



**COMMISSARIAT A L'ÉNERGIE ATOMIQUE
AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION
DES DÉCHETS RADIOACTIFS**
Route du Panorama-Robert-Schumann
B.P. 38 - 92266 FONTENAY-AUX-ROSES CEDEX

les appareils de thermographie infrarouge à courte distance

**principes - inventaire - caractéristiques
(appareils disponibles en France en 1990,
pour des applications civiles)**

620 RP BRG 91-003

C. Sirieix

**janvier 1991
R 32 073**

**BRGM
SERVICE SOL ET SOUS-SOL
Département Stockages**
B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX 2 - France - Tél. : (33) 38.64.34.34

RÉSUMÉ

Après avoir rappelé les principaux domaines d'application et d'utilisation de la thermographie infrarouge que ce soit en laboratoire ou *in-situ*, ce rapport s'attache à rechercher le matériel utilisé pour en décrire les performances.

En thermographie infrarouge, on trouve actuellement quatre types de capteurs :

- les radiomètres qui sont des détecteurs ponctuels,
- les imageurs thermiques qui sont des appareils de visualisation (ils donnent une image thermique dans le visible),
- les caméras infrarouges qui sont des appareils de mesure, c'est-à-dire qui attribuent une valeur de température à une surface élémentaire comprise dans la scène étudiée,
- les scanners ou analyseurs lignes qui sont conçus de la même façon que les caméras mais qui balayent une ligne et non une surface.

Les deux derniers capteurs sont composés des mêmes éléments :

- un détecteur unique qui reçoit un flux thermique provenant d'une surface élémentaire de la scène thermique. Ses qualités seront directement responsable de la résolution thermique de l'appareillage,
- un système de balayage optomécanique qui permet de balayer une surface élémentaire le long d'une ligne pour un scanner et le long d'une surface pour une caméra. La vitesse de balayage et la résolution spatiale seront liées au système choisi,
- un système optique spécifique à l'infrarouge et dont les qualités seront en grande partie responsable de la résolution spatiale du capteur,
- un système de refroidissement dont le rôle est déterminant pour augmenter la résolution thermique et assurer la stabilité du système.

Ces quatre éléments permettent de réaliser un appareil de mesure dont les caractéristiques seront différentes en fonction des choix effectués sur l'un ou l'autre de ces éléments.

Un inventaire du matériel existant sur le marché a été effectué. Il permet de mieux cerner les produits correspondants à nos besoins.

Aucune caractérisation (de type normes AFNOR) n'étant actuellement mise en pratique par les fournisseurs de matériel infrarouge, il est très difficile de comparer les différents capteurs. De plus, les caractéristiques fournies par les différents constructeurs ne correspondent pas toujours à nos conditions d'utilisation. Un tableau résume les caractéristiques des caméras semblant être les plus performantes et des caméras de location. Une série de tests sera proposée afin de comparer ultérieurement les différents appareillages dans des conditions proches de l'utilisation prévue pour ces matériels.

SOMMAIRE

	Page
1 <u>INTRODUCTION</u>	1
2 <u>SITUATION GÉNÉRALE DE LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE</u>	1
3 <u>DESCRIPTION DES CAPTEURS INFRAROUGES</u>	4
3.1 <u>L'OPTIQUE</u>	4
3.1.1 <u>L'optique géométrique</u>	6
3.1.1.1 Aberrations chromatiques	6
3.1.1.2 Aberrations géométriques	7
3.1.2 <u>La diffraction</u>	9
3.1.3 <u>Conclusion</u>	10
3.2 <u>LES DÉTECTEURS</u>	11
3.2.1 <u>Caractéristiques des détecteurs</u>	11
3.2.1.1 Sensibilité	11
3.2.1.2 Bruit	12
3.2.2 <u>Les différents types de détecteurs</u>	13
3.2.2.1 Détecteurs thermiques : bolomètres, pyroélectriques, pneumatiques	13
3.2.2.2 Détecteurs quantiques : photoémissifs, photoconducteurs, photovoltaïques	15
3.2.2.3 Détecteurs particuliers : détecteurs IRCCD, détecteurs SPRITE	15
3.2.3 <u>Les systèmes de refroidissement</u>	16
3.2.4 <u>Les systèmes d'analyse spatiale</u>	17
3.2.4.1 Radiomètre	17
3.2.4.2 Thermographie ou imagerie thermique : principe	18
3.2.4.3 Les divers types de balayage	18
3.2.5 <u>Conclusion</u>	21

	Page
4 <u>CARACTERISATION DES CAPTEURS INFRAROUGES</u>	21
4.1 CARACTERISTIQUES DES CAPTEURS INFRAROUGES	22
4.1.1 <u>Résolution spatiale</u>	22
4.1.1.1 IFOV	22
4.1.1.2 FEL	22
4.1.1.3 FTC	22
4.1.1.4 FRF	25
4.1.2 <u>Résolution thermique</u>	25
4.1.2.1 NETD ou DETB	27
4.1.2.2 MDTD ou MDT	28
4.1.2.3 MRTD ou MDTR ou MRT	28
4.1.3 <u>Uniformité de réponse</u>	28
4.1.4 <u>Dérive</u>	29
4.2 CARACTERISTIQUES FOURNIES PAR LES CONSTRUCTEURS	29
4.2.1 <u>Liste des caméras</u>	29
4.2.2 <u>Bandes spectrales</u>	32
4.2.3 <u>Nature du détecteur</u>	33
4.2.4 <u>Vitesse de balayage</u>	34
4.2.5 <u>Résolution spatiale</u>	35
4.2.6 <u>Résolution thermique</u>	37
4.2.7 <u>Signal de sortie</u>	37
4.2.8 <u>Encombrement</u>	38
4.3 LES ANALYSEURS LIGNES	40
4.4 QUALITÉS ET COMPARAISON DU MATÉRIEL EXISTANT	41
4.5 SYNTHÈSE DU MATÉRIEL UTILISÉ	42
5 <u>CONCLUSION</u>	45
BIBLIOGRAPHIE	47

1 INTRODUCTION

Le domaine de sensibilité de l'oeil est limité à l'intervalle (0,45 - 0,75 μm). La perception visuelle des objets qui nous entourent nécessite souvent une source lumineuse auxiliaire. C'est le rayonnement réfléchi par chaque objet dans le domaine spectral visible qui est détecté par l'oeil.

Un capteur infrarouge (0,75 à 1000 μm) utilise, comme support de l'information, le rayonnement thermique émis par les objets pour en donner une représentation dans le visible (image thermique...).

Les capteurs (radiomètres, scanners, caméras, imageurs) utilisés en infrarouge sont composés des éléments suivants : optique, un ou plusieurs détecteurs et éventuellement des filtres.

Les radiomètres permettent de mesurer un rayonnement thermique ou une température ponctuelle. Les scanners, les imageurs ou les caméras effectuent cette mesure sur une scène thermique en balayant une surface élémentaire. La conception et la performance de ces derniers reposent, entre autre, sur le type de balayage (optomécanique ou électronique).

Les caméras dans le visible utilisent des multidétecteurs (CCD) ou des tubes électroniques, qui couvrent le champ image analysé. Dans l'infrarouge, ces conceptions peuvent aussi être retenues. Cependant, les difficultés liées à la conception, au refroidissement, aux systèmes de compensation, au coût, etc. limitent l'utilisation de ces détecteurs aux seuls imageurs thermiques. En effet, on distingue communément les imageurs thermiques des caméras infrarouges. Les premiers sont des instruments de visualisation et les seconds des instruments de mesure. Les caméras infrarouges utilisent actuellement des détecteurs ponctuels ou en barrettes couplés à un système de balayage optomécanique.

Après une présentation des différentes applications civiles de la thermographie infrarouge, la seconde partie de ce rapport est consacrée à des rappels sur les principes utilisés en infrarouge et présente, de plus, des composants que l'on retrouvera dans la conception des capteurs proposés sur le marché.

Malgré des conceptions souvent très différentes d'un constructeur à l'autre, les appareils de thermographie peuvent être comparés selon certaines caractéristiques.

La troisième partie de ce rapport présente tout d'abord les caractéristiques des capteurs et, ensuite, les compare quand cela est possible.

2 SITUATION GÉNÉRALE DE LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

Le matériel de thermographie infrarouge est utilisé dans divers domaines civils : recherche et développement, maintenance industrielle et surveillance, contrôle de produits, médical, contrôle de procédés...

Dans le cadre des études en laboratoire, on peut citer de façon non exhaustive :

- la thermique des matériaux : étude de comportement des matériaux et structures, échanges thermiques (conduction, convection, rayonnement),

- les CND (contrôles non destructifs) : étude des collages, tenue des revêtements de céramique, tenue des matériaux aux températures élevées, étude de la combustion et de certaines réactions chimiques, étude des panneaux solaires...,
- la mécanique des solides : caractérisation des matériaux, observation des variations spatiotemporelles des températures d'un matériau soumis à une sollicitation mécanique (thermoélasticimétrie, tribologie, vibrothermographie...),
- l'étude de l'action des lasers de puissance comme traitement de surface (métallurgique), la découpe et la soudure des matériaux...,
- l'électronique : comportements thermiques, mesure des impédances thermiques des puces, cartes électroniques...,
- le contrôle des pièces automobiles (moteurs, isolation des habitacles, collages, pneus, disques de freins...).

En principe, les matériaux étudiés sont souvent relativement "simples", de fabrication industrielle : les composites, polyester, pneumatique, verre, céramique, béton...

Les applications in situ sont orientées vers les contrôles des structures :

- la surveillance des produits radioactifs inflammables dans les sites nucléaires (détection de l'élévation de température),
- l'inspection de fours (ex. : fours de cimenterie, fours de crackage...),
- le contrôle de bâtiments : irrégularités de la résistance thermique des éléments de construction d'une maison, recherche d'anomalie des conduites de chauffage,
- l'étude des problèmes de feuilletage ou délaminage de dalles de béton (ponts, chaussées routières...),
- le suivi des circulations d'eau dans le sol (génie rural),
- la surveillance du réseau de transport EDF (lignes à haute tension),
- la surveillance des feux de forêts,
- la surveillance de la qualité de l'expansion de mousses injectées isolantes pendant la période de refroidissement des structures,
- la localisation de fissures et de zones altérées sur des parements de barrage en béton,
- la détection de fuites dans des berges de canaux,
- la surveillance des réfrigérants thermiques (EDF),
- l'auscultation d'ouvrages souterrains,
- le contrôle d'injection.

Dans des domaines plus proches des nôtres, on citera : en France les travaux en laboratoire du Laboratoire de Génie Civil de l'Université des Sciences et Technique du Languedoc et du Laboratoire de Mécanique des Solides de l'Ecole de Polytechnique (thermomécanique, vibrothermographie...), les travaux in situ du laboratoire de Géomécanique de Bordeaux et la division thermographie infrarouge du LNE (Laboratoire National d'Essai). A l'étranger, de nombreux laboratoires se sont équipés ou s'équipent en infrarouge. Trois publications récentes sont parues :

- une première concernant les barrages en béton (Gwyn *et al.*, 1990)
- une seconde concernant des études de bloc instable en mine (Yu *et al.*, 1990),
- une troisième concernant des auscultations de tunnels en Suisse (Société Ambert Messetechnik, 1989).

Dans le cadre des barrages en béton, l'étude (Gwyn *et al.*, 1990) portait sur la détermination de la fissuration et de l'altération des parements par des méthodes non destructives : photographies (visible) et thermographies. La thermographie infrarouge a permis de mettre en évidence les zones altérées du béton.

On retrouve les mêmes résultats dans la thèse de S. Majourau (1990). En effet, les parties poreuses altérées ou humides de l'ouvrage réagissent différemment aux variations journalières de la température et sont ainsi repérables par thermographie infrarouge. La mise en évidence de la fissuration par thermographie infrarouge est beaucoup moins facile. A l'exception des fissures ouvertes qui ont été repérées systématiquement sur l'ouvrage EDF du Chambon (S. Majourau, 1990). Les autres fissures n'ont pas été aussi facilement identifiées. On pourrait penser qu'elles ne l'ont pas été en raison des caractéristiques insuffisantes de l'appareil de mesure. Le traitement d'image doit aussi pouvoir apporter des compléments dans ce genre d'étude.

L'étude des blocs en mine consiste à détecter de façon systématique les blocs instables, afin de réaliser une purge adaptée de l'ouvrage. La mine étudiée se situe dans l'Ontario (Timins), il s'agit d'une mine de Cuivre, Plomb, Zinc, Argent, dans de la rhyolite. La réponse thermique des matériaux étant insuffisante dans les conditions habituelles, des modifications thermiques ont été imposées au milieu :

- un réchauffement provoqué par les gaz d'échappements des engins diesels utilisés en mine,
- une modification de la température de l'air de la galerie : modification de la ventilation,
- un réchauffement à l'aide de la lampe I.R. (mais le réchauffement ne semble pas assez uniforme),
- évaporation d'eau : pas de contrastes thermiques observés entre les blocs stables ou instables.

Un réchauffement de 2° C provoqué par les gaz d'échappements a été la méthode la plus satisfaisante par sa simplicité et son efficacité. Ce réchauffement permet de localiser les blocs détachés ou partiellement détachés. Ils ont, en effet une inertie thermique plus faible que le massif (c'est-à-dire qu'ils se réchauffent ou se refroidissent plus vite et que cette variation est détectable par thermographie infrarouge).

Pour sa part, la société Ambert s'est équipé d'un scanner infrarouge. Le dispositif comprend un scanner qui effectue un balayage sur 180°, monté sur un véhicule. Cet appareillage est monté sur un camion pour ausculter les tunnels routiers et est monté sur une draine pour ausculter les tunnels ferroviaires. Cet équipement ressemble à celui du LNE. Au Canada, la société Beauchemin-Beaton-Lapointe, utilise un équipement identique pour le contrôle des chaussées, ponts...

Les applications et le matériel utilisés en thermographie infrarouge sont très diversifiés. Il apparaît donc nécessaire de préciser les traits caractéristiques des différents capteurs.

3 DESCRIPTION DES CAPTEURS INFRAROUGES

Un système de thermographie infrarouge est composé de l'assemblage de plusieurs éléments (figure 1) qui sont :

- * La caméra, ou tête de mesure. Elle est constituée par :
 - un système optique de formation d'images,
 - un système de déflexion permettant d'analyser une image,
 - un ou plusieurs détecteurs de rayonnement infrarouge dont le signal constitue l'information de base du système,
 - un certain nombre de fenêtres de protection et éventuellement de filtres afin de réduire la bande spectrale analysée.
- * L'unité de visualisation, connectée à la caméra, qui comporte l'alimentation électrique de celle-ci et une partie de traitement de signal provenant du détecteur. L'image est reconstituée sur un écran. Cet ensemble est en général portable pour les mesures sur site.
- * Les systèmes d'acquisition de données et de traitement d'images plus ou moins complexes ou performants. Ces systèmes composés de modules permettent l'enregistrement des images, leur traitement et leur restitution.

On s'intéresse ici au capteur infrarouge et à ses spécificités.

3.1 L'OPTIQUE

L'optique d'entrée est un élément qui va collecter le rayonnement et le transformer en une image qui sera analysée ensuite par le module de discrimination spatiale.

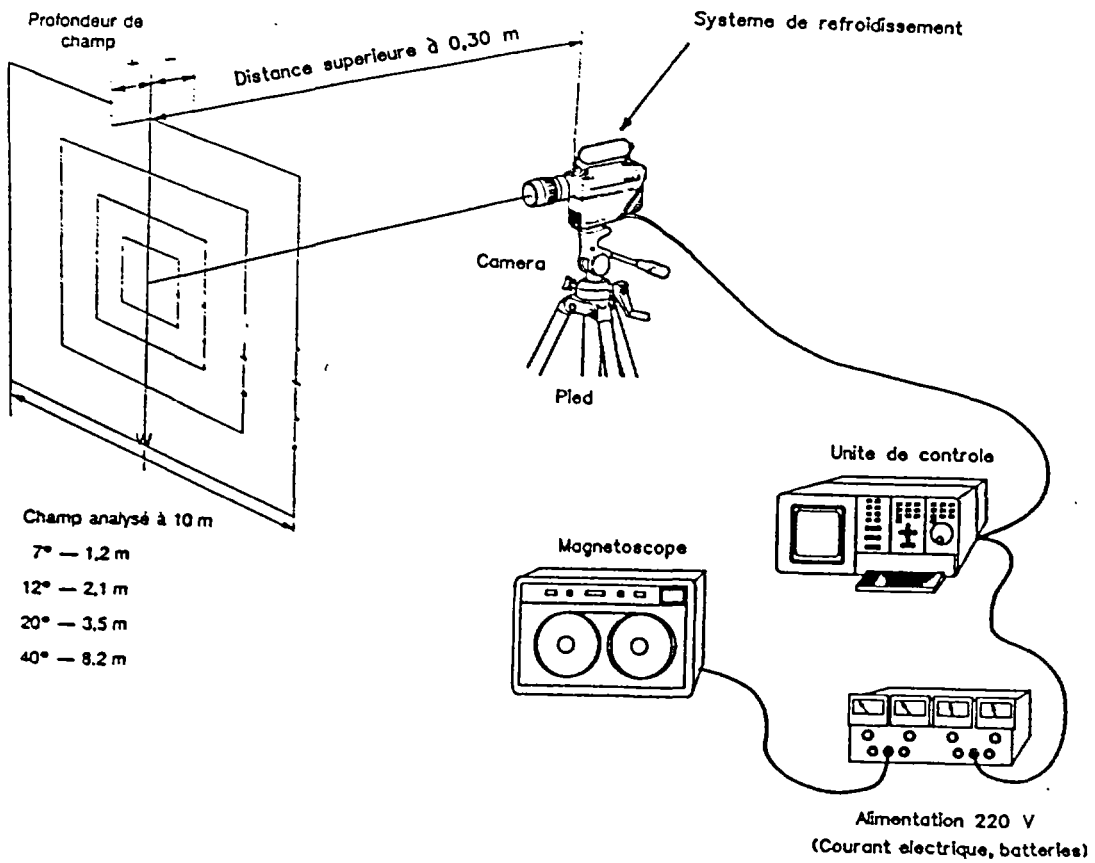
Les caractéristiques des composants optiques sont une cause de limitation dans les critères de détection :

- Compte tenu des principes de l'optique géométrique, la qualité du point image résolu est affectée d'aberrations géométriques et chromatiques,
- l'influence de la diffraction détermine la résolution théorique du système.

La tache image obtenue pour un point objet donné ne doit pas alors excéder la dimension de la surface sensible du détecteur. De plus, il ne faut pas oublier que les matériaux utilisés dans le système optique doivent être transparents dans l'infrarouge.

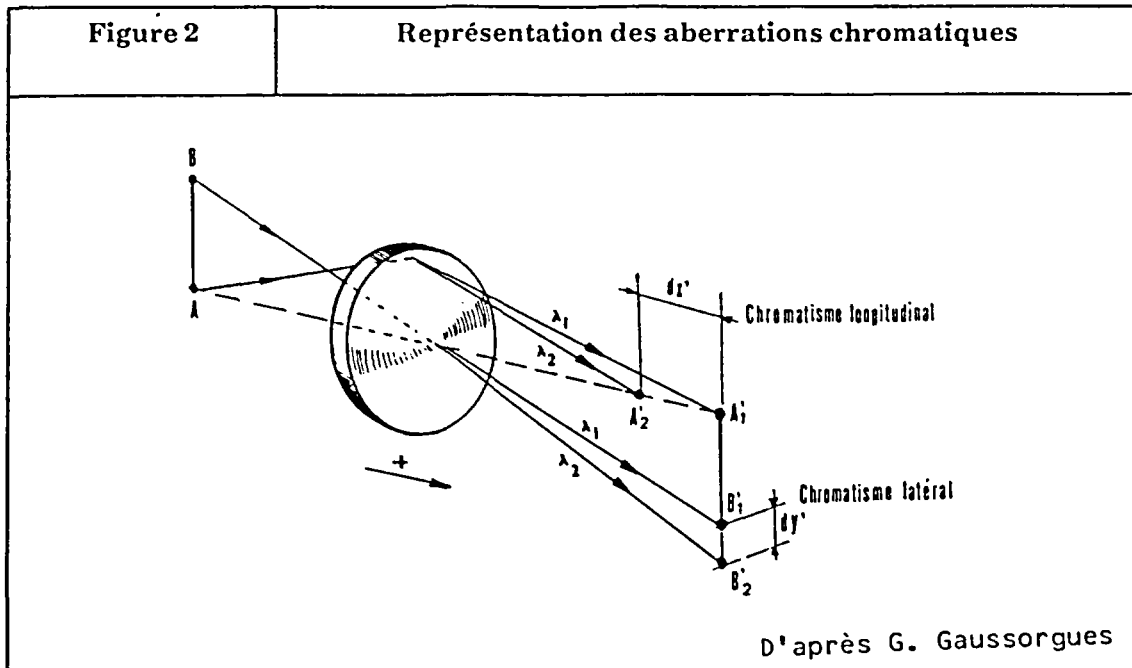
FIGURE 1

Matériel de mesure



3.1.1 L'optique géométrique

3.1.1.1 - Les aberrations chromatiques sont dues à la dispersion lors de la réfraction d'un faisceau de lumière complexe. Cette dispersion est fonction de la longueur d'onde. On distingue l'aberration chromatique longitudinale, parallèle à l'axe optique du système, de l'aberration chromatique transversale (figure 2).



La convergence ($C = 1/f$, où f est la distance focale) d'une lentille est fonction de l'indice de réfraction n et des rayons de courbures des faces des lentilles. n varie avec la longueur d'onde pour un même matériau [d'où $n(\lambda)$].

Pour corriger ces dispersions, il est nécessaire d'associer au moins deux lentilles telles que la dispersion de l'une compense la dispersion de l'autre.

Dans ce cas, la convergence totale C du système devient :

$$C = C_1 + C_2$$

avec, pour chaque lentille :

$$C = \frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} \right)$$

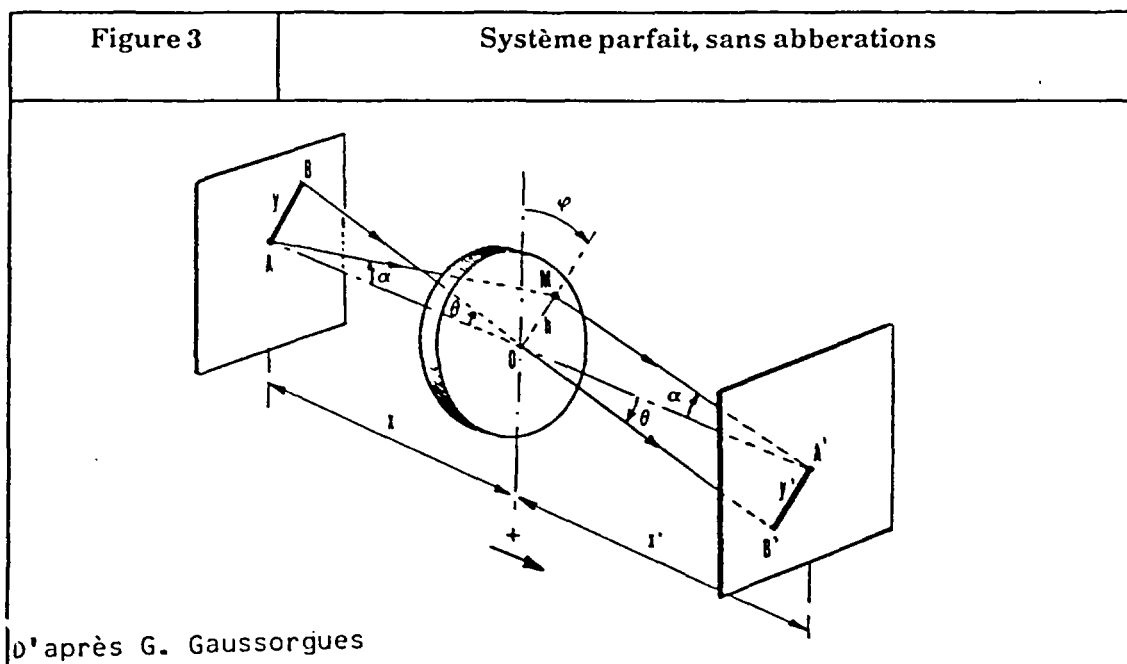
avec R et R' rayon de courbure des faces de la lentille.

Dans la pratique, les objectifs utilisés sont composés d'un simple doublet achromatique (association de deux lentilles), ou plus exceptionnellement d'un triplet apochromatique (association de 3 lentilles, fournissant une meilleure correction).

On note que les systèmes optiques composés de miroirs ne sont pas affectés par le chromatisme puisque les rayons lumineux ne sont pas réfractés par les différents éléments.

3.1.1.2 - Les aberrations géométriques se produisent, contrairement aux aberrations chromatiques, même en lumière monochromatique. L'image d'un objet situé au voisinage de l'axe de révolution d'un système optique (axe optique) est convenable dans la mesure où les rayons cheminent au voisinage de cet axe (approximation de Gauss). Dans la pratique, les systèmes présentent souvent des ouvertures importantes et des champs étendus, les rayons s'éloignent donc des rayons paraxiaux et sont ainsi affectés d'aberrations géométriques.

Considérons un système optique mince centré en O et d'axe AOA', donnant d'un objet AB de dimension y, une image A'B' de dimension y' (figure n° 3).



$\theta = (OA, OB)$ angle de champ objet

$\theta' = (OA', OB')$ angle de champ image.

θ, θ', y, y' sont appelés paramètres de champ du système.

Les rayons issus de A, traversant la pupille du système en un point M quelconque de hauteur h et passant par A' sont appelés rayons d'ouverture. α, α' sont les angles d'ouverture tels que :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{x} \quad \text{et} \quad \operatorname{tg} \alpha' = \frac{h}{x'}$$

Lorsque le système présente des aberrations, les rayons issus de A et B ne passent plus tous respectivement par A' et B' mais par des points plus ou moins voisins ; la zone de dispersion de l'impact de chacun de ces rayons correspond à l'aberration géométrique transversale dy' .

Pour des raisons de symétrie, on montre que le développement en série de l'expression analytique de l'aberration géométrique transversale dy' ne contient que des termes de degrés impairs :

$$dy' = A_1 h + B_1 y' + A_3 h^3 + B_3 h^2 y + C_3 h y'^2 + D_3 y'^3 + A_5 h^5 \dots$$

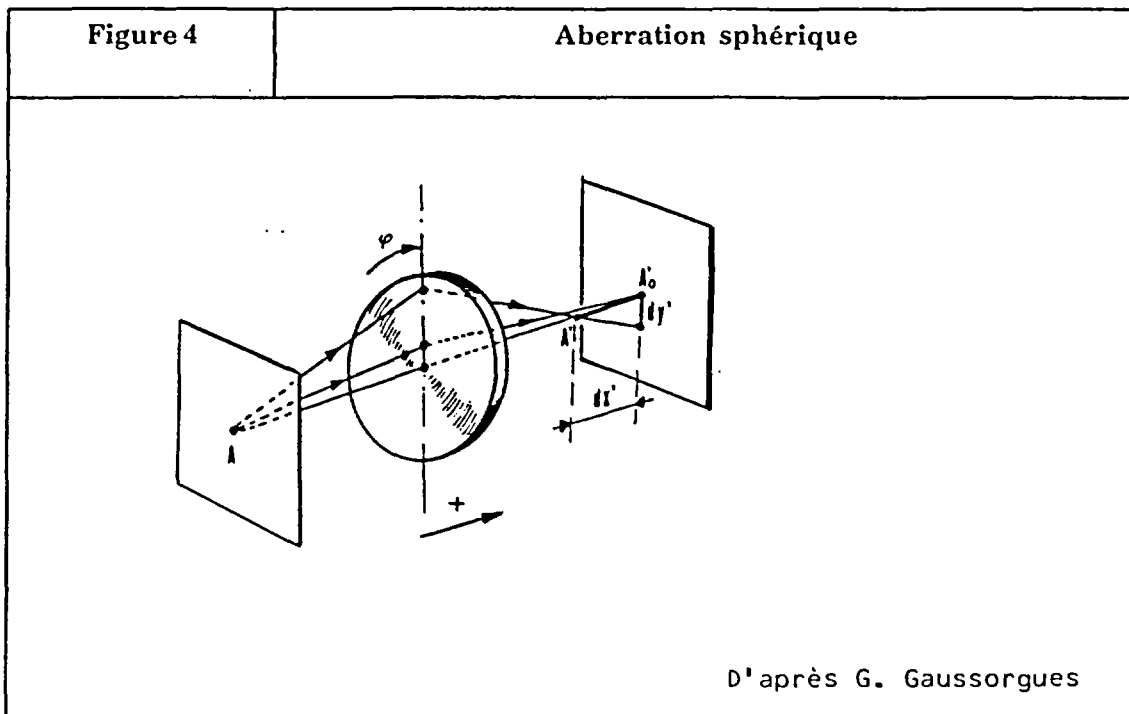
Si l'on choisit α' et θ' suffisamment faibles, les termes d'ordres supérieurs deviennent négligeables. Si en outre, on se place dans le cas de l'approximation de Gauss on arrive à :

$$A_1 = 0, B_1 = 0 \text{ et } dy' = 0$$

Les termes du troisième degré constituent les aberrations dites du 3ème ordre. Il existe 4 aberrations fondamentales caractérisées par un développement du troisième ordre de la forme :

- $dy' = A_3 h^3$ aberration sphérique
- $dy' = B_3 h^2 y'$ coma
- $dy' = C_3 h y'^2$ astigmatisme et courbure de champ
- $dy' = D_3 y'^3$ distorsion.

Aberration sphérique : dans ce cas les rayons paraxiaux convergent bien sur A'_0 mais les rayons non centrés sur la pupille sont dispersés (figure 4). L'image ne sera plus un point mais une figure de diffusion dont la structure évolue le long de l'axe. Le cercle de moindre diffusion est obtenue pour un plan situé au 3/4 de la distance $A'_0 A'$ à partir de A_0 .



La coma apparait en dehors de l'axe optique. Elle donne une tache image qui n'a plus de symétrie de révolution et qui augmente avec le champ et l'ouverture du système. (la tache a la forme approximative d'une comète).

Il est possible de réaliser des objectifs composés de deux lentilles et suffisamment bien corrigés à la fois de la coma et de l'aberration sphérique (doublets aplanétiques).

L'astigmatisme et la courbure de champ. Ces termes sont proportionnels à l'ouverture de la pupille et se manifestent même avec une pupille de faible diamètre. Un faisceau entaché d'astigmatisme présente deux zones d'amincissement situées au voisinage et de part et d'autre du plan image où on observe un cercle de moindre diffusion.

L'astigmatisme dépend de la convergence C de la lentille mais varie assez peu avec la forme de celle-ci. Dans les systèmes à grand champ, la correction de l'astigmatisme qui dépend de la position de la pupille ou du diaphragme d'ouverture se fait par le bon choix de cette position ou par l'addition d'autres lentilles.

La distorsion ne dépend pas de l'ouverture h du système mais dépend de l'angle du champ θ ou θ' .

Pour supprimer la distorsion, il faut que l'image $A'B'$ soit homothétique de l'objet AB (grandissement constant quelque soit θ).

La distorsion n'affecte pas la qualité de l'image mais modifie la position géométrique de chaque point.

Généralement tous ces défauts cohabitent avec plus ou moins d'importance dans les systèmes optiques. Ces systèmes constituent des compromis entre les corrections des différentes aberrations.

Le calcul optique consiste à réaliser un système tel que la diffusion globale donnée par toutes les aberrations ne dépasse pas la dimension du ou des détecteurs. Le champ angulaire élémentaire résolu par un système bien calculé ne devrait pas être limité par des aberrations optiques.

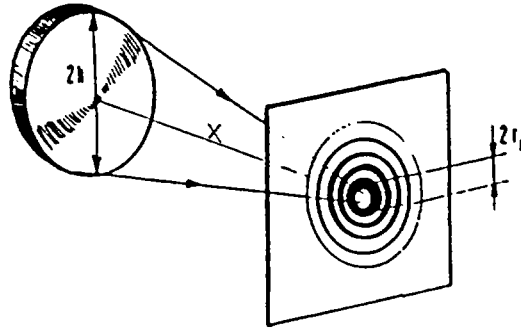
3.1.2 La diffraction

La théorie élémentaire des images repose sur l'hypothèse des rayons lumineux rectilignes assimilables aux droites de la géométrie. L'expérience ne vérifie pas cette hypothèse dans ses dernières conséquences. Il y a diffraction de la lumière autour de l'image géométrique, et l'image physique se compose d'un disque circulaire à bords dégradés, entouré d'anneaux lumineux concentriques irisés (figure 5). La théorie ondulatoire conduit à une formule simple donnant le rayon angulaire r_0 du disque central contenant la presque totalité du rayonnement, en fonction de la longueur d'onde, du rayon h de l'objectif (Danjon et Couder, 1983).

Dans l'infrarouge la longueur d'onde est plus grande que pour les rayonnements visibles. Il faut donc des systèmes très ouverts (h importante) pour obtenir des taches images de dimensions réduites, c'est-à-dire pour avoir une bonne résolution spatiale (figure 5). Mais l'augmentation de l'ouverture tend à augmenter considérablement les aberrations (la tache image doit rester inférieure à la taille du détecteur).

Figure 5

Diffraction



D'après G. Gaussorgues

$$r_0 = \frac{1,22 \lambda x}{2h}$$

r_0 : dimension utile de la tache image de diffraction.

3.1.3 Conclusion : optiques en infrarouge

Les optiques peuvent être uniquement composées de miroirs. Ils sont achromatiques et fonctionnent dans toutes les longueurs d'onde, avec une très bonne transmission, mais ils ne fournissent pas un champ important (on peut citer par exemple : les télescopes catoptriques, utilisés en télédétection lointaine).

Les systèmes dioptriques sont donc souvent employés en imagerie infrarouge à courte distance. Ils utilisent des lentilles en matériaux spéciaux tels le germanium et doivent faire l'objet de traitements anti-réfléchissements des différentes lentilles.

La sensibilité des équipements de détection infrarouge étant liée à l'ouverture de l'optique, il n'est pas rare de rencontrer des optiques ouvertes au-delà de la $f/1$.

Pour ces différentes raisons, les optiques à applications infrarouges sont des pièces délicates à réaliser et en général onéreuses malgré le nombre réduit d'éléments qui composent ces systèmes.

Le pouvoir séparateur des optiques infrarouges est en général bien inférieur à celui des optiques conçues pour le domaine spectral visible,

Exemple d'optique : lentille mince en germanium

$$f = 100 \text{ mm. Ouverture } f/2$$

tache de diffusion angulaire environ 5 mrad pour un champ de 12°

Par comparaison, une optique dioptrique bien corrigée, donnerait un champ élémentaire voisin de la limite angulaire de la diffraction soit 0,5 mrad, pour la bande 8 à 13 μm. La tache image focale est alors de 0,05 mm, soit une résolution de 20 traits par millimètre. Dans le visible on peut obtenir un pouvoir séparateur de 400 traits par millimètre.

3.2 LES DETECTEURS

L'élément le plus important du capteur infrarouge est le détecteur. De lui dépend la qualité des mesures et leur précision. Son rôle est de transformer :

une énergie lumineuse en une énergie électrique
ou un signal optique incident en un signal électrique.

3.2.1 Caractéristiques des détecteurs

On distingue deux caractéristiques essentielles : la sensibilité et la détectivité.

3.2.1.1 Sensibilité

La sensibilité (responsivity) traduit le rapport de transformation du flux optique F en tension ou en courant électrique.

On peut donc définir :

$$S_v = \frac{\partial V}{\partial F} \text{ en volts/watt}$$

V: tension
i: courant
F: flux optique incident

ou

$$S_i = \frac{\partial i}{\partial F} \text{ ampères/watt}$$

On peut donc définir également l'impédance $Z = \frac{\partial V}{\partial i}$ pour F constant

et l'admittance $A = \frac{1}{Z} = \frac{\partial i}{\partial V}$

La sensibilité doit cependant être précisée par un certain nombre de paramètres.

On distingue notamment :

- *Sensibilité locale*

En général, la sensibilité du détecteur n'est pas uniforme sur toute sa surface. Par conséquent, la réponse du détecteur à un flux constant dépend de la position du point considéré sur l'aire sensible du détecteur.

- *Sensibilité spectrale*

La sensibilité au flux d'un détecteur dépend de la composition spectrale du rayonnement excitateur. Pour un flux dont la répartition spectrale est uniforme, le détecteur donne une réponse qui varie avec la longueur d'onde.

- *Sensibilité en fonction des variations d'excitation*

L'étude de la sensibilité d'un détecteur à une excitation périodique, d'amplitude constante mais de fréquence variable permet de situer les conditions optimales d'utilisation.

La présence d'un certain temps de réponse permet donc de définir une constante de temps :

$$\tau = \frac{1}{2 \pi \nu_c}$$

avec ν_c : fréquence de coupure pour une chute de 3 dB de la sensibilité.

3.2.1.2 Bruit et détectivité

Pour un signal optique régulier dans le temps (créneau), la réponse du détecteur évolue dans le temps : dérive, fatigue, trainage, mémoire, fluctuations. Il est possible de diminuer ou d'éliminer les premiers types de défauts.

Les fluctuations (ou bruit) sont dues à la nature granulaire de la matière et du rayonnement ainsi qu'à l'agitation thermique des particules. Elles fixent la limite de détection et la précision des mesures.

• Bruit

Une bonne détection nécessite à un rapport signal/bruit élevé afin de quantifier le niveau de bruit d'un détecteur seul.

On définit la puissance équivalente au bruit, ou NEP (Noise equivalent power).

Le signal de réponse d'un détecteur soumis à un flux d'excitation F est composé de la réponse à ce flux et d'une fonction aléatoire appelée bruit. Si on diminue le flux d'excitation F , on atteint un seuil en-dessous duquel la puissance de sortie ne varie plus, c'est-à-dire est égale à celle du bruit. La puissance maximum F_0 du flux d'excitation qui correspond à ce seuil, représente le NEP et s'exprime par :

$$F_0 = \frac{\sqrt{\frac{8 \, d v^2}{\partial v}} \cdot \Delta v}{S_v}$$

Δv : bande de fréquence d'excitation du détecteur

• **Délectivité :**

$$D = \frac{1}{F_0}$$

D doit être la plus grande possible (D en W^{-1})

Dans le cas où le détecteur est excité par un flux périodique de fréquence ν , on définit la délectivité spécifique :

$$D^* = D \sqrt{A} \cdot \sqrt{\Delta \nu} = \frac{\sqrt{A \cdot \Delta \nu}}{NEP} \text{ (en } W^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}\text{)}$$

$\Delta \nu$: bande de fréquence d'excitation du détecteur (flux périodique)

A : surface du détecteur

D^* : est fonction :
 - du spectre et de la fréquence du rayonnement optique
 - de la largeur de la bande fonctionnement du système de détection
 - de la température détecteur
 - de la surface du détecteur.

3.2.2 Les différents types de détecteurs

Un détecteur de rayonnement transforme un signal optique incident en un signal électrique. On distingue les détecteurs thermiques des détecteurs quantiques. Dans le premier cas le flux lumineux est transformé en chaleur par absorption au niveau du détecteur. La variation thermique du matériau du détecteur est transformée en signal électrique.

Dans le second cas, détecteurs quantiques ou photoélectriques, le signal produit correspond à la mesure de l'excitation directe de leurs particules par les photons incidents.

3.2.2.1 Les détecteurs thermiques

Le coefficient d'absorption de la face sensible est voisin de 1 et constant quelque soit la longueur d'onde. La sensibilité spectrale est donc constante.

Sensibilité $S_F = \frac{1}{K}$ avec K : conductance thermique du détecteur

Parmi les détecteurs thermiques, on citera les plus connus :

Les bolomètres

- Le signal observé représente la variation de la conductibilité électrique du matériau en fonction de la température.
- Ce sont des détecteurs lents : $\tau = 10^{-1}$ à 10^{-3} secondes
- Matériaux : métaux ou thermistances.

Les détecteurs pyroélectriques

Ils sont constitués par des lames cristallines qui sous l'action d'un échauffement produisent des charges électriques de surface. Le signal électrique correspond au prélèvement des charges transmises par le dépôt d'électrodes conductrices sur le cristal.

Matériau : sulfate triglycine (TGS) utilisé pour $T^{\circ} < 45^{\circ}\text{C}$

$$S \approx 10^5 \text{ V.W}^{-1}$$

$$D^* = 5 \cdot 10^8 \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1} \text{ à } 10 \text{ Hz}$$

$$\text{NEP} = 4 \cdot 10^{-10} \text{ W}$$

Réponse spectrale 2 à 35 μm .

La détectivité est faible et il n'est pas possible de faire des mesures en flux continu. Des améliorations actuelles portent sur l'utilisation de cibles en matériaux dont la température de Curie est plus élevée.

Les détecteurs thermopiles

Il s'agit de détecteurs qui produisent une force électromotrice par effet thermo-électrique.

Avec des thermocouples montés en série, on obtient :

$$D^* = 10^8 \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$$

$$\tau \approx 100 \text{ ms}$$

$$S \approx \text{quelques V.W}^{-1}$$

Surface 50 mm^2 .

Les détecteurs pneumatiques

Le signal est donné par la mesure de la variation de pression d'une masse de gaz donné.

$$D \approx 10^9 \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1} \text{ à } 30 \text{ Hz}$$

$$A = \text{quelques } \text{mm}^2.$$

3.2.2.2 Les détecteurs quantiques

Les détecteurs photoémissifs

Il s'agit de cellules photoémissives. Le signal observé correspond à la mesure d'un certain nombre d'électrons arrachés d'un solide par les effets conjugués des photons incidents et d'une polarisation statique.

Ces détecteurs sont sensibles dans l'ultra-violet, le visible et le proche infrarouge ($< 1 \mu\text{m}$).

Les détecteurs photoconducteurs

Il s'agit de détecteurs pour lesquels l'observation du signal correspond à la mesure de l'augmentation de la conductivité électrique d'un semi-conducteur lorsqu'il absorbe un rayonnement électromagnétique. Cette augmentation de conductivité est due à un effet photoélectrique interne qui fait passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction. Pour abaisser le seuil, on pratique un dopage du matériau par introduction d'impuretés (photoconduction extrinsèque).

photoconductivité intrinsèque : PbS, PbSe, PbTe, InSb, AsGa, InAs, HgCdTe...

photoconductivité extrinsèque : germanium ou silicium dopés à l'or, mercure, cuivre...

Les détecteurs photovoltaïques

Il s'agit de détecteurs dans lesquels le flux de photons incident crée une modification de la barrière de potentiel d'une jonction, à l'intérieur d'un semi-conducteur inhomogène. Ces détecteurs se comportent comme des générateurs d'énergie et peuvent fournir un signal en l'absence de polarisation.

Ils sont beaucoup plus rapides que les photoconducteurs.

Exemple : InAs, InSb, TeCdHg.

3.2.2.3 les détecteurs particuliers

• Les détecteurs IRCCD (infrared charge coupled devices)

Les caméras thermiques militaires nécessitent l'emploi de détecteurs multiéléments pour obtenir la sensibilité nécessaire au discernement de très faibles écarts d'émissions tout en conservant une forte résolution et une cadence image élevée.

La technologie des détecteurs IR à lecture intégrée utilisant des registres à transfert de charges répond à ce problème. Ces détecteurs sont des structures complexes intégrant d'une part les éléments photosensibles, d'autre part les registres de lecture, de multiplexage de retard et parfois des modules de préamplification.

L'ensemble est situé dans le plan focal du système optique.

Les matériaux utilisés pour ces détecteurs sont :

- le tellure de cadmium mercure,
- l'antimoniure d'indium,
pour lesquels très peu d'information technique sont disponibles
- le Silicium - Platine Schottky.

La sensibilité spectrale de ce matériau se situe dans la bande allant de 1,1 à 5 μm avec une forte décroissance de réponse entre 3 et 5 μm . Le rendement quantique est très faible. Cependant l'intégration longue donnée par un grand nombre d'éléments compense ces handicaps. Le faible rendement quantique évite la saturation précoce du registre de lecture CCD.

La fabrication réalisée par condensation de platine vaporisé projeté sur un circuit intégré silicium, assure une très faible dispersion de réponse entre chaque élément. D'après G. Gaussorgues, les images résultantes sont remarquablement uniformes et ne présentent pratiquement pas de bruit spatial. La sensibilité thermique est voisine de celle du tellure de cadmium mercure.

- **Détecteurs SPRITE (Signal Processing in the element)**

Le balayage est identique à celui des CCD mais les détecteurs de forme très allongée remplacent une ligne de P éléments.

L'intégration du signal de balayage est réalisée au niveau de l'élément sensible.

L'intégration du signal permet d'obtenir des détectivités supérieures à la limite théorique des détecteurs conventionnels BLIP (Back ground Limited Infrared Photodetection). Il semblerait que ces détecteurs soient limités en dynamique en raison de la saturation de l'élément dû au cumul des charges.

3.2.3 Système de refroidissement

Le refroidissement du détecteur a plusieurs buts :

- d'une part d'accroître la détectivité. Il faut diminuer le rayonnement propre de l'élément sensible et de son environnement immédiat (diaphragme). Cette opération est obtenue par refroidissement du détecteur à des températures pour lesquelles ce bruit d'émission propre devient négligeable ;
- d'autre part d'éviter l'échauffement exagéré des petites surfaces sensibles sous l'influence d'un rayonnement intense et prolongé.

On distingue quatre modes de refroidissement :

- par gaz liquéfiés : le détecteur est placé en contact thermique avec le gaz liquéfié contenu dans un réservoir. Les plus utilisés sont l'azote liquide (température d'ébullition = 77° K), l'hélium liquide (4,2° K), l'hydrogène liquide (20,3° K). Pour des raisons de simplicité, de sécurité d'emploi, c'est l'azote liquide qui est le plus souvent employé. L'autonomie varie entre 2 et 4 heures. Il existe des procédés de transfert du gaz liquéfié à partir de réservoirs de grande contenance vers le vase Dewar du détecteur (procédé Leidenfrost) ;

- par détente de gaz comprimé (détente Joule-Thomson). Cette méthode de cryogénie utilise l'abaissement de température créé par la détente rapide d'un gaz à haute pression dans un tube capillaire (200 à 400 bar) ;
- par machines cryogéniques, en particulier, le cycle Stirling. Il s'agit de machines à produire mécaniquement du froid de façon continue par détente de gaz, préalablement comprimé en circuit fermé ;
- par effet thermoélectrique (effet Peltier). Cet effet consiste en l'absorption ou le dégagement de chaleur à la jonction de deux métaux différents, lorsque ces conducteurs sont parcourus par un courant électrique. La puissance réfrigérante d'un tel module étant assez faible, l'utilisation de plusieurs modules en cascade est souvent nécessaire. Ex : 173° K (-100°C) pour 6 étages de tellure de bismuth. Ces températures sont insuffisantes pour les détecteurs InSb et Hg CdTe devant fonctionner à 77° K mais conviennent parfaitement pour les détecteurs fonctionnant aux températures intermédiaires (PbSe).

3.2.4 Les systèmes d'analyse spatiale

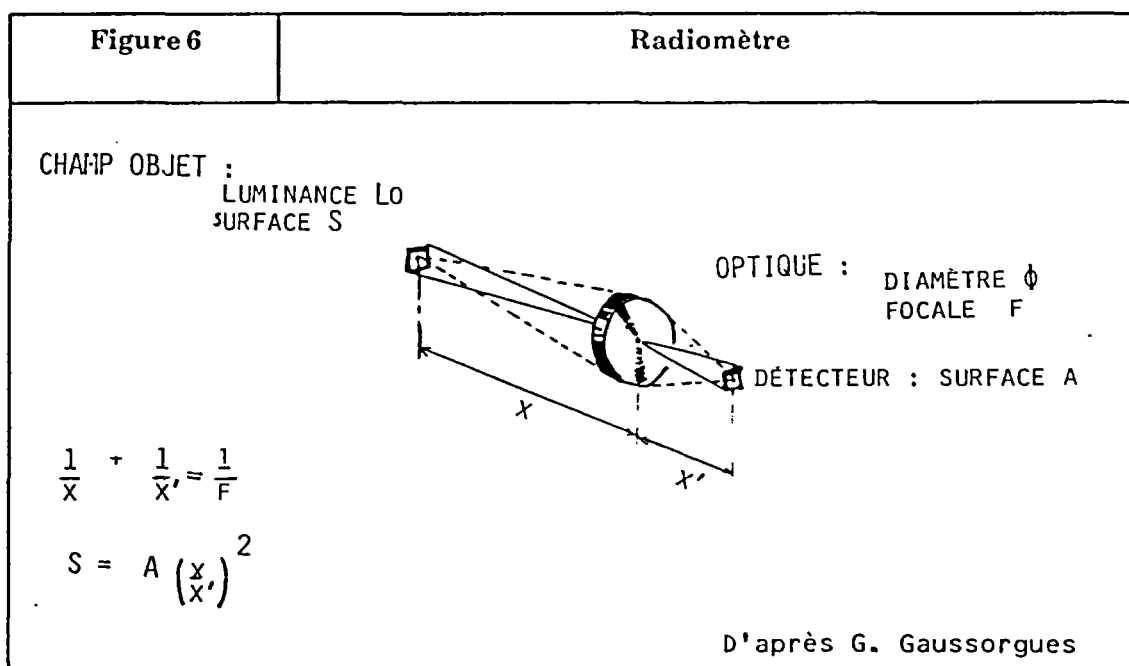
3.2.4.1 - Radiomètre

Soit une optique de diamètre ϕ , de focale f et un détecteur (ou groupe de détecteurs) de surface A situé à la distance x' de l'optique (figure 6). Le détecteur est alors l'image du champ objet, situé à la distance x , telle que :

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{x'} = \frac{1}{f}$$

et de surface :

$$S = A \left(\frac{x}{x'} \right)^2$$



Etendue géométrique :

$$G = \frac{\pi \phi^2 S}{4 x^2} = \frac{\pi \phi^2 A}{4 x^2}$$

Si L_o est la luminance de l'objet constante, le détecteur reçoit un flux F :

$$F = L_o \cdot \tau_{op} \cdot \tau_{at} G$$

avec : τ_{op} : coefficient transmission optique
 τ_{at} : coefficient transmission atmosphérique

Le détecteur délivre une amplitude s fonction linéaire du flux optique.

$$s = S.F \quad \text{où} \quad S = \text{Sensibilité du détecteur}$$

3.2.4.2 Thermographie ou imagerie thermique : principe

C'est une méthode qui permet l'acquisition des phénomènes liés à la distribution spatiale de la chaleur sur les objets examinés ainsi qu'à la variation de cette distribution dans le temps.

Le système transforme une image infrarouge en image visible. La luminance visible doit être proportionnelle à la répartition de luminance infrarouge sur l'objet, c'est-à-dire à la distribution spatiale de température $T_{(y,z)}$ ou d'émissivité $E_{(y,z)}$.

Cette transformation est généralement obtenue par l'analyse séquentielle des divers points de l'objet étudié au moyen d'un champ radiométrique élémentaire de surface S . Ce champ élémentaire, choisi petit, est déplacé rapidement sur l'objet examiné afin d'en couvrir toute la surface.

La distribution de luminance infrarouge de l'objet, explorée par le balayage de la surface élémentaire S , donne sur le détecteur un signal $s(t)$ dont l'amplitude varie dans le temps en fonction des variations de luminance rencontrée. Ce signal $s(t)$ est alors appliqué (après amplification) sur une unité de visualisation dont le balayage est synchronisé sur celui de l'analyse. L'image restituée présente ainsi une luminance visible localement proportionnelle à la luminance infrarouge de l'objet examiné.

Remarque

Cette méthode suppose que les variations temporelles de la distribution thermique de l'objet soient lentes devant le temps de l'exploration total de cet objet.

3.2.4.3 Les divers types de balayage

La déflexion du champ élémentaire se fait par des procédés optomécaniques.

Les balayages optomécaniques peuvent être remplacés par des balayages électroniques. Il s'agit des tubes images pyroélectriques ou des mosaïques à transferts de charges.

- **Le balayage ligne (line scanner)**

Déflexion d'un champ élémentaire ("radiomètre mobile")

La déflexion du champ se fait selon une ligne. Cette ligne aura la largeur de la surface élémentaire et la longueur du champ angulaire exploré.

La déflexion du champ élémentaire peut être obtenue de diverses façons :

- par la rotation du système complet (optique, détecteur...)

La vitesse angulaire de balayage est égale à la vitesse angulaire de rotation du système. En raison de la masse de la partie mobile, les vitesses de balayage ne peuvent pas être très élevées. L'espace objet exploré est cylindrique. L'exploration peut se faire sur 360° mais nécessite un collecteur tournant pour sortir l'information de la tête tournante.

- par l'oscillation d'un miroir plan

L'axe de rotation passe par le point d'incidence du faisceau. La rotation du miroir plan produit une déviation du faisceau réfléchi dont la vitesse angulaire de balayage est le double de celle de rotation.

- par la rotation d'un tambour polygonal à miroirs

La rotation continue d'un système prismatique à facettes réfléchissantes permet d'atteindre des vitesses de balayage élevées (entrelacement des lignes).

- par la rotation d'un prisme réfringent polygonal

Le polygone régulier réfringent comporte un nombre pair de facettes planes. Chaque couple de facettes opposées constitue une lame à faces parallèles. Ce système permet des vitesses de balayage élevées mais nécessite d'une part une correction des aberrations introduites par la lame à faces perpendiculaires, d'autre part un traitement de surface destiné à l'amélioration de la transparence du prisme (entrelacement des lignes).

- par la rotation d'un tambour à lentilles

Le flux utile se superpose à un flux parasite provenant de l'émission du système lui-même dans le champ total du détecteur. De plus, la réponse du détecteur est variable avec l'incidence des faisceaux (on n'obtient pas de réponse uniforme pour le balayage d'une ligne à flux constant).

- par la rotation de diasporamètres

Les diasporamètres sont constitués par 2 prismes traversés successivement par le rayonnement. La déviation globale du faisceau dépend de l'angle au sommet du prisme équivalent à l'ensemble. Cet angle dépend lui-même de la rotation relative d'un prisme par rapport à l'autre autour de l'axe optique du faisceau incident.

Il faut corriger les aberrations géométriques et le chromatisme. Le choix des paramètres géométriques et cinétiques permet la définition de figures de balayage très variées (ligne, ellipse, spirale, courbe...).

- **La barette linéaire de détecteurs**

Il s'agit d'une succession d'éléments détecteurs contigus, disposés en ligne. Chaque élément de dimension, a , soutend un champ élémentaire analysé $d\theta$, lié à la distance focale f de l'optique par la relation :

$$d\theta = \frac{f}{a}$$

Il y a autant de champs élémentaires que de détecteurs. Afin de ne pas laisser d'espaces vides entre chaque élément de la ligne, les détecteurs sont disposés en quinconques. L'analyse de la ligne est faite électroniquement en examinant les signaux donnés par chaque détecteur. Il n'y a pas de mouvements mécaniques. Le détecteur multiéléments devient très onéreux si le nombre de points élémentaires requis dans la ligne est important.

Dans le cas d'un balayage ligne, l'image thermique bidimensionnelle peut être obtenue en déplaçant la tête d'analyse à l'aide d'un porteur perpendiculairement à la ligne balayée et selon une vitesse régulière en correspondance avec la vitesse de balayage du système et la dimension angulaire du champ élémentaire.

L'image peut aussi être obtenue par l'utilisation de la combinaison de deux méthodes de balayage lignes disposées orthogonalement (le support des vitesses d'analyse suivant les deux directions dites lignes élémentaires définit le format, le nombre de lignes par trame dans l'image. Le balayage trame est beaucoup plus lent que le balayage ligne).

- **Les divers modes d'analyse d'une image par détecteurs multiéléments**

Balayage par une barrette de n éléments en perpendiculaires

La barrette perpendiculaire à la direction du balayage inscrit simultanément n lignes pour un seul balayage horizontal. Cette configuration a l'avantage de réduire la vitesse de balayage et la bande passante. En réduisant la bande passante, le rapport signal sur bruit augmente. Par contre, la dispersion de sensibilité (20 %) et du bruit (200 %) est importante.

Balayage par une barrette de p éléments en série

La barrette est considérée comme un détecteur unique (exemple : détecteur SPRITE).

La détectivité apparente est plus élevée.

Analyse série-parallèle par une mosaïque bidimensionnelle

Il s'agit de la conjugaison d'un balayage parallèle et d'un balayage en série avec une mosaïque $n \times p$ détecteurs.

Le problème est lié au fait que les mosaïques sont trop coûteuses et difficiles à refroidir.

3.2.5 Conclusion

Chaque élément de tête de mesure va intervenir dans la qualité du signal de sortie :

- le détecteur déterminera la qualité de la résolution thermique et sa taille définira en partie la résolution spatiale. Un système de refroidissement bien adapté augmente les qualités de résolution thermique,
- l'optique détermine la résolution spatiale et l'uniformité de l'image,
- le balayage spatial imposant la bande passante, joue à la fois sur les caractéristiques spatiales et thermiques des caméras,

La caractérisation des capteurs infrarouges doit donc se faire sur l'ensemble du système.

4 CARACTERISATION DES CAPTEURS INFRAROUGES

Il y a une distinction entre l'appréciation de la qualité d'une caméra infrarouge en tant qu'instrument de mesure et la détermination du meilleur équipement pour une utilisation bien définie.

La première attitude demande une caractérisation de la caméra. La seconde conduit à vérifier l'adéquation d'une caméra donnée avec les critères techniques de l'utilisation précise.

On s'intéresse dans ce chapitre à la caractérisation de la caméra. Les caractéristiques des caméras figurant sur les notices fournies par les constructeurs sont parfois incomplètes et rarement normalisées.

La première partie de ce chapitre précisera les différentes caractéristiques qui permettent d'apprécier les qualités d'une caméra infrarouge :

- les résolutions spatiales,
- les résolutions thermiques,
- l'uniformité de réponse,
- la dérive.

Ces définitions seront très largement inspirées des normes AFNOR n° A 09420 et A 09421 et des ouvrages de D. Pajani et G. Gaussorgues.

La seconde partie présentera les caractéristiques fournies par les constructeurs de capteurs infrarouges. Ces caractéristiques sont parfois incomplètes et répondent rarement aux normes françaises.

4.1 CARACTÉRISTIQUES DES CAPTEURS INFRAROUGES

4.1.1 Résolution spatiale

La résolution spatiale est l'expression quantitative de l'aptitude de la caméra à faire apparaître significativement la distinction entre des valeurs de luminance très voisines. Cet angle solide élémentaire d'analyse est fonction de l'IFOV, (Instantaneous Field of View) de la qualité de l'optique, de la vitesse d'analyse spatiale, des filtrages...

4.1.1.1 L'IFOV ou résolution géométrique

L'IFOV (Instantaneous Field of View) est la valeur du champ optique instantané du système. En général, il s'agit de l'angle solide (en mrad) sous tendu par la surface sensible du détecteur depuis l'optique principale. Il s'agit d'une valeur théorique.

$$\text{IFOV} = \frac{R}{f}$$

R : côté du détecteur carré
f : distance focale

4.1.1.2 La fonction d'Étalement de ligne (FEL) ou Line Spread Function

La FEL est la réponse impulsionnelle de la caméra, réponse mesurée sur le thermosignal (figure 7). Cette fonction est relevée expérimentalement pour une fente thermique très fine.

La FEL est une caractéristique de la caméra qui est destinée à calculer la fonction de transfert de contraste. Elle est intéressante surtout pour caractériser la caméra en tant qu'imagerie thermique.

On définit aussi le PRSL.

$$\text{Pouvoir de Résolution Spatiale Limite (PRSL)} : P_1 = \frac{A}{\alpha_1}$$

A : angle d'observation horizontal.
 α_1 : voir figure 7

Cette grandeur permet de déterminer le nombre d'échantillons minimum (N.e.m.) qu'il faut pour représenter le thermosignal suivant une ligne de balayage. $N_{em} = 2 \times \text{PRSL}$.

4.1.1.3 La fonction de Transfert de Contraste ou (FTC)

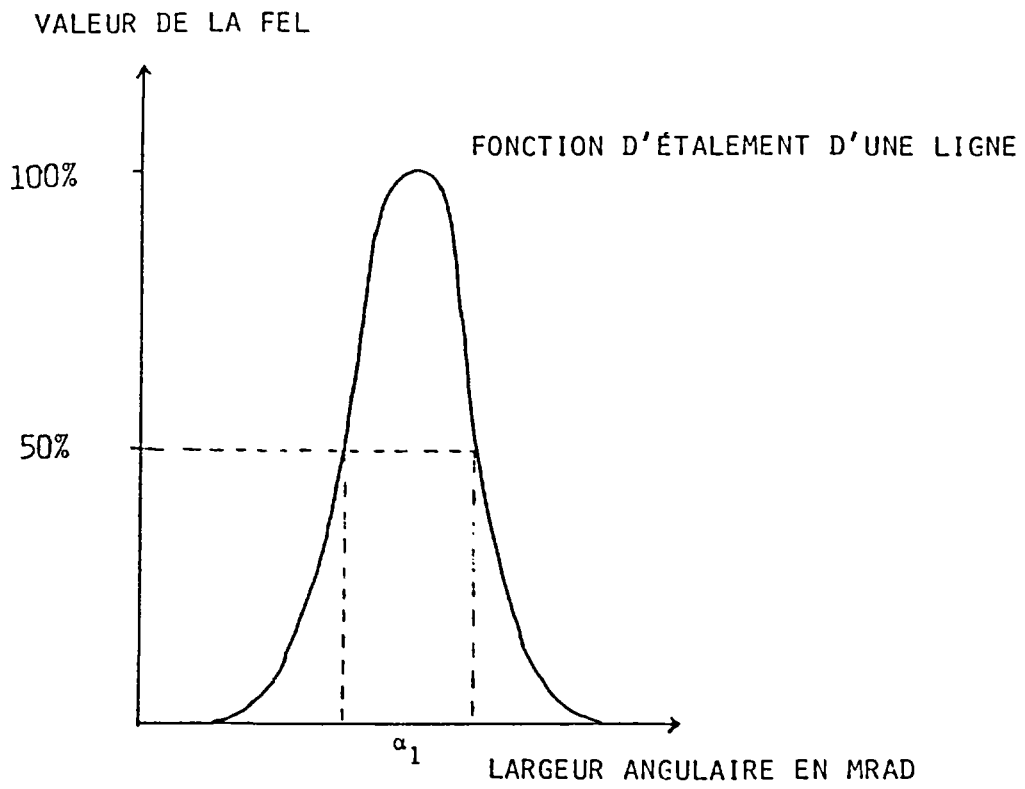
La FTC (figure 8) est le module de la transformée de Fourier de la fonction d'étalement de ligne (FEL).

Elle peut aussi être obtenue par des mesures sur mires thermiques (Normes AFNOR A 09491). Il s'agit principalement d'une caractéristique d'imagerie et non de mesure thermographique.

$$F_1 = \frac{1}{\alpha_1}$$

Figure 7

Représentation de la fonction d'étalement de ligne

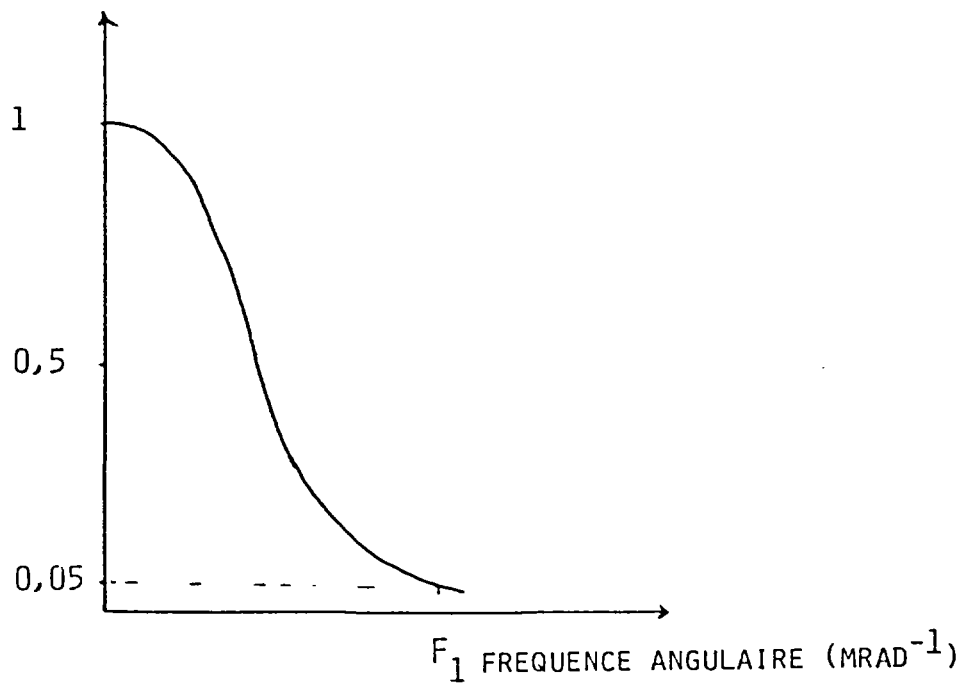


(NORMES AFNOR)

Figure 8

Représentation de la fonction de transfert de contraste

FONCTION DE TRANSFERT DE CONTRASTE



(NORMES AFNOR)

4.1.1.4 La fonction de réponse à une fente (FRF)

On relève la fonction de réponse à une fente qui est fonction de la dimension angulaire α de la fente thermique. C'est une fonction de la largeur angulaire représentant le quotient des amplitudes de la réponse à une fente thermique de largeur angulaire α variable à l'amplitude de la réponse à une fente de largeur suffisante pour que l'appareil de thermographie fournisse une réponse indépendante de la largeur angulaire (figure 9.c) :

$$FRF(\alpha) = \frac{V_M(\alpha) - V_0}{V_1 - V_0}$$

Cette mesure est réalisée à l'aide d'une fente rectiligne placée devant un corps noir (figure 9.a). Quand la largeur de la fente est grande (1) figure 9.b, le signal vidéo d'une ligne présente un palier. Ensuite, la fente est progressivement refermée jusqu'à obtenir un signal ne présentant plus de palier horizontal. La largeur angulaire de la fente correspondante donne la résolution du système pour 100 % de modulation maximale. Si la fente est encore fermée pour n'avoir plus que la moitié du niveau initial, la largeur angulaire de la fente donne la résolution pour 50 % de modulation maximale.

Cette fonction permet donc de définir l'angle minimum de mesure α_{\min} (norme AFNOR α_{95}). Cet angle est bien supérieur à l'IFOV (angle minimum théorique). Il faut que α_{\min} soit le plus faible possible afin d'assurer que la surface élémentaire observée soit la plus petite possible. Le Pouvoir de Résolution Spatiale de Mesure :

$$PRSM = \frac{A}{\alpha_{\min}}$$

On mesure α_m pour différentes valeurs : α_{98} ; α_{95} ; α_{50} .

α_{95} conduira à une sous-estimation de 5 % de la variation de luminance (figure 9 c). Selon les caméras, α_{98} vaut environ 3 à 10 fois α_{50} . Les constructeurs ont l'habitude de définir la résolution spatiale par :

- l'angle α_{50} correspondant à une FRF de 0,5
- ou par le rapport A/α_{50} (A : angle de vue) exprimé en nombre de points par ligne pour une FRF de 0,5
- ou par l'IFOV
- ou par $A/IFOV$.

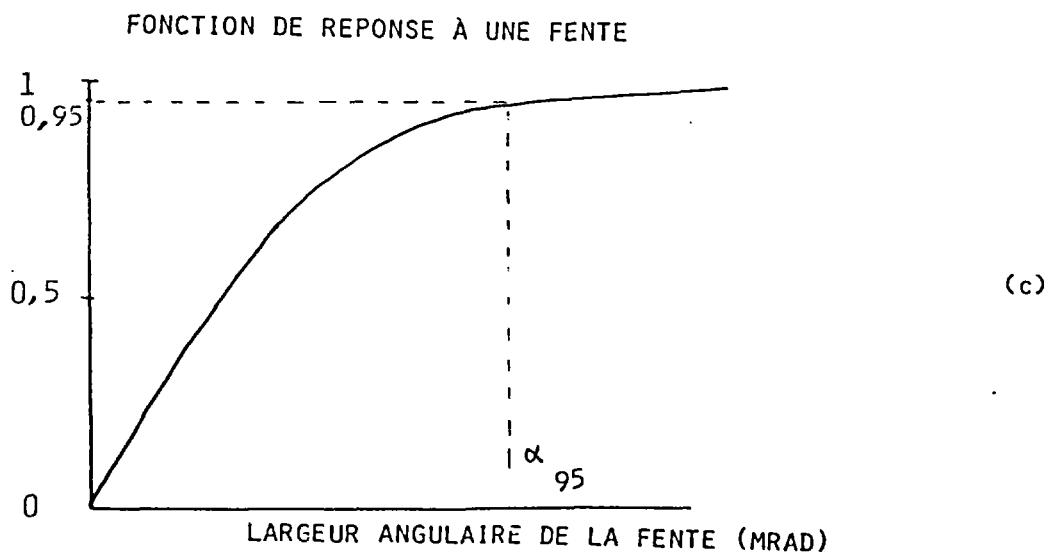
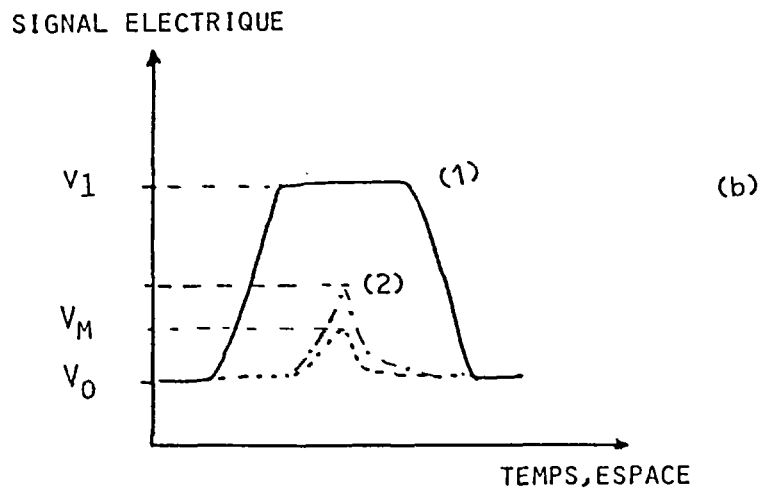
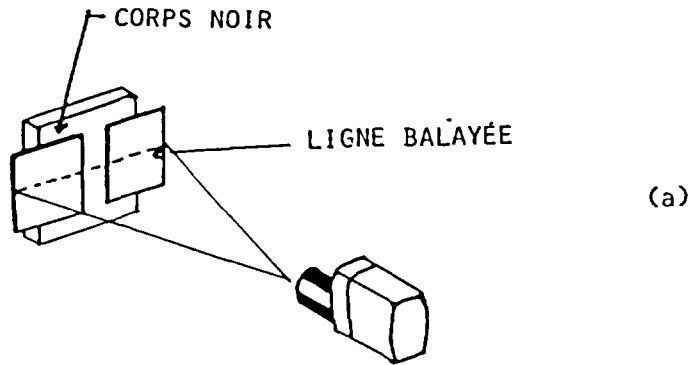
Le CELAR (Centre d' Electronique de l'Armement) utilise α_1 de la FEL et le LNE (Laboratoire National d'Essais) les valeurs de la FRF.

4.1.2 Résolution thermique

La résolution thermique représente l'écart minimum de température apparente discernable entre un objet et son environnement. Suivant la nature de l'objet, la définition de la résolution thermique prend des formes différentes (NETD ou DETB ; MRTD ou MDTR ou MRT ; MDTD).

Figure 9

Acquisition et représentation de la fonction de réponse à une fente



4.1.2.1 NETD ou DETB

Le NETD (Noise equivalent Temperature difference) est la différence de température équivalente à la valeur efficace du bruit mesuré sur le signal délivré en un endroit de l'appareillage pour un point de fonctionnement et une fréquence de restitution donnée. Cette résolution thermique est le plus souvent donnée pour une température observée de 30° C.

Le NETD se traduit par l'écart de température apparente entre un objet étendu et son environnement susceptible de produire un signal de crête égal à la tension efficace de bruit du système.

$$\text{NETD} = \frac{V_b}{\left(\frac{dV}{dT}\right)_{T_0}}$$

V_b : valeur efficace du bruit

$\left(\frac{dV}{dT}\right)_{T_0}$: sensibilité différentielle à la température T_0 (valeur déduite de la courbe d'étalonnage de la caméra)

La résolution thermique exprimée en ΔT est d'autant plus faible (ce qui est une qualité) que :

- la surface R du détecteur est importante (sens contraire de la résolution spatiale) ;
- l'ouverture de l'optique est grande (NETD augmentera si l'on ferme le diaphragme d'ouverture)
- la D^* (défectivité spécifique) est élevée (paragraphe 1-2) (la sensibilité augmente) ;
- le facteur spectral de transmission de l'optique augmente (NETD augmente si on utilise un filtre réduisant la bande spectrale $\Delta\lambda$)
- la bande passante est faible (diminution de la fréquence ligne, mais il y a alors diminution de la résolution spatiale).

4.1.2.2 MDTD ou MDT (minimum détectable température différence)

Le MDTD est une caractéristique du système Infrarouge utilisée pour les imageurs thermiques. Il s'agit de l'écart de température apparente minimum entre un objet étendu et son environnement qui rend juste perceptible cet objet par une observation visuelle du thermogramme.

4.1.2.3 MRTD ou MDTR ou MRT (minimum resolvable température différence)

Le MRTD représente l'écart de température apparente minimum entre les traits d'une mire de Foucault à structure périodique permettant de séparer visuellement les zones de la mire. Cette grandeur dépend aussi de la fréquence spatiale de la mire.

Remarque :

- les grandeurs MDTD et MRTD sont des grandeurs subjectives (appréciations visuelles), toujours inférieures au NETD, donc plus flatteuses,
- ne pas confondre la résolution thermique du système et la résolution de restitution. La seconde s'exprime en °C pour chaque niveau de gris pour un thermogramme noir et blanc, et est aussi fine que l'on veut mais sans signification physique réelle.

4.1.3 Uniformité de réponse

L'uniformité de réponse de la caméra sur l'image thermique est une caractéristique radiométrique de la caméra infrarouge. La luminance mesurée par la caméra pour un corps noir, de dimension angulaire supérieure à l'angle élémentaire de mesure α_{\min} défini par la FRF, doit être identique, pour toute position de ce corps dans la scène thermique observée. L'uniformité décrit comment se modifie la courbe d'étalonnage en fonction de la position du corps noir dans la scène thermique observée.

Généralement, les constructeurs s'efforcent de maintenir une non-uniformité non apparente à l'œil sur l'écran de restitution.

Cette non uniformité peut être liée :

- à la pupille d'entrée (en fonction de l'angle entre le faisceau incident et l'axe optique),
- au système de balayage (facteurs de réflexion selon les angles d'incidence des faisceaux sur ses composants),
- à l'utilisation de multidétecteurs (chacun des détecteurs a sa propre réponse). Il importe d'appliquer une correction sélective des paramètres de gain et d'offset de l'amplificateur associé à chaque détecteur. Ces techniques de compensation sont lourdes et doivent être refaites automatiquement à intervalles rapprochés compte-tenu des dérives des détecteurs entre eux,
- aux filtres spectraux placés devant la caméra.

Parmi les techniques de compensation des non uniformités, on citera les soustraction de fond, extraction de fond,... En imagerie, le concepteur cherchera à maintenir les non uniformités inférieures au bruit "visualisé" (MDTR) (dynamique 40 à 50 dB). En thermographie, la non uniformité doit absolument être corrigée (dynamique 70 à 80 dB).

4.1.4 Dérive

La dérive de la caméra provoque une modification non maîtrisée des courbes d'étalonnage et augmente l'incertitude de mesure. La caméra doit donc être compensée en dérive.

Différentes causes sont responsables de cette dérive :

- l'augmentation de la température de la caméra,
- la variation de la température de l'air ambiant,
- le temps de stabilisation.

Remarque :

Dans le cas des imageurs thermiques, la dérive n'importe pas, puisque le niveau continu du thermosignal est supprimé pour ne laisser apparaître sur l'écran que les variations de ce thermosignal.

Une des façons de réaliser des compensations de dérive est d'intégrer un ou 2 corps noirs dans la caméra. Ils sont observés à chaque balayage par le détecteur et la compensation se fait à partir de ces références internes.

4.2 CARACTERISTIQUES FOURNIES PAR LES CONSTRUCTEURS

Cette partie a pour but de faire tout d'abord l'inventaire des capteurs infrarouges proposés sur le marché français et, ensuite, de comparer les caractéristiques fournies par les constructeurs, quand elles sont comparables.

En plus des caractéristiques décrites au paragraphe 2.1, on comparera aussi la portabilité, les fréquences d'analyse, les champs totaux analysés.

On rappellera aussi la nature des détecteurs, les bandes spectrales utilisées, les systèmes de refroidissement utilisé et les caractéristiques du signal de sortie.

Les scanners seront traités dans une autre partie.

4.2.1 Liste des caméras

Sur le marché français actuel, on a pu relever 6 constructeurs ou distributeurs de capteurs infrarouges correspondant aux mesures que l'on souhaite effectuer. Chaque vendeur propose entre 1 et 5 caméras, soit un total de 15 capteurs.

Parmi ces 15 capteurs, on distinguera :

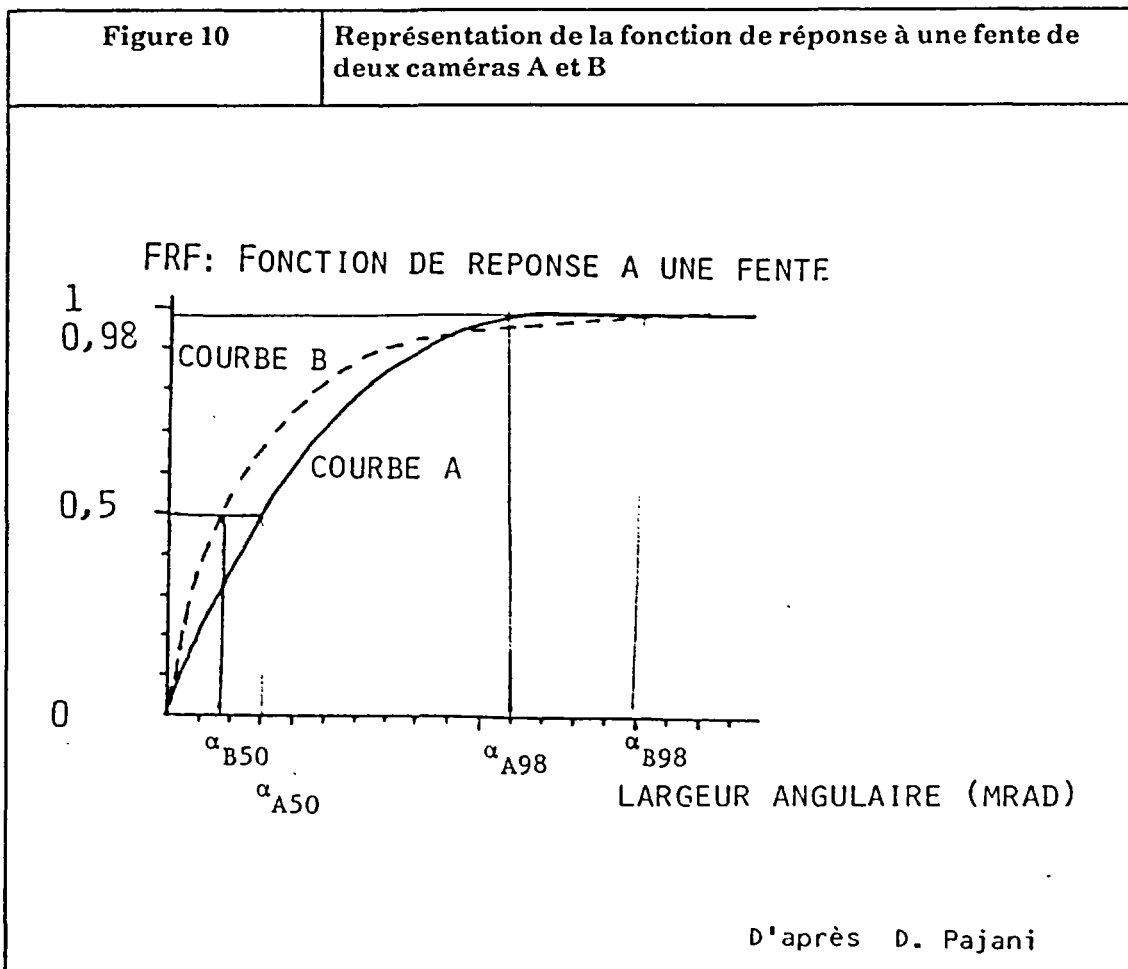
- 4 imageurs thermiques : THOMSON IR 5120C (caméra MITSUBISHI), RANK TAYLOR HOBSON, TALYTHERM 8.90 et 8.1000,
- 2 caméras bispectrales (GEC, INFRAMÉTRIC 610)
- 9 caméras infrarouges.

Un imageur thermique mesure des écarts de luminance d'une scène thermique. Une caméra infrarouge mesure des luminances ou températures absolues de la scène thermique.

Remarque :

Une caméra infrarouge peut aussi n'être utilisée qu'en imageur thermique.

La conception de ces capteurs diffère. Par exemple, pour un imageur on s'intéresse à la résolution spatiale correspondant à la limite d'observabilité (FRF de α_{50}) alors que pour la mesure on s'intéresse plutôt aux valeurs correspondant à une FTC de 0,05 ou une FRF de α_{95} (figure 10).



La caméra A est une meilleure caméra que B, mais B est meilleur imageur que A

La liste suivante (tableau 1) présente les différents distributeurs français et les caméras ou imageurs proposées par chacun d'eux.

Tableau 1		Liste des appareils de thermographie infrarouge	
Distributeur	Marque	Caméras	
AGEMA Infrared systems	AGA	Thermovision 880 SWB	
"	"	Thermovision 880 LWB	
"	"	Thermovision 870	
"	"	Thermovision 470	
"	"	Thermovision 450	
HGH	Hughes	AVIO TVS 2000	
"	"	AVIO TVS 5000	
INFRATEK	Inframetric	Inframetric 600	
"	"	Inframetric 600L	
"	"	Inframetric 610	
OPTILAS	Rank Taylor Hobson	Talytherm 8-90 *	
"	"	Talytherm 8-1000 *	
"	GEC	GEC Sensors Dual waveband	
Rank precision Industries	Rank Taylor Hobson	Rank Taylor *	
Thomson	Mitsubishi	IR 5120 C *	

* imageur thermique

Service de location

Certaines entreprises (tableau 2) annoncent qu'elles assurent la location (ou prestation) de caméras infrarouges. Etant donné que peu de services de location existent en France, les délais d'attente peuvent être importants.

Le coût varie en fonction du matériel ou de la prestation offerte et se situe aux environs de 10 000 F la journée ou la semaine.

Tableau 2	Liste des sociétés de location ou de prestation
Sociétés	Caméras proposés
Hamilton	Thermovision 870 (- 20 à 500° C - 3 à 5 µm 12° × 12°) magnétoscope modifié
Locamesure	Thermovision 470 ? portable Thermovision 870
Bodson	TVS 2000 (haute température)
I.T.I.	TVS 3000

4.2.2 Bandes spectrales

Il existe deux fenêtres de transmission dans l'infrarouge (fenêtre de transmission atmosphériques, C. Sirieix, note technique n° 10/90) :

- la fenêtre dite A ou onde courte (short wave) qui s'étend de 2 à 5,5 µm
- la fenêtre dite B ou onde longue (long wave) qui s'étend de 8 à 12 µm.

Les caméras infrarouges mesurent la luminance de la scène thermique dans l'une de ces 2 bandes ou utilisent ces deux bandes simultanément (caméras bispectrales). Chaque fenêtre A ou B possède des qualités particulières que l'on peut résumer brièvement.

D'après la loi de Wien (pour un corps noir), la longueur d'onde correspondant à un maximum de luminance (ou température) est liée à celle-ci par :

$$\lambda_{\max} = \frac{2848}{T} \quad \begin{array}{l} \lambda \text{ en } \mu\text{m} \\ T \text{ en } ^\circ\text{K} \end{array}$$

Pour des températures allant de 20° à 60°C, λ_{\max} s'étend de 8,9 à 10 µm.

La détectivité spécifique D^* des ondes courtes est 5 fois supérieure à celle des ondes longues (moindre incertitude). Les ondes longues sont plus favorables pour des mesures effectuées à distance importante, la transmission atmosphérique est plus favorable dans la bande 8-12 µm que dans la bande 3-5 µm.

Le choix de la bande est lié aussi aux valeurs de l'émissivité des matériaux étudiés dans les deux bandes. Il existe très peu de spectres infrarouges connus de 2 à 12 µm pour les matériaux rocheux. Il est donc difficile de comparer ces valeurs d'émissivité pour des matériaux rocheux.

Les caméras ondes longues paraissent a priori plus favorables à nos mesures que les caméras ondes courtes. Cependant, il faut noter que, les caméras ondes courtes étant les plus diffusées sur le marché, sont moins chères. De plus, le refroidissement doit être plus important et plus rigoureux dans la bande 8-12 µm que dans la bande 3-5 µm.

Il apparaît donc indispensable de comparer des caméras ondes longues et ondes courtes sur les matériaux faisant l'objet de nos mesures, à des températures voisines de nos conditions de terrain et à distance comparable.

Le tableau 3 résume les bandes spectrales des caméras et imageurs proposés. Il faut noter tout d'abord que sur certains modèles la longueur d'onde peut être choisie (option du constructeur) et que dans tous les cas des filtres spectraux peuvent être adaptés pour réduire les bandes spectrales d'utilisation (dans le cas où certains gaz absorbant seraient présents en quantité importante).

Tableau 3	Liste des caméras OL et OC
Bande A ou OC. ou SW	
Thermovision 870	2 - 5,6 μm
880 SWB	2 - 5,6 μm
470	2 - 5 μm
450	2 - 5 μm
Avio TVS 5000	3 - 5 μm
Avio TVS 2000	3 - 5 μm
Thomson IR 5120C	3 - 5 μm
Bande B ou OL. ou LW	
Inframetric 600 L	8 - 12 μm^*
600	8 - 15 μm^*
Thermovision 880 LWB	8 - 12 μm^*
Talytherm 8 - 90	8 - 13 μm^*
8 - 1000	8 - 12 μm^*
Rank Taylor hobson	8 - 12 μm^*
* option 3 à 5 μm	
Bispectrales	
GEC	
Inframétrie 610	

4.2.3 Nature du détecteur

La liste du tableau 4 indique la nature et le nombre d'éléments qui composent le détecteur ainsi que le système de refroidissement. On distingue les caméras à monodétecteur (un seul détecteur, ou SPRITE monté en série) des détecteurs à barrettes ou à mosaïques (CSD de Mitsubishi). Il semble évident que les problèmes d'uniformité de réponse sont moins importants avec un monodétecteur qu'avec une mosaïque. Les caméras sont de préférence équipées de monodétecteur.

Le système de refroidissement est précisé pour chaque caméra. Le système thermoélectrique demeure le plus pratique pour des mesures sur le terrain mais ne permet pas un refroidissement (- 100°C) suffisant pour obtenir des résolutions thermiques performantes ou pour être utilisé dans les longueurs d'ondes 8 à 12 μm .

Tableau 4		Nature des détecteurs		
Caméra		Nature du détecteur	Composant	Refroidissement
Thermovision 880 SWB		In Sb (antimoniure d'indium)	1 élément	Azote
Thermovision 880 LWB		Hg _{1-x} Cd _x Te (tellurure de cadmium mercure)	1 élément	Azote
Thermovision 870		Hg _{1-x} Cd _x Te (tellurure de cadmium mercure)	SPRITE	Thermoélectrique
Thermovision 470		Hg _{1-x} Cd _x Te (tellurure de cadmium mercure)	SPRITE	Thermoélectrique
Thermovision 450		Hg _{1-x} Cd _x Te (tellurure de cadmium mercure)	SPRITE	Thermoélectrique
Avio TVS 200		In Sb	10 éléments barrette	Joule - Thomson + Argon
Avio TVS 5000		In Sb	1 élément	
Inframetric 600		Hg _{1-x} Cd _x Te	1 élément	Azote
Inframetric 600 L		Hg _{1-x} Cd _x Te	1 élément	Azote
Inframetric 610		Hg _{1-x} Cd _x Te	2 éléments	Azote
Talytherm	8-90	Hg _{1-x} Cd _x Te	SPRITE - 8 éléments	Joule - Thomson + Argon
Talytherm	8-1000	Hg _{1-x} Cd _x Te	SPRITE - 8 éléments	Joule - Thomson + Argon
GEC			8 éléments SPRITE	Joule - Thomson
Rank Taylor		Hg _{1-x} Cd _x Te	SPRITE - 8 éléments	Azote ou Joule-Thomson ou cycle stirling
Mitsubishi IR 5120 C		Pt Si (Platine de Silicium)	CSD 512 × 512 éléments	Cycle stirling

4.2.4 Vitesse de balayage

Pour les caméras infrarouges le balayage mécanique impose la fréquence d'analyse. Le standard d'analyse des caméras équipées d'un monodétecteur ou d'une barrette de détecteurs est un standard propre à chaque constructeur (tableau 5). Un convertisseur de standard permet le passage au standard vidéo (fréquence de restitution). Pour l'imageur thermique IR 5120C, la fréquence balayage sera la même que celle de restitution : 50 Hz.

Sur certaines caméras, le balayage vertical peut être bloqué. La mesure se fait alors suivant une "ligne". Ce type de balayage peut être intéressant dans certaines configurations (caméra Thermovision 880 d'AGEMA).

Tableau 5		Balayage		
Caméras	Fréquence ligne	Fréquence trame	Entrelacement	Fréquence d'analyse (image)
Thermovision 880 SWB	2500 Hz 280 l/trame			25 Hz
Thermovision 880 LWB	2500 Hz 280 l/trame			25 Hz
Thermovision 870	2500 Hz 280 l/trame			25 Hz
Thermovision 470	4000 Hz 140 l/trame			20 Hz
Thermovision 450	4000 Hz 140 l/trame			20 Hz
Avio TVS 2000	?			30 Hz
Avio TVS 5000	ligne verticale : 200 Hz			20 Hz
Inframetric 600	200 l/trame	60 Hz	2 : 1	30 Hz
Inframetric 600 L	120 l/trame	50 Hz	2 : 1	25 Hz
Inframetric 610	200 l/trame			
Talytherm 8-90				
Talytherm 8-1000				
GEC				
Rank Taylor				
Mitsubishi IR 5120 C				50 Hz

4.2.5 Résolution spatiale

La résolution spatiale est définie par les constructeurs soit en :

- FRF ou SRF pour 50, 90 ou 95 % de modulation et éventuellement en nombre de points par ligne
- par l'IFOV.

Il est donc parfois difficile de comparer ces valeurs.

Tableau 6	Valeurs de résolution spatiale
Caméras	Résolution
AVIO TVS 5000	IFOV = 2,2 mrad
GEC	IFOV = 2,27 mrad
Talytherm 8-90 Talytherm 8-1000	
Rank Taylor Hobson	IFOV = 2,727 mrad
Thomson	0,5 mrad

Tableau 7	Valeurs de FRF	
	FRF à 50	FRF à 90
Inframétrie 600	1,8 mrad	
Thermovision 880 SWB Thermovision 880 LWB	2 mrad 2 mrad	4,5 mrad 4,5 mrad
Inframétrie Dual 610	2 mrad (8 - 12)	
TVS 2000	1,8 mrad	4,5 mrad
Inframétrie 600 L	2,4 mrad	
Thermovision 870	3,5 mrad	8 mrad
Thermovision 470	3,5 mrad	
Thermovision 450	3,5 mrad	

La thomson IR 5120C présente des caractéristiques spatiales nettement supérieures aux autres appareillages. Les caméras suivantes apparaissent de qualité comparable :

- Inframétrie 600
- Thermovision 880 SWB
- Thermovision 880 LWB
- TVS 2000
- GEC et Inframétrie Dual 610 (bispectrales)
- Rank Taylor Hobson.

Champ total des objectifs standards

Il s'agit ici des valeurs théoriques des champs totaux et non de l'angle d'observation.

Tableau 8	Champ total
Caméras	H × V
Thermovision 880 SWB* Thermovision 880 LWB* Thermovision 870 Thermovision 450	20° × 20° 20° × 20° 20° × 20° 20° × 20°
Avio TVS 2000 Avio TVS 5000	15° × 10° 16° × 10°
Inframétrie 600 Inframétrie 600 L Inframétrie 610	15° × 20° 15° × 20° 15° × 20°
Talytherm 8-90 Talytherm 8-1000	60° × 40° 60° × 40°
GEC	60° × 40°
Rank Taylor Hobson	60° × 40°
Mitsubishi IR 5120 C	15° × 11°

* utilisable en balayage ligne.

4.2.6 Résolution thermique

Il est difficile de comparer des valeurs de résolution thermique qui n'ont pas été mesurées de la même façon. On rappellera qu'en général le MRTD ou MDTR ou MRT (tableau 9) sont inférieures au NETD (tableau 10). Dans les normes AFNOR, la résolution thermique retenue a été le NETD.

Tableau 9	Valeur de résolution thermique autre que le NETD	
	Caméras	Résolution thermique
Rank Taylor Hobson	MRTD	0,1° C
Talytherm 8-90 Talytherm 8-1000	MDTD	0,03° C ?
Avio TVS 5000	MTR	0,1° C
Inframétrie 600	MDT	0,1° C
Inframétrie 610	MDT	0,1° C
Inframétrie 600 L	MDT	0,1° C

Tableau 10	Valeur de NETD	
	Caméras	NETD
Thermovision 880 LWB	0,07° C	30° C
Thermovision 880 SWB	0,1° C	30° C
870	0,1° C	30° C
470	0,1° C	30° C
450	0,1° C	30° C
TVS 2000	0,1° C	?
Thomson IR 5120 C	0,15° C	27° C
GEC	0,1 à 0,2° C	?

A l'exception de la thermovision 880 LWB, la résolution thermique est généralement de 0,1° C. Ces valeurs demandent à être précisées pour les caméras Inframétrie, elles sont certainement supérieures à 0,1° C.

4.2.7 Signal sortie

La plupart des capteurs ont une sortie standard (CCIR), à l'exception des caméras AGEMA 870 et 880. Les constructeurs nous ont cependant proposé un adaptateur. La qualité de ces signaux adaptés doit cependant être vérifiée.

Tableau 11	Signaux de sortie		
Caméras	Signal CCIR PAL	Signal RGB	Thermosignal
Rank Taylor Hobson	CCIR 625 1/50 Hz		
Thomson IR 5120 C	CCIR		
Infratek 600	CCIR	NTSC RGB PAL-RGB	
Infratek 600L	CCIR-Pal (Option)	EIARS170-NTSC	
Infratek 610 Dual	CCIR	BW NTSC RGB	
Avio TVS 5000 Hughes	CCIR	NTSC - RGB	Température signal
GEC	CCIR 625 1/50 Hz		
Talytherm 8-90	CCIR	RGB	
Talytherm 8-1000	CCIR	RGB	
Thermovision 870	non mais adaptateur	EIA/NTSC	Thermosignal + TIC
Thermovision 880 LWB	non mais adaptateur		Thermosignal + TIC
Thermovision 880 SWB	non mais adaptateur		Thermosignal + TIC
Thermovision 470	CCIR PAL		
Thermovision 450	CCIR PAL	EIA	
Avio TVS 2000 Hughes	CCIR PAL	RGB	

4.2.8 Encombrement

L'encombrement de ce type de matériel est très variable. Il existe des ensembles portables (Thermovision 470) et des appareillages très lourds comme les imageurs ou les caméras bispectrales (tableau 12). Les appareils peuvent être composés de 1 à 4 éléments :

- tête de mesure,
- unité de contrôle,
- écran de visualisation,
- système d'enregistrement.

A ces éléments, il faut rajouter une alimentation électrique.

Tableau 12		Encombrement des différents capteurs		
Caméras	Nombre d'éléments	Poids (kg)	Dimension (Longueur × hauteur × profondeur) en mm	
Thermovision 880 SWB	- tête - unité contrôle - enregistrement	2,5 portable ? ?	93 × 150 × 205 ? ?	
Thermovision 880 LWB	idem	idem	idem	
Thermovision 870	idem	idem	idem	
Thermovision 470	Incorporé dans la tête de mesure	6,1	140 × 154 × 475	
Thermovision 450	Incorporé dans la tête de mesure	5,3	115 × 154 × 475	
Avio TVS 2000	- tête - unité contrôle - enregistrement	2,3 10,9	175 × 80 × 180 300 × 140 × 470	
Avio TVS 5000	idem	2,8 11,2	200 × 95 × 201 ?	
Inframetric 600	- tête - unité contrôle - écran visualisation - enregistrement	3,1 3,5 4	122 × 124 × 206 236 × 137 × 262 322 × 124 × 160	
Inframetric 600L	- tête - unité contrôle - écran visualisation - enregistrement	3,1 3,5 4	122 × 124 × 206 236 × 137 × 262 322 × 124 × 160	
Inframetric 610	- tête - unité contrôle - enregistrement	3,6 50	173 × 124 × 122 706 × 635 × 653	
GEC	- tête - unité contrôle - enregistrement	12 16	300 × 160 × 250 225 × 260 × 205	
Talytherm 8-90 Talytherm 8-1000	- tête - tête	10 10	160 × 230 × 285 160 × 230 × 285	
Rank Taylor Hobson	?	?	?	
IR 5120 C	- tête - unité contrôle - enregistrement - écran visualisation	7,5 13	145 × 170 × 350 200 × 200 × 450	

4.3 LES ANALYSEURS LIGNES

Il existe peu de scanners sur le marché. Ils sont, en effet, plus encombrant et moins rapides.

- la caméra Thermovision 880 d'AGEMA peut fonctionner en balayage ligne,
- la société HGH propose deux scanners : ATL 20 et ATL 80 (dont les prix respectifs sont de 200 000 et 700 000 F). Ces deux appareils présentent des caractéristiques très intéressantes mais pas forcément adaptées à nos mesures. Un nouvel appareillage devrait pouvoir nous être proposé : le ATL L50

ATL 20 :

- conçu pour les hautes températures,
- 3 à 5,5 μm
- angle de balayage : 90°, fréquence de balayage 20 Hz
- refroidissement thermoélectrique
- détecteur Pb Se (20° à 200° C)
- résolution thermique 1° C à 100° C
- résolution spatiale $\alpha_{50} = 0,75 \text{ mrad}$ $\alpha_{90} = 2,5 \text{ mrad}$
- poids de la tête de mesure = 5 kg
- dimensions 460 × 96 × 151 mm
- poids coffret électronique \approx 15 kg
- focalisation : 0,5 m à l'infini.

ATL 80 :

- bispectral
- angle de balayage 45° à 60°, fréquence de balayage 80 Hz
- refroidissement : azote liquide
- 2 détecteurs :
 - In Sb 2,5 à 5,5 μm
 - Hg Cd Te 8 à 14 μm
- résolution thermique 0,1° C à 20° C
- résolution spatiale $\alpha_{50} = 1,5 \text{ mrad}$
 $\alpha_{90} = 3,5 \text{ mrad}$
- poids : 35 kg
- dimensions : 748 × 230 × 298 mm

ATL L50 :

- conçu pour les basses températures,
- 8 à 14 μm
- angle de balayage : 90°, fréquence de balayage 50 Hz
- refroidissement type stirling
- détecteur : Hg Cd Te
- $\alpha_{50} = \leq 1 \text{ mrad}$
- $\alpha_{90} = \leq 3 \text{ mrad}$
- NETD $\leq 0,1^\circ \text{C}$ à 30° C
- taille : 170 × 160 × 516 mm
- poids : \approx 5 kg
- 1 coffret électronique \approx 15 kg
- récupération des signaux de sortie ??

4.4 QUALITÉS ET COMPARAISON DU MATÉRIEL EXISTANT

Certaines caractéristiques ne sont pas prédominantes pour nos études, alors que d'autres sont décisives :

- La fréquence d'analyse n'est pas déterminante. Il importe peu que l'image soit acquise en 1/50 ou 1/20 ou 2 secondes. Ce temps d'acquisition, en principe, sera toujours faible devant la vitesse d'évolution du phénomène étudié.

- La bande spectrale de mesure n'est pas déterminante dans le choix de la caméra.

- L'encombrement du matériel peut être limitatif pour une utilisation in situ : les caméras bispectrales et certains imageurs thermiques sont souvent de tailles trop importantes.

- Le mode d'acquisition : il paraît intéressant d'avoir deux sorties d'enregistrement :

- 1 numérique, plus rigoureuse et utilisable en laboratoire,
- 1 analogique ou directe, moins contraignante in situ.

De plus, plusieurs modes d'acquisition peuvent être utilisés simultanément afin d'éviter la dépendance d'un essai à seul mode d'enregistrement.

Un écran de contrôle est toujours nécessaire.

Les caractéristiques primordiales sont bien évidemment liées à la qualité du capteur (à sa définition) : les résolutions spatiales et thermiques sont déterminantes dans le choix d'un capteur.

- Il est difficile de donner une correspondance directe entre une valeur de résolution spatiale et un élément réel différenciable dans un matériau rocheux présentant un faible gradient thermique puisque l'émissivité du matériau joue un rôle important mais non quantifié. Pour une résolution spatiale de 1 mrad, cela signifie qu'au mieux l'on pourra distinguer deux surfaces de 1 mm de largeur à 1 m de distance. Dans nos conditions d'utilisation, on sera rarement aussi près de la surface étudiée (sauf en laboratoire) et toujours loin des conditions optimum. La définition sera certainement d'ordre centimétrique.

La résolution thermique est, elle aussi, déterminante puisque les chiffres donnés correspondent à une température apparente de 0,1° C cela pourrait correspondre à un écart de température absolue de 0,2° C ou une variation d'émissivité allant de 0,8 à 0,85. Il nous paraît indispensable que la résolution thermique (NETD) n'excède pas 0,5° C : c'est le cas pour tous les capteurs proposés. Des chiffres plus précis pourront être donnés à la suite des essais en laboratoire.

Outre la résolution thermique et spatiale, il faut prendre en compte d'autres caractéristiques.

- Les problèmes de dérive sont importants : les variations de température doivent toujours donner la même variation d'intensité du signal de sortie (courbe d'étalonnage constante ou variant de façon contrôlée ou connue dans le temps). Cet élément discrédite l'utilisation d'imageurs thermiques pour nos essais. En effet, nos mesures peuvent durer plusieurs heures, plusieurs jours.

- Le capteur doit, de la même façon donner une image uniforme. C'est-à-dire qu'une même anomalie doit donner la même signature sur tout le champ analysé.

En résumé, les imageurs thermiques présentent une résolution spatiale bien supérieure à celle des caméras mais ont vraisemblablement des problèmes de dérive et d'uniformité. Si ces deux dernières caractéristiques ne peuvent être connues et compensées ou corrigées, ce type de capteurs devra malheureusement être éliminé.

Le tableau 13 résume les caractéristiques des caméras les plus performantes et celles des caméras de location. Il apparaît que ces caméras de location sont choisies dans un but de visualisation rapide (thermovision 470 : isolation de bâtiments, surveillance de four...). La caméra 870 nécessite l'utilisation d'un magnétoscope modifié (pendant les mesures et pendant l'interprétation des images). D'après les informations d'AGEMA ce matériel aurait été vendu par les sociétés de location.

On dispose sur le marché de location de la caméra TVS 2000 de Bodson, pratique pour les essais en laboratoire. Par contre, sa dérive devra être corrigée et un objectif à plus grand angle doit être envisagé pour un usage in situ. En effet, une dérive liée au système de refroidissement a été constatée durant des essais préliminaires.

Parmi le matériel disponible, le scanner présente des caractéristiques nettement supérieures à celles des caméras. Ce matériel n'étant pas encore réalisé, on n'aura pas la possibilité de démontrer que ces qualités conviennent le mieux pour nos essais.

L'adaptation de ce scanner représente un coût plus élevé que celui des caméras les moins onéreuses et un délai d'attente vraisemblablement plus important que pour une caméra (probablement 6 mois). Ces paramètres devront être quantifiés rapidement.

Par contre, ce matériel est directement comparable avec le scanner AGA THP 1 (utilisé au Laboratoire de Géomécanique de l'Université de Bordeaux 1). Avec le THP 1, il était possible de discerner les câbles électriques d'environ 6 cm de diamètre, à sensiblement 5 m de distance dans des tunnels ferroviaires, soit une résolution meilleure que 12 mrad (résolution spatiale annoncée = 5 mrad). La résolution thermique du THP 1 est difficile à apprécier étant donné qu'aucun capteur de température de surface n'a été placé sur les sites étudiés. Cependant, on peut affirmer que cette résolution était meilleure que 0,5°C. En effet, dans les galeries de drainage d'EDF des conduits d'eau avaient une signature thermique différente en fonction de la température de l'eau qui les traversait. Pour un écart de 0,5°C de la température de cette eau, le signal thermique des conduits variait (résolution thermique annoncée \approx 0,2°C) (C. Sirieix, 1990).

Il apparaît plus délicat de comparer directement les performances d'un scanner et d'une caméra. L'analyse du champ par une caméra est plus rapide qu'avec un scanner et le champ étudié n'a ni la même forme ni la même étendue.

4.5 SYNTHÈSE DU MATÉRIEL UTILISÉ

Les utilisateurs de capteurs infrarouges pour des applications voisines des nôtres, sont peu nombreux. Deux orientations très nettes sont à noter quand au choix du matériel utilisé. Certaines équipes utilisent du matériel classique (des caméras infrarouges) et d'autres équipes modifient et adaptent du matériel (des scanners). Les caméras sont directement utilisables. Elles permettent de thermographier facilement un champ, fonction de la distance focale de l'objectif utilisé.

Tableau 13							
Synthèse des capteurs infrarouges							
	Appareils	Résolution spatiale (1)	Résolution thermique (1)	Dérive	Uniformité	Encombrement	Prix
Quelques modèles performants	Thomson IR 5120 C	≈ 0,5 mrad ?	0,15° C	???	???	C	3
	Thermovision 880 SWB	2 mrad	0,07° C	? CN	?	B	2
	Thermovision 880 LWB	2 mrad	0,1° C	? CN	?		
	Inframetric 600	1,8 mrad	≈ 0,2° C	? CN	?	B	1
	Avio TVS 2000	1,8 mrad	0,1° C	? CN	?	A	1
	Scanner HIGH ATL L50	≤ 1 mrad	≤ 0,1° C	? CN	?	?	2 et développement
Anciens modèles	Thermovision 782	3,4 mrad ?	0,1° C	? CN	?	B ?	
	THP 1	5 mrad	0,2° C	? CN	?	F	
Location	Avio TVS 2000	1,8 mrad	0,1° C	*	?	A	1
	Thermovision 870	3,5 mrad	0,1° C	? CN	?	B	0 ou 1
	Thermovision 470	3,5 mrad	0,1° C ??	? CN	?	AA	0

* dérive liée au système de refroidissement (toutes les minutes)

Fourchettes de prix :
 0 - < 300 000 F 2 - 400 000 à 500 000 F
 1 - 300 000 à 400 000 F 3 - ≥ 700 000 F
 AA à F : matériel portable et peu encombrant à très encombrant
 (1) Ces chiffres sont donnés par les constructeurs. Ils demandent à être vérifiés par des tests.

Le scanner n'est pas directement utilisable. Il nécessite d'adapter et de synchroniser le balayage ligne et le déplacement permettant d'obtenir une visualisation en 2 dimensions.

La caméra balaye un champ plan mais souvent peu étendu ($20 \times 20^\circ$). Son utilisation nécessite donc de nombreuses mesures pour réaliser la thermographie d'un parement dans sa totalité. Par contre, la caméra est tout à fait adaptée aux mesures en laboratoire.

Le scanner balaye sur un angle important (90° ou plus) une ligne circulaire. Le champ analysé est bien plus important qu'avec une caméra. La mesure est plus longue (10 secondes pour une image). Cet appareillage est donc moins adapté aux mesures en laboratoire mais plus pratique en excavation souterraine.

Dans le cadre du matériel classique, on retrouve généralement le matériel AGA : les caméras Thermovision 780, Thermovision 110, Thermovision 782. Ces caméras ont été construites en 1978. Seules trois équipes utilisent un matériel plus récent :

- pour le contrôle des barrages : la caméra Thermovision 880 LWB (Gwyn *et al*, 1990),
- pour la thermoélasticimétrie : l'imageur thermique Rank Taylor Hobson (Société Ometron),
- pour les études hautes températures : la caméra Infratek 600 (Laboratoire Haute Température - ESEM Orléans).

Parmi les entreprises modifiant leurs scanners, on peut citer le LNE, Ambert (Suisse), Donohure & Associates (USA), Beauchemin Beaton Lapinte Inc. (Canada). Dans ces cas précis, le matériel est totalement adapté et conçu pour une utilisation bien spécifique : auscultation de routes, de tunnels, de chaussées, de ponts... L'appareillage de mesure, d'enregistrement est mis en place sur un véhicule (camion, draisine...). Le déplacement mesuré du véhicule perpendiculairement au balayage du scanner permet la restitution d'une image en deux dimensions de l'ouvrage. En fonction du scanner et de son angle d'ouverture adapté au milieu étudié (180° ou 220°), l'ensemble de l'ouvrage ou de la structure routière est entièrement thermographié en un ou deux passages.

Remarque : Il paraît très peu de publications scientifiques dans ce domaine, à l'exception des études menées dans des laboratoires de recherche. Dans ce cas là, le matériel utilisé est souvent ancien (caméra datant de 10 ou 20 ans). Les entreprises privées sont connues par leurs plaquettes publicitaires ou par les informations données par les constructeurs de matériel.

5 CONCLUSION

Les appareils de thermographie infrarouge, relevés sur le marché français, peuvent être classés en trois groupes, correspondant aussi à 3 fourchettes de prix :

- imageurs thermiques (600 000 F à 1 MF) : Thomson IR 5120C ; Rank Taylor Hobson, Talytherm 8-90 et 8-1000,
- caméras bispectrales (600 000 à 3 MF) : Inframétric 610, GEC ; Agema
- Caméras infrarouges (300 000 F - 500 000 F).

Le coût total du scanner ATL L50 n'est pas encore chiffré dans sa totalité (400 000 F pour le capteur).

Il est à noter que les imageurs thermiques et les caméras bispectrales présentent un encombrement important et un coût élevé. On est donc en droit d'attendre des performances remarquables pour ces types d'appareils. Les imageurs thermiques dérivant directement du matériel militaire ont, semble-t-il, une grande résolution spatiale et une vitesse de balayage au moins deux fois supérieure à celle des caméras. Une bonne résolution spatiale est indispensable pour nos mesures. Mais une absence de dérive et une bonne uniformité s'avèrent aussi nécessaires. Ces paramètres seront à étudier puisqu'ils ne sont jamais mentionnés par les constructeurs. Pour les appareils suivants : Rank Taylor Hobson, Talytherm 8-90 et 8-1000, aucune conclusion ne peut être apportée d'après les fiches techniques fournies par les distributeurs français.

En ce qui concerne les caméras bispectrales, leur intérêt principal réside dans le fait qu'elles nous permettent un levé sur une grande partie du spectre infrarouge. Mais, ne connaissant pas l'émissivité spectrale des matériaux étudiés et n'étant pas certain de leur constance dans les 2 bandes spectrales (corps gris), l'intérêt de ce type de matériel diminue. De plus, l'encombrement et le coût sont plus importants que ceux des autres caméras. Leur intérêt reste donc à être démontré.

Parmi les caméras infrarouges, on distinguera les caméras ondes longues des caméras ondes courtes. On rappellera, mise à part les réserves faites précédemment, que les caméras ondes longues semblent plus adaptées à nos mesures. Mais les caméras ondes courtes étant fabriquées en plus grand nombre, les détecteurs semblent plus performants, moins chers et en tout cas moins sensibles à la qualité du système de refroidissement utilisé.

Ondes longues : Inframétric 600L et 600, Thermovision 880 LWB

Ondes courtes : Thermovision 870, 880 SWB, 470 et 450

Avio TVS 5000 et TVS 2000.

Trois caméras nous semblent comparables autant en qualité qu'en coût :

- Thermovision 880
- Inframétric 600
- TVS 2000.

Elles doivent donc absolument être comparées autant en caractéristiques thermiques, qu'en maniabilité, solidité...

Elles doivent bien évidemment être comparées aux imageurs thermiques.

Pour des mesures sur site, le scanner présente les meilleures qualités de mesure mais sa conception et son coût précis de réalisation sont à définir.

Un facteur important ne doit pas être oublié : la maintenance. Compte tenu de la complexité et de la fragilité des équipements, des contrôles périodiques et des étalonnages doivent absolument pouvoir être réalisés facilement en France. Les sociétés suivantes ont le matériel et les compétences pour assurer ce service : AGEMA (Caméras thermovision), HGH (caméras TVS) ; Thomson (caméra Mitsubishi IR 5120C). Les sociétés suivantes ne semblent pas pouvoir assurer en France, ce type de service : Optilas (GEC, Talytherm), Rank Taylor industrie. Pour Infratek (caméra Inframétrie), la maintenance semble pouvoir être assurée en partie en France et en partie en Belgique.

Dans le but de comparer les différents capteurs entre eux et de donner des chiffres correspondants à nos conditions d'utilisation : matériau rocheux, basse température.... cinq qualités vont être testées : les résolutions thermiques et spatiales, l'uniformité, la dérive, la qualité des signaux de sortie.

Un banc d'essai a été conçu à cet effet. Pour rendre les tests comparables, un gradient thermique sera imposé sur un échantillon rocheux. Ce gradient sera faible et proche de la température ambiante. Cet échantillon sera équipé de jauges de température dont les valeurs seront enregistrées en continu. On pourra ainsi mettre au point un ensemble de tests répétitifs qui nous permettront de comparer les différents capteurs.

BIBLIOGRAPHIE

AMBERT Messetechnik (*nom d'une entreprise*) (1989) - Measuring aids for renovating tunnels, Tunnel, pp. 124-130, London.

DAUGUET A. (1964) - La détection des radiations infrarouges. Dunod, Paris. 331 p.

DANJON A. et COUDER A. (1983) - Lunettes et télescopes. Librairie scientifique et technique Albert Blanchard, Paris, 715 p.

GAUSSORGUES G. (1989) - La thermographie infrarouge: Principes techniques - Applications. Ed. Technique et Documentation. Paris, 540 p.

GWYN Q.H.J., BALLIVY G., DAOUST J., SALEH K., IM O. (1990) - Télédétection de la fissuration des barrages en béton. Journées Jacques Cartier, Saint-Etienne.

JACQUEMMOZ A., LIEVRE M., RIDOUX P. (1984) - La caractérisation des caméras infrarouges. Technica n° 440, pp. 14-17.

MAJOURAU S. (1990) - La télédétection thermique proche: exemples de dégradations appliquées au barrage du Chambon (Isère) et la falaise de la Roque Gageac (Dordogne), 243 p. Thèse Université Bordeaux I.

PAJANI D. (1989) - Mesure par thermographie infrarouge. ADD Editeur. Châtenay-Malabry, 418 p.

PAJANI D. (1984) - Thermographie infrarouge. Revue Instrumentation et systèmes.

PAJANI D. (1985) - Thermographie infrarouge. Collection des techniques de l'ingénieur. Traité Mesure et Contrôle R 2740 et 2741, 25 p.

RIDOUX P. (1984) - Etude de conditions d'une mise en oeuvre rationnelle de la thermographie infrarouge. Thèse 3ème cycle, Paris VI, 185 p.

SIRIEIX C. (1990) - "Thermographie infrarouge : rappel et exemples d'application". NT n° 10/90.

YU T.R., HENNING J.G., CROWALL J.E. (1990) - Loose rock detection with infrared thermography. CIM underground mining, volume 83, n° 937, Canada, pp. 46-52.

Normes AFNOR :

- n° A 09420 - février 1989
Thermographie infrarouge. Caractérisation de l'appareillage
- n° A 09400 - octobre 1987
Thermographie infrarouge. Vocabulaire
- n° A 09421 - février 1989
Thermographie infrarouge. Méthodes de caractérisation de l'appareillage.