

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 pour l'obtention du diplôme
de master en Electronique

La Thermographie 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

Remerciement

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 figures

Liste des abréviations

Introduction générale	9
Chapitre 1 : Rayonnement infrarouge	11
1. Emission de l'objet « cible »	12
1.1 Grandeurs définissant un rayonnement	12
1.1.1 Le flux (F)	12
1.1.2 Intensité (I)	13
1.1.3 Luminance (L)	14
1.1.4 Eclairement (E)	13
1.1.5 Exitance (R)	16
1.2 Rayonnement infrarouge	16
1.2.1 Classification du rayonnement infrarouge	17
1.2.2 Signature infrarouge d'un objet	17
1.3 Rayonnement du corps noir	18
1.3.1 Loi de Planck	18
1.3.2 Loi de Wien	20
1.3.3 Loi de Stephan Boltzmann	20
1.4. Émissivité des matériaux	21
1.4.1 Définitions de l'émissivité	22
1.5 Calcul du rayonnement émis	22
Chapitre 2 : Détection thermique	24
2. Détecteurs du rayonnement infrarouge	25
2.1 Le choix d'un détecteur de rayonnement	25
2.2 Les différents types de détecteurs	25

2.2.1 Les détecteurs thermiques	26
2.2.1.1 Les bolomètres	26
2.2.1.2 Les détecteurs pyroélectriques	27
2.2.1.3 Les thermopiles	27
2.2.2 Les détecteurs quantiques	28
2.2.2.1 Les détecteurs photoémisifs.....	28
2.2.2.2 Les détecteurs photoconducteurs	29
2.3 Caractéristiques des détecteurs.....	29
2.3.1 Sensibilité (S)	29
2.3.2 Minimum de flux détectable	30
2.3.3 Défectivité spécifique	30
2.4 Refroidissement des détecteurs	32
Chapitre 3 : Mesures réalisées	36
3. Partie expérimentale	37
3.1 Capteur de température LM35	37
3.2 Mesures à l'aide de la caméra thermique pyrocam	38
3.2.1 Torche d'un téléphone portable	38
3.2.2 Fer à souder « source continue »	39
3.3 Logiciel d'analyse de l'image thermique	39
3.3.1 Interface de commande	39
Conclusion générale	44
Bibliographie	45

Listes des figures:

Figure 1.1: intensité d'une source	12
Figure 1.2 : paramètres de définition de la luminance d'un rayonnement.....	12
Figure 1.3 : éclairage sur un plan.....	13
Figure 1.4 : Le spectre des rayonnements électromagnétiques.....	14
Figure 1.6 : spectre du rayonnement terrestre.....	23
Figure 1.5 : courbes de Planck.....	17
Figure 1.6 : loi de Stephan-Boltzmann.....	19
Figure 1.7: Le rayonnement émis et le rayonnement réfléchi.....	21
Figure 2.1 : Thermopile	28
Figure 2.2 : Détections spécifiques de détecteurs pour des températures indiquée	31
Figure 2.3 : Principe d'un détecteur refroidi.....	32
Figure 2.4 : Effet peltier.....	34
Figure 2.5 : Sonde Joule Thomson.....	35
Figure 3.1 : capteur de température LM35DZ	37
Figure 3.2 : courbe expérimentale $T(^{\circ}C) = f(t(\text{min}))$	38
Figure 3.3 : torche d'un téléphone « lumière visible ».....	38
Figure 3.4 : Fer à souder.....	39
Figure 3.5 : interface de commande de la PyrocamIII.....	40
Figure 3.6 : hacheur « chopper » de la Pyrocam III.....	40
Figure 3.7 : profil du faisceau d'une torche d'un téléphone mobile en 3D.....	41
Figure 3.8 : profil du faisceau d'une torche d'un téléphone mobile en 2D.....	41
Figure 3.9 : profil de la lumière infrarouge du fer à souder en 2D.....	42
Figure 3.10 : profil de la lumière infrarouge du fer à souder en 3D.....	42

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.

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 la température sur les photodétecteurs infrarouge, « détection thermique ».

L'étude expérimentales et les mesures réalisées sont menées dans le chapitre 3.

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 (F_p)**

Le débit de photons par unité de temps est appelé flux photonique (F_p), 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 :

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

1.1.2 Intensité (I)

L'intensité d'un émetteur dans une direction donnée est 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 :

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

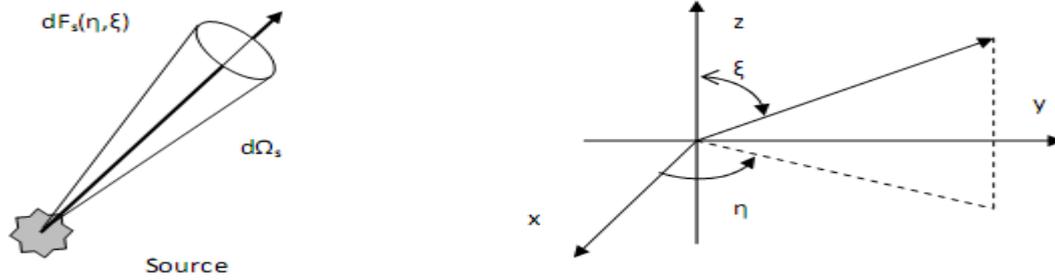


Figure 1.1: intensité d'une source

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)

$$L_s(x,y,z,\eta,\xi) = \frac{dI(x,y,z,\eta,\xi)}{dAs.\cos\theta_s} \dots\dots\dots (1-5)$$

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

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

d²G étendue géométrique ; caractéristique de la géométrie du montage.

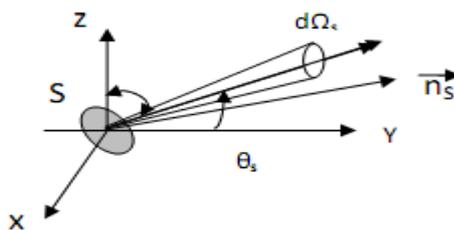


Figure 1.2 : paramètres de définition de la luminance d'un rayonnement.

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 pinceaux dont il est constitué.

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

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 $W.m^{-2}$.

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

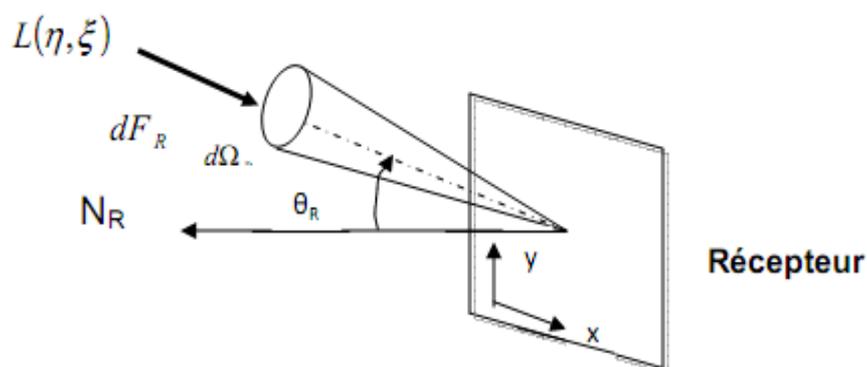


Figure 1.3 : éclairement sur un plan.

1.1.5 Exitance (R)

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

$$R = \frac{dFs}{dA_s} = \int_{2\pi s_r} L_s \cdot \cos \theta_s \cdot d\Omega_s \dots \dots \dots (1-10)$$

Si la source est à luminance uniforme :

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

1.2 Rayonnement infrarouge

La découverte du rayonnement infrarouge est due à Sir William Herschel [12] désirant 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.

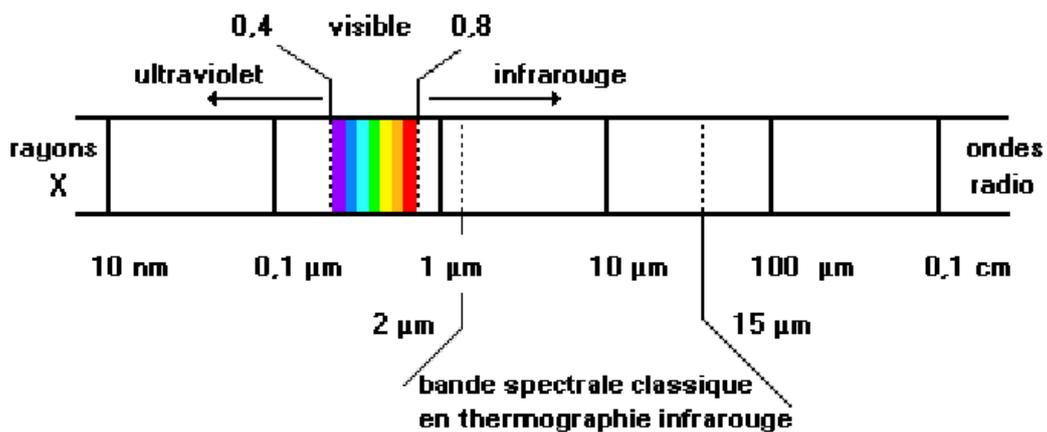


Figure 1.4 : Le spectre des rayonnements électromagnétiques.

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 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.

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).

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

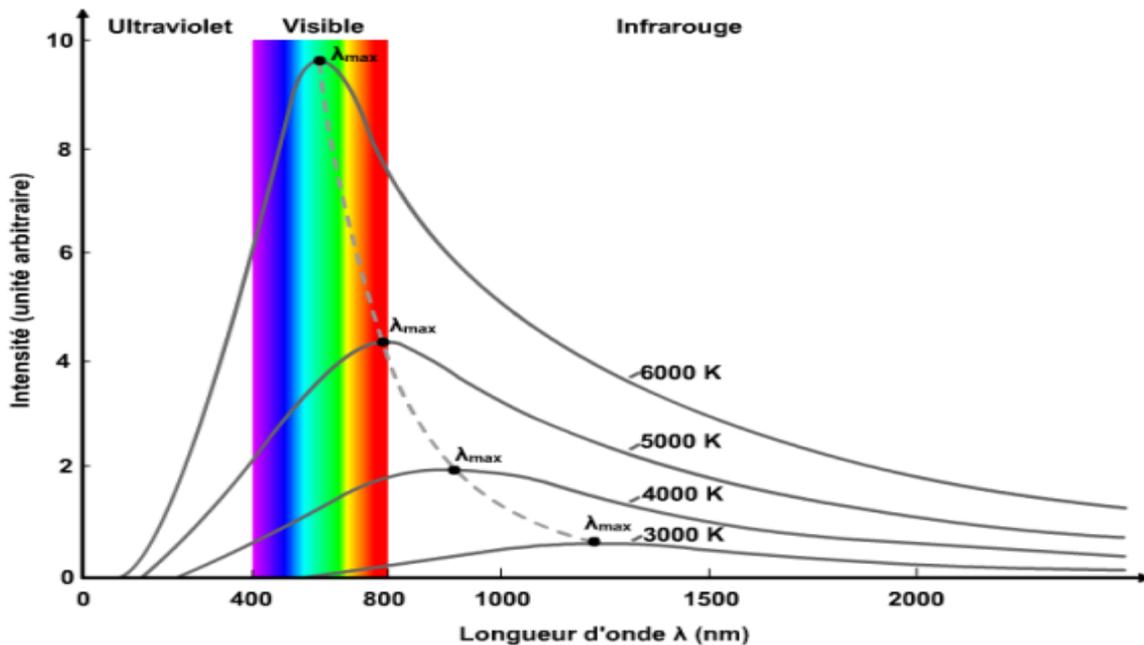


Figure 1.5 : courbes de Planck.

La figure 1.5 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.

On voit que le spectre d'émission est continu et qu'il présente un maximum dans l'infrarouge. Ceci explique l'association commune infrarouge-chaaleur. 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 maxima 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 .

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 indique 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 quatre 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). L'utilisation de l'équation 1.16 nous permet de déterminer l'exitance pour les températures de 6000K : $L=73\,487\,347 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$, et pour 300K : $L=459 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$.

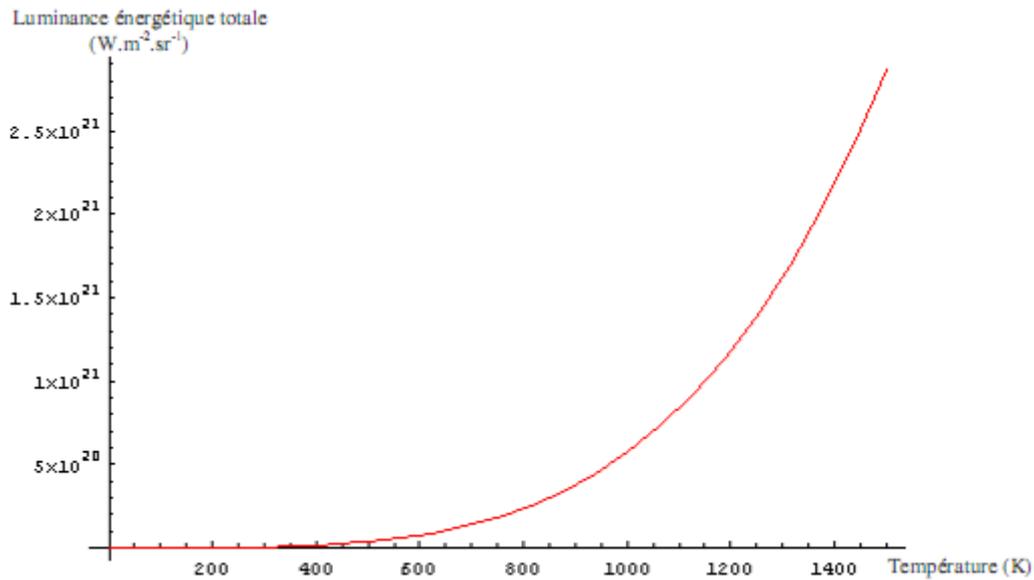


Figure 1.6 : loi de Stephan-Boltzmann.

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 $\epsilon(\lambda)$ dont le rôle est de compenser le terme d'absorption $A(\lambda)$; $A(\lambda) = \epsilon(\lambda)$ Et :

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

- 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 :

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

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. 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).

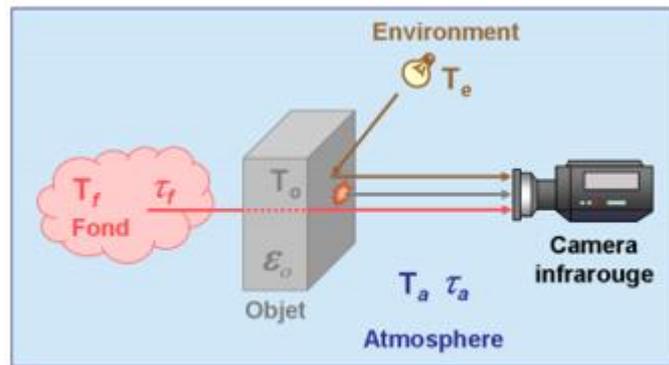


Figure 1.7: Le rayonnement émis et le rayonnement réfléchi.

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.

Chapitre 2 :

Détection thermique

2. 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 détecteurs thermiques, les thermopiles (effets conjugués de Peltier (1834), Seebeck et Thomson (1854)), puis des thermomètres à variation de résistance, les bolomètres, en 1880.

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. Pour les mesures thermographiques, une large gamme de détecteurs est disponible donnant des outils précieux au concepteur du système de mesure.

2.1 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 l'acquisition de notre information. Ce choix est guidé par les contraintes de l'application mais aussi par les caractéristiques des détecteurs proposés. Les détecteurs sont identifiés :

- Par leur plage de températures mesurables (hautes ou basses températures),
- Par le phénomène mis en jeu (thermique, quantique, bolométrique, pneumatique,)
- Par le type de données (caméra thermographique, imageur infrarouge)

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.

2.2 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.

2.2.1 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 matériau 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.

2.2.1.1 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].

2.2.1.2 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.

2.2.1.3 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.

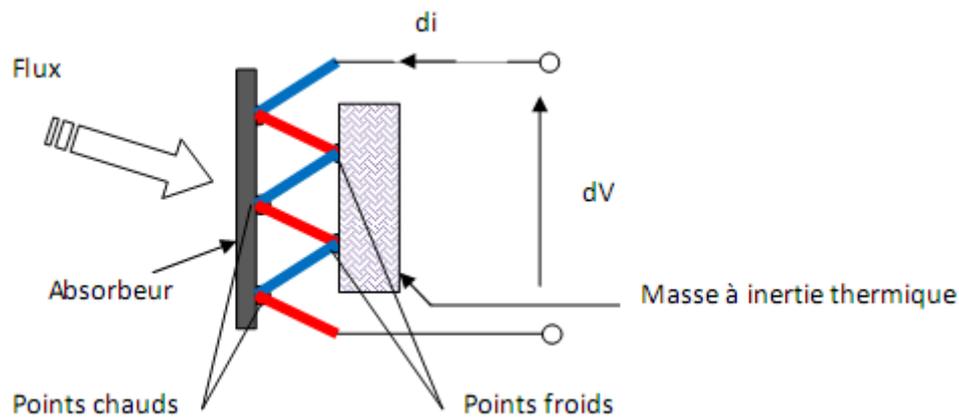


Figure 2.1 : Thermopile

2.2.2 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.

2.2.2.1 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.

2.2.2.2 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.

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

2.3.1 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)

2.3.2 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 V_n , aux bornes d'une charge, égal à la valeur efficace de bruit du détecteur. La mesure est prise autour d'un point de fonctionnement :

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

2.3.3 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 V_n 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]

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

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 (2.2) donne des exemples de défectivité spécifique de détecteurs utilisés en imagerie thermique et en thermographie.

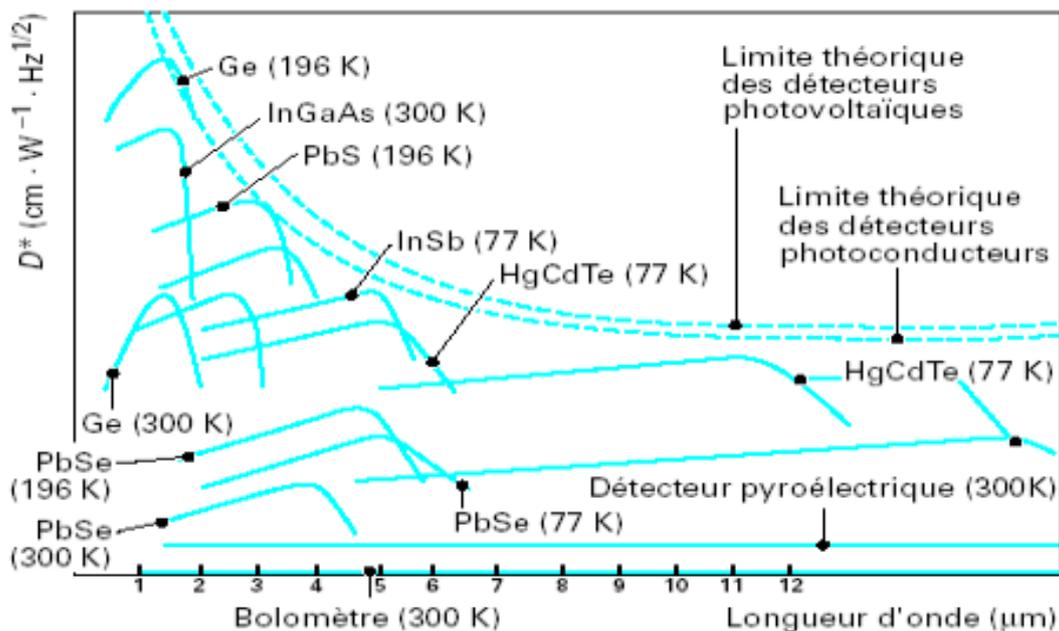


Figure 2.2 : Détectivités spécifiques de détecteurs pour des températures indiquée [11]

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.

2.4 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.

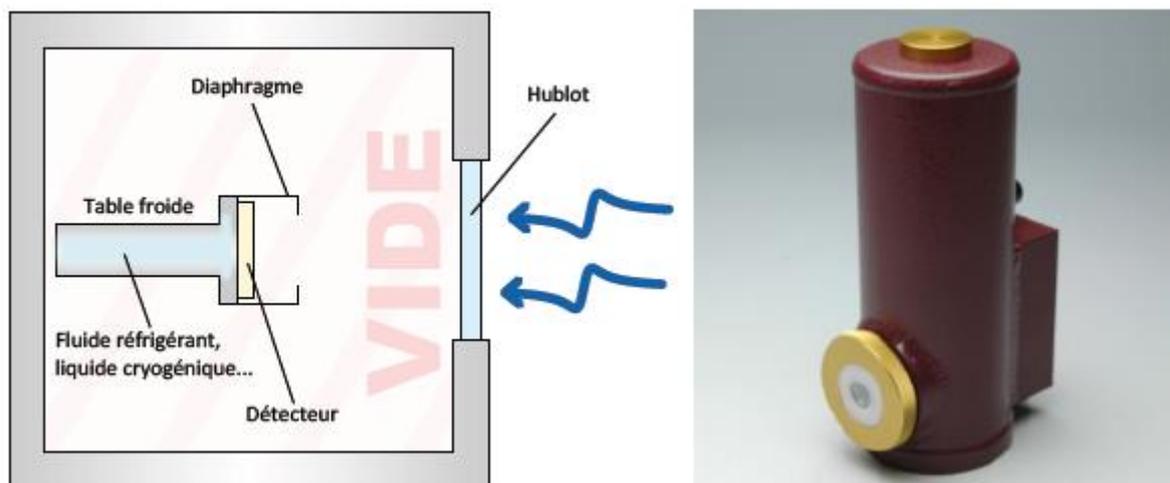


Figure 2.3 : Principe d'un détecteur refroidi.

Pour obtenir un détecteur sensible à des photons de petite énergie (photons infrarouges de bande II ou III), il est nécessaire d'utiliser des matériaux de gap très faible, proche de l'énergie kT à température ambiante ($kT \approx 30meV$ à 300 K). En conséquence, les impuretés à l'origine d'effets Shockley-Read Hall peuvent être activées thermiquement et d'autant plus facilement, et le niveau de courant d'obscurité augmente généralement, conséquence de plus nombreuses générations de charges. Cette augmentation de courant signifie une augmentation du bruit, ce qui dégrade sensiblement la détectivité du système. [10]

Les détecteurs IR sont donc généralement refroidis à des températures cryogéniques dans un cryostat, une enceinte fermée, sous vide afin d'éviter les échauffements par convection, et équipée d'un hublot laissant pénétrer la lumière. Certains cryostats opérationnels sont couplés à une machine à froid qui utilise le principe d'une compression-détente d'un gaz, selon le principe de Stirling. D'autres sont alimentés par un liquide cryogénique, généralement de l'azote liquide (80 K), voire de l'hélium liquide (4K).

Bien que les capacités d'intégration de cryostats au sein de détecteurs ont considérablement évolué ces dernières années et sont tout à fait communes dans la filière de détection IR, il n'en reste pas moins que la cryogénie reste une contrainte forte sur le plan technologique, avec des répercussions évidentes et sensibles en termes de coût.

Mais à ce prix, les gains en termes de détectivité sont considérables : les technologies actuelles de détection MWIR et LWIR refroidies peuvent atteindre les niveaux théoriques de performances idéales.

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 liquéfié.

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 »

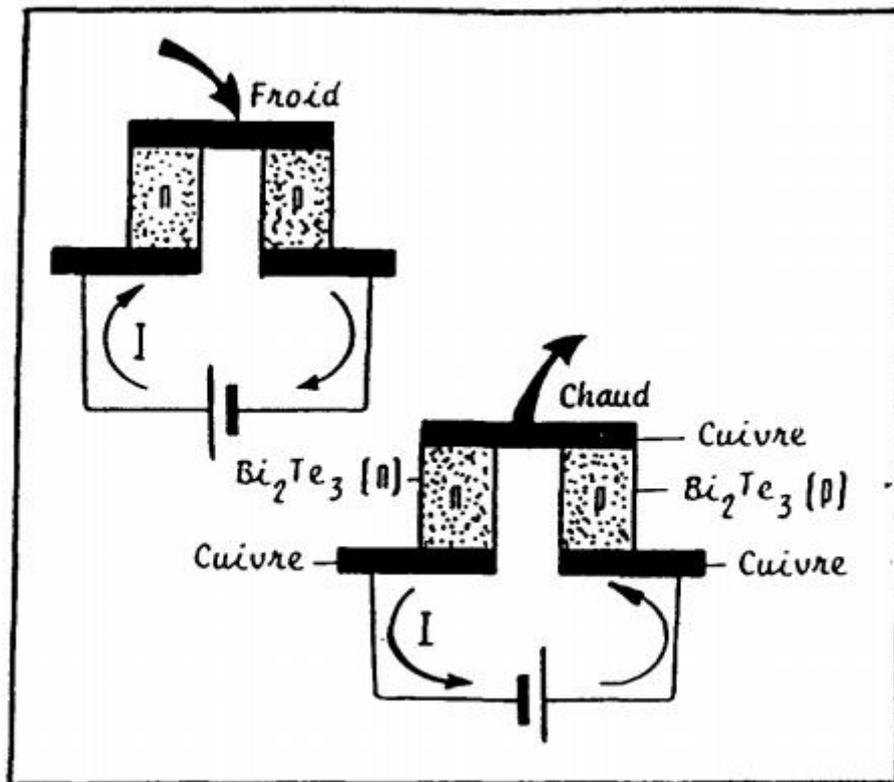


Figure 2.4 : Effet peltier

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.

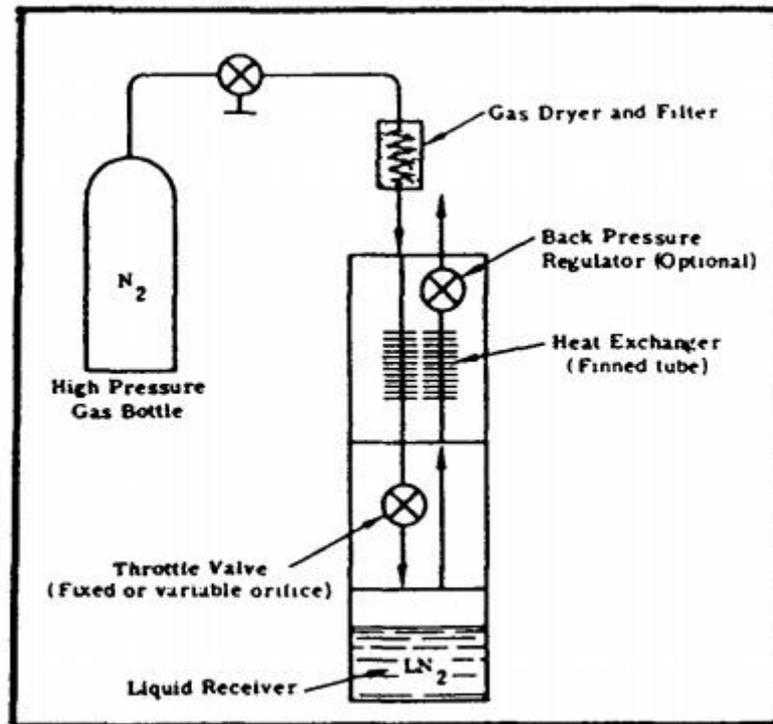


Figure 2.5 : Sonde Joule Thomson.

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).

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.

Chapitre 3 :

Mesures réalisées

3. 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) vont voir sa température s'élever. Donc une étude doit être menée afin d'éviter la destruction de cet élément. Dans ce cas, on va étudier, sur un circuit simple à base du capteur de température LM35, l'effet de la température sur le photodétecteur lors d'une exposition prolongée d'un rayonnement lumineux.

3.1 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.

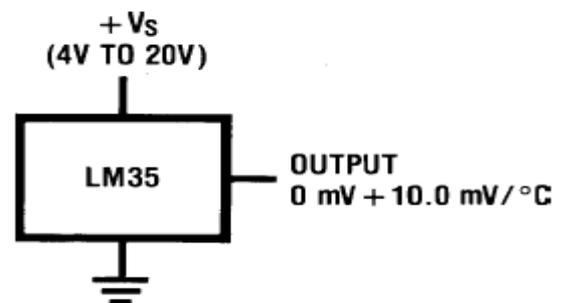
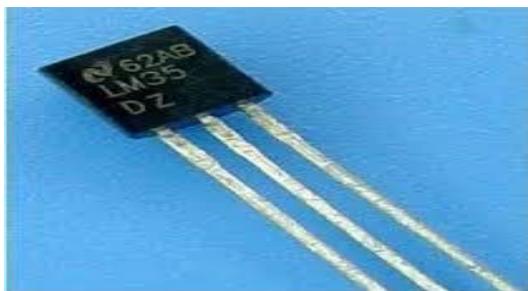


Figure 3.1 : capteur de température LM35DZ

- **Mise en œuvre :**

Le LM35 a été exposé au rayonnement infrarouge de longueur d'onde ($\lambda = 810 \text{ nm}$), à la température de 28°C et d'un courant d'injection de 30 mA. On relève la tension de sortie qui est proportionnelle à la température.

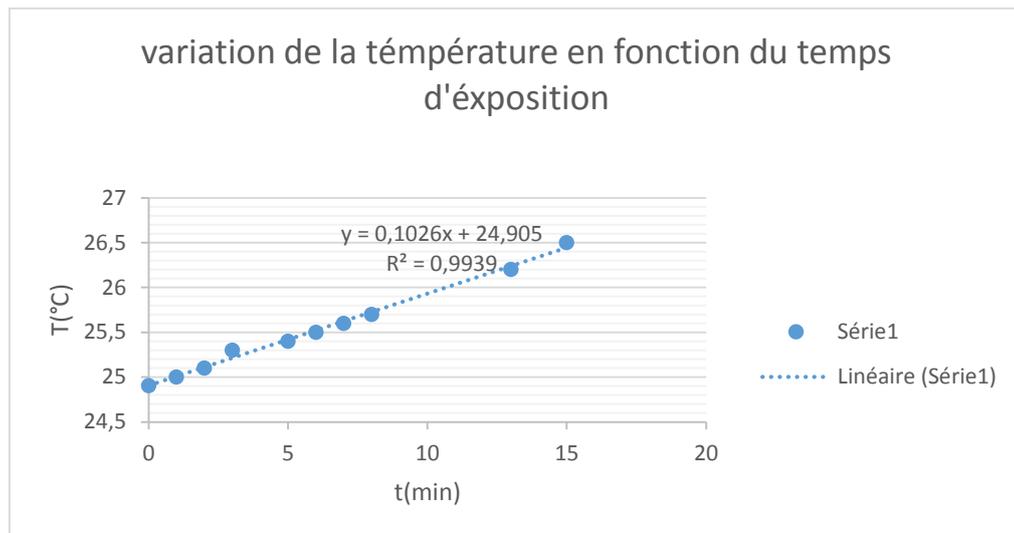


Figure 3.2 : courbe expérimentale $T (^{\circ}\text{C}) = f(t (\text{min}))$

On constate que la température augmente avec le temps d'exposition des rayons incidents.

3.2 Mesures à l'aide de la caméra thermique Pyrocam

Dans cette expérimentation, nous nous intéressons à deux sources de rayonnement. L'une à l'aide d'une source blanche fournissant un signal riche spectralement et la deuxième une source de chaleur fournie par un fer à souder pour analyser le rayonnement de la chaleur.

3.2.1 Torche d'un téléphone portable



Figure 3.3 : torche d'un téléphone « lumière visible »

3.2.2 Fer à souder (source continue)

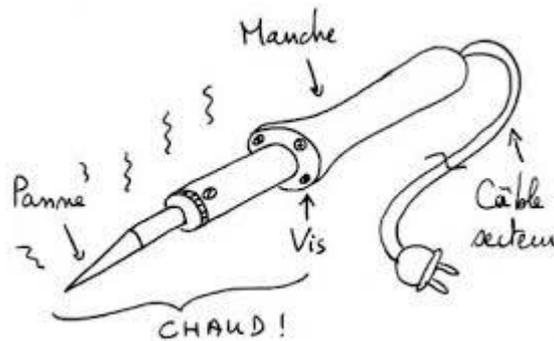


Figure 3.4 : Fer à souder

De ces deux expériences, des mesures ont été effectuées à l'aide d'une caméra thermique. Les images obtenues sont ensuite traitées par le logiciel fourni avec cette caméra.

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 incident, tels que la taille du faisceau, la forme, l'uniformité, la divergence, le contenu du mode, et la distribution de puissance reçue. Une fois que le Pyrocam est connecté au PC, le logiciel détecte automatiquement la présence de la caméra et est immédiatement prêt à l'acquisition des images et l'affichage sur l'écran.

3.3.1 Interface de commande :

L'interface qui nous permet le traitement de notre image thermique est représentée sur la figure 3.5.



Figure 3.5 : interface de commande de la PyrocamIII.

L'application PyrocamTM III Windows intègre un logiciel de configuration qui permet de prendre en charge l'affichage du profil d'intensité. 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 permettre au détecteur d'avoir un temps supplémentaire pour dissiper de la chaleur de l'ordre de la milliseconde.

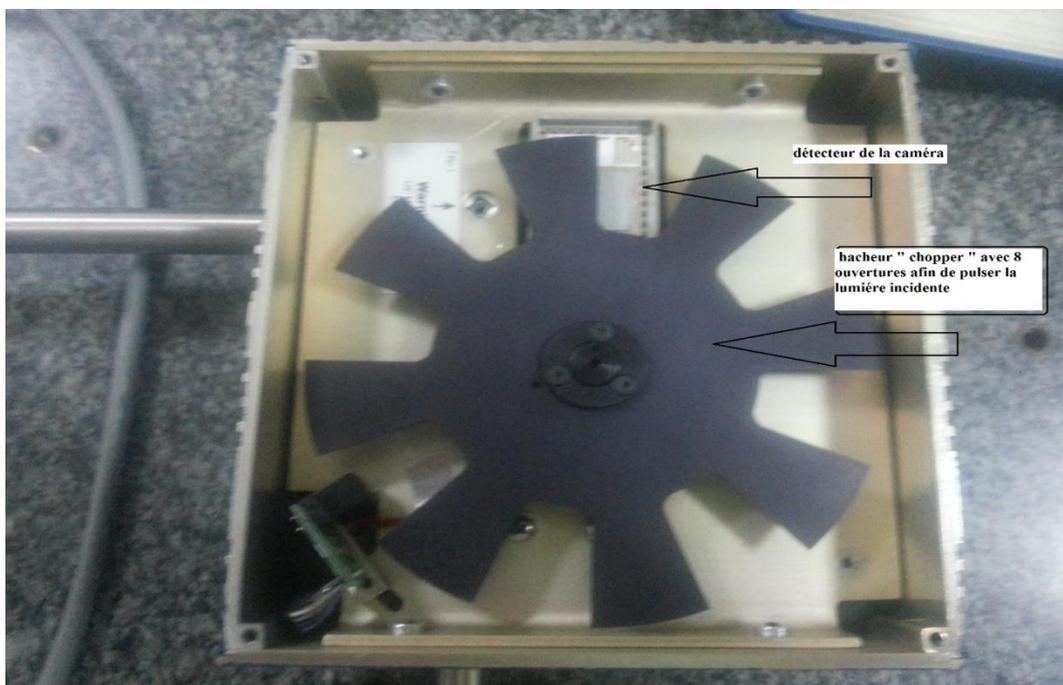


Figure 3.6 : hacheur « chopper » de la Pyrocam III.

Résultats obtenus :

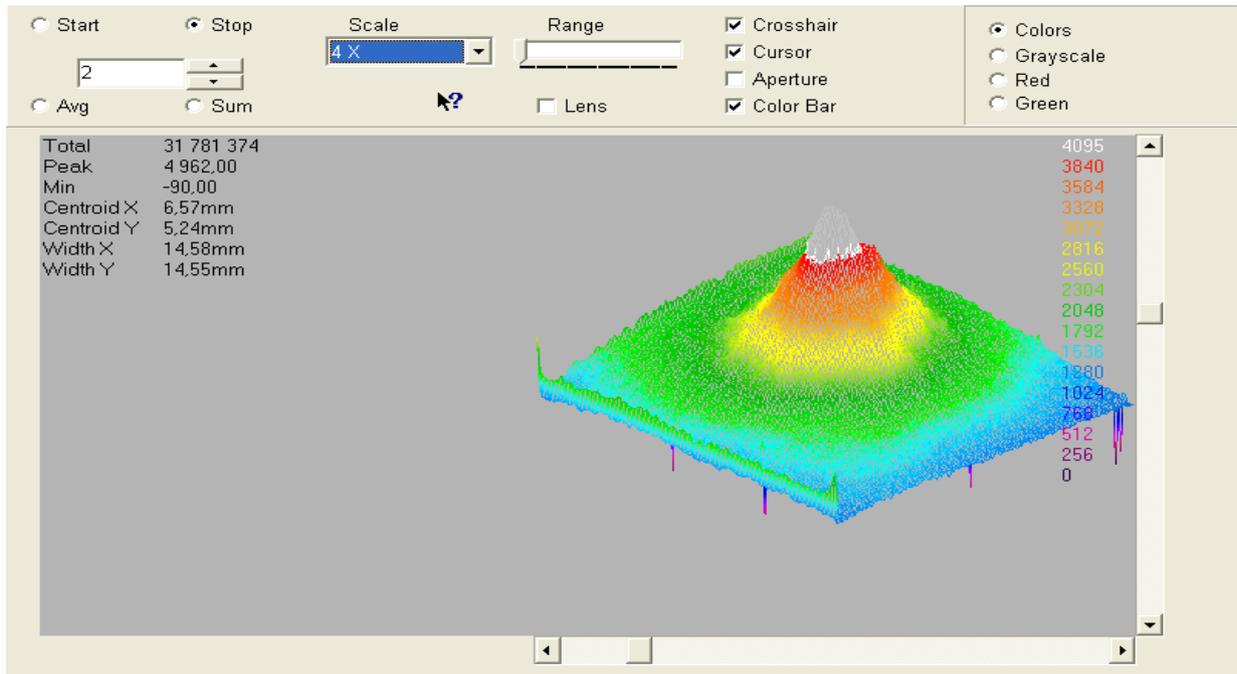


Figure 3.7 : profil du faisceau d'une torche d'un téléphone mobile en 3D.

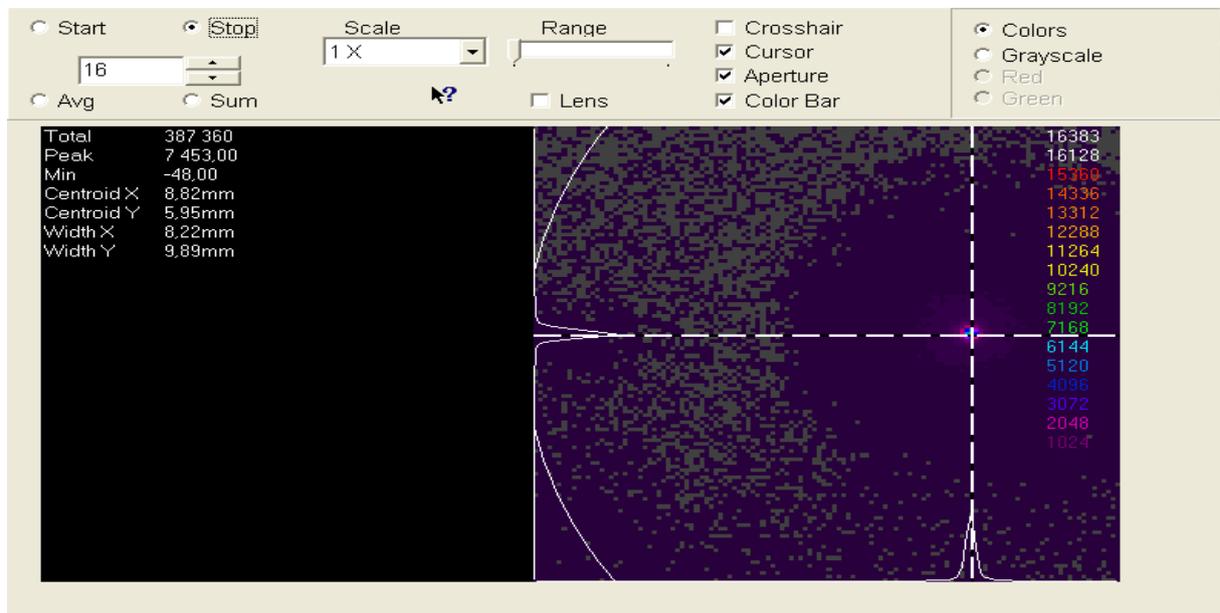


Figure 3.8 : profil du faisceau d'une torche d'un téléphone mobile en 2D.

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

***) Infrarouge**

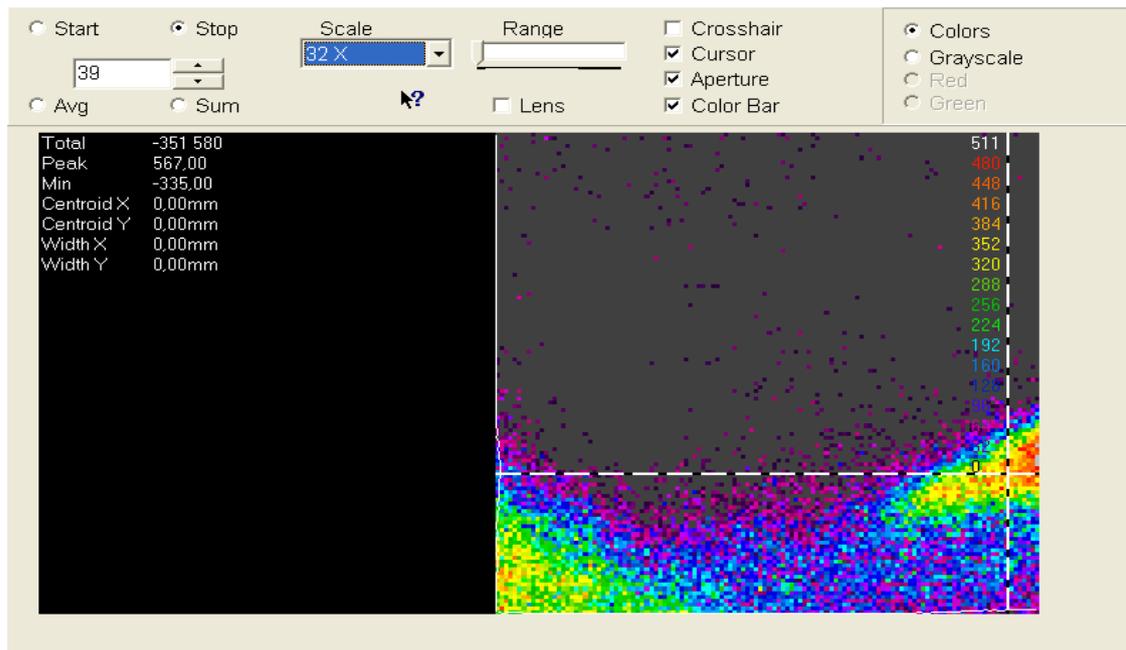


Figure 3.9 : profil de la lumière infrarouge du fer à souder en 2D.

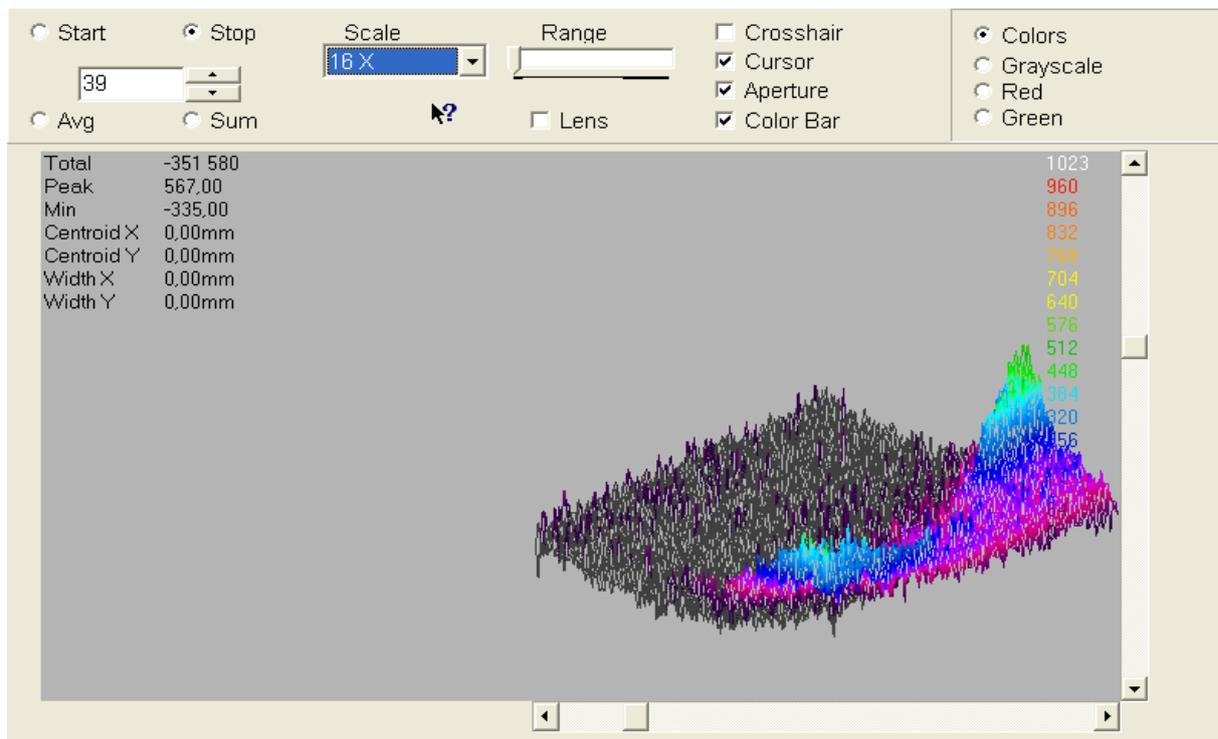


Figure 3.10 : profil de la lumière infrarouge du fer à souder en 3D.

Interprétation des résultats obtenus :

On remarque une large distribution de puissance de la lumière d'une torche qui émet dans le visible et qui couvre presque toute la surface sensible de la caméra avec une énergie riche spectralement. Figure (3.7)

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]: F. BECKER and Z.L.LI. Temperature-independent spectral indices in thermal infrared bands. *Remote Sensing of Environment*, 1990.
- [4]: Chrzanowski K., Park S.N., "Evaluation of thermal cameras for non-destructive thermal testing applications", *Infrared Physics and Technology*, 2001, vol.42p.101-105.
- [5]: 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.
- [6]: DeWitt D.P., « inferring temperature from optical radiation measurements », *optical engineering*, avril 1986, vol. 25, n.4, p.596-601.
- [7]: C. Fabron, A. Meurat, Measurement of total hemispheric emissivity at low temperature, *International Symposium on Environmental Testing for Space Program*, Liège, Belgium, 2001.
- [8] : Gaussorgues G., "la thermographie infrarouge ", 4ème édition, Editions technique and documentation, paris, 1999.
- [9] : Gaussorgues G, *La thermographie infrarouge : principes, technologies, applications*. Lavoisier TEC&DOC Editeurs, 3ème éditions, Paris, France, 1972.
- [10]: Kaplan H., Sacanlon T., "A thermographer's guide to infrared detectors", *proceeding of InfraMation 2001*, Orlando, EU, oct.2001, vol.2, p.89-100.
- [11]: King D.J., « Resistance temperature detectors: theory and standards », *Sensors*, 1995, vol.10, p.20-27.
- [12]: Kruse P.W., « uncooled IR focal plane arrays », *proceedings SPIE*, 1995, vol.2552, p.556-561.

[13]: 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.

[14] : Mathieu H., « physique des semiconducteurs et des composants » 4^{ème} Ed. Masson, Paris, 1998.

[15] : P. Hervé, *Mesure de l'émissivité thermique*, Technique de l'Ingénieur, 2005.

[16] : Rosencher E., Vinter B., « optoélectronique », Ed.Masson, Paris, 1998.

[17]: Setiadi D., Binnie T.D., et al, "A comparative study of integrated ferroelectric polymer pyroelectric sensors", *integrated ferroelectrics*, 1998, vol.19, p.33-47.

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