

### **Imageur : Principe de fonctionnement**

L'objectif que nous nous sommes fixé est de réaliser un module imageur pouvant être connecté sur un PC à l'aide d'une liaison RS232 ou USB, un programme implanté sur le PC permettant de visualiser l'image IR. La structure du dispositif complet est donnée dans la figure ci-dessous suivie de la méthodologie d'élaboration de l'imageur.

Compte tenu du nombre important de pixels (49), il est nécessaire de multiplexer les 49 tensions délivrées par les pixels avant de les amplifier, les numériser et les transmettre via l'interface développée à cet effet.

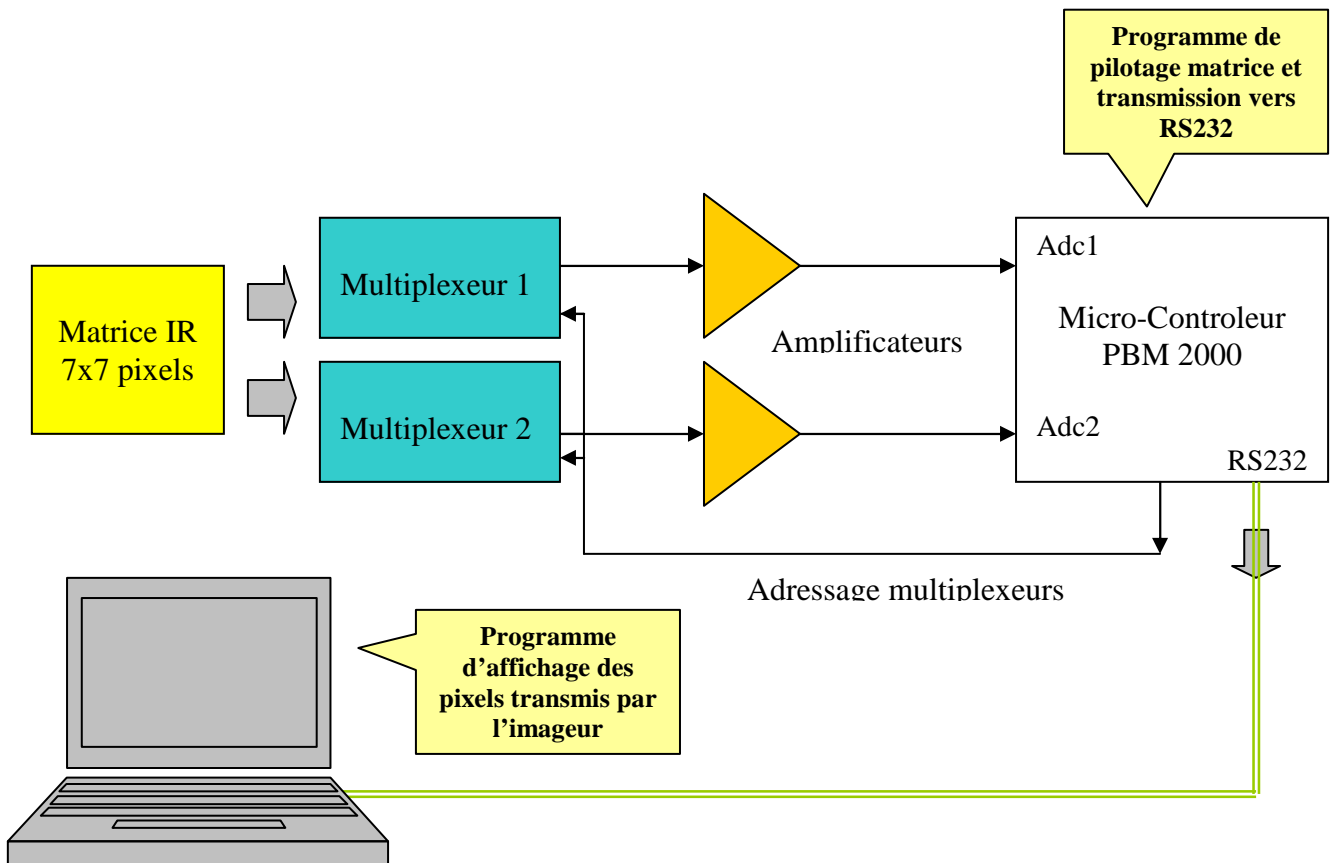


Figure 44 : Représentation modulaire de l'imager infrarouge

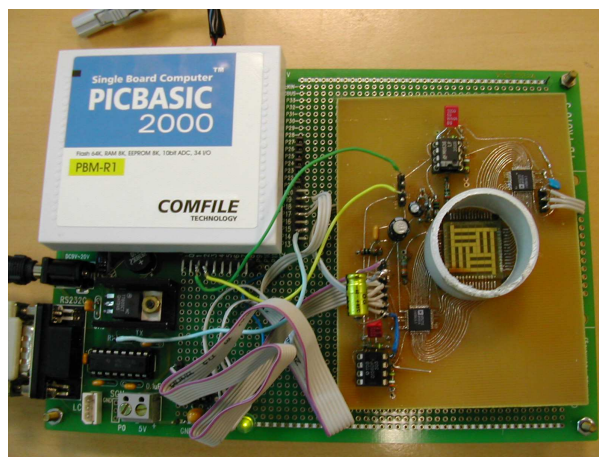


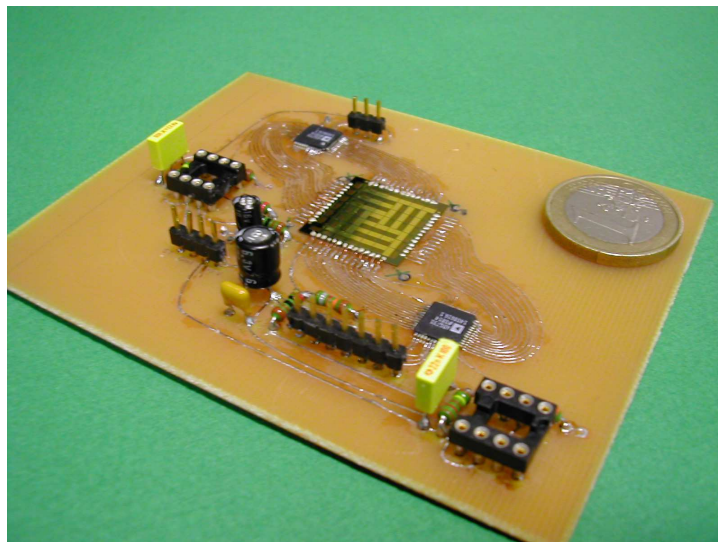
Figure 45 : Prototype fonctionnel de caméra infrarouge 7x7 pixels sans lentille de Fresnel

Ne disposant pas de multiplexeur comportant au moins 49 voies, nous avons décidé d'utiliser deux multiplexeurs 32 voies, à adressage série, dont les sorties sont reliées sur deux amplificateurs opérationnels montés en gain de 500. Les sorties de ces amplificateurs sont connectées sur les entrées des convertisseurs analogiques-numériques d'un micro-contrôleur PicBasic2000.

Pour ce micro-contrôleur, nous avons développé un programme, décrit en annexe, permettant de générer les adresses de pilotage des multiplexeurs, et de transmettre sur la liaison RS232 les valeurs numériques représentatives de la tension délivrée par chaque pixel.

Compte-tenu du temps de réponse des amplificateurs, du filtrage nécessaire pour réduire le bruit, et de la vitesse limitée de la liaison série (4800 bauds), le temps de rafraichissement d'une image est d'environ une seconde. Ce temps pourrait facilement être réduit en utilisant plusieurs multiplexeurs (4, 6, 8) associés au même nombre d'amplificateurs et d'entrées de conversion A/N (le micro-contrôleur utilisé en possède 16).

Un circuit imprimé CMS réalisé par nos soins est représenté figure 45. Il est constitué de la matrice 7x7, des deux multiplexeurs et des amplificateurs. Ce petit circuit est ensuite intégré à une carte de prototypage dédiée au micro-contrôleur PicBasic 2000.



**Figure 46 : Photo de la platine équipée de la matrice et des fonctions de multiplexage-amplification**



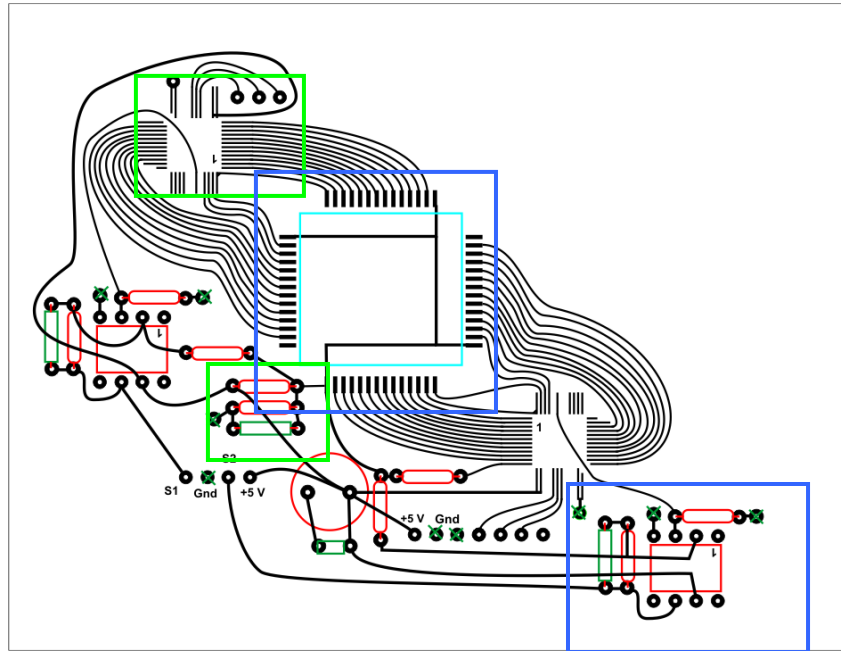


Figure 47 : Routage du circuit imprimé

Le circuit imprimé est représenté figure 46, des zones rectangulaires de sélection ont été ajoutées afin de localiser et expliciter la fonction correspondante.

On distingue :

- Le capteur,
- Le multiplexage,
- L'amplification,
- La masse flottante.

### Le capteur

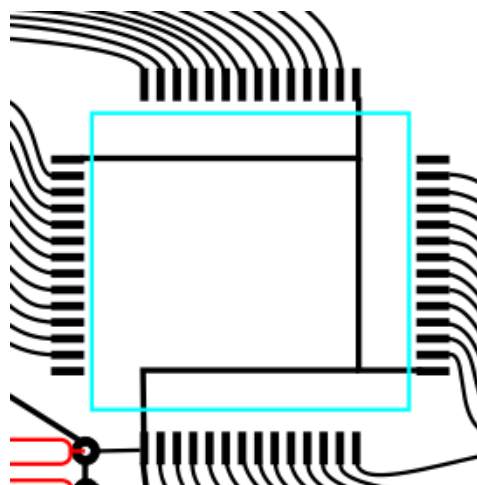
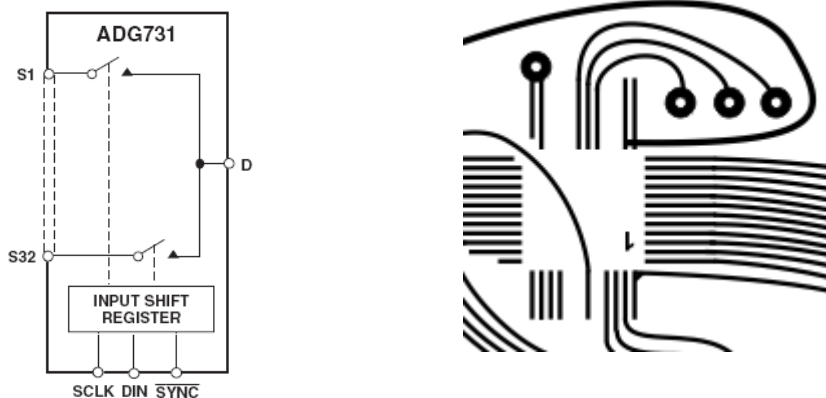


Figure 48 : Capteur 7x7 pixels

Bien que le capteur ait été déjà décrit dans les chapitres précédents mais dans cette partie il nous semble important de mettre en avant les précautions à prendre pour l'intégration « manuelle » sur une platine CMS. La matrice n'étant pas encapsulée, les membranes sont apparentes et peuvent être détruites à la moindre maladresse. C'est pourquoi nous avons tout d'abord soudé de petites longueurs de fil de 50  $\mu\text{m}$  de diamètre sur les 56 plots de contact du circuit imprimé, puis nous avons collé la matrice, et enfin connecté ces 56 fils sur la matrice à l'aide de résine à l'argent. L'objectif rudimentaire couvrant le capteur, et utilisant une lentille de Fresnel, sera décrit par la suite.

### Le multiplexage



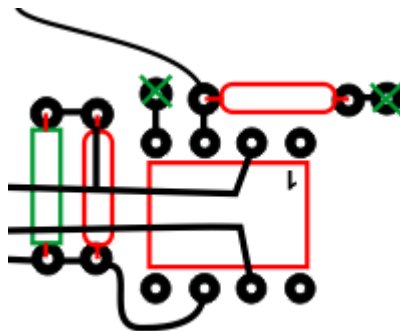
**Figure 49 : Multiplexage des signaux pixels**

Les multiplexeurs utilisés dans ce montage sont référencés AD731 chez Analog Devices en boîtier CMS TQFP (datasheet en annexe 5). Ils sont pilotés par le micro-contrôleur via une interface série 3 fils : synchronisation, horloge et données qui indiquent le numéro de la voie à activer. Ils sont alimentés en 0 - +5 volts et ne peuvent donc commuter que des tensions positives. La résistance « ON » d'une voie est de 4 ohms, ce qui est négligeable en regard de la résistance interne des pixels ( $R > 100 \text{ kohms}$ ). Les courants de fuite sont extrêmement faibles : 0.01 nA typique, ce qui ramené à la résistance interne d'un pixel, induit une tension résiduelle d'environ  $1\mu\text{V}$ , négligeable vis-à-vis des tensions de plusieurs dizaines de microvolts générées par le rayonnement IR.

Une entrée inutilisée d'un multiplexeur est connectée une résistance de même valeur que la résistance interne des pixels, et une seconde entrée est directement connectée à la masse. Les mesures effectuées par ces entrées pourront être exploitées de différentes façons par les programmes de pilotage de l'imageur, afin de soustraire d'éventuels offsets issus d'une dérive en température de la chaîne de mesure.

### **L'amplification**

L'amplification est réalisée à partir d'amplificateurs opérationnels « grand public » de type LF356 à entrées JFET présentant un très faible courant de fuite (10 pA typique). Ils sont montés en non inverseur afin de bénéficier de la grande résistance interne de l'entrée e+. Le gain est fixé à 500, compte-tenu de la tension maximale pouvant être délivrée par un pixel et de la gamme de tension admissible par les entrées du convertisseur A/D 10 bits du micro-contrôleur. Ramenée à l'entrée de l'amplificateur la résolution de cette chaîne de mesure est de 10 $\mu$ V ce qui correspond à un éclairage de 0,88 W/m<sup>2</sup> compte tenu de la sensibilité d'un pixel qui est de 11.4  $\mu$ V/(W.m<sup>2</sup>) sans optique.



**Figure 50 :Implantation d'un amplificateur**

Afin de diminuer un peu le niveau de bruit, la bande passante des amplificateurs est limitée à 10 ms en disposant une capacité en parallèle sur la résistance de contre-réaction.

### **La masse flottante**

Si la température d'une partie de la scène est inférieure à la température de la matrice, le signal délivré par les pixels concernés reste négatif. Les multiplexeurs et les entrées du micro-contrôleur ne pouvant traiter de tels signaux, il est nécessaire de porter le potentiel de référence de la matrice à une valeur positive constante. Un pont diviseur constituant une masse flottante permet de fixer ce potentiel à 20 mV ce qui autorise la mesure de flux nets négatifs jusqu'à -1000 W/m<sup>2</sup>. Cette masse flottante est reliée à une entrée inutilisée d'un multiplexeur afin de pouvoir mesurer son potentiel et le soustraire aux tensions mesurées sur chaque pixel, si nécessaire.

## Objectif à lentille de Fresnel

Dans le but de permettre la formation d'une image sur la matrice et augmenter la sensibilité de l'imageur un objectif rudimentaire mettant en œuvre une lentille de Fresnel a été réalisé. Afin de respecter le cahier des charges « bas coût » fixé au départ de cette Thèse, cette lentille a été choisie en polyéthylène, matériau laissant passer environ 60 % de l'IR dans les gammes de longueur d'onde correspondant à la détection de présence humaine.

Cette lentille a été mise au point par Augustin Fresnel lors d'un projet de rénovation des phares bretons [2]. Le principe de la lentille est l'inverse de celui déjà utilisé à cette époque par la chimie dans les « verres ardents ».

Le principe de fonctionnement est simple : Si on divise une lentille classique en anneaux concentriques (schéma de droite ci-dessous) et que l'on supprime pour chaque anneau la partie inutile, on obtient une lentille à l'encombrement moindre réalisant le parallélisme des rayons émergents comme une lentille plane classique.

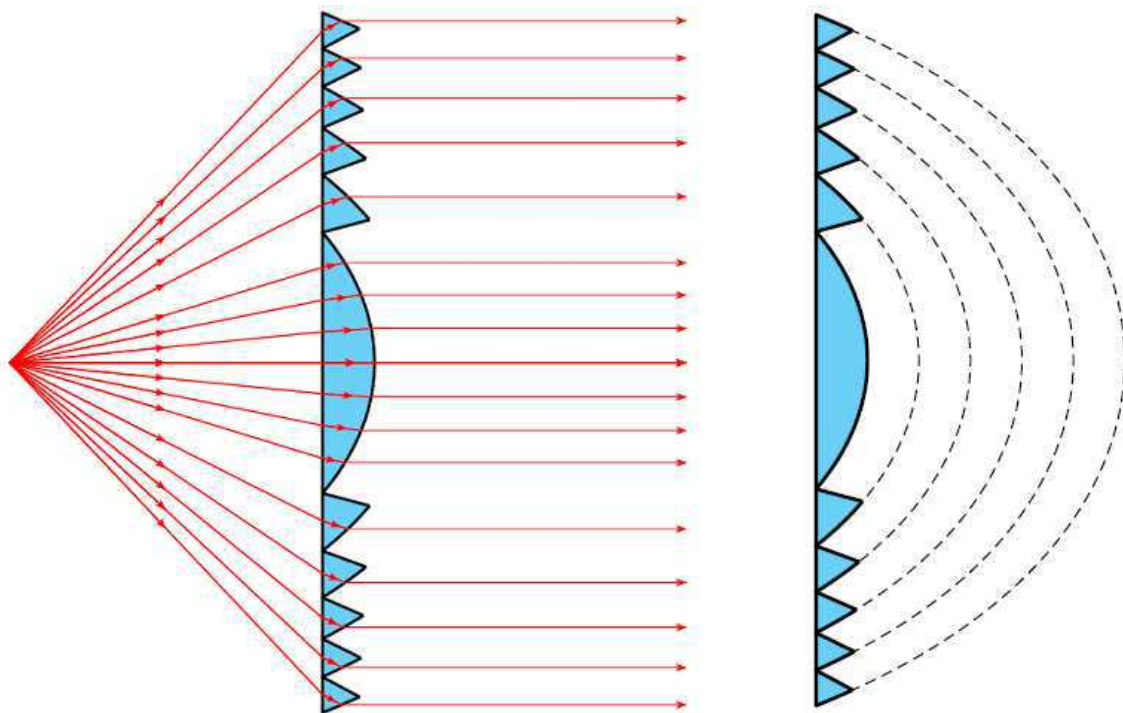
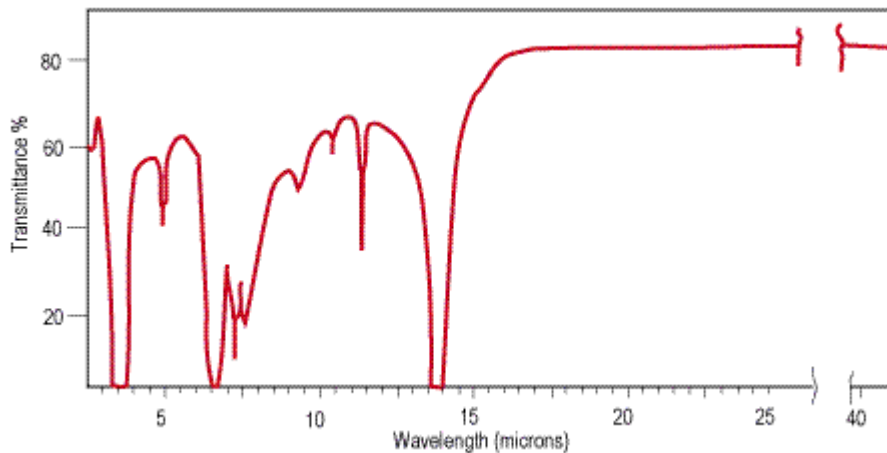


Figure 51 : Schéma de principe de la lentille de Fresnel

Dans l'infrarouge, l'utilisation d'une lentille de Fresnel permet la diminution de l'encombrement et du poids total de la caméra, paramètre important en microtechnologie.

Dans l'infrarouge (surtout dans les bandes MWIR (3-5 $\mu\text{m}$ ) et LWIR (8-14 $\mu\text{m}$ )), l'utilisation du verre est impossible car celui-ci est opaque au rayonnement. Il fallait donc trouver un matériau présentant une transparence dans ces bandes spectrales.

Le polyéthylène possède une transparence de l'ordre de 60% (voir fig. 51) dans ces domaines.



**Figure 52 : Transparence du polyéthylène dans l'infrarouge**

Le polyéthylène est un élément à chaîne carbonée (de type  $(\text{CH}_2\text{-CH}_2)_n$ ) possédant dans la bande spectrale qui nous intéresse (LWIR, cf introduction générale) un indice de réfraction de 1.53, et une permittivité relative de 2.25.

Le polyéthylène est aussi peu onéreux par rapport aux optiques habituelles des caméras infrarouges en germanium. L'optique « bas coût » choisie dans cette recherche nous amène donc à utiliser la lentille de la société Edmund Optics [3].



**Figure 53 : Lentille de Fresnel**

Trois objectifs ont été testés, ils sont respectivement équipés de lentilles de diamètres  $D= 33 \text{ mm}$ ,  $50 \text{ mm}$  et  $63 \text{ mm}$ , de distances focales  $f= 20 \text{ mm}$ ,  $30 \text{ mm}$  et  $55 \text{ mm}$ . Ils ne sont pas équipés de diaphragmes (Figures 54 et 55). L'éclairement reçu par chaque élément de surface  $ds'$  du capteur est fonction de l'angle d'incidence ( $i$ ) de l'élément de surface de l'objet correspondante ( $ds$ ) ( figure 53).

Le grandissement de l'image ( $g$ ) est défini par la relation suivante :

$$g = \sqrt{\frac{ds'}{ds}} \quad (\text{IV.3})$$

et l'ouverture relative de l'objectif ( $n$ ) par le rapport de sa distance focale par le diamètre de la lentille soit :

$$n = \frac{f}{d} \quad (\text{IV.4})$$

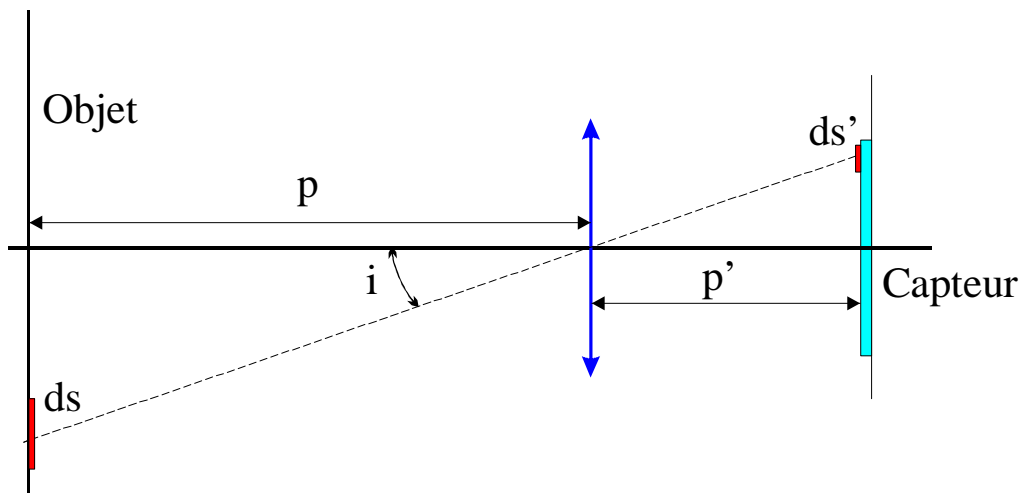


Figure 53 : Modèle géométrique simplifié des objectifs réalisés

Dans ces conditions, l'éclairement reçu par chaque élément de surface du capteur s'exprime :

$$E = \frac{\pi \cdot \cos^4 i}{4 \cdot n^2 \cdot (g + 1)^2} M \quad (\text{IV.5})$$

L'émittance  $M$  de chaque partie de l'objet est donc pondérée par un coefficient « gain » fonction de l'angle d'incidence, du carré de l'ouverture relative et du grandissement.

Pour les applications envisagées : la surveillance de locaux, la distance objet – objectif (p) sera au minimum de l'ordre du mètre, alors que la distance objectif – capteur (p') reste inférieure à 50 mm. Dans ce cas, le grandissement g est << 1 et la distance objectif – capteur (p') est proche de la distance focale f. La relation précédente devient alors :

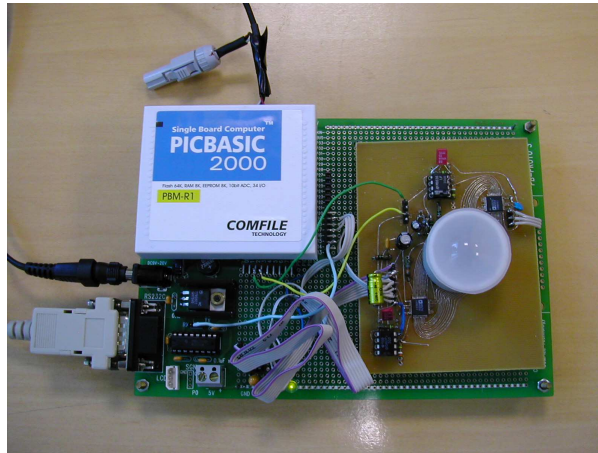
$$E = \frac{\pi \cdot \cos^4 i}{4 \cdot n^2} M \quad (\text{IV.6})$$

A partir des dimensions de la surface sensible de la matrice IR : 16 x16 mm<sup>2</sup>, l'angle de vue maximum (i<sub>max</sub>) peut être calculé et le gain  $\frac{\pi \cdot \cos^4 i}{4 \cdot n^2}$  peut être évalué pour chaque objectif. Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau suivant :

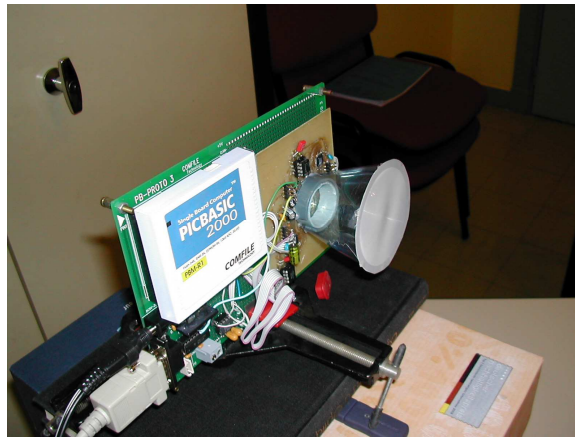
Lentille	Ouverture Relative n = f / D	Angle de vue maximum (i <sub>max</sub> ) (d°)	Gain pixel central (i = 0)	Gain pixels périphériques (i = i <sub>max</sub> )
Diam. D= 33 mm Foc. f = 20 mm	0,6	± 22	2.18	1.62
Diam. D= 50 mm Foc. f = 30 mm	0,6	± 15	2.18	1.90
Diam. D= 63 mm Foc. f = 55 mm	0,79	± 8.3	1.26	1.21

**Tableau 11 : Caractéristiques des objectifs infrarouge à lentille de Fresnel**

Le gain calculé ne prend pas en compte l'absorption (de l'ordre de 40 %) du rayonnement par la lentille constituée de polyéthylène. Il ressort de cette étude que c'est la lentille de Fresnel de diamètre 50 mm et de focale 30 mm qui devrait donner les meilleurs résultats en termes d'homogénéité du gain sur l'ensemble des pixels.



**Figure 54 : Prototype fonctionnel d'un imageur infrarouge équipé d'une lentille de 33 mm de diamètre**



**Figure 55 : Prototype fonctionnel d'un imageur infrarouge équipé d'une lentille de 62 mm de diamètre**



## **Principe de fonctionnement des logiciels et résultats obtenus**

### **1-Programme implanté dans le microcontrôleur.**

Ce logiciel est écrit en Basic, dont le listing donné en annexe, est de principe très simple. Le microcontrôleur balaye les entrées des multiplexeurs, converti les tensions en valeurs numériques et les transmet via le port RS232. Lors de la phase d'initialisation, qui doit être menée avec une scène vide de tout être humain, les données sont stockées dans un tableau 7x7 et pour chaque pixel, c'est la différence entre la valeur mesurée en temps réel et la valeur stockée qui sera ensuite envoyée comme donnée vers le port série. Cette façon d'opérer qui est classique permet d'éliminer les « offsets » de toute la chaîne de mesure et d'obtenir une image « froide », uniforme.

Pour des raisons de routage du circuit imprimé et de la matrice, le balayage linéaire des multiplexeurs ne permet pas d'obtenir une suite ordonnée des tensions délivrées par les pixels. Il est donc nécessaire de réordonner cette suite à l'aide d'une table de transcodage avant transmission des 49 valeurs.

		49	48	47	46	45	44	43	42	41	40	39	38	M
M														
1														37
2														36
3														35
4														34
5														33
6														32
7														31
8														30
9														29
10														28
11														27
12														26
13	M	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	M

Figure 56 : Correspondance plots de contact – Pixel d'une matrice 7x7

## 2-Programme implanté dans le PC.

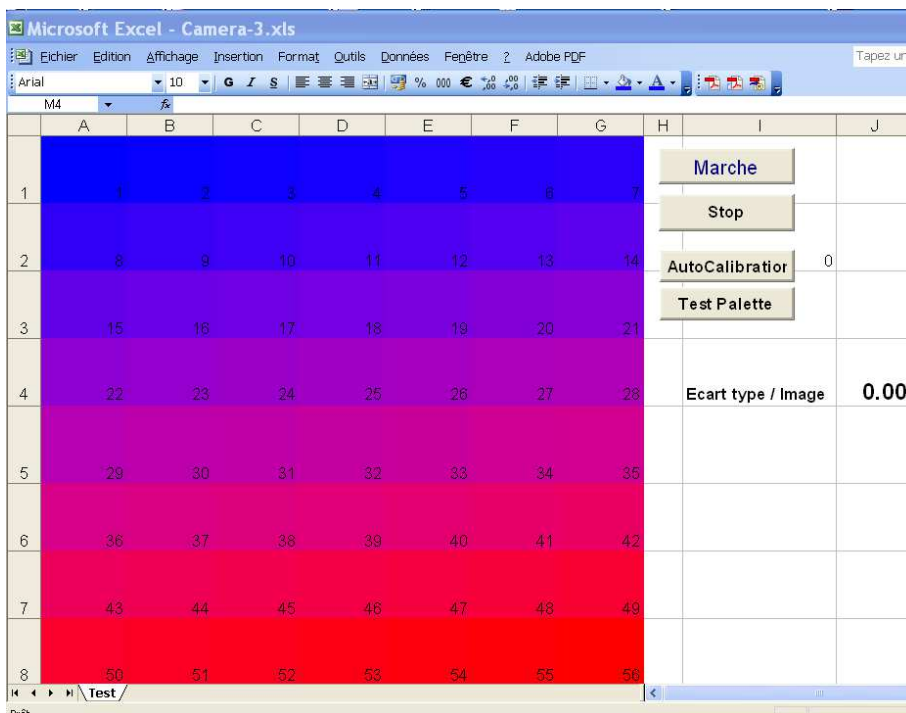


Figure 57 : Logiciel de visualisation des images

Ce programme présenté en annexe est développé en Visual basic dans une feuille « EXCEL ». Les données correspondant à une image sont récupérées sur le port série du PC et sont stockées dans un tableau 7x7. Un bouton « Autocalibration » permet d'attribuer à chaque pixel un gain différent avant de l'afficher sur l'écran. Ces gains sont stockés dans un tableau 7x7 et permettent de compenser la dispersion de sensibilité de chaque pixel ainsi que la diminution de gain optique des pixels périphériques. Pour effectuer cette « autocalibration », il suffit de disposer une cible à température uniforme (voisine de 30 °C) devant l'objectif et de cliquer sur le bouton correspondant.

Une palette rouge-bleu à 56 niveaux à été générée (figure 57) et chaque donnée issue d'un pixel de l'imageur est traitée de façon proportionnelle afin de générer un nombre entier compris entre 1 et 56. Ce nombre permet d'attribuer la couleur correspondant à la température de chaque pixel de la scène et de l'afficher sur l'écran du PC.

### **Résultats obtenus**

Lorsque la matrice est occultée par un corps à température constante, la fluctuation moyenne de tension de l'imageur ramenée au niveau des pixels est de  $\pm 10 \mu\text{V}$ , ce qui correspond à une variation d'éclairement énergétique de  $\pm 0,88 \text{ W/m}^2$ , compte tenu de la sensibilité moyenne d'un pixel qui est de  $11,4 \mu\text{V}/(\text{W/m}^2)$  sans optique. Lorsque la cible est en influence totale, cette valeur permet de déterminer la résolution de l'imageur sans objectif qui est alors de  $\pm 0,14 \text{ K}$ . Cette valeur peut être comparée au NETD d'un pixel seul, qui est de  $0,75 \text{ mK}$ , cette forte dégradation des performances étant essentiellement due au bruit introduit par l'interface électronique dotée de composants « grand-public ».

Les images obtenues sont représentées figure 58. L'objectif de focale 20 mm donne des images de médiocre qualité en périphérie comme prévu. Le NETD mesuré par la variation de température d'une cible (10K autour de 300K) située à 2 m est de  $\pm 1,0 \text{ K}$  pour les pixels centraux et de  $1,3 \text{ K}$  pour les pixels périphériques, ce qui correspond assez bien aux données calculées dans le tableau.

Comme prévu dans le tableau 11 c'est bien l'objectif de focale 30 mm qui donne les meilleurs résultats, en terme de NETD mesuré à 2 m :  $\pm 0,72 \text{ K}$  dans l'axe et  $\pm 1,2 \text{ K}$  en périphérie de la matrice. Ces résultats sont assez éloignés des prévisions théoriques, cette

erreur étant probablement due à la simplicité du modèle optique utilisé et à l'utilisation de lentilles de Fresnel ne possédant pas le même nombre de traits/mm.

L'objectif équipé d'une lentille de 63 mm de diamètre et de distance focale 55 mm donne des images plus homogènes compte-tenu de son faible angle d'ouverture. Contrairement aux prévisions du modèle le « gain » est sensiblement identique à celui des autres lentilles puisque le NETD mesuré dans les mêmes conditions est de  $\pm 0.94$  K dans l'axe optique, et  $\pm 0.90$  K pour les pixels périphériques, ce qui, par-contre est conforme aux prévisions.

En conclusion, ces mesures montrent que le NETD de cet imageur « grand-public » équipé d'une lentille de Fresnel de 20 ou 30 mm de focale peut convenir pour la détection de personnes. L'interface électronique assez rudimentaire pourrait être rendu moins bruyant par un choix judicieux de l'amplificateur opérationnel et un filtrage plus élaboré qui pourrait être effectué à l'aide du micro-contrôleur qui reste sous-utilisé.

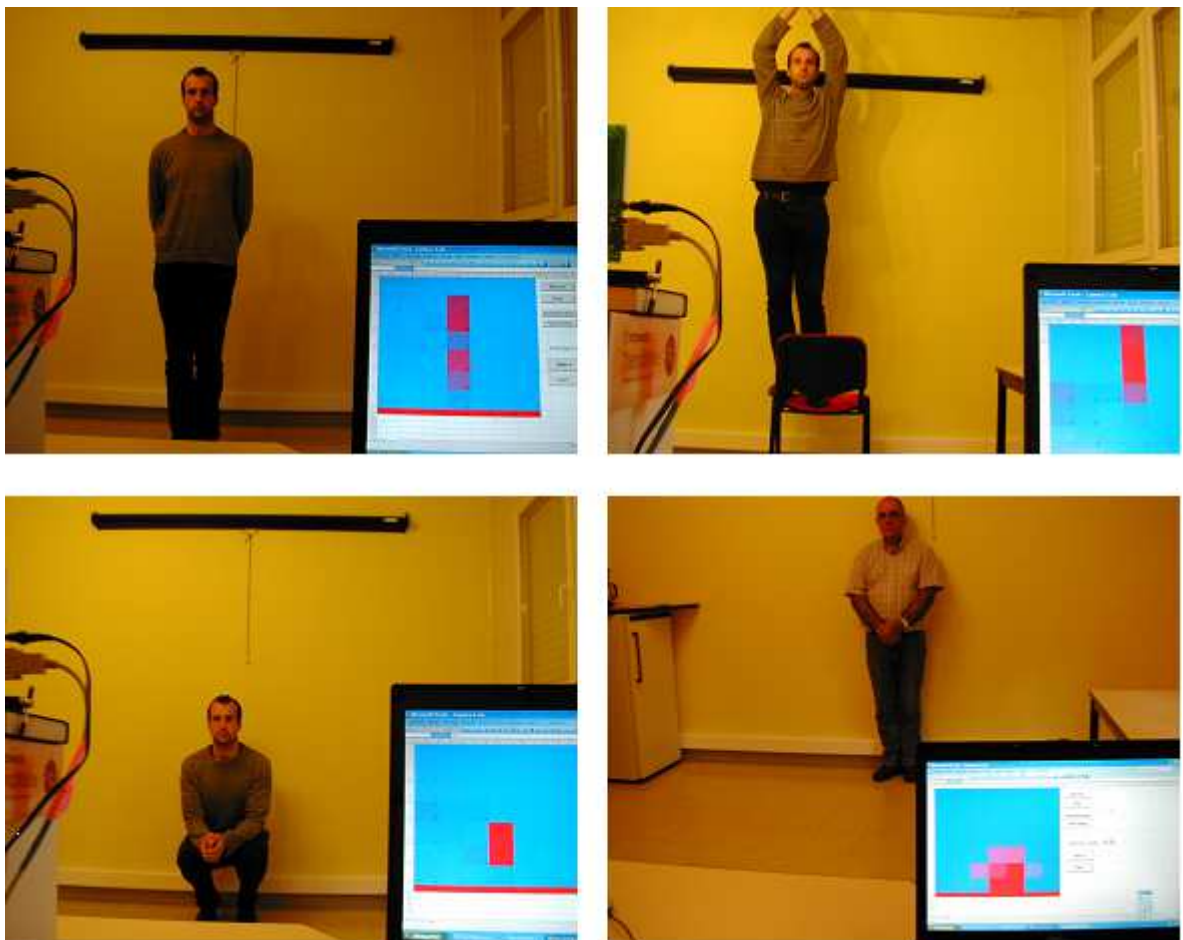


Figure 58 : Trois images obtenues avec l'objectif de focale 20 mm et 1 image en bas à droite avec le 56 mm

## **Bibliographie**

[1] H.Randrianarisoa *Etude et réalisation d'un banc de mesures pour capteurs de rayonnement infrarouge. Application à la caractérisation de microradiomètres*. Thèse de doctorat USTL 1998

[2] A.Fresnel le *Mémoire sur un nouveau système d'éclairage des phares* 1822

[3] <http://www.edmundoptics.com/products/displayproduct.cfm?productID=2042>

## **CONCLUSION GENERALE**

Le travail qui nous avait été demandé dans le cadre de ce Doctorat était, dans un premier temps, de développer un logiciel de modélisation spécifique permettant le dimensionnement de matrices de capteurs infrarouges thermoélectriques afin d'obtenir dans chaque cas les performances optimales. La seconde partie de ce travail a été d'exploiter ces résultats pour réaliser en salle blanche des matrices de différentes tailles et les caractériser afin de valider le modèle. La troisième partie a consisté à réaliser un imageur complet depuis le circuit imprimé de gestion des matrices jusqu'aux logiciels de pilotage et d'affichage des données implantés sur microcontrôleur et sur PC.

Plusieurs objectifs ont été réalisés à l'aide de lentilles de Fresnel à faible coût, mais il nous semble qu'il reste encore du travail à fournir pour optimiser ce type d'optique qui est assez complexe à mettre en œuvre. Nous pensons qu'il serait intéressant de diminuer encore les dimensions des matrices, donc des pixels pour permettre une meilleure adaptation aux lentilles. Le problème qui se pose dans ce cas est la résolution de la technologie de gravure des pistes thermoélectriques qui devrait passer de 5  $\mu\text{m}$  à 1  $\mu\text{m}$  pour les pistes les plus fines afin de réaliser des capteurs ayant des dimensions inférieures au millimètre.

Il sera également important de prévoir une méthode fiable de liaison entre les capteurs et le circuit imprimé car l'augmentation du nombre de pixels associée à la réduction des tailles va fortement compliquer les problèmes de soudures au niveau des plots de contact de la matrice déjà apparus lors de ce projet.

Des travaux dans l'équipe notamment sur le polysilicium, sont en cours pour permettre une amélioration des caractéristiques de la matrice, en modifiant non plus le dessin mais les performances des matériaux qui la composent.

L'imageur réalisé pourra lui aussi être optimisé en améliorant les différentes parties utilisées dans ce prototype, microcontrôleur programmable en langage C, utilisant des multiplexeurs ayant moins de voies pour accélérer la vitesse d'actualisation des images, et utilisation d'une taille de lentille adaptée à la distance de prise de vue.

## **Liste des symboles et unités**

## Introduction générale

IR-A :	subdivision de l'infrarouge situé de 0.78 à 1.4 $\mu\text{m}$
IR-B :	subdivision de l'infrarouge situé de 1.4 à 3 $\mu\text{m}$
IR-C :	subdivision de l'infrarouge entre 3 et 1000 $\mu\text{m}$
FPA :	Focal Plane Array : Matrice de capteurs situé dans un plan
ROIC :	ReadOut Integrated Circuit : Circuit intégré adapté à la lecture des données des microcapteurs
SWIR :	Short WaveInfraRed : subdivision de l'infrarouge de 0.78 à 3 $\mu\text{m}$
MWIR :	MidWaveInfraRed : subdivision de l'infrarouge de 3 à 8 $\mu\text{m}$
LWIR :	LargeWaveInfraRed : subdivision de l'infrarouge de 8 à 14 $\mu\text{m}$

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

NETD :	Noise Equivalent Temperature Difference	[K]
V :	tension	[V]
I :	courant	[A]
TCR :	Temperature Coefficient Resistance : rapport entre la température et la résistance dans un bolomètre	[ $\Omega$ /K]
$\Delta T$ :	Différence de Température	[K]
$\Delta V$ :	Différence de Tension	[V]
R :	Résistance	[ $\Omega$ ]
C :	capacité	[F]
$\alpha$ :	coefficient Seebeck	[V/K]
NEP :	Noise Equivalent Power	[W]
$D^*$ :	Déectivité spécifique	[ $\text{m}\cdot\text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ ]
$h$ :	constante de Planck = $6,626068 \times 10^{-34}$	[ $\text{m}^2\cdot\text{kg}/\text{s}$ ]
$c$ :	Vitesse de la lumière = $3\cdot 10^6$	[m/s]
$\sigma$ :	constante de Stefan-Boltzmann = $5.67 \cdot 10^{-8}$	[ $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$ ]
T :	Température	[K]
f :	fréquence	[Hz]
$\lambda$ :	longueur d'onde	[m]
$\nu$ :	fréquence d'un photon	[Hz]
$\Delta E$ :	différence entre bande de conduction et bande de valence	
$E_c$ :	limite de la bande de conduction dans un semi conducteur	
$E_v$ :	limite de la bande de valence dans un semi-conducteur	
III-V :	semi conducteur composé d'un élément de la colonne III et la colonne V sur le tableau périodique	
II-VI :	semi-conducteur composé d'un élément de la colonne II et de la colonne VI sur le tableau périodique	
$\eta$ :	rendement quantique (fig.4)	
$\lambda_p$ :	longueur d'onde du pic d'absorption (fig.4)	[m]
$\lambda_c$ :	longueur d'onde de coupure (fig.4)	[m]
TFFE :	Thin Film Ferro Electric : couche mine de matériau se polarisant sous l'effet d'un champ électrique	
MEMS :	microsystème électromécanique	
CCD :	Charged coupled Device : appareil de mesure d'une déviation	



## **Modélisation et dimensionnement des matrices infrarouge**

L	Longueur de la piste	[m]
$l_x$	largeur de la couche x	[m]
$e_x$	épaisseur de la couche x	[m]
$\lambda_x$	conductivité thermique de la couche x	[W/(m.K)]
$Y_x$	conductivité équivalente de la portion x	[W/(m.K)]
$\alpha_x$	coefficient Seebeck du matériau x	[V/K]
$\Phi(x)$	flux traversant les lignes de la thermopile	[W]
$\Phi_{sup}$	flux convectif sur la face supérieure de la membrane	[W]
$\Phi_{inf}$	flux convectif sur la face inférieure de la membrane	[W]
$\Phi_{ray}$	flux rayonné par le capteur	[W]
$\varphi$	flux surfacique	[W/m <sup>2</sup> ]
S	Surface du microcapteur	[m <sup>2</sup> ]
E	Eclairement	[W/m <sup>2</sup> ]
M	Emittance du microcapteur	[W/m <sup>2</sup> ]
h	coefficient d'échange convectif	[W/(m <sup>2</sup> .K)]
K	coefficient de caractérisation des échanges entre le capteur et son environnement	
$\gamma^2$	constante de propagation de la chaleur le long de la membrane	[m <sup>-2</sup> ]
$U_B$	Tension de bruit	[V]
$\rho$	résistivité électrique	[ $\Omega/cm$ ]

## **Réalisation technologique des matrices de capteurs infrarouges**

LPCVD :	Low Pressure Chemical Vapor Deposition
UV :	Ultraviolet : bande de rayonnement située en dessous du visible (longueur d'onde inférieur à 400nm)
RIE :	Reactive Ion Etching
ICP :	Ion Coupled Plasma

## **Caractérisation des performances et réalisation du système de vision infrarouge**

$S_E$	Sensibilité du capteur à l'éclairement	[ $\mu V/(W.m^2)$ ]
$F_{CP}$	Facteur de forme capteur/plaque chauffante	
$\varepsilon$	émissivité du capteur	

## **Liste des figures et tableaux**

## Figures :

### Introduction

Figure 1 : Rayonnement et longueur d'onde. Zones de l'infrarouge.

Figure 2 : Historique de la détection infrarouge. D'après Réf [5]

Figure 3 : Transparence atmosphérique de l'infrarouge

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

Figure 54 : Défectivité des différentes technologies de détection infrarouge

Figure 5 : image MEB d'une matrice de bolomètres [1]

Figure 6 : Principe Photomultiplicateur

Figure 7 : Schéma de principe de l'absorption d'un photon dans un semi-conducteur

Figure 8 : Déplacement des paires électrons/trous dans un détecteur de type jonction P-N

Figure 8 : Puits quantique : épaisseur des couches [14]

Figure 9 : Fonctionnement d'un détecteur à multi puits quantiques

Figure 10 : Pixel dans une matrice de capteurs utilisant la pyro-électricité

Figure 11 : Image vu par une matrice de bolomètres. [24]

Figure 12 : Représentation d'une image reçue par un capteur basé sur une thermopile

Figure 13 : Image donnée par une caméra de micro-cantilevers. [35]

### Modélisation et dimensionnement des matrices infrarouge

Figure 14 : Vue écorchée d'un micro-capteur IEMN

Figure 15 : Profil de température le long d'une ligne de 3mm pour  $E=1000W/m^2$

Figure 16 : Variation de sensibilité en fonction du ratio longueur du réflecteur/longueur de la membrane

Figure 16 : Cellule d'étude : schéma des pistes vues de dessus. Représentation des largeurs de piste réelle (à gauche) et de ligne équivalente (à droite) utilisée pour la simulation.

Figure 17 : Schéma des pistes vues en coupe AA' (rapport des dimensions non représentatif). Représentation des différentes couches (à gauche) et de la couche équivalente (à droite).

Figure 18 : Schéma équivalent du système sur une portion dx de la ligne de thermocouple

Figure 19 : Profil d'une ligne de thermocouple

Figure 20 : Sensibilité totale suivant la surface et le nombre de zones d'un microcapteur

Figure 21 : Profil de température le long d'une ligne de thermocouple de 3mm.

En bleu :  $T_{sub}=20^{\circ}C$ ,  $T_{air} = 25^{\circ}C$ ,  $E=418W/m^2$ .

En rouge  $T_{air} = T_{sub}= 20^{\circ}C$  et  $E = 1000W/m^2$ .

Figure 22 : Méthode de calcul des positions optimales des jonctions J1 et J2

Figure 23 : Sensibilité par piste en fonction de la longueur d'une ligne de thermocouple.

Figure 24: Variation de sensibilité en fonction des largeurs des lignes de thermocouple

Figure 25 : Variation de la sensibilité totale d'un capteur 3mmx3mm en fonction de la largeur d'une ligne

Figure 26 : Sensibilité par piste en fonction de l'épaisseur du polyimide

## **Réalisation technologique de la matrice de capteurs infrarouges**

- Figure 28 : Wafer vu de dessus : Résultat final
- Figure 29 : Schéma wafer avant dépôt
- Figure 30 : Wafer avec couches d'oxydes de silicium et polysilicium
- Figure 31 : Masque Polysilicium
- Figure 32 : Wafer après résinage
- Figure 33 : Wafer après usinage de la résine
- Figure 34 : Wafer après gravure polysilicium
- Figure 35 : Wafer après nettoyage résine
- Figure 36 : Masque Pistes Or
- Figure 37 : Masque Polyimide
- Figure 38 : Masque réflecteur
- Figure 39 : Masque gravure face arrière
- Figure 40 : vue de dessus des trois types de matrices réalisées

## **Caractérisation des performances et réalisation du système de vision infrarouge**

- Figure 41 : Banc de caractérisation micro-capteur
- Figure 42 : Réponse d'un pixel  $3 \times 3 \text{mm}^2$  d'une matrice  $5 \times 5$  pixels
- Figure 43 : Représentation modulaire de l'imageur infrarouge
- Figure 44 : Prototypage fonctionnel de caméra infrarouge  $7 \times 7$  pixels
- Figure 45 : Photo de la platine équipée de la matrice et des fonctions de multiplexage-amplification
- Figure 46 : Routage circuit imprimé
- Figure 47 : Capteur  $7 \times 7$
- Figure 48 : Multiplexage
- Figure 49 : Implantation d'un amplificateur
- Figure 50 : Schéma de principe lentille de Fresnel
- Figure 51 : Transparence du polyéthylène dans l'infrarouge
- Figure 52 : Lentille de Fresnel
- Figure 53 : Modèle géométrique simplifié des objectifs réalisés
- Figure 54 : Prototypage fonctionnel d'un imageur infrarouge équipé d'une lentille de 33mm de diamètre.
- Figure 55 : Prototypage fonctionnel d'un imageur infrarouge équipé d'une lentille de 62mm de diamètre.
- Figure 56 : Correspondance plots de contact – capteur
- Figure 57 : logiciel de visualisation des images
- Figure 58 : 3 images obtenues avec l'objectif de focale 20 mm et 1 image en bas à droite avec le 56 mm

## **Tableaux :**

### **Etat de l'art des dispositifs de vision et de détection infrarouge**

Tableau 1 : Paramètres des détecteurs extrinsèques [14]

Tableau 2 : Comparatif des technologies de matrices non refroidies pour l'imagerie infrarouge [20]

Tableau 3 : Etat de l'art des principaux fabricants de microbolomètres

### **Modélisation et dimensionnement des matrices infrarouge**

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des couches du capteur

Tableau 5 : Dimensions des matrices

### **Réalisation technologique de la matrice de capteurs infrarouges**

Tableau 6 : Paramètres lithographiques dépôt de résine AZ1518

Tableau 7 : Paramètres lithographiques insolation et révélation résine AZ1518

Tableau 8 : Paramètres de la gravure du polysilicium

Tableau 9 : paramètres lithographiques pour la métallisation

Tableau 10 : paramètres de dépôt et gravure du polyimide PI-2731

Tableau 11 : Paramètres lithographiques de la gravure face arrière

Tableau 12 : paramètres de la gravure des couches d'oxydes face arrière

### **Caractérisation des performances et réalisation du système de vision infrarouge**

Tableau 13 : Résumé des performances des capteurs d'une matrice 5x5 et d'une matrice 7x7

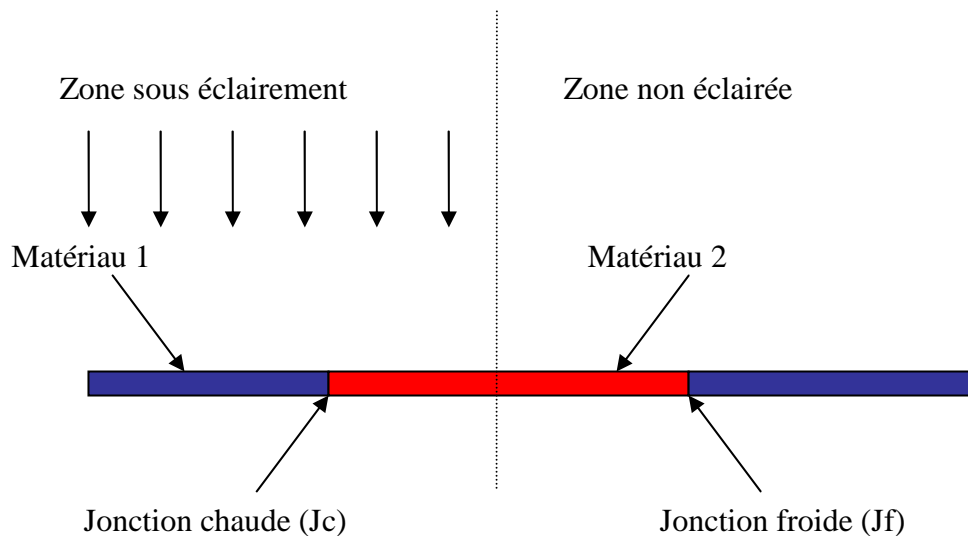
Tableau 14 : Caractéristiques des objectifs infrarouge à lentille de Fresnel

## **Annexes**

## Annexe 1 : L'effet Seebeck

L'effet Seebeck est un effet thermoélectrique découvert en 1821 par le physicien Thomas Johann Seebeck.

Il consiste en l'apparition d'un courant électrique quand 2 jonctions de 2 matériaux conducteurs sont à des températures différentes.



Comme  $T_{Jc} > T_{Jf}$ , on a alors  $V_{Jc} \neq V_{Jf}$ . On définit alors un coefficient Seebeck dépendant des 2 matériaux tel que :

$$S_{12} = \frac{dV}{dT}$$

avec :

- $S_{12}$  : coefficient Seebeck de la jonction, soit la différence entre les coefficients Seebeck des deux matériaux

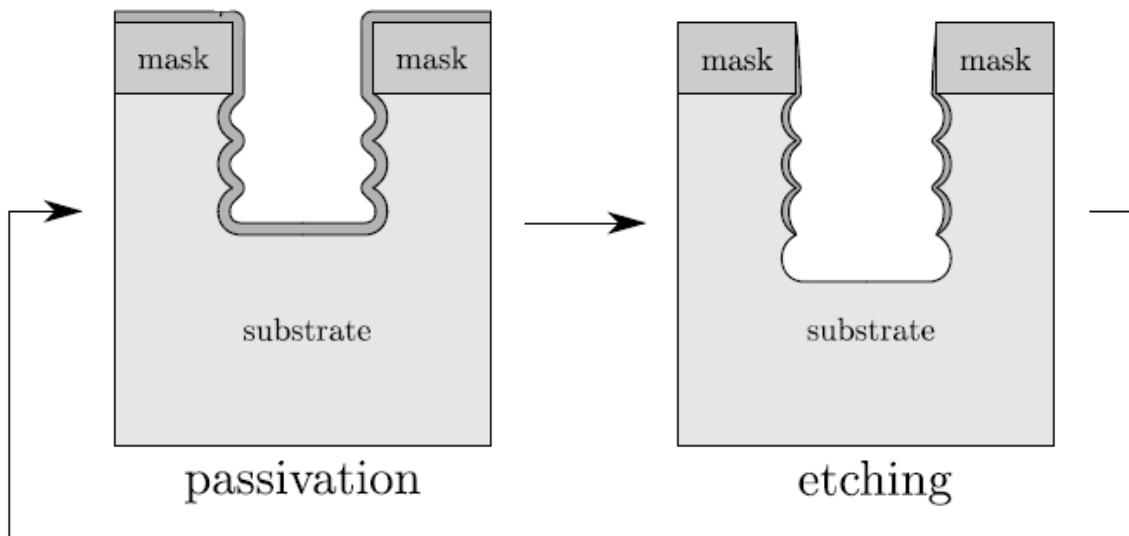
Donc, si on connaît le coefficient Seebeck des deux matériaux avec lesquels on travaille, il est possible d'estimer la température de la jonction en mesurant la tension aux bornes. Ce phénomène est la base de la création d'un thermocouple

## Annexe 2 : le procédé BOSCH en microtechnologie

En microtechnologie, le procédé BOSCH est une technique de gravure ionique réactive profonde (DRIE) utilisant une gravure au plasma (ICP) permettant d'obtenir des rapports d'aspect très élevés.

Il consiste en l'alternance de deux phases à reproduire jusqu'à ce que la gravure soit réalisée :

- une phase de passivation utilisant des composés fluorocarbonés tel que  $\text{CF}_4$
- une phase de gravure (etching) au plasma utilisant les fluorures de soufre tel le  $\text{SF}_6$



La première étape est la phase de passivation. Le  $\text{CF}_4$  introduit dans la chambre va être dissocié par le plasma puis il va se former une couche de passivation formé de  $\text{CF}_2$  sur les parois de la cavité (fig 1.a).

Une fois cette étape de passivation terminée, on peut commencer la gravure au  $\text{SF}_6$ . Sous l'action d'un bombardement ionique dans le sens souhaité de gravure, la couche de passivation va être gravée puis les fluorures de soufre pourront graver le silicium.

Le bombardement ionique permet de choisir la direction privilégiée de la gravure et donc de favoriser un rapport d'aspect important



Ces deux phases sont ensuite répétées jusqu'à atteindre la profondeur de gravure souhaitée.

En jouant sur le temps de chaque étape, on peut modifier les paramètres de la gravure. Plus le temps est court, plus le rapport d'aspect sera important. Plus les phases sont prolongées, plus la gravure sera rapide.

Dans notre processus, la fin d'étape est contrôlée visuellement pour 2 raisons :

- L'arrêt de la gravure par période permet d'éviter un échauffement trop important de la résine.
- A cause de la couche de passivation, l'épaisseur de gravure mesurée à l'interféromètre est parfois incorrecte.

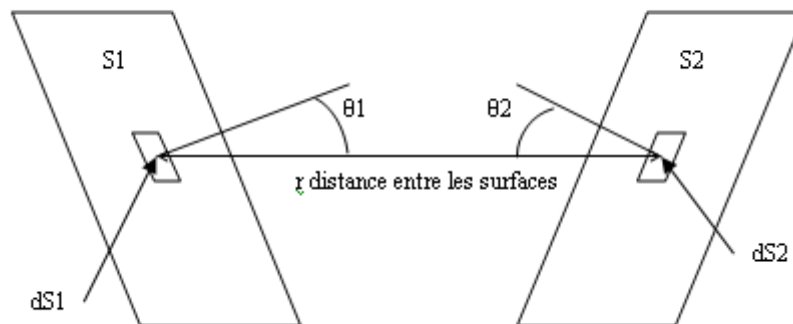
Les paramètres sont rappelés dans le tableau suivant.

Procédé BOSCH	
Débit CF4 (passivation)	200 sccm
Durée étape passivation	2.2 sec
Débit SF6 (gravure)	450 sccm
Durée étape gravure	3 sec
Arrêt procédé	Toutes les 15 min
Fréquence de travail du plateau	380 kHz
Température du plateau	10°C

## Annexe 3 : Le facteur de forme

Le facteur de forme est un nombre sans dimension compris entre 0 et 1, avec une signification purement géométrique. Il correspond à la portion de rayonnement émise par une surface S1 qui est reçue par une surface S2.

Le facteur de forme ne prend en compte que la géométrie des surfaces, l'angle et la distance les séparant.



Le rayonnement émis par  $dS_1$  vers  $dS_2$  peut être exprimé par :

$$d^2\phi_{12} = M_1 \cdot \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2 dS_1 dS_2}{\pi r^2}$$

où  $M_1$  est l'émittance de la surface S1

En intégrant par rapport à S2 puis à S1, on obtient que :

$$\phi_{12} = M_1 \int \int_{S_1 S_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dS_1 dS_2$$

D'après la définition du facteur de forme, on a aussi :

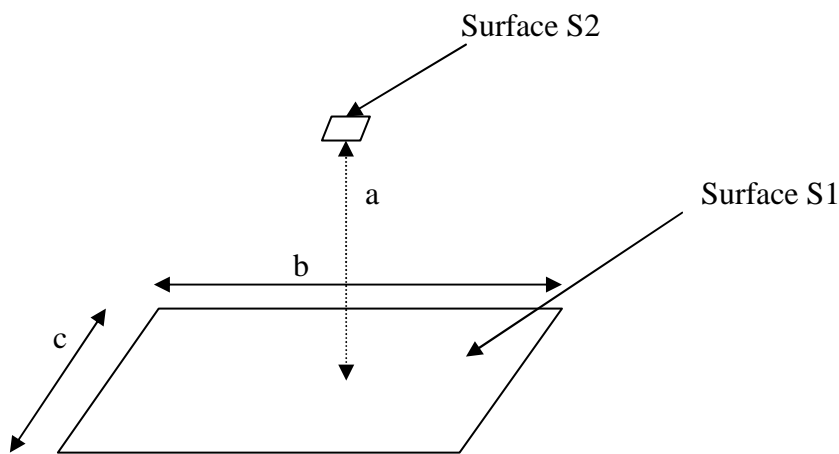
$$\phi_{12} = M_1 \cdot S_1 \cdot F_{12}$$

en combinant (A.3) et (A.4), on obtient que la facteur de forme vaut :

$$F_{12} = \frac{1}{S_1} \int \int_{S_1 S_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r^2} dS_1 dS_2$$

La résolution de cette double intégrale est souvent un calcul long donc il existe le plus souvent des abaques pour déterminer le facteur de forme pour les formes géométriques les plus utilisées.

Dans notre cas, on est dans la représentation suivante



avec  $b \gg a$  et  $c \gg a$  ( rapport presque 10)

Le facteur de forme dans ce cas peut s'exprimer :

$$F = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{B}{\sqrt{1+B^2}} \tan^{-1} \left( \frac{C}{\sqrt{1+B^2}} \right) + \frac{C}{\sqrt{1+C^2}} \tan^{-1} \left( \frac{C}{\sqrt{1+C^2}} \right) \right] \text{ avec } C = c/a \text{ et } B = b/a$$

De précédentes recherches [1] ont montré que pour une distance  $a$  de 3,5 cm et avec une plaque carrée de 20cm\*20cm, on pouvait estimer le facteur de forme à 0.91

## Annexe 4 : Lentille de Fresnel Edmund Optics

Spécifications Générales	
Indice de Réfraction	
Visible (Raie Sodium D)	1.52
8-14µm	1.53
15µm+	1.48
Module de Tension	(60-180) x 10 <sup>3</sup> PSI
Module de Flexion	(100-260) x 10 <sup>3</sup> PSI
Dureté	D60-70 (Shore)
Expansion Thermale	(11-13) x 10 <sup>-5</sup> /°C
Température d'Utilisation	100°C (212°F)
Spécifications de Durabilité	
Effet de la Lumière du Jour	Aucun à peu
Effet de l'Ultraviolet	UV Stabilisé
Effet de Faibles Acides	Très peu
Effet de Forts Acides	Attaqué par acides oxydants
Effet de Faibles Alcalins	Très peu
Effet de Forts Alcalins	Très peu
Effet de Solvant Organique	Peu dessous 60°C (140°F)

### Lentilles de Fresnel Infrarouge



- Excellent Système Optique de Rassemblement pour les Détecteurs Infrarouges
- Perte Minimale d'Absorption dans la Région 8-14µm
- Utile pour l'Imagerie Terahertz (THz)

Les lentilles de Fresnel sont moulées dans un plastique flexible 0.015" (0.457mm) blanc laiteux. Les avantages de ce produit sont: moins de pertes d'absorption dans la région 8-14µm, extrêmement fin avec épaisseur constante à travers la lentille, grandes ouvertures et dilatation thermique minimale. La conception d'un objectif de transmission de Fresnel implique des considérations complexes. Le côté cannelé d'un objectif de Fresnel devrait faire face au conjugué le plus long (loin du détecteur une fois utilisé pour rassembler le rayonnement). Si le côté lisse doit faire face au conjugué le plus long pour une certaine raison non optique, l'ouverture maximale de l'objectif devrait être F1.0. Dans ce cas-ci, la réflexion interne totale garde tout le rayonnement du secteur de l'objectif après F1.0 d'atteindre l'image. Même lorsque les cannelures font face au conjugué le plus long, la partie de l'objectif après F1.0 contribue à une quantité diminuée et aucune contribution significative après F0.5.

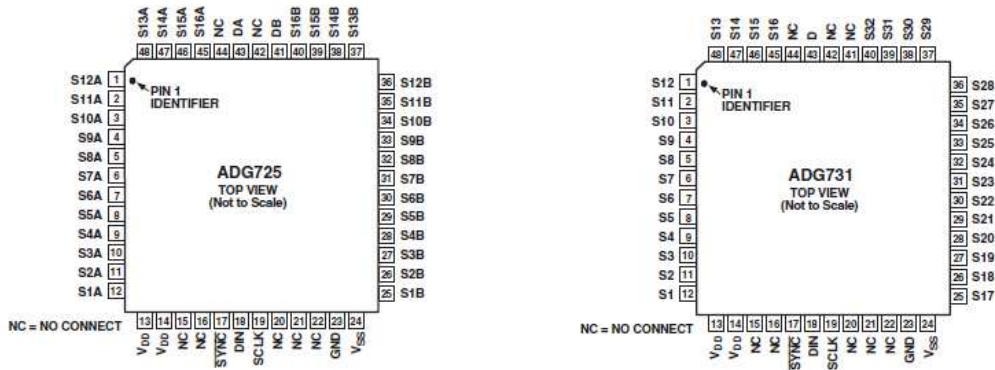
[Produits](#) [Spécifications](#) [Images Techniques](#) [Documents/Téléchargements](#)

[voir la légende](#)

Description	No. de Stock	Prix	En Stock	Qty												
IR Fresnel Lens 1.0" X 1.0", FL 0.37"	NT43-794	€21.38	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/> <a href="#">BUY</a>												
IR Fresnel Lens 1.5" X 1.5", FL 0.56"	NT43-795	€21.38	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/> <a href="#">BUY</a>												
IR Fresnel Lens 1.5" X 1.5", FL 0.92"	NT32-797	€21.38	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/> <a href="#">BUY</a>												
IR Fresnel Lens 2.0" X 2.0", FL 0.79"	NT32-796	€21.38	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/> <a href="#">BUY</a>												
<table border="1"> <tr> <td>Dimensions (pouces)</td> <td>2.0 x 2.0</td> </tr> <tr> <td>Diamètre Effectif (pouces)</td> <td>1.3</td> </tr> <tr> <td>Distance Focale EFL (pouces)</td> <td>0.79</td> </tr> <tr> <td>Épaisseur Centrale CT (pouces)</td> <td>0.02</td> </tr> <tr> <td>Traits par Pouce</td> <td>200.00</td> </tr> <tr> <td>RoHS</td> <td>Compliant</td> </tr> </table>		Dimensions (pouces)	2.0 x 2.0	Diamètre Effectif (pouces)	1.3	Distance Focale EFL (pouces)	0.79	Épaisseur Centrale CT (pouces)	0.02	Traits par Pouce	200.00	RoHS	Compliant	<a href="#">Demande de Devis</a> <a href="#">Ajouter à la Liste de Souhaits</a>		
Dimensions (pouces)	2.0 x 2.0															
Diamètre Effectif (pouces)	1.3															
Distance Focale EFL (pouces)	0.79															
Épaisseur Centrale CT (pouces)	0.02															
Traits par Pouce	200.00															
RoHS	Compliant															
IR Fresnel Lens 2.3" X 2.3", FL 1.2"	NT32-798	€21.38	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/> <a href="#">BUY</a>												
IR Fresnel Lens 3.0" X 3.0", FL 7.3"	NT43-799	€21.38	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/> <a href="#">BUY</a>												
IR Fresnel Lens 3.0" X 3.0", FL 2.2"	NT43-796	€21.38	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/> <a href="#">BUY</a>												
IR Fresnel Lens 5.0" X 5.0", FL 2.6"	NT43-797	€23.75	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/> <a href="#">BUY</a>												
IR Fresnel Lens 6.7" X 6.7", FL 2.8"	NT43-798	€26.13	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text"/> <a href="#">BUY</a>												

Montrant 1-9 de 9 Composants | [Afficher par Spéc](#)

# Annexe 5 : Datasheet ADG731



### PIN FUNCTION DESCRIPTIONS

ADG725	ADG731	Mnemonic	Function
1–12, 25–40, 45–48	1–12, 25–40, 45–48	Sxx	Source. May be an input or output.
13, 14	13, 14	V <sub>DD</sub>	Power Supply Input. These parts can be operated from a single supply of 1.8 V to 5.5 V and a dual supply of ±2.5 V.
17	17	SYNC	Active Low Control Input. This is the frame synchronization signal for the input data. When SYNC goes low, it powers on the SCLK and DIN buffers and the input Shift Register is enabled. An 8-bit counter is also enabled. Data is transferred on the falling edges of the following clocks. After eight falling clock edges, switch conditions are automatically updated. SYNC may be used to frame the signal or just pulled low for a short period of time to enable the counter and input buffers.
18	18	DIN	Serial Data Input. Data is clocked into the 8-bit Input Register MSB first on the falling edge of the serial clock input.
19	19	SCLK	Serial Clock Input. Data is clocked into the Input Shift Register on the falling edge of the serial clock input. These devices can accommodate serial input rates of up to 30 MHz.
23	23	GND	Ground Reference
24	24	V <sub>SS</sub>	Most Negative Power Supply in a Dual-Supply Application. In single-supply applications, connect to GND.
41, 43	N/A	DA, DB	Drain. May be an input or output.
N/A	43	D	Drain. May be an input or output.



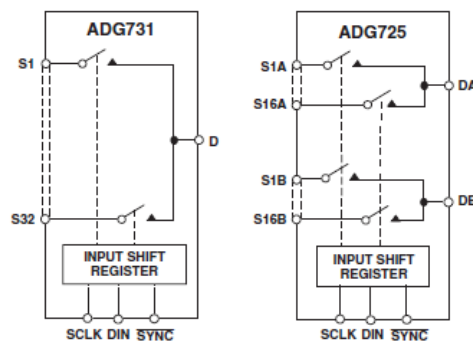
## 16-/32-Channel, Serially Controlled 4 Ω 1.8 V to 5.5 V, ±2.5 V, Analog Multiplexers

### ADG725/ADG731

#### FEATURES

- 3-Wire SPI Compatible Serial Interface
- 1.8 V to 5.5 V Single Supply
- ±2.5 V Dual-Supply Operation
- 4 Ω On Resistance
- 0.5 Ω On Resistance Flatness
- 7 mm x 7 mm 48-Lead Chip Scale Package (LFCSP)  
or 48-Lead TQFP Package
- Rail-to-Rail Operation
- Power-On Reset
- 42 ns Switching Times
- Single 32-to-1 Channel Multiplexer
- Dual/Differential 16-to-1 Channel Multiplexer
- TTL/CMOS Compatible Inputs
- For Functionally Equivalent Devices with Parallel Interface, See ADG726/ADG732

#### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



## ANNEXE 6

```
'- Pilotage Camera IR 7x7 pixels
'Programme sur microcontrôleur PicBasic -----

CONST DEVICE=R1

'----- Troncage n° pixel - adresse multiplexeur
' Entrée 1 du multiplexeur 1 - potentiel de ref => T(51)
' Entrée 17 du Multiplexeur 2 - Masse => T(52)
' Entrée 13 Mult. 2 non câblée => T(50)

'adr multiplexeur 1, 2, 3 ,4, 5, 6, 7, 8,
9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24)
  Const Byte Mpx2=(51,1
,8,15,22,23,24,29,30,31,36,37,38,25,43,44,34,41,48,33,40,47,32,39,46,45)
  Const Byte
Mpx1=(49,42,35,28,27,26,21,20,19,14,13,12,50,7,6,5,52,16,9,2,17,10,3,18,11,
4)

Const Clock=16 : Const Donnees=17 : Const Synchro1=18 : Const Synchro2=19 :
Const LED=12
Const ADC_1=2 : Const ADC_2=3 : Const N=10
Dim I as byte : Dim u as byte : Dim v as byte : Dim k as byte
Dim W1 as integer : Dim W2 as integer
Dim T(52) as byte : Dim Zero(50) as integer : Dim S1 as integer : Dim S2 as
integer

  Const N=15 : Const Tempo=1
Dim Chn as string*1

' init balayage multiplexeurs

  out Synchro1 ,1 : out Synchro2 ,1 :out Synchro1 ,0
  ShiftOut Clock,Donnees,1,128
  out Synchro1 ,1
' Stockage des valeurs pixels pour faire le zéro

  For I=0 to 25
    out Synchro1 ,0
    ShiftOut Clock,Donnees,1,I
    u=Mpx1(I) : v=Mpx2(I) : S1=0 : S2=0
    delay 12
    For K=1 to N
      S1=S1+Adin(ADC_1)
      Delay Tempo
      S2=S2+Adin(ADC_2)
      Delay Tempo
    Next K
    W1=S1/N : W2=S2/N
    Zero(u)=W1
    Zero(v)=W2
    out Synchro1 ,1
  Next I
```

```

100 ' Boucle principale -----
    'Balayage multiplexeur 1 et 2 en parallèle et stockage dans tableau
    '
    out LED,1

    For I=0 to 25
        out Synchron1 ,0
        ShiftOut Clock,Donnees,1,I
        u=Mpx1(I) : v=Mpx2(I): S1=0 : S2=0
        delay 12
        For K=1 to N
            S1=S1+Adin(ADC_1)
            Delay Tempo
            S2=S2+Adin(ADC_2)
            Delay Tempo
        Next K
        W1=S1/N : W2=S2/N
        T(u)=W1-Zero(u)+80
        T(v)=W2-Zero(v)+80
        out Synchron1 ,1
    Next I
    out LED,0
    For I=1 to 52
        SEROUT 14,196,0,1,[Chr(T(i))]
    Next I
    SEROUT 14,196,0,1,[chr(13),chr(10)]
goto 100

```

## ANNEXE 7

### 'Programme VBasic sous Excel

```
Option Explicit

Dim Fin, Min, Max, Moy, Offs As Integer
Dim MyCom As New ClasseCom
Dim ChaineduCom As String
Dim Tligne As String
Dim Ligne As String
Dim W(7, 7) As Integer
Dim G(7, 7) As Single
Dim Gg As Single

'ce module (Thierry Pourtier - tpourtier@wanadoo.fr)
'illustre l'emploi de ComTi sans utilisation d'un UserForm
'l'objet ComTi est déclaré dans ClasseCom. Ensuite il est toujours
'référencé dans le programme par MyCom.TiCom

Private Sub FermeCom()
    On Error Resume Next
    'Le port Com est fermé et TiCom = Nothing
    Set MyCom.TiCom = FermeComEvent
End Sub

Private Function OuvreCom(ComPort As Integer, _
                          Optional ParamCom As String, _
                          Optional DelaiTimer As Long) As Boolean
    On Error GoTo erreur

    'ferme le port com par sécurité s'il est ouvert
    With MyCom
        If Not .TiCom Is Nothing Then _
            If .TiCom.ComOuvert = Ouvert Then .TiCom.ComOuvert = Ferme
    End With

    If ComPort <= 0 Then ComPort = 1
    If ParamCom = "" Then ParamCom = "9600,n,8,1"

    'cet appel est obligatoire pour l'initialisation
    'cela permet plusieurs instances différentes
    Set MyCom.TiCom = InitialiseComEvent

    With MyCom.TiCom
        .ComNumCom = ComPort
        If DelaiTimer <> 0 Then .ComTimer = DelaiTimer
        .ComSettings = ParamCom
        .ComOuvert = Ouvert

        If .ComOuvert = Ferme Then
            'l'erreur est signalée depuis clsComTi
        Else
            OuvreCom = True
        End If
    End With
End Function
```



```

Exit Function

erreur:
    FermeCom
End With
End Function

Sub EvenementCOMTest(Chaine)
'c'est cette procédure qui est référencée depuis ClasseCom pour
gérer la réception des données du port Com
'ici on se contente de copier la chaîne reçue dans la feuille Test

Dim Cel As Range
'éviter les erreurs d'exécution
On Error Resume Next
ChaineduCom = Chaine
'With F2
'Set Cel = .Range("A65536").End(xlUp).Offset(1, 0)
'End With
'Cel = CleanStr(CStr(ChaineduCom))

End Sub

Private Sub Image(Tligne)
Dim Lign, Col, I, Nb, NColor, S, ECT As Integer
Dim Moy, a As Single

' Entrée données dans tableau W
I = 1
For Col = 1 To 7
    For Lign = 1 To 7
        Nb = Asc(Mid$(Tligne, I, 1))
        NColor = Int((Nb - 78) * Gg * G(Col, Lign))
        'Nb doit être compris entre 1 et 56 : Index dans palette de
rouges
        If NColor < 1 Then NColor = 1
        If NColor > 56 Then NColor = 56
        W(Col, Lign) = NColor
        I = I + 1
    Next Lign
Next Col

' Interpolation Pixels mauvais
W(7, 1) = (W(6, 1) + W(7, 2)) / 2
W(2, 1) = (W(1, 1) + W(1, 2)) / 2

'Affichage image
For Col = 1 To 7
    For Lign = 1 To 7
        With Cells(8 - Col, 8 - Lign)
            .Value = W(Col, Lign)
            .Interior.ColorIndex = W(Col, Lign)
        End With
    Next Lign
Next Col

```

```

'Calcul moyenne tableau
S = 0
For Col = 1 To 7
  For Lign = 1 To 7
    S = S + W(Col, Lign)
  Next Lign
Next Col
Moy = S / 49

' Calcul Ecart Type
S = 0
For Col = 1 To 7
  For Lign = 1 To 7
    a = W(Col, Lign) - Moy
    S = S + a * a
  Next Lign
Next Col
ECT = S / 49

With Cells(2, 9)
  .Value = ECT
End With
End Sub

Sub Go()
Dim I, X, J, K, r, G, b As Integer
Dim Lign, Col As Integer

Fin = 0: Offs = 0: Gg = 3

' Palette Rouge_bleu
For I = 1 To 56
  X = 2 * (I - 1)
  r = Int(255 * Sin(255 / 110 * X / 2 * 3.14 / 255))
  b = Int(255 * Cos(255 / 110 * X / 2 * 3.14 / 255))
  G = 0
  ActiveWorkbook.Colors(I) = RGB(r, G, b)
Next I

If OuvreCom(1, "4800,n,8,1") = True Then
Do
  Delai (1) ' obligatoire pour pouvoir sortir boucle
  Ligne = ChaineduCom
  If Len(Ligne) > 49 Then
    Image (Ligne)
    Ligne = ""
  End If
Loop Until Fin = 1
FermeCom
'Range("A1:Z42").Value = ""
End If

erreur:
FermeCom
End Sub

```

```

Sub Arret()
  Fin = 1
End Sub

Sub GainPlus()
  Gg = Gg + 0.1
End Sub

Sub GainMoins()
  Gg = Gg - 0.1
End Sub

Sub Gain()

' Gain pixel - mettre objet uniforme devant caméra

Dim Lign, Col, I, Nb, NColor As Integer

  Do
    Delai (1) ' obligatoire pour pouvoir sortir boucle
    Ligne = ChaineduCom
    Loop Until (Fin = 1) Or (Len(Ligne) > 49)

  I = 1
  For Col = 1 To 7
    For Lign = 1 To 7
      Nb = Asc(Mid$(Ligne, I, 1))
      NColor = (Nb - 78)
      If NColor < 1 Then NColor = 1
      If NColor > 56 Then NColor = 56
      G(Col, Lign) = 56 / NColor
      I = I + 1
    Next Lign
  Next Col

End Sub

```

---

**RESUME : Réalisation d'une caméra infrarouge à bas coût pour application grand public**

---

Mots clés : Détection infrarouge, caméra, bas coût, micro-thermopile, capteur matriciel.

Le rayonnement émis par un humain peut être détecté par un capteur infrarouge travaillant dans la bande 8-14 $\mu$ m. Les caméras basées sur ce type de détecteur, initialement réservées aux applications militaires, sont en développement constant grâce à la demande croissante d'applications commerciales telles que la détection de personnes ou la thermographie. Les détecteurs « non refroidis » constitués de matrices microbolométriques représentent aujourd'hui près de 95% du marché industriel mais demeurent néanmoins trop coûteux pour des applications grand-public. Pour remédier à ce problème, le travail reporté dans ce mémoire est relatif à la conception et la réalisation d'un système de vision infrarouge intégrant un capteur thermique matriciel développé au laboratoire et principalement destiné à la détection de personnes. Contrairement aux matrices bolométriques basées sur une variation de résistance électrique, ce capteur fonctionnant par effet thermoélectrique ne nécessite pas d'alimentation et l'interface électronique associée est très simple. Une attention particulière a été portée sur la diminution des coûts de fabrication par réduction des dimensions des pixels thermoélectriques associés à un objectif équipé d'une lentille de Fresnel en polyéthylène afin de permettre l'implantation de ce type de système dans l'habitat individuel. Des séries de microcapteurs 5x5, 7x7, 10x10 pixels ont été développées durant cette thèse ainsi qu'un imageur complet utilisant une matrice de 7x7 pixels. Le modèle mathématique mis au point durant ce travail montre que les dimensions des capteurs peuvent être encore réduites pour obtenir un nombre de pixels plus conséquent sans augmentation du coût.

---

**ABSTRACT : Realization of a low cost infra-red imaging device for consumer applications**

---

Key words: Infrared detection, imaging device, low cost, micro-thermopile, sensor array.

The thermal radiation emitted by human body can be detected in the 8-14  $\mu$ m range by an infra-red sensor. Cameras imagined from this type of detectors were initially reserved for army personal usage but the market is in a large growth due to commercial applications like thermography or human detection. Thermal detectors microbolometers are the most spread technologies with 95% of the market but some others are showing interesting results as thermoelectrical arrays. This document explains the realisation of an infrared camera that can be used for human detection using a technology developed in the group. Contrary to the bolometric matrices based on a variation of electrical resistance, this sensor working by thermoelectric effect does not require power supply and the associated electronic interface is very simple. A special attention was related to the reduction in the manufacturing costs by decreasing the size of the thermoelectric pixels and using a polyethylene Fresnel lens in order to use this type of system in the individual housing. Series of 5x5, 7x7, 10x10 pixels microsensors were modelled and realized during this thesis as well as a complete imaging device using of 7x7 pixels array. The mathematical model developed during this work shows that a further increase in length reduction is possible if more pixels are needed.