

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF  
UFAS (ALGERIE)

## MEMOIRE

Présenté à la faculté des sciences de l'ingénieur  
Département d'optique et mécanique de précision  
Pour l'obtention du diplôme de

## MAGISTER

Option : Optique et mécanique de précision

Par

**Mr. Zidane HEBBOUL**  
**THEME**

**Contribution à l'étude de la thermographie infrarouge  
et ses applications**

Soutenu le :.....

devant la commission d'examen :

Djamel BOUZID	Prof	à l'université de Sétif	Président
Mohamed BOUAFIA	Prof	à l'université de Sétif	Rapporteur
Aicha MEDJAHED	M.C	à l'université de Sétif	Examineur
Hocine GUESSAS	Dr	à l'université de Sétif	Examineur

## Sommaire

### Introduction générale

### Partie I : Chaine de radiométrie thermographique et applications

<b>Introduction</b>	<b>01</b>
<b>1. Emission de la matière</b>	<b>02</b>
1.1 grandeurs de base de rayonnement	02
1.1.1 le flux (F)	02
1.1.2 Intensité (I)	03
1.1.3 Luminance (L)	04
1.1.4 Eclairement (E)	05
1.1.5 Existence (R)	05
1.1.6 Exposition ( $\Sigma$ )	06
1.1.7 Quantité de lumière ( $\kappa$ )	06
1.1.8 loi de BOUGUER	06
1.2 rayonnement infrarouge	07
1.2.1 classification du rayonnement infrarouge	07
1.2.2 Sources courantes de rayonnement infrarouges	08
1.2.3 Signature infrarouge d'un objet	09
1.3 Rayonnement du corps noir	09
1.3.1 loi de Planck	10
1.3.2 loi de Wien	10
1.3.3 loi de Stephan Boltzmann	11
1.3.4 réalisation d'un corps noir	11
1.4 Emissivité des matériaux	13
1.4.1 définitions de l'émissivité	13
1.4.2 émissivité de quelques matériaux	15
1.5 calcul du rayonnement émis	16
<b>2. Transmission atmosphérique</b>	<b>17</b>
2.1 les différentes perturbations de l'atmosphère terrestre	18
2.2 absorption moléculaire	20
2.3 les fenêtres atmosphériques	21
2.4 la diffusion atmosphérique	22
2.5 correction atmosphérique	23
<b>3. matériaux des systèmes infrarouges</b>	<b>26</b>
3.1 les verres	26
3.2 les cristaux	26
3.3 les matériaux plastiques	27
3.4 les métaux	27

<b>4. détecteurs du rayonnement infrarouge</b>	<b>27</b>
4.1 Caractéristiques des détecteurs	28
4.1.1 Sensibilité S	28
4.1.2 Minimum de flux détectable	28
4.1.3 Défectivité spécifique	28
4.2 Détecteurs thermiques	30
4.2.1 les bolomètres	31
4.2.2 Pyroélectriques	31
4.2.3 thermocouple ou thermopile	32
4.3 Détecteurs quantiques	33
4.3.1 détecteur photoconducteur	35
4.3.2 détecteur photovoltaïque	35
4.4 détecteurs multiéléments	36
4.4.1 Dispositif à transfert de charges CCD	37
4.4.2 Condensateur MOS	38
4.4.3 Injection optique	39
4.4.4 Transfert de charges	39
<b>5. Visualisation de la température</b>	<b>41</b>
5.1 Signal donné par le détecteur	42
5.2 Modes d'analyse d'une image thermique	44
5.2.1 le balayage bidirectionnel par un détecteur unique	45
5.2.2 le balayage par une barrette de n éléments en parallèle	45
5.2.3 le balayage par une barrette de p éléments en série	46
5.2.4 l'analyse série-parallèle par une mosaïque bidimensionnelle	47
5.3 Caméra thermique	47
5.3.1 balayage spatial optomécanique	49
5.3.2 Balayage spatial électronique	50
5.4 Etalonnage des images en température	51
5.5 système de mesure thermographique	52
<b>6. Caractéristiques des systèmes infrarouges</b>	<b>53</b>
6.1 MTF du système	53
6.1.1 MTF de l'optique	54
6.1.2 MTF du détecteur	55
6.2 Intervalle de température équivalent au bruit NETD	55
6.3 Ecart normale de température séparable MRTD	56
<b>7. Applications de la thermographie</b>	<b>58</b>
7.1 Contribution de la thermographie	58
7.2 Typologie des applications et utilisations	59
7.2.1 La recherche et développement	60
7.2.1.1 signature spectrale	60
7.2.1.2 aérodynamique et aérothermique	61
7.2.1.3 thermique	61

7.2.1.4 matériaux et mécanique du solide .....	62
7.2.1.5 électrotechnique et électronique.....	62
7.2.1.6 industrie automobile et de transports .....	63
7.2.1.7 métallurgie, traitement thermique et soudage .....	64
7.2.1.8 industrie du verre .....	64
7.2.1.9 électroménager et industrie agroalimentaire .....	65
7.2.1.10 agronomie, géologie et pollution .....	65
7.2.1.11 papier, textile et plastique .....	66
7.2.2 les applications médicales .....	66
7.2.3 maintenance et prévention .....	67
7.2.3.1 maintenance électrique .....	68
7.2.3.2 Isolants, calorifuges, réfractaires, joints et fuites .....	69
7.2.3.3 Pétrochimie .....	70
7.2.3.4 Maintenance mécanique .....	71
7.2.3.5 Surveillance industrielle .....	71
7.2.3.6 Contrôle de produits et contrôle de procédés .....	71
7.2.4 Contrôle non destructif .....	72
<b>Conclusion .....</b>	<b>73</b>
<b>Partie II : traitement d'images infrarouges et applications .....</b>	<b>75</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>75</b>
<b>8. Présentation générale du traitement numérique des images infrarouges ....</b>	<b>75</b>
8.1 Réduction des défauts propres, aux images infrarouges .....	79
8.2 Réduction du bruit aléatoire dans les images infrarouges .....	81
8.3 Amélioration du contraste des images infrarouges .....	85
8.4 Extraction et séparation d'objets chauds .....	88
8.5 Caractérisation et reconnaissance d'objets chauds .....	90
9. Traitement d'images infrarouges par « Image Pro Plus » .....	
9.1 rehaussement d'images infrarouges	
9.1.1 modification de l'intensité des pixels	
9.1.2 filtrage spatial	
9.1.2.1 Filtre de convolution	
9.1.2.2 filtres contours	
9.1.2.3 filtres de non convolution ou morphologiques	
9.1.3 analyses basés sur l'intensité du pixel	

9.1.3.1 analyses basées sur l'histogramme

9.1.3.2 analyses basées sur la ligne de profil

9.1.4 mesure et comptage

9.2 Segmentation d'images infrarouges

## **Conclusion**

### **Conclusion générale**

### **Références bibliographiques**

## Introduction générale

Chaque jour, dans le monde entier, des scientifiques sont à la recherche de nouvelles méthodes pour la résolution de leurs 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  $T(x, y)$  ou d'émissivité  $\epsilon(x, y)$ .

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.

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);
- d'objets visqueux (paraison de verre avant moulage)

- d'objets et environnements à températures élevées (dans un four de traitement thermique), etc.

Cette contribution spécifique de la thermographie comporte des limitations comme pour toute technique.

Un soin particulier sera apporté, d'une part à l'étude des aspects qualitatifs et quantitatifs de la thermographie infrarouge et d'autre part, au large champ de ses applications diverses en opérant sur le traitement d'images thermiques.

Notre travail est divisé en deux parties : la première partie est consacrée à l'aspect purement théorique de tout ce qui aide à la compréhension de la technique de thermographie infrarouge, depuis l'émission du rayonnement infrarouge par la matière jusqu'à la détection et la quantification de ce rayonnement, sans oublier le milieu séparant l'objet du système de mesure qui est l'atmosphère.

Dans la deuxième partie, nous avons abordé l'aspect pratique de la technique de thermographie infrarouge à travers la description d'une méthodologie spécifique pour le traitement d'images infrarouges qui ont des particularités par rapport à celles du visible. Cet outil puissant qui possède la thermographie infrarouge sera appliqué aux différents champs d'activités et de recherches telles que le contrôle non destructif, la télédétection, le domaine militaire et la médecine.

Enfin notre travail sera achevé d'une conclusion générale.

# Partie I : Chaine de radiométrie thermographique et applications

## Introduction

On voudrait par cette étude aboutir à l'entourage des notions de base de la thermographie infrarouge sans entrer dans beaucoup de détails qui nécessitent des ouvrages et des ouvrages.

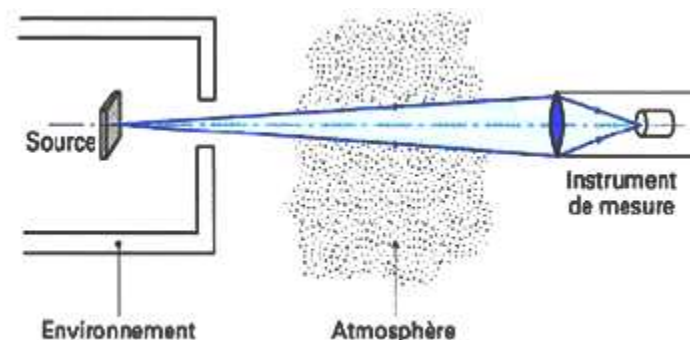
Le rayonnement d'énergie par la matière est une réalité de tous les jours, même si nous n'en avons pas conscience. Par unité de temps, la matière émet une puissance de rayonnement, des watts. Tout corps dont la température est supérieure à 0°K émet un rayonnement électromagnétique, il joue le rôle de source en transformant une partie de l'énergie thermique en énergie radiative, donc en rayonnement électromagnétique.

Les phénomènes qui régissent le comportement de la technique de thermographie infrarouge sont:

1. l'émission de rayonnement;
2. la propagation de rayonnement dans l'atmosphère;
3. la détection, le traitement et l'analyse du signal, rayonnant sous forme de signal électrique;

La configuration de mesure thermographique « chaîne radiométrique » est composée d'éléments suivants:

- la source ou l'objet entouré d'un environnement qui émet le rayonnement infrarouge,
- l'atmosphère à travers lequel se propage le rayonnement infrarouge,
- l'instrument de détection et de quantification du rayonnement infrarouge.



*Figure 1.1: observation de l'émission d'une source placée dans un environnement à travers une atmosphère.*



## 1. Emission de la matière

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  $\mu\text{m}$ . La thermographie infrarouge classique va de 2 à 20  $\mu\text{m}$ .

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. [1.1]

### 1.1 grandeurs de base de rayonnement [1.2], [1.3][1.4][1.5]

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 : valeur instantanée d'un débit de rayonnement, il peut s'agir du débit émis par une source, transporté par un faisceau, ou reçu par un récepteur.

Selon les systèmes d'unités, on distingue entre :

#### Flux énergétique (Fe) :

On peut transformer ce rayonnement en chaleur (puissance thermique), dont on donnera la valeur en Watts.

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

$$\langle \|\vec{S}\| \rangle = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \|E_0\|^2 \dots\dots\dots(1-1)$$

Où :  $\varepsilon$ ,  $\mu$  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 U, proportionnelle à la fréquence  $\nu$  de son onde associée suivant la relation de Planck :

$$U = h\nu = \frac{h.c}{\lambda_0} \dots\dots\dots(1-2)$$

Où : h constante de Planck ( $6.62.10^{-34}$  j).

$\lambda_0$  Longueur d'onde dans le vide.

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

$$F_e = F_p.U \dots\dots\dots(1-3)$$

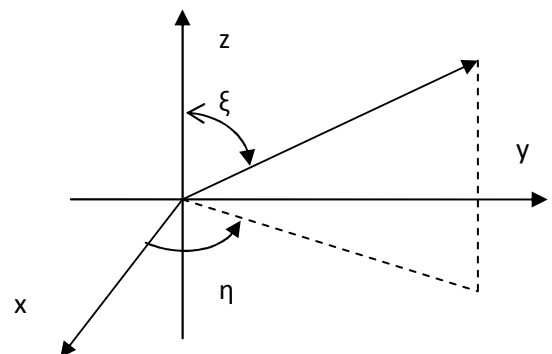
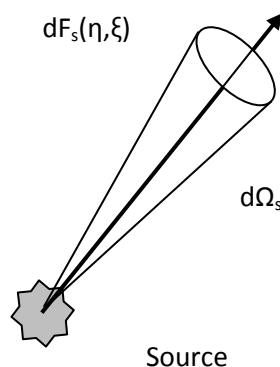
## Flux lumineux (Fl) :

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  $(\eta, \xi)$ , est le flux  $dF_s$  qu'il émet par unité d'angle solide  $d\Omega_s$  dans la direction considérée :

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



### 1.1.3

Figure 1.2: intensité d'une source

Par définition, la luminance au point  $(x, y)$  de la source et dans la direction  $(\eta, \xi)$ , est l'intensité par unité de surface apparente dans cette direction, soit : (Figure 02)

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

Où  $\theta_s$  est l'angle entre la normale et la direction d'intérêt, d'où :

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

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

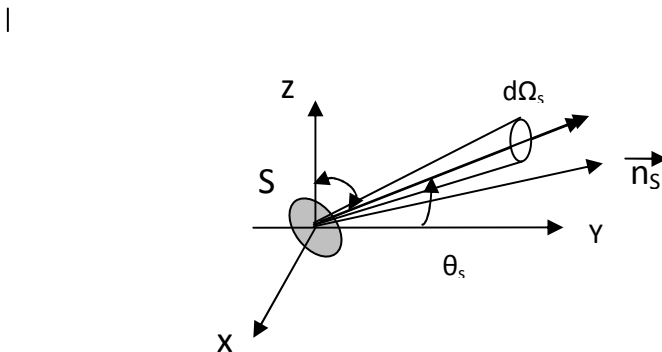


Figure 1.3 : paramètres de définition de la luminance d'un rayonnement.

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.

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

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 de la droite support.

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

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

$\tau$  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 le flux  $dF_R$  reçu par le récepteur, et l'aire  $dA_R$  de ce récepteur, il est exprimé en  $\text{W.m}^{-2}$  :

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

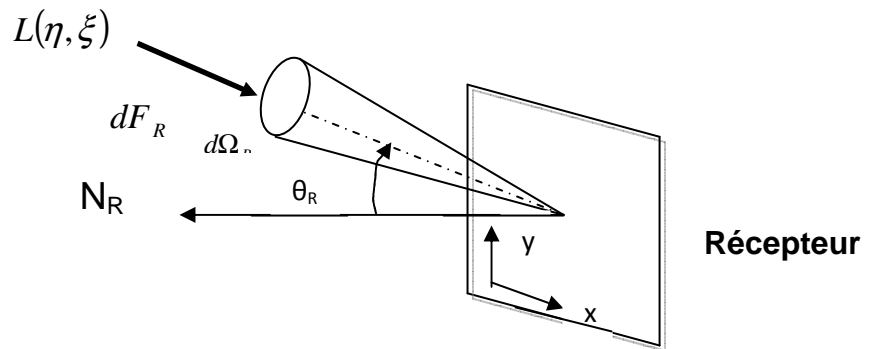


Figure 1.4 : éclairement sur un plan.

#### 1.1.5 Existence (R)

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

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

Si la source est à luminance uniforme :

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

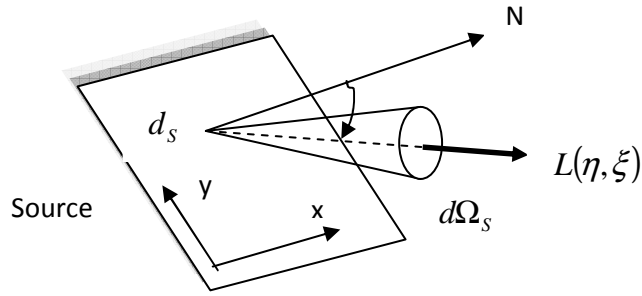


Figure 1.5 : existence d'une source.

### 1.1.6 Exposition ( $\Sigma$ )

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

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

### 1.1.7 Quantité de lumière ( $\kappa$ )

C'est l'intégrale du flux transporté par un faisceau pendant un intervalle de temps ( $t_1, t_2$ ) donné :

$$\kappa = \int_{t_1}^{t_2} E \cdot dt \dots\dots\dots (1-13)$$

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  $E$  d'une surface réceptrice, du à une source  $S$ , et l'intensité  $I$  de cette source dans la direction du récepteur, éloigné par la distance  $d$  :

$$E_r = \frac{dF_r}{dA_r} = \frac{I(\eta, \xi) \cdot \cos \theta_r}{d^2} \dots\dots\dots (1-14)$$

## 1.2 rayonnement infrarouge

La découverte du rayonnement infrarouge est due à Sir William Herschel [1.6] 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 après le rouge et n'était pas visible à l'œil, il s'agissait du **rayonnement infrarouge**.

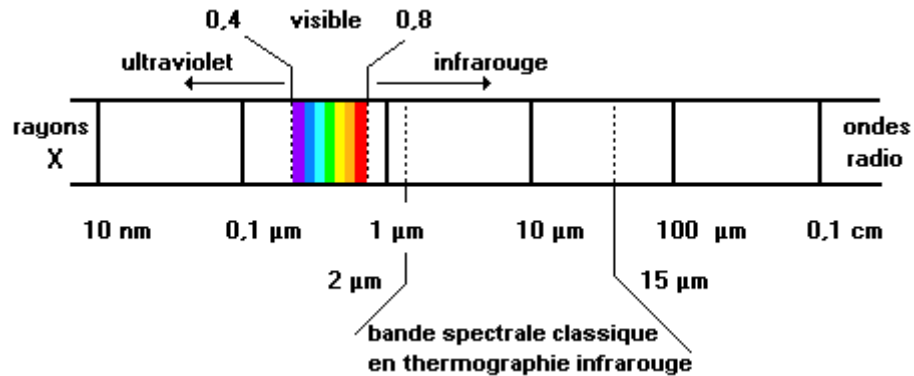


Figure 1.6 : Le spectre des rayonnements électromagnétiques.

### 1.2.1 classification du rayonnement infrarouge [1.7]

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** : ( $\lambda < 3\mu\text{m}$ ) correspond à un domaine où les verres restent transparents, les récepteurs photoélectriques sont identiques (Si) ou ont un fonctionnement similaire (Ge, Pbs) à ceux du visible. C'est le principal domaine d'émission des radiateurs 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  $\lambda_{\text{max}}$  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** : ( $\lambda > 20\mu\text{m}$ ) est le domaine réservé aux laboratoires spécialisés en spectroscopie moléculaire ou des expériences spatiales. Il nécessite des températures de détecteur très basses (Hélium liquide).

En infrarouge lointain, les détecteurs sont 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 considérablement avec la température.

### 1.2.2 Sources courantes de rayonnement infrarouges

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 1.7 montre que le spectre d'émission présente deux bosses : la première dans le visible correspond au rayonnement solaire réfléchi, et la seconde, dans l'infrarouge, au rayonnement propre de la terre.

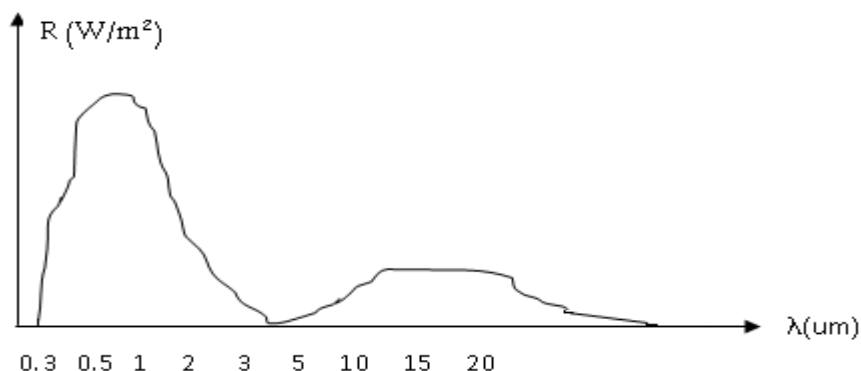


Figure 1.7 : spectre du rayonnement terrestre. [1.8]

**Corps humain** : avec sa température d'environ 37°C, le corps humain émet 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 se trouve beaucoup pour la réalisation de télécommandes ou pour les transmissions par fibres optiques.

### 1.2.3 Signature infrarouge d'un objet [1.4]

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 [1.9], [1.10], [1.11], [1.12][1.13]**

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 1.8).

$$\left[ \frac{dL_{\lambda}}{d\lambda} \right]_{CN}^T = \frac{2h.c^2.\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda KT}\right) - 1} \text{ (W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}.\text{Sr}^{-1}\text{)}.....(1-15)$$

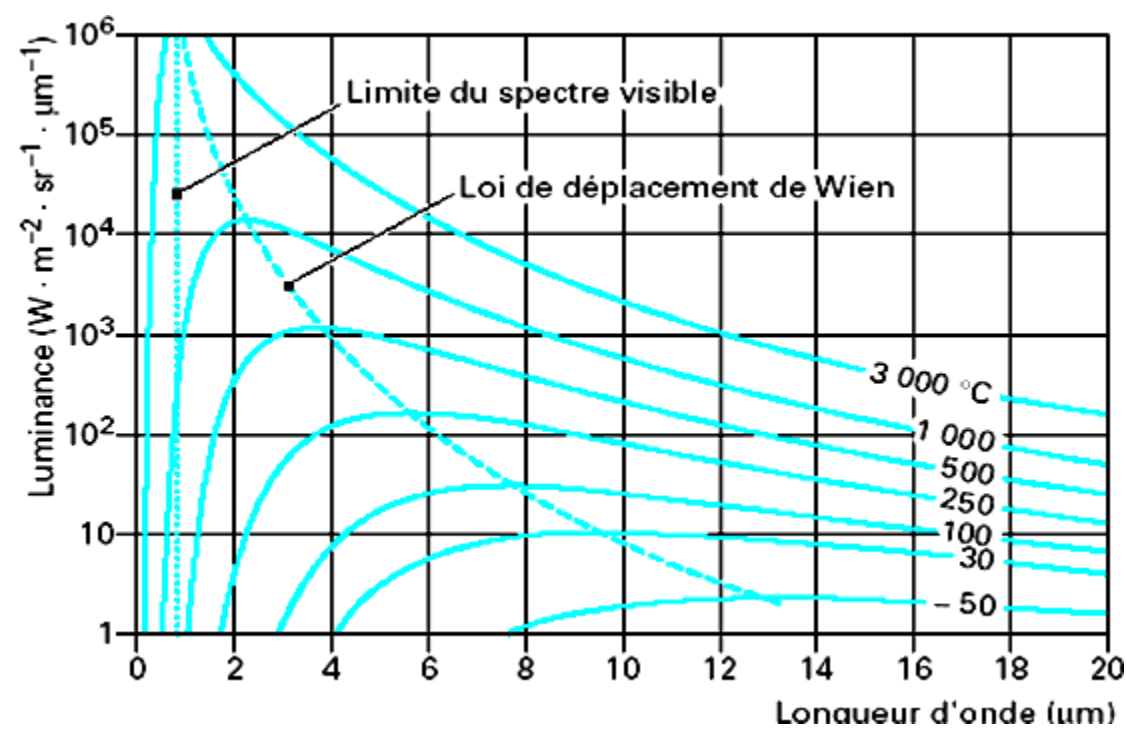


Figure 1.8 : courbes de Planck. [1.13]

On voit que le spectre d’émission est continu et qu’il présente un maximum dans l’infrarouge. Ceci explique l’association commune infrarouge-chaleur. On remarque aussi que si l’on travail avec une camera infrarouge 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 ».

### 1.3.2 loi de Wien

Sur les courbes de Planck (figure I-5), 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.

$$T. \lambda_{max} = 2\,897,8 \approx 3\,000 \mu\text{m} \cdot \text{K}.....(1-16)$$

Avec :

$T$  (K) température,

$\lambda_{\max}$  ( $\mu\text{m}$ ) longueur d'onde du maximum d'émission.

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  $5 \lambda_{\max}$ )

### 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 existence totale.

$$\int_0^{\infty} \left( \frac{dL}{d\lambda} \right)_{CN}^T d\lambda = K_1 \cdot T^4 \dots\dots\dots(1-17)$$

Avec :

$K_1 = 5,670 \ 32 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$  (constante de Stephan en luminance)

$T$  (K) température.

### 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...

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 certaines 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.

Les photos suivantes montrent quelques exemples des corps noirs de laboratoires  
(source HGH)



Corps noir étendu  
ECN 100



Corps noir à  
température absolue  
et différentielle  
(série DCN 1000N)



Corps noir basse  
température (série DCN  
1000L)

Les corps noirs **DCN1000L** possèdent des caractéristiques spécifiques, lui permettant d'atteindre des températures plus basses. Ils sont composés d'une tête émettrice renfermant une série de refroidisseurs par effet Peltier dont l'évacuation des calories est assurée par une circulation d'un liquide réfrigérant. Le liquide réfrigérant provient d'une unité externe. La tête émissive comprend également un support de mire. Les températures de la mire et de la surface émissive sont toutes deux mesurées par des sondes Pt calibrées de haute précision. Différentes tailles de surface émissive sont disponibles pour répondre aux diverses applications telles que la caractérisation d'imageurs thermiques (mires MRTD, FTM et NETD), la calibration de détecteurs matriciels, la correction de non uniformité de capteurs infrarouges, etc.

Les corps noirs **DCN1000N** sont des sources infrarouges de référence. Ils sont composés d'une tête émissive dont la température est contrôlée par un coffret électronique de régulation par régulateur PID. La tête émissive comprend également un support de mires.

Le corps noir **ECN 100** est une source infrarouge de référence dont la surface émissive, à structure micro-pyramidale, est particulièrement grande. Les dimensions de la surface radiante sont comprises entre 150 mm x 150 mm et 1m x 1 m et la température maximale de ce corps noir peut atteindre +550°C. Ce corps noir étendu peut notamment être utilisé pour l'étalonnage de caméras thermiques sans collimateur ou comme cible à taille réelle pour des tests optroniques.

## 1.4 Émissivité des matériaux [1.14]

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 :

$$\varepsilon(\lambda) + R(\lambda) + T(\lambda) = 1 \dots \dots \dots (1-18)$$

- 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  $T$  :

$$\varepsilon(T) = \frac{L_{\text{corps.réel}}(T)}{L_{\text{corps.noir}}(T)} \dots \dots \dots (1-19)$$

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

**Emissivité monochromatique directionnelle  $\varepsilon(T, \lambda, \theta)$  :**

$$\varepsilon(T, \lambda, \theta) = \frac{L_{\text{corps.réel}}(T, \lambda, \theta)}{L_{\text{corps.noir}}(T, \lambda, \theta)} \dots\dots\dots(1-20)$$

Avec  $\theta$  angle d'émission.

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

### Émissivité directionnelle totale $\varepsilon(T, \theta)$ :

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

$$\varepsilon_{\text{totale}}(T, \theta) = \frac{\int_0^\infty \varepsilon(\lambda, T, \theta) L_{CN}(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^\infty L_{CN}(\lambda, T) d\lambda} \dots\dots\dots(1.21)$$

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  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ . On définit alors une émissivité effective pour cette bande.

### Émissivité hémisphérique monochromatique $\varepsilon(T, \lambda)$ :

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  $\varepsilon(\lambda, T, \theta)$  sur ce demi-espace et elle est appelée émissivité hémisphérique monochromatique :

$$\varepsilon_{\text{hémi}}(T, \lambda) = \frac{\iint_{2\pi\text{Sr}} \varepsilon(\lambda, T, \theta) L_{CN}(T, \lambda) \cos \theta d\Omega}{\iint_{2\pi\text{Sr}} L_{CN}(T, \lambda) \cos \theta d\Omega} \dots\dots\dots(1.22)$$

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

#### 1.4.2 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, ou l'émissivité pour la direction normale à la surface.

Les caractéristiques du corps : état de surface, pureté, microstructure, ne sont pas toujours bien définies, ce qui peut entraîner de graves confusions et des erreurs majeures. [1.3]

Le tableau 1 résume les valeurs d'émissivité de quelques matériaux dans des conditions appropriés. [1.15]

Tableau 1.1 : Émissivité de quelques matériaux usuels, pour un angle d'observation de $0^\circ$ à $\lambda = 5 \mu\text{m}$					
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	20	0,98
Laiton oxydé	100	0,61	Carbone – graphite	20	0,92
Cuivre poli	100	0,05	Béton	20	0,94
Cuivre oxydé	20	0,78	Verre poli	100	0,92
Or poli	100	0,02	Vernis blanc	100	0,97
Fer, fonte, polis	40	0,21	Vernis noir mat	20	0,05
Fer, fonte, oxydés	100	0,64	Huile sur nickel :	20	0,27
Fer, fonte, très rouillés	20	0,69	nickel seul	20	0,46
Magnésium poli	20	0,07	avec film de 25 mm	20	0,72
Nickel poli	20	0,05	avec film de 50 mm	20	0,82
Nickel oxydé	200	0,37	avec film de 125 mm	20	0,94
Argent poli	100	0,03	film épais	20	0,93
Acier inoxydable 18/8	20	0,16	Peinture à l'huile	20	0,91
poli	60	0,85	Papier	20	0,90
Acier oxydé	100	0,07	Plâtre	32	0,98
Acier poli	200	0,79	Sable	20	0,92
Acier oxydé à 800 °C	100	0,07	Peau humaine	20	0,95
Fer blanc			Terre sèche	20	0,96
			Terre saturée d'eau	10	0,96
			Eau distillée	10	0,85
			Glace	20	0,90
			Neige		

## 1.5 calcul du rayonnement émis

La matière émet du rayonnement mais, également, elle réfléchit du rayonnement, rayonnement qui provient de son environnement, 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).

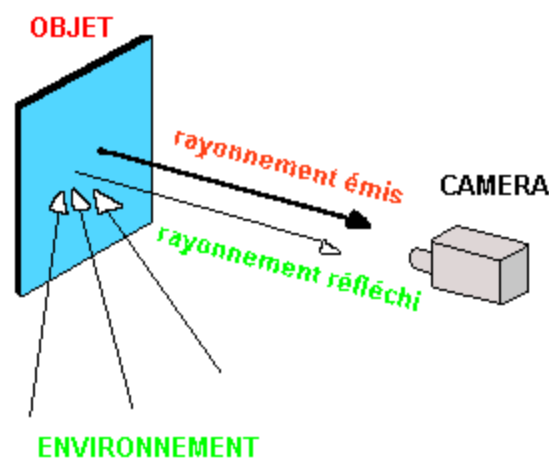


Figure 1.9: Le rayonnement émis et le rayonnement réfléchi.

En partant de l'équation qui définit l'émissivité (eq 1.19), la luminance d'un objet est :

$$L_{ob}(\lambda, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) L_{en}(\lambda, T) d\lambda \dots \dots \dots (1.23)$$

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

$$\frac{\partial L_{ob}}{\partial T} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_\lambda \cdot \frac{\partial L_{en}}{\partial T} \cdot d\lambda \dots \dots \dots (1.24)$$

## 2. Transmission atmosphérique

Tous les rayonnements émis ou réfléchis par les objets sont influencés par l'atmosphère, car c'est un environnement contenant différents aérosols. Chacune de ces particules selon ses caractéristiques agit sur les rayonnements par absorption ou dispersion.

En particulier, l'absorption joue un rôle important. Les sept aérosols sont : la vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ), l'ozone ( $\text{O}_3$ ), l'oxygène ( $\text{O}_2$ ), le méthane ( $\text{CH}_4$ ), l'oxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ), le monoxyde de carbone ( $\text{CO}$ ) et le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ).  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{O}_3$  (aux grandes altitudes) produisent un effet significatif sur l'absorption des rayonnements infrarouges. [2.1]

Les figures suivantes montrent la transmission atmosphérique des éléments ( $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ) simulées par le logiciel LOWTRAN 7 [2.2].

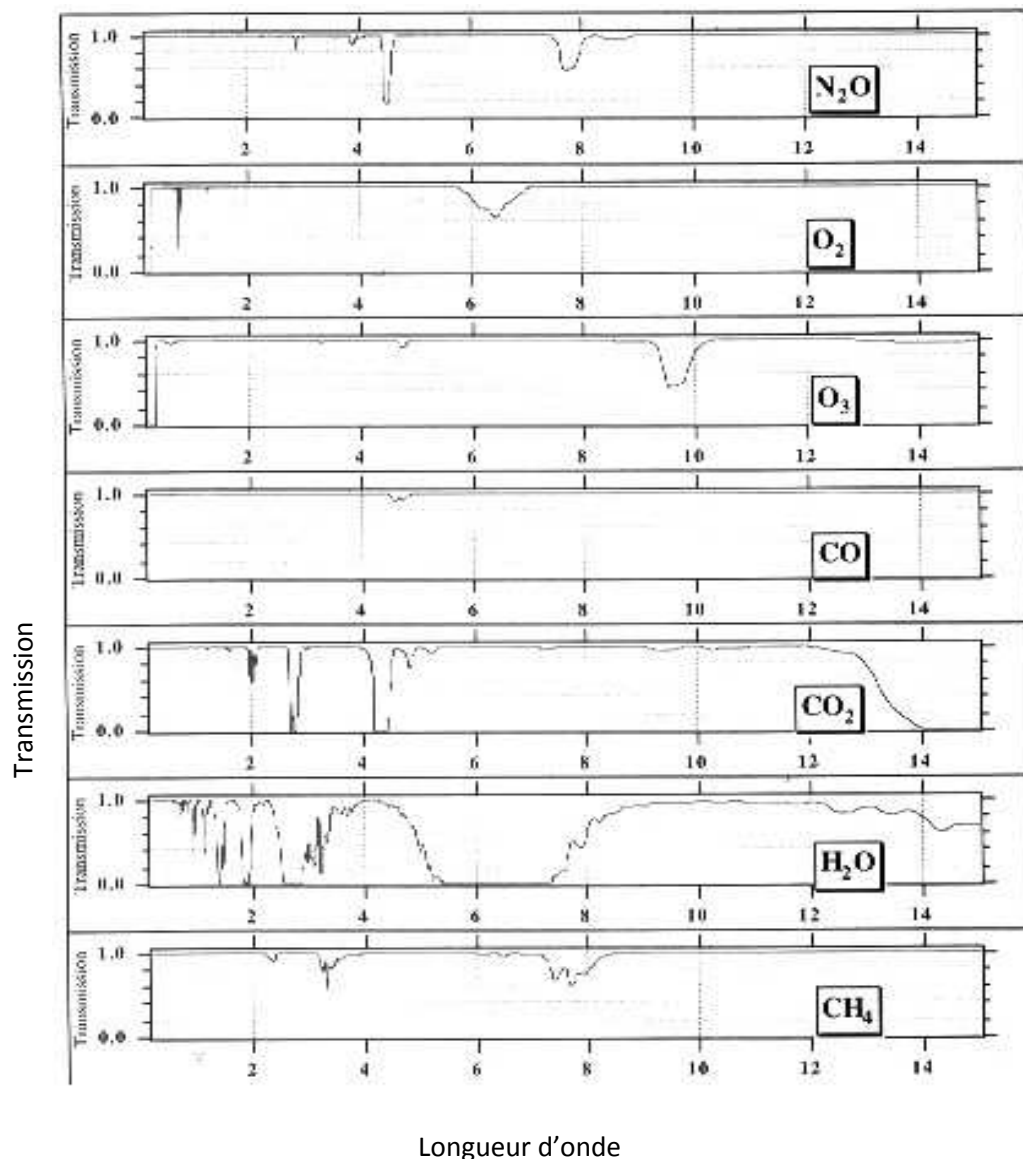


Figure 2.1 : transmission de l'atmosphère (trajet vertical) associée à ses différents constituants.

## 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 2.2)

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 1 atm au niveau de la mer à quelques dixièmes d'atm à l'extrémité supérieure. Les plus importants atténuateurs sont : le H<sub>2</sub>O et le CO<sub>2</sub>.

La deuxième couche, dite « Stratosphère », s'étend de 11 km jusqu'à 50 km. On constate la présence de l'Ozone (O<sub>3</sub>).

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.

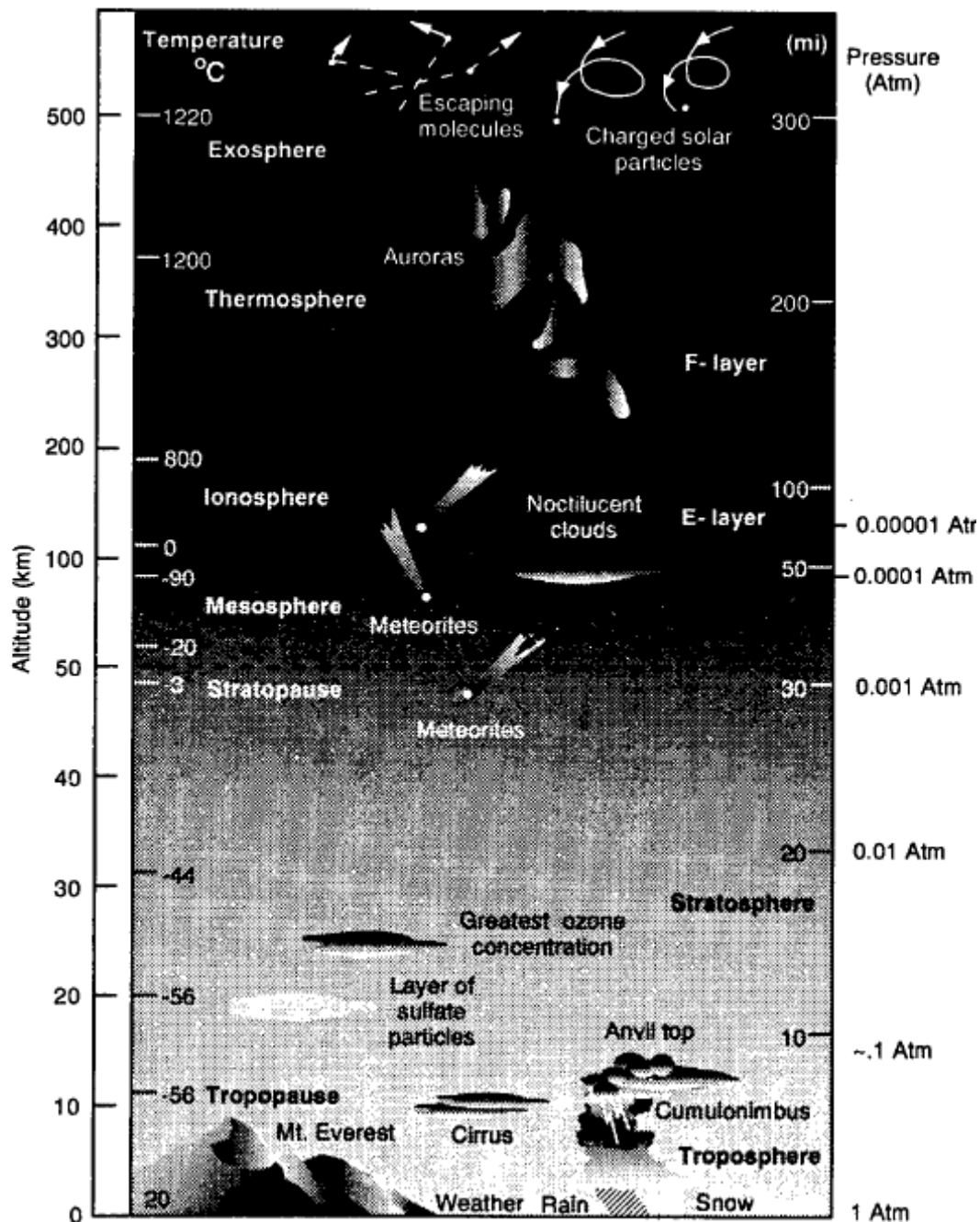


Figure 2.2: structure de l'atmosphère avec l'altitude. [2.3]

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 **Lu** du rayonnement à détecter (rayonnement "utile" ou de signal)
- La luminance apparente **Lp** 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 **Ld** 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 :

$$L_{app} = Lu + Lp + Ld \dots\dots\dots(2-1)$$

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 :

$$\tau_{at} = \tau_m \cdot \tau_d \dots\dots\dots(2.2)$$

$\tau_m$  Coefficient de transmission en présence de l'absorption moléculaire.

$\tau_d$  Coefficient de transmission en présence de diffusion par les particules.

## 2.2 absorption moléculaire

Le coefficient  $\tau_m$  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.

$$\tau_m = \tau_{H2O} \cdot \tau_{CO2}$$

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  $\tau_{CO_2}$  sera donc fonction uniquement de la distance parcourue D. [2.4]

### 2.3 les fenêtres atmosphériques

L'absorption moléculaire est un phénomène sélectif qui se traduit par une transmission spectrale de l'atmosphère présentant des zones transparentes appelées fenêtres de transmission atmosphériques, et des zones opaques ou fenêtres de blocage atmosphériques.

Les fenêtres de transmission dans le domaine infrarouge sont les suivantes :

- proche infrarouge ou IR I : 1.4 à 1.9  $\mu\text{m}$  et 1.9 à 2.7  $\mu\text{m}$
- IR moyen ou IR II : 2.7 à 4.3  $\mu\text{m}$  et 4.5 à 5.2  $\mu\text{m}$
- IR lointain IR III : 8 à 14  $\mu\text{m}$
- IR extrême ou IR IV : 16 à 28  $\mu\text{m}$

Pour la partie du spectre allant de l'UV à 15  $\mu\text{m}$  de longueur d'onde, la figure suivante présente les principales fenêtres de transmission atmosphériques. [2.5]

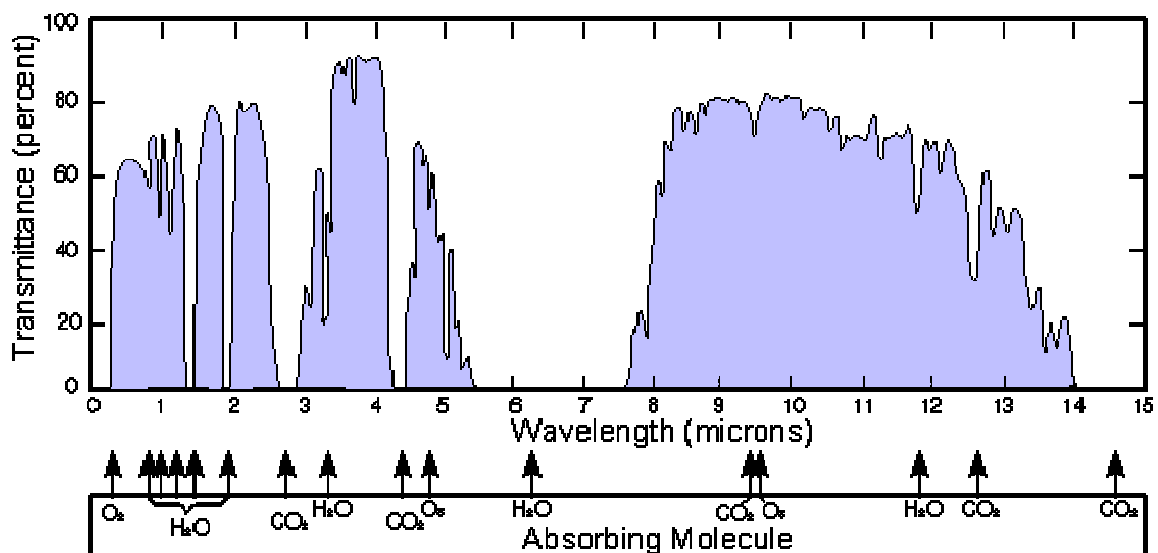


Figure 2.3 : principales fenêtres de transmission atmosphérique de l'UV à 15  $\mu\text{m}$ .

## 2.4 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  $\gamma$ . L'absorption moléculaire  $\alpha$  superposée à la diffusion est caractérisée par le coefficient d'extinction  $k$  ;  $\alpha = \gamma + k$ . [ $\text{mm}^{-1}$ ]

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  $\text{cm}^3$ , présente un coefficient de diffusion de la forme :

$$\gamma = \pi n k_0 r^2 \dots\dots\dots(2-4)$$

$K_0$  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.

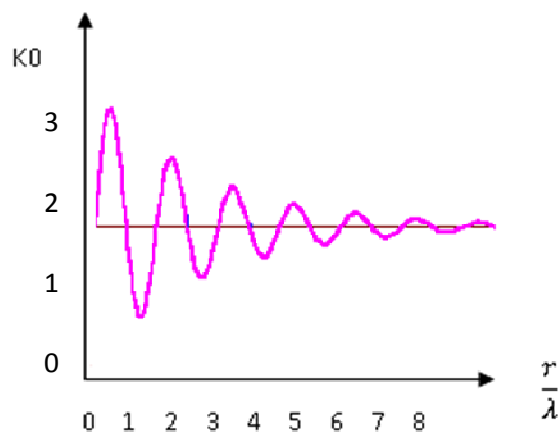


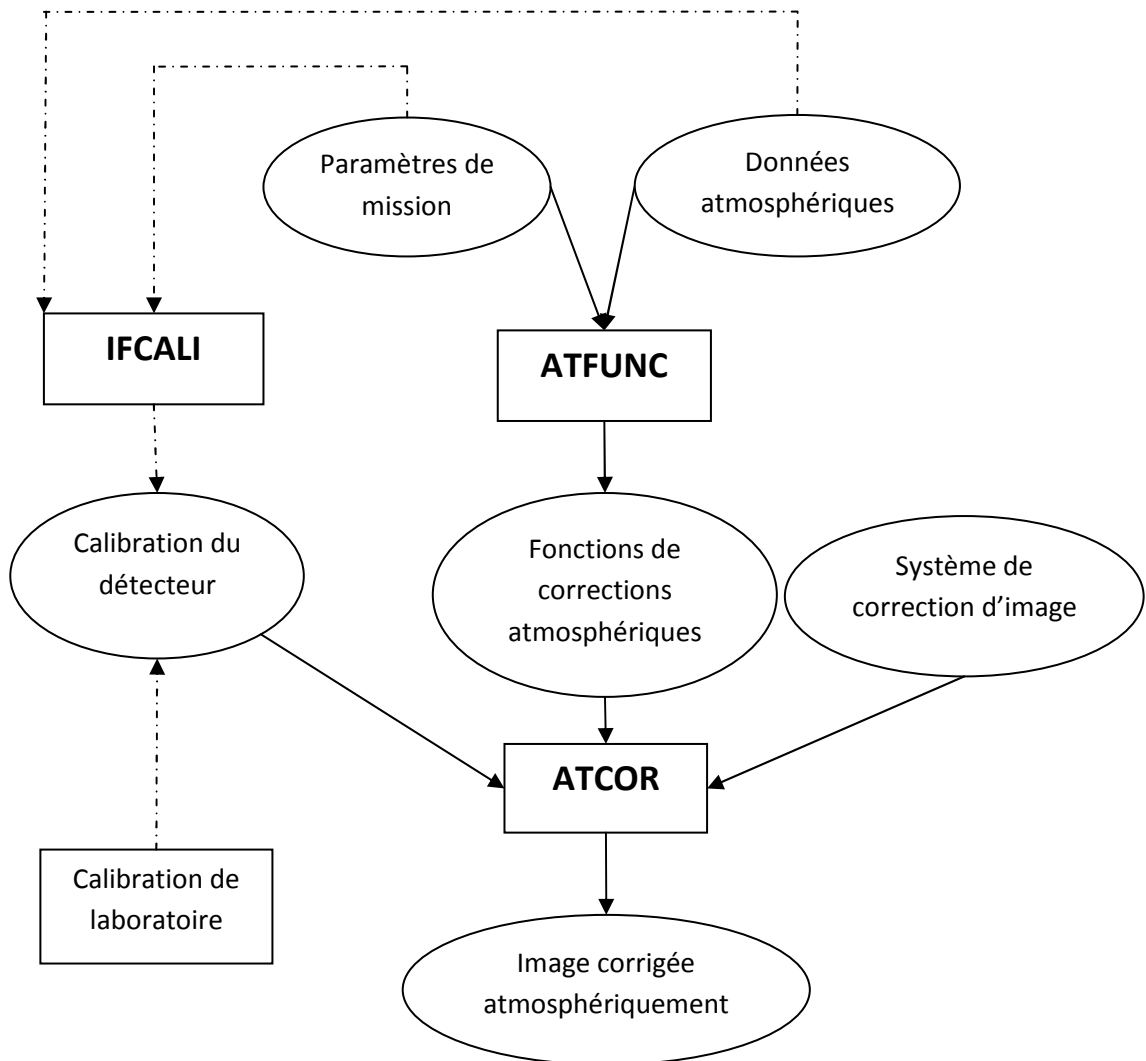
Figure 2.4 : variation de la fonction  $k0$  en fonction de  $r/\lambda$ . [1.4]

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

## 2.5 correction atmosphérique

Un progiciel pour la correction atmosphérique des données d'image enregistrées par sondes aéroportées hyper spectraux est développé par l'institut d'optoélectronique GARE (German Aerospace Research Establishment). Il se compose de trois modules principaux [2.6]:

Le schéma 2.5 montre un diagramme bloc des étapes de traitement principales utilisées pour obtenir une image corrigée atmosphériquement.



*Figure 2.5 : diagramme bloc des principales étapes de traitement pour obtenir une images corrigée atmosphériquement. [2.6]*

**ATFUNC** : calcule les fonctions atmosphériques de correction pour une atmosphère et une géométrie indiquées, en utilisant les codes de MODTRAN 2 [2.7] et de SENSAT [2.8]. Des résultats sont stockés comme tables de look-up. Après avoir défini les données d'entrée exigées, le programme peut être exécuté en ligne ou dans une exploitation par lots.

**ATCOR** : calcule la réflectivité sur l'image au sol pour les bandes spectrales réfléchissantes, et les images de température/émissivité pour les bandes thermiques.

**IFCALI** : dérive les coefficients de calibrage pour chaque bande réfléchissante basée sur des données de réflectivité mesurées au sol et les données atmosphériques indiquées.

Dans la région spectrale thermique ( $\mu\text{m}$  8-14) la contribution solaire peut être négligée et émise, et le rayonnement thermique reflété doit être pris en considération. Dans le moyen infrarouge ( $\mu\text{m}$  3-5) les radiances solaire et thermique contribuent au signal image.

La bande 3-5  $\mu\text{m}$  sera employée d'une façon qualitative pour l'acquisition de données de temps de jour et aucune correction d'atmosphère ne sera appliquée. Pour des émissions de nuit cette bande enregistre le rayonnement thermique émis et peut être incluse dans la correction atmosphérique ainsi que la bande 8-13  $\mu\text{m}$ . [2.9]

On peut conclure donc, que, pour accéder à la température de surface, il est nécessaire de connaître l'émissivité de la surface et le rayonnement atmosphérique. Concernant l'émissivité, plusieurs choix sont possibles : soit on dispose de mesures de terrain qui sont souvent très locales et lourdes à mettre en œuvre, soit on se réfère aux valeurs données dans la littérature. En ce qui concerne l'estimation du rayonnement atmosphérique et des corrections à effectuer pour obtenir la température de surface, différentes méthodes sont proposées suivant les mesures dont on dispose.

### **3. matériaux des systèmes infrarouges**

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

#### **3.1 les verres**

Les verres à base de quartz fondu ou de silice fondue donnent une transmission correcte jusqu'à  $5\mu\text{m}$ , 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 ( $\text{MgF}_2$ )  
*irtran 2* verre au sulfure de Zinc fritté ( $\text{ZnS}$ )  
*irtran 3* verre au fluorure de Calcium ( $\text{CaF}_2$ )  
*irtran 4* verre au séléniure de Zinc ( $\text{ZnSe}$ )  
*irtran 5* verre fritté à l'oxyde de magnésium ( $\text{MgO}$ )  
*irtran 6* verre au Tellure de Cadmium ( $\text{TeCd}$ )
- des verres de *chalcogénures* , contenant des éléments lourds tels que Arsenic, Antimoine, Thallium, sélénium, Tellure.
- Des verres au *trisulfure d'arsenic* ( $\text{As}_2\text{S}_3$ )
- Des verres à l'oxyde de germanium tels que le *vir 3* de *Sovirel*.

### 3.2 les cristaux

Les cristaux les plus utilisés sont :

- les *halogénures*, généralement monocristallins, tels que le *sel de gemme* ( $\text{NaCl}$ ), la *fluorine* ( $\text{KCl}$ ), la *cérargyrite* ( $\text{AgCl}$ ), le *bromoiodure de thallium* (KRS-5), le *Bromochlorure de thallium* (KRS-6), etc.
- les *semiconducteurs*, rares et coûteux à l'état monocristallin ; ils ont devenus relativement répandus sous la forme polycristalline. Il s'agit du silicium ( $\text{Si}$ ), du germanium ( $\text{Ge}$ ), de l'arséniure de gallium ( $\text{GaAs}$ ), etc.

### 3.3 les matériaux plastiques

Dans l'infrarouge, des composants en plastique ont pu être obtenus facilement par moulage. Les films de *polyéthylène* et de *plexiglas*, peuvent servir de fenêtres dans certains équipements et présentent une très bonne transmission dans l'infrarouge malgré la présence de bandes d'absorption étroites.



### 3.4 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). [3.1]

## 4. détecteurs du rayonnement infrarouge

Les méthodes de détection infrarouge reposent sur l'analyse du rayonnement émis. Pour cette analyse deux types de capteurs sont utilisés:

**1. les capteurs thermiques** pour lesquels le rayonnement de la surface est absorbé et transformé en chaleur. C'est cet échauffement du capteur, converti en signal électrique, qui constitue le paramètre thermosensible. (Le problème de ces détecteurs est que l'énergie thermique reçue est très faible parce que la conductivité thermique des éléments constituant l'atmosphère est très faible).

**2. les capteurs photoniques** (ou quantiques) pour lesquels l'absorption des photons est directement convertie en signal électrique par excitation d'électrons dans le matériau photosensible; cette excitation des électrons implique un seuil d'énergie minimal  $U_0$  pour les photons  $U_0=hc/\lambda_0$  participent à cette excitation; pour la réalisation de ces capteurs photoniques trois types différents de phénomènes peuvent être utilisées: la photo émission, la photoconduction et l'effet photovoltaïque. [4.1]

### 4.1 Caractéristiques des détecteurs [4.2][4.3]

#### 4.1.1 Sensibilité S

Soumis à un flux de rayonnement de puissance P (en Watts), le détecteur de surface A (en  $\text{cm}^2$ ) fournit un signal V (en volts ou en ampères). Sa sensibilité est :

$$S = \frac{\partial V}{\partial P} \text{ (En } V.W^{-1}\text{)}. \dots\dots\dots(4-1)$$

Et si la correspondance est linéaire :

$$S = \frac{V}{P} = \frac{V}{E.A} \dots\dots\dots(4-2)$$

D'où E est l'éclairement (en W.cm<sup>-2</sup>).

#### 4.1.2 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<sub>n</sub> égal à la valeur efficace de bruit du détecteur. La mesure est faite autour d'un point de fonctionnement :

$$PEB = \frac{1}{S} . V_n = \frac{E.A}{V} V_n \dots\dots\dots(4-3)$$

#### 4.1.3 Défectivité spécifique

La défectivité est donnée par :

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

De laquelle on tire 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 Δf de l'électronique associée, et de la racine carrée de la surface A,

$$Vn = K . \Delta f^{1/2} A^{1/2} \dots\dots\dots(4-5)$$

Avec K gain de l'appareil.

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

$$D^* = \Delta f^{1/2} . A^{1/2} / PEB \text{ (en cm} \cdot W^{-1} \cdot Hz^{1/2}) \dots\dots\dots(4-6)$$

La défectivité spécifique est donc le rapport signal/bruit pour un flux P de 1 W, une surface A de 1 cm<sup>2</sup>, 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 4.1 donne des exemples de détectivité spécifique de détecteurs utilisés en imagerie thermique et en thermographie.

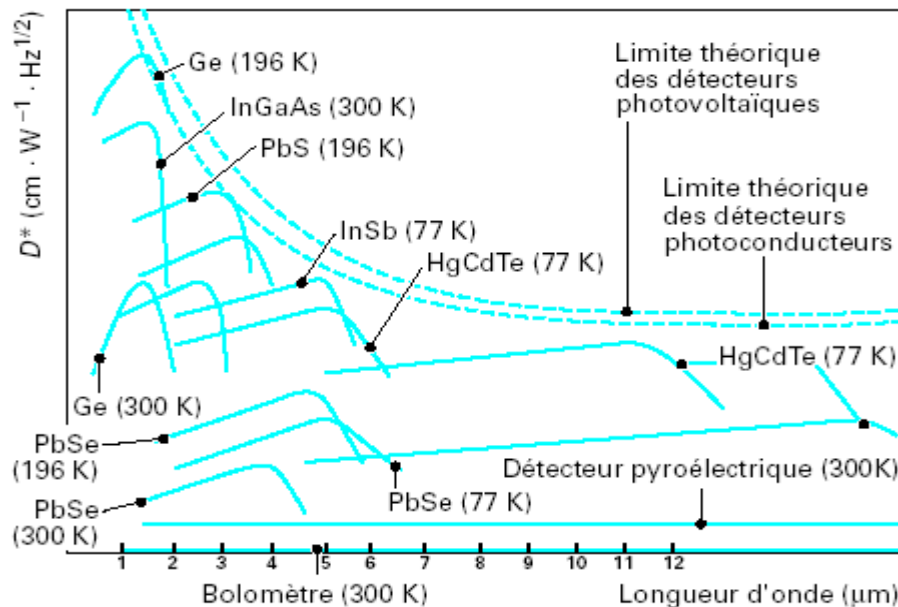


Figure 4.1 : Détectivités spécifiques de détecteurs à la température indiquée [4.3]

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 senseur et de la répartition de la température sur le senseur, 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.

## 4.2 Détecteurs thermiques [4.4],[4.5]

De nombreuses grandeurs physiques dépendent de la température. Le détecteur thermique est échauffé par le flux incident. L'échauffement est d'autant meilleur que le détecteur est mieux isolé thermiquement de son environnement et, plus particulièrement, du circuit de lecture sous-jacent, par une résistance thermique  $R_{th}$  élevée.

Par ailleurs, le détecteur est caractérisé par une capacité calorifique  $C_{th}$ . Le flux incident est ainsi filtré par un filtre passe-bas de constante de temps  $\tau_{ph} = R_{ph}.C_{ph}$

En conséquence, le temps de réponse est très long (environ 5 ms) vis-à-vis des bons détecteurs quantiques (environ 100 ns à 1  $\mu$ s). Intégrés en matrice, ils peuvent désormais entrer dans le champ de l'imagerie thermique au standard vidéo.

Sensible à l'énergie du rayonnement et non aux photons, le détecteur thermique ne présente pas, en principe, de sélectivité spectrale.

On peut utiliser le détecteur thermique, en principe encore, à température ordinaire, ce qui présente tout l'intérêt de ce type de détecteur. Mais, refroidi, il gagnerait en détectivité.

Les senseurs à détecteurs thermiques ( $\mu$ -bolomètres) ne nécessitent pas de refroidissement mais une stabilisation thermique très fine (par élément thermoélectrique Peltier). En effet, un écart de température de 1 °C sur la scène thermique induit un écart de température de l'ordre de (1/50) °C sur la matrice.

### **\*Composés utilisés**

En imagerie thermique, ce sont principalement des ferroélectriques : le PZT, titanate zirconate de plomb  $PbZr_{(1-x)}Ti_{(x)}O_3$  est le plus utilisé. Les imageurs l'employant sous forme de matrice sont incapables de mesure absolue (ils ne fournissent un signal que pour des variations de flux incident).

En thermographie, essentiellement, pour le bolomètre résistif, on utilise soit le silicium amorphe Si- $\alpha$ , soit l'oxyde de vanadium  $V_2O_5$ . Ces détecteurs thermiques sont aptes à la mesure absolue et sont associés en matrice de micro.

#### **4.2.1 les bolomètres**

Les bolomètres sont des détecteurs thermiques comportant un matériau dont la conductivité varie avec la température. Pour observer cette variation de résistance, il est nécessaire d'appliquer une tension aux composants. Pour éviter les dérives en courant provenant des variations de température ambiante, un bolomètre utilise généralement 2 éléments identiques, dont l'un est exposé au rayonnement à détecter et l'autre protège de ce

rayonnement; la variation de résistance entre ces 2 éléments essentiellement due au flux de signal recherché est alors mesurée dans un montage à pont de Wheatstone (Figure 4.2)

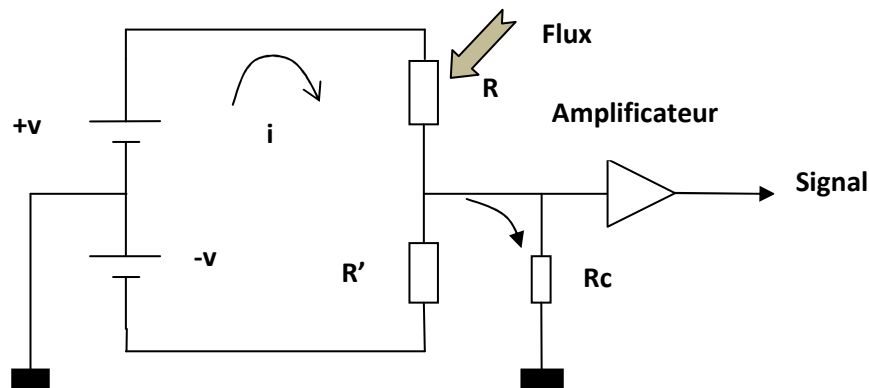


Figure 4.2 : schéma électrique d'un bolomètre

Les matériaux employés sont des métaux ou des semi-conducteurs (thermistances). A très basse température, la supraconductivité et la faiblesse de l'agitation thermique des électrons conduisent à la réalisation de détecteurs dans l'infrarouge sensibles et rapides. [4.6]

#### 4.2.2 Pyroélectriques

L'effet pyroélectrique se manifeste dans les cristaux isolants dont la maille ne présente pas de centre de symétrie. Il consiste en un déplacement global des électrons de liaison par rapport au réseau cristallin en fonction de la température. Si l'on dépose 2 électrodes sur les faces d'une lame d'un matériau pyroélectrique perpendiculairement à la direction de ce déplacement, ces dernières prélèveront les charges qui se seront déplacées à chaque variation de température du Crystal soumis à un éclairage variable.

Il faut noter que le signal électrique recueilli (courant) est proportionnel à la variation dans le temps du nombre de charges collectées par les électrodes. Il est donc nul si le flux incident sur le matériau est constant. Ces détecteurs ne peuvent donc s'utiliser que pour détecter des rayonnements modulés en fonction du temps. Ils constituent les plus rapides des détecteurs thermiques.

Les matériaux utilisés pour la constitution des détecteurs pyroélectriques sont le sulfate de glycolle (TGS), le titanate de Baryum ( $\text{BaTiO}_3$ ), le tantalite de Lithium ( $\text{LiTaO}_3$ ). ils se présentent généralement sous la forme de détecteurs élémentaires, avec des surfaces sensibles de l'ordre de 1 à quelques  $\text{mm}^2$ , sur un domaine spectral de 2 à 35  $\mu\text{m}$ . Ils

peuvent aussi se montrer dans des tubes à imagerie infrarouge ("pyricon"): ils y présentent l'intérêt de ne pas nécessiter de système de refroidissement, mais par contre leur détectivité demeure beaucoup plus faible que celle des détecteurs quantiques, ils sont microphoniques et nécessitent l'emploi de modulateurs de lumière.

#### 4.2.3 thermocouple ou thermopile

Une thermopile est constituée d'une chaîne de thermocouples, soudures produisant une d.d.p. par effet thermoélectrique (effet Seebeck) sous l'effet d'une différence de température) (Figure 4.3). Les soudures "chaudes" sont en contact avec l'absorbeur qui élève leur température par rapport à l'ambiante sous l'effet du rayonnement incident et les soudures "froides" maintenues à la température ambiante par contact avec une masse à forte inertie thermique.

La mise en série de plusieurs thermocouples permet de recueillir une tension proportionnelle à leur nombre. Le facteur de réponse de tels dispositifs va de quelques V/W à quelques dizaines de V/W et leur temps de réponse de quelques 10 à 100 ms. Les thermopiles fonctionnent sans polarisation.

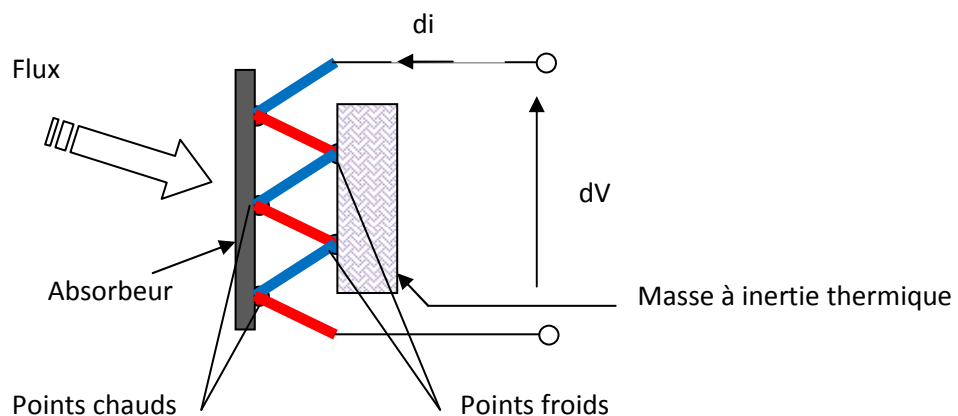


Figure 4.3 : Thermopile [4.6]

#### 4.3 détecteurs quantiques

Les deux points clés de ce type de détection sont la sélectivité spectrale et le besoin de refroidissement des détecteurs. Un photon de longueur d'onde  $\lambda$  a une énergie :  $E_{ph} = hc / \lambda$ . Avec  $h$  constante de Planck,  $c$  vitesse de la lumière. Ce photon n'est absorbé par le matériau de détection (semi-conducteur) que si son énergie est supérieure à un seuil. Le seuil est le gap du semi-conducteur  $E_g$  (différence d'énergie entre la bande de valence et la bande de

conduction) :  $E_{ph} > E_g$ . Ce seuil  $E_g$  induit une sélectivité spectrale dans la conversion : la longueur d'onde détectable  $\lambda$  est inférieure à la longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$  :  $\lambda_c = hc / E_g$

La création de paires électron – trou due à l'absorption de photons (création photonique) est en concurrence avec la création de paires due à l'agitation thermique du réseau cristallin liée à la température de fonctionnement  $T_f$  ; celle-ci varie comme  $\exp (- E_g / kT_f)$ , où  $K$  constante de Boltzmann. Cette création thermique brouille l'information sur les photons incidents et doit être minimisée par refroidissement du détecteur. [4.3],[4.4]

Afin de permettre une résolution thermique satisfaisant aux besoins d'imagerie (DTEB de l'ordre de 0,1°C à 30°C), les senseurs à détecteurs quantiques SW et LW sont nécessairement refroidis :

- à une température dite cryogénique (de l'ordre de – 200 °C) pour les senseurs LW ou les PtSi et InSb (SW). Cette température est obtenue par le montage du senseur dans un Dewar contenant de l'azote liquide ou dans un cryostat refroidi par une machine frigorifique (compresseur à cycle Stirling) ;
- à une température intermédiaire (de l'ordre de – 70 °C) pour certains senseurs HgCdTe (SW), température obtenue par des éléments thermoélectriques (à effet Peltier). [4.7]

#### \* Composés utilisés

En thermographie, seule la détection intrinsèque est mise en œuvre. Tous les semi-conducteurs « essayés » sont des composés issus des colonnes IIIB et VB de la table de Mendeleïev : on parle de composés 3-5 binaires ou ternaires.

Le **germanium** est un composant relativement instable ne permettant pas d'effectuer des mesures fiables.

L'**InAsGa** n'est pas encore très répandu. Non refroidi, il entre dans la réalisation de caméra thermique proche infrarouge à senseur matriciel (0,9 à 1,7  $\mu\text{m}$ ).

Le **PtSi**, du fait de son rendement quantique médiocre (inférieur à 1 %), n'est utilisé que dans les senseurs matriciels. Très stable et reproductible, son utilisation en matrice SW (Short Waves) est favorable aux mesures au standard vidéo.

L'**InSb** est un composant photovoltaïque très stable et sa sensibilité est constante (linéarité) sur une très grande dynamique, ce qui justifie qu'il soit souvent appelé détecteur théorique, puisque l'on sait prévoir son comportement. C'est le meilleur détecteur pour la

bande 2 à 5  $\mu\text{m}$ . De haut rendement quantique (supérieur à 80 %), il est apte à la thermographie rapide.

L'**HgCdTe** ou **MCT**, plus répandu du fait de l'adaptation aisée de la bande spectrale par dosage des composés de base, reste le composant le moins reproductible et le moins stable malgré les lourds moyens mis en œuvre pour maîtriser la technologie de fabrication des matrices. En photoconducteur, il est non linéaire et nécessite une correction de la courbe d'étalonnage. En photovoltaïque (pour les matrices), le **MCT** présente davantage de bruit : la destination en est principalement l'imagerie thermique rapide du fait de son bon rendement quantique (supérieur à 80 %) et de son faible temps de réponse.

Les détecteurs à puits quantique **QWIP** (Quantum Well Infrared Photodetector) font une percée en LW (Long Waves) où ils concurrenceront avantageusement les **MCT** par un faible bruit spatial fixe, un coût de fabrication faible et d'une forte sélectivité spectrale. De rendement quantique faible (inférieur à 10 %, mais certains annoncent 50 % pour un concept breveté), ils seront préférés en thermographie au standard vidéo.

Des détecteurs **PbS** et **PbSe** sont encore utilisés dans certains analyseurs ligne. Ce sont les plus anciens détecteurs quantiques utilisés en infrarouge. [4.8]

#### 4.3.1 détecteur photoconducteur

L'absorption d'un rayonnement d'énergie photonique suffisamment élevée, par les électrons d'un matériau semi-conducteur homogène, y provoque une augmentation de la densité des charges libres, donc de sa conductivité électrique. Un tel semi-conducteur se comporte en détecteur (photoconducteur) de la lumière par l'augmentation de sa conductance sous l'effet du rayonnement. Comme dans le cas des bolomètres, une polarisation extérieure est nécessaire pour exploiter cette variation de résistance.

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. [4.6]

### 4.3.2 détecteur photovoltaïque

L'utilisation d'un semi-conducteur dans le mode photovoltaïque suppose par définition la présence de une ou plusieurs jonctions entre régions homogènes (dopées N et P) de ce semi-conducteur. Si le composant ne comporte qu'une jonction, il s'agit d'une photodiode ; s'il en comporte 2, c'est un phototransistor qui intègre à la fois les fonctions de détection et de pré-amplification de courant (typiquement de 50 à 200) par effet transistor ; s'il y a 3 jonctions, on a affaire à un photo-thyristor.

Une jonction éclairée par un flux lumineux de longueur d'onde  $\lambda < \lambda_c$ , absorbe une fraction des photons incidents en créant des paires électron-trou, aussi bien dans les régions homogènes qu'à l'interface (zone de charge d'espace). C'est là que le phénomène est le plus important car chaque porteur créé dans cette zone est soumis au champ local, les électrons étant accélérées vers la zone N et les trous vers la zone P. Ainsi séparés, ils ne peuvent plus se recombiner et contribuent à accroître le courant d'une valeur proportionnelle au flux incident.

Le mode de détection photovoltaïque ne peut mettre en œuvre que des semi-conducteurs intrinsèques (création de paires électron-trou), ce qui limite le choix des matériaux utilisables par rapport aux possibilités du mode photoconducteur. Par contre, les détecteurs en mode photovoltaïque présentent l'avantage d'une plus grande rapidité (bandes passantes de plusieurs gigahertz) et d'un bruit plus réduit (absence de recombinaison) qu'en mode photoconducteur. [4.6]

### 4.4 détecteurs multiéléments

La sensibilité thermique d'une caméra varie comme la racine carrée du nombre d'éléments détecteurs. 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 :

1. la fréquence ligne de la télévision étant égale à 15625 lignes/s (625 lignes \* 25 images/s) selon le standard européen 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).

2. le débit d'information, au niveau du détecteur, est très élevé (12Mpixels/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 4.5 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 4.5 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 4.5c)

- 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 4.5d)

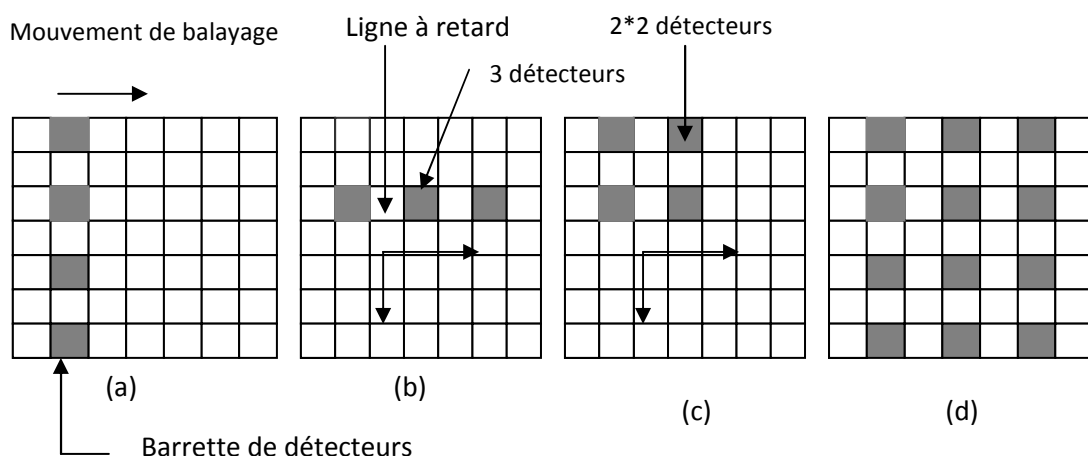


Figure 4.5: détecteurs à éléments multiples : (a) parallèle, (b) série, (c) série-parallèle, (d) micro balayage. [4.9]

#### 4.4.1 Dispositif à transfert de charges CCD

On les désigne souvent par l'appellation anglaise de CCD (charge coupled devices). La figure 4.6 donne des exemples d'analyseurs CCD (linéaires et matriciels).

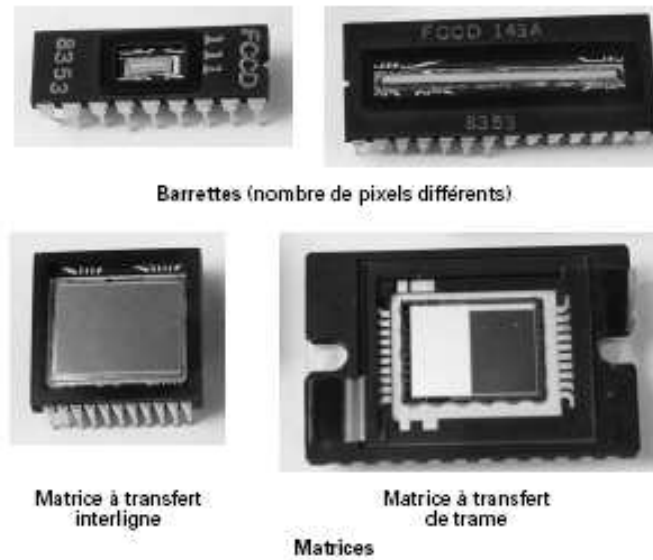


Figure 4.6 : Exemples d'analyseurs intégrés (CCD) linéaires et matriciels. [4.10]

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 ligne et en matrice. 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 4.7.

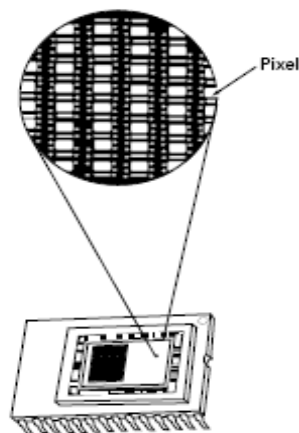


Figure 4.7 : Structure d'un analyseur CCD matriciel. [4.10]

La conversion optoélectronique est réalisée dans les cellules élémentaires qui peuvent être des photodiodes ou des photocalapacités 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 reposant largement sur la technologie MOS, nous en rappellerons quelques principes de base. [4.11]

#### 4.4.2 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,  $\text{SiO}_2$ ) et d'une grille ou conducteur.

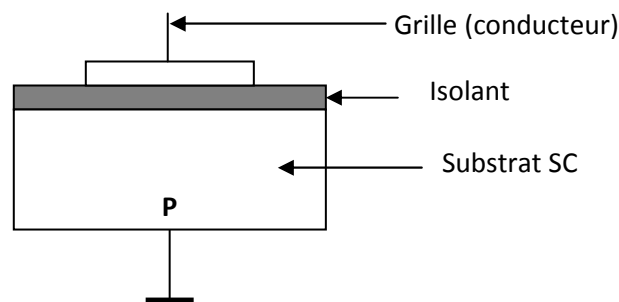


Figure 4.8 : condensateur MOS

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 4.9)

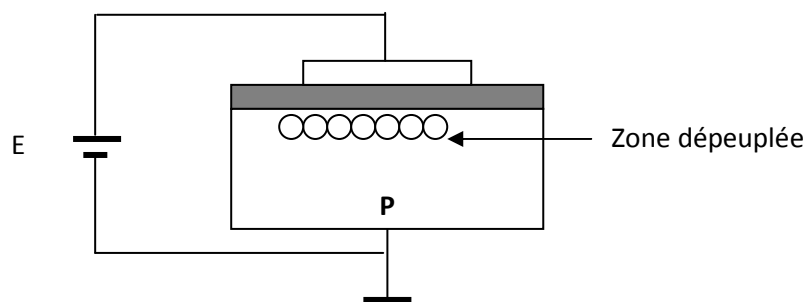


Figure 4.9 : création de la zone dépeuplée.

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.

#### **4.4.3 Injection optique**

La grille et l'isolant sont assez minces pour être transparents. Quand un photon de longueur d'onde approprié 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. [2.1]

#### **4.4.4 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 4.10, 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. [2.1]

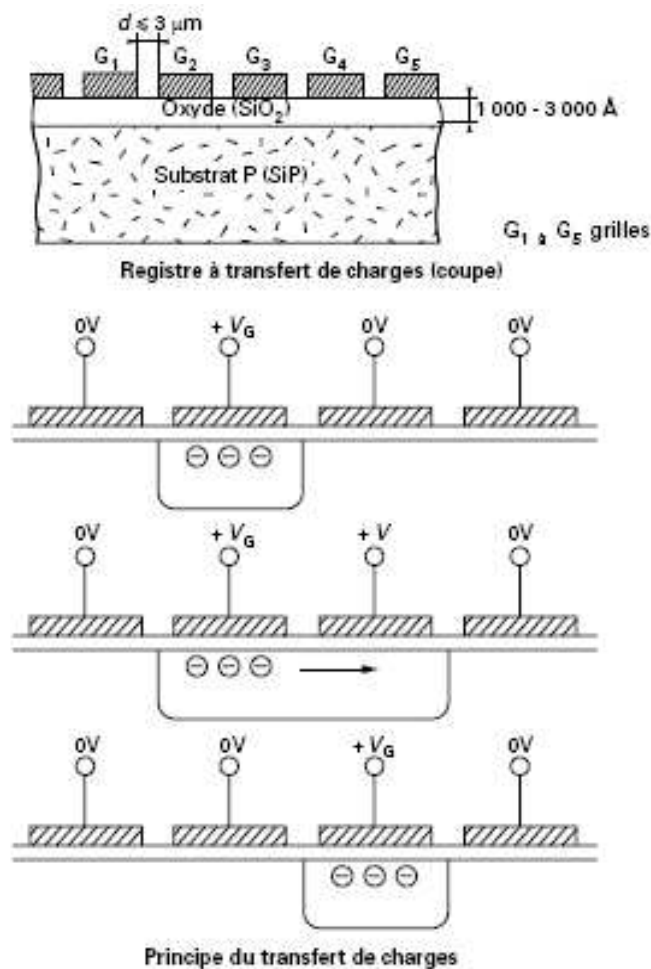


Figure 4.10 : Registre CCD et principe du transfert de charges (canal en surface)

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 SiO<sub>2</sub>-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 4.10.

Ces dispositifs constituent donc des organes de transfert des charges stockées dans une photocapacité MOS vers un dispositif de lecture. [4.11]

Chaque détecteur possède sa propre fonction de transfert et doit être étalonné individuellement. Les détecteurs étant identiques, l'angle solide définissant le champ instantané est identique ; les dimensions des pixels sont légèrement plus grandes sur les bords de la ligne puisque on a une projection conique.

Comme un détecteur doit recevoir une énergie minimale pour être activé, si l'on prend une bande relativement large, la quantité d'énergie est plus grande que pour une bande étroite et on peut prendre un pixel d'une superficie plus petite. [2.1]

## **5. 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.

Si l'on veut observer la température des objets froids, donc mesurer le rayonnement émis par ces objets, il faut aider notre œil en l'équipant d'une prothèse onéreuse, prothèse qui décale le spectre de fonctionnement de notre œil vers les longueurs d'onde de l'infrarouge.

La méthodologie de principe (figure 5.1) 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.

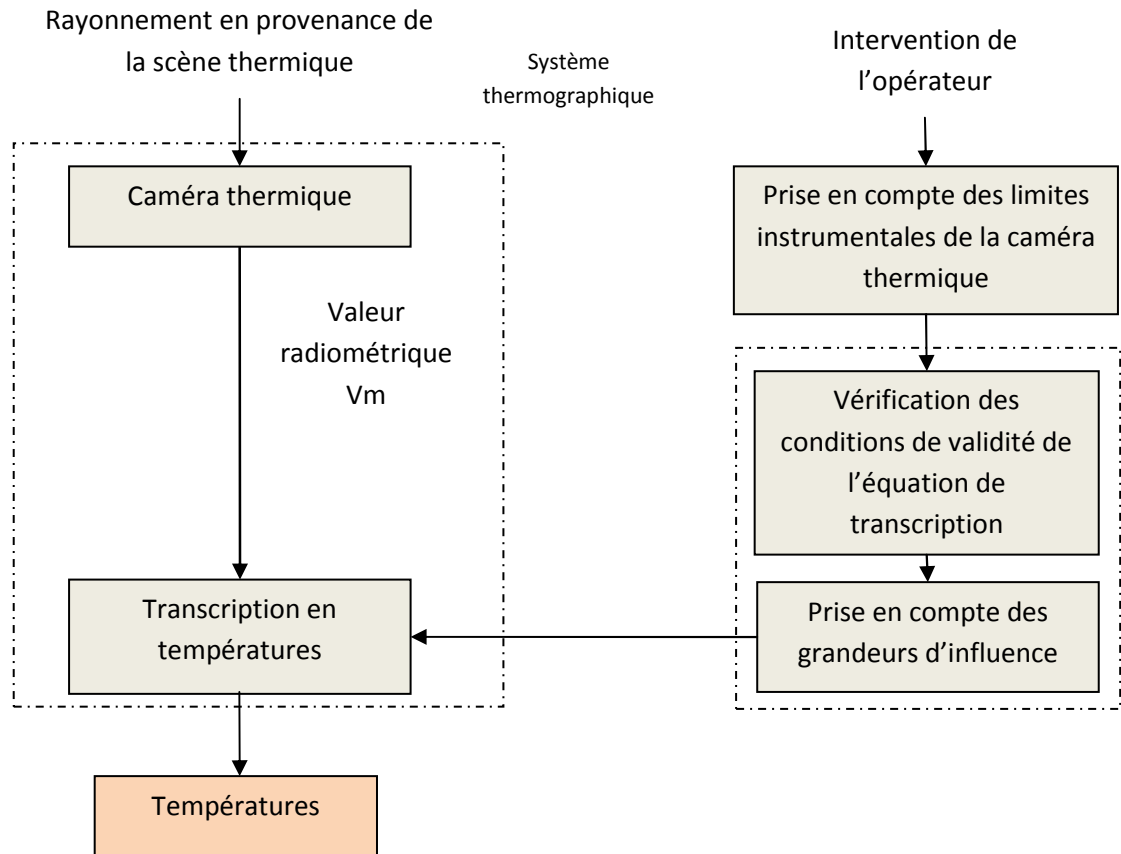


Figure 5.1 Démarche méthodologique de la mesure thermographique. [1.1]

## 5.1 Signal donné par le détecteur

Lorsqu'on observe le rayonnement d'une surface opaque, plusieurs facteurs d'influence peuvent gêner l'exploitation du résultat: d'une part, l'émission du milieu environnant ainsi que les réflexions sur la surface, d'autre part, les absorptions par l'atmosphère interposée entre la surface observée et l'instrument d'observation.

Dans le cas le plus général (figure 5.2), en ne considérant que le rayonnement monochromatique de longueur d'onde  $\lambda$ . Soit  $T$  la température de la surface, **température vraie** qu'on veut déterminer, et  $\varepsilon(\lambda)$  son émissivité monochromatique. Le matériau visé étant supposé opaque, sa réflectivité est  $R(\lambda) = 1 - \varepsilon(\lambda)$

Le milieu environnant la surface étudiée est à une température  $T_e$  [température de luminance définissant la luminance monochromatique de ce milieu  $L_\lambda^{CN}(T_e)$ ]. Supposons qu'entre la surface, le milieu environnant et le capteur existe une atmosphère, qui ne soit pas totalement transparente, et soient  $\tau_{\lambda,atm}$ , et  $T_{atm}$  le facteur de transmission et la température de luminance, de l'atmosphère.



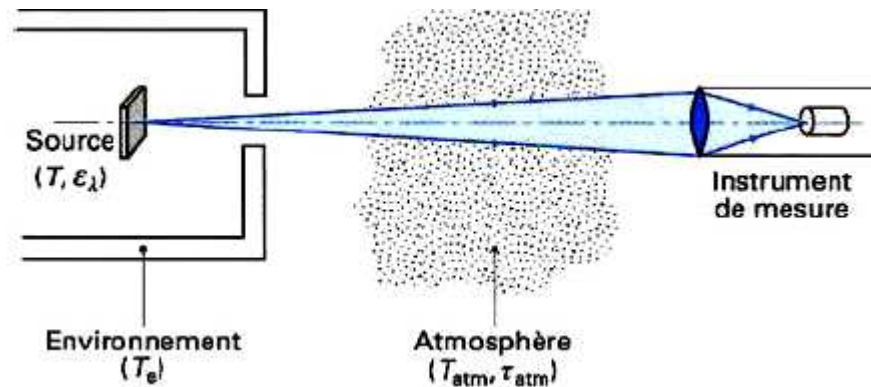


Figure 5.2 : Observation de l'émission d'une source placée dans un environnement à travers une atmosphère.

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

$$L_{mes} = [\varepsilon(\lambda).L_{\lambda}^{CN}(T) + R(\lambda).L_{\lambda}^{CN}(Te)]\tau_{\lambda,atm} + (1 - \tau_{\lambda,atm}).L_{\lambda}^{CN}(T_{atm}) \dots\dots\dots(5-1)$$

Flux : { émis }                      { réfléchi }                      { émis }

          { Par la surface }                      { Par l'atmosphère }

          { et transmis par l'atmosphère }

Les grandeurs d'influence sont donc  $\varepsilon(\lambda)$ ,  $R(\lambda)$ ,  $Te$ ,  $\tau_{atm}$  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 :

$$L_{mes} = [\varepsilon(\lambda).L_{\lambda}^{CN}(T) + R(\lambda).L_{\lambda}^{CN}(T_e)] \cdot \tau_{\lambda,atm} \dots\dots\dots(5-2) \quad [5.1]$$

L'optique de diamètre  $\Phi$ , 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  $s = A(x/x')^2$ .

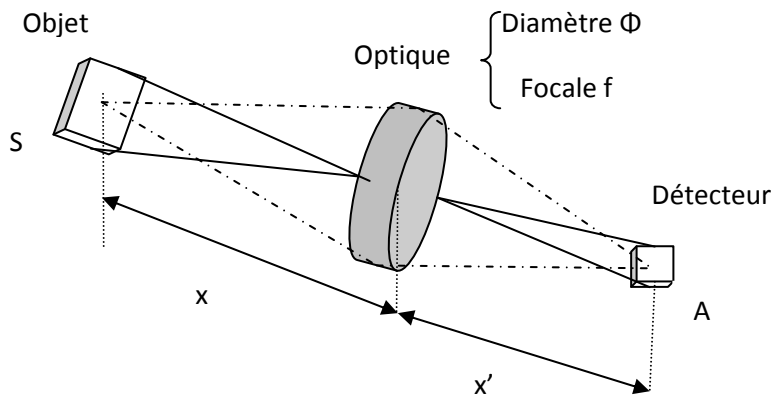


Figure 5.3 : schéma simplifié d'un radiomètre.

L'étendue géométrique définie par un tel système est :

$$G = \frac{\pi \Phi^2 A}{4x'^2} \dots \dots \dots (5-3)$$

Le flux reçu par le détecteur est :

$$F = L_{mes} \cdot \tau_{op} \cdot G \dots \dots \dots (5-4)$$

$\tau_{op}$  est le facteur de transmission de l'optique.

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

$$s = S \cdot F \dots \dots \dots (5-5)$$

S est la sensibilité du détecteur.

Lorsque tous ces coefficients de proportionnalité sont connus il est possible de faire correspondre à chaque valeur de l'amplitude du signal s, une température T moyenne contenue dans le champ objet. [5.2]

## 5.2 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).

De plus l'optique ne doit présenter de vignettage, source de bruit en infrarouge par l'émission parasite du système lui-même.

Lorsque ces conditions sont satisfaisantes, il est possible de définir plusieurs modes de balayage du champ par un détecteur. [5.3]

### 5.2.1 le balayage bidirectionnel par un détecteur unique

Un balayage d'amplitude totale horizontale y et d'amplitude totale verticale z par un champ élémentaire dy.dz délivre  $\frac{y \cdot z}{dy \cdot dz}$  points images par trame, soient  $f \cdot \frac{y \cdot z}{dy \cdot dz}$  points par seconde lorsque cette trame est répétée à la fréquence f. Généralement 20 à 30 % de ces amplitudes totales de balayage sont utilisées pour les retours de balayage, le champ utile est ainsi réduit de la même proportion. (figure 5.4)

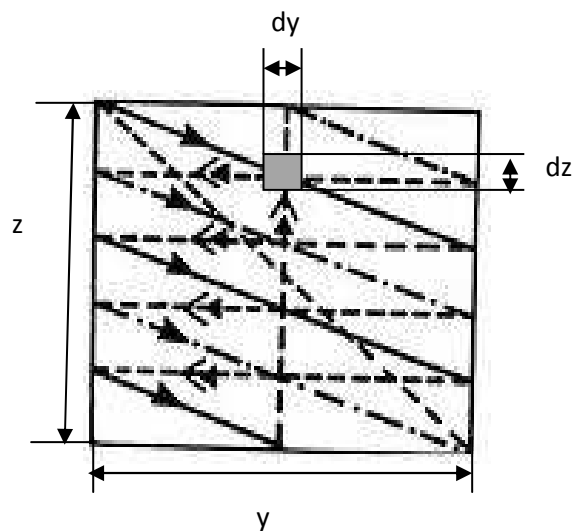


Figure 5.4 : balayage bidirectionnel par un détecteur unique.

### 5.2.2 le balayage par une barrette de n éléments en parallèle

La barrette perpendiculaire à la direction du balayage inscrit simultanément n lignes pour un seul balayage horizontal. Les n champs instantanés sont lus en parallèle, et la bande passante du signal vidéo devient :

$$\Delta v = \frac{1}{2} \cdot \frac{f \cdot y \cdot z}{n \cdot dy \cdot dz} \dots\dots\dots(5-6)$$

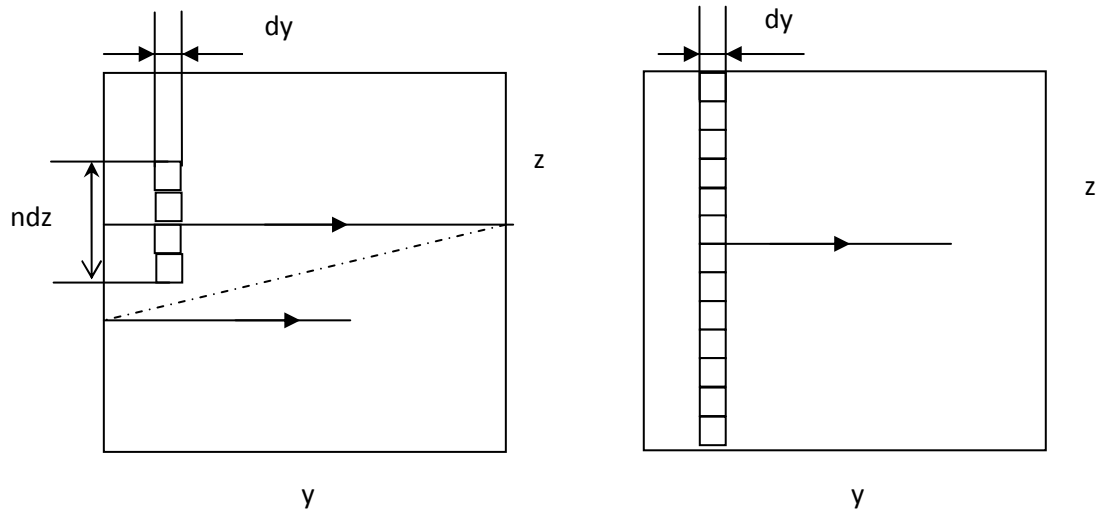


Figure 5.5 : balayage par une barrette en parallèle.

### 5.2.3 le balayage par une barrette de $p$ éléments en série

La barrette est ici considérée comme un détecteur unique (figure 5.6). Un point du champ est analysé successivement par chaque détecteur. Les signaux obtenus sont recalés en phase par des lignes à retard, puis additionnés.

L'analyse série qui garde l'inconvénient d'un balayage bidirectionnel rapide donne par contre une détectivité apparente plus élevée ( $D^*_{app} = \sqrt{p} \cdot D^*$ ), de plus, la destruction d'un élément n'entraîne pas d'effet visible dans l'image et enfin, la sommation cohérente des signaux issus de chaque détecteur élémentaire élimine les effets dus à la dispersion des détectivités.

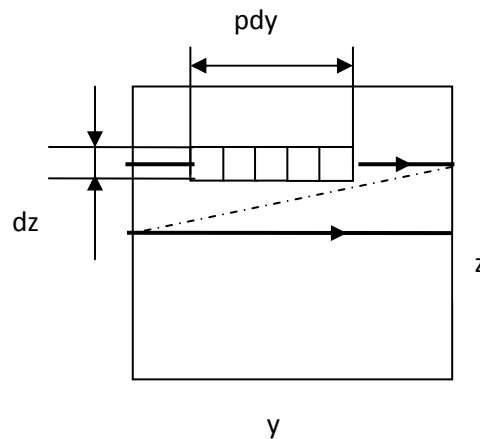


Figure 5.6 : balayage par une barrette en série.

#### 5.2.4 l'analyse série-parallèle par une mosaïque bidimensionnelle

Les deux configurations de balayage précédentes donnent sensiblement des performances équivalentes. Le gain en détectivité est ainsi  $\sqrt{n} \cdot \sqrt{p}$ , avec des balayages qui peuvent être plus lents.

Ce mode d'analyse pourrait être utilisé techniquement avec succès en thermographie, en raison de l'uniformité de la sensibilité dans le champ.

Si le nombre de détecteurs est tel que  $n=z/dz$  et  $p=y/dy$ , tout le champ est analysé globalement sans balayage optique.

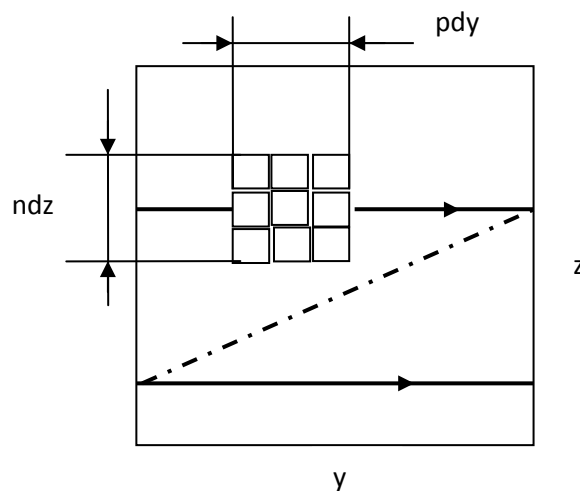


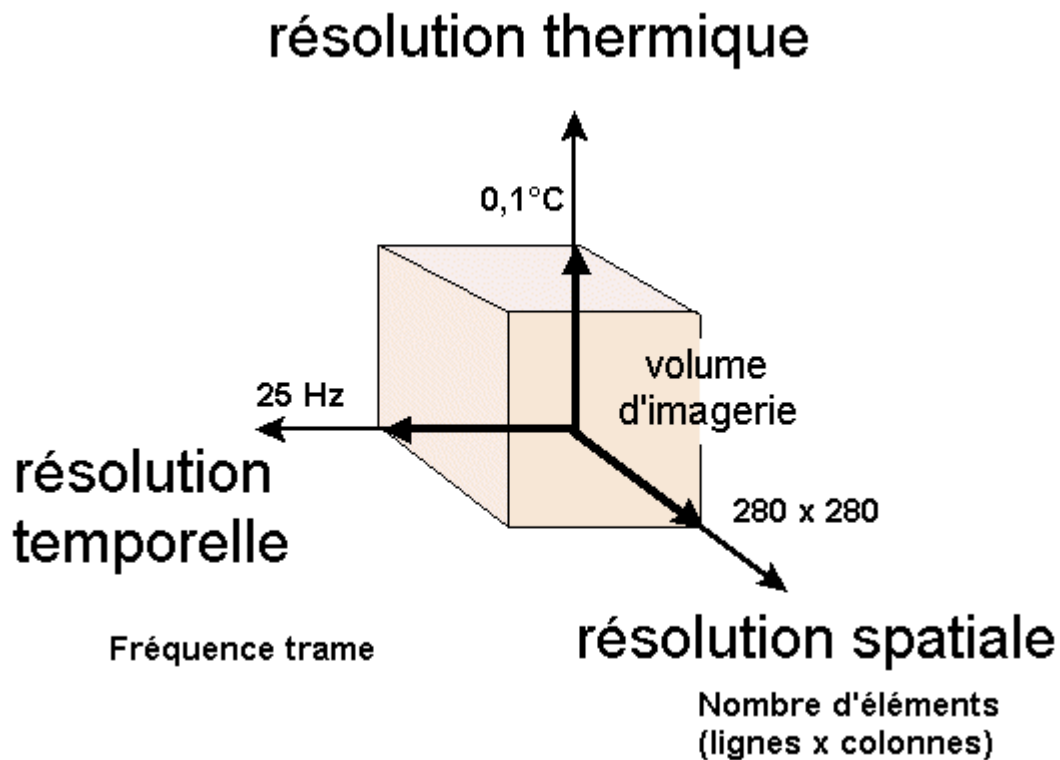
Figure 5.7 : balayage par une mosaïque bidimensionnelle.

Le balayage opto-mécanique a été récemment supprimé, remplacé par une structure matricielle à grand nombre de détecteurs (au-delà de  $256 \times 256$ ). Ce sont les matrices « fixes » (staring arrays) ou matrices plan focal (Focal Plane Arrays FPA), puisqu'elles sont placées dans le plan focal de l'objectif pour une visée à l'infini. [1.4]

### 5.3 Caméra thermique

Comme tout appareil de mesure, la caméra thermique se spécifie par un ensemble de caractéristiques qui doivent être comprises par le thermographe.

S'agissant d'une caméra fournissant une image, elle a des caractéristiques d'imagerie qui se déclinent dans les trois dimensions de l'espace de l'imagerie ou espace des résolutions : résolutions thermique, spatiale et temporelle.



*Figure 5.8 : Espace de l'imagerie ou espace des résolutions.*

La résolution temporelle recherchée en imagerie est naturellement celle du standard vidéo, soit 25 ou 50 trames par seconde.

Si l'on augmente la résolution spatiale, la bande passante électronique s'accroît corrélativement ; c'est l'une des raisons qui ont poussé les technologues à employer des circuits de lecture CMOS plutôt que les circuits à CCD. [5.4]

S'agissant d'une caméra de mesure, elle se spécifie par des caractéristiques d'appareil de mesure, dans l'espace de la mesure thermographique et suivant les trois mêmes dimensions, thermique, spatiale et temporelle.

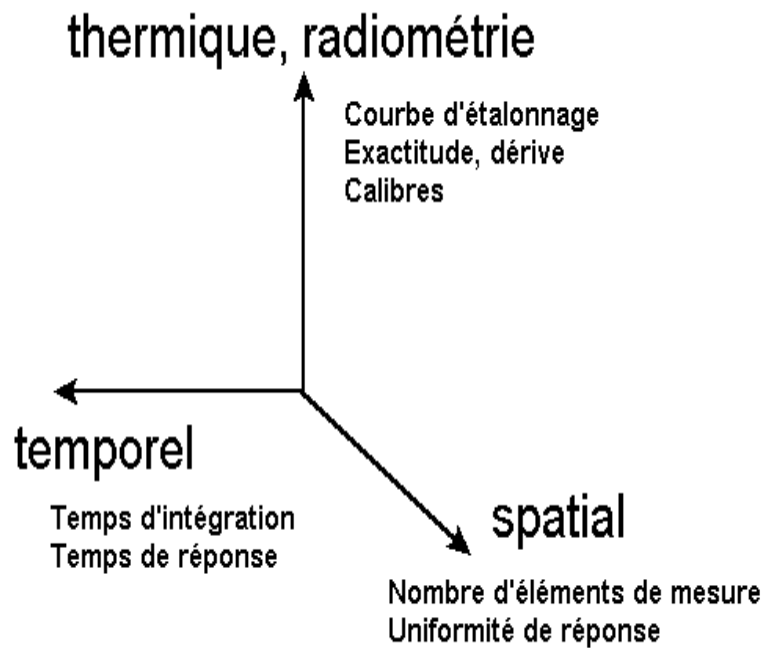


Figure 5.9 : Espace de la mesure thermographique.

On trouve dans la dimension thermique les caractéristiques d'étalonnage, d'exactitude, de dérive, de calibres de mesure, ...

Dans la dimension spatiale des deux espaces, le thermographe ne confond pas les résolutions spatiales d'observation (pour l'image) et de mesure (pour la mesure).

### 5.3.1 balayage spatial optomécanique

Les caméras classiques sont conceptuellement une extension de la radiométrie à monodétecteur par l'adjonction d'un balayage spatial opto-mécanique (fig 5.10 et exemple 5.11).

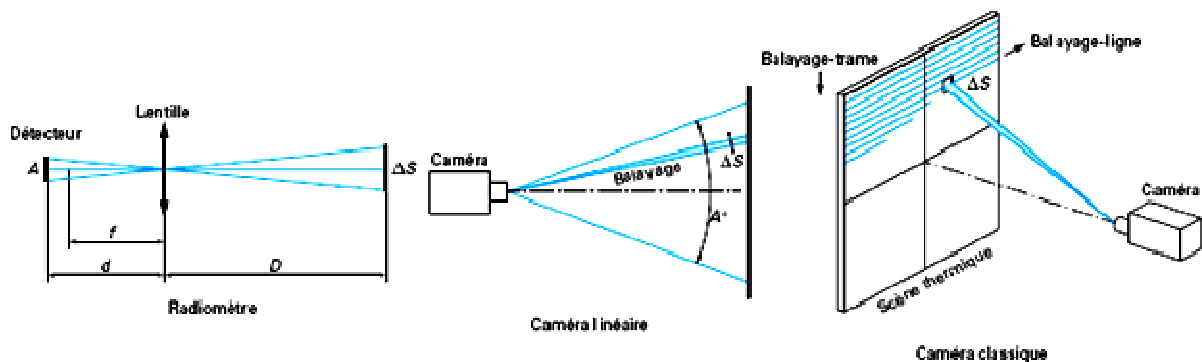


Figure 5.10 : Principe de l'optique d'une caméra à balayage optomécanique. [5.5]

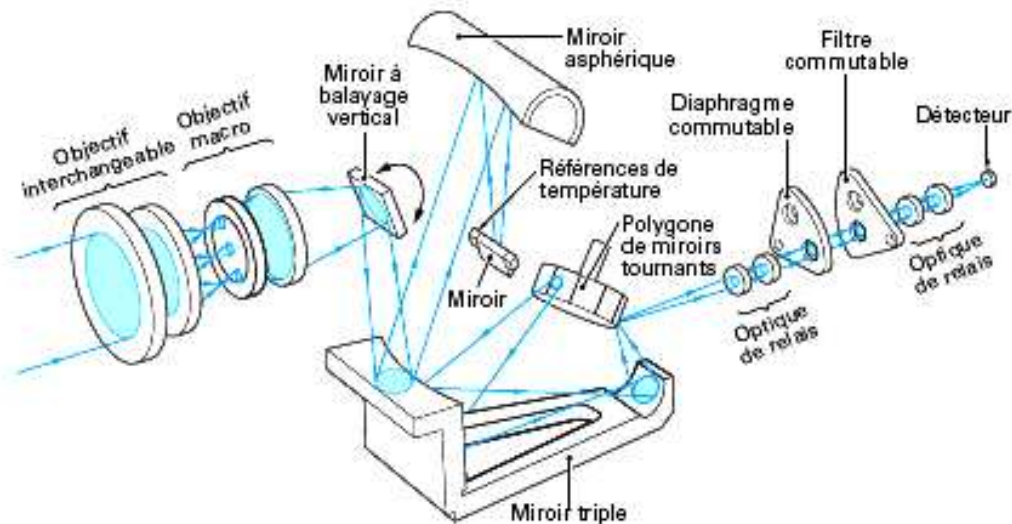


Figure 5.11 : Éclaté de la partie optique de la caméra THERMOVISION 800. [5.5]

Le balayage conjugué le détecteur avec une surface élémentaire  $\Delta S$  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.

### 5.3.2 Balayage spatial électronique

La caméra à matrice fixe dispose d'un très grand nombre de détecteurs rangés en lignes et en colonnes (environ  $100 \times 100$  à plus de  $800 \times 600$ ). Chacun des détecteurs est le conjugué d'une seule surface élémentaire discrète  $\Delta S$  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 5.12)



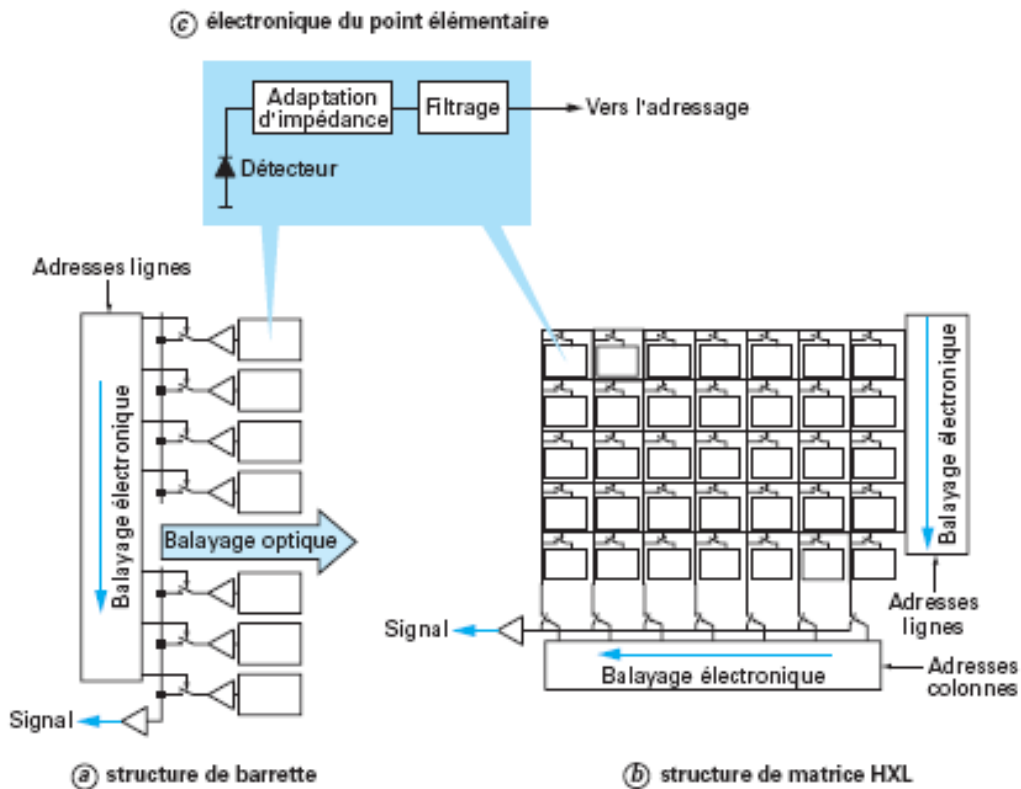


Figure 5.12 : Structures de principe des balayages d'une caméra linéaire (à barrette) et d'une caméra à matrice. [5.5]

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. [5.6]

On constate donc que le thermographe se doit de connaître son appareil, ses caractéristiques, ses limites et son bon état de fonctionnement à l'instant où il le met en œuvre.

#### 5.4 Etalonnage des images en température

L'amplitude du signal issu de la caméra infrarouge est une fonction de la température du corps noir observé, décrite par une loi exponentielle de la forme :

$$I = \frac{a}{b \cdot e^{T/cn} - 1} \dots\dots\dots(5-7)$$

(Cette loi est définie par la méthode des moindres carrés, à partir du relevé de la courbe expérimentale).

Dans cette relation,  $T_{cn}$  est la température du corps noir observé,  $a$  et  $b$  sont des facteurs constants qui dépendent de l'objectif utilisé, de l'ouverture et du filtrage de la caméra. Il faut donc disposer des courbes d'étalonnage de la caméra  $I=f(T_{cn})$  pour l'emploi de chaque objectif, chaque diaphragme et chaque filtre spectral. Un exemple est donné par la figure suivante (figure 5.13)

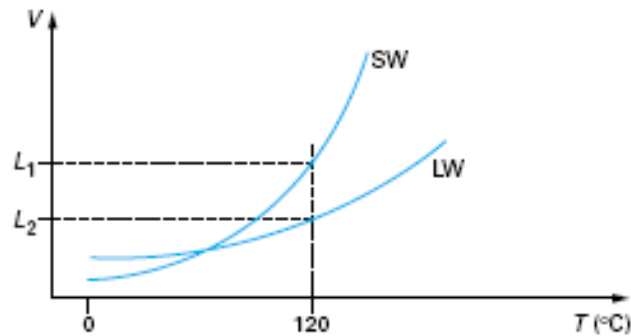


Figure 5.13 : exemple de signal issu de la caméra en fonction de la température du corps noir. [5.5]

### 5.5 système de mesure thermographique

Le système de mesure thermographique est un ensemble complet d'équipements assemblés pour exécuter des mesurages de flux ou de températures. Il se présente soit sous forme intégrée, soit sous forme d'unités distinctes. [1.4]

On pourrait distinguer également les systèmes homogènes et les systèmes cohérents. Les premiers sont plutôt orientés vers les applications de recherche et proposent une homogénéité depuis le capteur (caméra) jusqu'au stockage, sans aucune limitation par un maillon plus faible. Les seconds peuvent souffrir de faiblesse dans la chaîne de mesure (stockage d'une seule image parmi  $N$ , en particulier), sans pour autant que l'application en soit dégradée (appareillages destinés à la maintenance) ; ils sont cohérents avec une application déterminée.

Sur la figure 5.14, on peut faire la distinction de base entre l'enregistrement des données brutes (images thermiques ou cartes de luminances) et l'enregistrement des données transcrites (thermogrammes). Les laboratoires opteront nécessairement pour le premier mode, procurant ainsi toute la souplesse nécessaire à la modification des grandeurs d'influence, à l'uniformisation des caractéristiques des détecteurs des caméras à matrice et au post-étalonnage de l'appareil.

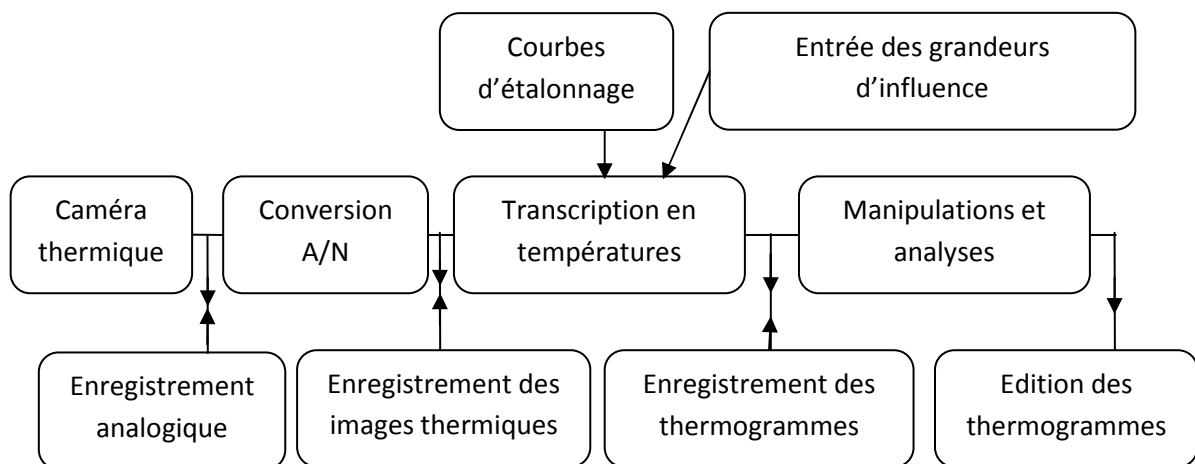


Figure 5.14 : Schéma global et synoptique de principe d'un système de thermographie. [5.5]

## 6. Caractéristiques des systèmes infrarouges

### 6.1 MTF du système

De nombreux procédés de filtrage de l'image sont utilisés pour :

1. améliorer le rapport signal sur bruit apparent ;
2. améliorer les contrastes, les contours ;
3. débarrasser l'image de bruits récurrents, etc.

Ces procédés conduisent à modifier de façon volontaire la fonction de transfert de modulation de la caméra.

#### 6.1.1 MTF de l'optique

On peut distinguer deux phénomènes limitant la résolution de l'optique.

- **La diffraction** fixe une limite ultime à la résolution permise par une optique de diamètre donné  $D$  pour une longueur d'onde également donnée  $\lambda$ . Avec une pupille circulaire non apodisée et non occultée, la fonction de transfert de modulation liée à la diffraction est notée :

$$(MTF)_d = \frac{2}{\pi} \left[ \arccos x - x(1-x^2)^{1/2} \right] \dots\dots\dots (6.1)$$

$$\text{Avec } x = \frac{\lambda}{D} \cdot F$$

Cette fonction s'annule pour la fréquence spatiale  $F_{c1}=D/\lambda$  appelée fréquence de coupure de l'optique.

- **Les aberrations** des différents types d'optique (aberration sphérique, chromatisme, coma, etc.) qui diminuent la fonction de transfert de modulation de la diffraction. La MTF de l'optique est considérée d'un point de vue global. Par contre, l'expression de la MTF est souvent compliquée car :
  1. il faut distinguer les MTF dans deux directions perpendiculaires (dites tangentielle et sagittale, car il s'agit généralement d'un phénomène de révolution autour de l'axe optique) ;
  2. les MTF n'ont pas la même valeur en tous les points du champ. On doit remarquer que dans les bandes spectrales de l'imagerie thermique (3-5um et surtout 8-12um), l'importance relative de la diffraction par rapport aux aberrations est beaucoup plus grande que dans le visible ( $D/\lambda$  est petit). [6.1]

### 6.1.2 MTF du détecteur

Appelons  $a$  le côté d'un élément détecteur et  $f$  la distance focale de l'optique ; par définition, le champ élémentaire est l'angle  $\alpha$  sous tendu par le détecteur :  $\alpha=a/f$ .

En supposant le détecteur rectangulaire et sa sensibilité uniforme, la fonction de transfert de modulation (FTM ou MTF) associée à ce champ élémentaire est donné par :

$$(MTF)_{\alpha} = \frac{\sin \pi.F\alpha}{\pi F\alpha} \dots\dots\dots(6-2)$$

Avec  $F$  fréquence spatiale.

Cette fonction s'annule une première fois pour  $F_{c2}=1/\alpha$ .

On considère que le signal n'est plus exploitable au delà de cette fréquence dite **fréquence de coupure du détecteur**.

Avec un détecteur rectangulaire de côtés  $a_h$  et  $a_v$ , on définit 2 valeurs du champ élémentaire  $\alpha_h$  et  $\alpha_v$ , qui donnent deux MTF et deux fréquences de coupure dans les directions horizontale et verticale.

Notons que dans beaucoup de cameras thermiques, le premier élément limitatif de la fréquence spatiale est le champ élémentaire. [6.1]

La FTM directement mesurable est égale au produit des MTF de l'optique, des détecteurs, des différents effets liés au glissement, à l'échantillonnage et au filtrage. La mesure peut être effectuée en différents points du champ et selon plusieurs directions.

Les méthodes de mesure sont basés généralement sur des transformées de Fourier plutôt que sur l'observation de mires sinusoïdales de fréquence variable. En effet, il est assez difficile de réaliser des mires thermiques à variation sinusoïdale de température. Par contre, il est facile de réaliser une variation de température en échelon ou sous la forme d'une fente. Le principe consiste donc à observer une fente fine (par rapport au champ élémentaire) placée au foyer d'un collimateur. Le spectre de fréquences spatiales de cette fente est large devant le spectre des fréquences spatiales de la caméra. Le spectre du signal vidéo représente alors directement la MTF de la camera. La fente peut être remplacée pour des raisons de réalisation ou de rapport signal sur bruit par un échelon de température. La MTF est alors donnée par le spectre du signal vidéo après dérivation.

## 6.2 Intervalle de température équivalent au bruit NETD

La sensibilité thermique d'une caméra s'exprime généralement sous forme de l'intervalle de température équivalent au bruit (NETD : Noise Equivalent Temperature Difference) mesuré sur le signal vidéo : c'est l'intervalle de température entre deux corps noirs, de grande dimension par rapport au champ élémentaire, donnant un signal égal à la valeur quadratique moyenne du bruit, mesuré à distance nulle, c'est-à-dire avec une transmission atmosphérique uniformément égal à 1.

$$NETD(K) = \frac{4\sqrt{A} \cdot \sqrt{\Delta f}}{\alpha_h \cdot \alpha_v \cdot D^2 \sqrt{n} \cdot \tau_0 \cdot M^*} \dots\dots\dots(6-3)$$

Avec :

$A$  (cm<sup>2</sup>) surface d'un détecteur élémentaire

$\Delta f$  bande équivalente de bruit globale

$\alpha$  champ élémentaire en radian ( $\alpha_h$  horizontal,  $\alpha_v$  vertical)

$D$  (cm) diamètre utile de pupille

$n$  nombre total d'éléments du détecteur

$\tau_0$  transmission de l'optique

$M^*$  facteur de mérite du détecteur dans la bande spectrale utile ( $\lambda_1, \lambda_2$ ) pour un élément

$$M^* = \pi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial L\lambda(T)}{\partial T} \cdot D^*(\lambda) d\lambda \dots\dots\dots(6-4)$$

$D^*(\lambda)$  (cm.Hz<sup>1/2</sup>.W<sup>-1</sup>) détectivité spécifique du détecteur.

$L\lambda(T)$  (W.cm<sup>-2</sup>.Sr<sup>-1</sup>.µm) luminance énergétique spectrale du corps noir à la température T.

La bande de bruit globale  $\Delta f$  est, pour un filtre d'ordre 1, égale à :

$$\Delta f = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{m.s.}{2} \cdot \frac{f_t}{\eta} \dots\dots\dots(6-5)$$

Avec :

$m$  (pixels) nombre de champs élémentaires par ligne.

$S$  nombre de lignes par trame.

$f_t$  fréquence trame.

$\eta$  rendement de balayage. [6.1]

### 6.3 Ecart normale de température séparable MRTD

Cette notion MRTD a été introduite pour établir un lien entre la résolution géométrique et la sensibilité thermique d'un ensemble complet comprenant la caméra thermique, la visualisation et l'observation.

Pour mesurer la MRTD, une mire carrée comprenant 7 barres (3 barres à une température T, et 4 barres à une température T+ΔT, le tout sur un fond à la température T), est présentée sous un angle variable à une caméra thermique dont l'image est perçue sur un visualisateur par un observateur avec un grossissement global donné (grossissement : rapport de l'angle sous lequel l'observateur voit la mire sur l'écran du moniteur à la dimension angulaire de la mire vue par la caméra).

Pour chaque valeur angulaire de la mire, on note la différence de température ΔT limite qui permet de percevoir la mire de 4 barres. On opère généralement une fois par intervalle de température croissant, une fois par intervalle de température décroissant et on prend la moyenne.

On fait également la moyenne entre les valeurs de  $\Delta T$  positives et négatives, ce qui permet d'annuler une erreur systématique éventuelle de l'intervalle  $\Delta T$  ainsi qu'un écart éventuel d'émissivité entre les barres à température  $T$  et les barres à température  $T+\Delta T$ . On opère également avec plusieurs observateurs.

- La MRTD est la courbe résultante  $\Delta T=f(1/\rho)$ .

$\rho$  étant le pas angulaire de la mire,  $(1/\rho)$  est appelé fréquence spatiale de la mire.

Un exemple de MRTD est donné par la figure 6.1.

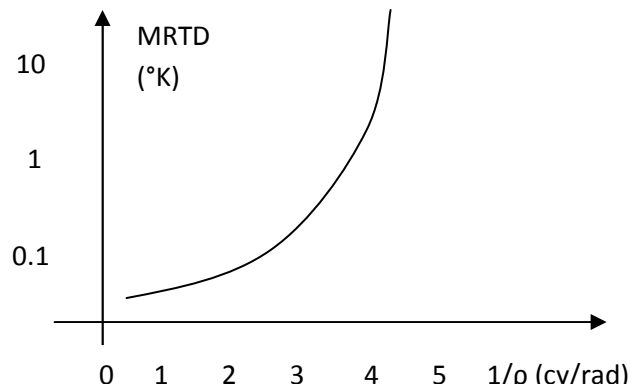


Figure 6.1 : exemple de courbe de MRTD [4.9]

On peut remarquer :

1. que la valeur de l'intervalle de température nécessaire pour résoudre la mire augmente de façon continue avec la fréquence spatiale ;
2. qu'au-delà d'une certaine fréquence spatiale de coupure, la mire n'est plus résolue, quel que soit l'intervalle de température ;
3. que vers les basses fréquences spatiales, l'intervalle de température tend vers une valeur non nulle quand la dimension de la mire augmente ;
4. que la caméra est d'autant plus sensible que les intervalles de température sont plus bas, donc que la courbe se déplace vers le bas ;
5. que la caméra a une définition géométrique d'autant meilleure que les fréquences sont plus élevées, donc que la courbe se déplace vers la droite. [4.9]

Un modèle simple est donné par la relation suivante :

$$MRTD = \sqrt{\frac{4}{7}} \left( \frac{S}{B} \right)_m \cdot \frac{NET_{\rho}}{MTF} \cdot \frac{F \cdot \alpha}{\sqrt{1 + (2F \cdot \alpha)^2}} \dots\dots\dots(6-7)$$

Avec :

$\left(\frac{S}{B}\right)_m$  Valeur nécessaire du rapport S/B pour percevoir la mire (souvent pris égal à 2.25)

$NET_\rho$  Grandeur définie par la relation suivante :

$$NET_\rho = \frac{NETD}{\sqrt{P_r \cdot F_i \cdot \rho}} \dots\dots\dots(6-8)$$

$P_r$  persistance rétinienne

$\rho$  taux de recouvrement

$$\rho = \frac{\text{surface.totale.couverte.par.les.éléments.détecteurs,après.balayage}}{\text{surface.de.l'image}}$$

$F_i$  fréquence image.

MTF fonction de transfert de modulation globale de l'ensemble incluant la caméra, le visualisateur et l'observateur.

$\alpha$  champ élémentaire de la caméra.

F fréquence spatiale. [6.1]

## 7. Applications de la thermographie [7.1], [7.2], [7.3], [7.4], [7.5], [7.6], [7.7]

### 7.1 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 dénoncer 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 (à distance) et passivement (elle reçoit le rayonnement). 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 de la situation de mesure pour réaliser des mesures (augmentation de l'émissivité, masquage de sources chaudes de l'environnement...), 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) ;
- d'objets visqueux (paraison de verre avant moulage) ;
- d'objets et environnements à températures élevées (dans un four de traitement thermique), etc.

Cette contribution spécifique de la thermographie comporte des limitations comme pour toute technique.

Le choix d'un système tient donc compte des besoins qu'ont les opérateurs pour leurs applications, des critères techniques qui décrivent ces applications et des caractéristiques des systèmes disponibles, à compléter ou à concevoir.

## **7.2 Typologie des applications et utilisations**

Nous retiendrons cinq segments d'application de la thermographie ou de l'imagerie 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.

## **7.2.1 La recherche et développement**

### **7.2.1.1 signature spectrale**

En général, la signature est un ensemble de comportements habituels et invariables, que manifeste un objet et qui permet sa reconnaissance.

La signature spectrale dans les bandes de la thermographie est un cas particulier de la signature électromagnétique.

Ce genre d'étude s'applique surtout aux engins à usage militaire : avion, hélicoptère, navire, char, véhicule...

Les rayonnements sont analysés dans toutes les directions de l'espace autour des engins. Ils proviennent des coques des appareils, des sources chaudes solides telles que tuyères des réacteurs, ou échappements des gaz et cheminées et des sources gazeuses : jets et fumées.

Le but de l'étude de la signature spectrale est de déterminer la vulnérabilité en particulier lors de l'agression par un missile autoguidé équipé d'une détection servant au guidage sur la cible.

Entrent dans cette application les études des leurres infrarouges destinés à tromper le missile agresseur, les études de camouflage par fumées, les études de masquage des sources conduisant à diminuer la vulnérabilité des engins dans certaines directions de l'espace, les études dites « actives » consistant à éclairer les engins par des sources et à analyser des rayonnements réfléchis, les contre-mesures et les études des armes et moyens capables de contourner toutes ces défenses.

Dans ces applications de signature spectrale, l'utilisateur établit la carte des luminances ou des intensités. Le thermogramme est classiquement sans objet et n'a de sens qu'en températures de luminances.

Les caméras utilisées dans ce type d'applications seront (principalement) :

- adaptées à la bande spectrale étudiée : il faut donc plusieurs caméras ou des caméras multispectrales ;
- caractérisées en réponse spectrale relative RSR ;
- de grande dynamique de thermosignal (avec une numérisation assurant l'homogénéité du système).

L'étude de la signature spectrale par caméra thermique est couramment associée à une étude simultanée par spectroradiométrie de l'émission des corps ou gaz observés.

### **7.2.1.2 aérodynamique et aérothermique**

Les études d'aérodynamique concernent principalement les avions (ailes, dérives) ou les engins lors de la rentrée dans l'atmosphère (navette spatiale, missile). Ces études sont menées sur des maquettes ou en vraie grandeur en soufflerie. On mesure les coefficients d'échange, les flux pariétaux, etc.

Nous classons ici les études des mouvements des fluides et plus généralement des gaz. Pour qu'un gaz soit observable dans l'infrarouge, sa molécule doit présenter un moment dipolaire, donc être dissymétrique ou composée de plusieurs atomes différents. La longueur d'onde principale d'émission du gaz carbonique CO<sub>2</sub> est de 4,25  $\mu\text{m}$ . De nombreuses raies entre 4,2 et 4,7  $\mu\text{m}$  apparaissent à plus haute température. On peut ainsi visualiser des écoulements et mettre en évidence des fuites. Quand les phénomènes étudiés sont de faible énergie et quasi-stationnaires, on préfère matérialiser les écoulements en y plaçant des parois ou des maillages de faible conductivité thermique.

### **7.2.1.3 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.

Cette discipline est étroitement liée à la caractérisation thermique des matériaux : propriétés thermophysiques (conductivité, diffusivité, etc...), propriétés radiatives (émissivité spectrale directionnelle, facteur de réflexion...) et propriétés optiques.

En thermique, on recourt aux modélisations (calculs par éléments finis, etc...). Le calcul s'accompagne d'une vérification expérimentale de la validité des modèles utilisés. La caméra thermique est l'instrument privilégié de cette vérification en un ou plusieurs points, ou en une surface du matériau, au cours du temps. Elle permet donc le recalage des modèles par la mesure physique des valeurs aux limites.

D'autres recherches en rayonnement et en thermique bénéficient de l'apport de la thermographie :

- la tenue des matériaux aux températures élevées comme les aubes de turbine (ces études nécessitent des algorithmes de corrections qui tiennent compte des influences des environnements), matériaux ablables soumis à des plasmas de gaz ;
- les études de combustion et de certaines réactions chimiques, la pyrotechnie ;
- les études d'absorption des rayonnements et de réflexion des rayonnements électromagnétiques : par exemple, les études de cuisson par micro-ondes, les études de panneaux de cellules solaires ;
- les recherches sur les matériaux du bâtiment, sur les matériaux métallurgiques à haute température ;
- le fonctionnement des moteurs thermiques pour l'industrie aéronautique ou automobile.

#### **7.2.1.4 matériaux et mécanique du solide**

Un pan important des études de matériaux et des structures se distingue depuis 1985 : la recherche en contrôle non destructif (CND) et en détectabilité de défauts dans les matériaux divers ainsi que la mécanique du solide (contrainte, fatigue, rupture).

La structure à étudier subit une sollicitation mécanique. Les images thermiques sont traitées en démodulation ou détection synchrone à la fréquence d'excitation des structures. Pour les excitations à haute fréquence, les imageurs à matrice présentent l'intérêt de synchroniser la prise d'image à une phase du cycle d'excitation (imageur déclenchable). On met ainsi en évidence des écarts de température de quelques dizaines de microkelvins, à relier aux valeurs de la grandeur recherchée (contraintes ou défauts). On classera dans ce domaine la tribologie (étude des frottements).

#### **7.2.1.5 électrotechnique et électronique**

**En électrotechnique**, on réalise des composants destinés à véhiculer, transformer ou commuter de l'énergie électrique. On rencontre tous les cas de figure : courants forts sous haute tension jusqu'aux courants faibles sous basse tension. Les problèmes sont relatifs aux comportements thermiques de ces composants et aux résistances de contact. Seuls persistent les problèmes de mesure de température des contacts en métal de faible émissivité.

Dans les cas évolutifs comme pour l'étude des machines tournantes (moteurs, alternateurs, turbines), l'utilisation de caméra classique en mode de balayage ligne (caméra linéaire), aptes à la mesure en dynamique, est devenue aisée par le stockage en temps réel des profils thermiques fournis par la caméra.

Dans les domaines de l'**électronique**, les usages de la thermographie sont multiples, de la puce de silicium à la carte électronique équipée : comportements thermiques évolutifs, mesure des impédances thermiques, validation des techniques de report (soudure, collage, visserie), dimensionnement et comportement des composants de puissance et des radiateurs, efficacité des caloducs, etc.

Les problèmes principaux rencontrés en électronique sont :

- la forte dispersion des émissivités ;
- le faible taille de certains composants à étudier et la faible conductivité thermique interdisant les thermocouples.

#### **7.2.1.6 industrie automobile et de transports**

L'industrie automobile et l'industrie des transports ainsi que celle des équipements pour l'automobile est une grande utilisatrice de caméras thermiques.

Les sujets d'études sont les moteurs électriques, les paraboles de phares, l'isolation et les fuites des habitacles, les moules de fonderie, les sièges chauffants, les collages de pièces mécaniques, les circuits d'échappement ou de dégivrage, les pièces d'échauffement (radiateurs, climatisation), les pièces de frottement et les pneumatiques...

L'étude des phénomènes physico-chimiques intervenant sur les disques de freins lors du freinage est destinée à améliorer la connaissance et la maîtrise de ce freinage selon les constituants des plaquettes de frein. Ces études sont menées sur des bancs d'essais et sont d'interprétations complexes (thermique, métallurgie, tribologie...).

La caméra classique en analyseur ligne observe alors le disque suivant un rayon choisi avant ou après le passage sous la mâchoire de frein.

L'image thermique suivante d'un arbre à pignons, montre clairement les zones plus chaudes de celles moins chaudes. Une intervention rapide pour identifier la cause est nécessaire.



Figure 7.1 : image thermique d'un arbre à pignons. Source : « Eco-Energie services »

#### **7.2.1.7 métallurgie, traitement thermique et soudage**

L'industrie de la métallurgie en est à ses essais de thermographie dans le domaine de la recherche. L'état métallurgique d'un métal et la qualité du produit final dépendent fortement des procédés de fabrication et des cycles de température auxquels sont soumis les matériaux (laminage à chaud ou à froid, trempe, hyper trempe, recuit, traitements thermiques classiques ou par laser, nitruration ionique, etc.).

Les études de l'action des lasers CO2 sur la matière, comme les traitements de surface (métallurgie fine), la découpe et la soudure des matériaux conduisent préférentiellement à utiliser des caméras SW insensibles aux rayonnements du laser. La découpe et la soudure en continu peuvent être étudiées par un analyseur ligne (caméra thermique linéaire) procurant des profils thermiques.

Cependant, l'image thermique complète que fournit une caméra procure une information spatiale autrement plus intéressante et exploitable : perception immédiate des zones perturbées par les éclaircissements parasites provenant de la fusion, détermination des masquages de ces éclaircissements avant mesure des températures atteintes par les matériaux. Les analyseurs ligne seront donc réservés aux contrôles de procédés et non à l'étude ou à la mise au point de ces contrôles.

#### **7.2.1.8 industrie du verre**

L'industrie du verre est une forte consommatrice d'énergie que l'on cherche à économiser. Les utilisations des caméras thermiques se rencontrent dans toutes les branches de cette industrie : verre plat (verre à vitre), verre creux (bouteilles, flacons...), fibres isolantes (fibre de verre pour laine de verre), fibre de verre textile, verre automobile ou d'avion, autres produits (tube cathodique de téléviseur, ustensiles ménagers, ampoules d'éclairage...).

Les problèmes de mesure sont divers :

- mesure de température du verre, à haute température ;
- mesure dans des ambiances et environnements difficiles et à température élevée ;
- mesure sur des événements rapides (ouverture de moules, chute de la paraison...).

On sélectionne la bande spectrale de la caméra pour mesurer les températures de surface ou les températures plus à cœur du matériau.

#### **7.2.1.9 électroménager et industrie agroalimentaire**

L'industrie de l'électroménager est classée dans les usages plus classiques de la thermographie. Les phénomènes thermiques, rencontrés sur les appareils étudiés, évoluent relativement lentement (régulation par thermostat) et sont à température intermédiaire, de l'ambiante à 800 °C environ, si l'on excepte les réfrigérateurs, l'étude de la conservation des denrées périssables en chambre froide, etc.

Ces études concernent les convecteurs électriques et les appareils tels que plaque de cuisson, rôtière, autocuiseur, fer à repasser, grille-pain, etc.

Les fabricants des appareils sont tenus de respecter les normes qui limitent les échauffements des matériaux (plastiques et métaux) selon leurs natures et leurs rôles (isolants électriques ou thermiques, pièces de préhension, ornements). La thermographie procure une extrême rapidité de développement. Dans les industries agroalimentaires, l'amélioration des conditionnements thermiques des aliments, les études des modes de cuisson, l'amélioration des procédés de scellage de sachets pour aliments ou de pots de plastique, bénéficient de l'apport de la thermographie.

#### **7.2.1.10 agronomie, géologie et pollution**

Nous regroupons ici les usages de la thermographie qui ont lieu dans des conditions similaires: faibles écarts de température à température basse et mesures à longue distance. On classe ces applications en télédétection. C'est un secteur privilégié pour la caméra LW. L'émissivité des végétations ou des sols avoisine 0,98 dans cette bande spectrale.

La recherche agronomique se base sur les cartes de luminances établies dans plusieurs bandes spectrales. Les cartographies (dans la bande de 8 à 14  $\mu\text{m}$ ) sont obtenues au sol, en vol ou par satellite. Elles renseignent sur l'état de santé des plantes, sur les inerties thermiques comparées des végétaux ou des sols, sur l'humidité des sols et sur les drainages... etc

En géologie, certaines études se basent sur les écarts de température des sols et des roches lors d'un cycle journalier. On en déduit les résistances thermiques des couches géologiques de surface, donc les qualités de leurs ancrages sur les couches plus profondes (ancrage des barrages).

La recherche de pollution sur les nappes d'eau (océans et lacs) est facilitée par l'emploi des imageurs thermiques. Les études des mélanges d'effluents des centrales thermiques, avec les eaux d'un fleuve ou les eaux de mer, sont faites d'un avion.

#### **7.2.1.11 papier, textile et plastique**

Les caméras sont surtout utilisées en contrôle de procédés. On notera cependant les études des revêtements textiles ou vêtements isolants, les études d'amélioration de procédés dans l'industrie du plastique, le relevé de l'uniformité de séchage du papier.

#### **7.2.2 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.

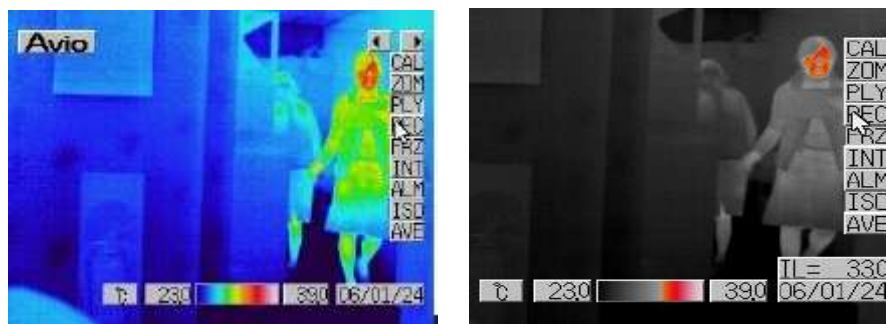
L'action réparatrice ou chirurgicale des lasers médicaux est étudiée en relation avec la température atteinte par les tissus sous l'impact du laser. Autrefois, la thermographie dans l'infrarouge remplaçait avantageusement la thermographie par contact (plaque de cristaux liquides) et répondait, seulement en partie, à la nécessité d'employer des techniques non invasives pour l'observation du corps humain.

Les applications relèvent les températures de surface quand elles sont perturbées par des variations métaboliques ou vasculaires, que ces variations soient d'origine tumorale, nerveuse, inflammatoire ou traumatique : sénologie, dermatologie, rhumatologie, pathologie vasculaire périphérique et cérébrale, neurologie, traumatologie, pharmacologie, vétérinaire.

Elle s'est orientée ensuite vers l'observation des troubles cliniques ayant des manifestations thermiques très proches de la surface de la peau.

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 et qui est approuvé par le ministère japonais de la santé .





*Figure 7.2 : 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.

### **7.2.3 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 délimitées mais restent suffisantes pour ces applications.

Les gains financiers générés par la thermographie sont très importants, voire inestimables, quand une seule intervention de quelques heures évite des incendies, des arrêts de production ou des bris de machines.

L'avantage décisif de la thermographie en maintenance est de permettre l'estimation de la qualité d'un équipement ou d'une installation en exploitation normale, sans arrêt des machines et bien avant la défaillance effective. Une dégradation conduit le plus souvent à une évolution des répartitions de températures.

On distingue l'inspection et la surveillance (bien que ce terme porte désormais à confusion avec l'imagerie thermique). La première est une action ponctuelle destinée à vérifier la progression lente d'une dégradation éventuelle ou inéluctable. Cette inspection est exécutée périodiquement par un opérateur qui intervient sur le site avec un matériel approprié. La seconde est une inspection permanente destinée à éviter les conséquences d'événements aléatoires pouvant se produire à tout instant. La caméra de mesure est alors installée à poste fixe et équipé d'une électronique de seuillage et d'alarme.

Les opérations de réception en fonctionnement des installations industrielles (en présence des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre, tels que sociétés de conception, de réalisation, bureaux d'études, etc.), ainsi que les examens thermographiques d'expertise (avant ou en cours de contrat ou d'intervention des compagnies d'assurance) relèvent de ces applications.

L'image thermique suivante montre un tube de transmission de liquide, froid, dans une chauffe eau (pas de circulation du liquide).

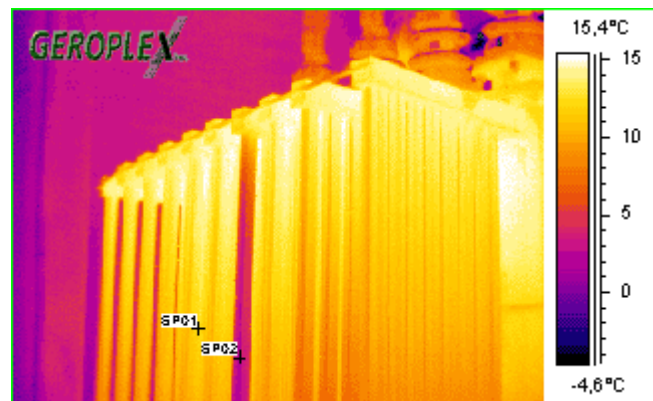


Figure 7.3 : image thermique d'un chauffe-eau. Source : GEROPLEX

### 7.2.3.1 maintenance électrique

La maintenance électrique est actuellement la plus importante application de la thermographie en maintenance.

L'inspection va du centre de production d'énergie électrique jusqu'au moindre tableau de distribution dans les étages d'un immeuble d'administration, en passant par les réseaux de transport d'énergie sous haute tension inspectés régulièrement par hélicoptère.

On inspecte les transformateurs, les têtes de disjoncteurs, les sectionneurs, les raccords et cosses de toutes natures, les contacteurs, les portes fusibles, borniers de connexions et de répartition...

L'image thermique suivante montre les irritabilités thermiques des conducteurs électriques.

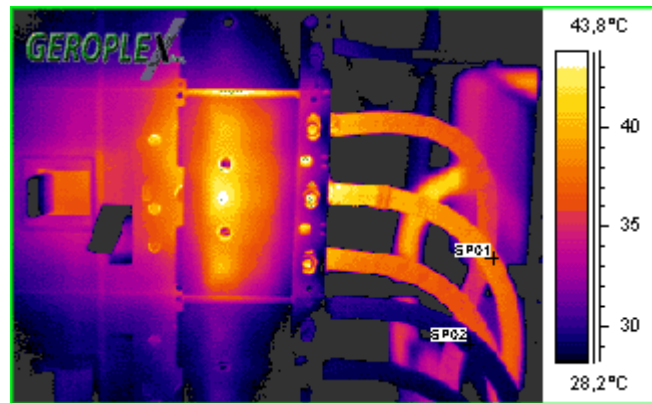


Figure 7.4 : Image thermique d'un raccord des fils électriques. Source : GEROPLEX

### 7.2.3.2 Isolants, calorifuges, réfractaires, joints et fuites

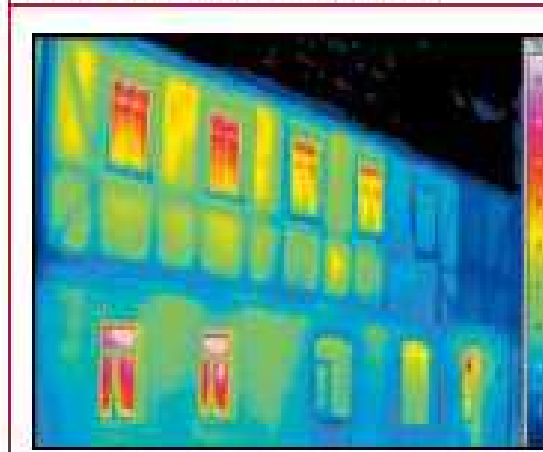
Ce type d'inspection relève davantage de l'imagerie thermique lorsqu'il concerne les enveloppes métalliques polies des calorifuges de circuits vapeur, circuit sodium des centrales nucléaires, des réservoirs de produits froids, wagons-citernes calorifugés.

Dans les cas de gaines à réfractaires, circuits de vents chauds en sidérurgie, cheminées industrielles, les observations par thermographie sont aisées. Mais l'inspection devient délicate quand des calorifuges extérieurs masquent les écarts de température dus aux dégradations des réfractaires.

La caméra ou l'imageur met en évidence les fuites aux joints qui plaquent mal ou qui se dégradent au cours du temps, les fuites de canalisations enterrées (chauffage industriel ou urbain), les infiltrations d'eau saine dans les circuits d'assainissement, fuites aux fissures et porosités des ouvrages en béton (barrages, digues, canaux...), etc.

On détecte les encrassements d'échangeurs thermiques, le dépôt de poussières et les agrégats le long de tuyauteries, le cokage de tubes de fours de pétrochimie.

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.... Une application plus classique que l'isolation thermique des bâtiments est la détection des défauts ou des malfaçons dans les planchers chauffants (à l'électricité ou à eau chaude) ou dans les corps de chauffe (encrassement, blocage de vannes). L'image suivante localise des fuites dans les jonctions des fenêtres à l'intérieur de l'habitation.



*Figure 7.5: image thermique d'une façade de bâtiment. Source: (INFRARED THERMOGRAPHY EXPERT)*

Dans le même ordre d'idée, nous classerons ici l'entretien et la restauration des monuments à caractère historique, qui utilisent la thermographie pour déterminer les zones humides, les structures internes des constructions ou la qualité d'accrochage des enduits recouverts de fresques.

Enfin, la dégradation lente des fours des industries lourdes (métallurgie, industrie verrière...) ou des bacs d'électrolyse (aluminium), les poches de coulée, les wagons-cigares sont suivis par thermographie.

On arrive ainsi à économiser quelques mois sur la réfection des réfractaires ou à colmater certains défauts qui apparaissent trop tôt dans la vie de l'équipement.

### **7.2.3.3 Pétrochimie**

L'usage spécifique de caméras thermiques en pétrochimie consiste à inspecter les « peaux de tube » à l'intérieur des fours de craquage des produits pétroliers. Ces produits circulent dans les tubes ; du coke (carbone) se dépose lentement sur les parois internes, créant petit à petit une couche isolante : la paroi du tube peut alors être échauffée par les flammes du four jusqu'aux températures de fluage. La caméra SW équipée d'un filtre spectral centré sur  $3,9\ \mu\text{m}$  et protégée par une cagoule en amiante à hublot infrarouge, mesure la température des tubes ( $500\ ^\circ\text{C}$  à  $700\ ^\circ\text{C}$ ) depuis des regards pratiqués dans le réfractaire du four. L'émission de la flamme et ses réflexions sur les tubes sont quasiment inexistantes dans la bande spectrale sélectionnée. La présence de suies (carbone) à haute température dans la flamme empêcherait la mesure : ces suies émettent un rayonnement de corps noir à toutes les longueurs d'onde et formeraient un rideau infranchissable.

#### **7.2.3.4 Maintenance mécanique**

Dès qu'il y a échauffement par un frottement devenu anormal (usure, manque de lubrification, déformation dynamique des pièces mécaniques...), la caméra thermique peut dénoncer les points défectueux : paliers de moteurs, roulements à billes, courroies (défauts d'alignement de poulies), chaînes, accouplements.

#### **7.2.3.5 Surveillance industrielle**

Les applications de la surveillance par caméra thermique installée à poste fixe sont à distinguer des applications de contrôle de production et de contrôle de procédés : surveillance de réfractaire de four de cimenterie, de produits radioactifs inflammables, d'électrodes des cuves d'électrolyse et surveillance incendie.

#### **7.2.3.6 Contrôle de produits et contrôle de procédés**

Le contrôle de produits se préoccupe de la qualité des produits fabriqués, tandis que le contrôle de procédé vise à aider le pilotage du procédé (manuel ou automatisé) au moyen de l'information de température prélevée sur les produits élaborés au cours de ce procédé.

Un procédé mal réglé provoque systématiquement une mauvaise qualité du produit. Un procédé bien réglé n'élimine pas les écarts aléatoires de qualité de fabrication : paramètre non totalement maîtrisé, manque de matière, corps étrangers, rupture, fissure, etc.

Alors que le contrôle de procédé se satisfait d'une analyse lente, le contrôle de produit demande une analyse exhaustive de la répartition des températures de surface de ce produit et donc une analyse spatiotemporelle généralement plus rapide.

Ces contrôles sont assurés par des opérateurs de terrain ou, pour certains d'entre eux, par des appareillages à poste fixe.

Une installation de contrôle résulte d'une étude de faisabilité antérieure. Le concepteur du système automatisé incluant un capteur (analyseur ligne ou caméra) est un spécialiste de la thermographie.

Il prévoit les variations possibles des grandeurs d'influence et retiendra des caméras autonomes et fiables. C'est un secteur futur, potentiellement très vaste.

#### 7.2.4 Contrôle non destructif

En CND, la phase de définition de la méthodologie de contrôle est très importante, celle-ci dépend des propriétés thermophysiques des matériaux et structures. L'emploi de l'imagerie thermique est banal, c'est l'interprétation et l'expérience de l'opérateur qui comptent tout comme en thermographie appliquée au diagnostic médical.

On réalise des défauts « tests » de référence qui conduisent à la validation de la méthode et à la définition des limites des défauts détectables et admissibles.

S'agissant d'identifier la « fonction de transfert » d'une structure, toute forme d'excitation est en principe applicable : impulsionnelle, en créneau, en échelon, harmonique ou multifréquentielle (bruit blanc). Les tenants de l'une ou l'autre forme d'excitation s'emploient à valider leur choix en fonction des matériaux et des résultats escomptés pour une durée assignée au contrôle.

Néanmoins, les industriels se contentent de méthodes empiriques et rapides, déclarées suffisantes pour la tenue mécanique des structures contrôlées. Le but est annoncé : supprimer les contrôles (sauf dans les cas de produits hautement techniques ou onéreux pour lesquels le contrôle unitaire s'impose).

Il existe deux types principaux d'excitations : thermique et mécanique. Le matériel de chauffage peut être une rampe infrarouge, une lampe à décharge, un laser, un inducteur HF, une convection forcée d'air, une conduction par liquide. Les excitations mécaniques peuvent être des vibreurs, des machines d'essais mécaniques, etc.

#### Exemples :

- CND de matériaux composites- Les matériaux composites utilisés dans la construction navale utilisent principalement des fibres et tissus de verre et des résines époxyde, pour les structures monolithiques et des mousses syntactiques ou bois de balsa pour l'âme des structures sandwichs. Les méthodes de contrôles non destructifs traditionnelles, tels que les ultrasons ou la radiographie, ne permettent pas toujours d'assurer un contrôle parfait de la structure, principalement à cause de la forte hétérogénéité des matériaux mis en œuvre. Pour pallier ces problèmes, la DCN a développé un moyen d'essai fondé sur l'utilisation de la thermographie infrarouge active. La technique mise en œuvre consiste à éclairer la structure avec une lampe de puissance et à observer le refroidissement de la surface à l'aide d'une caméra

infrarouge. Les défauts présents constituent des obstacles à la transmission de la chaleur dans le matériau et donnent naissance en surface à des anomalies thermiques détectées par la caméra infrarouge.

- CND de métaux – Le laminage des métaux en barres (billettes) provoque parfois des plis et autres défauts du produit (fissures). Ces défauts peuvent être mis en évidence par un chauffage par induction HF (les défauts présentent une résistance électrique plus élevée : l'effet Joule y est plus fort et la température augmente localement) puis par une détection, par imageur thermique, immédiatement après le passage dans l'inducteur. Une légère humidification de la surface augmente l'émissivité de la pièce;
- CND divers – On utilise également les caméras thermiques pour vérifier la qualité des soudures des ensembles mécanosoudés : les transferts thermiques ont lieu de façon régulière pour des pièces correctement soudées. Quelques essais ont été menés dans la détection de corrosion ou d'oxydation. La localisation des armatures de ferrailles dans le béton armé, à des fins de réparation ou de modification d'ouvrages d'art, se base sur l'échauffement du métal provoqué par une induction HF. La bonne qualité de l'expansion des mousses injectées isolantes est vérifiable par imagerie thermique. Les bulles importantes (absence de matière) ou les insuffisances d'expansion sont rapidement visualisées dans la période du refroidissement des structures, suite à la réaction exothermique du mélange des produits. Les manques de matière, ou les cavités se formant au cours du temps peuvent parfois être mises en évidence sur les ouvrages d'art (voûtes de tunnels, revêtement routier).

La thermographie donc, est une technique aux applications multiples : elle est ainsi entre les mains d'opérateurs très différents, dont les besoins et les compétences représentent une palette très variée.

## Conclusion

Nous avons vu donc que la technique de thermographie infrarouge est éminemment pluridisciplinaire et fait appel à des notions sur les rayonnements, sur l'optique, sur les détecteurs et l'électronique, sur le traitement du signal et de l'image, sur la thermique ainsi que sur l'instrumentation et la mesure en général.

La chaleur exprime, tout comme la température qui n'en est qu'une manifestation, un **état de santé** de la matière ou d'un objet dans des conditions considérées.



Et ainsi, c'est par la mesure du rayonnement émis par la matière que l'on connaît la température de cette matière. On mesure une faible partie de ce rayonnement, au moyen d'un appareil de mesure, le radiomètre. Après étalonnage de ce radiomètre, celui-ci indiquera directement une température : ce sera alors un thermomètre par rayonnement, un radio-thermomètre. Ceci, si ce radiomètre observe cette matière "idéalisée", ce qui n'est pas le cas habituel ; mais la matière réelle peut s'en approcher. Et dans la panoplie du savoir-faire du "mesureur", il y a précisément la connaissance de la matière observée, la connaissance du "combien la matière n'est pas idéale". En effet, le radiomètre ne sait pas quelle matière il observe : c'est bien le savoir du mesureur, lequel met en œuvre le radiomètre dans le cadre particulier de chacune des applications.

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, si nous voulons voir le rayonnement émis par les objets habituels de notre environnement (ils sont froids), ou déterminer leur température en mesurant ce rayonnement, il nous faut des yeux spéciaux capables de voir dans l'infrarouge. D'où les caméras infrarouges, que nous préférons appeler "caméras thermiques", conçues pour pallier les limites de nos yeux, incapables de voir les rayonnements émis par les objets "froids", en dessous d'environ 500°C.

Le thermographe doit passer de l'image thermique, qui n'est qu'une image, à un thermogramme, qui est une image thermique quantifiée en températures. Cette opération de transcription en température nécessite non seulement l'appréciation de la situation de mesure, mais également sa maîtrise, afin de supprimer les phénomènes dits parasites, qui ne peuvent donner lieu à transcription en température et afin de quantifier en prenant en compte les grandeurs d'influence.

Nous avons donc compris que le thermographe, aidé de sa caméra, va voir dans l'infrarouge les objets froids (par rapport aux nos yeux) et, parmi ces objets, ceux qui sont anormalement chauds ou anormalement froids. Le thermographe pourra donc quantifier et fournir une cartographie des températures.

Une fois que les mesures thermographiques sont valides, que le thermographe est capable d'interpréter les images thermiques en terme de températures, il se peut qu'il faille



passer à une phase de vérification des mesures, dès lors que certains résultats surprennent par leurs valeurs : le trop chaud, le trop froid sont à expliquer dans le cadre d'un référentiel soit nominal (défini par l'habitude, l'expérience ou la logique simple), soit précédent (défini donc par comparaisons successives au cours du temps), soit résultant de la thermique des composants observés (thermique "intuitive" ou largement expliquée techniquement).

Parmi les outils utilisées pour interpréter les images de températures, le traitement de ces images est qualifié de puissant ; chose qu'on va l'éclairer dans la deuxième partie de ce travail.

Réf : p18

USGS : USGS Spectroscopy Lab Documentations. United State Geology Survey,  
<http://speclab.cr.usgs.gov> édition. Ou Saéid Homayouni « Caractérisation des Scènes Urbaines par Analyse des Images Hyperspectrales », Decembre 2005, Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur de l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris

[gtr] Ecole d'Ete Syst<sup>^</sup>mes Optiques  
**Radiometrie et detection optique**

J.L. Meyzonnette

*Institut d'Optique Theorique etAppliquee, E.S.O., Centre Universitaire d'Orsay, B&t. \$03,*

*BP. 147, F-91403 Orsay cedex, France*

[Richter] : Richter, R., 1990, A fast atmospheric correction algorithm applied to Landsat TM images: Intern. Jour. Remote Sensing. v. 11, no. 1, p. 159-766.

[esz] **ATMOSPHERIC CORRECTION OF DAIS HYPERSPECTRAL IMAGE DATA**  
**RUDOLF RICHTER**

Computers & Geosciences Vol. 22, No. 7, pp. 785-793, 1996

[Berk, Bernstein] : Berk, A., Bernstein, L. S., and Robertson, D. C., 1989, MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7, GL-TR-89-0122: Geophys. Lab., Bedford, MA 38 p,

[richter, 1992]: Richter, R., 1992, Model SENSAT-4: Sensor-Atmosphere- Target: DLR-IB 552-01/92. DLR Wessling, Germany 71 p.

[zaz]: Richter, R., 1994. Derivation of temperature and emittance from airborne multispectral thermal infrared scanner data: Infrared Physics Technology, v. 35. no. 6, p. 817.

[gfd] atmospheric transmission, Michael E. Thomas Donald D. Duncan

The infrared and electro-optical systems handbook, V 02. 1993

[JL]: Jean-Louis MEYZONNETTE et Thierry LEPINE “bases de radiométrie optique”, 2eme édition, CEPAUDES-éditions. 2003

[=8]: the infrared and electro-optical systems handbook, volume 2, “atmospheric propagation of radiation”, F. G. Smith, Editor, SPIRE Press.

[1963] KRUSE R., Mc GLAUCHLIN L., Mc Quistan R “element of infrared technology” Wiley (1963).

[=5] SMITH R.A., JONES F.E., CHASMAR R.P, “the detection and measurement of infrared Radiation- second edition- Oxford – Clarendon Press (1968).

[=p] LLOYD J.M., “thermal imaging” – Plenum Press 1975.

[=u] PAJANI (D.). – Évolution des technologies en thermographie. Nouvelle génération de station de thermographie. Congrès SFT 1997, thermique aéronautique et spatiale. ELSEVIER 6 p.

[=5] WOLFE (W.L.). – Introduction to Infrared System Design. Tutorial Texts in Optical Engineering Vol. TT 24. SPIE PRESS. 1996.

[hhu] PAPINI (F.) et GALLET (P.). – Thermographie infrarouge. Image et mesure. MASSON 1994. 239 p.

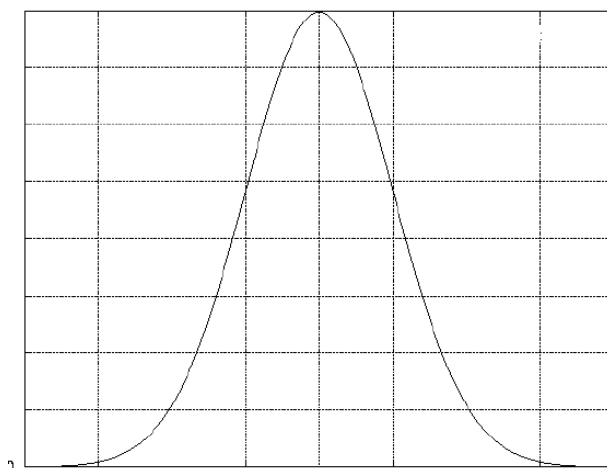
[tt] HOWES (M.J.) et MORGAN (D.V.). – Charge-Coupled Devices and Systems. Dept of Electrical and Electronic Eng., University of Leeds, John Wiley and Sons.

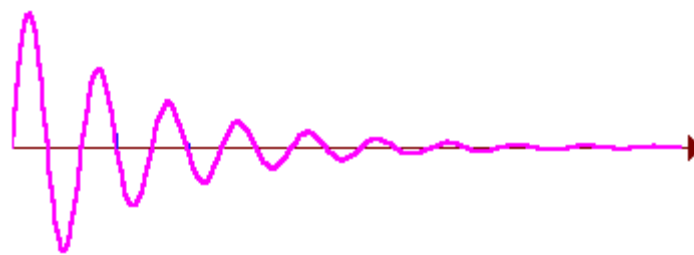
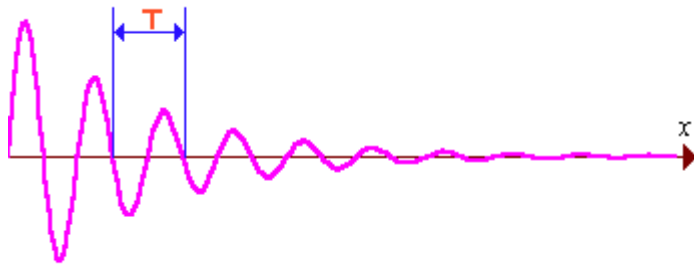
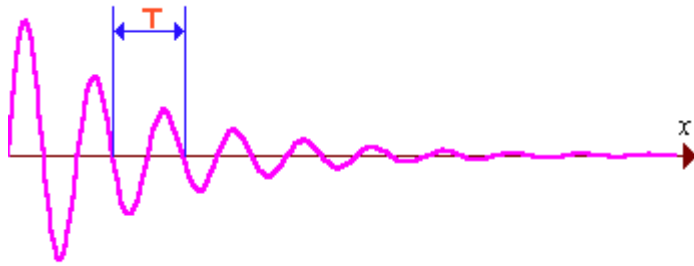
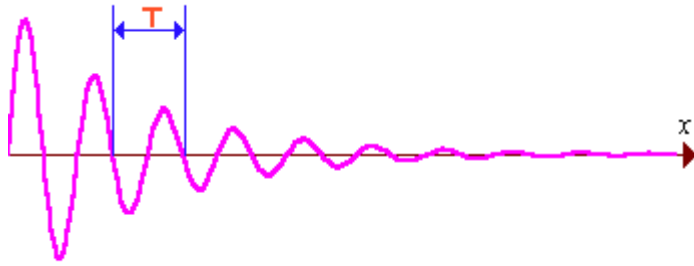
[po 2] BARBE (D.F.). – Imaging Devices Using the Chargecoupled Concept. Proceedings IEEE, vol. 63, pp. 38-67, Janv. 75.

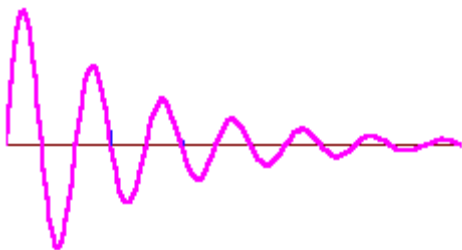
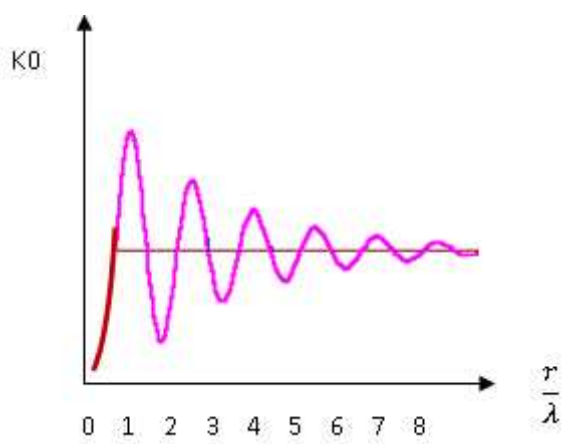
[=mm] DRISCOLL W., “handbook of optics” – Mc Graw- Hill Book Company (1978)

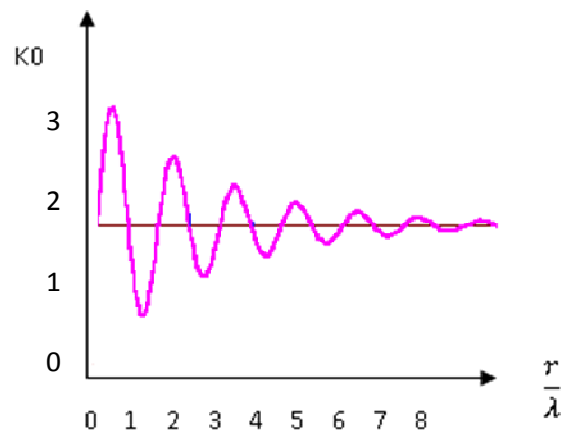
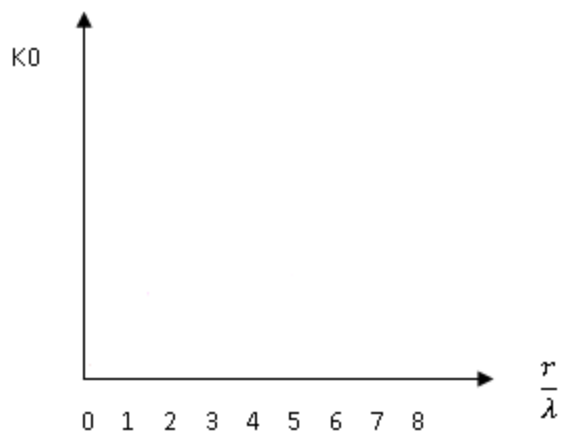
[=ou] L.F. ELTERMAN “parameters for attenuation in the atmospheric windows for fifteen wavelenths”, Applied Optics, 3, 745, 1964.

[+5] atmospheric propagation in the UV, visible, infrared and MM-wave region and related systems aspects, AGARD conference proceedings n°=454.









## **Introduction**

L'utilisation des images est aujourd'hui devenue courante dans nombre d'applications. Leur grande efficacité a été ainsi mise en évidence pour l'analyse d'observations dans des domaines aussi variés que l'espace et l'industrie, ou lors d'applications militaires et médicales.

Le développement récent des moyens informatiques, aussi bien en vitesse et capacité qu'en coût et facilité d'exploitation, permet le traitement de volumes de données toujours plus grands [8.1]. Le traitement des images peut ainsi être réalisé de façon purement numérique, conduisant à leur description, analyse et utilisation sous forme quantitative [8.2].

On va présenter dans ce qui suit une approche générale du traitement numérique des images infrarouges pour l'utilisation des données. Les principales étapes d'un tel traitement y sont développées sans dépasser les prétraitements qui visent à diminuer les erreurs radiométriques et le fort bruit aléatoire qui caractérisent les images infrarouges. Il est ensuite montré comment l'application de telles étapes permet d'utiliser efficacement les informations contenues dans ces images infrarouges pour résoudre beaucoup de problèmes dans différents domaines.

## **8. Présentation générale du traitement numérique des images infrarouges**

À partir d'une image numérique, il convient d'extraire les informations pertinentes en regard de l'application concernée, de les traiter puis de les interpréter. Le terme générique d'analyse d'images désigne l'ensemble de ces opérations.

En analyse d'images, on distingue les traitements de bas niveau et les traitements de haut niveau. Cette distinction est liée au contenu sémantique des entités traitées et extraites de l'image. Les traitements de bas niveau opèrent sur les grandeurs calculées à partir des valeurs attachées à chaque point de l'image (pixel) sans faire nécessairement la liaison avec la réalité qu'elles représentent. Les traitements de bas niveau opèrent sur les données de nature numérique. À l'opposé, les traitements de haut niveau s'appliquent à des entités de nature symbolique associées à une représentation de la « réalité » extraite de l'image. [6.1]

On s'intéresse donc à l'application de ces techniques aux images infrarouges thermiques, décrivant pour cela les principales étapes du traitement qu'on va les utiliser dans des exemples d'applications particuliers.

L'accent est principalement mis sur les traitements les plus spécifiques. Ils sont liés aux caractères particuliers des images infrarouges, par exemple :

- un contraste et une résolution relativement faibles par rapport aux images du domaine visible ;
- l'existence d'erreurs radiométriques dues à la méthode d'analyse de l'image et aux capteurs utilisés;
- la présence d'un fort bruit aléatoire lié aux caractéristiques des capteurs infrarouges.

En fonction de ceux-ci, l'application de prétraitements adaptés aux images infrarouges permet par la suite de pouvoir utiliser efficacement des méthodes classiquement mises en œuvre sur des images du domaine visible.

## 8.1 Description de l'image thermique

Les caractéristiques d'une scène peuvent être mesurées ou enregistrées, en plaçant des capteurs dans le plan de son image donnée par un système optique. Les capteurs utilisés sont de types différents suivant les caractéristiques lumineuses de la scène que l'on veut observer. Chaque capteur ayant une caractéristique spectrale de sensibilité, la réponse totale résultante en un point donné peut être exprimée par une intégrale de la forme :

$$R = \int S(\lambda)I(\lambda)d\lambda \dots\dots\dots(8.1)$$

Où  $S(\lambda)$  dénote la sensibilité du capteur en fonction de la longueur d'onde  $\lambda$  et  $I(\lambda)$  dénote l'intensité lumineuse reçue.

Dans les applications de l'imagerie infrarouge, les capteurs utilisés sont sensibles aux radiations situées dans l'infrarouge proche et lointain ( $\lambda=3$  à  $5.5\mu\text{m}$  et  $8$  à  $12\mu\text{m}$ ). On obtient donc par leur intermédiaire un signal directement fonction de la répartition en température de la scène observée.

Le signal électrique résultant, ou l'image elle-même, peut être décrit sous une forme mathématique par l'intermédiaire d'une fonction de trois variables  $f(x, y, t)$ , où  $x$  et  $y$  dénotent les coordonnées spatiales et  $f$  la valeur, au point  $(x, y)$  à l'instant  $t$ .

Dans le cas des images infrarouges, les variations de  $f$  sont proportionnelles aux variations de température dans la scène observée. Le contraste de flux de photons est généralement plus faible que celle obtenue lors de l'acquisition d'images du domaine visible.

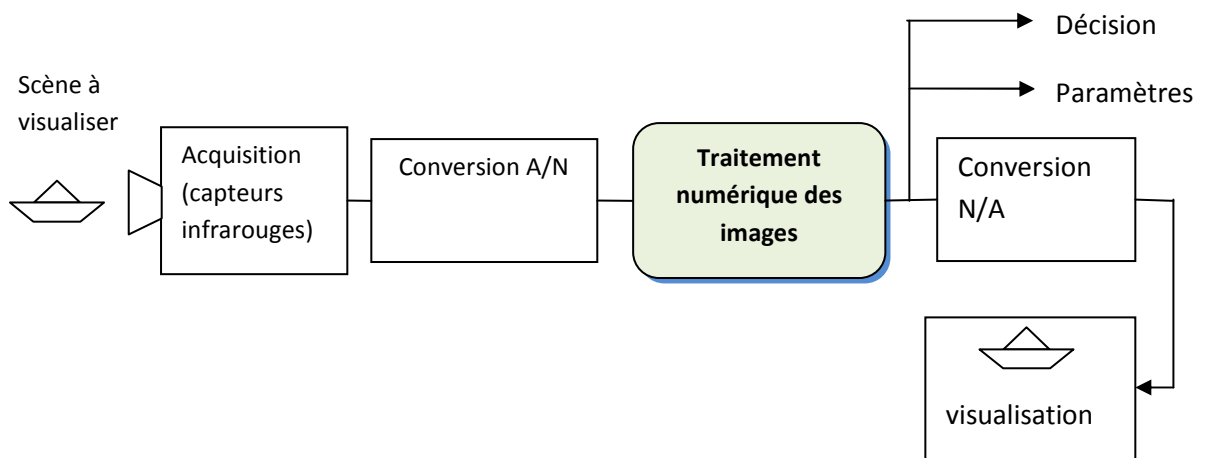
A partir de chaque image analogique  $f(x, y)$  à un instant donné, on obtient une image numérique  $F(i, j)$  par échantillonnage spatial de l'image et quantification des niveaux de gris. L'image est alors représentée sous la forme d'une matrice dont chaque élément  $F(i, j)$  correspond à un point de l'image appelé pel (Point Élémentaire ou Picture Element).

Le traitement numérique des images peut alors être défini comme un processus au cours duquel une image qui a été numérisée est :



- soit modifiée pour donner une nouvelle image qui sera par exemple plus attrayante pour un observateur humain;
- soit transformée en un ensemble de paramètres liés à la scène observée, paramètres directement présentés à l'observateur ou analysés automatiquement pour conduire à une décision prise en fonction de la scène observée et de critères préétablis.

Lorsque le résultat du traitement est une nouvelle image, sa conversion en une image analogique en permettra la visualisation à des fins d'observation. Cette succession d'étapes fondamentales est illustrée sur la figure 8.1.



*Figure 8.1 : système d'imagerie*

Dans le cas du traitement numérique d'images infrarouges, la démarche générale suivie peut être décrite de manière condensée par le diagramme de la figure 8.2.

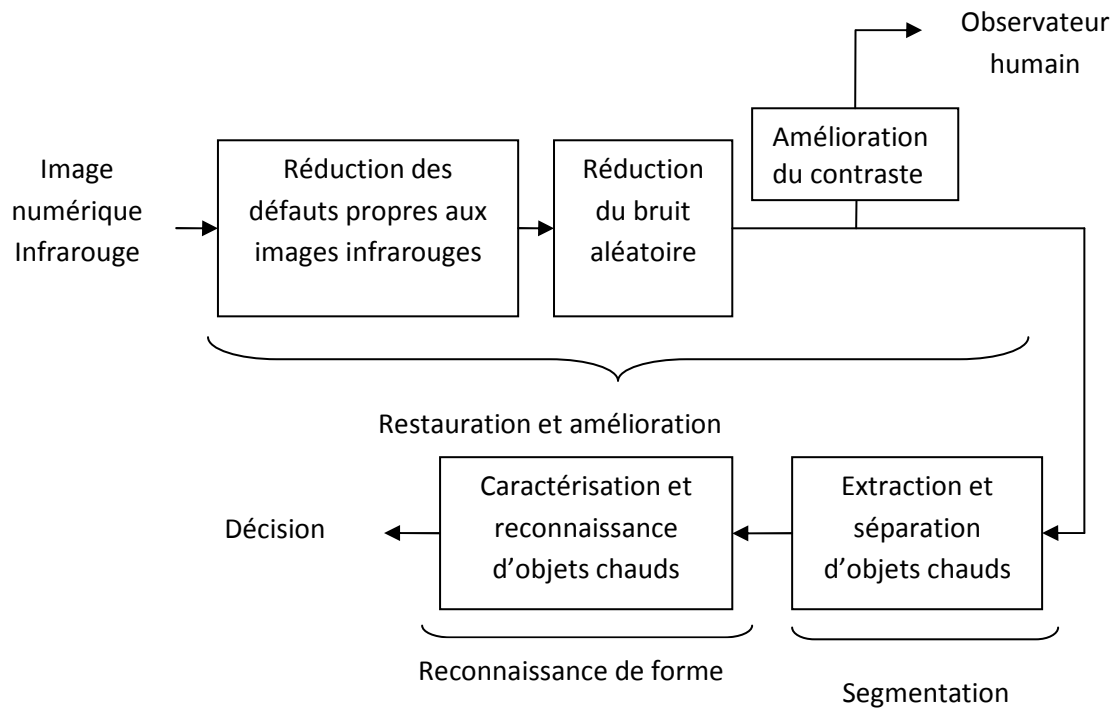


Figure 8.2 : Chaîne de traitement numérique des images IR.

**La restauration** a pour but d'inverser l'effet du phénomène dégradant. Il s'agit donc de produire une image la plus proche de la réalité physique de la scène observée. Le plus souvent, cette étape est la première dans la chaîne de traitements constituant un système de vision.

**L'amélioration** a pour but de satisfaire l'œil de l'observateur humain.

Différentes techniques sont possibles :

Il existe 2 grandes familles de méthodes :

- **Les méthodes globales :**

Dites aussi ponctuelles, elles modifient chaque point de l'image indépendamment de ses voisins à partir d'une information globale sur l'image. On distingue :

- La modification de l'histogramme.
- Le rehaussement de contraste.
- L'utilisation de la couleur.

- **Les méthodes locales :**

Elles travaillent sur des voisinages de pixels et donc localement dans l'image.

On distingue :

- Le filtrage fréquentiel,
- Le filtrage linéaire,
- Le filtrage non-linéaire. [8.3]

## 8.2 Réduction des défauts propres, aux images infrarouges

L'environnement dans lequel se situe l'acquisition d'images infrarouges n'est pas toujours maîtrisable : En télédétection, la couverture nuageuse dégrade la qualité des images satellites. De même, la poussière dans un atelier de production peut être difficile à éliminer. Cependant, la connaissance a priori du phénomène perturbateur permet d'envisager une modélisation et donc une correction systématique.

A partir de l'image infrarouge d'origine, qui pourra être par exemple la sortie numérique d'une caméra thermique, cette première étape consiste à éliminer les défauts liés au caractère particulier des capteurs infrarouges.

Un des problèmes de base des capteurs infrarouges est leur **dispersion** et la difficulté posée par leur étalonnage lors d'une utilisation dynamique. C'est ainsi que, dans des systèmes mettant en œuvre des matrices de capteurs élémentaires, des différences de réponse entre les divers capteurs apparaissent et se traduisent par des « lignages » parasites dans l'image.

Le but de cette étape est donc de réduire ces erreurs radiométriques sans affecter les informations contenues dans l'image.

Les moyens de correction développés doivent prendre en compte la structure particulière de ces erreurs ; on peut ainsi développer des modèles de correction basés sur une analyse statistique des données disponibles dans l'image afin de réaliser une égalisation à posteriori des données issues des divers capteurs infrarouges utilisés [8.4] [8.5].

Pour cela, un capteur de référence est choisi, et les tensions de sorties  $V_s$ , de chacun des autres capteurs  $s$  sont corrigées en fonction de leur écart par rapport à ce capteur de référence suivant :

$$\hat{V}_s = g_{s,r}(V_s) \dots\dots\dots(8.2)$$

Où  $\hat{V}_s$  et  $V_s$  dénotent respectivement les tensions de sortie du capteur avant et après correction. La fonction  $g_{s,r}(\cdot)$ , appelée courbe d'égalisation, traduit la dérive du capteur par rapport au capteur de référence. La correction des erreurs radiométriques se ramène donc à l'estimation de cette courbe d'égalisation  $g_{s,r}(\cdot)$  pour chaque capteur  $s$ .

Cette estimation peut être faite en supposant l'égalité statistique des données issues de chacun des capteurs ; cette égalité statistique peut être supposée à différents niveaux : égalité de la moyenne, égalité de la variance, égalité de moments statistiques d'ordre supérieur, égalité des densités de probabilité. Chacune de ces hypothèses conduit à un modèle mathématique pour la courbe d'égalisation  $g_{s,r}(\cdot)$  de plus en plus sophistiqué, à savoir

respectivement : modèle linéaire (correction de décalage et/ou de pente), modèle polynomial, modèle général . Le tableau 8.1 regroupe ces différents niveaux de correction.

Hypothèses sur les réponses des capteurs ou sur la courbe d'égalisation	Hypothèses sur les statistiques des données des sous-images S(r) et S(s) respectivement balayées par les capteurs r et s	Estimation de la courbe d'égalisation $g_{sr}(\cdot)$
Réponses linéaires des senseurs et de même pente pour tous les senseurs	Les intensités lumineuses reçues par les divers capteurs sont égales en moyenne $E(I_r)=E(I_s)$	$g_{s,r}(V_s) = V_s + [E(V_r) - E(V_s)]$
Réponses linéaires des senseurs	Les intensités lumineuses reçues par les divers capteurs sont égales en moyenne et variance $E(I_r)=E(I_s)$ et $\sigma^2(I_s)=\sigma^2(I_r)$	$g_{s,r}(V_s) = \frac{\sigma(V_r)}{\sigma(V_s)} V_s + \left[ E(V_r) - \frac{\sigma(V_r)}{\sigma(V_s)} E(V_s) \right]$
Courbe d'égalisation polynomiale	Les tensions de sorties correspondant aux divers capteurs ont des moments statistiques croisés identiques : $E(V_r^{i+1}) = E(g_{r,s}(V_s) \cdot V_r^i)$	$g_{s,r}(V_s) = \sum_{j=0}^{N-1} a_j V_s^j$ Avec: $[a_j] = [E(V_s^i \cdot V_r^j)]^{-1} \cdot [E(V_r^{i+1})]$
	Les histogrammes des sous-images balayées par les divers capteurs sont identiques : $\int_{-\infty}^{V_s} f_s(V) \cdot dV = \int_{-\infty}^{g_{s,r}(V_s)} f_r(V) \cdot dV$	$g_{s,r}(V_s, l_0) = V_{r,m0}$ Tel que : $\sum_{i=0}^{l_0} f_s(V_{s,i}) = \sum_{m=0}^{m_0} f_r(V_{r,m})$

Tableau 8.1 : les différents niveaux de correction.

L'utilisation du modèle général basé sur l'égalisation des histogrammes de chaque capteur conduit à une réduction très nette des erreurs radiométriques.

#### En bref :

L'utilisation de méthodes statistiques d'égalisation a posteriori des données dans une image infrarouge permet de réduire les erreurs radiométriques sans affecter les informations

contenues dans l'image, contrairement à ce qui se produit lors de l'application de filtres spatiaux classiques. Mais cette méthode de correction qui repose sur des hypothèses au niveau des statistiques des données issues de chacun des capteurs doit résulter du choix d'un compromis entre :

- la connaissance a priori du système pouvant orienter vers un modèle mathématique pour la courbe d'égalisation (en particulier réponse linéaire ou non linéaire des capteurs infrarouges utilisés) ;
- les caractéristiques des images traitées avec en particulier la taille des échantillons statistiques disponibles pour chaque groupe de données et le caractère d'homogénéité de l'image. C'est ainsi que dans le cas d'une taille d'échantillons suffisamment grande, il est justifié de supposer que l'ensemble des capteurs voit statistiquement, lors du balayage d'acquisition de l'image, la même région géographique; ceci est d'autant plus vrai que l'homogénéité de la scène observée est grande, d'où une garantie d'efficacité pour des modèles de la courbe d'égalisation de plus en plus sophistiqués ;
- la complexité des algorithmes, et donc des systèmes de correction.

### **8.3 Réduction du bruit aléatoire dans les images infrarouges**

Les images infrarouges se caractérisent par la présence d'un fort bruit aléatoire. Ce bruit trouve principalement naissance au niveau des détecteurs infrarouges :

- une partie est constituée par le bruit de distribution des photons;
- une partie est constituée par divers bruits d'agitation thermique.
- A ces bruits s'ajoute, bien entendu, du bruit électronique d'amplification.

Cette étape de la chaîne de traitement a donc pour but de mettre en œuvre des techniques de filtrage visant à réduire le bruit aléatoire. C'est une étape très importante dans la mesure où elle doit conduire à des images dont les caractéristiques, en particulier le rapport signal à bruit, permettront d'envisager par la suite des méthodes de traitement plus classiques, également utilisées dans le cadre des images du domaine visible.

Mais toute technique de filtrage pour réduire le bruit aléatoire dans l'image se traduit par un double effet : modification des caractéristiques du bruit (effet désirable) et des données elles-mêmes (effet indésirable).

Or, il s'avère que, aussi bien lors de traitements plus sophistiqués (segmentation, caractérisation et reconnaissance d'objets) ou lorsque les images sont destinées à l'observation humaine directe, certaines informations telles que les contours sont de toute première importance. Le filtrage du bruit aléatoire doit donc prendre en compte en particulier cet impératif de préservation, voire amélioration, des contours dans l'image.

En général, le bruit d'image  $B$  peut être considéré comme **additif**, l'image observée  $I$  s'exprime sous la forme :  $I = s + B$ .

On rencontre également des situations où la perturbation apparaît sous forme **convolutive**. Cela se produit à cause de la turbulence atmosphérique dans des images aériennes, ou dans des images floues où le processus dégradant les images est inconnu et variable :  $I = s * B$ .

Une autre caractéristique importante du bruit d'image est son comportement plus ou moins impulsionnel que l'on peut caractériser par la plus ou moins forte probabilité de valeurs aberrantes, ainsi que par son caractère ponctuel (pics parasites) ou continu. [8.6]

Une méthode classique de réduction du bruit est le **filtrage temporel** par accumulation des données, cette méthode qui accroît efficacement le rapport signal à bruit pose des problèmes lors de traitements en temps réel et en présence d'objets mobiles dans la scène observée.

Pour le **filtrage spatial** des images, il est coutume de distinguer deux grandes catégories de tels filtres, l'une basée sur des méthodes linéaires, l'autre sur des méthodes non linéaires.

L'application du **filtrage linéaire** aux images infrarouges, donne des résultats décevants ; ainsi un filtrage passe-bas réduit suffisamment le bruit important des images et s'accompagne d'une perte de résolution et de netteté des contours tout à fait gênante pour un observateur humain en particulier.

Des méthodes de filtrage linéaire mieux adaptées aux images peuvent tout de même être envisagées [8.7]. La réduction du bruit aléatoire et la préservation des contours sont alors réalisées en concevant des filtres satisfaisant à la fois des exigences dans le domaine spectral (zone d'affaiblissement du filtre où les composantes du bruit sont les plus importantes) et dans le domaine spatial (réponse à un échelon la meilleure possible).

La mise en œuvre de filtres linéaires pour réduire le bruit aléatoire dans les images infrarouges souffre en général du fait qu'ils traitent les images comme des domaines spatialement invariants, agissant donc de façon identique sur le bruit et les données elles mêmes. Les principaux filtres linéaires utilisés sont le filtre **moyenneur**, le filtre **gaussien** et le filtre de **Shen-Castan**. Leurs réponses impulsionnelles sont :

- pour le filtre moyenneur :

$$h(i, j) = \frac{1}{N^2}, \text{ pour } i, j = -\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2} \dots \dots \dots (8.2)$$

- pour le filtre gaussien :

$$h(i, j) = C \exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{2\sigma^2}\right) \dots \dots \dots (8.3)$$

- pour le filtre Shen-Castan :

$$h(i, j) = K \exp\left(-\frac{|i|+|j|}{\alpha}\right) \dots\dots\dots(8.4)$$

C et K sont des constantes de normalisation rendant la somme des coefficients égale à 1. [8.6]

Les filtrages **non linéaires** ont, par contre, pour but non seulement de réduire le bruit aléatoire, mais en même temps de prendre en compte les propriétés locales de l'image. En considérant l'image comme un domaine spatialement variant, ils s'adaptent mieux aux exigences du traitement des images infrarouges.

Ces filtrages non linéaires se caractérisent donc par un opérateur  $F(.)$  :

$$\{\hat{I}(i, j)\} = \mathcal{F}[\{I(i, j)\}] \dots\dots\dots(8.5)$$

Reliant l'ensemble de l'image d'origine  $\{I(i, j)\}$  et l'ensemble de l'image filtrée  $\{\hat{I}(i, j)\}$ .

L'opérateur non linéaire  $F(.)$  agit le plus souvent sur un voisinage (typiquement de 3 x 3 ou 5 x 5 pixels) de chacun des points  $(i_0, j_0)$  pris séparément :

$$\hat{I}(i_0, j_0) = F[I(i_0 + k_0, j_0 + l_0), \dots, I(i_0 + k_n, j_0 + l_n)] \dots\dots\dots(8.6)$$

Avec :

$$K_0, \dots, k_n, l_0, \dots, l_n \in \{\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots\}$$

et :

$I(i_0, j_0)$  et  $\hat{I}(i_0, j_0)$  désignent respectivement l'intensité lumineuse du point  $(i_0, j_0)$  dans l'image d'origine et dans l'image filtrée.

Une approche plus générale du filtrage non linéaire, bien adaptée au problème posé par les images infrarouges, consiste à combiner des opérateurs de filtrage locaux et des opérateurs logiques prenant des décisions en fonction du point de l'image traité et des propriétés de son voisinage, démarche qu'on peut modéliser par :

$$\hat{I}(i, j) = F_1[I(i, j)] \text{ si } |\mathcal{D}[\{I(i, j)\}]| > S \dots\dots\dots(8.7)$$

Et

$$\hat{I}(i, j) = F_2[I(i, j)] \text{ si } |\mathcal{D}[\{I(i, j)\}]| \leq S \dots\dots\dots(8.8)$$

Où  $F_1(.)$  et  $F_2(.)$  dénotent des opérateurs linéaires ou non linéaires;  $\mathcal{D}(.)$  et S dénotent respectivement une fonction et un seuil de décision.

Les techniques de **déconvolution** s'attaquent aux fonctions de transfert qui viennent atténuer les composantes hautes fréquences des images. Ces fonctions de transfert proviennent du capteur (optique, détecteur ou vibrations de la ligne de visée que le temps

d'intégration du détecteur transforme en flou), mais peuvent aussi être générées par les turbulences de l'atmosphère. [8.8]

La **déconvolution** vise à la reconstruction du signal original, c'est-à-dire émis par la scène vue à courte distance et observée par un senseur idéal. Il s'agit d'un problème d'inversion qui doit être abordé en considérant attentivement les sources de bruit.

**Déconvoluer** l'image signifie lui appliquer une fonction de transfert  $W$  de telle sorte que le résultat soit le plus proche possible de l'image initiale. Les noyaux suivants ( $W1$ ,  $W2$ ,  $W3$ ) peuvent donner des résultats satisfaisants.

$$W1 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, W2 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}, W3 = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 5 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots[8.9]$$

#### En bref :

Tout filtrage d'image doit rechercher un compromis entre une réduction maximale du bruit aléatoire et une détérioration minimale des données, en particulier des informations de contour. Ce problème est d'autant plus sensible dans le cas des images infrarouges que celles-ci se caractérisent par un fort bruit aléatoire par rapport aux images du domaine visible.

Les filtres non linéaires qui traitent l'image de façon inhomogène semblent être les plus à même de pouvoir optimiser ce compromis dans le cas des images infrarouges.

Après cette étape de filtrage du bruit aléatoire, le diagramme de la figure 8.2 montre que les traitements suivants peuvent être séparés en deux axes principaux en fonction de l'objectif final fixé, à savoir une observation humaine des images ou alors une utilisation automatique de celles-ci à des fins de détection et reconnaissance d'objets chauds par exemple.

### 8.4 Amélioration du contraste des images infrarouges

Lors de cette étape, le traitement a pour objet de modifier le contenu de l'image pour le rendre plus agréable ou utile pour un observateur humain. Après avoir réduit lors des deux étapes précédentes les dégradations présentes dans l'image, **l'amélioration du contraste** pourra être une étape ultime avant l'observation directe de l'image par un observateur humain.

Ce type de correction est également adapté lorsqu'une majeure partie des niveaux de gris présents dans l'image est concentrée dans un faible intervalle sur l'échelle des intensités lumineuses.

L'intérêt de tels traitements est d'autant plus grand dans le cas des images infrarouges que celles-ci se caractérisent par un contraste faible.



Le but de l'amélioration du contraste est généralement d'aider un observateur à la discrimination de paramètres particuliers dans l'image. Par exemple, dans le cas des images infrarouges thermiques, on peut dilater l'échelle des températures perceptibles pour mettre en évidence des objets chauds spécifiques. La fidélité de la reproduction de la scène d'origine n'est plus alors un impératif.

L'idée générale est de mettre en œuvre des opérateurs mathématiques  $F( \cdot )$  agissant sur les niveaux de luminance de chacun des points de l'image infrarouge à traiter.

Mais, contrairement au cas du filtrage des images,  $F(\cdot)$  n'agit que sur chaque pel pris séparément, c'est-à-dire qu'alors :

$$\hat{I}(i_0, j_0) = \mathcal{F}[I(i_0, j_0)] \dots\dots\dots(8.10)$$

Où

$I(i_0, j_0)$  et  $\hat{I}(i_0, j_0)$  dénotent respectivement l'intensité lumineuse du point  $(i_0, j_0)$  avant et après traitement;  $F( \cdot )$  est défini en fonction du résultat recherché.

On peut ainsi réaliser par exemple des transformations linéaires des niveaux de gris qui visent à une meilleure utilisation de la dynamique en luminance disponible dans le système de visualisation :

$$\hat{I}(i_0, j_0) = a[I(i_0, j_0)] + b \dots\dots\dots(8.11)$$

Où les constantes  $a$  et  $b$  sont définies en fonction des images à traiter et du système de visualisation utilisé.

Une des méthodes les plus classiques d'amélioration du contraste consiste également à mettre en correspondance les niveaux de gris et des fausses couleurs. Mais cette méthode basée sur le fait que l'œil humain peut discerner seulement quelques dizaines de niveaux de gris contre plusieurs milliers de couleurs différentes, ne présente que peu d'intérêt dans le cas des images infrarouges où le nombre de niveaux de gris significatifs est limité. De plus, une correspondance directe d'un niveau de gris et d'une couleur, plutôt que d'une classe d'objets et d'une couleur, devient même gênante lors de la photo-interprétation humaine d'une scène où la signature thermique des objets chauds peut évoluer, par suite de déplacements spatiaux ou de simples échauffements.

Ci-dessous sont représentées quelques-unes des plus célèbres transformations  $F$ , telles que  $\hat{I}(x, y) = \mathcal{F}[I(x, y)]$  :

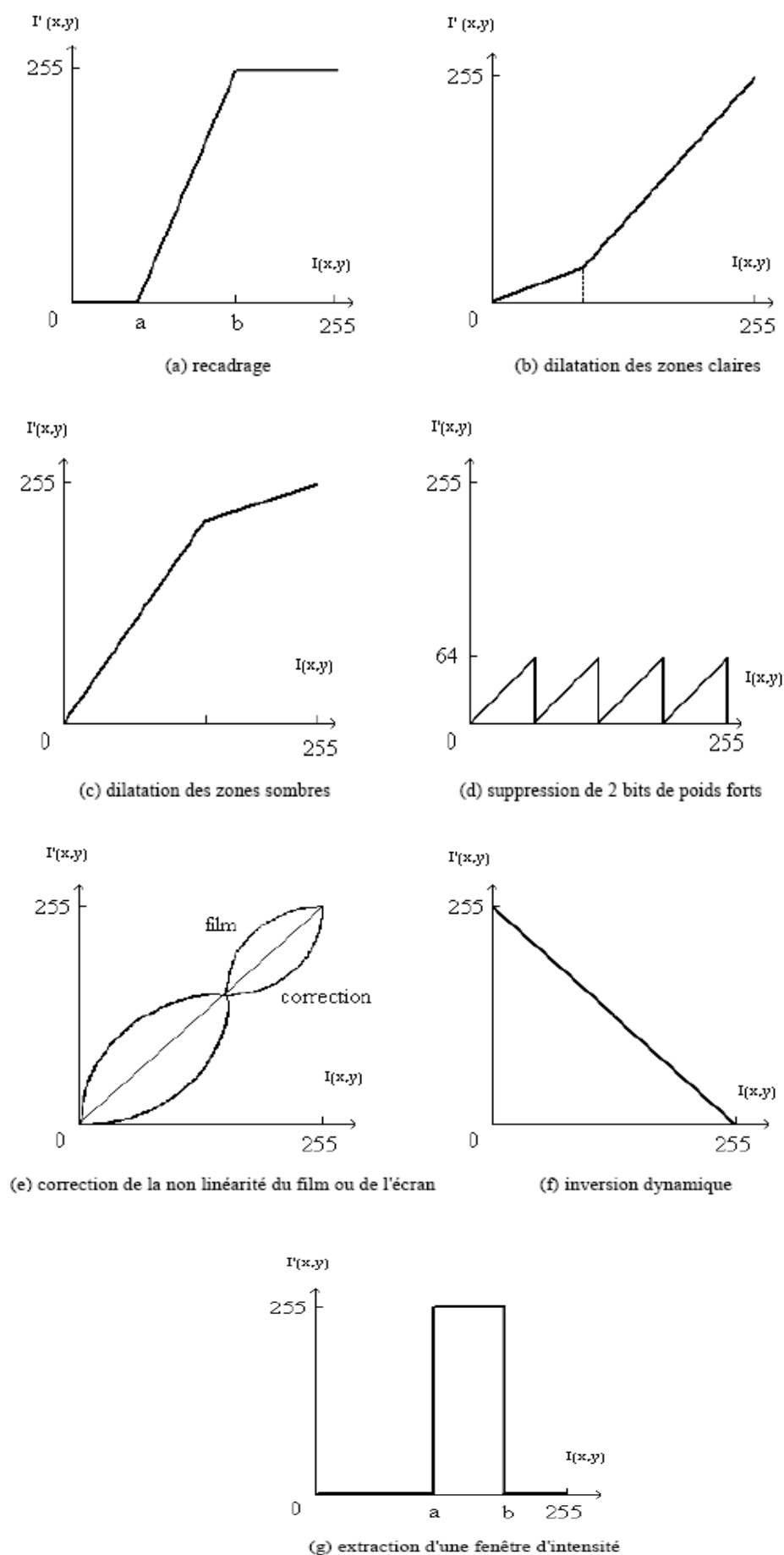


Figure 8.3: Transformation par modification de l'échelle des niveaux de gris [8.9]

### En bref :

Des méthodes simples d'amélioration du contraste telles que des transformations partiellement linéaires des niveaux de gris sont tout à fait intéressantes dans le cas des images infrarouges. En effet, pour ces images une modification du contraste avant l'observation humaine semble dans tous les cas positive, que ce soit tout simplement pour améliorer la qualité visuelle globale ou pour aider à la photo-interprétation par mise en évidence de paramètres particuliers.

Mais tout traitement sur le contraste s'accompagne la plupart du temps d'une mise en évidence plus marquée du bruit, et il est donc toujours important de faire précéder ce traitement d'une réduction des défauts dans les images infrarouges (erreurs radiométriques, bruit aléatoire, . . .).

### 8.5 Extraction et séparation d'objets chauds

Le but de cette étape est tout d'abord d'extraire de l'image des informations significatives telles que les contours d'objets chauds, si bien que pour un observateur humain, l'image obtenue peut fort bien, après traitement, ne plus refléter directement l'ensemble de la scène d'origine.

Ces informations significatives, mises ainsi en évidence, sont ensuite utilisées lors de la **segmentation** pour partitionner l'image en différents sous-ensembles ayant des propriétés communes spécifiques.

Ces traitements sont d'ailleurs à considérer comme la préparation de traitements ultérieurs destinés à une analyse automatique de la scène observée en fonction de certains critères prédéterminés.

Avant de définir un traitement visant à la segmentation puis l'analyse de l'image, il faut se fixer les paramètres sur lesquels reposeront ces traitements.

Ces paramètres peuvent être très variés; on peut citer par exemple l'utilisation de propriétés de texture, d'autres algorithmes sont basés en priorité sur le mouvement des objets d'intérêt ou leurs caractéristiques spectrales [8.10] [8.11].

En effet, des méthodes classiques d'extraction de contours peuvent être appliquées pour des images infrarouges dans la mesure où les traitements précédents les y ont préparées en réduisant en particulier les dégradations et en conservant les contours qu'elles contenaient.

Les extracteurs de contours les plus classiques se caractérisent par deux étapes successives, d'abord une étape de **filtrage** puis un **seuillage**.

Le filtrage, réalisé par convolution de l'image  $\{I(i, j)\}$ , et d'une matrice donnée  $\{M(i, j)\}$ , vise à mettre en évidence les zones de l'image où l'intensité lumineuse varie rapidement :

$$\{\hat{I}(i,j)\} = \{I(i,j)\} * \{M(i,j)\} \dots\dots\dots(8.12)$$

Voici quelques exemples de matrices M (i, j) très utilisées [8.1]

Opérateur de Roberts :

$$4. \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \text{ et } 4. \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Opérateur de Prewitt :

$$\frac{4}{3}. \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ et } \frac{4}{3}. \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Opérateur de Sobel

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

Les coefficients multiplicatifs (respectivement : 4, 4/3 et 1) permettent de normaliser l'intensité lumineuse de l'image traitée.

Le seuillage est une opération non linéaire :

$$\begin{aligned} C(i_0,j_0) &= \Re[\hat{I}(i_0,j_0)] = 0 \text{ si } \hat{I}(i_0,j_0) < S \\ &= 255 \text{ si } \hat{I}(i_0,j_0) \geq S \dots\dots\dots(8.13) \end{aligned}$$

Elle permet de ne retenir parmi les zones de transitions mises en évidence par filtrage que celles qui correspondent à un contour recherché. Le choix du seuil de luminance S dans l'image filtrée peut être automatique en utilisant les statistiques du bruit présent dans l'image d'origine :

$$S = N \cdot \sigma_b \dots\dots\dots(8.14)$$

Le facteur constant N est défini par avance expérimentalement sur un grand nombre d'images et  $\sigma_b$  est estimé lors du traitement en fonction des connaissances a priori de la caméra et de son réglage de gain.

### En bref :

L'étape de segmentation est une charnière importante dans la chaîne de traitement numérique des images puisqu'en séparant l'image en sous-ensembles d'intérêt, elle en permettra une analyse automatique dans des conditions optimales.

La segmentation est basée sur le choix de paramètres qui permettent de partitionner l'image dans les sous ensembles désirés. Suivant le caractère de l'image à traiter et la finalité du traitement global effectué, les paramètres de discrimination peuvent varier. Mais, parmi ces paramètres, les contours d'objets chauds, dans le cas des images' thermiques, apparaissent

de tout premier intérêt dans de nombreuses applications visant à une utilisation automatique de ces images.

Cette extraction d'objets chauds peut être avantageusement envisagée à deux niveaux, cherchant à mettre en évidence par exemple uniquement les parties chaudes d'un objet ou alors la forme globale de ce même objet. Mais dans tous les cas, des traitements antérieurs adaptés pour réduire le caractère particulièrement bruité des images infrarouges permettront la mise en œuvre efficace des extracteurs de contours classiquement utilisés pour les images du domaine visible.

### **8.6 Caractérisation et reconnaissance d'objets chauds**

Le but de cette étape est d'identifier les sous-ensembles mis en évidence lors du traitement précédent de segmentation d'image. Cette identification se fait à l'aide d'informations que l'on possède a priori sur une classe donnée d'objets et de descripteurs mathématiques de formes ou de signatures caractéristiques.

Il est donc primordial d'avoir tout d'abord déterminé ces informations caractéristiques qui devront être à la fois simples, pour faciliter leur mise en œuvre, mais aussi efficaces, pour limiter les erreurs lors d'identifications dans un contexte donné.

Pour un objet donné à reconnaître, on cherche généralement à définir des attributs caractéristiques invariants en translation et rotation dans l'image, ainsi qu'en changement d'échelle [8.12].

Le choix des caractéristiques à utiliser dépend du contexte ; en effet, on veut caractériser un objet dans un environnement donné constitué d'un ou plusieurs autres objets définis. Mais, bien que le modèle de caractérisation retenu doive donc être adapté à la situation à traiter, il existe des attributs généralement utilisés. Certains de ceux-ci, spécifiques, visent à caractériser par exemple l'élongation, la forme ou autres, points particuliers d'un objet; quelques exemples en sont donnés dans le tableau 8.2.

<b>Elongation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\frac{[\text{périmètre de l'objet au carré}]}{(\text{surface de l'objet})} \quad \frac{P^2}{S}</math></li> <li>• <math>\frac{[\text{distance maximale entre deux points du contour de l'objet}]}{(\text{distance minimale entre deux points du contour de l'objet})} \quad \frac{D_{\max}}{D_{\min}}</math></li> <li>• <math>\frac{[\text{distance maximale du centre de gravité du contour de l'objet}]}{(\text{distance minimale du centre de gravité du contour de l'objet})} \quad \frac{R_{\max}}{R_{\min}}</math></li> <li>• <math>\frac{[\text{longueur du rectangle minimum exinscrit de l'objet}]}{(\text{largeur du rectangle minimum exinscrit de l'objet})} \quad \frac{L_{\text{ex}}}{l_{\text{ex}}}</math></li> <li>• <math>\frac{[\text{grand diamètre de l'ellipse d'inertie de l'objet}]}{(\text{petit diamètre de l'ellipse d'inertie de l'objet})} \quad \frac{C_{\text{ell}}}{P_{\text{ell}}}</math></li> </ul>
<b>Formes spécifiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\frac{[\text{surface du rectangle minimum exinscrit de l'objet}]}{(\text{surface de l'objet})} \quad \frac{S_{\text{rec}}}{S}</math></li> <li>• <math>\frac{[\text{surface du cercle minimum exinscrit de l'objet}]}{(\text{surface de l'objet})} \quad \frac{S_{\text{cer}}}{S}</math></li> <li>• <math>\frac{[\text{surface de l'ellipse d'inertie de l'objet}]}{(\text{surface de l'objet})} \quad \frac{S_{\text{ell}}}{S}</math></li> </ul>
<b>Points spécifiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre d'angles d'un type donné dans le contour de l'objet <math>N_a</math></li> <li>• Nombre de trous dans la représentation binaire de l'objet <math>N_t</math></li> <li>• Nombre d'éléments caractéristiques de l'objet (exemple : nombre de mâts sur un bateau) <math>N_e</math></li> </ul>

Tableau 8.2 : Exemple d'attributs spécifiques de caractérisation d'objets (paramètres invariants en translation, rotation et changement d'échelle à deux dimensions)

### Remarque :

Suivant les cas, le contour de l'objet utilisé lors de l'estimation des attributs doit être lissé (estimation de l'élongation) ou approximé sous forme de segments de droites (nombres et types d'angles).

### Identification par masques déformables

Une des techniques les plus anciennes et les plus utiles en analyse d'image est certainement l'identification par masque (template matching), où l'image matricielle de l'objet à localiser et à identifier est balayée à travers l'image à traiter, afin de trouver les endroits où

la corrélation entre la matrice de points et l'image sous-jacente est la plus élevée (et donc confirmer la présence de l'objet à ces endroits). [8.13]

### **En bref :**

Le choix d'attributs caractéristiques pour un objet dans un contexte donné est une étape primordiale pour obtenir des systèmes de reconnaissance automatique efficaces. Ce choix est un problème global, c'est-à-dire dépendant non seulement de l'objet à reconnaître mais aussi des autres objets parmi lesquels on doit l'identifier.

Mais il existe tout de même des paramètres généraux pour caractériser des formes données. Parmi ceux-ci les combinaisons de moments d'inertie semblent bien adaptées à la caractérisation d'images numériques : leur utilisation permet de bien s'affranchir des problèmes liés à la numérisation lors de changements d'orientation ou de taille d'un objet à identifier.

Dans le cas des images infrarouges, ces méthodes générales gardent tout leur intérêt, mais il peut être en outre fait usage des propriétés spécifiques des objets chauds en appliquant par exemple ces méthodes non seulement aux objets tout entiers mais aussi aux parties chaudes de ceux-ci . Il sera également intéressant d'utiliser des attributs spécifiques combinant les propriétés des parties chaudes et des autres parties de l'objet à caractériser (rapport de surfaces, de distances, de moments, . . .).

Mais dans tous les cas, il faut que ces attributs :

- évoluent le moins possible pour un même objet lorsque celui-ci subit des modifications spatiales ;
- soient nettement différents d'un élément à un autre dans la classe totale des objets à identifier.

Ces deux impératifs définissent l'efficacité de chacun des attributs. En fonction de celle-ci, on pourra par exemple envisager une structure hiérarchique de la reconnaissance des objets, utilisant en priorité les attributs les plus efficaces [8.14].

### **Conclusion**

Dans tous les cas, des méthodes de traitement numérique appliquées aux images infrarouges s'avèrent être une solution efficace pour pousser plus avant les potentialités des caméras thermiques. Le développement de systèmes de plus en plus sophistiqués pourra ainsi être envisagé pour aider l'homme lors de prises de décision en réalisant par exemple une reconnaissance automatique d'objets chauds.

Nous avons donc présenté les étapes les plus importantes d'une telle chaîne de traitement numérique des images infrarouges, en insistant en particulier sur les traitements les plus spécifiques liés à la nature de ces images qui ne diffèrent des images du domaine visible que par des aspects qui peuvent sembler secondaires, mais qui ont en fait une grande importance dans l'utilité et l'applicabilité des méthodes classiques de traitement des images.

Ainsi, la présence dans les images infrarouges à la fois d'erreurs radiométriques et d'un fort bruit aléatoire nécessite de mettre en œuvre, en priorité, des traitements spécifiques pour réduire ces défauts. Les images infrarouges ainsi prétraitées peuvent alors subir efficacement des traitements classiquement utilisés pour des images du domaine visible.

On va montrer dans ce qui suit l'efficacité d'utiliser un outil puissant de traitement d'images « logiciel ImageProPlus IPP » qui va nous aider à exploiter le maximum d'informations contenues dans des images infrarouges pour différents domaines.

## **9. Traitement d'images infrarouges par « Image Pro Plus »**

Le logiciel utilisé est de version 4.5.0.29 pour Windows 98/NT/2000. Le support technique est accessible via Media Cybernetics' home page sur le site Web : <http://www.mediacy.com>.

Tout d'abord, nous avons besoin d'une banque ou galerie, source d'images infrarouges. Ceux-ci sont disponibles à partir de différents sites Internet à savoir celui de « Flir Systems » où les images infrarouges sont corrigées des effets dégradants tels que les erreurs radiométriques et le bruit aléatoire. Elles sont aussi calibrées en températures et munies d'un toolbar indiquant la gamme de température utilisée pour toutes les couleurs si les images sont colorées (RGB, HSV, HSI...) ou pour toutes les valeurs des intensités de Gris réparties de 0 à 255 si les images sont de type niveau de gris. Les images choisies représentent les domaines les plus importants tels que la maintenance industrielle, la médecine, recherche et développement, etc.

Une caméra infrarouge ne produit normalement qu'une image noir et blanc. C'est cette image qu'on appelle un thermogramme. En utilisant des algorithmes appropriés mais complexes, l'image N&B peut être convertie en une image en couleur. Cette opération est souhaitable car nous avons une perception naturelle des couleurs qui sont chaudes, du rouge au blanc, par exemple. C'est pourquoi un thermogramme en couleur donne une perception immédiate des différences de température dans l'image proprement dite.



### Images infrarouges de maintenance industrielle :

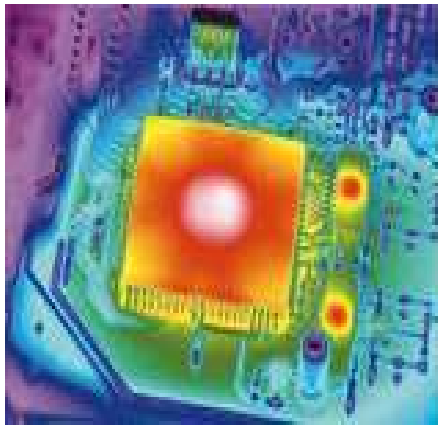


Image 01

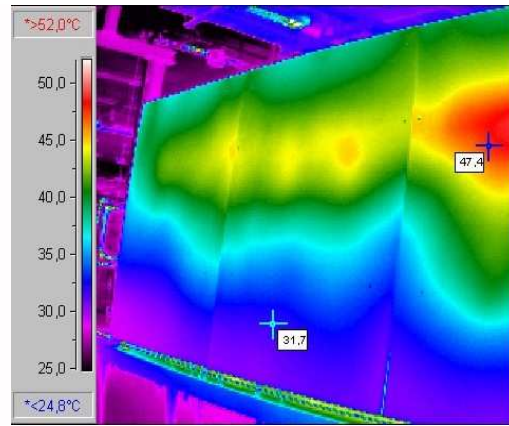


image 02

L'image infrarouge 01 est d'une carte de circuit imprimé pour les ordinateurs portables montrant les dissipations thermiques dans les composants électroniques. (source : Flir Systems). Elle a les caractéristiques suivantes :

- Classe : RGB 24
- Taille : largeur 279 pixels, hauteur 214 pixels
- Nombre de canaux : 03 (08 bits par canal, 24 bits par pixel)
- Gamme de température : de 25.1°C à 55.4 °C

L'image infrarouge 02 représente une dégradation localisée de l'isolation sur une paroi de four (Doc SPIE ). Elle a les caractéristiques suivantes :

- Classe : RGB 24
- Taille : largeur 257 pixels, hauteur 213 pixels
- Nombre de canaux : 03 (08 bits par canal, 24 bits par pixel)
- Gamme de température : 25°C à 50 °C

### Images infrarouges pour la recherche (analyse des contraintes) :



Image 02a

image 02b

image 02c

Ces images infrarouges représentent un matériau soumis à un essai pour l'analyse des contraintes (Flir Systems). Elles ont les caractéristiques suivantes :

- Classe : RGB 24
- Taille : largeur 164 pixels, hauteur 159 pixels
- Nombre de canaux : 03 (08 bits par canal, 24 bits par pixel)

### Images infrarouges médicales:

Ces images montrent l'amélioration de la circulation sanguine ; après 20 minutes de l'utilisation d'un produit ionique vital (la gamme de température est entre 25 et 36°C), (source : Flir Systems)

Avant utilisation

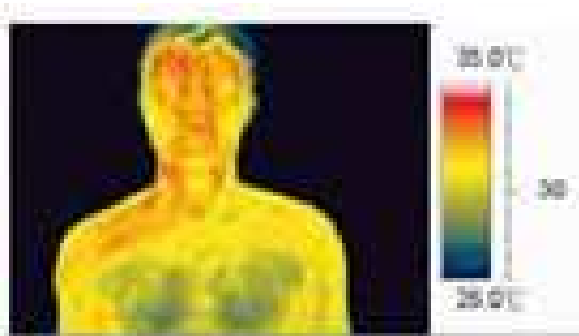


Image 03a

après utilisation

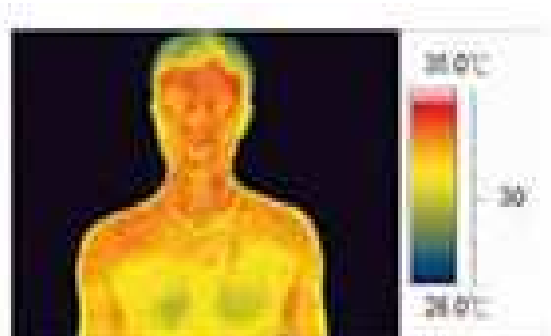


image 03 a'



Image 03b

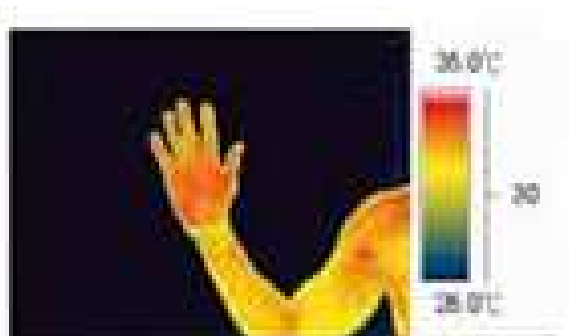


Image 03B'

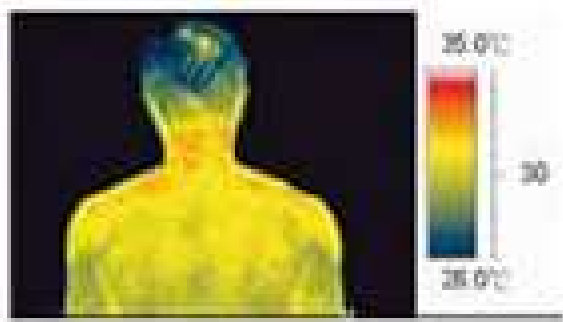


Image 03c

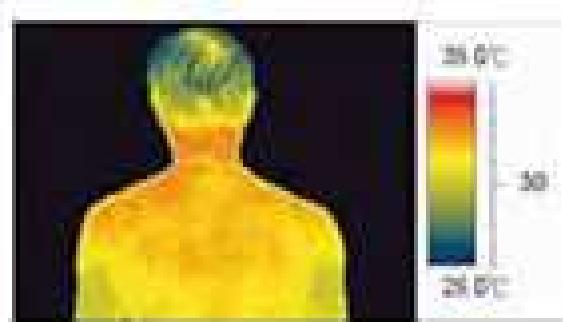


image 03c'

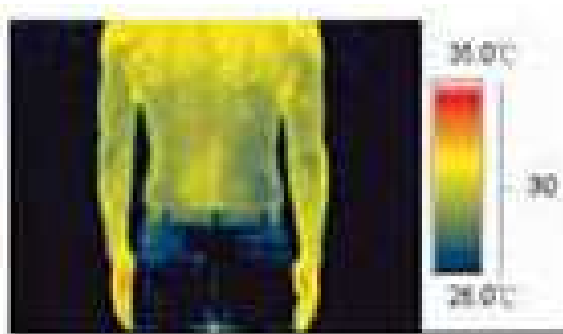


Image 03 d



image 03d'

Ces images médicales ont les caractéristiques suivantes :

- Classe : RGB 24
- Taille : largeur 294 pixels, hauteur 178 pixels
- Nombre de canaux : 03 (08 bits par canal, 24 bits par pixel)
- Gamme de température : 25°C à 35 °C

**Images de télédétection infrarouge :**

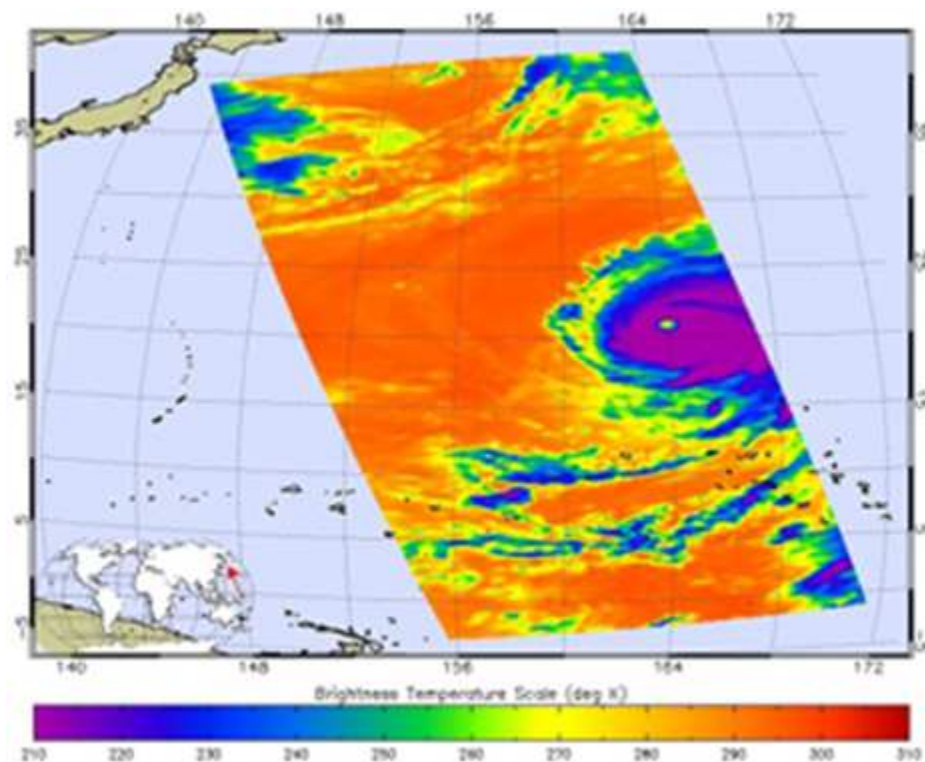


Image 04a

Cette image infrarouge représente le pacifique, captée par le détecteur infrarouge « Atmospheric Infrared Sounder AIRS » monté sur le satellite NASA's Aqua en 01 septembre 2006, lorsque une tempête a causée un fort typhon. Cette image montre les températures des nuages supérieures et celles de la surface des régions de la terre non couvertes par les nuages. Les basses températures (en pourpre) sont associées avec les nuages supérieurs froids qui constituent le cœur de la tempête. Les vues où il n'y a pas de nuages, l'instrument AIRS lire le signal infrarouge émis à partir de la terre révélant ainsi des températures chaudes (en rouge). Cette image a les caractéristiques suivantes :

- Classe : RGB 24
- Taille : largeur 470 pixels, hauteur 390 pixels
- Nombre de canaux : 03 (08 bits par canal, 24 bits par pixel)
- Gamme de température : 210°K à 310 °K

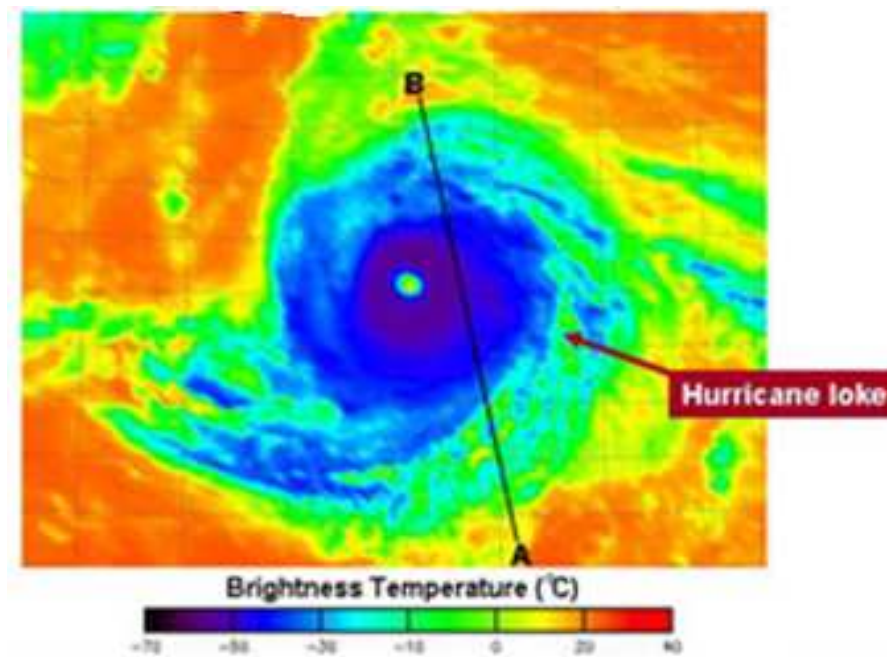


Image 04b

Cette image infrarouge donne une vue directe du typhon en 25 Aout 2006 captée par Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) [9.1]. Cette image a les caractéristiques suivantes :

- Classe : RGB 24
- Taille : largeur 457pixels, hauteur 366 pixels
- Nombre de canaux : 03 (08 bits par canal, 24 bits par pixel)
- Gamme de température : -70°C à 40 °C

Elle donne idée sur l'élargissement de la tempête. Les régions rouge et pourpre de cette image indiquent de larges quantités des eaux des nuages. Les régions bleues le long des nuages indiquent la glace des nuages, alors que les lignes bleues ondulées dans le centre de l'image indiquent une précipitation intense.

### 9.1 rehaussement d'images infrarouges

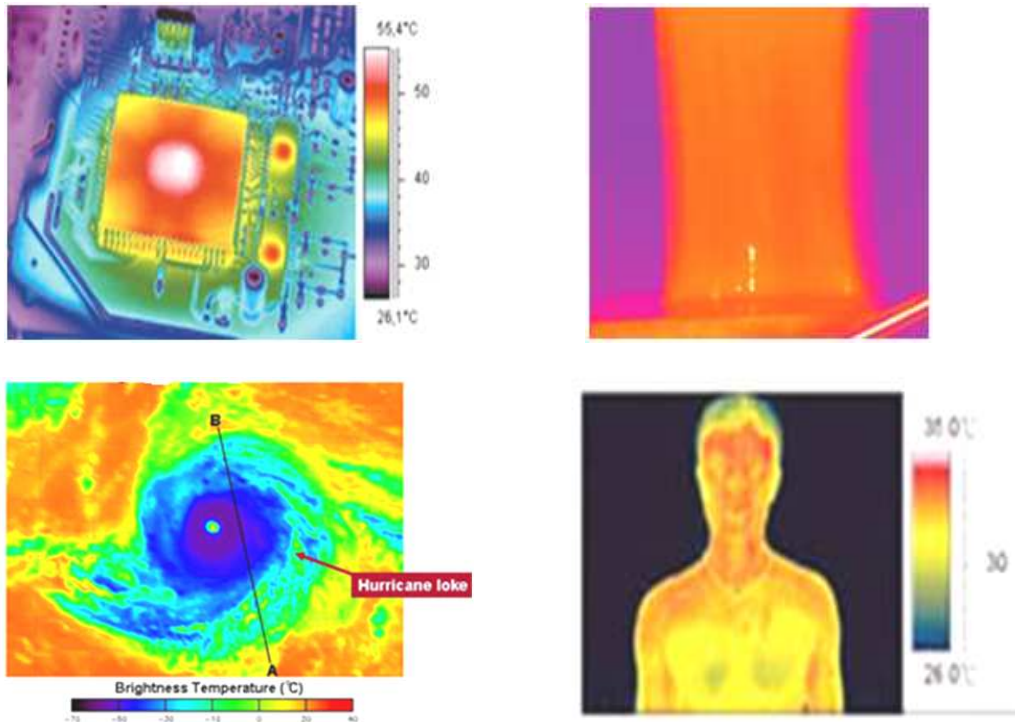
On applique généralement le rehaussement des images afin de faciliter l'interprétation visuelle et la compréhension des images. On va opérer par la suite – à titre d'exemple - sur seulement quatre images infrarouges : 01, 2a, 3a' et 04b.

#### 9.1.1 modification de l'intensité des pixels

Un moyen pour améliorer une image est de changer la manière dont les valeurs d'intensité sont interprétées. On peut utiliser différent outils tels que:

- **changement de luminosité**

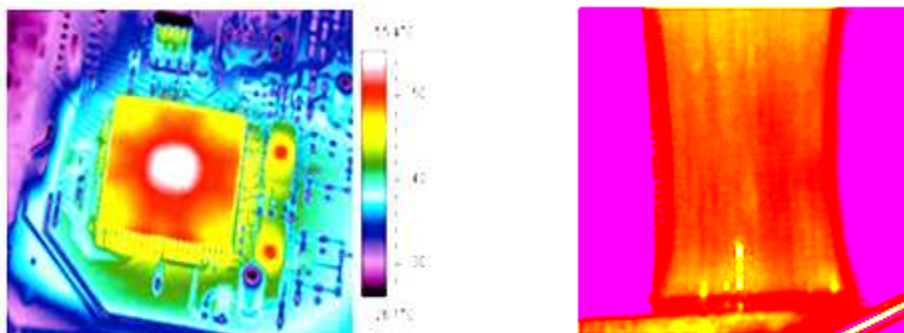
Une augmentation de la luminosité pour les images 01, 2a, 3a' et 04b, nous a permis d'avoir les résultats suivants :



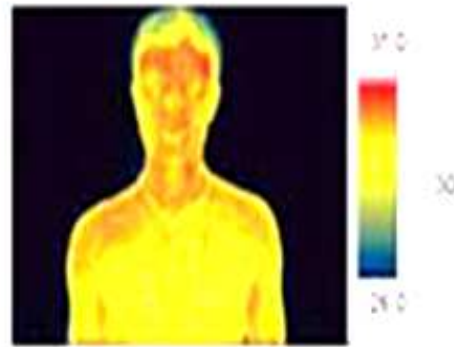
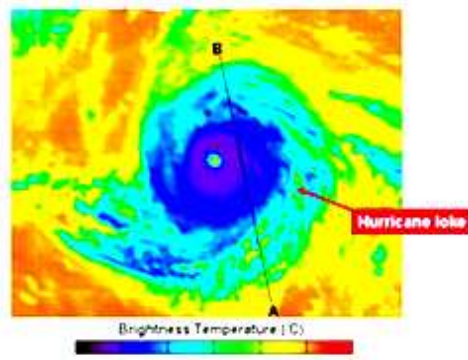
Les images 01, 2a, 3a' et 04b après augmentation de luminosité.

- **Changement de contraste**

L'augmentation du contraste nous donne aussi des images satisfaisantes :





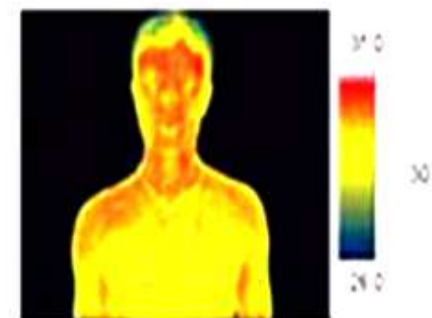
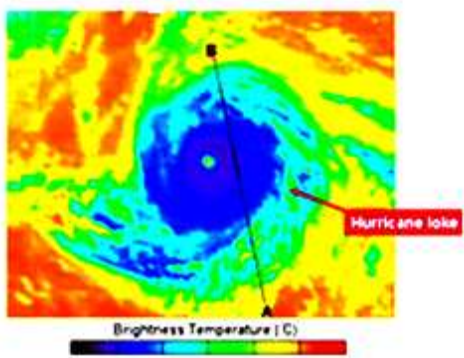
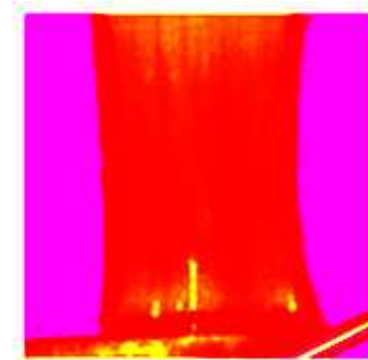
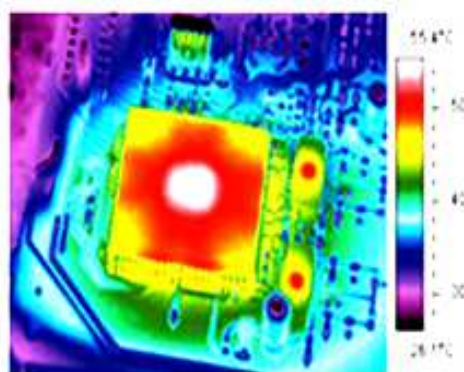


Les images 01, 2a, 3a' et 04b après augmentation du contraste.

Le rehaussement des contrastes se fait en changeant les valeurs initiales de façon à utiliser toutes les valeurs possibles, ce qui permet d'augmenter le contraste entre les cibles et leur environnement.

#### - Corrections Gamma

L'oeil humain ne perçoit pas une palette de couleur de façon linéaire, les tons moyens paraissent plus sombres. La correction gamma vise à corriger cette différence de perception.



Les images 01, 2a, 3a' et 04b après qu'elles subissent des corrections Gamma.

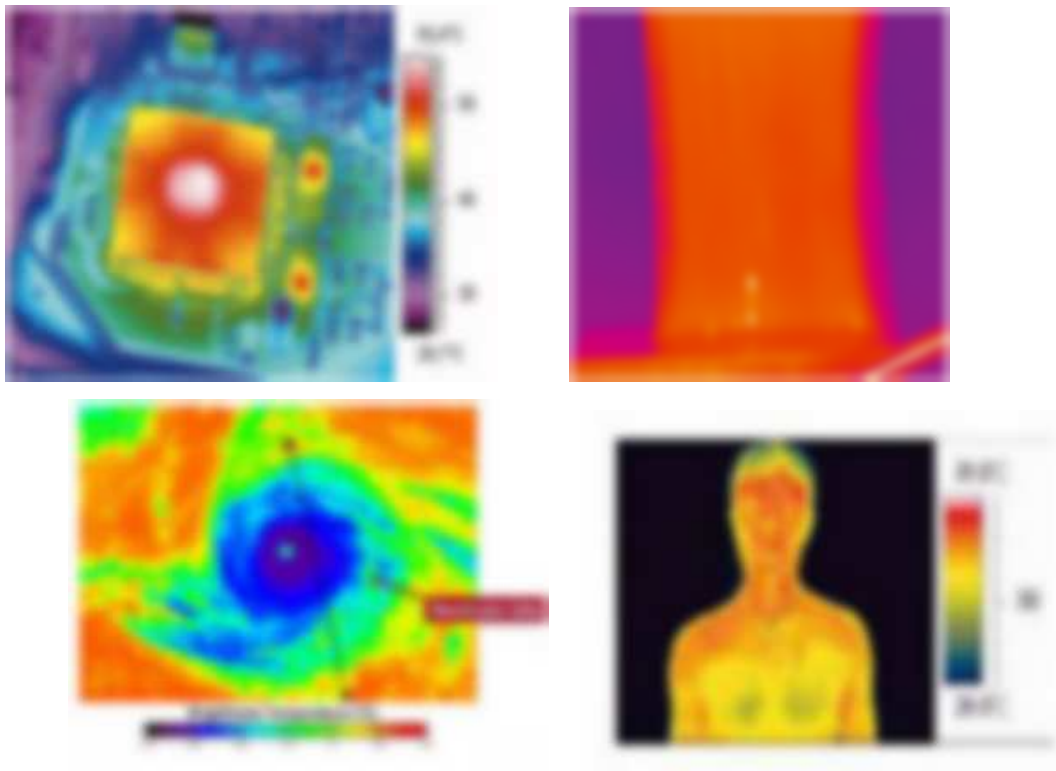
#### 9.1.2 filtrage spatial

Les techniques de filtrage sont divisées en deux catégories : filtres de convolution ou linéaires et filtres de non convolution ou non linéaires. La méthode de filtrage spatial consiste à déplacer une "fenêtre" d'une dimension de quelques pixels (ex. : 3 sur 3, 5 sur 5, etc.) au-dessus de chaque pixel de l'image. On applique alors un traitement mathématique utilisant les valeurs des pixels sous la fenêtre et on remplace la valeur du pixel central par le résultat obtenu. La fenêtre est déplacée le long des colonnes et des lignes de l'image, un pixel à la fois, répétant le calcul jusqu'à ce que l'image entière ait été filtrée.

#### 9.1.2.1 Filtre de convolution

- **Filtre passe-bas**

Un filtre passe-bas est conçu afin de mettre en évidence les régions assez grandes et homogènes ayant des pixels d'intensité similaire. L'utilisation de ce filtre nous a donné les résultats suivants :



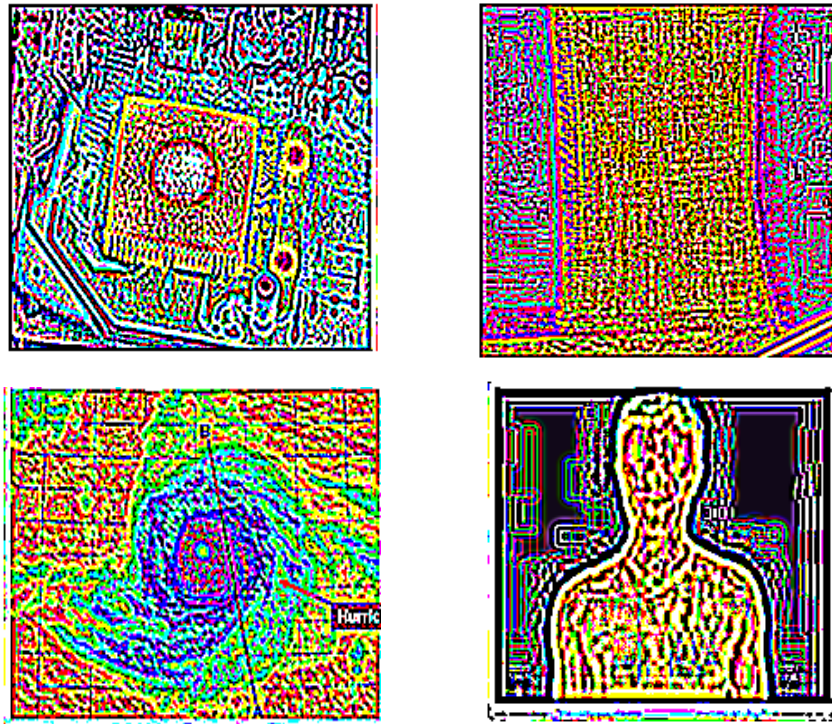
Images 01, 2a, 3a' et 04b après qu'elles subissent un filtrage passe-bas à des fins de rehaussement.

On voit que ce filtre réduit les plus petits détails d'une image. Il est donc utilisé pour lisser une image.

- **Filtre passe-haut**

Les filtres passe-haut font le contraire des filtres passe-bas : ils sont utilisés pour raviver les petits détails d'une image. L'utilisation de ce filtre nous a donné les résultats suivants :



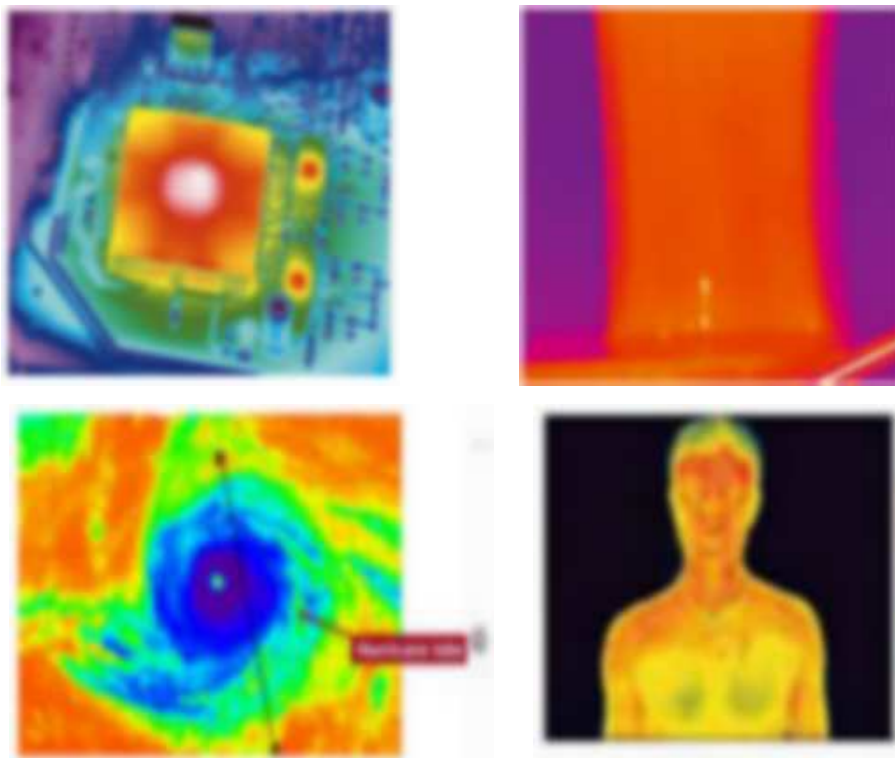


Images 01, 2a, 3a' et 04b après qu'elles subissent un filtrage passe-haut à des fins d'amélioration.

On voit que les détails ayant une fréquence spatiale élevée sont rehaussés.

- **Filtre de Gauss**

La fonction de ce filtre est pour doucir une image par élimination de l'information haute fréquence. Les images suivantes montrent ça :

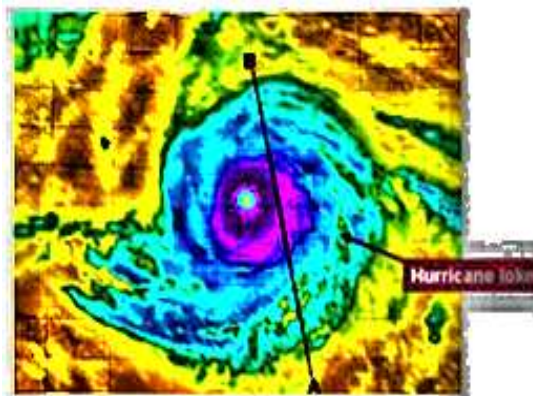
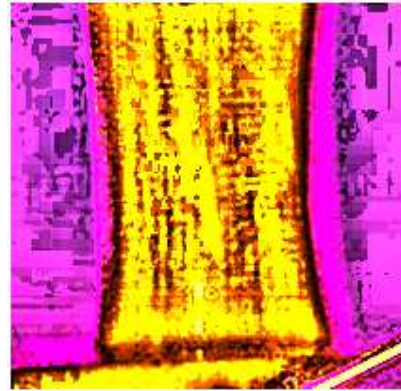
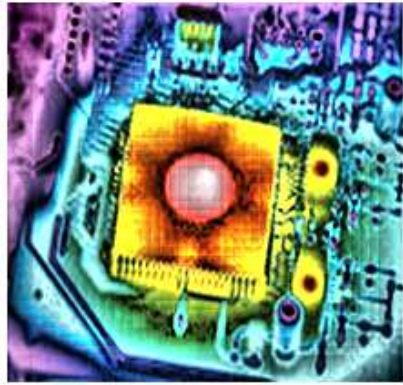


Images 01, 2a, 3a' et 04b après qu'elles subissent un filtrage de Gauss.

On voit que l'opération de filtre de Gauss est similaire à celle du filtre passe bas, mais il dégrade moins l'image qu'un filtre passe-bas.

- **Filtre d'égalisation locale**

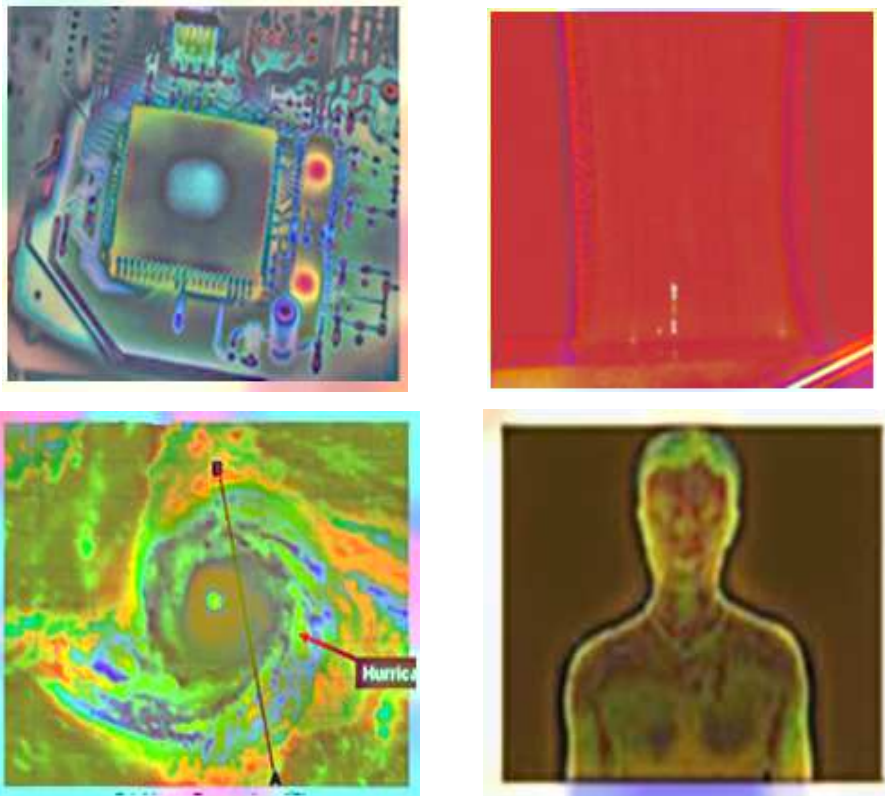
Ce filtre améliore le contraste du pixel basé sur l'histogramme de voisinage local. Les résultats de l'application de ce filtre sont les suivants :



Images 01, 2a, 3a' et 04b après l'application du filtre d'égalisation.

- **Filtre Fatten**

Ce filtre réduit les variations d'intensité dans les pixels du fond. L'utilisation de ce filtre par IPP nous a donné les résultats suivants :

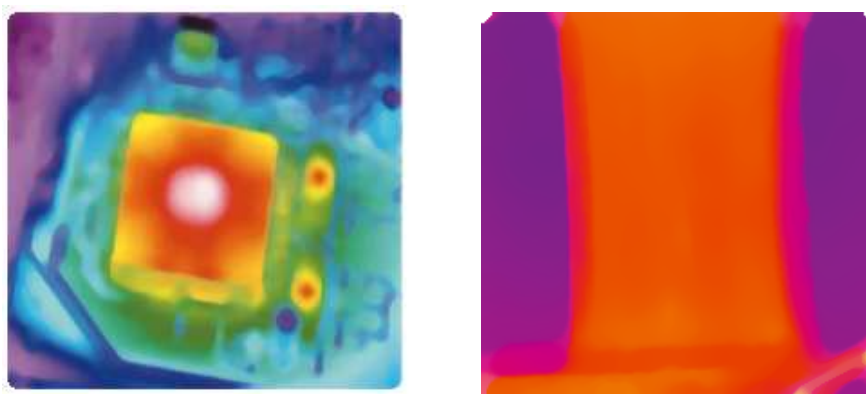


Images 01, 2a, 3a' et 04b obtenues après l'application du filtre de Fattin utilisant IPP.

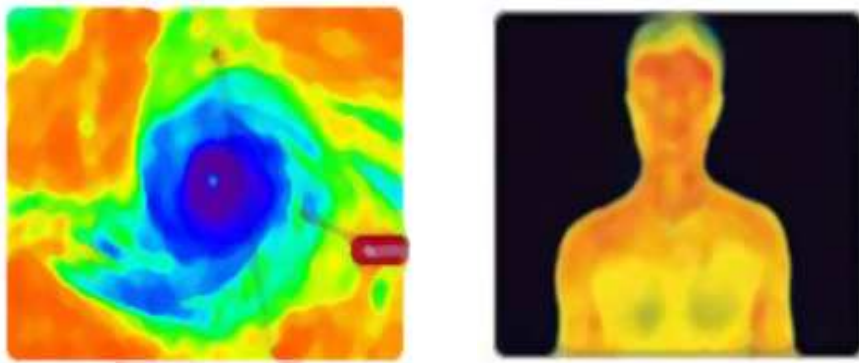
Ceci est souvent utilisé afin de préparer une image pour une opération de comptage si ses objets sont difficiles à isoler, parce que le fond d'image contient des pixels avec la même intensité que les objets intéressés.

- **Filtre médian**

Ce filtre est particulièrement efficace à la suppression du bruit impulsionnel arbitraire de l'image. L'utilisation de ce filtre par IPP nous a donné les images suivantes :





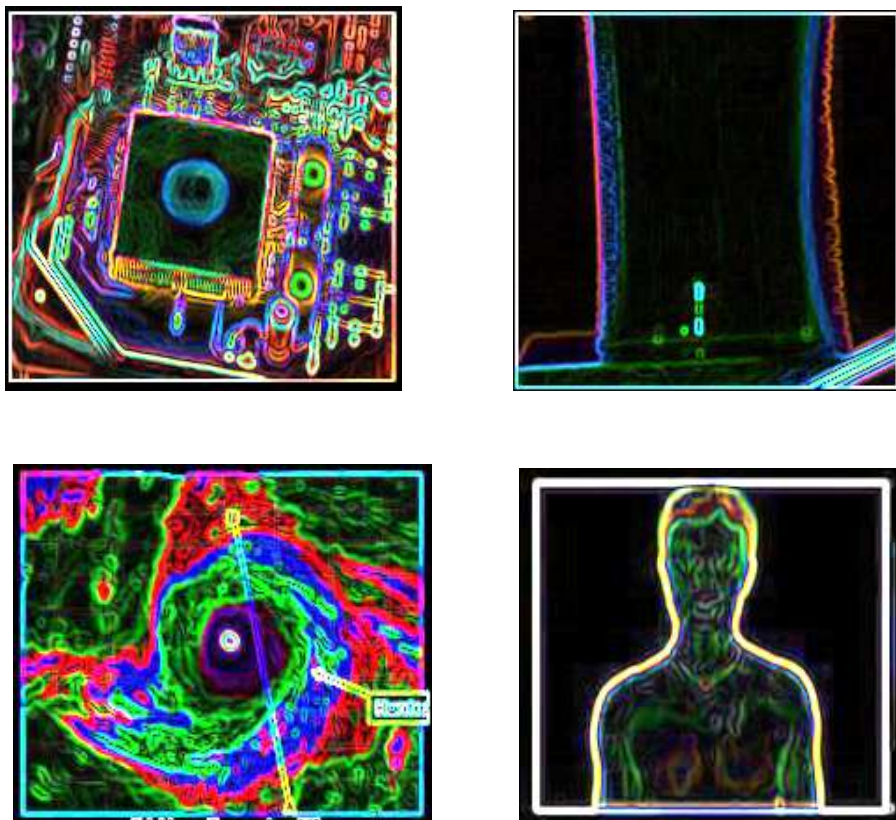


Images 01, 2a, 3a' et 04b obtenues après l'application du filtre médian utilisant IPP.

#### 9.1.2.2 filtres contours

- **filtre de Sobel**

Ce filtre extrait et améliore les limites et les contours dans une image. L'utilisation de ce filtre par l'IPP nous a donné les images suivantes :

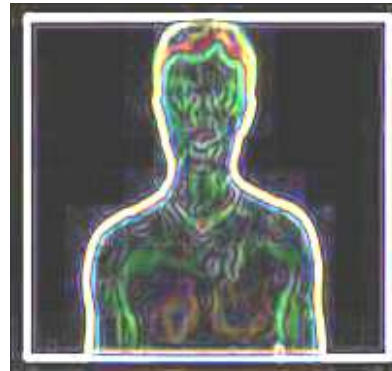
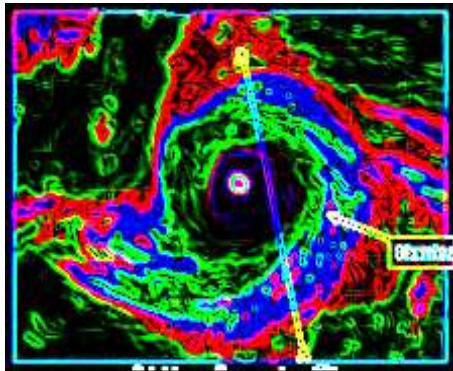
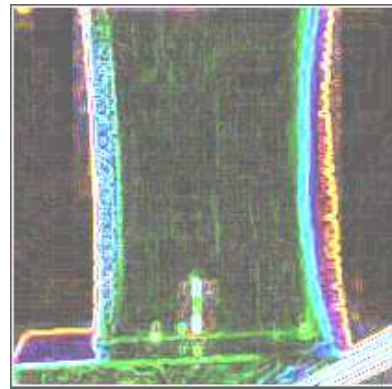
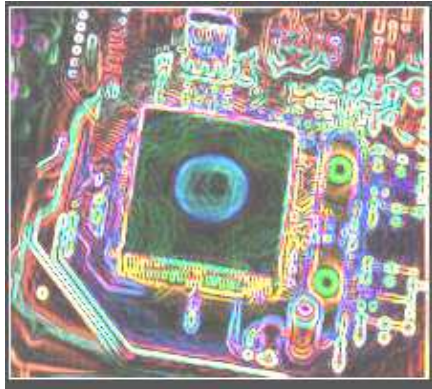


Images 01, 2a, 3a' et 04b obtenues après l'application du filtre Sobel utilisant IPP.

On voit sur ces images, une amélioration d'apparition des limites et contours.

- **Filtre de Roberts**

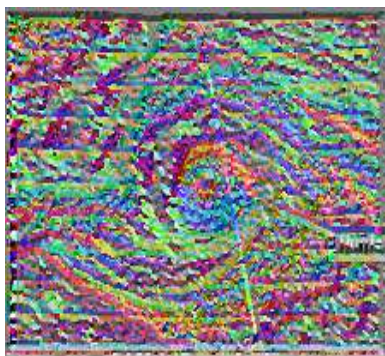
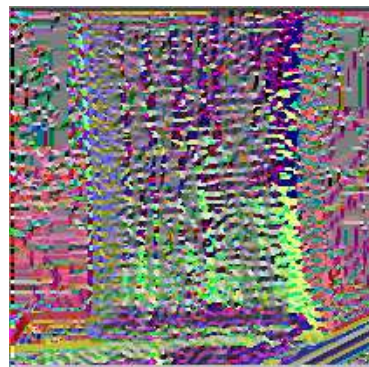
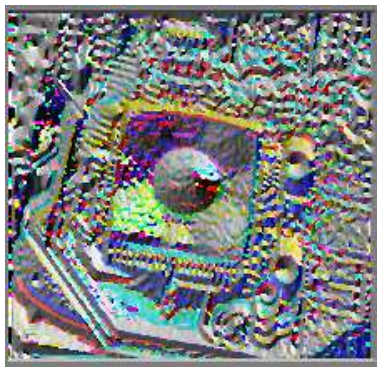
Ce filtre extrait et améliore les contours fins dans une image. Ceci est montré dans les images suivantes :



Images 01, 2a, 3a' et 04b obtenues après l'application du filtre Roberts utilisant IPP.

- **Filtre de phase**

Ce filtre est utilisé pour localiser les contours et indiquer la direction des changements de l'intensité. Le filtrage de phase nous a donné les images suivantes :



Images 01, 2a, 3a' et 04b obtenues après l'application du filtre de phase utilisant IPP.



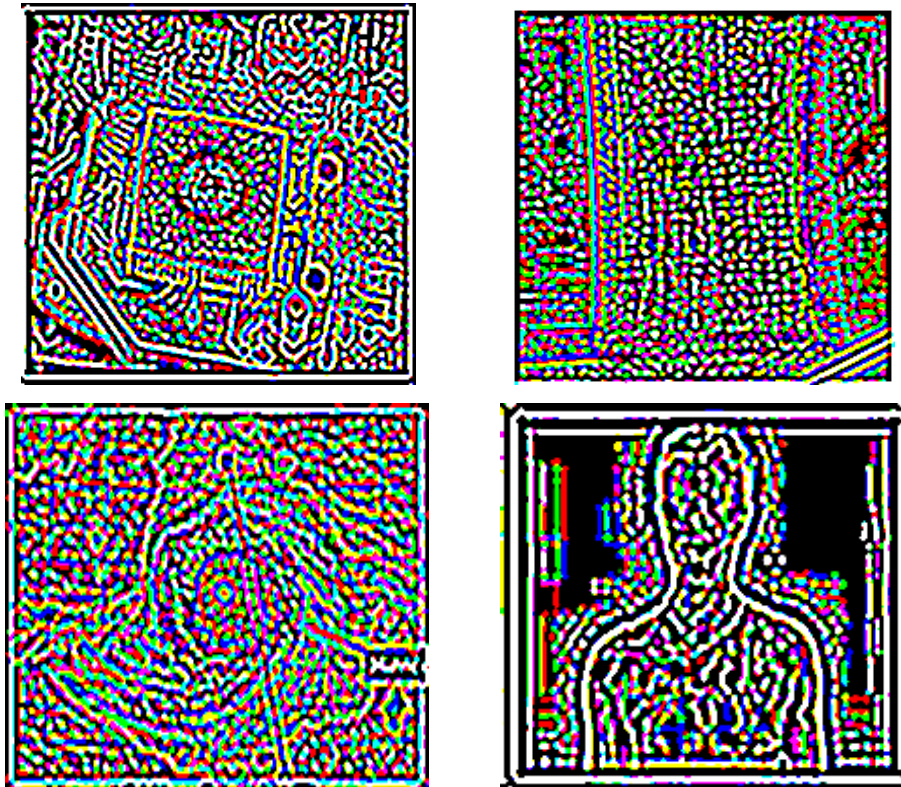
On voit que le filtre de phase donne un relief 3D à l'image. Les surfaces qui n'ont pas de différences d'intensité sont plates.

Notons ici que les imperfections mineures sont devenues visibles dans les images filtrées.

### 9.1.2.3 filtres de non convolution ou morphologiques

- **filtre « Top hat »**

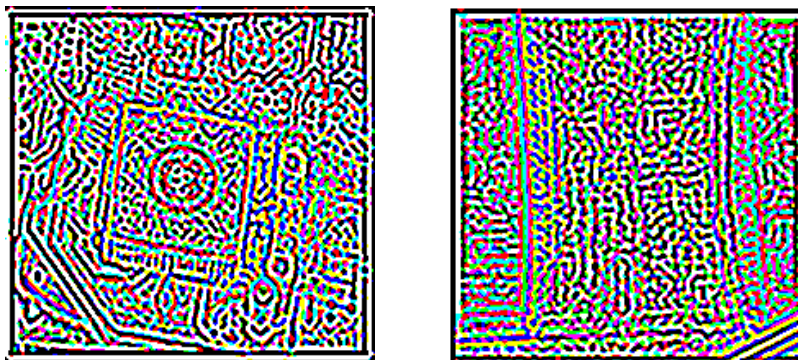
Ce filtre détecte et souligne les points, ou les grains, qui sont brillants que le fond. Son application a donné les résultats suivants :

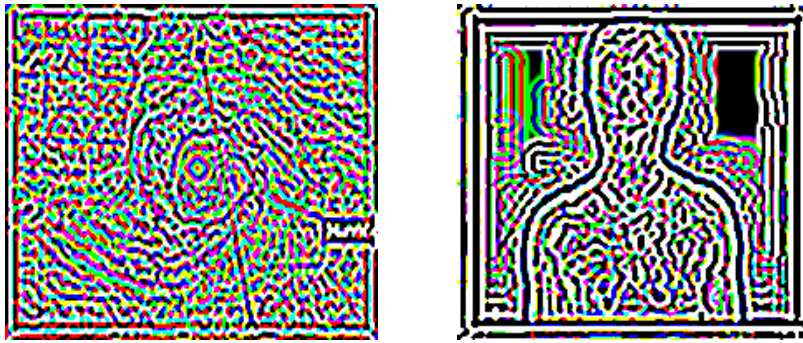


Images 01, 2a, 3a' et 04b obtenues après l'application du filtre de Top hat utilisant IPP.

- **Filtre Well**

Ce filtre détecte et souligne les points, ou les grains, qui sont obscures que le fond. Son application a donné les résultats suivants :

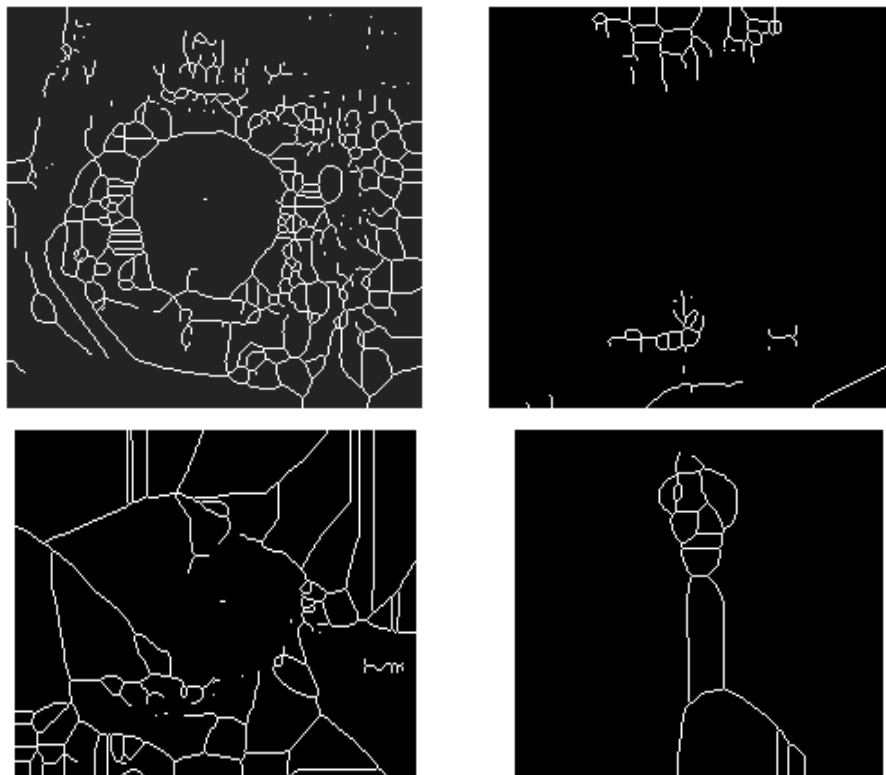




Images 01, 2a, 3a' et 04b obtenues après l'application du filtre de Well utilisant IPP.

- **Filtre Thinning**

Ce filtre réduit l'image à son squelette. Il opère sur une base binaire ; les pixels appartiennent à un objet si leurs intensités sont supérieures à 127, sinon, ils appartiennent au fond de l'image. L'utilisation de ce filtre par le logiciel IPP a donné les images suivantes :



Images 01, 2a, 3a' et 04b obtenues après l'application du filtre de Thinning utilisant IPP.

## Conclusion :

Ces filtres, donc, sont conçus de façon à faire ressortir ou à supprimer des caractéristiques spécifiques d'une image en se basant sur leur fréquence spatiale.

La fréquence spatiale fait référence à la fréquence de variation des différents tons qui apparaissent dans une image. Les régions d'une image où la texture est "rugueuse" sont les

régions où les changements dans les tons sont abrupts; ces régions ont une fréquence spatiale élevée. Les régions "lisses" ont une variation des tons qui est plus graduelle sur plusieurs pixels; ces régions ont une fréquence spatiale faible.

En fait, l'interprétation de ces images infrarouges traitées par IPP ne nécessite pas tous ces filtres ; l'objectif visé est de montrer les différentes possibilités qu'offre le traitement d'images par IPP pour résoudre surtout les problèmes scientifiques de recherche et développement.

### **9.1.3 analyses basés sur l'intensité du pixel**

Les opérations d'analyse, basées sur l'intensité du pixel laissent nous collecter l'information de l'image en se basant sur les valeurs d'intensité qui contient. Parmi les outils d'analyse on trouve :

- l'analyse par histogramme ;
- l'analyse par Ligne de profile ;
- l'analyse Bitmap

#### **9.1.3.1 analyses basées sur l'histogramme**

Un histogramme montre la distribution des intensités dans une image. Il décrit, dans un format graphique, les caractéristiques de contraste et de la gamme dynamique de l'image. Pour les images infrarouges, on parle de distribution de température au lieu de distribution d'intensités vue la proportionnalité qui existe entre eux (la relation de proportionnalité est obtenue par le procédé de calibrage de la caméra thermique).

Les graphes 9.1, 9.2, 9.3 et 9.4 représentent respectivement les histogrammes des images 01,02a, 03a et 04b obtenus par IPP.

Sur l'histogramme on peut agir sur les portions pour lesquelles les valeurs d'intensité ont une fréquence plus élevée pour améliorer le contraste par exemple ; les détails de ces régions seront mieux rehaussés que les détails des régions pour lesquelles la fréquence des valeurs d'intensité de l'histogramme est plus faible, comme on peut aussi rehausser le contraste dans une portion spécifique de l'histogramme.



L'histogramme est un outil privilégié en analyse d'images infrarouges car il représente un résumé simple, mais souvent suffisant du contenu de l'image.

### **9.1.3.2 analyses basées sur la ligne de profil**

Pour un thermographe, ce type d'analyse est le plus important parce qu'il lui donne la distribution linéaire, circulaire ou quelconque de l'intensité et donc de la température selon une droite, un cercle ou forme quelconque sur l'image pour mieux localiser l'excès de température qui a causé le problème ou le phénomène. Ce type d'analyse nous a permis d'évaluer les changements de la température de surface d'un patient après 20 minutes de la prise d'un produit vital (les images 03a...03c').

Les graphes 9.5a, 9.5a', 9.5b, 9.5b', représentent respectivement les profils d'intensité et donc de température des images 03a, 03a', 03b, 03b'.

La température de la surface située entre les bouts des doigts et le poignet a augmentée de presque 2°C. Ce produit a donc un effet notable pour ceux qui souffrent de froid des extrémités des organes et d'une circulation sanguine impropre.

L'analyse de la pièce mise sous contrainte de tension (images 02a, 02b) nous a donné les graphes 9.6.a et 9.6.b.

Ces graphes montrent clairement le comportement énergétique de la pièce au niveau de l'endroit critique ; les différences de températures enregistrées nous a permis de localiser avec précision le point où la rupture a commencée. Ce genre d'informations constitue une aide précieuse à l'étude de distribution des dislocations et des imperfections dans les matériaux ; il faut faire attention aux propriétés physiques, chimiques, mécaniques, etc de la surface qui sont souvent très différents de matière au sein du milieu, notamment lorsque la surface présente parfois des couches d'oxydes, des dépôts, des salissures qui peuvent affecter les mesures de température notamment par rayonnement.

**L'analyse Bitmap** est utilisé pour voir les valeurs des pixels de la fenêtre active (AOI) dans un format numérique.

## **9.2 Segmentation d'images infrarouges**

La segmentation est un processus par lequel certaines couleurs (ou niveaux de gris) dans une image peuvent être identifiés visuellement, puis isolés de l'image. Cependant, ce

processus peut être utilisé pour la séparation des objets d'intérêt (objets chauds ou froids) de fond de l'image.

Le graphe 9.7 montre une façon de segmenter l'image 01 en différentes classes.

- Classe 01 : niveau de gris entre 0 et 80, couleur bleue.
- Classe 02 : niveau de gris entre 81 et 170, couleur vert.
- Classe 03 : niveau de gris entre 171 et 230, couleur marron.
- Classe 04 : niveau de gris entre 231 et 255, couleur rouge.

En fait, une correspondance directe d'un niveau de gris et d'une couleur, plutôt que d'une classe d'objets et d'une couleur, devient gênante lors de la photo-interprétation humaine d'une scène où la signature thermique des objets chauds peut évoluer, par suite de déplacements spatiaux ou de simples échauffements.

## Conclusion :

La thermographie infrarouge, présentée par les images thermiques issues des caméras infrarouges, a fait leur preuve en tant que technique indispensable en **contrôle**, **mesure** et **détection**. Pour les tâches de réparation en maintenance industrielle préventive, de l'analyse des phénomènes scientifiques, de détection d'objets chauds et froids ; la cible peut souvent être localisée avec une facilité surprenante, dès que la chaleur qu'elle dégage devient visible. La tâche devient encore facile si on utilise un outil de traitement d'images tel que IPP, qui nous aidera à les mieux interpréter en répondant sur les questions : comment et combien la température est distribuée dans l'espace de la scène observée dans un moment donné. Cela nous conduira sans doute à répondre sur la question pourquoi la température a une telle distribution ou pourquoi l'objet examiné a tel ou tel comportement calorifique.

## **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 d'assez de problèmes dans différents domaines de la vie. Cette triche de la réalité implique la maîtrise de la cuisine de plusieurs disciplines telles que la radiométrie, l'optique, l'électronique, la thermodynamique, l'instrumentation physique, etc.

La caméra infrarouge, par ses résolutions spatiale, spectrale et thermique nous donne une carte de répartition spatiale et temporelle de luminance. Le thermographe armé d'un labo équipé de matériels doit intervenir pour trouver une correspondance entre les luminances mesurées et les températures de surface de la scène analysée ; le résultat est une image thermique appelée aussi thermogramme. Ce dernier est considéré comme étant la matière brute chez le thermographe, emmagasinant d'énormes informations. Extraire ces informations d'images infrarouges, constitue la tâche idéale dont le thermographe est obligé de la passer. Nous avons donc essayé de donner à cette tâche leur aspect pratique à travers l'application des commandes d'un outil puissant de traitement d'images « logiciel IPP » sur un ensemble d'images infrarouges qui représentent certains domaines scientifiques courants pour les

interpréter, en répondant indirectement sur les questions : 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 ou pourquoi l'objet examiné a tel ou tel comportement calorifique. Les étapes suivies se résument en trois étapes essentielles : La restauration et l'amélioration qui conduisent à produire une image la plus proche de la réalité physique de la scène observée et de satisfaire l'œil de l'observateur humain et la segmentation pour extraire et séparer les objets chauds.

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.



## 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 d'assez de problèmes dans différents domaines de la vie. Cette triche de la réalité implique la maîtrise de la cuisine de plusieurs disciplines telles que la radiométrie, l'optique, l'électronique, la thermodynamique, l'instrumentation physique, etc.

La caméra infrarouge, par ses résolutions spatiale, spectrale et thermique nous donne une carte de répartition spatiale et temporelle de luminance. Le thermographe armé d'un labo équipé de matériels doit intervenir pour trouver une correspondance entre les luminances mesurées et les températures de surface de la scène analysée ; le résultat est une image thermique appelée aussi thermogramme. Ce dernier est considéré comme étant la matière brute chez le thermographe, emmagasinant d'énormes informations. Extraire ces informations d'images infrarouges, constitue la tâche idéale dont le thermographe est obligé de la passer. Nous avons donc essayé de donner à cette tâche leur aspect pratique à travers l'application des commandes d'un outil puissant de traitement d'images « logiciel IPP » sur un ensemble d'images infrarouges qui représentent certains domaines scientifiques courants pour les interpréter, en répandant indirectement sur les questions : 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 ou pourquoi l'objet examiné a tel ou tel comportement calorifique. Les étapes suivies se résument en trois étapes essentielles : La restauration et l'amélioration qui conduisent à produire une image la plus proche de la réalité physique de la scène observée et de satisfaire l'œil de l'observateur humain et la segmentation pour extraire et séparer les objets chauds.

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.



## Références bibliographiques

- [1.1] MARTINET (J.). « La mesure des températures par rayonnement thermique. Monographie du BNM ». Éditions Chiron. 1981.
- [1.2] Jean-Louis MEYZONNETTE et Thierry LEPINE “bases de radiométrie optique”, 2<sup>ème</sup> édition, CEPAUDES-éditions. France 2003.
- [1.3] GREFFET (J.J.) et LOARER (T.). « Méthodes photothermiques, dans Métrologie des propriétés thermophysiques des matériaux ». Éd. J. Hladik, Masson, Paris, ch. IX, (1990).
- [1.4] Gilbert Gaussorgues « la thermographie infrarouge : principes – technologie - applications » deuxième édition. Technique et Documentation, France 1984.
- [1.5] VERNIER (P.). « L’émission photoélectrique et ses applications ». Dunod, France 1963.
- [1.6] François Galmiche , « Laboratoire de vision et systèmes numériques ». Université Laval Québec (qc) canada. 2005.
- [1.7] Optoélectronique. Volume 2, 1990, EDP Sciences.
- [1.8] PIERRE MAYE « les infrarouges en électronique », DUNOD, Paris 2003.
- [1.9] CHOL (G.), MARFAING (Y.), MUNSCH (M.), THOREL (P.) et COMBETTE (P.). « Les détecteurs de rayonnement infrarouge ». Dunod, France 1966.
- [1.10] J.L. Meyzonnette « Optique Théorique et Appliquée », E.S.O., Centre Universitaire d'Orsay, France 2007.
- [1.11] GRENIER (H.). « Contribution à l’étude du comportement thermique de matériaux semi-transparents soumis à un ensoleillement naturel ». Thèse de Doctorat, INSA de Toulouse, 1987, Université de Toulouse.
- [1.12] KINGSTON (R.H.). “Detection of optical and infrared radiations”. Springer Series in Optical Science, vol. 10, Springer, 1978, 140 p.
- [1.13] TOULOUKIAN. “Thermophysical Properties of Matter. Thermal Radiative Properties”. Plenum Data Corporation. New-York Volume 7. 1970.
- [1.14] François CABANNES “pyrométrie optique” TI, R2610. 1990



- [1.15] WOLFE (W.L.). "Introduction to radiometry". Tutorial Texts in Optical Engineering Volume TT29. SPIE Optical Engineering Press. 1998. 184 p.
- [2.1] Michel-Claude Girard, Colette M. Girard « traitement des données de télédétection » DUNOD France 2004.
- [2.2] F. G. Smith "the infrared and electro-optical systems handbook, volume 2, atmospheric propagation of radiation", , Editor, SPIRE Press.
- [2.3] atmospheric transmission, Michael E. Thomas Donald D. Duncan The infrared and electro-optical systems handbook, V 02. 1993
- [2.4] L.F. ELTERMAN "parameters for attenuation in the atmospheric windows for fifteen wavelenths", Applied Optics, 3, 745, 1964.
- [2.5] atmospheric propagation in the UV, visible, infrared and MM-wave region and related systems aspects, AGARD conference proceedings n°=454.
- [2.6] RUDOLF RICHTER "atmospheric correction of DAIS hyperspectral image data" Computers & Geosciences Vol. 22, No. 7, pp. 785-793, 1996.
- [2.7] Berk, A., Bernstein, L. S., and Robertson, D. C., MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7, GL-TR-89-0122: Geophys. Lab., Bedford, MA 38 p, 1989
- [2.8] Richter, R., Model SENSAT-4: Sensor-Atmosphere- Target: DLR-IB 552-01/92. DLR Wessling, Germany 71 p. 1992.
- [2.9] Richter, R., Derivation of temperature and emittance from airborne multispectral thermal infrared scanner data: Infrared Physics Technology, v. 35. no. 6, p. 817. 1994.
- [3.1] KRUSE R., Mc GLAUCHLIN L., Mc Quistan R "element of infrared technology" Wiley (1963).
- [4.1] DESVIGNES (F.). « Détecteurs de rayonnements optiques ». R3415, traité Mesures et Contrôle, janv. 1987.
- [4.2] AMINGUAL (D.). "Second generation of Infrared Detectors : present situation and prospects in France". CEA-LETI-LIR. Proceedings of Infrared Workshop – Advanced Technology and Applications. Atti della fondazione GIORGIO RONCHI. Capri 1995.11 p.
- [4.3] GAUSSORGUES (G.). « Détecteurs infrarouges ». Techniques de l'Ingénieur. E 4 060. 09- 1996. Traité Électronique.

- [4.4] ROGALSKI (A.). "Quantum well infrared photodetectors among the other types of semiconductor infrared detectors". Proceedings of Infrared Workshop – Advanced Infrared Technology and Applications. Atti della fondazione GIORGIO RONCHI. Capri 1995. 21 p.
- [4.5] FASKA (T.S.) et coll. "Staring LWIR MBT Quantum-Well Sensor Performance Using the Commercial Infrared ImagIR™ Camera System". T.S. Santa Barbara Focalplane. SPIE Vol. 1969-25, 1993 20 p.
- [4.6] Ecole d'été Systèmes Optiques, Radiométrie et détection optique
- [4.7] BAKER (I.M.) et coll. – Infrared Detectors for the Year 2000. GMIRL. GEC REVIEW Vol. 10, No 3. 1995. 13 p.
- [4.8] AMINGUAL (D.). "Second generation of Infrared Detectors : present situation and prospects in France". CEA-LETI-LIR. Proceedings of Infrared Workshop – Advanced Technology and Applications. Atti della fondazione GIORGIO RONCHI. Capri 1995.11 p.
- [4.9] Alain DELTEIL et Jean –Pierre FOUILLOY « systèmes optroniques passifs : caméras thermiques » E4105. Sept 1996.
- [4.10] HOWES (M.J.) et MORGAN (D.V.). "Charge-Coupled Devices and Systems". Dept of Electrical and Electronic Eng., University of Leeds, John Wiley and Sons, 2007.
- [4.11] BARBE (D.F.). "Imaging Devices Using the Charge coupled Concept". Proceedings IEEE, vol. 63, pp. 38-67, Janv. 1975.
- [5.1] HERVÉ (P.). « Mesure simultanée de la température de surface et de son émissivité ». Mesure, no 485, p. 20-4 (1983).
- [5.2] SMITH R.A., JONES F.E., CHASMAR R.P, "the detection and measurement of infrared Radiation" second edition- Oxford – Clarendon Press (1968).
- [5.3] LLOYD J.M., "thermal imaging" – Plenum Press 1975.
- [5.4] PAJANI (D.). « Évolution des technologies en thermographie. Nouvelle génération de station de thermographie ». Congrès SFT 1997, thermique aéronautique et spatiale. ELSEVIER 6 p.
- [5.5] Dominique PAJANI et Luc AUDAIRE « Thermographie : Technologies et applications ». R2741. 2000.

- [5.6] PAPINI (F.) et GALLET (P.). « Thermographie infrarouge. Image et mesure ». MASSON 1994. 239 p.
- [5.7] WOLFE (W.L.). “Introduction to Infrared System Design”. Tutorial Texts in Optical Engineering Vol. TT 24. SPIE PRESS. 1996.
- [6.1] Hichem SAHLI “ Mesures dimensionnelles par vision” TI. R 1392. 2000
- [7.1] BALAGEAS (D.), BOSCHER (D.), DEOM (A.), FOURNIER (J.) et HENRY (R.). « La thermographie infrarouge : un outil quantitatif à la disposition du thermicien ». Revue Générale de Thermique. No 322. Octobre 1988. 12 p.
- [7.2] KRAPEZ (J.C.) et ONERA. « Métrologie thermique : des matériaux jusqu’aux structures. Les applications de la thermographie dans les industries mécaniques ». 22 et 23 juin 1999, Journées du GAMI-CETIM.
- [7.3] LE NILIOT (C.), GALLET (P.) et IUSTI. “Infrared thermography applied to the resolution of inverse heat conduction problems : recovery of heat line sources and boundary conditions”. Revue Générale de Thermique. Special Issue QIRT’98. RGTHA7, Vol. 37. Septembre 1998.
- [7.4] Proceedings of Infrared Workshop. Advanced Infrared Technology and Applications. Atti della fondazione GIORGIO RONCHI.
- [7.5] Proceedings. Quantitative Infrared Thermography. QIRT 1992, 1994, 1996, 1998, 2000. EUROTHERM.
- [7.6] actes de télédétection infrarouge thermique, 1993, Des échanges énergétiques et hydriques de la végétation en combinaison avec d’autres capteurs, la Londe, les Maures, 20-23 sept. 1993, Cemagref, CETP, Pennstate, 330p.
- [7.7] COURAULT D, CLASTRE P, GUINOT J-P, SEGUIN B « analyse des sécheresses de 1988 à 1990 en France à partir de l’analyse combinée de données satellitaires » Agronomie 14, p 41-56
- [8.1] La recherche en traitement des images dans les différents laboratoires français, Bulletin de Liaison de la Recherche en Informatique et Automatique, INRIA, n° 71, 1981 .
- [8.2] Le traitement numérique des images, Bureau et Informatique, n° 78, avril 1982 .
- [8.3] B . R. HuNT, “Digital image processing”, Proceeding of the IEEE, 63, n° 4, April 1975.

- [8.4] FERNANDEZ-MALOIGNE Christine « Introduction aux techniques de traitement et d'analyse d'images » DUNOD, janvier 2004
- [8.5] V. R . ALGAZI, G . E. FORD et J . A . KAZAKOFF, “Radiometric correction and equalization of satellite digital data”, Proceeding 12th Asilomar Conférence on Circuits, Systems and Computers, 1978, p . 336-340.
- [8.6] V. R . ALGAZI et G . E. FORD, Radiometric equalization of non-periodic striping in satellite data”, Computer graphics and image processing, 16, 1981, p. 287-295.
- [8.7] COCQUEREZ (J.-P.) et PHILIPP (S.) ed. « Analyse d'image : filtrage et segmentation ». Masson, 1995.
- [8.8] T . A . HENTEA et V. R. ALGAZI, “Perceptual models and the filtering of high contrast achromatic images”, IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, SMC-14, n° 2, March/April 1984, p. 230-246 .
- [8.9] Thierry FERRE « traitements d'images optoélectroniques », TI, E4085. 1996.
- [8.10] Christine FERNANDEZ-MALOIGNE « Introduction aux techniques de traitement et d'analyse d'images » DUNOD, janvier 2004
- [8.11] K. S . Fu et J . K. Mui, « A survey on image segmentation, Pattern Recognition », 13, 1981, p . 3-16, Pergamon Press Ltd .
- [8.12] R. JAIN, W . N. MARTIN et J . K. AGGARWAL, “Segmentation through the detection of changes due to motion, Computer Graphics and Image Processing”, 11, 1979, p . 13-34.
- [8.13] R. NEVATIA, “Machine perception”, 1982, Prentice Hall Inc .
- [8.14] Dominique Ménard, « Vision artificielle et traitement d'image », Centre de recherche informatique de Montréal © 1999Bibliothèque nationale du Canada.
- [9.1] <http://www.teledetection.infrarouge/GOES-ifr.htm>

- [9.3] J. Heikkila, O. Silven, "A four-step camera calibration procedure with implicit image correction", IEEE Trans. Pattern Anal. 22 (10) (2000) 1066–1077.
- [9.4] M. Pilla, M. Klein, X. Maldague, A. Salerno, New Absolute Contrast for Pulsed Thermography, in: D. Balageas, G.M. Busse, G. Carlomagno (Eds.), QIRT 2002, pp. 53–58.
- [9.5] J.N. Zalameda, N. Rajic, W.P. Winfree, A comparison of image processing algorithms for thermal nondestructive evaluation, in: K.E. Orlando, X. Cramer, X. Maldague (Eds.), SPIE Proc. Thermosense XXV, vol. 5073, 2003, pp. 374–385.
- [9.6] W. Bai, B.S. Wong, "Evaluation of defects in composite plates under convective environments using lock-in thermography", Meas. Sci. Technol. 12 (2001) 142–150.
- [9.7] H. Carslaw and J. Jaeger, "Conduction of heat in solids", Oxford University Press, Walton street, Oxford OX2 6DP, Second ed., 1959.
- [9.8] I. K. Sendur and B. A. Baertlein, "Numerical simulation of thermal signatures of buried mines over a diurnal cycle, in Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets" V, Proceedings of the SPIE, pp. 156–167, 2000.
- [9.9] K. Khanafer and K. Vafai, "Thermal analysis of buried land mines over a diurnal cycle," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 40, pp. 461–473, February 2002.
- [9.10] P. L'opez, H. Sahli, D. Vilariño, and D. Cabello, "Detection of perturbations in thermal IR signatures: an inverse problem for buried land mine detection," in SPIE's SS/NDE, 2-6, March 2003.
- [9.11] A. Berk, L.S. Bernstein et D.C. Roberston : "Modtran a moderate resolution model for lowtran". Final Report GL-TR-0122, AFGL, Hanscom AFB, MA, 1989.
- [9.12] B.-C. Gao et C.O. Davis : "Development of a line by line based atmosphere removal algorithm for airborne and space born imaging spectrometer". In M.R. Descour et S.S Shen, éditeurs : Imaging Spectrometry III, pages 132–141. SPIE, 1997.
- [9.13] B.-C. Gao, M.J. Montes, A. Ziauddin et O.D. Curtiss : "Atmospheric correction algorithm for hyperspectral remote sensing of ocean color from space". Applied Optics, 39(6):887–896, February 2000.
- [9.14] J.A Richards et X. Jia : "Remote Sensing Digital Image Analysis". Springer Verlag, Berlin, 3rd édition, 1986.

- [9.15] GUYOT G., « climatologie de l'environnement. De la plante aux écosystèmes », Masson, paris 505p. 1997
- [9.16] Becker et Li (1995): Becker F., Li Z. L., “surface temperature and emissivity at various scales: definition, measurement and related problems”, Remote Sensing Reviews, 12, p.225-253. 1995
- [9.17] COURAULT D., CLASTRE P., GUINOT J., SEGUIN B, 1994, « Analyse des sécheresses de 1988 à 1990 en France à partir de l'analyse combinée de données satellitaires NOAA-AVHRR et d'un modèle agro-météorologique », Agronomie, 14, p 41-56
- [9.18] JACKSON R. D., REGINATO R. J., IDSO S. B., 1997, “Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements”, Water Resour. Research., 13 (3), p. 651-665
- [9.19] Rivest, R., « Plus de précision dans le conseil. Conférence présentée dans le cadre du 1<sup>er</sup> colloque sur la géomatique agricole et l'agriculture de précision », 23 et 2 mars 2000. CPVQ. p.210-217, 2000.
- [9.20] André Vézina. « Essai d'une caméra numérique multispectrale pour effectuer le suivi de cultures ». Projet no. 0136 Institut de technologie agroalimentaire de La Pocatière. Octobre 2001.
- [9.21] Pascoe D.D., Bellinger T.A., and McCluskey B.S. Clothing and exercise II: influence of clothing during exercise/work in environmental extremes. Sports Med. 18, 94–108, 1994.
- [9.22] T. Jakubowska, B. Wiecek, M. Wysocki, and C. Drews-Peszynski, “Thermal signatures for breast cancer screening comparative study”, Proceedings of the IEEE EMBS Conference, Cancun, Mexico, 17–21 September, 2003.
- [9.23] Boguslaw Wiecek M. Strzelecki T. Jakubowska M. Wysocki C. Drews-Peszynski “infrared image medical Advanced Thermal Image Processing”. Technical University of Lodz. CRC press New York 2006.
- [9.24] E.Y.K. Ng, L.N. Ung, F.C. Ng, and L.S.J. Sim, “Statistical analysis of healthy and malignant breast thermography”, Journal of Medical Engineering and Technology, 25, 253–263, 2001.
- [9.25] I.T. Jolliffe, “Principal Component Analysis”. New York, Springer-Verlag, 1986.
- [9.26] Schürman J. “Pattern Classification”. New York, JohnWiley & Sons, 1996.

[9.27] T. Jakubowska, B. Wiecek, M. Wysocki, and C. Drews-Peszynski, “Thermal signatures for breast cancer screening comparative study”, Proceedings of the IEEE EMBS Conference, Cancun, Mexico, 17–21 September, 2003.

[9.28] B. Wiecek and S. Zwolenik, “Thermal wave method limits and potentialities of active thermography in biology and medicine”, 2nd Joint EMBS-BMES Conference, 24th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, BMES-EMS 2002, Houston, 23–26 October, 2002.

[Richards et Jia, 1986] J.A Richards et X. Jia : Remote Sensing Digital Image Analysis. Springer Verlag, Berlin, 3rd édition, 1986.

[Berk et al., 1989] A. Berk, L.S. Bernstein et D.C. Roberston : Modtran a moderate resolution model for lowtran. Final Report GL-TR-0122, AFGL, Hanscom AFB, MA, 1989.

[Gao et Davis, 1997] B.-C. Gao et C.O. Davis : Development of a line by line based atmosphere removal algorithm for airborne and spaceborn imaging spectrometer. In M.R. Descour et

S.S Shen, éditeurs : Imaging Spectrometry III, pages 132–141. SPIE, 1997.

[Gao et al., 2000] B.-C. Gao, M.J. Montes, A. Ziauddin et O.D. Curtiss : Atmospheric correction algorithm for hyperspectral remote sensing of ocean color from space. Applied Optics, 39(6):887–896, February 2000.

(Guoyot) : GUYOT G., 1997, climatologie de l'environnement. De la plante aux écosystèmes, Masson, paris 505p.

Becker et Li (1995): Becker F., Li Z. L., 1995, surface temperature and emissivity at various scales: definition, measurement and related problems, Remote Sensing Reviews, 12, p.225-253.

[000]: COURAULT D., CLASTRE P., GUINOT J., SEGUIN B, 1994, Analyse des sécheresses de 1988 à 1990 en France à partir de l'analyse combinée de données satellitaires NOAA-AVHRR et d'un modèle agro-météorologique, Agronomie, 14, p 41-56

[111]: JACKSON R. D., REGINATO R. J., IDSO S. B., 1997, Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements, Water Resour. Research., 13 (3), p. 651-665



[987] Infrared image processing and data analysis

C. Ibarra-Castanedo, D. Gonzalez, M. Klein, M. Pilla, S. Vallerand, X. Maldague \*

Electrical and Computing Engineering Department, Université Laval, Quebec City (Quebec)  
G1K 7P4, Canada

Available online 27 April 2004

[poi] X. Maldague, Theory and Practice of Infrared Technology for Non Destructive Testing, John Wiley-Interscience, 2001, p. 684

[ota] J. Heikkila, O. Silven, A four-step camera calibration procedure with implicit image correction, IEEE Trans. Pattern Anal. 22 (10) (2000) 1066–1077, see also Matlab source code at: [www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/).

[cvb]. S. Marinetti, X. Maldague, M. Prystay, Calibration procedure for focal plane array cameras and noise equivalent material loss for quantitative thermographic NDT, Mater. Eval. 55 (3) (1997) 407–412.

[mlk] W.K. Pratt, Digital Image Processing, Wiley, New York, 1991, p. 698.

[fre]. M. Pilla, M. Klein, X. Maldague, A. Salerno, New Absolute Contrast for Pulsed Thermography, in: D. Balageas, G.M. Busse, G. Carlomagno (Eds.), QIRT 2002, pp. 53–58.

[kgy] J.N. Zalameda, N. Rajic, W.P. Winfree, A comparison of image processing algorithms for thermal nondestructive evaluation, in: K.E. Orlando, X. Cramer, X. Maldague (Eds.), SPIE Proc. Thermosense XXV, vol. 5073, 2003, pp. 374–385.

[iuy] W. Bai, B.S. Wong, Evaluation of defects in composite plates under convective environments using lock-in thermography, Meas. Sci. Technol. 12 (2001) 142–150.

[ 077]. Pascoe D.D., Bellinger T.A., and McCluskey B.S. Clothing and exercise II: influence of clothing during exercise/work in environmental extremes. Sports Med. 18, 94–108, 1994.

[mmm] infrared image medical “Advanced Thermal Image Processing. Boguslaw Wiecek M. Strzelecki T. Jakubowska M. Wysocki C. Drews-Peszynski  
Technical University of Lodz. CRC press New York 2006.

- [ 4-6 ] E.Y.K. Ng, L.N. Ung, F.C. Ng, and L.S.J. Sim, Statistical analysis of healthy and malignant breast thermography, *Journal of Medical Engineering and Technology*, 25, 253–263, 2001.
- [7-9] I.T. Jolliffe, *Principal Component Analysis*. New York, Springer-Verlag, 1986.
- [ 3.10.11 ] Schürman J. *Pattern Classification*. New York, JohnWiley & Sons, 1996.
- [ 1.2.10.12 ] T. Jakubowska, B. Wiecek, M. Wysocki, and C. Drews-Peszynski, Thermal signatures for breast cancer screening comparative study, *Proceedings of the IEEE EMBS Conference, Cancun, Mexico, 17–21 September, 2003*.
- [1-14] B. Wiecek and S. Zwolenik, Thermal wave method—limits and potentialities of active thermography in biology and medicine, 2nd Joint EMBS-BMES Conference, 24th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, BMES-EMS 2002, Houston, 23–26 October, 2002.
- [11] H. Carslaw and J. Jaeger, *Conduction of heat in solids*, Oxford University Press, Walton street, Oxford OX2 6DP, Second ed., 1959.
- [002] I. K. Sendur and B. A. Baertlein, “Numerical simulation of thermal signatures of buried mines over a diurnal cycle,” in *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets V*, *Proceedings of the SPIE*, pp. 156–167, 2000.
- [004] K. Khanafer and K. Vafai, “Thermal analysis of buried land mines over a diurnal cycle,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40, pp. 461–473, February 2002.
- [005] P. L’opez, H. Sahli, D. Vilariño, and D. Cabello, “Detection of perturbations in thermal IR signatures: an inverse problem for buried land mine detection,” in *SPIE’s SS/NDE*, 2-6, March 2003.
- (Rivest 2000): Rivest, R., 2000. Plus de precision dans le conseil. Conférence présentée dans le cadre du 1<sup>er</sup> colloque sur la géomatique agricole et l’agriculture de précision, 23 et 2 mars 2000. CPVQ. p.210-217
- [88] Essai d’une caméra numérique multispectrale pour effectuer le suivi de cultures. André Vézina. Projet no. 0136 Institut de technologie agroalimentaire de La Pocatière. Octobre 2001.

- [1] La recherche en traitement des images dans les différents laboratoires français, Bulletin de Liaison de la Recherche en Informatique et Automatique, INRIA, n° 71, 1981 .
- [2] Le traitement numérique des images, Bureau et Informatique, n° 78, avril 1982 .
- [3] B . R. HuNT, Digital image processing, Proceeding of the IEEE, 63, n° 4, April 1975.
- [4] H. MAITRE, A . CROUZET, J. DEWITTE, P. LE RAY, D . NASSE et J . P. TEMINE, Les tendances actuelles en traitement d'images, L'Écho des Recherches, n° 113, 3e trimestre 1983 .
- H. C. ANDREws et B. R . HuNT, Digital image restoration, 1977, Prentice Hall Inc .
- W. K. PRATT, Digital image processing, 1978, Wiley Interscience Publication .
- R. C . GONZALEZ et P. WINTz, Digital image processing, Second edition, 1979, Adisson Wesley Publishing Company.
- [8] K. R . CASTLEMAN, Digital image processing, 1979, Prentice

Hall Inc.

[9] E . L . HALL, Computer image processing and recognition,  
1979, Adademic Press.

[10] A . ROSENFELD et A . C . KAK, Digital picture processing,  
Second edition, 1982, Academic Press .

[11] J. A . CHIARI et F. D. MORTEN, Dectectors for thermal  
imaging, Electronic Components and Applications, 4,  
n° 4, August 1982.

[12] D . B. LoYD, Staring IR sensors, Military Electronics/  
Countermeasure, November 1979, p. 58-94,  
Decembre 1979, p. 32-39, January 1980, p . 28-35.

[13] A. N. NETRAVALI et J. O. LIMB, Picture coding: A  
review, Proceeding of the IEEE, 68, n° 3, March 1980,  
p . 366-406 .

[14] A. K. JAIN, Image data compression : A review, Proceeding  
of the IEEE, 69, n° 3, March 1981, p . 349-389.

[15] V. R . ALGAZI, G . E. FORD et J . A . KAZAKOFF, Radiometric  
correction and equalization of satellite digital data,  
Proceeding 12th Asilomar Conférence on Circuits, Systems  
and Computers, 1978, p . 336-340.

[16] V. R . ALGAZI et G . E. FORD, Radiometric equalization  
of non-periodic striping in satellite data, Computer  
graphics and image processing, 16, 1981, p. 287-295.

[17] M. BELLANGER, Traitement numérique du signal, Masson,

deuxième édition, 1984 .

[18] T . A . HENTEA et V. R. ALGAZI, Perceptual models and the filtering of high contrast achromatic images, IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, SMC-14, n° 2, March/April 1984, p. 230-246 .

[19] J. W. TUKEY, Exploratory data analysis, 1971, Addition Wesley, Reading, Mass .

[20] M. NAGAO et T. MATSUYAMA, Edge preserving smoothing, Computer Graphics and Image Processing, 9, April 1979, p . 394-407, Academic Press .

[21] K. S . Fu et J . K. Mui, A survey on image segmentation, Pattern Recognition, 13, 1981, p . 3-16, Pergamon Press Ltd .

[22] D . C . MASON, Segmentation of terrain images using textural and spectral characteristics, Computers and Digital Techniques, 2, n° 6, December 1979, p . 251-259 .

[23] P. C. CHEN et T. PAVLIDIS, Segmentation by texture using correlation, IEEE 5th International Conférence on Pattern Recognition, 1, December 1980, p. 551-553, Miami Beach .

[24] R. JAIN, W . N. MARTIN et J . K. AGGARWAL, Segmentation through the detection of changes due to motion, Computer Graphics and Image Processing, 11, 1979,

p . 13-34.

[25] R. NEVATIA, Machine perception, 1982, Prentice Hall  
Inc .

[26] T. A. GROGAN et O. R . MITCHELL, Shape recognition  
and description: A comparative study, School of Electrical  
Engineering, Purdue University, July 1983 .

[27] C. T. ZAHN et R. Z . ROSKIEs, Fourier descriptors for  
plane closed curves, IEEE Transaction on Computers,  
C-21, n° 3, March 1972, p . 269-281 .

[28] F. W . SMITH et M . H . WRIGHT, Automatic ship photointerpretation  
by the method of moments, IEEE Transactions  
on Computers, C-20, September 1971, p. 1089-  
1095 .

[29] S . A. DUDANI, K. J. BREDING et R. B . MCGHEE, Aircraft  
identification by moment invariants, IEEE Transactions  
on Computers, C-26, January 1977, p . 39-45 .

[30] Y.-K . J. LIN, Statistical approach for forward looking  
infrared (FLIR) target classification, SPIE Applications  
of digital image processing IV, 359, 1982, p . 77-82 .

[Richards et Jia, 1986] J.A Richards et X. Jia : Remote Sensing Digital Image Analysis.  
Springer Verlag, Berlin, 3rd ´edition, 1986.

[Berk et al., 1989] A. Berk, L.S. Bernstein et D.C. Roberston : Modtran a moderate resolution model for lowtran. Final Report GL-TR-0122, AFGL, Hanscom AFB, MA, 1989.

[Gao et Davis, 1997] B.-C. Gao et C.O. Davis : Development of a line by line based atmosphere removal algorithm for airborne and spaceborn imaging spectrometer. In M.R. Descour et

S.S Shen, ´editeurs : Imaging Spectrometry III, pages 132–141. SPIE, 1997.

[Gao et al., 2000] B.-C. Gao, M.J. Montes, A. Ziauddin et O.D. Curtiss : Atmospheric correction algorithm for hyperspectral remote sensing of ocean color from space. Applied Optics, 39(6):887–896, February 2000.

(Guoyot) : GUYOT G., 1997, climatologie de l’environnement. De la plante aux écosystèmes, Masson, paris 505p.

Becker et Li (1995): Becker F., Li Z. L., 1995, surface temperature and emissivity at various scales: definition, measurement and related problems, Remote Sensing Reviews, 12, p.225-253.

[000]: COURAULT D., CLASTRE P., GUINOT J., SEGUIN B, 1994, Analyse des sécheresses de 1988 à 1990 en France à partir de l’analyse combinée de données satellitaires NOAA-AVHRR et d’un modèle agro-météorologique, Agronomie, 14, p 41-56

[111]: JACKSON R. D., REGINATO R. J., IDSO S. B., 1997, Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements, Water Resour. Research., 13 (3), p. 651-665

[987] Infrared image processing and data analysis

C. Ibarra-Castanedo, D. Gonzalez, M. Klein, M. Pilla, S. Vallerand, X. Maldague \*

Electrical and Computing Engineering Department, Université Laval, Quebec City (Quebec) G1K 7P4, Canada Available online 27 April 2004

[poi] X. Maldague, Theory and Practice of Infrared Technology for Non Destructive Testing, John Wiley-Interscience, 2001, p. 684

[ota] J. Heikkila, O. Silven, A four-step camera calibration procedure with implicit image correction, IEEE Trans. Pattern Anal. 22 (10) (2000) 1066–1077, see also Matlab source code at: [www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/).

[cvb]. S. Marinetti, X. Maldague, M. Prystay, Calibration procedure for focal plane array cameras and noise equivalent material loss for quantitative thermographic NDT, Mater. Eval. 55 (3) (1997) 407–412.

[mlk] W.K. Pratt, Digital Image Processing, Wiley, New York, 1991, p. 698.

[fre]. M. Pilla, M. Klein, X. Maldague, A. Salerno, New Absolute Contrast for Pulsed Thermography, in: D. Balageas, G.M. Busse, G. Carlomagno (Eds.), QIRT 2002, pp. 53–58.

[kgy] J.N. Zalameda, N. Rajic, W.P. Winfree, A comparison of image processing algorithms for thermal nondestructive evaluation, in: K.E. Orlando, X. Cramer, X. Maldague (Eds.), SPIE Proc. Thermosense XXV, vol. 5073, 2003, pp. 374–385.

[iuy] W. Bai, B.S. Wong, Evaluation of defects in composite plates under convective environments using lock-in thermography, Meas. Sci. Technol. 12 (2001) 142–150.

[ 077]. Pascoe D.D., Bellinger T.A., and McCluskey B.S. Clothing and exercise II: influence of clothing during exercise/work in environmental extremes. Sports Med. 18, 94–108, 1994.

[mmm] infrared image medical “Advanced Thermal Image Processing. Boguslaw Wiecek M. Strzelecki T. Jakubowska M. Wysocki C. Drews-Peszynski

Technical University of Lodz. CRC press New York 2006.

[ 4-6 ] E.Y.K. Ng, L.N. Ung, F.C. Ng, and L.S.J. Sim, Statistical analysis of healthy and malignant breast thermography, Journal of Medical Engineering and Technology, 25, 253–263, 2001.

[7-9] I.T. Jolliffe, Principal Component Analysis. New York, Springer-Verlag, 1986.



- [ 3.10.11 ] Schürman J. Pattern Classification. New York, JohnWiley & Sons, 1996.
- [ 1.2.10.12 ] T. Jakubowska, B. Wiecek, M. Wysocki, and C. Drews-Peszynski, Thermal signatures for breast cancer screening comparative study, Proceedings of the IEEE EMBS Conference, Cancun, Mexico, 17–21 September, 2003.
- [1-14] B. Wiecek and S. Zwolenik, Thermal wave method—limits and potentialities of active thermography in biology and medicine, 2nd Joint EMBS-BMES Conference, 24th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, BMES-EMS 2002, Houston, 23–26 October, 2002.
- [11] H. Carslaw and J. Jaeger, Conduction of heat in solids, Oxford University Press, Walton street, Oxford OX2 6DP, Second ed., 1959.
- [002] I. K. Sendur and B. A. Baertlein, “Numerical simulation of thermal signatures of buried mines over a diurnal cycle,” in Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets V, Proceedings of the SPIE, pp. 156–167, 2000.
- [004] K. Khanafer and K. Vafai, “Thermal analysis of buried land mines over a diurnal cycle,” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 40, pp. 461–473, February 2002.
- [005] P. L’opez, H. Sahli, D. Vilariño, and D. Cabello, “Detection of perturbations in thermal IR signatures: an inverse problem for buried land mine detection,” in SPIE’s SS/NDE, 2-6, March 2003.
- (Rivest 2000): Rivest, R., 2000. Plus de precision dans le conseil. Conférence présentée dans le cadre du 1<sup>er</sup> colloque sur la géomatique agricole et l’agriculture de précision, 23 et 2 mars 2000. CPVQ. p.210-217
- [88] Essai d’une caméra numérique multispectrale pour effectuer le suivi de cultures. André Vézina. Projet no. 0136 Institut de technologie agroalimentaire de La Pocatière. Octobre 2001.

## Référence :

Gilles GIRARD, V. Ralph ALGAZI « traitement numérique d'images infrarouges » revue :  
Traitement du Signal, volume 2 N°1, 1985.

[521] COCQUEREZ (J.-P.) et PHILIPP (S.) ed. – Analyse d'image : filtrage et segmentation.  
Masson, 1995.

[444] Dominique Ménard, Vision artificielle et traitement d'image, **Centre de recherche  
informatique de Montréal** © 1999Bibliothèque nationale du Canada

Réf : p18

USGS : USGS Spectroscopy Lab Documentations. United State Geology Survey,  
[http ://speclab.cr.usgs.gov](http://speclab.cr.usgs.gov) édition. Ou Saéid Hodayouni « Caractérisation des Scènes  
Urbaines par Analyse des Images Hyperspectrales », Decembre 2005, Thèse  
présentée pour obtenir le grade de docteur de l'Ecole Nationale Supérieure des  
Télécommunications de Paris

[gtr] Ecole d'Ete Syst^mes Optiques  
Radiometrie et detection optique

J.L. Meyzonnette



*Institut d'Optique Theorique et Appliquee, E.S.O., Centre Universitaire d'Orsay, B&t. \$03,  
BP. 147, F-91403 Orsay cedex, France*

[Richter] : Richter, R., 1990, A fast atmospheric correction algorithm applied to Landsat TM images: Intern. Jour. Remote Sensing. v. 11, no. 1, p. 159-766.

[esz] **ATMOSPHERIC CORRECTION OF DAIS HYPERSPECTRAL IMAGE DATA**  
RUDOLF RICHTER

Computers & Geosciences Vol. 22, No. 7, pp. 785-793, 1996

[Berk, Bernstein] : Berk, A., Bernstein, L. S., and Robertson, D. C., 1989, MODTRAN: A Moderate Resolution Model for LOWTRAN 7, GL-TR-89-0122: Geophys. Lab., Bedford, MA 38 p,

[richter, 1992]: Richter, R., 1992, Model SENSAT-4: Sensor-Atmosphere- Target: DLR-IB 552-01/92. DLR Wessling, Germany 71 p.

[zaz]: Richter, R., 1994. Derivation of temperature and emittance from airborne multispectral thermal infrared scanner data: Infrared Physics Technology, v. 35. no. 6, p. 817.

[gfd] atmospheric transmission, Michael E. Thomas Donald D. Duncan

The infrared and electro-optical systems handbook, V 02. 1993

[JL]: Jean-Louis MEYZONNETTE et Thierry LEPINE “bases de radiométrie optique”, 2eme édition, CEPAUDES-éditions. 2003

[=8]: the infrared and electro-optical systems handbook, volume 2, “atmospheric propagation of radiation”, F. G. Smith, Editor, SPIRE Press.

[1963] KRUSE R., Mc GLAUCHLIN L., Mc Quistan R “element of infrared technology” Wiley (1963).

[=5] SMITH R.A., JONES F.E., CHASMAR R.P, “the detection and measurement of infrared Radiation- second edition- Oxford – Clarendon Press (1968).

[=p] LLOYD J.M., “thermal imaging” – Plenum Press 1975.

[=u] PAJANI (D.). – Évolution des technologies en thermographie. Nouvelle génération de station de thermographie. Congrès SFT 1997, thermique aéronautique et spatiale. ELSEVIER 6 p.

[=5] WOLFE (W.L.). – Introduction to Infrared System Design. Tutorial Texts in Optical Engineering Vol. TT 24. SPIE PRESS. 1996.

[hhu] PAPINI (F.) et GALLET (P.). – Thermographie infrarouge. Image et mesure. MASSON 1994. 239 p.

[tt] HOWES (M.J.) et MORGAN (D.V.). – Charge-Coupled Devices and Systems. Dept of Electrical and Electronic Eng., University of Leeds, John Wiley and Sons.

[po 2] BARBE (D.F.). – Imaging Devices Using the Chargecoupled Concept. Proceedings IEEE, vol. 63, pp. 38-67, Janv. 75.

[=mm] DRISCOLL W., “handbook of optics” – Mc Graw- Hill Book Company (1978)

[=ou] L.F. ELTERMAN “parameters for attenuation in the atmospheric windows for fifteen wavelenths”, Applied Optics, 3, 745, 1964.

[+5] atmospheric propagation in the UV, visible, infrared and MM-wave region and related systems aspects, AGARD conference proceedings n°=454.

[MCG] : Michel-Claude Girard, Colette M. Girard « traitement des données de télédétection » DUNOD France 2004.

[KERR] : KERR Y « mesures physiques et signatures en télédétection » 5<sup>e</sup> coll int, Courchevel, ESA SP 319, p 29-34 1991.

[PAL]: PRIVETTE J-L, FOWLER C, WICK G. A, BALDWIN D, EMERY W. J, “ effects of orbital drift on advanced very high resolution radiometer products” Remote Sensing of Environment, 53, p164-171 , 1995

[CAL]: COURAULT D, CLASTRE P, GUINOT J-P, SEGUIN B « analyse des sécheresses de 1988 à1990 en France à partir de l’analyse combinée de données satellitaires » Agronomie 14, p 41-56

[IRT1993] : actes de télédétection infrarouge thermique, 1993, Des échanges énergétiques et hydriques de la végétation en combinaison avec d’autres capteurs, la Londe, les Maures, 20-23 sept. 1993, Cemagref, CETP, Pennstate, 330p.

[PM] : PIERRE MAYE « les infrarouges en électronique », DUNOD, paris 2003.

[PD] : Ph Dondon

[JL] :

[PAJANI] PAJANI (D.). – *Mesure par thermographie infrarouge*. Ed. ADD, p. 310 (1989).

François Galmiche

Laboratoire de vision et systèmes numériques

Université Laval

Quebec (qc) canada

[fgalmich@qel.ulaval.ca](mailto:fgalmich@qel.ulaval.ca)

[ROGALSKI] : ROGALSKI (A.). – Quantum well infrared photodetectors among the other types of semiconductor infrared detectors. Proceedings of

Infrared Workshop – Advanced Infrared Technology and Applications. Atti della fondazione GIORGIO RONCHI. Capri 1995. 21 p.

[FASKA]: FASKA (T.S.) et coll. – Staring LWIR MBT ®

Quantum-Well Sensor Performance Using the Commercial Infrared ImagIR™ Camera System. T.S. Santa Barbara Focalplane. SPIE Vol. 1969-25, 1993 20 p.

[SAUNDERS] SAUNDERS (P.) et RICOLFI (T.). – The characterisation of a CCD camera for the purpose of temperature measurement. Proceedings of TEMPMEKO' 96. 1996. 6 p.

[BAKER] BAKER (I.M.) et coll. – Infrared Detectors for the Year 2000. GMIRL. GEC REVIEW Vol. 10, No 3. 1995. 13 p.

[AMINGUAL] AMINGUAL (D.). – Second generation of Infrared Detectors : present situation and prospects in France. CEA-LETI-LIR. Proceedings of Infrared Workshop – Advanced Technology and Applications. Atti della fondazione GIORGIO RONCHI. Capri 1995. 11 p.

[METSCHULEIT] METSCHULEIT (J.) et GRAFF (J.). – Stability evaluation of staring InSb Imagers. AMBER.

1995. 14 p.

[PAJANI (D.).] PAJANI (D.). – Le choix de la bande spectrale.

Revue Opto Electronique.

[HERVE] HERVE (P.). – Le pyrométrie optique passe dans l’ultraviolet. Revue MESURES – Novembre 1996. 4 p.

[MOREAU]MOREAU (F.). – Thermographie proche infrarouge par caméras CCD et application aux composants de première paroi du Tokamak TORE SUPRA. Thèse au CEA CEN de Cadarache. Juin 1996.

[SAUNDERS (P.)]SAUNDERS (P.) et RICOLFI (T.). – The characterisation of a CCD camera for the purpose of temperature measurement. Proceedings of TEMPMEKO’ 96. 1996. 6 p.

[PAJANI-3]PAJANI (D.). – Évolution des technologies en thermographie. Nouvelle génération de station de thermographie. Congrès SFT 1997, thermique aéronautique et spatiale. ELSEVIER 6 p.

[PAJANI-4]PAJANI (D.). – Ouverture des systèmes de thermographie. Revue de métrologie pratique et légale. Tome 70, No 11. 1992. 3 pages.

[BALAGEAS]BALAGEAS (D.), BOSCHER (D.), DEOM (A.), FOURNIER (J.) et HENRY (R.). – La thermographie infrarouge : un outil quantitatif à la disposition du thermicien. Revue Générale de Thermique. No 322. Octobre 1988. 12 p.

[KRAPEZ]KRAPEZ (J.C.) et ONERA. – Métrologie thermique : des matériaux jusqu’aux structures. Les applications de la thermographie dans les industries mécaniques. 22 et 23 juin 1999, Journées du GAMI-CETIM.



[LE NILIOT]LE NILIOT (C.), GALLET (P.) et IUSTI. – Infrared thermography applied to the resolution of inverse heat conduction problems : recovery of heat line sources and boundary conditions. Revue Générale de Thermique. Special Issue QIRT'98. RGTHA7, Vol. 37. Septembre 1998.

[Proceedings]Proceedings. Quantitative Infrared Thermography. QIRT 1992, 1994, 1996, 1998, 2000. EUROTHERM.

[GIORGIO]Proceedings of Infrared Workshop. Advanced Infrared Technology and Applications. Atti della fondazione GIORGIO RONCHI.

[D19] D19 – Document technique, Thermographie infrarouge. Contrôle d'installations électriques. Mars 1999. APSAD – CNPP ENTREPRISE. 22 p.

[F. LESBRE1]APPLICATIONS DE LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE AU CONTRÔLE NON DESTRUCTIF DES MATERIAUX COMPOSITES UTILISES EN CONSTRUCTION NAVALE .

F. LESBRE1, P. POTET2, F. ARTIGAL.

La construction navale en composites. Paris, 7-9 décembre 1.992

*Ih'REMER. Acres de colloques >t° 15. communication n° M*

[666] Introduction aux techniques de traitement et d'analyse d'images Christine FERNANDEZ-MALOIGNE

DUNOD, janvier 2004

## 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 faible contraste thermique et qui nécessitent alors un traitement approprié. Dans ce contexte, nous avons développé une approche générale visée à réduire ces bruits. Il est ensuite montré comment l'application de telles étapes permet d'utiliser efficacement les informations contenues dans ces images infrarouges pour résoudre beaucoup de problèmes dans différents domaines ; nous avons pris à titre d'exemple quatre secteurs importants : le contrôle non destructif, la médecine, la télédétection et le secteur militaire.

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

## Abstract

Any body 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 developed a general approach aimed at reducing these noises. It is then shown how the application of such stages makes it possible to effectively use the information contained in these infrared images to solve many problems in various fields; we took as an example four significant sectors: non destructive testing, medicine, teledetection and the military sector.

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

## ملخص:

فوق درجة حرارة 0°K أي جسم أن يبعث موجات كهرومغناطيسية - تحت الحمراء - نحو الوسط المحيط به، ويلعب دور المنبع الإشعاعي بتحويل جزء من الطاقة الحرارية الداخلية إلى طاقة إشعاعية.

تتمثل تقنية التصوير الحراري بالموجات تحت الحمراء في التقاط هذه الأشعة المنبعثة من الجسم ومن ثم تقييمها بهدف التمكن من حساب وقراءة درجة حرارة السطح، عن بعد، بدون تماس، بطريقة غير هدامة وحتى في حالة عمل.

تتميز الصور الحرارية الملتقطة بواسطة كاميرا حرارية عادة بوجود أخطاء ناتجة عن طريقة تحويل الأشعة وتقييمها، وجود تشويش ناتج عن الإشعاعات المنبعثة من الأجسام المحيطة والوسط الخلفي وبالتالي فهي بحاجة إلى الخضوع إلى معالجة مناسبة. في هذا السياق، قمنا بعرض طريقة عامة لمعالجة الصور الحرارية بغية التقليل من تلك الآثار الجاتية. تم في ما بعد إظهار مدى فعالية تطبيق بعض مراحل تلك الطريقة لحل بعض المشاكل في مجالات متعددة عبر الاستفادة من المعلومات الكامنة في تلك الصور الحرارية، حيث تناولنا على سبيل المثال أربعة مجالات حيوية هي: تقنيات التجريب الغير مخربة، المجال الطبي، الالتقاط البعيد وأخيرا المجال العسكري.

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