HAL
open science

Conception, réalisation et caractérisation de capteurs infrarouges à thermopiles : application à la détection de présence passive dans l'habitat

Christophe Escriba

To cite this version:

Christophe Escriba. Conception, réalisation et caractérisation de capteurs infrarouges à thermopiles : application à la détection de présence passive dans l'habitat. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2005. Français. NNT : . tel-00088644

HAL Id: tel-00088644

https://theses.hal.science/tel-00088644

Submitted on 3 Aug 2006

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

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

N° d'ordre : Année : 2005

THESE

Présentée

au LABORATOIRE D'ANALYSE ET D'ARCHITECTURE DES SYSTEMES DU CNRS

en vue de l'obtention

du DOCTORAT de l'UNIVERSITE PAUL-SABATIER TOULOUSE III
U.F.R PCA : Physique Chimie Automatique

Spécialité : Conception des Circuits Microélectroniques et Microsystèmes (CCMM)

par

Christophe ESCRIBA

Maître ès Sciences

Conception, Réalisation et Caractérisation de capteurs infrarouges à thermopiles : Application à la détection de présence passive dans l'habitat

---

Soutenue le 5 décembre 2005, devant la Commission d'Examen :

A. DITTMAR	Directeur de recherche CNRS de Lyon	Rapporteurs
D. LECLERCQ	Professeur à l'université de Lille	
F. MONCHOUX	Professeur à l'université de Toulouse III	Examinateurs
J.Y. FOURNIOLS	Professeur à l'INSA de Toulouse	
G. DESTEFANIS	Directeur de recherche CEA Grenoble	Membre invité
D. ESTEVE	Directeur de recherche CNRS de Toulouse	Co-directeur de thèse
E. CAMPO	HDR - Maître de Conférences à l'université de Toulouse II	Directeur de thèse

Rapport L.A.A.S. n°
Cette thèse a été préparée au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS
7, Avenue du Colonel Roche, 31077 Toulouse Cedex.

N° d'ordre : Année : 2005

THESE

Présentée

au LABORATOIRE D'ANALYSE ET D'ARCHITECTURE DES SYSTEMES DU CNRS

en vue de l'obtention

du DOCTORAT de l'UNIVERSITE PAUL-SABATIER TOULOUSE III
U.F.R PCA : Physique Chimie Automatique

Spécialité : Conception des Circuits Microélectroniques et Microsystèmes (CCMM)

par

Christophe ESCRIBA

Maître ès Sciences

Conception, Réalisation et Caractérisation de capteurs infrarouges à thermopiles : Application à la détection de présence passive dans l'habitat

---

Soutenue le 5 décembre 2005, devant la Commission d'Examen :

A. DITTMAR	Directeur de recherche CNRS de Lyon	Rapporteurs
D. LECLERCQ	Professeur à l'université de Lille	
F. MONCHOUX	Professeur à l'université de Toulouse III	Examinateurs
J.Y. FOURNIOLS	Professeur à l'INSA de Toulouse	
G. DESTEFANIS	Directeur de recherche CEA Grenoble	Membre invité
D. ESTEVE	Directeur de recherche CNRS de Toulouse	Co-directeur de thèse
E. CAMPO	HDR - Maître de Conférences à l'université de Toulouse II	Directeur de thèse

Rapport L.A.A.S. n°
Cette thèse a été préparée au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS
7, Avenue du Colonel Roche, 31077 Toulouse Cedex.

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse ont été effectués au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du Centre National de la Recherche Scientifique (LAAS-CNRS) de Toulouse.

Je tiens tout d'abord à remercier Messieurs Jean-claude Laprie et Malik Ghallab, Directeurs successifs du LAAS-CNRS, pour m'avoir accueilli dans ce laboratoire et permis de réaliser mes travaux.

Je remercie également Monsieur Augustin Martinez et Jacques Graffeuil, Directeurs successifs de l'Ecole Doctorale Génie Electrique, Electronique, Télécommunication (GEET), pour m'avoir accepté dans la formation doctorale.

Je souhaite aussi remercier Monsieur Alain Cazarré, Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse III, responsable du DEA Conception des Circuits Microélectroniques et Microsystèmes (CCMM) ainsi que Madame Anne-Marie Gué, responsable du groupe Microsystèmes et Intégration des Systèmes (MIS) au sein duquel j'ai été accueilli.

Il m'est particulièrement agréable de remercier Monsieur Eric Campo, Maître de Conférence HDR à l'université de Toulouse II et Monsieur Daniel Estève, Directeur de recherche au LAAS-CNRS, pour avoir accepté d'assurer la direction scientifique de mes travaux. Je tiens également à leur témoigner toute ma gratitude pour leur compétence scientifique très rigoureuse, leur disponibilité et la pédagogie avec laquelle ils m'ont encadré tout le long de ce travail de thèse.

J'adresse également mes sincères remerciements et toute ma reconnaissance à Monsieur Jean-Yves Fourniols, Professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, je ne saurais dire combien j'ai apprécié sa grande compétence, sa disponibilité et ses qualités humaines. Je le remercie aussi de m'avoir fait l'honneur d'accepter la charge d'examinateur de mes travaux et de participer au jury de thèse.

Je suis également très honoré de la présence au jury de thèse de :

Madame Françoise Monchoux, Professeur à l'université Paul Sabatier de Toulouse III, pour m'avoir fait l'honneur d'examiner et d'accepter la présidence du jury de thèse.

Monsieur André Dittmar, Directeur de recherche au CNRS/INSA de Lyon, pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux en qualité de rapporteur, qu'il soit assuré de ma respectueuse reconnaissance.

Monsieur Didier Leclercq, Professeur à l'université de Lille, pour l'intérêt qu'il a manifesté à l'égard de mes travaux en qualité de rapporteur, qu'il trouve ici le témoignage de ma vive reconnaissance.

Monsieur Gérard Destefanis, Directeur de recherche au Commissariat à l'Energie Atomique (CEA/LETI) de Grenoble, pour avoir accepté de juger le contenu de mes travaux, je lui en suis extrêmement reconnaissant.

J'exprime ici toute mon estime à l'ensemble des membres permanents Enseignants/Chercheurs, Ingénieurs et stagiaires du laboratoire qui m'ont témoigné soutien et sympathie. Sans tous les citer, je pense particulièrement à Corinne Alonso, Laurent Andrieux, Laurent Bary, Christian Bergaud, Henri Camon, Thierry Camps, Bruno Caussinus, Jean Marie Dorkel, Alain Estève, Bruno Estibals, Christian Ganibal, Bruno Jammes, Antoine Marty, Liviu Nicu, François Olivié, Jean-Bernard Pourciel, Carole Rossi, Emmanuel Sheid, Jean-Guy Tartarin, Pierre Temple Boyer, Patrick Tounsi, Christophe Viallon… De plus, je souhaite exprimer ma reconnaissance et le profond respect que je témoigne à Monsieur Jean Simonne qui au cours de mon premier passage au laboratoire a su me transmettre la passion pour la recherche scientifique au travers de son expérience professionnelle et de ses compétences scientifiques très rigoureuses.

Je tiens également à témoigner toute ma gratitude, non seulement à l'ensemble de l'équipe du service Techniques et Equipements Appliqués à la Microélectronique (TEAM), je pense notamment à Monique Benoit, Laurent Bouscayrol, David Colin, Véronique Conédéra, Monique Dilhan, Thierry Do Conto, Pascal Dubreuil, Norbert Fabre, Laurent Jalabert, Sébastien Pinaud, Bernard Rousset, Ludovic Salvagnac et plus particulièrement à Monsieur David Bourrier, mais aussi à Madame Christiane Duprat de l'Atelier Interuniversitaire de Microélectronique (AIME) de Toulouse.

Mes sincères remerciements s'adressent aussi à l'ensemble du personnel des services, Secrétariat, Edition-Documentation et Magasin du LAAS, je pense essentiellement à Nicole Higounet, Christian Berty (pour sa gentillesse et sa disponibilité), Anne Bergez, Daniel Daurat, Arlette Evrard, Eric Le Denmat, Emilie Marchand, Corinne Moulin et Michèle Powell.

Je remercie mes camarades de thèse qui ont contribué à maintenir une ambiance de travail à la fois sympathique et dynamique au cours de ces années, Sylvain, Charles, Thierry, Angel, Rémy, Patrick, Francis, Alexandre, Georges, Mathieu, David, Laurent, Petra, Sylvaine, Benoît, Habib, Sébastien, Stéphane et Cyril.

Mes remerciements chaleureux s'adressent aussi à l'ensemble de mes amis du EEA, Stéphane, Jean-Pierre, Jean-Michel, Arnaud, Armand, Salah, Valérie, Valie, Laetitia, François, Philippe, Bertrand, Régis, Chloé, Sylvie, Gaëlle, Gégé et Joanna.

Je ne saurais terminer sans remercier très profondément mes parents et mon petit frère Jérôme pour m'avoir continuellement soutenu, constamment encouragé dans mes démarches et indéfiniment témoigné affection et tendresse durant toutes ces années, bien plus encore chaque jour. Naturellement, mes respectueux remerciements s'adressent également à mes chers grands parents ainsi qu'à l'ensemble de ma famille.

Enfin, que tous ceux qui se sentent délaissés me pardonnent, il s'agit très certainement d'une omission involontaire tant la liste est longue, remercier nominativement chacune des personnes s'avère une composition délicate à laquelle je me suis exposé.

Christophe Escriba

Table des matières

Introduction générale **1**

1 La détection dans l'infrarouge **5**

Introduction **7**

1.1 Les infrarouges : présentation des fondements scientifiques **9**

1.1.1 Vers la découverte des rayonnements infrarouges 9

1.1.2 Les infrarouges : un rayonnement d'origine thermique 9

1.1.3 L'émission thermique des matériaux 10

1.1.3.1 Considérations physiques d'un corps émissif parfait 10

1.1.3.2 L'émission des corps réels 12

1.1.4 Les méthodes de détection dans l'infrarouge 15

1.1.5 Propriétés spectrales des matériaux infrarouges 16

1.1.5.1 Influence de l'absorption atmosphère 17

1.1.5.2 Les matériaux de l'optique infrarouge 18

1.2 Technologie des détecteurs dans l'infrarouge lointain : Etat de l'art **20**

1.2.1 Les détecteurs quantiques 21

1.2.1.1 Introduction 21

1.2.1.2 Les détecteurs au Tellurure de Mercure et Cadmium HgCdTe 23

1.2.1.3 Les détecteurs à multi puits quantiques semi-conducteurs (QWIP) 24

1.2.1.4 Les détecteurs quantiques de type extrinsèque en Silicium ou Germanium 25

1.2.1.5 Evolutions technologiques des détecteurs refroidis 26

1.2.2 Les détecteurs thermiques 28

1.2.2.1 Introduction 28

1.2.2.2 Les détecteurs pyroélectriques 29

1.2.2.3 Les détecteurs bolométriques micro-usinés 31

1.2.2.4 Les détecteurs thermoélectriques 33

1.2.2.5 Croissances économiques et évolutions technologiques des détecteurs non refroidis .. 37

1.3 Présentation des objectifs de recherche **39**

1.3.1 Problématique liée à la détection des personnes 39

1.3.2 Spécifications techniques préliminaires du détecteur infrarouge passif (DIRP) 40

1.3.3 Choix technologique du capteur pour la détection de présence 41

Conclusion **45**

2 Modélisation d'un détecteur infrarouge thermoélectrique ... 47
Introduction ... 49
2.1 Méthodologie de conception ... 51
2.1.1 Présentation de la conception descendante : Modélisation "Top-down" ... 51
2.1.2 Description conceptuelle du système optronique infrarouge à détection passive ... 52
2.2 Modélisation du système optronique infrarouge à détection passive (DIRP) ... 53
2.2.1 Détermination du rayonnement thermique émis par le corps humain ... 53
2.2.2 Evaluation de la transmission spectrale atmosphérique ... 55
2.2.3 Propriétés du sous système-optique ... 57
2.2.4 Détermination du flux reçu par le capteur ... 60
2.2.5 Paramètres fondamentaux du capteur ... 62
2.2.5.1 Sensibilité électrique du capteur ... 62
2.2.5.2 Puissance équivalente au bruit (*NEP*) ... 63
2.2.5.3 Les sources de bruits ... 63
2.2.5.4 Détectivité ... 63
2.2.5.5 Détectivité spécifique ... 63
2.2.5.6 La constante de temps ... 64
2.2.5.7 Eclairement équivalent au bruit (*NEI*) ... 64
2.2.5.8 Ecart de température équivalent au bruit (*NETD*) ... 65
2.3 Modélisation analytique des capteurs thermopiles micro-usinés sur substrat de silicium ... 65
2.3.1 Présentation des différents modes de transferts thermiques ... 65
2.3.2 Description de la structure retenue pour l'élaboration de la thermopile ... 67
2.3.3 Propriétés thermoélectriques des matériaux ... 68
2.3.3.1 L'effet Seebeck dans les métaux ... 68
2.3.3.2 L'effet Seebeck dans les semi-conducteurs ... 69
2.3.3.3 Le facteur de mérite d'une thermojonction ... 70
2.3.4 Détermination du gradient thermique situé entre les thermojonctions ... 71
2.3.5 Sensibilité, Puissance équivalente au bruit, Détectivité ... 78
2.3.6 Estimation du temps de réponse ... 78
2.4 Etude de l'influence des dimensions du capteur ... 80
2.4.1 Méthodologie d'analyse ... 80
2.4.1.1 Influence de la longueur et largeur des bras de PolySi ... 80
2.4.1.2 Influence des dimensions de l'absorbeur et de la membrane pour W_{poly} fixée ... 82
2.4.1.3 Influence du nombre et des dimensions des bras de PolySi pour une taille d'absorbeur Wa fixée ... 83
Conclusion ... 87

3 Réalisations technologiques des thermopiles ... 89
Introduction ... 91
3.1 Présentation des différentes topologies retenues pour l'élaboration des capteurs thermopiles ... 93
3.1.1 Dimensions de la zone active/scène observée des structures unitaires et matricielles ... 93
3.1.2 Topologies des thermojonctions ... 94
3.1.2.1 Dimensions des ouvertures de contact PolySi/Al ... 94
3.1.2.2 Structures conventionnelles ... 95
3.1.2.3 Structures séries/parallèles ... 95
3.1.4 Dénominations et dimensions des structures réalisées ... 96

3.1.5 Quelques exemples de capteurs unitaires et véhicules tests associés ... 97
3.1.6 Architectures et dimensions des structures matricielles ... 99
3.1.6.1 Matrices 8 × 8 ... 99
3.1.6.2 Matrices 8 × 8 sur membrane unique ... 100
3.1.6.3 Matrices 2 × 8 sur membrane unique ... 101
3.1.6.4 Matrices 3 × 3 ... 101
3.1.7 Présentation du jeu de masques ... 102
3.2 Description des procédés de fabrication technologique des thermopiles ... 103
3.2.1 Réalisation des mires d'alignement ... 104
3.2.2 Réalisation de l'absorbeur ... 105
3.2.3 Réalisation de la membrane ... 107
3.2.4 Elaboration des thermocouples ... 107
3.2.4.1 Réalisation des bras PolySi ... 107
3.2.4.2 Réalisation de l'isolation électrique des thermocouples ... 109
3.2.4.3 Réalisation des ouvertures de contact ohmique ... 109
3.2.4.4 Réalisation des bras en aluminium ... 111
3.2.5 Passivation du capteur ... 113
3.2.6 Libération de la membrane ... 113
3.2.7 Séparation, montage et connectique des puces ... 114
Conclusion ... 117

4 Caractérisation thermoélectrique des thermopiles ... 119
Introduction ... 121
4.1 Caractérisation des résistances électriques ... 123
4.1.1 Mesure des structures tests ... 123
4.1.2 Mesure de l'ensemble des topologies unitaires ... 124
4.2 Détermination du coefficient Seebeck ... 126
4.3 Influence de la géométrie des structures sur le pouvoir thermoélectrique ... 130
4.3.1 Influence du contact ohmique localisé aux extrémités des thermojonctions ... 130
4.3.2 Influence de la topologie des thermocouples ... 131
4.5 Mesure de la constante de temps ... 133
4.6 Conception et réalisation d'un banc de mesure ... 134
4.6.1 La régulation du système thermique ... 134
4.6.2 L'électronique d'instrumentation : un préamplificateur spécifique ... 138
4.6.3 Automatisation du banc de mesure ... 139
4.7 Mesure de la dérive thermique des thermopiles ... 141
4.8 Mesure de la Sensibilité ... 142
4.9 Mesure de l'écart de température équivalent au bruit (*NETD*) ... 143
4.10 Discussion et corrélation préliminaire des mesures avec le modèle ... 144
Conclusion ... 147

Conclusion générale ... 149

Bibliographie ... 153
Annexes ... 159
Liste de figures et des tableaux ... 167

Introduction générale

Le rayonnement infrarouge est le rayonnement spontané émis par les objets, en fonction de leur température. Il est géré par la loi d'émission de la température en T^4 suivant une émittance spectrale dont le maximum évolue selon l'inverse de la température entre le proche IR (1 µm) et l'infrarouge lointain (10 µm).

L'étude des rayonnements IR émis par un objet permet d'accéder à des propriétés intimes de la matière et des surfaces. La recherche IR s'est développée surtout sur la détection des objets chauds, pour des applications essentiellement militaires mais aussi civiles.

La vision nocturne est un axe d'application très important et très moteur dans le développement technologique. En quelques dizaines d'années, on est passé des systèmes très lourds et très coûteux, parce que fonctionnant à basse température 77 K, à des systèmes portables fonctionnant à température ambiante [1]. Des jumelles IR sont aujourd'hui disponibles pour le fantassin, dans son équipement de base. Des matrices IR équipent aussi les missiles qui s'accrochent aux points chauds : sol-air ou air-air. Ces applications militaires ont suscité, en France, dans les années 70 un effort important de recherche sur les matériaux réalisant la détection quantique : InSb, HgCdTe, ... et conduit dans les années 80 à la création d'une activité industrielle importante (exemple de la société SOFRADIR et très récemment de sa filiale ULIS) pour les applications civiles en développant une technologie nouvelle basée sur des matrices bolométriques [2].

Le LAAS-CNRS a été très tôt sollicité pour participer à ces études sur l'infrarouge en intégrant un réseau d'équipes spécialisées avec le laboratoire de physique de Bellevue et avec le LETI/LIR en partenariat avec deux entreprises françaises : la société S.A.T et THOMSON dans les années 70. La filière confiée au LAAS, en collaboration avec S.A.T était la filière InSb dans la fenêtre 3-5 µm, sous forme de capteurs CCD. Cette étude a conduit à la thèse d'Etat de J. Farré [3] et à plusieurs thèses de 3ème cycle visant des applications automobiles [4-5].

Plus récemment, notre laboratoire a exploré des filières nouvelles travaillant à température ambiante et appliquant la piezo-électricité des Polyvinylidène fluoré (PVDF). Cette étude conduite avec le LETI/LIR fut un succès rapide puisque en trois années d'études dans le cadre du Programme Automobile PROMETHEUS, on arrivait à des matrices 32×32, fonctionnelles [6]. Malgré ce succès, la filière en restera là à cause de l'émergence des matrices bolométriques déjà évoquées sur lesquelles on fondait davantage d'espoirs industriels.

Notre travail se situe bien dans le prolongement de tous ces travaux, mais dans une perspective nouvelle liée à la surveillance dans l'habitat. On connaît les développements en cours liés à la sécurisation des biens et à la surveillance des personnes âgées et handicapées. A ce jour, ce secteur s'appuie sur l'usage de détecteurs mono-points, indiquant le passage d'une personne dans le champ. Utilisés isolément ou en réseaux, ces détecteurs permettent un diagnostic et le lancement d'une alarme.

Depuis plusieurs années, le laboratoire est avec la société EDF, promoteur de deux systèmes ERGDOM et PROSAFE [7], [8], l'un sur le confort, l'autre sur la surveillance des personnes âgées, qui utilisent des réseaux de détecteurs commerciaux de type piezo-pyro électriques. Ces travaux font apparaître deux limitations :

- l'impossibilité de détecter lorsque la personne à surveiller est immobile,
- la nécessité dans certains cas, d'avoir des informations plus riches que la simple présence : direction des mouvements, estimation du volume de l'objet, estimation de la distance …

Parrallélement à ces constatations et à l'occasion d'une collaboration européenne (Projet IMPACT/Université de Barcelone), l'opportunité est née de développer une filière originale de capteurs thermoélectriques. Nous verrons, dans le chapitre 1, l'intérêt de cette filière : le fait est que nous avons lancé cette étude en 2001, avec l'objectif de faire une analyse critique et de fournir des premiers échantillons utilisables dans l'application à l'habitat.

Notre travail de thèse porte donc sur la : Conception, Réalisation et Caractérisation de Capteurs Infrarouges à Thermopiles : Application à la Détection de Présence Passive dans l'Habitat.

Il s'est déroulé au sein du groupe MIS[1], chargé de développer en autres de nouvelles générations de microsystèmes.

Les dispositifs sont destinés à s'inclure dans des réseaux de capteurs pour l'habitat mais nous sommes aussi intéressés pour des applications robotiques : un programme PICASSO, a été lancé entre les groupes RIA[2] et MIS pour l'imagerie bi-spectrale (visible/infrarouge).

Selon les recommandations générales, concernant la conception des microsystèmes, nous avons fait un travail assez approfondi de modélisation avant d'engager les étapes de réalisations et de tests. Ceci explique le plan de notre présentation.

Dans le premier chapitre, nous présenterons les concepts scientifiques de la voie infrarouge et étudierons les différentes méthodes de détection. Au terme d'une investigation sur les principaux matériaux permettant la détection IR et compte tenu de la problématique et des spécifications que nous établirons, nous discuterons et justifierons le choix technologique effectué pour les capteurs thermoélectriques.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation complète du système de détection infrarouge. Pour cela, nous expliciterons notre démarche de conception et détaillerons l'ensemble des modèles analytiques développés pour l'évaluation du système depuis la scène jusqu'au capteur.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les différentes topologies de capteurs retenus à réaliser et nous détaillerons les différentes étapes du processus technologique nécessaires à la fabrication de ces capteurs.

Le quatrième et dernier chapitre sera consacré à la caractérisation des capteurs réalisés et à la corrélation des résultats pratiques avec ceux issus du modèle. Pour cela, nous présenterons le banc de mesures développé afin d'évaluer le comportement thermique de nos structures.

---

[1] MIS : Microsystèmes et Intégration des Systèmes.

[2] RIA : Robotique Intelligence Artificielle.

Chapitre 1

La Détection dans l'Infrarouge

Sommaire

Introduction **7**

1.1 Les infrarouges : présentation des fondements scientifiques **9**

1.1.1 Vers la découverte des rayonnements infrarouges 9

1.1.2 Les infrarouges : un rayonnement d'origine thermique 9

1.1.3 L'émission thermique des matériaux 10

1.1.3.1 Considérations physiques d'un corps émissif parfait 10

1.1.3.2 L'émission des corps réels 12

1.1.4 Les méthodes de détection dans l'infrarouge 15

1.1.5 Propriétés spectrales des matériaux infrarouges 16

1.1.5.1 Influence de l'absorption atmosphère 17

1.1.5.2 Les matériaux de l'optique infrarouge 18

1.2 Technologie des détecteurs dans l'infrarouge lointain : Etat de l'art **20**

1.2.1 Les détecteurs quantiques 21

1.2.1.1 Introduction 21

1.2.1.2 Les détecteurs au Tellurure de Mercure et Cadmium HgCdTe 23

1.2.1.3 Les détecteurs à multi puits quantiques semi-conducteurs (QWIP) 24

1.2.1.4 Les détecteurs quantiques de type extrinsèque en Silicium ou Germanium 25

1.2.1.5 Evolutions technologiques des détecteurs refroidis 26

1.2.2 Les détecteurs thermiques 28

1.2.2.1 Introduction 28

1.2.2.2 Les détecteurs pyroélectriques 29

1.2.2.3 Les détecteurs bolométriques micro-usinés 31

1.2.2.4 Les détecteurs thermoélectriques 33

1.2.2.5 Croissances économiques et évolutions technologiques des détecteurs non refroidis .. 37

1.3 Présentation des objectifs de recherche **39**

1.3.1 Problématique liée à la détection des personnes 39

1.3.2 Spécifications techniques préliminaires du détecteur infrarouge passif (DIRP) 40

1.3.3 Choix technologique du capteur pour la détection de présence 41

Conclusion **45**

Introduction

Les progrès récents des microtechnologies offrent aujourd'hui la possibilité de réaliser de nouveaux microsystèmes monolithiques multifonctions de faibles dimensions et d'augmenter leurs densités d'intégration sur une même plaquette. Ce sont principalement ces avancées technologiques, matérialisées notamment par l'exploitation massive des techniques de micro-usinage et les dépôts de couches minces que nous souhaitons exploiter pour proposer des solutions à faibles coûts pour les applications dédiés à la détection de personnes dans l'habitat. C'est une entrée essentielle dans la conduite des systèmes de confort, de sécurité, d'économie d'énergie et de surveillance. Pour réaliser ces fonctions, les systèmes nécessitent des capteurs performants, fiables et bon marché.
Nous avons dans l'introduction générale, rappelé l'historique dans lequel s'intègre notre travail qui remonte aux années 70. Plus précisément, c'est pour des applications à l'habitat intelligent [9], que nous avons lancé ce travail de thèse. Notre groupe a en effet développé avec la société EDF R&D des procédures de commandes (ERGDOM) et de surveillance (PROSAFE) qui impliquent de nouveaux efforts sur les détecteurs de présence.

Dans les années récentes, l'expérience acquise dans les collaborations LAAS/EDF porte sur l'usage de détecteurs pyroélectriques. Actuellement, ils sont très largement diffusés, toutefois, les insuffisances rencontrées dans le projet ERGDOM sur site réel ont mis en évidence quelques faiblesses de détection concernant les surveillances nocturnes lorsqu'il s'agissait de confirmer la présence des usagers endormis [10]. C'est donc la raison essentielle qui a amené le LAAS et EDF à engager de nouvelles études [11] sur la conception et la réalisation d'un système de détection infrarouge passif de nouvelle génération. Le cahier des charges en est simple puisqu'il est celui des performances et des coûts existants des capteurs pyroélectriques avec des fonctionnalités nouvelles : détecter des personnes immobiles, enrichissement des détecteurs par la fusion multisensorielle.

Avant de nous intéresser aux aspects technologiques, dans ce chapitre nous commencerons par rappeler de manière non exhaustive les fondements élémentaires des rayonnements infrarouges, ceci afin de bien situer le contexte dans lequel s'inscrit notre travail. Ensuite, nous présenterons les solutions technologiques permettant la détection IR, les principes de fonctionnement de chaque type de capteur et discuterons de leurs différentes évolutions.

Nous présenterons les objectifs de recherche en nous appuyant sur la problématique liée à la détection des personnes et nous formulerons les spécifications techniques de notre projet.

Enfin, nous terminerons ce chapitre en décrivant la solution technologique retenue pour l'élaboration du système de détection.

1.1 Les infrarouges : présentation des fondements scientifiques

1.1.1 Vers la découverte des rayonnements infrarouges

Bien que l'existence du miroir convexe conçu par Archimède fut utilisé par les Grecs pour concentrer les rayons solaires sur les matières combustibles des navires romains, ce n'est qu'au début du XVIIIe siècle que la théorie chromatique d'Isaac Newton (1642-1727) démontra que la lumière blanche était la combinaison de sept lumières de couleur qui s'échelonnent du violet jusqu'au rouge. Ce fut au cours d'expériences dédiées à la mesure de température propre à chaque couleur élémentaire du spectre solaire que les infrarouges furent mis en évidence en 1800 par Sir William Herschel (1738-1822), compositeur et astronome amateur qui découvrit par ailleurs la planète Uranus. En effet, c'est durant ces expériences (figure 1) qu'il démontra au moyen de thermomètres à mercure, placés dans le spectre obtenu par un prisme de verre dispersif, que la chaleur était plus intense du côté rouge du spectre y compris dans la zone où la lumière était en dehors de l'extrémité rouge, W. Herschel baptisa ce type de chaleur : *rayons calorifiques*. C'était la première découverte montrant que la chaleur pouvait se transmettre sous une forme de rayonnements invisibles à l'œil humain qui de nos jours sont connus sous la dénomination *de rayons infrarouges*[1]. On notera que cette découverte devança celle des autres types de rayonnements invisibles. Par la suite, il faudra attendre le milieu du XIXe siècle avec l'interprétation des phénomènes électromagnétiques de James Clark Maxwell (1831-1879) et la notion de transport d'énergie dans le vide sous forme d'ondes pour assimiler la lumière à un rayonnement électromagnétique dont la fréquence est caractéristique de la couleur.

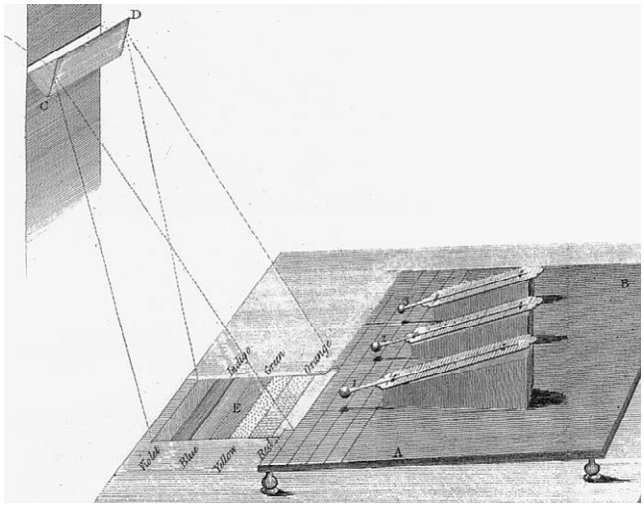


Figure 1.1 : Planche originale de l'expérience de Sir W. Herschel (1800).

1.1.2 Les infrarouges : un rayonnement d'origine thermique

Tout corps dont la température T diffère du zéro absolu[2] émet et absorbe un rayonnement électromagnétique issu d'une part, de son caractère physico-chimique et d'autre part, de l'action de mécanismes intrinsèques d'énergies vibratoires des molécules. La libération d'énergie sous forme de rayonnements électromagnétiques est directement liée à l'accélération de charges électriques et donc à l'agitation moléculaire. La température détermine ainsi la

[1] Du latin *infra* signifiant *au-delà de*.

[2] 0 K = -273,16 °C.

quantité de particules élémentaires libérées qui seront transportées sous la forme de quanta d'énergie[3] et dont la longueur d'onde d'émission λ est donnée par la **relation d'Einstein**.

$$E = h\,\nu = \frac{h\,c_0}{\lambda} \tag{1.1}$$

avec h la constante de Planck : 6,626179.10^{-34} J.s,
c_0 la célérité de la lumière : 299792458 m.s^{-1},
ν la fréquence d'émission d'une particule émise (en Hz),
λ la longueur d'onde d'émission (en µm).

1.1.3 L'émission thermique des matériaux

1.1.3.1 Considérations physiques d'un corps émissif parfait

Comme nous venons de l'énoncer, un rayonnement électromagnétique émis par une source est directement lié à sa température propre. Dès lors, en s'appuyant sur le concept du **corps noir**[4], nous pouvons en déterminer l'intensité rayonnée. Par hypothèse, un corps noir est parfaitement capable d'absorber l'intégralité des rayonnements incidents [12], ceci indépendamment de leur longueur d'onde et de leur direction de propagation, mais aussi capable d'émettre une énergie rayonnante isotrope égale à la quantité absorbée selon la **loi de Planck** (eq. 1.2). Plus particulièrement, cette loi décrit la puissance rayonnée par unité de surface de corps noir et unité de longueur d'onde :

$$\frac{dR_{CN}(\lambda,T)}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5\left[exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)-1\right]} \tag{1.2}$$

avec : - $dR_{CN}(\lambda,T)/d\lambda$: émittance ou exitance spectrale du corps noir (W.cm^{-2}.µm^{-1}).
- h : la constante de Planck (6,0626176.10^{-34} J.s).
- k : la constante de Boltzmann (1,380662.10^{-23} J.K^{-1}).
- λ : la longueur d'onde (µm).
- T : la température du corps noir (K).

Le réseau de courbes de la figure 1.2 souligne la dépendance de l'émittance spectrale du corps noir vis-à-vis de la température et de la longueur d'onde. Nous observons que l'émittance spectrale tend vers 0 lorsque la longueur d'onde tend vers 0 ou vers l'infini et passe par un maximum unique, notée $R_{\lambda m}$ que l'on détermine selon l'équation (eq. 1.3):

$$R_{\lambda m} = 1,286.10^{-15}\,T^5 \qquad (\mathrm{W.cm^{-2}.\mu m^{-1}}) \tag{1.3}$$

[3] Couramment appelé photons.

[4] Le corps noir est un modèle physique établi en 1900 par Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947) qui formule, sur des fondements de thermodynamiques statistiques, la relation entre l'intensité rayonnante d'une source portée à la température T et sa longueur d'onde λ.

Ainsi, pour chaque température maintenue constante, le déplacement de ce maximum est associé à une longueur d'onde. Cette constatation est décrite selon la **loi de Wien** (eq. 1.4) qui relate la longueur d'onde maximale λ_m que peut émettre un corps en fonction de sa température. En outre, le fait que le déplacement de ce pic spectral tend vers les faibles longueurs d'ondes alors que la température augmente, explique pourquoi un corps chauffé émet d'abord dans le domaine des infrarouges et ne devient visible, qu'aux températures suffisamment élevées.

$$\lambda_m = \frac{2899}{T} \qquad (\mu m) \tag{1.4}$$

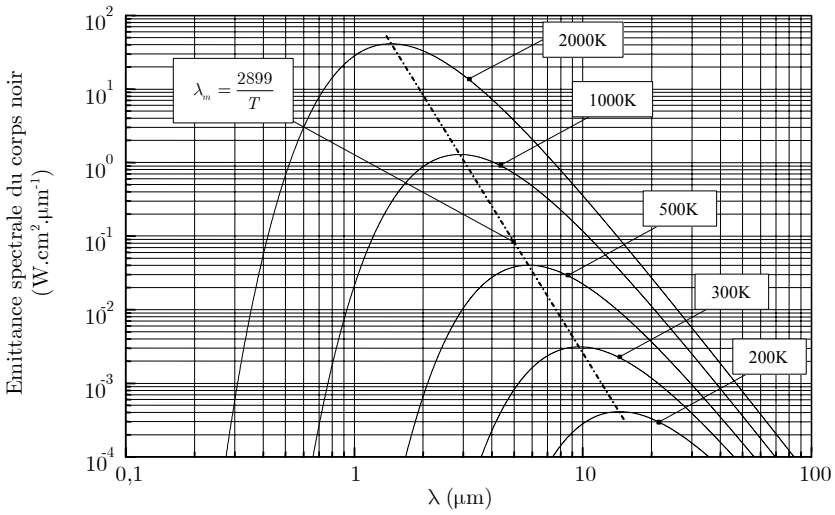


Figure 1.2 : Emittance spectrale du corps noir en fonction de la température.

Pour une température choisie, nous remarquons que la quantité d'émission spectrale centrée autour du maximum d'émission de chacune des courbes se situe dans une gamme de longueurs d'ondes finies. Ainsi, pour désigner l'appartenance des longueurs d'ondes à un domaine bien spécifique d'application (médical, télécommunication, ...), il est d'usage de recourir à une classification de ces dernières. Ceci est représenté sur la figure 1.3 où sont référencés les différents spectres de rayonnements électromagnétiques.

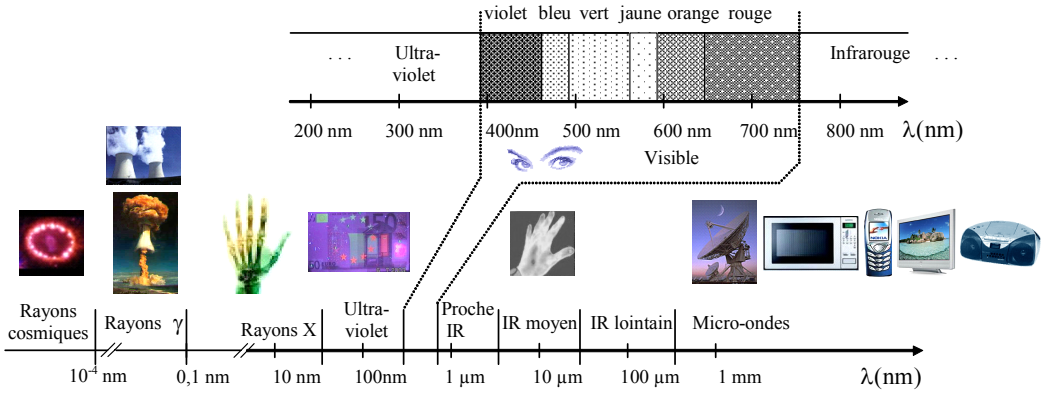


Figure 1.3 : Spectre des rayonnements électromagnétiques.

Entre 0,4 et 0,77 microns, c'est le spectre visible de l'œil humain. Cette plage est bordée par les ultra-violets (0,03 et 0,4 microns) et les infrarouges (0,78 et 100 microns). De surcroît, nous remarquons que le spectre des infrarouges correspond au domaine d'émission des corps dont la plage de température concorde à celle de la couche superficielle du globe terrestre (T=300K à température ambiante). Dès lors, nous distinguerons le rayonnement infrarouge du rayonnement visible. Le premier est directement émis par la matière alors que le second, comparé à l'ensemble du spectre électromagnétique est quasiment la conséquence directe de la conjugaison des phénomènes de réflexion et de diffusion d'une source lumineuse d'origine solaire ou artificielle à la surface d'un objet.
Ainsi, en fonction de la gamme des longueurs d'ondes à détecter et du type de capteur utilisé dans un système de détection infrarouge, le spectre des rayonnements infrarouges est réparti en quatre bandes :

- le proche infrarouge, (*NIR*[5] *et SWIR*[6]), séparé en deux bandes spectrales dont les longueurs d'ondes correspondent à [0,78 µm-1 µm] et [1 µm-3 µm],
- le moyen infrarouge, (*MWIR*[7]), qui correspond aux longueurs d'ondes [3 µm-5 µm],
- le lointain infrarouge, (*LWIR*[8]), plus particulièrement la bande [7 µm-14 µm],
- l'extrême infrarouge, (*VLWIR*[9]), définit pour les longueurs d'ondes supérieures à 20 µm.

1.1.3.2 L'émission des corps réels

Dans leur environnement, l'émission thermique des matériaux qui nous entoure, usuellement qualifiés de corps réels par opposition aux corps noir parfaits, n'est pas exactement telle que nous l'avons explicité. Lorsqu'un corps est soumis à un éclairement énergétique incident E_i, indépendamment de son état (solide, liquide ou gazeux), l'interaction avec la matière conduit classiquement à une partition de celui-ci en trois composantes qui sont (figure 1.4) :

- l'éclairement réfléchie par la surface du matériau : E_r,

- l'éclairement absorbé dans le volume du matériau : E_a,

- l'éclairement transmis au travers du matériau : E_t.

[5] NIR : Near infrared.

[6] SWIR : Short wavelength IR.

[7] MWIR : Medium wavelength IR.

[8] LWIR : Long wavelength IR.

[9] VLWIR : Very long wavelength IR.

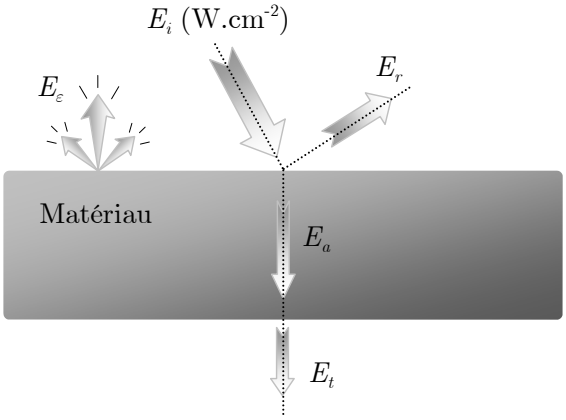


Figure 1.4 : Bilan énergétique au sein d'un matériau.

On doit donc définir les coefficients de réflexion, d'absorption et de transmission, notés respectivement ρ, a, τ qui en toute rigueur, sont dépendants de la température, de l'état de surface du matériau considéré et plus particulièrement de la longueur d'onde λ laquelle détermine le caractère sélectif selon les expressions suivantes :

- le coefficient de réflexion : $\rho(\lambda) = \dfrac{E_r}{E_i}$ (1.5)
- le coefficient d'absorption : $a(\lambda) = \dfrac{E_a}{E_i}$ (1.6)
- le coefficient de transmission : $\tau(\lambda) = \dfrac{E_t}{E_i}$ (1.7)

Ainsi, en écrivant le bilan énergétique, la conservation de l'énergie impose :

$$\rho(\lambda) + a(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \tag{1.8}$$

Toutefois, lorsqu'un corps est à l'équilibre thermodynamique, l'énergie restituée au milieu sous la forme de réflexion, transmission ou bien d'émission thermique est nécessairement égale à l'énergie accumulée par absorption [13]. C'est pourquoi la **loi de Kirchhoff** établit que $a(\lambda) = \varepsilon(\lambda)$ du fait que l'absorption *a(λ)* est compensée par le terme d'émission ε(λ), ceci afin de satisfaire la conservation du bilan énergétique. Dès lors, en considérant des valeurs particulières de ces coefficients, on détermine l'existence de certains corps qui reflètent plus ou moins la réalité physique :

- les corps parfaitement réflecteurs sont caractérisés par : $\rho(\lambda) = 1$ et $\varepsilon(\lambda) = \tau(\lambda) = 0$,
- les corps brillants sont caractérisés par : $\rho(\lambda)$ élevé et $\varepsilon(\lambda)$ presque nul,
- les corps parfaitement transparents sont caractérisés par : $\rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$ et $\varepsilon(\lambda) = 0$,
- les corps opaques sont caractérisés par : $\varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) = 1$ et $\tau(\lambda) = 0$,
- les corps noirs (parfaitement absorbants), sont caractérisés par : $\varepsilon(\lambda) = 1$ et $\rho(\lambda) = \tau(\lambda) = 0$,
- les corps gris sont caractérisés par : $\varepsilon(\lambda) = \rho(\lambda) =$ constante.

A titre d'exemple, la figure 1.5 présente la distribution de l'émissivité spectrale de la peau humaine [14]. Globalement, on remarque qu'à partir de 6 µm de longueur d'onde, l'émissivité de la peau est indépendante de λ, cela pour des valeurs supérieures à 6 µm où l'émissivité ε(λ) est à peu près égale à 0,98 ± 0,01. D'autre part, en admettant que les émissivités de la peau et de l'eau peuvent être confondues en raison de leur proche valeur à λ = 10 µm, nous constatons (figure 1.6) que le coefficient d'émissivité est quasiment constant jusqu'à un angle $\theta = 45°$, angle formé entre la normale à la surface d'un corps et la direction d'émission.

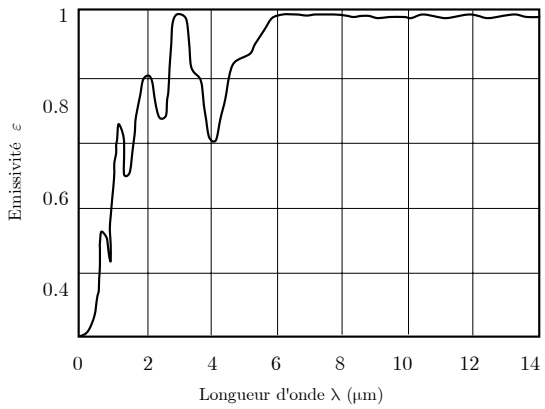


Figure 1.5 : Emissivité spectrale de la peau humaine.

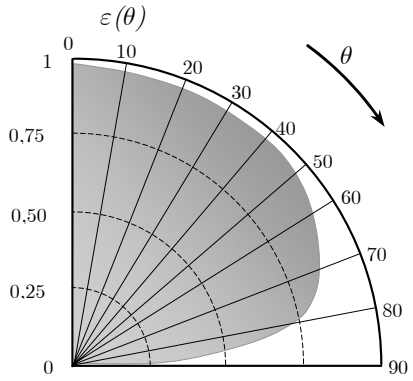


Figure 1.6 : Emissivité de l'eau à λ=10 µm en fonction de la direction.

Nous voyons ici que les corps réels se différencient du corps noir, plus particulièrement par la notion d'émissivité spectrale de surface ε, grandeur sans dimension dont la valeur est comprise entre 0 et 1 qui quantifient la qualité d'émission radiative d'un flux d'origine thermique [15]. Pour rendre compte de son influence, une interprétation rationnelle consiste à déterminer le ratio d'énergie rayonnante d'un corps quelconque à une température T, noté $dR(\lambda,T)/d\lambda$, sur celle d'un corps noir $dR_{CN}(\lambda,T)/d\lambda$ à la même température (eq. 1.9).

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{\dfrac{dR(\lambda,T)}{d\lambda}}{\dfrac{dR_{CN}(\lambda,T)}{d\lambda}} \tag{1.9}$$

Les propriétés d'émission des corps réels étant définies par rapport à celles du corps noir, des valeurs approximatives d'émissivité de différents matériaux sont données dans le tableau 1.1. Ainsi, connaissant la température d'un objet et son émissivité au moyen des coefficients répertoriés, un calcul permettra d'estimer précisément la quantité d'énergie rayonnée par celui-ci.

Matériaux non métalliques	Température (°C)	Emissivité ε	Métaux		Température (°C)	Emissivité ε
Béton	20	0,92	Acier	galvanisé	20	0,28
Bois	20	0,5-0,7		rouillé	20	0,69
Noir de fumée	20-400	0,95-0,97		poli	100	0,07
Ciment	20	0,54	Al	Sf. brute	20-50	0,06-0,07
Cuir tanné	20	0,75-0,80		anodisé	100	0,55
Peau humaine	32	0,98		poli	50-100	0,04-0,06
Papier blanc	20	0,7-0,9	Cu	oxydé	50	0,70
jaune	20	0,72		poli	100	0,03
rouge	20	0,76	Au	poli	100	0,02
bleu	20	0,84	Tungstène		3300	0,04
vert	20	0,85	Chrome	poli	50	0,1
noir	20	0,9	Etain	poli	20-50	0,04-0,06

Tableau 1.1 : Emissivité moyenne sur la bande 8-12 μm de différents matériaux.

1.1.4 Les méthodes de détection dans l'infrarouge

Les systèmes de détection optique détectent l'énergie des rayonnements sur la gamme des longueurs d'ondes qui s'échelonnent de l'ultraviolet aux infrarouges. Les technologies utilisées pour visualiser une scène thermique, détecter une défaillance ou plus particulièrement détecter la présence d'une personne, reposent essentiellement sur deux méthodes fondamentales de détection infrarouge, communément qualifiée de détection active ou passive [16] :

La *détection active*, utilise un émetteur IR et un récepteur lequel décèlera la coupure du faisceau infrarouge lors du passage de l'objet à détecter ou bien décèlera les radiations réfléchies par la cible spécifique à détecter (figure 1.7 -a-). Cette méthode est très exploitée industriellement pour la détection d'obstacles, la visualisation de scène thermique dans le proche infrarouge [0,78 - 1 μm] ou bien encore la caractérisation de défauts localisés sous la surface des objets dans le moyen infrarouge [3 - 5 μm]. Dans les applications domestiques, ce principe de détection est principalement décliné sous la forme de barrières infrarouges ou de systèmes à balayage. On notera que ce type de détection est aussi très utilisé dans les systèmes anti-intrusions d'une habitation ou la protection de sites sensibles (zones militaires, banques, musées ...).

La *détection passive*, fait appel au rayonnement thermique naturel émis par les objets. Ce système repose sur des phénomènes d'absorption radiative directement émis par la source et ce, dans un champ de vision (figure 1.7 -b-). Le détecteur générera un signal électrique de sortie relatif aux variations infrarouges intrinsèques de la cible. Par analogie au principe précédent, nous remarquons que la détection passive s'affranchit de la partie émettrice *artificielle* au profit d'une source *naturelle*.

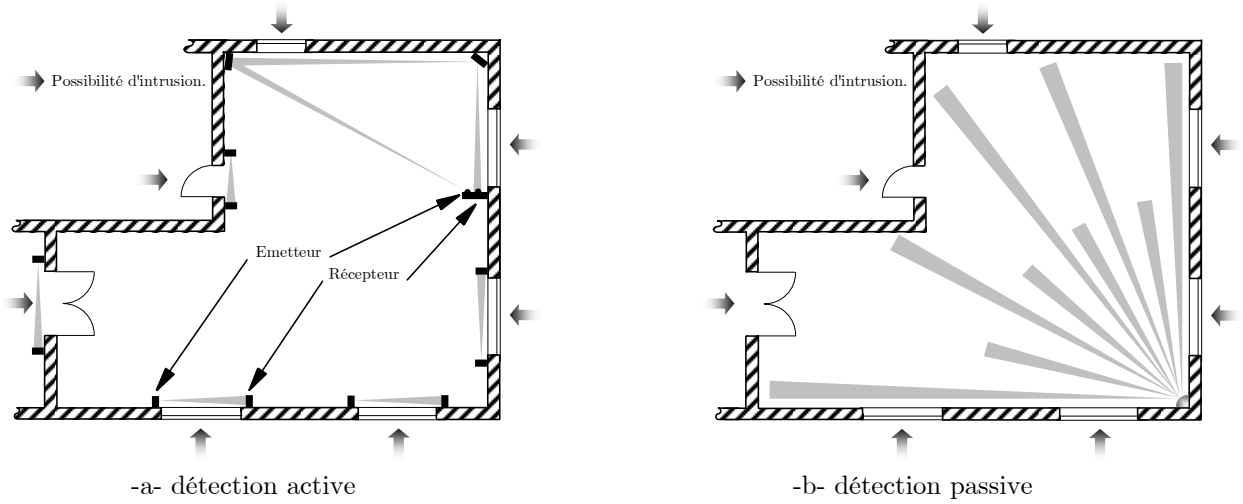


Figure 1.7 : Système de détection.

Bien que les performances obtenues par un système actif soient largement démontrées, la détection d'un franchissement de zones pouvant s'étendre jusqu'à 150 mètres, cette méthode peut s'avérée dans certaines situations une source de complication. En effet, dans une habitation domestique, la multiplication de ce type de détecteurs peut atteindre un degré de complexité élevé, un coût onéreux et s'avéré inesthétique. C'est pourquoi, il est préférable d'opter pour un système à détection passive. De surcroît, en terme d'insertion, nous estimons que c'est au système de détection de s'adapter à l'environnement d'un habitacle quelque soit sa configuration et non l'inverse.

1.1.5 Propriétés spectrales des matériaux infrarouges

La vocation d'un système de détection IR passif (DIRP) est de mesurer la distribution spatiale et l'évolution temporelle des rayonnements infrarouges émis par chacun des objets contenus dans un champ de vision. Comme le montre la figure 1.8 qui rend compte des éléments constitutifs d'un tel système, nous voyons que les différents flux matérialisant les sources de la scène sont éloignés du capteur et se trouvent altérés en raison du cheminement spécifique qu'ils suivent au travers de l'atmosphère et des optiques nécessaires au système [14].

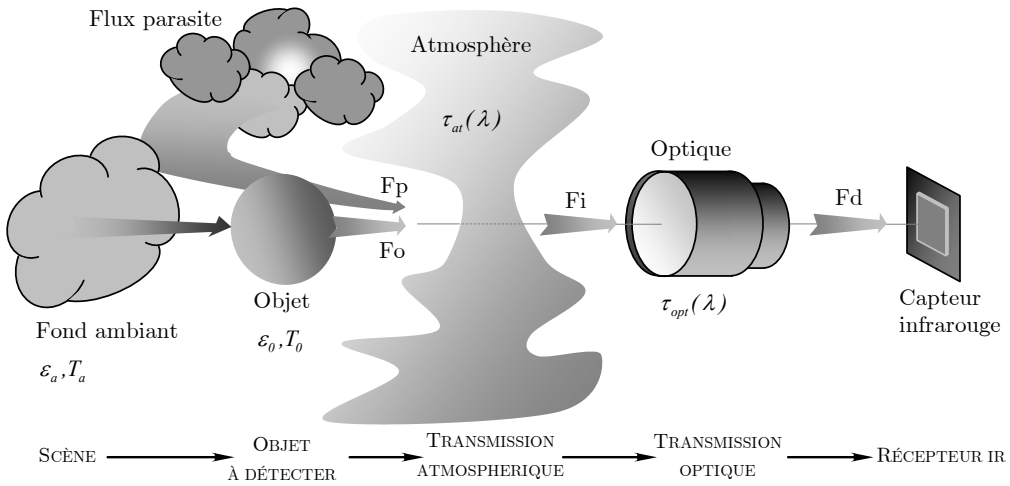


Figure 1.8 : Eléments mis en jeu dans la détection infrarouge passive.

C'est pourquoi les performances propres de tout système de détection optronique sont non seulement fixées par ses caractéristiques technologiques mais aussi liées à l'influence du milieu dans lequel il se trouve. Aussi, lors de la conception du système DIRP, il est nécessaire de tenir compte de l'influence que peuvent engendrer le parcours atmosphérique et les différents systèmes optiques, chacun respectivement caractérisés par leur coefficient de transmission spécifique $\tau_{atm}(\lambda)$ et $\tau_{opt}(\lambda)$.

1.1.5.1 Influence de l'absorption atmosphérique

Si dans le domaine visible l'influence que peut exercer l'atmosphère sur un rayonnement lumineux est pratiquement négligeable, il en est autrement dans le spectre des infrarouges. En effet, lorsque l'énergie émise sous la forme de rayonnements infrarouges traverse un milieu constitué de molécules gazeuses et de particules - c'est le cas de l'atmosphère - il résulte des phénomènes d'atténuations sélectives engendrés par ces constituants au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source. De ce fait, les altérations exercées par l'atmosphère sur les rayonnements IR émis par un objet à détecter représentent indéniablement un réel problème dont il faut tenir compte (figure 1.9). En effet, ce sont les composantes de l'atmosphère telles que le dioxyde de carbone (CO_2), l'ozone (O_3) et la vapeur d'eau (H_2O) qui sont majoritairement à l'origine de ces phénomènes indésirables. D'une manière générale, il apparaît des bandes quasi-transparentes aux infrarouges, mais aussi des bandes d'absorption principalement dues à la présence de vapeur d'eau et de gaz carbonique.

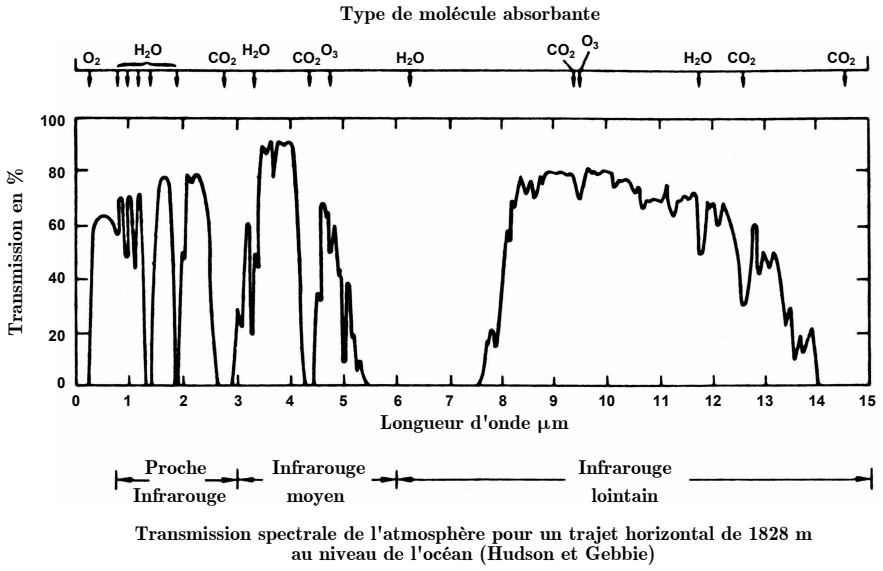


Figure 1.9 : Evolution de la transmission spectrale de l'atmosphère.

On remarque que certaines bandes spectrales, énumérées ci-après, sont impérativement à éviter car le coefficient de transmission y est nul et ce, même pour de très faibles épaisseurs traversées.

- Bande I : 0 à 0,2 µm, absorption par O_2,
- Bande II : 1,4 et 1,5 µm, absorption par H_2O,
- Bande III : 1,6 à 1,8 µm, absorption par H_2O,
- Bande IV : 2,5 à 2,8 µm, absorption par CO_2et H_2O,
- Bande V : 4,2 à 4,4 µm, absorption par CO_2,

- Bande VI : 5,5 à 7,5 µm, absorption par H_2O,
- Bande VII : Au delà de 14 µm, absorption par CO_2.

Concernant les autres bandes, appelées *fenêtres de transmission atmosphérique*, nous les avons déjà présentées (cf. §1.1.3.1). Elles sont également, dans une moindre mesure dépendantes de la concentration des différents gaz de l'atmosphère, affectées par l'épaisseur, la température et la pression atmosphérique. En pratique, chacune d'entre elles est utilisée pour détecter les corps dont le rayonnement y est maximal. De ce fait, l'utilisation de la bande correspondant aux infrarouges lointains (LWIR, bande 7 – 14 µm) s'impose naturellement pour des applications de sécurité et de confort puisqu'elle correspond exactement au domaine (λ=10 µm) où le maximum de l'énergie est rayonné par les corps à température ambiante (300 K).

1.1.5.2 Les matériaux de l'optique infrarouge

Tout comme pour le visible, les éléments conceptuels nécessaires au développement d'un système DIRP diffèrent peu de ceux dédiés aux systèmes actifs. En fonction de l'application souhaitée, tous deux reposent entre autres sur l'utilisation d'un ensemble de dispositifs optiques tels que les fenêtres, les lentilles et les miroirs, caractérisés par leur aptitude à réfléchir et/ou à réfracter un rayonnement électromagnétique. Ceci conforte le fait qu'il n'existe pas de différences majeures dans les règles de conception entre un système optronique fonctionnant dans le visible et dans l'infrarouge. Outre le choix de l'élément sensible, la conception d'un système DIRP est fortement contrainte par le nombre limité de matériaux optiques appropriés au domaine IR comparé à ceux disponibles pour la gamme du visible. En effet, ces derniers ont la particularité de ne pas transmettre les rayonnements électromagnétiques pour des longueurs d'ondes supérieures à 2,5 µm. C'est pourquoi, il est nécessaire de recourir à des matériaux spécifiquement adaptés aux infrarouges [17]. Aussi, pour rendre compte de leurs propriétés optiques, la figure 1.10 montre le pouvoir de transmission des principaux matériaux disponibles sur le marché : CaF_2 (fluorure de calcium), MgF_2 (fluorure de magnésium), ZnS (sulfure de zinc fritté), ZnSe (séléniure de zinc), $A_{S2}S_3$(trisulfure d'arsenic), etc.

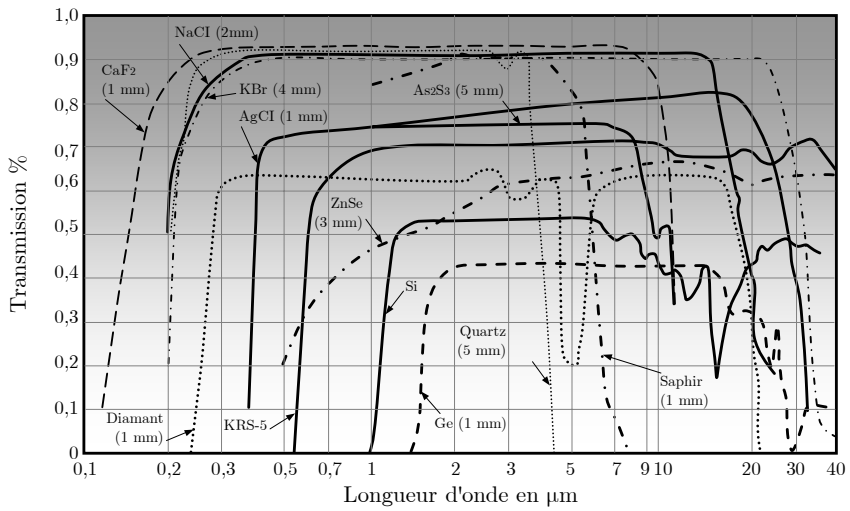


Figure 1.10 : Transmission spectrale des principaux matériaux pour l'infrarouge.

Non seulement le choix d'une optique est principalement fixé par son pouvoir sélectif mais aussi par les critères d'exigences requis par le système DIRP qu'elle doit satisfaire. Par exemple, l'environnement dans lequel le système est destiné à être utilisé et son mode d'utilisation sont autant de facteurs qui déterminent les caractéristiques physiques d'une optique et implicitement son coût. Comme le montre le tableau 1.2, le coût d'une optique est d'autant plus élevé que ses propriétés optiques, mécaniques, thermiques et chimiques sont performantes.

Matériaux	Domaine spectral (µm)	Température d'utilisation °C	Résistance chimique	Tenue mécanique (dureté Knoop)	Coût Euro (HT)
CaF_2	0,5 - 8	600	Insoluble dans l'eau, bonne résistance aux acides et alcalins.	158	300 à 890
MgF_2	0,2 - 6	500	Légèrement soluble dans l'eau.	415	330 à 440
ZnSe	0,6 - 16	300	Insoluble dans l'eau, bonne résistance aux solvants organiques et acides.	120	400 à 990
Ge	3 - 5, 8 - 12	300	Insoluble dans l'eau, soluble dans l'acide sulfurique.	780	400 à 915

Tableau 1.2 : Propriétés des matériaux optiques utilisés dans l'infrarouge.

Nettement moins coûteuse, une autre alternative consiste à profiter des matériaux plastiques tels que les films de polyéthylène et ces dérivés (plexiglas, polyester, polytétrafluoréthylène). Ils sont présentés sous la forme de lentilles obtenues par moulage, constituées d'un (ou plusieurs) disque central bombé vers l'extérieur et entouré de sillons concentriques. De faible poids et d'encombrement réduit, elles ont l'avantage, comme le montre la figure 1.11, de bien transmettre les rayonnements dans l'infrarouge.

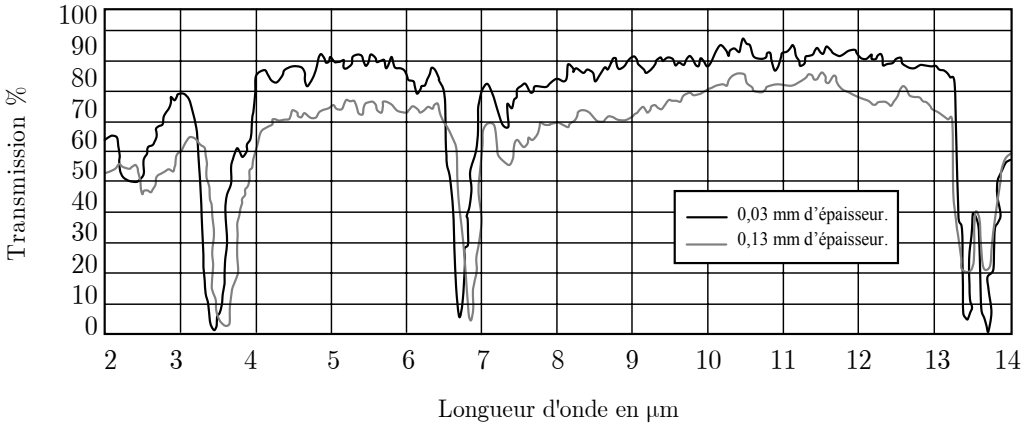


Figure 1.11 : Transmission spectrale du polyéthylène dans l'infrarouge.

Outre les performances du pouvoir de transmission spectrale dans l'IR et malgré des propriétés mécaniques très insuffisantes, ces optiques plastiques, plus communément qualifiées de lentilles de *Fresnel*, offrent en fonction de leur géométrie, la possibilité de surveiller des zones bien spécifiques. A titre d'exemple, la figure 1.12 montre différentes topologies de lentilles proposées par Hamamatsu. Caractérisées par un ensemble discret de lobes principaux, c'est donc leur topologie qui dictera leur choix, ceci afin d'obtenir des diagrammes directifs de surveillance horizontaux et verticaux plus ou moins étroits et adaptés aux contraintes de la zone à surveiller.

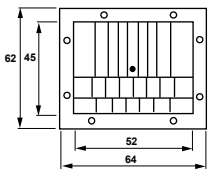
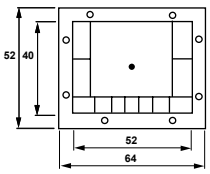
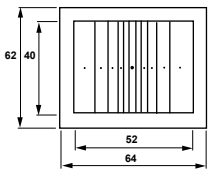
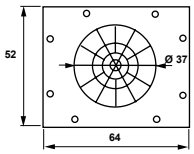
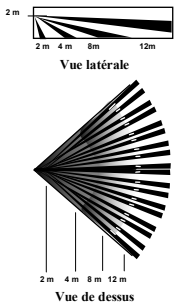
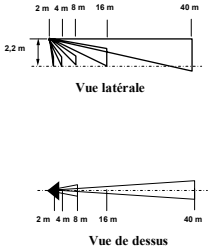
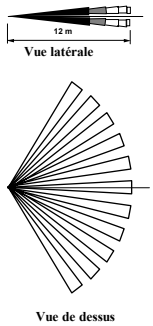
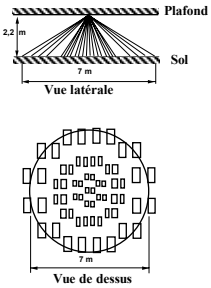
Modèle	E4116-01	E4116-02	E4116-03	E4116-04
Type				
Diagramme directif				
Utilisation	Générale	Longue distance	Couloir	Plafond
Nombre de faisceaux	24	11	11	31
Coût € (HT)	5 à 27			

Figure 1.12 : Topologies possibles des lentilles de Fresnel.

1.2 Technologie des détecteurs dans l'infrarouge lointain : Etat de l'art

Depuis plus d'un quart de siècle, le nombre élevé d'applications industrielles, aujourd'hui de plus en plus exigeantes qui font appel aux systèmes de détection et d'imagerie infrarouge, pose la question de l'utilité de rappeler, dans ce mémoire, l'inventaire des dispositifs qui ont été successivement développés. En effet, le nombre de livres et de publications scientifiques ayant traités le sujet sur tous ses aspects, ainsi que celui des ouvrages spécialisés ouverts à un plus large public, sont devenus considérables [18]. Notre intention n'est donc pas de présenter en détail la théorie de manière exhaustive de tous les détecteurs IR mais plus

précisément de synthétiser les principaux matériaux qui permettent la détection dans l'infrarouge. Toutefois, pour bien saisir les choix qui ont été faits dans cette étude et pour bien souligner l'originalité des solutions retenues, il est indispensable de se pencher sur les différentes évolutions connues de la détection infrarouge, plus particulièrement durant ces dix dernières années. En conséquence, nous noterons pour résumer, qu'il existe actuellement deux grandes familles de détecteurs infrarouges, les détecteurs quantiques et les détecteurs thermiques [19] respectivement qualifiés de détecteurs refroidis et de détecteurs non refroidis.

1.2.1 Les détecteurs quantiques

1.2.1.1 Introduction

Les détecteurs quantiques, souvent qualifiés de détecteurs à effet photoélectrique, s'appuient sur la création de charges électriques mobiles par un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde inférieure à une valeur seuil caractéristique d'un matériau. Le photon absorbé fournit son énergie à un électron de la bande de valence qui transite dans la bande de conduction et peut se déplacer sous l'action d'un champ électrique (figure 1.13). Ces phénomènes sont mis à profit dans la photoconduction et la conversion photovoltaïque que nous allons rappeler brièvement [20].

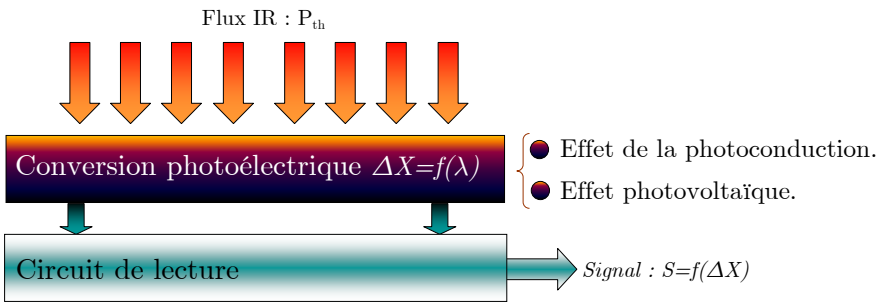


Figure 1.13 : Structure fondamentale d'un détecteur quantique.

En photoconduction ce sont les porteurs photogénérés qui modifient la densité de porteurs libres du matériau. L'action du rayonnement photonique modifie la conductance par la création de porteurs en excès. En appliquant une différence de potentiel aux bornes du barreau semi-conducteur, un courant parcourt celui-ci et sous l'effet d'un rayonnement résulte une variation de courant.

La conversion photovoltaïque s'appuie sur la collecte d'électrons et des trous au voisinage d'une jonction à semiconducteur P^+N par le champ électrique de la jonction. Deux modes fonctionnement sont à distinguer en présence ou pas de polarisation externe de la diode. Lorsque la jonction est soumise à un éclairement photonique, le courant inverse tend à augmenter, alors la diode fonctionne dans un *mode photoconducteur*. En l'absence de polarisation externe, la diode est équivalente à un générateur dont on peut mesurer, soit la tension en un circuit ouvert, soit le courant de court-circuit.

Nous avons dressé la liste des principaux matériaux permettant la détection dans l'infrarouge. Pour cela, nous avons classé et spécifié le mode de fonctionnement de ces matériaux (tableau 1.3) en fonction, de leur type intrinsèque ou extrinsèque et de leur température de fonctionnement.

Détecteurs quantiques		Détecteur	Sensibilité spectrale (μm)	Température de fonctionnement (K)	Détectivité spécifique ($W^{-1}.cm.Hz^{1/2}$)	
Type intrinsèque	Mode Photoconduction	PbS	0,8 à 2,8	300	4×10^{8}	[21]
		PbSe	2,5 à 4,5	300	2×10^{8}	[21]
		InSb	0,5 à 5	213	2×10^{9}	[22]
		HgCdTe	1 à 30	77	2×10^{10}	[23]
	Mode Photovoltaïque	InGaAs	0,8 à 1,6	300	5×10^{12}	[24]
		InSb	1 à 5,5	77	2×10^{10}	[25]
		HgCdTe	2,5 à 14	77	1×10^{14}	[26]
Type extrinsèque		Ge : Au	1 à 10	77	1×10^{11}	[27]
		Ge : Hg	2 à 14	4,2	8×10^{9}	
		Ge : Cu	2 à 30	4,2	5×10^{9}	
		Ge : Zn	2 à 40	4,2	5×10^{9}	
		Ge : Ga	1 à 17	4,2	5×10^{9}	
		Ge : As	1 à 23	4,2	5×10^{9}	

Tableau 1.3 : Propriétés des principaux matériaux rencontrés pour l'élaboration des détecteurs quantiques.

Typiquement, durant la période des années 1930 à 1960, l'utilisation de matériaux tels que les dérivés de sulfure de plomb, (PbS, PbSe, PbTe) ou bien encore à antimoniure d'indium (InSb), furent intensément utilisés pour répondre à des besoins militaires. Toutefois, malgré des températures de fonctionnement plus ou moins proches de l'ambiant et des gammes de longueurs d'ondes pouvant atteindre 6 μm, leur exploitation en imagerie rapide fut compromise car essentiellement limitée par des fréquences d'utilisation trop faibles. Dès lors, les progrès des technologies, telles que l'épitaxie par jet moléculaire de nos jours, ont considérablement améliorés l'étude des infrarouges lointains et permis le développement de systèmes d'imagerie infrarouge hautement performants atteignant fréquemment des NETD[10] inférieures à 20 mK, grâce à des matériaux fonctionnant à de très basses températures (70K) et à des longueurs d'ondes jusqu'à 30 μm.
Actuellement, outre les détecteurs à photo-émission de type Schottky à PtSi [28], les deux principaux matériaux qui sont à l'origine de telles performances sont les alliages de tellurure de mercure et cadmium (HgCdTe) et les structures multicouches alternativement en arséniure de gallium (AsGa) et en aluminium arséniure de gallium (AlGaAs).

[10] NETD : Noise Equivalent Temperature Difference (écart de température équivalent au bruit).

1.2.1.2 Les détecteurs au Tellurure de Mercure et Cadmium HgCdTe

L'un des matériaux de prédilection pour la détection infrarouge est sans conteste le $Hg_{1-x}Cd_xTe$. Il s'agit d'un alliage ternaire à *gap* direct dont l'intérêt réside dans la faculté de pouvoir ajuster son niveau d'énergie de bande interdite (*Band gap*) de 0 eV à 1,6 eV par un dosage moyen de proportion x de cadmium ou de sa teneur en mercure. Ainsi, en fonction de ce dosage, le matériau est calibré pour favoriser la détection sur une gamme de longueur d'onde s'échelonnant de 1 à 30 µm et atteindre des limites proches de la théorie. Toutefois, comme le montre la figure 1.14, pour détecter des longueurs d'onde proches de 10 µm, outre l'apport de cadmium, il est nécessaire que le matériau soit refroidi dans une enceinte cryogénique (T=77 K), ceci pour accorder la largeur de bande interdite à une valeur proche de 0,1 eV et bénéficier au mieux des performances du détecteur.

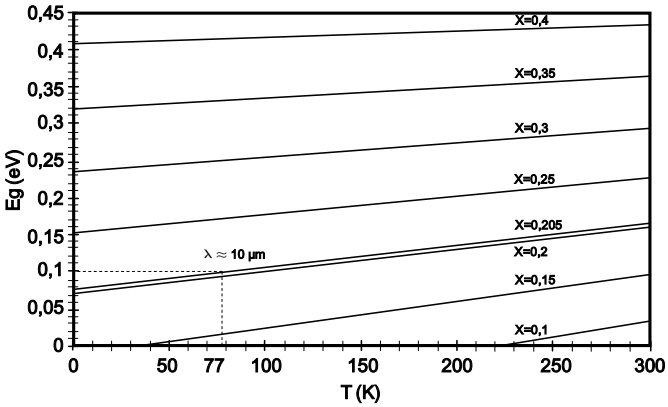


Figure 1.14 : Energie de bande interdite de l'alliage $Hg_{1-x}Cd_xTe$ en fonction du dosage moyen de Cadmium.

Depuis ces quatre dernières décennies, le Tellurure de Mercure et Cadmium (également connu sous la dénomination anglosaxone de MCT[11]) reste l'un des matériaux les plus utilisés pour la détection de source thermique. Il est aussi bien employé comme photodétecteur que comme détecteur photovoltaïque. Actuellement, le HgCdTe est très utilisé dans la gamme des longueurs d'onde proches de 5 µm (*MWIR*) puisque l'apport de cadmium pour $x = 0{,}3$ confère au matériau un paramètre de maille cristallin quasi-constant [29]. Cette caractéristique lui concède une utilisation optimale sous la forme de couche mince et permet la réalisation de matrices de détection IR plan focal performantes sous la forme hybride (figure 1.15) pouvant atteindre des résolutions de 128 × 128 à 2048 × 2048 points pour des tailles de pixel respectivement de 50 × 50 µm à 18 × 18 µm.

[11] MCT : Mercury Cadmium Telluride

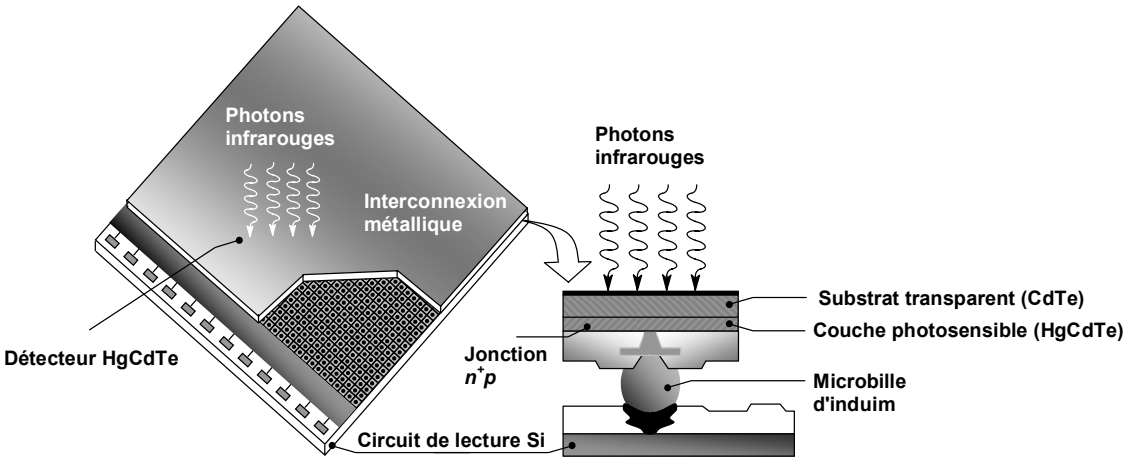


Figure 1.15 : Architecture d'une matrice détecteur IR hybride plan focal.

1.2.1.3 Les détecteurs à multi-puits quantiques semi-conducteurs (QWIP)

Comparés aux propriétés des matériaux HgCdTe, les détecteurs à multi-puits quantiques QWIP[12] permettent également d'adapter le détecteur, ou plus exactement d'accorder les matériaux, à un domaine d'application de la bande spectrale choisie (figure 1.16).

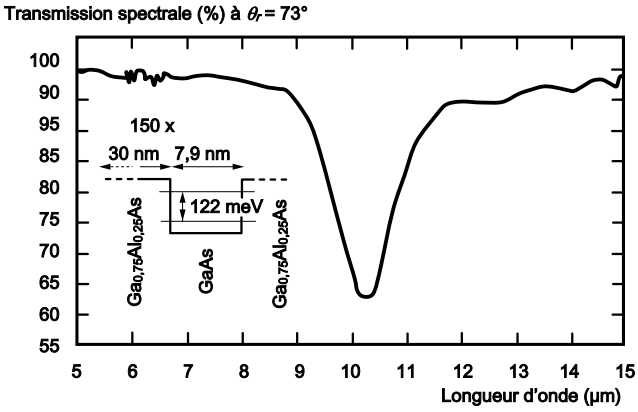


Figure 1.16 : Transmission spectrale d'une structure à multi-puits quantiques.

Pour cela, les détecteurs QWIP sont élaborés à partir d'un empilement successif de fines couches de matériaux semiconducteurs qui définissent leurs propriétés optiques. Les matériaux ayant chacun d'eux une largeur de gap différente, l'association successive d'un matériau à faible gap, qui participe à la création d'un puits de potentiel, placé entre deux matériaux identiques de largeur de gap supérieure créant ainsi une barrière de potentiel, constitue une hétérostructure qui est à l'origine de la formation de multi-puits de potentiels (figure 1.17).

[12] QWIP : Quantum Well Infrared Photodetector (détecteur IR à multi-puits quantiques).

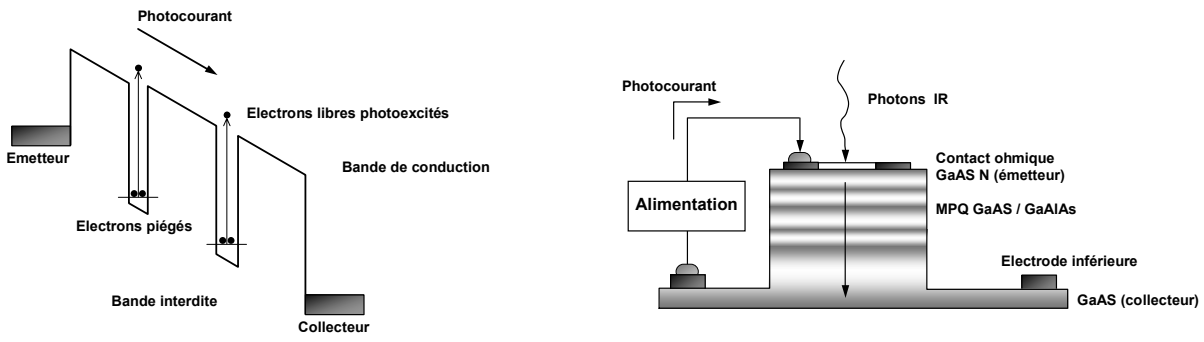


Figure 1.17 : Principe de la détection à multi-puits quantiques.

En polarisant l'association de la structure multi-puits-barrières, le champ électrique résultant engendre un fléchissement des bandes d'énergies par effet Stark. Pour fonctionner, le détecteur est placé dans un cryostat dont la température se situe entre 35 et 70 K, ceci pour confiner les électrons sur le niveau fondamental à l'intérieur des puits de potentiel. Ainsi, sous l'influence d'un rayon IR, l'apport d'énergie induite par la photoexcitation permet aux porteurs de franchir les barrières de potentiel si bien qu'ils participent à la création d'un courant que l'on mesure à l'aide d'un circuit approprié. Issus des laboratoires de recherche, les détecteurs à hétérostructures multicouches sont couramment élaborés à partir de l'association de matériaux telle que le GaAs/AlGaAS ou bien encore de InAs/$In_xGa_{1-x}Sb$. Profitant de la maturité et des innovations technologiques récentes dédiées aux matériaux III-V durant ces deux dernières décennies, les nouveaux détecteurs QWIP s'imposent de plus en plus comme une solution alternative, aujourd'hui incontestable, pour la réalisation de nouvelles matrices aux performances accrues. Actuellement, on trouve sur le marché [30] des détecteurs QWIP plan focal pouvant atteindre des résolutions de 1024 × 1024 points pour des tailles de pixel de 18 × 18 µm à 50 × 50 µm.

1.2.1.4 Les détecteurs quantiques de type extrinsèque en Silicium ou Germanium

Les détecteurs quantiques de type extrinsèque sont élaborés à partir d'impuretés introduites dans un substrat Silicium ou Germanium. Ainsi, en fonction de la nature des matériaux dopants (Au, Hg, Cu, Zn, Ga, As ...), il est possible d'obtenir des détecteurs pouvant couvrir une gamme spectrale qui s'étend de 1 à 40 µm (figure 1.18). Leur fonctionnement est proche des détecteurs intrinsèques puisqu'il repose également sur l'un des effets de la photoconduction ou de la photoexcitation. Toutefois, à la différence de ces derniers, les phénomènes photoélectriques s'appuient non pas sur le niveau de bande interdite du matériau de base mais plus exactement sur les niveaux d'énergie des matériaux dopants. De la même manière, pour fonctionner ces détecteurs doivent être refroidis à des températures très basses, souvent inférieures à 77 K.

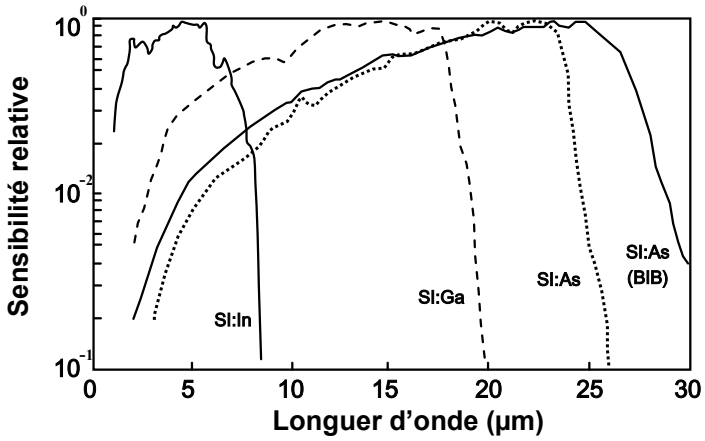


Figure 1.18 : Sensibilité spectrale relative de quelques détecteurs quantiques de type extrinsèque [31].

1.2.1.5 Evolutions des détecteurs refroidis

Actuellement, les activités de recherche et de développement sur les détecteurs IR portent leurs efforts non pas sur des améliorations significatives des performances puisque les détecteurs MCT (les plus sensibles) atteignent des limites de détection très proches de la théorie, mais plus particulièrement sur l'augmentation de la taille des matrices, une détection multispectrale et des températures de fonctionnement plus élevées (120-140 K). Ces efforts visent essentiellement la minimisation de la consommation électrique des systèmes de refroidissement cryogéniques.

Si la loi de Moore prédit la possibilité, en moyenne tous les 18 mois, de doubler l'intégration des transistors dans les circuits intégrés Silicium, la figure 1.19 montre que cette progression est moindre concernant les détecteurs quantiques depuis le début des années 90. En effet, si les efforts portent sur la taille des matrices, une réduction de la taille des pixels tout en conservant un niveau de performances élevé ne s'obtient pas sans difficulté. Les rendements de fabrication, le nombre de pixels actifs par matrices, les étapes de lithographie séparées en cadrants pour les grands formats, ainsi que la conservation d'une stabilité thermique sur de grandes surfaces, sont autant de raisons qui ralentissent le développement des détecteurs à grands formats. Selon les spécifications de la NASA, le successeur du télescope Hubble, le JWST[13], nécessiterait un détecteur matriciel de $1{,}67.10^7$ pixels architecturé à partir d'un assemblage de 16 matrices de 1024×1024 pixels.

[13] JWST : James Webb Space Telescope (Telescope spatial James Webb).

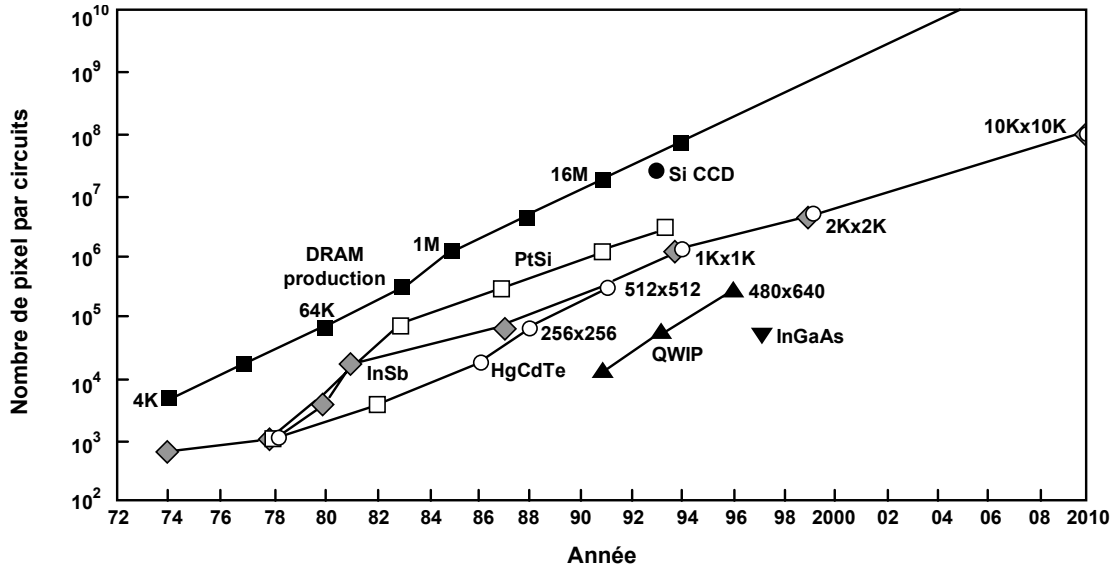
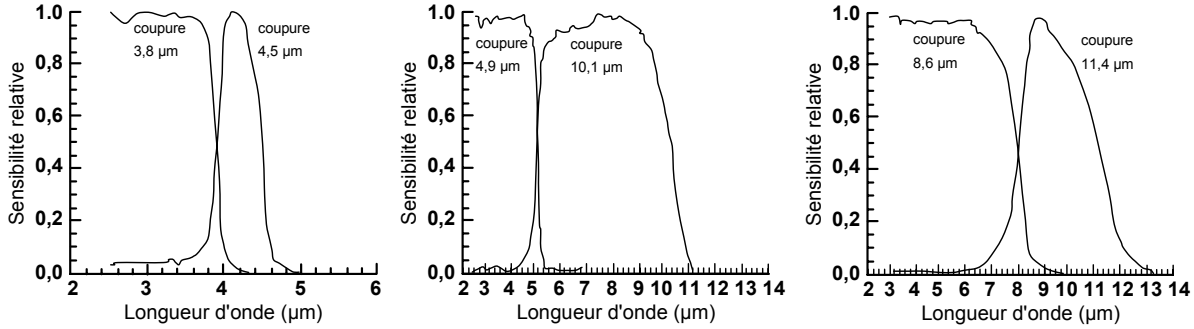


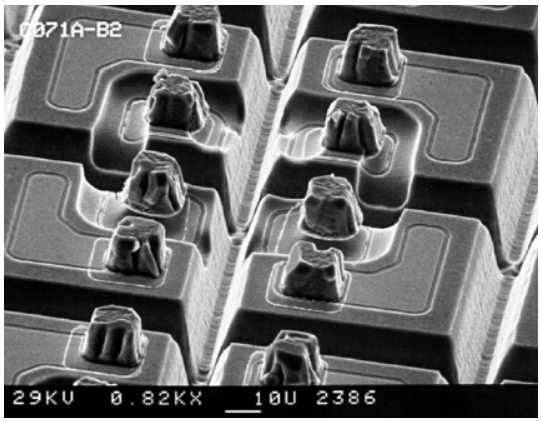
Figure 1.19 : Croissance du nombre de pixel par circuit depuis ces 25 dernières années pour les technologies DRAM [32].

Outre, la course vers le développement de matrices à plusieurs millions de pixels, les activités de la recherche concentrent également des efforts sur le développement de détecteurs sensibles à plusieurs bandes spectrales (figure 1.20) en un même pixel compte tenu de la souplesse spectrale offerte par les matériaux. Ceci est illustré par la figure 1.21 qui présente les deux solutions technologiques existantes, solutions qui diffèrent selon la présence d'un ou deux points de contact par pixels.

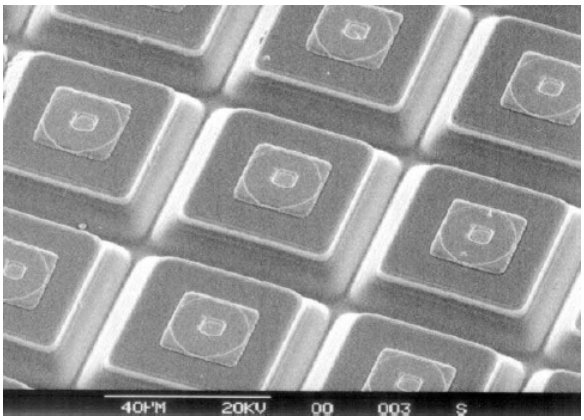


-a- plage 3-5 µm -b- plage 5-10 µm -c- plage 8-12 µm

Figure 1.20 : Courbes normalisées des sensibilités bi-spectrales ajustables des détecteurs HgCdTe.



-a- détecteur bispectral avec deux points de contact par pixel.



-b- détecteur bispectral avec un point de contact par pixel.

Figure 1.21 : Photographie *MEB*[14] de détecteurs HgCdTe de génération future (source : CEA-LETI/LIR) [33].

1.2.2 Les détecteurs thermiques

1.2.2.1 Introduction

Les détecteurs thermiques sont des transducteurs dans lesquels le rayonnement infrarouge est directement transformé en chaleur par absorption. Ainsi, lorsque le transducteur est soumis aux variations d'un flux thermique, celui-ci délivre une information sous la forme d'un signal électrique d'autant plus intense que la température est élevée et ce, quelque soit la gamme spectrale. Ces détecteurs sont composés d'un absorbeur, le *corps d'épreuve primaire*, d'un thermomètre, le *transducteur* et d'une isolation thermique (figure 1.22), ceci afin de permettre la mesure de faibles variations de température moyennant l'un des effets, pyroélectrique, bolométrique, thermoélectrique ou bien encore thermomécanique.

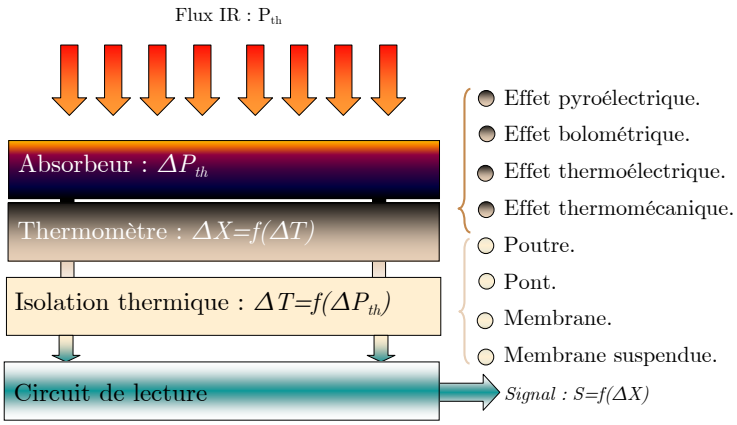
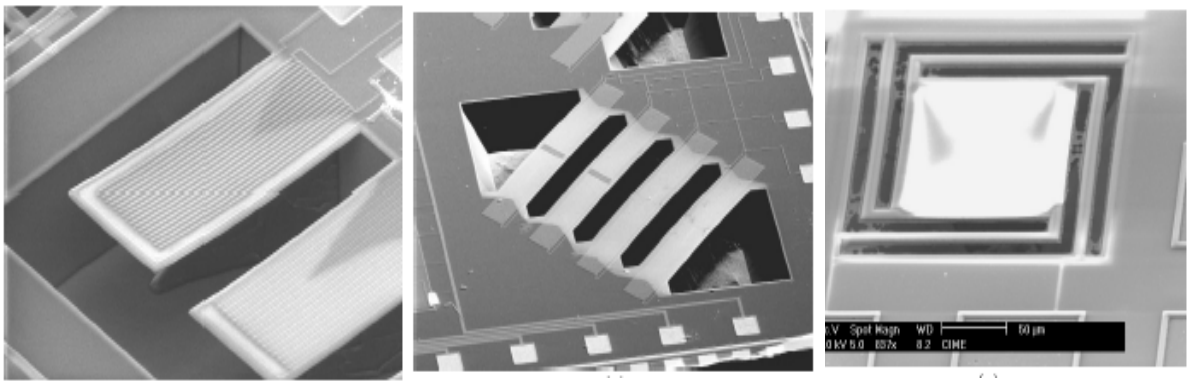


Figure1.22 : Structure fondamentale d'un détecteur thermique.

[14] MEB : Microscope Electronique à Balayage.

Commune à l'ensemble des détecteurs thermiques, on soulignera le rôle capital tenu par l'isolation thermique puisque c'est elle qui contribue à la formation du puit thermique entre le corps d'épreuve et le substrat. Idéalement, il conviendrait que le thermomètre soit totalement isolé du substrat pour éviter toute déperdition de chaleur par conduction. C'est pourquoi, les thermomètres sont placés sur des microstructures à forte résistance thermique (figure 1.23) qui ont la forme de poutres, de ponts ou bien de membranes pouvant être suspendues. Ce type de microstructures repose sur l'élaboration de fines couches d'oxyde de silicium qui sont ensuite isolées localement du substrat par les récentes technologies de micro-usinage volumique ou de surface. Actuellement, ce sont donc ces progrès qui permettent d'envisager le développement de détecteurs infrarouges *non refroidis* tant pour des applications civiles que militaires.

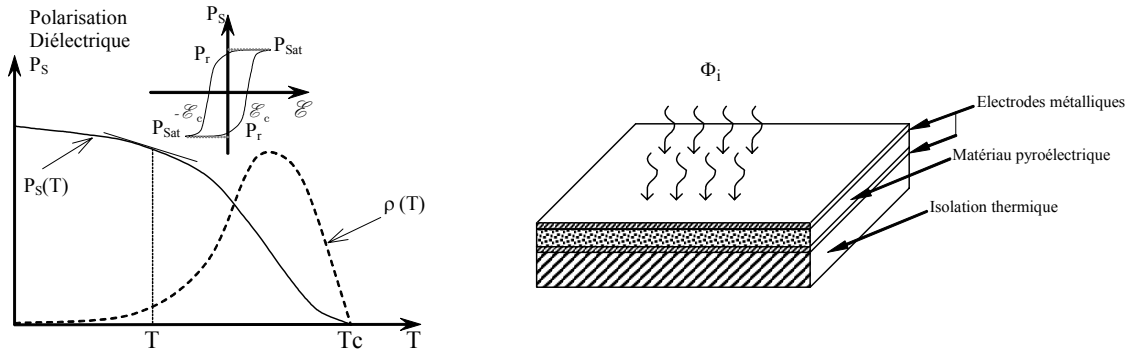


-a- poutre. -b- pont. -c- membrane suspendue.

Figure 1.23 : Photographies *MEB* de microstructures permettant la formation de puits thermiques [34].

1.2.2.2 Les détecteurs pyroélectriques

Les détecteurs pyroélectriques, initialement développés par *Texas Instrument* dès 1980, reposent sur l'utilisation de matériaux constitués de cristaux à faibles constantes diélectriques. Ils présentent une polarisation électrique spontanée P_s qui est fonction des variations de température (figure 1.24) et disparaît au dessus d'une température appelée température de Curie Tc (phase paraélectrique). C'est à partir du taux de variation de la polarisation P_s en fonction de la température T que l'on désigne le coefficient pyroélectrique déterminé par $\rho(T) = \partial P_S / \partial T$. Ainsi, comme la plupart de ces matériaux sont des ferroélectriques, cela signifie que la direction de leur polarisation peut être modifiée suite à une variation de température ou bien renversée par l'application d'un champ électrique $\mathcal{E}_c$ approprié. Dans cette situation, en fonction de l'intensité du champ électrique, la variation de la polarisation décrit un cycle d'hystérésis qui souligne un état de polarisation rémanente P_r.



-a- Polarisation spontanée et cycle d'hystérésis du matériau.

-b- Profil du capteur pyroélectrique.

Figure 1.24 : Principe de la détection pyroélectrique.

En conséquence, du fait de sa polarisation diélectrique P_s, un matériau pyroélectrique porte sur chacune de ces deux faces opposées des charges électriques Q. Ces charges liées créent un champ électrique interne qui par le déplacement de charges libres qu'il entraîne, résulte de la neutralisation des charges superficielles. Cependant, lorsque la surface frontale A du détecteur est soumise aux variations d'un rayonnement IR, son absorption par le matériau engendre une élévation de sa température interne dT de telle sorte que l'équilibre polaire n'est plus respecté. Ceci se traduit par une déformation de la structure cristalline et donc un changement d'état de la polarisation rémanente du matériau ferroélectrique. Ainsi, la modification du moment dipolaire induit une variation de densité de charges électriques surfaciques $dQ = \rho A dT$ délivrant alors un courant transitoire pyroélectrique noté I_p :

$$I_p = \rho A \frac{dT}{dt} \tag{1.10}$$

De ce fait, l'obtention de détecteurs pyroélectriques aux performances élevées doivent recourir à des matériaux ferroélectriques possédant un coefficient pyroélectrique important, une capacité calorifique faible, une résistivité volumique élevée et une constante diélectrique de faible valeur. De plus, ils doivent posséder un point de Curie élevé pour être utilisé dans un milieu fluctuant autour d'une large gamme de température. Parmi ces matériaux, nous mentionnerons les plus employés dans les applications pyroélectriques, à savoir, les monocristaux ferroélectriques du type Tantale de Lithium $LiTaO_3$ et son composé organique à Sulfate de Triglycine TGS, les céramiques polycristallines telles que le Titanate Zirconate de Plomb PZT, les polymères polaires semi-cristallins ferroélectriques du type polyfluorure de vinylidène PVDF et ses dérivés comme le copolymère PVDF-TrFE. Le tableau 1.4 résume les caractéristiques principales de ces matériaux.

Matériaux	tg δ	ρ (nC.cm^{-2}.K^{-1})	ε_r	T_c (°C)
LiTaO3	0,005	23	54	618
TGS	0,025	55	50	50
PZT	0,01	31	450	300
PVDF	0,015	4	12	100

Tableau 1.4 : Propriétés physiques des principaux matériaux pyroélectriques.

Où tg δ est la tangente de l'angle de pertes diélectriques à température ambiante, ρ est le coefficient pyroélectrique, ε_r la constante diélectrique et T_c la température de Curie.

Malgré un faible coefficient pyroélectrique (4 nC.cm^{-2}.K^{-1}), c'est le PVDF qui occupe le marché de la pyroélectricité appliquée aux détecteurs de présence (figure 1.25). En effet, sa robustesse, son insensibilité à l'humidité, un point température de curie élevée et son faible coût conjugués à une mise en œuvre compatible avec les techniques de microélectronique, notamment les dépôts par centrifugation puisqu'il se présente sous une forme visqueuse, l'imposent comme un matériau de prédilection pour les applications civiles. C'est ainsi, que pendant plusieurs années, le LAAS-CNRS et ses partenaires, le CEA-LETI de Grenoble et l'ISL de St Louis ont réalisé un prototype dédié à l'imagerie infrarouge dans le plan focal pour être embarqué à bord d'un véhicule automobile pour la détection d'obstacles [35]. Le détecteur se présentait sous la forme d'une matrice 32 × 32 pixels au pas de 100 µm. L'étude se termina dans les années 95-96, notamment avec l'arrivée des détecteurs bolométriques et des techniques de micro-usinage.

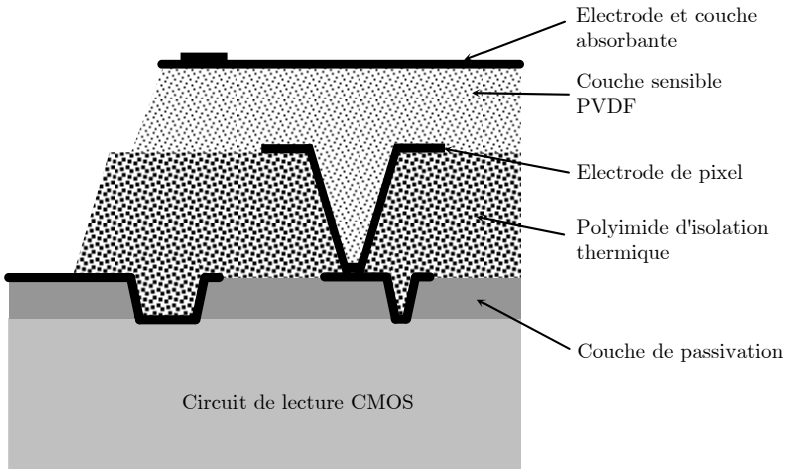


Figure 1.25 : Détecteur pyroélectrique à couche sensible de type PVDF.

1.2.2.3 Les détecteurs bolométriques micro usinés

Dans ce type de détecteurs, c'est l'échauffement thermique, provoqué par l'absorption de rayonnements infrarouges, qui modifie la conductivité électrique d'un matériau thermosensible. Ainsi, le bolomètre[15] repose sur la mesure des variations de résistance $dR = \alpha\, R_b\, dT$ d'une thermistance R_b qui est consécutive à un changement de température dT, (α représente le coefficient thermique de résistance TCR[16] à température ambiante).

[15] Destiné à la mesure des radiations solaires, le bolomètre fut inventé en 1878 par Samuel Pierpoint Langley (1834-1906). A l'origine, il était constitué de deux fines lamelles de platine reliées à l'une des deux branches que constituait un pont de Wheatstone.

[16] TCR : Thermal Coefficient Resistance (K^{-1}).

Comme l'illustre la figure 1.26 -b-, ce type de détecteur peut être constitué d'un grand nombre d'éléments microbolométriques qui sont organisés sous la forme d'une matrice bidimensionnelle.

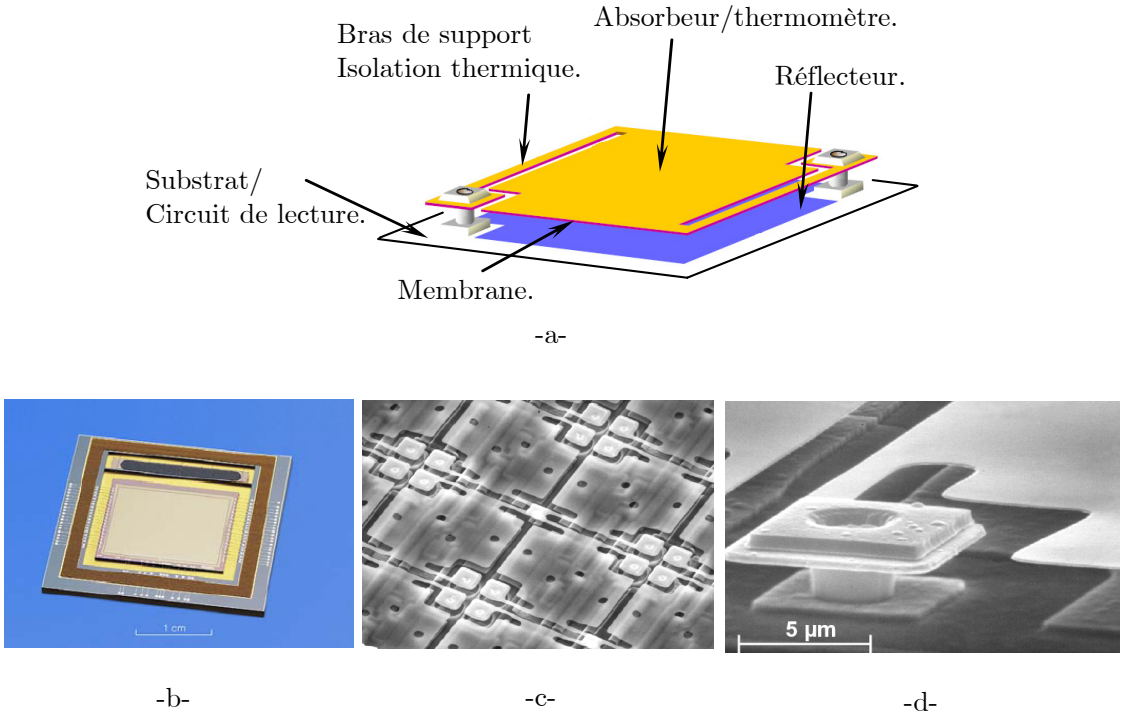


Figure 1.26 : a) Schéma élémentaire d'un microbolomètre, b) Photographie d'une matrice, c) et d) Photographies *MEB* d'éléments microbolomètriques.

Pour mesurer les variations de températures engendrées par les photons IR incidents, le microbolomètre (figure 1.26 -a-) est constitué d'une membrane suspendue très fine (inférieure à 0,5 µm) qui intègre le thermomètre et l'absorbeur. Les bras (figure 1.26 -d-) qui maintiennent la membrane confèrent au détecteur, outre une excellente tenue mécanique, une résistance thermique suffisamment élevée (entre 10^6 et 10^7 K.W^{-1}) pour isoler le thermomètre du circuit de lecture localisé dans le substrat. D'autre part, pour permettre un échauffement thermique optimal dans la bande spectrale 7-14 µm, la membrane est placée au dessus d'une couche réflectrice à une hauteur de $\lambda/4$ de telle sorte que l'empilement de couches conductrices et diélectriques constituent une cavité résonante au quart de longueur d'onde. Ainsi, en plaçant la membrane à une hauteur proche de 2,5 µm, la structure favorise l'absorption des longueurs d'ondes voisines de 10 µm.

Actuellement, les principaux matériaux [36] utilisés pour la réalisation des membranes microbolométriques reposent essentiellement sur des filières technologiques qui sont :

- Les oxydes de vanadium VO_x, initialement développés par Honeywell et produits aujourd'hui par Raytheon Vision Systems, DRS, Bae, Indigo, NEC et Daewoo Electronics.

- Le silicium amorphe *a-Si*, développé par Texas Instrument et maintenant produit par Raytheon Commercial infrared, CEA-LETI/ULIS (Sofradir).

- Les céramiques ferroélectriques telles que le titanate de strontium et de baryum *BST* développées par Texas Instrument et maintenant produites par Raytheon Commercial infrared.

- Le Si-Ge polycristallin *Poly Si-Ge* développé par l'IMEC (Belgique) et industrialisé par XeniC's.

Comme déjà énoncé précédemment, la maîtrise des technologies, les techniques d'assemblage hybrides directes ou indirectes et l'intégration monolithique, ont permis d'envisager de nouvelles prospectives pour le développement de détecteurs microbolométriques fonctionnant à température ambiante. Le tableau 1.5 regroupe, de manière non exhaustive, les performances obtenues par les principaux acteurs industriels qui réalisent et/ou distribuent à la fois des détecteurs IR mais aussi des caméras thermiques.

Fabriquant	Filière technologique	Format : résolution, taille pixel, type d'architecture	Domaine spectral	NETD f/D = 1, 300K
Raytheon (Etats-Unis)	VO_x BST	320 × 240, 48 × 48, Monolithique 328 × 245, 35 × 35, Hybride	8-14 µm 8-14 µm	> 50 mK > 50 mK
Boeing (Etats-Unis)	VO_x	320 × 240, 48 × 48, Monolithique	8-14 µm	50 mK
DRS (Etats-Unis)	VO_x	320 × 240, 28 × 28, Monolithique	8-14 µm	< 100 mK
BAE Systems (G.Bretagne)	VO_x	640 × 480, 28 × 28, Monolithique	8-14 µm	60 mK
Sofradir (France)	a-Si a-Si	320 × 240, 45 × 45, Monolithique 320 × 240, 35 × 35, Monolithique	8-14 µm 8-14 µm	85 mK 36 mK
NEC (Japon)	VO_x	320 × 240, 28 × 28, Monolithique	8-14 µm	80 mK

Tableau 1.5 : Les principaux acteurs dans la fabrication des détecteurs thermiques non refroidis.

1.2.2.4 Les détecteurs thermoélectriques

Les détecteurs à effet thermoélectrique[17] exploitent des phénomènes de polarisation électrique spontanée sous l'action d'une différence de température imposée aux extrémités d'un matériau. La figure 1.27 montre la connexion en série de deux matériaux de nature chimique différente (A et B) dont les segments sont joints pour former un circuit. La jonction froide est maintenue à une température de référence T_C alors que la jonction chaude, soumise aux variations de flux IR, voit sa température T_H s'élever localement.

[17] Les premiers phénomènes thermoélectriques observés en 1801 par Johann Wilhelm Ritter (1776-1810) n'avaient pas suscités un grand intérêt auprès de la communauté scientifique. Il fallut attendre les travaux de Thomas Johann Seebeck (1770-1831) pour en « redécouvrir » les effets en 1821.

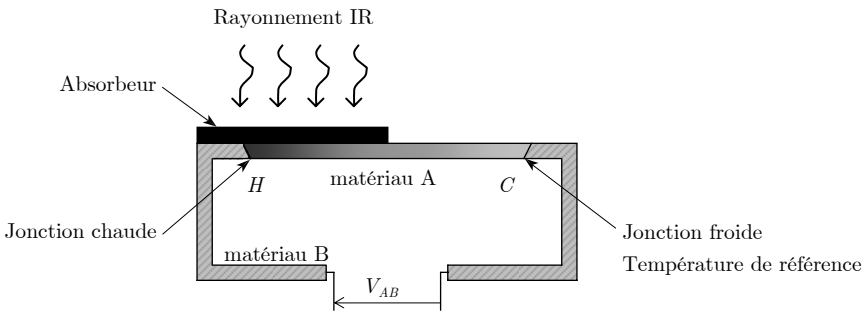


Figure 1.27 : Principe de l'effet Seebeck.

Dès lors, sous l'action de l'échauffement différentiel situé entre les deux jonctions (ou thermojonction), le gradient thermique $\Delta T = T_H - T_C$ engendre l'apparition d'une force électromotrice $V_{AB} = \alpha_{AB}\Delta T$ qui résulte de la conjugaison des facteurs électro-thermiques α_{AB} (µV/K) du couple de matériaux (appelé thermocouple) et de l'écart thermique ΔT.
Ainsi, afin d'exploiter d'une manière significative ce principe de conversion, qui est usuellement qualifié d'effet Seebeck, il est essentiel que les matériaux soient de bons conducteurs électriques, ceci afin de minimiser la résistance ohmique et de ce fait de réduire le bruit de Johnson. Ils doivent garantir également un gradient thermique entre les extrémités des thermojonctions, autrement dit, une conductivité thermique faible. Le tableau 1.6 recense les principaux matériaux utilisés pour l'élaboration des thermocouples. On remarquera la notion de facteur de mérite Z d'un matériau qui permet d'apprécier les performances de leur pouvoir thermoélectrique.

Matériaux	(W/m.K)	(µΩ.cm)	(µV/K)	T_{max}	Z(K^{-1})
Métaux					
Au	314	2,3	1,9	1000	$4{,}99 \times 10^{-7}$
Al	235	2,75	-1,8	800	$5{,}01 \times 10^{-7}$
Co	69	5,57	-20,1		$1{,}05 \times 10^{-4}$
Cu	398	1,72	1,83	700	$4{,}89 \times 10^{-7}$
Fe	72,5	8,6	13,4	1000	$2{,}88 \times 10^{-5}$
Ni	60,5	6,15	-20,4	1500	$1{,}11 \times 10^{-4}$
Pt	71	9,81	-5,9		$4{,}99 \times 10^{-6}$
Semi métalliques, alliages					
Bi	8,1	1,1	-72,8	450	$59{,}48 \times 10^{-3}$
Sb	24,4	40,1	32	750	$1{,}04 \times 10^{-4}$
Constantan (Ni45Cu55)	19,5	51	-38,4	750	$1{,}48 \times 10^{-4}$
NiCr(Ni80Cr20)	13,4	108	27	1450	$5{,}00 \times 10^{-5}$
Semiconducteurs					
p-Si	150	10 à 500*	100 à 1000*		$6{,}66 \times 10^{-4}$
n-Si	150	10 à 500*	-100 à -1000*		$1{,}33 \times 10^{-3}$*
p-PolySi	30	10 à 1000*	100 à 500*	650	$3{,}33 \times 10^{-3}$
n-PolySi	30	10 à 1000*	-100 à -500*		$8{,}33 \times 10^{-4}$*
p-Sb_2Te_3	2,8	500	130	400	$1{,}20 \times 10^{-3}$
p-$(Bi_{1-x}Sb_x)Te_3$	1	3300	180	400	$9{,}81 \times 10^{-4}$
n-$(Bi_{1-x}Sb_x)Te_3$	1	2000	-200	400	$2{,}00 \times 10^{-3}$
p-$(Si_{0,8}Ge_{0,2})$Te3	4,8	1140	125	1300	$2{,}85 \times 10^{-4}$
n-$(Si_{0,8}Ge_{0,2})$Te3	4,45	850	-108	1300	$3{,}08 \times 10^{-4}$

Tableau 1.6 : Caractéristiques électro-thermiques des principaux matériaux rencontrés pour la réalisation des thermocouples.

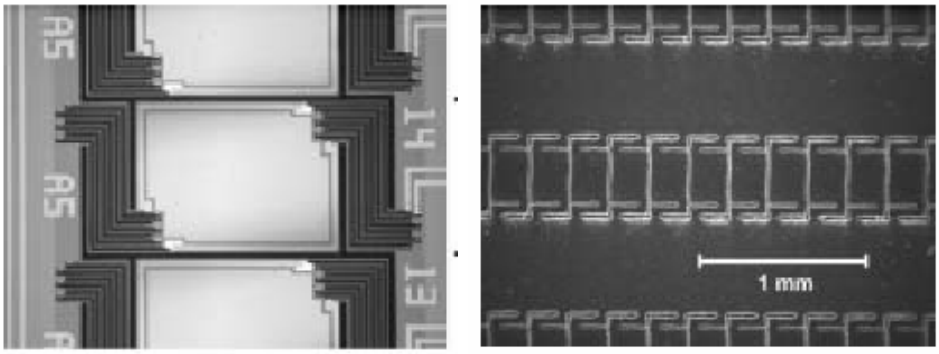
D'utilisation simple, les thermocouples sont appréciables car ils présentent la particularité de délivrer un signal *f.e.m* dont la mesure ne nécessite pas la circulation d'un courant de polarisation dans le capteur. En conséquence, pour augmenter la tension générée, les thermojonctions sont connectées en série de telle sorte qu'en fonction de leur nombre N la tension générée par la structure, une thermopile[18], s'écrit :

$$V_S = N\alpha_{AB}\Delta T \tag{1.11}$$

Dans le but d'augmenter la sensibilité des détecteurs thermopiles, deux approches différentes conduisent à des topologies structurelles différentes :

- Le premier type de structure (figure 1.28) privilégie un grand écart de température ΔT au détriment du nombre de thermocouples, lesquels sont localisés sur une membrane dont le rôle permet d'augmenter le gradient thermique entre les extrémités des zones chaudes soumises aux rayonnements infrarouges absorbés et les zones froides maintenues à la température ambiante du substrat.

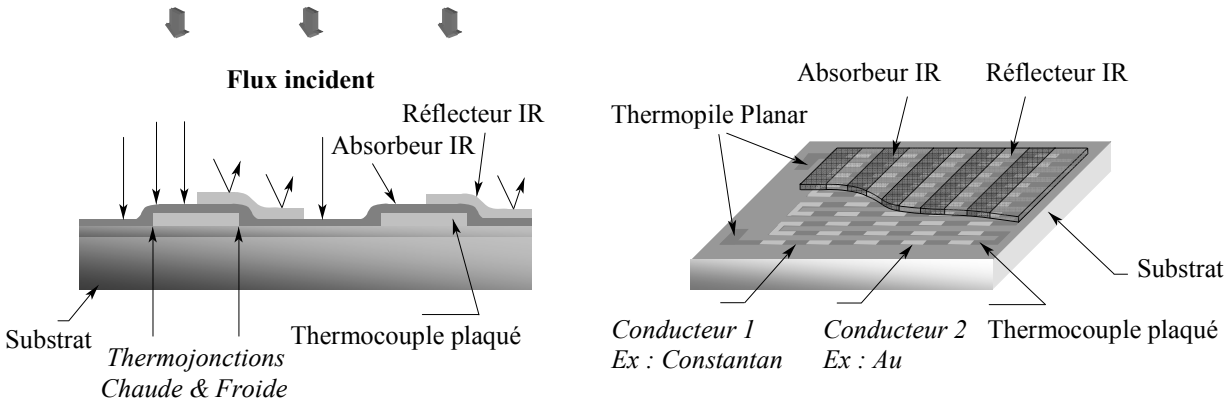
- Une seconde topologie de capteur (figure 1.29), est composée d'un grand nombre de thermocouples N affectés de faibles écarts de températures obtenus à partir d'un système différentiel spatial par combinaison alternative de couches réfléchissantes et absorbantes.



-a- Photographie d'un pixel élémentaire. -b- Matrice.

Figure 1.28 : Topologie d'une thermopile à grand écart thermique (Jet Propulsion Laboratory/NASA).

[18] Inventée en 1829 par Leopoldo Nobili (1784-1835), la première thermopile était constituée de plusieurs thermocouples de matériaux métalliques. C'est en 1833 que Macedonio Melloni (1798-1854) utilisa le couple de matériaux bismuth antimoine pour leur élaboration, aujourd'hui toujours utilisé.



-a- Section de la structure. -b- Vue écorchée du détecteur.

Figure 1.29 : Topologie d'une thermopile à faible écart thermique (IEMN Lille/CAPTEC) [37].

Le tableau 1.7 liste de manière non exhaustive les principales caractéristiques des thermopiles disponibles dans le commerce.

Thermometric Global Business	**ZTP101**	**ZTP205**	**ZTP115**	**ZTP215**	**ZTP315**	**Unités**
Sensibilité	110	40	60	110	32	V/W
Détectivité spécifique	$9{,}0.10^{7}$	$7{,}0.10^{7}$	1.10^{8}	$1{,}85.10^{8}$	$1{,}38.10^{8}$	$W^{-1}.cm.Hz^{1/2}$
Surface active	0,51 × 0,51	0,55 × 0,51	0,5 × 0,5	0,5 × 0,5	1,3 × 1,3	mm^2
NEP	0,6	0,8	0,5	0,27	0,94	$nW/Hz^{1/2}$
Résistance	200	52	50	50	50	Kohm
Tension de bruit	62	31	30	30	30	$nV/Hz^{1/2}$
Constante de temps	22	12	20	24	25	ms (63 %)
Perkin Elmer	**TPS 333**	**TPS 334**	**TPS 434**	**TPS 434IR**	**TPS 534**	**Unités**
Sensibilité	35	55	35	55	20	V/W
Détectivité spécifique	$0{,}7.10^{8}$	$1{,}1.10^{8}$	$0{,}7.10^{8}$	$1{,}1.10^{8}$	$0{,}8.10^{8}$	$W^{-1}.cm.Hz^{1/2}$
Surface active	0,7 × 0,7	0,7 × 0,7	0,5 × 0,5	0,5 × 0,5	1,2 × 1,2	mm^2
NEP	1,2	0,6	0,7	0,4	1,4	$nW/Hz^{1/2}$
Résistance	75	75	35	35	50	Kohm
Tension de bruit	38	35	24	24	29	$nV/Hz^{1/2}$
Constante de temps	25	25	20	20	35	ms (63 %)
Micro Hybrid	**TS116**	**TS72**	**TS100**	**TS144**		**Unités**
Sensibilité	30	200	90	25		V/W
Détectivité spécifique	$1{,}1.10^{8}$	$4{,}5.10^{8}$	4.10^{8}	4.10^{8}		$W^{-1}.cm.Hz^{1/2}$
Surface active	1,44	0,2	1	4		mm^2
Résistance	60 à 65	15 à 30	18 à 43	7 à 13		Kohm
Tension de bruit	33	20	25	15		$nV/Hz^{1/2}$
Constante de temps	37	20	45	60		ms (63 %)

Autres sociétés référence	**Smartec SMTIR9901**	**Willow technologie TS 8060**	**T-F technology TS105-3**	**Opto Tech TP336**	**Unités**
Sensibilité	110	60	90	85	V/W
Détectivité spécifique	$2{,}1.10^{8}$	$1{,}5.10^{8}$	$1{,}7.10^{8}$	$1{,}3.10^{8}$	$W^{-1}.cm.Hz^{1/2}$
Surface active	0,5	0,26	0,7x0,7	0,545	mm^2
NEP	0,35	0,35	0,41	0,36	$nW/Hz^{1/2}$
Résistance	50 ± 15	35 ± 5	50 ± 15	65	Kohm
Tension de bruit	37	25	37	16	$nV/Hz^{1/2}$
Constante de temps	40 ± 10	60 ± 10	40 ± 10	35	ms (63 %)

Tableau 1.7 : Principaux détecteurs thermopiles disponibles sur le marché.

1.2.1.5 Croissances économiques et évolutions technologiques des détecteurs non refroidis

Bien que la majorité des détecteurs vendus aujourd'hui soient refroidis, l'avènement des détecteurs non refroidis au coût nettement moins onéreux tend à déséquilibrer la situation actuelle et explique pourquoi à ce jour ces derniers sont de plus en plus présents sur le marché. En effet, les applications spécifiques (militaires et/ou spatiales), les coûts élevés, les performances accrues au demeurant pas toujours nécessaires, sont autant de raisons qui endiguent l'acquisition des systèmes IR refroidis pour des applications civiles.

D'un point de vue économique, le marché des systèmes infrarouges (tableau 1.8) est relativement important. Il représente plusieurs milliards d'euros avec une part considérable de 80 % pour des applications militaires et seulement 20 % pour les applications civiles.

Marché mondial des systèmes infrarouges
- Evaluation du marché à 3 milliards d'euros, 80 % : militaires et 20 % : civils.
- Systèmes de vision (1 milliard d'euros), 80 % non refroidis et 20 % refroidis.
- Taux de croissance des systèmes non refroidis : + 30 % par an.

Tableau 1.8 : Marché mondial des systèmes infrarouges [38].

Cependant, nous constatons que 80 % des détecteurs non refroidis sont principalement des systèmes de vision à fort potentiel d'applications civiles et ce, avec une progression annuelle de + 30 %. Les principaux axes stratégiques de prospective visent essentiellement :

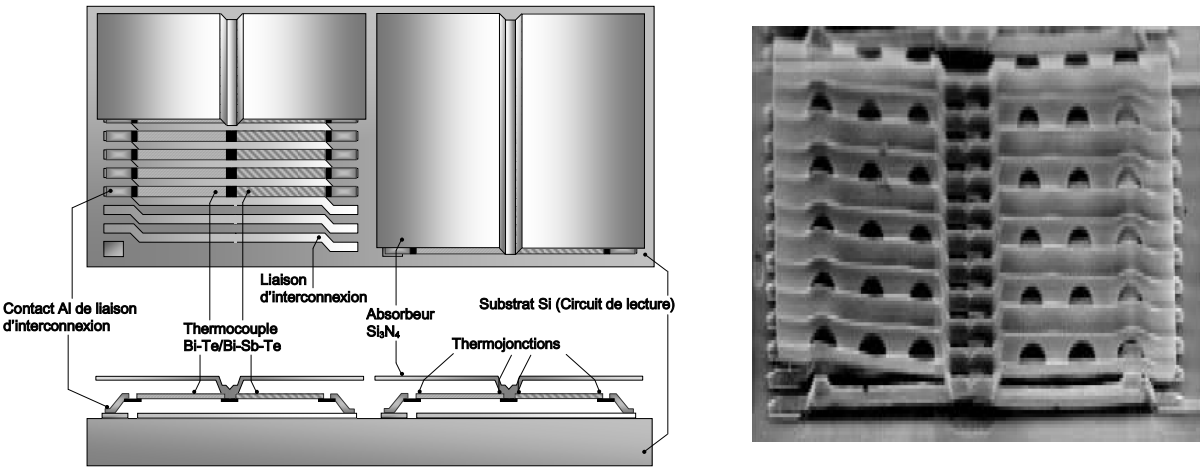
- La détection IR pour la surveillance domestique et le contrôle des processus industriels.
- L'imagerie thermique pour la sécurité et le contrôle environnemental.
- La spectroscopie pour l'instrumentation en laboratoire.

Ainsi, pour mieux répondre à l'émergence de ces nouveaux marchés de masse, les laboratoires et les industries, concentrent leurs efforts vers des améliorations technologiques avec pour cible des détecteurs bolométriques de génération avancée et des thermopiles sous forme essentiellement matricielle.
Les principaux objectifs sont la réduction du capteur élémentaire (pixel) nécessaire à l'augmentation de la taille des matrices, une meilleure isolation thermique actuellement pénalisée par des technologies hybrides, ainsi que la suppression de la régulation thermique du plan focal, actuellement réalisée à partir de module Peltier. Pour atteindre ces objectifs, les solutions retenues s'appuient sur une intégration monolithique des matrices et un contrôle individuel des courants de polarisation de chaque microbolomètre.

Concernant les détecteurs à effet Seebeck, une solution envisagée par la NASA pour augmenter le facteur de remplissage des matrices à thermopiles (figure 1.30), consiste à localiser l'absorbeur au dessus des thermocouples en utilisant les techniques de micro-usinage de surface développées pour la réalisation des MEMS-RF[19] telle que les micro-ponts à actionne-

[19] Micro-Electro-Mechanical Systems - Radio Frequency Switch

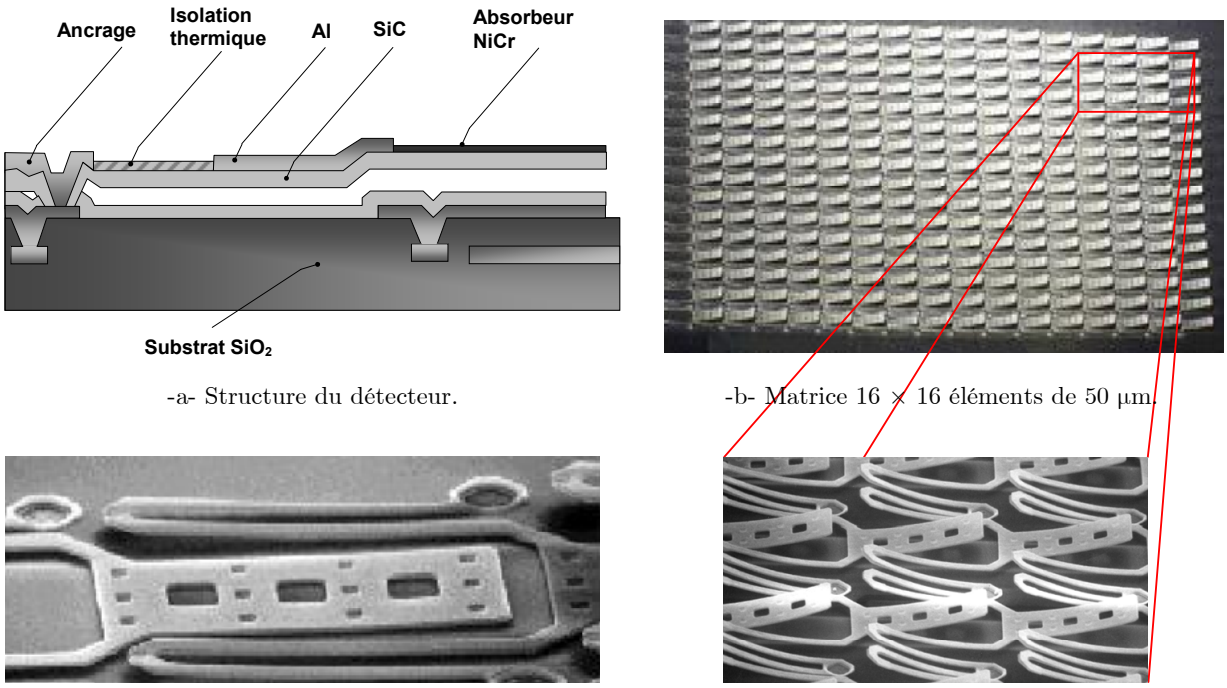
ment électrostatique. Ainsi, la totalité de la surface occupée par les thermocouples délimite parallèlement celle de l'absorbeur.



-a- Schéma de principe. -b- Photographie MEB de la structrure.

Figure 1.30 : Thermopile obtenue par micro-usinage de surface à couche sacrificielle de polyimide [39].

Indépendamment de ces améliorations technologiques, des recherches s'orientent également vers l'étude de nouvelles solutions qui par exemple exploitent les propriétés thermomécaniques d'un microbilame. Les premiers prototypes, initialement développés par Sarcon, sont constitués d'un couple de matériaux dont les coefficients de dilatation diffèrent. La figure 1.31-a- présente une vue en coupe de la structure sur laquelle on identifie le couple de matériaux, l'aluminium et le carbure de silicium (Al-SiC). Lorsque le détecteur est soumis au rayonnement IR, l'échauffement engendré par l'absorbeur déforme la structure. Dès lors, les déformations du microbilame sont exploitées selon deux procédés qui sont, la détection capacitive (située entre le levier et le substrat) et la détection par une piézo-résistance intégrée dans le levier.



-a- Structure du détecteur.

-b- Matrice 16 × 16 éléments de 50 µm.

-d- Pixel au repos.

-c- Pixels exposés à un flux IR.

Figure 1.31 : Détecteur thermomécanique infrarouge à microlevier capacitif [40].

1.3 Présentation des objectifs de recherche

1.3.1 Problématique liée à la détection des personnes

La détection de présence dans l'habitat est une entrée essentielle dans la conduite des systèmes de surveillance. Aussi, pour développer ce type d'application, tout système de détection nécessite un besoin de capteurs performants, fiables et bon marché. Cette fonction est aujourd'hui essentiellement remplie par cinq types de capteurs parmi lesquels on trouve :

- Les détecteurs à contacts se plaçant essentiellement sur les portes et les fenêtres, les tapis tactiles ...
- Les barrières infrarouges utilisant des couples émetteur-récepteur.
- Les détecteurs pyroélectriques.
- Les détecteurs à échométrie de type ultrasonique.
- Les caméras CCD[20] silicium qui compte tenu de leur prix sont surtout utilisées dans les lieux publics et certaines applications de haute sécurité.

Dans la gamme des prix acceptables pour des produits à grande diffusion, le capteur pyroélectrique est sans équivalent, il est performant et bénéficie d'une technologie mature.

[20] CCD : Charge Coupled Device.

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe (cf. § 1.2.2.2), l'effet pyroélectrique consiste en la variation du moment dipolaire d'un matériau considéré mû sous l'action d'une variation temporelle de température d'origine radiative. Autrement dit, le capteur est sensible à une dynamique de flux et c'est précisément à ce niveau que la problématique se manifeste. Le capteur est sensible non pas à la présence intrinsèque d'une personne mais plus précisément à son déplacement. Cela revient à dire que le capteur peut détecter si la personne est en mouvement mais en aucun cas celui-ci ne fournira d'information si par exemple, bien que présente, la personne est endormie et/ou ne bouge pas (état *statique*). Les limites opérationnelles de ce type de capteurs ne permettent donc pas de conclure quant à la présence d'une personne immobile.

Ainsi, l'objectif final de ce travail de recherche et de concevoir un nouveau système de détection permettant de mieux répondre aux nouvelles exigences que requièrent les applications actuelles et futures tant au niveau de la sécurité, que du confort. Pour cela, il est nécessaire de confirmer la présence des personnes. La première étape de ce travail est donc de réaliser un capteur répondant à ces exigences.

1.3.2 Spécifications techniques préliminaires du détecteur infrarouge passif (DIRP)

Nous venons de l'énoncer, la demande initiale formulée par le LAAS est de disposer d'un système capable d'assurer la détection intrinsèque d'une personne dans son habitacle. Ainsi, avant de présenter le type de capteur qui sera utilisé dans notre application et pour bien comprendre le choix qui a été fait, nous avons défini les spécifications initiales propres de ce dispositif global. Nous avons établi une classification selon cinq critères qui tiennent compte en priorité, des spécificités, du capteur et du système dans son ensemble ainsi que des contraintes en termes d'énergie, de mécanique et de coût.

Spécificités du capteur :

- Bande spectrale : 7-14 µm.
- Précision de la mesure thermique : < +/- 0,5°C.
- Temps de réponse du capteur : < 60 ms.
- Température de fonctionnement : comprise entre 10°C et 50°C.
- Aptitude à discriminer le comportement d'une personne : immobilité / mouvement.

Spécificités du système :

- Distance de détection minimale après amplification : 5 m.
- Angle d'ouverture minimum de détection : 85° (+/- 42,5°).
- Temps de réponse du système : < 250 ms.
- Sortie relative à l'information (statique/dynamique) : booléenne et/ou linéaire.
- Calibration automatique du système.
- Compensation de la température ambiante du système.
- Stabilisation thermique des niveaux tensions d'alimentation : < 100 ppm/°C.

Contraintes énergétiques :

- Faible consommation : < 0,2 Watt.
- Tension d'alimentation asymétrique : + 5 Volts.
- Fonctionnement du système : piles, accus, éventuellement sur secteur.

Contraintes mécaniques :

- Exclusion de tout système mécanique actif (positionnement, optique, ...).
- Volume moyen du système : < 400 cm^3.
- Masse : < 100 grammes.

Contraintes financières :

- Technologie de fabrication du capteur : faible coût.
- Utilisation des systèmes optiques : faible coût.
- Utilisation de la technologie CMS[21] disponible dans le commerce pour la réalisation du conditionneur électronique.

1.3.3 Choix technologique du capteur pour la détection de présence

Après avoir passé en revue l'ensemble des principaux matériaux disponibles pour la détection IR passive, il résulte de cette étude bibliographique que les détecteurs quantiques sont d'excellents candidats en terme de sensibilité, de détectivité spectrale (figure 1.32) et de rapidité. Toutefois, ils requièrent pour fonctionner un environnement cryogénique. De ce fait, et compte tenu des critères énoncés précédemment : température de fonctionnement, contraintes énergétique et mécanique, nous avons exclu l'utilisation des détecteurs *refroidis* pour notre application. En effet, une consommation de quelques watts, une fiabilité fragilisée par l'usure mécanique des parties mobiles des systèmes de refroidissement, leur masse proche de ½ Kg et un encombrement non négligeable, expliquent les raisons pour lesquelles nous avons orienté notre choix sur les détecteurs pouvant fonctionner à température ambiante, autrement dit, la filière technologique des détecteurs *non refroidis*.

[21] CMS : Composants Montés en Surface.

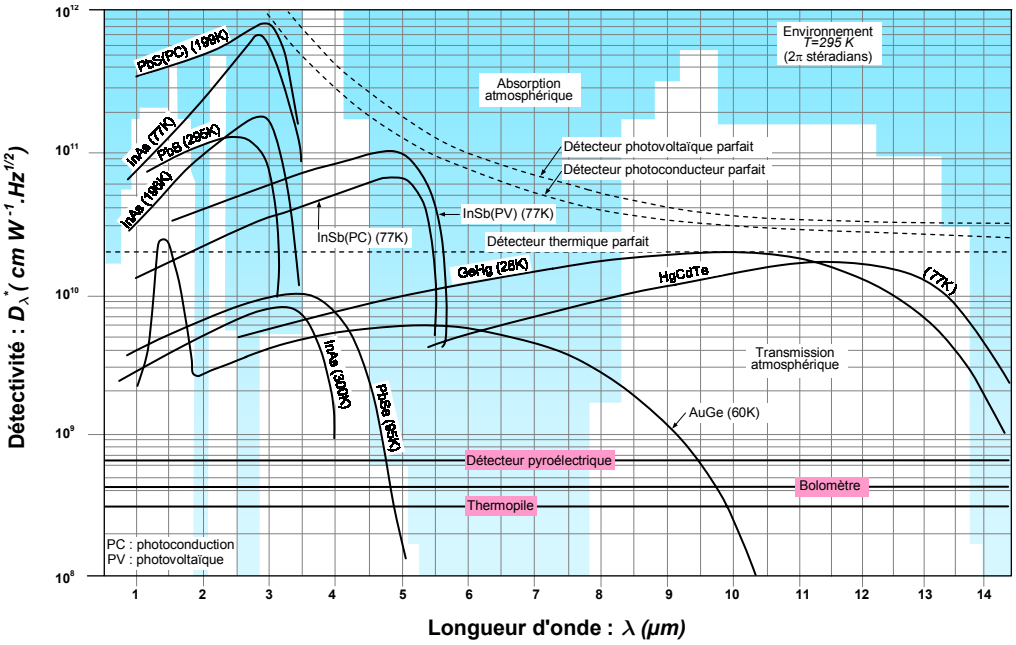


Figure 1.32 : Détectivité spécifique en fonction de la longueur d'onde.

Issus de la filière des détecteurs *non refroidis*, nous avons fait état des capteurs à effet pyroélectrique et avons montré dans notre problématique qu'ils étaient simplement sensibles à une dynamique de flux et qu'ils nécessitaient une action mécanique pour en générer les variations. Dès lors, il résulte que les technologies offertes par les détecteurs bolométriques et thermoélectriques paraissent potentiellement les mieux placées pour répondre à nos exigences. Aussi, afin d'étayer notre justification quant à la décision finale du choix technologique, le tableau 1.9 suivant présente les avantages et les inconvénients de chacun d'entre eux.

Type de capteur	Microbolomètre	Thermopile
Catégorie	Passif (résistance)	Actif (générateur de tension)
Sensibilité électrique (V. W^{-1})	5.10^3 à 10^6 (après amplification)	6 à 120 (avant amplification)
Détectivité spécifique (W^{-1}.cm.Hz$^{1/2}$)	10^8 à 10^9	10^6 à 10^8
NETD (mK)	$<$ 230 (après amplification)	$<$400 (après amplification)
Temps de réponse (ms)	15 à 20	15 à 65
Origine du bruit	*1/f* et thermique	Thermique
Réponse linéaire	Non	Oui
Nécessité d'introduire un circuit de polarisation (avant amplification)	Oui (Pont de Wheatstone, Miroir de courant ...)	Non (Auto générateur)
Auto échauffement	Oui (courants de polarisation)	Non
Nécessité de réguler le plan focal à partir de module Peltier	Oui	Non
Fonctionnement sous vide	Oui (durée n'excédant pas plus de 10 dix ans)	Non
Coût en imagerie (K€)	💰 💰 💰 (20 à 50)	💰

Tableau 1.9 : Synthèse et comparaison des caractéristiques : capteurs microbolométriques/thermopiles.

A première vue, le capteur microbolométrique nous paraît être un choix raisonnable. Comparé à la thermopile, nous constatons qu'il bénéficie d'une détectivité plus élevée, d'un NETD performant et un temps de réponse nettement supérieur. Bien évidement, ces qualités sont nécessaires mais faut-il encore qu'elles soient suffisantes. En effet, la spécificité de notre système est qu'il doit permettre une détection statique et dynamique d'un flux IR. Autrement dit, il est indispensable de s'affranchir au maximum des sources de bruit en basses fréquences, notamment le bruit en *1/f* qui est présent dans la résistance des bolomètres en raison des courants de polarisation. De plus, à cause des courants de polarisation, le bolomètre subit un phénomène d'auto-échauffement qui est à l'origine de la dérive de la sensibilité. C'est la raison pour laquelle, le bolomètre est maintenu à une température de référence obtenue à partir d'un module de refroidissement à effet Peltier induisant une augmentation de la consommation énergétique globale du système. Enfin, nous noterons que pour satisfaire l'une des contraintes de notre système, à savoir le coût, il est exclu de sceller le capteur sous vide. Or les microbolomètres fonctionnent sous vide, ceci afin de limiter les pertes par convection.

En conséquence, il nous semble plus judicieux de recourir aux capteurs thermopiles pour le développement de notre système DIRP. En effet, ce type de capteur n'a pas besoin de circuit de polarisation puisque de part sa nature intrinsèque, il convertit directement un éclairement IR en une *f.e.m,* ceci sans aucune source d'énergie électrique extérieure. Dès lors, il n'est plus utile de recourir à un système de régulation du plan focal du capteur. Concernant le bruit, notre étude montre que seul le bruit d'origine thermique affecte la détectivité de ce type de capteur, le bruit en *1/f* est quasi-inexistant. Le temps de réponse est plus élevé que celui des bolomètres mais n'est pas préjudiciable aux spécificités que nous avons établies. A priori, seule la sensibilité pourrait être critique en terme de faisabilité. Une solution pour y remédier consisterait à développer un amplificateur de tension à fort gain, entre 80 dB et 120 dB. Enfin, non seulement une thermopile n'a pas besoin d'un environnement sous vide pour fonctionner mais en plus, sa réponse en tension est parfaitement linéaire contrairement aux capteurs microbolométriques.

De plus, en raison de la maturité des microsystèmes silicium, des perspectives de fabrications collectives et des faibles coûts de réalisation, nous avons décidé de fabriquer ce détecteur au sein du laboratoire LAAS-CNRS. Afin de situer par la suite nos résultats par rapport aux travaux de la communauté scientifique, le tableau 1.10 suivant, bien que non exhaustif, présente les performances obtenues sur les capteurs thermopiles en technologie silicium issus des laboratoires de recherche depuis ces deux dernières décennies.

Année [Réf] Auteurs	R V/W	D^* $W^{-1}.cm.Hz^{1/2}$	Matériaux		Atmosphère	Traitement Electronique sur puce
			thermocouple	Membrane		
2001 [41] F. Parrain (TIMA Grenoble)	130	$5{,}03.10^7$	n-polySi/Al	Multi couches	Vide	Oui
2002 [42] M. Boutchich (IEMN Lille)	109*	-	n-polySi/ p-polySi	SiO2/ SiN_x	Air	Non
2002 [43] L. Yueving	14	$6{,}20.10^7$	p-polySi/Al	SiO2/ Si3N4	Air	Non
2001 [44] E. Socher	18,1	-	n-polySi/Al	Multi couches SiO2	N	Oui
2001 [45] A. Schaufelbühl	11	$1{,}56.10^7$	n-polySi/Al	SiO2	Air	Oui
1999 [46] W. Ghanem	136	$8{,}90.10^7$	n-polySi/ p-polySi	SiO2	-	Oui
1993 [47] R. Lenggenhager	44 72	$2{,}0.10^7$ $2{,}40.10^7$	n-polySi / p-polySi	SiO2	Air	Non
1995 [48] J. Schieferdecker	48 12	$9{,}30.10^7$ $1{,}30.10^8$	n-polySi/Al	SiO2/ Si3N4	-	
1986 [49] I. Hyun Choi	54	$5{,}80.10^6$	p-PolySi/Au	SiO2/ Si3N4	-	Non
1993 [50] J. Lu	13,7 33,7	- -	p-PolySi/Au p-PolySi/Al	SiO2/ Si3N4	- -	Oui
1981 [51] G. R. Lahij	7 9,6 6	$3{,}50.10^6$ $4{,}80.10^6$ $6{,}00.10^6$	p-PolySi/Au n-PolySi/Au Bi/Sb	Si	Air	Non

*: R donnée en ($\mu V/(W.m^2)$)

Tableau 1.10 : Comparaison des performances de différents capteurs thermopiles en technologie Silicium et thermocouples issues des laboratoires de recherche.

Conclusion

Ce chapitre est consacré à la présentation de notre problématique de recherche et à la présentation de l'état de l'art de la détection IR.

Le LAAS est associé -en France- aux études IR depuis plus de trente ans pour des applications militaires initialement, pour des applications civiles (automobile) et aujourd'hui pour des applications liées à "l'habitat intelligent". Notre objectif, dans ce cadre, est de concevoir un détecteur multipoints de performances égales aux capteurs pyroélectriques déjà commercialisés mais capable de faire de la détection statique. De plus, le développement des techniques de fusion multisensorielle permettra d'enrichir le détecteur de données nouvelles : sens et vitesse de déplacement, dimension des objets ...

Nous présentons dans cette perspective, un état de l'art des pratiques actuelles. Nous y notons une évolution forte vers les détecteurs matriciels fonctionnant à température ambiante et dans la bande spectrale des infrarouges lointains *(bande 7 – 14 μm)*.

En fait, nous avons le choix entre la détection bolométrique et la détection thermoélectrique : dans les deux cas, s'appliquent les micronanotechnologies propres à résoudre les problèmes de coût/performances. Une filière française (ULIS) existe avec laquelle nous collaborons qui développe des matrices bolométriques. Pour cette raison et pour avoir fait une analyse comparée des performances des deux filières, nous avons choisi d'explorer la voie thermoélectrique : elle est moins sensible mais aussi moins bruyante. De plus, elle génère de l'énergie ce qui à terme peut jouer un rôle bénéfique.

Chapitre 2

Modélisation d'un détecteur infrarouge thermoélectrique

Sommaire

Introduction **49**

2.1 Méthodologie de conception **51**

2.1.1 Présentation de la conception descendante : Modélisation "Top-down" 51

2.1.2 Description conceptuelle du système optronique infrarouge à détection passive 52

2.2 Modélisation du système optronique infrarouge à détection passive (DIRP) **53**

2.2.1 Détermination du rayonnement thermique émis par le corps humain 53

2.2.2 Evaluation de la transmission spectrale atmosphérique 55

2.2.3 Propriétés du sous-système optique 57

2.2.4 Détermination du flux reçu par le capteur 60

2.2.5 Paramètres fondamentaux du capteur 62

2.2.5.1 Sensibilité électrique du capteur 62

2.2.5.2 Puissance équivalente au bruit (*NEP*) 63

2.2.5.3 Les sources de bruits 63

2.2.5.4 Détectivité 63

2.2.5.5 Détectivité spécifique 63

2.2.5.6 La constante de temps 64

2.2.5.7 Eclairement équivalent au bruit (*NEI*) 64

2.2.5.8 Ecart de température équivalent au bruit (*NETD*) 65

2.3 Modélisation analytique des capteurs thermopiles micro-usinés sur substrat de silicium **65**

2.3.1 Présentation des différents modes de transferts thermiques 65

2.3.2 Description de la structure retenue pour l'élaboration de la thermopile 67

2.3.3 Propriétés thermoélectriques des matériaux 68

2.3.3.1 L'effet Seebeck dans les métaux 68

2.3.3.2 L'effet Seebeck dans les semi-conducteurs 69

2.3.3.3 Le facteur de mérite d'une thermojonction 70

2.3.4 Détermination du gradient thermique situé entre les thermojonctions 71

2.3.5 Sensibilité, Puissance équivalente au bruit, Détectivité 78

2.3.6 Estimation du temps de réponse 78

2.4 Etude de l'influence des dimensions du capteur **80**

2.4.1 Méthodologie d'analyse 80

2.4.1.1 Influence de la longueur et largeur des bras de PolySi 80

2.4.1.2 Influence des dimensions de l'absorbeur et de la membrane pour W_{poly} fixée 82

2.4.1.3 Influence du nombre et des dimensions des bras de PolySi pour une taille d'absorbeur Wa fixée 83

Conclusion **87**

Introduction

Nous avons montré au chapitre 1 que la détection infrarouge passive peut favorablement s'appuyer sur des capteurs de technologie thermopile, pour répondre aux exigences requises par le système de détection que nous voulons proposer. Rappelons simplement ici que le but est de concevoir et réaliser un dispositif IR permettant la détection statique et dynamique pour des applications de sécurité et de confort dans l'habitat.

Dans ce deuxième chapitre, nous commençons par présenter la méthodologie de conception retenue pour réaliser l'architecture du système global. Notre approche est de construire le modèle de la chaîne de transmission, prendre en compte la personne à détecter, l'influence du trajet atmosphérique, les lois de l'optique mises en jeu dans le système DIRP[1] ainsi que le détecteur et son conditionnement électronique. Pour ce faire, nous tenterons d'établir le modèle complet du système optronique infrarouge passif dans son environnement en considérant chacun des sous-systèmes le constituant (cf. chapitre1 §1.1.5). Les relations nécessaires à l'évaluation des paramètres fondamentaux du détecteur seront présentées. L'analyse des facteurs déterminants permettra d'évaluer les performances opérationnelles du système de détection IR passif. Les paramètres conceptuels relatifs au dimensionnement du capteur seront alors établis. Enfin, après cette analyse globale, nous discuterons des résultats obtenus ainsi que des améliorations que nous avons apportées à la conception des détecteurs IR.

[1] DIRP : Système de détection IR passif.

2.1 Méthodologie de conception

2.1.1 Présentation de la conception descendante : Modélisation "Top-down"

La méthodologie adoptée dans ce travail s'inscrit dans une démarche de conception "Top-down" que notre groupe de recherche MIS[2] tente de mettre en place. Cette approche vise une double exigence : la réduction des délais de conception et l'optimisation avant la fabrication. Le concept, s'appuie sur une description en sous-systèmes en tenant compte des priorités des spécifications générales et des éventuelles modifications de telle sorte que par cette approche, il soit possible d'intégrer de nouvelles composantes sans pour autant modifier les autres sous-systèmes [52], [53]. Dès lors, le modèle global (prototype virtuel) offre la possibilité d'effectuer des calculs d'évaluation en sélectionnant les critères à optimiser (figure 2.1).
En résumé, la méthodologie que nous proposons de suivre repose sur la volonté de rassembler dans un modèle informatique du système global toutes les connaissances cumulées sur les composants, les technologies d'assemblage, les conditions d'assemblage ..., jusqu'à pouvoir assurer, par la simulation numérique, que le système est fonctionnel et qu'il répond aux spécifications du cahier des charges.

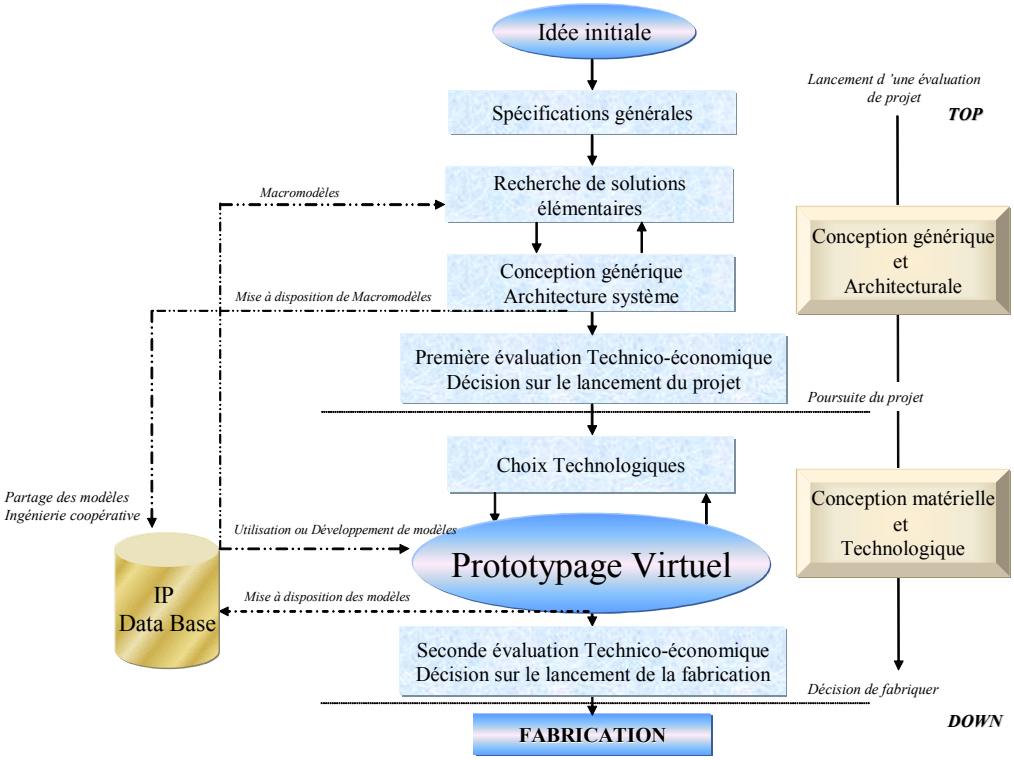


Figure 2.1 : Synoptique de la conception descendante (Modélisation "Top-down").

L'objectif vers lequel nous nous efforçons de converger ici est la recherche de modèles analytiques encapsulés, corrélés et pouvant être validés par des modélisations aux éléments finis. Notre système est éminemment pluridisciplinaire. Sa modélisation implique une cohé-

[2] MIS : Microsystèmes et Intégration des Systèmes.

rence des outils de simulation informatique entre les niveaux de conception et les partenaires concepteurs. La principale difficulté se situe alors dans la capacité à faire coopérer des modèles de différentes disciplines : électronique, optoélectronique, thermique... Dès lors, si l'on considère qu'un métier ne peut pas se substituer à un autre, qu'il a ses propres outils d'analyse et de simulation : MATLAB, MATHCAD, SABER, MENTOR GRAPHICS, CADENCE ..., il parait difficile de réduire l'hétérogénéité induite par la pluridisciplinarité. De plus, les métiers ne veulent pas forcément partager leur savoir-faire : la stratégie d'une modélisation sous la forme de modèles IP va dans ce sens.
Dans notre démarche de conception, nous avons décidé de modéliser dans un premier temps notre système au moyen du logiciel MATHCAD, ceci en attendant de s'appuyer sur le standard VHDL-AMS : c'est un langage standardisé capable de faire coopérer des modèles numériques, analogiques et mixtes appelé à remplir le vide de la simulation pluridisciplinaire.

2.1.2 Description conceptuelle du système optronique infrarouge à détection passive

Un système optronique infrarouge passif peut être représenté selon le synoptique suivant (figure 2.2). Nous distinguons dans cet ensemble les différents blocs ou sous-systèmes qui définissent l'architecture globale du système DIRP.

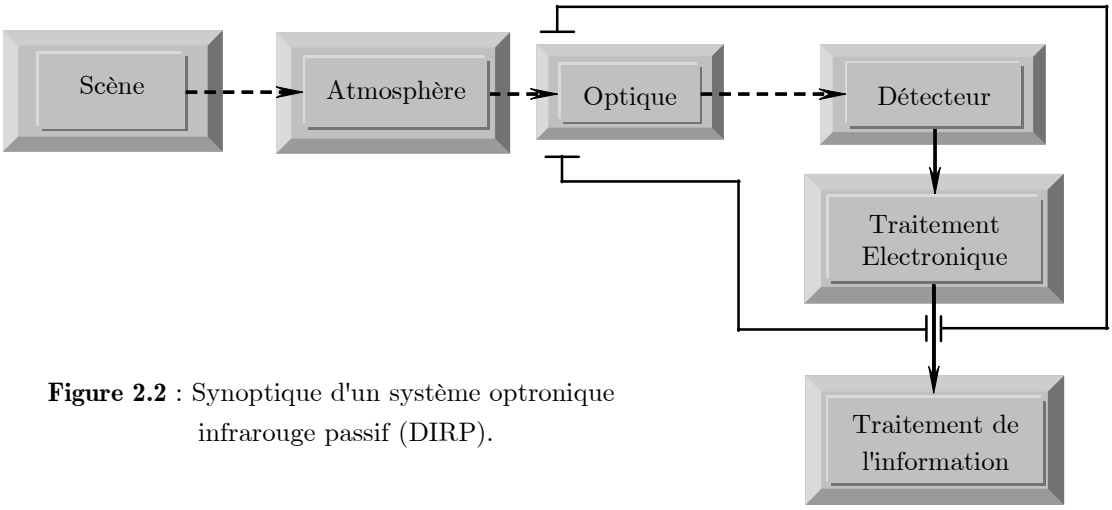


Figure 2.2 : Synoptique d'un système optronique infrarouge passif (DIRP).

L'analyse de ce synoptique montre que le rayonnement émis par la scène subit des modifications lors de son parcours avant d'atteindre le détecteur. En effet, le rayonnement de la scène est altéré lors de son trajet atmosphérique, et d'autre part, qu'il est soumis à des modifications liées aux propriétés optiques du système. L'élément de détection convertit le rayonnement énergétique focalisé par l'optique en énergie électrique, laquelle sera ensuite traitée par une électronique adaptée. Les algorithmes de traitement embarqués suivent cette électronique et permettront de traiter les informations selon des applications de sécurité et/ou de confort.

A partir de cette description, nous voyons que pour supporter notre travail de modélisation, il sera nécessaire de disposer d'un certain nombre de paramètres, sur la scène et la

transmission atmosphérique. Pour l'élaboration du système DIRP, les caractéristiques du système sont choisies par le concepteur en fonction des technologies disponibles. C'est le cas en particulier du détecteur, de son conditionnement électronique et des optiques.

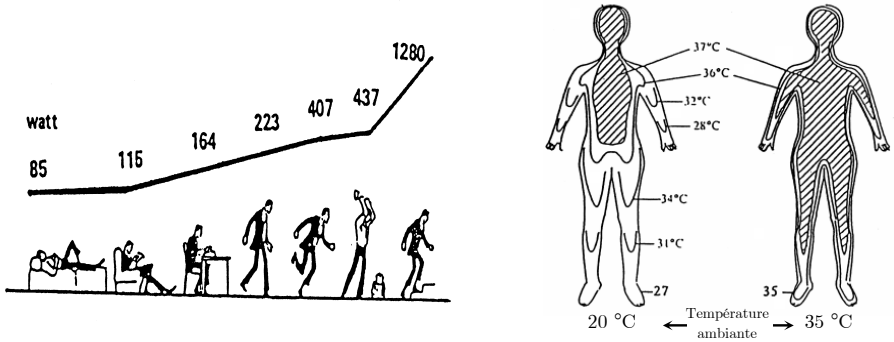
2.2 Modélisation du système optronique infrarouge à détection passive

2.2.1 Détermination du rayonnement thermique émis par le corps humain

Pour estimer les radiations mesurées par le détecteur infrarouge, il est nécessaire de connaître non seulement la température du corps à détecter, mais également son émissivité. Ceci permettra d'évaluer le rayonnement émis par la scène qui constituera la donnée d'entrée de notre modèle optronique DIRP. Dans cette étude, nous déterminerons la puissance intrinsèque émise par l'homme. Nous nous appuierons sur les données physiologiques de l'organisme humain [54] : on considérera une personne de taille moyenne (1,65 m), pesant 65 Kg représentant 1,7 m^2 de peau à la température superficielle de 34 °C dont l'émissivité est évaluée de 0,98 à 1 [55]. Dès lors, une première évaluation de la puissance peut être obtenue à partir de la loi de **Stefan Boltzmann.** Elle traduit la puissance radiative, sur l'ensemble du spectre électromagnétique, émise par une source de chaleur dont la température diffère de celle de l'environnement dans laquelle elle se situe. La présence de l'homme détermine la source de chaleur dont la puissance d'émission P_h (W) est donnée par la relation suivante :

$$P_h = \varepsilon_h \sigma A \left(T_{sin\,k}^4 - T_a^4 \right) \tag{2.1}$$

Avec : - ε_h l'émissivité de l'homme (0,98),
- σ la constante de (5,67.10^{-8} Wm^{-2}k^{-4}),
- A la surface de peau,
- T_{sink} la température superficielle de l'organisme humain (307,16 K),
- T_a la température ambiante (297,16 K).



-a- Variation du dégagement de chaleur en fonction de l'activité physique.

–b- Dépendance thermique de la peau en fonction de la température ambiante.

Figure 2.3 : Echanges thermiques de l'organisme humain [55].

En appliquant la relation (2.1), l'estimation de la puissance radiative théorique P_h d'un homme donne $P_h = 105$ W (figure 2.3 -a-). La puissance dissipée peut être considérablement augmentée par l'activité physique. Par exemple, lors d'exercices plus ou moins intenses, les dispositifs de lutte contre l'élévation de température sont mis en action : la vasodilatation de la peau augmente la température et ses possibilités de déperdition. La transpiration permet aussi d'éliminer de la chaleur par évaporation dans le milieu ambiant. Tous ces facteurs contribuent à définir la température du corps humain (figure 2.3 -b-). Ainsi, compte tenu de ces variations thermiques mais aussi du choix de la bande spectrale, nous adapterons notre estimation des écarts de température $\Delta T = T_{sink} - T_{sc}$ entre la source T_{sink} et la température moyenne de scène T_{sc}. Nous limiterons nos calculs à la bande spectrale $\Delta\lambda = \lambda_a - \lambda_b$ [7-14 µm] en accord avec notre cahier des charges et nous considèrerons des écarts thermiques compris entre 3 K et 12 K avec une température de scène variant entre 280 K et 320 K. Dès lors, l'émittance spectrale de la scène globale est donnée par :

$$\Phi_h = \varepsilon_h \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \frac{\frac{hc}{k} e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)}}{\lambda T^2 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1\right)} R_{cn}(\lambda) \Delta T d\lambda \tag{2.2}$$

Les calculs montrent (figure 2.4) que les flux émis par le corps humain sont dépendants de la température ambiante et aussi des écarts de température. Par exemple, nous observons que pour $T_{sc} = 300$ K et $\Delta T = 3$ K, le flux émis a pour valeur 9,38 µW/mm^2 alors que pour un $\Delta T = 10$ K son intensité a quasiment triplé, $\Phi_h = 31{,}29$ µW/mm^2. Cette augmentation est d'autant plus importante que la température T_{sc} est élevée. Toutefois, on remarque que l'émittance du flux émis pour $\Delta T = 3$ K est dans une moindre mesure dépendante de T_{sc}. En effet, pour $T_{sc} = 320$ K, le flux émis vaut 11,32 µW/mm^2 alors que pour $T_{sc} = 280$ K, il est seulement de 7,57 µW/mm^2.

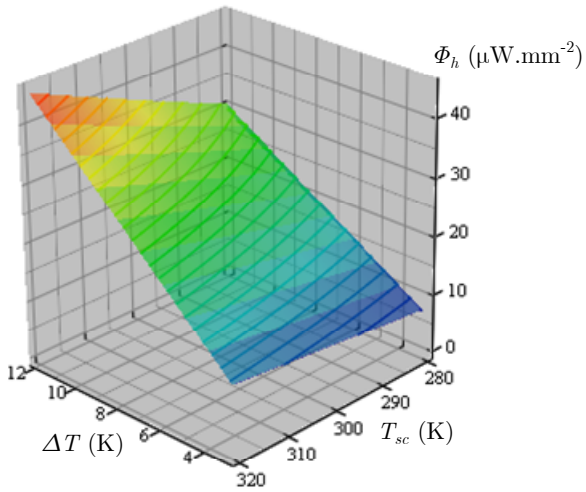


Figure 2.4 : Emittance spectrale du corps humain en fonction des écarts thermiques (ΔT) entre celui-ci et différentes températures de scène moyenne (T_{sc}).

2.2.2 Evaluation de la transmission spectrale atmosphérique.

Comme rappelé dans le premier chapitre (§1.1.5.1), lorsqu'un rayonnement IR traverse une couche atmosphérique, la présence de vapeur d'eau et de gaz carbonique sont à l'origine d'altérations de la transmission spectrale. Ces altérations sont essentiellement engendrées par deux phénomènes qui sont :

- l'absorption propre des constituants gazeux de l'atmosphère,
- la diffusion de la lumière par les particules solides ou liquides qu'elle contient.

Dans le premier cas, ce sont principalement les masses de vapeur d'eau H_2O et de gaz carbonique CO_2 contenue dans l'atmosphère qui absorbent les rayonnements infrarouges à certaines longueurs d'onde.

Dans le second cas, il s'agit d'un phénomène de diffusion multidirectionnelle des rayonnements induits par la présence, d'aérosol, de gouttelettes de pluie, brume, brouillard…, ce qui se traduit par la dissipation et l'atténuation de l'énergie du rayonnement incident transmis. Cette influence ne sera pas traitée ici, car l'effet [56] dans le domaine des infrarouges aux distances inférieures à quelques mètres n'est pas prépondérant et peu probable lorsque le système est utilisé en intérieur.

Dans les bandes d'absorption moléculaire, la transmission atmosphérique est peu dépendante de la concentration des différents gaz de l'atmosphère, de la température et de la pression atmosphérique, mais particulièrement affectées par l'épaisseur de la couche à traverser. C'est pourquoi, dans notre modèle, nous évaluerons l'influence de la transmission atmosphérique en nous appuyant sur un modèle statistique à bande étroite [57]. Nous considérerons les effets du gaz carbonique CO_2, de la vapeur d'eau H_2O dans un environnement où la température et la pression sont fixées. Nous nous appuyons sur les travaux de J. Taine [58], [59] qui formulent l'équation régissant la transmission atmosphérique pour de faibles distances au travers d'un gaz :

$$\overline{\tau}_g(\Delta\lambda,T) = exp\left[-\frac{2\,\overline{\gamma}}{\overline{\delta}(\Delta\lambda,T)}\left(\sqrt{1+\frac{\overline{k}(\Delta\lambda,T)\,\overline{\delta}(\Delta\lambda,T)\,P\,x_m\,d}{\overline{\gamma}}}-1\right)\right] \tag{2.3}$$

avec :
- $\overline{\gamma}$, $\overline{k}(\Delta\lambda,T)$ et $\overline{\delta}(\Delta\lambda,T)$: les constantes statistiques [2,3] calculées dans la fenêtre spectrale $\Delta\lambda$.
- P : la pression atmosphérique (1 atm = 1,014.10^5 Pa).
- x_m : la fraction molaire du gaz absorbant.
- d : l'épaisseur atmosphérique (cm).
- T : la température environnante (k).

Ainsi, à partir de l'équation (2.1) qui établit le taux de transmission atmosphérique pour un mélange gazeux et compte tenu des hypothèses de calcul, l'influence totale de la transmission spectrale depuis la source jusqu'au détecteur est donnée par l'équation :

$$\tau_{at}(\Delta\lambda,T) = \prod \overline{\tau}_g(\Delta\lambda,T) \tag{2.4}$$

Après implémentation du modèle dans le logiciel MathCad, le coefficient de transmission est déterminé dans la fenêtre spectrale 7-14 µm puisque celle-ci est centrée sur la gamme des longueurs d'ondes émises par les objets à température ambiante et plus particulièrement sur les rayonnements émis par un être humain (cf. chapitre1 §1.1.5.1). Les résultats issus du modèle sont présentés sur les réseaux des courbes figure 2.5 et 2.6. Elles décrivent l'allure de la transmission atmosphérique soumise à l'influence des différents paramètres considérés. La figure 2.5 illustre l'influence de l'épaisseur atmosphérique dans un environnement correspondant aux conditions qualifiées de bien être dans un habitat : un taux d'humidité de 55 %, une teneur en carbone de 0,04 % pour une pression atmosphérique de 1 atm et une température ambiante $T = 300$ K. Ainsi, de la lecture des courbes, nous retiendrons que la fenêtre de transmission atmosphérique présente un facteur de transmission compris entre 85 et 96 % pour des distances inférieures à 10 mètres, ceci sur une largeur de bande 8-12 µm.

Concernant la figure 2.6, nous avons évalué le facteur de transmission atmosphérique en choisissant des conditions extrêmes de la teneur en vapeur d'eau. En effet, si l'on considère les deux taux suivants, 25 % et 80 % d'humidité, correspondant respectivement à un air très sec ou quasi-saturé en humidité, nous constatons que le facteur de transmission est d'autant plus élevé que l'air est humide. Ce résultat montre bien l'influence que peuvent avoir les molécules d'eau sur le facteur de transmission.

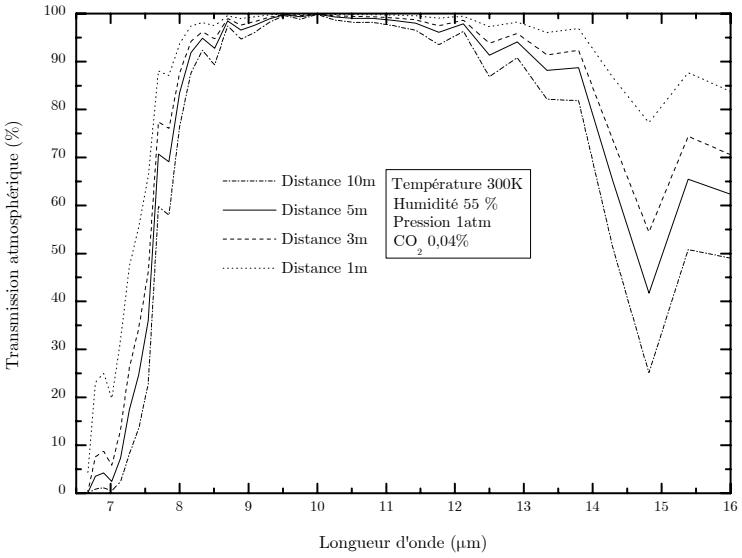


Figure 2.5 : Transmission atmosphérique en fonction de son épaisseur.

Nous avons également évalué l'influence de la transmission en considérant un seuil dangereux de teneur en CO_2 (2 %) présent dans l'air, teneur qui correspond au début d'asphyxie de l'être humain. Les résultats obtenus montrent qu'un taux relativement élevé en CO_2 altère dans une moindre mesure la largeur de la fenêtre mais n'affecte pas de façon significative l'amplitude du facteur de transmission.

En conséquence, compte tenu des hypothèses de travail, nous retiendrons que le facteur de transmission dépend essentiellement de l'épaisseur de la couche atmosphérique dans la bande 8-12 µm.

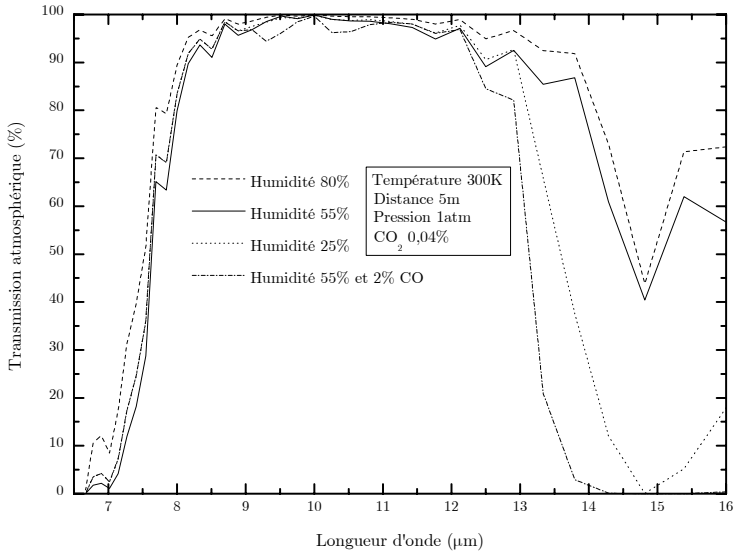


Figure 2.6 : Transmission atmosphérique en fonction de l'humidité contenue dans l'air.

2.2.3 Propriétés du sous-système optique

La résolution du système optique repose non seulement sur la détermination de ces paramètres géométriques en terme d'étendue spatiale mais aussi sur les caractéristiques physiques des matériaux utilisés (cf. chapitre1 §1.1.5.2). Dans le cadre de notre application, les paramètres géométriques nécessaires à l'évaluation de la quantité de flux reçu par le système DIRP dans sa globalité, depuis le flux émis par la scène jusqu'à la surface active du capteur sont représentés par la figure 2.7. Le sous-système optique ainsi défini tient compte à la fois, des dimensions de la scène, de la lentille et du récepteur, et s'appuie sur la notion de l'angle solide (voir l'encadré p.59).

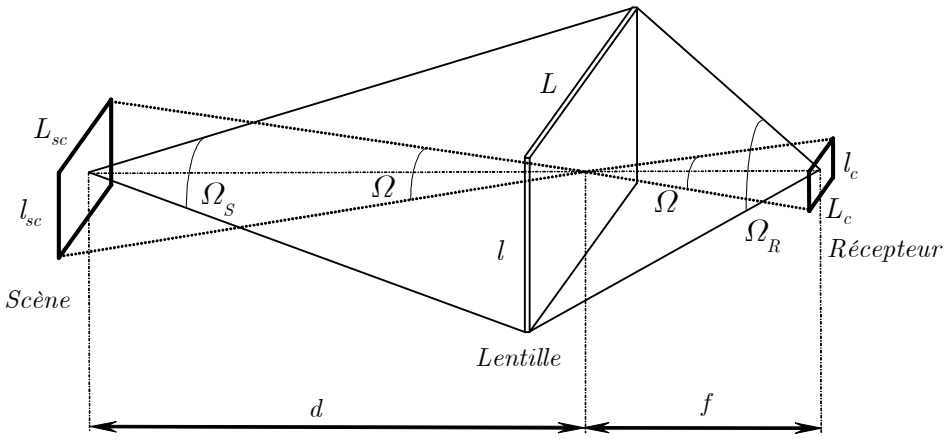


Figure 2.7 : Configuration géométrique du sous-système optique.

Nous désignerons Ω_S l'angle solide défini par la scène, Ω_R l'angle solide défini par le récepteur et Ω l'angle solide de champ élémentaire instantané ($IFOV$[3]) du système selon les équations suivantes :

$$\Omega_S = \frac{L\,l}{d^2} \qquad \Omega_R = \frac{L\,l}{f^2} \qquad \Omega = \frac{L_{sc} l_{sc}}{d^2} = \frac{L_c l_c}{f^2} \qquad (2.5), (2.6), (2.7)$$

Dans ces équations, L et l représentent respectivement la longueur et la largeur de la lentille considérée. L_{sc} et l_{sc} sont associées aux dimensions de la source (la scène) et L_c, l_c définissent les dimensions du récepteur (la zone sensible du capteur).
En fonction des dimensions de la cible à détecter, nous présentons les équations qui fixent les angles d'ouvertures horizontaux et verticaux (figure 2.8) :

- Angle d'ouverture verticale : $$tan\frac{\alpha}{2} = \frac{l_{sc}}{2d} = \frac{l_c}{2f} \qquad (2.8)$$

- Angle d'ouverture horizontale : $$tan\frac{\beta}{2} = \frac{L_{sc}}{2d} = \frac{L_c}{2f} \qquad (2.9)$$

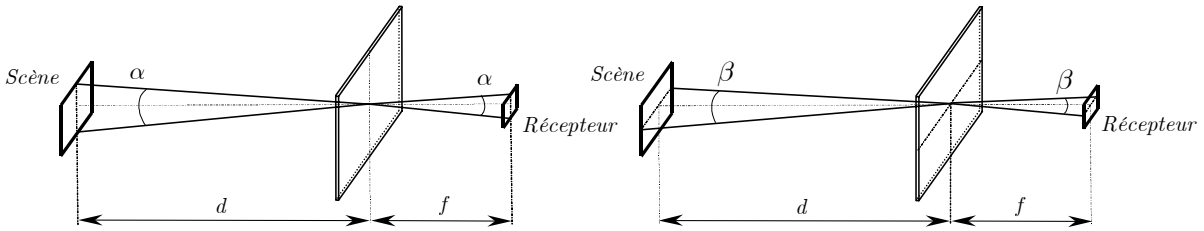


Figure 2.8 : Définition géométrique des angles ouvertures.

On notera que les angles α et β définissent également la résolution optique du système, c'est-à-dire le rapport entre la distance d du détecteur cible et la surface de la zone thermique à détecter ($L_{sc} \times l_{sc}$.).

Par ailleurs, dans un souci de réaliser un dispositif simple et à moindre coût, nous avons opté pour des lentilles de Fresnel fabriquées à base de plastique polyéthylène commercialisées par la société ***muRata***. Elles sont particulièrement dédiées aux applications IR dans la bande [8-14 µm] (cf.courbe de transmission figure 2.11 -a-) et de faible coût. Ses caractéristiques principales sont : une longueur et une largeur respectivement de 51,5 mm et 44,5 mm, une focale f = 29,6 mm, une épaisseur de 0,7 mm et une plage d'utilisation en température comprise entre 25 °C et 55 °C. Concernant la sélectivité spectrale, nous avons aussi modélisé un filtre optique pour la bande passante [8-14 µm], à travers sa courbe de transmission (figure 2.12 -a-).

[3] IFOV : Instantaneous Field Of View.

Angle solide (Ω)

En considérant une source S et un récepteur R, (figure 1) séparés par une distance de longueur d, avec dS et dR les éléments de surface respectivement relatifs à la source et au récepteur ; nous pouvons déterminer les angles solides $d\Omega_S$ et $d\Omega_R$ propres à la source vis à vis du récepteur et inversement.

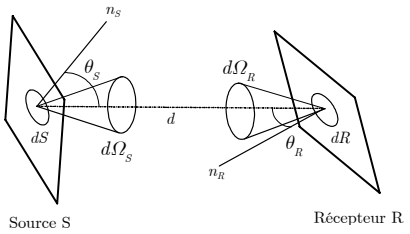


Figure 2.9 : Angle solide.

Avec θ_S et θ_R les angles entre les directions dS et dR par rapport aux normales n_S et n_R, on détermine :

- soit $d\Omega_S$ l'angle solide sous lequel on voit dR depuis dS :

$$d\Omega_S = \frac{dR\cos\theta_R}{d^2}\text{ , si } \cos\theta_s = 0 \text{ alors : } \Omega_S = \frac{R}{d^2}$$

- soit $d\Omega_R$ l'angle solide sous lequel on voit dS depuis dR :

$$d\Omega_R = \frac{dS\cos\theta_S}{d^2}\text{ , si } \cos\theta_s = 0 \text{ alors : } \Omega_R = \frac{S}{d^2}$$

Ainsi, en introduisant entre la source et le récepteur une lentille (figure 2.10), la détermination des paramètres optiques du système est obtenue en s'appuyant sur les équations précédentes.

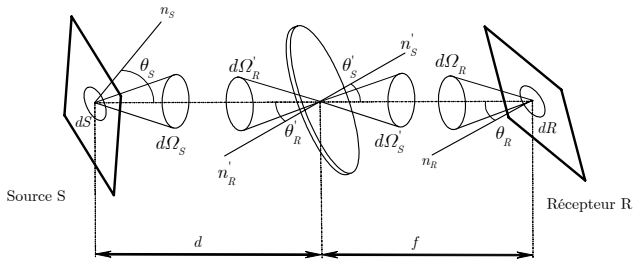


Figure 2.10 : Système optique.

La lentille étant située à l'interface de la source et du récepteur, celle-ci joue un double rôle. Elle est assimilée à un récepteur de surface noté R' par rapport à la source S séparée par la distance d et se comporte comme une source équivalente de surface notée S' par rapport au récepteur R séparé par la focale f de la lentille. D'où les équations des angles solides suivantes :

$$d\Omega_S = \frac{dR^{'}\cos\theta_R^{'}}{d^2} \qquad \text{et} \qquad d\Omega_S^{'} = \frac{dR\cos\theta_R}{f^2}$$

$$d\Omega_R^{'} = \frac{dS\cos\theta_S}{d^2} \qquad \text{et} \qquad d\Omega_R = \frac{dS^{'}\cos\theta_S^{'}}{f^2}$$

Dès lors, si le système optique présente un angle nul entre chacune des directions d'éléments de surface et les normales, on en déduit que :

$$\Omega_S = \frac{R^{'}}{d^2} \qquad \text{et} \qquad \Omega_S^{'} = \frac{R}{f^2}$$

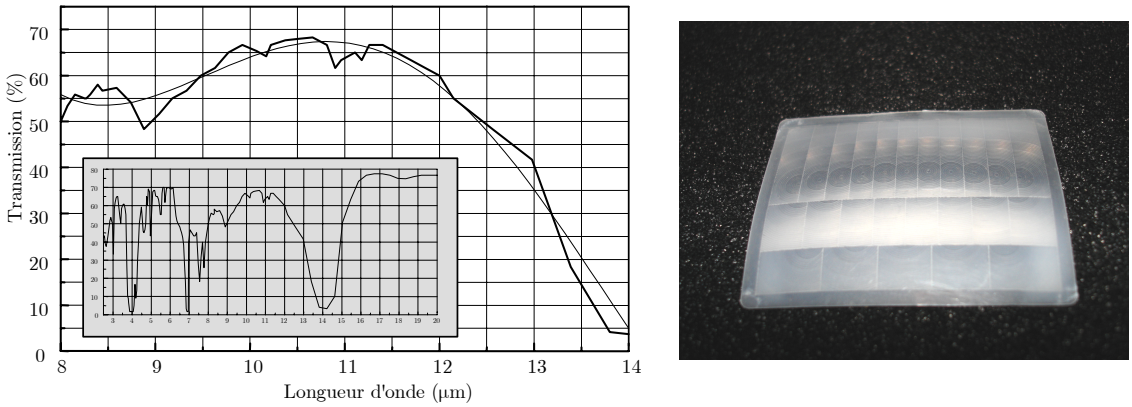
$$\Omega_R^{'} = \frac{S}{d^2} \qquad \text{et} \qquad \Omega_R = \frac{S^{'}}{f^2}$$

La lentille étant symétrique, nous pouvons poser les égalités suivantes :

$$\left|\Omega_R^{'}\right| = \left|\Omega_S^{'}\right| = \Omega \qquad \text{soit :} \qquad \Omega = \frac{S}{d^2} = \frac{R}{f^2}$$

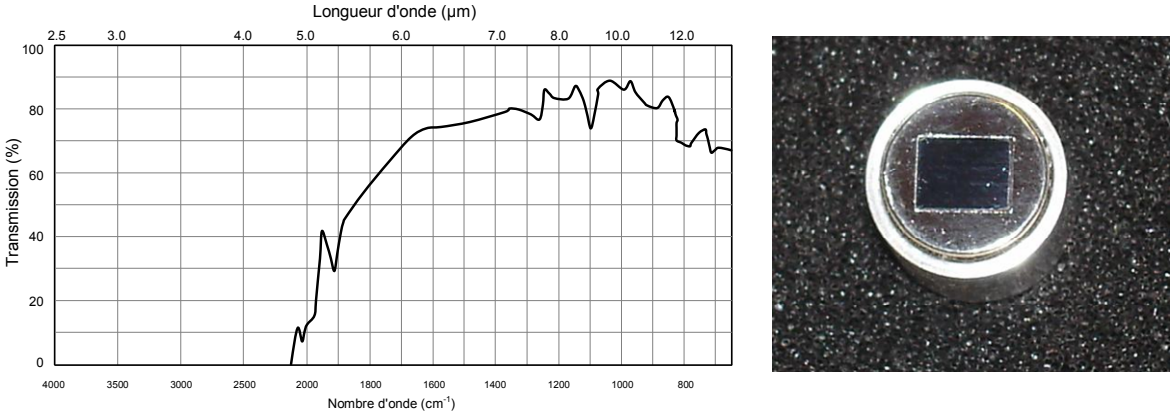
Comme R' égale S', avec Φ_p le diamètre de la lentille on déduit que :

$$R' = S' \Rightarrow \frac{\pi Ø_p^2}{4} = \Omega_S d^2 = \Omega_R f^2$$



-a- Courbe de transmission spectrale de la lentille. -b- Photographie de la lentille.

Figure 2.11 : Présentation de la lentille de Fresnel (***muRata***).



-a- Courbe de transmission spectrale du filtre infrarouge. -b- Photographie du capot muni de son filtre infrarouge.

Figure 2.12 : Présentation du filtre optique scellé dans son boîtier (***muRata***).

2.2.4 Détermination du flux reçu par le capteur

Pour aborder l'évaluation de la puissance reçue par le capteur, nous utilisons dans notre étude, la loi dite de **Bouger** corrigée par la transmission spectrale atmosphérique τ_{at} qui établit la relation de l'éclairement spectral $dE/d\lambda$ d'un objet d'intensité spectrale $dI/d\lambda$ localisé à la distance d de la lentille et contenu dans le champ élémentaire instantané, soit :

$$\frac{dE}{d\lambda} = \frac{dI}{d\lambda}\frac{\tau_{at}(\lambda)}{d^2} \tag{2.10}$$

Comme $\frac{dE}{d\lambda} = \frac{dF / d\lambda}{S_{opt}}$, la détermination du flux spectral noté $dF_{opt}/d\lambda$ situé à la surface de la lentille S_{opt} ainsi que le flux spectral $dF_d/d\lambda$ reçu par la zone sensible du détecteur s'écrivent sous la forme :

- flux situé à la surface de l'optique : $\frac{dF_{opt}}{d\lambda} = \frac{dI}{d\lambda}\frac{S_{opt}}{d^2}\tau_{at}(\lambda)$ (2.11)

- flux reçu par le détecteur : $\frac{dF_d}{d\lambda} = \frac{dI}{d\lambda}\frac{S_{opt}}{d^2}\tau_{at}(\lambda)\tau_{opt}(\lambda)$ (2.12)

L'intensité spectrale, résultante du produit de la luminance spectrale $dL/d\lambda$ de la source par la surface S_{sc} de cette dernière, conduit à l'équation suivante :

$$\frac{dI}{d\lambda} = \frac{dL}{d\lambda}S_{sc} \tag{2.13}$$

Dès lors, comme la luminance spectrale est liée à l'émittance spectrale d'un corps quelconque selon l'équation :

$$\frac{dL}{d\lambda} = \frac{1}{\pi}\frac{dR}{d\lambda}, \tag{2.14}$$

nous sommes en mesure d'estimer le flux que recevra la surface du détecteur. Ainsi, l'équation du flux reçu $dF_d^{amb} / d\lambda$ par le détecteur depuis une scène rayonnant à la température ambiante T_a s'écrit :

$$\frac{dF_d^{amb}}{d\lambda} = \frac{1}{\pi}\frac{dR}{d\lambda}\Omega S_{opt}\tau_{at}(\lambda)\tau_{opt}(\lambda) \tag{2.15}$$

Sous l'effet d'un changement de la température ambiante ou bien de la présence d'une personne, il résulte une loi de variation de flux notée $d(dF/d\lambda)$:

$$\frac{dF_d}{d\lambda} = \frac{dF_d^{amb}}{d\lambda} \pm d\left(\frac{dF_d}{d\lambda}\right) \tag{2.16}$$

avec : $$d\left(\frac{dF_d}{d\lambda}\right) = \frac{\partial\left(dF_d / d\lambda\right)}{\partial\varepsilon}d\varepsilon + \frac{\partial\left(dF_d / d\lambda\right)}{\partial T}dT \tag{2.17}$$

soit : $$\Delta\frac{dF_d}{d\lambda} = \frac{\partial\left(dF_d / d\lambda\right)}{\partial\varepsilon}\Delta\varepsilon + \frac{\partial\left(dF_d / d\lambda\right)}{\partial T}\Delta T \tag{2.18}$$

Dès lors, si la variation du flux $\Delta(dF/d\lambda)$ est la conséquence unique d'un changement de la température ambiante $\Delta T = T_0 - T_a$, nous considérerons que l'émissivité de la scène est inchangée ($\Delta\varepsilon = 0$), cela revient à écrire que :

$$\Delta \frac{dF_d}{d\lambda} = \frac{\partial (dF_d / d\lambda)}{\partial T} \Delta T = \frac{\Omega\, S_{opt}}{\pi} \frac{\partial (dR / d\lambda)}{\partial T} \Delta T \tau_{at}(\lambda) \tau_{opt}(\lambda) \tag{2.19}$$

Si la variation du flux résulte de la présence d'une personne, l'évolution de ce dernier est causé par la différence d'émissivité ($\Delta\, \varepsilon \neq 0$) entre la scène et cette personne ainsi que de l'écart thermique respectif ΔT. C'est pourquoi, dans le cadre de cette hypothèse, l'équation de la loi de variation s'écrit sous la forme :

$$\Delta \frac{dF_d}{d\lambda} = \frac{\Omega\, S_{opt}}{\pi}\ \tau_{at}(\lambda)\ \tau_{opt}(\lambda) \left[\frac{\partial (dR / d\lambda)}{\partial \varepsilon} \Delta\varepsilon + \frac{\partial (dR / d\lambda)}{\partial T} \Delta T \right] \tag{2.20}$$

En conséquence, comme l'élévation du flux reçu est comprise dans une fenêtre spectrale $\Delta\lambda = \lambda_b - \lambda_a$, les équations s'écrivent :

- Pour un changement de température de scène :

$$\Delta \frac{F_d}{d\lambda} = \frac{\Omega\, S_{opt}}{\pi} \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \frac{\partial (dR / d\lambda)}{\partial T} \Delta T\ \tau_{at}(\lambda)\ \tau_{opt}(\lambda)\ d\lambda \tag{2.21}$$

- Pour un changement de température et d'émissivité :

$$\Delta \frac{F_d}{d\lambda} = \frac{\Omega\, S_{opt}}{\pi} \tau_{at}(\lambda)\ \tau_{opt}(\lambda)\ d\lambda \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial (dR / d\lambda)}{\partial \varepsilon} \Delta\varepsilon + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial (dR / d\lambda)}{\partial T} \Delta T \right] \tag{2.22}$$

2.2.5 Paramètres fondamentaux du capteur

2.2.5.1 Sensibilité électrique du capteur

La sensibilité d'un détecteur en tension $\mathfrak{R}_v$, ou en courant $\mathfrak{R}_i$, estime la réponse d'un capteur considéré lorsqu'il est soumis au mesurande. Dans notre étude, le mesurande est le flux thermique d'origine infrarouge de rayonnement dF, il en résulte donc une variation en tension dv du capteur.

$$dv = \frac{\partial v}{\partial F} dF + \frac{\partial v}{\partial i} di = \mathfrak{R}_v\, dF + Z\, di \tag{2.23}$$

C'est donc le terme $\mathfrak{R}_v = \dfrac{\partial v}{\partial F}$ (V/W) qui caractérise la sensibilité en tension d'un capteur, avec Z l'impédance interne de ce dernier. D'une manière pratique, on écrira la sensibilité d'un capteur, sous la forme :

$$\mathfrak{R}_v = \frac{dV_s}{dF_c} \tag{2.24}$$

Où V_S est la tension de sortie du capteur et F_c le flux incident à la surface d'un des capteurs.

2.2.5.2 Puissance équivalente au bruit (*NEP*[4])

La puissance équivalente au bruit estime la puissance minimale de flux détectable par le capteur en considérant un rapport signal sur bruit unitaire. Autrement dit, il y a égalité entre le signal de sortie V_s correspondant à un minimum de flux et V_b la tension de bruit intrinsèque délivrée par le capteur, soit :

$$NEP = \frac{V_b}{\mathfrak{R}_v} \qquad \text{(W)} \tag{2.25}$$

2.2.5.3 Les sources de bruit

Outre les sources de bruit engendrées à travers la masse thermique du capteur ou bien en provenance des radiations incidentes qui sont respectivement le siège des fluctuations thermiques et radiatives, nous admettrons, compte tenu de sa prépondérance, que seul le bruit d'origine thermique (bruit de Johnson) affecte les détecteurs thermoélectriques puisqu'il est 10_3 à 10_5 fois plus intense [60]. On rappelle que le bruit de scintillement en *1/f* n'est pas présent dans ce type de capteur (cf. Chapitre1 §1.3.3).

$$V_b = \sqrt{4\,\kappa\,T\,R_{el}\Delta f} \qquad \text{(V/Hz}^{1/2}\text{)} \tag{2.26}$$

avec κ la constante de Boltzmann, R_{el} la résistance électrique du capteur et Δf la bande passante du circuit électronique de mesure et T la température.

2.2.5.4 Détectivité

Bien que le capteur soit d'autant plus performant à convertir un flux thermique pour un *NEP* d'autant plus faible, on traduira cette spécificité en introduisant la notion de détectivité *D*, qui est l'inverse du *NEP*, soit :

$$D = \frac{1}{NEP} \qquad \text{(W}^{-1}\text{)} \tag{2.27}$$

2.2.5.5 Détectivité spécifique

Conventionnellement, on préfère utiliser la notion de détectivité spécifique D^* qui rend indépendant, de manière intrinsèque, chaque type de capteur en considérant que la détectivité D est fonction de la racine carrée de la surface A, ainsi que de la bande passante électrique de mesure Δf.

$$D^* = D\sqrt{A\,\Delta f} = \frac{\sqrt{A\,\Delta f}}{NEP} = \frac{\mathfrak{R}_v\sqrt{A\,\Delta f}}{V_b} \qquad \text{(W}^{-1}\text{.cm.Hz}^{1/2}\text{)} \tag{2.28}$$

[4] NEP : Noise Equivalent Power.

Dès lors, on spécifiera les conditions de mesure de la manière suivante :

$D^*(T, f, \Delta f)$ avec : - T, la température de la source,
- f, la fréquence de modulation de la source,
- Δf, la bande passante électrique de mesure.

2.2.5.6 La constante de temps

Le temps de réponse d'un capteur caractérise le temps nécessaire pour que le signal électrique en sortie atteigne 63 % de sa valeur finale lorsqu'il est soumis à une brusque variation du mesurande.

2.2.5.7 Eclairement équivalent au bruit (*NEI*[5])

L'évaluation de l'éclairement équivalent au bruit *NEI* collectée à la surface de l'optique rend compte du flux minimal reçu lorsque le rapport signal sur bruit est unitaire. Son expression est de la forme :

$$NEI = E_{opt}\frac{V_b}{V_S} = \frac{\sqrt{A\,\Delta f}}{S_{opt}\,D^*\,\tau_{opt}} \qquad (\mathrm{W.cm^{-2}}) \qquad (2.29)$$

Ainsi, en considérant les dimensions de la surface active A du capteur et les écarts de température situés entre la scène et l'objet à détecter, l'évaluation du *NEI* représentée sur la figure 2.13 montre que d'une manière générale le *NEI* affecte le système de détection lorsque les écarts de température sont d'autant plus intenses et que la surface A du détecteur est élevée.

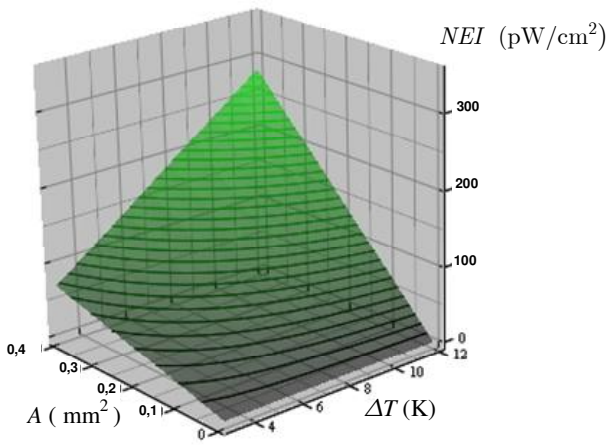


Figure 2.13 : NEI en fonction de la surface A du capteur et de l'écart de température ΔT.

[5] NEI : Noise Equivalent Irradiance.

2.2.5.8 Ecart de température équivalent au bruit (*NETD*[6])

L'écart de température équivalent au bruit *NETD* représente l'écart de température minimum détectable entre une scène de fond et un objet, ceci en considérant que le signal de sortie généré par le capteur présente un rapport signal sur bruit unitaire.

$$NETD = \frac{\pi\sqrt{A\,\Delta f}}{\Omega\, S_{opt}\, D^{*}\tau_{opt}} \frac{1}{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \frac{\partial(dR/d\lambda)}{\partial T}\, d\lambda} \qquad \text{(K)} \qquad (2.30)$$

La figure 2.14 montre que le *NETD* est particulièrement affecté par la bande passante du circuit de lecture. Ces résultats montrent que le choix de la bande passante détermine les performances du système de détection en terme de dynamique.

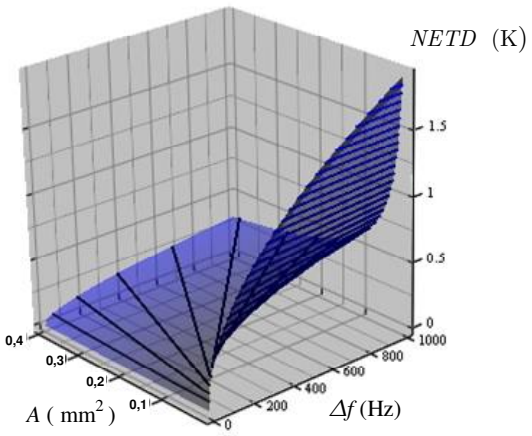


Figure 2.14 : NETD en fonction de la surface A du capteur et de la bande passante électronique.

2.3 Modélisation analytique des capteurs thermopiles micro-usinés sur substrat de silicium

2.3.1 Présentations des différents modes de transferts de la chaleur

Dans ce paragraphe, nous commencerons par rappeler brièvement les différents échanges de transfert thermique présents dans le capteur. Pour ce faire, nous nous appuierons sur le schéma simplifié (figure 2.15) sur lequel nous identifions le flux IR incident qui est converti en chaleur par l'absorbeur et les pertes par réflexion, la naissance du flux de *conduction* thermique ainsi que les pertes par *rayonnement* et *convection* le long de la structure. Outre les phénomènes d'absorption et de réflexion, chacune de ces composantes est régie par une loi qui lui est propre.

[6] NETD : Noise Equivalent Temperature Difference.

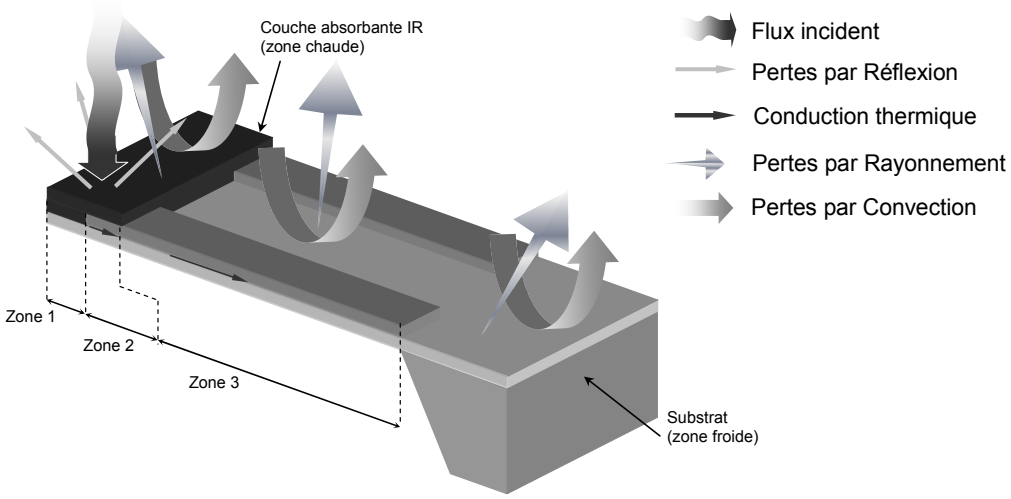


Figure 2.15 : Les différents modes de transfert thermique.

La *conduction* est un phénomène de diffusion qui permet la propagation de la chaleur à l'intérieur d'un corps solide. On notera que c'est un mode de transfert sans transport de matière et qu'elle n'est pas possible dans le vide en raison du manque de support moléculaire. La conduction est énoncée à partir de la loi de **Fourier** :

$$\vec{q} = -\lambda \, \overrightarrow{grad}(T) \tag{2.31}$$

où $\vec{q}$ représente la densité de flux de chaleur (W/m^2) et λ la conductivité thermique (W/m.K)

La *convection* se manifeste lorsqu'un corps cède son énergie au milieu qui l'entoure en raison de la présence d'un débit ou d'une circulation de fluide présente à sa surface. Autrement dit, la chaleur se sert du fluide comme moyen de transport pour se déplacer. Lorsque l'écoulement du fluide est imposé, ce phénomène est qualifié d'échange thermique par *convection forcée*, par opposition à la *convection naturelle* engendrée par un gradient de température entre deux points d'un fluide. La convection est régie par la loi de **Newton**, elle caractérise le flux de chaleur q qui est dissipé entre/par un fluide de température T_a et un corps à la température T_s.

$$q = h\left(T_s - T_a\right) \tag{2.32}$$

où q représente la densité de flux de chaleur perdue (W/m^2) et h désigne le coefficient d'échange entre le corps et le fluide (W/m^2.K^{-1}).

La transmission de chaleur par *rayonnement* correspond à un flux d'ondes électromagnétiques émises par un corps gris porté à une température, (cf. chapitre1 §1.1.3). Elle est donnée par la relation de **Stephan-Boltzmann**.

$$q = \sigma_b \varepsilon \left(T_s^4 - T_a^4\right) \tag{2.33}$$

où q représente la densité de flux de chaleur perdue (W/m^2), σ_b la constante de Stephan-Boltzmann (W.m^{-2}.K^{-4}), ε l'émissivité de la surface portée de température T_s et T_a la température ambiante.

2.3.2 Description de la structure retenue pour l'élaboration de la thermopile

La structure du détecteur retenue est présentée sur la figure 2.16, elle repose sur l'association de N thermojonctions connectées en série qui délivrent une tension totale ΔV_{AB} que l'on estime à partir de l'équation suivante :

$$\Delta V_{AB} = N\alpha_{AB}(T_h - T_c) = N\alpha_{AB}R_{th}\eta P_0 \tag{2.34}$$

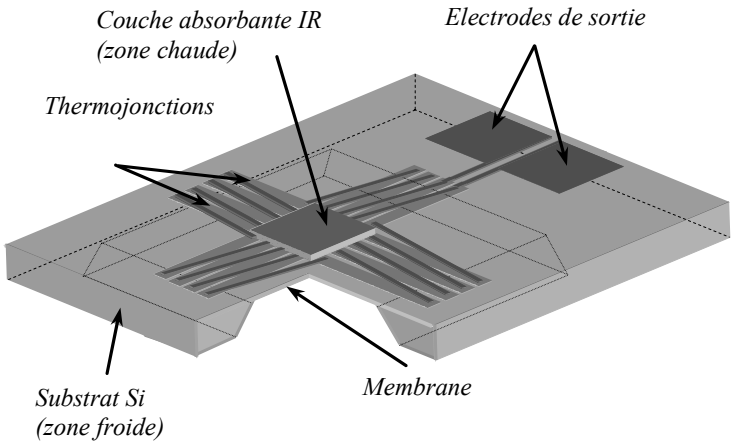


Figure 2.16 : Structure élémentaire de la thermopile.

où R_{th} (K/W) représente la résistance thermique de la thermopile, η le coefficient d'absorption et P_0 la puissance radiative (W) collectée par la surface absorbante S_a (m^2) du capteur ($P_0 = \Phi_0 S_a$) et α_{AB} le coefficient Seebeck du couple de matériaux. Afin d'accroître la tension générée, les thermojonctions sont disposées sur une membrane, obtenue par un micro-usinage de volume du silicium, dont le rôle contribue à augmenter le gradient thermique entre les extrémités des zones chaudes soumises aux rayonnements infrarouges absorbés et les zones froides maintenues à la température ambiante. Le rapport de la tension générée ΔV_{AB} sur la puissance reçue P_0 représente la sensibilité électrique de la thermopile notée $\mathfrak{R}_v$.

$$\mathfrak{R}_v = \frac{\Delta V_{AB}}{P_0} = N\alpha_{AB}R_{th}\eta \tag{2.35}$$

2.3.3 Propriétés thermoélectriques des matériaux

2.3.3.1 L'effet Seebeck dans les métaux

Comme présenté dans le chapitre 1 (§1.2.2.4), l'effet d'un échauffement différentiel ΔT situé entre les extrémités d'une thermojonction entraîne l'apparition d'une différence de potentiel ΔV_{AB} dite de **Seebeck** dont l'expression est :

$$\Delta V_{AB} = \int_{T_c}^{T_h} (\alpha_A - \alpha_B)\, dT = \alpha_{AB} \Delta T \tag{2.36}$$

Dans les métaux [61], le principe de l'effet Seebeck repose sur la statistique de **Fermi-Dirac**, ce qui revient à dire que si l'on applique un gradient de température sur un barreau métallique, la concentration des électrons reste inchangée. Elle ne varie pas en fonction de la température, seul un phénomène de redistribution de leur vitesse d'agitation thermique entre les extrémités du matériau conjugué aux variations du niveau de fermi engendre la naissance de la tension Seebeck (figure 2.17) par thermodiffusion.

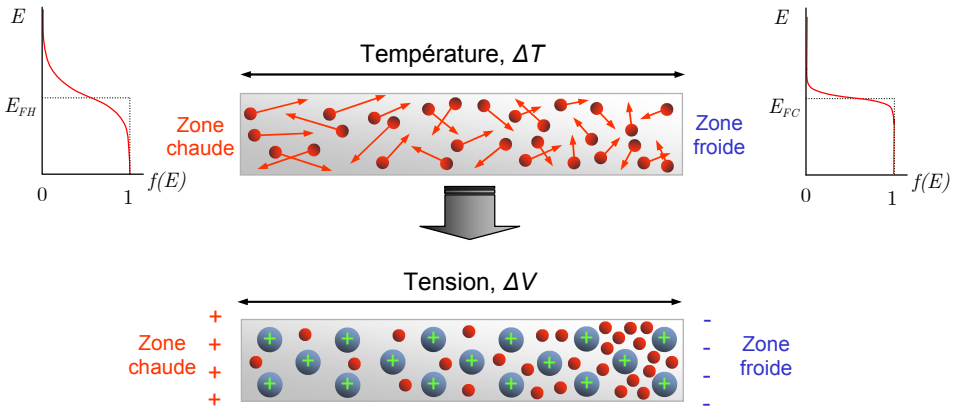


Figure 2.17 : Influence de la température sur l'énergie cinétique des porteurs d'un métal.

Son estimation est calculée à partir de l'équation suivante [61] :

$$\alpha_m \approx -\frac{\pi^2 \kappa^2 T}{3qE_{FO}} x_m \tag{2.37}$$

Avec : E_{FO}, le niveau de Fermi à la température de 0 K, κ la constante de Boltzmann, q la charge de l'électron et x_m un facteur de correction dont les valeurs sont présentées dans le tableau 2.1.

Métal	α_m à 27°C (µV.K^{-1})	E_{FO} (eV)	x_m
Al	-1,8	11,6	2,78
Cu	1,84	7	-1,79
Au	1,94	5,5	-1,48

Tableau 2.1 : Coefficients Seebeck calculés dans les métaux.

2.3.3.2 L'effet Seebeck dans les semi-conducteurs

Dans les semi-conducteurs, c'est la statistique de **Maxwell-Boltzmann** qui doit être appliquée. La concentration des porteurs dans les semi-conducteurs étant dépendante de la température et de leur énergie cinétique, l'extrémité chaude du barreau possède plus d'électrons avec une plus grande énergie. Ces porteurs vont donc diffuser vers la région froide, lesquels créent un champ électrique qui est à l'origine de l'effet Seebeck. On notera que le coefficient Seebeck [62] est lié par la relation $\nabla E_F / q = \alpha_s \nabla T$, où $\alpha_s \nabla T = \mu_F$ représente le potentiel chimique du barreau et α_s le coefficient Seebeck. Ainsi, les résultats de calculs obtenus [63] pour un semi-conducteur extrinsèque de type N ou P non dégénéré s'écrivent sous la forme :

$$\alpha_n = -\frac{\kappa}{q}\left\{ln\left(\frac{N_c}{n}\right) + \frac{5}{2} + s_n + \phi_n\right\} \text{ et } \alpha_p = +\frac{\kappa}{q}\left\{ln\left(\frac{N_v}{p}\right) + \frac{5}{2} + s_p + \phi_p\right\} \qquad (2.38), (2.39)$$

où N_c, N_v représentent respectivement les densités d'états dans la bande de conduction et de valence, n et p représentant la concentration des porteurs dans chacune des bandes d'énergie. Le terme $s_{n,p}$ est un coefficient qui exprime la relation entre la mobilité des porteurs et leur énergie, $\phi_{n,p}$ traduit la transmission de quantité de mouvement des phonons aux porteurs sous l'action d'un flux chaleur, (typiquement à $T = 300\ K$, $-1 < s_{n,p} < 2$ et $\phi_{n,p} \approx 0$ pour de forts dopages ou bien $\phi_{n,p} \approx 5$ aux faibles dopages).

Concernant le polysilicium [64], l'évaluation du coefficient Seebeck noté α_{poly} est obtenue à partir de l'approximation du temps de relaxation des porteurs dans la théorie de **Boltzmann**. A partir d'une quantité d'atome dopant n ou p supérieure à 10^{18}cm^{-3}, il s'écrit sous la forme :

$$\alpha_{poly} = \pm\frac{\kappa}{q}\left(\frac{2\ F_1(\zeta_q)}{F_0(\zeta_q)} - \zeta_q\right) \qquad (2.40)$$

où $F_m(\zeta_q) = \int_0^\infty \frac{x^m}{exp(x-\zeta_q)+1}dx$ correspond à l'intégrale de Fermi et ζ_q aux énergies de Fermi réduites qui s'écrivent sous la forme :

$$\zeta_n = -\frac{ln\, N_c}{n} \text{ et } \zeta_p = -\frac{ln\, N_v}{p} \qquad (2.41), (2.42)$$

La courbe d'évaluation (figure 2.18) montre que le coefficient Seebeck du polysilicium de type N est d'autant plus performant que le niveau de dopage est faible. Toutefois, le choix d'un matériau ayant un coefficient Seebeck trop élevé ne serait pas judicieux car la résistance est d'autant plus élevée que le niveau de dopage est faible. C'est pourquoi, pour mieux estimer le pouvoir thermoélectrique d'une thermojonction, on introduit la notion de facteur de mérite.

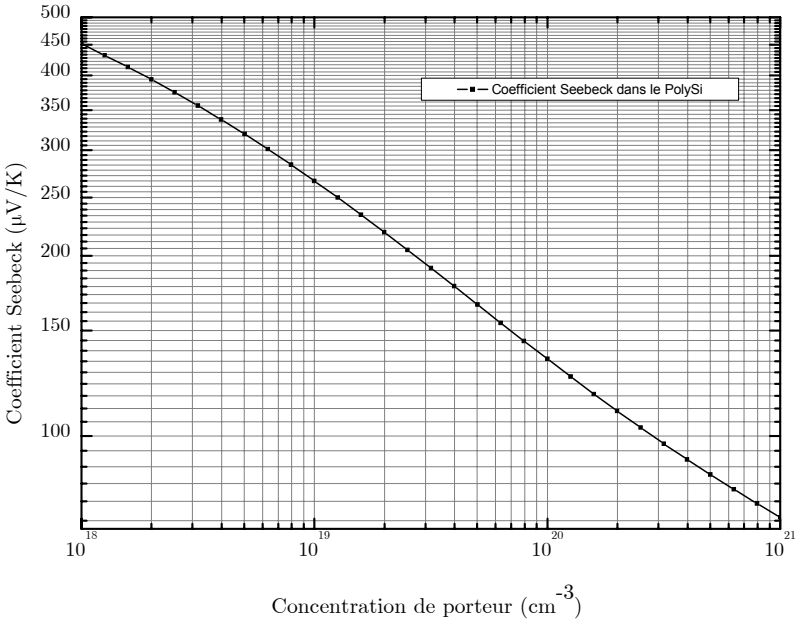


Figure 2.18 : Evolution du coefficient Seebeck (T=300 K) dans le PolySi dopé au phosphore en fonction de la concentration de porteur n.

2.3.3.3 Le facteur de mérite d'un thermocouple

Outre un coefficient Seebeck élevé, pour augmenter l'efficacité d'un thermocouple, il est nécessaire que les matériaux soient de bons conducteurs électriques, ceci afin de minimiser la résistance ohmique et de fait de réduire le bruit de Johnson. Ils doivent garantir également un gradient thermique entre les extrémités des thermojonctions, autrement dit, une conductivité thermique faible. Or, selon la loi de **Wiedemann-Franz** [65], il est difficile d'obtenir de tels matériaux. En effet, cette loi nous montre que les conductivités électriques et thermiques représentatives des transferts de porteurs au sein d'un métal sont dépendantes de la température et sont régies par l'équation :

$$\frac{\sigma}{K_{th}} = \frac{3}{\pi^2}\left(\frac{q}{\kappa}\right)^2 \frac{1}{T_{abs}} = \frac{1}{LT_{abs}} \tag{2.43}$$

avec σ, K_{th}, respectivement la conductivité électrique et thermique du matériau, q, la charge de l'électron, κ, la constante de Boltzmann, T_{abs}, la température absolue et L, le nombre de Lorentz ($2{,}5.10^{-8}$ $V^2.K^{-2}$).
Ainsi, afin d'apprécier les performances intrinsèques du pouvoir thermoélectrique d'un matériau, on introduit la notion de facteur de mérite Z (cf. chapitre1 §1.2.2.4) selon l'équation :

$$Z = \alpha^2 \frac{\sigma}{K_{th}} \tag{2.44}$$

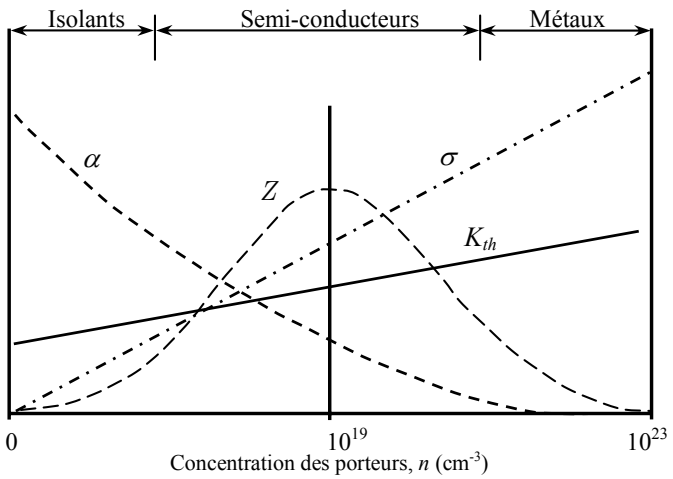


Figure 2.19 : Evolution du facteur de mérite pour des matériaux isolants, semi-conducteurs et conducteurs.

Comme le montre la figure 2.19, nous constatons un intérêt certain pour les semi-conducteurs ayant une concentration d'impuretés située entre 10^{18} et 10^{20} cm^{-3}. Toutefois, un thermocouple constitué de deux matériaux semi-conducteurs ne constitue pas une solution optimale. Cette association élèverait l'impédance équivalente du thermocouple et de ce fait réduirait la détectivité du capteur. De plus, pour assurer une compatibilité avec la filière technologique de fabrication compatible CMOS, nous avons écarté l'utilisation de matériaux semi-métalliques (Bi/Sb, NiCu, NiCR ...). C'est pourquoi nous avons choisi le couple de matériaux polysilicium/aluminium pour l'élaboration des thermojonctions. L'expression du facteur de mérite [4] s'écrit :

$$Z_{Poly/Al} = \frac{\left(\alpha_{Poly} - \alpha_{Al}\right)^2}{\left[\left(\rho_{Poly}\,\kappa_{Poly}\right)^{1/2} + \left(\rho_{Al}\,\kappa_{Al}\right)^{1/2}\right]^2} \tag{2.45}$$

2.3.4 Détermination du gradient thermique situé entre les thermojonctions

Pour déterminer l'écart de température entre les extrémités des thermocouples, nous considèrerons d'une part les flux de conduction thermique dans les matériaux suivant l'axe longitudinal de direction x et d'autre part les flux de chaleur échangés par convection et rayonnement (cf. §2.3.1) situés à la surface de la structure (figure 2.20). De plus, comme la constitution générale du capteur présente des axes de symétrie (figure 2.21 -a-), nous modéliserons l'ensemble du capteur sur un seul cadran [66] et établirons le calcul du gradient thermique ΔT entre les extrémités des thermojonctions à partir de l'équation fondamentale de la chaleur en régime établi. Ainsi, le bilan thermique sur un élément dx s'écrit :

$$-div\left[\lambda\,\nabla(T(x) - T_a)\right] + \sum pertes = 2x\,\eta\,\Phi_0 dx \tag{2.46}$$

avec,

$$\sum pertes = h\left(T(x) - T_a\right)2x\,dx + \sigma_b\varepsilon\left(T^4(x) - T_a^4\right)2x\,dx \tag{2.47}$$

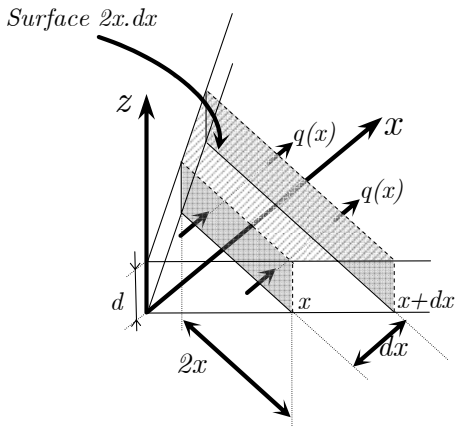


Figure 2.20 : Représentation unidimensionnelle d'un quartet de tronçon d'élément dx de la structure.

Dès lors, le développement de l'équation fondamentale s'écrit sous la forme :

$$-\lambda\, d\, \frac{dT(x)-T_a}{dx}\, 2x - \left(-\lambda\, d\, \frac{dT(x+dx)-T_a}{dx}\; 2x\right) + \sum pertes = 2x\, \eta\, \Phi_0 dx \tag{2.48}$$

Soit après simplification,

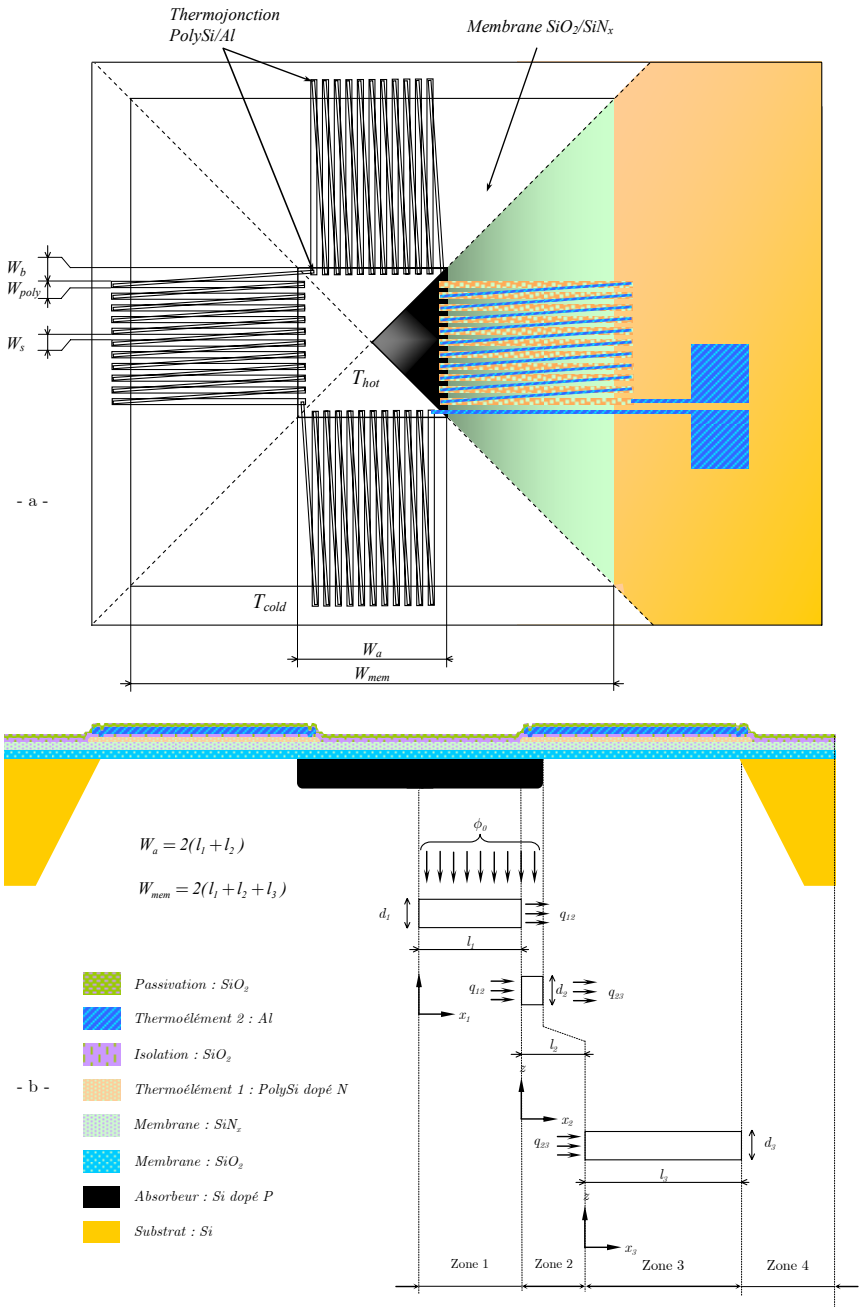
$$-\lambda\, d\; 2x \frac{\partial^2 T(x)-T_a}{\partial x^2} dx + \sum pertes = 2x\, \eta\, \Phi_0\, dx \tag{2.49}$$

On en déduit l'équation différentielle qui régit la distribution thermique au sein de la structure :

$$\underbrace{-\lambda\, d\, \frac{\partial^2 T(x)}{\partial x^2}}_{Conduction\ thermique} + \underbrace{h\left(T(x)-T_a\right)}_{Pertes\ par\ convection} + \underbrace{\sigma_b \varepsilon \left(T^4(x)-T_a^4\right)}_{Pertes\ par\ rayonnement} = \underbrace{\eta\, \Phi_0}_{Flux\ radiatif\ absorbé} \tag{2.50}$$

où λ est la conductivité thermique (W/m.K), d l'épaisseur du matériau (m), h le coefficient de convection (W/m^2.K), σ_b la constante de Stefan-Boltzmann, ε le coefficient d'émissivité et $T(x)$ la température le long de l'élément ∂x et ϕ_0 le flux incident (W/m^2).

Compte tenu de la topologie du capteur, le gradient thermique entre les thermojonctions chaudes et froides sera déterminé en fractionnant la structure globale en 4 zones (figure 2.21 -b-). Ainsi, pour chacune des zones n considérées, nous établirons l'équation de transfert de chaleur et assurerons la continuité des flux thermiques aux interfaces en considérant les conditions aux limites situées à leurs frontières respectives.



Nomenclature :

λ : conductivité thermique (W/m.K).
d : épaisseur du matériau (m).
h : coefficient de convection (W/m^2.K).
σ_n : constante de Stefan-Boltzmann.
ε : coefficient d'émissivité.
$T(x)$: température le long de l'élément ∂x .
ϕ_0 : flux incident (W/m^2).
n : désignation de la zone considérée (n = 1, 2, 3).
l_n : longueur d'une zone n suivant l'axe des abscisses x_n.
q_{12}, q_{23} : flux de conduction aux interfaces des zones (1-2 et 2-3).
T_a : température ambiante.
ε_{n1}, ε_{n2} : coefficient d'émissivité de la face supérieure et de la face inférieure du capteur dans la zone n considérée.
h_n : coefficient de convection dans la zone n.
λ_i, d_i : conductivité thermique et épaisseur des matériaux constituant une couche individuelle de référence noté i.
l_i, W_i : longueur et largeur des matériaux de référencés par l'indice i.
W_s : espace entre deux thermocouples.
W_b : marge de l'absorbeur.

Figure 2.21 : Schéma équivalent général.

Le terme l_n représente la longueur de chacune des zones (n = 1, 2, 3) suivant l'axe des abscisses x_n, et q_{12} , q_{23} les flux de conduction aux interfaces des zones 1-2 et des zones 2-3. On considèrera la distribution de la température dans la zone 4 égale à la température ambiante notée T_a. De même, le gradient thermique dans l'épaisseur (axe z) de chacune des zones sera négligé. Autrement dit, la température sur la face supérieure et inférieure de la structure sera considérée identique compte tenu de la faible épaisseur de la membrane [67]. Enfin, comme les écarts de température entre les extrémités des thermojonctions chaude et froide sont très proches de la température ambiante, nous considérons :

$$\frac{|T(x_n)-T_a|}{T_a} \ll 1 \qquad \text{avec} \qquad T_n(x_n)=T(x_n)-T_a \qquad (2.51),\ (2.52)$$

Dès lors, le terme relatif aux radiations peut être linéarisé et l'équation stationnaire de chaleur (2.50) en fonction de (2.51) et (2.52) avec n l'indice faisant référence à la zone étudiée, peut s'écrire sous la forme :

$$-\lambda_n\, d_n \frac{\partial^2 T_n(x_n)}{\partial x_n^2} + \left[h_n + 4\sigma_b(\varepsilon_{n1}+\varepsilon_{n2})T_a^3\right]T_n(x_n) = \eta\, \Phi_0 \qquad (2.53)$$

où λ_n est la conductivité thermique équivalente et d_n l'épaisseur équivalente constituée par chacun des matériaux constituant une couche individuelle référencée par l'indice i. Les deux termes sont fonction du nombre $n'=N/4$ de thermocouples présents dans le cadran, de la largeur des matériaux thermoélectriques ($W_{i=al}$ pour l'aluminium, $W_{i=poly}$ pour le PolySi ...) présents dans la zone étudiée, ainsi que de la largeur de l'absorbeur W_a et de la membrane W_{mem}, telles que décrites par F. Völklein et H. Baltes [66].
ε_{n1} et ε_{n2} représentent respectivement le coefficient d'émissivité de la face supérieure et inférieure du capteur dans la zone n considérée,

$$\lambda_n = \frac{\sum_i \lambda_i d_i}{\sum_i d_i} \qquad d_n = \sum_i d_i \qquad (2.54),\ (2.55)$$

avec h_n, le coefficient de convection [68],[69] dont l'expression est :

$$h_n = \lambda_g \left(\frac{1}{d_1 + 2\frac{2-a_g}{a_g}\frac{\lambda_p}{p}} + \frac{1}{d_2 + 2\frac{2-a_g}{a_g}\frac{\lambda_p}{p}} \right) \qquad (2.56)$$

où λ_g est la conductivité thermique du gaz atmosphérique contenu dans le boîtier (figure 2.22), d_1 la distance entre la membrane et la face supérieure de l'embase, d_2 la distance entre la membrane et le capot du boîtier. Le terme a_g, représente le facteur d'accommodation d'efficacité de la transmission d'énergie entre les molécules gazeuses, λ_p (torr.cm) le libre parcours moyen des molécules de gaz et p (torr) la pression à l'intérieur du boîtier.

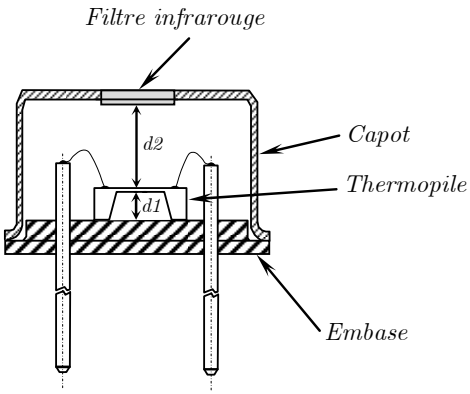


Figure 2.22 : Vue en coupe de la thermopile encapsulée dans son boîtier.

Les conditions aux limites sont :

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1(x_1)}{\partial x_1}\bigg|_{x_1=0} = 0 \qquad -\lambda_1 \frac{\partial T_1(x_1)}{\partial x_1}\bigg|_{x_1=l_1} = q_{12} \qquad \text{dans la zone 1,} \qquad (2.57), (2.58)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(x_2)}{\partial x_2}\bigg|_{x2=0} = q_{12} \qquad -\lambda_2 \frac{\partial T_2(x_2)}{\partial x_2}\bigg|_{x2=l_2} = q_{23} \qquad \text{dans la zone 2,} \qquad (2.59), (2.60)$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3(x_3)}{\partial x_3}\bigg|_{x3=0} = q_{23} \qquad T_3(x_3)\bigg|_{x3=l_3} = 0 \qquad \text{dans la zone 3.} \qquad (2.61), (2.62)$$

Dans les conditions aux limites (équations (2.58), (2.59), (2.60) et (2.61)), nous noterons que les expressions relatives au flux de conduction thermique q_{12}, q_{23} sont inconnues. Elles seront déterminées après la résolution successive des équations différentielles résultant de l'élévation thermique $T_n(x_n)$ dans chacune des zones élémentaires n.

- <u>Le bilan thermique dans la zone 1</u>, pour $0 < x_1 < l_1$ s'écrit :

$$-\lambda_1 d_1 \frac{\partial^2 T_1(x_1)}{\partial x_1^2} + A_1 T_1(x_1) = \eta \Phi_0 \qquad (2.63)$$

avec A_1, le coefficient représentant les pertes totales des échanges thermiques surfaciques,

$$A_1 = \left[h_1 + 4\sigma_b(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{12})T_a^3\right] \qquad (2.64)$$

où λ_1, d_1, h_1, ε_{11}, ε_{12} sont les coefficients associés à la zone 1 avec $T_1(x_1)$ représentant l'élévation thermique le long de l'élément ∂x_1. D'après les conditions aux limites (équations (2.57) et (2.58)), l'élévation thermique de la structure régie par l'équation (2.63) dans la zone 1, est de la forme :

$$T_1(x_1) = \frac{\eta \Phi_0}{A_1} - \frac{q_{12}}{\lambda_1 k_1}\frac{ch(k_1 x_1)}{sh(k_1 l_1)} \quad \text{avec } k_1 = \sqrt{\frac{A_1}{\lambda_1 d_1}} \qquad (2.65), (2.66)$$

- <u>Le bilan thermique dans la zone 2</u>, pour $0 < x_2 < l_2$ s'écrit,

$$-\lambda_2 d_2 \frac{\partial^2 T_2(x_2)}{\partial x_2^2} + A_2 T_2(x_2) = \eta \Phi_0 \qquad (2.67)$$

avec A_2, le coefficient représentant les pertes totales des échanges thermiques surfaciques,

$$A_2 = \left[h_2 + 4\sigma_b(\varepsilon_{21} + \varepsilon_{22})T_a^3\right] \qquad (2.68)$$

λ_2, d_2, h_2, ε_{21}, ε_{22} sont les coefficients associés à la zone 2 avec $T_2(x_2)$ représentant l'élévation thermique le long de l'élément ∂x_2. D'après les conditions aux limites (équations (2.59) et (2.60)), l'élévation thermique de la structure régie par l'équation (2.67) dans la zone 2, est de la forme :

$$T_2(x_2) = \frac{\eta\,\Phi_0}{A_2} + \frac{q_{12}}{\lambda_2\,k_2}\frac{ch\left[k_2(l_2 - x_2)\right]}{sh(k_2 l_2)} - \frac{q_{23}}{\lambda_2\,k_2}\frac{ch(k_2 x_2)}{sh(k_2 l_2)} \quad \text{avec } k_2 = \sqrt{\frac{A_2}{\lambda_2\,d_2}} \qquad (2.69), (2.70)$$

- <u>Le bilan thermique dans la zone 3</u>, pour $0 < x_3 < l_3$ s'écrit,

$$-\lambda_3\,d_3\frac{\partial^2 T_3(x_3)}{\partial x_3^2} + A_3\,T_3(x_3) = 0 \qquad (2.71)$$

avec A_3, le coefficient représentant les pertes totales des échanges thermiques surfaciques,

$$A_3 = \left[h_3 + 4\sigma_b(\varepsilon_{31} + \varepsilon_{32})T_a^3\right] \qquad (2.72)$$

λ_3, d_3, h_3, ε_{31}, ε_{32} sont les coefficients associés à la zone 3 avec $T_3(x_3)$ représentant l'élévation thermique le long de l'élément ∂x_3. D'après les conditions aux limites, (équations (2.61) et (2.62)), l'élévation thermique de la structure régie par l'équation (2.71) dans la zone 3, est de la forme :

$$T_3(x_3) = \frac{q_{23}}{\lambda_3\,k_3}\frac{ch\left[k_3(l_3 - x_3)\right]}{sh(k_3 l_3)} \quad \text{avec } k_3 = \sqrt{\frac{A_3}{\lambda_3\,d_3}} \qquad (2.73), (2.74)$$

Dans les équations (2.65), (2.69) et (2.73), les expressions des flux de conduction q_{12}, q_{23} étant inconnues, il est nécessaire d'établir un système d'équations en introduisant aux interfaces des zones 1-2 et des zones 2-3 les conditions aux limites qui assurent la continuité de la température :

$$T_1(x_1)\Big|_{x_1=l_1} = T_2(x_2)\Big|_{x_2=0} \quad \text{et} \quad T_2(x_2)\Big|_{x_2=l_2} = T_3(x_3)\Big|_{x_3=0} \qquad (2.75), (2.76)$$

En fonction des équations (2.75) et (2.76), les matériaux situés au niveau des faces supérieures et inférieures (zone 1, zone 2) sont de même nature, les coefficients d'émissivité et de convection sont considérées identiques, soit $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{21}$, $\varepsilon_{12} = \varepsilon_{22}$ et $h_1 = h_2$. On obtient alors le système d'équations suivant :

$$\begin{bmatrix} \dfrac{coth(k_2 l_2)}{\lambda_2\,k_2} + \dfrac{coth(k_1 l_1)}{\lambda_1\,k_1} & \dfrac{-1}{\lambda_2\,k_2 sh(k_2 l_2)} \\ \dfrac{-1}{\lambda_2\,k_2 sh(k_2 l_2)} & \dfrac{coth(k_2 l_2)}{\lambda_2\,k_2} + \dfrac{th(k_3 l_3)}{\lambda_3\,k_3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{12} \\ q_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \eta\,\Phi_0\,A_2^{-1} \end{bmatrix} \qquad (2.77)$$

Dès lors, les flux de conduction q_{12} et q_{23} respectivement communs aux zones 1-2 et 2-3 ont pour expression :

$$q_{12} = \frac{\eta\,\Phi_0}{A_2}\xi_{12} \qquad\qquad q_{23} = \frac{\eta\,\Phi_0}{A_2}\psi_{23} \tag{2.78), (2.79}$$

où ξ_{12} et ψ_{23} représentent respectivement le facteur de forme des flux de conduction,

$$\xi_{12} = \frac{1}{\lambda_2\,k_2\left[\left(\frac{coth(k_2l_2)}{\lambda_2\,k_2}+\frac{coth(k_1l_1)}{\lambda_1\,k_1}\right)\left(\frac{coth(k_2l_2)}{\lambda_2\,k_2}+\frac{th(k_3l_3)}{\lambda_3\,k_3}\right)-\frac{1}{\lambda_2^2\,k_2^2sh^2(k_2l_2)}\right]sh(k_2l_2)} \tag{2.80}$$

$$\psi_{23} = \frac{\left(\frac{coth(k_2l_2)}{\lambda_2\,k_2}+\frac{coth(k_1l_1)}{\lambda_1\,k_1}\right)}{\left[\left(\frac{coth(k_2l_2)}{\lambda_2\,k_2}+\frac{coth(k_1l_1)}{\lambda_1\,k_1}\right)\left(\frac{coth(k_2l_2)}{\lambda_2\,k_2}+\frac{th(k_3l_3)}{\lambda_3\,k_3}\right)-\frac{1}{\lambda_2^2\,k_2^2sh^2(k_2l_2)}\right]} \tag{2.81}$$

En introduisant l'expression des flux de conduction q_{12}, q_{23} (équations (2.78), (2.79)) dans les équations (2.65), (2.69), (2.73), nous obtenons l'expression analytique de la distribution de la température dans les zones 1, 2 et 3,

$$T_1(x_1) = \eta\,\Phi_0\left(\frac{1}{A_1}-\frac{1}{A_2}\frac{\xi_{12}}{\lambda_1\,k_1}\frac{ch(k_1x_1)}{sh(k_1l_1)}\right) \tag{2.82}$$

$$T_2(x_2) = \frac{\eta\,\Phi_0}{A_2}\left(1+\xi_{12}\frac{ch\left[k_2(l_2-x_2)\right]}{\lambda_2k_2sh(k_2l_2)}-\psi_{23}\frac{ch(k_2x_2)}{\lambda_2k_2sh(k_2l_2)}\right) \tag{2.83}$$

$$T_3(x_3) = \frac{\eta\Phi_0}{A_2\lambda_3k_3}\psi_{23}\frac{sh\left[k_3(l_3-x_3)\right]}{ch(k_3l_3)} \tag{2.84}$$

Dès lors, l'expression du gradient thermique est établie en calculant la différence de température entre les extrémités respectives des thermocouples (équation (2.36)). L'extrémité de la thermojonction chaude au point T_h est localisée sous la couche absorbante située dans la zone 2 au point $x_2 = 0$, soit : $T_h = T(x_2 = 0) = T_2(x_2 = 0) + T_a$.

$$T_h = \frac{\eta\,\Phi_0}{A_2}+\frac{\eta\,\Phi_0}{A_2}\xi_{12}\frac{coth(k_2l_2)}{\lambda_2\,k_2}-\frac{\eta\,\Phi_0}{A_2}\psi_{23}\frac{1}{\lambda_2\,k_2sh(k_2l_2)}+T_a \tag{2.85}$$

La thermojonction froide se situe à l'extrémité de la zone 3 au point $x_3=l_3$,

$$T_c = T(x_3 = l_3) = T_3(x_3 = l_3) + T_a = T_a \tag{2.86}$$

En conséquence, l'expression du gradient thermique située entre T_c et T_h est de la forme,

$$\Delta T = \frac{\eta\,\Phi_0}{A_2}\left(1+\frac{\xi_{12}}{\lambda_2\,k_2}coth(k_2l_2)-\frac{\psi_{23}}{\lambda_2\,k_2sh(k_2l_2)}\right) \tag{2.87}$$

2.3.5 Sensibilité électrique, Puissance Equivalente au Bruit, Détectivité

L'expression du gradient thermique ΔT étant établie et considérant que les coefficients Seebeck α_1, α_2, le nombre total de thermocouples du capteur N et le coefficient d'absorption η sont connus, la tension générée par la thermopile (équation (2.34)) soumise au flux radiatif Φ_0 s'écrit,

$$V_s = (\alpha_1 - \alpha_2) N \frac{\eta\, \Phi_0}{A_2} \left(1 + \frac{\xi_{12}}{\lambda_2\, k_2} coth(k_2 l_2) - \frac{\psi_{23}}{\lambda_2\, k_2 sh(k_2 l_2)} \right) \tag{2.88}$$

La *sensibilité électrique* du capteur (équation (2.35)) s'écrit :

$$\mathfrak{R}_v = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) N \eta}{A_2 S_a} \left(1 + \frac{\xi_{12}}{\lambda_2 k_2} coth(k_2 l_2) - \frac{\psi_{23}}{\lambda_2 k_2 sh(k_2 l_2)} \right) \tag{2.89}$$

Par identification, (équation(2.35)), nous obtenons l'expression de la résistance thermique R_{th} de la thermopile,

$$R_{th} = \frac{1}{A_2 S_a} \left(1 + \frac{\xi_{12}}{\lambda_2 k_2} coth(k_2 l_2) - \frac{\psi_{23}}{\lambda_2 k_2 sh(k_2 l_2)} \right) \tag{2.90}$$

Comme la principale source de bruit V_n est d'origine thermique (bruit de Johnson) dans ce type de capteur [70], la puissance équivalente au bruit s'écrit :

$$NEP = \frac{V_n}{\mathfrak{R}_v} \tag{2.91}$$

Avec V_n la tension de bruit :

$$V_n = N \left(\frac{R_{\square 1}\, L}{W_1} + \frac{R_{\square 2}\, L}{W_2} \right) \tag{2.92}$$

où $R_{\square 1}$ et $R_{\square 2}$ sont les résistances par carré des thermocouples, L et $W_{1,2}$ définissent respectivement leurs longueurs et largeurs. Dès lors, en fonction de la surface absorbante S_a, de la puissance équivalente au bruit V_n et de la bande passante Δf, la détectivité spécifique a pour expression,

$$D^* = \frac{\mathfrak{R}_v \sqrt{S_a \Delta f}}{V_n} \tag{2.93}$$

2.3.6 Estimation du temps de réponse

Pour estimer le temps de réponse du capteur, nous nous appuyons sur une méthode de calcul simplifié dont l'originalité consiste à identifier la constante de temps présente dans la structure équivalente. Ainsi, nous poserons L la longueur totale de la structure (l_1+l_2+l_3) et

écrirons les paramètres équivalents suivants : le coefficient total des pertes surfaciques par échanges thermiques A_e, la conductivité thermique λ_e, l'épaisseur d_e, la densité ρ_e, la capacité thermique spécifique c_e, et le coefficient de diffusion thermique α_e. Dès lors, pour $0 < x < L$ et $t > 0$, l'équation fondamentale de la chaleur en régime dynamique s'écrit :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{A_e}{\lambda_e\, d_e} T(x,t) = \frac{1}{\alpha_e} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \qquad \text{avec } \alpha_e = \frac{\lambda_e}{\rho_e\, c_e} \tag{2.94}$$

Les conditions aux limites sont les suivantes :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \qquad \text{défini pour } x = 0 \text{ et } t > 0, \tag{2.95}$$

$$T = T_a \qquad \text{défini pour } x = L \text{ et } t > 0, \tag{2.96}$$

$$T = f(x) \qquad \text{défini pour } t = 0 \text{ et } 0 \le x \le L. \tag{2.97}$$

Nous noterons que $f(x)$ représente la distribution initiale de la température le long de la structure équivalente. Ainsi, compte tenu des conditions aux limites précédentes, la solution de l'équation différentielle [71], [72] a pour expression :

$$\begin{aligned} T(x,t) = T_a + \frac{2}{L}\sum_{k=1}^{\infty} exp\left[-\alpha_e \beta_k^2\, t\right]\, cos\left(\beta_k\, x\right) \Bigg\{ & \int_{x'=0}^{L} f(x')\, cos\left(\beta_k\, x'\right)\, dx' \\ & + \frac{\alpha_e\, A_e}{\lambda_e\, d_e} \int_{t'=0}^{t} exp\left[\alpha_e \beta_k^2\, t'\right] \int_{x'=0}^{L} T\left(x',t'\right) cos\left(\beta_k\, x'\right)\, dx' dt' \Bigg\} \end{aligned} \tag{2.98}$$

Dans l'équation (2.98), nous identifions la constante de temps τ_k dont l'expression est :

$$\tau_k = \left[\alpha_e\, \beta_k^2\right]^{-1} \text{ avec } \beta_k = \frac{(2k-1)\pi}{L} \text{ et } k = 1,2,3\ldots \tag{2.99), (2.100}$$

La solution montre que le transitoire thermique peut se décomposer en une somme de termes exponentiels de la forme $-t/\tau_k$. Ainsi, la constante de temps sera évaluée à partir du terme dominant, soit $\tau = \tau_1 \gg \tau_{1+k}$,

$$\tau = \frac{\left(l_1 + l_2 + l_3\right)^2}{\pi^2 \alpha_e} \qquad \text{avec } \alpha_e = \frac{\sum_{n=1}^{3} \frac{\lambda_n}{\rho_n\, c_n}\, l_n}{\sum_{n=1}^{3} l_n} \tag{2.101), (2.102}$$

où n fait référence aux zones élémentaires de la structure dans laquelle chacun des paramètres est déterminé en fonction du nombre de couches i qui le constitue (équations (2.54) et (2.55)). Ainsi, l'expression finale de la constante de temps a pour expression :

$$\tau = \frac{\left(l_1 + l_2 + l_3\right)^3}{\pi^2 \left(\alpha_1\, l_1 + \alpha_2\, l_2 + \alpha_3\, l_3\right)} \tag{2.103}$$

2.4 Etude de l'influence des dimensions du capteur

2.4.1 Méthodologie d'analyse

Dans cette étude, nous tenons compte de l'influence de l'absorbeur, de la membrane et des thermocouples lesquels sont fonction de l_1, l_2, l_3 et W_{poly}, où l_2 et les épaisseurs des différentes couches dans chaque zone sont fixées. Nous avons organisé cette analyse en plusieurs étapes. Préalablement, nous avons évalué l'influence de la longueur et largeur des bras en polysilicium sur l'ensemble de la structure (figure 2.21). Autrement dit, nous avons adapté les dimensions de l'absorbeur W_a et de la membrane W_{mem} (équations (2.104) et (2.105)) au taux d'occupation des thermocouples sur la structure (W_s est l'espace entre deux thermocouples et W_b les marges de l'absorbeur).

$$W_a = n' W_{poly} + (n' - 1) W_s + 2W_b = 2(l_1 + l_2) \tag{2.104}$$

$$W_{mem} = W_a + 2l_3 \tag{2.105}$$

En nous appuyant sur ces premiers résultats, nous avons évalué l'influence globale des dimensions des thermocouples sur les caractéristiques du capteur afin de définir leur ordre de grandeur. Ensuite, comme précédemment, nous avons évalué l'impact des dimensions de la membrane et de l'absorbeur pour une largeur de silicium polycristallin W_{poly} défini. Enfin, nous avons réévalué l'impact des dimensions des thermocouples ainsi que leur nombre sur les performances du capteur pour une surface retenue de l'absorbeur.
Dans cette modélisation, les conductivités thermiques des matériaux : Si absorbeur, SiO2, SiN_x, PolySi, Al, ont respectivement pour valeur, 150, 1,4, 1,9, 30 et 235 W/m.K [73], [74], [75], le flux incident vaut 10 $\mu W/mm^2$, l'émissivité de la couche absorbante ε a pour valeur 0,6 et les résistivités électriques 1 mΩ.cm dans le PolySi et $2{,}7.10^{-3}$ mΩ.cm dans l'Al, le coefficient Seebeck -190 μV/K pour le PolySi et -1,8 μV/K pour l'Al.

2.4.1.1 Influence de la longueur et largeur des bras de PolySi

Dans cette étude, nous avons dimensionné l'absorbeur W_a aux différentes largeurs de bras de polysilicium W_{poly} prenant les valeurs successives comprises entre 10 et 25 µm dans l'équation (2.104) et dimensionné la membrane W_{mem} à la longueur des thermocouples avec $n'=N/4=11$ et. La simulation révèle que l'influence des bras PolySi sur la sensibilité du capteur (figure 2.23) pour une largeur W_{poly} supérieure à 20 µm n'est pas favorable. Toutefois, cette constatation s'avère moins certaine dans la mesure où nous voyons (figure 2.24) que le gradient de température ΔT entre les extrémités des thermojonctions est plus significatif pour des largeurs W_{poly} supérieures à 20 µm. Cette constatation montre le compromis à adopter entre la sensibilité du capteur et le gradient thermique qui est dépendant, d'une part de la résistance thermique (figure 2.25), et d'autre part, du flux collecté à la surface de l'absorbeur. En effet, la résistance thermique R_{th} du capteur est beaucoup plus élevée pour des largeurs de W_{poly} décroissante, alors qu'au contraire le flux collecté est directement proportionnel à la surface de l'absorbeur. Concernant la longueur des bras de PolySi, nous constatons d'une manière générale, que celle-ci favorise la sensibilité et le gradient thermique du capteur. On remarque également que

la longueur des bras affecte le temps de réponse (figure 2.26). Toutefois, si la résistance électrique (PolySi, Aluminium) de la thermopile décroît en fonction de l'élargissement W_{Poly} des bras de PolySi, nous constatons que le *NEP* (figure 2.27) est particulièrement sensible à la longueur des thermocouples. Une longueur trop exagérée des bras thermoélectriques n'est pas une solution à préconiser car non seulement elle déséquilibrerait le compromis entre la sensibilité et la détectivité, mais aussi elle imposerait la réalisation d'une membrane de grande taille (figure 2.28). De cet état, il résulte un compromis entre la faisabilité technologique d'une grande membrane et les caractéristiques du capteur, sensibilité/détectivité, vis-à-vis de la longueur des thermocouples.

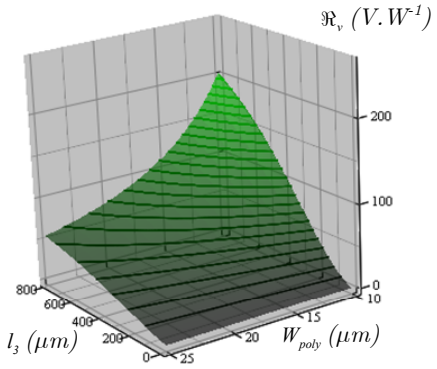


Figure 2.23 : Réponse du capteur en fonction de l_3 et W_{Poly}.

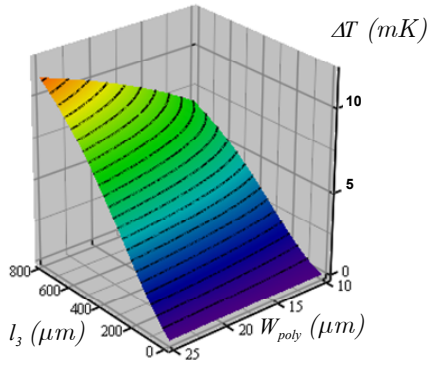


Figure 2.24 : Gradient thermique entre les thermojonctions en fonction de l_3 et W_{Poly}.

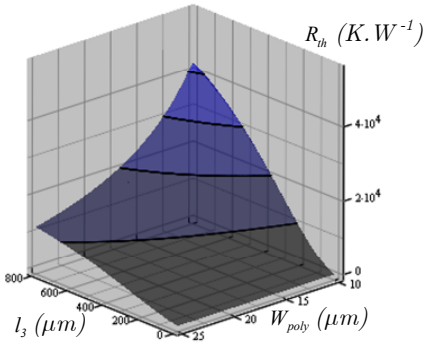


Figure 2.25 :. Résistance thermique de la thermopile en fonction de l_3 et W_{Poly}.

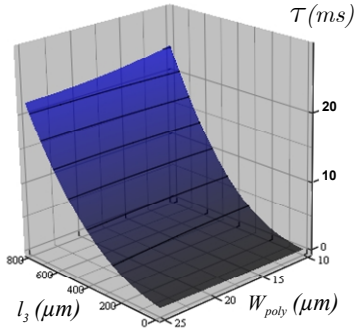


Figure 2.26 : Constante de temps en fonction de l_3 et W_{Poly}.

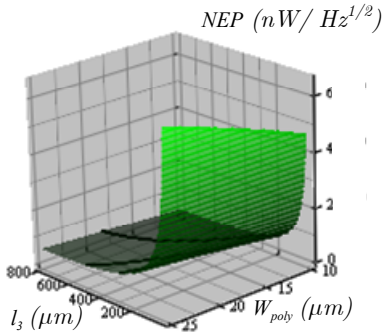


Figure 2.27 : NEP en fonction de l_3 et W_{Poly}.

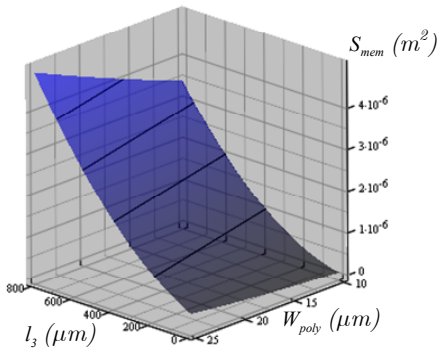


Figure 2.28 : Dimensions de la membrane en fonction de l_3 et W_{Poly}.

2.4.1.2 Influence des dimensions de l'absorbeur et de la membrane pour W_{poly} fixée

Compte tenu des résultats précédents, dans cette seconde étude, nous analysons l'influence des dimensions de l'absorbeur W_a et celle de la membrane W_{mem} en fonction d'une largeur W_{poly} fixée à 15 µm et d'un nombre de thermocouples maintenu à $n'=N/4=11$ dans l'équation (2.104). La simulation montre que la sensibilité du capteur (figure 2.29) décroît dès lors que l'on sur dimensionne la taille de l'absorbeur au-delà de la place transversale effective* occupée par l'ensemble des thermocouples. Comme précédemment, le gradient de température ΔT entre les extrémités des thermojonctions (figure 2.30) est plus significatif lorsque la surface de l'absorbeur augmente. Ceci dit, malgré l'élévation du gradient thermique, nous remarquons que celui-ci n'améliore pas la sensibilité du capteur car l'extension de la surface d'absorption du flux collecté réduit considérablement la résistance thermique (figure 2.31). Nous vérifions que la longueur des bras PolySi privilégie la sensibilité. Toutefois, augmenter la longueur des thermocouples n'est pas une solution logique pour l'amélioration des performances du capteur, car en plus de l'agrandissement de l'absorbeur qui est défavorable aux performances du capteur, nous augmentons inutilement la taille de la membrane. De plus, nous vérifions que le NEP (figure 2.33) et la détectivité spécifique (figure 2.34) sont également altérés. En conséquence, nous retiendrons qu'il est inutile d'augmenter la taille de l'absorbeur car d'une manière générale, celle-ci est préjudiciable aux performances du capteur dans la mesure où elle est supérieure à l'occupation effective* des thermocouples $(W_a > n'W_{poly} + (n'-1)W_s + 2W_b = 2(l_1 + l_2))$.

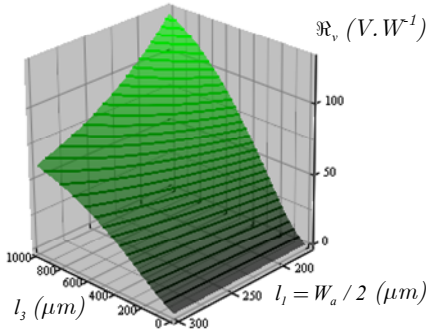


Figure 2.29 : Sensibilité du capteur en fonction de l_1 et l_3.

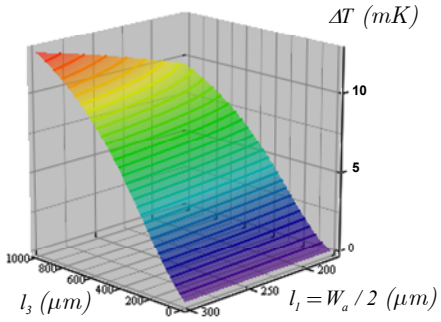


Figure 2.30 : Gradient thermique entre les thermojonctions en fonction de l_1 et l_3.

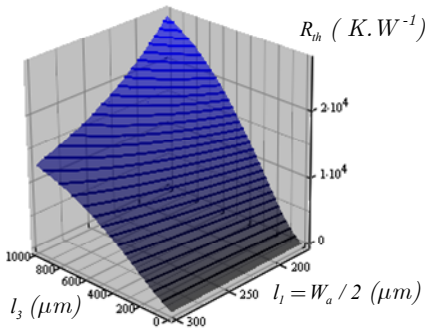


Figure 2.31 : Résistance thermique en fonction de l_1 et l_3.

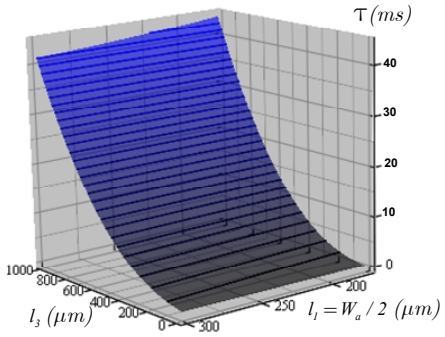


Figure 2.32 : Constante de temps en fonction de l_1 et l_3.

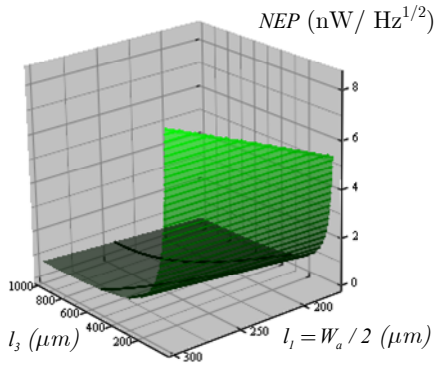


Figure 2.33 : NEP en fonction de l_1 et l_3.

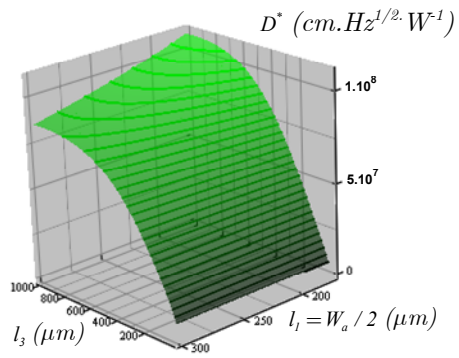


Figure 2.34 : Détectivité spécifique en fonction de l_1 et l_3.

2.4.1.3 Influence du nombre et des dimensions des bras de PolySi pour une taille d'absorbeur W_a fixée

Pour finaliser cette étude, nous réévaluons l'influence des paramètres géométriques des bras en polysilicium sur les performances du capteur en imposant la taille de l'absorbeur W_a. Nous avons choisi comme hypothèse de départ W_{poly} = 15 µm et $n'=N/4=11$ pour évaluer W_a. Le calcul donne W_a = 375 µm. La taille de l'absorbeur étant fixée, nous calculons l'ensemble de couples $[W_{poly}, N]$ afin de satisfaire l'équation 2.104.
Ainsi, pour chacun des couples déterminés, l'analyse des résultats obtenus par la simulation montre que le gradient de température ΔT (figure 2.36) dépend essentiellement de la longueur des thermocouples et que l'influence des couples $[W_{poly}, N]$ est extrêmement faible. Ce phénomène s'explique par la notion de conductivités thermiques équivalentes des bras en polysilicium que nous avons introduites dans notre modèle. En effet, ces dernières sont sensiblement identiques car la disparité du produit N par W_{poly} pour chacun des couples est très faible. Ainsi, nous déduisons que le compromis entre la sensibilité du capteur et le gradient thermique est directement lié à la longueur des thermocouples. Dès lors, nous avons la possibilité d'ajuster les performances du capteur en choisissant un couple $[W_{poly}, N]$ ou bien en augmentant la longueur de ce dernier. C'est pourquoi, la sensibilité du capteur (figure 2.35) est directement liée au nombre de thermocouples et à leur longueur. Cette constatation est mise en évidence sur les figures 2.37 et 2.38 qui montrent la dépendance de la sensibilité du capteur vis à vis de chacun des couples $[W_{poly}, N]$. Ceci est également vérifié sur les courbes représentatives des temps de réponse du capteur (figure 2.39 et 2.40). Concernant la résistance électrique R_{el} de la thermopile (figure 2.41), nous remarquons que celle-ci dépend des dimensions géométriques. En effet, dans son estimation nous n'avons pas introduit la notion relative de conductivités électriques équivalentes, seule la conductivité électrique effective est prise en compte. Ceci explique également la dépendance de la tension de bruit (figure 2.42) générée par la thermopile aux dimensions géométriques réelles des thermocouples. Des courbes supplémentaires de bruit (figure 2.43 et 2.44) soulignent cette dépendance. Concernant le *NEP* et la détectivité spécifique D^*, les résultats présentés sur les figures 2.45 et 2.46 montrent que celles-ci sont d'autant meilleures que les bras des thermocouples sont longs. En conséquence, nous retiendrons que pour une dimension fixée de l'absorbeur, il est préférable de réaliser des thermocouples de faible largeur afin d'augmenter leur nombre et ainsi de profiter au maximum de la contribution de l'effet Seebeck. Enfin, outre

la possibilité d'ajuster la sensibilité du capteur en choisissant un couple $[W_{poly}, N]$ si des contraintes en terme de surface sont imposées, on notera que les règles de conception technologique (résolution optique, marges d'alignement des masques, surface des contacts ohmiques ...) imposent une taille minimale de la largeur des thermocouples.

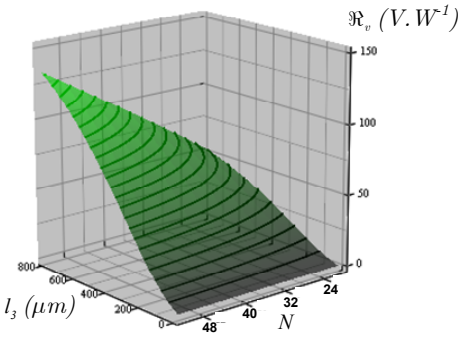


Figure 2.35 : Sensibilité du capteur en fonction de $[N, W_{poly}]$ et l_3.

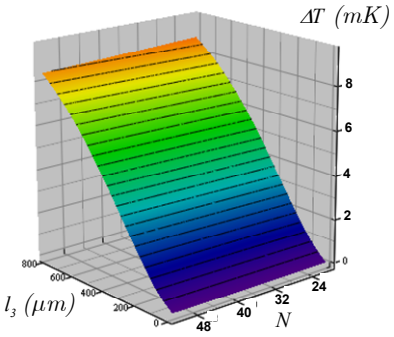


Figure 2.36 : Gradient thermique entre les thermojonctions en fonction de $[N, W_{poly}]$ et l_3.

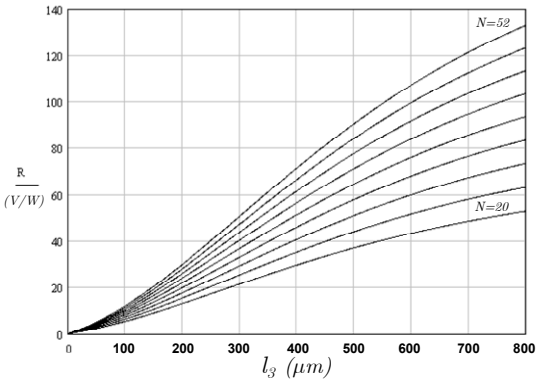


Figure 2.37 : Sensibilité du capteur en fonction de W_{poly} et l_3.

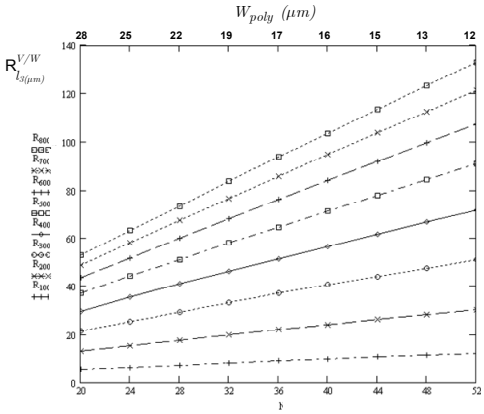


Figure 2.38 : Sensibilité du capteur en fonction de $[N, W_{poly}]$ et l_3.

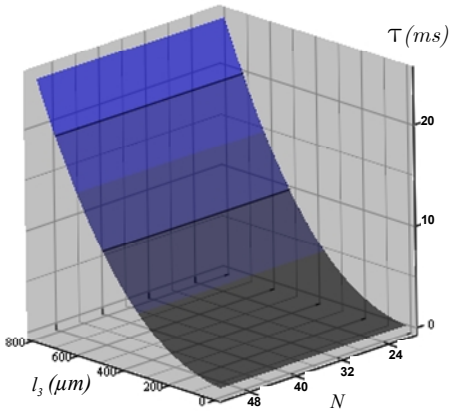


Figure 2.39 : Constante de temps en fonction de $[N, W_{poly}]$ et l_3.

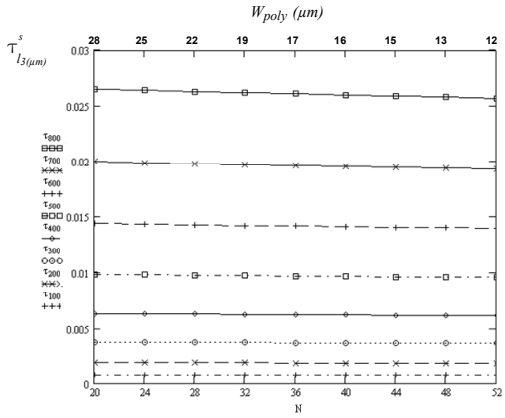


Figure 2.40 : Constante de temps en fonction de $[N, W_{poly}]$ et l_3.

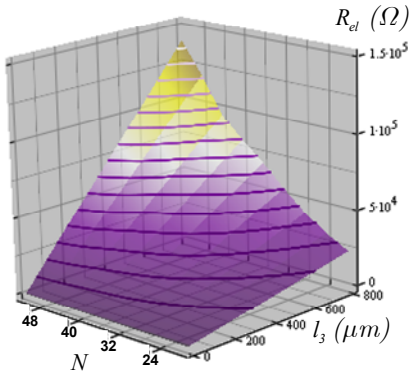


Figure 2.41 : Résistance électrique en fonction de $[N,\ W_{poly}]$ et l_3.

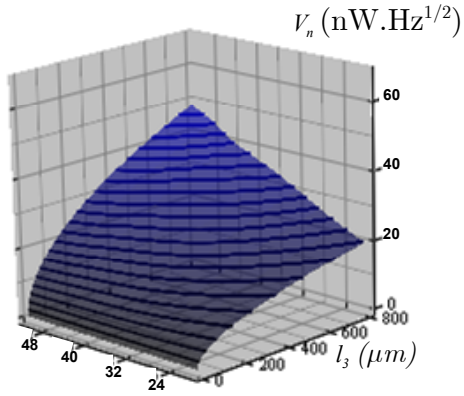


Figure 2.42 : Tension de bruit en fonction de $[N,\ W_{poly}]$ et l_3.

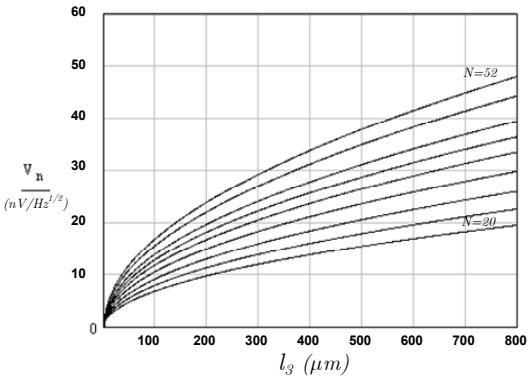


Figure 2.43 : Tension de bruit en fonction de W_{poly} et l_3.

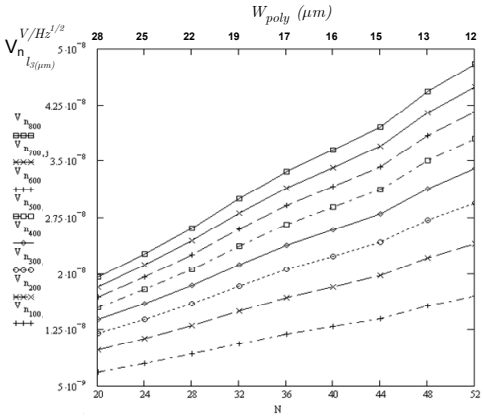


Figure 2.44 : Tension de bruit en fonction de $[N,\ W_{poly}]$ et l_3.

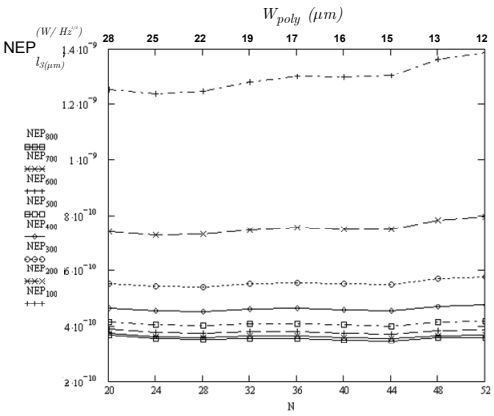


Figure 2.45 : NEP en fonction de $[N,\ W_{poly}]$ et l_3.

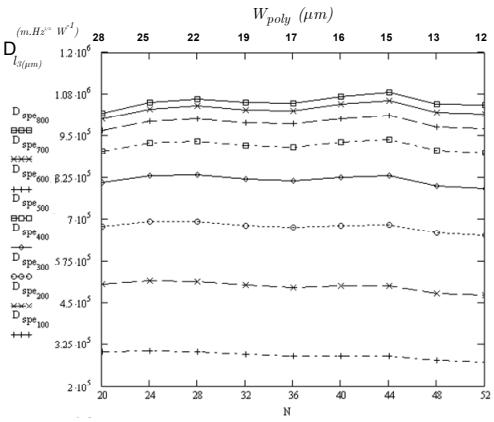


Figure 2.46 : Détectivité spécifique en fonction de $[N,\ W_{poly}]$ et l_3.

Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous nous sommes appliqués à décrire la modélisation du capteur dans son environnement d'utilisation. Pour ce faire, nous avons suivi une démarche de conception descendante "Top-down" en décrivant l'ensemble des équations physiques de chacun des sous-systèmes. Ce travail définit un système optronique assez complexe que nous avons modélisé en nous attachant :

- à étudier la transmission optique dans la bande 7-14 µm depuis la scène jusqu'au détecteur. Les résultats montrent que le coefficient de transmission est essentiellement fonction de la distance à travers la couche atmosphérique et vaut 80 % pour des distances inférieures à 5 m.

- à la modélisation thermoélectrique du capteur lui-même. Pour cela, nous avons élaboré un modèle thermique très détaillé qui nous a permis d'interpréter l'influence des lois et des paramètres essentiels.

En outre, cette modélisation nous a conduit à mieux comprendre le comportement thermique du capteur et de dimensionner de manière optimale la réalisation d'un capteur prototype. Nous avons aussi montré qu'un compromis devait être réalisé entre la longueur des thermocouples et la taille de l'absorbeur. La largeur des thermocouples devant être la plus réduite possible.

Chapitre 3

Réalisations technologiques des thermopiles

Sommaire

Introduction **91**

3.1 Présentation des différentes topologies retenues pour l'élaboration des capteurs thermopiles **93**

3.1.1 Dimensions de la zone active/scène observée des structures unitaires et matricielles 93

3.1.2 Topologies des thermojonctions 94

3.1.2.1 Dimensions des ouvertures de contact PolySi/Al 94

3.1.2.2 Structures conventionnelles 95

3.1.2.3 Structures séries/parallèles 95

3.1.4 Dénominations et dimensions des structures réalisées 96

3.1.5 Quelques exemples de capteurs unitaires et véhicules tests associés 97

3.1.6 Architectures et dimensions des structures matricielles 99

3.1.6.1 Matrices 8×8 99

3.1.6.2 Matrices 8×8 sur membrane unique 100

3.1.6.3 Matrices 2×8 sur membrane unique 101

3.1.6.4 Matrices 3×3 101

3.1.7 Présentation du jeu de masques 102

3.2 Description des procédés de fabrication technologique des thermopiles **103**

3.2.1 Réalisation des mires d'alignement 104

3.2.2 Réalisation de l'absorbeur 105

3.2.3 Réalisation de la membrane 107

3.2.4 Elaboration des thermocouples 107

3.2.4.1 Réalisation des bras PolySi 107

3.2.4.2 Réalisation de l'isolation électrique des thermocouples 109

3.2.4.3 Réalisation des ouvertures de contact ohmique 109

3.2.4.4 Réalisation des bras en aluminium 111

3.2.5 Passivation du capteur 113

3.2.6 Libération de la membrane 113

3.2.7 Séparation, montage et connectique des puces 114

Conclusion **117**

Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les topologies retenues et les étapes du processus de réalisation que nous avons mis au point. Ces réalisations ont entièrement été effectués dans la salle blanche du LAAS-CNRS et ont fait l'objet de plusieurs pré-études en amont pour valider et ajuster certaines étapes technologiques.

Dans la première partie, nous présenterons les différentes dimensions des capteurs retenus pour leur élaboration. Nous montrerons comment sont organisées les thermojonctions ainsi que les différentes topologies que nous avons choisies de fabriquer. Nous expliciterons les paramètres technologiques que nous voulons mettre en évidence de par leur influence sur les performances des capteurs. Ensuite, nous présenterons les différentes architectures de matrices et leurs dimensions.

Dans la seconde partie, nous détaillerons les différentes étapes de notre processus de fabrication dans leur succession chronologique, ainsi que les paramètres de réglages.

3.1 Présentation des différentes topologies retenues pour l'élaboration des capteurs thermopiles

3.1.1 Dimensions de la zone active/scène observée des structures unitaires et matricielles

Dans le chapitre précédent, nous avons souligné l'influence des paramètres géométriques du capteur sur ses caractéristiques propres. Aussi, pour évaluer les résultats obtenus par le modèle analytique, nous avons conçu un ensemble de capteurs thermopiles sous la forme unitaires, matricielles et de barrettes. Les dimensions de la zone active retenues sont présentées sur les tableaux 3.1 et 3.2. En fonction de la taille des optiques et de la distance d'observation, fixée à 5 m (cf. Chapitre2 §2.2.3), nous avons calculé les dimensions des angles d'ouvertures horizontaux et verticaux qui définissent l'ensemble des scènes observées (cf. Chapitre2 figure 2.8). Pour les capteurs unitaires, les surfaces de scène observées s'échelonnent de 3,61 cm^2 à 108,33 cm^2 et pour les structures matricielles celles-ci sont comprises entre 0,05 m^2 et 7,18 m^2. Nous détaillerons l'architecture de ces structures dans les paragraphes suivants.

Dimensions : zone active du capteur.			Angles d'ouverture.		Dimensions : scène observée.		
Longueur L_C (μm)	Largeur l_C (μm)	Surface S_C (mm^2)	Horizontal ($d°$)	Vertical ($d°$)	Longueur L_{SC} (cm)	Largeur l_{SC} (cm)	Surface S_{SC} (cm^2)
115	115	13.10^{-3}	0,222	0,222	1,90	1,90	**3,61**
205	115	24.10^{-3}	0,396	0.222	3,40	1,90	6,46
325	325	0,106	0,629	0,629	5,40	5,40	29,16
375	375	0,141	0,725	0,725	6,30	6,30	39,69
600	325	0,195	1,161	0,629	10,13	5,40	54,70
705	280	0,197	1,364	0,541	11,90	4,70	55,93
705	325	0,229	1,364	0,629	11,90	5,40	64,26
1365	280	0,382	2,641	0,541	23,05	4,70	**108,33**

Tableau 3.1 : Dimensions de la scène observée à une distance de 5 m en fonction des dimensions de la zone active d'un capteur unitaire.

Dimensions : zone active de la matrice.			Angles d'ouverture.		Dimensions : scène observée.		
Longueur. L_C	Largeur. l_C	Surface. S_C	Horizontal ($d°$)	Vertical ($d°$)	Longueur L_{SC} (m)	Largeur l_{SC} (m)	Surface S_{SC} (m^2)
3265 μm	565 μm	1,84 mm^2	6,29	1,09	0,549	0,095	**0,05**
3265 μm	3265 μm	10,66 mm^2	6,29	6,29	0,549	0,549	0,30
4665 μm	4665 μm	21,76 mm^2	9,03	9,03	0,789	0,789	0,62
1,595 cm	1,595 cm	2,54 cm^2	30,11	30,11	2,68	2,68	**7,18**

Tableau 3.2 : Dimensions de la scène observée à une distance de 5 m en fonction des dimensions de la zone active de la matrice.

3.1.2 Topologie des thermojonctions

Les topologies proposées pour l'élaboration des thermojonctions ont pour but d'étudier les performances obtenues pour différentes structures. Pour cela, nous évaluerons l'influence géométrique du contact ohmique, en terme de surface, entre le polysilicium et l'aluminium pour différentes structures (séries et parallèles). L'objectif vise le compromis entre la réduction des résistances électriques équivalentes des thermocouples élémentaires et la préservation du gradient thermique entre les extrémités de ces derniers.

3.1.2 1 Dimensions des ouvertures de contact PolySi/Al

La figure 3.1 présente le dimensionnement des différents contacts que nous avons élaborés. Leurs dimensions étant délimitées par la largeur des bras en PolySi, nous avons défini les surfaces suivantes : 5 x 5 μm^2, 5 $\times$ 10 μm^2 et 10 $\times$ 10 μm^2. On notera que les marges d'alignement sont très réduites 1,5 μm.

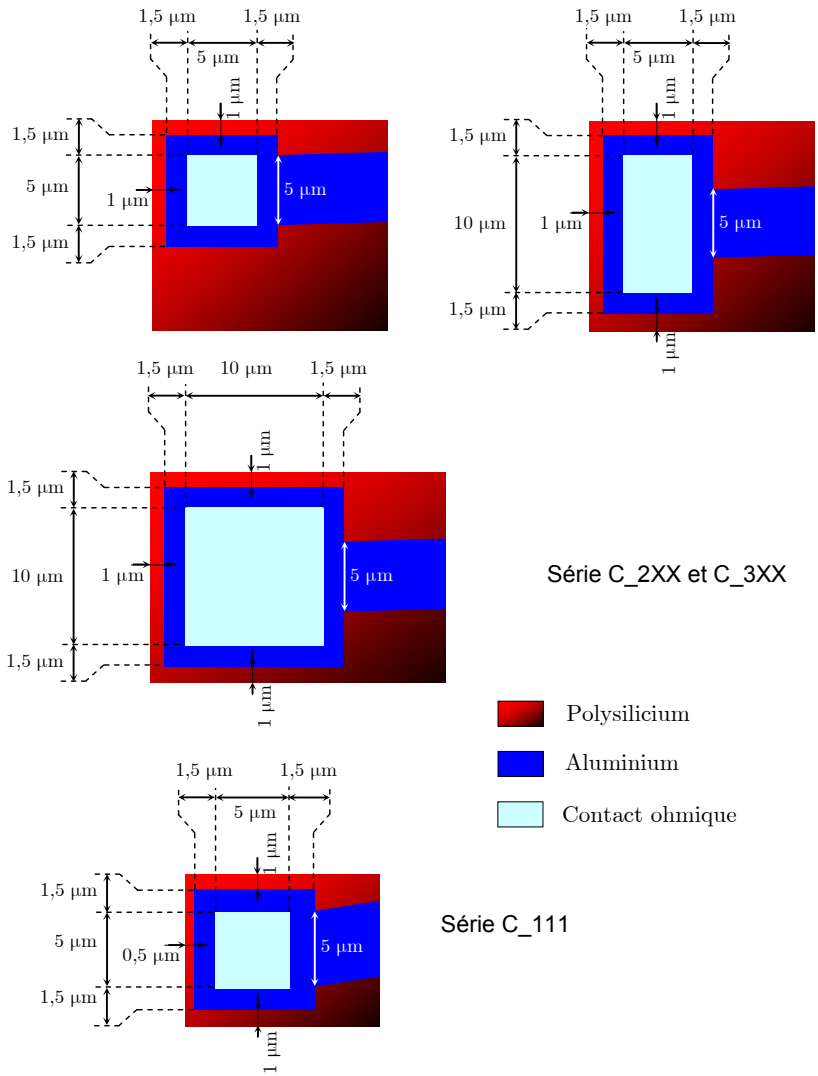


Figure 3.1 : Dimensions des contacts PolySi/Al pour différentes structures.

3.1.2 2 Structures conventionnelles

La structure conventionnelle (figure 3.2) présente les matériaux constitutifs des thermojonctions sur lesquels on identifie les trois types de contacts surfaciques (5×5 μm^2, 5×10 μm^2 et 10×10 μm^2) que nous considérons dans la réalisation.

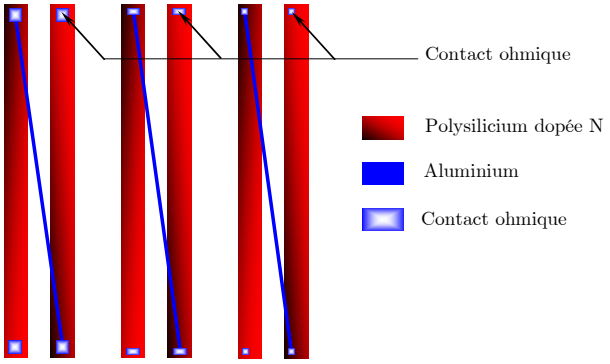
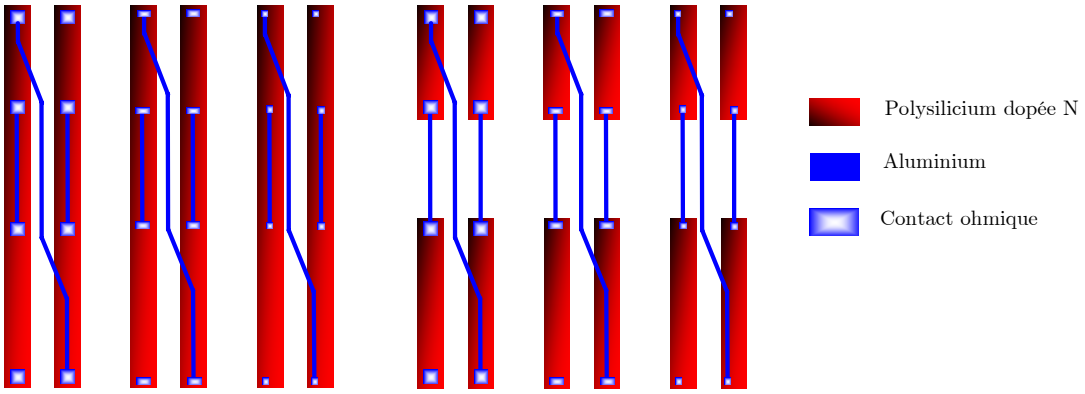


Figure 3.2 : Structures conventionnelles.

3.1.2 3 Structures à thermojonctions parallèles/séries

A la différence de la structure conventionnelle, nous proposons deux autres types de structures distinctes. Sur la première (figure 3.3 -a-), une couche d'aluminium est déposée en parallèle sur le polysilicium avec le but de réduire la résistance électrique équivalente de l'ensemble. Cette structure nous permettra d'étudier l'influence de cette association sur le pouvoir thermo-générateur du couple de matériau.
Concernant la structure série (figure 3.3 -b-), nous avons tronqué le PolySi et remplacé ce dernier par une liaison d'aluminium connectée en série. On remarquera que ces liaisons d'aluminium (parallèle/série) sont de longueurs relativement faibles ($\approx 1/3$ de la longueur du PolySi). Nous avons défini ce rapport de dimensions pour ne pas court-circuiter le gradient thermique situé aux extrémités des thermojonctions lequel est altéré par la conductivité thermique de la couche d'aluminium ($\lambda_{Al} \approx 8\ \lambda_{PolySi}$).



-a- configuration parallèle. -b- configuration série

Figure 3.3 : Structures parallèle et série.

3.1.4 Dimensions et dénomination des structures réalisées

Les thermocouples sont constitués de trois longueurs de bras différentes, dont chacun est constitué, nous venons de l'évoquer, de trois types de contacts ohmiques (figures 3.4). Pour bien saisir les dimensions que nous avons fixées, nous présentons le récapitulatif suivant :

- Longueur et largeur des bras PolySi :
  L1, l1 : 120 μm, 5 μm,
  L2, l2 : 400 μm, 15 μm,
  L3, l3 : 800 μm, 15 μm.

- Type de structure :
  B1 : structure classique,
  B2 : structure parallèle,
  B3 : structure série.

- Surface du contact ohmique :
  V1 : 5 μm x 5 μm,
  V2 : 5 μm x 10 μm,
  V3 : 10 μm x 10 μm.

- Espace entre les bras de PolySi :
  Structure L1B1V1 : 5 μm,
  Structure L2B1V(1,2,3) : 10 μm,
  Structure L2B(2,3)V(1,2,3) : 15 μm,
  Structure L3B(1,2,3)V(1,2,3) : 15 μm.

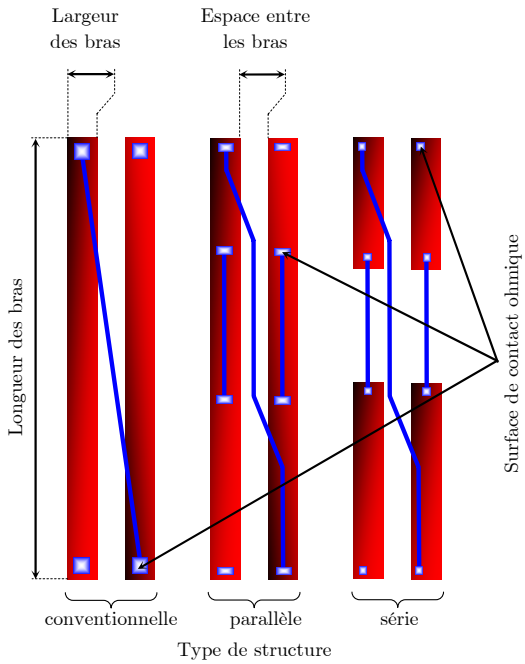


Figure 3.4 : Dimensions des structures.

Pour identifier chaque type de structure (capteur, véhicule test associé, matrice et barrette), nous avons défini une dénomination en considérant les champs d'identification suivants :

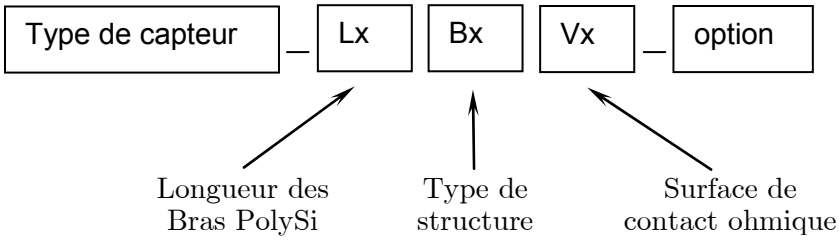


Figure 3.5 : Champs d'identification des capteurs.

Définition du type de capteur :

- C : capteur dont la membrane est de forme carré et ayant un nombre de 44 thermojonctions,

- CT : véhicule test associé au capteur C,
- R : capteur dont la membrane est rectangulaire et ayant un nombre de 44 thermo-jonctions,
- RT : véhicule test associé au capteur R,
- Rn : identique au capteur précédent avec une membrane plus grande,
- M : capteur sous la forme d'une matrice,
- MT : structure test de faisabilité de la membrane des différentes matrices.

Option :

- bo : implantation de bore à la périphérie de la zone substrat,
- bol : identique à l'option ci-dessus, à la différence que cette implantation est plus éloigné.

3.1.5. Quelques exemples de capteurs unitaires et de véhicules tests associés

Nous trouverons en annexe A1.1 et A1.2 une liste complète de toutes les structures (au total 180) que nous avons élaborées et référencées selon le principe énoncé précédemment. A titre d'exemple, les figures suivantes (3.6 à 3.8) présentent les architectures types pour des longueurs de thermocouples 120 μm à 800 μm.

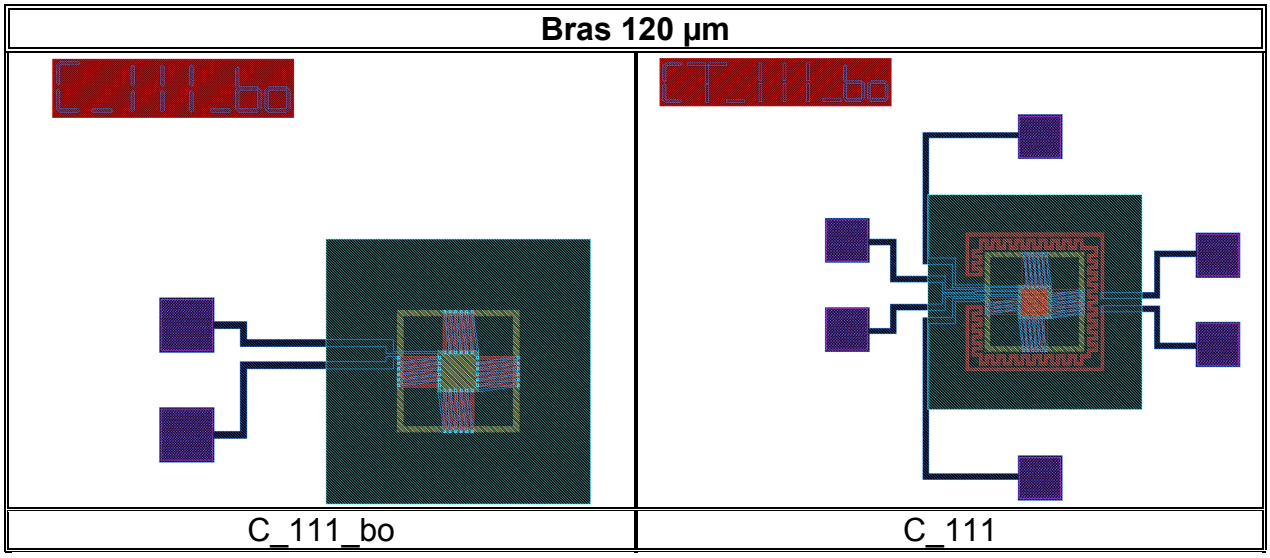
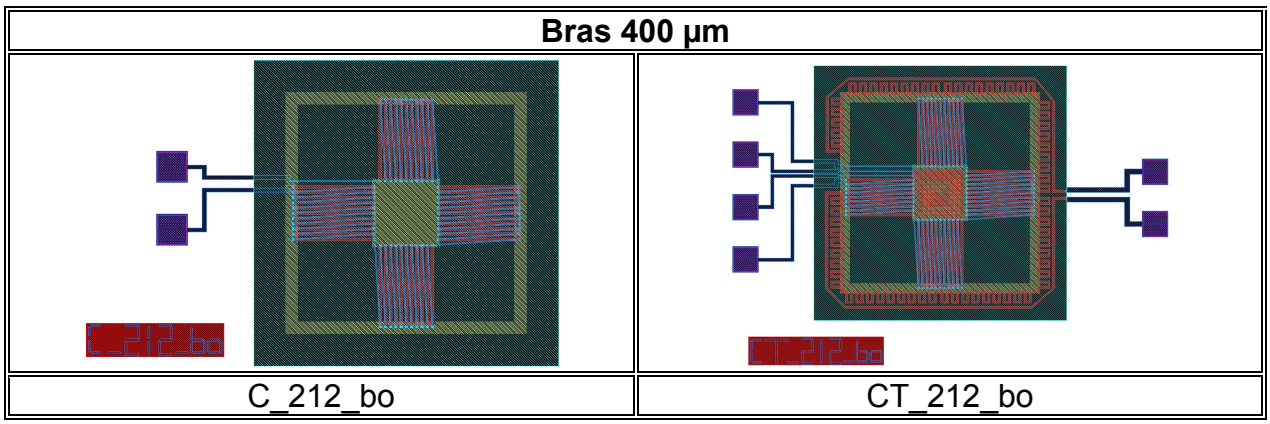


Figure 3.6 : Capteurs unitaires (bras 120 µm).



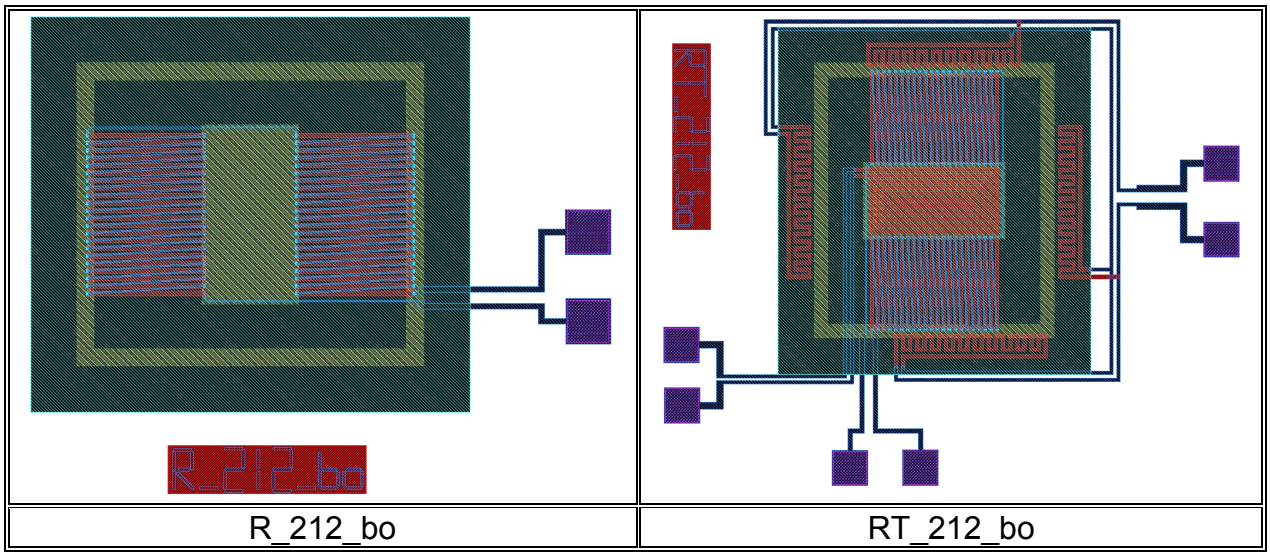


Figure 3.7 : Capteurs unitaires (bras 400 µm).

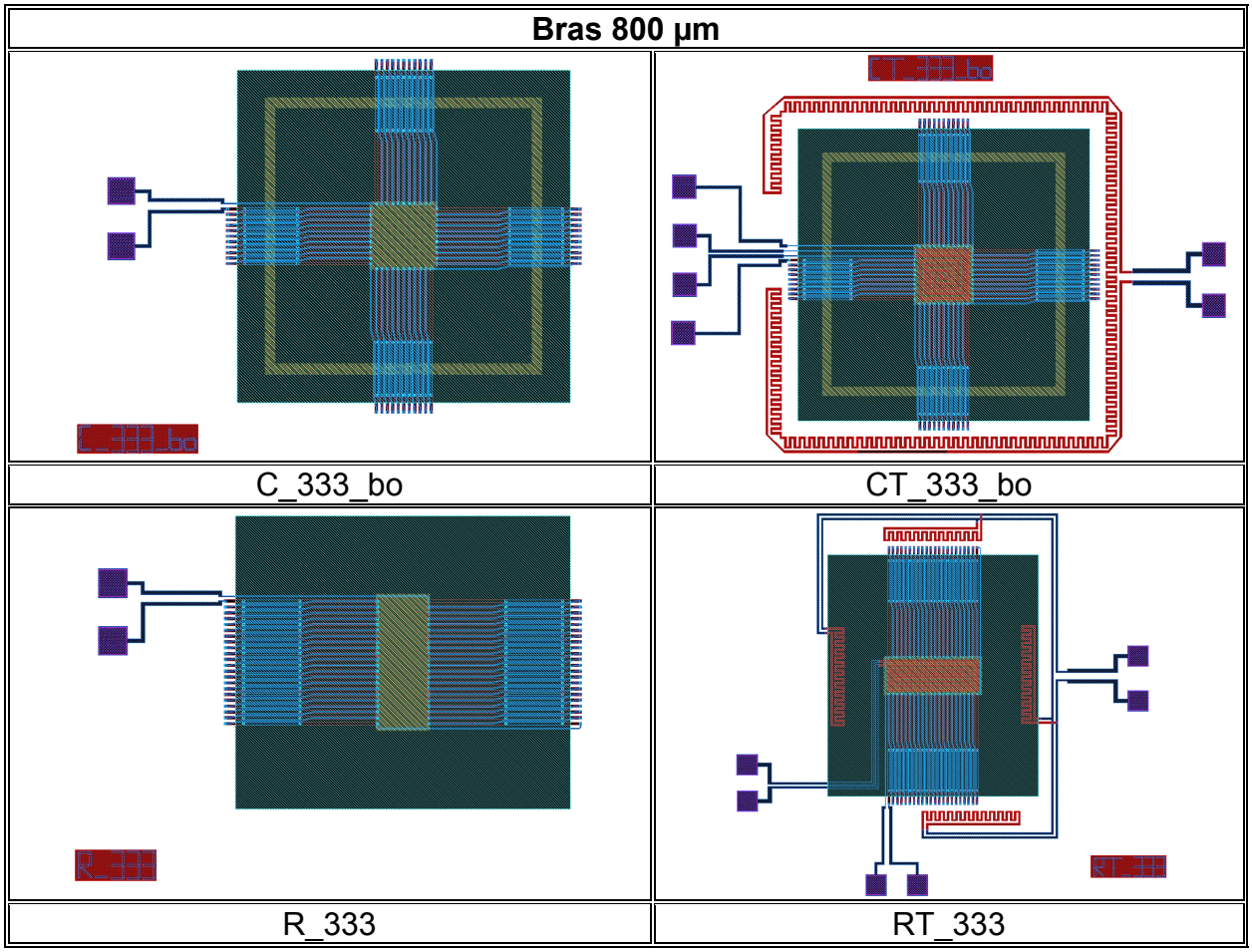


Figure 3.8 : Capteurs unitaires (bras 800 µm).

Nous avons associé à chacun des capteurs un véhicule test sur lequel une première résistance est placée au centre de la membrane. La seconde est placée à la périphérie des thermojonctions. L'objectif visé est l'émulation du flux infrarouge, ceci en vue de la caractérisation.

3.1.6 Architectures et dimensions des structures matricielles

3.1.6.1 Matrices 8 × 8

Ces matrices reposent sur l'association 8 × 8 capteurs (figure 3.9) de la série C_3XX_bo pour la matrice **M_1_bo** et la série C_3XX concernant la matrice **M_1**. La figure 3.10 présente les dimensions des matrices : surface active de la matrice 1,595 × 1,595 cm^2, surface active d'un *pixel* 375 × 375 μm^2, correspondant à une scène détectable de 7,18 m^2.

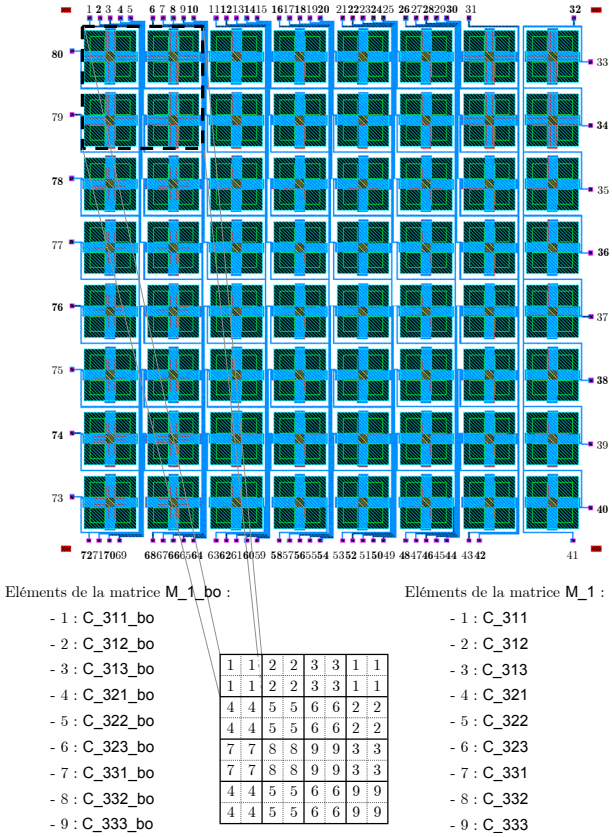


Figure 3.9 : Architecture des matrices M_1_bo et M1.

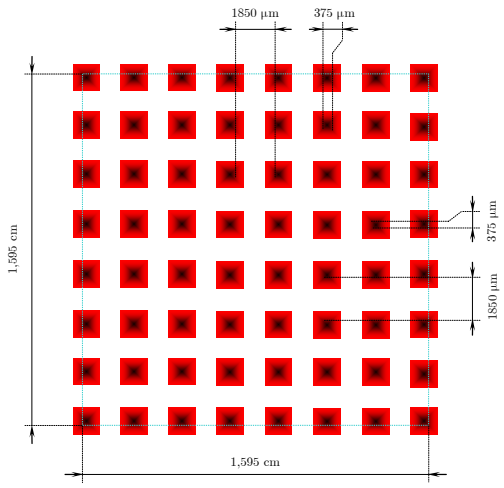


Figure 3.10 : Dimensions des matrices M_1_bo et M1.

3.1.6.2 Matrice 8 × 8 sur membrane unique

Cette matrice **M_2** repose sur l'association 8 × 8 capteurs (figure 3.11) de la série C_111. Son originalité repose sur l'élaboration d'une membrane unique. La figure 3.12 présente les dimensions des matrices : surface active de la matrice 3,265 × 3,265 mm^2, surface active d'un *pixel* 115 × 115 μm^2, correspondant à une scène détectable de 0,3 m^2.

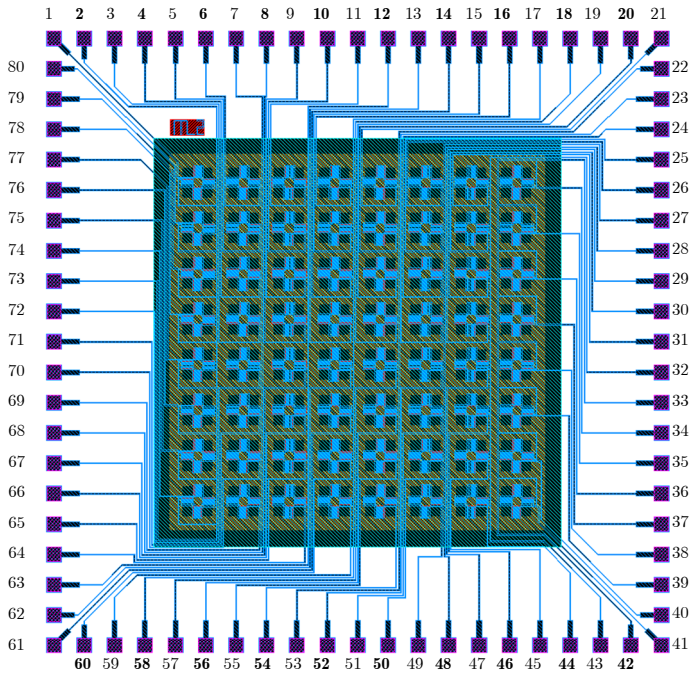


Figure 3.11 : Architecture de la matrice M_2.

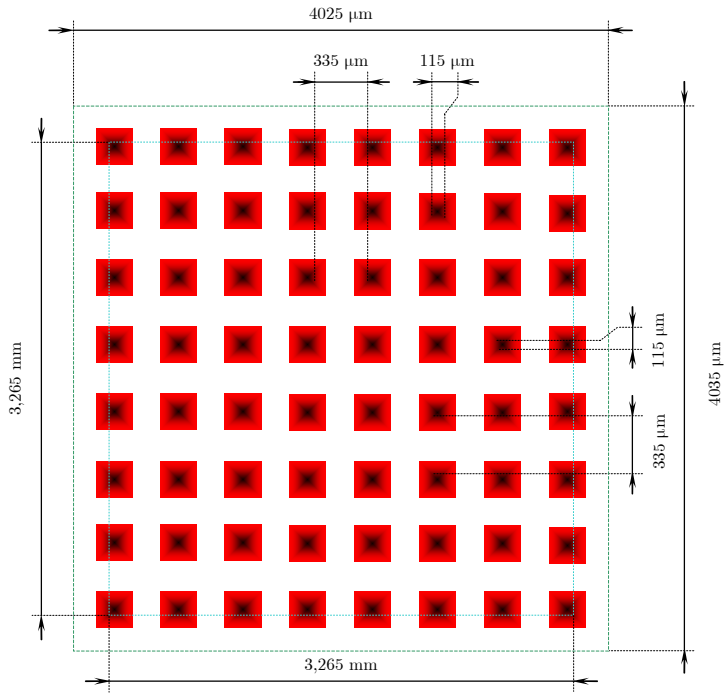


Figure 3.12 : Dimensions de la matrice M_2.

3.1.6.3 Matrice 2 × 8 sur membrane unique

Cette matrice **M_3** repose sur l'association 2 × 8 capteurs (figure 3.13) de la série C_111. Son originalité repose également sur l'élaboration d'une membrane unique. La figure 3.14 présente les dimensions des matrices : surface active de la matrice 565 × 3265 μm^2, surface active d'un *pixel* 115 × 115 μm^2, correspondant à une scène détectable de 0,05 m^2.

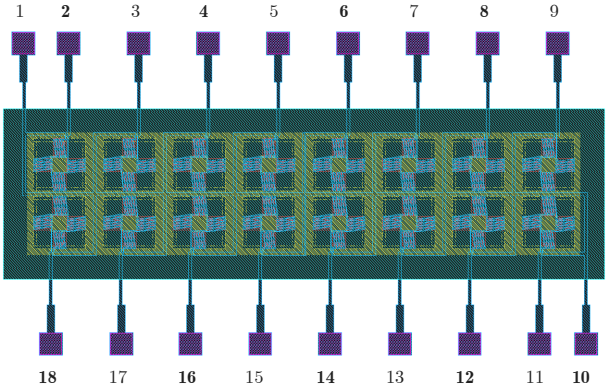


Figure 3.13 : Architecture de la matrice M_3.

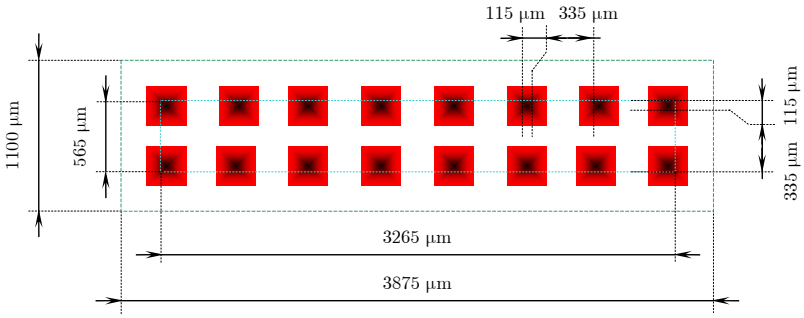


Figure 3.14 : Dimensions de la matrice M_3.

3.1.6.4 Matrice 3 × 3

Cette matrice **M_4** repose sur l'association 3 × 3 capteurs (figure 3.15) de la série C_311. La figure 3.16 présente les dimensions de la matrice : surface active de la matrice 4465 × 4465 μm^2, surface active d'un *pixel* 375 × 375 μm^2, , correspondant à une scène détectable de 0,62 m^2.

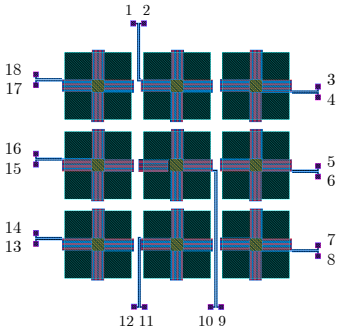


Figure 3.15 : Architecture de la matrice M_4.

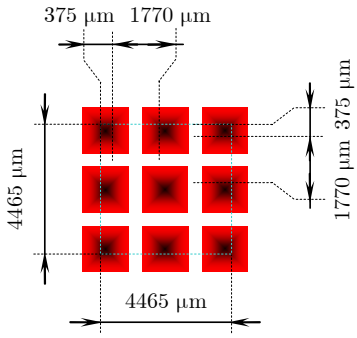


Figure 3.16 : Dimensions de la matrice M_4.

3.1.7. Présentation du jeu de masques

La conception des niveaux de masques a été effectué au moyen de la plate-forme de CAO Cadence[1] *Virtuoso Layout* disponible au LAAS et commercialisée par la société DuPont Photomasks[2], Inc (figure 3.17). Pour élaborer les thermopiles, nous avons conçu un jeu de masques à 8 niveaux. Une brève description est présentée sur la figure 3.18.

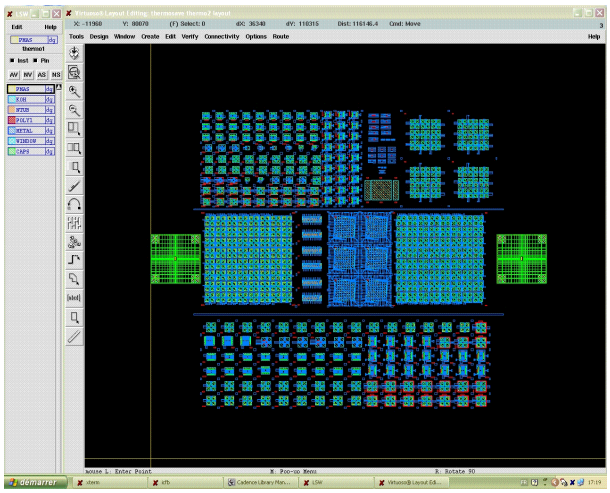
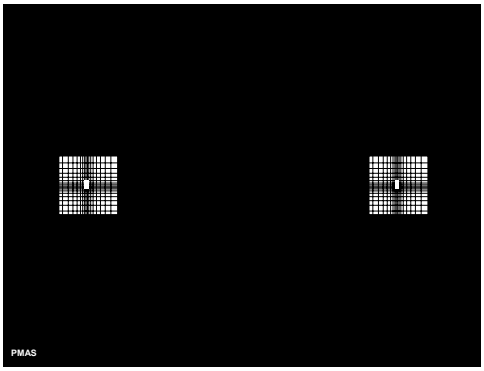


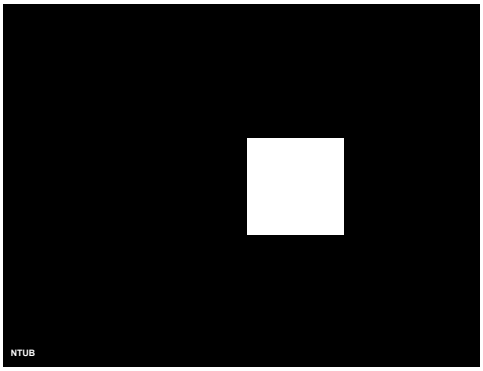
Figure 3.17 : Environnement de CAO Cadence *Virtuoso Layout* utilisé pour la conception des masques.

Liste des niveaux de masque conçu :

- Masque TI1 : PMAS, gravure des mires d'alignement dans le silicium.
- Masque TI2 : NTUB, implantation du bore dans le silicium (*Absorbeur*).
- Masque TI3 : POLY1, élaboration des bras PolySi.
- Masque TI4 : WINDOWS, ouverture de l'oxyde (*Contact ohmique*).
- Masque TI5 : METAL, élaboration des bras en Al.
- Masque TI6 : CAPS, gravure de la membrane (masque optionnel).
- Masque TI7 : PLATI, gravure de la couche de passivation (*bonding*).
- Masque TI8 : KOH, micro-usinage chimique (libération de la membrane).



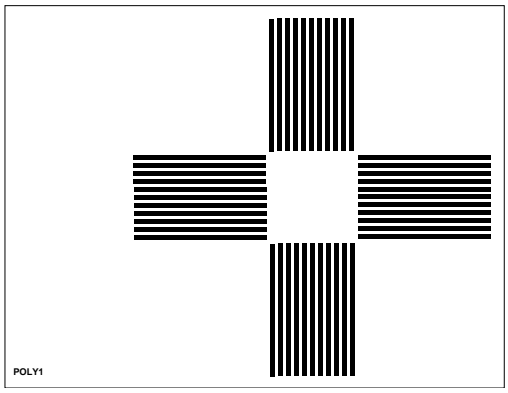
-a- Masque TI1 : PMAS



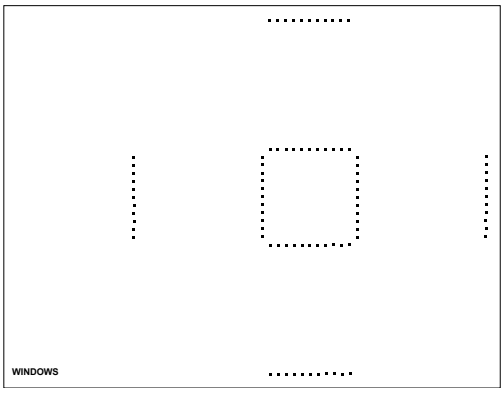
-b- Masque TI2 : NTUB

[1] http://www.cadence.com/products/custom_ic/index.aspx

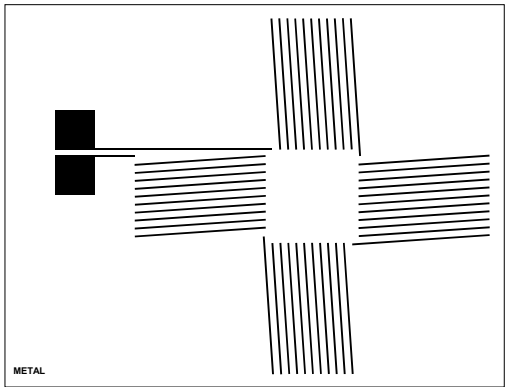
[2] http://www.photomask.com/



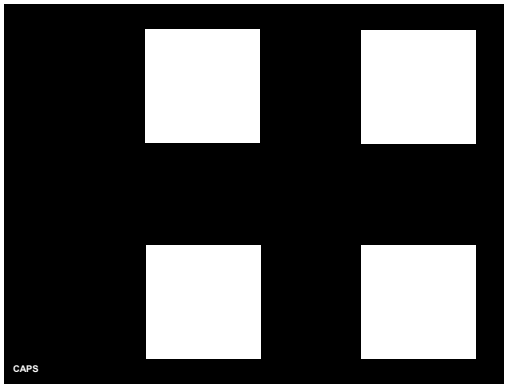
-c- Masque TI3 : POLY1



-d- Masque TI4 : WINDOWS

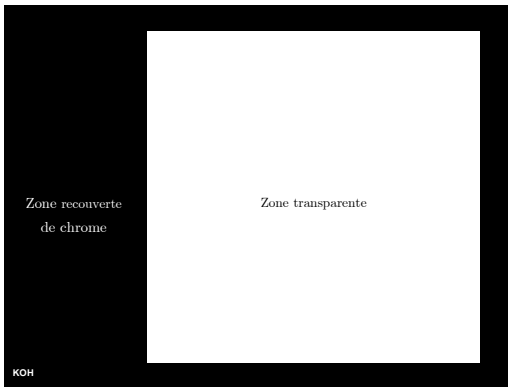


-e- Masque TI5 : METAL



-f- Masque TI6 : CAPS

-g- Masque TI7 : PLATI



-h- Masque TI8 : KOH

Figure 3.18 : Présentation du jeu de masques.

3.2 Description des procédés de fabrication technologique des thermopiles

Dans cette partie, nous nous attacherons à présenter les différentes étapes technologiques qui ont permis la fabrication finale de nos structures. En terme de faisabilité, la réalisation de l'absorbeur, des thermocouples et la libération des membranes furent l'objet de nombreuses phases technologiques de mises au point individuelles et de tests sous pointes ; nous ne les décrirons pas dans ce manuscrit. Nous soulignerons que l'ensemble des capteurs unitaires, matriciels et véhicules tests ont suivi le même processus de fabrication (utilisation du même jeu de masques).

Les caractéristiques du substrat de départ utilisé sont les suivantes : matériau de type N, 4-40 Ωcm^{-1}, d'orientation cristalline <100>, d'une d'épaisseur 300 ± 25 μm avec les deux faces polies et un diamètre de quatre pouces.

3.2.1 Réalisation des mires d'alignement

La réalisation des mires d'alignement constitue la première étape de fabrication. Au préalable, nous effectuons un nettoyage de la plaquette pour supprimer tout corps étranger tels que graisses, poussières, etc. Une première étape de photolithographie (masque TI1) est réalisée (figure 3.19). Pour cela, un promoteur d'adhérence HDMS[3] est déposé à la surface de la plaquette. La résine utilisée est une AZ1529, déposée à la tournette, dont les paramètres sont les suivants : accélération 5000 $rd.s^{-2}$, vitesse 4000 $tr.min^{-1}$ et de durée 30 s. Un pré-recuit sur plaque thermo-régulée à une température de 105 $°C$ pendant une minute permet l'évaporation des solvants dans la résine. Ensuite, la plaquette est insolée sous vide pendant 12 s à $\lambda = 405$ nm au moyen d'un équipement Karl-Suss MA150. La résine est alors révélée au moyen d'un bain AZ-Developper pendant 30 s (dose 1/1 : eau /AZ) puis durcie après recuit à 115 $°C$ pendant 1 mn (élimination des solvants résiduels).

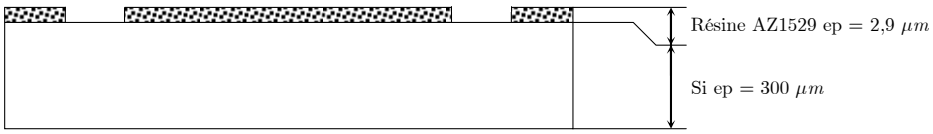


Figure 3.19 : Photolithographie n° 1 : Dépôt et révélation de la résine AZ1529.

Après vérification du bon déroulement de l'étape de photolithographie sous binoculaire, nous procédons à une gravure ionique sèche (DRIE[4] : ICP, gaz C_4F_8, SF_6) pendant 30 s pour obtenir une profondeur de gravure d'environ 1 μm dans le silicium (figure 3.20).

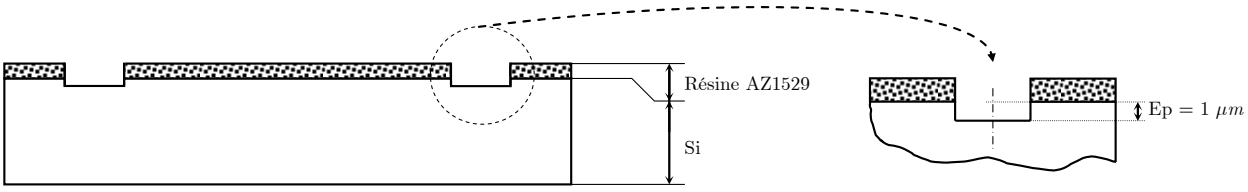


Figure 3.20 : Gravure DRIE : ICP du silicium.

Enfin, nous procédons à l'élimination de la résine dans un bain d'acétone et rinçage à l'eau désionisée (figure 3.21).

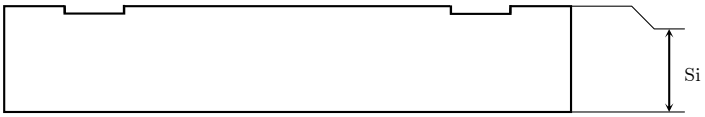


Figure 3.21 : Réalisation des mires d'alignement.

[3] HDMS : Hexmethyldisilazane.

[4] DRIE : Dry Reactive Ion Etching.

3.2.2 Réalisation de l'absorbeur

Cette étape du processus de fabrication est réalisée avec l'aide du CNM[5] de Barcelone, elle consiste à implanter une forte concentration de Bore par une source solide d'une épaisseur d'environ 6 μm. Pour préparer la plaquette à cette implantation, il est nécessaire de réaliser une couche d'oxydation humide d'épaisseur proche de 1 μm suivie d'une seconde étape de photolithographie afin de localiser l'absorbeur au centre de la future membrane.

Un nettoyage piranha (H_2SO_4 et H_2O_2, dose 1/1) est effectué pour éliminer toute trace de dépôt organique. Après rinçage à l'eau désionisée et séchage sous azote, la plaquette est placée dans un four d'oxydation humide. Une couche d'oxyde de 1 μm est réalisée (figure 3.22) lors de la phase d'oxydation humide H_2+O_2 à 1100 $°C$.

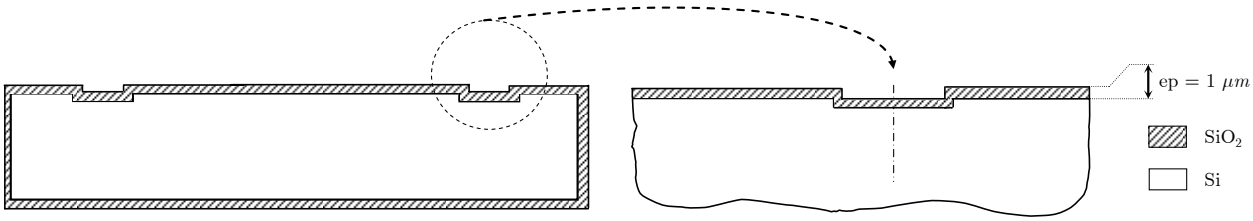


Figure 3.22 : Réalisation de la couche d'oxydation humide.

La seconde étape de photolithographie (masque TI2) est réalisée selon le principe déjà présenté. La résine utilisée est une AZ1529, après un dépôt d'une épaisseur d'environ 2,9 μm. après un recuit et une révélation, la zone de l'absorbeur est ainsi dimensionnée (figure 3.23).

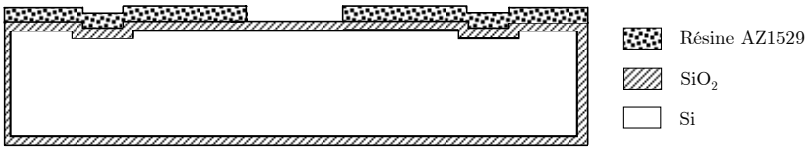


Figure 3.23 : Photolithographie n° 2 : Dépôt et révélation de la résine AZ1529.

Après vérification du bon déroulement de l'étape de photolithographie, la plaquette est plongée dans un bain d'acide fluorhydrique (*buffer HF*) pour graver l'oxyde de silicium (figure 3.24). On notera la présence de la cire apiezon qui protège la face inférieure de la plaquette. La gravure terminée, on effectue un rinçage à l'eau désionisée et un séchage sous azote.

[5] CNM : Centro Nacional de Microelectrónica, http://www.cnm.es/imb/index.php

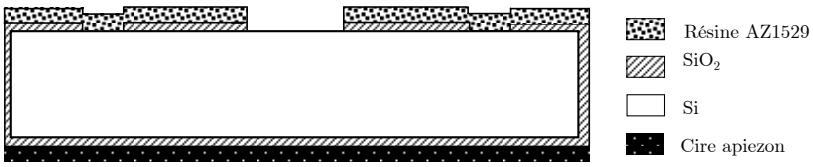
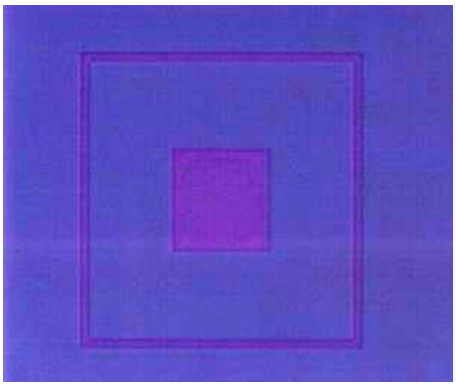


Figure 3.24 : Gravure de l'oxyde de silicium (*buffer HF*).

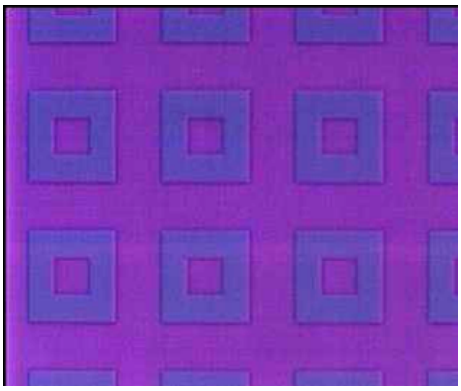
Un nettoyage au trichloréthylène permet d'éliminer la cire apiezon et un rinçage à l'acétone de supprimer les résidus de trichloréthylène et de résine (face avant). Un dernier rinçage à l'eau désionisée puis un séchage sous azote sont effectués. Un nettoyage piranha (H_2SO_4 et H_2O_2, dose 1/1) est opéré avant de procéder à l'implantation du bore. Cette implantation du bore est réalisée par une source solide sur la face avant de la plaquette pendant 60 *min* à une température de 1250 $°C$ avec un niveau de concentration de $1.10^{19} cm^{-3}$ (figure 3.25). Ceci permet d'atteindre une couche de profondeur 6 μm. Enfin, on exécute un nettoyage piranha pour supprimer à la fois les résidus de dopage et l'oxyde de masquage, puis on rince à l'eau désionisée et on sèche sous azote.

Figure 3.25 : Réalisation de l'absorbeur (implantation de bore fortement dopé : $1.10^{19} cm^{-3}$).

Sur la figure 3.26, nous pouvons voir les résultats obtenus après implantation du bore dans les plaquettes de silicium. A titre d'exemple, nous montrons l'absorbeur d'un capteur unitaire (figure 3.26 -a-) sur lequel nous identifions également l'implantation localisée à la périphérie de la future membrane. La figure 3.26 -b- représente la distribution des absorbeurs d'une future matrice sur membrane unique.



-a- capteur unitaire.



-b- matrice sur membrane unique.

Figure 3.26 : Photographie au microscope de la localisation des absorbeurs.

3.2.3 Réalisation de la membrane

La filière de réalisation choisie pour élaborer la membrane s'est naturellement orientée vers la technologie existante au LAAS-CNRS, déjà développée depuis plusieurs années pour d'autres applications [76], [77]. La membrane est donc constituée d'une double couche SiO_2/SiN_x (figure 3.27). La couche d'oxyde de silicium est compressive (- 300 MPa) et la couche de nitrure non stoechimétrique est en tension (+ 520 MPa). Des travaux de recherches antérieurs ont montré que leur association permettait l'obtention d'une compensation des contraintes résiduelles pour une épaisseur de 0,8 μm d'oxyde et 0,6 μm de nitrure, soit une contrainte en tension inférieure à 50 MPa pour une épaisseur totale de la bicouche de 1,4 μm. L'étape nécessaire à la formation de la couche d'oxyde silicium est réalisée par une oxydation thermique. La couche de nitrure est obtenue par dépôt chimique de Silane SiH_4 et NH_3 en phase vapeur à basse pression (réacteur horizontal LPCVD[6]).

Figure 3.27 : Dépôt de la couche SiO_2/SiN_x.

3.2.4 Elaboration des thermocouples

3.2.4.1 Réalisation des bras en PolySi

La couche mince de silicium polycristallin est déposée par LPCVD (figure 3.28). Le gaz nécessaire à son élaboration, le disilane (SiH_4), est soumis à une température de 605 °C et à une pression de 300 $mTorr$. Une période de 20 mn est nécessaire pour atteindre une épaisseur d'environ 0,6 μm. Ensuite, nous procédons au dopage in-situ du silicium polycristallin selon trois phases :

- Réalisation d'un oxyde de surface (gaz N_2, O_2) à une température de 950 °C pendant 5 mn.
- Dopage au phosphore (gaz $PoCl_3$) à une température de 950 °C pendant 20 mn.
- Redistribution (gaz N_2) à une température de 950 °C pendant 10 mn.

Figure 3.28 : Dépôt du silicium polycristallin.

[6] LPCVD : Low Pressure Chemical Vapor Deposition.

La troisième étape de photolithographie (masque TI3) est réalisée comme énoncée précédemment (résine AZ1529, dépôt, recuit et révélation). Les zones des bras en polySi sont ainsi dimensionnées (figure 3.29).

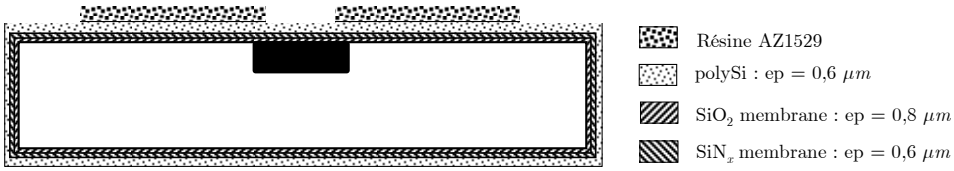


Figure 3.29 : Photolithographie n° 3 : Dépôt et révélation de la résine AZ1529.

Après vérification du bon déroulement de l'étape de photolithographie, nous procédons à une gravure ionique sèche (DRIE : ICP, gaz C_4F_8, SF_6, O_2) pendant 1 mn 40 s pour réaliser les bras en polySi (figure 3.30). Enfin, nous procédons à l'élimination de la résine dans un bain d'acétone et rinçage à l'eau désionisée.

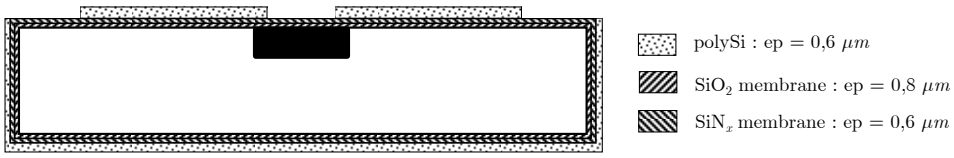
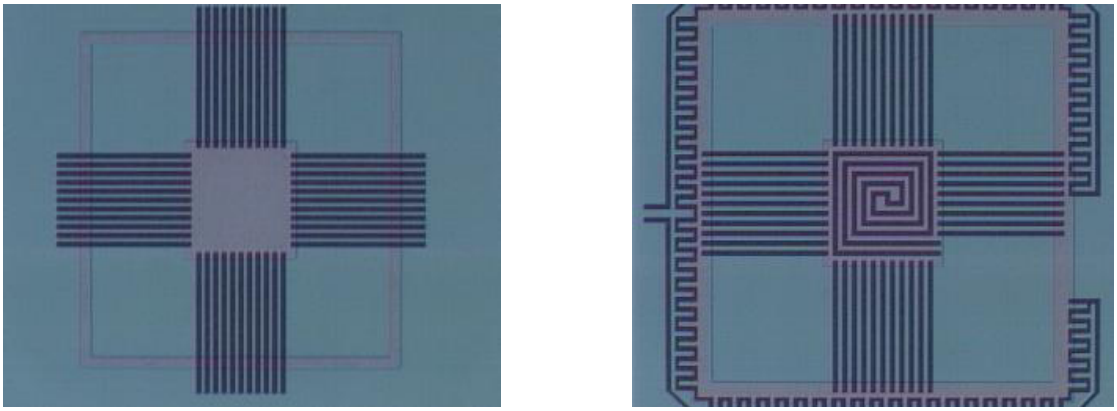


Figure 3.30 : Réalisation des bras en silicium polycristallin.

La figure 3.31 présente la réalisation finale des bras en silicium polycristallin. A titre d'exemple, nous représentons un capteur unitaire (figure 3.31 -a-) et un véhicule test (figure 3.31 -b-).



-a- capteur unitaire. -b- véhicule test.

Figure 3.31 : Photographie au microscope des bras en silicium polycristallin.

Dans une seconde étape, nous procédons à l'élimination du polySi situé sur les faces latérales et inférieures (arrière). Au préalable, nous protégeons la face supérieure avec de la cire apiezon. La suppression du polySi est réalisée en plongeant la plaquette protégée dans une solution HNO_3+HF(1%) (gravure humide) durant une période qui s'échelonne de 30 s à 1 mn (figure 3.32).

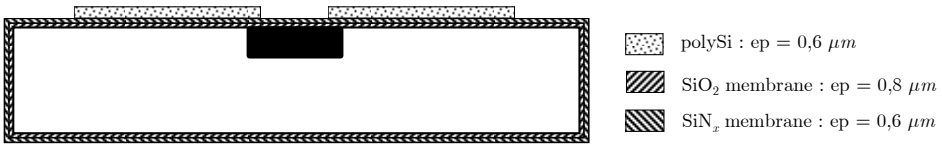


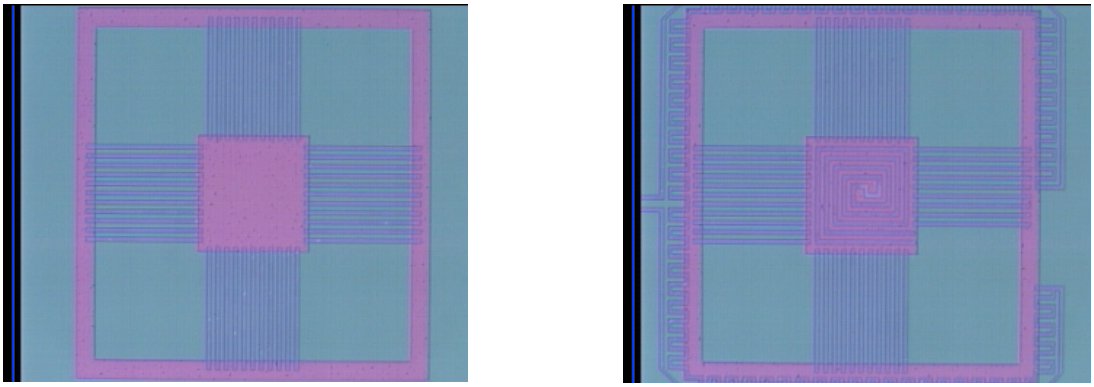
Figure 3.32 : Elimination du polySi les faces latérales et inférieure.

3.2.4.2 Réalisation de l'isolation électrique des thermocouples

L'élaboration de la couche d'isolation électrique est obtenue à partir d'un dépôt PECVD (figure 3.33). Les conditions de réalisation sont les suivantes : (gaz SiH_4+N_2O) à une température de 300 °C. Cette étape nécessite une durée de 11 mn pour obtenir une épaisseur de 0,1 μm.

Figure 3.33 : Dépôt de la couche d'oxydation dédié à l'isolation électrique des thermocouples.

La figure 3.34 présente la réalisation finale après l'isolation électrique des thermocouples pour un véhicule test et un capteur unitaire.



-a- capteur unitaire. -b- véhicule test.

Figure 3.34 : Photographie au microscope de la couche d'oxyde nécessaire à l'isolation électrique des thermocouples.

3.2.4.3 Réalisation des ouvertures de contacts électriques

La réalisation des ouvertures de contacts électriques (figure 3.35) requiert une étape de étape de photolithographie (masque TI4). Pour cela, un promoteur d'adhérence HDMS est déposé à la surface de la plaquette. La résine réversible utilisée est une AZ5214, déposée à la tournette, dont les paramètres sont les suivants : accélération 5000 $rd.s^{-2}$, vitesse 1000 $tr.min^{-1}$

de durée 30 s. Un pré-recuit sur plaque thermo-régulée à une température de 105 $°C$ pendant 55 s permet l'évaporation des solvants et la polymérisation de la résine. Ensuite, la plaquette est insolée sous vide pendant 2,7 s à $\lambda = 405$ nm au moyen d'un équipement Karl-Suss MA150. Ensuite, un recuit d'inversion est réalisé à une température de 105 $°C$ pendant 55 s. Puis, une seconde insolation, d'une durée de 12 s, sous vide et pleine plaque est ainsi réalisée. La résine est alors révélée au moyen d'un bain AZ-Developper pendant 30s (dose 1/1 : eau /AZ) puis durcie après un recuit à 105 $°C$ pendant 10 s.

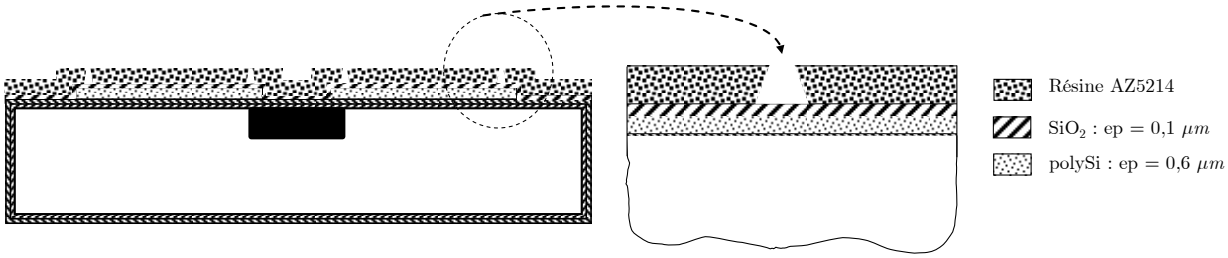


Figure 3.35 : Photolithographie n° 4 : Dépôt et révélation de la résine AZ5214.

Après vérification du bon déroulement de l'étape de photolithographie, nous procédons à une gravure ionique sèche (DRIE : ICP, gaz C_4F_8, SF_6, O_2) pendant 1 mn 40 s pour réaliser les ouvertures dans l'oxyde (figure 3.36). Enfin, nous procédons à l'élimination de la résine dans un bain d'acétone et à un rinçage à l'eau désionisée.

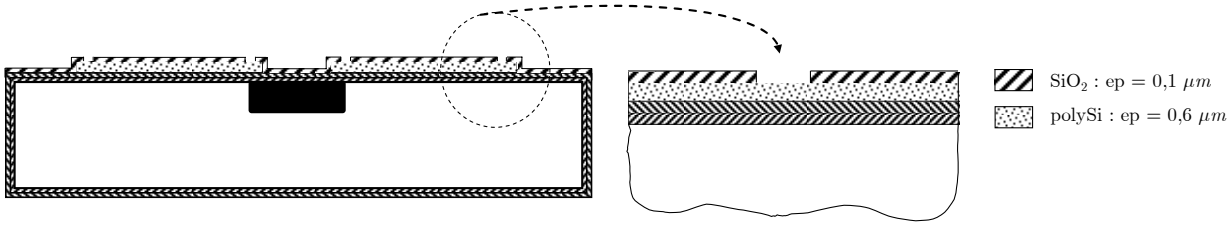
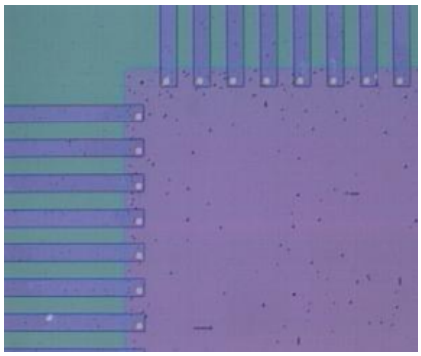
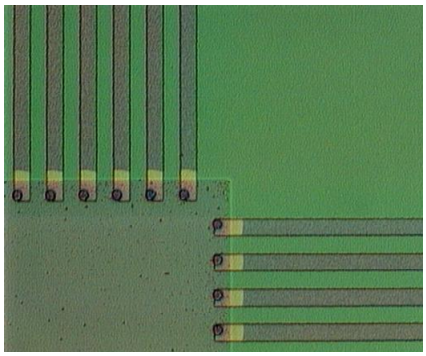


Figure 3.36 : Ouverture de l'oxyde pour les contacts électriques.

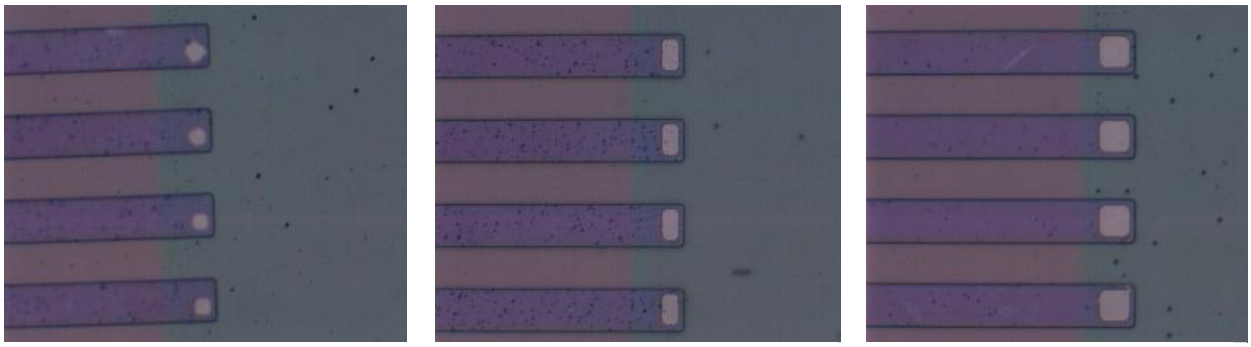
La figure 3.37 -a- présente l'ensemble des ouvertures de contacts électriques (5 × 5 µm, 5 × 10 µm et 10 × 10 µm) correctement réalisées (figure 3.37 c, d, e). Pour souligner la difficulté majeure de cette étape technologique, la figure 3.35 -b- présente des défauts de gravure localisés que nous avons du éprouvés.



-a- Contact correctement gravés.



-b-. Sur-gravure des contacts.



-c- Contact 5 $\mu m \times 5\ \mu m$ -d- Contact 5 $\mu m \times 10\ \mu m$ -e- Contact 10 $\mu m \times 10\ \mu m$

Figure 3.37 : Ouverture de l'oxyde d'isolation nécessaire au contact électrique des thermojonctions.

3.2.4.4 Réalisation des bras en aluminium

Compte tenu de la largeur des bras en aluminium (5 μm), le procédé technologique s'appuie sur une étape de *lift-off* [7]. Pour ce faire, une cinquième étape de photolithographie (masque TI5) est nécessaire, pour laquelle nous utilisons la résine réversible AZ5214 (figure 3.38). Comme précédemment, les conditions d'utilisation sont identiques (dépôt, pré-recuit, 1er insolation, recuit d'inversion et 2nde insolation). Cette technique confère une meilleure résolution des bras d'aluminium. Ensuite, le dépôt d'aluminium est réalisé par pulvérisation sous vide.

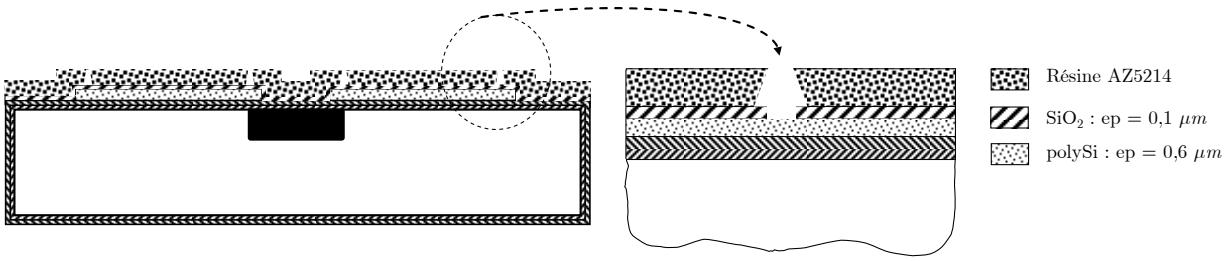


Figure 3.38 : Photolithographie n° 5 : Dépôt et révélation de la résine AZ5214.

Le dépôt d'aluminium (figure 3.39) se décompose en deux phases :

- pulvérisation sans polarisation avec les paramètres suivants : DC=0,5 kW, P=10^{-7} à 10^{-2} $mBar$, sous Ar pendant 30 s (obtention d'une épaisseur de 0,1 μm),
- pulvérisation polarisée pendant 2 mn 50 s avec une tension de polarisation de -60 V (obtention d'une épaisseur de 0,5 μm).

[7]lift-off : Procédé d'élimination d'un matériau par l'utilisation d'une couche sacrificielle.

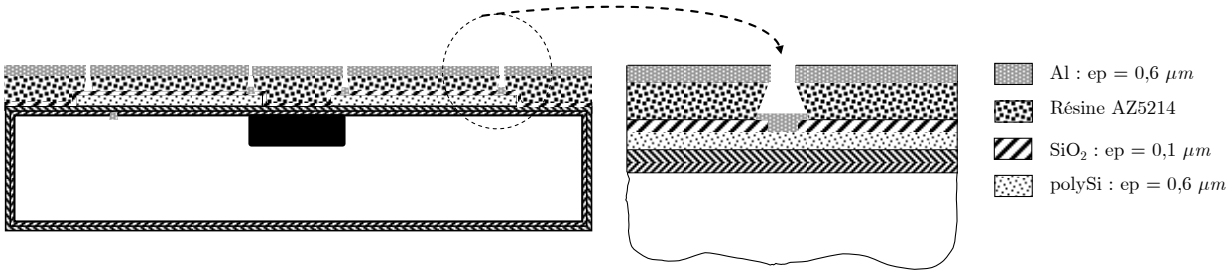


Figure 3.39 : Dépôt de l'aluminium.

Ensuite, la plaquette est immergée dans une étuve à ultrasons contenant de l'acétone. Les vibrations mécaniques conjuguées aux effets de l'acétone contribuent à l'élimination de la résine. Un rinçage à l'eau désionisée et un séchage à l'azote terminent cette étape technologique (figure 3.40).

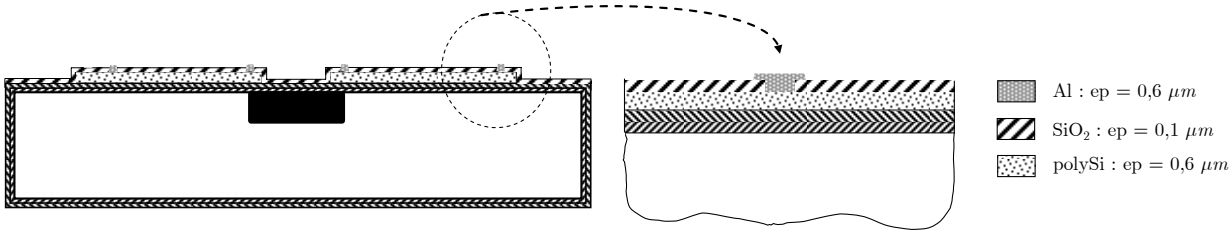
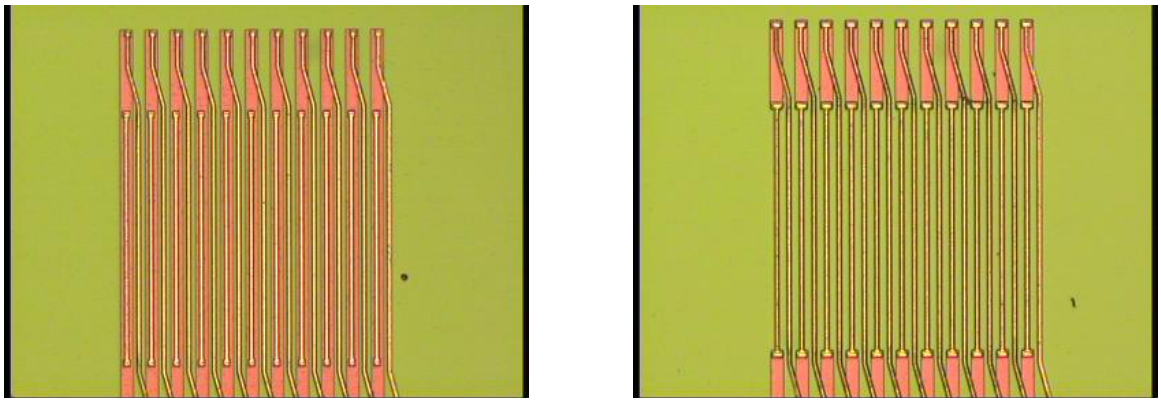


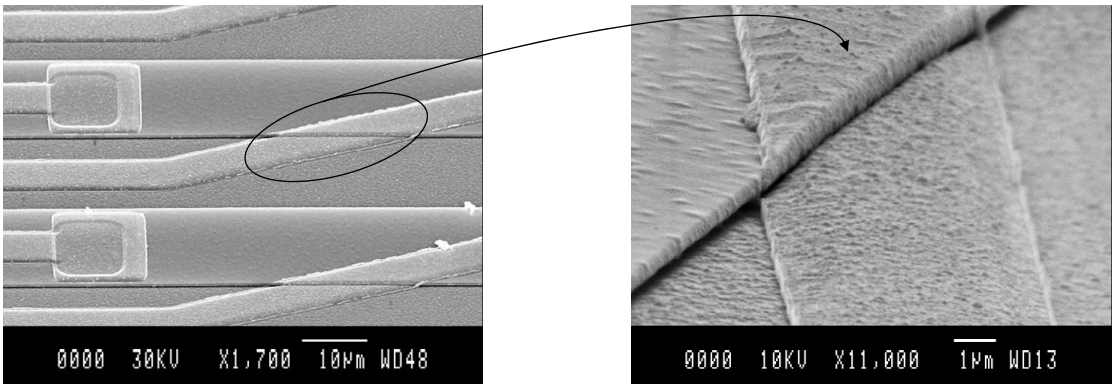
Figure 3.40 : Obtention des bras d'aluminium par la suppression de la résine AZ5214.

La figure 3.41 permet de voir la réalisation physique des thermocouples que nous avons présentées au paragraphe 3.1.2.3. Nous identifions les structures de type parallèle et série. La figure 3.42 illustre un double problème que nous avons rencontré. Le premier rend compte de la difficulté à obtenir un recouvrement de marche correct et le second révèle un problème de gravure latérale situé sous les bras en polySi (*Notching*).



-a- Bras de type parallèle -b- Bras de type série.

Figure 3.41 : Photographie au microscope des bras en aluminium.



-a- Recouvrement de marche. -b- Gravure latérale situé sous le polySi.

Figure 3.42 : Photographie MEB des recouvrements de marche.

3.2.5 Passivation du capteur

La passivation du capteur est réalisée par une oxydation PECVD non dopé d'épaisseur 0,2 μm (figure 3.43).

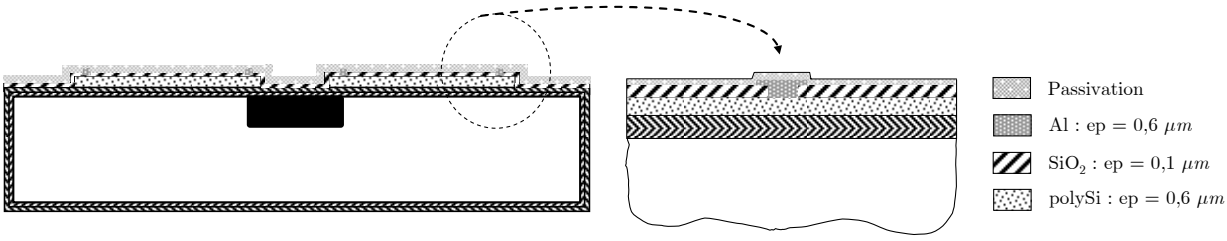


Figure 3.43 : Passivation du capteur par un oxyde PECVD.

On notera qu'une 7ème étape de photolithographie, que nous ne présenterons pas dans ce manuscrit, est nécessaire pour accéder aux plots de contact des fils de soudure (*Bonding*).

3.2.6 Libération de la membrane

Compte tenu de la présence de l'absorbeur situé sous la membrane, la libération de celle-ci impose un mode de micro-usinage du silicium de type chimique. Ainsi, pour réaliser la membrane, une dernière étape de photolithographie (masque TI8) est nécessaire (figure 3.44). Pour cela, un promoteur d'adhérence HDMS est déposé à la surface de la plaquette. La résine utilisée est une AZ1529, elle est utilisée tel que nous l'avons déjà décrit précédemment (dépôt à la tournette, pré-recuit à 105 °C et insolation).

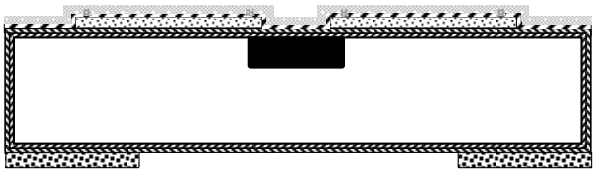


Figure 3.44 : Photolithographie n° 8 : Dépôt et révélation de la résine AZ1529.

Après vérification du bon déroulement de l'étape de photographie sous binoculaire, nous procédons à une gravure ionique sèche (DRIE : GIR) pour éliminer la bicouche SiO_2/SiN_x sur la face inférieure. Puis, nous procédons à l'élimination de la résine dans un bain d'acétone et rinçage à l'eau désionisée (figure 3.45).

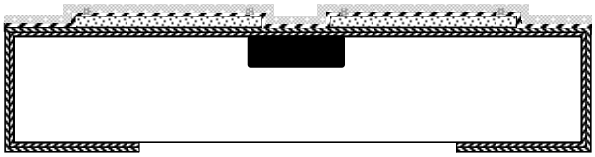


Figure 3.45 : Gravure DRIE : GIR du bicouche SiO_2/SiN_x.

Enfin, nous procédons à la gravure chimique anisotropique (KOH[8]) du substrat de silicium (figure 3.46) qui permet de "libérer" la membrane [78], [79].

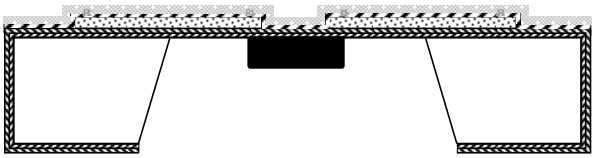


Figure 3.46 : Micro-usinage chimique du substrat de silicium.

3.2.7 Séparation, montage et connectique des puces

A cette étape du processus technologique, l'ensemble des phases de fabrication collective est achevé. La figure 3.47 présente la plaquette réalisée. La séparation des différentes structures est effectuée à l'aide d'une scie diamantée. Cette technique nécessite à la fois un procédé de rainurage (*scribing*) et de découpe. La scie diamantée est utilisée pour rainurer la pastille selon des raies parallèles puis perpendiculaires pour amorcer le détachement des puces les unes des autres. Placés sur un support déformable, les éléments sont séparés par application d'une dépression sur la membrane. Ils sont ensuite montés un à un sur des embases TO5 pour les structures unitaires, sur des supports de circuits intégrés du type DIL 40 pour les barrettes ou sur des supports PCB en époxy pour les matrices. Pour fixer les puces sur leur embase respective, l'opération se fait à l'aide d'une binoculaire. Nous utilisons une résine H70E qui se polymérise à faible température (50 $°C$ pendant 12 h). La dernière étape consiste à réaliser la connectique en micro-soudant par ultrasons (*wedge bonding*) des fils d'aluminium de très faible section (25 μm). Chaque puce est ainsi reliée aux électrodes de son support. A titre d'exemple, nous présentons un aperçu des structures que nous avons encapsulées (figure 3.48). La figure 3.49 montre une thermopile mono-élément fixée sur son embase munie de son optique. Les figures 3.50 à 3.53 représentent un véhicule test thermopile et un capteur thermopile avec leur cablage sur support. Enfin, nous présentons une structure matricielle 2×8 éléments sur laquelle nous identifions : les détails de barrette (figure 3.54 -a-), ainsi que son montage sur un boîtier DIP 40 (figures 3.54 -b- et 3.54 -c-). Les caractérisations de ces différentes structures seront présentées dans le quatrième chapitre.

[8] KOH : Hydroxide de potassium.

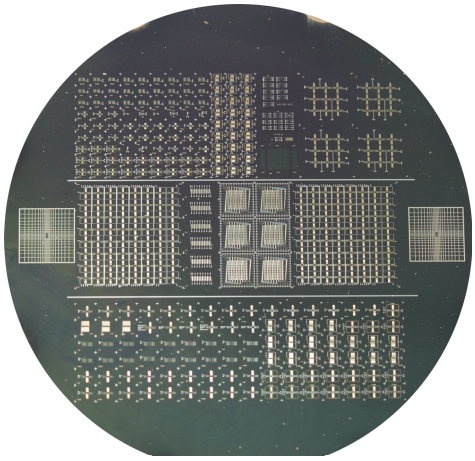


Figure 3.47 : Structures élaborées sur wafer $4''$.

Figure 3.48 : Quelques structures encapsulées.

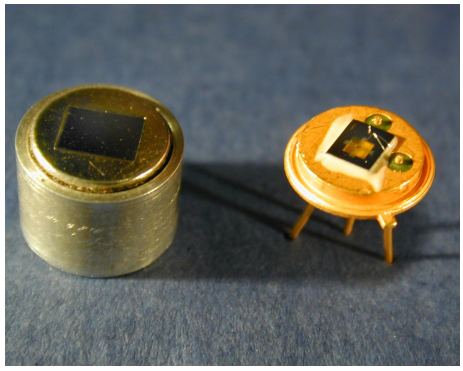


Figure 3.49 : Thermopile mono-élément montée sur son embase TO5 et munie de son optique.

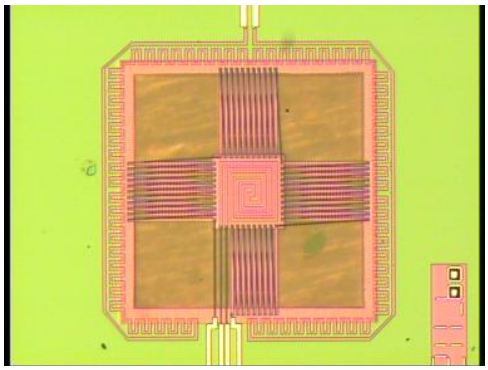


Figure 3.50 : Véhicule test.

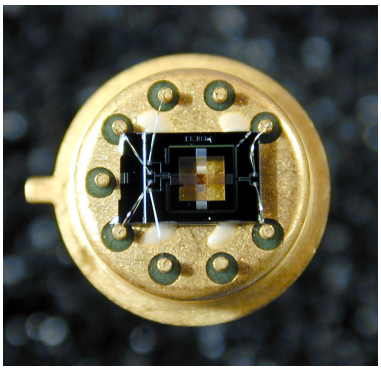


Figure 3.51 : Véhicule test associé monté sur son embase avec puce câblée.

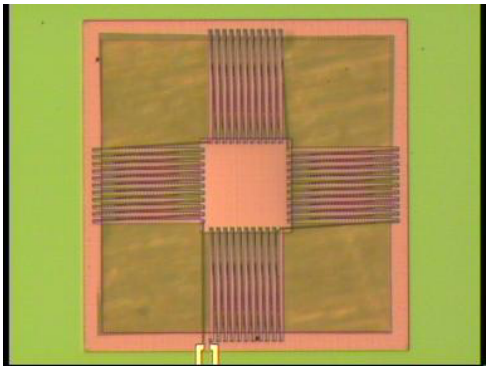


Figure 3.52 : Thermopile unitaire.

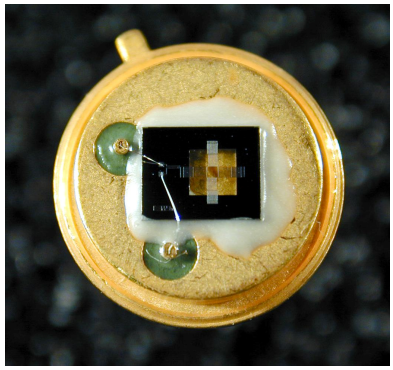
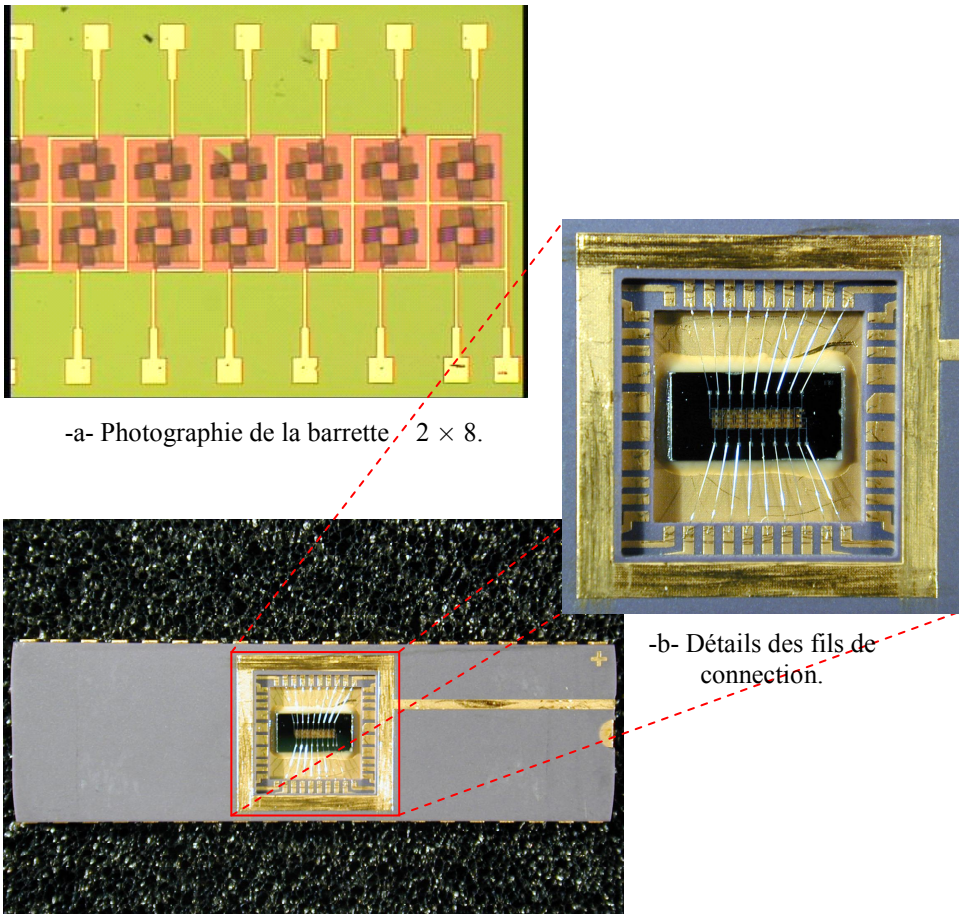


Figure 3.53 : Thermopile unitaire montée sur son embase avec puce câblée.



-a- Photographie de la barrette 2×8.

-b- Détails des fils de connection.

-b- Photographie de la barrette montée sur une embase DIP 40.

Figure 3.54 : Photographie d'une structure matricielle 2×8 éléments.

Conclusion

Au cours de ce troisième chapitre, nous avons présenté les différentes structures thermopiles proposées : unitaires, matricielles, en barrettes et véhicules tests. Nous avons décrit les caractéristiques topologiques des capteurs qui se différencient des structures conventionnelles par de nouvelles constitutions des thermocouples (série et parallèle). Ceci doit permettre de bien souligner l'influence des paramètres géométriques que nous désirons évaluer.

Ensuite, nous avons détaillé le processus technologique de réalisation des thermopiles élaborées au LAAS-CNRS. Ceci nous a conduit à développer un premier savoir-faire sur le processus de fabrication complet des thermopiles. Pour cela, un certain nombre de problèmes technologiques ont du être résolus au travers de réglages paramétriques des outils de fabrication qui ont été effectués grâce à des tests principalement effectués sous pointes. Plusieurs échantillons de structures ont été montés sur des embases conventionnelles pour pouvoir être caractérisés facilement.

Chapitre 4

Caractérisation thermoélectrique des thermopiles

Sommaire

Introduction **121**

4.1 Caractérisation des résistances électriques **123**

4.1.1 Mesure des structures tests 123

4.1.2 Mesure de l'ensemble des topologies unitaires 124

4.2 Détermination du coefficient Seebeck **126**

4.3 Influence de la géométrie des structures sur le pouvoir thermoélectrique **130**

4.3.1 Influence du contact ohmique localisé aux extrémités des thermojonctions 130

4.3.2 Influence de la topologie des thermocouples 131

4.5 Mesure de la constante de temps **133**

4.6 Conception et réalisation d'un banc de mesure **134**

4.6.1 La régulation du système thermique 134

4.6.2 L'électronique d'instrumentation : un préamplificateur spécifique 138

4.6.3 Automatisation du banc de mesure 139

4.7 Mesure de la dérive thermique des thermopiles **141**

4.8 Mesure de la Sensibilité **142**

4.9 Mesure de l'écart de température équivalent au bruit (*NETD*) **143**

4.10 Discussion et corrélation préliminaires des mesures avec le modèle **144**

Conclusion **147**

Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats métrologiques des structures que nous avons fabriquées dans la salle blanche de notre laboratoire. Nous commencerons par présenter les résultats issus de la mesure des résistances électriques de l'ensemble des structures et déterminerons la résistivité des matériaux constitutifs des thermocouples. Nous évaluerons le coefficient Seebeck des capteurs et présenterons une analyse comparative des résultats obtenus pour les différents topologies (contact ohmique, type de bras : conventionnel, parallèle et série) de forme carré et/ou rectangulaire. Nous déterminerons également les temps de réponse de nos structures.

Ensuite, pour évaluer la dérive thermique de nos thermopiles, la sensibilité des capteurs ainsi que la température équivalente au bruit (*NETD*), nous avons conçu un banc de mesure automatique thermorégulé spécifiquement adapté à la caractérisation des capteurs thermopiles. Nous en présenterons les principales phases, de la conception jusqu'à la réalisation.

Enfin, nous établirons un bilan des caractérisations effectuées et situerons nos performances par rapport à celles du commerce.

4.1. Caractérisation des résistances électriques

4.1.1 Mesures des structures tests

Dans cette partie du travail, on se propose de déterminer la résistivité des matériaux qui constituent les thermocouples. Les mesures ont été en partie réalisées au moyen d'un testeur sous pointe KARL SUSS PM5 (figure 4.1). Cette figure présente également un exemple d'une série de structures dédiées aux tests des thermocouples (type et longueur de bras, ouverture des contacts ohmiques).

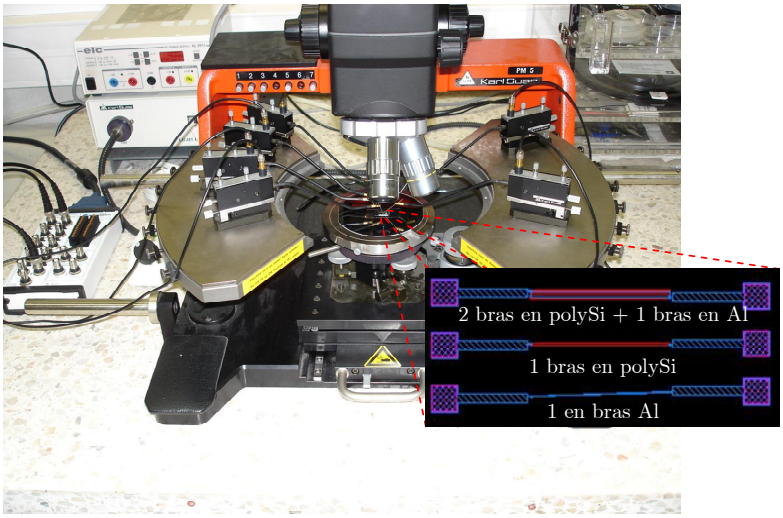


Figure 4.1 : Testeur sous pointe permettant la mesure de résistance des bras.

Les mesures effectuées sur l'ensemble des structures tests (B1, B2 et B3) de longueur 800 μm sont répertoriées dans le tableau 4.1 (nous présentons en Annexes A2.1 les résultats pour les bras de 120 μm et 400 μm).

Longueur des bras 800 µm	**Résistance électrique (Ω)**		
Type de thermocouple	**Surface du contact ohmique des thermojonctions**		
Structure type B1	**5 × 5 µm**	**5 × 10 µm**	**10 × 10 µm**
2 bras polySi +1 bras Al	1468	956	1458
1 bras polySI	730	736	723
1 bras Al	15	19	13
Structure type B2 (//)			
2 bras polySi+1 bras Al	937	937	923
1 bras polySi	467	464	458
1 bras Al	15	14	13
Structure type B3 (série)			
2 bras polySi+1 bras Al	964	947	920
1 bras polySi	476	470	457
1 bras Al	19	18	12

Tableau 4.1 : Résistances électriques des différents types de bras élémentaires.

Les résultats montrent que les structures **B2** et **B3** (structure série et parallèle) présentent une **diminution** de la **résistance** de thermocouple d'environ **36 %**. Globalement, l'influence de la surface du contact ohmique sur les thermojonctions n'affecte quasiment pas la résistance électrique. Des mesures complémentaires effectuées au TENCOR ont également permis d'évaluer l'épaisseur des matériaux déposés. Les épaisseurs mesurées de polysilicium et de l'aluminium sont de 0,6 μm. Connaissant les dimensions de chacune des structures conventionnelles (**B1**), le calcul de la résistivité donne en moyenne :

- pour le **silicium polycristallin** : **0,821** $m\Omega.cm$
- pour l'**aluminium : 6,019** $\mu\Omega.cm$.

4.1.2 Mesure de l'ensemble des topologies unitaires

Dans ce paragraphe, nous présentons l'ensemble des mesures de résistances électriques pour la totalité des capteurs (tableau 4.2) et des véhicules tests associés (tableau 4.3). L'ensemble des mesures a été initialement effectué sous pointe puis vérifié après encapsulation. Globalement, nous constatons que les différentes surfaces de contact ohmique que nous avons considérées ont peu d'influence sur les résistances des thermopiles. Nous noterons que les résistances des structures série et parallèle présentent une diminution de leur résistance de 30 % en comparaison avec les structures conventionnelles. En résumé, les valeurs de résistance de chacune des thermopiles présentent des résultats analogues aux structures tests vues précédemment, ce qui nous permet de valider le calcul des résistivités.

Capteur (bras 120 µm)			Résistance thermopile (kΩ)		
C_111		C_111_bo	3,53		3,57
R_111		R_111_bo	3,63		3,61
Capteur (bras 400 µm)			Résistance thermopile (kΩ)		
C_211	C_212	C_213	15,24	15,2	14,84
C_211_bo	C_212_bo	C_213_bo	15,26	15,21	14,86
C_221	C_222	C_223	10,03	9,96	9,531
C_221_bo	C_222_bo	C_223_bo	10,06	10	∅
C_231	C_232	C_233 (E), (G)	10,38	∅	9,72
C_231_bo	C_232_bo	C_233_bo	10,43	10,21	9,72
C_211_bol (D)	C_212_bol (D)	C_213_bol (D)	15,25	∅	14,63
C_211_bol (G)	C_212_bol (G)	C_213_bol (G)	13,52	∅	∅
R_211	R_212	R_213	15,29	15,16	14,84
R_211_bo	R_212_bo	R_213_bo	15,24	15,18	14,91
R_221	R_222	R_223	9,91	9,96	9,44
R_221_bo	R_222_bo	R_223_bo	9,96	∅	9,45
R_231	R_232	R_233	10,13	∅	9,527
R_231_bo	R_232_bo	R_233_bo	10,32	∅	9,6
R_211_bol	R_212_bol	R_213_bol	15,26	15,12	14,8
R_221_bol	R_222_bol	R_223_bol	9,908	9,97	9,41
R_231_bol	R_232_bol	RT_233_bol	∅	10,2	9,45

Capteur (bras 800 µm)			Résistance thermopile (kΩ)		
C_311 (A)	C_312 (A)	C_313 (A)	∅	31,97	31,81
C_311 (E)	C_312 (E)	C_313 (E)	∅	∅	31,09
C_311_bo (A)	C_312_bo (A)	C_313_bo (A)	∅	∅	31,29
C_311_bo (F)	C_312_bo (F)	C_313_bo (F)		∅	∅
C_321 (A)	C_322 (A)	C_323 (A)	21,81	21,8	∅
C_321 (E)	C_322 (E)	C_323 (E)	24,64	∅	∅
C_321_bo (A)	C_322_bo (A)	C_323_bo (A)	∅	∅	∅
C_321_bo (F)	C_322_bo (F)	C_323_bo (F)	23,88	23,7	21,88
C_331 (A)	C_332 (A)	C_333 (A)	∅	22,23	∅
C_331 (E)	C_332 (E)	C_333 (E)	∅	22,83	21,6
C_331_bo	C_332_bo	C_333_bo	27,39	23,32	
R_311	R_312	R_313	∅	31,73	31,79
R_311_bo	R_312_bo	R_313_bo	31,27	31,6	∅
R_321	R_322	R_323	∅	22,09	∅
R_321_bo	R_322_bo	R_323_bo	23,32	∅	∅
R_331	R_332	R_333	29,97	24,58	24,28
R_331_bo	R_332_bo	R_333_bo	∅	∅	21,74
Rn_311_bol	Rn_312_bol	Rn_313_bol	∅	63,8	∅

Tableau 4.2: Résistances électriques des différentes topologies unitaires.

Capteur (bras 120 µm)			Résistance thermopile (kΩ)			Résistance chauffe (kΩ)		
CT_111			3,44			0,67		
CT_111_bo			3,37			0,71		
RT_111			3,72			1,46		
RT_111_bo			3,88			1,43		
Capteur (bras 400 µm),			Résistance thermopile (kΩ)			Résistance chauffe (kΩ)		
CT_211	CT_212	CT_213	14,7	14,18	14,13	2,53	2,54	2,53
CT_211_bo	CT_212_bo	CT_213_bo	14,57	14,62	14,02	2,52	2,97	3,54
CT_221	CT_222	CT_223	9,71	9,63	9,12	3,11	3,12	3,14
CT_221_bo	CT_222_bo	CT_223_bo	∅	9,66	∅	3,07	3,13	3,33
CT_231	CT_232	CT_233	9,99	10	9,35	3,17	3,2	3,22
CT_231_bo	CT_232_bo	CT_233_bo	10,15	9,85	9,25	3,15	3,18	3,19
CT_211_bol	CT_212_bol	CT_213_bol	14,46	14,55	14,33	2,51	2,52	2,55
RT_211	RT_212	RT_213	16,12	15,68	∅	5,68	5,28	∅
RT_211_bo	RT_212_bo	RT_213_bo	16,32	15,83	15,86	6,03	5,46	5,31
RT_221	RT_222	RT_223	10,57	10,37	9,8	6,35	6,01	6,1
RT_221_bo	RT_222_bo	RT_223_bo	10,56	10,32	9,81	6,44	6,42	6,46
RT_231	RT_232	RT_233	11,55	10,13	12,15	6,4	0,256	6,39
RT_231_bo	RT_232_bo	RT_233_bo	10,51	10,16	9,45	6,39	6,39	6,41
RT_211_bol	RT_212_bol	RT_213_bol	∅	15,9	15,39	5,9	5,94	5,99
RT_221_bol	RT_222_bol	RT_223_bol	10,57	10,68	9,71	6,43	6,36	6,35
RT_231_bol	RT_232_bol	RT_233_bol	∅	10,23	9,66	∅	4,76	6,44

Capteur (bras 800 µm)			Résistance thermopile (kΩ)			Résistance chauffe (kΩ)		
CT_311	CT_312	CT_313	∅	33,45	∅	∅	3.36	3.35
CT_311_bo	CT_312_bo	CT_313_bo	37,78	34,12	∅	3,26	3,27	3,33
CT_321	CT_322	CT_323	∅	22,02	∅	3,37	3.32	∅
CT_321_bo	CT_322_bo	CT_323_bo	∅	21,88	∅	∅	3,35	∅
CT_331	CT_332	CT_333	∅	21,51	20,75	∅	3,37	3,35
CT_331_bo	CT_332_bo	CT_333_bo	21,65	2121	20.40	3.32	3,3	3.32
RT_311	RT_312	RT_313	34,64	35,2	∅	5,06	5,17	∅
RT_311_bo	RT_312_bo	RT_313_bo	∅	∅	∅	5,04	∅	5,22
RT_321	RT_322	RT_323	∅*	23,44*	22,10*	∅*	5,18*	5,16*
RT_321_bo	RT_322_bo	RT_323_bo	∅	22,78	21,59	∅	5,07	5,13
RT_331	RT_332	RT_333	22,57	22,08	21,8	5,1	5,08	5,17
RT_331_bo	RT_332_bo	RT_333_bo	22,58	22,63	21,44	5,1	5,2	5,22

Tableau 4.3 : Résistances électriques des différents véhicules tests unitaires.

4.2 Détermination du coefficient Seebeck

Pour déterminer le coefficient Seebeck du couple de matériaux, nous avons effectué une analyse thermique de la résolution surfacique de nos structures. Le résultat de cette technique de mesure, qui est aussi qualifiée de thermographie, représente une cartographie instantanée des phénomènes thermiques statiques et/ou dynamiques. Pour ce faire, nous avons conçu un dispositif de mesure (figure 4.2) constitué d'une caméra infrarouge de type JADE III (CEDIP Infrared Systems), d'une carte d'acquisition (PCI-6024E de National Instruments) et d'un ordinateur. La caméra thermique est de type refroidie (température de fonctionnement à 80 K atteinte en moins de 8 min). Elle repose sur une technologie HgCdTe et présente une résolution de 320 × 256 *pixels*, une taille de pixel 25 μm et des temps d'intégration[1] compris entre 25 μs et 375 μs. Compte tenu de la taille de nos structures, elle ne permettra pas de mesurer avec précision la résolution spatiale de la température le long d'un seul thermocouple. Toutefois, elle est parfaitement adaptée pour mesurer des zones de température de dimensions bien supérieures telles que les zones d'absorption. On notera que le NETD de la caméra est inférieure à 20 mK, ce qui confère à la mesure une incertitude globale largement inférieure au degré Celcius après calibration.

L'évaluation du coefficient Seebeck est obtenue à partir des structures tests que nous avons conçues. Ces structures tests sont constituées d'une résistance localisée au dessus de l'absorbeur. C'est donc la polarisation électrique de la résistance qui par effet Joule, engendre l'élévation de la température. Comme la membrane garantit le maintien du gradient thermique entre les thermojonctions, la thermopile génère un signal électrique d'autant plus élevé que l'amplitude est grande. Ainsi, l'acquisition des points de mesure est obtenue en synchronisant la caméra avec la carte d'acquisition.

[1] Le temps d'intégration correspond à la durée de polarisation d'un pixel, par exemple pour t_{int} = 64 µs, l'image est cadencée à 50 Hz.

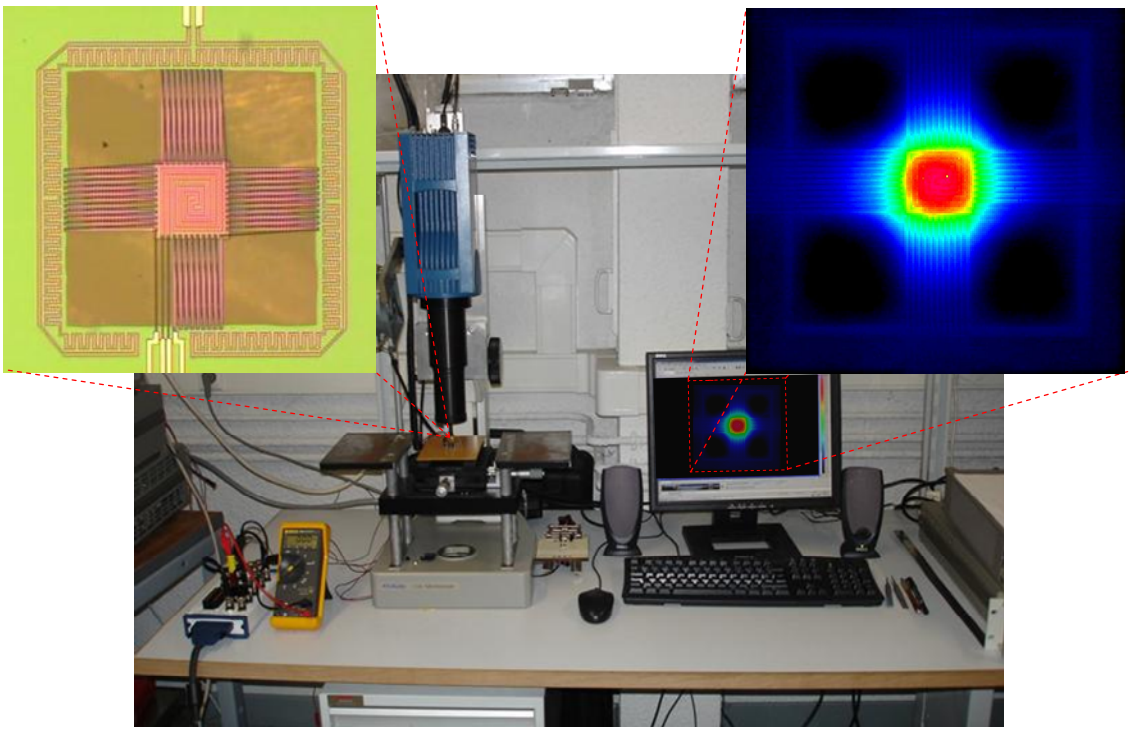


Figure 4.2 : Dispositif de mesure par thermographie.

Les figures 4.3 et 4.4 présentent la tension générée par les thermopiles en fonction de l'élévation de la température ΔT. On rappelle que les structures tests ont 42 thermocouples de longueur 400 μm et 800 μm, et 22 thermocouples pour celles de 120 μm.

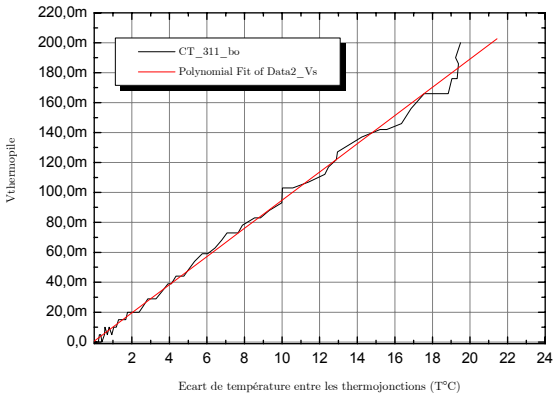


Figure 4.3 : Tension générée par la thermopile CT_311_bo en fonction de ΔT.

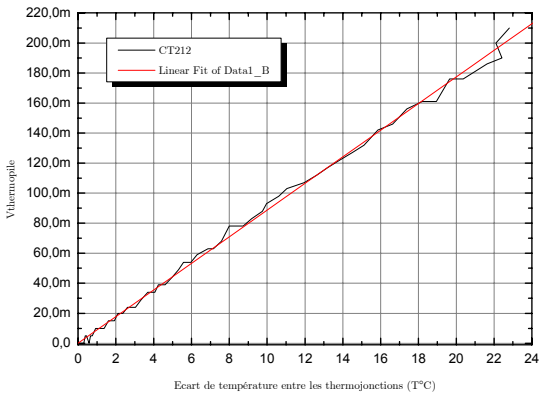


Figure 4.4 : Tension générée par la thermopile CT_212 en fonction de ΔT.

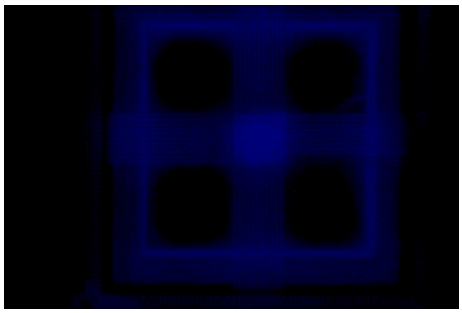
Les mesures montrent que les thermopiles tests **CT_311bo** et **CT_212** présentent respectivement une sensibilité thermique globale de 9,42 mV/°C et 8,86 mV/°C, soit en fonction du nombre de thermocouples, un **coefficient Seebeck** de **224** $\boldsymbol{\mu V/°C}$ et **210** $\boldsymbol{\mu V/°C}$. Des résultats complémentaires sont présentés dans le tableau 4.4. On admettra que le coefficient Seebeck est en **moyenne** de **220** $\boldsymbol{\mu V/°C}$.

Type de structure test	Sensibilité thermique globale	Coefficient Seebeck
Bras conventionnels (B1)		
CT_311bo	9,42 mV/°C	224 µV/°C
CT_212	8,86 mV/°C	210 µV/°C
CT_111bo	5,70 mV/°C	259 µV/°C
RT_111bo	9,37 mV/°C	223 µV/°C
Bras parallèles (B2)		
CT_322_bo	8,74 mV/°C	208 µV/°C
CT_222	10,27 mV/°C	244 µV/°C
Bras séries (B3)		
CT_332	7,54 mV/°C	179 µV/°C
CT_231	6,81 mV/°C	162 µV/°C

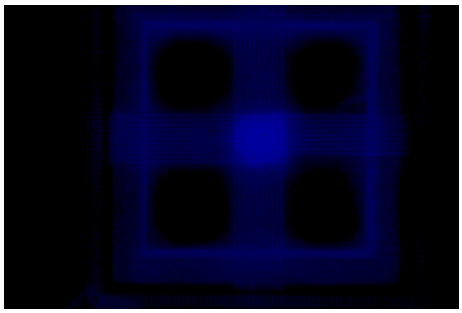
Tableau 4.4 : Evaluation expérimentale du coefficient Seebeck de quelques structures.

En comparant l'ensemble des structures, nous remarquons que les bras **B3** (type série), présentent un **coefficient Seebeck inférieur** à la **moyenne** (structures CT_332 et CT_231). Les bras de type **B1** et **B2** sont du **même** ordre de **grandeur**.

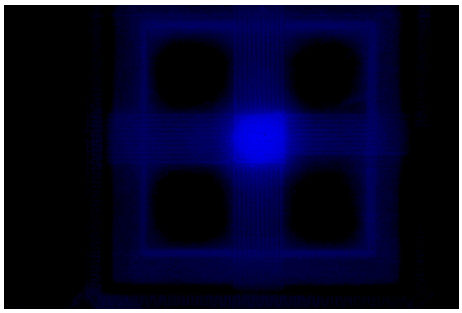
Pour bien souligner le rôle d'isolateur thermique tenu par la membrane, nous présentons sur la figure 4.5 une séquence de l'élévation de la température obtenue par caméra thermique qui est consécutive à une rampe de tension injectée dans la résistance. Nous constatons que la chaleur générée par effet joule reste bien localisée au centre du capteur.



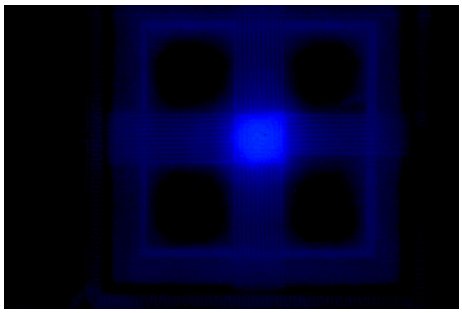
pour t = 0 à 400 ms, T = 25,54 °C



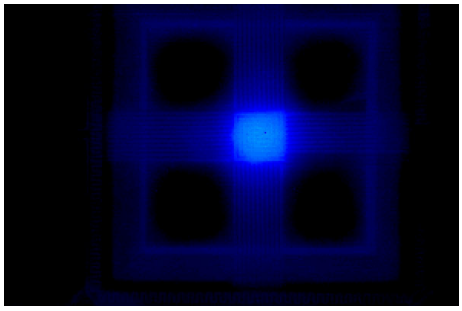
à t = 800 ms, T = 26,27 °C



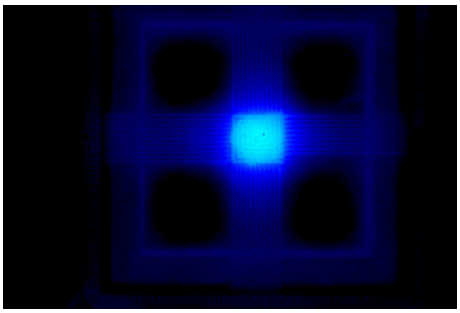
à t = 1,2 s, T = 27,25 °C



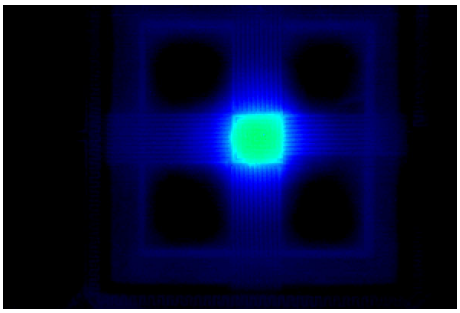
à t = 1,6 s, T = 28,50 °C



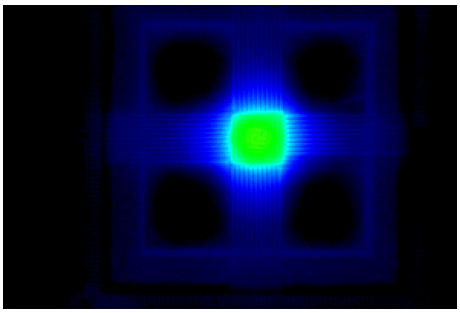
à t = 2 s, T = 30,36 °C



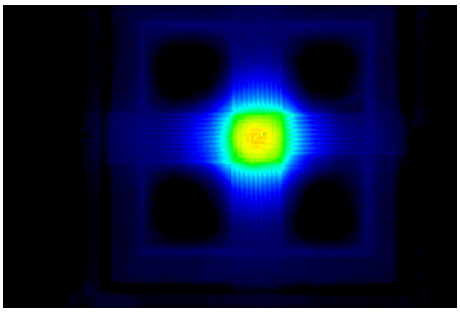
à t = 2,4 s, T = 32,27 °C



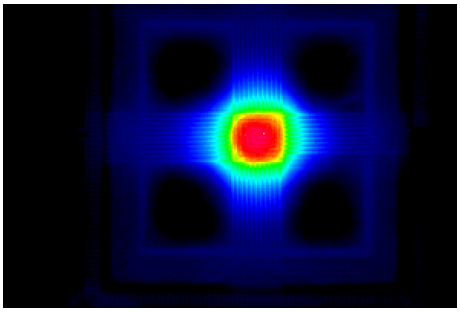
à t = 2,8 s, T = 34,79 °C



à t = 3,2 s, T = 37,36 °C



à t = 3,6 s, T = 40,68 °C



à t = 4 s, T = 44,42 °C

Figure 4.5 : Séquence de l'élévation thermique générée par effet joule.

4.3 Influence de la géométrie des structures sur la tension générée

Dans cette étude, l'objectif consiste à présenter et à comparer l'influence que peut exercer une topologie sur la tension générée par nos structures tests. Comme précédemment, c'est la polarisation de la résistance de *chauffe* (localisée dessus de l'absorbeur) qui engendre le gradient thermique entre les extrémités des thermojonctions par effet Joule. Nous présentons les résultats de manière quantitative. Afin de s'affranchir des disparités observées entre les résistances de *chauffe* mais aussi des variations d'impédance engendrées par la température, nous présentons les résultats en fonction de la puissance injectée. Pour cela, des mesures de la différence de potentiel et du courant ont été effectuées.

4.3.1 Influence du contact ohmique localisé aux extrémités des thermojonctions

Les figures 4.6 à 4.8 représentent quelques caractérisations pour des véhicules tests associés aux thermopiles de type carré (série **CT**) et de longueur 400 μm (**L2**). Pour bien souligner l'influence des contacts ohmiques (**V1**, **V2**, **V3**), nous avons isolé sur chacun des graphes le type de bras (**B1**, **B2**, **B3**). Nous avons adopté la même démarche pour présenter les résultats (figure 4.9 à 4.11) concernant les structures de forme rectangulaire (série **RT**).

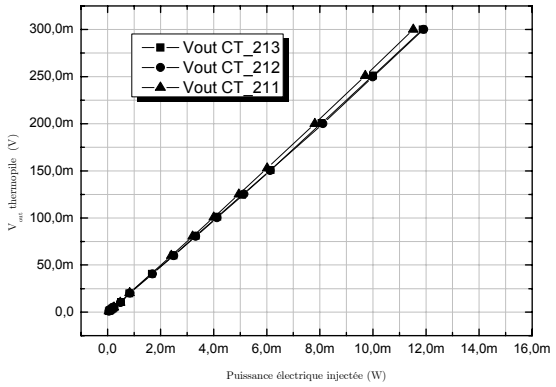


Figure 4.6 : Caractérisation des thermopiles de type CT_21(123).

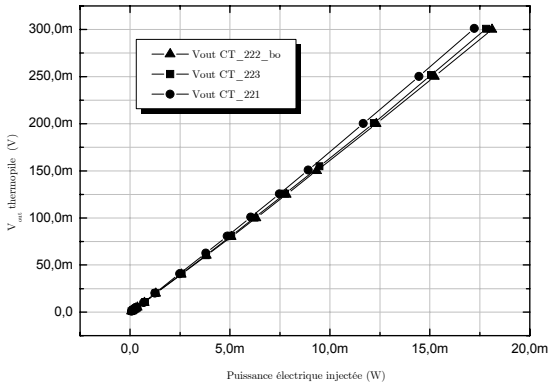


Figure 4.7 : Caractérisation des thermopiles de type CT_22(123).

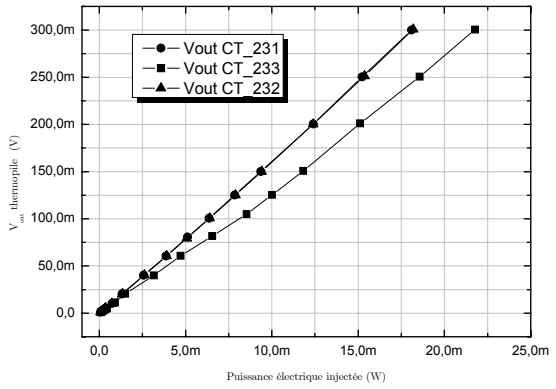


Figure 4.8 : Caractérisation des thermopiles de type CT_23(123).

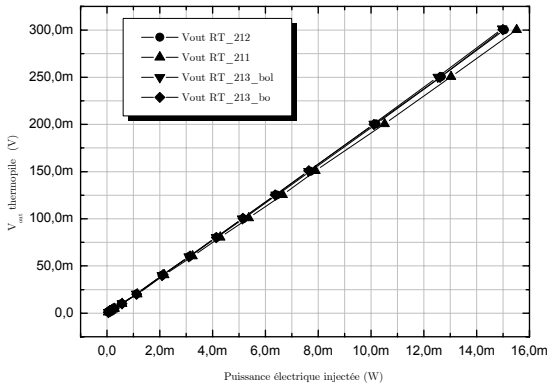


Figure 4.9 : Caractérisation des thermopiles de type RT_21(123).

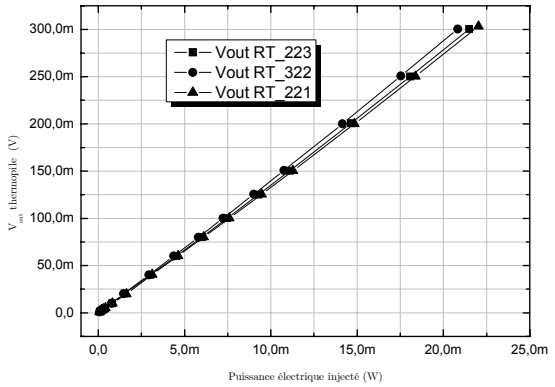


Figure 4.10 : Caractérisation des thermopiles de type RT_22(123).

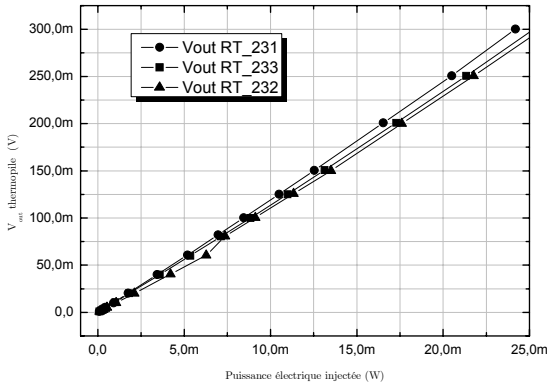


Figure 4.11 : Caractérisation des thermopiles de type RT_23(123).

Dans tous les cas, nous observons des courbes très linéaires sur la totalité des structures caractérisées (L = 120, 400, 800 µm). Globalement, nous ne constatons pas une influence des contacts ohmiques sur l'amplitude de la tension générée. Nous pouvons conclure que les ouvertures de contacts (**V1**, **V2**, **V3**) **n'affectent pas le pouvoir thermoélectrique** d'une thermopile (des courbes supplémentaires sont présentées dans l'annexe A3.1).

4.3.2 Influence de la topologie des thermocouples

Dans cette d'étude, nous avons analysé l'influence de la topologie des thermocouples sur la tension générée. Nous avons aussi comparé des véhicules tests de type carré (**CT**) et rectangulaire (**RT**) de longueurs 400 μm (**L2**). Les figures 4.12 à 4.14 relatent l'influence du type de bras présent dans les structures (**B1**, **B2**, **B3**), ceci en fonction d'un type de contact ohmique (**V1**, **V2** ou **V3**) commun dans chacun des graphes. Comme précédemment, nous conservons cette démarche de comparaison pour les structures de type rectangulaire (figure 4.15 à 4.17).

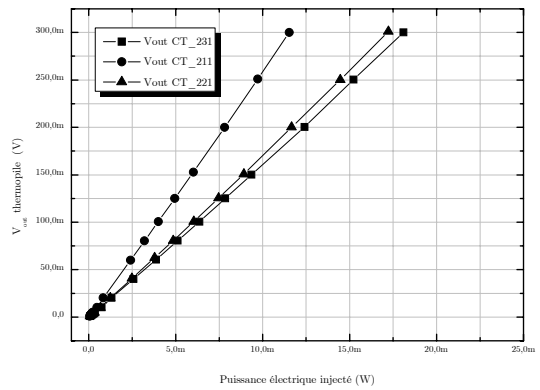


Figure 4.12 : Caractérisation des thermopiles de type CT_2(123)1.

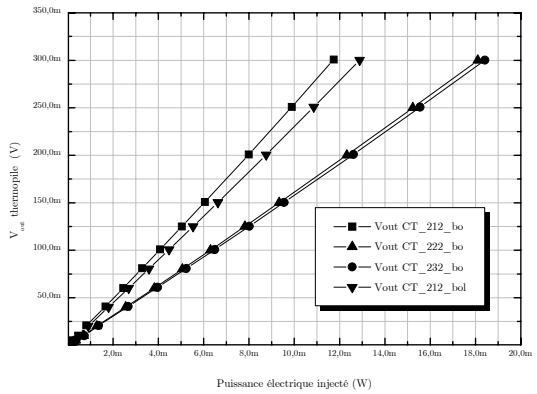


Figure 4.13 : Caractérisation des thermopiles de type CT_2(123)2.

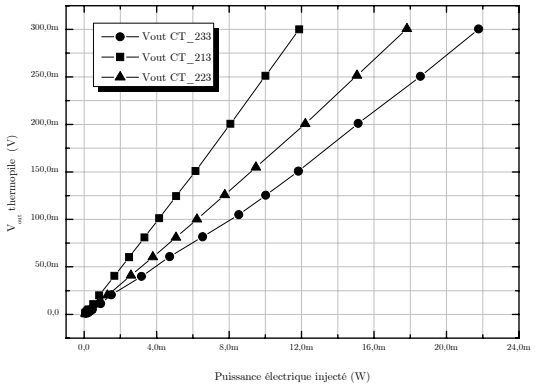


Figure 4.14 : Caractérisation des thermopiles de type CT_2(123)3.

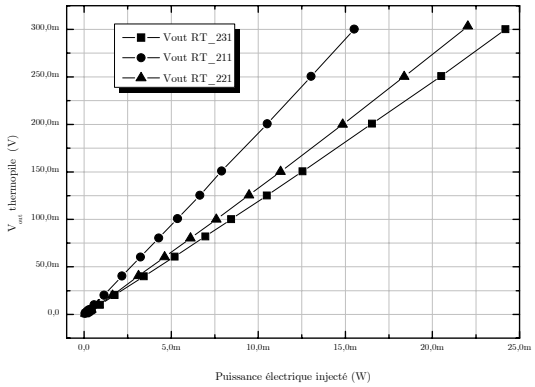


Figure 4.15 : Caractérisation des thermopiles de type RT_2(123)1.

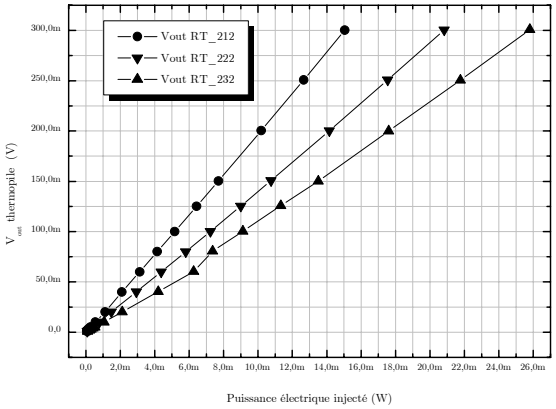


Figure 4.16 : Caractérisation des thermopiles de type RT_2(123)2.

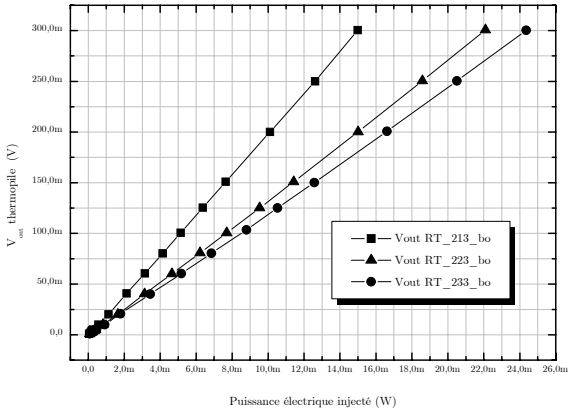


Figure 4.17 : Caractérisation des thermopiles de type RT_2(123)3.

Dans l'ensemble, nous constatons que les structures élaborées à partir des bras conventionnels (**B1**) **sont** plus **performantes**. Ceci est vérifié pour l'ensemble des véhicules tests que nous avons caractérisés. Ces caractéristiques métrologiques montrent que les structures **B2** et **B3** (structure série et parallèle) présentent une tension systématiquement **inférieure** d'environ **33 %** aux structures conventionnelles. Or, dans la mesure des résistances ohmiques pour les structures B2 et B3 (cf. §4.1.1), les résultats nous révélaient une réduction des résistances de 36 %. Ceci pourrait laisser penser que pour une longueur fixée de bras, il est possible de différencier les performances de nos structures par une analyse de la résistance ohmique. Nous présentons dans l'annexe A3.2 des courbes supplémentaires.

4.5 Mesure de la constante de temps

Pour évaluer la constante de temps, nous avons appliqué un échelon unitaire sur la résistance de *chauffe*. Consécutivement, nous effectuons la mesure du temps lorsque le signal électrique de la thermopile atteint 63 % de sa valeur finale (régime permanent). En pratique, nous injectons dans la résistance de *chauffe* un signal périodique astable de rapport cyclique 0,5 et de fréquence inférieure au temps de réaction des structures. Les acquisitions des formes d'ondes sont présentées sur les figures 4.18 et 4.19. Les mesures expérimentales présentent un temps de réponse respectif de **8,3** ***ms*** et **11,88** ***ms*** pour les structures carrées CT_211 et CT_311_bo.

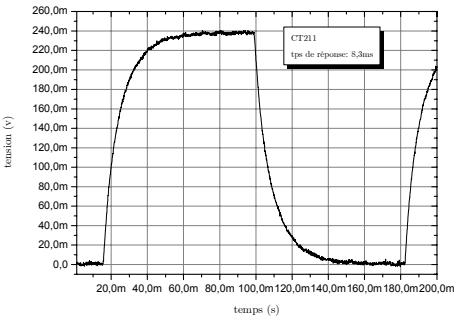


Figure 4.18 : Réponse indicielle de la structure CT_211.

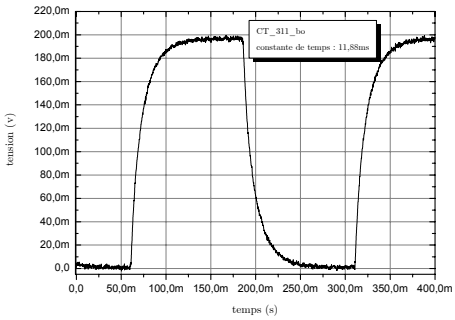


Figure 4.19 : Réponse indicielle de la structure CT_311_bo.

Le tableau 4.5 résume les mesures de constante de temps obtenues selon le même principe pour quelques structures tests de longueur de bras 120 μm, 400 μm et 800 μm.

Type de structure test	Constante de temps	Type de structure test	Constante de temps
Bras conventionnels (B1)		**Bras parallèles (B2)**	
CT_311_bol	7,42 ms	CT_322	10,36 ms
CT_311_bo	11,88 ms	CT_222	8,18 ms
CT_211	8,3 ms	RT_223	9,4 ms
CT_212	8,5 ms	**Bras séries (B3)**	
CT_212_bo	7,84 ms	CT_332	9,96 ms
CT_213_bo	8,38 ms	CT_232	11,44 ms
CT_213	10,04 ms	RT_233	9,8 ms
RT_212	11,68 ms		
CT_111_bo	0,99 ms		
RT_111	1,3 ms		

Tableau 4.5 : Evaluation expérimentale de la constante de temps de quelques structures.

4.6 Conception et réalisation d'un banc de mesure

C'est dans le but d'évaluer les dérives thermiques des thermopiles, leur sensibilité à un flux infrarouge et leur NETD, que nous avons conçu au laboratoire un banc de mesure spécifique. Outre, une observation de l'évolution générale de la tension de sortie des capteurs, ce banc nous permet d'obtenir la loi de variation de la tension en fonction de la température ambiante. Le synoptique du banc de mesure se présente sous la forme suivante (figure 4.20).

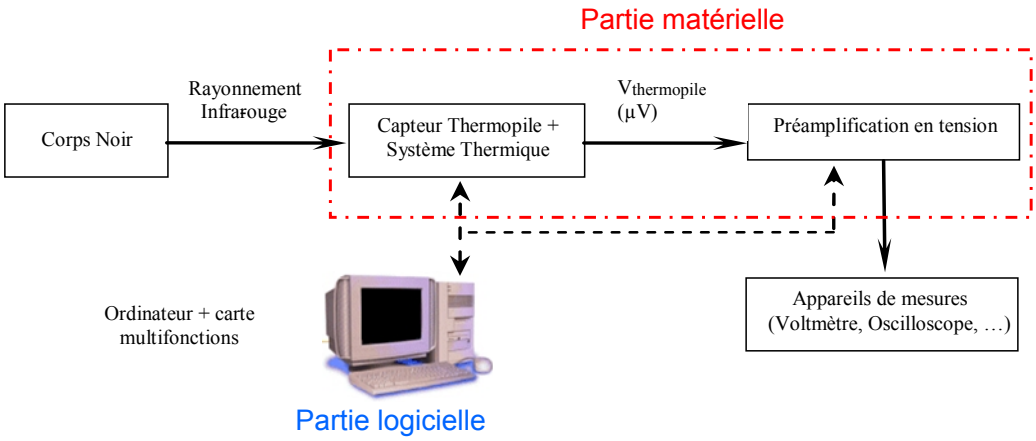


Figure 4.20 : Synoptique du banc de caractérisation.

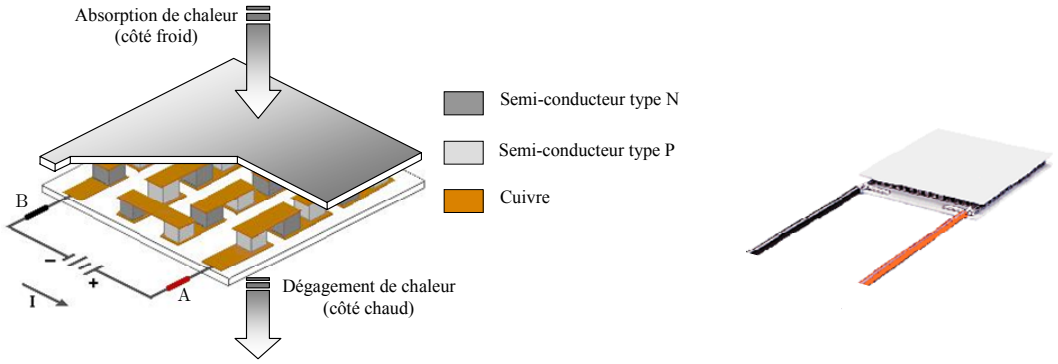
Le corps noir (HGH RCN600) permet de générer l'émission de rayonnements infrarouges en fixant une température de consigne. Les variations de la température ambiante du capteur sont confiées au système de régulation thermique. La mesure de la tension délivrée par la thermopile est ensuite amplifiée au moyen d'une électronique instrumentale adaptée (gain élevé, réjection du mode commun, faible dérive thermique d'offset et faible bruit). L'acquisition des informations est obtenue au moyen des appareils de mesures et de contrôle (carte d'acquisition, voltmètres et oscilloscopes …). Outre la gestion automatique du banc, la carte d'acquisition (PCI-6024E de National Instruments) permet de stocker les points de mesure dans un fichier texte via un ordinateur et les appareils de mesures permettent un contrôle en temps réel des mesures.

4.6.1 La régulation du système thermique

Le système de régulation thermique a été conçu de telle sorte qu'il soit possible de l'utiliser par une commande potentiométrique externe ou au moyen de la carte multifonctions contrôlée par un ordinateur. Le choix de l'élément permettant la **variation de température** s'est porté sur une **cellule** thermoélectrique à **effet Peltier** (TEC[2]). Ce dispositif permet d'absorber et de dégager de la chaleur par l'intermédiaire de deux matériaux (A et B) connectés en série. Les couples de matériaux (Tellure de Bismuth) sont connectés

[2] TEC : Thermoelectric Cooler.

thermiquement en parallèle et électriquement en série entre deux plaques de céramique (figure 4.21).



-a- Principe d'une cellule Peltier -b- Photographie d'une cellule Peltier

Figure 4.21 : Illustration d'une cellule à effet Peltier.

Lorsqu'un courant I traverse les jonctions dans le sens A vers B, on observe qu'une certaine puissance est libérée. Cette puissance dQ/dT est appelée "puissance Peltier".

$$\frac{dQ}{dt} = \chi_{A-B}\, T\, I \tag{4.1}$$

On notera que le coefficient Peltier χ_{A-B} est dépendant de la température T et change de signe suivant le sens du courant I.

$$\chi_{A-B}\, T \;= -\chi_{B-A}\, T \tag{4.2}$$

Pour assurer un fonctionnement optimum du TEC (DT12-4), il est nécessaire de réaliser une régulation thermique. Ceci est illustré sur la figure 4.22 qui présente la chaîne d'asservissement réalisée.

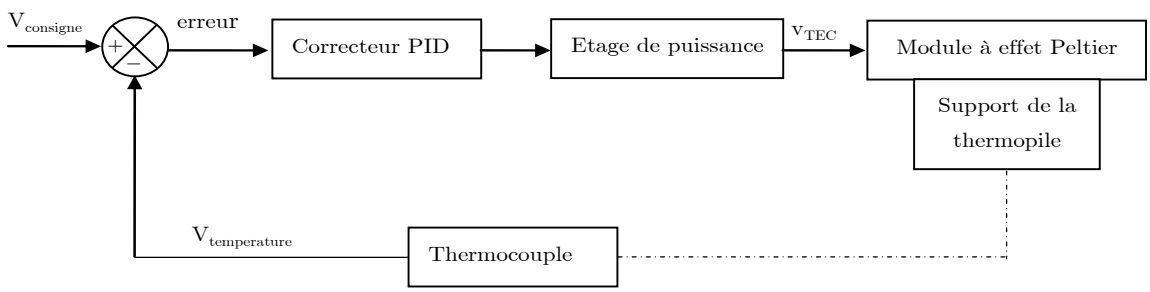


Figure 4.22 : Synoptique de la stabilisation en température du module à effet Peltier.

La **stabilisation thermique** s'appuie sur la mise en œuvre d'un **correcteur PID**, d'un amplificateur de puissance 60 W (LM3875) pour la commande du TEC, d'une mesure de

température par thermocouple de type K associé à un amplificateur spécifique (AD595) et d'amplificateurs opérationnels faibles bruits pour la commande (LT1124).
Le choix du correcteur PID est fait de manière à optimiser la précision, la stabilité et la rapidité du système. Les objectifs attendus par l'asservissement sont d'obtenir un système en boucle ouverte possédant une marge de phase $M\varphi$ de 45° et un coefficient d'amortissement ζ de $\sqrt{2}/2$ pour assurer respectivement une bonne stabilité et un bon compromis entre le temps de réponse et le 1er dépassement en boucle fermée. Pour cela, le dimensionnement du correcteur nécessite de connaître le système à asservir, c'est-à-dire, d'identifier les équations dans le domaine de ***Laplace*** du système complet. La cellule à effet Peltier et l'amplificateur ont donc été modélisés expérimentalement (méthode de ***Broïda*** [80]). Entre autres, ceci nous a permis modéliser le système thermique complet au moyen du logiciel Matlab-Simulink (figure 4.23).

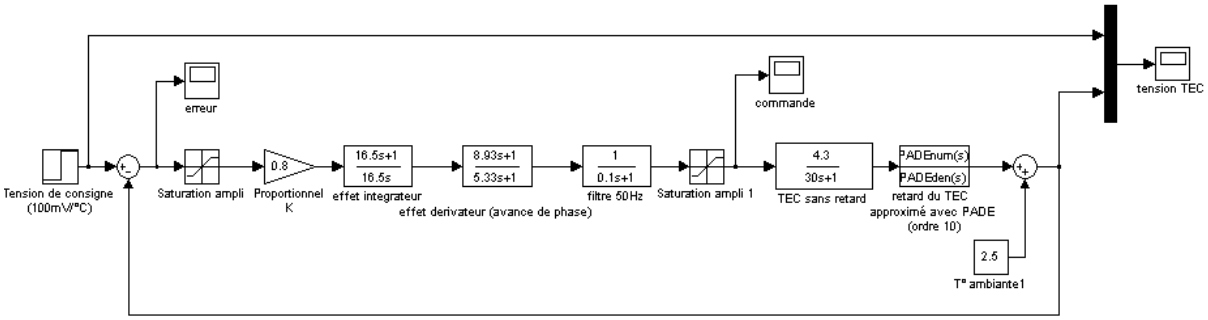


Figure 4.23 : Simulation de l'asservissement du système thermique avec Matlab-Simulink.

La conception de la carte de régulation s'est donc faite en conjuguant une méthode de modélisation expérimentale et des outils de haut niveau de simulation. La figure 4.24 présente la réalisation pratique du système thermique que nous avons réalisé.

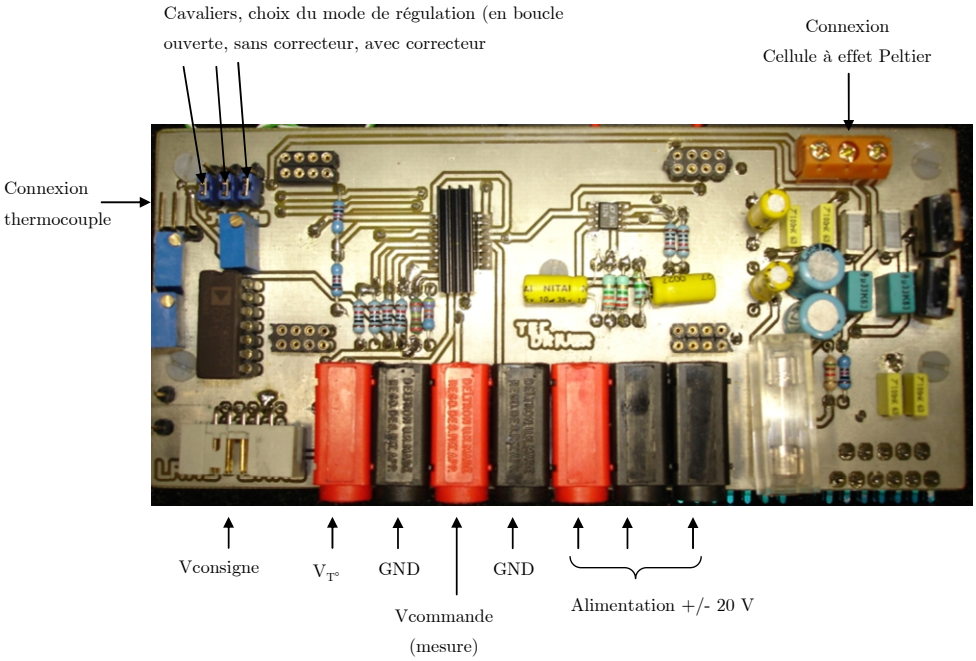


Figure 4.24 : Carte d'asservissement du système thermique.

Le **système thermique** conçu permet de configurer les capteurs dans une **plage de température** s'échelonnant de **-5 °*C*** à **+70 °*C*** avec une **précision** mesurée de **± 0,1 °*C***. Pour rendre compte des performances obtenues par notre système, les figures 4.25 à 4.28 présentent les oscillogrammes des mesures expérimentales. La **réponse temporelle moyenne** du système à trois échelons successifs de 0,5 *V*, 1 *V* et 1,5 *V* (soit 5 °*C*, 10 °*C* et 15 °*C*) est **obtenue** en environ **15 s** (figure 4.25). La figure 4.26 correspond au temps moyen d'un réglage manuel de consigne, elle permet un **réglage** de la température **de 10 à 50 °*C* en moins de 40 *s***. Pour souligner les performances du correcteur, la figure 4.27 présente la réponse du système à un **élément perturbateur** : une panne de fer à souder à **350 °*C*** en contact avec le support du capteur. Le système met environ **50 s à retrouver sa position d'équilibre** à la température de consigne. Les 50 dernières secondes correspondent au temps de réaction lorsque le fer n'est plus en contact. Enfin, la figure 4.28 présente la tenue en température sur une longue durée d'utilisation. Par exemple, le système thermique permet de délivrer une **température constante de 46 °*C* sur une période de 11 *h***.

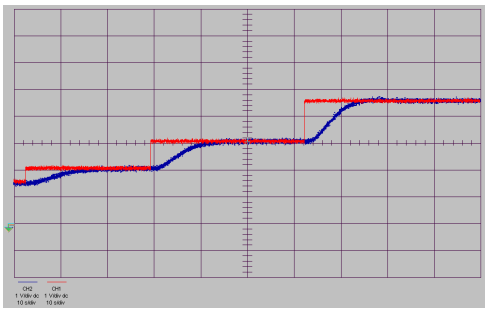


Figure 4.25 : Réponse du système à différents échelons.

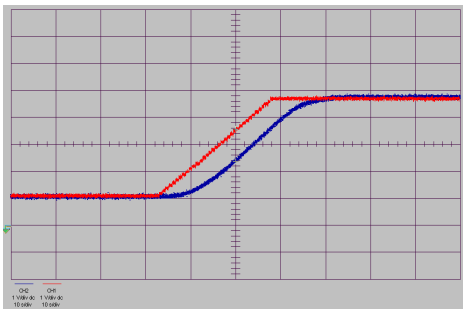


Figure 4.26 : Réponse du système à une rampe.

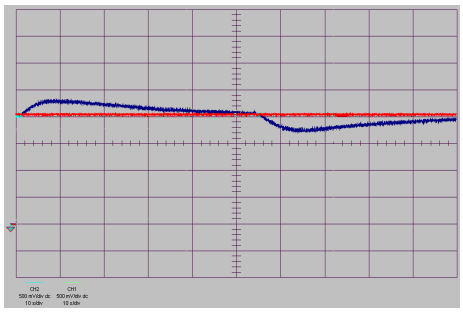


Figure 4.27 : Réponse du système à une perturbation extérieure.

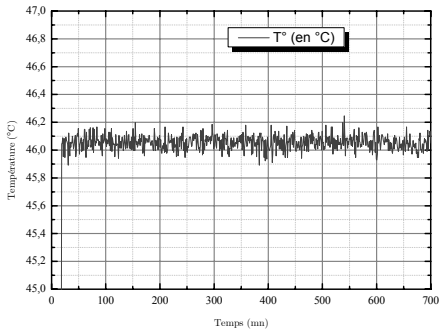


Figure 4.28 : Stabilité de la régulation thermique en fonction du temps.

4.6.2 L'électronique d'instrumentation : un préamplificateur spécifique

La thermopile est un générateur de tension continue délivrant un signal de très faible amplitude (quelques centaines de nanovolts à plusieurs millivolts) dont la gamme de fréquence n'excède pas la dizaine de Hertz. Ce type de signal nécessite donc un système d'amplification combinant à la fois un fort gain et des entrées hautes impédances. Pour ne pas perturber le signal mesuré, le bruit et l'offset doivent également être réduit. Le choix des composants qui intègrent le système d'amplification est donc déterminant pour ce type de capteur. Comme le circuit est prévu pour être inséré sur la carte de la régulation thermique, il est probable qu'il soit faiblement soumis aux variations de température du TEC. C'est pourquoi l'architecture électronique de l'amplificateur est réalisée de telle sorte à ce qu'elle perturbe le moins possible les mesures. De plus, on notera que l'électronique étudiée pour ce montage est étroitement similaire à celle utilisée pour le module de détection de présence, laquelle doit également présenter une faible dérive thermique pour ne pas fausser la détection.

L'utilisation d'un amplificateur d'instrumentation, le AD620, a été envisagée dans un premier temps. Ce composant possède une amplification différentielle précise mais il est pénalisé par la dérive thermique de son offset (0,6 $\mu V/°C$). C'est pourquoi nous avons réorienté notre choix sur les amplificateurs de type *chopper* qui présentent d'excellentes performances tant au niveau de l'offset que de ses dérives. Cette gamme d'amplificateur réduit considérablement leur propre offset et niveau de bruit par une approche dite d'auto-zéro. Ainsi, parmi les composants disponibles sur le marché, nous avons choisi l'amplificateur opérationnel AD8552 distribué par Analog Devices, il possède un gain en boucle ouverte de 130 dB, 1 μV de tension d'offset, 0,005 $\mu V/°C$ de dérive de l'offset et présente une tension de bruit de $40nV/\sqrt{Hz}$.

Les tensions d'alimentation ainsi que les niveaux de potentiel références sont compensés en température. Pour cela, nous avons choisi de combiner au régulateur de tension des références de tension *bandgap*. Les résistances et les potentiomètres choisis présentent des tolérances de 1 et 2 % et sont à faible dérive thermique (100 ppm/°C).

La figure 4.29 présente le synoptique du circuit de préamplification que nous avons conçu.

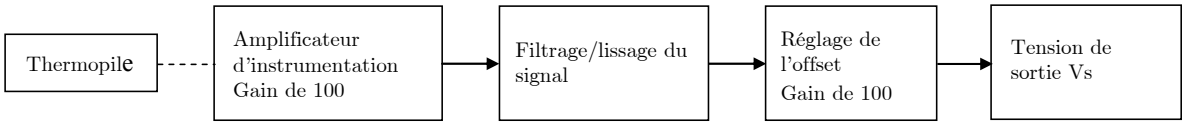


Figure 4.29 : Synoptique du circuit de préamplification.

La conception de la carte électronique s'est faite à partir du logiciel de simulation PSPICE. La figure 4.30 présente le circuit de préamplification que nous avons également réalisé au laboratoire.

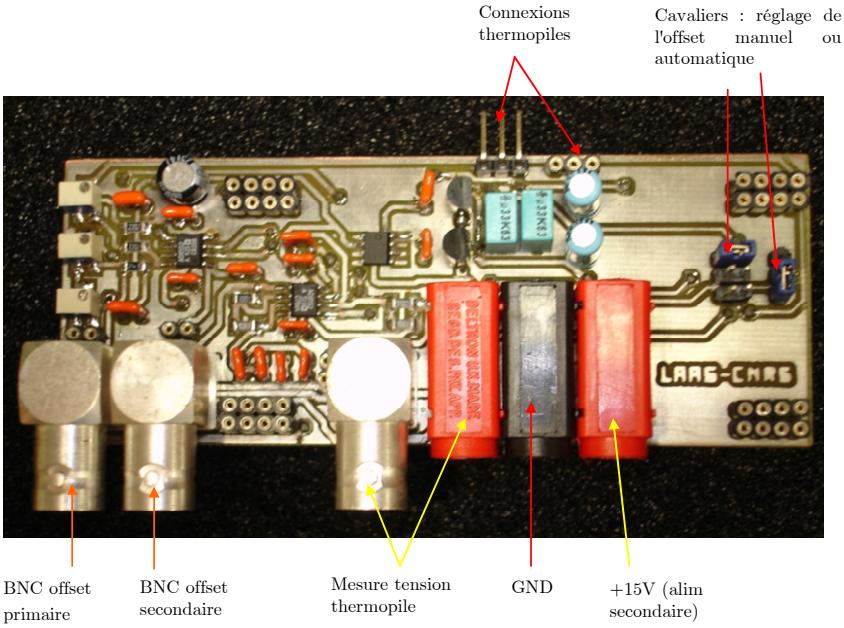


Figure 4.30 : Carte électronique du préamplificateur de la thermopile.

Le **gain total** du circuit mesuré est d'environ **10366**. Une mesure de la tension de sortie, réalisée dans une étuve, a permis de mesurer l'effet de la température sur le circuit. **Après amplification**, il résulte que le circuit présente une **dérive thermique** de **865** $\mu V/°C$ sur une **plage** de température comprise entre **25** $°C$ **et 50**$°C$.

4.6.3 Automatisation du banc de mesure

L'automatisation du banc est réalisée au moyen du logiciel **LabVIEW** [81]. C'est à partir d'un programme structuré en langage *Graphique* que la réalisation et la coordination des fonctions automatisées sont élaborées, ces programmes sont qualifiés de *VI* [3]. Nous avons défini deux VI principaux et un secondaire qui sont : *balayage en température*, *mesures à température fixe* et *réglage de l'offset*.

Comme son nom l'indique, le VI qualifié de *balayage en température* permet d'effectuer le balayage en température du capteur tout en réalisant l'acquisition en temps réel de la tension générée par le circuit de préamplification, la température et le temps. Pour ce faire, nous définissons la température de départ, la température d'arrivée, le pas entre chaque mesure et la durée de temporisation avant l'acquisition de la tension thermopile. Cette configuration s'effectue dans les fenêtres respectivement nommées : "T°amb de départ", "tempT°amb d'arrivée", "pas de T", et "durée de la tempo".

Concernant le VI *mesures à température fixe,* celui-ci nous permet de maintenir le capteur à une température constante. Le VI *réglage de l'offset* permet de définir un niveau de l'offset de sortie du préamplificateur, ceci afin d'adapter le niveau de référence à la plage de variation de la thermopile. A titre d'exemple, les figures 4.31 à 4.33 présentent les interfaces de chacun des VI que nous avons conçu. Enfin, la figure 4.34 montre une vue d'ensemble du

[3] VI : Virtual Instrument.

banc de régulation sur laquelle nous pouvons identifier la carte thermique, la carte de préamplification que ainsi le capteur logé dans son support en aluminium.

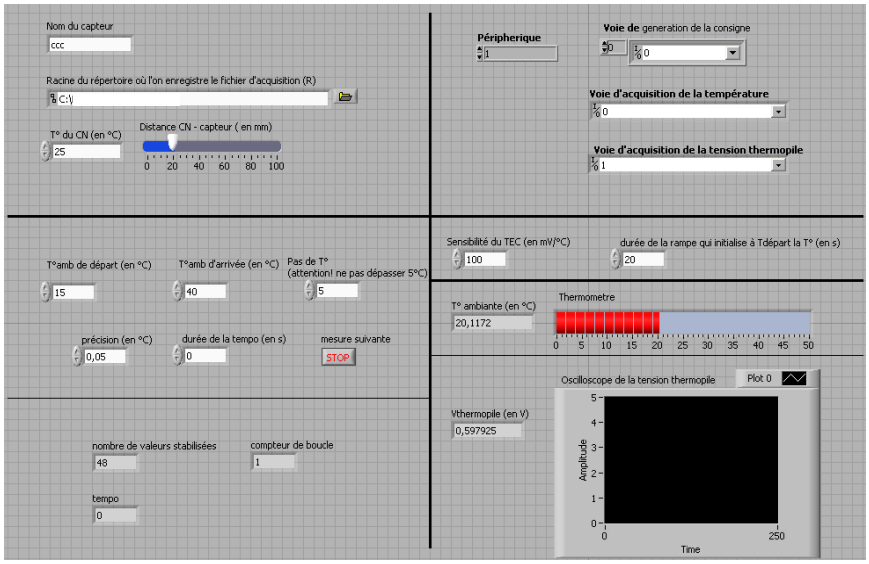


Figure 4.31 : Face avant du VI : *balayage en température.*

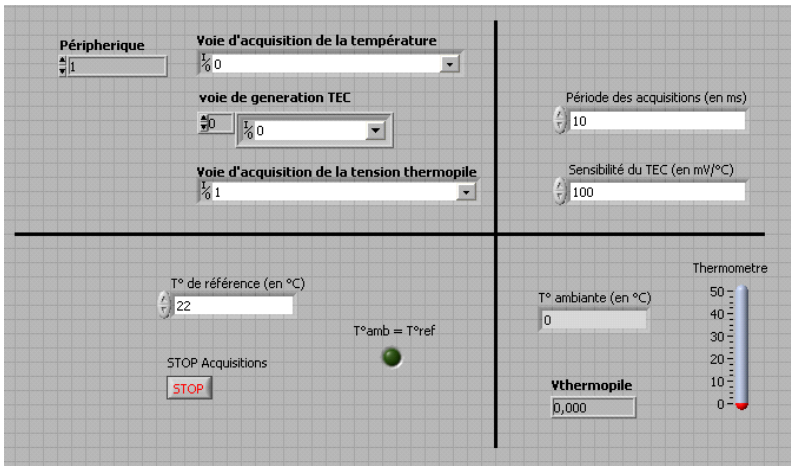


Figure 4.32 : Face avant du VI : *mesures à température fixe.*

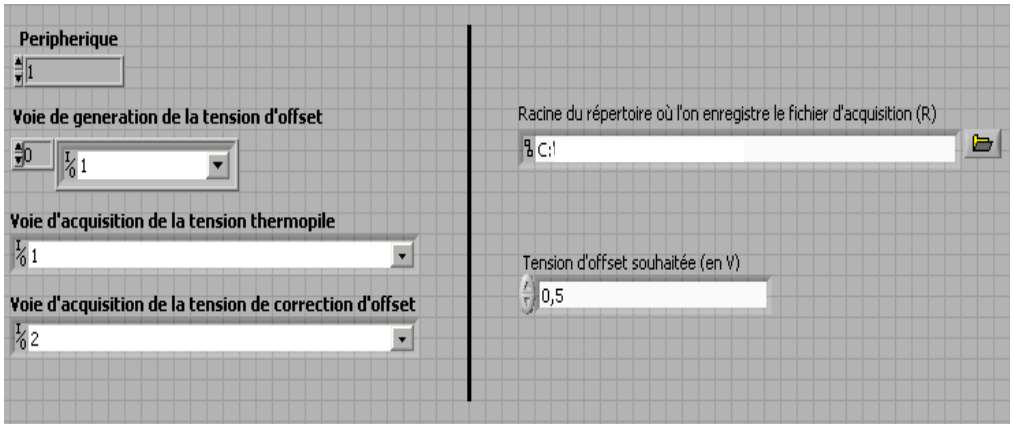


Figure 4.33 : Face avant du VI : *réglage de l'offset.*

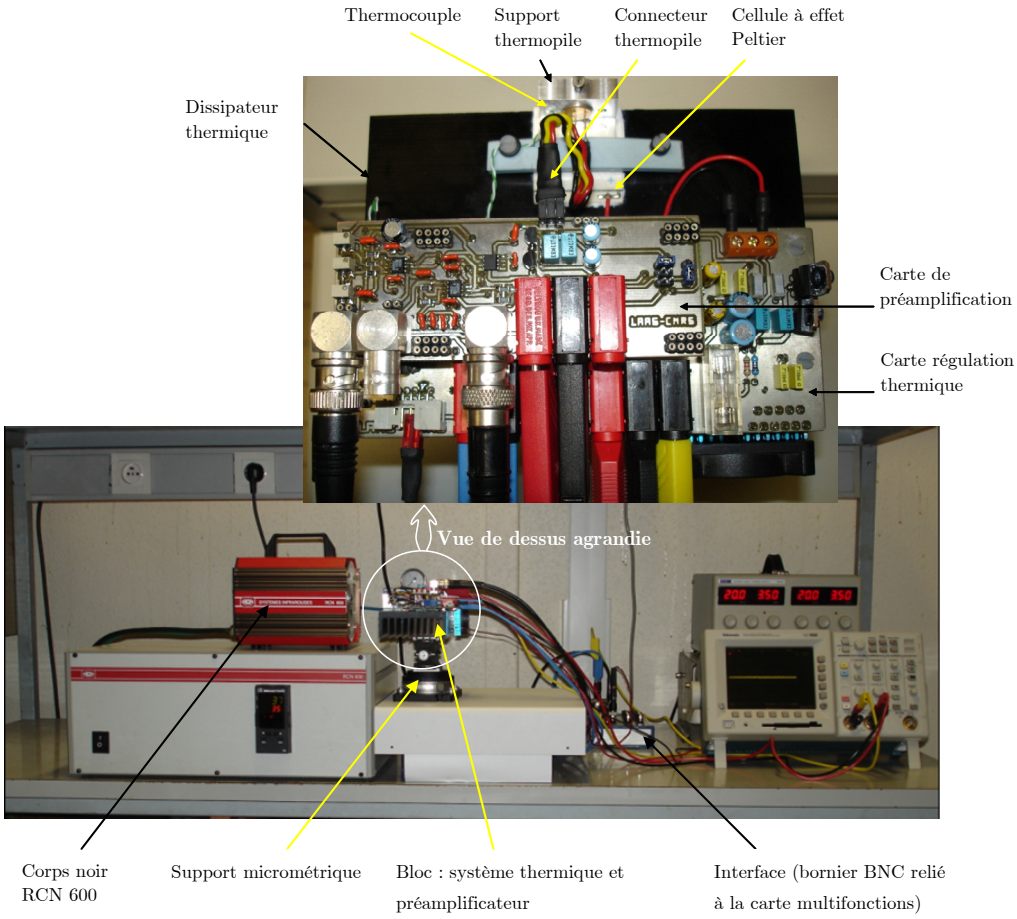


Figure 4.34 : Vue d'ensemble du banc de mesure thermorégulé dédié à la caractérisation des thermopiles.

4.7 Mesure de la dérive thermique des thermopiles

C'est pour répondre au besoin de notre application qu'il nous est utile d'évaluer l'influence de la dérive en température d'un capteur sur ses propres performances. En effet, c'est en déterminant la loi de variation du capteur qu'il est possible de s'affranchir de cette dérive. Dès lors, une compensation peut être réalisée par une simple mesure de la température du capteur. C'est donc grâce au banc de mesure que nous configurons la plage de température des capteurs. Pour ce faire, le capteur est positionné à quelques centimètres du corps noir et nous fixons une température de consigne pour le soumettre à un flux radiatif constant. Ensuite, le banc de mesure nous permet d'établir une loi de variation de la température interne du capteur. Pour ce type de mesure, nous utilisons le VI *balayage en température.* Nous configurons une plage température comprise entre 10 $°C$ et 45 C avec une temporisation entre chaque point de mesure de 1 mn. Le corps noir présente une température de 45 $°C$ et se situe à 40 mm du capteur. Les résultats que nous présentons sur les figures 4.35 et 4.36 montrent, que après amplification, les structures **rectangulaires** présentent une **dérive** évaluée à **48,08** $\boldsymbol{mV/°C}$ pour les bras de **400** $\boldsymbol{\mu m}$ et à **81** $\boldsymbol{mV/°C}$ pour les bras de

800 μm. Pour les structures **carrées,** la **dérive** est évaluée à 5**8,06 $mV/°C$** pour le bras de **400 µm** et **70 $mV/°C$** pour les bras de **800 µm**.

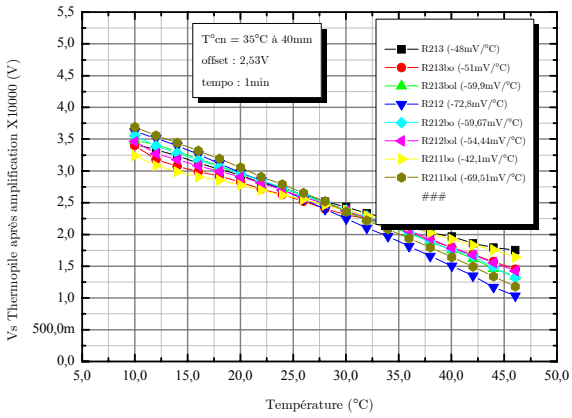


Figure 4.35 : Dérive thermique des thermopiles de type rectangulaire (bras 400 µm).

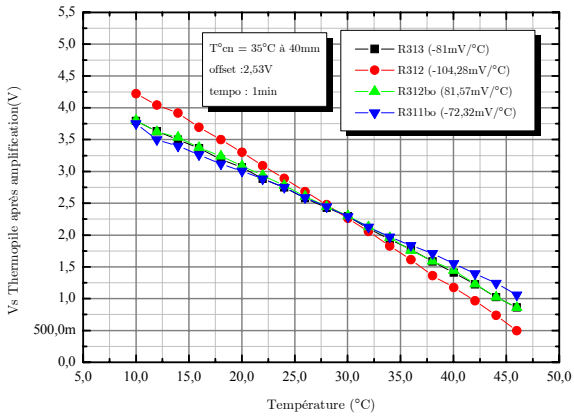


Figure 4.36 : Dérive thermique des thermopiles de type rectangulaire (bras 800 µm).

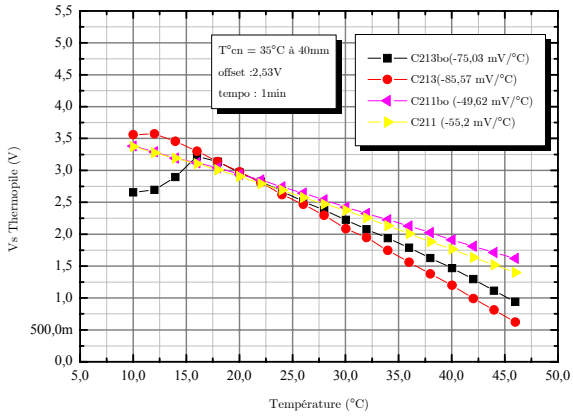


Figure 4.37 : Dérive thermique des thermopiles de type carrée (bras 400 µm).

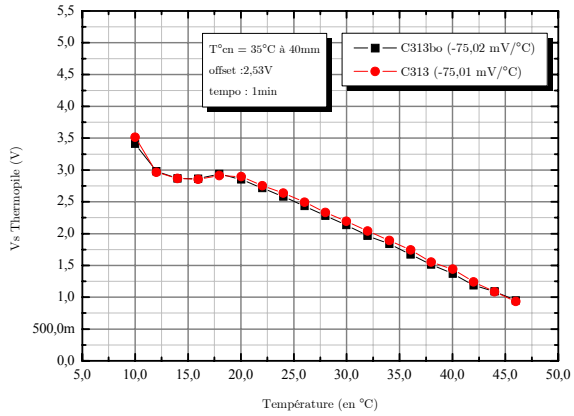


Figure 4.38 : Dérive thermique des thermopiles de type carrée (bras 800 µm).

4.8 Mesure de la sensibilité

Pour évaluer les performances des structures thermopiles à un flux infrarouge, nous utilisons le VI *mesures à température fixe*. Comme précédemment le capteur est positionné à quelques centimètres du corps noir. Dans cette situation, le rôle du banc de mesure est de maintenir la température du capteur constante. Pour déterminer la sensibilité des structures, il est nécessaire de connaître la puissance de flux radiatif collectée P_c par les thermopiles. Celle-ci est évaluée à partir de l'équation suivante :

$$P_c = \frac{1}{\pi}\varepsilon\int_{\lambda_a}^{\lambda_b}\frac{\partial(dR/d\lambda)}{\partial T}\left(\frac{\pi\,\Phi_{cn}^{\;2}}{4}\right)\frac{S_c}{d^2}\tau_{opt}(\lambda)\,d\lambda \tag{4.3}$$

Nous maintenons la température des capteurs à 25 $°C$ et assurons une température du corps noir à 75 $°C$. La distance d du corps noir/capteur est fixée à 40 mm. En fonction du diamètre d'ouverture du corps noir ($\Phi_{cn} = 12{,}5\ mm$), des dimensions de la zone active des structures S_c (surface de l'absorbeur) et du coefficient de transmission du filtre infrarouge τ_{opt}, le rapport de la puissance collectée (calculée dans la bande spectrale 7-14 μm) sur la tension générée donne la sensibilité (V/W). Les résultats que nous présentons dans les tableaux 4.6 et 4.7 montrent que pour les **structures carrées**, la sensibilité est comprise entre **32** $\boldsymbol{V/W}$ et **82** $\boldsymbol{V/W}$. Pour les **structures rectangulaires**, nous obtenons des sensibilité inférieures : entre **18** $\boldsymbol{V/W}$ et **37** $\boldsymbol{V/W}$.

Structure	Sensibilité (V/W)	Taille de l'absorbeur (μm)	Taille de la membrane (μm)
C_312	82,6	375 × 375	1400 × 1400
C_321	42,5	375 × 375	1400 × 1400
C_331bo	46,8	375 × 375	1400 × 1400
C_211	63,6	325 × 325	1035 × 1035
C_221bo	32,3	375 × 375	1085 × 1085
C_231	32,9	375 × 375	1085 × 1085

Tableau 4.6 : Mesures expérimentales de la sensibilité de quelques thermopiles carrés.

Structure	Sensibilité (V/W)	Taille de l'absorbeur (μm)	Taille de la membrane (μm)
R_312	37,9	705 × 280	1305 × 1385
R_321_bo	29,0	705 × 280	1305 × 1385
R_331	31,0	705 × 280	1305 × 1385
R_211_bo	25,4	600 × 325	1035 × 890
R_221	22,1	705 × 325	1035 × 995
R_233	18,0	705 × 325	1035 × 995

Tableau 4.7 : Mesures expérimentales de la sensibilité de quelques thermopiles rectangulaires.

4.9 Mesure de l'écart thermique équivalent au bruit (*NETD*)

Nous l'avons déjà présenté, la mesure du *NETD* donne le plus petit écart de température (K) que peut mesurer un capteur [82], [83]. La méthode de mesure repose sur une acquisition de la réponse du capteur lorsque celui-ci est soumis à deux flux homogènes de température différente T_1 et T_2. Sous l'action des flux que l'on génère avec un corps noir, le capteur délivre deux tensions V_{T1} et V_{T2} consécutives au changement de la température. L'évaluation du *NETD* est obtenue par l'équation suivante :

$$NETD = \frac{< V_n >}{\frac{\partial V}{\partial T}} \tag{4.4}$$

avec :

$$\frac{\partial V}{\partial T} = \frac{V_{T2} - V_{T1}}{T_2 - T_1} \tag{4.5}$$

Le terme $\partial V / \partial T$ correspond à la sensibilité du détecteur (V/K) où $< V_n >$ est la tension de bruit efficace issue du capteur et de l'électronique du circuit de préamplification que nous avons présentée. On notera que la tension de bruit est calculée à partir de la densité spectrale de puissance.
Les tableaux 4.8 et 4.9 présentent l'évaluation expérimentale du *NETD* de quelques thermopiles de forme carrées et rectangulaires. Dans l'ensemble, nous constatons que les thermopiles réalisées dans notre laboratoire présentent un ***NETD*** compris entre **222 *mK*** et **695 *mK***.

Structures	$< V_n >$	$\partial V / \partial T$	*NETD*
C_312	3,38 mV	16,25 mV/K	208 mK
C_321	4,27 mV	9,97 mV/K	428 mK
C_331bo	3,72 mV	8,80 mV/K	422 mK
C_211	3,86 mV	11,32 mV/K	340 mK
C_221bo	3,10 mV	06,75 mV/K	460 mK
C_231	3,65 mV	05,25 mV/K	695 mK

Tableau 4.8 : Evaluation expérimentale du NETD de quelques thermopiles carrés.

Structures	$< V_n >$	$\partial V / \partial T$	*NETD*
R_312	2,82 mV	12,7 mV/K	222 mK
R_321bo	2,65 mV	8,70 mV/K	304 mK
R_331	2,93 mV	8,62 mV/K	340 mK
R_211bo	2,65 mV	7,15 mV/K	370 mK
R_221bo	2,27 mV	5,87 mV/K	386 mK
R_233	2,62 mV	4,72 mV/K	555 mK

Tableau 4.9 : Evaluation expérimentale du NETD de quelques thermopiles rectangulaires.

4.10 Discussion et corrélation préliminaires des mesures avec le modèle

Afin de confronter les résultas annoncés par le modèle que nous avons développé et/ou réajuster ces paramètres physiques pour se rapprocher des mesures, le tableau 4.10 présente une comparaison entre les résultats expérimentaux et les calculs théoriques. Pour cela, nous comparons les architectures dont les bras sont de type conventionnel. L'analyse de cette comparaison montre que la sensibilité du modèle analytique sous-estime les valeurs mesurées de 7 % à 10 %. Pour les constantes de temps, l'erreur est en moyenne d'environ 16 % alors que pour les résistances électriques des thermopiles, les résultats du modèle sont relativement proches des valeurs expérimentales (6 %). Compte tenu de ces premiers résultats, nous pouvons dire que le modèle théorique est globalement très proche des valeurs expérimentales. Ceci, est d'autant plus vrai que la comparaison de ces deux types de structures montre respectivement une disparité de la sensibilité et de la résistance électrique d'environ 23 % et 52 % pour les valeurs mesurées et une disparité de 20 % et 46 %, pour le modèle théorique. Dans l'ensemble, le modèle que nous avons développé semble très proche de la réalité.

Mesures expérimentales				Modèle analytique		
Structures	Sensibilité	Constante de temps	Résistance électrique	Sensibilité	Constante de temps	Résistance électrique
C_312	82,6 V/W	10,7ms	31,8$k\Omega$	74 V/W	14 ms	30,2 $k\Omega$
C_211	63,6 V/W	8,3ms	15,2$k\Omega$	59 V/W	7.5 ms	14,1$k\Omega$

Tableau 4.10 : Comparaison des résultats entre les mesures expérimentales et le modèle des structures conventionnelles.

Dans le chapitre 1 (§1.2.2.4), nous avons présenté de manière non exhaustive les principales caractéristiques des thermopiles disponibles dans le commerce. Pour compléter cette analyse comparative, nous prendrons comme critères de comparaison : la sensibilité, la surface active, la résistance, et la constante de temps.
Dans le tableau 4.11, nous avons sélectionné et listé les thermopiles du commerce qui présentent des sensibilités de valeur proches à celles de nos structures.

Thermopile	LAAS	Commerce	Unités
Sensibilité	63,6 et 82,6	60 à 90	V/W
Surface active	325 × 325 et 375 × 375	500 × 500 à 1000 × 1000	$\mu m \times \mu m$
Résistance	15,2 et 31,8	50 à 65	$k\Omega$
Constante de temps	8,3 et 10,7	20 à 45	ms

Tableau 4.11 : Comparaison des performances entre les thermopiles réalisées au LAAS et celles du commerce.

Dans la gamme des thermopiles présentant des sensibilités comprises entre 60 V/W et 90 V/W, nous constatons que les structures conventionnelles réalisées au LAAS, en termes de résistance électrique et de constante de temps, présentent des performances supérieures. De plus, on remarquera que ces performances sont obtenues avec des tailles de la surface active nettement inférieure (35 % à 62 %).

Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté l'ensemble des résultats des différentes topologies de thermopiles réalisées. Pour cela, nous avons utilisé et/ou adapté le matériel de caractérisation disponible au laboratoire mais nous avons aussi réalisé un banc de mesure spécifique pour la caractérisation des thermopiles. Pour initier ce travail, nous avons effectué sous pointes une caractérisation complète des résistances électriques des thermocouples. Au cours de ces mesures, nous avons constaté que les structures des bras série et parallèle présentaient une diminution de la résistance d'environ 36 % par rapport aux bras conventionnels. Nous avons déduit de ces structures tests, la résistivité électrique du silicium polycristallin (0,821 mΩ.cm) et de l'aluminium (6,01 μΩ.cm).

Ensuite, nous avons procédé à l'évaluation du coefficient Seebeck du couple de matériaux par une technique de thermographie IR. L'estimation moyenne du coefficient Seebeck a été évaluée à 220 μV/K. Nous avons remarqué que les bras de type série présentaient un coefficient Seebeck inférieur à la moyenne (170 μV/K).

L'étude de l'influence de la géométrie des structures sur la tension générée s'est s'effectuée en deux étapes :

- Dans une première phase, nous avons étudié l'effet de la surface du contact ohmique localisé aux extrémités des thermojonctions. Il s'avère que les ouvertures de contacts n'affectent pas le pouvoir thermoélectrique d'une thermopile. En conséquence, nous retiendrons qu'il est inutile de compliquer le processus de fabrication en définissant des dimensions d'ouverture de petite surface.

- La seconde phase de ce travail consistait à évaluer l'influence du type de bras : conventionnel, série et parallèle. Il est incontestable que les bras conventionnels sont plus performants (+ 33 %) en comparaison des deux autres topologies.

L'évaluation des constantes de temps ne nous a pas permis de remarquer de grandes disparités entre les structures carrées et rectangulaires, les résultats s'échelonnent entre 7,4 ms et 11,8 ms pour des bras de longueur 400 μm et 800 μm.

Pour prolonger nos caractérisations, nous avons réalisé un banc de mesure automatique thermorégulé. Ce banc est constitué d'un système de régulation thermique et d'une carte de préamplification. La précision en température est de ± 0,1 °C dans une gamme comprise entre 10 et 50 °C. Le gain du préamplificateur de 10366 présente une dérive de tension d'offset de 865 μV/K. Grâce à ce banc, nous avons réalisé des mesures de dérive thermique, de sensibilité et évalué l'écart de température équivalent au bruit (*NETD*). Au terme de ces mesures, nous avons retenu deux types de thermopiles (C_312 et C_211). Nous avons confronté leurs caractéristiques (sensibilité, constante de temps et résistance électrique) à celles obtenues par notre modèle. Une bonne concordance des valeurs a été trouvée entre le modèle et les mesures.

Enfin, nous avons comparé les performances des thermopiles LAAS avec celles disponibles dans le commerce en fonction d'une gamme similaire de sensibilité. Nous avons montré que dans l'ensemble les thermopiles réalisées présentaient un temps de réponse bien meilleur et des résistances électriques plus faibles, ceci avec des tailles de surfaces actives plus petites.

Conclusion générale

Notre projet de recherche s'inscrit dans un axe d'activité ancien du laboratoire puisqu'il remonte à des travaux sur les détecteurs infrarouges quantiques qui datent des années 70. A cette époque, les travaux se tournaient plutôt vers les applications militaires. L'effort national associant les efforts des sociétés S.A.T et THOMSON, des laboratoires du CEA/LETI et du LAAS-CNRS a permis de dégager une filière française de détecteurs quantiques industrialisés par une société spécialisée SOFRADIR.
Des tentatives pour trouver des options technologiques nouvelles, moins coûteuses, ont conduit à d'intéressants travaux du LAAS et du LETI sur la détection piézoélectrique (matrices PVDF) auxquels ont été préféré des options bolométriques actuellement industrialisées par la société ULIS. L'important, pour cette deuxième étape travail, c'est le retour au silicium et la mise en œuvre des technologies microsystèmes.

Notre projet de recherche prend en compte ce bilan d'activités et ces nouvelles orientations vers le silicium et les microsystèmes d'autant que sa motivation est de chercher des nouvelles générations de détecteurs de présence plus adaptées au besoin et moins coûteux. En l'occurrence, nos détecteurs de présence doivent :

- détecter les personnes immobiles,
- détecter les mouvements,
- distinguer des objets différents les uns des autres.

Ces spécifications résultent des travaux importants consacrés à l'habitat intelligent :

- gestion du confort thermique dans l'habitat (projet ERGDOM),
- surveillance des personnes âgées (projet PROSAFE).

Elles invitent évidemment à la détection multisensorielle et au développement d'une électronique spécifique à la détection de présence. Au sein du groupe MIS, deux études techniques rejoignent notre démarche :

- le développement d'une électronique, qui partant d'un capteur thermique de type bolométrique ou à thermopiles, détecte à la fois la personne immobile et la personne en mouvement [84],
- le développement d'une électronique, qui à partir de capteurs multiples placés dans un passage, fait du comptage [85].

Notre tâche a donc pu se consacrer entièrement à la définition du capteur, à sa modélisation dans son environnement, à sa réalisation et à sa validation. Cette démarche très linéaire a organisé notre travail de recherche ces dernières années et le plan de présentation de nos résultats dans ce manuscrit.

Le chapitre 1 propose un état de l'art assez fouillé de la détection infrarouge. Nous nous sommes attachés à éclairer la voie du développement actuelle sur la détection ambiante bas coût, fonctionnant à température ambiante.
Nous montrons les intérêts de la détection par thermopile :

- le bruit en *1/f* n'affecte par les structures, seul le bruit d'origine thermique de Johnson (le plus prépondérant) est présent, il est donc dépendant de la valeur ohmique des résistances,
- le signal est auto-généré, et permet donc s'affranchir de tout circuit de polarisation (conversion instantanée),
- la réponse est linéaire,
- l'auto-échauffement est quasiment inexistant.

Le chapitre 1 se termine sur la présentation de nos objectifs de recherche : concevoir et réaliser des détecteurs multiples intégrables dans des conditionnements grand public. Nous avons établi des spécifications préliminaires concernant un capteur adapté à notre application.

Le chapitre 2 présente le modèle analytique unidimensionnel élaboré sous l'outil Mathcad. Il tient compte des paramètres environnementaux influant sur la réponse des détecteurs (humidité, CO_2, T°...), de l'optique utilisée, de la topologie des structures de capteurs. Les simulations ont permis de mettre en évidence l'influence des différentes grandeurs dimensionnelles des détecteurs (taille de la membrane, longueur et largeur des thermocouples...). Dans une première phase d'étude, lorsque nous avons adapté les dimensions des thermocouples à l'ensemble de la structure, il s'est avéré que les résultats de la simulation ont montré que la largeur des bras en silicium polycristallin était un facteur très influant pour l'obtention de bonnes performances. Compte tenu de ces premiers résultats, nous avons retenu une largeur de bras en silicium polycristallin et avons réévalué l'influence que pouvait exercer les dimensions de l'absorbeur et de la membrane. Nous avons remarqué que le surdimensionnement de la taille de l'absorbeur était préjudiciable aux performances du capteur. Pour terminer cette étude, nous avons reconsidéré l'influence de la largeur des bras de silicium polycristallin mais aussi leur nombre, ceci pour une taille d'absorbeur fixée. Nous avons montré qu'il était préférable de réaliser des thermocouples de faible largeur pour en augmenter leur nombre et ainsi profiter de la contribution de l'effet Seebeck, ceci dans la limite où le facteur de mérite n'est pas pénalisé. Dans ce sens, les simulations nous ont permis de mieux comprendre le fonctionnement des capteurs thermoélectriques. Le modèle proposé [86] s'avère être un véritable outil d'aide à la conception pour le dimensionnement et l'optimisation des performances des thermopiles avant d'entreprendre la réalisation technologique des structures.

Le chapitre 3 détaille les étapes du procédé technologique complet. Ces réalisations ont entièrement été réalisées en salle blanche du laboratoire et nous ont conduit à développer un premier savoir-faire sur le processus complet de fabrication thermopile silicium compatible CMOS. Plus particulièrement, nous avons utilisé les récentes technologies de micro-usinage volumique du silicium, les dépôts en couches minces ainsi que les techniques de gravure sèche (RIE) notamment pour la réalisation des contacts ohmiques. Ensuite, nous avons présenté les différentes structures qui ont été élaborées pour mettre en évidence l'influence des différentes topologies (taille des contacts ohmique, type de bras : conventionnel, série et parallèle,

différentes dimensions de membranes) de thermopiles sur les réponses. Les structures que nous avons fabriquées dans notre laboratoire se présentaient sous la forme d'éléments mono-points (carrées et rectangulaires) auxquels nous avons associé des véhicules tests. L'intérêt des structures tests est de pouvoir émuler un rayonnement infrarouge grâce à une résistance placée au dessus de l'absorbeur. Pour répondre à des applications futures, nous avons également réalisé des capteurs sous la forme de matrices et de barrettes.

Le chapitre 4 présente les différentes phases de caractérisation que nous avons mis en œuvre pour le test des différentes structures réalisées. Des tests sous pointes nous ont permis de mesurer les résistances électriques de l'ensemble des topologies unitaires et de leurs véhicules tests associés. Ensuite, nous avons procédé à l'évaluation du coefficient Seebeck du couple de matériaux utilisé par une technique de thermographie infrarouge. Un banc de caractérisation automatisé thermorégulé a été conçu et développé pour évaluer les dérives thermiques des structures, leur sensibilité ainsi que le NETD. Ceci nous a permis d'évaluer nos structures et de montrer que le modèle analytique donnait des valeurs très proches de celles mesurées.
Au terme de notre travail, nous disposons de détecteurs dont la fiche technique, à ce jour, peut être résumée à :

- un coefficient Seebeck moyen du couple de matériaux de $220\ \mu V/K$,
- une constante de temps comprise entre 7 et $11\ ms$.
- une sensibilité comprise entre 18 V/W et 82 V/W,
- un NETD compris entre 222 mK et 695 mK.

Ces capteurs peuvent être réalisés en lignes ou en matrices et peuvent donc conduire à des fonctions complexes comme on les souhaite pour sélectionner et classer des situations devenues nécessaires dans des applications de surveillance "intelligente".

Pour l'avenir, nous voyons deux axes d'améliorations :

- En technologie, on peut explorer d'autres matériaux de thermopiles. Dans ce sens, nous pensons aux polymères conducteurs. Compte tenu que les matériaux plastiques sont de bons isolants thermiques, nous pensons améliorer le gradient thermique de nos structures. De plus, ils se présentent sous une forme visqueuse et peuvent donc se déposer à la tournette, ce qui simplifierait le processus de fabrication. Pour initier cette idée, une première phase d'étude consisterait à mesurer le coefficient Seebeck, la conductivité thermique et électrique pour en évaluer leur facteur de mérite. A l'issue de ces premiers travaux, si les résultats son encourageants, nous pourrions envisager une étude plus approfondie de ce type de matériaux.
- En microsystème, on peut étudier la compatibilité de ces détecteurs avec des fonctions électroniques telles que le développement d'accéléromètres, d'analyseurs de gaz, ou d'anémomètres que l'on pourrait directement intégrées sur la puce.

Sur un plan plus général, ces travaux, avec d'autres, ouvrent la voie à une nouvelle étape domotique : longtemps, on a pensé que la domotique constituait un axe important de développement sans que cela se concrétise dans la réalité. Aujourd'hui, avec le développement de l'informatique à domicile, des systèmes de télécommunications, de la surveillance des biens et des personnes, tous les ingrédients existent pour une nouvelle étape au service d'un "habitat intelligent". La part sécuritaire à laquelle nous avons collaboré est prête.

Bibliographie

[1] A. Rogalski, K. Chrzanowski. Infrared devices and techniques. *Opto-electronics Review*, 10(2), pp.111-136, 2002.

[2] J. Tissot. IR detection with uncooled sensors. Infrared Physics & Technologie. 46(1-2), pp.147-153, 2004.

[3] J. Farré. Photodétecteurs MIS sur semiconducteurs intrinsèques pour imagerie infrarouge thermique : Aide à la conception de matrices dans le plan focal. Thèse d'Etat, Université Paul Sabatier de Toulouse III. Juillet 1980.

[4] A. Najmi. Conception et réalisation d'un détecteur d'obstacles automobiles à faisceaux infrarouges balayes et pulsés. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse III. Juin 1994.

[5] A. Mahrane. Etude et réalisation de détecteurs infrarouges pyroélectriques P(VDF-TrFE). Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse III. Juillet 1994.

[6] D. Estève, E. Bousbiat, J.P. Beconne, F. Rossel, G. Lacoste, C. Solano, J. Simonne. Détection d'obstacles infrarouge passif. Rapport LAAS N°91095, Contrat PROMETHEUS-PROCHIP. Février 1991, 61p.

[7] E. Campo, J.P. Scotto Di Rinaldi, D. Estève, N. Bailly, F. Bénard. Développement d'une nouvelle génération de gestionnaire d'énergie auto-configurable pour l'habitat : le concept ERGDOM. Annales du Bâtiment et des Travaux Publics N°2, pp.43-49, Août 2003.

[8] M. Chan, E. Campo, D. Estève. PROSAFE, a multisensory remote monotoring system for the elderly or the handicapped. 1st International Conference On Smart homes and health Telematics (ICOST'2003), pp.89-85, Septembre 2003.

[9] E. Campo, M. Chan, D. Estève. L'apprentissage des modes de vie : une base indispensable au développement d'un habitat "intelligent". Annales des Télécommunications, Tome 58 N°5-6, pp.850-865, Mai-Juin 2003.

[10] E. Campo, T. Val, M. Chan. La surveillance multicapteurs appliquée au suivi comportemental de personnes agées dans l'habitat. Conférence sur la Commande des Systèmes Industriels (CIS'97), Vol.2, pp.565-569, Mai, 1997.

[11] C. Escriba, E. Campo, D. Estève. Les détecteurs de présence dans l'habitat : Analyse des besoins et conception de nouveaux modules. Projet de collaboration LAAS-EDF E18L05, 40p, Décembre 2001.

[12] R. W. Boyd. Radiometry and the Detection of Optical Radiation, Wiley & Sons, ISBN 0-471-86188-X

[13] G. Zissis. The Infrared and electro-optical system hanbook, SPIE Press, ISBN 0-8194-1072-1.

[14] G. Gaussorgues. La thermographie infrarouge, Edition Tech&Doc, Lavoisier Paris, ISBN : 2-74300290-5.

[15] D. Pajani. Mesure par thermographie infrarouge. Add Editeur. ISBN 2-9504171-0-8.

[16] J.P. Pocholle (Coordinateur). Bilan des forces et faiblesses de l'optique en France, Défense et sécurité (chapitre6) : http://www.recherche.gouv.fr/rapport/optique/optique.htm

[17] W.D. Rogatto. The Infrared and Electron-Optical Systems Handbook. Volume 3 Electro-Optical Components. ∑ERIM Infrared Information Analysis Center and SPIE Optical Engeneering Press. ISBN 0-8194-1072-1.

[18] G. Soto-Romero. Etude, modélisation et réalisation d'un microsenseur terrestre infrarouge en technologie microsystème : Application au positionnement de micro satellites en orbite basse. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse III. Décembre 2001.

[19] E. L. Dereniak, G. D. Boreman. Infrared Detectors and Systems, Wiley, ISBN : ISBN: 0-471-12209-2

[20] E. Rosencher, B. Vinter. Optoélectronique. Masson. ISBN 2-225-82935-7.

[21] Sélection guide for PbS & PbSe InfraredDetector. Donées constructeur : Laser Componants, http://www.lasercomponents.com/

[22] A.M. Fowler, I. Gatley, P. McIntyre, F.J. Vrba, A. Hoffman, The 1024 x 1024 InSb array: design, description, and results, Proc SPIE 2816, pp.150-160, 1996.

[23] A. Rogalski. New trends in infrared detector technology. Infrared Physics & Technology, 35(1), pp.1-21, Février 1994.

[24] L.J. Kozlowski, K. Vural, J.M. Arias et all. Performances of HgCdTe, InGaAs and quantum well GaAs/AlGaAs staring infrared focal plane array. Proc SPIE 4028, pp.210-207, 2000.

[25] J. T. Wimmers, D. S. Smith, Optimization of InDb detectors for use at liquid helium temperatures, Proc SPIE, pp.510, 521, 1984.

[26] L.J. Kozlowski. HgCdTe focal plane arrays for high performance infrared camera. Proc SPIE 3279, pp.200-211, 1997.

[27] N. Sclar. Properties of doped silicon and germanium infrared detectors, Prog. Quant. Electr. vol9, pp.149-257,1984.

[28] J-h. Wu, R-S. Chang, G-J. Horng. Microstructure, electrical, and optical properties of evaporated PtSi/p-Si(100) Schottky barriers as high quantum efficient infrared detectors, Thin Solid Films. 46(1-2), pp.314-319, Novembre 2004.

[29] S.D.Y. Yoo, K.D. Kwack. Theorical calculation of electron mobility in HgCdTe. Journal of Applied Physic. 41(2), 1997.

[30] S. D. Gunapala et all. 1024 × 1024 pixel mid-wavelength and long-wavelength infrared QWIP focal plane arrays for imaging applications. Semiconductor science and technology. 20, pp.473-480, 2005.

[31] P.R. Norton. Infrared image sensors. Opt Eng. 30, pp.1649-1663, 1991.

[32] P.R. Norton. Statut of infrared image sensors. Proc. SPIE (3379), pp.102-114, 1998.

[33] G. Destefanis. Les nouvelles générations de détecteurs infrarouge à base de HgCdTe. Comptes Rendus de Physique 4. pp.1109-1120, 2003.

[34] B. Charlot. Modélisation de fautes et conception en vue du test des microsystèmes. Thèse de doctorat, INP de Grenoble. Mars 2001.

[35] L. Audaire, M. Pirot, Ph. Rambaud, F. Bauer, J. Simonne. Détection d'obstacles par infrarouge passif, Colloque Capteurs pour l'Automobile, (Grenoble : France), C1/8-C8/8, Octobre 1992.

[36] J.L. Tissot. IR detection with uncooled focal plane arrays. State-of-the art and trends. Opto Electronics Review.12(1), pp.105-109, 2004.

[37] M. Boutchich, K. Ziouche, M. Ait-Hammouda Yala, P. Godts and D. Leclercq. Package-free infrared micro sensor using polysilicon thermopile. Sensors and Actuators. 120(1), pp.52-58, 2005.

[38] D. Estève, F. Bony, C. Escriba, E. Campo, J. Y Fourniols. Retro-prospective in IR optical detectors. Optical Systems Design 2003, Saint-Etienne (France), 15p, Octobre 2003.

[39] M. C. Fote, S. Gaalema, Progress toward high-performance thermopile arrays. Proc. SPIE (4369), pp.350-354, 2001.

[40] R. Amantea, L.A. Goodman, F. Pantuso, D.J. Sauer, M. Varghese, T.S. Villani, L.K. White. Progress towards an uncooled IR imager with 5mK NEΔT. Proc. SPIE (3436), pp.647-659, 1998.

[41] F. Parrain, B. Charlot, S. Mir, B. Courtois. Capteur infrarouge CMOS à thermopile comportant des fonctions de self-test. The TIMA LAb. Nano et micro technologies. 1(3-4), pp.387-412, 2001, ISSN : 1469-3399.

[42] M. Boutchich. Microcapteurs de rayonnement infrarouge en technologie silicium. Thèse de doctorat, Université de Lille. Décembre 2002.

[43] L. Yueying, S. Dexin, Z. Ziqiang. The design of adding heat reflective emitter coating on the cold region of infrared thermopiles. IEEE Int. Conf. on Thermoelec. Vol21, pp. 458-462, 2002

[44] E. Socher, O. Bochobza-Degani, Y. Nemirovsky. A novel spiral CMOS compatible micromachined thermoelectric IR microsensor. J. Micromech. Microeng. 11, pp. 574-576, 2001.

[45] A. Schaufelbühl et all. Uncooled Low-Cost Thermal Infrared Based on Micromachined CMOS Integrated Sensor Array. J. Micromech. Microeng. 10, pp. 503-510, 2001.

[46] W. Ghanem et all. Development and characterization of a sensor based on thermopiles array for human information and counting : A contribution to innovative house technique. Transduer's 99, pp.562-566.

[47] R. Lenggenhager, H. Baltes, T. Elbel. Thermoelectric infrared sensor in CMOS technology. Sensors and Actuators. A37-38, pp.216-220, 1993.

[48] J. Schieferdecker et all. Infrared thermopile sensors with high sensitivity and very low temperature coefficient. Sensors and Actuators. A46-47, pp. 422-427, 1995.

[49] I.H. Choi, A. Wise. A silicon-thermopile-based infrared sensing array for use in automates manufacturing. IEEE Trans. on Electron Devices, ED33, pp. 72-79, 1986.

[50] J. Lu et all. Structure and properties of silicon-metal thermopile. Sensors and Actuators. A35, pp.217-220, 1993.

[51] G. R. Lahiji, K.D. Wise. A batch-fabricated silicon thermopile infrared detector. IEEE Trans. on Electron Device. 29, pp.221-225, 1981.

[52] J.Y. Fourniols. Méthodologie de conception des microsystèmes et systèmes intégrés : Application aux systèmes embarqués. Habilitation à diriger des recherches. 127p., Décembre 2002.

[53] M. Wahbi, J. Simonne, J.Y. Fourniols, J. Boucher. Les Microsystèmes : de la conception à la fabrication. 3ème Conférence Internationale sur les Mathématiques Appliquées et les Sciences de l'Ingénieur. (CIMASI'2000), pp.100-112, Octobre 2000.

[54] S. Murakami, S. Kato, J. Zeng. Combined simulation of airflow, radiation and moisture transport for heat release from human body. Building and Environnement. N°35, pp.489-500, 2000.

[55] A. Dittmar, G. Delhomme, T. Pauchard. La thermique de l'homme et de son proche environnement. Congrès annuel de la Société Française des Thermiciens. 29, Mai 1995.

[56] D. H. Höhn, W. Steffens, A. Kohnle. Atmosphéric IR Propagation. Infrared Physic, 25(1-2), pp.445-456, 1985.

[57] J. M. Hartmann, R. Levi Dr Leon, J. Taine. Line-by-line and narrow-band statical model calculations for H_2O. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 32(2), pp.119-127, 1984.

[58] J. Taine. A line-by-line calculation of low-resolution radiative properties of CO_2-CO-Transparent nonisothermal gases mixtures up to 3000K. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 30(4), pp.371-379, 1983.

[59] A. Soufiani, J.M. Hartmann, J. Taine. Validity of band-model calculations for CO_2 and H_2O aplied to radiative properties and conduction-radiative transfer. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 33(3), pp.247-257, 1985.

[60] E. Socher, O. Degani, and Y. Nemirovsky. Optimal design and noise considerations of CMOS compatible IR thermoelectric sensors, Sensors and Actuators. A71, pp.107-115, 1998.

[61] V.L. Ginzburg. On heat transfert (heat conduction) and the thermoelectric effect in the superconducting state. Physics, 41(3), pp.307-311, 1998.

[62] A. W. Van-Herwaarden. The Seebeck effect in silicon ICs, Sensors and Actuator. A6, pp.245-254, 1984.

[63] A. W. Van-Herwaarden, P. M. Sarro. Thermal sensors based on the Seebeck effect. Sensors and Actuators. A10, pp.321-346, 1986.

[64] F. Völklein and H. Baltes. Thermoelectric properties of polysilicon films doped with phosphorus and boron. Sens. Mat, 3, 325-334, 1992.

[65] Y. Zhang, N.P. Ong, Z.A. Xu, K. Krishana, R. Gagnon, L. Taillefer. Determining the Wiedemann-Franz Ratio from the Thermal Hall Conductivity: Application to Cu and $YBa_2Cu_3O_{6,95}$. Physical Review Letters. 84(10), pp.2219-2222, 2000.

[66] F. Volklein and H. Baltes. Optimization tool for the performance parameters of thermoelectric microsensors. Sensors and Actuators. A36, 65-71, 1993.

[67] A. G. Kozlov. Optimization of thin-film thermoelectric radiation sensor with separate disposition of absorbing layer and comb thermoelectric transducer, Sensors and Actuators. A84, pp.259-269 , 2000

[68] D. Chen Hsun and L. Chengkuo. Characterization of thermopile based on complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) materials and post CMOS micromachining. Jap. J. App. Physics. 41, pp.4340-4345, (2002)

[69] D. Cben Hsun and L. Chengkuo, Optimization criteria of CMOS compatible thermopile sensors, SPIE. pp.116-126, 1999.

[70] E. Socher, O. Degani, and Y. Nemirovsky, Optimal design and noise considerations of CMOS compatible IR thermoelectric sensors. Sensors and Actuators. A71, pp.107-115, 1998.

[71] M. Necati Özisik. Heat conduction. Wiley inter science. ISBN 0-471-53256-8.

[72] J. P. Holman. Heat transfert. Mc Graw Hill. ISBN 0-07-112644-9.

[73] Rossi, P. Temple-Boyer, and D. Estève. Realization and performance of thin SiO_2 / SiN_x membrane for microheater applications, Sensors and Actuators. A64, pp.241-245, 1998.

[74] M. Dumitescu, C. Cobianu, D. Lungu, D. Dascalu, A. Pascu, S. Kolev, and A. van-den-Ber. Thermal simulation of surface micromachined polysilicon hot plates of low power consumption. Sensors and Actuators. A76, pp.51-56, 1999.

[75] J. Schieferdecker, R. Quad, E. Holzenkampfer, and M. Schulze, Infrared thermopile sensors with high sensitivity and very low temperature coefficient, Sensors and Actuators. A47, pp.422-427, 1995.

[76] P. Temple-Boyer, C. Rossi, E. Saint-Etienne, E. Scheid. Residual stress in low pressure chemical vapor deposition SiN_x films deposited from silane and ammonia. J. Vac. Sci. Technol. A16(4), pp.2003-2007, 1998.

[77] P. Temple-Boyer. Développement des matériaux dans le cadre des microtechnologies. Habilitation à Diriger des Recherches. 2004.

[78] R. Lenggenhager, D. Jaeggi, P. Malcovati, H. Duran, H. Baltes, E. Doering. CMOS Membranes Infrared Sensors and Improved TMAHW Etchant. IEEE : E. Electron Devices, pp.531-534, 1994.

[79] R. Iosub, C. Moldovan, M. Modreanu. Silicon membranes fabrication by wet anisotropic etching. Sensors and Actuators, A99, pp.104-111, 2002.

[80] C. Sermondade , A. Toussaint. Régulation Tome 2 : Identifications, stabilité, réglages. Ed. Nathan. ISBN : 2-09-177743-9.

[81] R. bitter. LabVIEW Advanced Programming Techniques. National Instruments Books and Publications. ISBN : 0849320496.

[82] G. Gaussorgues. Caractérisation des systèmes infrarouges. Technique de l'Ingénieur, traité electronique E 4 080.

[83] F. Bony. Conception d'une architecture générique "sur puce" de traitement vidéo numérique pour micro-capteurs matriciels avec applicatif intégré : Cas de la microbolométrie infrarouge. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse. Décembre 2003.

[84] C. Escriba, E. Campo, D. Estève. Contrat EDF R&D n°E18/E58115, "Conception d'un module démonstrateur dédié à la détection de présence", 92p , Septembre 2002.

[85] S Bonhomme, E. Campo, D. Estève, M. Chan. Contrat EDF R&D n°E961/P000J0E32, "Conception d'un dispositif de capteurs dédié au comptage des personnes dans un habitat", 65p., Mars 2005.

[86] C. Escriba, E. Campo, D. Estève, J.Y. Fourniols. Complete analytical modeling and analysis of micromachined thermoelectric uncooled IR sensors. Sensors and Actuators. A120, pp267-276, 2005.

Annexes

Annexes 1

A1.1 Nomenclature des capteurs unitaires et véhicules tests

Capteur (bras 120 μm) :			**Surface membrane**	**Surface absorbeur**
C_111	CT_111		300 × 300 μm²	115 ×115 μm²
C_111_bo	CT_111_bo		300 × 300 μm²	115 ×115 μm²
RT_111	RT_111		390 × 300 μm²	205 ×115 μm²
R_111_bo	RT_111_bo		390 × 300 μm²	205 ×115 μm²
Capteur (bras 400 μm) :			**Surface membrane**	**Surface absorbeur**
C_211	C_212	C_213	1035 × 1035 μm²	325 × 325 μm²
C_211_bo	C_212_bo	C_213_bo	1035 × 1035 μm²	325 × 325 μm²
C_221	C_222	C_223	1085 × 1085 μm²	375 × 375 μm²
C_221_bo	C_222_bo	C_223_bo	1085 × 1085 μm²	375 × 375 μm²
C_231	C_232	C_233	1085 × 1085 μm²	375 × 375 μm²
C_231_bo	C_232_bo	C_233_bo	1085 × 1085 μm²	375 × 375 μm²
CT_211	CT_212	CT_213	1035 × 1035 μm²	325 × 325 μm²
CT_211_bo	CT_212_bo	CT_213_bo	1035 × 1035 μm²	325 × 325 μm²
CT_221	CT_222	CT_223	1085 × 1085 μm²	375 × 375 μm²
CT_221_bo	CT_222_bo	CT_223_bo	1085 × 1085 μm²	375 × 375 μm²
CT_231	CT_232	CT_233	1085 × 1085 μm²	375 × 375 μm²
CT_231_bo	CT_232_bo	CT_233_bo	1085 × 1085 μm²	375 × 375 μm²
C_211_bol	C_212_bol	C_213_bol	895 × 895 μm²	325 × 325 μm²
CT_211_bol	CT_212_bol	CT_213_bol	895 × 895 μm²	325 × 325 μm²
R_211	R_212	R_213	1035 × 890 μm²	600 × 325 μm²
R_211_bo	R_212_bo	R_213_bo	1035 × 890 μm²	600 × 325 μm²
R_221	R_222	R_223	1035 × 995 μm²	705 × 325 μm²
R_221_bo	R_222_bo	R_223_bo	1035 × 995 μm²	705 × 325 μm²
R_231	R_232	R_233	1035 × 995 μm²	705 × 325 μm²
R_231_bo	R_232_bo	R_233_bo	1035 × 995 μm²	705 × 325 μm²
R_211_bol	R_212_bol	R_213_bol	895 × 890 μm²	600 × 325 μm²
R_221_bol	R_222_bol	R_223_bol	995 × 895 μm²	705 × 325 μm²
R_231_bol	R_232_bol	R_233_bol	995 × 895 μm²	705 × 325 μm²
RT_211	RT_212	RT_213	1035 × 890 μm²	600 × 325 μm²
RT_211_bo	RT_212_bo	RT_213_bo	1035 × 890 μm²	600 × 325 μm²
RT_221	RT_222	RT_223	1035 × 995 μm²	705 × 325 μm²
RT_221_bo	RT_222_bo	RT_223_bo	1035 × 995 μm²	705 × 325 μm²
RT_231	RT_232	RT_233	1035 × 995 μm²	705 × 325 μm²
RT_231_bo	RT_232_bo	RT_233_bo	1035 × 995 μm²	705 × 325 μm²
RT_211_bol	RT_212_bol	RT_213_bol	895 × 890 μm²	600 × 325 μm²
RT_221_bol	RT_222_bol	RT_223_bol	995 × 895 μm²	705 × 325 μm²
RT_231_bol	RT_232_bol	RT_233_bol	995 × 895 μm²	705 × 325 μm²

Capteur (bras 800 µm) :			Surface membrane	Surface absorbeur
C_311	C_312	C_313	1400 × 1400 µm²	375 × 375 µm²
C_311_bo	C_312_bo	C_313_bo	1400 × 1400 µm²	375 × 375 µm²
C_321	C_322	C_323	1400 × 1400 µm²	375 × 375 µm²
C_321_bo	C_322_bo	C_323_bo	1400 × 1400 µm²	375 × 375 µm²
C_331	C_332	C_333	1400 × 1400 µm²	375 × 375 µm²
C_331_bo	C_332_bo	C_333_bo	1400 × 1400 µm²	375 × 375 µm²
CT_311	CT_312	CT_313	1400 × 1400 µm²	375 × 375 µm²
CT_311_bo	CT_312_bo	CT_313_bo	1400 × 1400 µm²	375 × 375 µm²
CT_321	CT_322	CT_323	1400 × 1400 µm²	375 × 375 µm²
CT_321_bo	CT_322_bo	CT_323_bo	1400 × 1400 µm²	375 × 375 µm²
CT_331	CT_332	CT_333	1400 × 1400 µm²	375 × 375 µm²
CT_331_bo	CT_332_bo	CT_333_bo	1400 × 1400 µm²	375 × 375 µm²
R_311	R_312	R_313	1305 × 1085 µm²	705 × 280 µm²
R_311_bo	R_312_bo	R_313_bo	1305 × 1085 µm²	705 × 280 µm²
R_321	R_322	R_323	1305 × 1085 µm²	705 × 280 µm²
R_321_bo	R_322_bo	R_323_bo	1305 × 1085 µm²	705 × 280 µm²
R_331	R_332	R_333	1305 × 1085 µm²	705 × 280 µm²
R_331_bo	R_332_bo	R_333_bo	1305 × 1085 µm²	705 × 280 µm²
Rn_311_bol	Rn_312_bol	Rn_313_bol	1745 × 1305 µm²	1365 × 280 µm²
RT_311	RT_312	RT_313	1305 × 1085 µm²	705 × 280 µm²
RT_311_bo	RT_312_bo	RT_313_bo	1305 × 1085 µm²	705 × 280 µm²
RT_321	RT_322	RT_323	1305 × 1085 µm²	705 × 280 µm²
RT_321_bo	RT_322_bo	RT_323_bo	1305 × 1085 µm²	705 × 280 µm²
RT_331	RT_332	RT_333	1305 × 1085 µm²	705 × 280 µm²
RT_331_bo	RT_332_bo	RT_333_bo	1305 × 1085 µm²	705 × 280 µm²

Tableau A1.1 : Dimension des structures unitaires (bras 120, 400 et 800 µm).

A1.2 Nomenclature des capteurs sous forme matricielle

Matice	Type membrane	Type de capteur	Surface pixel	Surface équivalente du capteur matriciel
M_1	une par pixel	série C_3XX	375 × 375 µm²	1,595 × 1,595 cm²
M1_bo	une par pixel	série C_3XX_bo	375 × 375 µm²	1,595 × 1,595 cm²
M_2	unique	C_111_bo	115 × 115 µm²	3265 × 3265 µm²
M_3	unique	C_111_bo	115 × 115 µm²	3265 × 565 µm²
M_4	une par pixel	C_311	375 × 375 µm²	4665 × 4665 µm²

Tableau A1.2 : Dimension des structures matricielles.

Annexes 2

A2.1 Mesures des structures tests

Longueur des bras 400 µm	Résistance électrique (Ω).		
Type de thermocouple	Surface du contact ohmique des thermojonctions		
Structure type B1	5 × 5 µm	5 × 10 µm	10 × 10 µm
2Poly+1Al	448,29	483	715
1Poly	Hs	367	357
1Al	9,43	7,81	8,41
Structure type B2 (//)			
2Poly+1Al	474	322,47	438
1Poly	236,4	234,1	217,2
1Al	8,15	9,40	8,95
Structure type B3 (série)			
2Poly+1Al	475	466	440
1Poly	241	231,7	220,7
1Al	12,38	9,35	9,78

Tableau A2.1 : Résistances électriques des différents types de bras élémentaires (400 µm).

Longueur des bras 120 µm	Résistance électrique (Ω).
Type de thermocouple	Surface du contact ohmique des thermojonctions
Structure type B1	5 × 5 µm
2Poly+1Al	314,89
1Poly	157,29
1Al	9,50

Tableau A2.2 : Résistances électriques des bras élémentaires (120 µm).

Annexe 3

A3.1 : Influence du contact ohmique localisé aux extrémités des thermojonctions

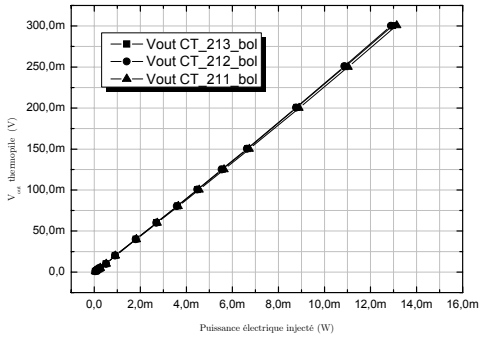


Figure A.3.1.1 : Caractérisation des thermopiles de type CT_21(123)_bol.

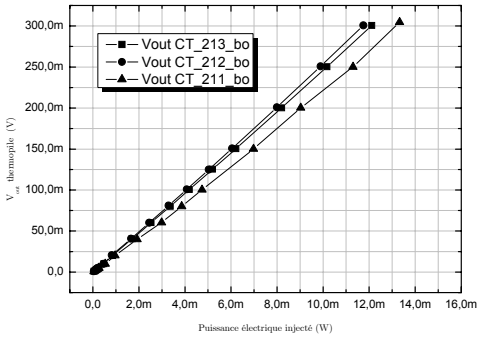


Figure A.3.1.2 : Caractérisation des thermopiles de type CT_21(123)_bo.

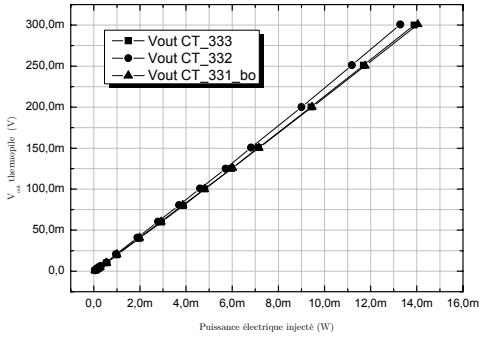


Figure A.3.1.3 : Caractérisation des thermopiles de type CT_33(23) & CT_331-bo.

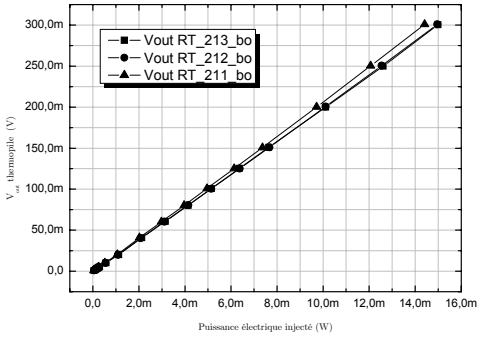


Figure A.3.1.4 : Caractérisation des thermopiles de type RT_21(123)_bo.

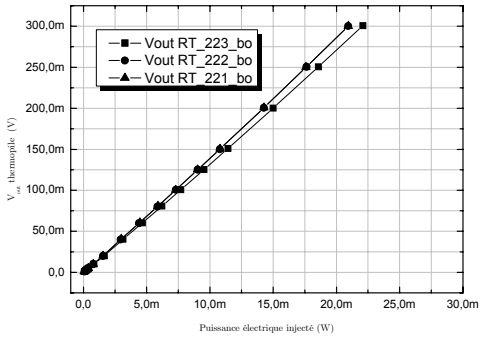


Figure A.3.1.5 : Caractérisation des thermopiles de type RT_23(123)_bo.

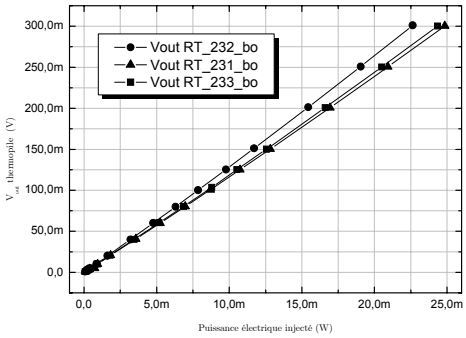


Figure A.3.1.6 : Caractérisation des thermopiles de type RT_23(123)_bo.

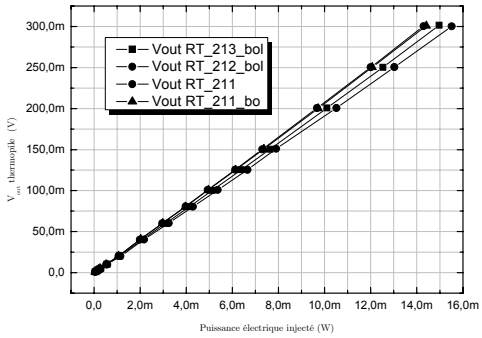


Figure A.3.1.7 : Caractérisation des thermopiles de type RT_21(23)_bol & RT_211 & RT_211_bo.

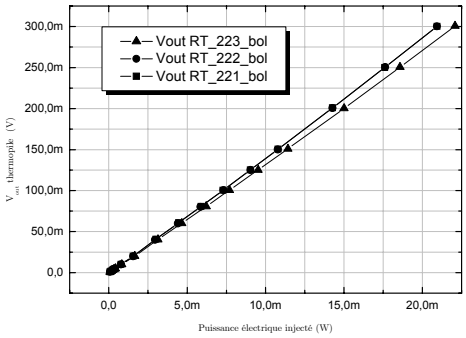


Figure A.3.1.8 : Caractérisation des thermopiles de type RT_22(123)_bol.

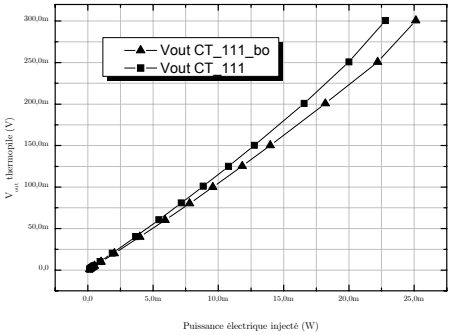


Figure A.3.1.9 : Caractérisation des thermopiles de type CT_111 & CT_111_bo.

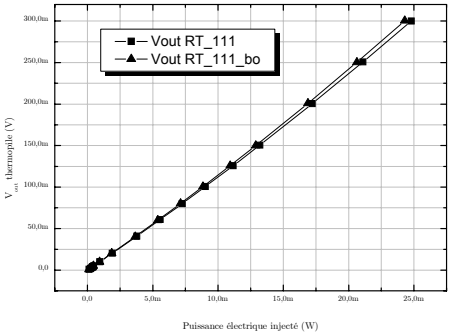


Figure A.3.1.10 : Caractérisation des thermopiles de type RT_111 & RT_111_bo.

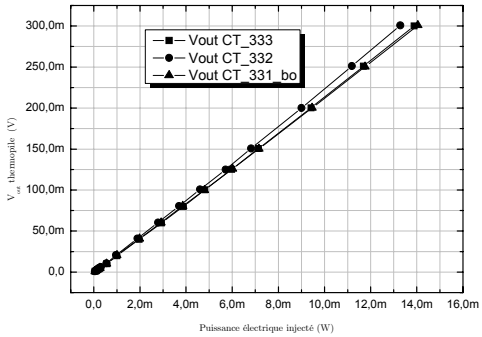


Figure A.3.1.11 : Caractérisation des thermopiles de type CT_33(23) & CT_331_bo.

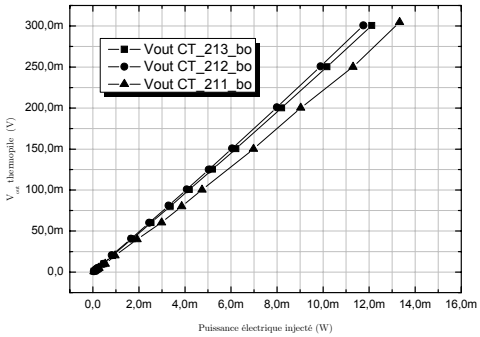


Figure A.3.1.12 : Caractérisation des thermopiles de type CT_21(123)_bo.

A3.2 : Influence de la topologie des thermocouples

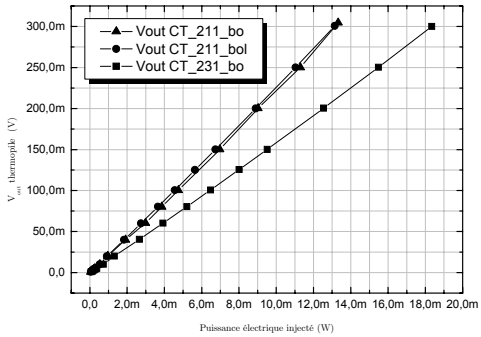


Figure A.3.2.1 : Caractérisation des thermopiles de type CT_2(13)_bo & CT_211_bol.

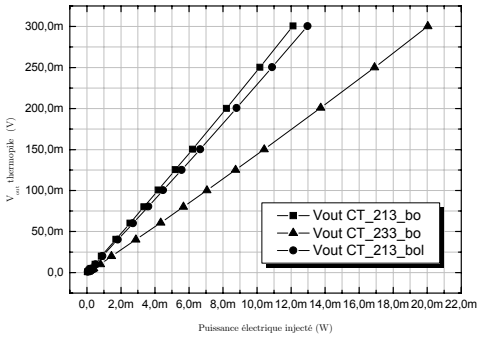


Figure A.3.2.2 : Caractérisation des thermopiles de type CT_2(13)_bo & CT_213_bol.

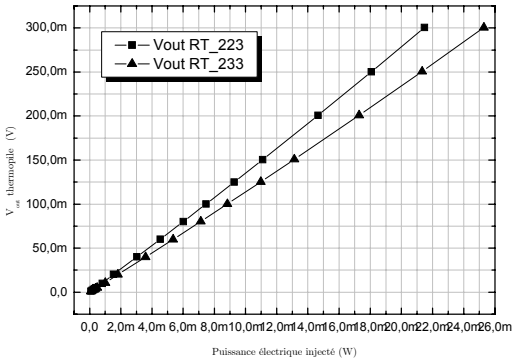


Figure A.3.2.3 : Caractérisation des thermopiles de type RT_2(23)3.

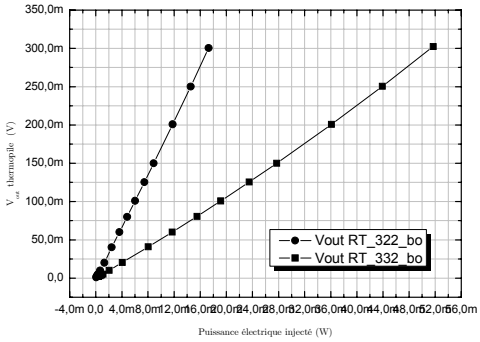


Figure A.3.2.4 : Caractérisation des thermopiles de type RT_3(23)2_bo.

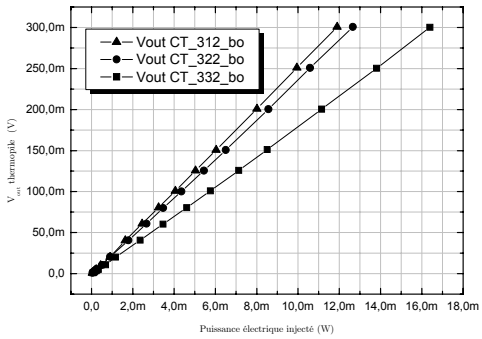


Figure A.3.2.5 : Caractérisation des thermopiles de type CT_3(123)2_bo.

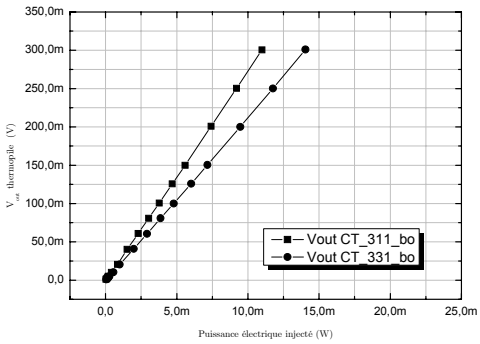


Figure A.3.2.6: Caractérisation des thermopiles de type CT_3(13)1_bo.

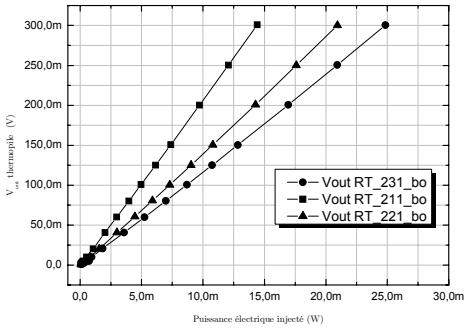


Figure A.3.2.7: Caractérisation des thermopiles de type RT_2(123)1_bo.

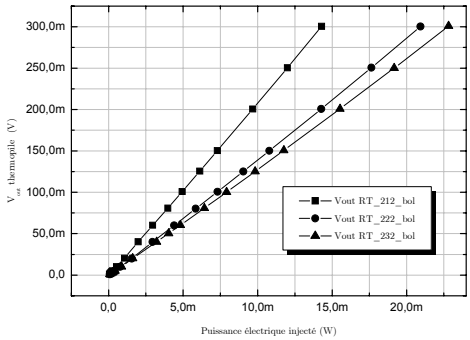


Figure A.3.2.8: Caractérisation des thermopiles de type RT_2(123)2_bol.

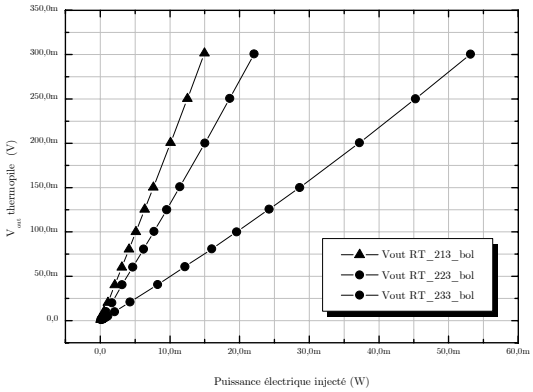


Figure A.3.2.9: Caractérisation des thermopiles de type RT_2(123)3_bol.

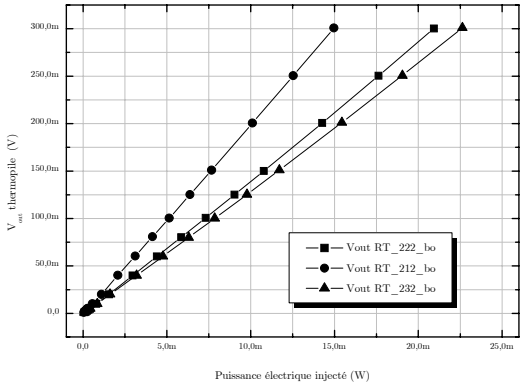


Figure A.3.2.10: Caractérisation des thermopiles de type RT_2(123)2_bo.

Liste des figures et des tableaux

Chapitre 1

Listes des figures

Figure 1.1 : Planche originale de l'expérience de Sir W. Herschel (1800).
Figure 1.2 : Emittance spectrale du corps noir en fonction de la température.
Figure 1.3 : Spectre des rayonnements électromagnétiques.
Figure 1.4 : Bilan énergétique au sein d'un matériau.
Figure 1.5 : Emissivité spectrale de la peau humaine.
Figure 1.6 : Emissivité de l'eau à λ=10 µm en fonction de la direction.
Figure 1.7 : Système de détection.
Figure 1.8 : Eléments mis en jeu dans la détection infrarouge passive.
Figure 1.9 : Evolution de la transmission spectrale de l'atmosphère.
Figure 1.10 : Transmission spectrale des principaux matériaux pour l'infrarouge.
Figure 1.11 : Transmission spectrale du polyéthylène dans l'infrarouge.
Figure 1.12 : Topologies possibles des lentilles de Fresnel.
Figure 1.13 : Structure fondamentale d'un détecteur quantique.
Figure 1.14 : Energie de bande interdite de l'alliage $Hg_{1-x}Cd_xTe$ en fonction du dosage moyen de Cadmium.
Figure 1.15 : Architecture d'une matrice détecteur IR hybride plan focal.
Figure 1.16 : Transmission spectrale d'une structure à multi-puits quantiques.
Figure 1.17 : Principe de la détection à multi-puits quantiques.
Figure 1.18 : Sensibilité spectrale relative de quelques détecteurs quantiques de type extrinsèque.
Figure 1.19 : Croissance du nombre de pixel par circuit depuis ces 25 dernières années pour les technologies DRAM.
Figure 1.20 : Courbes normalisées des sensibilités bi-spectrales ajustables des détecteurs HgCdTe.
Figure 1.21 : Photographie *MEB* de détecteurs HgCdTe de génération future (source : CEA-LETI/LIR).
Figure1.22 : Structure fondamentale d'un détecteur thermique.
Figure 1.23 : Photographies *MEB* de microstructures permettant la formation de puits thermiques.
Figure 1.24 : Principe de la détection pyroélectrique.
Figure 1.25 : Détecteur pyroélectrique à couche sensible de type PVDF.
Figure 1.26 : a) Schéma élémentaire d'un microbolomètre, b) Photographie d'une matrice, c) et d) Photographies *MEB* d'éléments microbolomètriques.
Figure 1.27 : Principe de l'effet Seebeck.
Figure 1.28 : Topologie d'une thermopile à grand écart thermique (Jet Propulsion Laboratory/NASA).
Figure 1.29 : Topologie d'une thermopile à faible écart thermique (IEMN Lille/CAPTEC).
Figure 1.30 : Thermopile obtenue par micro-usinage de surface à couche sacrificielle de polyimide.
Figure 1.31 : Détecteur thermomécanique infrarouge à microlevier capacitif.
Figure 1.32 : Détectivité spécifique en fonction de la longueur d'onde.

Listes des tableaux

Tableau 1.1 : Emissivité moyenne sur la bande 8-12 µm de différents matériaux.
Tableau 1.2 : Propriétés des matériaux optiques utilisés dans l'infrarouge.
Tableau 1.3 : Propriétés des principaux matériaux rencontrés pour l'élaboration des détecteurs quantiques.
Tableau 1.4 : Propriétés physiques des principaux matériaux pyroélectriques.
Tableau 1.5 : Les principaux acteurs dans la fabrication des détecteurs thermiques non refroidis.
Tableau 1.6 : Caractéristiques électro-thermiques des principaux matériaux rencontrés pour la réalisation des thermocouples.
Tableau 1.7 : Principaux détecteurs thermopiles disponibles sur le marché.
Tableau 1.8 : Marché mondial des systèmes infrarouges.
Tableau 1.9 : Synthèse et comparaison des caractéristiques : capteurs microbolométriques/thermopiles.
Tableau 1.10 : Comparaison des performances de différents capteurs thermopiles en technologie Silicium et thermocouples issues des laboratoires de recherche.

Chapitre 2

Listes des figures

Figure 2.1 : Synoptique de la conception descendante (Modélisation "Top-down").
Figure 2.2 : Synoptique d'un système optronique infrarouge passif (DIRP).
Figure 2.3 : Echanges thermiques de l'organisme humain.
Figure 2.4 : Emittance spectrale du corps humain en fonction des écarts thermiques (ΔT) entre celui-ci et différentes températures de scène moyenne (T_{sc}).
Figure 2.5 : Transmission atmosphérique en fonction de son épaisseur.
Figure 2.6 : Transmission atmosphérique en fonction de l'humidité contenue dans l'air.
Figure 2.7 : Configuration géométrique du sous-système optique.
Figure 2.8 : Définition géométrique des angles ouvertures.

Figure 2.9 : Angle solide.
Figure 2.10 : Système optique.
Figure 2.11 : Présentation de la lentille de Fresnel (***muRata***).
Figure 2.12 : Présentation du filtre optique scellé dans son boîtier (***muRata***).
Figure 2.13 : NEI en fonction de la surface A du capteur et de l'écart de température ΔT.
Figure 2.14 : NETD en fonction de la surface A du capteur et de la bande passante électronique.
Figure 2.15 : Les différents modes de transfert thermique.
Figure 2.16 : Structure élémentaire de la thermopile.
Figure 2.17 : Influence de la température sur l'énergie cinétique des porteurs d'un métal.
Figure 2.18 : Evolution du coefficient Seebeck (T=300 K) dans le PolySi dopé au phosphore en fonction de la concentration de porteur n.
Figure 2.19 : Evolution du facteur de mérite pour des matériaux isolants, semi-conducteurs et conducteurs.
Figure 2.20 : Représentation unidimensionnelle d'un quartet de tronçon d'élément dx de la structure.
Figure 2.21 : Schéma équivalent général.
Figure 2.22 : Vue en coupe de la thermopile encapsulée dans son boîtier.
Figure 2.23 : Réponse du capteur en fonction de l_3 et W_{Poly}.
Figure 2.24 : Gradient thermique entre les thermojonctions en fonction de l_3 et W_{Poly}.
Figure 2.25 :. Résistance thermique de la thermopile en fonction de l_3 et W_{Poly}.
Figure 2.26 : Constante de temps en fonction de l_3 et W_{Poly}.
Figure 2.27 : NEP en fonction de l_3 et W_{Poly}.
Figure 2.28 : Dimensions de la membrane en fonction de l_3 et W_{Poly}.
Figure 2.29 : Sensibilité du capteur en fonction de l_1 et l_3.
Figure 2.30 : Gradient thermique entre les thermojonctions en fonction de l_1 et l_3.
Figure 2.31 : Résistance thermique en fonction de l_1 et l_3.
Figure 2.32 : Constante de temps en fonction de l_1 et l_3.
Figure 2.33 : NEP en fonction de l_1 et l_3.
Figure 2.34 : Détectivité spécifique en fonction de l_1 et l_3.
Figure 2.35 : Sensibilité du capteur en fonction de $[N,\ W_{poly}]$ et l_3.
Figure 2.36 : Gradient thermique entre les thermojonctions en fonction de $[N,\ W_{poly}]$ et l_3.
Figure 2.37 : Sensibilité du capteur en fonction de W_{poly} et l_3.
Figure 2.38 : Sensibilité du capteur en fonction de $[N,\ W_{poly}]$ et l_3
Figure 2.39 : Constante de temps en fonction de $[N,\ W_{poly}]$ et l_3.
Figure 2.40 : Constante de temps en fonction de $[N,\ W_{poly}]$ et l_3.
Figure 2.41 : Résistance électrique en fonction de $[N,\ W_{poly}]$ et l_3.
Figure 2.42 : Tension de bruit en fonction de $[N,\ W_{poly}]$ et l_3.
Figure 2.43 : Tension de bruit en fonction de W_{poly} et l_3.
Figure 2.44 : Tension de bruit en fonction de $[N,\ W_{poly}]$ et l_3.
Figure 2.45 : NEP en fonction de $[N,\ W_{poly}]$ et l_3.
Figure 2.46 : Détectivité spécifique en fonction de $[N,\ W_{poly}]$ et l_3.

Listes des tableaux

Tableau 2.1 : Coefficients Seebeck calculés dans les métaux.

Chapitre 3

Listes des figures

Figure 3.1 : Dimensions des contacts PolySi/Al pour différentes structures.
Figure 3.2 : Structures conventionnelles.
Figure 3.3 : Structures parallèle et série.
Figure 3.4 : Dimensions des structures.
Figure 3.5 : Champs d'identification des capteurs.
Figure 3.6 : Capteurs unitaires (bras 120 µm).
Figure 3.7 : Capteurs unitaires (bras 400 µm).
Figure 3.8 : Capteurs unitaires (bras 800 µm).
Figure 3.9 : Architecture des matrices M_1_bo et M1.
Figure 3.10 : Dimensions des matrices M_1_bo et M1.
Figure 3.11 : Architecture de la matrice M_2.
Figure 3.12 : Dimensions de la matrice M_2.
Figure 3.13 : Architecture de la matrice M_3.
Figure 3.14 : Dimensions de la matrice M_3.
Figure 3.15 : Architecture de la matrice M_4.
Figure 3.16 : Dimensions de la matrice M_4.
Figure 3.17 : Environnement de CAO Cadence *Virtuoso Layout* utilisé pour la conception des masques.
Figure 3.18 : Présentation du jeu de masques.
Figure 3.19 : Photolithographie n° 1 : Dépôt et révélation de la résine AZ1529.
Figure 3.20 : Gravure DRIE : ICP du silicium.
Figure 3.21 : Réalisation des mires d'alignement.
Figure 3.22 : Réalisation de la couche d'oxydation humide.
Figure 3.23 : Photolithographie n° 2 : Dépôt et révélation de la résine AZ1529.
Figure 3.24 : Gravure de l'oxyde de silicium (*buffer HF*).
Figure 3.25 : Réalisation de l'absorbeur (implantation de bore fortement dopé : $1.10^{19} cm^{-3}$).
Figure 3.26 : Photographie au microscope de la localisation des absorbeurs.

Figure 3.27 : Dépôt de la couche SiO_2/SiN_x.
Figure 3.28 : Dépôt du silicium polycristallin.
Figure 3.29 : Photolithographie n° 3 : Dépôt et révélation de la résine AZ1529.
Figure 3.30 : Réalisation des bras en silicium polycristallin.
Figure 3.31 : Photographie au microscope des bras en silicium polycristallin.
Figure 3.32 : Elimination du polySi les faces latérales et inférieure.
Figure 3.33 : Dépôt de la couche d'oxydation dédié à l'isolation électrique des thermocouples.
Figure 3.34 : Photographie au microscope de la couche d'oxyde nécessaire à l'isolation électrique des thermocouples.
Figure 3.35 : Photolithographie n° 4 : Dépôt et révélation de la résine AZ5214.
Figure 3.36 : Ouverture de l'oxyde pour les contacts électriques.
Figure 3.37 : Ouverture de l'oxyde d'isolation nécessaire au contact électrique des thermojonctions.
Figure 3.38 : Photolithographie n° 5 : Dépôt et révélation de la résine AZ5214.
Figure 3.39 : Dépôt de l'aluminium.
Figure 3.40 : Obtention des bras d'aluminium par la suppression de la résine AZ5214.
Figure 3.41 : Photographie au microscope des bras en aluminium.
Figure 3.42 : Photographie MEB des recouvrements de marche.
Figure 3.43 : Passivation du capteur par un oxyde PECVD.
Figure 3.44 : Photolithographie n° 8 : Dépôt et révélation de la résine AZ1529.
Figure 3.45 : Gravure DRIE : GIR du bicouche SiO_2/SiN_x.
Figure 3.46 : Micro-usinage chimique du substrat de silicium.
Figure 3.47 : Structures élaborées sur wafer *4″*.
Figure 3.48 : Quelques structures encapsulées.
Figure 3.49 : Thermopile mono-élément montée sur son embase TO5 et munie de son optique.
Figure 3.50 : Véhicule test.
Figure 3.51 : Véhicule test associé monté sur son embase avec puce câblée.
Figure 3.52 : Thermopile unitaire.
Figure 3.53 : Thermopile unitaire montée sur son embase avec puce câblée.
Figure 3.54 : Photographie d'une structure matricielle 2×8 éléments.

Listes des tableaux

Tableau 3.1 : Dimensions de la scène observée à une distance de 5 m en fonction des dimensions de la zone active d'un capteur unitaire.
Tableau 3.2 : Dimensions de la scène observée à une distance de 5 m en fonction des dimensions de la zone active de la matrice.

Chapitre 4

Listes des figures

Figure 4.1 : Testeur sous pointe permettant la mesure de résistance des bras.
Figure 4.2 : Dispositif de mesure par thermographie.
Figure 4.3 : Tension générée par la thermopile CT_311_bo en fonction de ΔT.
Figure 4.4 : Tension générée par la thermopile CT_212 en fonction de ΔT.
Figure 4.5 : Séquence de l'élévation thermique générée par effet joule.
Figure 4.6 : Caractérisation des thermopiles de type CT_21(123).
Figure 4.7 : Caractérisation des thermopiles de type CT_22(123).
Figure 4.8 : Caractérisation des thermopiles de type CT_23(123).
Figure 4.9 : Caractérisation des thermopiles de type RT_21(123).
Figure 4.10 : Caractérisation des thermopiles de type RT_22(123).
Figure 4.11 : Caractérisation des thermopiles de type RT_23(123).
Figure 4.12 : Caractérisation des thermopiles de type CT_2(123)1.
Figure 4.13 : Caractérisation des thermopiles de type CT_2(123)2.
Figure 4.14 : Caractérisation des thermopiles de type CT_2(123)3.
Figure 4.15 : Caractérisation des thermopiles de type RT_2(123)1.
Figure 4.16 : Caractérisation des thermopiles de type RT_2(123)2.
Figure 4.17 : Caractérisation des thermopiles de type RT_2(123)3.
Figure 4.18 : Réponse indicielle de la structure CT_211.
Figure 4.19 : Réponse indicielle de la structure CT_311_bo.
Figure 4.20 : Synoptique du banc de caractérisation.
Figure 4.21 : Illustration d'une cellule à effet Peltier.
Figure 4.22 : Synoptique de la stabilisation en température du module à effet Peltier.
Figure 4.23 : Simulation de l'asservissement du système thermique avec Matlab-Simulink.
Figure 4.24 : Carte d'asservissement du système thermique.
Figure 4.25 : Réponse du système à différents échelons.
Figure 4.26 : Réponse du système à une rampe.
Figure 4.27 : Réponse du système à une perturbation extérieure.
Figure 4.28 : Stabilité de la régulation thermique en fonction du temps.
Figure 4.29 : Synoptique du circuit de préamplification.
Figure 4.30 : Carte électronique du préamplificateur de la thermopile.
Figure 4.31 : Face avant du VI : *balayage en température.*
Figure 4.32 : Face avant du VI : *mesures à température fixe.*
Figure 4.33 : Face avant du VI : *réglage de l'offset.*
Figure 4.34 : Vue d'ensemble du banc de mesure thermorégulé dédié à la caractérisation des thermopiles.

Figure 4.35 : Dérive thermique des thermopiles de type rectangulaire (bras 400 µm).
Figure 4.36 : Dérive thermique des thermopiles de type rectangulaire (bras 800 µm).
Figure 4.37 : Dérive thermique des thermopiles de type carrée (bras 400 µm).
Figure 4.38 : Dérive thermique des thermopiles de type carrée (bras 800 µm).

Listes des tableaux

Tableau 4.1 : Résistances électriques des différents types de bras élémentaires.
Tableau 4.2: Résistances électriques des différentes topologies unitaires.
Tableau 4.3 : Résistances électriques des différents véhicules tests unitaires.
Tableau 4.4 : Evaluation expérimentale du coefficient Seebeck de quelques structures.
Tableau 4.5 : Evaluation expérimentale de la constante de temps de quelques structures.
Tableau 4.6 : Mesures expérimentales de la sensibilité de quelques thermopiles carrés.
Tableau 4.7 : Mesures expérimentales de la sensibilité de quelques thermopiles rectangulaires.
Tableau 4.8 : Evaluation expérimentale du NETD de quelques thermopiles carrés.
Tableau 4.9 : Evaluation expérimentale du NETD de quelques thermopiles rectangulaires.
Tableau 4.10 : Comparaison des résultats entre les mesures expérimentales et le modèle des structures conventionnelles.
Tableau 4.11 : Comparaison des performances entre les thermopiles réalisées au LAAS et celles du commerce.

Annexes

Listes des figures

Figure A.3.1.1 : Caractérisation des thermopiles de type CT_21(123)_bol.
Figure A.3.1.2 : Caractérisation des thermopiles de type CT_21(123)_bo.
Figure A.3.1.3 : Caractérisation des thermopiles de type CT_33(23) & CT_331-bo.
Figure A.3.1.4 : Caractérisation des thermopiles de type RT_21(123)_bo.
Figure A.3.1.5 : Caractérisation des thermopiles de type RT_23(123)_bo.
Figure A.3.1.6 : Caractérisation des thermopiles de type RT_23(123)_bo.
Figure A.3.1.7 : Caractérisation des thermopiles de type RT_21(23)_bol & RT_211 & RT_211_bo.
Figure A.3.1.8 : Caractérisation des thermopiles de type RT_22(123)_bol.
Figure A.3.1.9 : Caractérisation des thermopiles de type CT_111 & CT_111_bo.
Figure A.3.1.10 : Caractérisation des thermopiles de type RT_111 & RT_111_bo.
Figure A.3.1.11 : Caractérisation des thermopiles de type CT_33(23) & CT_331_bo.
Figure A.3.1.12 : Caractérisation des thermopiles de type CT_21(123)_bo.
Figure A.3.2.1 : Caractérisation des thermopiles de type CT_2(13)_bo & CT_211_bol.
Figure A.3.2.2 : Caractérisation des thermopiles de type CT_2(13)_bo & CT_213_bol.
Figure A.3.2.3 : Caractérisation des thermopiles de type RT_2(23)3.
Figure A.3.2.4 : Caractérisation des thermopiles de type RT_3(23)2_bo.
Figure A.3.2.5 : Caractérisation des thermopiles de type CT_3(123)2_bo.
Figure A.3.2.6: Caractérisation des thermopiles de type CT_3(13)1_bo.
Figure A.3.2.7: Caractérisation des thermopiles de type RT_2(123)1_bo.
Figure A.3.2.8: Caractérisation des thermopiles de type RT_2(123)2_bol.
Figure A.3.2.9: Caractérisation des thermopiles de type RT_2(123)3_bol.
Figure A.3.2.10: Caractérisation des thermopiles de type RT_2(123)2_bo.

Listes des tableaux

Tableau A1.1 : Dimension des structures unitaires (bras 120, 400 et 800 µm).
Tableau A1.2 : Dimension des structures matricielles.
Tableau A2.1 : Résistances électriques des différents types de bras élémentaires (400 µm).
Tableau A2.2 : Résistances électriques des bras élémentaires (120 µm).

Conception, Réalisation et Caractérisation de Capteurs Infrarouges à Thermopiles : Application à la Détection de Présence Passive dans l'Habitat

RÉSUMÉ : A ce jour, les développements de systèmes liés à la sécurisation des biens et à la surveillance des personnes s'appuient le plus souvent sur l'usage de détecteurs commerciaux de type pyroélectriques mono-points, indiquant le passage d'une personne dans le champ. Ces détecteurs font apparaître deux limitations : l'impossibilité de détecter lorsque la personne à surveiller est immobile, et la nécessité dans certains cas, d'avoir des informations plus riches que la simple présence (direction des mouvements, estimation de la distance ...). Notre travail de recherche se situe dans une perspective liée à la surveillance passive dans le domaine de l'habitat intelligent. Il vise le développement de capteurs infrarouges de nouvelles générations. Au terme d'une investigation sur les principaux matériaux permettant la détection infrarouge et compte tenu de la problématique et des spécifications que nous avons établies, le choix s'est porté sur une technologie thermoélectrique de type thermopile. Selon les recommandations générales concernant la conception "Top-down" des microsystèmes, nous avons fait un travail assez approfondi de modélisation analytique du système global de détection infrarouge avant d'engager les étapes de conception et de réalisation. A partir de cette démarche conceptuelle, plusieurs structures (au total 180) sous la forme de capteurs unitaires, matriciels et de véhicules tests ont été réalisées. Ce travail de recherche se termine par le développement d'un banc de mesures spécifique et la corrélation des caractérisations expérimentales avec le modèle élaboré. Les résultats obtenus montrent la validité des concepts mis en œuvre et permettent d'engager dès à présent le développement de détecteurs de présence statique.

Mots-clés : capteur thermopile, optronique, détection infrarouge passive, microsystème, micro-usinage volumique, modélisation analytique, électronique instrumentale, habitat intelligent.

Design, Realization and Characterization of Thermopile Infrared Sensors: Application for the Passive Presence Detection at Home

SUMMARY: Nowadays, the developments of systems related to the security and the monitoring of people are generally based on the use of mono-points pyrolectric commercial detectors. Those sensors, allowing the detection of an individual moving in the field, exhibit two main limitations: they are not capable to sense an immobile presence and they are unable to provide any extra information, such as the direction of motions and the estimation of distances. Our research work is related to the passive monitoring in the field of smart home applications. It aims at the development of new generations of infrared sensors. After studying the principal materials allowing infrared detection and taking into account the specifications established for our application, we have selected the thermopile thermoelectric technology as the sensor technological platform. According to the general recommendations concerning the "Top-down" design of the microsystems, we have carried out the analytical modeling of the overall infrared detection system before engaging the steps of design and realization. From this conceptual step, several structures (total of 180) in the shape of unit sensors, matrices and vehicles tests were fabricated. Finally, we have developed a specific automated testbench and correlated the experimental characterizations to the analytical model. The results obtained show the validity of the concepts implemented and make it possible to engage as of now the development of static presence detectors.

Keywords: thermopile sensor, optronic, passive infrared detection, microsystems, bulk micromachining, analytical modeling, instrumental electronics, smart home.