



# THESE

Présentée à

**L'Ecole Normale Supérieure**  
Département de Physique Appliquée

Par

**DERGUINI Nour-eddine**

Ingénieur d'état en électronique  
- U.S.T.H.B -

En vue de l'obtention du grade de  
**Magister en Physique Appliquée**

## THEME

**Modélisation et Simulation d'un Capteur Infrarouge Intégré  
sur Silicium à Base d'un Matériau PVDF et son Copolymère et  
Réalisation d'une Carte d'Acquisition à base d'un CPLD**

Soutenue le, 26 février 2007 devant le jury :

**F.BOUDJEMA**  
**A.GESSOUM**  
**A.MERAGHNI**  
**D.KENDIL**  
**E.BOUSBIAT**

**Professeur à l'ENP**  
**Professeur à l'USDB**  
**Maitre de conférences à l'ENS**  
**Maitre de conférences à l'ENS**  
**Maitre de conférences à l'ENS**

**Président**  
**Examinateur**  
**Examinateur**  
**Examinateur**  
**Directeur de thèse**

---

---

# SOMMAIRE

---

---

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>2</b>
------------------------------	----------

### CHAPITRE I

#### Infrarouge, Phénomène Physique et Détecteurs Pyroélectriques

<b>I.1- Introduction</b>	<b>8</b>
<b>I.2- Infrarouge</b>	<b>9</b>
<b>I.3- Exploitation du rayonnement infrarouge</b>	<b>10</b>
<b>I.4- Propriétés optique des infrarouges</b>	<b>11</b>
<b>I.5- Grandeurs physiques de rayonnement</b>	<b>11</b>
<b>I.6- Loi de rayonnement du corps noir</b>	<b>12</b>
- Loi de Planck	12
- Loi de Wien	14
<b>I.7- Calcul du flux reçue par le détecteur</b>	<b>15</b>
a)- L'émission de l'objet	15
b)- Flux entrant dans le système	16
c)- Flux émergeant de l'optique d'entrée	16
d)- Flux détecté	16
<b>I.8- Détecteurs pyroélectrique</b>	<b>18</b>
<b>I.9- La détection infrarouge</b>	<b>19</b>
9.1- Détecteurs quantiques	19
9.2- Détecteurs Thermiques	19
<b>I.10- Propriétés piézo et pyroélectriques des matériaux</b>	<b>20</b>
3.1- La piézoélectricité	20
3.2- La pyroélectricité	20
<b>I.11- Les matériaux ferroélectriques</b>	<b>21</b>
11.1- Définition	21

11.2- Polarisation	22
11.3- Polarisabilité	22
I.12- Caractéristique d'un matériau pyroélectrique	22
12.1- Différents matériaux pyroélectriques	23
12.2- Comparaison des propriétés des matériaux	23
I.13- Présentation du PVDF	24
13.1- Composition moléculaire du PVDF	24
13.2- Obtention de la phase utile du matériau	25
13.3- Technologie du capteur	25
13.4- Polarisation	26
13.4.1- Types de polarisation	26
13.4.2- Méthodes de polarisation	26
1- Polarisation par champ électrique continu	26
2- Polarisation par effet corona	27
3- Polarisation par Plasma	27
4- Polarisation par champ alternatif	27
13.5- Propriétés principales du PVDF	28
13.6- Effet de la polarisation sur la réponse pyroélectrique	28
I.14- Conclusion	29

## **CHAPITRE II**

### **Effet Pyroélectrique et les Sources de Bruit**

II.1- Effet Pyroélectrique	32
II.2- Le détecteur pyroélectrique	32
2.1- Le circuit thermique	33
2.2- Le circuit électrique	34
. Lecture en tension	35
. Lecture en courant	35
2.3- Sensibilité en tension et en courant	36
A/ Sensibilité en tension	36
B/ Sensibilité en courant	37
II.3- Problème de bruit	37

3.1- Définition et classification du bruit	37
3.2- Les principales sources de bruits	38
3.2.1- Bruit de radiation ou de température (radiation noise)	38
3.2.2- Bruit de Johnson	39
3.2.3- Bruit de l'amplificateur	39
3.2.4- Bruit total équivalent	40
II.4- Performances des détecteurs pyroélectriques	41
4.1- Sensibilité ( Responsivity )	42
4.2- La puissance équivalente en bruit ( N.E.P )	42
4.3- Eclairage équivalent au bruit	43
4.4- La détection	43
4.5- Détection spécifique $D^*$	43
4.6- Le temps réponse	44
II.5- Détermination des coefficients de mérite $F_i$ , $F_v$ , $F_d$	44
I I.6- Conclusion	45

## CHAPITRE III

### Dispositif de Détection IR et Model Pyroélectrique Multicouches

III.1- Introduction	48
III.2- Chaîne de détection	48
III.3- Montage du capteur sur circuit imprimé	49
III.4- Mesures et résultats	52
4.1-Appareillage	52
4.2- Principe de mesure	52
4.3- Manipulation	52
III.4- Bilan sur la détection IR passive à l'aide du matériau PVDF	54
III.5- Introduction au model pyroélectrique multicouche	55
III.6- Hypothèses	55
III.7- Résolution analytique de l'équation de la chaleur	56
7.1- Température moyenne dans couche pyroélectrique	57
7.2- Condition aux limites	57
III.8- Model généralisé pour une structure multicouche	58

<b>III.9-Analyse et approximations</b>	<b>61</b>
<b>III.10- Circuit électrique équivalent de la structure à "m" couches</b>	<b>63</b>
<b>III.11- Evaluation du model électrique</b>	<b>64</b>
<b>11.1- Model et Simulation du circuit pour plusieurs agencements</b>	<b>65</b>
<b>1) Couche pyroélectrique librement suspendue en l'air</b>	<b>65</b>
<b>2) Couche pyroélectrique déposée sur radiateur thermique</b>	<b>65</b>
<b>3) Couche pyroélectrique déposée sur substrat de silicium</b>	<b>66</b>
<b>4) Structure pyroélectrique / isolant thermique/ silicium</b>	<b>67</b>
<b>5) Structure pyroélectrique / isol ther/ silic /radia therm</b>	<b>68</b>
<b>6) Structure couche absorbante/ pyro / isolant / silicium</b>	<b>69</b>
<b>11.2- Analyse et discussion</b>	<b>70</b>
<b>III.12- Circuit de lecture</b>	<b>76</b>
<b>III.13- Conclusion</b>	<b>79</b>

## **CHAPITRE IV**

### **Réalisation d'une Carte d'Acquisition et Implémentation de l'architecture Dans un CPLD**

<b>V.1-Introduction</b>	<b>82</b>
<b>V.2 - Schéma synoptique de la chaîne d'acquisition</b>	<b>82</b>
<b>V.2.1- Principe de l'architecture de la carte</b>	<b>83</b>
<b>V.2.2- Système mixte pour La réalisation des cartes prototypes</b>	<b>83</b>
<b>V.3.1- Bus PCI (Peripheral Component Interconnect)</b>	<b>84</b>
<b>V.3.2- Bus ISA (Industry Standard Architecture)</b>	<b>84</b>
<b>V.4- Utilisation des Bus D'extensions</b>	<b>85</b>
<b>V.4.1- Signification des signaux</b>	<b>86</b>
<b>V.5- Adressage Des Périphériques</b>	<b>86</b>
<b>V.6- Conception Matérielle</b>	<b>87</b>
<b>V.6.1 – Généralités</b>	<b>87</b>
<b>V.6.2 - La technologie VHDL</b>	<b>88</b>
<b>V.7- Mise En Œuvre</b>	<b>88</b>

<b>V.7.1- Mécanisme De La Technique</b>	<b>89</b>
<b>V.7.2- Interfaçage Avec Les Périphériques d'E/S</b>	<b>90</b>
<b>V.4.2.3- Réalisation et fonctionnement</b>	<b>90</b>
<b>a- Décodage de la carte</b>	<b>90</b>
<b>b- Multiplexage Et Conversion Analogique Numérique</b>	<b>91</b>
<b>V.8- Application avec des Thermistances</b>	<b>93</b>
<b>V.8.1- Modèle de linéarisation</b>	<b>94</b>
<b>V.9- Programme Réalisé</b>	<b>95</b>
<b>9.1- Le Programme</b>	<b>95</b>
<b>9.2- Structure générale du programme</b>	<b>95</b>
<b>V.10- Testes et résultats</b>	<b>96</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>101</b>
<b>Annexes</b>	
<b>Annexe A1</b>	<b>105</b>
<b>Annexe A2</b>	<b>106</b>
<b>Annexe A3</b>	<b>107</b>
<b>Annexe A4</b>	<b>110</b>
<b>Annexe A5</b>	<b>111</b>
<b>Annexe B1</b>	<b>112</b>
<b>Annexe B2</b>	<b>113</b>
<b>Annexe B3</b>	<b>114</b>
<b>Annexe B4</b>	<b>115</b>
<b>Annexe C1</b>	<b>117</b>
<b>Annexe C2</b>	<b>119</b>
<b>Annexe D1</b>	<b>120</b>
<b>Annexe D2</b>	<b>121</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>126</b>

---

---

# **INTRODUCTION GENERALE**

---

---



### **INTRODUCTION GENERALE**

Les applications infrarouges ont été pendant longtemps l'apanage du domaine militaire qui demeure à ce jour leur principal pourvoyeur (70% des parts de marché). Avec la fin de la guerre froide, les grands groupes de défense confrontés à la baisse des budgets militaires s'intéressent de plus en plus au potentiel commercial pour consolider leurs activités. A ce titre la progression du marché commercial dans le domaine de l'infrarouge est très révélatrice. A titre indicatif seulement entre 1990 et 2000, la part du marché infrarouge commercial a progressé de 20% représentant actuellement plus de 30% du marché de l'infrarouge dont le montant global représente une somme dont l'ordre excède le 1 milliard de dollars US, ceci est du notamment à l'émergence de détecteurs non refroidis qui ont engendré une réduction notable des coûts.

Toutes les prévisions indiquent que les détecteurs infrarouges non refroidis vont imprimer une forte expansion à tout le marché infrarouge conduisant à un taux de croissance de l'ordre de 20% alors qu'il n'était que de 1% au début des années 90.

Ainsi la tendance ces dernières années est au développement de structures détectrices infrarouges non refroidies aussi bien sous forme de détecteurs unitaires que de matrices en ayant le souci constant d'améliorer leur sensibilité. Ceci conduira sans nul doute, dans les toutes prochaines années, à un bouleversement de la donne pour l'industrie infrarouge avec notamment de nouvelles applications civiles et grand public qui constituent un marché qui est en constante progression. Parmi les applications visées et qui sont porteuses nous citerons à titre d'exemple, la lutte contre les incendies, les systèmes de vision de nuit pour automobile, la maintenance préventive, le contrôle qualité, le suivi de process, les tests non destructifs, l'imagerie médicale, la surveillance, ...

La détection infrarouge fait appel à différentes technologies. Celles-ci ont généré plusieurs types de détecteurs infrarouges qui couvrent une grande gamme du spectre électromagnétique allant du proche infrarouge (0.8-2 $\mu$ m) jusqu'au lointain infrarouge (20-400 $\mu$ m). Les progrès les plus significatifs dans le domaine de la détection infrarouge ont été possibles grâce à des matériaux pouvant travailler à la température ambiante. Des systèmes de détection infrarouge sans refroidissement, compact, portable et de coût réduit sont devenus aujourd'hui une réalité. Cette évolution est principalement due au développement des détecteurs thermiques.

## Introduction générale

---

Les détecteurs thermiques tels que les thermopiles, les bolomètres ou les détecteurs pyroélectriques, mesure la variation d'une propriété physique de l'élément actif induite par la variation de sa température. Cette dernière étant quant à elle provoquée par l'absorption du rayonnement infrarouge. Les détecteurs thermiques peuvent être utilisés non refroidis et sont de ce fait compacts et peu coûteux. De part leur nature ils ont une réponse constante sur une large gamme de longueurs d'ondes. Cependant, les détecteurs thermiques présentent une plus faible sensibilité et un temps de réponse plus lent comparativement aux détecteurs photoniques ou quantiques. Ils sont à ce titre destinés à une certaine niche d'applications.

Dans la famille des détecteurs thermiques nous retiendrons principalement les bolomètres et les détecteurs pyroélectriques ferroélectriques.

Les *microbolomètres* qui ont connu ces dernières années une avancée significative utilisent un film absorbant sensible à la chaleur et dont la résistance varie avec la température. Le film détecteur est principalement à base d'oxyde de vanadium  $V_{2}O_5$  suspendu par deux fines branches qui assurent son isolation thermique mais qui servent aussi de contacts métalliques. Ils présentent aujourd'hui les performances les plus élevées parmi les détecteurs non refroidis. C'est ainsi qu'ils peuvent détecter des variations de températures de l'ordre de 20mK avec une optique  $f/1$ .

Les détecteurs pyroélectriques, dont le principe de fonctionnement est basé sur la variation de leur polarisation rémanente provoquée par la variation de température suite à l'absorption du rayonnement thermique émanant de la cible. Comme ces détecteurs ne réagissent qu'avec une variation du rayonnement incident ils doivent donc être utilisés muni d'un chopper. Les détecteurs pyroélectriques ont atteint des sensibilités inférieures à 40mK avec une optique  $f/1$ . De manière générale leur sensibilité moyenne est de l'ordre de 70 à 80 mK. Parmi les matériaux ferroélectriques utilisés pour ce type de détecteurs nous citerons les cristaux ferroélectriques (TGS, DTGS,  $LiTaO_3$ , ..), les céramiques ferroélectriques telles que (BST, PZT, PZFN, PZNTU, . . .) et enfin les polymères ferroélectriques (PVDF, P(VDF-TrFE)). Ce sont toutefois le titanate de baryum strontium (BST) et le titanate de plomb zircon (PZT) qui sont les matériaux les plus utilisés.

Cependant, si les polymères ferroélectriques ont été préférés par rapport aux céramiques et les cristaux ferroélectriques cela étant dû principalement à leur fabrication compatible avec la technologie des semi-conducteurs, à leur faible

## Introduction générale

---

diffusivité thermique qui est un atout dans la réalisation de matrice mais aussi pour leur faible coût.

A ce propos, il nous a été confié la modélisation et simulation d'un capteur infrarouge intègre silicium à base d'un matériau PVDF et son copolymère et réalisation d'une carte d'acquisitions. Ce travail est reparti en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une étude théorique des phénomènes physiques du rayonnement des corps, et les considérations du trajet atmosphérique et optique emprunté par le rayonnement thermique, entre la source et le détecteur ainsi que l'évaluation du flux arrivant sur le capteur au terme de ce parcours. Le capteur en question dont le matériau le constituant existe sous différentes natures, ce qui nous conduit à effectuer une étude comparative des détecteurs IR , on introduisant la présentation du PVDF, et la comparaison des différentes propriétés physiques et les paramètres entrant dans la performance des détecteurs pyroélectriques.

Le second chapitre traite le comportement du capteur face aux variations de température ; et s'intéresse éventuellement au problème de bruits intrinsèque et extrinsèque du détecteur ; orientant ainsi la conception du dispositif de détection sa réalisation, faisant l'objet du troisième chapitre dont la première partie est constituée :

Du montage de l'élément capteur à partir d'une membrane PVDF et la réalisation du circuit de traitement de signal. La validation avec une présentation des résultats et tests de mesures. Pour ensuite entamer la seconde partie qui consiste en la modélisation et la simulation de la structure pyroélectrique multicouche sur silicium, on optant pour une configuration optimale, celle qui donne une meilleure réponse, on lui correspondant l'équivalent en circuit électrique, déduit à partir du modèle générale que nous avons développé, employé pour l'orienter les caractéristiques du circuit de lecture, envisageable, pour un mono-élément et éventuellement pour barrette linéaire ou matrice.

Le dernier chapitre consiste en la réalisation d'une carte d'acquisition des signaux pouvant être issue de la barrette ou la matrice IR, cette carte communique les informations via le PC , et ce à base d'une architecture implémentée dans un CPLD.

Enfin une conclusion générale clôturera notre thèse.