

13/95

MINISTRE D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

**- SUJET -**

UNE NOUVELLE GENERATION DE  
CAPTEUR POUR LA DETECTION  
INFRAROUGE A BASE D'UN POLYMERE  
POLAIRE

PROPOSE PAR :

M. D. KENDIL  
M. E. BOUSBIAT  
M. M. BOUSBIAT  
M. A. HASSANI  
M. A. BENBELKACEM

ETUDIE PAR :

M. F. ZEGHIDI  
M. O. OUDAINIA

DERIGE PAR :

M. D. KENDIL

PROMOTION JUIN 1995



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

**- SUJET -**

UNE NOUVELLE GENERATION DE  
CAPTEUR POUR LA DETECTION  
INFRAROUGE A BASE D'UN POLYMERE  
POLAIRE

PROPOSE PAR :

M. D. KENDIL  
M. E. BOUSBIAT  
M. M. BOUSBIAT  
M. A. HASSANI  
M. A. BENBELKACEM

ETUDIE PAR :

M. F. ZEGHIDI  
M. O. OUDAINIA

DERIGE PAR :

M. D. KENDIL

PROMOTION JUIN 1995

## DEDICACES

**J**e dédie ce travail,

**A** ma très chère mère, faible témoignage de mon affection et mon profond dévouement pour tous ses sacrifices.

**A** mon très cher père, qui a toujours su me conseiller, m'encourager, m'appuyer, lui la source de ma réussite.

**A** mes frères et soeurs, surtout mon frère aîné Toufik et ma soeur Sara.

**A** toute la famille Zeghidi.

**A** tous mes amis.

## DEDICACES

**A** *la mémoire de mon très cher père .*

**A** *ma très chère mère.*

**A** *tous mes frères et soeurs.*

**A** *mon frère aîné Mohamed.*

**A** *Monsieur NECHE Ahmed.*

**A** *Monsieur MEDJED Ahmed.*

**A** *Monsieur SAIKI Hocine.*

**A** *tous mes amis.*

**J** *e dédie ce travail,*

OUDAINIA

## AVANT PROPOS

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au laboratoire de physique, de l'école Normale Supérieure d'Alger (Kouba) (ENS).

Nous tenons à exprimer notre profonde et respectueuse gratitude à Monsieur BELLAL Tahar Directeur de l'école Normale supérieure de Kouba, de nous avoir accueilli dans son établissement.

Il nous est particulièrement agréable d'exprimer notre vive reconnaissance à Monsieur HADADI, Chargé de cours à l'Ecole Nationale Polytechnique, Département Electronique qui malgré ses lourdes charges, à bien voulu s'intéresser à notre travail et accepter de nous aider. Nous sommes très heureux de lui exprimer ici toute notre reconnaissance.

Nous tenons à remercier, tout particulièrement Monsieur KENDIL Jamel, Chargé de cours à l'école Normale Supérieure de Kouba, Département de Physique, de nous avoir proposé ce sujet. Nous tenons à lui faire part de notre profonde gratitude pour son aide incessante, son soutien et ses conseils tout au long de notre travail.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à Monsieur BENBELKACEM Abdelhalim, Chargé de cours à l'école Normale Supérieure de Kouba, Département de Physique. Nous le remercions pour les discussions que nous avons eues avec lui, pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail.

Nous sommes très reconnaissants à Monsieur ESSAID BOUSBIAT, Chargé de cours à l'école Normale Supérieure de Kouba, Département de Physique, pour son aide efficace et son expérience. Nous le remercions particulièrement pour ses conseils qui ont largement contribué à l'aboutissement de notre travail. Nous avons toujours trouvé sa porte ouverte ce qui nous a beaucoup aidé.

Nous témoignons notre connaissance à Monsieur HINI chargé de cours à USTHB, département d'électronique (TS), pour son aide efficace et son expérience.

Nous témoignons notre reconnaissance aux membres du jury, qui nous ont fait l'honneur d'accepter de participer au jury de thèse, qu'ils trouvent ici l'expression de notre vive reconnaissance. Nous ne saurions terminer cet avant-propos sans remercier ceux qui nous ont apporté leur aide.

Nous exprimons nos respectueux remerciements à Monsieur ZEGHIDI Mohamed, Directeur de l'administration Générale (APN), pour avoir mis à notre disposition les moyens nécessaires et nous a aidé dans notre travail. Nous lui exprimons ici, nos vifs remerciements pour les discussions que nous avons eues avec lui.

Une part importante du travail présenté dans ce mémoire n'aurait pu être menée à bien sans l'aide de Monsieur BENZERFA Moussa Directeur du bureau d'études BERTEL Consulting Riadh El Feth, avec qui nous avons souvent eu le plaisir de travailler sur le matériel pour déterminer les performances de notre détecteur. Ses compétences et son savoir nous ont été d'une aide précieuse. Nous tenons à lui témoigner notre profonde reconnaissance et nous le remercions vivement pour son aide efficace et son expérience.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à Madame MAKHLOUF Rahima Professeur de Maths au lycée de Chéraga, qui a accepté malgré ses multiples charges de nous aider dans la rédaction du manuscrit, qu'elle soit assurée de toute notre gratitude.

Comme nous remercions tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin pour réaliser ce travail.

## UNE NOUVELLE GENERATION DE CAPTEUR POUR LA DETECTION INFRAROUGE A BASE D'UN POLYMERE POLAIRE

D. Kendil, E. Bousbiat, A. Hassani, A. Benbelkacem  
Ecole Normale Supérieure d'Alger Vieux Kouba  
Département de physique

O. Oudaïnia, F. Zeghidi

Ecole Nationale polytechnique, d'El Harrach Alger

**Résumé** : L'importance de la détection infrarouge active n'est plus à démontrer car elle intéresse a priori des domaines aussi divers que l'aéronautique, l'espace, la médecine, l'industrie du bâtiment, l'argonome, le nucléaire, etc... Pour n'en citer que quelques uns. Mais se sont surtout les militaires qui ont été longtemps les plus gros consommateurs d'infrarouge, faisant appel essentiellement aux détecteurs quantiques à semiconducteurs pour obtenir des performances élevées. L'infrarouge n'a pénétré que progressivement le secteur industriel car le coût élevé des détecteurs à semiconducteurs et leur fonctionnement à basse température (nécessite une source de refroidissement pour porter le semi-conducteur à sa température de fonctionnement 77°K) représentaient initialement des freins rédhibitoires, à quelques exceptions près. Ceci explique certainement l'intérêt porté pour les applications civiles aux détecteurs pyroélectriques qui au moins travaillaient à température ambiante, sensible aux radiations depuis les rayons X, jusqu'à l'infrarouge lointain et permettaient certaines réalisations de coûts abordables. Ceci a entraîné également certains laboratoires à étudier de nouveaux matériaux pyroélectriques, à côté des céramiques classiques, tels que : les polymères polaires. Le polyvinylidène bifluoré appelé le plus souvent PVF2 ou PVDF a été choisi dans ce domaine. Ce matériau de type plastique se présente sous forme de feuilles de 6 à 100 µm d'épaisseurs, il acquiert des propriétés piézo et pyroélectrique remarquables, lorsqu'il a été soumis à une action d'un champ électrique élevé, qui lui confère une polarisation permanente. C'est la raison pour laquelle nous voulons tirer profit de ces caractéristiques pour une application de la détection.

En effet, il est possible de détecter le mouvement d'une personne ou d'un objet dont la température est légèrement différente de celle de son environnement en utilisant un détecteur pyroélectrique et ce, sur des distances allant jusqu'à un Kilomètre. En effet la détection pyroélectrique est basée sur l'absorption d'une radiation incidente infrarouge qui produit une élévation de température  $\Delta T$  dans l'élément et donc en modifie le moment dipolaire, induisant un signal proportionnel à cette variation  $\Delta T$  que l'on peut recueillir sur une charge.

Notons que les ensembles réalisés sont purement passifs, puisqu'aucune autre source que l'objet à détecter n'est nécessaire, et leur consommation est réduite. De même les capteurs utilisés ne sont sensibles qu'aux variations de la température et font ainsi automatiquement la distinction entre mobile ou stationnaire. Le travail que nous présentons comportera trois parties essentielles. i) La première partie sera consacré à l'étude théorique sur les capteurs, en particulier sur la recherche d'une meilleure sensibilité, détectivité...etc. ii) La deuxième partie sera consacré à la conception et la réalisation de carte sur laquelle sera implanté : le circuit de l'amplification, le capteur I.R., l'optique de focalisation, le circuit de déclenchement,...etc. iii) Dans la troisième partie, nous présenterons : Les résultats des différents essais effectués, validation des résultats obtenus, les performances « la portée de détection du système, la sensibilité,...etc ».

Référence :

/1/ Essaïd Bousbiat, J. Simone  
Réalisation et caractérisation de systèmes intégrés pyroélectriques mono - élément (LAAS/CNRS N°91122 Fev 1991

/2/ Essaïd Bousbiat, J. Simone, Daniel Estève (LAAS/CNRS)  
Modélisation et réalisation de nouvelles structures hétérogènes de détecteurs infra-rouge Si/PVF2 LAAS/CNRS (non diffusable).

# SOMMAIRE

<b><u>INTRODUCTION GENERALE</u></b>	<b>1</b>
<b><u>CHAPITRE I : ETUDE GENERALE DES DETECTEURS PYROELECTRIQUES</u></b>	<b>3</b>
<b>I.1. INTRODUCTION :</b>	<b>3</b>
<b>I.2. DETECTEURS INFRAROUGES :</b>	<b>4</b>
<b>I.2.1. DEFINITION :</b>	<b>4</b>
<b>I.2.2. CLASSIFICATION DES DETECTEURS :</b>	<b>4</b>
<b>I.2.3. DETECTEURS PYROELECTRIQUES :</b>	<b>5</b>
<b>I.2.3.1. PIEZOELECTRICITE :</b>	<b>5</b>
<b>I.2.3.2. SUBSTANCE FERRO ELECTRIQUE :</b>	<b>5</b>
<b>I.2.3.3. POLARISATION ELECTRIQUE P :</b>	<b>5</b>
<b>I.2.3.4. EFFET PYROELECTRIQUE :</b>	<b>6</b>
<b>I.2.3.5. MATERIAUX PYROELECTRIQUE :</b>	<b>6</b>
<b>I.2.3.6. COMPARAISON DES PROPRIETES DES MATERIAUX :</b>	<b>7</b>
<b>I.2.3.7. PRESENTATION DU PVDF.</b>	<b>7</b>
<b>I.2.3.7.1. HISTORIQUE :</b>	<b>7</b>
<b>I.2.3.7.2. MATERIAUX ET MOLECULE :</b>	<b>8</b>
<b>I.2.3.7.3. OBTENTION DU MATERIAUX :</b>	<b>8</b>
<b>I.2.3.7.4. POLARISATION :</b>	<b>8</b>
<b>I.2.3.7.5. DESCRIPTION DU PHENOMENE :</b>	<b>10</b>

<b>I.2.4. DETECTION PYROELECTRIQUE :</b>	<b>11</b>
<b>I.2.4.1. EQUATION DE BASE :</b>	<b>11</b>
<b>I.2.5. SENSIBILITES EN COURANT ET EN TENSION :</b>	<b>15</b>
<b>I.2.5.1. SENSIBILITE EN COURANT :</b>	<b>16</b>
<b>I.2.5.2. SENSIBILITE EN TENSION :</b>	<b>17</b>
<b>I.2.5.3. PUISSANCE EQUIVALENTE AU BRUIT :</b>	<b>18</b>
<b>I.2.5.4. DETECTIVITE :</b>	<b>19</b>
<b>I.3. PERFORMANCE DES DISPOSITIFS :</b>	<b>19</b>
<b>I.3.1. CALCUL DU COEFFICIENT PYROELCTRIQUE :</b>	<b>19</b>
<b>I.3.2. DETERMINATION DES COEFFICIENTS DE MERITE, FI, FV, FD</b>	<b>20</b>
<b>I.3.1.3. SENSIBILITE :</b>	<b>21</b>
<b>I.3.1.4. DIRECTIVITE :</b>	<b>21</b>
<b>I.3.1.5. PORTEE :</b>	<b>21</b>
<b>I.3.1.6. TEMPS DE REPONSE :</b>	<b>21</b>
<b>I.4. CONCLUSION :</b>	<b>22</b>
<b><u>CHAPITRE II : ETUDE GENERALE D'UN DISPOSITIF</u></b>	
<b>INFRAROUGE</b>	<b>23</b>
<b>II.1 INTRODUCTION :</b>	<b>23</b>
<b>II.2 DESCRIPTION DES DISPOSITIFS :</b>	<b>24</b>
<b>II.2.1. BOITIER :</b>	<b>24</b>
<b>II.2.2. OPTIQUE :</b>	<b>24</b>
<b>II. 2.3. CAPTEUR PYROELECTRIQUE :</b>	<b>29</b>

<b>II. 2.4. CIRCUIT DU TRAITEMENT DE SIGNAL :</b>	<b>29</b>
<b>II.3. LES DIVERSES APPLICATIONS :</b>	<b>29</b>
<b>II. 3.1. ACOUSTIQUE :</b>	<b>29</b>
<b>II. 3.1.1. MICROPHONES :</b>	<b>30</b>
<b>II. 3.1.2. HYDROPHONES :</b>	<b>30</b>
<b>II. 3.1.3. CAPTEURS MEDICAUX :</b>	<b>30</b>
<b>II. 3.2. GENERATEURS DE VIBRATIONS :</b>	<b>30</b>
<b>II. 3.3. COMPTAGE :</b>	<b>30</b>
<b>II. 3.4. MESURE DE SURFACE :</b>	<b>31</b>
<b>II. 3.5. ANALYSE DE GAZ :</b>	<b>31</b>
<b>II. 3.6. MESURE DE TEMPERATURE :</b>	<b>31</b>
<b>II. 3.7. ALARME :</b>	<b>31</b>
<b>II. 3.8. UN SYSTEME D'IMAGERIE INFRAROUGE :</b>	<b>31</b>
<b>II. 4. CONCLUSION :</b>	<b>32</b>
<b><u>CHAPITRE III : ANALYSE DU CIRCUIT DU TRAITEMENT</u></b>	
<b>DE SIGNAL</b>	<b>33</b>
<b>III.1. INTRODUCTION :</b>	<b>33</b>
<b>III.2. CIRCUIT DU TRAITEMENT DE SIGNAL :</b>	<b>34</b>
<b>III.2.1. CIRCUIT DE PREAMPLIFICATION ET DE FILTRAGE :</b>	<b>34</b>
<b>III.2.1.1. IDENTIFICATION DES COMPOSANTS :</b>	<b>35</b>
<b>III.2.1.2. DESCRIPTION D'ENSEMBLE ET FONCTIONNEMENT :</b>	<b>35</b>
<b>III.2.1.2.1. CALCUL DE LA CELLULE AMPLIFICATRICE :</b>	<b>38</b>

<b>III.2.1.2.2 CALCUL DE FILTRE PASSE BAS DU 2EME ORDRE :</b>	<b>40</b>
<b>II .2.2. CIRCUIT DE TRAITEMENT ET DU DECLENCHEMENT :</b>	<b>42</b>
<b>III .2.2.1 IDENTIFICATION DES COMPOSANTS:</b>	<b>42</b>
<b>III.2.2.2. DESCRIPTION D'ENSEMBLE ET FONCTIONNEMENT :</b>	<b>42</b>
<b>III.3. PROBLEME DE BRUIT :</b>	<b>45</b>
<b>III.3.1. DEFINITION ET CLASSIFICATION DES BRUITS :</b>	<b>45</b>
<b>III.3.1.1. BRUIT D'ORIGINE EXTERIEURE:</b>	<b>45</b>
<b>III .3.1.2 BRUIT D'ORIGINE INTERIEURE</b>	<b>45</b>
<b>III .3.2. ELEMENTS DES CIRCUITS ELECTRONIQUES SUSCEPTIBLES DE</b>	
<b>CREER DES BRUITS :</b>	<b>46</b>
<b>III.3.2.1. LES SOURCES D'ALIMENTATION :</b>	<b>46</b>
<b>III.3.2.2. LES CAPACITES :</b>	<b>46</b>
<b>III 3.2.3. LES RESISTANCES :</b>	<b>47</b>
<b>III 3.2.4. LES DIODES ET LES TRANSISTORS :</b>	<b>48</b>
<b>III. 3.2.5. CIRCUITS INTEGRES :</b>	<b>48</b>
<b>III. 4 - CONCLUSION :</b>	<b>49</b>
<b><u>CHAPITRE IV : MESURES ET PERFORMANCES</u></b>	<b>50</b>
<b>IV.1. MESURES DES CARACTERISTIQUES PRINCIPALES :</b>	<b>50</b>
<b>IV.1.1. MESURES AVEC LE PVDF :</b>	<b>50</b>
<b>IV.1.2. MESURES AVEC LE LHI954 :</b>	<b>54</b>
<b>IV.2. CONCLUSION :</b>	<b>56</b>
<b><u>CONCLUSION GENERALE :</u></b>	<b>57</b>

**INTRODUCTION**  
**GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE :

Tout corps porté à une température différente du zéro absolu, plongé dans l'atmosphère terrestre, émet, absorbe et réfléchit le rayonnement infrarouge de façon caractéristique ne serait-ce que parce que la sensibilité de l'oeil ne permet pas la vision directe de ce rayonnement.

Le spectre de l'infrarouge se subdivise en quatre parties :

- 1) Proche du rouge
- 2) Moyen
- 3) Lointain
- 4) Très lointain

Les deux dernières parties correspondent au rayonnement de chaleur [1].

L'intérêt de cette bande spectrale vient de ce qu'elle représente le seul domaine de longueur d'onde où le rayonnement émis provient directement en photons, alors que les images du spectre naturel visible sont produites essentiellement par réflexion de la lumière solaire ou artificielle.

La première naissance de la détection est alors réalisée dans le semi-conducteur intrinsèque pour effectuer le traitement de l'information.

Malgré les bons résultats obtenus, les problèmes du coût élevé pour la mise en oeuvre d'une part, et d'autre part la nécessité de l'utilisation d'une source de refroidissement pour porter le semi-conducteur à sa température de fonctionnement (77°K), restent toujours posés.

Ces deux inconvénients constituent un obstacle majeur pour beaucoup d'applications, c'est pourquoi depuis des années les recherches se sont orientées vers des matériaux qui ont un caractère moins noble que les semi-conducteurs (les isolants).

Si les diélectriques entrent couramment dans la composition des composants passifs, tels que les conducteurs, il en est une catégorie la plus connue étant les céramiques qui, lorsqu'elle est polarisée de façon permanente, donne naissance à des composants actifs parmi lesquels les capteurs pyroélectriques.

Ces derniers ont déjà trouvé leurs applications depuis longtemps, ils sont certainement moins sensibles que les semi-conducteurs, cependant, leur coût est moins onéreux et fonctionnent à température ambiante.

Les monocristaux, certains composés organiques et les céramiques polycristallines sont encore les matériaux pyroélectriques les plus utilisés pour de telles applications.

Cependant, ils présentent tous des inconvénients : par exemple une température de curie faible, ou une constante diélectrique élevée, ou encore de grandes difficultés de mise en oeuvre, et ceci explique la recherche d'autres solutions.

Ce n'est que depuis une vingtaine d'années que la découverte d'un polymère semi-cristallin, le polyfluorure de vinylidène (**PVDF**) a suscité de réelles espérances dans le domaine de la détection infrarouge.

Ce matériau de type plastique présente après étirage mécanique et application d'un champ électrique des propriétés piézo-électriques et pyroélectriques remarquables. Aussi ce matériau qui ne nécessite pas de refroidissement, il présente une grande stabilité dans le temps, de bonnes caractéristiques électriques et mécaniques, aussi il peut s'utiliser sous la forme d'une matière synthétique fine et thermoformable.

Voulant profiter des propriétés piézo-électriques et pyroélectriques de ce matériau, moins noble et plus abondant que les semi-conducteurs et les céramiques, visant des applications technologiques dont le monopole revient souvent aux détenteurs des technologies modernes, le département de physique de l'école Normale Supérieure d'Alger a ouvert un nouveau projet de recherche en technologie des capteurs à base de **PVDF** et ses copolymères. Dans un premier temps, à viser une application particulière : les détecteurs pyroélectriques et, dans un second lieu, de prouver la faisabilité d'une substitution détecteurs de type plastique, bon marché, aux détecteurs à semi-conducteurs ou à céramiques, coûteux et nécessitant parfois des refroidissements.

Cette vue synoptique de notre progression nous permet maintenant de justifier le découpage de notre travail selon quatre principaux chapitres.

Nous rappelons dans le premier chapitre les propriétés générales des détecteurs pyroélectriques.

Il permet dans un premier temps de classer les différents types des détecteurs, ensuite nous allons rappeler la généralité de la piézo-électricité etc..., d'autre part, de situer le **PVDF** par rapport à d'autres matériaux pyroélectriques en explicitant tous ses avantages et ses inconvénients.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude générale d'un détecteur infrarouge; description générale de la structure puis les différentes applications du matériau.

Le troisième chapitre concerne l'analyse du circuit du traitement de signal. Nous étudions d'une part, la partie amplification et déclenchement et, d'autre part, nous essaierons de traiter le problème du bruit.

Le quatrième chapitre expose les tests effectués et les conclusions déduites concernant les limites d'utilisation de notre dispositif infrarouge.

# **CHAPITRE I**

## **CHAPITRE I : ETUDE GENERALE DES DETECTEURS PYROELECTRIQUES**

### **I.1. INTRODUCTION :**

La détection pyroélectrique est basé sur l'absorption d'une radiation infrarouge incidente (thermique) par un matériau. Cette absorption produit une augmentation de température qui induit une variation de la charge électrique de surface du matériau [4].

Ainsi le signal de sortie recueilli aux bornes du matériau est proportionnel à cette variation de température et non à la température elle-même. Cette description de principe n'est que phénoménologique pour en comprendre le mécanisme physique, il est d'abord nécessaire de définir les propriétés des diélectriques polarisés.

Dans une première partie de ce chapitre, nous essaierons, de classer les différents types des détecteurs infrarouges ensuite nous développerons l'étude des détecteurs pyroélectriques où nous citerons quelques définitions comme la piézoélectricité, la pyroélectricité, la polarisation électrique.

Nous traitons par la suite le problème de sensibilité en courant, en tension et nous donnerons les équations de base de cette détection. Enfin nous présenterons les performances d'un tel dispositif.

## **1.2. DETECTEURS INFRAROUGES :**

### **1.2.1. DEFINITION :**

Les détecteurs de rayonnement sont des organes chargés de transformer un signal optique incident (Fonction spatio-temporelle  $\Phi(x,y,t)$  qui peut être un flux, un éclairage, ou toute autre grandeur traduisant une énergie lumineuse) en une information accessible à nos sens que l'on peut stocker

L'information d'entrée étant l'excitation et l'information de sortie la réponse électrique ou thermique [2].

### **1.2.2. CLASSIFICATION DES DETECTEURS :**

La mission des détecteurs infrarouges est d'assurer la transformation d'un rayonnement infrarouge en variation de température laquelle provoque l'apparition d'un courant électrique.

Ces détecteurs se subdivisent en deux catégories.

1. Les détecteurs quantiques
2. Les détecteurs thermiques

#### **1. LES DETECTEURS QUANTIQUES :**

Sont des semi-conducteurs dans lesquels l'absorption de l'énergie du rayonnement infrarouge se manifeste de façon très diverse et se traduit par quatre effets principaux :

- a. Effet photoémissif
- b. Effet photoconducteur
- c. Effet photovoltaïque
- d. Effet photomagnétique

Ces détecteurs sont sélectifs, c'est à dire qu'il ne répondent que dans une zone du spectre infrarouge.

L'avantage des détecteurs quantiques; possèdent un temps de réponse court.

#### **2. LES DETECTEURS THERMIQUES :**

Dans les détecteurs thermiques, l'absorption du rayonnement infrarouge par le réseau atomique est transformée en chaleur, c'est à dire en agitation thermique répartie plus au moins uniformément dans toutes les particules du corps. Les détecteurs thermiques non sélectifs présentent comme inconvénient une grande constante de temps (temps de réponse long).

### **1.2.3. DETECTEURS PYROELECTRIQUES :**

Le principe de son fonctionnement est le suivant :

La variation d'un rayonnement incident absorbé par le matériau provoque une élévation de température  $\Delta T(t)$  de celui-ci et engendre une modification de son état polaire qui induit, par variation de charges des électrodes, un signal pyroélectrique.

Le signal de sortie est proportionnel à la variation de la température du matériau.

#### **1.2.3.1. PIEZOELECTRICITE :**

La piézoélectricité est la propriété que présentent certains matériaux cristallins de se charger électriquement lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique.

L'effet piézo-électrique résulte de la déformation de la structure cristalline, ce qui a pour effet de modifier les modules des moments dipolaires élémentaires.

Pour des matériaux qui possèdent une polarisation non nulle à l'état naturel, la définition précédente ne s'applique plus. Nous définissons alors la piézo-électricité comme étant la variation de cette polarisation en réponse à la contrainte appliquée.

L'effet piézo-électricité est réversible.

#### **1.2.3.2. SUBSTANCE FERRO ELECTRIQUE :**

Un ferro électrique est un diélectrique présentant une polarisation rémanente et appartenant à un groupe pyroélectrique; polarisation rémanente qui peut être renversée par application d'un champ électrique.

#### **1.2.3.3. POLARISATION ELECTRIQUE P :**

Le moment dipolaire associé à deux charges ponctuelles de signes opposés  $(+q, -q)$  séparées par la distance "L" est un vecteur dirigé de la charge négative vers la charge positive de module :  $|M| = qL$

On définit la polarisation électrique **P** d'un élément de volume **dv** du matériau par la relation suivante :

$$S_m = P \cdot dv$$

Dans laquelle **S<sub>m</sub>** est la somme des moments dipolaires unitaires dans l'élément de volume **dv** considéré. La polarisation **P** est exprimée en  $[C/m^2]$ .

#### **1.2.3.4. EFFET PYROELECTRIQUE :**

La détection pyroélectrique est fondée sur la propriété qu'ont certains corps ferroélectriques de présenter une polarisation électrique spontanée variant avec la température. L'effet pyroélectrique consiste en la variation d'amplitude du moment dipolaire dans une maille cristalline sous l'effet d'un changement de température, se traduisant par l'apparition de charges électriques sur les faces polaires du matériau.

L'effet pyroélectrique est donc la conséquence de la variation du moment dipolaire du matériau sous l'effet d'une différence de température.

#### **1.2.3.5. MATERIAUX PYROELECTRIQUE :**

Une substance pyroélectrique est caractérisée par une polarisation électrique spontanée **P** qui est une fonction de la température.

Du fait de sa polarisation, une plaquette pyroélectrique porte sur chacune de ses deux surfaces opposées, d'aire **A** et perpendiculaire à (**P**), des charges électriques **Q = A.S**.

Dont les densités **S**, de signes contraires sur chacune des faces, sont égales à (**+P**) (la polarisation électrique).

Ces charges liées créent un champ électrique interne qui, par le déplacement des charges libres qu'il entraîne, aboutit à la neutralisation de la charge superficielle. La variation thermique de la polarisation autour d'une température donnée est définie par le coefficient pyroélectrique.

$$\lambda = \frac{dp}{dt} \cdot [\lambda] \equiv \left[ \frac{c}{m^2 K^o} \right]$$

La pyroélectricité ne peut apparaître que dans les matériaux dont le réseau cristallin n'a pas de centre de symétrie mais axes polaire qui est la direction de la polarisation spontanée.

Les principaux matériaux pyroélectriques sont :

1. Les monocristaux du type tantalate de lithium (**LiTaO3**).
2. Le composé organique : Le sulfate de glycolle (**TGS**) **[(NH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>COOH)<sub>3</sub>]**
3. Les céramiques polycristallines du type titanate zirconite de plomb (**PZT**).  
**[(pb,Zr)TiO3]**
4. Les polymères orientés du type poly-fluorure de vinylidene (**PVDF**)  
**[(CH<sub>2</sub>-CF<sub>2</sub>)<sub>n</sub>, n=(1000,1200)]**

### 1.2.3.6. COMPARAISON DES PROPRIETES DES MATERIAUX :

Un bon matériau pyroélectrique devra avoir les qualités suivantes :

1. Un coefficient pyroélectrique  $\lambda$  important.
2. Une constante diélectrique  $\epsilon r$  faible.
3. Une résistivité  $\rho$  importante.
4. Une capacité calorifique  $C_v$  faible.
5. Une température de curie  $T_c$  le plus élevé possible.

Le tableau suivant résume les caractéristiques comparées de ces matériaux [6]. [7]. [8]. [9]

MATERIAUX	$\lambda$ [n.C.cm <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]	$\epsilon r$	$\rho$ [ $\Omega$ .cm]	$C_v$ [J.c.m <sup>-3</sup> .K <sup>-1</sup> ]	$T_c$
TGS	30	30	10 <sup>10</sup>	2.5	40
PZT	170	3700	1.6.10 <sup>7</sup>	2.6	100
LiTaO3	17			3.2	618
PVDF	3	13	2.10 <sup>12</sup>	2.4	100

En comparaison, le **PVDF** malgré une réponse pyroélectrique (**Coef  $\lambda$** ) 10 fois plus faible que le **TGS**, peut apparaître cependant comme un matériau pyroélectrique plus intéressant que **TGS**. Le **PVDF** est réalisable sous la forme de feuilles de grande surfaces à partir d'épaisseur de quelque microns, ce qui le rend aisé à l'utilisation. Il est souple, peu sensible aux agents chimiques, d'une remarquable stabilité dans le temps. Sa température de curie est très élevée ce qui représente un atout considérable pour un détecteur pyroélectrique.

Un dernier aspect loin d'être négligeable l'orsqu'on recherche des applications industrielles, est son faible coût.

### 1.2.3.7. PRESENTATION DU PVDF.

#### 1.2.3.7.1. HISTORIQUE :

La chaîne organique du **PVDF** a été mis en évidence en 1936 par LANDAU. En 1969, M.KAWAI (Institut Kubayashi, Tokyo), à découvert un fort coefficient piézo-électrique. Ses propriétés pyroélectriques ont été mises en évidence en 1971 par BERGMAN.

Depuis, de nombreuses études sont effectuées sur le **PVDF**.

### **1.2.3.7.2. MATERIAUX ET MOLECULE :**

Le **PVDF** est un polymère thermoplastique semi-cristallin qui se présente sous forme d'un film transparent de 6 à 1000  $\mu\text{m}$  d'épaisseur dont deux appellations sont possibles:

1. Anglaise : Le polyvinylidène fluoride
2. Française : Le polyfluorure de vinylidène

Ce polymère possède quatre phases  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  et  $\alpha\text{p}$ .

La présence de l'une ou de l'autre de ces phases dépend de la méthode de polymérisation et de l'histoire thermique et mécanique du **PVDF**.

Le caractère polaire du **PVDF** vient tout d'abord de la dissymétrie ionique créée au niveau du monomère. Un carbone porte deux hydrogènes, l'autre carbone porte deux atomes de fluor.

Sa molécule est :  $[\text{CH}_2 - \text{CF}_2]_n$  , Avec  $n$  variant de 1000 à 1200.

La molécule du polymère prend généralement la forme :

...-CH<sub>2</sub> - CF<sub>2</sub> - CH<sub>2</sub> - CF<sub>2</sub>...

### **1.2.3.7.3. OBTENTION DU MATERIAUX :**

Pour obtenir la phase utile du **PVDF** (phase  $\beta$ ) qui est la seule à conférer au matériau ses propriétés ferroélectriques, il faut éviter lentement le film de 3 à 5 fois sa longueur, à des températures comprises entre 60° et 140°C, les films obtenus de cette façon présentent une transparence élevée et surtout, après application d'un champ électrique intense, des propriétés piézo-électriques et pyroélectriques particulièrement intéressantes qui sont mises à profit dans différentes applications.

La méthode de fabrication d'un capteur consiste à déposer une couche métallique très fine, sur chaque face du matériau, dont la fonction est de recueillir les charges électriques générées par effet pyroélectrique.

L'apparition de cet effet est conditionnée par la polarisation au préalable du matériau pris en sandwich entre les deux électrodes. Cette polarisation est obtenue par application d'un champ électrique intense qui oriente les dipôles électriques internes.

### **1.2.3.7.4. POLARISATION :**

Après étirement et obtention de la phase, les dipôles sont répartis de façon erratique dont la résultante est nulle.

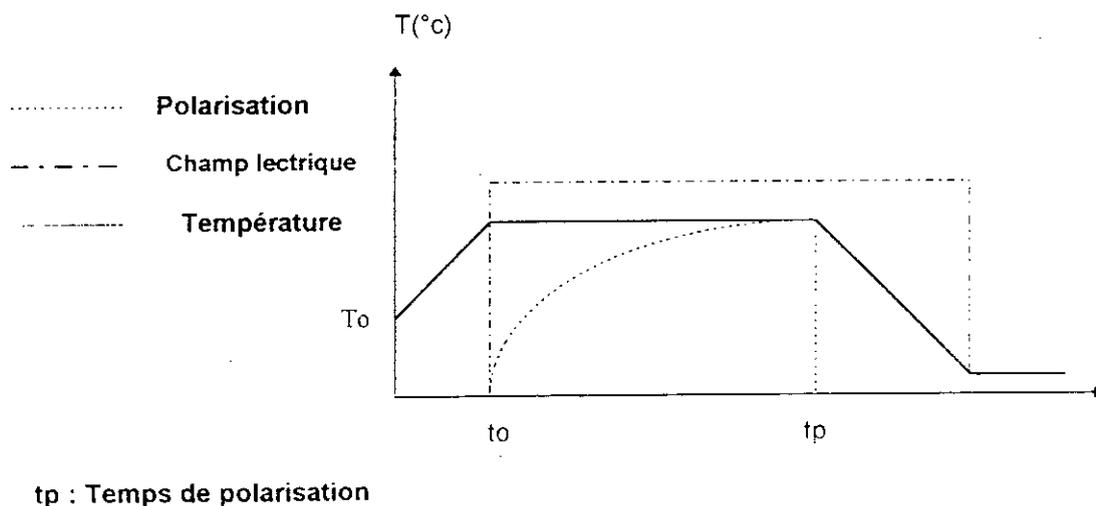
Ce champ est appliqué aux bornes des deux électrodes métalliques qui se font face de part et d'autre du **PVDF**. Il existe quatre procédés de polarisation du matériau :

1. Par champ électrique continu
2. Par effet corona
3. Par plasma
4. Par champ électrique alternatif.

### **1. POLARISATION PAR CHAMP CONTINU :**

Le champ électrique est appliqué aux bornes des électrodes métalliques déposées sur les deux faces du **PVDF** dans les conditions de température allant de l'ambiante à 120°C.

Cette méthode consiste à soumettre le matériau à une élévation de température pendant un temps  $t_0$  au bout duquel on applique un champ électrique perpendiculaire au plan du film. Celui-ci peut atteindre 2000 Kv/cm. La tension appliquée ne sera retirée qu'au retour du système à la température ambiante suivant le protocole [10] [11] [12] de la **Figure [1,1]**.



**FIGURE [1,1] : CYCLE DE POLARISATION**

## **2. POLARISATION PAR EFFET CORONA :**

Cette méthode est utilisée par solavy, elle consiste à appliquer un champ électrique élevé par l'intermédiaire d'une électrode pointée à très faible distance de l'échantillon qui provoque l'ionisation de l'air ambiant au voisinage du diélectrique. Ce procédé s'effectue à température ambiante. [13]

## **3. POLARISATION PAR PLASMA :**

Ce procédé est proche du précédent mis à part qu'il est effectué dans une chambre portée à un vide de 200 mtorr. L'électrode portée à la haute tension n'étant plus alors constituée d'une aiguille, mais d'une plaque, toujours située à quelques centimètres.

Dans ces deux méthodes, la face du **PVDF** en vis à vis de l'électrode HT n'est jamais métallisée, alors que la face inférieure mise à la masse est toujours métallisée afin de permettre un contact électrique sur toute la face à polariser. [2].

## **4. POLARISATION PAR CHAMP ALTERNATIF :**

Cette méthode consiste à appliquer un champ électrique sinusoïdal aux bornes de l'échantillon. L'amplitude du champ électrique appliqué augmente au fur et à mesure de la polarisation avec un pas adéquat.

### **1.2.3.7.5. DESCRIPTION DU PHENOMENE :**

La variation de la température associée à l'éclairement entraîne la création d'un courant selon le schéma suivant :

- variation de température ( $\Delta T$ ).
- variation de la charge induite au niveau des électrodes  $dq$ .
- création d'un courant dans le circuit extérieur ( $dq/dt$ ).

Le comportement d'un détecteur pyroélectrique peut être donc modélisé en considérant les trois transformations suivantes :

1. Une transformation de l'éclairement en élévation de température.
2. Une transformation de la variation de température ( $\Delta T$ ) en variation de charge.
3. Une transformation de la variation de charge en courant (signal pyroélectrique).

#### **1.2.4. DETECTION PYROELECTRIQUE :**

La modélisation du système consiste donc à mettre toutes les transformations de la variation de température et de charge sous forme d'équations et à identifier les différents paramètres physiques.

Pour les détecteurs pyroélectrique il existe deux modèles:

1. court-circuit : qui est un mode en courant.
2. circuit-ouvert : qui est un mode en tension.

Les études théoriques et pratiques consacrées à la réponse pyroélectrique s'appuient sur des radiations modulées en forme de sinusoïdes ou d'impulsions carrées.

##### **1.2.4.1. EQUATION DE BASE :**

Lorsque une radiation ou un flux par unité de surface  $\phi(t)$  modulé, est absorbé par l'aire  $A$  du récepteur, il y a une élévation de température  $\Delta T(t)$  dans le cristal pyroélectrique. Celle-ci est donnée par l'équation de la chaleur (1) [14] [15] [16] [17].

$$\frac{d(\Delta T(t))}{dt} + \frac{\Delta T(t)}{\tau_{th}} = \frac{A \cdot \Phi(t)}{C_{th}} \quad (1)$$

$\tau_{th}$  : la constante de temps thermique,

$C_{th}$  : la capacité thermique du détecteur.

L'effet pyroélectrique se manifeste par le changement de la polarisation spontanée à la variation de la température et se traduit par l'équation [18].

$$\lambda = \frac{dP(T)}{dT(t)} \quad (2)$$

$\lambda$  : Coefficient pyroélectrique du matériau. Il en découle de cette équation que le détecteur peut générer un courant  $I(t)$  donnée par [19].

$$I(t) = \frac{d\Phi}{dt} = A \cdot \frac{dp}{dT} \cdot \frac{dT}{dt} = \lambda \cdot A \cdot \frac{d\{\Delta T(t)\}}{dt} \quad (3)$$

Le détecteur pyroélectrique peut être représenté par le modèle électrique suivant:

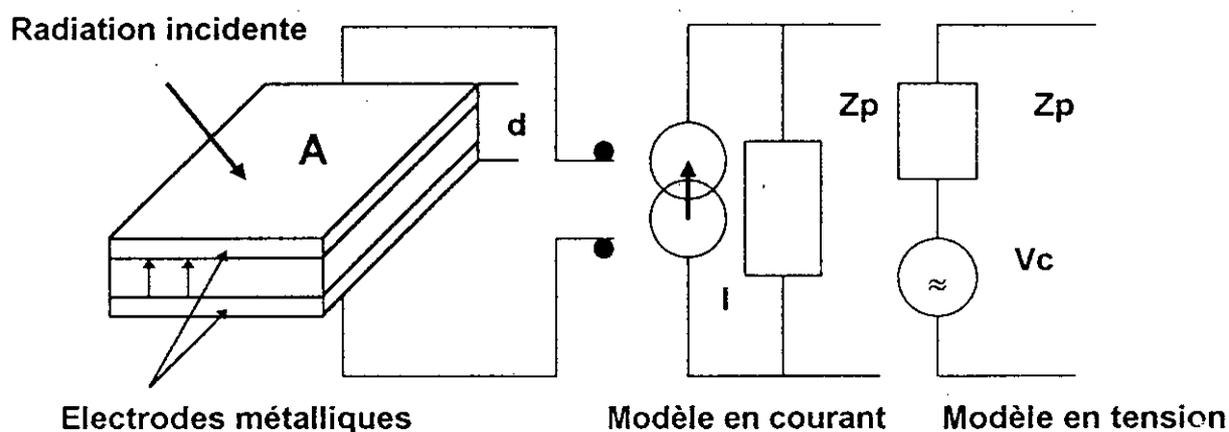
Un générateur de courant  $I(t)$  aux bornes duquel on trouve en parallèle la capacité électrique équivalente,

$$C_p = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d}$$

$A$  et  $d$  sont respectivement l'aire et l'épaisseur du diélectrique et  $\epsilon_r$  sa constante diélectrique, et une résistance de fuite  $R_p$  traduisant les pertes diélectriques.

Il est possible de modéliser ce même dispositif avec un générateur de tension et une impédance en série. Voir **Figure [1,2]**.

On pourra à partir de ce circuit réaliser une lecture en tension ou en courant après amplification du signal fourni par le détecteur. **[15] [19]**.



**FIGURE [1,2] : SCHEMA EQUIVALENT DE LA CAPACITE FORMANT LE CAPTEUR**

## **1. LECTURE EN TENSION :**

Pour faire une lecture en tension, le schéma équivalent du détecteur plus amplificateur est donné par la Figure [1,3], où  $Z_{in}=(R_{in} // C_{in})$  est l'indépendance d'entrée de cet amplificateur.

La constante de temps électrique associée à ce mode de lecture est alors  $\tau_e = R.C$  avec  $(R=R_{in} // R_p)$ ,  $(C=C_{in} // C_p)$ .

La tension  $v(t)$  apparaissant à l'entrée de l'amplificateur satisfait à l'équation.

$$\frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{\tau_e} = \frac{I(t)}{C} = \frac{\lambda.A}{C} \frac{d(\Delta T(t))}{dt} \quad (4)$$

Cette équation est en réalité facile à obtenir si on la compare à l'équation (1).

En effet, le passage entre le système thermique et électrique est obtenu en faisant l'analogie suivante.

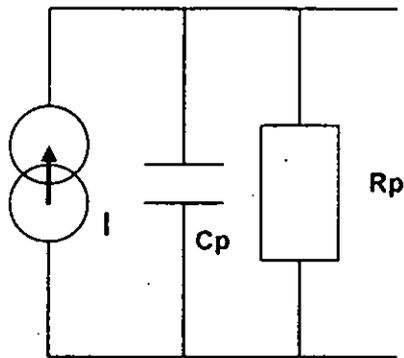
$$v(t) \equiv \Delta T(t), I(t) \equiv \Phi(t), \tau_e \equiv \tau_{th}, C \equiv C_{th}$$

## **2. LECTURE EN COURANT :**

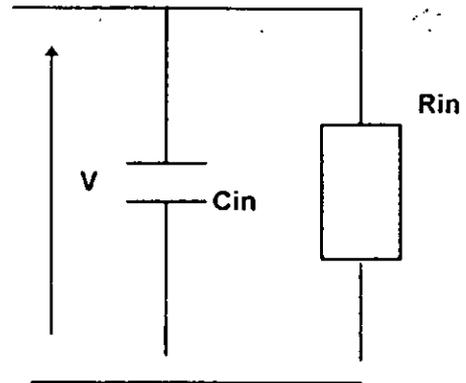
Si on veut maintenant une lecture en courant, le détecteur est suivi en fait d'un amplificateur convertisseur courant/ tension (voir Figure [14]) de telle sorte que la tension recueillie à la sortie de celui-ci vaut :

$$V_m(t) = R_f I(t) \quad (6)$$

Où  $R_f$  est la résistance variable de contre réaction de cette amplification.

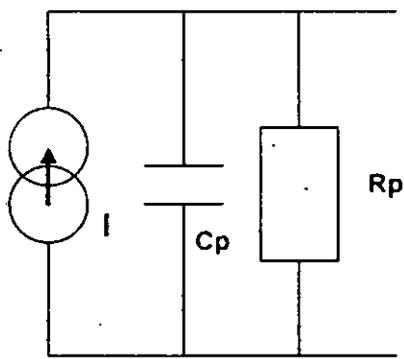


Elément pyroélectrique

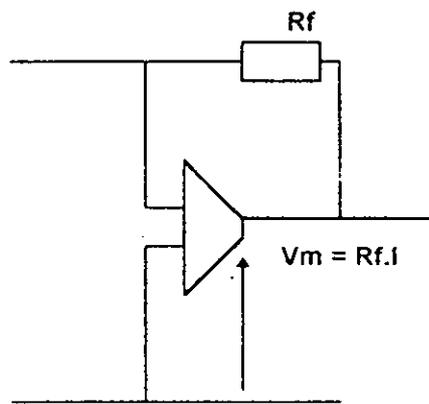


Impédance d'entrée de l'amplificateur de tension

**FIGURE [1,3] : LECTURE EN TENSION**



Elément pyroélectrique



Convertisseur courant/tension

**FIGURE [1,4] : LECTURE EN COURANT**

### 1.2.5. SENSIBILITES EN COURANT ET EN TENSION :

La sensibilité d'un détecteur est définie par le rapport de la réponse pyroélectrique (courant ou tension) au flux incident. La détermination de la réponse exige la connaissance de la relation entre l'échauffement et le flux incident.

La solution de l'équation (1), permet le calcul de  $\Delta T(t) = T - T_a$  du détecteur.

Pour cela, nous considérons un flux de chaleur  $\Phi(t)$  modulé temporellement à la fréquence  $f = w/2\pi$ .

L'élévation de la température  $\Delta T(t)$  du matériau pyroélectrique absorbant ce flux peut être calculée à partir de la formule suivante :

$$\Phi(t) = \Phi_0 + \Phi_1 \cdot \cos(wt)$$

$$\Delta T(t) = \frac{\eta \cdot \Phi_0}{G_{th}} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{th}}\right)\right) + \frac{\eta \cdot \Phi_1}{G_{th} \sqrt{1 + w^2 \tau_{th}^2}} \left( \cos(wt - \Psi) - \frac{\exp\left(-\frac{t}{\tau_{th}}\right)}{G_{th} \sqrt{1 + w^2 \tau_{th}^2}} \right) \quad (7)$$

-  $\Psi = \text{Arctg}(w\tau_{th})$  -  $G_{th}$  : Conductance thermique

$$\tau_{th} = \frac{C_{th}}{G_{th}} = \text{Constante de temps thermique}$$

$C_{th} = \gamma Ad$  : capacité thermique       $\gamma = \rho_v C_s$  : chaleur volumique

$A$  : Surface active du détecteur;  $d$  : épaisseur du PVDF

$\rho_v$  : Densité volumique du matériau,  $C_s$  : chaleur spécifique

$\Phi(t)$  : Rayonnement incident dont la fraction  $\eta$  est absorbée par le détecteur

Si l'on fait abstraction d'une part du régime transitoire dont l'évolution est déterminée par la constante de temps thermique, et d'autre part de l'échauffement constant dû à  $\Phi_0$ . Le régime permanent sinusoïdal associé à la modulation à pour amplitude :

$$\Delta T(w) = \frac{\eta \cdot \Phi_1}{G_{th} \sqrt{1 + w^2 \tau_{th}^2}} \quad (8)$$

La pulsation de coupure thermique :  $w_{th} = \frac{1}{\tau_{th}} = \frac{G_{th}}{C_{th}}$

### 1.2.5.1. SENSIBILITE EN COURANT :

Le courant engendré par l'effet pyroélectrique décrit par l'équation (3) à pour amplitude.

$$I(w) = \frac{\lambda . A . \eta . w . \Phi_1}{G_{th} \sqrt{1 + w^2 \tau_{th}^2}} \quad (9)$$

Le capteur pyroélectrique a une impédance  $Z_p$ , formée d'une capacité  $C_p$  en parallèle avec une résistance  $R_p$ .

$C_p = \epsilon . A / D$  :  $\epsilon$  est la constante diélectrique du matériau

$R_p = \rho . D / A$  :  $\rho$  étant la résistivité tenant compte des pertes diélectriques

La sensibilité en courant  $R_i$  est donnée par la formule suivante :

$$R_i = \frac{I_p}{\Phi_1} = \frac{\lambda . A . \eta . w}{G_{th} \sqrt{1 + w^2 \tau_{th}^2}} \quad (10)$$

$R_i$  ne dépend pas de  $Z_p$  du détecteur. Si on fait la supposition suivante :

Que les pertes sont dues à la conduction; soit :

$$G_{th} = \frac{1}{R_{th}} = \frac{K . A}{d}$$

Où  $K$  est la conductivité thermique

Pour des fréquences  $f > f_{th}$ , la sensibilité est constante et s'exprime par :

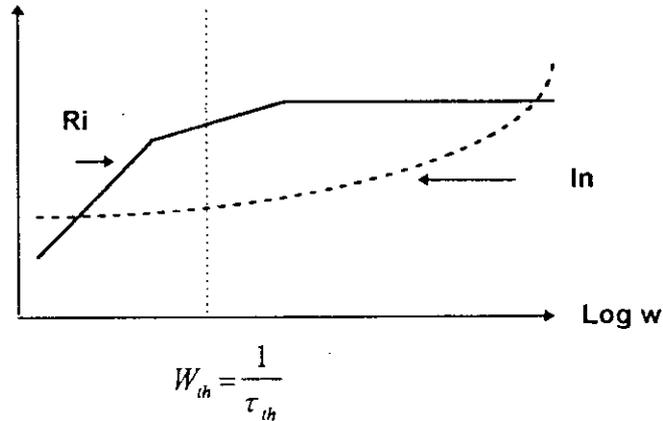
$$R_i = \frac{\lambda . \eta}{\gamma . d} \quad (11)$$

Pour des fréquences  $f < f_{th}$ , la sensibilité sera :

$$R_i = \frac{\lambda w \eta . d}{K} \quad (12)$$

L'équation (12) montre que  $R_i$  tend vers zéro lorsque  $w$  tend vers zéro. D'après ce qui précède l'évolution de  $R_i$  en fonction de  $w$  et celle du courant du bruit  $I_n$  peuvent être représentées par la Figure [1.5].

( $R_i$  et  $I_n$ )



**FIGURE [1.5] : LA VARIATION DE LA SENSIBILITE EN COURANT EN FONCTION DE LA FREQUENCE**

#### 1.2.5.2. SENSIBILITE EN TENSION :

La sensibilité en tension est donnée par la formule suivante :

$$R_v = \frac{V}{\Phi_1}, V = Z \cdot I = \frac{R}{\sqrt{1+w^2 \tau_e^2}} \times \frac{A \cdot \lambda \cdot \eta \cdot w \cdot \Phi_1}{G_{th} \sqrt{1+w^2 \tau_{th}^2}}$$

$Z = (Z_p / Z_e)$  :  $Z_e$  : Impédance d'entrée de l'amplificateur

$Z_p$  : Impédance du détecteur

$$\tau_e = \frac{1}{w_e} = R \cdot C, R = \frac{R_e \cdot R_p}{R_e + R_p}, C = C_e + C_p$$

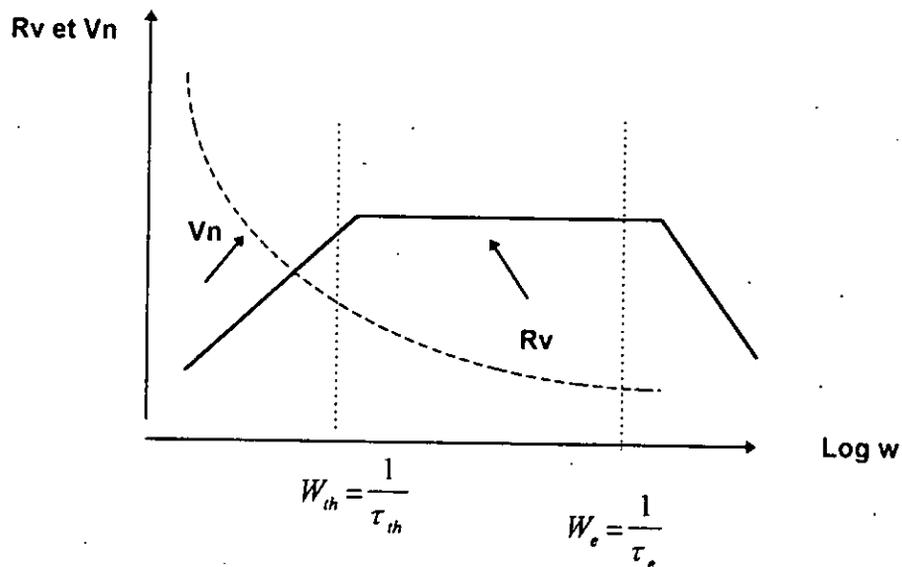
$w_e$  : Pulsation de coupure électrique

$$\text{D'où : } R_v = \frac{V}{\Phi_1} = \frac{R}{\sqrt{1+w^2 \tau_e^2}} \times \frac{A \cdot \lambda \cdot \eta \cdot w}{G_{th} \sqrt{1+w^2 \tau_{th}^2}} \quad (13)$$

La sensibilité en tension est constante dans la bande délimitée par  $f_e$  et  $f_{th}$ .

$$R_v = \frac{R \cdot \lambda \cdot A \cdot \eta \cdot w_e}{G_{th}} = \frac{\lambda \cdot A \cdot \eta}{G_{th} \cdot C}, C = C_{th} + C_p \quad (14)$$

L'évolution de  $R_v$  et la tension de bruit  $V_n$  en fonction de  $w$  sont représentées par la Figure [1,6].



**FIGURE [1,6] : LA VARIATION DE LA SENSIBILITE TENSION EN FONCTION DE LA FREQUENCE**

### 1.2.5.3. PUISSANCE EQUIVALENTE AU BRUIT : (NEP) (Noise equivalent Power)

La mesure du signal devenant difficile quand le rapport signal sur bruit tend vers l'unité, il sera plus facile de la faire avec un signal important  $\Phi(t)$  et d'écrire :

$$R_v = \frac{V_f}{\Phi} = \frac{V_b}{NEP} \quad (15)$$

$V_f$  : Tension efficace due au flux  $\Phi(t)$  en watts.

$V_b$  : Tension efficace de bruit propre à la cellule de détection.

$$\text{D'où : } NEP = \Phi \frac{V_b}{V_f} \quad [\text{watts}] \quad (16)$$

La mesure doit être faite avec la bande passante électrique de fonctionnement du détecteur.

#### **1.2.5.4. DETECTIVITE :**

D'une façon générale un détecteur est d'autant plus performant que son NEP est faible. L'inverse de NEP est appelée détectivité **D**.

$$D = \frac{1}{NEP} [w^{-1}] \quad (17)$$

La détectivité spécifique **D\*** : est la sensibilité **D** ramené à une surface de détecteur unitaire (1 cm<sup>2</sup>) et à l'unité de bande passante (1 hertz).

$$D^* = D \cdot \sqrt{A \cdot \Delta F} = \sqrt{\frac{A \cdot F}{NEP}}$$

$\Delta F$  : bande passante électrique de mesure

#### **1.3. PERFORMANCE DES DISPOSITIFS :**

##### **1.3.1. CALCUL DU COEFFICIENT PYROELECTRIQUE :**

Le coefficient pyroélectrique  $\lambda$  peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\lambda = \frac{\gamma \cdot d \cdot I_{\max}}{\eta \cdot \Phi_i} \quad (18)$$

$$\lambda = \frac{\rho_v \cdot C_s \cdot d \cdot I_{\max}}{\eta \cdot \Phi_i} \quad (19)$$

$\rho_v$  : densité volumique du matériau.

$C_s$  : chaleur spécifique.

$\eta$  : fraction absorbée par le détecteur

$I_{\max}$  : Le courant pyroélectrique de palier au delà de la fréquence de coupure thermique  $f_{th}$ .

Il est toujours préférable donc d'avoir un coefficient pyroélectrique important pour obtenir une bonne réponse pyroélectrique.

### 1.3.2. DETERMINATION DES COEFFICIENTS DE MERITE, $F_i$ , $F_v$ , $F_d$

Un détecteur performant doit avoir une bonne sensibilité (en courant ou en tension) et une détectivité spécifique, les valeurs maximales de ces deux caractéristiques principales dépendent de trois facteurs appelés : "Facteur de mérite" de courant de la tension et de la détectivité.

Ses expressions sont données par les formules suivantes :

$$F_i = \frac{\lambda}{C_s \cdot \rho} \quad (20)$$

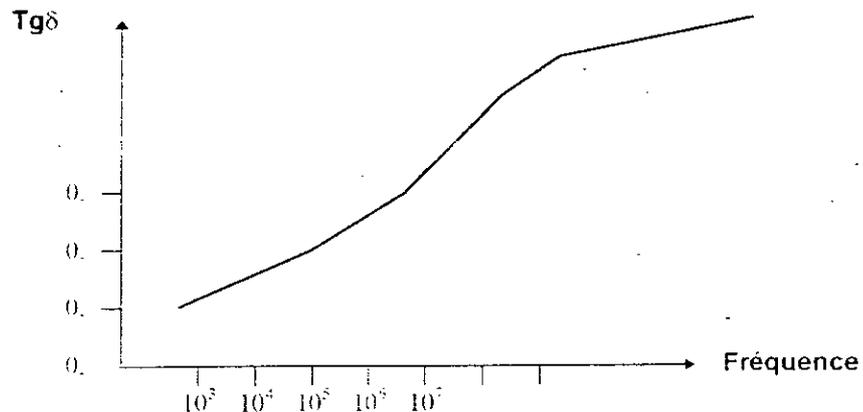
$$F_v = \frac{\lambda}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot C_s \cdot \rho} \quad (21)$$

$$F_p = \frac{\lambda}{C_s \cdot \rho \cdot \sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \cdot \text{tg}\delta}} \quad (22)$$

Un détecteur performant doit avoir un coefficient pyroélectrique élevé, une capacité électrique faible ( $\varepsilon_r$  faible), une faible perte diélectrique ( $\text{tg}\delta$ ).

Les pertes diélectriques ( $\text{tg}\delta$ ) varient avec la fréquence appliquée.

La Figure [1,7] illustre cette variation.



**FIGURE [1,7] : LA VARIATION DES PERTES EN FONCTION DE LA FREQUENCE**

On voit bien que  $\text{tg}\delta$  est faible dans les basses fréquences et forte aux hautes fréquences, d'où la nécessité de travailler aux basses fréquences.

### **1.3.3. SENSIBILITE :**

Un détecteur pyroélectrique doit avoir une bonne sensibilité, cette sensibilité est définie comme étant la limite de détection du dispositif en fonction de la température de la source.

### **1.3.4. DIRECTIVITE :**

La directivité est définie comme étant la portion d'espace observée par le détecteur. Tant que la portion d'espace à observer est grande, le champ de vision du détecteur est grand.

### **1.3.5. PORTEE :**

La portée peut être définie comme étant la plus grande distance à laquelle est détectée une personne.

Cette portée dépend d'une part de l'objet à détecter, et d'autre part des conditions thermiques environnantes.

### **1.3.6. TEMPS DE REPONSE :**

Le temps de réponse est définie comme étant l'intervalle de temps entre le moment où la cible entre dans le champ de détection du dispositif et l'ouverture du contact de sortie.

Ce temps de réponse peut varier quelque peu en fonction de la température de la source, de sa surface émissive et de la vitesse de pénétration.

En général le choix d'un détecteur pyroélectrique est déterminé par un faible temps de réponse et une grande sensibilité.

#### **1.4. CONCLUSION :**

Dans ce chapitre, nous avons exposé et classifié les différents détecteurs pyroélectriques; ensuite nous vous fait sur la ferroélectricité, la pyroélectricité, piezoélectricité et les matériaux pyroélectriques utilisés.

Aussi une comparaison des propriétés physiques des paramètres entrant dans la performance d'un détecteur pyroélectrique

Par la suite nous avons traité le problème de la sensibilité, détectivité et enfin la présentation des performances d'un tel dispositif qui détermine le choix du détecteur pyroélectrique.

## **CHAPITRE II**

## **CHAPITRE II : ETUDE GENERALE D'UN DISPOSITIF INFRAROUGE**

### **II.1 INTRODUCTION :**

Dans une première partie de ce chapitre nous présenterons la description des dispositifs, nous développerons tout ce qui concerne le boîtier, sa fabrication, sa nature.

Aussi nous aborderons l'optique et ses divers applications. Par la suite nous dirigerons notre étude vers le capteur pyroélectrique et ses performances et puis le circuit de traitement du signal qui sera l'objectif du troisième chapitre.

Nous terminerons ce chapitre par les différentes applications du **PVDF**.

## **II.2 DESCRIPTION DES DISPOSITIFS :**

Le système de détection complet se compose de :

- 1 - Un boîtier de protection muni d'une fenêtre
- 2 - Une optique
- 3 - Un capteur pyroélectrique
- 4 - Un circuit de traitement du signal

### **II.2.1. BOITIER :**

Il sert à protéger l'ensemble des mouvements d'air, de la chaleur, du soleil, de la poussière et des rayonnements radiofréquences. Le dernier point implique l'utilisation d'un blindage métallique et de filtres de passage pour la réalisation du boîtier.

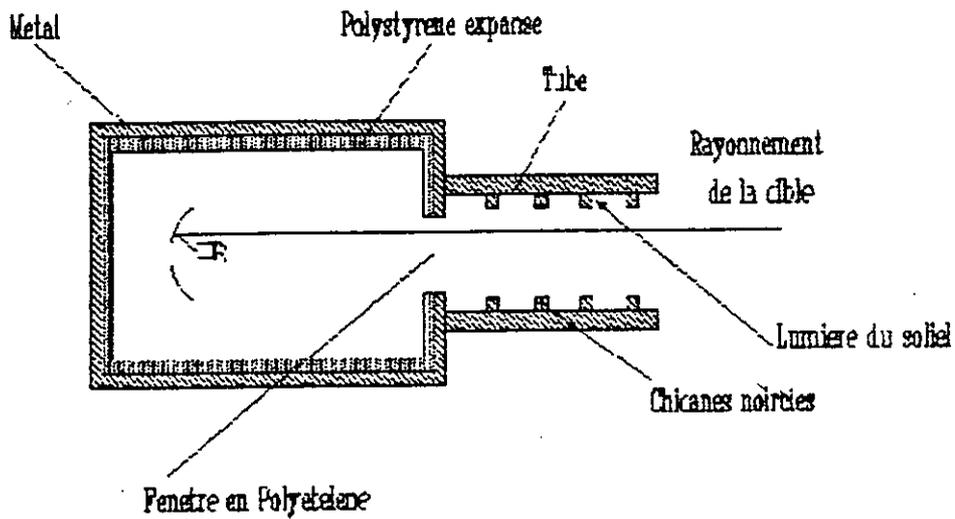
En ce qui concerne les premières exigences, une couche isolante en plastique ou en polystyrène expansé pourra s'avérer suffisante. La fenêtre mise en oeuvre est formée de plusieurs couches de films polyéthylène (30 - 100 $\mu$  m d'épaisseur) ou du nylon (7  $\mu$  m). Il peut être nécessaire de protéger cette fenêtre par un tube muni de chicanes. (Figure [2,1])

### **II.2.1. OPTIQUE**

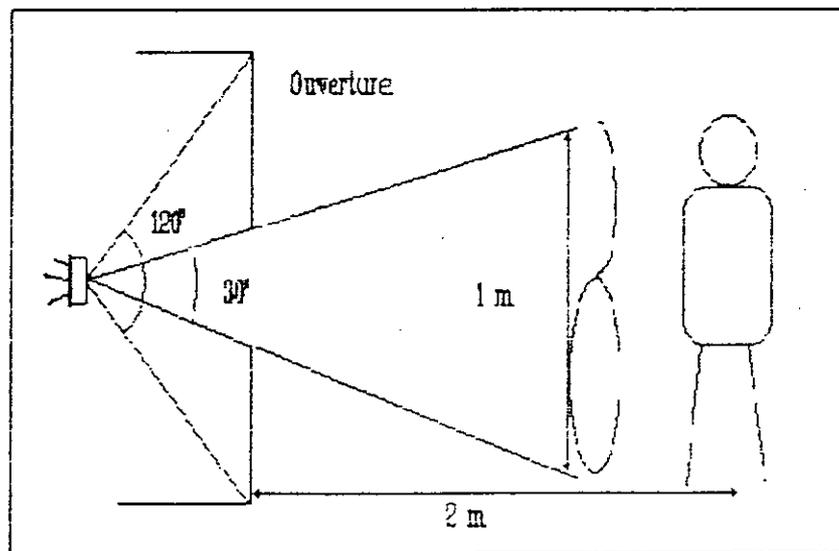
Celle-ci sert à définir le champ de vision du détecteur. La pénétration sur la sortie d'une source infra-rouge du champ de vision provoquera un gradient thermique qui sera exploité par l'intermédiaire des impulsions électriques qui en résulteront.

Plusieurs techniques peuvent être mises en oeuvre :

- 1. Diaphragme
- 2. Cône
- 3. Miroir
- 4. Lentille



**FIGURE [2,1] : EXEMPLE DE MISE EN OEUVRE D'UN DISPOSITIF PYROELECTRIQUE**



**FIGURE [2,2] : MISE EN OEUVRE D'UN DIAPHRAGME**

## **1 - DIAPHRAGME :**

L'optique la plus simple est une ouverture (diaphragme) restreignant le champ du capteur. (Figure [2,2])

L'inconvénient de cette méthode est la réduction de la sensibilité suivant le rapport inverse du carré du diamètre de l'ouverture.

Dans l'exemple de la Figure [2,2]. Si l'on considère que le champ de détection du capteur est à l'origine de  $120^\circ$  et se trouve réduit pour cette application à  $30^\circ$ , la réduction de la sensibilité s'effectue avec un facteur de 16 et la température détectable est alors :  $16 \times 0,1 \text{ C}^\circ = 1,6 \text{ C}^\circ$

## **2 - LE CONE :**

La Figure [2.3] montre le plus simple des focalisateurs : le cône.

Le gain obtenu par les réflexions simples ou multiples est de l'ordre de 10 à 20.

Le cône, dont la section peut-être circulaire ou carrée, doit être poli ou métallisé à l'intérieur afin de se comporter comme un miroir dont l'angle d'ouverture est calculé afin de renvoyer le maximum d'énergie par réflexion directe ou indirecte sur la surface du capteur.

L'avantage de cette méthode est de pouvoir détecter non seulement l'objet émetteur d'infrarouge, mais aussi un individu en mouvement. Elle offre aussi la stabilité des réglages de localisation des faisceaux.

## **3 - LES LENTILLES :**

Les lentilles présentent l'avantage de permettre l'obturation complète du boîtier, mais elles sont généralement onéreuses particulièrement pour des rapport  $F$  (distance focale/diamètre du miroir) très faibles.

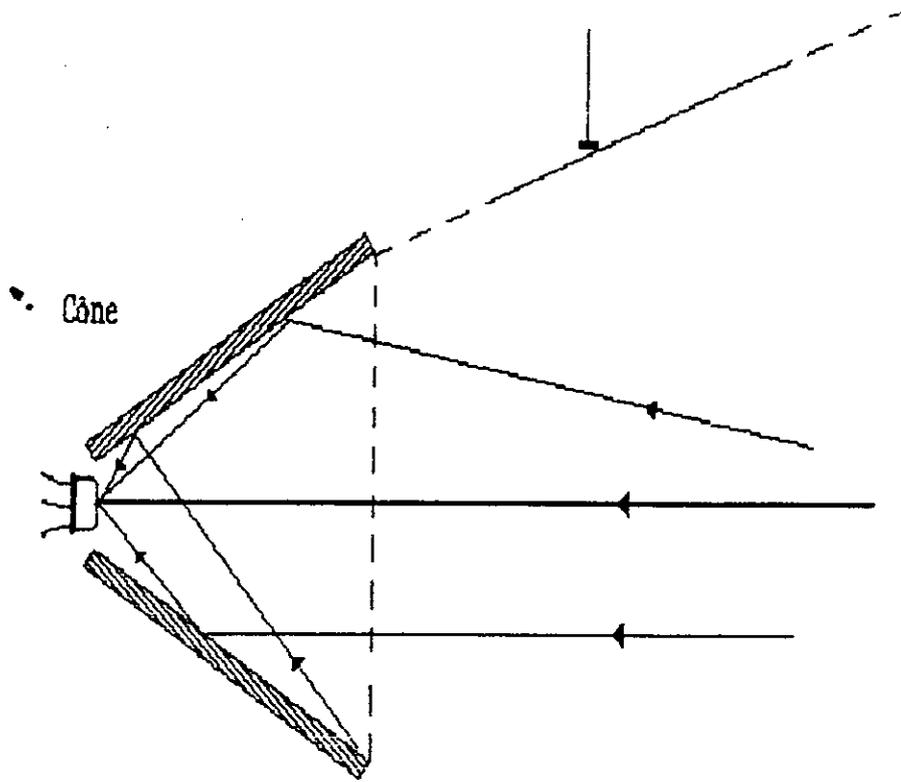
On rencontre néanmoins des dispositifs dotés de lentilles de Fresnel en polyéthylène dont le principe est identique aux miroirs concaves à facettes.

## **4 - LES MIROIRS :**

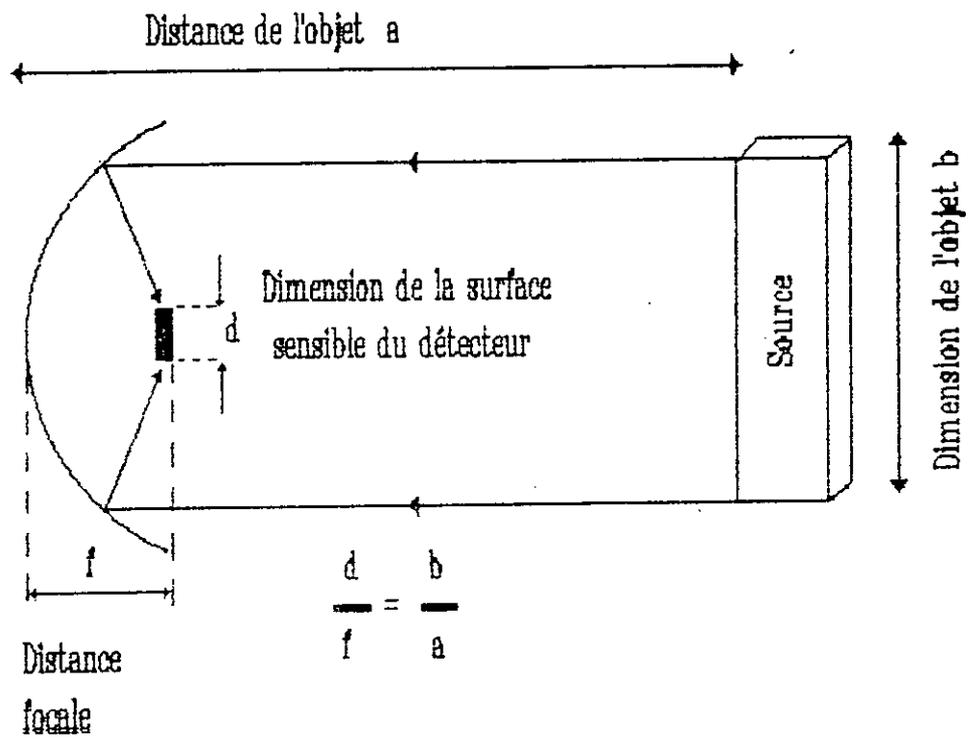
Ils sont très couramment employés en infrarouge. La distance focale doit être adaptée à la taille de l'objet à détecter. Le rapport  $F$  (distance focale/diamètre du miroir) doit être aussi grand que possible mais pour des valeurs inférieures à 1, des miroirs paraboliques seront préférés aux sphériques. (voir Figure [2,4]).

En pratique de nombreux constructeurs utilisent des miroirs concaves multifacettes qui présentent d'une part l'avantage d'un rapport qualité/prix intéressant et d'autre part la faculté de segmenter en  $N$  zones de champ de vision.

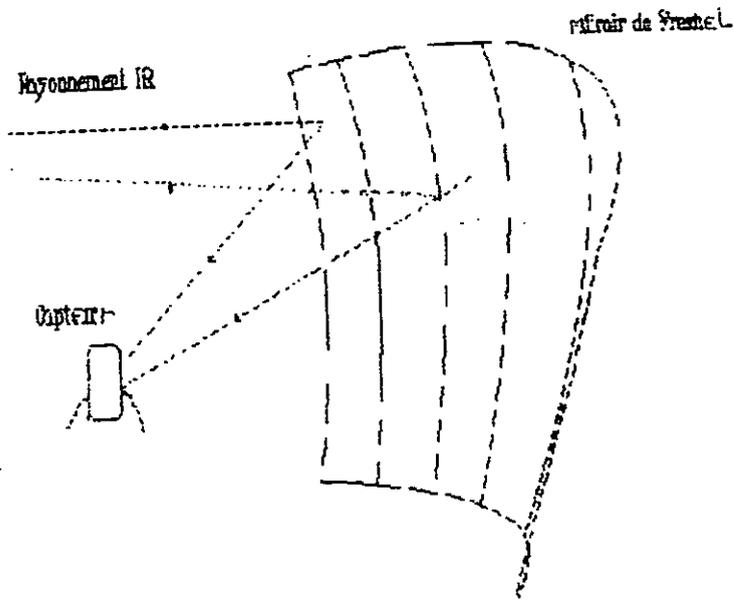
Les Figures ([2,5] - [2,6]) illustrent ces avantages.



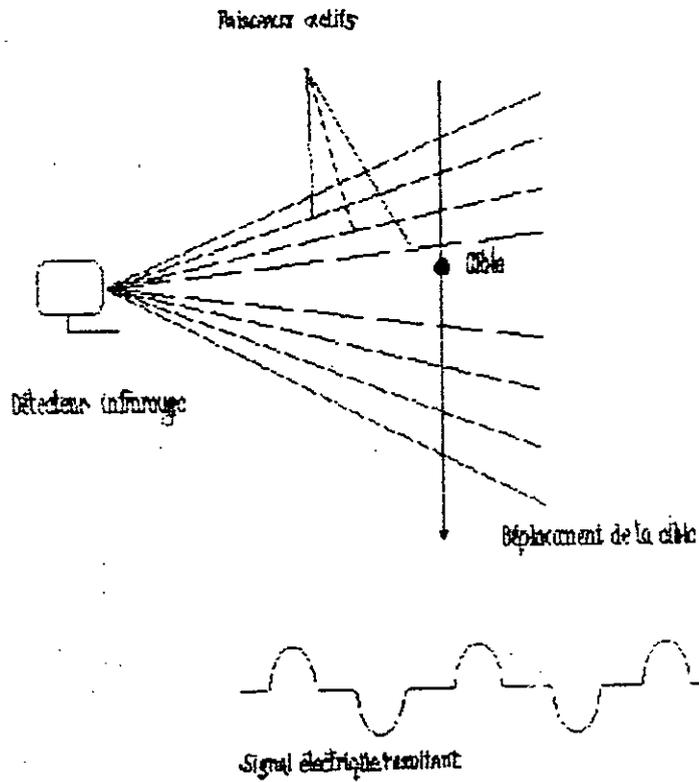
**FIGURE [2,3] : MISE EN OEUVRE D'UN CÔNE**



**FIGURE [2,4] : MISE EN OEUVRE DE MIROIRS**



**FIGURE [2,5] : SYSTEME A MIROIR DE FRESNEL**



**FIGURE [2,6] : SYSTEME EQUIVALENT ET SIGNAL RESULTANT EN PRESENCE D'UNE CIBLE MOUVANTE**

### **II. 2.3. CAPTEUR PYROELECTRIQUE :**

Le choix d'un détecteur pyroélectrique est justifié par le fait qu'il présente les caractéristiques suivantes : une grande sensibilité et un court temps de réponse (rapidité), aussi il faut deux règles à respectées :

- 1 - pour éviter des problèmes de bruit, le détecteur doit être sensible à un minimum de 0,1 c° réparti sur l'ensemble de son champ de vision.
- 2 - la vitesse de déplacement de la cible doit produire un signal de fréquence comprise entre 0,1 et 10 HZ pour disposer de la meilleure sensibilité.

### **II. 2.4. CIRCUIT DU TRAITEMENT DE SIGNAL :**

En ce qui concerne cette partie, elle est constituée généralement de deux parties essentielles :

1. la partie préamplification et de filtrage qui sert à amplifier le signal pyroélectrique et éliminer les parasites qui peuvent exister aux basses et hautes fréquences.

2. la partie de déclenchement qui est constituée elle même de trois autres parties :

- 2.1. un comparateur qui sert à comparer le signal amplifié à un signal de référence bien spécifié.

- 2.2. un temporisateur qui donne la durée du déclenchement du système d'alarme (buzzer).

- 2.3. la partie alarme qui confirme la présence d'un objet.

Cette partie essentielle sera l'objectif du prochain chapitre.

### **II.3. LES DIVERSES APPLICATIONS :**

Les détecteurs à base de poly-fluorure de vinylidène (PVDF) ont une grande importance d'application dans le domaine militaire et industriel. Cette importance intéresse à priori des domaines aussi divers que l'aéronautique, l'espace, l'industrie du bâtiment, l'agronomie, le nucléaire etc...

C'est pour cela il est intéressant de citer quelques unes de ces diverses applications.

#### **II. 3.1. ACOUSTIQUE :**

Ce sont les microphones, détecteur d'ultrasons, hydrophones, sonars et capteurs pour échographie médicale.

### **II. 3.1.1. MICROPHONES :**

Les différents types de microphones, destinés surtout à la téléphonie, comportent généralement une membrane piézoélectrique parfois mise en forme de calotte sphérique ou une membrane bimorphe plane, encastrée à sa périphérie.

La sensibilité moyenne est de quelques millivolts par pascal, et la courbe de réponse est très plate. Ils sont insensibles à l'humidité, aussi sont caractérisés par leur faible coût à cause de leur simplicité de réalisation.

### **II. 3.1.2. HYDROPHONES :**

Les hydrophones à PVDF présentent un avantage de principe par rapport aux autres hydrophones, c'est l'adaptation acoustique à l'impédance de l'eau. Ils ont aussi un bon facteur de mérite.

### **II. 3.1.3. CAPTEURS MEDICAUX :**

Les capteurs médicaux comportent les sondes ultrasons pour échographie et des capteurs de pression.

#### **1. SONDES ULTRASONS :**

Les sondes pour échographie fonctionnent en émission-réception à des fréquences comprises entre 2 MHz et 10 MHz.

#### **2. CAPTEURS DE PRESSION :**

C'est la répartition des pressions sur des surfaces détecteurs d'intrus. Les capteurs de pression sont essentiellement les stéthoscopes où un filtrage électronique réglable permet de séparer facilement les différentes composantes du pouls, de la respiration, de la circulation sanguine. Aussi pour les contrôles non destructifs, accéléromètres, claviers.

### **II. 3.2. GENERATEURS DE VIBRATIONS :**

Ce sont les écouteurs légers, protection des coques de bateaux contre les salissures marines.

### **II. 3.3. COMPTAGE :**

A l'aide d'un détecteur pyroélectrique, on détectera la minime différence de température entre l'objet à compter et son environnement. L'impulsion obtenue et amplifiée sera transmise à un compteur.

Aussi on peut connaître la température de l'objet et autre application comme par exemple de contrôler le niveau du contenu s'il s'agit de bouteilles.

### **II. 3.4. MESURE DE SURFACE :**

L'association de deux détecteurs et d'une électronique assez simple, on obtient une mesure très précise. Le premier détecteur possède un faisceau très fin correspondant à l'unité de surface, l'autre à un faisceau large recouvrant l'objet à mesurer. Le rapport des deux flux donne la mesure.

### **II. 3.5. ANALYSE DE GAZ :**

Les gaz absorbent la lumière infrarouge de différentes longueurs d'onde.

A l'aide d'un filtre optique, on aura donc avec les détecteurs pyroélectriques un moyen simple de détecter la présence d'un gaz donné et même d'en mesurer la teneur.

### **II. 3.6. MESURE DE TEMPERATURE :**

La sensibilité des détecteurs pyroélectriques ainsi que leur plage d'utilisation en font des outils particulièrement appréciés puisqu'ils n'ont pas les défauts des autres types de senseurs à contact.

### **II. 3.7. ALARME :**

Les détecteurs pyroélectriques sont utilisables en alarme incendie ou en détection d'intrus. Leurs sensibilités spécifiques, ainsi que leur très faible consommation les rendent très attrayants. Ils peuvent détecter un corps humain jusqu'à 50 m (même plus), de distance avec un faisceau passif très directif.

### **II. 3.8. UN SYSTEME D'IMAGERIE INFRAROUGE :**

L'imagerie infrarouge ou thermographique est une méthode qui permet l'acquisition du rayonnement infrarouge lié à la distribution spatiale de chaleur sur les objets examinés, ainsi qu'à la variation de cette distribution dans le temps. Le système utilisé doit être, capable en particulier de transformer l'image infrarouge en image visible. Les dispositifs thermographiques existants utilisent comme détecteur une photodiode **In Sb** fonctionnant à la température de l'azote liquide (77K°)

Il est intéressant d'utiliser à la place de la diode le détecteur **PVDF**. Un détecteur **PVDF** avec un préamplificateur approprié peuvent détecter et amplifier le signal analogique utile, qui sera après traitement, visualisé par le dispositif.

#### **II. 4. CONCLUSION :**

Dans ce deuxième chapitre nous avons commencé par la description du dispositif infrarouge, c'est à dire tout ce qui concerne le boîtier, l'optique et ses divers applications.

Ensuite nous avons cité les performances du capteur pyroélectrique.

En ce qui concerne le circuit de traitement du signal, il sera étudié au troisième chapitre. En fin, nous avons terminé par les divers applications du détecteur pyroélectrique.

# ***CHAPITRE III***

---

## **CHAPITRE III : ANALYSE DU CIRCUIT DU TRAITEMENT DE SIGNAL**

### **III.1. INTRODUCTION :**

Nous consacrons le troisième chapitre à l'analyse du circuit du traitement de signal. Dans un premier temps nous présenterons la partie amplification et filtrage avec le calcul nécessaire des éléments du circuit.

Par la suite nous dériérons notre étude vers la partie du traitement et de déclenchement avec tous les calculs nécessaires.

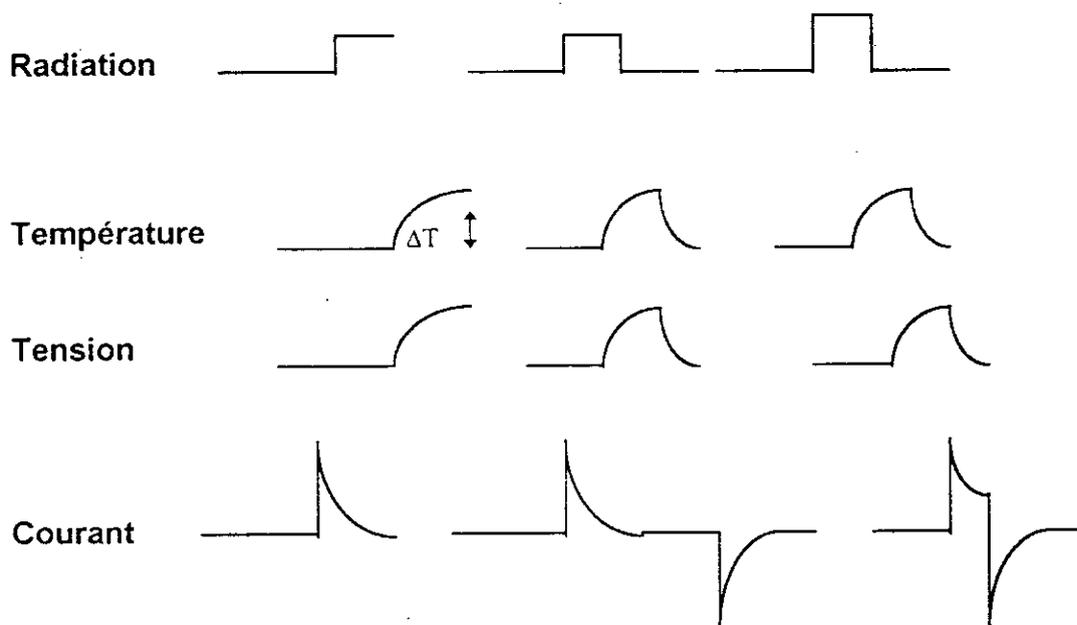
A la fin de ce chapitre nous traiterons le problème du bruit.

### III.2. CIRCUIT DU TRAITEMENT DE SIGNAL :

L'énergie rayonnée dans le domaine de l'infrarouge par tout être humain, peut être détecté pour constituer un système d'alarme. Ceci n'est possible qu'il y a variation du rayonnement (**Annexe 1**).

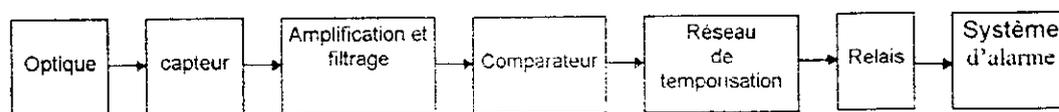
Lorsque ce rayonnement infrarouge est absorbé par un échantillon de PVDF il y a une augmentation de température qui produit, via l'effet pyroélectrique, un signal électrique aux bornes du capteur.

Ce signal peut être soit un courant, soit une tension suivant le traitement, Figure [3,1].



**FIGURE [3,1] : ALLURE DES TENSIONS ET COURANTS DE SORTIE DELIVRES PAR LE DETECTEUR LORSQU'IL OBSERVE UN BRUSQUE CHANGEMENT DE TEMPERATURE DANS SON CHAMP DE VISION.**

L'ordre de grandeur du courant est de quelques picoampères, ce qui nécessite une préamplification adaptée. Le schéma synoptique général d'un détecteur est représenté par la Figure [3,2]



**FIGURE [3,2] : SCHEMA SYNOPTIQUE D'UN DETECTEUR INFRAROUGE**

### **III.2.1. CIRCUIT DE PREAMPLIFICATION ET DE FILTRAGE :**

#### **III.2.1.1. IDENTIFICATION DES COMPOSANTS :**

Le circuit (voir **Figure [3,3]**) est composé de trois circuits intégrés (OP27) qui n'est en fait que des amplificateurs opérationnels à faible bruit.

Les autres composants se sont des résistances et des condensateurs.

#### **III.2.1.2. DESCRIPTION D'ENSEMBLE ET FONCTIONNEMENT :**

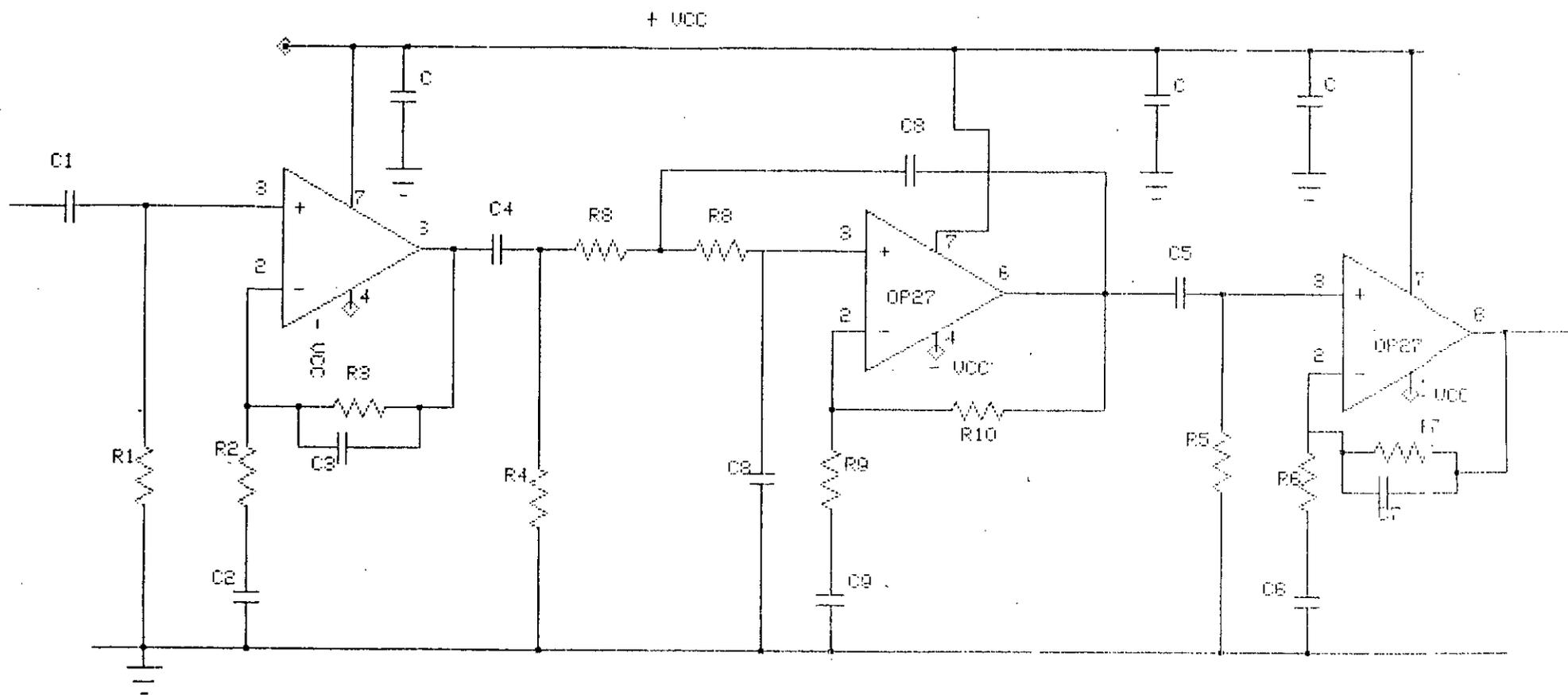
Notre circuit qui présente la préamplification et le filtrage utilise les trois amplificateurs opérationnels avec un gain global d'environ 10000 qui apportent au détecteur une sensibilité suffisante pour attaquer un comparateur à fenêtre. Le capteur attaque un premier étage d'amplification qui fait office d'adaptateur d'impédance.

Ce premier étage est suivi d'un second qui fait office d'un filtre actif passe bas de 2<sup>ème</sup> ordre.

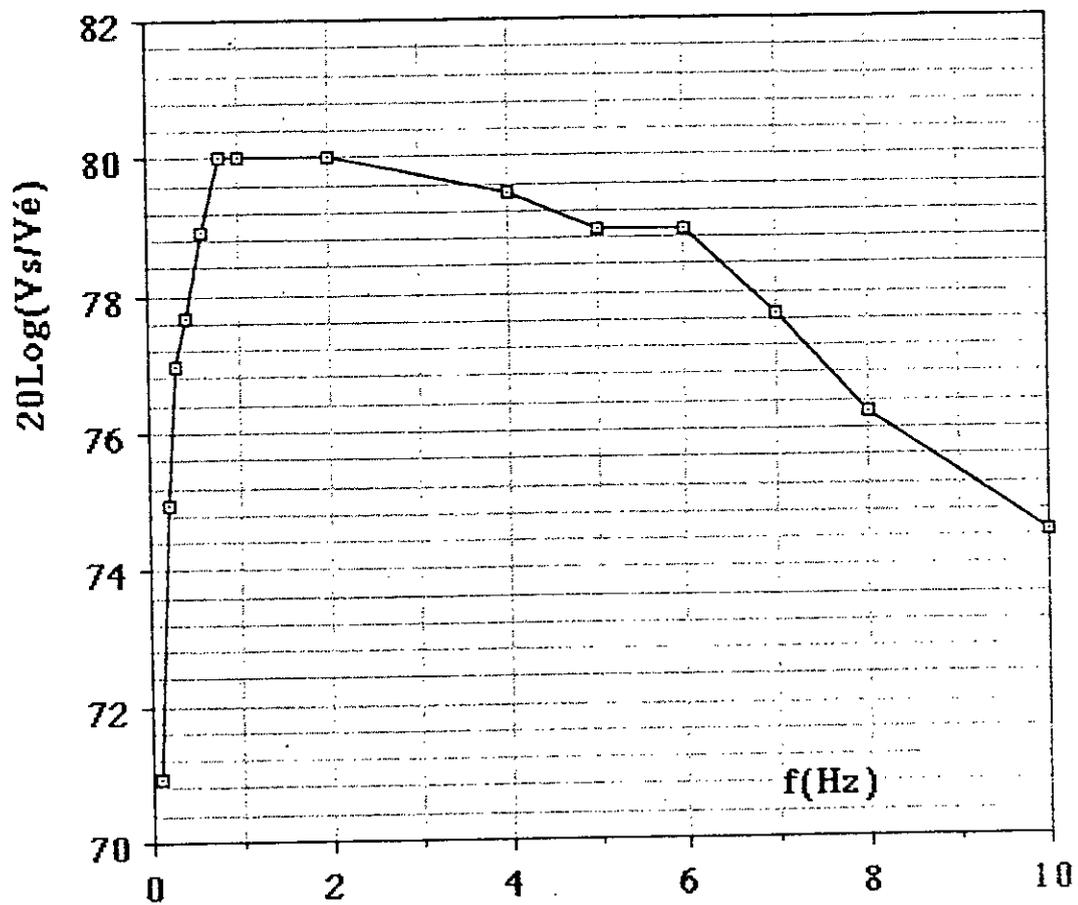
Le troisième étage est un amplificateur adaptateur. Notre préamplificateur est un amplificateur sélectif très basse fréquence, et sa bande passante est faible (quelque Hertz) afin de limiter le bruit, dont la **Figure [3,4]** présente la courbe de réponse.

Cet amplificateur donne une bonne amplification mais avec des parasites, ces parasites sont éliminés par les réseaux RC.

1. Les réseaux ( $R_1, C_1$ ), ( $R_4, C_4$ ) et ( $R_5, C_5$ ) permettent la suppression des perturbations basses fréquences.
2. Les réseaux ( $R_3, C_3$ ) et ( $R_7, C_7$ ) permettent la suppression des perturbations hautes fréquences.
3. Les réseaux ( $R_2, C_2$ ) et ( $R_6, C_6$ ) servent à minimiser la tension d'offset à la sortie.
4. Les capacités  $C : 0,1 \text{ nF}$  du circuit (**3,3**) servent à éliminer le bruit de la tension d'alimentation.

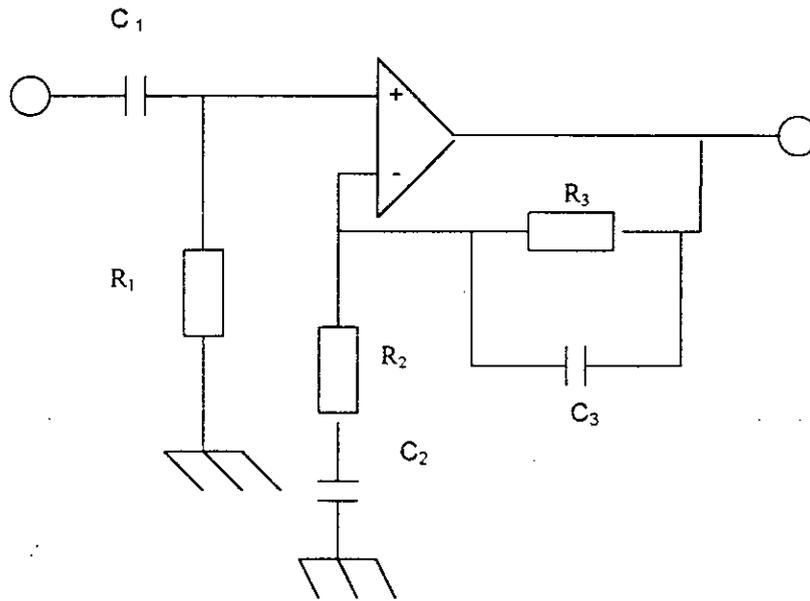


**FIGURE [3.3] : LE CIRCUIT D'AMPLIFICATION ET FILTRAGE**



**FIGURE [3.4] : REPONSE FREQUENTIELLE DU PREAMPLIFICATEUR**

### III.2.1.2.1. CALCUL DE LA CELLULE AMPLIFICATRICE :



**FIGURE [3,A] : LA CELLULE AMPLIFICATRICE**

- Pour minimiser la tension de décalage de sortie, nous plaçons un condensateur de découpage dans la boucle de réaction ( $R_2$ ,  $C_2$ ).

- Dans la bande médiane de l'amplificateur le gain en tension égale :

$$A_v = R_3/R_2 + 1 \quad (23)$$

#### 1. PREMIER ETAGE :

-  $A_{v1} = 200 \rightarrow R_3/R_2 = 199 \rightarrow R_3 = R_2 \cdot 199$

- Si on pose  $R_3 = 10 \text{ M } \Omega$ ,  $R_2 = 50 \text{ K } \Omega$

#### 2. TROISIEME ETAGE :

-  $A_{v3} = 50$

-  $A_{v3} = R_7/R_6 + 1 \rightarrow R_7 = 49 \cdot R_6$

- Si on pose  $R_7 = 10 \text{ M } \Omega$ ,  $R_6 = 200 \text{ K } \Omega$ ,

$R_2$ ,  $C_2$  minimise la tension de décalage de sortie et maximise la dynamique du signal alternatif de sortie.

### CALCUL DES ELEMENTS DE LA CELLULE AMPLIFICATRICE :

Pour un filtre passe bas ou passe haut la fréquence de coupure est donnée par la formule suivante : **Figure [3,5]**

$$wc = 1/RC \rightarrow fc = 1/2\pi RC \quad (24)$$

Alors pour notre montage :

1.  $[C_2, C_6]$  : Produit une fréquence de coupure basse :

$$D'où  $f_1 = 1/2\pi R_2 C_2 = 1/2\pi R_6 C_6 \quad (25)$$$

2.  $[C_1, C_5, C_4]$  : Produit une fréquence de coupure basse :

$$D'où  $f_2 = 1/2\pi R_4 C_4 = 1/2\pi R_1 C_1 = 1/2\pi R_5 C_5 \quad (26)$$$

3.  $[C_3, C_7]$  : Produit une fréquence de coupure haute :

$$D'où  $f_3 = 1/2\pi R_3 C_3 = 1/2\pi R_7 C_7 \quad (27)$$$

- **Application :**

a/  $f_1 = 0,1$  HZ : donc

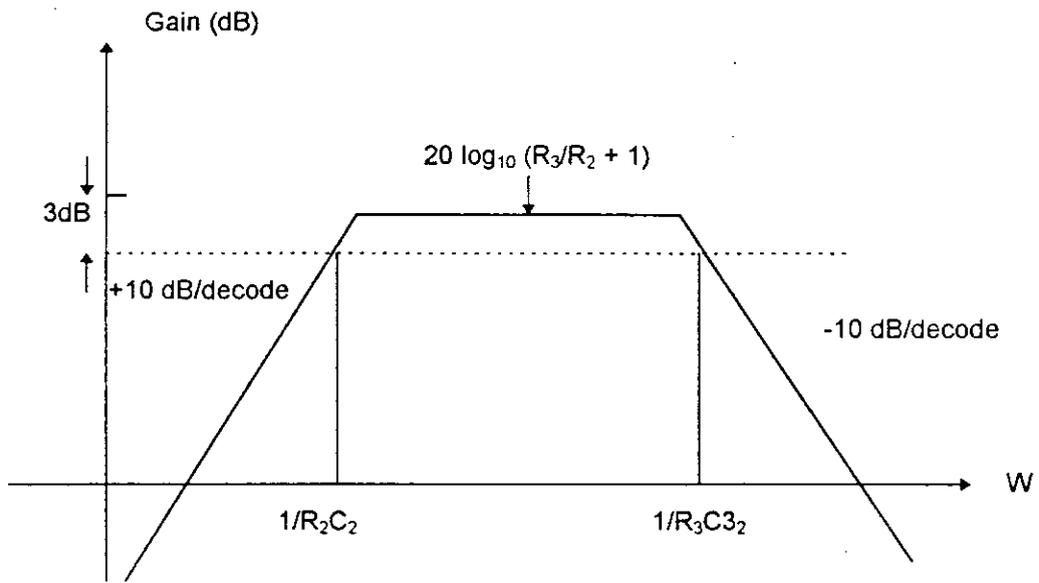
$$\begin{cases} C_2 = 47 \mu F \\ C_6 = 47 \mu F \end{cases}$$

b/  $f_2 = 0,1$  HZ : donc

$$\begin{cases} R_1 = 10 M\Omega, C_1 = 47 \mu F \\ R_4 = 10 M\Omega, C_4 = 47 \mu F \\ R_5 = 10 M\Omega, C_5 = 47 \mu \end{cases}$$

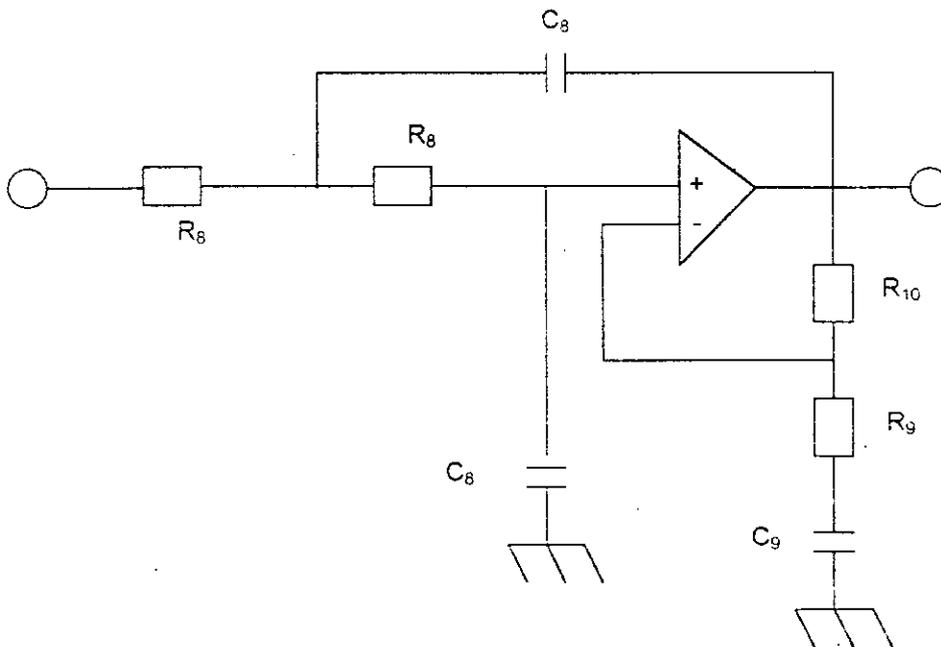
c/  $f_3 = 10$  HZ : donc

$$\begin{cases} C_3 = 1 nF \\ C_7 = 1 nF \end{cases}$$



**FIGURE [3.5] : LA REPONSE DE LA CELLULE AMPLIFICATRICE**

**III.2.1.2.2 CALCUL DE FILTRE PASSE BAS DU 2ème ORDRE :**



**FIGURE [3.B] : ETAGE DE FILTRAGE**

Le filtre passe bas représenté sur la **Figure (3,6)** a deux pôles puisqu'il comporte deux réseaux de retard.

Si le gain est égal 1,586 on obtiendrait la caractéristique de réponse la plus horizontal possible dans la bande médiane, cette caractéristique de réponse s'appelle la caractéristique de réponse de Butterworth ou la plus horizontal. [21]

1. Le gain en tension en boucle fermée est :

$$A_v = R_{10}/R_9 + 1 \quad (28)$$

$$A_v = 1,586 \rightarrow R_{10}/R_9 = 0,586 \rightarrow R_{10} = 0,586 R_9$$

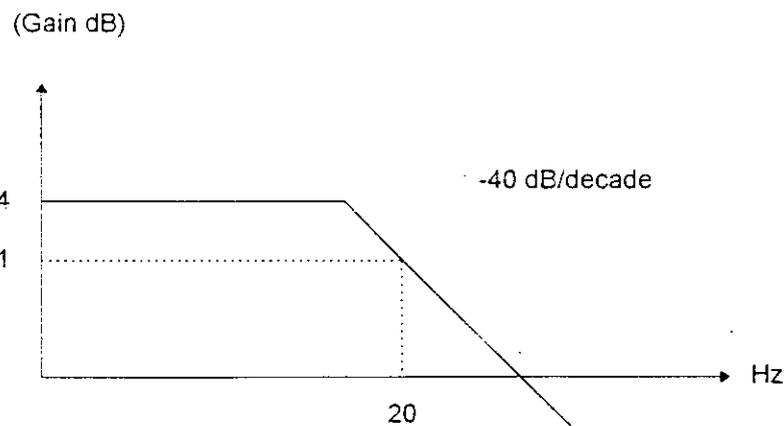
$$\text{Si } R_9 = 39 \text{ K}\Omega, R_{10} = 2,2 \text{ K}\Omega, C_9 = 47 \mu\text{F}$$

2. La fréquence de coupure de ce filtre est :  $F_c = 1/2\pi R_8 C_8 \quad (29)$

- Application :

$$F_c = 20 \text{ HZ}$$

$$\text{Si } R_8 = 1,5 \text{ K}\Omega, C_8 = 4,7 \mu\text{F}$$



**FIGURE [3,6] : LA REPONSE DU FILTRE PASSE-BAS 2EME ORDRE**

### **III .2.2. CIRCUIT DE TRAITEMENT ET DU DECLENCHEMENT :**

#### **III .2.2.1 IDENTIFICATION DES COMPOSANTS:**

Cette partie **Figure (3,7)** est caractérisé par trois circuits intégrés, un Buzzer et un relais.

Les composants réstants sont des résistances, des condensateurs, des diodes et des transistors (NPN).

En ce qui concerne le premier circuit intégré ( $\mu$  A 741) est un amplificateur opérationnel.

Les deux derniers circuits integrés, (Rc 555) se sont: Un monostable et un astable.

#### **III.2.2.2. Description d'ensemble et fonctionnement :**

Le circuit du déclenchement et du traitement utilise un amplificateur opérationnel qui fonctionne en saturation en trigger de schmitt (comparateur) qui fonctionne avec un seuil de déclenchement déterminé par  $R_1$  et  $R_2$ .

Cependant il fournit une impulsion positive de sortie, quand leur seuil d'entrée se trouve dépassé, cette impulsion sature le transistor **Bc 549 B**, ce dernier déclenche un temporisateur (monostable).

La sortie du monostable est alors mise en niveau haut, cette sortie polarise la base du transistor **2N2222** à travers  $R_6$ , il résulte que le relais est déclenché pendant la durée de stabilité du monostable, durée fonction des valeurs de  $R_5$  et  $C_5$ .

Pour minimiser l'effet des perturbations, on peut ajouter un compteur qui ne valide le temporisateur, que s'il a enregistré un minimum d'impulsions dans un temps donné. (ANNEXE2).

Pendant la durée de fermeture du relais la minuterie (astable) est en travail, et pendant ce temps le buzzer sone et la LED s'allume.

La fréquence du buzzer  $f_b$  est déterminé par  $R_7$ ,  $R_8$  et  $C_7$ .

#### **1. CALCUL DU SEUIL DE DECLENCHEMENT :**

Le seuil de déclenchement est déterminé par la formule suivante :

$$V_5 = (R_2/R_1 + R_2).V_{cc} \quad (30)$$

$$V_{cc} = 9V, R_1 = 50 K\Omega, R_2 = 20K\Omega$$

$$V_5 = 20/70.9 = 2,57 V$$

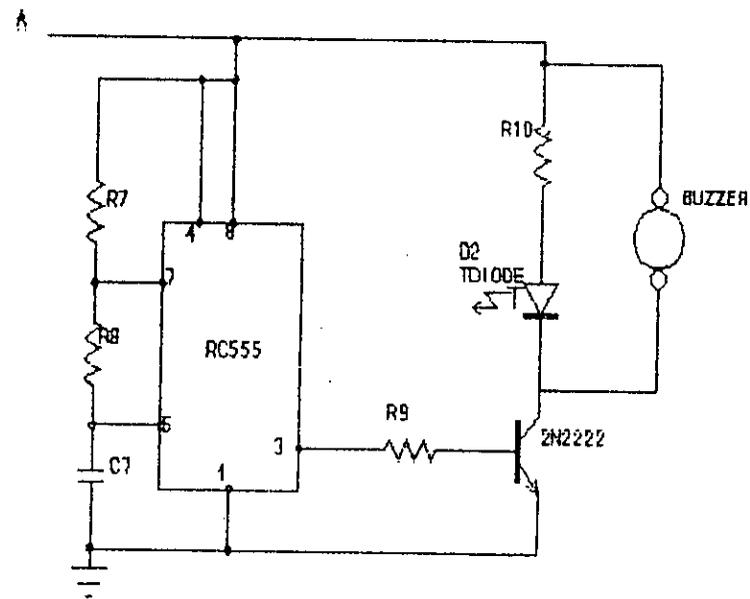
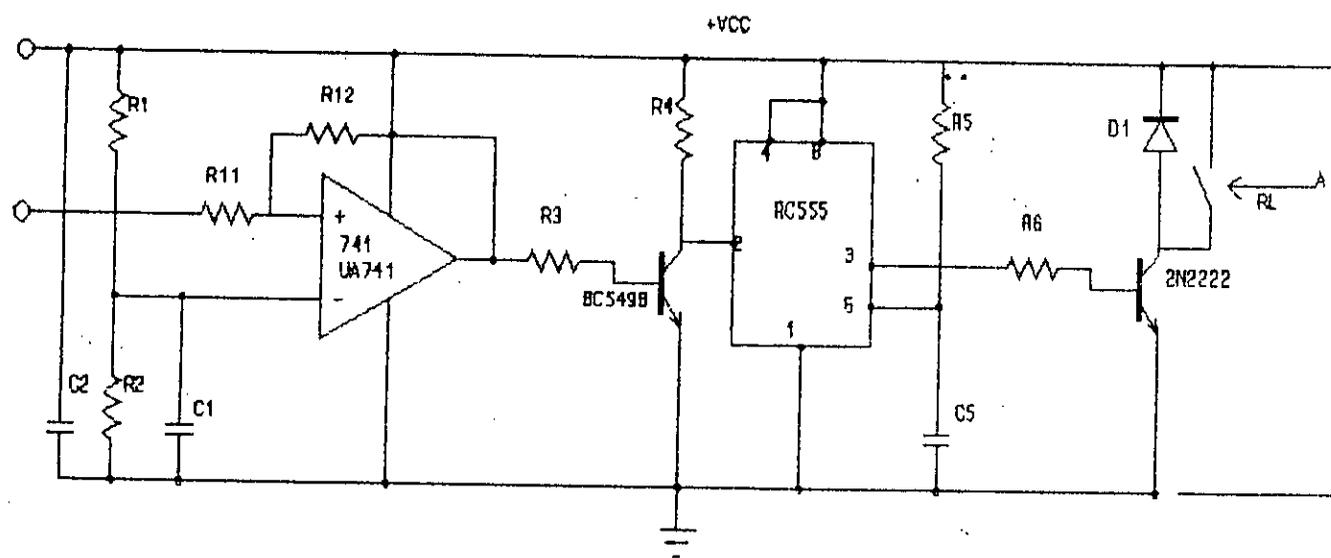


FIGURE [3,7] : LE CIRCUIT DE DECLENCHEMENT

## **2. CALCUL DES RESISTANCES ET CAPACITES, QUI DETERMINE LA DUREE DE STABILITE DU MONOSTABLE ET LA FREQUENCE DU BUZZER DELIVRE PAR L'ASTABLE :**

### **A. LA DUREE $T_s$ :**

La durée  $T_s$  de stabilité du monostable est donné par la formule suivante :

$$T_s = 1,1 \cdot R_5 C_5 \quad (31)$$

$$C_5 = 200 \mu\text{F}, R_5 = 1,2 \text{ K}\Omega, T_s = 0,264 \text{ S}$$

### **B. LA FREQUENCE DU BUZZER :**

La fréquence du buzzer est déterminée par l'expression suivante :

$$f_b = 1,44 / (R_7 + 2R_8) C_7 \quad (32)$$

Pour notre cas nous avons choisi une fréquence  $f_b$  qui nous donne une bonne sonnerie.

$$f_b = 2,7 \text{ KHZ}, R_7 = 2,2 \text{ K}\Omega, R_8 = 2,2 \text{ M}\Omega, C_7 = 0,1 \mu\text{F}$$

3. Les résistances ( $R_{11}$ ,  $R_{12}$ ) du circuit (3,7) servent à stabiliser le système du comparateur. c'est à dire éliminer les oscillations entre la tension d'entrée et la tension de référence du comparateur.

$$- R_{11} = R_1 // R_2 = R_1 R_2 / R_1 + R_2 = 20.50/70 = 14,28 \text{ K}\Omega$$

$$- R_{11} = 15 \text{ K}\Omega, R_{12} = \text{très grande}, R_{12} = 330 \text{ K}\Omega$$

$$4. R_3 = 39 \text{ K}\Omega, R_4 = 12 \text{ K}\Omega, R_6 = 39 \text{ K}\Omega, R_{10} = 330 \text{ K}\Omega$$

Ces résistances sont choisies d'une façon que les transistors fonctionnent en régime de commutation.

5. La diode D1 assure la protection du relais.

### **Remarque :**

Le montage proposé (Figure 3,3), (Figure 3,7) peut être utilisé avec un détecteur pyroélectrique simple, qui nous donnent des caractéristiques bien déterminées.

Ces caractéristiques peuvent être améliorer si on fait appel à un détecteur pyroélectrique double (Annexe 3), mais il faut alors obligatoirement le munir d'une optique comme par exemple un système de lentilles de Fresnel.

### **III.3. PROBLEME DE BRUIT :**

#### **III.3.1. DEFINITION ET CLASSIFICATION DES BRUITS :**

On appelle « bruits » au sens large de ce terme, tous les signaux aléatoires ou déterministes, qui n'apportent aucune information utile dans un problème de transmission et peuvent au contraire perturber la transmission d'une information en interférant avec les signaux utiles ou en se superposant à eux.

On peut les classer en trois catégories.

##### **III.3.1.1. BRUIT D'ORIGINE EXTERIEURE :**

###### **A. ARTIFICIEL DU A L'ACTIVITE HUMAINE :**

Ce sont des signaux parasites engendrés par des installations électriques ou électromagnétiques : lignes; antennes, moteurs, tubes fluorescents d'éclairage, etc...

Ils peuvent se transmettre aux circuits électroniques de diverses manières : conduction, induction, rayonnement électromagnétique. Ils constituent des brouillages involontaires ou intentionnels.

Leur influence peut être minimiser ou éliminée par des filtres, des blindages ou par une conception particulière des circuits à protéger.

###### **B. NATUREL :**

Ce sont des signaux électroniques dû au rayonnement thermodynamique des corps qui dépendent essentiellement de la température de ces corps.

Aussi les signaux électromagnétique dus à des perturbations atmosphériques, comme les orages, et divers rayonnements d'origine solaire et cosmique, l'influence de ces derniers étant généralement très faible, sauf dans certains problèmes spécifiques de transmission.

##### **III .3.1.2 BRUIT D'ORIGINE INTERIEURE :**

Ces bruits sont dus à des mouvements spontanés et des données qui affectent les charges électriques élémentaires mobiles à l'échelle microscopique, dans les circuits électriques et les composants.

On distingue plusieurs bruits de ce type dont nous citons quelques uns.

1. Le bruit « thermique » (bruit Johnson ou bruit de résistance) est dû à l'agitation thermique des charges élémentaires dans toutes les résistances.

2. Le bruit de « grenaille » qui existe dans les tubes à vide, les diodes, les transistors est dû aux fuctuations micro-scopiques des courants qui existent dans ces composants électriques.

3. Le bruit « en  $1/F$  » appelé aussi bruit de scintillement ou de papillotement ou encore bruit « en excès aux basses fréquences » qui existe dans les tubes à vide, les diodes, les transistors, mais aussi dans certaines résistances, particulièrement les résistances au carbone aggloméré. D'autres bruits, comme le bruit « en créneau » et le bruit d'avalanche existent aussi dans certains composants électroniques.

### **3.2. ELEMENTS DES CIRCUITS ELECTRONIQUES SUSCEPTIBLES DE CREER DES BRUITS :**

#### **III.3.2.1. LES SOURCES D'ALIMENTATION :**

On sait que ces sources sont généralement des sources de tension continue qui peuvent être obtenues à partir du réseau industriel par redressement, filtrage et stabilisation ou constituées par des piles ou des accumulateurs autonomes.

- Les sources non autonomes sont toujours le siège d'un certain bruit .

Au contraire, les piles et accumulateurs ne sont pas des sources de bruit en général.

Il est donc préférable de choisir une alimentation de ce dernier type pour réaliser un système à très faible bruit.

Dans tous les cas, pour réduire l'influence d'un bruit éventuel, on place en parallèle avec la source d'alimentation une capacité convenablement choisie.

#### **III.3.2.2. LES CAPACITES :**

Une capacité idéale est dénuée de bruit. Mais dans une capacité réelle, il existe toujours des pertes qui peuvent être représentées, soit par une résistance en série, soit par une résistance en parallèle. A la composante réelle de l'impédance capacitive ainsi représentée est associée un bruit thermique dont l'influence est généralement négligeable.

La façon la plus commode de représenter le bruit, lorsque ceci est jugé nécessaire, est d'apporter la représentation C, R parallèle de l'impédance capacitive et de lui associer en parallèle une source de courant traduisant le bruit thermique de la résistance R.

### **III 3.2.3. LES RESISTANCES :**

Les résistances constituent les principales sources de bruit des circuits électroniques.

#### **a) - LES RESISTANCES DISCRETES :**

On peut y distinguer quatre types usuels de résistances discrètes de valeurs constantes.

- . Les résistances en carbone aggloméré
- . Les résistances à couche de carbone déposée sur un support isolant.
- . Les résistances à couche au film métallique sur support isolant
- . Les résistances en fil métallique bobiné.

En ce qui concerne le bruit, elles sont toutes, bien entendu, le siège du bruit thermique fondamental, mais souvent aussi d'un bruit "en excès" ce bruit supplémentaire étant plus ou moins important selon le type de résistance et quelque fois de la valeur de la résistance. Le bruit en excès est surtout important dans les conducteurs agglomérés où le courant passe de façon irrégulière de grain à grain. Plus la structure d'un conducteur est uniforme, moins il y a de bruit en excès. On évite de façon générale les résistances agglomérées dans les étages d'entrée des amplificateurs à faible bruit. Les résistances à couche de carbone sont généralement moins bruyantes que les résistances agglomérées.

Les résistances à film de métal constituent actuellement le meilleur choix de résistances lors de la réalisation d'amplifications à faible bruit, car elles peuvent être à la fois faiblement bruyantes, de valeurs très variées largement indépendantes de la fréquence et de prix raisonnable.

Les résistances bobinées sont les moins bruyantes de toutes. Lorsque les connexions sont soudées, le bruit en excès est très faible. Il est plus élevé lorsque les connexions sont accrochées par sertissage. Ces résistances sont chères et elles dépendent de la fréquence. Car elles sont inductives ou capacitives selon l'importance et le mode de réalisation du bobinage.

#### **b) - LES RESISTANCES INTEGREES :**

Parmi les résistances intégrées, on peut distinguer d'une part, les résistances à film mince et les résistances à film épais, d'autre part, les résistances monolithiques.

Les résistances à film mince sont comparables aux résistances discrètes à film de métal. Les résistances à film épais ont des caractéristiques de bruit très variables selon la composition et la valeur de la résistance.

Les résistances monolithiques obtenues dans les circuits intégrés, sont normalement isolées des autres composants intégrés par une jonction (p-n), polarisée en sens inverse qui crée un certain bruit supplémentaire, elles sont comparables par ailleurs aux résistances à couche métallique.

### **III 3.2.4. LES DIODES ET LES TRANSISTORS :**

Ces composants donnent naissance à des bruits spécifiques. Ces bruits sont :

#### **1 - BRUIT DE GRENAILLE :**

Le bruit de grenaille est dû aux fluctuations des courants électroniques (diodes, transistors) et s'accompagne toujours d'un courant. Dans les composants semi-conducteurs, il est associé aux courants qui franchissent les barrières de potentiel.

#### **2 - BRUIT EN EXCES (1/F), AU BRUIT DE BASSE FREQUENCE :**

Ce bruit existe dans tous les composants élémentaires électroniques actifs et dans certains composants passifs. Ses origines sont variées. Dans les transistors bipolaires, il est provoqué principalement par des pièges créés par les impuretés et les défauts cristallins dans la zone de transition de la jonction émetteur-base.

Une autre cause importante est constituée par les générations et recombinaisons de porteurs dans les états de surface des semi-conducteurs.

#### **3 - BRUIT EN CRENEAUX :**

Ce bruit est encore un bruit de basse fréquence. On le rencontre dans les transistors, discrets ou intégrés. Son origine n'est pas clairement comprise actuellement, mais les études ont montré qu'il était lié à des contaminations des semi-conducteurs par des ions métalliques. Ce bruit est important, dans les dispositifs dopés à l'or.

#### **4 - BRUIT D'AVALANCHE :**

Une diode à jonction p.n polarisée en sens inverse dans sa région de claquage par effet Zener ou effet d'avalanche, est le siège de bruits particuliers, surtout lorsque le claquage est dû au dernier effet.

Les bruits qui accompagnent le phénomène d'avalanche sont beaucoup plus forts et plus complexes que les précédents.

Ils comportent, d'une part, un bruit dû au mécanisme d'avalanche lui même et, d'autre part, un bruit dit "multi-état" variant assez fortement d'un composant à un autre.

### **III. 3.2.5. CIRCUITS INTEGRES :**

Les circuits intégrés sont en général, plus bruyants que les transistors discrets, diode, car les contraintes de fabrication ne permettent pas une très bonne optimisation des bruits.

### **III. 4 - CONCLUSION :**

Dans ce troisième chapitre nous avons commencé par la présentation de la partie amplificatrice et filtrage, avec le calcul nécessaire des éléments de l'amplificateur et du filtre.

Ensuite nous avons exposé la partie du traitement et de déclenchement.

Enfin nous avons terminé par une étude sur le bruit.

# CHAPITRE IV

## **VI. MESURES ET PERFORMANCES :**

### **VI.1. MESURES DES CARACTERISTIQUES PRINCIPALES :**

#### **VI.1.1. MESURES AVEC LE PVDF :**

##### **1. SENSIBILITE :**

Cette mesure est délicate à effectuer car elle va dépendre du pouvoir émissif de la cible, lequel est lié à la température de la cible ainsi qu'à son volume (voir **Annexe1**).

Tenant compte de la faible ouverture du champ observé, nous avons choisi comme cibles, un fer à souder, la lumière blanche du stroboscope, la main d'une intrusion humaine.

##### **1.1. FER A SOUDER :**

Lorsque le fer à souder coupe le champ de vision du capteur pyroélectrique (PVDF) à une distance de (2cm), le seuil de déclenchement se trouve dépassé, avec l'apparition d'un signal pyroélectrique important (voir **Figure [4,1]**).

##### **1.2. LA LUMIERE DU STROBOSCOPE :**

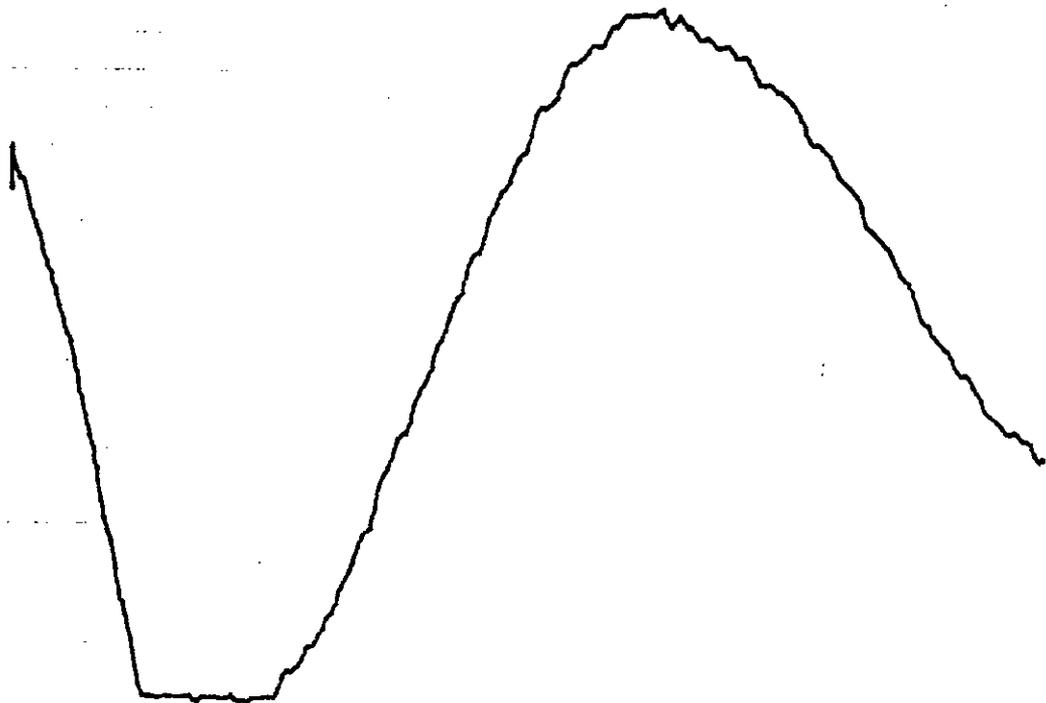
Avec le stroboscope, nous appliquons la lumière blanche discontinue à une distance de 10 cm sur la surface sensible du capteur pyroélectrique (PVDF), nous avons visualisé un signal pyroélectrique (voir **Figure [4,2]**), avec un dépassement de seuil.

##### **1.3. LA MAIN D'UNE INTRUSION HUMAINE :**

Lorsqu'une main d'une personne coupe le faisceau du capteur pyroélectrique (PVDF) à une distance de (1 à 2 cm), il y a une apparition d'un signal pyroélectrique et un dépassement de seuil de déclenchement. (voir **Figure [4,3]**).

**Echelles**  
1 cm → 14 ms  
1 cm → 1,7 v

**Distance**  
2 cm



**FIGURE [4.1] : LA REPONSE PYRO-ELECTRIQUE L'ORSQU'IL S'AGIT UN FER A SOUDER QUI COUPE LE FAISCEAU DU CAPTEUR (PVDF) A 2 CM**

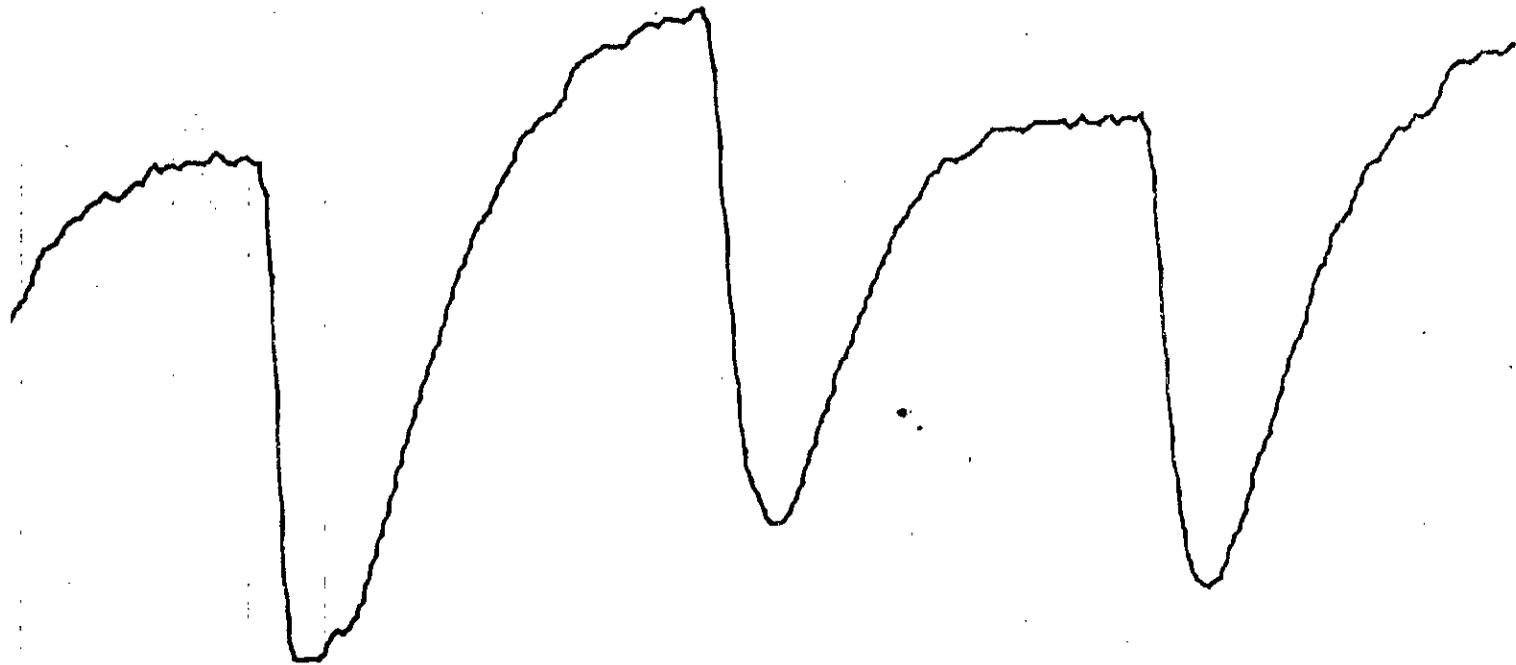
**Echelles**

1 cm → 9,5 ms

1 cm → 1,6 v

**Distance**

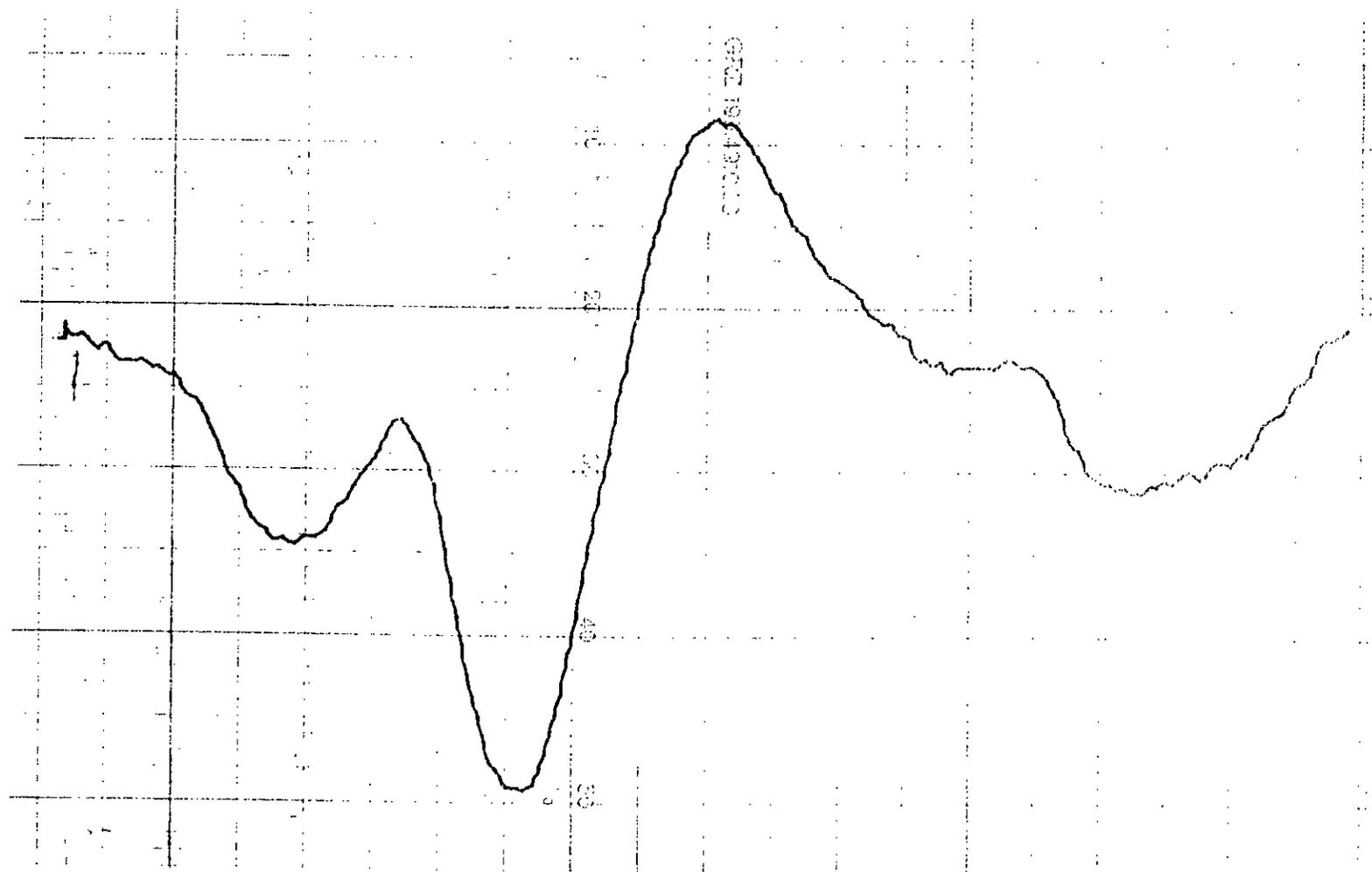
10 cm



**FIGURE [4,2] : LA REPONSE PYRO-ELECTRIQUE L'ORSQU'IL SAGIT DE LA LUMIERE DU STROBOSCOPE QUI FRAPPE LA SURFACE SENSIBLE DU CAPTEUR (PVDF) A 10 CM**

**Echelles**  
1 cm → 9,5 ms  
1 cm → 0,9 v

**Distance**  
[1 - 2] cm



**FIGURE [4.3] : LA REPONSE PYRO-ELECTRIQUE L'ORSQU'IL SAGIT LA MAIN D'UNE INTRUSION HUMAINE QUI COUPE LE FAISCEAU DU CAPTEUR (PVDF) A [1 à 2 cm]**

### **VI.1.2. MESURES AVEC LE LHI954 :**

Le LHI954 est un détecteur pyroélectrique de commerce, de grande sensibilité (3500v/w), qui utilise des éléments doubles, montés avec opposition de polarité, en parallèle (voir Annexe 3, Figure [3,3,5]), pour avoir une compensation électrique).

#### **1. PORTEE :**

Plusieurs mesures ont été réalisées à une température 22° et à chaque fois le dispositif a été en mesure de détecter une personne coupant le faisceau à 2 m, (voir Figure [4,4]).

#### **2. TEMPS DE REPONSE :**

La mesure a été effectuée par une personne qui se déplaçant perpendiculairement à l'axe optique du capteur.

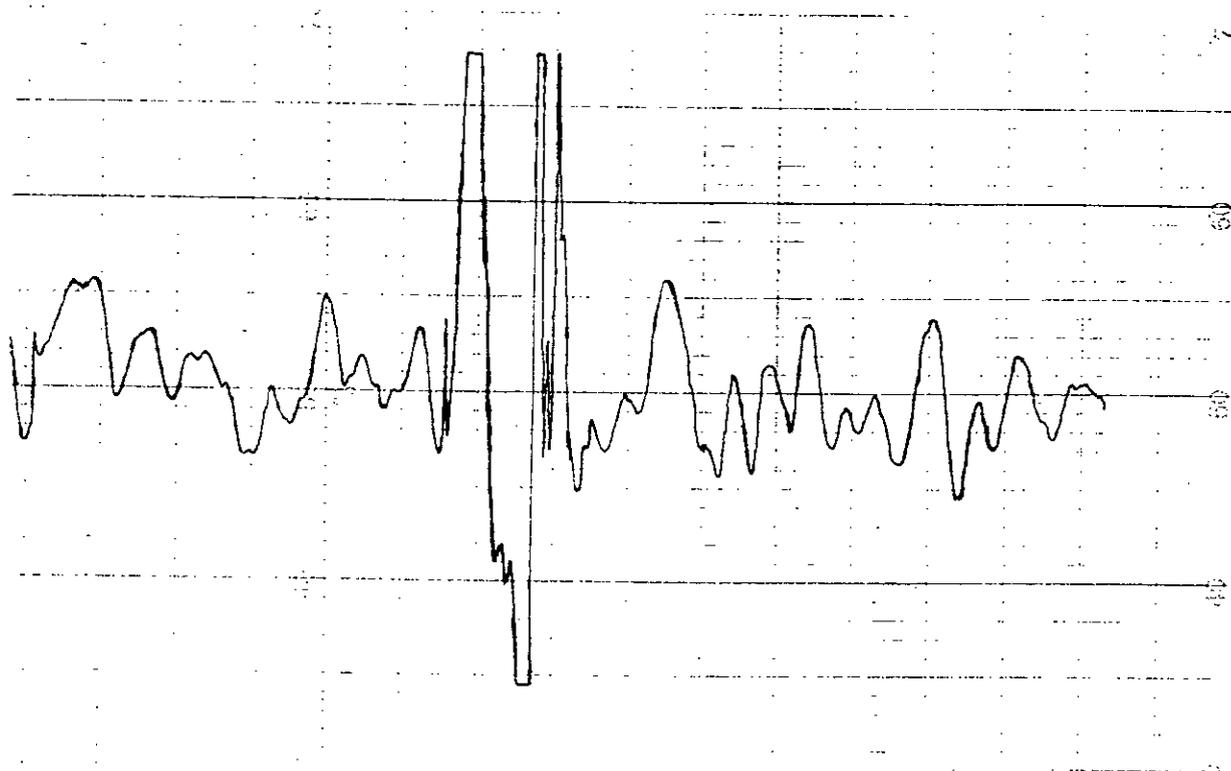
Le temps de réponse relevé est d'environ 2 secondes après franchissement du faisceau.

#### **3. DIRECTIVITE :**

Après les mesures effectuées, on peut constater que le champ couvert par le dispositif est d'environ : 80°

**Echelles**  
1 cm → 14,3 ms  
1 cm → 2,11 v

**Distance**  
2 m



**FIGURE [4.4] : LA REPOSE PYRO-ELECTRIQUE  
L'ORSQU'IL SAGIT D'UNE PERSONNE  
QUI COUPE LE FAISCEAU DU CAPTEUR  
(LHI - 954) A 2 M**

## **VI.2. CONCLUSION :**

1. Les **PVDF** utilisés sont du genre expérimental.
2. Les électrodes des capteurs en aluminium poli ce qui veut dire la réflexion est à 95% du flux incident.
3. Les échantillons du **PVDF** ne sont pas suffisamment sensibles. (une sensibilité de  $1/w$ ).
4. La méthode de fabrication du capteur n'est pas optimiser.
5. Pour améliorer la portée de notre détecteur il faut prendre les considérations suivantes :
  - a. Une couche de carbone absorbante sur les électrodes.
  - b. Augmenter la sensibilité du détecteur.

**CONCLUSION**  
**GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE :

Le travail effectué dans le cadre de ce mémoire avait pour principal objectif de montrer la faisabilité d'un détecteur pyroélectrique, utilisant comme élément sensible un polymère ferroélectrique, le polyfluorure de vinyldène **PVDF**. On peut considérer que ce but a été atteint.

Nous avons tout d'abord rappelé dans le premier chapitre de ce mémoire, les différents types des détecteurs de rayonnement, ainsi les principes du détecteur pyroélectrique et les caractéristiques du matériau **PVDF** utilisé nécessaires à la compréhension des phénomènes. A la fin de ce chapitre nous avons exposé les performances d'un tel détecteur.

Le chapitre II présente la description d'un dispositif infrarouge : l'optique, le boîtier, le capteur pyroélectrique, et le circuit du traitement de signal. Enfin nous avons terminé par les diverses applications du **PVDF**.

Dans le troisième chapitre nous avons développé la partie qui concerne le circuit du traitement de signal : le circuit d'amplification, filtrage et le circuit de déclenchement. A la fin de ce chapitre nous avons traité le problème du bruit.

Au dernier chapitre sont exposées les différentes mesures effectuées et les conclusions déduites pour mettre en évidence les limites d'utilisation de notre dispositif.

Compte-tenu des avantages que possède le **PVDF** en regard des matériaux pyroélectriques conventionnels et des premiers résultats établis dans ce mémoire, un réel avenir peut-être promis pour son utilisation dans la détection infrarouge à moyennes performances.

# ANNEXES

## ANNEXE 1

L'infrarouge est un rayonnement électromagnétique, il possède toutes les propriétés de la lumière.

Il est situé dans une région spectrale invisible à l'oeil humain sur un domaine approximatif des longueurs d'ondes qui s'étendent entre  $0,7\mu\text{m} < \lambda < 25\mu\text{m}$ .

La source de rayonnement infrarouge de référence est le corps noir qui est, par définition, un corps susceptible d'absorber complètement le rayonnement qu'il reçoit, il est également, quand on le chauffe, un émetteur parfait car il émet le maximum d'énergie qu'un corps puisse émettre à une température donnée. Le corps noir obéit à la loi fondamentale de PLANCK : qui définit à une température donnée la puissance émise par un corps noir à une certaine longueur d'onde. La radiation ou émission énergétique spectrale s'exprime alors par la relation [20] (Voir Figure [1.3.1]).

$$R_{\lambda}(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} [\exp(C_2/\lambda \cdot T) - 1]^{-1}$$

$$R_{\lambda}(\lambda, T) \equiv (\text{w. cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1})^{-1}$$

$$C_1 : 3,742 \cdot 10^4 (\text{w. cm}^{-1} \cdot \mu\text{m}^4)$$

$$C_2 : 1,439 \cdot 10^4 \text{ } (\mu\text{m} \cdot ^\circ\text{K})$$

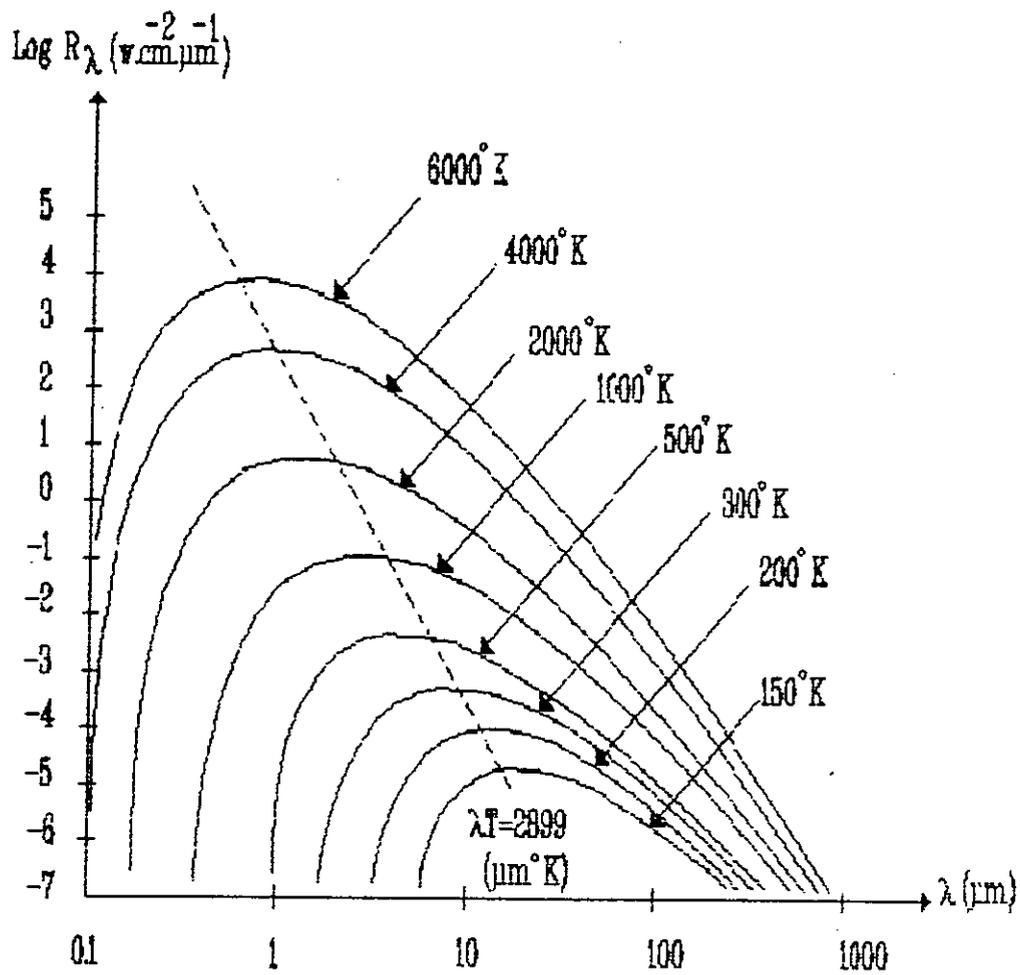
T : Température du corps noir en °Kelvin

$\lambda$  : Longueur d'onde en  $\mu\text{m}$

La loi de PLANCK est complétée par la loi du déplacement de WEEN qui précise que pour un corps noir la longueur d'onde pour laquelle l'énergie rayonnée est maximale se définit par les formules.

$$R_{\lambda, \text{max}} = 1,286 \cdot 10^{-5} \cdot T^5 (\text{w. cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1})$$

$$\lambda_{\text{max}} = 2899/T \text{ } (\mu\text{m})$$



**FIGURE [1,3,1] : EMITTANCE SPECTRALE DU CORPS NOIR EN FONCTION DE LA TEMPERATURE**

## ANNEXE 2

La forte sensibilité du capteur favorise les perturbations thermiques et électriques, susceptibles de se traduire par des fausses alarmes.

On peut s'en protéger en exploitant le fait qu'un intrus, se déplaçant devant un détecteur muni d'une optique multifoyers, va déclencher plusieurs impulsions successives dans un temps relativement limité.

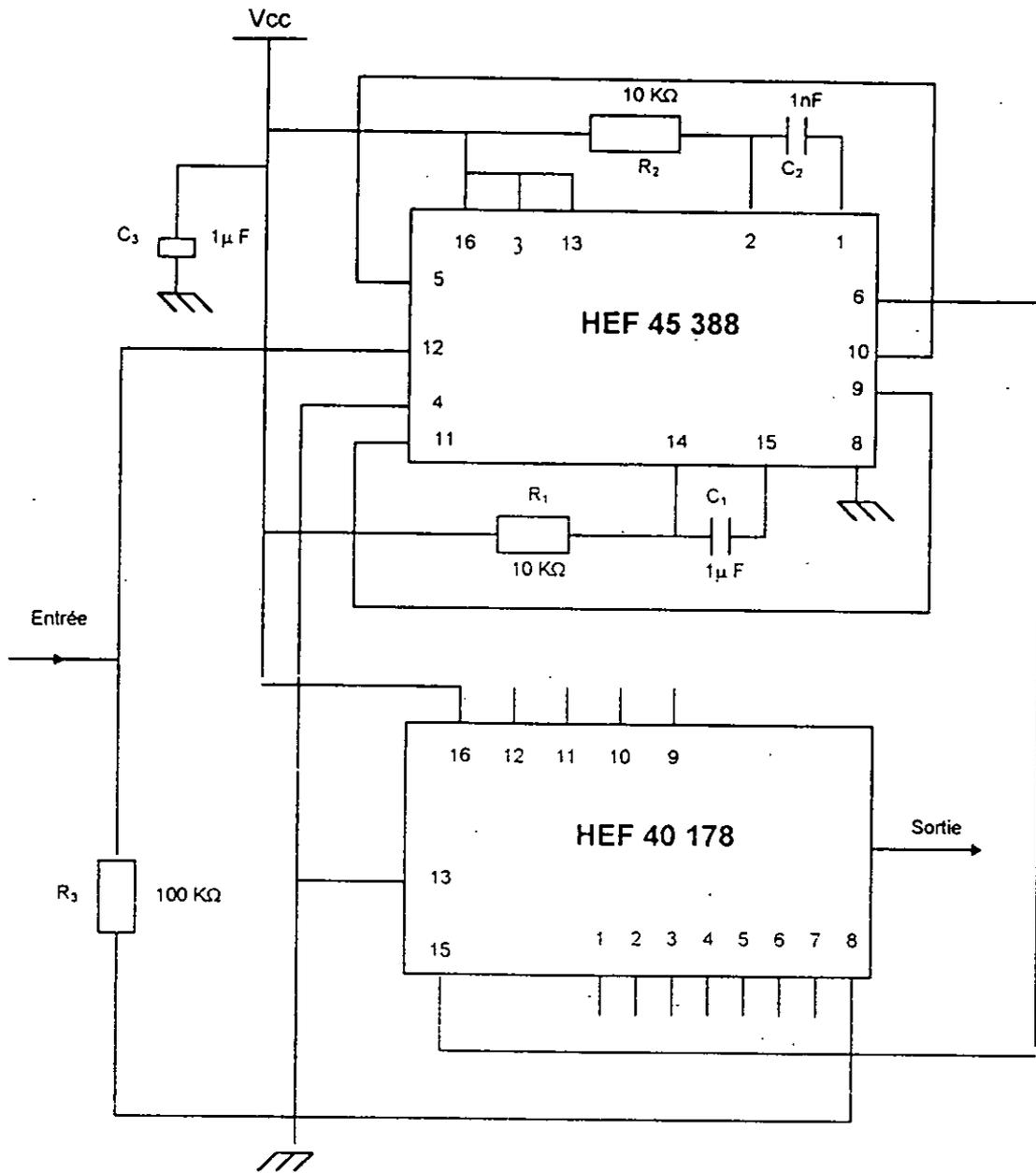
La **Figure [2,3,2]** montre un circuit qui ne répond que s'il a enregistré trois impulsions successives dans un délai de 10 secondes.

Ce délai est déterminé par les composants  $R_1$  et  $C_1$  de l'un des deux monostables qui sont contenus dans le circuit intégré **HEF4538B**.

Le déclenchement se fait par l'impulsion d'entrée, laquelle se trouve également appliquée à un compteur-décodeur **HEF4017B**.

Au bout des dix secondes, le premier monostable déclenche le second (temporisé par  $R_2$   $C_2$ ), lequel produit une très brève impulsion (10 $\mu$ s environ) servant à la remise à zéro du compteur.

Ainsi, ce dernier ne peut parvenir à la position "3" que si trois impulsions lui ont été appliquées à l'intérieur d'un délai de dix secondes, commençant avec le flanc montant de la première impulsion.



**FIGURE [2.3.2] : CETTE LOGIQUE N'AUTORISE L'EMISSION D'UN SIGNAL D'ALARME QUE SI TROIS IMPULSIONS DE DETECTION DE MOUVEMENT ONT ETE ENREGISTREES DANS UN DELAIS DE 10 SECONDES**

## ANNEXE 3

### CAPTEURS SIMPLES ET DOUBLES :

La **Figure [3,3,3]** illustre le cas le plus simple. Le détecteur pyroélectrique y est dessiné sous forme d'un condensateur, un transistor à effet de champ sert d'adaptateur d'impédance, et un élément non linéaire est prévu pour éviter toute surcharge accidentelle ou tout effet de saturation en cas de très forte variation de température.

Dans la pratique, un tel dispositif doit répondre à une variation de température de quelques degrés et qui se passe à plusieurs mètres.

L'échauffement subi par l'élément sensible est infime, dans ces conditions.

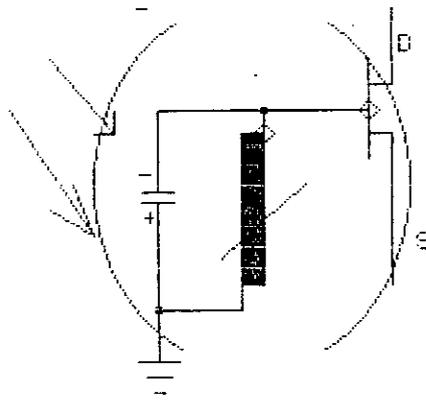
En d'autres termes, le moindre courant d'air en fait autant, quand il frappe le détecteur. Pour éviter les conséquences, on utilise des éléments doubles, montés, avec opposition de polarité, en série comme dans la **Figure [3,3,4]**, ou en parallèle comme dans la **Figure [3,3,5]**.

Les courants d'air ou autres phénomènes de même effet (nuage obscurcissant le soleil, pluie froide sur une fenêtre) agissent alors de la même manière sur les deux éléments, et les conséquences électriques se compensent. Le passage du "corps chaud" provoque alors une alternance "moins-plus" sur le premier, et une alternance "plus-moins" sur le second élément.

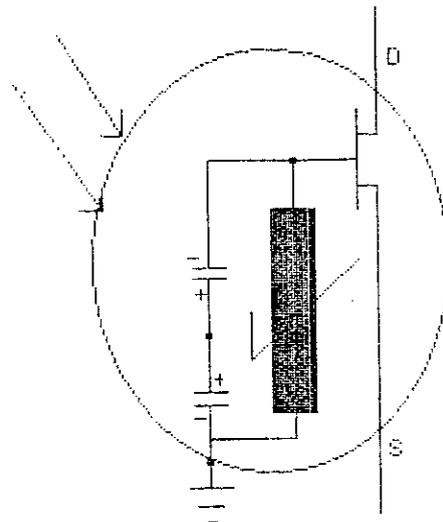
Du fait de l'inertie des capteurs, les deux alternances "plus" s'additionnent quand ces capteurs se trouvent en série et on obtient une amplitude deux fois plus grande qu'avec un seul. Ce n'est pas pour autant que les capteurs à deux éléments série soient toujours à préférer aux associations en parallèle.

Ces dernières présentent, en effet un bruit moindre, et leur plus grande régularité d'amplitude permet un comptage d'impulsions qui ne valide le détecteur qu'à trois impulsions se sont succédées dans un délai donné.

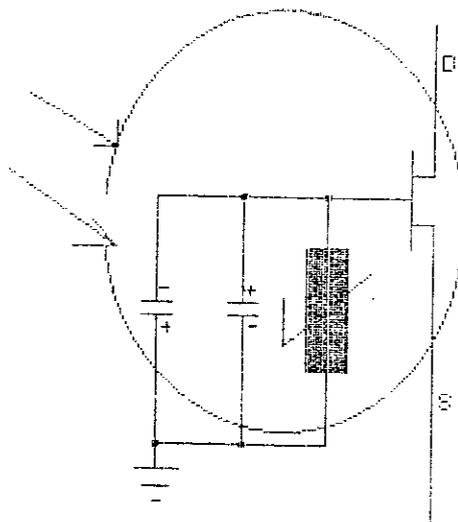
Certes, cela ne fonctionne que si les deux éléments sont orientés côte à côte (et non pas l'un en-dessous de l'autre).



**FIGURE [3.3.3] : DETECTEUR PYROELECTRIQUE SIMPLE**



**FIGURE [3.3.4] : DETECTEUR PYROELECTRIQUE DOUBLE SERIE**



**FIGURE [3.3.5] : DETECTEUR PYROELECTRIQUE DOUBLE PARALLELE**

# **BIBLIOGRAPHIE**

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] HERRMANN SCHREIBER  
Les infrarouges en électronique (1989)
  
- [2] ESSAID BOUSBIAT  
DéTECTEURS pyroélectriques sur polyvinylidene bifluore et copolymère,  
intégrés sur silicium.  
Approche technologique de capteurs unitaires et matrices bidimensionnelles  
infrarouges.  
Thèse de Doctorat d'Etat, Université des Sciences et de la technologie  
Houari Boumédiène (U.S.T.H.B), Alger (1991).
  
- [3] M. KNEPPERT  
DéTECTEUR Humain  
Centre National de la Recherche Scientifique (LAAS) (1986)
  
- [4] A. BUNUEL, J. FARRE, W. PHAM, JJ. SIMONE  
Capteur piezo et pyroélectriques. Développement des applications du  
PVDF (1986)
  
- [5] J. COAT  
Bruit dans les circuits électroniques  
Ecole supérieure d'électricité (1988)
  
- [6] M. A. MARCUS  
Ferroelectrics polymer and their application :  
Ferroelectrics (1982) Vol.40
  
- [7] S.G. PORTER  
A brief guide to pyroelectric detectors  
Ferroelectrics (1981) Vol.33
  
- [8] H. GALLAN TREE, R.M. PULLIAM  
Polarized poly (vinylidene fluoride) its application to  
pyroelectric and piezoelectric device. The Marconi review,  
fourth quater (1976)
  
- [9] E. WILLIAMS  
Pyroélectrics and piezoelectrics devices  
Electronic engineering - June (1977)
  
- [10] W. E. BLEVIN  
Poling rates for films of PVDF, applied physics letters,  
Vol.31, Nø1, July (1977)

- [11] J. V. TURNHOUT  
Thermally stimulated discharge of polymer electrets.  
Elsevier scientific publishing (1975). London
- [12] D.K. DAS GUPTA et K. DOUGHTY  
"Corona charging and the piezoelectric effect in **PVDF**"  
J. Appl physics, 49(8), (1978)
- [13] T.T. WANG, J. E. WEST  
"Polarization of **PVDF** by application of break down fields"  
J. Appl physics 53(10), (1982)
- [14] E. H. PUTLEY  
Semiconductors and semimetals 5, infrared detectors
- [15] D. J. WHITE and H. H. WIEDER  
J. Appl, Phys, 34, 2487 (1963)
- [16] M. SIMHONY and A. SHAULOV  
J. Appl, Phys, 42, 3741 (1971)
- [17] A.G. CHONYOWETH  
J. Appl, Phys, 27, 78, (1956)
- [18] R. BYER and C. ROUNDY  
Ferroelectrics, 3, 333 (1972)
- [19] E. H. PUTLEY  
In "optical and infrared detectors" edited by :  
R. J. Keys (Springer - Verlag)
- [20] J. FARRE  
Photo détecteur MIS sur semi-conducteurs intrinsèques pour imagerie  
infrarouge thermique.  
Aide à la conception de matrices dans le plans focal.  
Toulouse, Université Paul sabatier (1980).
- [21] ALBERT PAUL MALVINO  
Principe d'électronique 3<sup>ème</sup> édition (1988).