

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Electronique
Laboratoire Signal et Communication
Mémoire de projet de fin d'études
pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Electronique

Etude et Applications d'une Caméra Thermique Infrarouge

Djameleddine BELLEM

Sous la direction de
Mr. M. MEHENNI Professeur

Présenté et soutenu publiquement le 22/06/2016

Composition du Jury :

| | | | |
|-----------|---------------------|-------------------|-------------------------------|
| Président | Mr. M.S. AIT-CHEIKH | Professeur | Ecole Nationale Polytechnique |
| Promoteur | Mr. M. MEHENNI | Professeur | Ecole Nationale Polytechnique |
| Examineur | Mr. B. BOUSSEKSOU | Maitre Assitant A | Ecole Nationale Polytechnique |
| Invité | Mr. M. TRAICHE | Docteur | CDTA |

ENP 2016

DEDICACE

A ma mère, ma mère, ma mère et mon père

A mes sœurs

A mon frère

A tous les membres de ma famille

A mon promoteur : M.MEHENNI

*A mes amis de l'ENP spécialement du département
Electronique*

A tous ceux qui ont su croire en moi

A tous ceux qui me sont chers

A tous ceux que je n'ai pas cités et qui sont présents dans mes pensées

Je dédie ce modeste travail

Djameleddine

Remerciements

Je remercie le bon Dieu pour m'avoir donné la force et la santé dans la réussite de nos études et de ce présent travail.

Mes remerciements vont à mes chers parents qui ont empli ma vie d'amour et de joie, et qui ont fait de leurs mieux pour que j'arrive à ce que je suis maintenant. J'exprime ma profonde reconnaissance et gratitude à mon promoteur, le Professeur Mohamed MEHENNI, qui a su m'apporter un soutien constant, une disponibilité, une écoute, une confiance et des conseils précieux et avisés à la hauteur de ses compétences et de ses réelles qualités humaines.

J'exprime aussi, ma profonde reconnaissance aux membres du jury, Professeur M.S. AIT-CHEIKH et Monsieur B. BOUSSEKSOU, pour leurs disponibilités, et d'avoir accepté de juger mon travail.

Mes remerciements vont également à Monsieur le Docteur Mohamed TRAICHE, pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire et de m'avoir permis de réaliser les expérimentations sur le banc de mesures avec la caméra thermique.

Je tiens à exprimer ma gratitude et reconnaissance aux enseignants du département Électronique de l'École Nationale Polytechnique d'Alger, qui ont contribué étroitement à ma formation d'ingénieur, je leurs suis reconnaissant pour leurs inestimables efforts durant ma formation.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ملخص

فوق درجة حرارة (0) كالفن بإمكان أي جسم يبعث موجات كهرومغناطيسية – تحت الحمراء – نحو الوسط المحيط به, و يلعب دور المنبع الإشعاعي بتحويل جزء من الطاقة الحرارية الداخلية إلى طاقة إشعاعية.

تتمثل تقنية التصوير الحراري بالموجات تحت الحمراء في النقاط هذه الأشعة المنبعثة من الجسم و من ثم تقييمها بهدف التمكن من حساب و قراءة درجة حرارة السطح عن بعد, بدون تماس, بطريقة غير هدامة و حتى في حالة عمل.

تتميز الصور الحرارية الملتقطة بواسطة كاميرا حرارية عادة بوجود أخطاء ناتجة عن طريقة تحويل الأشعة و تقييمها, و جود تشويش ناتج عن الإشعاعات المنبعثة من الأجسام المحيطة و الوسط الخلفي و بالتالي فهي بحاجة إلى الخضوع إلى معالجة مناسبة. في هذا السياق تناولنا على سبيل المثال نظام تبريد لحذف تأثير التشويش الحراري.

الكلمات المفتاحية: تقنية التصوير الحراري, حرارة السطح, الأشعة تحت الحمراء, الكاميرا الحرارية, معالجة الصور تحت الحمراء.

Abstract

Anybody whose temperature is higher than 0K emits an infrared radiation, it plays the role of source by transforming part of thermal energy into radiative energy, therefore as electromagnetic radiation.

Infrared thermography consists in collecting this radiation, to quantify it in order to allow the reading of the values of remote temperature, without contact, in a nondestructive way and on objects under operation.

The thermal images provided by the infrared camera are characterized by the presence of radiometric errors, a strong random noise and weak thermal contrast and which require a suitable treatment then. In this context, we took as an example a cooling system to eliminate the effect of the thermal noise.

Key words: infrared thermography, temperature of surface, infrared radiation, thermal camera, infrared image processing.

Résumé

Tout corps dont la température est supérieure à 0 K émet un rayonnement infrarouge, il joue le rôle de source en transformant une partie de l'énergie thermique en énergie radiative, donc en rayonnement électromagnétique.

La thermographie infrarouge consiste à capter ce rayonnement, à le quantifier afin de permettre la lecture des valeurs de température à distance, sans contact, de manière non destructive et sur des objets en fonctionnement.

Les images thermiques fournies par la caméra infrarouge sont caractérisées par la présence d'erreurs radiométriques, d'un fort bruit aléatoire et de faibles contrastes thermiques qui nécessitent alors un traitement approprié. Dans ce contexte, nous avons pris à titre d'exemple un système de refroidissement pour éliminer l'effet du bruit thermique. Il est ensuite montré comment utiliser efficacement les informations contenues dans ces images infrarouges.

Mots clés : thermographie infrarouge, température de surface, rayonnement infrarouge, caméra thermique, traitement d'image infrarouge.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

| | |
|--|----|
| Introduction générale | 14 |
| Chapitre 1 : Rayonnement infrarouge | 15 |
| 1. Emission de l'objet « cible » | 16 |
| 1.1 Grandeurs définissant un rayonnement | 16 |
| 1.1.1 Le flux (F) | 16 |
| 1.1.2 Intensité (I) | 17 |
| 1.1.3 Luminance (L) | 18 |
| 1.1.4 Eclairement (E) | 19 |
| 1.1.5 Exitance (R) | 20 |
| 1.1.6 Exposition (Σ) | 21 |
| 1.1.7 Loi de BOUGUER | 21 |
| 1.2 Rayonnement infrarouge | 21 |
| 1.2.1 Classification du rayonnement infrarouge | 22 |
| 1.2.2 Sources de rayonnement infrarouges | 23 |
| 1.2.3 Signature infrarouge d'un objet | 24 |
| 1.3 Rayonnement du corps noir | 24 |
| 1.3.1 Loi de Planck | 25 |
| 1.3.2 Loi de Wien | 26 |
| 1.3.3 Loi de Stephan Boltzmann | 27 |
| 1.3.4 Réalisation d'un corps noir | 28 |
| 1.4 Emissivité des matériaux | 29 |
| 1.4.1 Définitions de l'émissivité | 29 |

| | |
|---|-----------|
| 1.4.2 Facteurs d'influences..... | 31 |
| 1.4.3 Émissivité de quelques matériaux | 31 |
| 1.5 Calcul du rayonnement émis | 34 |
| 1.6 Les différents types de corps | 36 |
| Chapitre 2 : Transmission atmosphérique..... | 38 |
| Introduction | 39 |
| 2.1 Les différentes perturbations de l'atmosphère terrestre | 43 |
| 2.2 Absorption moléculaire | 46 |
| 2.3 La diffusion atmosphérique..... | 47 |
| Chapitre 3 : Détecteurs | 50 |
| 3. Détecteurs du rayonnement infrarouge | 51 |
| 3.1 Le choix d'un détecteur de rayonnement | 52 |
| 3.2 Les différents types de détecteurs | 52 |
| 3.2.1 Les détecteurs thermiques | 52 |
| 3.2.1.1 Les bolomètres | 52 |
| 3.2.1.2 Les détecteurs pyroélectriques | 53 |
| 3.2.1.3 Les thermopiles | 54 |
| 3.2.2 Les détecteurs quantiques | 55 |
| 3.2.2.1 Les détecteurs photoémissifs..... | 55 |
| 3.2.2.2 Les détecteurs photoconducteurs | 56 |
| 3.3 Caractéristiques des détecteurs..... | 56 |
| 3.3.1 Sensibilité (S)..... | 56 |
| 3.3.2 Minimum de flux détectable | 57 |
| 3.3.3 Défectivité spécifique | 58 |
| 3.4 Détecteurs multiéléments | 59 |
| 3.4.1 Dispositif à transfert de charges CCD..... | 60 |

| | |
|--|-----------|
| 3.4.2 Condensateur MOS | 61 |
| 3.5 Refroidissement des détecteurs | 64 |
| 3.6 Matériaux des systèmes infrarouges | 66 |
| 3.6.1 Les verres | 67 |
| 3.6.2 Les cristaux | 67 |
| 3.6.3 Les matériaux plastiques | 68 |
| 3.6.4 Les métaux | 69 |
| Chapitre 4 : Affichage | 70 |
| 4. Visualisation de la température | 71 |
| 4.1 Signal fourni par le détecteur | 72 |
| 4.1.1 Calibration..... | 72 |
| 4.1.1.1 Calibration lumineuse | 72 |
| 4.1.1.2 Calibration en température | 73 |
| 4.2 Caractérisation d'une caméra | 77 |
| 4.2.1 La réponse spectrale relative | 78 |
| 4.2.2 Le bruit | 78 |
| 4.2.3 Les courbes d'étalonnage | 78 |
| 4.2.4 La sensibilité | 78 |
| 4.2.5 La plage de fonctionnement | 79 |
| 4.2.6 La résolution spatiale | 79 |
| 4.2.7 La résolution temporelle..... | 79 |
| 4.2.8 La constante de temps | 79 |
| 4.2.9 La résolution thermique | 79 |
| 4.3 Modes d'analyse d'une image thermique..... | 80 |
| 4.4 Résolutions de la caméra thermique..... | 80 |
| 4.4.1 Balayage spatial optomécanique | 80 |

| | |
|--|-----------|
| 4.4.2 Balayage spatial électronique | 81 |
| 4.5 Applications de la caméra thermique | 82 |
| 4.5.1 Applications et utilisations de la caméra thermique..... | 83 |
| 4.5.1.1 La recherche et développement..... | 83 |
| 4.5.1.2 Les applications médicales..... | 83 |
| 4.5.1.3 Maintenance et prévention | 84 |
| 4.5.1.4 Surveillance du site | 85 |
| Chapitre 5 : Etudes expérimentales et résultats | 86 |
| 5. Partie expérimentale | 87 |
| 5.1 Capteur de température LM35 | 87 |
| 5.2 Mesures de l'intensité lumineuse de notre source laser | 88 |
| 5.3 Mesures sur Caméra pyroélectrique « Pyrocam III » | 90 |
| 5.3.1 Caractéristiques de la caméra | 91 |
| 5.3.2 Sources optiques utilisées | 92 |
| 5.3.3 Logiciel d'analyse de l'image thermique | 94 |
| 5.3.3.1 Interface de commande | 94 |
| Conclusion générale | 103 |
| Bibliographie..... | 104 |

Liste des tableaux :

Tableau 1 : les valeurs d'émissivité de quelques matériaux dans des conditions appropriés.....34

Listes des figures:

| | |
|---|----|
| Figure 1.1 : intensité d'une source | 18 |
| Figure 1.2 : paramètres de définition de la luminance d'un rayonnement..... | 18 |
| Figure 1.3 : éclairage sur un plan..... | 20 |
| Figure 1.4 : exitance d'une source..... | 20 |
| Figure 1.5 : Le spectre des rayonnements électromagnétiques..... | 22 |
| Figure 1.6 : spectre du rayonnement terrestre..... | 23 |
| Figure 1.7 : courbes de Planck..... | 25 |
| Figure 1.8 : loi de Stephan-Boltzmann..... | 28 |
| Figure 1.09 : émission spectrale en fonction de la longueur d'onde pour différents métaux à température ambiante | 32 |
| Figure 1.10 : émissivité spectrale en fonction de la longueur d'onde pour différents diélectriques à température ambiante | 32 |
| Figure 1.11 : émissivité normale spectrale en fonction de la température lors de fusion de métaux | 33 |
| Figure 1.12: Le rayonnement émis et le rayonnement réfléchi..... | 35 |
| Figure 1.13 : Distribution spectrale de différents corps à la même température..... | 37 |
| Figure 2.1 : facteur de transmission spectrale atmosphérique..... | 39 |
| Figure 2.2 : influence de la distance et de la température-transmission spectrale de l'atmosphère..... | 41 |
| Figure 2.3 : influence de la distance de propagation-transmission atmosphérique..... | 41 |
| Figure 2.4 : influence de la température-transmission atmosphérique | 42 |
| Figure 2.5 : influence de la distance de propagation-transmission atmosphérique- $d=10\text{km}$ | 42 |
| Figure 2.6 : influence de la température-transmission atmosphérique- $T=30^\circ\text{C}$ | 43 |
| Figure 2.7: structure de l'atmosphère avec l'altitude. [9] | 45 |
| Figure 2.8 : variation de la fonction k_0 en fonction de r/λ | 49 |
| Figure 3.1 : Thermopile | 55 |
| Figure 3.2 : Détections spécifiques de détecteurs pour des températures indiquée | 58 |
| Figure 3.3: détecteurs à éléments multiples :(a) parallèle, (b) série, (c) série-parallèle, (d) micro balayage. | 60 |
| Figure 3.4 : Exemples d'analyseurs intégrés (CCD) linéaires et matriciels..... | 60 |
| Figure 3.5 : Structure d'un analyseur CCD matriciel..... | 61 |
| Figure 3.6 : condensateur MOS..... | 62 |
| Figure 3.7 : création de la zone dépeuplée..... | 62 |
| Figure 3.8 : Principe du transfert du charge..... | 63 |
| Figure 3.9 : Effet peltier..... | 65 |

| | |
|---|-----|
| Figure 3.10 : Sonde Joule Thomson..... | 66 |
| Figure 3.11 : la transmission spectrale des films plastiques varie indépendamment de l'épaisseur. | 68 |
| Figure 4.1 Démarche méthodologique de la mesure thermographique. | 71 |
| Figure 4.2 : Observation de l'émission d'une source placée dans un environnement à travers une atmosphère. | 75 |
| Figure 4.3 : schéma simplifié d'un radiomètre. | 76 |
| Figure 4.4 : Espace des caractéristiques des détecteurs | 77 |
| Figure 4.5 : Principe de l'optique d'une caméra à balayage optomécanique. | 80 |
| Figure 4.6 : Éclaté de la partie optique de la caméra THERMOVISION 800. | 80 |
| Figure 4.7 : Structures de principe des balayages d'une caméra linéaire (à barrette) et d'une caméra à matrice. | 81 |
| Figure 4.8 : détection des personnes affectées par la grippe aviaire par thermographie..... | 83 |
| infrarouge..... | 83 |
| Figure 4.9: image thermique d'une façade de maison..... | 84 |
| Figure 4.10 : image thermique d'un centre de surveillance | 85 |
| Figure 5.1 : capteur de température LM35DZ | 87 |
| Figure 5.2 : courbe expérimentale $T(^{\circ}\text{C}) = f(t(\text{min}))$ | 88 |
| Figure 5.3 : puissance en fonction du courant d'injection pour $T= 40^{\circ}\text{C}$ et $T= 28^{\circ}\text{C}$ | 88 |
| Figure 5.4 : Courbe standard P-I pour trois températures. | 89 |
| Figure 5.5 : Caméra de type Pyrocam III..... | 90 |
| Figure 5.6 : source laser utilisée « He-Ne ». | 92 |
| Figure 5.7 : torche d'un téléphone « lumière visible » | 93 |
| Figure 5.8 : détection du rayonnement laser He-Ne à l'aide d'une caméra infrarouge..... | 93 |
| Figure 5.9 : Fer à souder..... | 93 |
| Figure 5.10 : source laser infrarouge..... | 94 |
| Figure 5.11 : interface de commande de la PyrocamIII. | 95 |
| Figure 5.12 : hacheur « chopper » de la Pyrocam III. | 96 |
| Figure 5.13 : alimentation du laser « déclencheur de synchronisation avec la caméra » | 97 |
| Figure 5.14 : profil du faisceau laser He-Ne en 3D | 97 |
| Figure 5.15: profil du faisceau laser HeNe en 2D..... | 98 |
| Figure 5.16 : profil du faisceau d'une torche d'un téléphone mobile en 3D..... | 98 |
| Figure 5.17 : profil du faisceau d'une torche d'un téléphone mobile en 2D..... | 99 |
| Figure 5.18 : profil de la lumière infrarouge du fer à souder en 2D..... | 100 |
| Figure 5.19 : profil de la lumière infrarouge du fer à souder en 3D..... | 100 |
| Figure 5.20 : profil du faisceau laser Nd-YAG en 2D. | 101 |

Figure5.21 : profil du faisceau laser Nd-YAG en 3D. 101
Figure5.22 : divergence du faisceau laser.....102

Liste des abréviations :

F_e : Flux énergétique.

F_p : Flux photonique.

F_l : Flux lumineux.

RTC : Coefficient Thermique de résistance.

SC : Semi-conducteur.

TGS : Sulfate de triglycine.

PVDF : Poly-Vinylidène Fluoride.

f.e.m : Force électromotrice.

PEB : Puissance équivalente au bruit.

CCD : Charge Coupled Devices.

MOS : Metal-Oxide-Silicium .

FEP : Fluor- Ethylène - Propylène.

PLU : Plage de lumière uniforme.

D^* : Défectivité spécifique

Introduction générale :

Chaque jour, dans le monde entier, des scientifiques sont à la recherche de nouvelles méthodes pour la résolution des problèmes. La thermographie infrarouge a fait ses preuves en tant qu'outil précieux pour résoudre un large éventail de questions scientifiques. Grâce à leur capacité d'analyse non destructive, les systèmes thermographiques sont des instruments importants pour répondre à une grande variété d'applications de recherche et développement.

Le rayonnement infrarouge émis par un corps contient un certain nombre d'informations caractéristiques de la matière constitutive de ce corps, de son histoire récente et de son agencement.

La saisie de ces informations, grâce à un système d'acquisition et de traitement approprié, permet d'atteindre et de contrôler certains paramètres, difficilement ou non directement mesurables.

L'imagerie infrarouge, ou thermographie 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 de transformer une image infrarouge en une image visible. En d'autres termes, il est nécessaire de restituer une image dont la distribution de luminance visible est proportionnelle à la répartition de luminance infrarouge sur l'objet, c'est-à-dire, à sa distribution spatiale de température $\mathbf{T}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ ou d'émissivité $\epsilon(\mathbf{x}, \mathbf{y})$.

La carte thermique, rayonnements ou températures, obtenue par cette méthode s'appelle un thermogramme : c'est un instantané mesurable d'un phénomène thermique statique ou dynamique. L'instrument de mesure est une **caméra infrarouge**, dite aussi **caméra thermographique**, caméra de mesure infrarouge ou analyseur thermique.

Le chapitre 1 fourni un résumé des différentes grandeurs de l'émission infrarouge, au rayonnement d'un corps se trouvant dans une température donnée.

Dans le chapitre 2, on étudiera l'effet de l'atmosphère sur un rayonnement infrarouge.

L'étude des détecteurs infrarouges et leurs caractéristiques est menée dans le chapitre 3.

Le chapitre 4 traite de l'affichage de la grandeur détectée.

Chapitre 1 :

Rayonnement infrarouge

1. Emission de l'objet « cible »

L'agitation des molécules de la matière se traduit par l'émission d'un flux de rayonnement électromagnétique fonction de la température de la matière ; c'est le rayonnement thermique. Le rayonnement thermique couvre approximativement la gamme de 0,1 à 1 000 μm . La thermographie infrarouge classique couvre la gamme allant de 2 à 20 μm .

La source principale de rayonnement infrarouge est la chaleur, ou rayonnement thermique. Tout objet, dont la température est supérieure au zéro absolu [-273,15 degrés Celsius ou 0 Kelvin], émet un rayonnement électromagnétique. [4]

1.1 Grandeurs définissant un rayonnement [16]

La mesure de température de surface, par observation du rayonnement d'émission, fait intervenir le transfert de l'énergie rayonnée par la source vers un capteur, et par suite les grandeurs relatives au rayonnement transporté dans un faisceau « lumineux ».

1.1.1 Le flux (F)

On appelle flux, la valeur instantanée d'un débit de rayonnement ; il peut s'agir du débit émis par une source, transporté par un faisceau, ou capté par un récepteur. Selon les systèmes d'unités, on distingue différents types de flux :

- **Flux énergétique (Fe)**

On peut transformer ce rayonnement en chaleur, puissance thermique, dont la valeur sera donnée en Watts.

Le flux énergétique d'un rayonnement est proportionnel à la valeur moyenne temporelle de son vecteur de Poynting :

$$\langle \|\vec{s}\| \rangle = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \|E_o\|^2 \dots\dots\dots (1-1)$$

Où : ϵ , μ sont respectivement la permittivité électrique et la perméabilité magnétique du milieu de propagation. E_0 amplitude du champ électrique associé à l'onde plane caractérisant le rayonnement optique.

- **Flux photonique (Fp)**

Le débit de photons par unité de temps est appelé flux photonique (Fp), Chaque photon transporte, à la vitesse de la lumière, une énergie individuelle E proportionnelle à la fréquence ν de son onde associée suivant la relation de Planck :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \dots\dots\dots (1-2)$$

Où : h constante de Planck ($6.62 \cdot 10^{-34}$ js)

λ Longueur d'onde en (m).

Pour une lumière quasi-monochromatique, la relation entre les deux flux, énergétique et photonique, est la suivante :

$$F_e = F_p E \dots\dots\dots (1-3)$$

- **Flux lumineux (Fl)**

Ce troisième type de flux est défini pour quantifier les stimulations visuelles des rayonnements sur un observateur humain, dont l'unité est le **Lumen**.

1.1.2 Intensité (I)

L'intensité d'un émetteur dans une direction donnée définie par les paramètres directeurs (η , ξ), est le flux élémentaire dF_s qu'il émet par unité d'angle solide $d\Omega_s$ dans la direction considérée :

$$I(\eta, \xi) = \frac{dF_s(\eta, \xi)}{d\Omega_s} \dots\dots\dots (1-4)$$

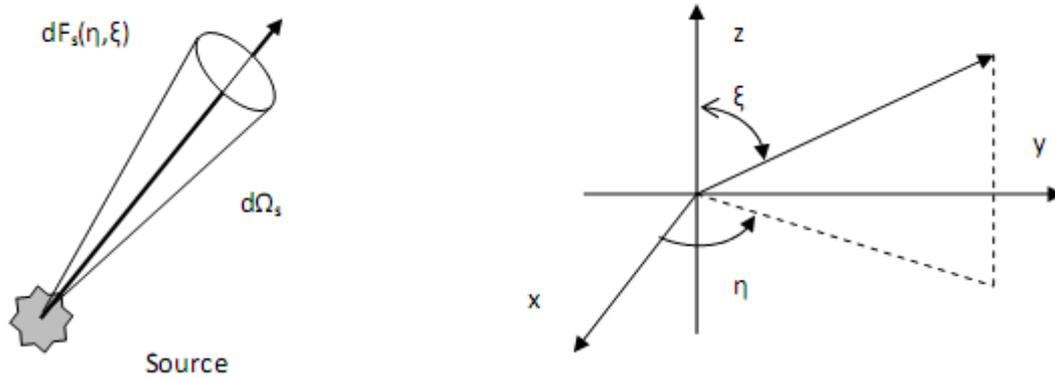


Figure 1.1: intensité d'une source

1.1.3 Luminance (L)

Par définition, la luminance au point (x, y) , de la source et dans la direction (η, ξ) , est l'intensité par unité de surface apparente dans cette direction, soit : (Figure 1.2)

$$L_S(x, y, z, \eta, \xi) = \frac{dI(x, y, z, \eta, \xi)}{dA_s \cdot \cos\theta_s} \dots\dots\dots (1-5)$$

Où θ_s est l'angle entre la normale et la direction d'intérêt, d'où :

$$L_S(x, y, z, \eta, \xi) = \frac{dI(x, y, z, \eta, \xi)}{dA_s \cdot \cos\theta_s} = \frac{d^2F}{d^2G} \dots\dots\dots (1-6)$$

d^2G étendue géométrique ; caractéristique de la géométrie du montage.

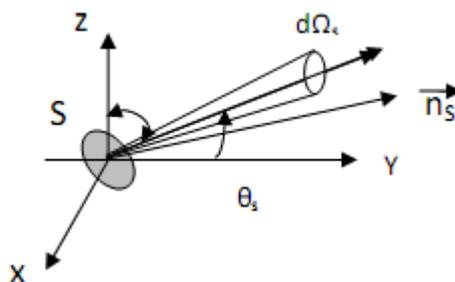


Figure 1.2 : paramètres de définition de la luminance d'un rayonnement.

Si le faisceau de lumière est défini par des diaphragmes qui se voient mutuellement sous des angles solides finis, l'étendue géométrique est la somme des étendues géométriques élémentaires des pincesaux dont il est constitué.

$$G = \iint_{A_S, A_R} d^2 G \dots\dots\dots (1-7)$$

S'il n'y a ni perte ni gain de flux dans la propagation entre la source et le récepteur, donc ; la luminance est alors la même au niveau du récepteur qu'à celui de la source. Ainsi, lorsque la propagation a lieu dans un milieu homogène ni absorbant ni émetteur, la luminance se conserve.

Les milieux matériels dans lesquels la lumière se propage sont généralement absorbants (et parfois émetteurs). La luminance L varie alors continûment le long du droit support.

Le rapport entre les luminances de deux points situés, l'un en amont, l'autre en aval sur un chemin optique donné :

$$\tau = \frac{L_2}{L_1} \dots\dots\dots (1-8)$$

τ est appelé facteur de transmission (pour la luminance) entre deux points.

1.1.4 Eclairement (E)

Il s'agit de la valeur locale du rapport entre l'élément de flux dF_R reçu par l'aire dA_R du récepteur ; il est exprimé en $W.m^{-2}$.

$$E(x,y) = \frac{dF_R}{dA_R} = \int_{2\pi S_r} L(\eta, \xi) \cdot \cos\theta_R \cdot d\Omega_R \dots\dots\dots (1-9)$$

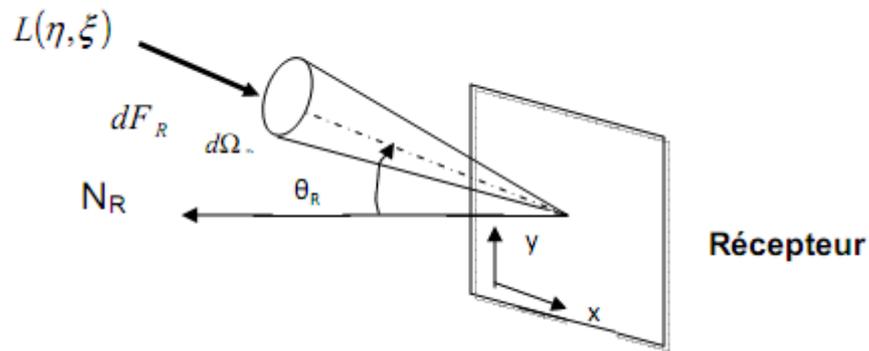


Figure 1.3 : éclairement sur un plan.

1.1.5 Exitance (R)

Valeur locale du rapport entre le flux dF_S (émis ou réfléchi) et l'aire dA_S (émettrice et/ou réfléchissante).

$$R = \frac{dF_S}{dA_S} = \int_{2\pi} L_S \cdot \cos \theta_S \cdot d\Omega_S \dots \dots \dots (1-10)$$

Si la source est à luminance uniforme :

$$R = \pi \cdot L \dots \dots \dots (1-11)$$

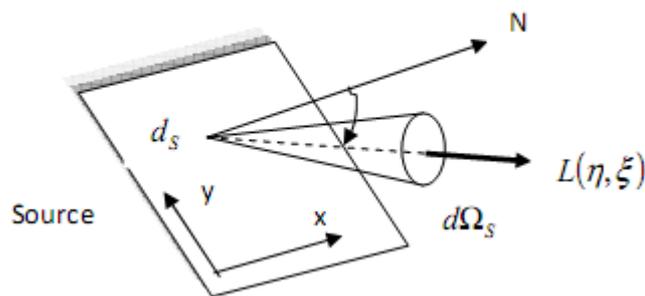


Figure 1.4 : exitance d'une source.

1.1.6 Exposition (Σ)

L'exposition (Σ) en un point donné (coordonnées y, z) d'une surface réceptrice est l'intégrale de l'éclairement dans un intervalle de temps (t_1, t_2) donné :

$$\Sigma \equiv \int_{t_1}^{t_2} E dt \dots\dots\dots (1-12)$$

La mesure de toutes ces grandeurs photométriques fait appel à trois systèmes d'unités :

1. unités énergétiques,
2. unités photoniques,
3. unités lumineuses.

1.1.8 Loi de Bouguer

La loi de Bouguer fournit une relation entre l'éclairement E_r sur une surface réceptrice, dû à une source S, et l'intensité I de cette source dans la direction du récepteur, éloigné par la distance d :

$$E_r = \frac{dF_r}{dA_r} = \frac{I(\eta, \xi) \cdot \cos \theta_r}{d^2} \dots\dots\dots (1-13)$$

1.2 Rayonnement infrarouge

La découverte du rayonnement infrarouge est due à Sir William Herschel [12] désireux d'observer le rayonnement solaire. Il décida d'utiliser un prisme afin de se protéger les yeux en séparant les couleurs du bleu au rouge. C'est ainsi qu'il découvrit en utilisant un thermomètre qu'une partie importante de la radiation se dirigeait au-delà du rouge et elle n'était pas visible à l'œil : il s'agissait du rayonnement infrarouge.

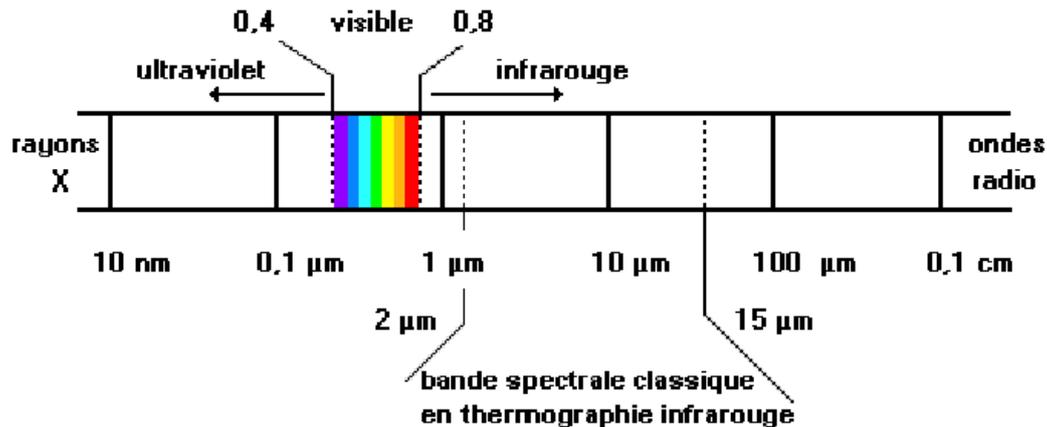


Figure 1.5 : Le spectre des rayonnements électromagnétiques.

1.2.1 Classification du rayonnement infrarouge [12]

Le spectre de rayonnement infrarouge est divisé en un certain nombre de régions arbitraires correspondent à des domaines de fonctionnement des générateurs ou des récepteurs appropriés. Il correspond au domaine d'émission de la matière dont les températures sont celles trouvées généralement à la surface de la terre.

- **L'infrarouge proche** : ($\lambda < 3\mu\text{m}$)

C'est le domaine où les verres restent transparents. Les récepteurs photoélectriques sont identiques (Si) ou ont un fonctionnement similaire (Ge) à ceux du visible. C'est le principal domaine de rayonnement destinés au chauffage et au séchage.

- **L'infrarouge moyen** : ($3\mu\text{m} < \lambda < 20\mu\text{m}$).

Un corps porté à une température T émet un rayonnement thermique d'autant plus intense que T est élevée et dont le maximum d'émission est situé à une longueur d'onde λ_{max} inversement proportionnelle à T . Les matériaux optiques utilisables pour ces longueurs d'onde sont principalement le Germanium et le Sélénium de Zinc.

- **L'infrarouge lointain** : ($\lambda > 20\mu\text{m}$)

C'est le domaine réservé aux laboratoires spécialisés en spectroscopie moléculaire ou des expériences spatiales. En infrarouge lointain, les détecteurs sont généralement des bolomètres

sensibles à l'élévation de la température consécutive à l'absorption de photons. L'élément détecteur est souvent un semi-conducteur dont la résistance varie avec la température.

1.2.2 Sources de rayonnement infrarouge

Tous les corps émettent de l'infrarouge, dans des proportions plus ou moins importantes suivant leur température :

- **Soleil**

Du fait de sa température très élevée, il émet une bonne part de son rayonnement dans le visible, mais une fraction non négligeable de l'énergie se situe néanmoins dans l'infrarouge.

- **Terre**

Sa température, beaucoup plus basse que celle du soleil, fait que le rayonnement émis se situe dans l'infrarouge. La figure 1.6 montre que le spectre d'émission présente deux bosses : la première dans le visible correspond au rayonnement solaire réfléchi ; la seconde, dans l'infrarouge, au rayonnement propre de la terre.

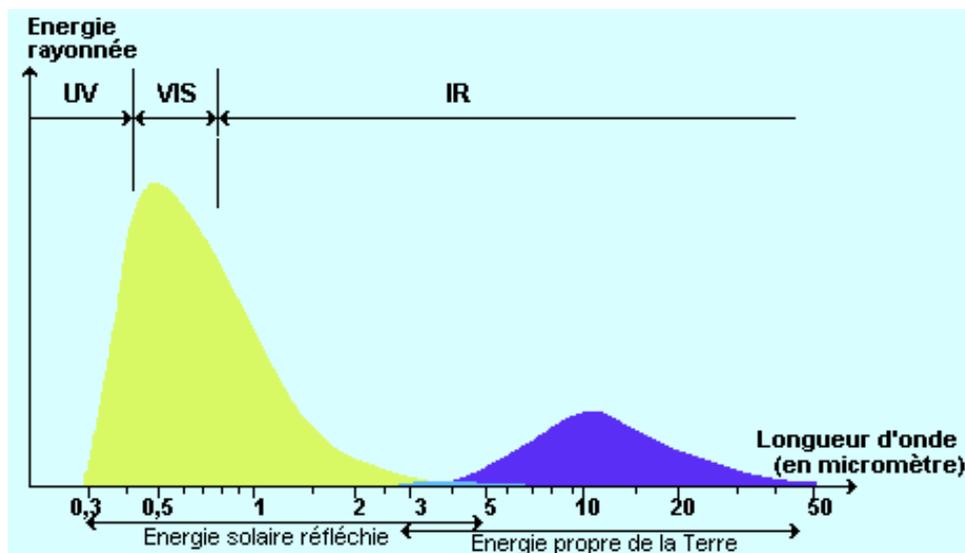


Figure 1.6 : spectre du rayonnement terrestre. [26]

- **Corps humain**

Avec sa température d'environ 37°C, le corps humain émet un rayonnement dans l'infrarouge avec un maximum d'un peu moins de 10 μm .

- **Sources d'éclairage**

Les tubes fluorescents émettent dans un large domaine de longueurs d'onde recouvrant aussi bien le visible que l'infrarouge.

- **Sources de signal**

L'infrarouge est utilisé pour la réalisation de télécommandes et en transmissions par fibres optiques.

1.2.3 Signature infrarouge d'un objet

La notion de signature infrarouge d'un objet englobe une accumulation de données relatives aux diverses configurations de présentations de cet objet. Dans le cas d'une signature infrarouge, il peut s'agir :

- de l'image thermique ou carte des températures,
- de rayonnement énergétique total ou spectral,
- d'une distribution spatiale de l'énergie rayonnée,
- de valeurs statistiques thermiques telles que histogrammes, moyennes...

La saisie de la distribution de l'énergie rayonnée par la surface de l'objet est certainement l'approche la plus intéressante pour caractériser sa signature infrarouge. Il s'agit de l'image thermique résultant des contrastes de température liés aux transferts d'énergie entre les objets et le fonds.

1.3 Rayonnement du corps noir [21]

Un corps noir est un objet idéal (n'existant pas physiquement) qui absorbe la totalité des rayonnements incidents quelles que soit leur longueur d'onde, l'angle d'incidence (la direction), et la polarisation. Il a l'émission thermique la plus intense possible ; ce fait a conduit à l'appeler également radiateur intégral.

En thermographie infrarouge, le corps noir est une source infrarouge de référence qui se révèle indispensable à tout utilisateur de systèmes infrarouges. En effet, les corps noirs sont utilisés aussi bien dans le secteur de l'industrie pour l'étalonnage de pyromètres, scanners ou

caméras, que dans les laboratoires spécialisés pour la caractérisation de systèmes optroniques infrarouges complexes.

Si on considère un corps noir en équilibre thermique avec son enceinte, l'énergie qu'il absorbe est égale à celle qu'il émet. Si l'on modifie la température de l'enceinte, les échanges radiatifs entre le corps noir et son enceinte sont modifiés et pour que l'égalité se maintienne entre rayonnements reçus et émis par le corps noir, le rayonnement de ce dernier en fonction de la longueur d'onde et de la température obéit à des lois spécifiques, dites lois de rayonnements du corps noir.

1.3.1 Loi de Planck

Planck a calculé, en 1900, la luminance énergétique spectrale du corps noir à température T. Cette loi est à la base même de la possibilité et de la pertinence de la mesure des températures par rayonnement. Elle est explicitée sous la forme des courbes de Planck (figure 1.7).

$$\left[\frac{dL\lambda}{d\lambda}\right]_{CN}^T = \frac{2 \cdot h \cdot C^2 \cdot \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \text{ w}\bar{\text{m}}^2 \cdot \mu\bar{\text{m}}^{-1} \cdot \text{Sr}^{-1} \dots\dots\dots (1-14)$$

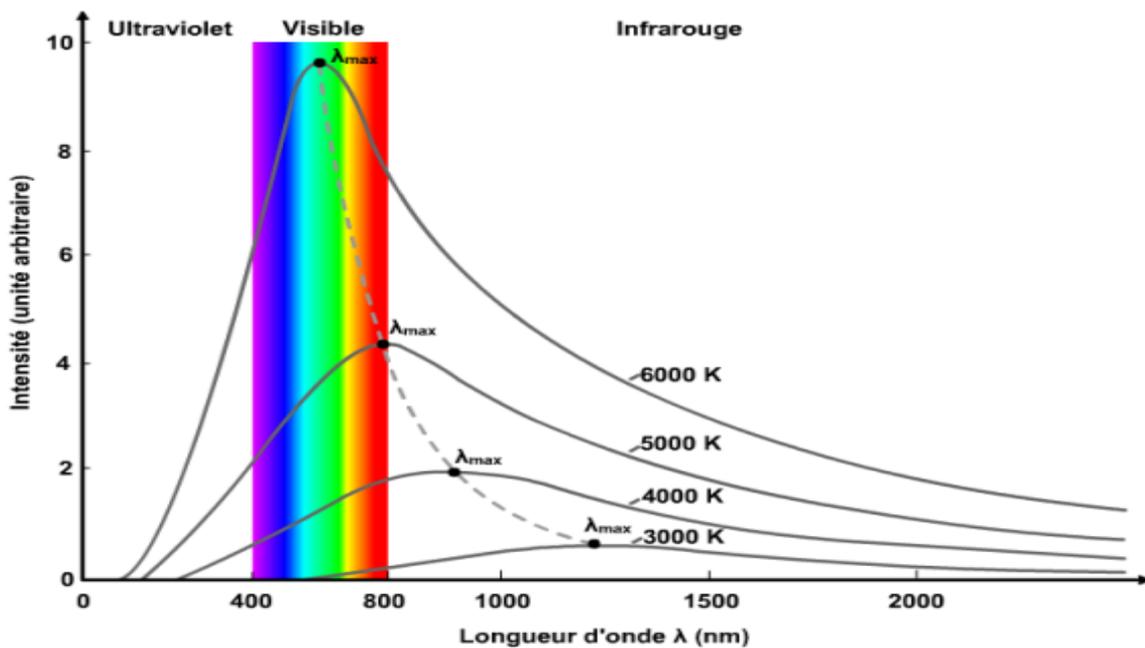


Figure 1.7 : courbes de Planck.

La figure (1.7) présente les variations de la luminance énergétique en fonction de la longueur d'onde d'observation et de la température. Cette courbe montre qu'un corps noir porté à une température T émet un rayonnement sur tout le spectre électromagnétique, son intensité est proportionnelle à la température.

Les différents spectres ne se recoupent pas, chacun d'entre eux est caractéristique de la température. A chaque température correspond une courbe ayant un maximum situé à une valeur de la longueur d'onde variable avec la température. La courbe relative à une température T_1 est toujours située au-dessus de celle correspondant à une température T_2 avec $T_2 < T_1$.

La croissance en longueur d'onde est beaucoup plus rapide que la décroissance.

Les basses températures sont évaluées pour de grandes longueurs d'onde, et les hautes températures pour des courtes longueurs d'onde.

On voit que le spectre d'émission est continu et qu'il présente un maximum dans l'infrarouge. Ceci explique l'association commune infrarouge-chaueur. On remarque aussi que si l'on travaille avec une caméra à une longueur d'onde donnée la luminance augmente avec la température, le signal de sortie sera donc une fonction croissante de la température du corps noir. Enfin, ces courbes montrent que l'on peut avoir intérêt à travailler avec des longueurs d'onde plus courtes lorsque la température augmente afin d'améliorer la sensibilité de la mesure.

1.3.2 Loi de Wien

Sur les courbes de Planck (figure 1.7), la courbe en pointillés est le lieu des longueurs d'onde des maximas d'émission du corps noir, en fonction de la température. C'est la loi de déplacement de Wien.

$$T \cdot \lambda_{\max} = 2\,897,8 \approx 3\,000 \mu\text{m} \cdot \text{K} \dots\dots\dots (1-15)$$

Avec :

T : température en Kelvin,

λ_{\max} longueur d'onde du maximum du rayonnement émis en μm .

Quand la température croît, la longueur d'onde du maximum d'émission se déplace vers les faibles longueurs d'onde ; 95,6 % du rayonnement du corps noir est émis entre 0,5 et 5 λ_{\max} .

1.3.3 Loi de Stephan-Boltzmann

La loi de Stephan-Boltzmann est l'intégrale spectrale et directionnelle de la luminance émise par un élément de surface du corps noir, ou exitance totale.

$$\int_0^{\infty} \left(\frac{dL}{d\lambda} \right) \cdot d\lambda = k_L \cdot T^4 \dots\dots\dots (1-16)$$

Avec :

$$k_L : 5,670\ 32 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ (Constante de Stephan en luminance)}$$

T : température en Kelvin.

La loi de Stephan-Boltzmann mentionne que les flux incidents ne sont fonction que de la température. Cette dépendance est importante puisque la quantité totale de rayonnement émis est proportionnelle à la puissance 4 de la température absolue. Une zone à 1200K émet donc un rayonnement 256 fois plus intense que celui d'une zone à 300K, comme l'illustre la figure (1.8). Alors que la température du soleil n'est que 20 fois plus élevée que celle de la terre, son flux partant est 160 000 fois plus élevée. L'utilisation de l'équation 1.15 nous permet de déterminer l'exitance pour les températures de 6000K : $L=73\ 487\ 347 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$, et pour 300K : $L=459 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$.

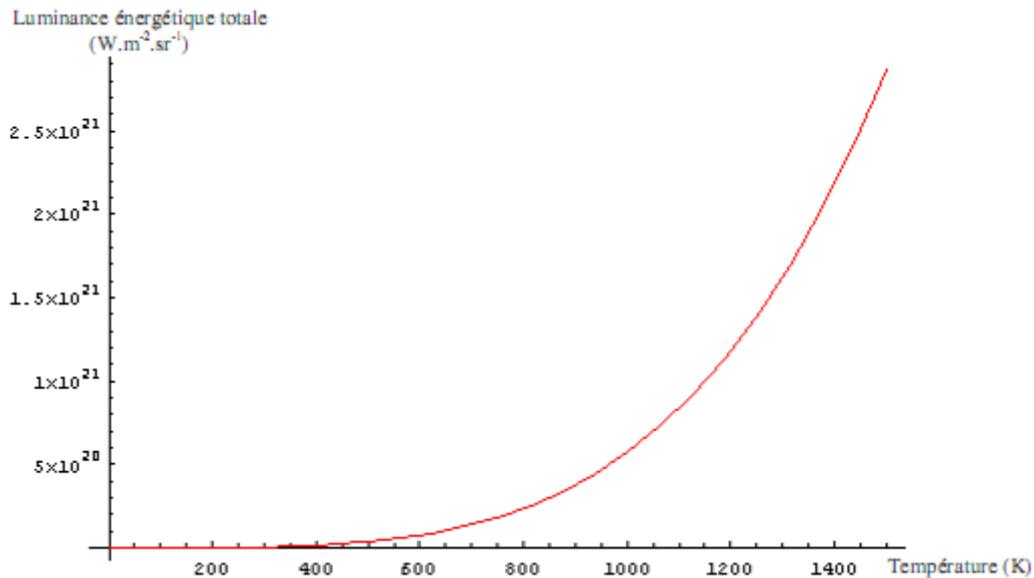


Figure 1.8 : loi de Stephan-Boltzmann.

1.3.4 Réalisation d'un corps noir

Le corps noir présente l'intérêt de donner un rayonnement dont la valeur absolue de la luminance spectrale ne dépend que de la température T ; il est utilisé comme étalon de luminance spectrale, pour la photométrie, pour la caractérisation des détecteurs infrarouges, etc. La réalisation pratique d'un tel système tient du compromis, et deux approches sont possibles :

- **la cavité presque totalement fermée** : il s'agit d'une cavité à l'intérieur d'un solide, débouchant à l'extérieur par un orifice dont la dimension est très faible devant celle de la cavité. Le système se comporte comme un piège à rayonnement.
- **Le revêtement absorbant parfait** : il est possible grâce à certains traitements de surfaces et peintures, d'obtenir à partir d'un objet quelconque une très bonne approximation du radiateur parfait. Les matériaux les plus absorbants dans un spectre étendu que l'on sache réaliser sont des couches à très faible densité de métaux bons conducteurs de l'électricité, très finement divisés. On sait faire de telles couches avec de l'argent, de l'or, du platine...mais ces couches sont mécaniquement très fragiles, et leur structure est instable.

1.4 Emissivité des matériaux [10]

Le corps noir est un concept limite auquel il faut comparer les sources lumineuses réelles. Les répartitions spectrales des luminances des sources réelles ont le même aspect que celles du corps noir, mais les énergies émises sont toujours inférieures à celles du corps noir, à longueur d'onde et température égales. L'émission de rayonnement thermique d'une surface solide ou liquide dépend donc, de la température, de la longueur d'onde, mais aussi d'un facteur compris entre 0 et 1 appelé émissivité.

Les échanges thermiques par rayonnement, les mesures de température par thermographie nécessitent donc la connaissance de ce facteur, qui dépend lui-même de la nature du matériau, de l'angle d'émission, de la polarisation du rayonnement émis et enfin de l'état de surface.

Les corps non noirs n'absorbent qu'une fraction $A(\lambda)$ du rayonnement incident, réfléchissent la partie $R(\lambda)$, et transmettent la partie $T(\lambda)$. Lorsque l'équilibre thermodynamique de tel corps est satisfait ; en raison du principe de conservation, l'énergie restituée au milieu extérieure par rayonnement, réflexion ou transmission, doit être égale à l'énergie emmagasinée par absorption. Il est donc nécessaire d'introduire le terme d'émission $\varepsilon(\lambda)$ dont le rôle est de compenser le terme d'absorption $A(\lambda)$; $A(\lambda) = \varepsilon(\lambda)$ Et :

$$\varepsilon(\lambda) + R(\lambda) + T(\lambda) = 1 \dots\dots\dots (1-17)$$

- corps opaque : $T(\lambda) = 0$
- corps brillant : $R(\lambda)$ grand et $\varepsilon(\lambda)$ presque nul
- corps noir : $\varepsilon(\lambda) = 1$
- corps gris : $\varepsilon(\lambda)$, $R(\lambda)$ constantes

1.4.1 Définitions de l'émissivité

Par définition, on appelle émissivité, le rapport entre l'émission du corps réel et celle du corps idéal, appelé corps noir, porté à la même température T :

$$\varepsilon(T) = \frac{L_{cR}(T)}{L_{cN}(T)} \dots\dots\dots (1-18)$$

Suivant le but recherché (échanges thermiques, pyrométrie, propriétés des surfaces sélectives), on distinguera différentes émissivités spécifiques :

***) Émissivité monochromatique directionnelle $\epsilon(T, \lambda, \theta)$**

$$\epsilon(T, \lambda, \theta) = \frac{L_{cR}(T, \lambda, \theta)}{L_{cN}(T, \lambda, \theta)} \dots\dots\dots(1-19)$$

Avec θ angle d'émission. .

Dans le cas fréquent où l'on s'intéresse à l'émission normale à la surface, on utilise : ϵ ($\theta=0^\circ, \lambda, T$) = $\epsilon_N(\lambda, T)$ appelée émissivité normale monochromatique.

***) Émissivité directionnelle totale $\epsilon(T, \theta)$**

Dans l'étude des échanges thermiques, on désire connaître l'énergie totale émise pour toutes les longueurs d'onde. On définit alors l'émissivité directionnelle ϵ_t totale :

$$\epsilon_t(T, \theta) = \frac{\int_0^\infty \epsilon(T, \lambda, \theta) \cdot L_{cN}(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^\infty L_{cN}(\lambda, T) d\lambda} \dots\dots\dots(1-20)$$

On restreint souvent l'intégration en longueur d'onde à une fenêtre de transmission atmosphérique ou à la zone de réponse d'un détecteur infrarouge entre deux longueurs d'onde λ_1 et λ_2 . On définit alors une émissivité effective pour cette bande.

***) Émissivité hémisphérique monochromatique $\epsilon(T, \lambda)$**

Dans les échanges thermiques, l'énergie est rayonnée dans tout le demi-espace situé vers l'extérieur du corps rayonnant. L'émissivité utile s'obtient en intégrant $\epsilon(\lambda, T, \theta)$ sur ce demi-espace et elle est appelée émissivité hémisphérique monochromatique :

$$\epsilon(T, \lambda) = \frac{\iint_{2\pi sr} \epsilon(\lambda, T, \theta) \cdot L_{cN}(T, \lambda) \cdot \cos\theta \cdot d\Omega}{\iint_{2\pi sr} L_{cN}(T, \lambda) \cdot \cos\theta \cdot d\Omega} \dots\dots\dots(1-21)$$

L'émissivité hémisphérique peut aussi être intégrée sur le spectre de longueurs d'onde et l'on obtient alors ϵ hémisphérique totale qui caractérise les flux de rayonnement émis par un corps isolé dans l'espace, tel qu'un satellite.

1.4.2 Les facteurs d'influence

Le comportement de l'émissivité d'une surface est fonction de la longueur d'onde, de la température, de son état de surface, de son état physico-chimique, du matériau composant, de la rugosité de la surface, de la direction d'émission, et de sa teneur en eau.

Deux grandes classes de comportements radiatifs sont identifiables : celles des matériaux conducteurs d'électricité (métaux) et celles des isolants électriques (diélectriques).

1.4.2.1 Influence de la longueur d'onde

De façon générale l'émissivité monochromatique varie avec la longueur d'onde. Lorsqu'elle ne dépend pas de longueur d'onde, le corps est qualifié de corps gris. Les variations de l'émissivité en fonction de la longueur d'onde ont été étudiées par de nombreux auteurs [7] [8].

L'émissivité d'une surface, dans le spectre visible est souvent sans grand rapport avec son émissivité dans l'infrarouge. La neige a par exemple une émissivité très faible dans le spectre visible alors qu'elle est un excellent corps noir ($\varepsilon = 1$) dans l'infrarouge.

Les substances liquides ou gazeuses présentent des fluctuations rapides d'émissivité alors que la variation d'émissivité est relativement lente pour les objets solides. Pour les matériaux conducteurs d'électricité, l'émissivité spectrale décroît lorsque la longueur d'onde augmente, comme illustré sur la figure (1.09) ; alors que pour les isolants électriques, l'émissivité augmente avec la longueur d'onde, comme illustré sur la figure (1.10)

La figure (1.09) et la figure (1.10) [11] illustrent le comportement du facteur d'émission de différents corps, métaux et diélectriques en fonction de la longueur d'onde.

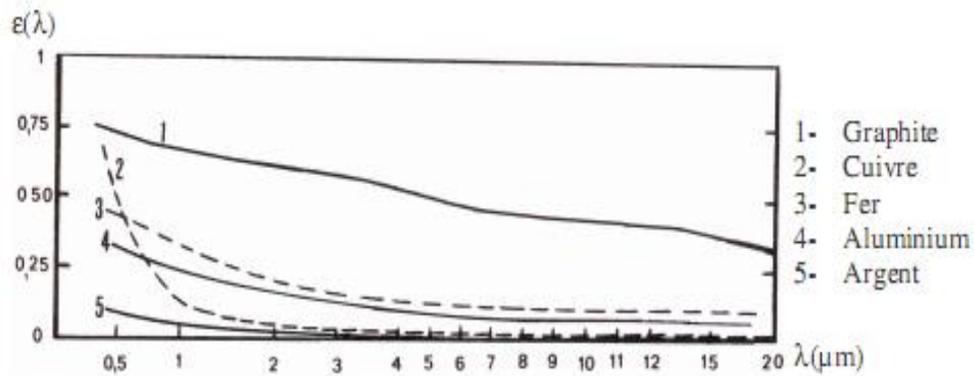


Figure 1.09 : émission spectrale en fonction de la longueur d'onde pour différents métaux à température ambiante

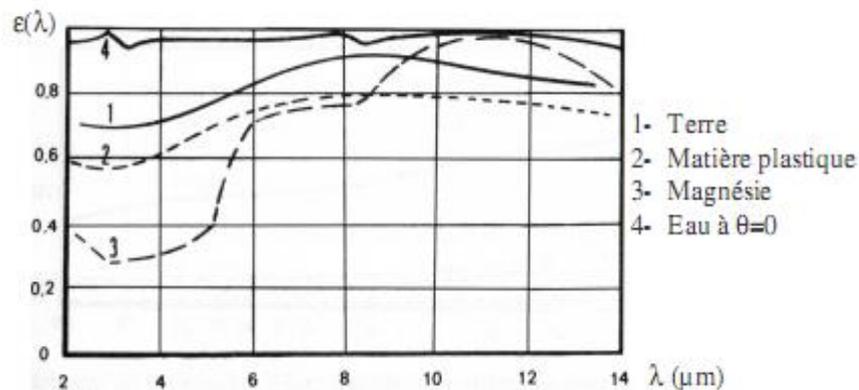


Figure 1.10 : émissivité spectrale en fonction de la longueur d'onde pour différents diélectriques à température ambiante

1.4.2.2 Influence de la température

La variation d'émissivité en fonction de la température est généralement faible et souvent directement influencée par des modifications éventuelles de l'état de surface lors d'un changement de surface. En effet, si la structure superficielle du matériau ne subit aucune modification, par exemple de l'oxydation, une élévation de température n'entraîne souvent qu'une faible variation de l'émissivité. Par contre, le passage à l'état liquide des métaux s'accompagne souvent d'une brusque et importante variation de l'émissivité (figure (1.11)).

Pour matériaux conducteurs, les variations d'émissivité sont faibles, en raison de leur haute concentration d'électrons libres. Les variations peuvent devenir très fortes lorsqu'il y a formation d'oxyde à la surface du métal chauffé.

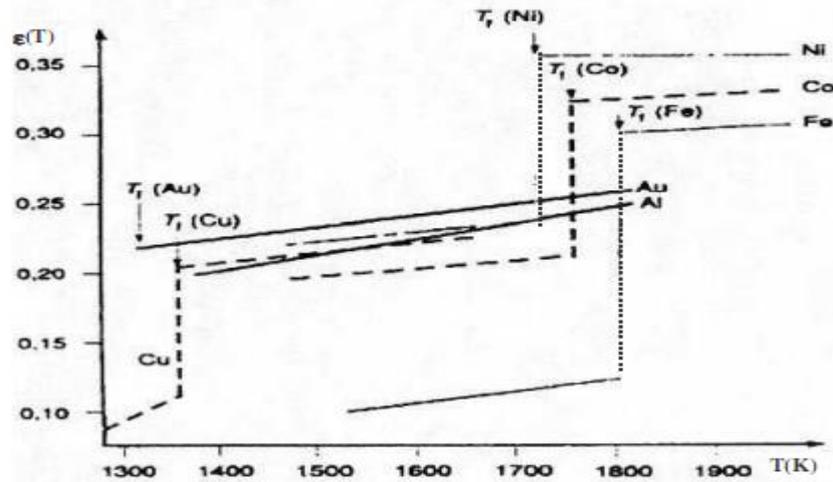


Figure 1.11 : émissivité normale spectrale en fonction de la température lors de fusion de métaux [17]

1.4.3 Émissivité de quelques matériaux

La connaissance de l'émissivité spectrale directionnelle et une mesure de température relative permettent de remonter à la température de surface vraie de l'objet. La détermination de cette valeur est donc fondamentale en thermographie infrarouge quantitative.

Les valeurs de $\varepsilon(\lambda)$ publiées sont généralement des valeurs moyennes pour le demi-espace dans lequel rayonne la surface du corps.

Les caractéristiques du corps : état de surface, pureté et microstructure ne sont pas toujours bien définies, ce qui peut entraîner de graves confusions et des erreurs majeures. [7]

Le tableau 1 résume les valeurs d'émissivité de quelques matériaux dans des conditions appropriés. [7].

Tableau 1 : les valeurs d'émissivité de quelques matériaux dans des conditions appropriés.

| Métaux | Température (°C) | Émissivité | Métaux | Température (°C) | Émissivité |
|---------------------------|------------------|------------|---------------------|------------------|------------|
| Aluminium poli | 100 | 0,05 | Brique rouge | 20 | 0,93 |
| Aluminium anodisé | 100 | 0,55 | Carbone – noir de | 20 | 0,95 |
| Laiton poli | 100 | 0,03 | Fumée | | |
| Laiton oxydé | 100 | 0,61 | Carbone – graphite | 20 | 0,98 |
| Cuivre poli | 100 | 0,05 | Béton | 20 | 0,92 |
| Cuivre oxydé | 20 | 0,78 | Verre poli | 20 | 0,94 |
| Or poli | 100 | 0,02 | Vernis blanc | 100 | 0,92 |
| Fer, fonte, polis | 40 | 0,21 | Vernis noir mat | 100 | 0,97 |
| Fer, fonte, oxydés | 100 | 0,64 | Huile sur nickel : | 20 | 0,05 |
| Fer, fonte, très rouillés | 20 | 0,69 | Nickel seul | 20 | 0,27 |
| Magnésium poli | 20 | 0,07 | Avec film de 25 mm | 20 | 0,46 |
| Nickel poli | 20 | 0,05 | Avec film de 50 mm | 20 | 0,72 |
| Nickel oxydé | 200 | 0,37 | Avec film de 125 mm | 20 | 0,82 |
| Argent poli | 100 | 0,03 | Film épais | 20 | 0,94 |
| Acier inoxydable 18/8 | 20 | 0,16 | Peinture à l'huile | 20 | 0,93 |
| Poli | | | Papier | 20 | 0,91 |
| Acier oxydé | 60 | 0,85 | Plâtre | 20 | 0,90 |
| Acier poli | 100 | 0,07 | Sable | 32 | 0,98 |
| Acier oxydé à 800 °C | 200 | 0,79 | Peau humaine | 20 | 0,92 |
| Glace | 100 | 0,07 | Terre sèche | 20 | 0,95 |
| Eau distillée | 20 | 0,90 | Terre saturée d'eau | 20 | 0,96 |

1.5 Calcul du rayonnement émis

La matière émet un rayonnement mais, également, elle réfléchit du rayonnement qui provient des objets environnants. Alors on comprend que si l'on pointe un radiomètre en direction d'un objet, ce radiomètre va mesurer du rayonnement émis par cet objet, mais également du rayonnement réfléchi par cet objet. La matière, du fait qu'elle est "non idéale", implique que le mesureur soit apte à comprendre ce qui se passe, à faire la part des choses dans ce que mesure son appareil. Cet appareil ne fait pas la distinction entre les rayonnements d'origines diverses, et le rayonnement réfléchi par l'objet visé ne nous renseigne pas sur la température de cet objet.

Ainsi, dans le spectre visible, nous avons surtout affaire à des rayonnements réfléchis pour observer les objets "froids", alors que dans l'infrarouge, pour observer et mesurer la température de ces objets "froids" nous nous intéressons aux rayonnements émis par ces objets (ce qui ne signifie pas que le rayonnement réfléchi n'existe pas, mais il est, en proportion, généralement moindre que dans le spectre visible).

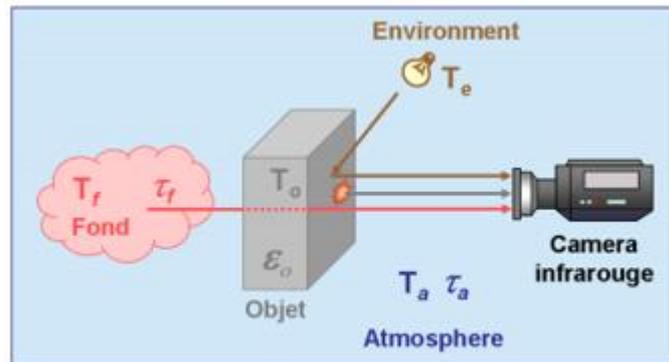


Figure 1.12: Le rayonnement émis et le rayonnement réfléchi.

En partant de l'équation qui définit l'émissivité (eq 1.18), la luminance d'un objet est :

$$L_{\text{ob}}(\lambda, T) = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \epsilon(\lambda, T) \cdot L_{cN}(\lambda, T) d\lambda \dots\dots\dots(1-22)$$

Si on suppose que $\frac{\partial \epsilon_{\lambda}}{\partial T} \rightarrow 0$, la formule générale devient :

$$\frac{\partial L_{\text{ob}}}{\partial T} = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \epsilon(\lambda, T) \cdot \frac{\partial L_{cN}}{\partial T} d\lambda \dots\dots\dots(1-23)$$

Le rayonnement détecté est donc affecté des termes de transmission et de réflexion, qu'il faut prendre en compte lors de la mesure de température par rayonnement. Ces termes peuvent avoir de fortes influences si les corps environnants sont à des températures différentes ou supérieures à celles de l'objet examiné. Des erreurs importantes peuvent être commises sur la mesure de température du corps. Donc il est souhaitable d'introduire des corrections.

1.6 Les différents types de corps :

Les facteurs d'émission, de transmission et de réflexion sont sélectifs ; ils dépendent de la longueur d'onde. Certains corps possèdent des propriétés radiatives spécifiques et sont distingués avec des noms particuliers.

- Corps noir

Un corps noir absorbe la totalité des rayons incidents quels que soient la longueur d'onde et l'angle d'incidence. Les composantes de transmission et de réflexion sont nulles.

L'émissivité est maximale pour toutes les longueurs d'onde.

$$\tau(\lambda) = 0; \varepsilon(\lambda) = 1; \rho(\lambda) = 0$$

- Corps gris

L'émissivité est indépendante de la longueur d'onde

$$\varepsilon(\lambda) = Cte$$

La figure (1.19) représente la distribution spectrale de ce type de corps.

- Corps opaque

Un corps dit opaque émet, réfléchit, absorbe mais ne transmet pas. Le rayonnement ne peut traverser les corps opaques. Celui-ci est absorbé ou/et réfléchi.

$$\tau(\lambda) = 0; \varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) = 1$$

- Corps transparents

Les corps transparents laissent passer tout le rayonnement qui les frappe. Un observateur peut donc apercevoir la forme et la couleur d'un objet situé de l'autre côté. Le corps transparent n'absorbe et ne réfléchit qu'une faible partie du rayonnement.

$$\tau(\lambda) \text{ Grand ; } \varepsilon(\lambda) \text{ et } \rho(\lambda) \text{ petits.}$$

La transparence dépend de la longueur d'onde. Le pyrex est transparent dans le visible et opaque dans l'infrarouge.

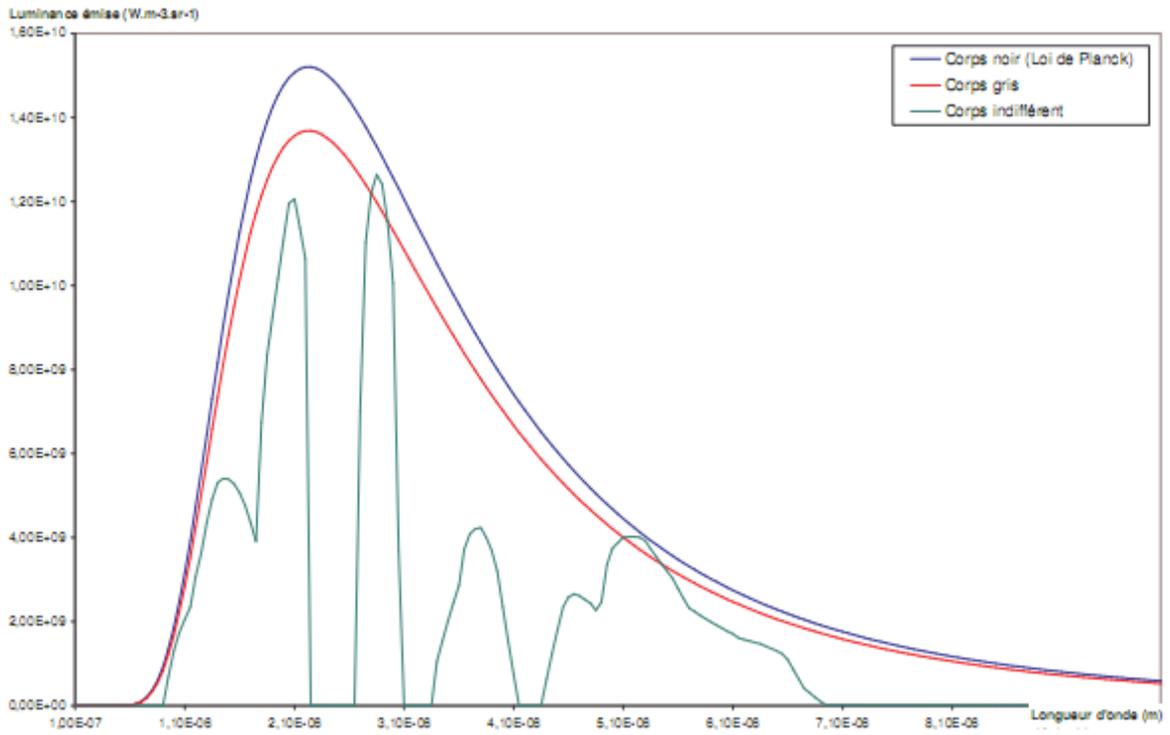


Figure 1.13 : Distribution spectrale de différents corps à la même température

Chapitre 2 :

Transmission atmosphérique

2. Transmission atmosphérique

Selon sa composition, la teneur des gaz qui le composent, son épaisseur et sa température, l'atmosphère est plus ou moins transparente au rayonnement spectral incident.

En effet, les constituants tels que les particules solides ou liquides, le gaz carbonique CO_2 , la vapeur d'eau H_2O , l'ozone O_3 , l'oxyde d'azote N_2O , l'oxyde de carbone CO , le méthane CH_4 , l'azote N_2 , les fumées et poussières, peuvent causer une absorption notable du flux en provenance de la surface cible, et ainsi interdire la mesure thermographique pour certaines longueurs d'onde.

De plus, les particules solides ou liquides contenues peuvent engendrer des phénomènes de diffusion des rayonnements incidents dans toutes les directions. La figure (2.1) représente le facteur de transmission spectrale d'une épaisseur d'atmosphère de 300m avec une température de $26^\circ C$ [9].

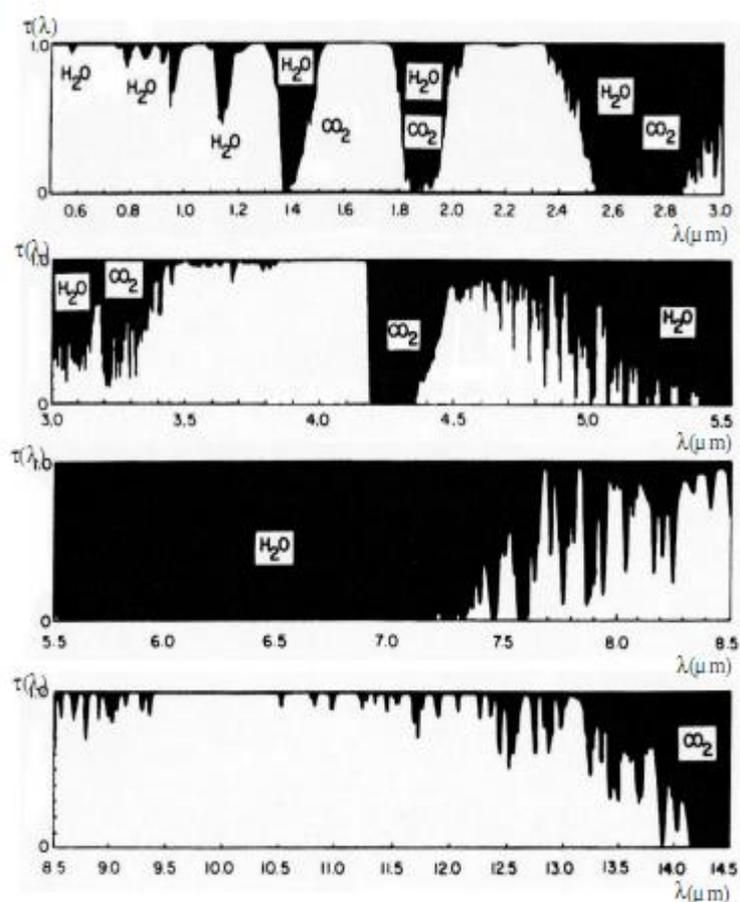


Figure 2.1 : facteur de transmission spectrale atmosphérique

Cette figure indique clairement les régions spectrales où le facteur de transmission est faible, voire nul. Pour des épaisseurs traversées moindres, telles que 1m dans les applications industrielles, les effets d'absorption sont moindres mais restent significatifs. Notamment l'atmosphère est particulièrement opaque dans les bandes spectrales :

- De $2,5\mu\text{m}$ à $2,8\mu\text{m}$, dû à l'absorption par CO_2 et H_2O
- De $4,2\mu\text{m}$ à $4,4\mu\text{m}$, dû à l'absorption par CO_2 ,
- De $5,5\mu\text{m}$ à $7,3\mu\text{m}$, dû à l'absorption par H_2O ,
- Au-delà de $14,2\mu\text{m}$, dû à l'absorption par CO_2 et H_2O

Ainsi les bandes spectrales, de $0,4\mu\text{m}$ à $1\mu\text{m}$, de $1,2\mu\text{m}$ à $1,3\mu\text{m}$, de $1,5\mu\text{m}$ à $1,8\mu\text{m}$, de $2,1\mu\text{m}$ à $2,5\mu\text{m}$, de $3\mu\text{m}$ à $5\mu\text{m}$, de $8\mu\text{m}$ à $13\mu\text{m}$, appelées « fenêtres atmosphériques », sont à privilégier pour une mesure radiométrique, la transmission atmosphérique étant bonne.

Cependant ces valeurs sont fortement conditionnées par l'épaisseur de l'atmosphère traversées, la concentration des différents gaz, et la température de l'atmosphère. En effet, lorsque la distance de mesure augmente (i.e. l'épaisseur de l'atmosphère traversée) ou lorsque l'air devient plus chargé en vapeur d'eau, la perte d'énergie par absorption devient plus importante. Les figures, figure (2.2) à figure (2.6), illustrent l'influence de la température et de l'épaisseur sur la valeur du coefficient de transmission atmosphérique [11].

Les notations suivantes sont utilisées pour définir les conditions de mesure des figures suivantes de transmission spectrale de l'atmosphère : trajet d , distance de visibilité d_v , température T , humidité relative h_r , longueur d'onde d'observation λ .

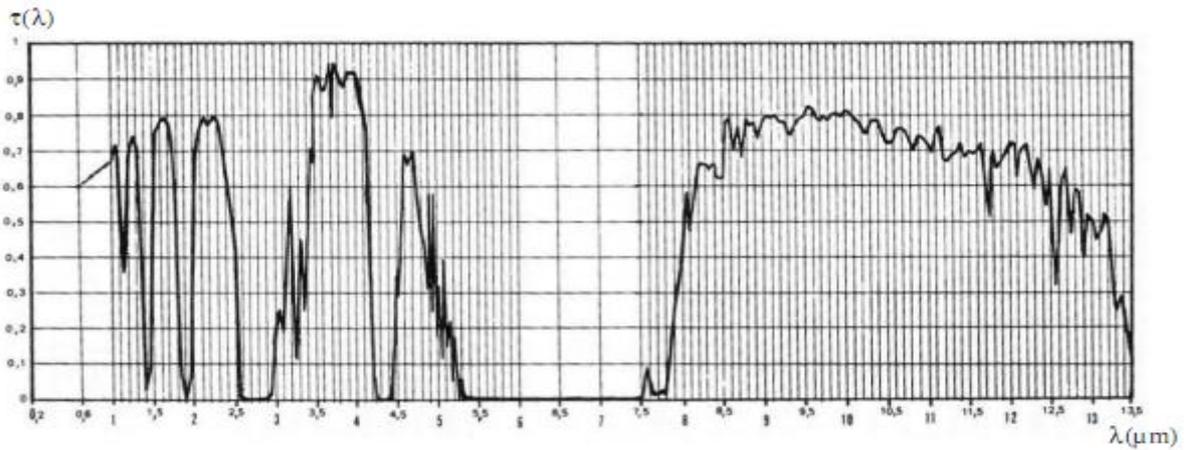


Figure 2.2 : influence de la distance et de la température-transmission spectrale de l'atmosphère

$D=1.852\text{km}$; à $\lambda=0.6\mu\text{m}$, $d_p=20\text{km}$

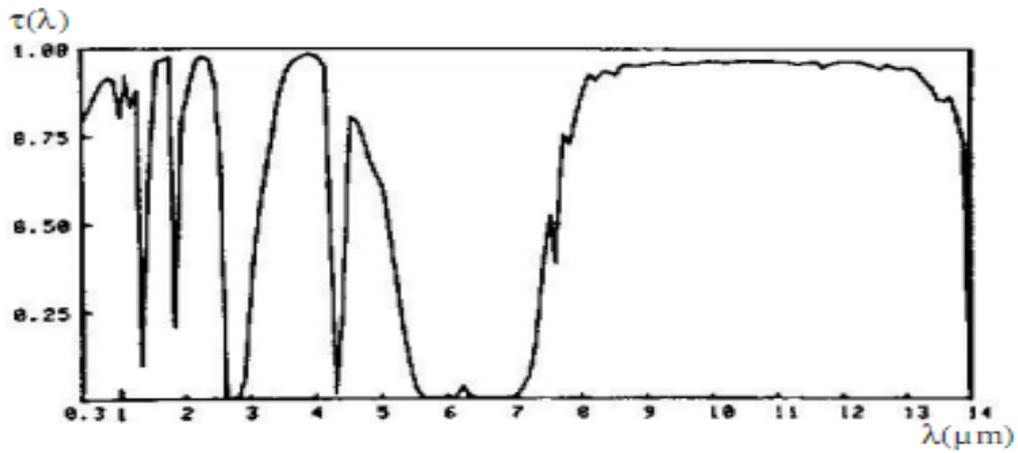


Figure 2.3 : influence de la distance de propagation-transmission atmosphérique

$D=0.20\text{km}$; $T=20^\circ\text{C}$; $h_r=70\%$; $d_p=15\text{km}$.

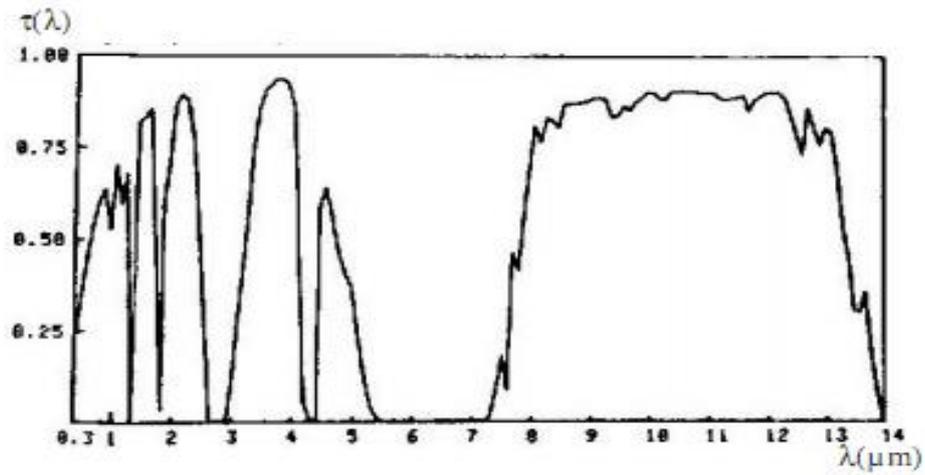


Figure 2.4 : influence de la température-transmission atmosphérique

$d = 2\text{km}$; $T = 0^\circ\text{C}$; $h_r = 70\%$; $d_v = 15\text{km}$

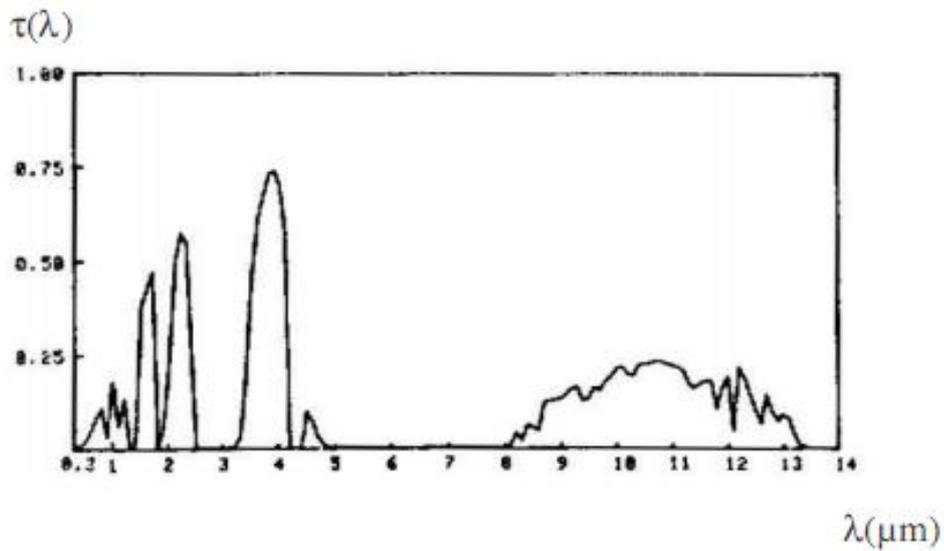


Figure 2.5 : influence de la distance de propagation-transmission atmosphérique- $d=10\text{km}$

$d = 10\text{km}$; $T = 20^\circ\text{C}$; $h_r = 70\%$; $d_v = 15\text{km}$.

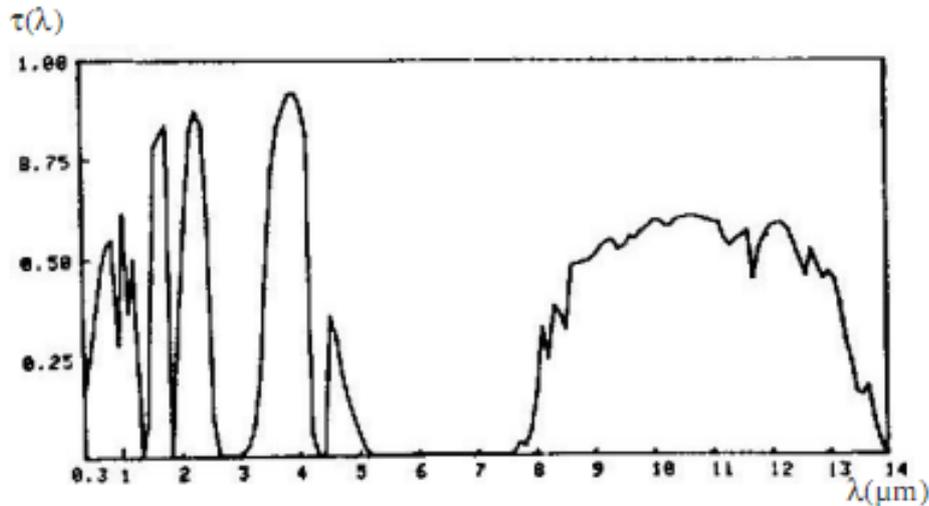


Figure 2.6 : influence de la température-transmission atmosphérique- $T=30^{\circ}\text{C}$

$$d = 2\text{km} ; T = 30^{\circ}\text{C} ; h_r = 70\% ; d_v = 15\text{km}$$

Pour des mesures à grande distance, l'indice de réfraction atmosphérique n'est généralement pas homogène, il dépend, entre autres, des vents, des courants de convection thermique et de l'humidité. Les turbulences atmosphériques peuvent provoquer des modifications du rayonnement incident, tels qu'une courbure des rayons lumineux (mirage, erreur angulaire), des fluctuations d'images (déplacements rapides des inhomogénéités d'indice), une modification de la focalisation du faisceau, une scintillation (image mouchetée), une dégradation de la cohérence spatiale.

Les méthodes de calcul de la transmission atmosphérique sont basées sur l'absorption des molécules et la diffusion due aux particules (méthode des raies monochromatiques, méthode du modèle de bande, modèle multiparamétrique). Les mesures expérimentales de transmission atmosphérique sont difficiles à mettre en œuvre et toutes les combinaisons ne peuvent être atteintes.

2.1 Les différentes perturbations de l'atmosphère terrestre

Il convient de tenir compte des propriétés du milieu de propagation, tel que l'atmosphère qui, sur des distances d'observation importantes, joue plusieurs rôles perturbateurs sur la performance du système optique :

- Atténuation du rayonnement utile recherché, par absorption et diffusion des photons par les atomes, molécules et particules (aérosols) en suspension.
- Emission de rayonnements parasites par diffusion de la lumière ambiante et émission propre par ces mêmes molécules et particules.
- Dans certains cas, déformation des rayons vis-à-vis de la propagation rectiligne de la lumière, à cause des inhomogénéités d'indices rencontrées (influence de la turbulence).

L'atmosphère est composée de gaz et de particules en suspension à des températures et des pressions variant en fonction de l'altitude et du lieu, les variations en fonction de l'altitude décrivant une structure marquée : six couches horizontales forment l'essentiel de la structure stratifiée de l'atmosphère. (Figure 2.7)

La couche inférieure, dite « Troposphère », s'étend à presque 11 km. La température dans cette couche diminue en fonction de l'augmentation d'altitude. La pression varie de 1atm au niveau de la mer à quelques dixièmes d'atm à l'extrémité supérieure. Les plus importants atténuateurs sont : le H₂O et le CO₂.

La deuxième couche, dite « Stratosphère », s'étend de 11km jusqu'à 50 km. On constate la présence de l'Ozone (O₃).

La couche dite « Mésosphère », s'étend de 50 km à 90 km en altitude.

La quatrième couche, dite « Ionosphère », est optiquement transparente ; les molécules subissent une dissociation photochimique.

Les deux dernières couches, dites « Thermosphère » et « Exosphère » sont influencées par les radiations solaires.

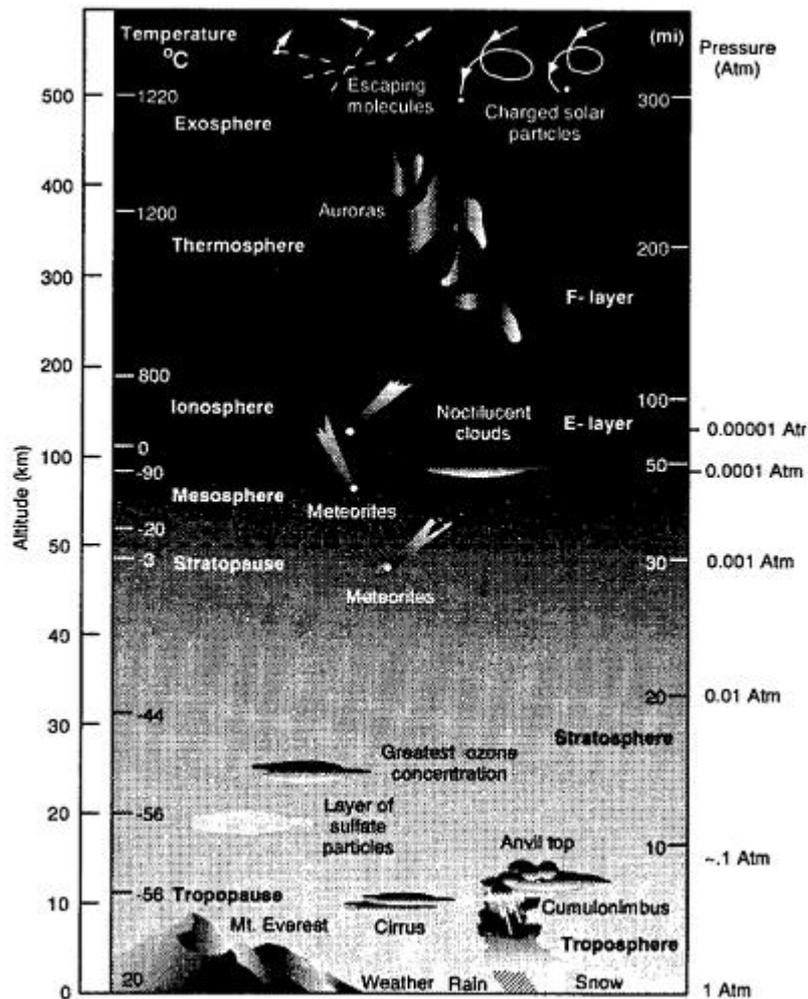


Figure 2.7: structure de l'atmosphère avec l'altitude. [9]

L'ionosphère est la composée ionisée de l'atmosphère. Elle s'étale de la mésosphère à la thermosphère et est constituée de trois couches (D, E et F) qui s'étendent environ entre 60 et 300 Km d'altitude.

Ainsi, tout système optique destiné à observer une scène au travers de l'atmosphère perçoit le long de chaque direction située à l'intérieur de son champ de vision, une luminance apparente de scène (c'est-à-dire mesure au niveau de sa pupille), qui est généralement la superposition de plusieurs termes et en particulier :

- La luminance apparente L_u du rayonnement à détecter (rayonnement "utile" ou de signal)

- La luminance apparente L_p due à l'émission propre de l'atmosphère (conséquence de la loi de Kirchhoff, le facteur d'absorption de l'atmosphère n'étant pas nul).
- La luminance apparente L_d du rayonnement solaire et ambiant diffusé par l'atmosphère.

La luminance apparente "vue" par le système dans chaque direction de l'espace peut alors s'exprimer, de façon générale, par la relation suivante :

$$L_{app} = L_u + L_p + L_d \dots\dots\dots(2-1)$$

Le facteur de transmission atmosphérique se compose de deux termes liés aux deux causes fondamentales d'atténuation du rayonnement par l'atmosphère, à savoir d'une part, l'absorption moléculaire par les gaz constitutifs, et d'autre part, la diffusion par les particules qu'elle contient :

$$\tau_{atm} = \tau_m \cdot \tau_d \dots\dots\dots(2-2)$$

τ_m Coefficient de transmission en présence de l'absorption moléculaire.

τ_d Coefficient de transmission en présence de diffusion par les particules.

2.2 Absorption moléculaire

Le coefficient τ_m dépend des constituants gazeux contenus dans l'atmosphère. Il est composé principalement de deux facteurs nettement plus importants que les autres pour un trajet horizontal :

- l'absorption par la vapeur d'eau,
- l'absorption par le gaz carbonique.

$$\tau_m = \tau_{H_2O} \cdot \tau_{CO_2}$$

L'absorption par la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère est conditionnée par :

- le nombre de molécules absorbantes, qui dépend d'une part de la pression partielle en vapeur d'eau, d'autre part, de la distance D parcourue par le rayonnement dans le milieu absorbant.
- La nature des transitions moléculaires, responsables du spectre d'absorption sélectif.
- La température et la pression totale du mélange gazeux, qui déterminent la largeur spectrale des raies d'absorption par collision moléculaire et effet Doppler.

La concentration en gaz carbonique dans l'atmosphère ne dépend pratiquement que de la pression, à l'altitude zéro ce paramètre peut être considéré comme constant. Le facteur de transmission du gaz carbonique τ_{CO_2} sera donc fonction uniquement de la distance parcourue D. [9]

2.3 La diffusion atmosphérique

Les particules en suspension dans l'air se présentent comme des défauts de structure de l'atmosphère. Le flux se conserve partiellement dans les images, mais la répartition de ce flux est affectée ; il y'a une baisse de contraste indépendant de la fréquence spatiale.

Les particules grandes devant la longueur d'onde donnent une diffusion prévisible par l'optique géométrique, elle est peu sélective.

Les particules dont les dimensions sont de l'ordre de la longueur d'onde du rayonnement, font intervenir la théorie de diffraction.

L'atténuation du signal est proportionnelle au coefficient de diffusion γ . L'absorption moléculaire α superposée à la diffusion est caractérisée par le coefficient d'extinction k ;

$$\alpha = \gamma + k. \text{ [mm}^{-1} \text{]}$$

Le facteur de transmission relatif à ce phénomène en considérant une tranche d'atmosphère D s'exprime par :

$$\tau_d = \exp(- \gamma D) \dots \dots \dots (2-3)$$

Une atmosphère contenant n particules d'eau de rayon r par cm^3 , présente un coefficient de diffusion de la forme :

$$\gamma = \pi \cdot n \cdot K_0 \cdot r^2 \dots\dots\dots(2-4)$$

K_0 Fonction dépend fortement de $\frac{r}{\lambda}$ quand $r < \lambda$ elle atteint son valeur maximum 3.8 pour un rayon de particule égale à la longueur d'onde optique ; la diffusion est alors maximale, ensuite k_0 se stabilise autour de la valeur 2 quand la dimension des particules augmente.

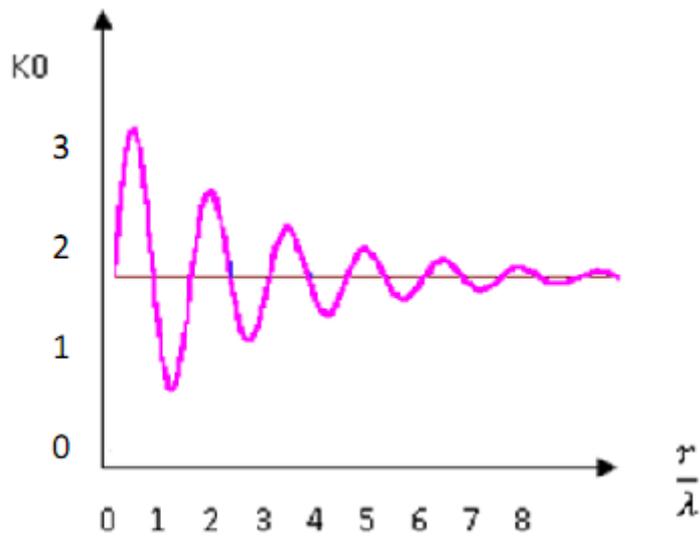


Figure 2.8 : variation de la fonction k_0 en fonction de r/λ .

Il faut donc s'attendre à une diffusion très sélective par les particules de rayon inférieur ou égal à la longueur d'onde.

En conclusion, seule une fraction du rayonnement incident sur le milieu intermédiaire est transmise. Le milieu de transmission peut à la fois absorber, diffuser et transmettre le rayonnement incident et ajouter son propre rayonnement. Il est donc indispensable de caractériser ce milieu et l'ensemble de ses composants, par sa température et son facteur spectral de transmission (fonction de sa composition et de son épaisseur), afin de pouvoir définir le rayonnement transmis du milieu et incident au détecteur.

Chapitre 3 :

Détecteurs

3. Détecteurs du rayonnement infrarouge

En 1800, William Herschel met en évidence l'existence d'un rayonnement au pouvoir calorifique invisible, le rayonnement infrarouge, en explorant au moyen d'un thermomètre un spectre solaire décomposé par un prisme. Cette découverte est suivie du développement des premiers détecteur thermique, les thermopiles (effets conjugués de Peltier (1834), Seebeck et Thomson (1854)), puis des thermomètres à variation de résistance, les bolomètres, en 1880.

Le développement de détecteurs quantiques entre 1870 et 1920, a permis d'améliorer les gains en termes de temps de réponse et de sensibilité. Successivement la technologie des détecteurs s'enrichit de nouveaux matériaux :

Le sulfure de plomb PbS (1,5-3 μ m) entre 1930 et 1944, l'antimoniure d'indium InSb (3-5 μ m) entre 1940 et 1950, le tellure de cadmium mercure HgTeCd (8-14 μ m) en 1960. Ces nouveaux capteurs, développés à des fins militaires, sont refroidis. Les temps d'acquisition sont encore très grands : les thermomètres nécessitent en 1958 plus de 45minutes pour être élaborés, et en 1966 près de 4minute.

Dans les années 70 et 80, l'avènement des systèmes infrarouges à balayage, des caméras thermiques mono-élément et des caméras à barrettes balayées conduit à l'apparition des premiers équipements commerciaux ; les progrès en vitesse d'acquisition sont notables ; mais la résolution d'images est relativement faible et les équipements thermographiques restent volumineux.

Les années 90 voient l'avènement des détecteurs matriciels. Les innovations en matière de détecteurs infrarouge et en termes de sensibilité, de temps de réponse et d'encombrement et la technologie des détecteurs non refroidis permettent la commercialisation de systèmes exploitables en industrie. Cet essor accroît l'intérêt de tels détecteurs, consécutivement dynamise les recherches appliquées, étend les domaines d'application [2] et rend ainsi les détecteurs encore plus performants et leurs couts tendent à diminuer.

Actuellement, dans l'optique d'effectuer des mesures thermographiques, une large gamme de détecteurs propose des outils précieux au concepteur du système de mesure.

3.1 Le choix d'un détecteur de rayonnement

La pluralité des technologies offre des éléments de réponse à chaque situation thermographique [15]. Le choix du détecteur est crucial pour le bon déroulement des opérations. Ce choix est guidé par les contraintes de l'applications mais aussi par les caractéristiques des détecteurs proposés. Les détecteurs sont identifiés :

- Par leur plage de températures mesurables (hautes ou basses températures),
- Par leur bande spectrale d'intégration (infrarouge, proche infrarouge, moyen infrarouge, infrarouge lointain, monochromatique, multi-longueur d'onde),
- Par le phénomène mis en jeu (thermique, quantique, bolométrique, pneumatique,)
- Par le matériau composant (HgCdTe, PbSe)
- Par le nombre de données (point, matriciel)
- Par le type de données (caméra thermographique, imageur infrarouge)
- Par la vitesse d'acquisition des données,
- Par leur principe de détection (refroidis ou non).

Chaque application peut être caractérisée par un ensemble de notions qui informent de sa spécificité, des possibilités de traitement, des limites de fonctionnement, des exigences de mesure. Afin de répondre aux besoins tout en satisfaisant à l'ensemble des contraintes du système, l'ensemble de ces particularités doit être spécifié.

3.2 Les différents types de détecteurs

Les détecteurs thermiques et les détecteurs quantiques sont les deux principales familles de détecteur du rayonnement infrarouge.

Le détecteur thermique est sensible à la variation de température : le rayonnement incident l'échauffe et le signal issu du détecteur est fonction de sa propre température.

Le détecteur quantique, basé sur l'interaction du rayonnement et de la matière, délivre un signal proportionnel au nombre de photon reçus.

Ces deux types de capteurs existent en monodétecteur ou sous forme matricielle.

3.2.1 Les détecteurs thermiques

Les détecteurs thermiques fournissent un signal qui est fonction de leur propre température. Le composant du détecteur s'échauffe lorsqu'un rayonnement infrarouge l'atteint. L'un des propriétés physiques du matériaux varie avec sa température. Ainsi la variation de température est mesurée par une variation du signal électrique issu du détecteur provoqué par la variation de ce phénomène qui peut être, par exemple, une variation de résistance, une tension générée par une jonction thermocouple ou une charge électrique générée. Ces phénomènes de variation doivent être réversibles pour détecter aussi bien des hausses que des baisses de températures.

La dénomination de détecteur thermique regroupe : la thermométrie par dilatation thermique des solides, des liquides et des gaz, la thermométrie par variation de résistance, les détecteurs pyroélectriques et les thermopiles.

3.2.1.1 Les bolomètres

Les bolomètres sont des thermomètres à résistance électrique [15]. Ces appareils sont utilisés pour la détection et la mesure de faibles rayonnements à partir de la variation de la résistance du composant (semi-conducteur) résultant de l'échauffement. Le rayonnement incident sur le semi-conducteur provoque une agitation thermique des électrons internes ce qui induit une modification de la résistivité du matériau.

Wood [27] a élaboré un bolomètre matriciel 240x336 dont la taille de chaque élément est de $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ et capable de travailler à des longueurs d'onde comprises entre $8\mu\text{m}$ et $12\mu\text{m}$. Les détecteurs matriciels microbolométriques basés sur le dioxyde de vanadium (VO_2) ayant un coefficient thermique de résistance (RTC) très élevé, ont une sensibilité importante. Des applications militaires utilisent des bolomètres matriciels en silicium non refroidis pour des températures ambiantes avec une sensibilité de $0,05^\circ\text{C}$ et d'autres bolomètres refroidis pour des températures de l'ordre de 100K avec une sensibilité de 0,01K [14].

3.2.1.2 Les détecteurs pyroélectriques

Les détecteurs pyroélectriques délivrent un signal fonction de la charge électrique générée par le matériau composant sous l'effet d'un rayonnement électromagnétique.

Certaines substances, qualifiées de pyroélectriques, génèrent des charges électriques sous l'effet d'un échauffement. Les matériaux généralement utilisés sont des lames cristallines, des dioxydes ferroélectriques, comme le sulfate de triglycine (TGS), le lithium de tantalate LiTaO_3 , le polymère PVDF.

La sensibilité du détecteur dépend du coefficient pyroélectrique du matériau composant. Les coefficients pyroélectriques des céramiques ferroélectriques et des cristaux simples sont plus élevés que ceux des polymères ferroélectriques [25]. La sensibilité des détecteurs pyroélectriques est plus faible que celles des détecteurs quantiques.

Ces détecteurs présentent l'avantage de fournir une image thermique infrarouge en large bande spectrale, sans refroidissement du détecteur et à un coût réduit [1]. La réponse des détecteurs pyroélectriques est plus rapide que celle des bolomètres ou des thermocouples. Les caméras infrarouges mettant en œuvre des capteurs pyroélectriques n'autorisent pas le fonctionnement en tant qu'instrument de mesure : le matériau pyroélectrique n'est sensible qu'aux variations de luminances. Ces détecteurs sont utilisés comme imageurs thermiques, ils ne permettent pas d'effectuer des mesures absolues.

3.2.1.3 Les thermopiles

Le principe de thermopiles repose sur l'apparition d'une force électromotrice (f.e.m.) à la jonction d'un couple de deux conducteurs de nature différente, appelé thermocouple. La f.e.m. fournie est dépendante de la nature des conducteurs et de leurs températures. L'une des deux soudures, appelée soudure froide, sert de référence, elle est maintenue à une température constante parfaitement connue, alors que la seconde sert de détecteur. Des tables de calibration donnent les correspondances entre la f.e.m. enregistrée et la température mesurée. L'assemblage de couples thermoélectriques crée des thermopiles. Ce type de détecteur permet une mesure aisée ponctuelle précise, la diversité des conducteurs possibles offre une échelle de température très large.

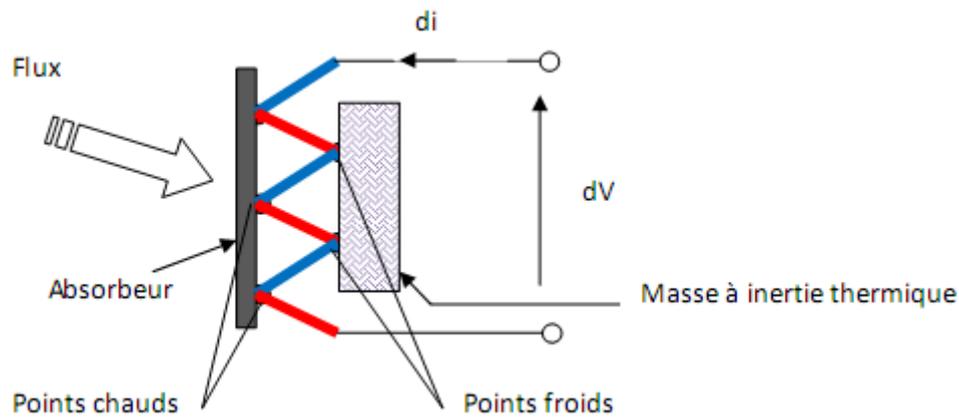


Figure 3.1 : Thermopile

3.2.2 Les détecteurs quantiques

Le détecteur quantique délivre un signal proportionnel au nombre de photons reçus. Ce signal est fonction de l'excitation des particules du composant par les photons du rayonnement incident. Certains métaux ont la propriété d'émettre des électrons sous l'effet d'un rayonnement électromagnétique dont la fréquence est supérieure à un seuil caractéristique (le photon incident doit posséder une énergie suffisante pour exciter les électrons du matériau) [23]. Basé sur l'interaction du rayonnement et de la matière, le détecteur quantique est plus rapide que le détecteur thermique et sera utilisé de préférence dans les caméras alors que le détecteur thermique sera plutôt réservé aux imageurs (thermographie non quantitative).

Entrent dans cette catégorie : les détecteurs photoémissifs, les détecteurs photoconducteurs, les détecteurs photovoltaïques.

3.2.2.1 Les détecteurs photoémissifs

Les détecteurs photoémissifs fournissent un signal proportionnel au nombre d'électrons arrachés d'un solide par le rayonnement incident.

Les photocathodes sont des cathodes émettent des électrons par effet photoélectrique.

L'arséniure de gallium AsGa est un des composants les plus utilisés.

3.2.2.2 Les détecteurs photoconducteurs

Le signal issu des détecteurs photoconducteurs est une mesure de la conductivité d'un réseau cristallin due à la création d'électrons semi-libres par absorption du rayonnement incident. La photoconduction est la propriété de certaines substances dont la conduction électrique varie sous l'effet d'un rayonnement lumineux [18].

Les semi-conducteurs envisageables pour la réalisation de détecteurs photoconducteurs sont :

- **soit intrinsèques** : la transition des photoélectrons s'effectue de la bande de valence à la bande de conduction. Parmi les semi-conducteurs « intrinsèques ». On citera PbS, PbSe, PbTe, InSb, AsGa, InAs, HgCdTe.
- **soit extrinsèque** :
 - **de type N** (conduction par électrons) : la transition s'effectue depuis les niveaux d'impureté (situés dans la bande interdite du semi-conducteur) à la bande de conduction
 - **de type P** (conduction par "trous") : la transition s'effectue de la bande de valence à un niveau d'impureté. Parmi les semi-conducteurs extrinsèques, Ge et Si dopés par Au, Hg, Cu.

3.3 Caractéristiques des détecteurs [13] [5] [11]

3.3.1 Sensibilité (S)

Soumis à un flux de rayonnement de puissance P (en Watts), un détecteur ayant une surface A en (cm²) fournit un signal I (en ampères). Sa sensibilité est :

$$S = \frac{\partial V}{\partial P} (\text{En } A \cdot W^{-1}) \dots \dots \dots (3-1)$$

Et si la correspondance est linéaire

$$S = \frac{V}{P} \frac{V}{E \cdot A} \dots \dots \dots (3-2)$$

où E est l'éclairement (en W.cm⁻²)

3.3.2 Minimum de flux détectable

Il est défini comme la puissance équivalente au bruit PEB (ou NEP), qui représente le flux (en W) provoquant un signal Vn , aux bornes d'une charge, égal à la valeur efficace de bruit du détecteur. La mesure est prise autour d'un point de fonctionnement :

$$PEB = \frac{1}{S} \cdot Vn = \frac{E \cdot A}{V} \cdot Vn \dots \dots \dots (3-3)$$

3.3.3 Défectivité spécifique

La défectivité est comme étant l'inverse de la PEB :

$$D = 1/PEB \text{ (en } W^{-1}) \dots \dots \dots (3-4)$$

De laquelle on déduit la défectivité spécifique D^* (D star), mieux adaptée à la comparaison des détecteurs entre eux. Généralement, le bruit Vn est fonction de la racine carrée de la bande passante f de l'électronique associée, et de la racine carrée de la surface A , [13]

$$Vn = K \cdot \Delta f^{1/2} \cdot A^{1/2} \dots \dots \dots (3-5)$$

Avec K gain de l'appareil.

La défectivité spécifique norme la défectivité à l'unité de bande passante et à l'unité de surface,

$$D^* = \Delta f^{1/2} \cdot A^{1/2} / PEB \text{ (cm} \cdot W^{-1} \cdot \text{HZ}^{1/2}) \dots \dots \dots (3-6)$$

La défectivité spécifique est donc le rapport signal/bruit pour un flux P de 1 W, une surface A de 1 cm², une bande passante de 1 HZ.

D^* varie avec la longueur d'onde du rayonnement reçu, avec la température du détecteur, avec ses conditions de polarisation, ainsi qu'avec l'ouverture angulaire du faisceau incident. La figure (3.2) donne des exemples de défectivité spécifique de détecteurs utilisés en imagerie thermique et en thermographie.

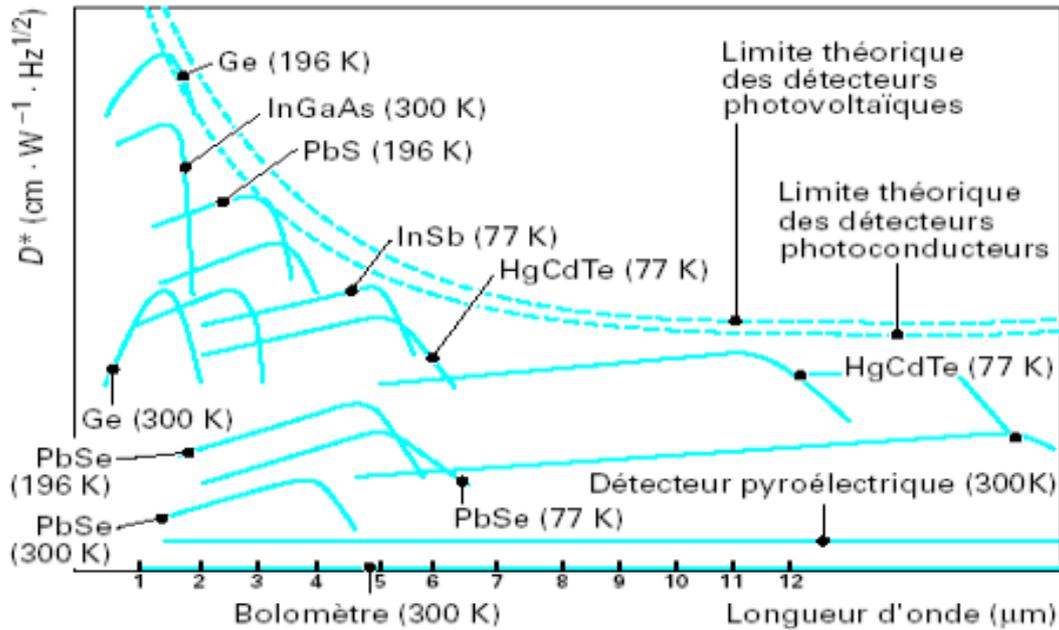


Figure 3.2 : Détections spécifiques de détecteurs pour des températures indiquées [11]

La réponse spectrale du système dépend bien-sûr du matériau semi-conducteur utilisé : le Silicium pour le visible, InSb ou PtSi pour la plage 2 à 5 μm et HgTeCd entre 8 et 13 μm .

Parmi les différents matériaux, l'antimoniure d'indium (InSb) est un photodétecteur très stable et sa sensibilité est constante sur une très grande dynamique. C'est le meilleur détecteur pour la bande 2 à 5 μm .

Par ailleurs et très généralement, les caractéristiques d'un détecteur sont fonction de sa température. Se pose alors le problème de la stabilité de la température du capteur et de la température sur le capteur, du fait de ses dimensions importantes.

La réponse spectrale relative subit des dispersions d'un détecteur à l'autre. C'est pourquoi les constructeurs proposent plutôt des filtres gris que des filtres spectraux pour atténuer les rayonnements et pouvoir adapter la caméra à des gammes de températures élevées ; cela évite les calibrages spectraux des matrices. En cas d'utilisation de filtres spectraux, des matrices de sensibilités et d'offsets doivent être relevées, mémorisées et commutées pour chacun des filtres.

3.4 Détecteurs multiéléments

La sensibilité thermique d'une caméra varie comme la racine carrée du nombre d'éléments détecteurs [19]. Ceci conduit à chercher à utiliser des détecteurs à éléments multiples. En outre, il est difficile d'obtenir à partir d'un détecteur unique une image du type télévision pour les raisons qui suivent :

- La fréquence ligne de la télévision étant égale à 15625 lignes/s (625 lignes * 25 images/s) selon le standard CCIR (comité consultatif international des radiocommunications), il est difficile d'obtenir cette fréquence par des moyens mécaniques, que ce soit avec des miroirs vibrants de dimensions centimétriques, ou avec un polygone tournant (un polygone à 10 facettes devant tourner à 1562.5 tr/s soit 93750 tr/mn).
- Le débit d'information, au niveau du détecteur, est très élevé (12 M pixels/s, avec un rendement de balayage égal à l'unité) ce qui limite le choix des détecteurs.

Ces différentes raisons ont conduit à l'utilisation de détecteurs à éléments multiples. Plusieurs dispositions typiques sont utilisées :

- i. Les détecteurs analysent chaque ligne d'une trame, associés à une méthode de balayage dite « parallèle » (figure 3.3 a). Les détecteurs sont alors disposés selon une ou plusieurs colonnes verticales dans l'image.
- ii. Les détecteurs sont rangés selon la direction des lignes et analysent successivement tous les points de l'image. C'est le balayage dit série (fig. 3.3 b)
- iii. Les détecteurs groupés en une petite mosaïque bidimensionnelle, (p lignes, n colonnes) participant à la fois aux deux méthodes précédentes : c'est le balayage « série-parallèle » (fig. 3.3c)
- iv. Les détecteurs groupés en une mosaïque ont approximativement la taille de l'image, mais présentant entre eux des vides ; ceux-ci sont remplis par un mouvement de « microbalayage » (fig. 3.3d)

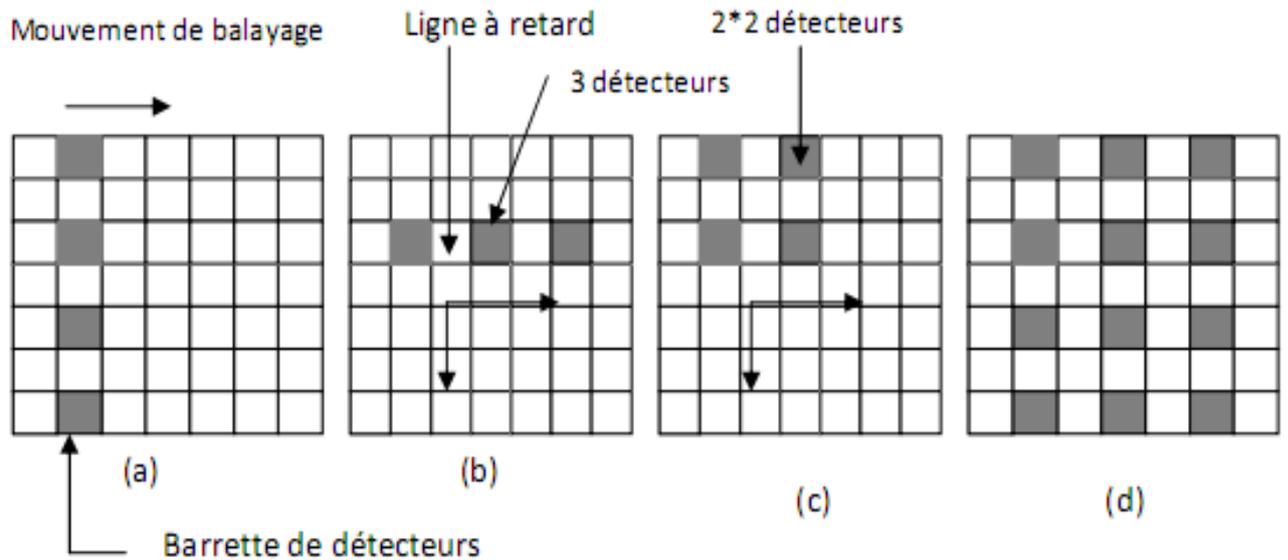


Figure 3.3: détecteurs à éléments multiples :(a) parallèle, (b) série, (c) série-parallèle, (d) micro balayage. [19]

3.4.1 Dispositif à transfert de charges CCD

On les désigne souvent par l'appellation anglaise de CCD (charge coupled devices). La figure (3.4) donne des exemples d'analyseurs CCD (linéaires et matriciels).

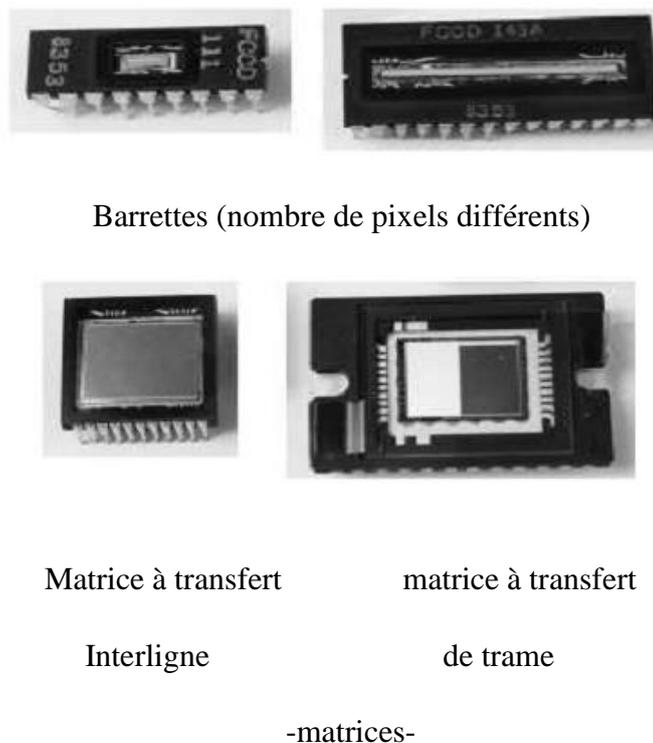


Figure 3.4 : Exemples d'analyseurs intégrés (CCD) linéaires et matriciels. [3]

Ces composants comportent sur la face supérieure du boîtier une fenêtre transparente qui protège une zone photosensible. Cette zone est constituée d'éléments discrets photosensibles ou pixels disposés en ligne (barrette CCD) ou en lignes et colonnes (rétine ou matrice CCD) selon le type d'analyseur.

Les pixels d'un analyseur CCD, assimilables à des petits rectangles, sont répartis de façon régulière en lignes et en colonnes. Ces pixels sont distants d'un certain pas et définissent ainsi un échantillonnage spatial mono ou bidimensionnel de l'image. Un exemple de structure matricielle est donné sur la figure (3.5).

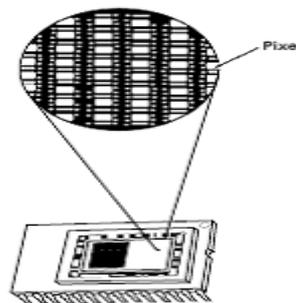


Figure 3.5 : Structure d'un analyseur CCD matriciel. [3]

La conversion optoélectronique est réalisée dans les cellules élémentaires qui peuvent être des photodiodes ou des photocalités MOS.

Lorsque des charges ont été créées dans un pixel par les photons incidents, il convient d'en opérer la lecture. Cette lecture se fait de façon séquentielle en adressant successivement chacun des pixels et en transférant l'information correspondante vers l'amplificateur de lecture. L'originalité du CCD par rapport au tube réside dans le mode d'adressage et de transfert des charges photoélectroniques ainsi que de leur amplification.

Les analyseurs d'images CCD reposent largement sur la technologie MOS, nous en rappellerons quelques principes de base. [3]

3.4.2 Condensateur MOS

L'élément de base des dispositifs à transferts de charges est le condensateur MOS, qui est constitué d'un substrat semi-conducteur (silicium), en général de type P, d'une couche isolante de quelques dixièmes de micromètres d'épaisseur (oxyde de silicium, SiO₂) et d'une grille ou conducteur.

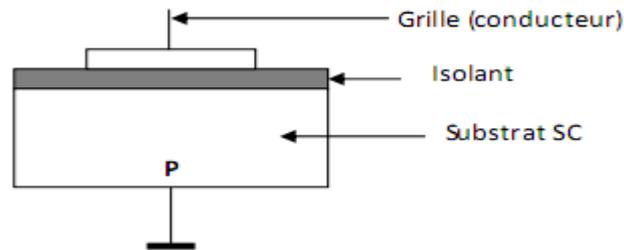


Figure 3.6 : condensateur MOS

Quand on applique une tension positive sur la grille, les trous, porteurs majoritaires, sont repoussés de la surface entre isolant et semi-conducteur et il se forme une zone dépeuplée (figure 3.7)

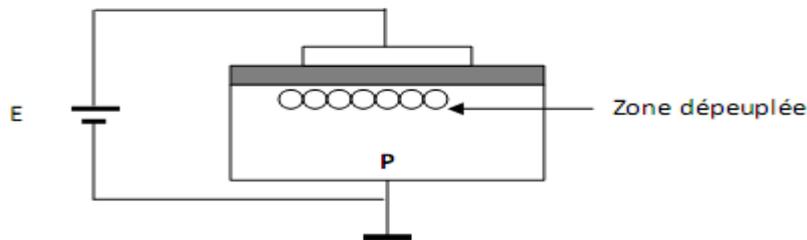


Figure 3.7 : création de la zone dépeuplée.

Lorsque la tension appliquée augmente, la région située au voisinage de l'interface se vide de plus en plus de ses porteurs majoritaires. Lorsque la densité des électrons dépasse la densité des trous, on dit qu'il y a inversion de population.

***) Injection optique**

La grille et l'isolant sont assez minces pour être transparents. Quand un photon de longueur d'onde appropriée atteint le semi-conducteur, il y a création d'une paire électron-trou par effet photoélectronique. Le champ électrique du condensateur MOS correctement polarisé piège les électrons au voisinage de l'isolant. La charge stockée est proportionnelle au nombre de photons reçus : elle constitue donc l'information à exploiter. [19]

***) Transfert de charges**

La capacité MOS peut assurer une fonction de conversion optoélectronique (photocapacité), mais elle peut aussi constituer un élément des organes de transfert d'un analyseur d'images.

Si une série de plusieurs capacités MOS sont couplées latéralement, comme indiqué sur la figure 3.8, de telle sorte que leurs zones de déplétion se rejoignent, les paquets de charges minoritaires vont s'accumuler dans les endroits où le potentiel de surface est le plus élevé (énergie la plus faible). Cette structure offre la possibilité de transférer un paquet de charges, à l'interface silice-silicium, par simple action sur les grilles de commande des capacités adjacentes. [19]

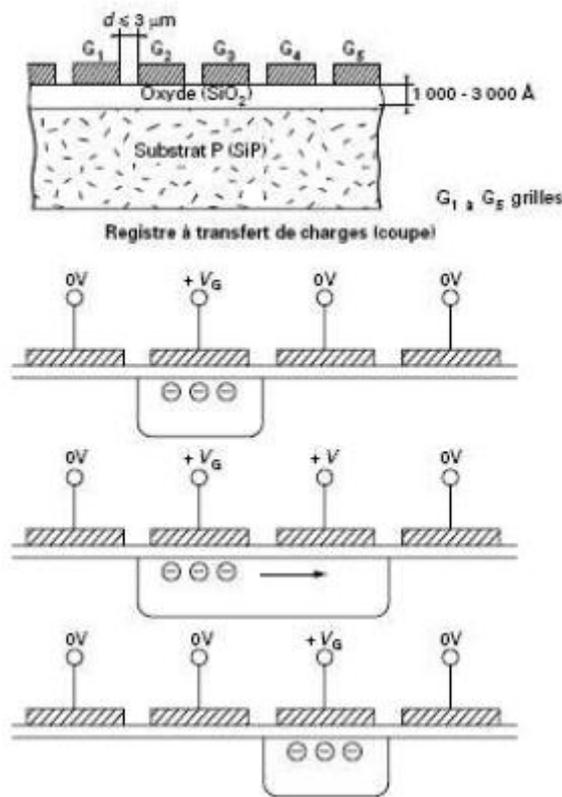


Figure 3.8 : Principe du transfert du charge.

Un paquet de charges qui aura été créé optiquement sous une grille donnée maintenue à un certain potentiel pourra migrer le long de l'interface SiO₂-Si jusque sous la grille voisine lorsque celle-ci aura été polarisée à un potentiel égal ou supérieur à celui de la grille adjacente. Si le potentiel de la grille sous laquelle la charge était initialement stockée est annulé, la charge se trouve complètement transférée sous la grille voisine comme indiqué sur la figure 3.8.

Ces dispositifs constituent donc des organes de transfert des charges stockées dans une photopacité MOS vers un dispositif de lecture. [19]

3.5 Refroidissement des détecteurs

Il a été noté plus haut, dans la description générale des détecteurs photoniques, que la création de photoélectrons provient de l'absorption des photons du rayonnement à détecter.

Il existe malheureusement d'autres causes que le rayonnement recherché dans l'excitation des électrons du détecteur, telles que l'agitation thermique des atomes et molécules du matériau photosensible et/ou l'éclairement du détecteur par le fond environnant. Ces sources de signaux parasites peuvent masquer plus ou moins le phénomène recherché et doivent être combattues de façon appropriée.

On s'attachera généralement à réduire l'agitation thermique du détecteur et le rayonnement ambiant qu'il reçoit en refroidissant le détecteur et en limitant son champ de vision à la valeur utile au moyen d'une enceinte à diaphragme elle-même refroidie.

Les méthodes de refroidissement à mettre en place ainsi que les températures à atteindre sont essentiellement fonction de la bande spectrale de fonctionnement du système et de la sensibilité requise pour le détecteur.

Les principales méthodes de mise en froid de détecteurs sont :

- L'effet Peltier,
- La détente Joule Thomson,
- Les machines cryogéniques,
- L'utilisation de gaz liquéfiés.

L'effet Peltier (ou thermoélectrique) consiste dans le refroidissement (ou échauffement) provoqué par le passage d'un courant électrique dans la jonction entre deux métaux différents. Il présente l'avantage de n'exiger qu'une source d'énergie électrique, conduit à des dispositifs fiables et compacts (le détecteur repose sur la jonction froide constituée d'une plaque de cuivre en contact avec du tellure de Bismuth) et ne pose pas de problèmes dus aux vibrations. Par contre, les températures minimales accessibles qui demeurent élevées, dépendent du nombre d'étages et de la température ambiante (par exemple, 195 K, avec 6 étages). D'autre part, il faut veiller soigneusement à la qualité du contact thermique entre le détecteur et la « plaque froide »

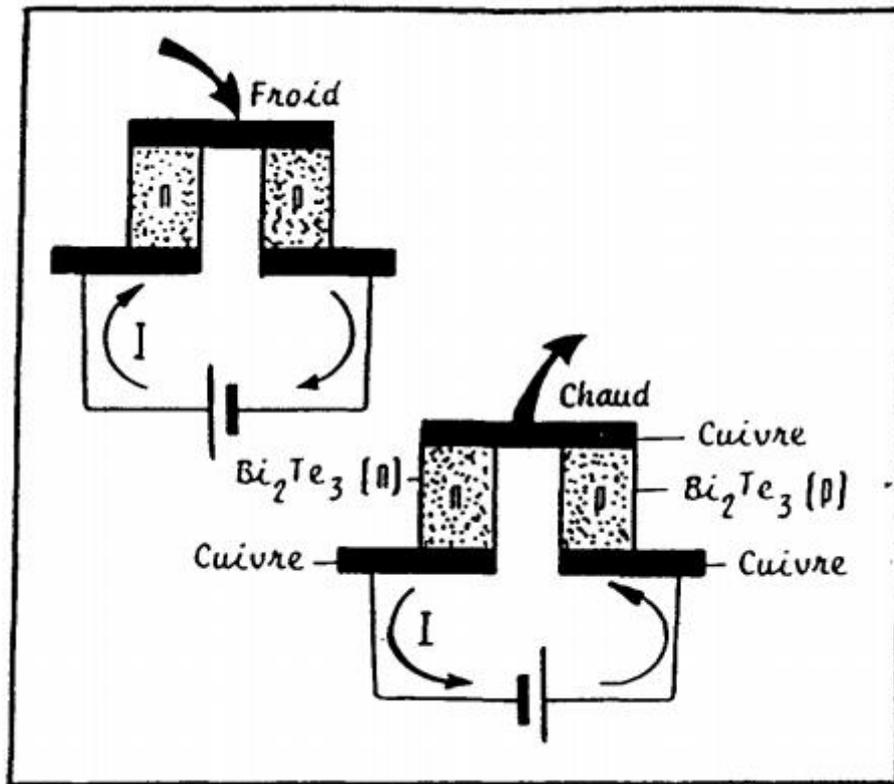


Figure 3.9 : Effet peltier

Le refroidissement par détente Joule Thomson exploite l'abaissement de la température par la détente d'un gaz à haute pression : le gaz sous pression (par exemple de l'azote entre 200 et 400 bars) se détend dans une sonde qui est introduite à l'intérieur du Dewar contenant le détecteur.

La sonde est constituée d'un manchon thermiquement isolant sur lequel est bobiné un tube métallique fin, par l'extrémité duquel s'échappe le gaz décompressé, donc refroidi. Au bout de quelques minutes, le tube est assez froid pour qu'une gouttelette d'azote se forme au contact du détecteur

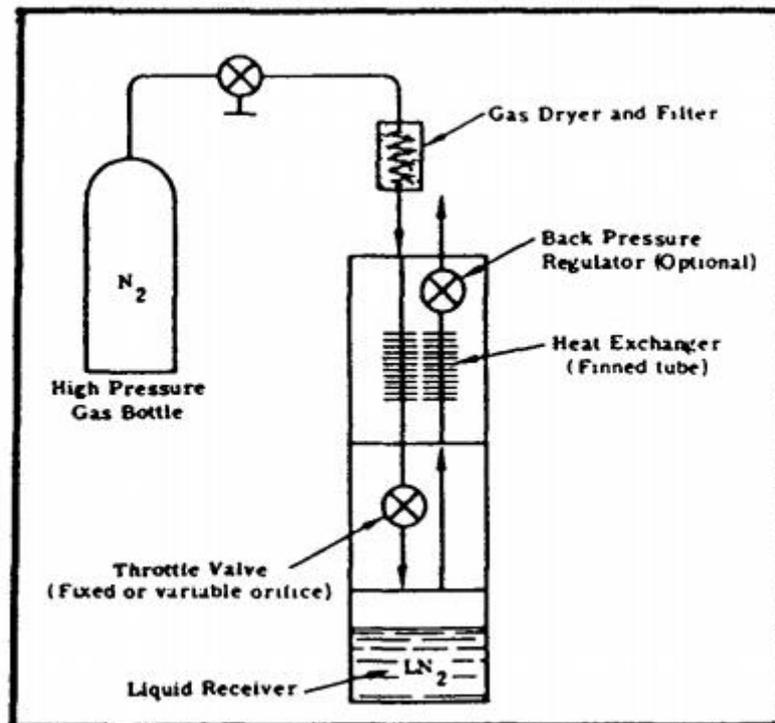


Figure 3.10 : Sonde Joule Thomson.

Le refroidissement par machine cryogénique s'opère mécaniquement par détente d'un gaz comprimé suivant plusieurs possibilités de cycles thermodynamiques. Parmi ces derniers, on citera le cycle de Sterling (phases de compression et de détente isothermes, et régénération à volume constant) et le cycle de Vuilleumier (apport de chaleur par chauffage électrique).

Enfin, le refroidissement par gaz liquéfié consiste à placer le détecteur en contact avec le gaz liquéfié (tel que l'azote) contenu dans un réservoir, généralement un vase Dewar comprenant une double enveloppe en verre ou en métal isolée par un vide poussé (cryostat). Le gaz liquéfié s'évapore lentement, ce qui assure au détecteur une autonomie de plusieurs heures.

3.6 Matériaux des systèmes infrarouges

Les matières utilisées dans l'infrarouge sont constituées à partir de verres, de cristaux naturels ou artificiels, de matières plastiques ou de métaux.

3.6.1 Les verres

Les verres à base de quartz fondu ou de silice fondue donnent une transmission correcte jusqu'à 5µm, limite au-delà de laquelle l'absorption est due au spectre de vibration de la liaison Si-O.

Certains verres spéciaux transmettent des longueurs d'onde plus grandes, il s'agit :

- des verres à l'aluminate de calcium

IR 10-11-12 de BAUSCH – LOMB

BS 37 A de BARR et STROUD

- des verres Irtran kodak

irtran 1 à base de Fluorure de Magnésium fritté (MgF₂)

irtran 2 verre au sulfure de Zinc fritté (ZnS)

irtran 3 verre au fluorure de Calcium (CaF₂)

irtran 4 verre au séléniure de Zinc (ZnSe)

irtran 5 verre fritté à l'oxyde de magnésium (MgO)

irtran 6 verre au Tellure de Cadmium (TeCd)

- des verres de chalcogénures, contenant des éléments lourds tels que Arsenic, Antimoine, Thallium, sélénium, Tellure.
- Des verres au trisulfure d'arsenic (As₂S₃)
- Des verres à l'oxyde de germanium tels que le vir 3 de Sovirel.

3.6.2 Les cristaux

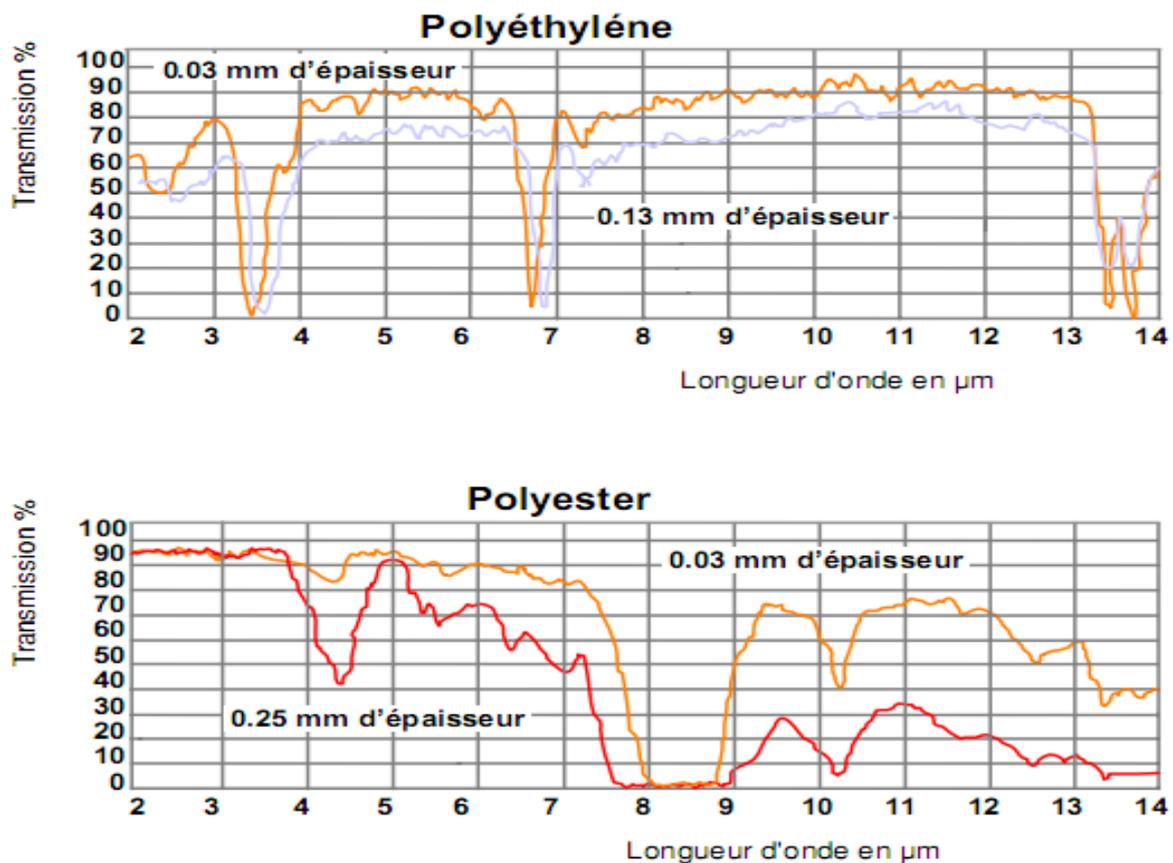
Les cristaux les plus utilisés sont :

- les halogénures, généralement monocristallins, tels que le sel de gemme (NaCl), la fluorine (KCl), la cérargyrite (AgCl), le bromiodure de thallium (KRS-5), le Bromochlorure de thallium (KRS-6), etc.

- les semiconducteurs, rares et coûteux à l'état monocristallin ; ils ont devenu relativement répandus sous la forme polycristalline. Il s'agit du silicium (Si), du germanium (Ge), de l'arséniure de gallium (GaAs), etc.

3.6.3 Les matériaux plastiques

La transmission des films plastiques varie selon la longueur d'onde et est proportionnelle à leur épaisseur. Les matériaux fins transmettent mieux les radiations que les plastiques épais. Pour mesurer de façon optimale la température, il est important de choisir une longueur d'onde où la transmission s'approche le plus possible de zéro. Certains plastiques ne transmettent pas de radiations à 3,43 μm (polyéthylène, polypropylène, Nylon et polystyrène) et d'autres non plus à 7,9 μm (polyester, polyuréthane, Téflon, FEP et polyamide). Il est recommandé de choisir une longueur d'onde comprise entre 8 et 14 μm pour les films plus épais ($> 0,4$ mm) et fortement pigmentés. Presque tous les films plastiques ont un degré de réflexion compris entre 4 et 10 %.



Le polyéthylène ne transmet pratiquement pas de radiations à 3,43 μm .

Le polyester, lui, ne transmet pas à 7,9 μm .

3.6.4 Les métaux

Certains métaux ont un excellent pouvoir réflecteur en infrarouge et sont à ce titre utilisés dans la réalisation des miroirs optiques. Les couches métalliques réfléchissantes sont déposées sous vide sur un substrat souvent à base de verre, quartz, pyrex ou céramique à très faible coefficient de dilatation. Les métaux les plus employés sont :

- l'aluminium (Al)
- l'Argent (Ag)
- l'Or (Au)
- le Cuivre (Cu)

La protection de la surface de tels miroirs soit souvent être faite avec un fin revêtement d'oxyde de silicium (SiO). [6]

En conclusion, le rayonnement incident au capteur est déterminé par l'influence de chaque élément qu'il traverse et des éléments environnants. Différents instruments de mesure peuvent être employés pour détecter ce rayonnement. Le développement de tels détecteurs et les critères de choix ont été présenté. Les deux principales familles de détecteurs du rayonnement infrarouge. Les détecteurs thermiques et les détecteurs quantiques, ont été introduites ainsi que leurs principes de fonctionnement. Chaque détecteur par sa spécificité apporte des informations différentes sur l'objet. L'analyse du signal issu de l'objet et détecter par le capteur est effectuer par des méthodes de calcul qui permettent d'en extraire ses propriétés thermiques.

Chapitre 4 :

Affichage

4. Visualisation de la température

La source principale de rayonnement infrarouge est la chaleur, ou rayonnement thermique. Tout objet, dont la température est supérieure au zéro absolu [-273,15 degrés Celsius ou 0 Kelvin], émet un rayonnement dans la bande infrarouge.

Plus l'objet est chaud, plus la quantité de rayonnement est importante. La Thermographie Infrarouge consiste donc à capter ce rayonnement, à le quantifier afin de permettre la lecture des valeurs de température à distance, sans contact, de manière non destructive et sur des objets en fonctionnement.

La méthodologie de principe (figure 4.1) est de ramener une situation de mesure à la situation d'étalonnage. Cette démarche, incluse dans l'examen thermographique, nécessite que l'opérateur apprécie et maîtrise la situation de mesure.

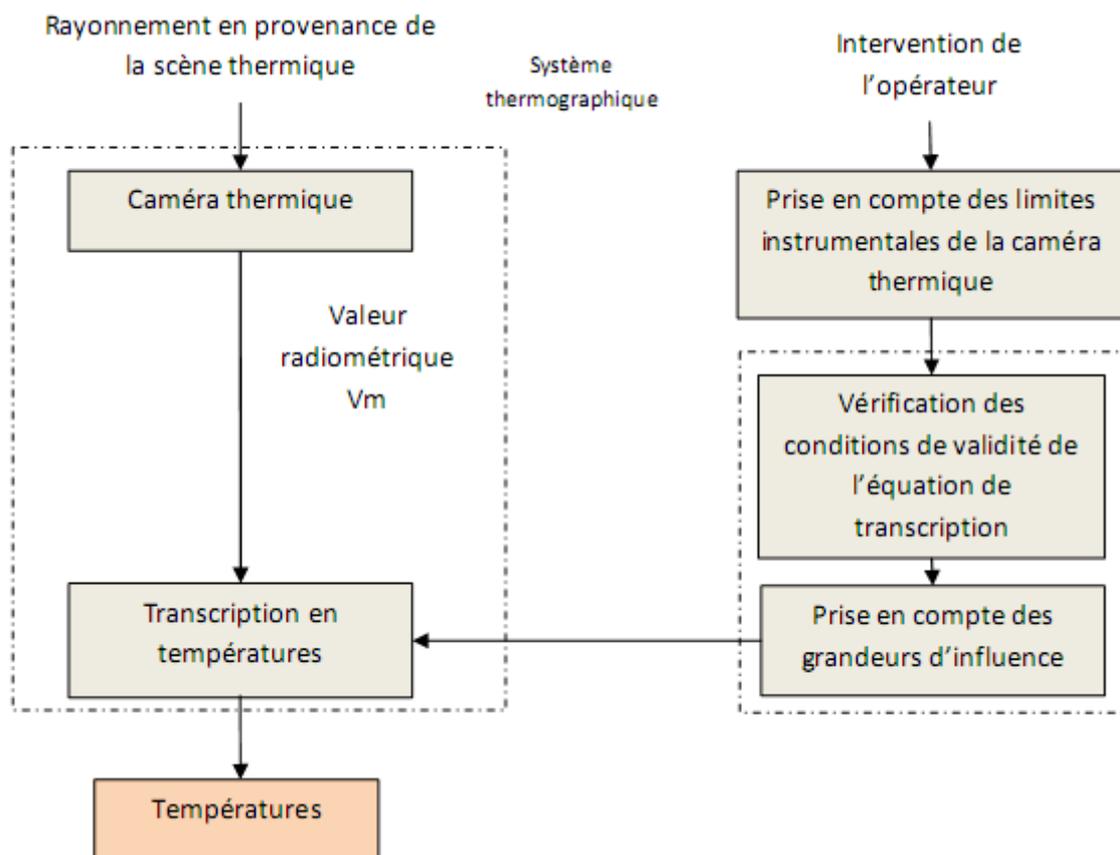


Figure 4.1 Démarche méthodologique de la mesure thermographique. [4]

4.1 Signal fourni par le détecteur

4.1.1 Calibration

Le principe de la mesure sans contact par caméra suppose l'existence d'une relation de correspondance connue entre les températures des objets et l'amplitude des signaux électriques délivrés par le détecteur, identifiée par les niveaux de gris de l'image. Cette correspondance peut être établie soit par le calcul à partir des divers paramètres de la chaîne de mesure, soit expérimentalement à l'aide de sources de référence étalonnées.

La procédure de calibration globale du système se décompose en une calibration lumineuse et une calibration en température [24].

4.1.1.1 Calibration lumineuse

L'aspect spatiale du système demande une calibration en luminance, de nombreux éléments altèrent l'intensité lumineuse reçue puis transmise par le capteur. L'image est entachée de défauts liés aux bruits et aux imperfections du système d'acquisition. Le prétraitement a pour but de supprimer ou atténuer ces défauts.

Cette phase vise à corriger d'une part la non-uniformité de la réponse à l'éclairement, due à la sensibilité relative des divers photosites constituant la matrice, et d'autre part de vérifier la linéarité en luminance des courbes d'étalonnage.

***) La non-uniformité de la réponse à l'éclairement**

Chaque élément de la matrice CCD est un détecteur photosensible : le nombre d'électrons produits par un photosite est proportionnel au nombre de photons reçus.

Cependant, la sensibilité des divers photosites constituant la matrice n'est pas constante. Certains pels (pel : point élémentaire = détecteur + électronique associée) ont une réponse nulle, d'autres ont un rapport signal sur bruit inférieur à la moyenne. Pour un même éclairement, chaque photo-élément ne réagit pas de la même manière que ses voisins, du fait de la non-uniformité intrinsèque du CCD (non-uniformité d'épaisseur du substrat semi-conducteur, disparité en taille, interface d'électronique associée, disparité des conversions flux/signal), et du système d'acquisition (altérations due à l'objectif, bruit de transmission),

La calibration en intensité lumineuse a pour objet d'uniformiser la réponse de l'ensemble de la matrice. Cette correction du bruit spatial fixe est intitulée « Non Uniformity Correction » (N.U.C). Le système est placé devant une sphère intégratrice qui émet une lumière homogène et diffuse en tout point. L'image résultante, appelée plage de lumière uniforme (PLU), présente un bruit spatial caractéristique des variations locales du rendement quantique, c'est-à-dire des variations locales de la réponse de chaque photoélément de la matrice CCD. Selon sa réponse à l'éclairement, une correction radiométrique différente est associée à chaque pixel, en vue de régulariser la réponse de l'ensemble des photo-élément de la matrice CCD.

***) La linéarité en luminance**

Pour la mesure de température vraie, il est essentiel que les courbes d'étalonnage soient linéaires en luminance. Pour vérifier cette propriété, le système d'acquisition est placé devant une sphère intégratrice, dont l'intensité lumineuse est variable. La linéarité de la réponse du système en fonction de l'éclairement de la matrice est vérifiée par la construction d'une droite à partir des couples de points {réponse du système, éclairement}.

Une correction cumulée est associée à chacun des pixels image.

4.1.1.2 Calibration en température

La correspondance entre l'amplitude de la tension du signal vidéo, c'est-à-dire la réponse du système, et la température du corps noir observé doit être établie expérimentalement, afin de pouvoir faire correspondre à chaque niveau de gris pixel, une valeur de température corps. Il s'agit des courbes d'étalonnage qui sont fonction de l'état du système : objectif, ouverture, filtre spectrale, etc...

***) Procédure**

La méthode de calibration consiste en l'observation d'une source corps noir à température variable.

Le système est placé à courte distance du corps noir, aussi proche que le permet la distance minimale de mise au point optique, selon l'objectif utilisé. La surface utile du corps noir, de dimension suffisante, est placée au centre de la scène thermique observée.

Lors de l'étalonnage, il faut prendre en compte le problème que représente le corps noir et surtout son aptitude à suivre étroitement la loi de Planck. Le corps noir n'est qu'un étalon de

température mesurée par contact au sein du corps noir lui-même. C'est pourquoi parallèlement à la mesure du thermosignal pour chaque température indiquée du corps noir, des mesures de températures à l'aide d'un pyromètre optique ont été relevées. Elles fournissent la référence en température.

La courbe d'étalonnage, construite sur l'ensemble des couples de valeurs $\{V(T_0), T_0\}$, est la courbe de correspondance effective entre le thermosignal $V(T_0)$ fournie par la caméra, et traduit en niveau de gris après numérisation, et la température T_0 du corps noir observé, lors de l'étalonnage du système. Ces courbes sont établies pour toutes les configurations d'utilisation du système de mesure : temps d'intégration, diaphragme d'ouverture, distance système-cible, température ambiante.

Pour une gamme de température donnée et une configuration donnée du système, la réponse du système peut être représentée par la loi de Planck en luminance. Le thermosignal $V(T)$ étant proportionnel à la luminance.

$$L_{\lambda}^0(T_0) = f(V(T_0)) \dots \dots \dots (4.1)$$

$$V(T_0) = \frac{A}{e^{\left[\frac{B}{T_0}\right]-1}} \dots \dots \dots (4.2)$$

La représentation d'une courbe d'étalonnage consiste à déterminer les coefficients A et B, dépendants de l'objectif utilisé, de l'ouverture et du filtrage de la caméra.

***) Interprétation**

Ces courbes sont nécessaires à l'utilisateur qui veut définir quelle est la configuration de l'appareil conduisant à la meilleure situation de mesure donnée. La meilleure sensibilité est obtenue pour une zone de courbe où la pente sera plus forte. La plage de fonctionnement en température du système est donnée par la plage de température mesurables du corps noir observé. Elle est couverte en plusieurs calibres (temps d'intégration et couverture du diaphragme). La sensibilité en température du système d'acquisition est son aptitude à fournir un incrément de la valeur du thermosignal pour un incrément de la température du corps noir observé. La courbe de sensibilité en température est la dérivée de la courbe d'étalonnage en température. La sensibilité est différentielle : elle prend une valeur variable selon la température.

L'ensemble de la phase de calibration précédemment décrite permet de caractériser avec précision le système, de corriger les éventuelles dérives et de définir ses limites.

La caractérisation de la caméra réalisée, l'aspect spatial de la mesure thermique est valorisé par les données images obtenues. La simple visualisation de ces images est suffisante pour des applications d'imagerie thermique simple. L'interprétation de ces images fait appel à des notions physiques de structures de la matière et nécessite des informations sur la scène.

Des traitements plus complexes sont effectués sur ces images pour en extraire des informations pertinentes de la scène.

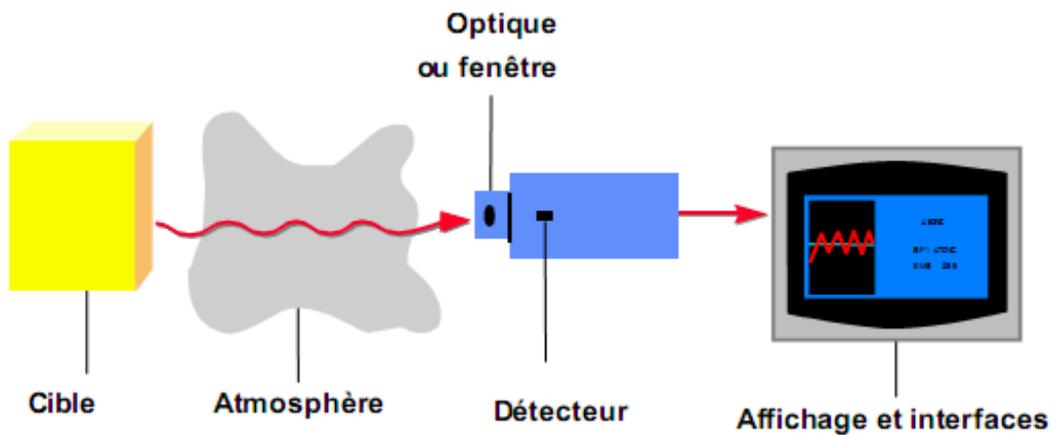


Figure 4.2 : Observation de l'émission d'une source placée dans un environnement à travers une atmosphère.

La luminance monochromatique L_{mes} mesurée par le capteur est donnée par **l'équation générale de la radiométrie** :

$$L_{mes} = [\varepsilon(\lambda).L_{\lambda}^{cN}(T) + R(\lambda).L_{\lambda}^{cN}(Te)]\tau_{\lambda atm} + (1- \tau_{\lambda atm}).L_{\lambda}^{cN}(Tatm) \dots\dots\dots(4.3)$$

$\varepsilon(\lambda).L_{\lambda}^{cN}(T)$: Flux émis par la surface.

$R(\lambda).L_{\lambda}^{cN}(Te)$: Flux réfléchi par la surface.

$\varepsilon(\lambda).L_{\lambda}^{cN}(T) + R(\lambda).L_{\lambda}^{cN}(Te)]\tau_{\lambda atm}$: Flux transmis par l'atmosphère.

$(1 - \tau_{\lambda_{atm}}) \cdot L_{\lambda}^{cN}(T_{atm})$: Flux émis par l'atmosphère.

Les grandeurs d'influence sont donc $\varepsilon(\lambda)$, $R(\lambda)$, T_e , τ_{atm} et T_{atm} . Suivant les conditions opératoires, l'influence de l'une ou de l'autre de ces grandeurs peut devenir négligeable, sauf en ce qui concerne le premier $\varepsilon(\lambda)$. Excepté lors de mesures par télédétection de températures peu élevées, le dernier terme, représentant l'émission de l'atmosphère, peut être négligé. On écrit alors :

$$L_{mes} = [\varepsilon(\lambda) \cdot L_{\lambda}^{cN}(T) + R(\lambda) \cdot L_{\lambda}^{cN}(T_e)] \tau_{\lambda_{atm}} \dots\dots\dots(4.4)$$

L'optique de diamètre Φ , de focale f et le détecteur de surface A , situé à la distance x' de l'optique. Le détecteur est alors l'image du champ objet situé à la distance x telle que $1/x + 1/x' = 1/f$ et de surface $s = A(x/x')^2$

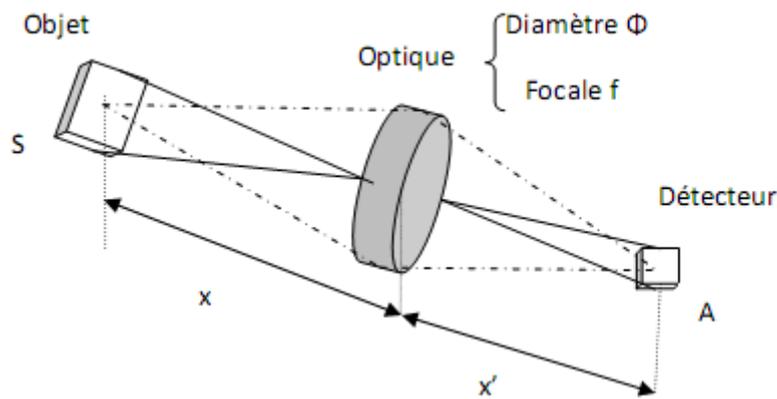


Figure 4.3 : schéma simplifié d'un radiomètre.

L'étendue géométrique définie par un tel système est :

$$G = \frac{\pi \cdot \phi^2 \cdot A}{4 \cdot x'^2} \dots\dots\dots(4.5)$$

Le flux reçu par le détecteur est :

$$F = L_{mes} \cdot \tau_{op} \cdot G \dots\dots\dots(4.6)$$

τ_{op} est le facteur de transmission de l'optique.

Dans des conditions normales de fonctionnement, le signal électrique délivré par le détecteur a une amplitude 'a' fonction linéaire du flux optique reçu :

$$'a' = S.F \dots\dots\dots(4.7)$$

S est la sensibilité du détecteur et F est le flux reçu .

Lorsque tous ces coefficients de proportionnalité sont connus il est possible de faire correspondre à chaque valeur de l'amplitude du signal 'a', une température T moyenne contenue dans le champ objet.

4.2 Caractérisation d'une caméra

Les caractéristiques des caméras se définissent principalement suivant trois axes : spatial, thermique et temporel. Le choix d'un instrument de mesure ou de visualisation thermique se résume à trouver un compromis judicieux entre ces trois axes [20].

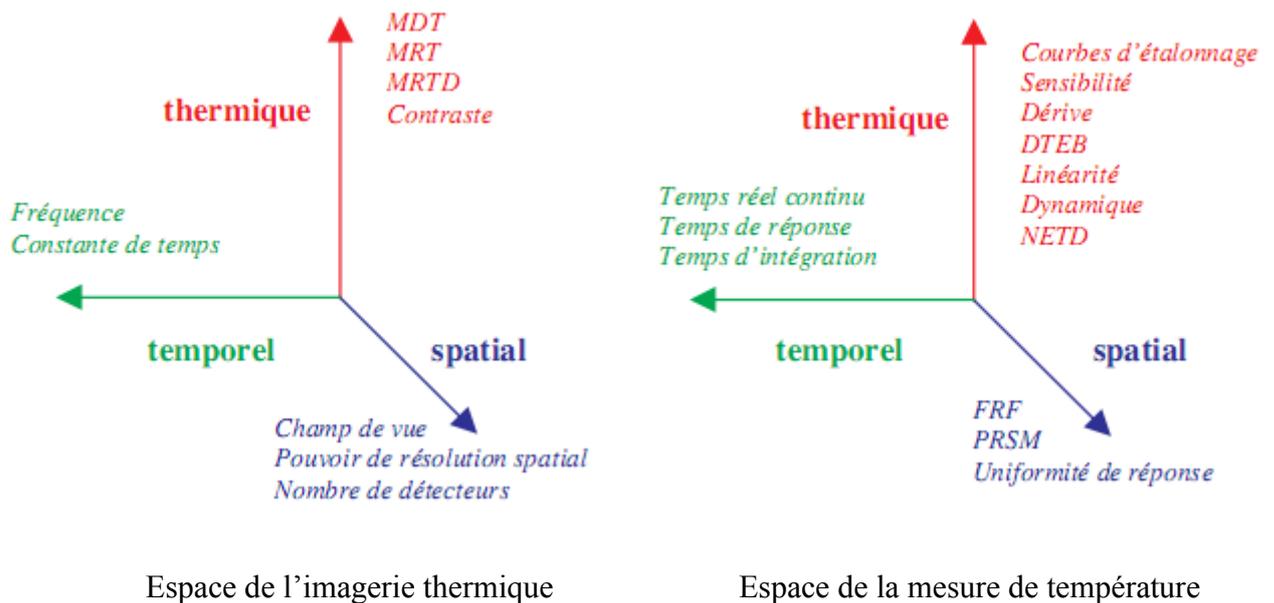


Figure 4.4 : Espace des caractéristiques des détecteurs

4.2.1 La réponse spectrale relative

La sensibilité spectrale d'un détecteur à rayonnement dépend de la composition spectrale de ce flux, de la caractéristique intrinsèque du détecteur. La réponse spectrale relative est représentée par la courbe de la sensibilité relative de la caméra à un flux incident constant de longueur d'onde variable. Les composants qui s'interposent sur le trajet optique entre l'objet à étudier et le capteur modifient cette réponse spectrale. La réponse spectrale d'un système de mesure quantifie la capacité de l'appareil à détecter un rayonnement incident selon sa longueur d'onde.

4.2.2 Le bruit

La limitation dans la détection des bas niveaux de rayonnement est due à la superposition du signal de sortie d'une fonction aléatoire appelée « bruit ».

L'évaluation du rapport entre le signal de sortie et le bruit permet de traduire un critère de qualité de la détection. Ce rapport doit être aussi élevé que possible.

La dynamique est définie par le rapport signal sur bruit maximal que la caméra peut présenter.

4.2.3 Les courbes d'étalonnage

Les courbes d'étalonnage établissent les correspondances entre le signal détecté par la caméra et la luminance ou la température observée.

4.2.4 La sensibilité

La sensibilité en température d'une caméra quantifie sa faculté à détecter la plus petite variation de température. Elle correspond à la variation d'un pas du signal pour la variation d'un pas de la température de la cible. La sensibilité est définie comme la dérivée du signal V que le détecteur délivre, par rapport au flux ϕ incident.

$$S(\phi_0) = \left(\frac{\partial V}{\partial \phi}\right) \dots \dots \dots (4.8)$$

Si le détecteur est linéaire, la sensibilité sera proportionnelle au flux reçu .

$$S = \left(\frac{V}{\phi}\right) = \frac{V}{EA} \dots\dots\dots(4.9)$$

4.2.5 La plage de fonctionnement

La plage de fonctionnement est l'intervalle limite de luminances ou de températures mesurables. Pour une même caméra, plusieurs configuration, calibres, ouverture et temps d'intégration, garantissent la couverture de la plage de fonctionnement.

4.2.6 La résolution spatiale

La résolution spatiale définit la dimension des plus petits éléments de l'objet que l'on peut percevoir. Elle caractérise l'aptitude de la caméra à faire apparaître la distinction entre des valeurs de luminance spatialement très proches. Elle est limitée par la qualité de l'optique.

4.2.7 La résolution temporelle

La résolution temporelle caractérise l'aptitude du détecteur à effectuer des mesures à des intervalles de temps très courts.

4.2.8 La constante de temps

Le temps de réponse d'un détecteur est défini comme le temps nécessaire pour que le signal électrique en sortie atteigne 63% de sa valeur finale lorsqu'il est soumis à un brusque changement d'éclairément. Il induit la fréquence maximale de fonctionnement.

4.2.9 La résolution thermique

La résolution thermique est l'aptitude de la caméra à mesurer de très faibles écarts de température en temps réel. Elle correspond à l'écart minimum de température apparente discernable entre un objet et son environnement. La résolution thermique est essentiellement limitée par le bruit électronique de l'ensemble détecteur et chaîne de mesure de traitement de signal.

4.3 Modes d'analyse d'une image thermique

L'analyse d'une image thermique est considérée comme bonne lorsqu'elle permet la réalisation d'une image exploitable spatialement et thermiquement. Pour cela, cette image doit présenter peu de distorsion, une finesse et une cadence, adaptées à l'observation visuelle, tout en possédant un spectre vidéo de largeur minimale pour réduire au mieux le bruit. Ainsi, l'analyse doit, si possible être linéaire, avec des temps morts aussi faibles que possible (balayage en dents de scie).

4.4 Résolutions de la Caméra thermique

4.4.1 Balayage spatial optomécanique

Les caméras classiques sont conceptuellement une extension de la radiométrie à monodétecteur par l'adjonction d'un balayage spatial optomécanique (fig 4.5 et exemple 4.6).

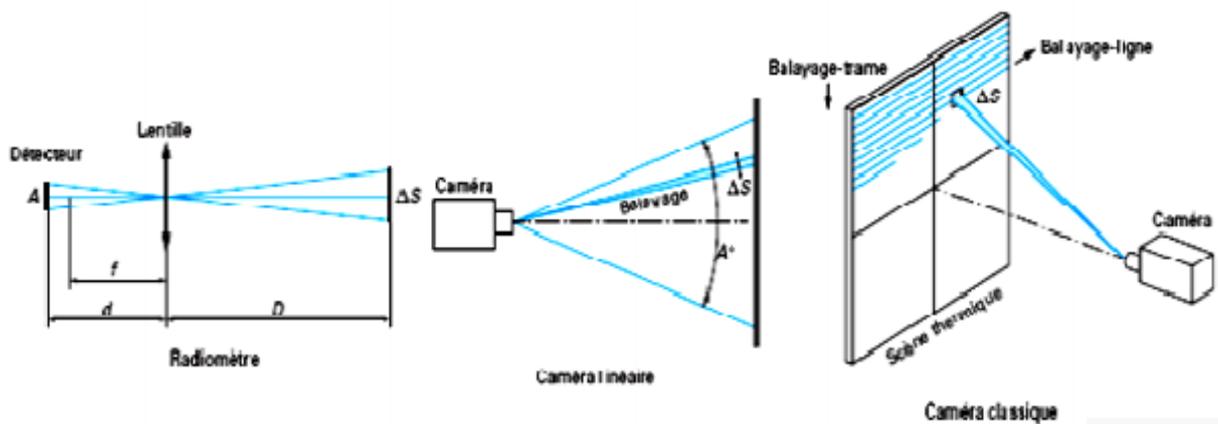


Figure 4.5 : Principe de l'optique d'une caméra à balayage optomécanique. [3]

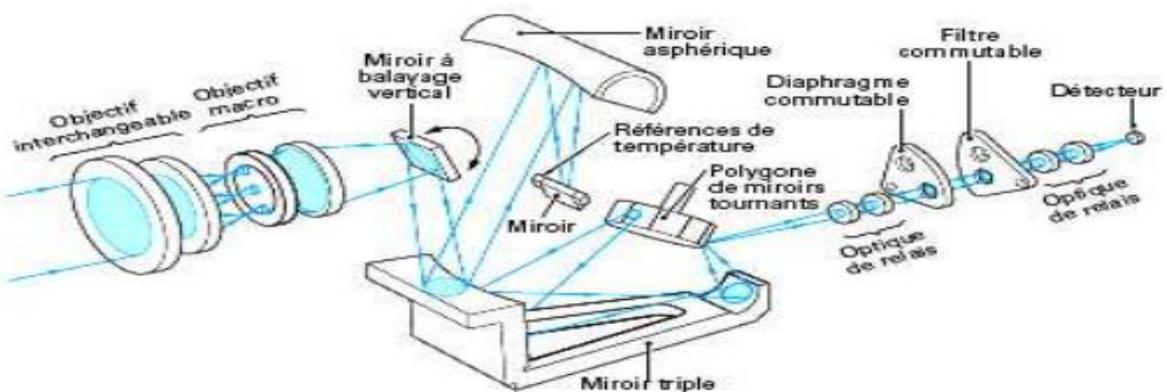


Figure 4.6 : Éclaté de la partie optique de la caméra THERMOVISION 800. [3]

Le balayage conjugue le détecteur avec une surface élémentaire S en déplacement continu sur la scène thermique. L'analyse de la scène thermique est périodique et a lieu séquentiellement par lignes et par trames : c'est le même détecteur qui détecte les divers flux en provenance de la scène observée.

4.4.2 Balayage spatial électronique

La caméra à matrice fixe dispose d'un très grand nombre de détecteurs rangés en lignes et en colonnes (environ 100×100 à plus de 800×600). Chacun des détecteurs est le conjugué d'une seule surface élémentaire discrète S de la scène thermique et reçoit en permanence le flux de cette surface. L'analyse de la scène thermique est réalisée par un balayage électronique qui vient « consulter » périodiquement chacun des pels : c'est la « lecture » de la matrice (figure 4.7)

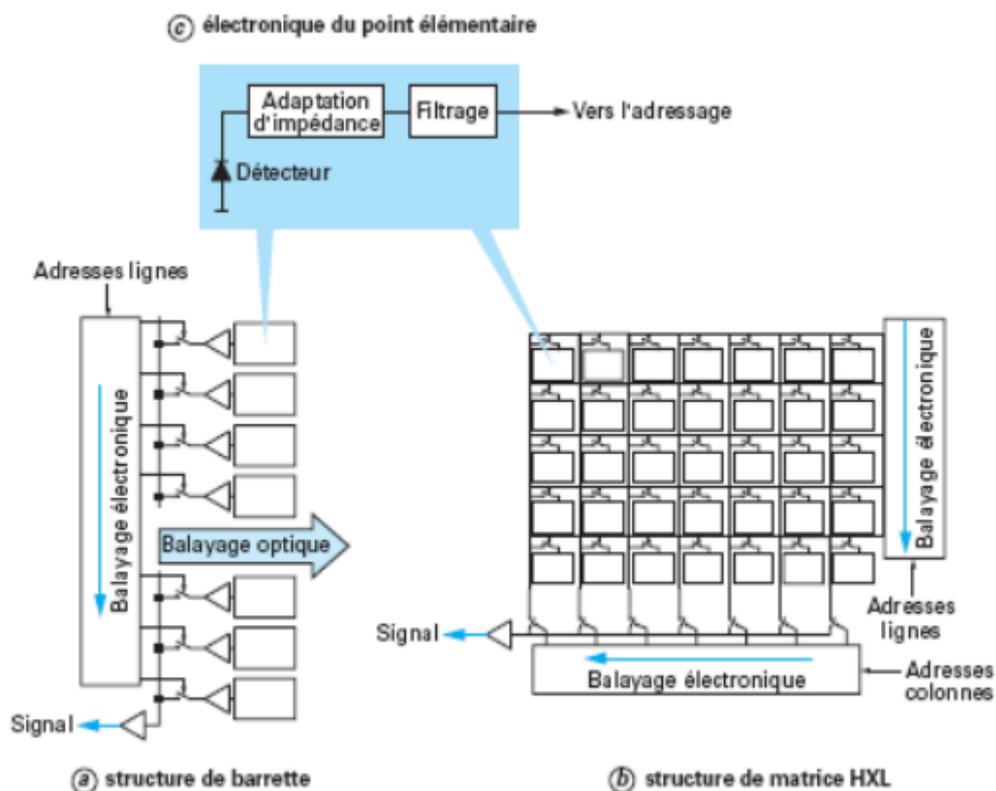


Figure 4.7 : Structures de principe des balayages d'une caméra linéaire (à barrette) et d'une caméra à matrice.[3]

Le temps séparant chaque lecture de la matrice est mis à profit pour intégrer le signal de chaque détecteur, améliorant ainsi le rapport signal sur bruit. Le compromis de conception permet de diminuer la surface des détecteurs et d'améliorer la résolution spatiale de la caméra.

4.5 Applications de la caméra thermique :

Contribution de la thermographie :

La technique de la thermographie apporte une contribution spécifique aux mesures de températures. C'est une technique à la fois instantanée, globale, discriminante et discrète.

- **Instantanée**, puisque les mesures peuvent être faites à cadence élevée. C'est la préparation, la maîtrise des situations et l'interprétation, qui fixent la durée d'une campagne de mesure.
- **Globale**, puisque la caméra fournit une image thermique de l'ensemble de la scène thermique qu'elle observe. Un simple coup d'œil sur l'image peut alors relever un défaut très localisé dans un ensemble complexe (armoire électrique en maintenance par exemple).
- **Discriminative**, tant spatialement (résolution spatiale) que thermiquement (résolution Thermique).
- **Discrète**, au sens de la mesure : la caméra observe sans contact et passivement. Généralement, l'action de mesurer n'interfère pas sur le résultat de la mesure. La thermographie est une technique de mesure non intrusive. Dans d'autres cas, il est impératif ou conseillé de modifier certaines propriétés pour réaliser des mesures souhaitables (augmentation de l'émissivité, masquage de sources chaudes de l'environnement, etc.), ce qui limite l'aspect non intrusif de la technique.

La thermographie s'impose par ses qualités dès lors que d'autres techniques sont inapplicables, trop complexes ou intrusives comme dans les cas :

- Du manque d'accessibilité (mesure de réfractaires de cheminée d'usine) ;
- De pièces sous tension électrique (lignes haute tension) ou sous rayonnements ionisants (nucléaire)
- D'objets trop petits pour être instrumentés par des thermocouples (électronique) qui modifieraient le comportement du composant ;
- D'objets en mouvement (disque de frein, tôle dans un laminoir) ;

4.5.1 Applications et utilisations de la caméra thermique

Nous retiendrons cinq segments d'application de la caméra thermique :

- La recherche et développement ;
- Les applications médicales et vétérinaires ;
- La maintenance et la prévention ;
- Le contrôle de produits et le contrôle de procédés ;
- La surveillance de site.

4.5.1.1 La recherche et développement

Thermique

La thermique est une science aux applications très vastes qui couvre pratiquement tous les secteurs d'activité : comportement thermique, échanges thermiques par conduction, convection et rayonnement. Le principe même de la thermographie est une illustration des échanges par rayonnement. Ce domaine est par excellence le champ principal d'application de la thermographie instrumentale.

4.5.1.2 les applications médicales

La recherche médicale employant la thermographie est largement concomitante des usages cliniques des caméras thermiques. Les données statistiques sur une large population garantissent la validité des méthodes de diagnostic et de mesure définies par la recherche.

Les images suivantes illustrent une application récente de l'utilisation de la technique de thermographie infrarouge pour la détection des personnes affectées par la grippe aviaire à l'aide de la caméra TVS 500 portée sur la mesure de la température de peau.

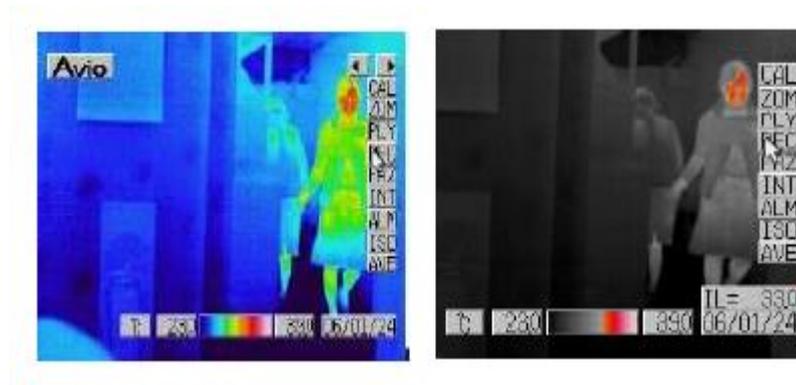


Figure 4.8 : détection des personnes affectées par la grippe aviaire par thermographie infrarouge. Source : (NIPPON AVIONICS).

Une couleur affectée à une température donnée permet un meilleur discernement. Le point de température maximale est suivi en temps réel ; lorsque la température d'un passager est supérieure au seuil, il apparaît sur l'écran de la caméra un message d'alarme.

4.5.1.3 Maintenance et prévention

La maintenance et la prévention bénéficient depuis longtemps de l'emploi des caméras thermiques ; mais la croissance des applications a été propulsée par l'arrivée des caméras portables à matrice, petits systèmes intégrés à l'ergonomie souvent attractive. Leurs qualités instrumentales sont assez limitées mais restent suffisantes pour ces applications.

L'inspection des bâtiments (isolation thermique) entre dans cette catégorie. Le diagnostic thermographique peut se faire en complément du diagnostic thermique traditionnel : il est exécuté de l'intérieur de l'habitation ou de l'extérieur. On peut localiser des infiltrations d'air froid ou des fuites importantes, des ponts thermiques, des affaissements ou dégradations des isolants. L'image suivante localise des fuites dans les jonctions des fenêtres à l'intérieur de l'habitation.

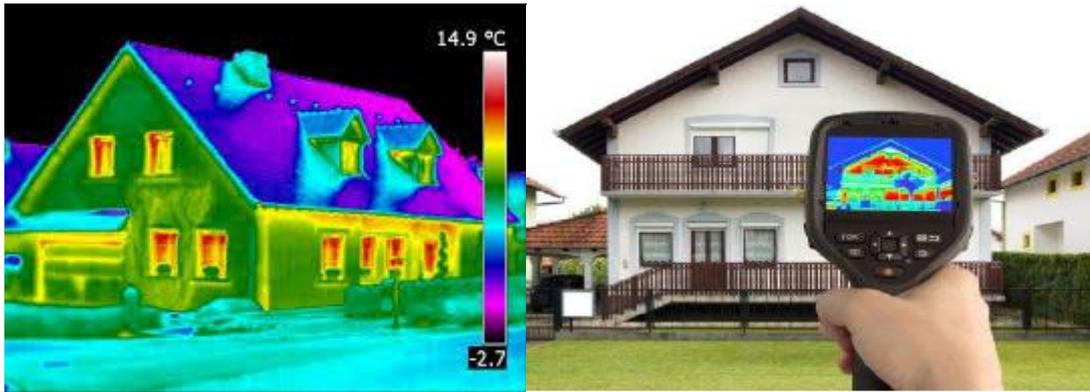


Figure 4.9: image thermique d'une façade de maison.

4.5.1.4 Surveillance du site

Pour surveiller les sites stratégiques, l'armée et la police utilisent les caméras thermiques pour toutes les missions qui se déroule la nuit. En effet, elle permet de détecter un individu dans toute sorte de situation, brouillard, pluie, neige etc. Elle permet également à la police de détecter des personnes à 20km dans l'obscurité.



Figure 4.10 : image thermique d'un centre de surveillance

Chapitre 5 :

Etudes expérimentales et résultats

5. Partie expérimentale :

Dans cette partie, nous allons nous intéresser à déterminer l'impact des rayonnements thermiques sur les photodétecteurs. En effet, les rayons infrarouges de chaleurs incidents qui vont être captés par le premier élément de la caméra thermique (photodétecteur) va voir sa température s'élever. Ainsi le problème de destruction de cet élément est posé. Dans ce cas, on va étudier sur un circuit simple à base du capteur de température LM35 nous permettant de déterminer cette élévation de température sur le photodétecteur.

5.1 Capteur de température LM35 :

Décliné en plusieurs versions, le LM35 est un circuit intégré calibré en usine pour être utilisé comme capteur de température de précision. Sa principale particularité tient en ceci que sa tension de sortie V_{out} est linéairement proportionnelle à la température exprimée en degrés Celsius. Plus exactement, la tension de sortie V_{out} augmente de 10 mV chaque fois que la température augmente de 1°C.

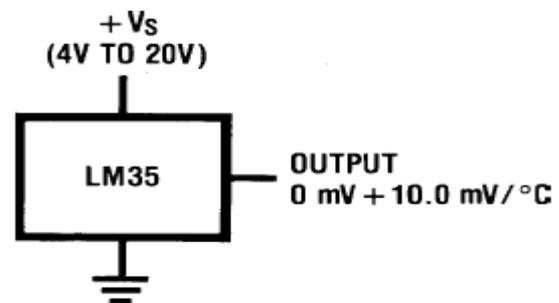
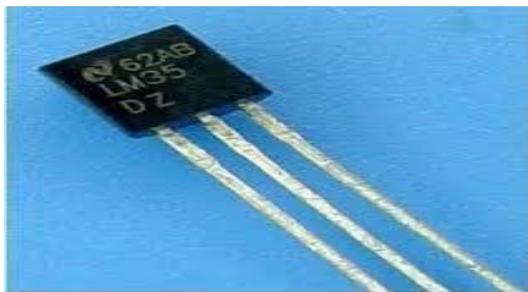


Figure 5.1 : capteur de température LM35DZ

La *data sheet* nous apprend que le LM35 (toutes versions confondues) doit être alimenté sous une tension $+V_s$ comprise entre 4 V et 30 V.

- **Mise en œuvre :**

Le LM35 a été exposé au rayonnement infrarouge de longueur d'onde ($\lambda = 810 \text{ nm}$), de température ($T = 28^\circ\text{C}$) et de courant d'injection ($I = 30 \text{ mA}$). On relève la tension de sortie qui est proportionnelle à la température.

Résultats obtenus :

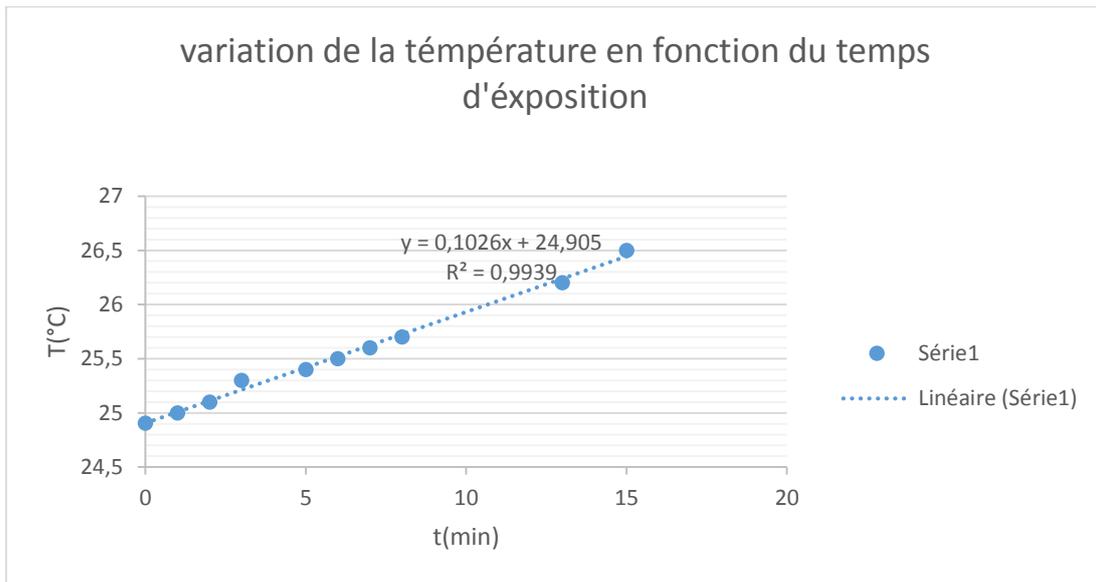


Figure 5.2 : courbe expérimentale $T (^{\circ}C) = f(t (min))$

On remarque une variation linéaire de la température comparant avec celle de la courbe standard.

5.2 Mesures de l'intensité lumineuse de notre source laser :

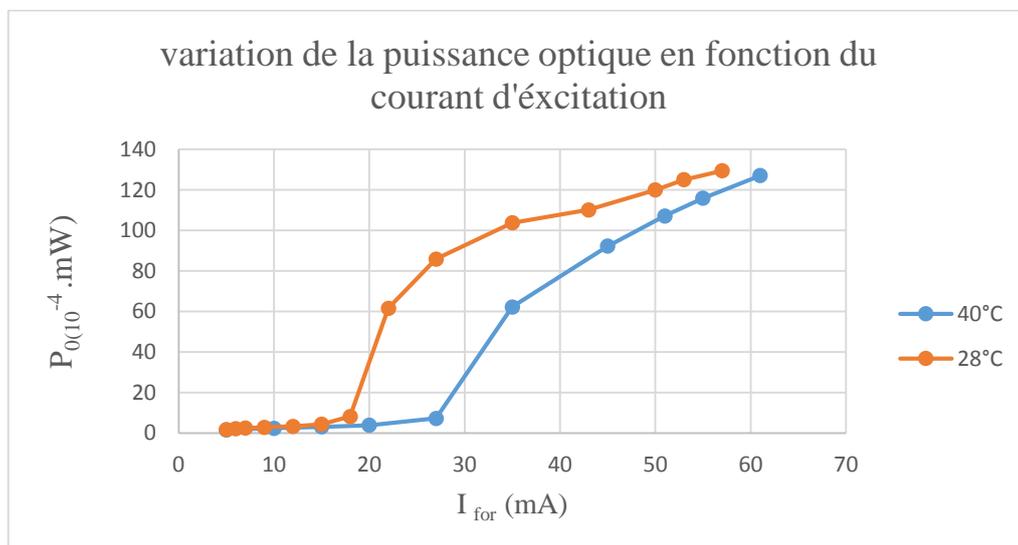


Figure 5.3 : puissance en fonction du courant d'injection pour $T= 40^{\circ}C$ et $T= 28^{\circ}C$

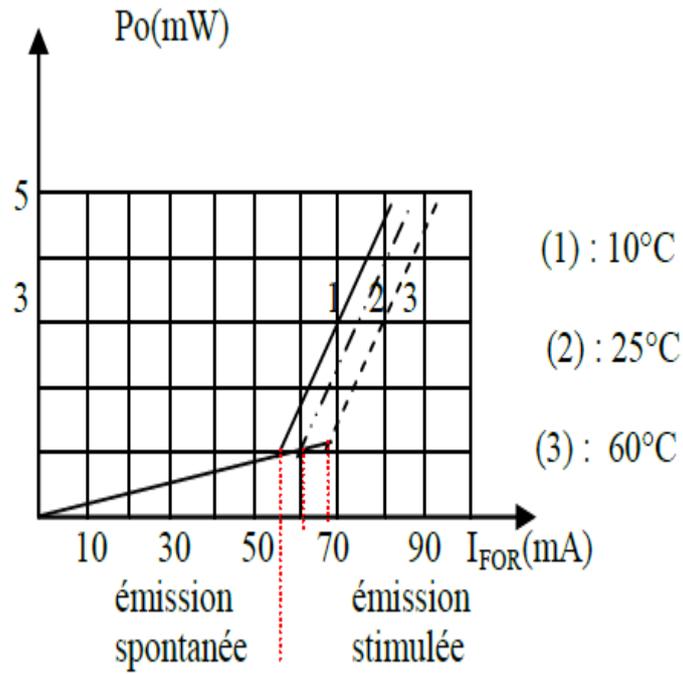


Figure 5.4 : Courbe standard P-I pour trois températures.

Interprétation :

On remarque une tendance des courbes comparables avec celles des courbes standard. On remarque, de plus que ces courants de seuil varient avec la température.

5.3 Mesures sur Caméra pyroélectrique « Pyrocam III » :



Figure 5.5 : Caméra de type Pyrocam III

C'est une caméra dédiée à la caractérisation des profils spatiaux en 1D, 2D et 3D de l'intensité lumineuse des faisceaux lasers. Elle est très utilisée en industrie des lasers dans les lignes de leur fabrication. Elle est également utilisée dans les systèmes basés sur les lasers comme le LIDAR « mesure des distances par laser », certains télémètres, les systèmes LIBS « spectroscopie de claquage induite par laser ».

Nous l'avons utilisée au CDTA afin d'étudier son fonctionnement. Combien même son détecteur pyroélectrique ne donne pas des mesures absolues en température, nous pouvons affirmer l'existence d'une corrélation constante entre le profil de température et le profil d'intensité

laser affiché en bout de chaîne du Read-out interfacée sur PC ; à condition que l'énergie laser ou la puissance utilisée soit dans la plage de linéarité de mesure de la caméra.

5.3.1 Caractéristiques de la caméra

- Gamme de longueurs d'onde : 157nm - 355 nm et 1.06 μm to $>1000\mu\text{m}$
- Caractéristiques spatiales du détecteur :
 - Pixel : 15,376... 124 x 124 éléments
 - Surface active : 12.4mm x 12.4mm
 - Dimensions du pixel : 85 μm x 85 μm
 - Matière : LiTaO₃ (tantalate de lithium)
- Sensibilité (limite inférieure de bruit) : 2.2 mW /cm² (source continue), 70 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ (source pulsée)
- Limite de saturation : 3.2 W /cm² (source continue), 10 mJ/cm² (source pulsée)
 - Dans notre manipulation :
 - Source continue « laser HeNe »
 - Source pulsée « Nd : YAG »

Remarque : la limite de sensibilité en continu est élevée. Elle ne la prédispose pas à l'imagerie infrarouge. Celle-ci exige une limite de sensibilité de $\sim 1 \text{ nW}/\text{cm}^2$. Cette caméra est dédiée pour les flux élevés thermiques incidents propres au faisceaux lasers.

5.3.2 Sources optiques utilisées

Les manipulations traitées dans ce projet ont consisté à utiliser plusieurs sources visible et infrarouge afin d'étudier les profils de températures.

*) Visible :

- Laser He-Ne émettant à $0.7 \mu\text{m}$.



Figure 5.6 : source laser utilisée « He-Ne ».

- Torche d'un téléphone portable.



Figure 5.7 : torche d'un téléphone « lumière visible »

Montage réalisé :



Figure 5.8 : détection du rayonnement laser He-Ne à l'aide d'une caméra infrarouge.

***) Infrarouge**

- Fer à souder (source continue).

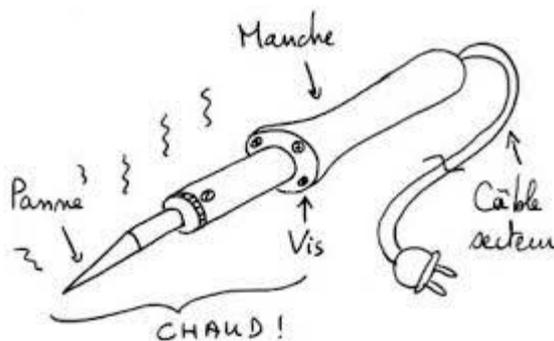


Figure 5.9 : Fer à souder

- Laser Nd : YAG+OPO (CFR- ULTRA du fabricant Big Sky) à 1.57 μm .

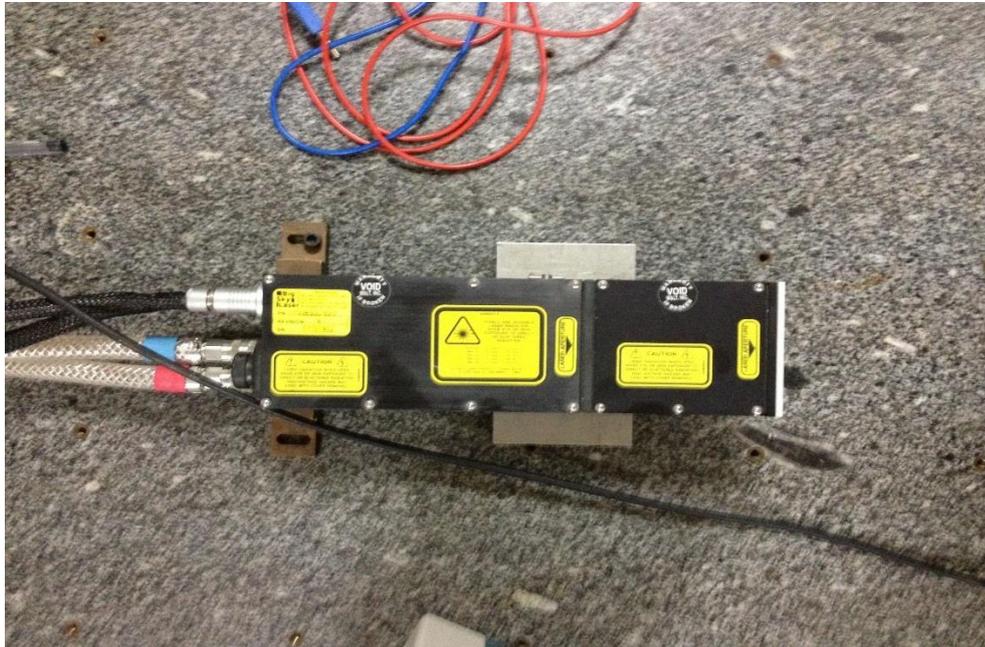


Figure 5.10 : source laser infrarouge

5.3.3 Logiciel d'analyse de l'image thermique :

Le système de profilage qui effectue l'acquisition de données permet une analyse rigoureuse des paramètres du faisceau laser, tels que la taille du faisceau, la forme, l'uniformité, la divergence, le contenu du mode, et la distribution de puissance attendue. Une fois que le Pyrocam est connecté au PC et BeamGage est en cours d'exécution, le logiciel détecte automatiquement la présence de la caméra et est immédiatement prêt à commencer à acquérir des images et les afficher sur l'écran.

5.3.3.1 Interface de commande :



Figure 5.11 : interface de commande de la PyrocamIII.

L'application Pyrocam TM III Windows intègre un logiciel de configuration qui permet de prendre en charge l'affichage du profil d'intensité en 2D et 3D des faisceaux lasers continus et pulsés. Pour les faisceaux continus, on a intégré une fonction de hachage du faisceau à deux fréquences, 24 et 48 Hz ; cela permet le refroidissement du détecteur afin que les caractéristiques de la caméra demeurent constantes. Le hacheur (chopper) montré en figure (5.11) comprend huit ouvertures, ce qui permet d'augmenter la fréquence effective d'acquisition à 400 et 800 Hz et ainsi disposer pour le détecteur d'un temps de dissipation de la chaleur de l'ordre de la milliseconde.

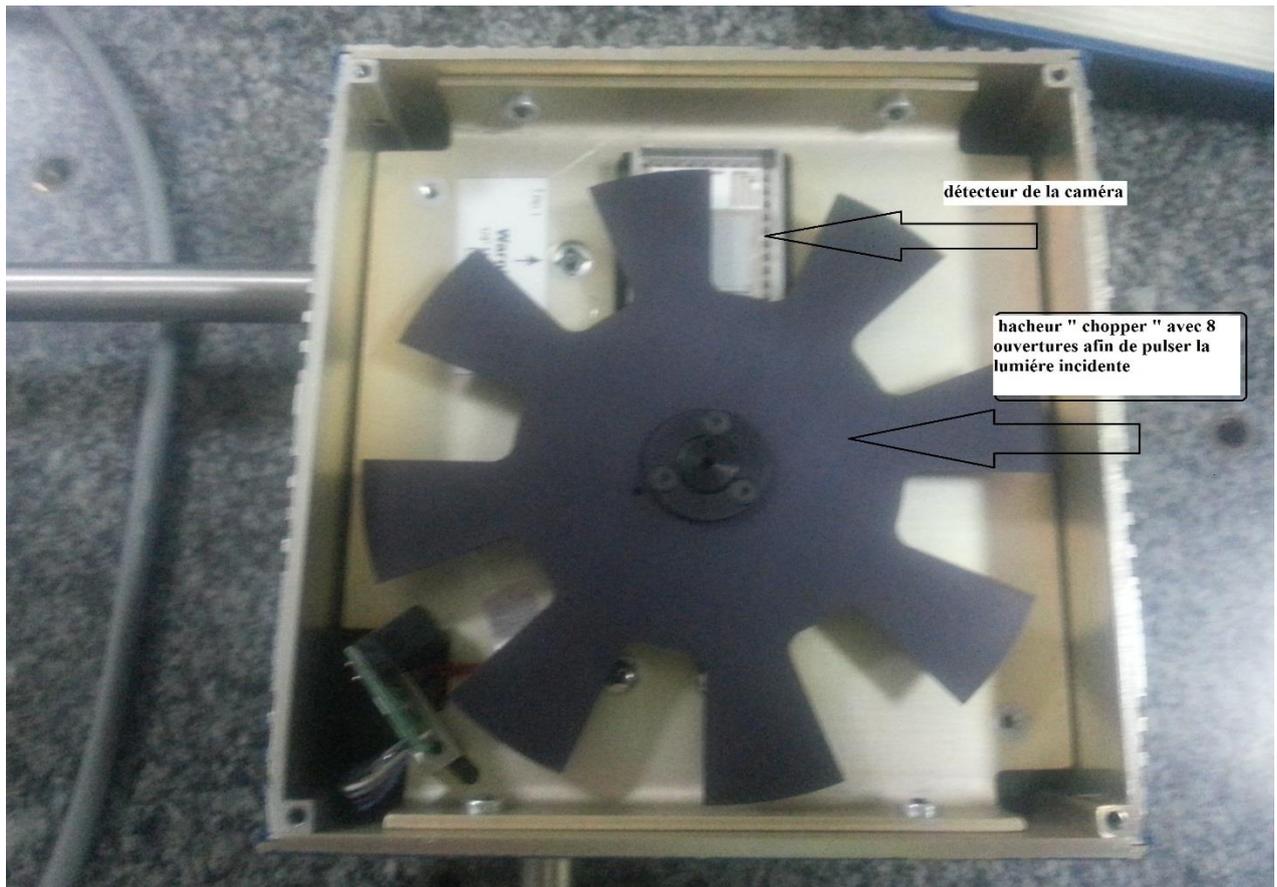


Figure 5.12 : hacheur « chopper » de la Pyrocam III.

De façon équivalente, la pyrocam III accepte des impulsions laser dont la fréquence de répétition va du monocoup jusqu'à 1 kHz ; avec fonctionnement déclenché au moyen d'impulsions de synchronisation à partir du laser (Figure 5.12). Le logiciel de la caméra interfacé à l'aide d'une ligne spéciale IEEE 1394 permet un certain nombre d'opérations sur les profils ainsi affichés en temps réel (1 ms). Parmi elles ; l'affichage de séquences moyennés de 1 à 100, ce qui permet de lisser les profils et s'affranchir des bruits non liés au faisceau lui-même.



Figure 5.13 : alimentation du laser « déclencheur de synchronisation avec la caméra »

Résultats obtenus :

***) Visible**

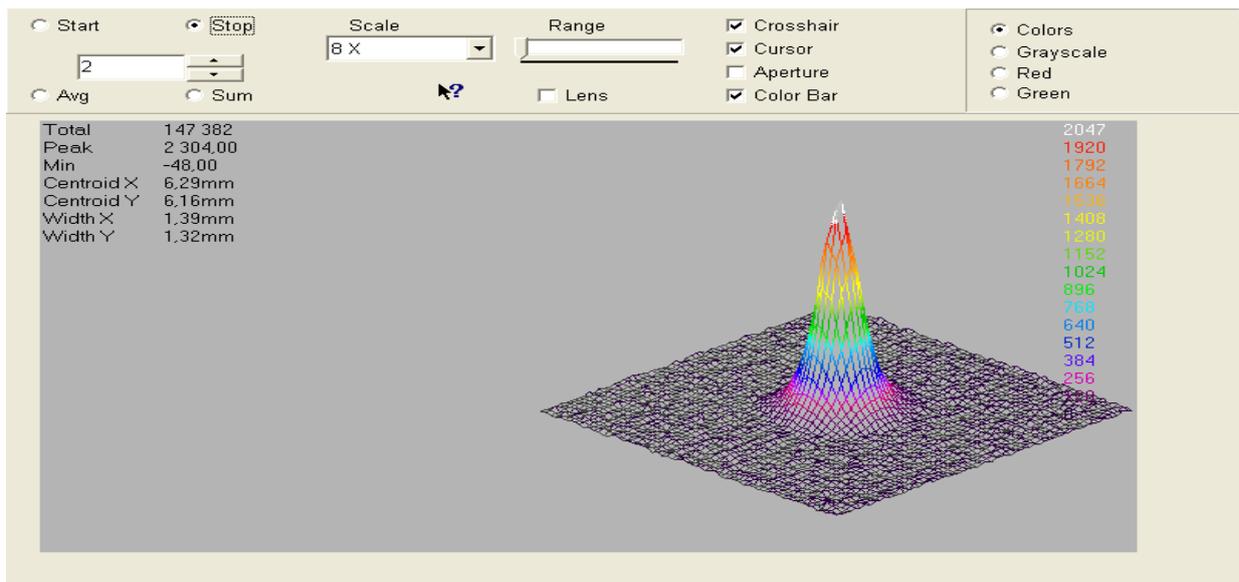


Figure 5.14 : profil du faisceau laser He-Ne en 3D

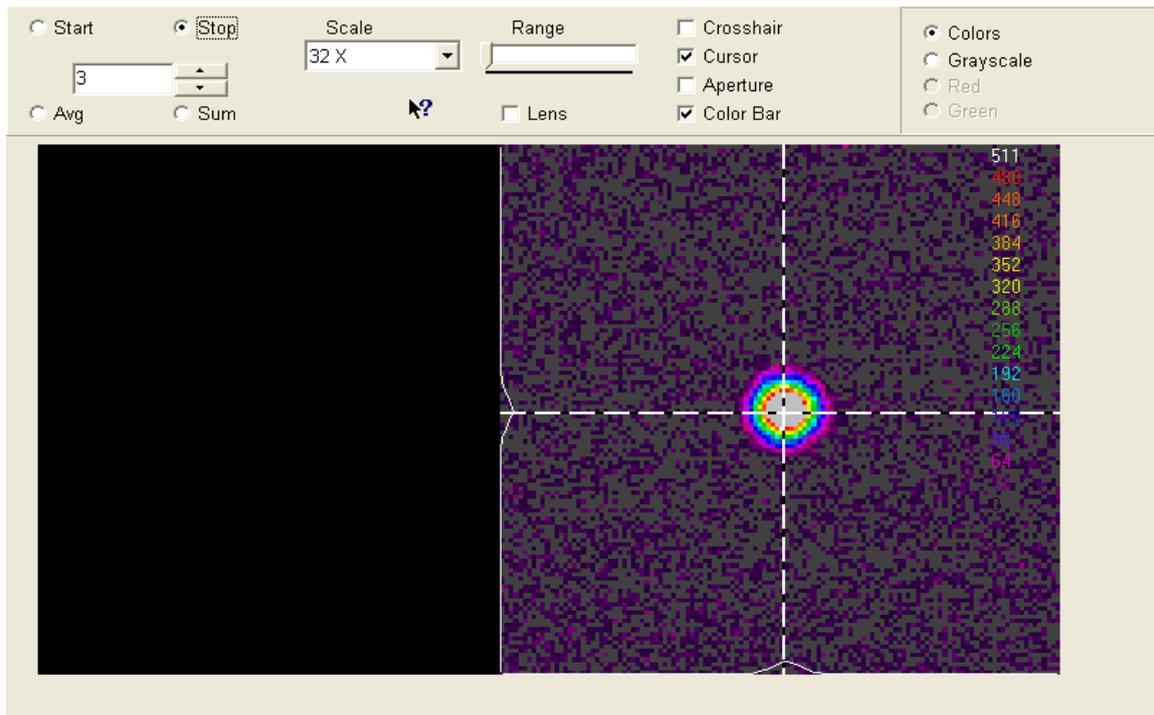


Figure5.15 : profil du faisceau laser He-Ne en 2D

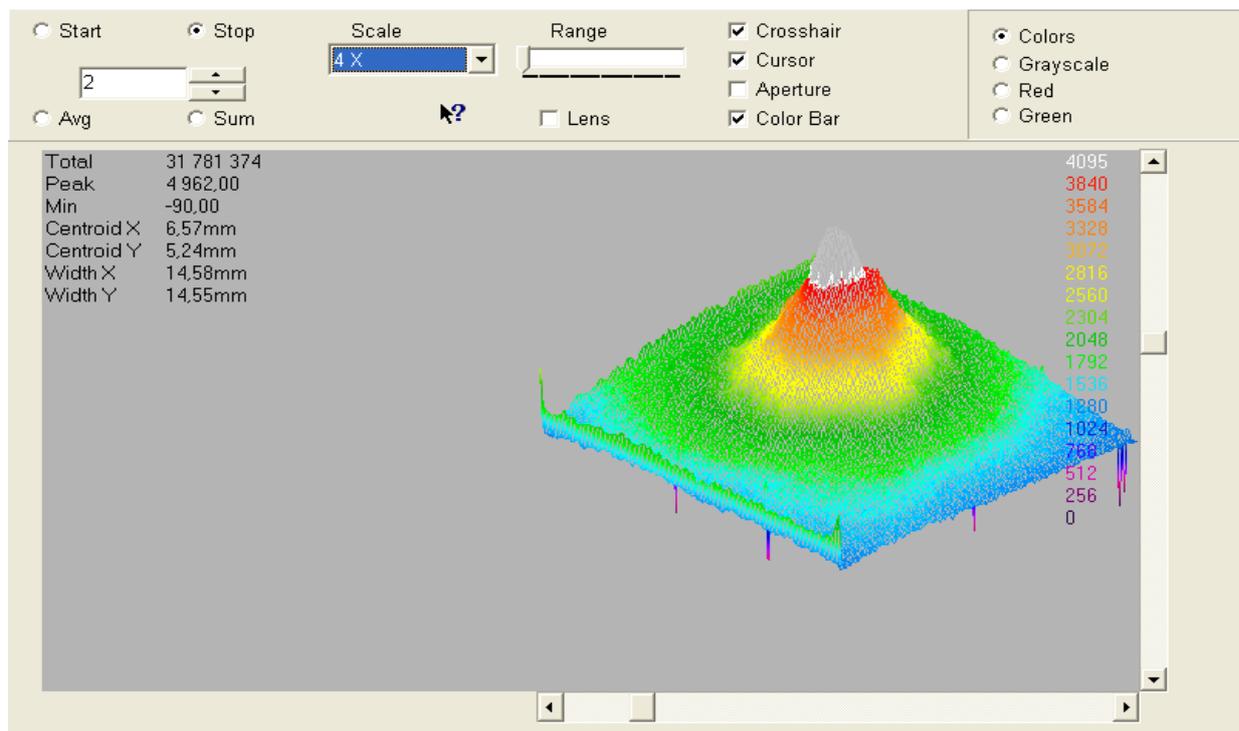


Figure5.16 : profil du faisceau d'une torche d'un téléphone mobile en 3D.

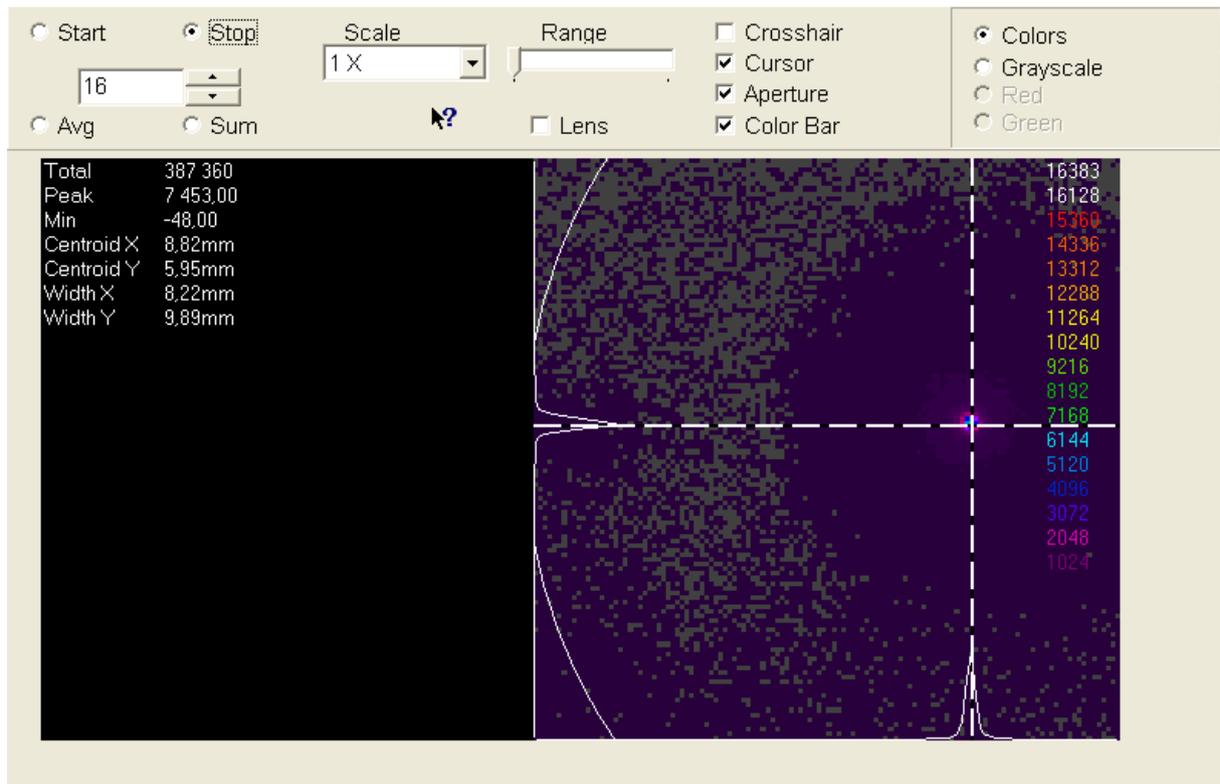


Figure 5.17 : profil du faisceau d'une torche d'un téléphone mobile en 2D.

Avec objectif (afin de focaliser une grande quantité de lumière sur la caméra)

***) Infrarouge**

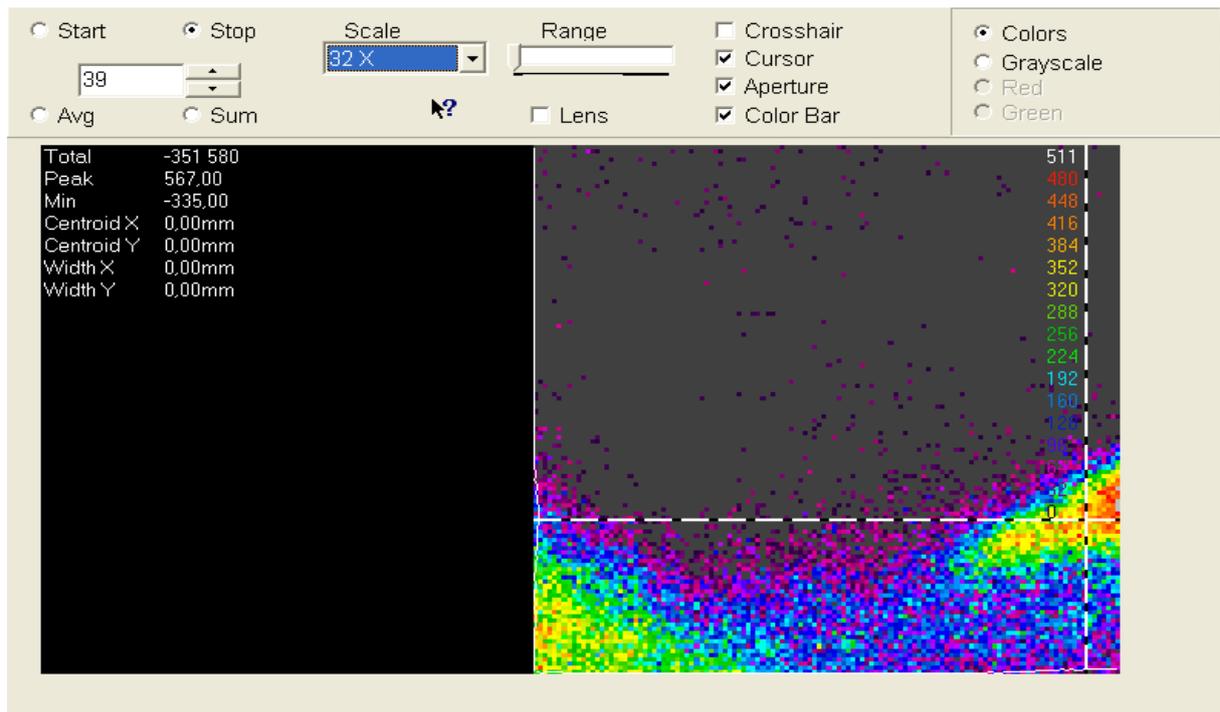


Figure5.18 : profil de la lumière infrarouge du fer à souder en 2D.

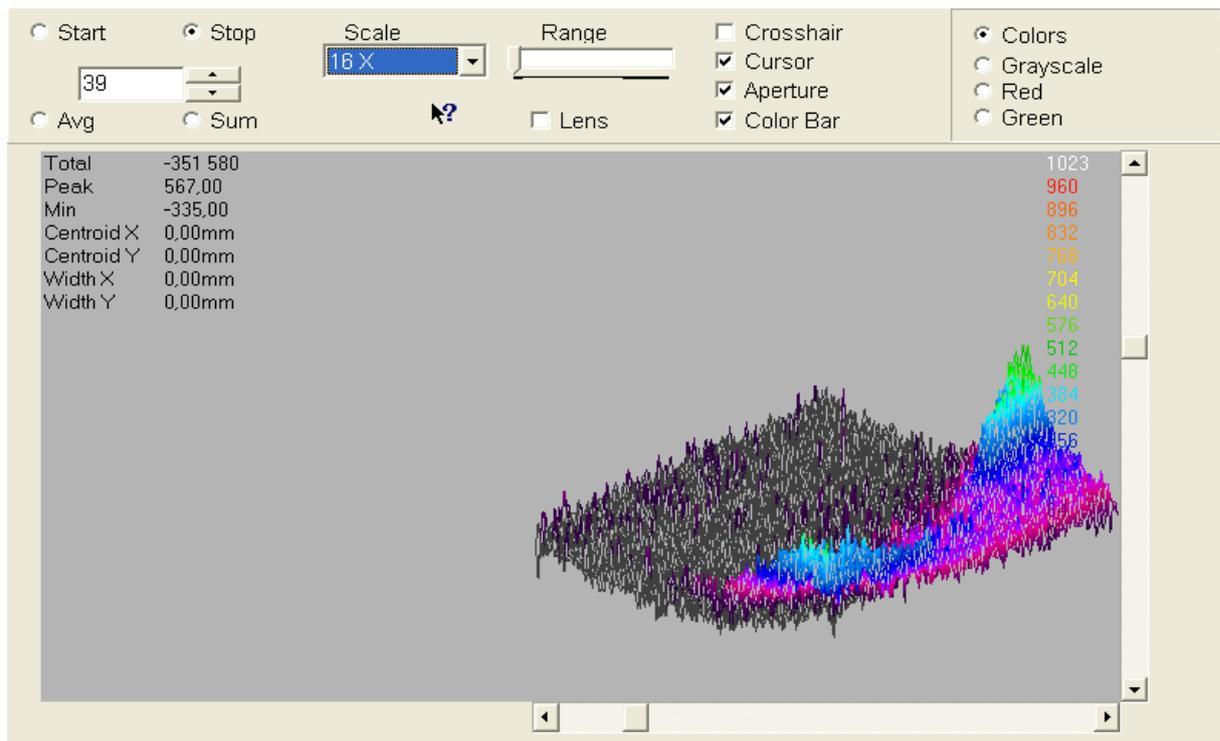


Figure5.19 : profil de la lumière infrarouge du fer à souder en 3D.

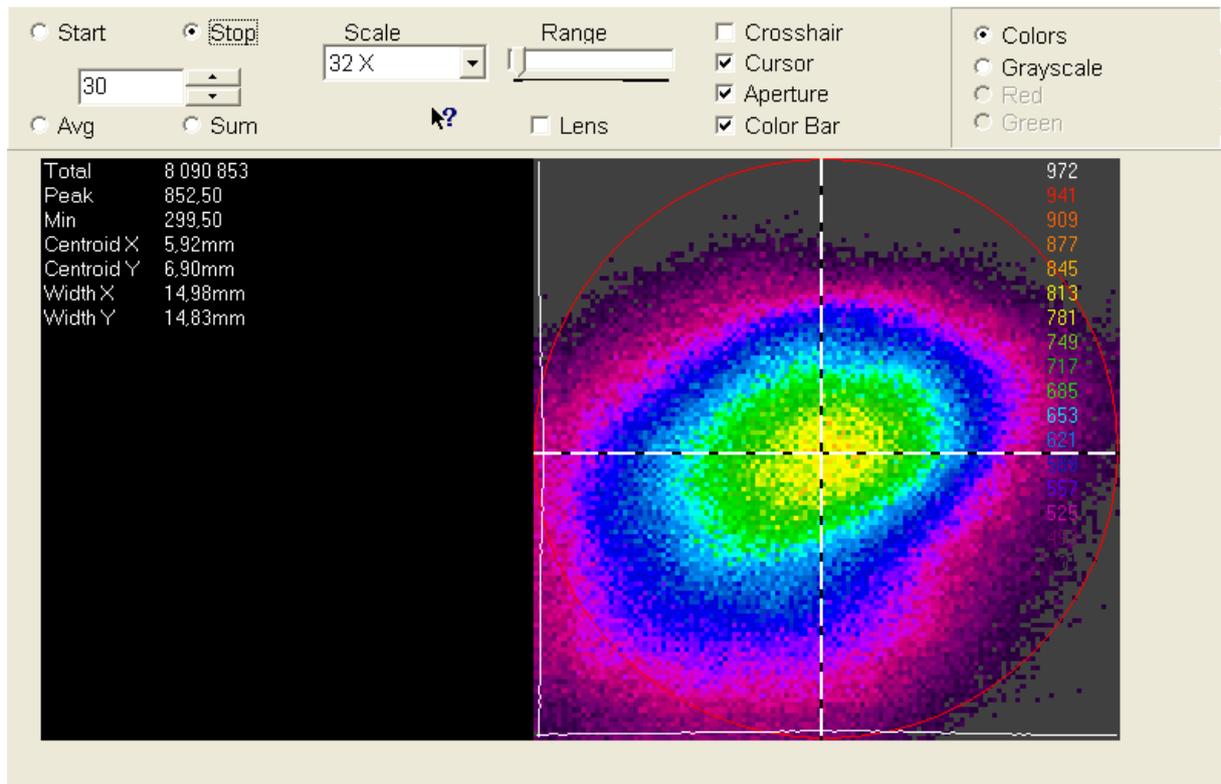


Figure5.20 : profil du faisceau laser Nd-YAG en 2D.

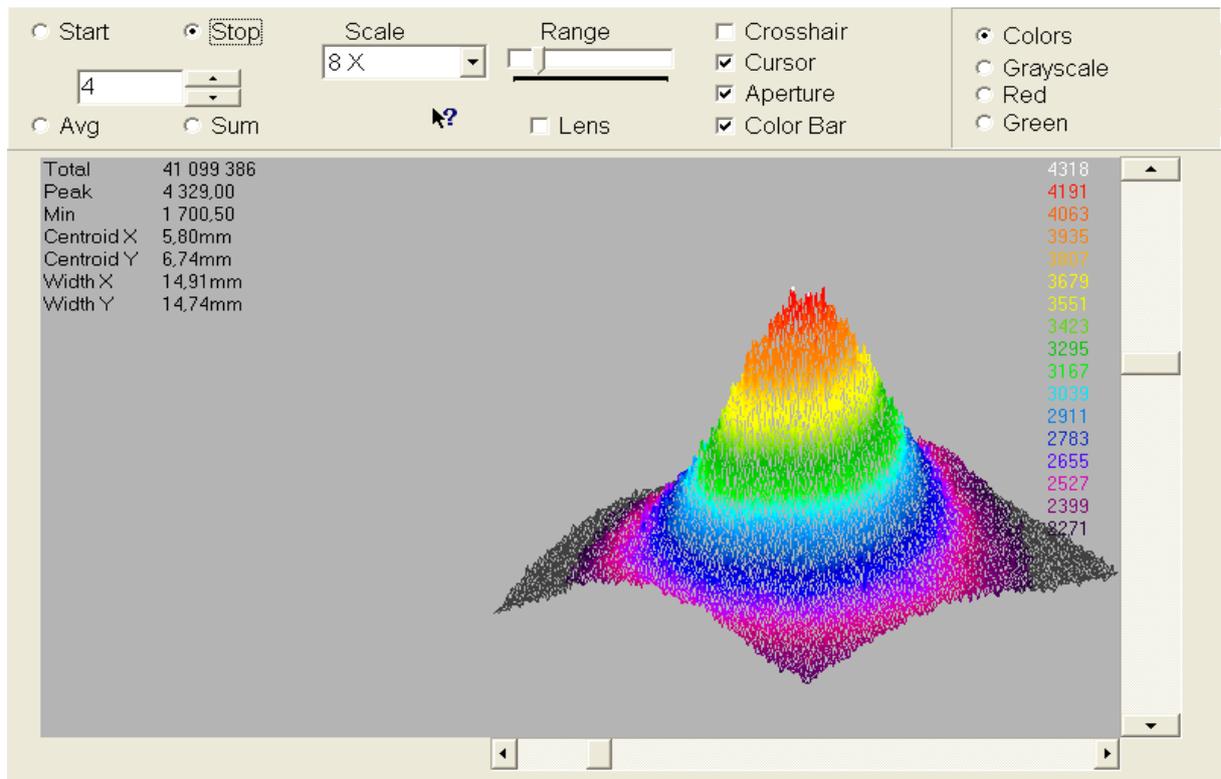


Figure5.21 : profil du faisceau laser Nd-YAG en 3D.

Interprétation des résultats obtenus :

La sortie de la source laser « He-Ne » est envoyée sur un miroir de renvoi, qui projette le faisceau sur la surface sensible de la caméra qui se trouve à 1.5m de distance de ce miroir Figure (5.8).

Donc le faisceau qui arrive sur la caméra va s'élargir, par conséquent on aura une distribution sur l'écran d'affichage montré sur la figure (5.15).

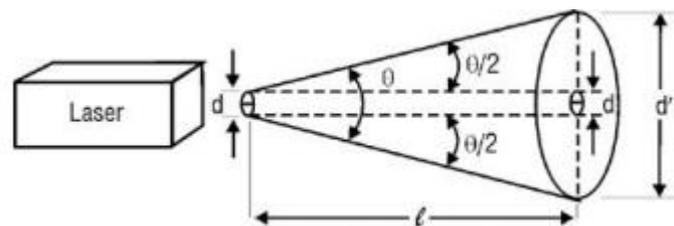


Figure 5.22 : divergence du faisceau laser.

On relève pour différentes couleurs, des informations quantifiées.

L'image fournie par la caméra représente la distribution de température de la cible. Suivant la couleur affiché on lui associe une température.

Ce travail est effectué par un logiciel dédié à cet effet.

Conclusion générale

Grâce aux progrès technologiques qui ont été réalisés dans un passé récent, la Thermographie Infrarouge est une technique multidisciplinaire qui a multiplié le champ de ses applications en mesure, contrôle et détection.

Rendre la chaleur dégagée par un objet, visible, constitue un essor considérable à la résolution de problèmes dans différents domaines de la vie.

La caméra infrarouge, par ses résolutions spatiale, spectrale et thermique nous donne une carte de répartition spatiale et temporelle de luminance. La thermographie permet d'obtenir une correspondance entre les luminances mesurées et les températures de surface de la scène analysée. Le résultat est une image thermique appelée aussi thermogramme. L'extraction de ces informations d'images infrarouges, constitue la tâche la plus importante pour un thermographe afin de l'analyser. Nous avons donc essayé de donner à cette tâche son aspect pratique à travers la manipulation de la caméra infrarouge « PyrocamIII » qui nous fournit, à l'aide d'un logiciel de traitement d'images un aperçu général sur un ensemble d'images infrarouges. Ces images nous donnent la possibilité de savoir comment et combien la température est distribuée dans l'espace de la scène observée dans un moment donné. Cela nous conduira ensuite à répondre à la question pourquoi la température a une telle distribution. Chercher à bénéficier de la thermographie infrarouge ce n'est pas seulement acheter une caméra infrarouge, les matériels périphériques et les programmes de traitement, mais aussi acquérir une connaissance minimum de la théorie du transfert de chaleur et des lois du rayonnement et des techniques de traitement d'image.

Ce projet nous a permis d'étudier, sur le plan théorique ce qu'est le rayonnement thermique et infrarouge, une caméra thermique, et la composition de cette dernière.

Sur le plan pratique nous avons pu mener quelques expériences au CDTA (Centre de Développement des Technologies Avancées) et qui ont consisté d'abord à monter une manipulation comprenant tous les composants utiles autour de la PyrocamIII. Nous avons obtenu des courbes en 2D et 3D avec différentes sources (laser visible « He-Ne », laser infrarouge Nd-YAG pulsée et en plus une source blanche « torche »).

Les courbes obtenues sont conformes aux courbes qu'on trouve dans la littérature.

En perspective nous souhaitons disposer au labo d'un banc de mesure autour d'une caméra thermique.

Bibliographies

- [1] : Antoniow J-S., Henry J-F., et al., « Contrôle de matériaux d'origine biologique par méthode photothermique : intérêt de la détection pyroélectrique », *Revue générale de technique*, 1997, vol.36, p.453-468.
- [2]: Armitage A., « An introduction to infrared thermography », *Measurement and Control*, 1998, vol.31, p.264-267.
- [3] : Belaiche P., “les secrets de l'image video “, 3ème édition, Eyrolles, 2000.
- [4]: F. BECKER and Z.L.LI. Temperature-independent spectral indices in thermal infrared bands. *Remote Sensing of Environment*, 1990.
- [5]: Chrzanowski K., Park S.N., “Evaluation of thermal cameras for non-destructive thermal testing applications”, *Infrared Physics and Technology*, 2001, vol.42p.101-105.
- [6] : Demont P., Huetz-Aubert M., Sacadura J.F., « technique de mesure des caractéristiques radiatives des matériaux opaques », *Revue de physique appliquée*, avril 1982, vol.17, p.239-249.
- [7]: Dewitt D.P, hernicz R.S “theory and measurement of emittance properties for radiation thermometry applications” *temperature its measurement and control in science and industry*, 1972 vol 4, p.459-482.
- [8] : Desvignes F « température de surface- mesure pour l'observation du rayonnement d'émission », *technique de l'ingénieur*, 1981, vol.2735, p1-21.
- [9]: DeWitt D.P., « inferring temperature from optical radiation measurements », *optical engineering*, avril 1986, vol. 25, n.4, p.596-601.
- [10]: C. Fabron, A. Meurat, Measurement of total hemispheric emissivity at low temperature, *International Symposium on Environmental Testing for Space Program*, Liège, Belgium, 2001.
- [11] : Gaussorgues G., “la thermographie infrarouge “, 4ème édition, Editions technique and documentation, paris, 1999.
- [12] : Gaussorgues G, *La thermographie infrarouge : principes, technologies, applications*. Lavoisier TEC&DOC Editeurs, 3ème éditions, Paris, France, 1972.

- [13]: Kaplan H., Sacanlon T., “A thermographer’s guide to infrared detectors”, proceeding of InfraMation 2001, Orlando, EU, oct.2001, vol.2, p.89-100.
- [14]: King D.J., « Resistance temperature detectors: theory and standards », Sensors, 1995, vol.10, p.20-27.
- [15]: Kruse P.W., « uncooled IR focal plane arrays », proceedings SPIE, 1995, vol.2552, p.556-561.
- [16]: Z.LI, F. BECKER, M.P. STOLL, and Z. WAN. Evaluation of six methods for extracting relative emissivity spectra from thermal infrared images. Remote Sensing of Environment,1999.
- [17] : lhospitalier S., « approche thermomécanique de la fissuration à chaud dans un acier inoxydable austénitique », thèse ENSAM, octobre 1997.
- [18] : Mathieu H., « physique des semiconducteurs et des composants » 4ème Ed. Masson, Paris, 1998.
- [19] : Malinovich Y., Koltin E., et al., « Fabrication of CMOS Image sensors », SPIE Conference on Sensors, Cameras, and Systems for Scientific/Industrial Applications, San Jose, California, 1999, vol.3649, p.212-222.
- [20] : Pajani D., « Mesure par thermographie infrarouge », ADD Editeur, 1989.
- [21] : P. Hervé, Mesure de l'émissivité thermique, Technique de l'Ingénieur, 2005.
- [22]: Rogalski A., « Heterostructure infrared photovoltaic detectors », infrared Physics and Technology, 2000, vol.41, p.213-248.
- [23] : Rosencher E., Vinter B., « optoélectronique », Ed.Masson, Paris, 1998.
- [24]: Saunders P., Edgar H., « Size-of source effect correction for a thermal imaging radiation thermometer » High temperatures – High Pressures, 1999, vol.31; n.1, pp.83-90.
- [25]: Setiadi D., Binnie T.D., et al, “A comparative study of integrated ferroelectric polymer pyroelectric sensors”, integrated ferroelectrics, 1998, vol.19, p.33-47.
- [26]: <https://www.google.dz/search?q=spectre+du+rayonnement+terrestre>.

[27]: Wood R.A., Foss N.A., « Micromachined bolometer arrays achieve low-cost imaging », Laser Focus World, 1993, vol.6, p.101-106.