

Image représentant la maîtrise du procédé de trempe

Les Caméras Infrarouges

Projet Bibliographique

Le but des caméras infrarouge est d'évaluer la température d'un corps par la mesure de son rayonnement dans une bande spectrale de l'ordre de 2 à 15 μm .

Stéphane DELECROIX & Mahmoud SKIFATI
Licence PRO Vision Industrielle



Table des matières

1.	Introduction.....	4
2.	Le domaine infrarouge et son système de mesure.....	5
2.1	La Cible.	5
2.1.1	Le Spectre électromagnétique.	5
2.1.2	Le Corps Noir.	6
2.2	Le facteur d'émission ou EMISSIVITE ϵ	7
2.3	L'environnement.	7
2.4	Détecteurs.	8
2.5	Affichage et interface.	8
3.	Les Caméras Thermiques.	9
3.1	Notion de système à balayage spatial.....	9
3.2	Notion de système à plan focal.....	9
3.3	Principes :	10
3.4	Fonctionnement	10
4.	Comparaison des cameras.....	11
5.	Types d'applications des cameras thermiques dans les différents secteurs.....	13
5.1	Généralités.	13
5.1.1	Contribution de la thermographie.	13
5.1.2	Besoins, critères techniques d'application et caractéristiques de systèmes.	13
5.2	Typologie des applications et utilisations.	14
5.3	Type d'Applications.	15
5.3.1	Thermique.	15
5.3.2	Matériaux et mécanique du solide.....	15
5.3.3	Electrotechnique et électronique.....	15
5.3.4	Industrie automobile et des transports.....	16
5.3.5	Métallurgie, traitements thermiques, soudage.	16
5.3.6	Industrie du verre.....	17
5.3.7	Électroménager et industries agroalimentaires.....	17
5.3.8	Papier, textile et plastique.....	18
5.3.9	Médical et pharmaceutique	18
5.3.10	Maintenance et prévention.....	18
5.3.11	Maintenance électrique	19
5.3.12	Maintenance mécanique.....	19
5.3.13	Pétrochimie.	19

6.	Les types de contrôles par camera thermiques.....	20
6.1	Surveillance industrielle	20
6.2	Contrôle de produits et contrôle de procédés.....	20
6.3	Contrôle des procédés.....	20
6.4	Vérification de procédé.....	20
7.	Conclusion	22
	Bibliographie.....	23

1. Introduction

Une caméra infrarouge (ou caméra thermique) est une caméra qui enregistre les différents rayonnements infrarouges (ondes de chaleurs) émis par le corps et qui varient en fonction de leurs température.

Contrairement à ce que l'on pourrait croire, une caméra infrarouge ne permet pas de voir derrière une paroi ou un obstacle. Elle reproduit tout simplement la température emmagasinée par un corps, ou montre le flux thermique d'une paroi en raison d'un foyer se trouvant à l'arrière.

C'est un procédé qui est de plus en plus utilisé dans l'industrie car ces caméras permettent d'effectuer des contrôles au niveau d'une ligne de production et ceci sans aucun contact avec le produit contrôlé.

Nous allons ainsi présenter dans ce dossier ce qu'est vraiment une caméra infrarouge. Nous verrons tous d'abord ce qu'est l'infrarouge et quel est son système de mesure. Ensuite, nous traiterons des caméras thermiques et de ses caractéristiques. Enfin, nous verrons son application dans différents secteurs d'activités.

2. Le domaine infrarouge et son système de mesure.

Le système de mesure par infrarouge consiste à ce que l'optique de la caméra focalise les radiations de l'objet à mesurer vers le détecteur. Ce dernier transforme alors l'information reçue en un signal qu'il transmet vers l'affichage.

Ce principe peut être synthétisé par le schéma suivant (figure 1) :

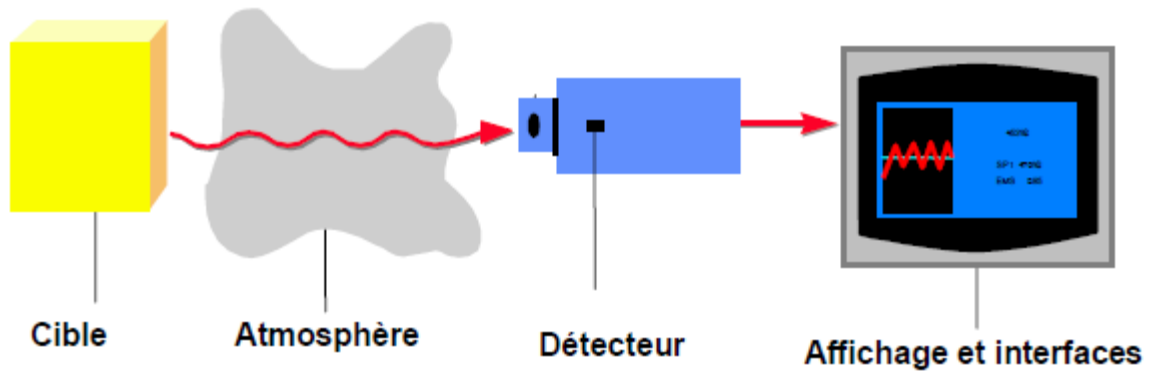


Figure 1 : système de mesure par infrarouge.

Nous allons ainsi développer chaque partie de cette figure pour mieux comprendre le système de mesure par infrarouge.

2.1 La Cible.

2.1.1 Le Spectre électromagnétique.

Tout corps ayant une température (T) supérieur au zéro absolue (-273°C ou 0°K) émet, selon sa température, une énergie infrarouge spécifique. Cette énergie est provoquée par le mouvement mécanique au sein des molécules. L'intensité de ce mouvement dépend de la température du corps. Les mouvements des molécules étant synonyme de mouvement de charge, ils génèrent des radiations électromagnétiques.

Ces radiations ont permis de mettre en place le spectre électromagnétique suivant :

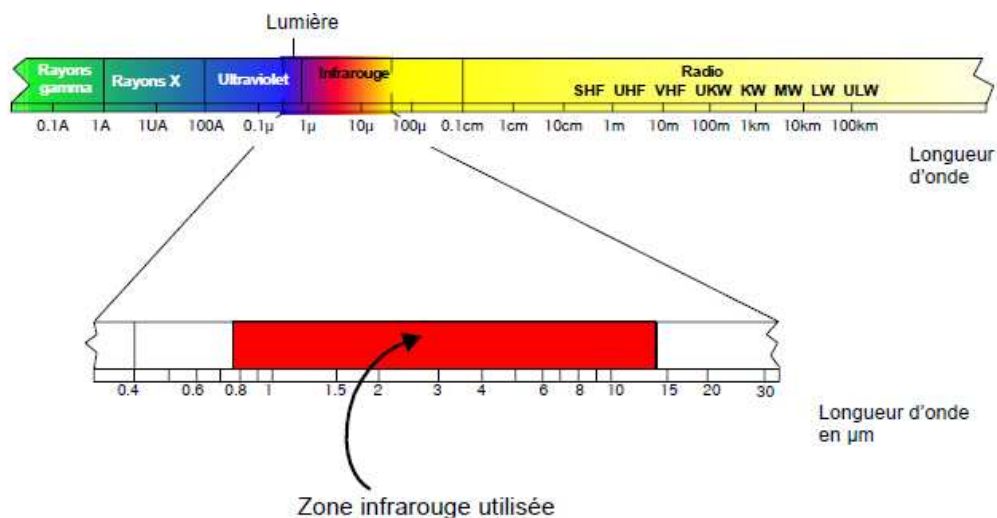


Figure 2 : le spectre électromagnétique.

Le domaine du visible s'étend des longueurs d'ondes allant de 0,4 à 0,8 μm (micromètres). La bande infrarouge quand à elle s'étend de 0,8 à 15 μm. Cependant, la bande spectrale de l'infrarouge est elle aussi divisée en plusieurs parties. Ces sections de la bande infrarouge sont définies dans le schéma ci-dessous :

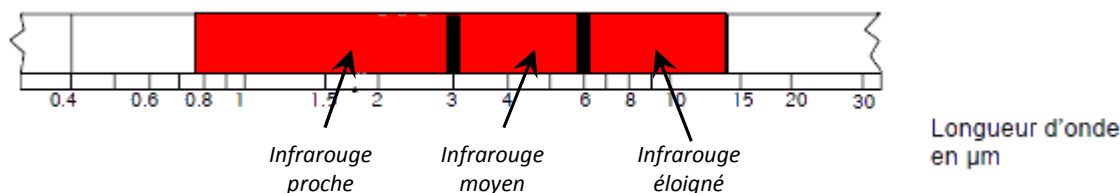


Figure 3 : sections de la bande spectrale infrarouge.

En thermographie infrarouge, on travaille généralement dans une bande spectrale qui s'étend de 2 à 15 μm, et plus particulièrement dans les fenêtres 2-5 μm et 7-15 μm.

2.1.2 Le Corps Noir.

Le corps noir est le corps de référence dans la théorie du rayonnement infrarouge : celui-ci est capable d'absorber tout rayonnement incident quelque soit sa longueur d'onde et d'émettre à son tour des radiations à toutes les longueurs d'ondes. Ce corps référentiel cède à l'environnement l'énergie captée jusqu'à l'établissement d'un équilibre thermodynamique.

Trois lois définissent le rayonnement d'un corps noir :

- **La loi de Planck** : Max Planck a calculé les flux de puissances électromagnétiques émis par un corps noir. La relation utilisée est la suivante :

$$W\lambda = \frac{2 \cdot \Pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T} \right)} - 1 \right)} \text{ (Watts/(cm}^2\mu\text{))}$$

avec :

- λ : longueur d'onde ;
- $W\lambda$: Flux de puissance émis par le corps noir à la longueur d'onde ;
- c : vitesse de la lumière = $3 \cdot 10^{10}$ cm/s ;
- h : constante de Planck = $6,6 \cdot 10^{-34}$ Watt.s² ;
- k : constante de Boltzmann = $1,4 \cdot 10^{-23}$ Watt.s²/°K ;
- T : température absolue du corps en Kelvin.

- **La loi de Wien** : Cette loi exprime le fait que la couleur d'un objet chauffé à une température élevée varie du rouge au blanc. La relation utilisée est la suivante :

$$\lambda \text{ max} = \frac{2898}{T} \text{ (}\mu\text{m)}$$

avec :

- $\lambda \text{ max}$: longueur d'onde à laquelle se produit l'émission maximale ;
- T : température absolue du corps en Kelvin.

- **La loi de Stefan-Boltzmann** : Celle-ci détermine le flux de puissance total émis par un corps noir. La relation utilisée est la suivante :

$$W = \sigma \cdot T^4 \text{ (Watts/(cm}^2 \text{))}$$

avec :

- σ : constante de Stefan-Boltzmann = $5,7 \cdot 10^{-12}$ (Watts/cm²/°K⁴) ;
- T : température absolue du corps en Kelvin.

2.2 Le facteur d'émission ou EMISSIVITE ϵ .

L'émissivité d'un corps représente l'aptitude de ce corps à émettre du rayonnement infrarouge. C'est le rapport entre le flux de puissance émis à une longueur d'onde par un corps réel à une température T et le flux de puissance qui serait émis à la longueur d'onde par un corps noir porté à la température T.

La relation mathématique qui permet de calculé l'émissivité est la suivante :

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{W_{\lambda}}{W_{\lambda_0}} \text{ (sans unité)}$$

avec :

- W_{λ} : Flux de puissance émis par un corps réel à la longueur d'onde λ .
- W_{λ_0} : Flux de puissance émis par un corps noir à la longueur d'onde λ .

Quelques exemples :

- T est la température en °C à laquelle la mesure a été réalisée.
- 'd' est la bande spectrale en μm .
- ϵ est l'émissivité normale.

Matériaux	T	'd'	ϵ
Peau	30°C	2 à 5	0,98
Papier	30°C	8 à 12	0,95
Eau	30°C	2 à 5	0,95
Peinture mate	20 à 100°C	2 à 5	0,95
Acier oxydé	100°C	2 à 5	0,74
Acier poli	100°C	2 à 5	0,07
Acier rouillé	20°C	2 à 5	0,69

2.3 L'environnement.

Le réglage d'une caméra infrarouge pour un certain domaine spectral s'avère nécessaire en raison de la transmissivité spécifique du parcours effectué par les radiations, c'est-à-dire de l'environnement.

Certains composants de l'atmosphère, comme la vapeur d'eau et le gaz carbonique, absorbent les radiations infrarouges à une certaines longueurs d'ondes et provoque des pertes de transmission. De nos jours, les fabricants ont pratiquement tous équipé leurs appareils de mesure par infrarouge de filtre de correction atmosphérique. L'utilisateur ne doit donc plus craindre les éventuelles pertes de transmission.

Il faut également tenir compte des sources de rayonnements thermiques situés à proximité de la cible, mais également les poussières, les fumées et les particules en suspension qui peuvent encrasser l'optique et ainsi fausser les mesures.

Voici dans un tableau récapitulatif les problèmes liés à l'environnement et les solutions apportées à ce problème.

Perturbations	Solutions
Rayonnement environnant plus chaud que l'objet	<ul style="list-style-type: none"> - Capteur de compensation ; - Surface à mesurer à l'ombre du rayonnement.
Poussières, Fumées, Particules dans l'atmosphère	<ul style="list-style-type: none"> - Collier de soufflage d'air ; - Pyromètre bi chromatique.
Température ambiante élevée	<ul style="list-style-type: none"> - Montage à isolement thermique ; - Refroidissement par air et/ou eau ; - Collier de soufflage d'air ; - Bouclier thermique.

2.4 Détecteurs.

Le détecteur est la pièce maîtresse de tout thermomètre infrarouge. Il transforme l'énergie infrarouge captée en signaux électriques qui sont alors affichés en termes de température par une électronique d'interprétation. Les techniques récentes utilisées par les processeurs ont augmenté la stabilité, la fiabilité, la résolution et la vitesse de réponse des thermomètres infrarouges tout en baissant leurs coûts.

On connaît deux principales catégories de détecteurs par infrarouge : les détecteurs quantiques et les détecteurs thermiques. Les détecteurs quantiques (photodiodes) entrent directement en interaction avec les photons captés créant ainsi des paires d'électrodes, puis un signal de courant électrique. Les détecteurs thermiques modifient leur température selon le rayonnement incident. La modification de la température génère une tension similaire à celle d'un thermocouple.

L'échauffement propre aux détecteurs thermiques fait qu'ils sont beaucoup plus lents que les détecteurs quantiques. La signification de l'expression « beaucoup plus lents » veut dire que les détecteurs thermiques exigent un temps de réponse exprimé en « ms » en comparaison aux « ns » ou aux « μ s » pour les détecteurs quantiques. Les détecteurs de quanta s'emploient essentiellement dans les systèmes d'imagerie et de scrutation en ligne.

2.5 Affichage et interface.

Les interfaces disponibles et la nature de l'affichage des valeurs mesurées sont des éléments importants pour l'utilisateur. La combinaison d'affichages et de panneaux de commande, disponible notamment sur les appareils portables peut être considérée comme une sortie primaire de l'appareil de mesure.

Les sorties analogiques ou numériques permettent d'utiliser des affichages supplémentaires dans le poste de contrôle ou d'opérer des réglages. Le raccordement direct d'électroniques d'interprétation, d'imprimantes et d'ordinateurs est également possible.

3. Les Caméras Thermiques.

L'atmosphère possède trois fenêtres de transmission dans l'infrarouge, c'est dans ces bandes de longueurs d'onde que sont optimisés les détecteurs. Nous avons à notre disposition des dispositifs plus ou moins complexes pour réaliser des images dans les bandes infra rouge proche, moyen et lointain. Disons simplement que les premières caméras utilisaient un seul détecteur associé à un dispositif de balayage à miroirs deux axes (lignes et colonnes), puis des barrettes ont été produites (un seul axe de balayage suivant les lignes), et que nous disposons aujourd'hui de caméras utilisant des matrices de détecteurs. Il faut ajouter ici que les détecteurs peuvent être quantiques, ils sont alors refroidis pour éliminer le courant d'obscurité, ou thermiques, comme les matrices de micro bolomètres qui ne sont pas refroidies.

Si on associe à l'observation d'une même scène thermique un système radiométrique de captation spatiale adjoint à un calculateur qui à la fois convertit les rayonnements infrarouges en points lumineux et en températures, on obtient une caméra infrarouge. Cet équipement permet de visualiser et de quantifier les températures d'une scène thermique : cette technique est appelée "**Thermographie infrarouge**".

Il existe deux systèmes de captation spatiale des radiations électromagnétiques : le système à balayage spatial et le système à plan focal.

3.1 Notion de système à balayage spatial.

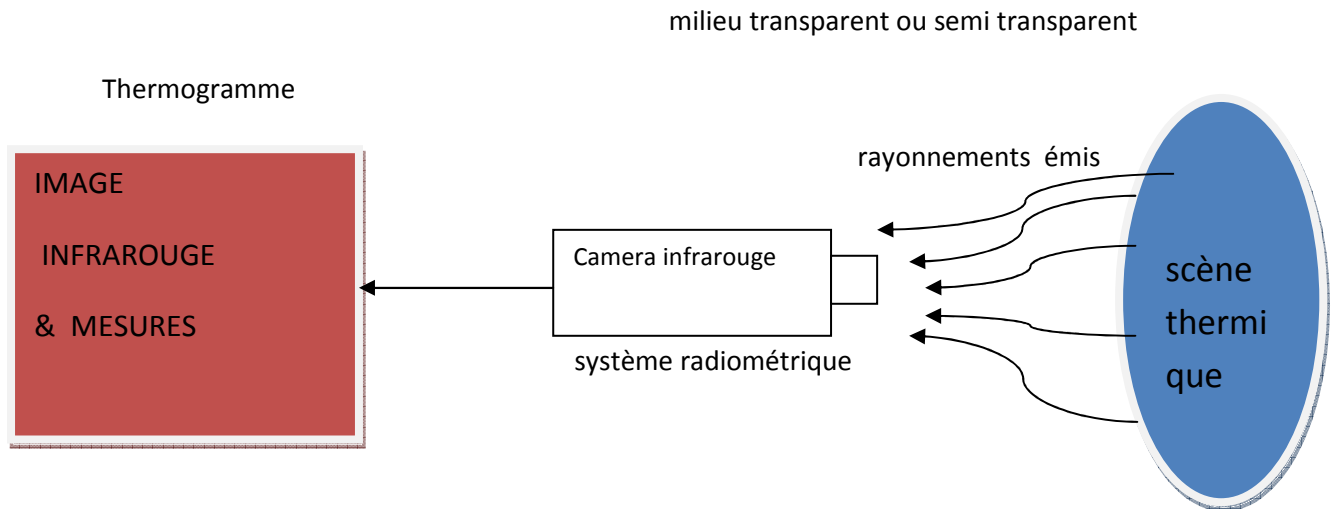
La camera thermique est munie d'un dispositif optico-mécanique qui par le biais de miroirs permet le balayage d'une scène suivant des axes verticaux et horizontaux. Dans ce cas, le même détecteur analyse chaque zone de la scène thermique avec un très léger décalage temporel.

3.2 Notion de système à plan focal.

Celui-ci est constitué par une multitude de radiomètre appelé "matrice de détecteurs". Dans ce cas, chaque détecteur est destiné à l'analyse continue d'une zone unique dans le champ scanné défini par l'optique de la caméra

Depuis 1989, les imageurs thermique à matrice de grand nombre de détecteurs sont disponibles pour des applications civiles, militaires et industrielles. En 1995, les matrices ont été adoptées pour les caméras thermiques d'entrée de gamme. Une meilleure qualité d'image risque de faire conclure à de meilleures qualités de mesure ; il est donc désormais nécessaire d'observer les implications de l'emploi des matrices sur les caractéristiques et performances instrumentales des caméras thermiques.

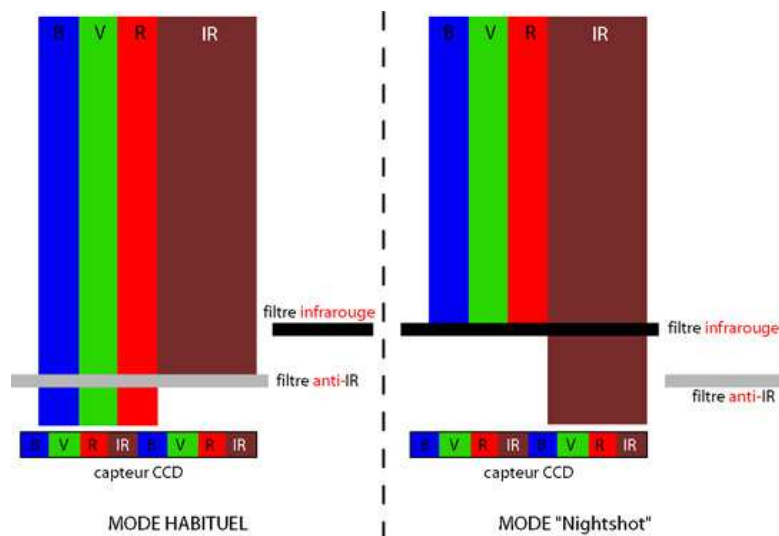
3.3 Principes :



La caméra infrarouge capte au travers d'un milieu transmetteur (ex : l'atmosphère) les rayonnements émis par une scène thermique. Le système radiométrique convertit la puissance de rayonnement en signaux numériques ou analogiques : ceux-ci sont transcrits en température par le calculateur et transformés en points lumineux sur un écran. L'image ainsi obtenue s'appelle "Thermogramme".

3.4 Fonctionnement

Pour comprendre le fonctionnement, il est intéressant de savoir ce qui se passe lorsque la caméra passe en mode « infrarouge ». Tous les capteurs CCD et tri-CCD ont une couche photosensible au rayonnement infrarouge. Toutes les caméras professionnelles et grand public possèdent un filtre qui coupe l'infrarouge et restreint donc l'impact des rayonnements sur le capteur à la seule lumière visible. La grande innovation est d'avoir rendu ce filtre amovible, qui est alors remplacé par un autre filtre, qui lui, inversement, supprime en majeure partie la lumière visible arrivant au capteur.

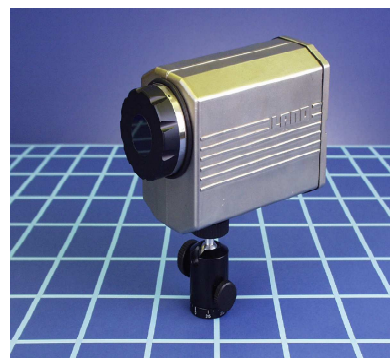


4. Comparaison des cameras

Aujourd'hui toutes les caméras thermographiques sont des caméras matricielles et elles utilisent toutes un détecteur micro bolomètre au même titre que tous les PC utilisent un processeur Pentium. Néanmoins, sur le marché de la thermographie infrarouge, toutes les caméras n'utilisent pas le même détecteur et certains constructeurs vont même jusqu'à demander une fabrication spécifique de détecteurs micro bolomètres selon leur propre cahier des charges. Le détecteur est le principal responsable des caractéristiques techniques de la caméra en terme de sensibilité thermique et de qualité d'image. Chaque fabricant de caméra thermographique propose par ailleurs des logiciels spécifiques pour l'édition de rapports.



Caméra AR-40



Caméra FTI Mini LAND



Caméra IR-032

Donnée images et optiques

Fabricant /modèle	Flir système A320	Devitech IR-032	FTI Mini LAND
Champ de vision	25° x 19°		17 x 12,8° (variantes d'objectif disponibles sur demande)
Distance focale	18 mm		450 mm
Résolution spatiale (IFOV)	1.36 mrad		1,85 mrad
Sensibilité thermique (NETD)	70 mK @ +30 °C	NETD <50mK	<0,12°C
Fréquence des images	30 Hz	50 Hz	30 Hz
Focalisation	Automatique ou manuelle (moteur intégré)	Réglage manuel ou autofocus	Réglage manuel ou autofocus

Données métrologiques

	Flir système A320	Devitech IR-032	FTI Mini LAND
Type de détecteur	Matrice à plan focal (FPA), microbolomètre non refroidi	microbolomètre non refroidi	Matrice plan focal à microbolomètres non refroidie
Gamme spectrale	7.5-13 μm	8-14 μm	7 à 14 μm
Résolution	320 x 240 pixels	640x480 pixels	160 x 120 pixels
Pas du détecteur	25 μm	25 μm	25 μm
Gamme de température de l'objet	de -20 °C à +120 °C	-30 à 90 °C	-20 à 500°C
Précision	± 2 °C ou ± 2 % de la valeur affichée	$\pm 2\%$ ou ± 2 °C	

Données ergonomiques

Fabricant /modèle	Flir système A320	Devitech IR-032	FTI Mini LAND
Masse	0.7 kg	0,550 kg	2 kg
Dimensions (L x P x H)	170 x 70 x 70 mm	65 x 65 x 89 mm	

Il s'agit ici d'attirer l'attention sur quelques critères de sélection (notamment : gamme de température, résolution, gamme spectrale, type de détecteurs, sensibilité thermique, résolution spatial et champ de vision). Cependant, le choix d'une caméra dépend nécessairement de l'utilisation qui en sera faite, de la qualité d'image attendue et du budget dont on dispose. Nous ne pouvons donc pas prétendre aiguiller précisément les choix vers la caméra qui répondra à coup sûr aux besoins de chacun.

5. Types d'applications des caméras thermiques dans les différents secteurs.

5.1 Généralités.

5.1.1 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.

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.

Discriminative, tant spatialement (résolution spatiale) que thermiquement (résolution thermique).

Discrète, 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. Nous avons dit « généralement » ; la caméra peut, en effet, perturber l'image thermique lorsqu'elle est très proche de la scène observée (la température d'environnement n'est alors pas uniforme) – c'est le cas en microélectronique – ou lorsque la scène est de faible émissivité – c'est souvent le cas sur cartes électroniques. 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 ;
- de pièces sous tension électrique ou sous rayonnements ionisants ;
- 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.

5.1.2 Besoins, critères techniques d'application et caractéristiques de systèmes.

Au même titre que les caractéristiques des systèmes, les besoins et critères techniques d'applications se définissent suivant les axes spectral, thermique, spatial et temporel.

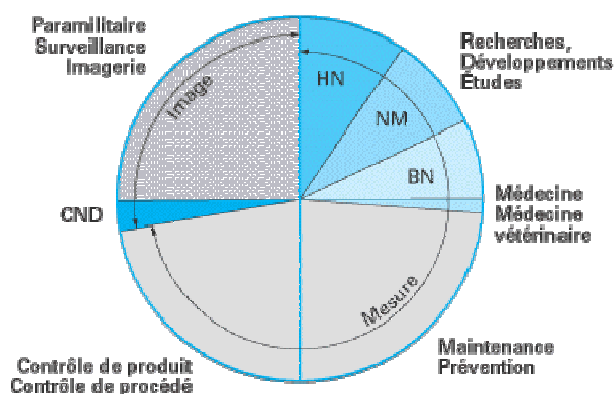
Le choix d'un système tient donc compte des besoins qu'ont les opérateurs pour leurs applications, des critères techniques qui décrivent ces applications et des caractéristiques des systèmes disponibles, à compléter ou à concevoir.

Ce « triangle » (besoins, critères et caractéristiques), base du choix, est rarement explicité lors de ce choix, bien que l'offre en systèmes soit assez vaste et que les constructeurs proposent des gammes de produits. Il s'ensuit des choix sur – ou sous-dimensionnés résultant de besoins insuffisamment justifiés ou de critères techniques mal exposés.

5.2 Typologie des applications et utilisations.

o Segmentation des applications

Nous retiendrons cinq segments d'application de l'imagerie thermique.



o Topologie des applications

La recherche et développement est subdivisée en haut niveau HN (laboratoires scientifiques), moyen niveau MN (R & D industriel) et bas niveau BN (électroménager...).

Les applications médicales et vétérinaires sont très peu nombreuses et bien spécifiques.

La maintenance et la prévention sont actuellement des applications majeures.

Le contrôle de produits et le contrôle de procédés comprennent tant les actions ponctuelles par un opérateur que les installations à poste fixe. Le contrôle non destructif (CND) est un cas particulier, situé principalement en imagerie thermique.

La surveillance de site, les applications paramilitaires ou de conduite nocturne, ne sont pas de la thermographie et ne sont évoquées ici que pour les exclure du propos.

Historiquement, trois grandes vagues d'applications ont eu lieu, en attente de quatrième en gestation : les applications médicales, puis scientifiques, puis en maintenance (vague actuelle). La prochaine (contrôles de produits et de procédés) débutera vraiment quand le prix des appareils sera à un niveau plus accessible et que des capteurs SW seront disponibles.

o Utilisation ou application ?

Il convient de distinguer « utilisation » et « application ».

Dans le premier cas (utilisation), la caméra thermique est considérée comme un **simple moyen** pour résoudre un problème : on ne se préoccupe guère d'expliquer pourquoi et comment la

technique thermographique est adaptée, apporte la solution ou est un avantage décisif : ce n'est pas le sujet.

Dans le deuxième cas (application), il s'agit de **thermographie appliquée** : on décrit alors les caractéristiques de la situation de mesure, la façon de la maîtriser, les choix ou les définitions des matériels adaptés. C'est cette seconde démarche qui présente un intérêt dans le cadre de ce projet ou au cours d'échanges techniques traitant de thermographie.

5.3 Type d'Applications.

5.3.1 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 thermo physiques (conductivité, diffusivité, etc. ...), propriétés radiatives (émissivité spectrale directionnelle, facteur de réflexion...) et propriétés optiques.

Un autre centre d'intérêt devenant majeur est l'usinage à grande vitesse.

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
- ✓ 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.

5.3.2 Matériaux et mécanique du solide.

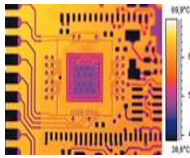
Un pan important des études de matériaux et des structures se distingue depuis 1985 : la recherche en contrôle non destructif (CND) et en détectabilité de défauts dans les matériaux divers ainsi que la mécanique du solide (contrainte, fatigue, rupture, l'étude des frottements).

5.3.3 Electrotechnique et électronique.

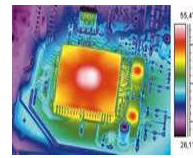
En électrotechnique, on réalise des composants destinés à véhiculer, transformer ou commuter de l'énergie électrique.

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).

Les problèmes principaux rencontrés en électronique sont la forte dispersion des émissivités et la faible taille de certains composants à étudier.



Electronique



Electronique (Cartes de circuit imprimées)

5.3.4 Industrie automobile et des 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...

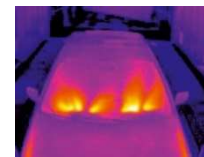
L'étude des phénomènes physico-chimiques intervenant sur les disques de freins lors du freinage est destinée à améliorer la connaissance et la maîtrise de ce freinage selon les constituants des plaquettes de frein. Ces études sont menées sur des bancs d'essais et sont d'interprétations complexes (thermique,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



Inspection des freins



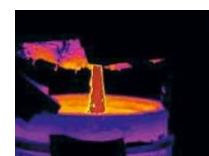
Inspection de siège chauffant



Inspection de l'air conditionné

5.3.5 Métallurgie, traitements thermiques, 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.).



Acier Brut

Les études comme les traitements de surface (métallurgie fine), la découpe et la soudure des matériaux conduisent préférentiellement à utiliser des caméras SW ou visible 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.

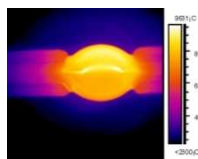
5.3.6 Industrie du verre.

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 (ustensiles ménagers, ampoules d'éclairage...).

Les problèmes de mesure sont divers :

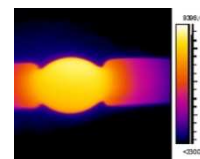
- mesure de température du verre, à haute température ;
- mesure dans des ambiances et environnements difficiles et à température élevée
- mesure sur des événements rapides (ouverture de moules...).

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



Verre

Verre observé en transparence à la longueur d'onde de 3,4 μm .



Verre à 5,1 μm *Observation de la température à la surface d'un objet en verre, au travers d'un filtre verre, à la longueur d'onde de 5,1 μm*

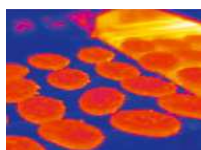
5.3.7 Électroménager et industries agroalimentaires

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.



Industrie agro-alimentaire

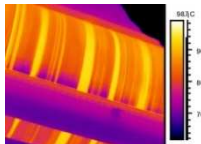


Soudure à chaud

Dans l'emballage des produits alimentaires, de nombreux contenants sont fermés par un procédé de soudure à chaud. Dans le cas des cartons de lait.

5.3.8 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.



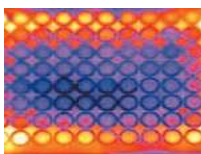
Procédé en papeterie

Image thermique d'un procédé en papeterie. De la moisissure apparaît clairement sur l'image.

5.3.9 Médical et pharmaceutique

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

Les 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.



Industrie Pharmaceutique

5.3.10 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.

On distingue l'inspection et la surveillance (bien que ce terme porte désormais à confusion avec l'imagerie thermique). 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. L'appareil de mesure est alors installé à poste fixe et équipé d'une électronique de seuillage et d'alarme.

5.3.11 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...

5.3.12 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.



Mécanique
Roulements défectueux

5.3.13 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.

6. Les types de contrôles par camera thermiques

6.1 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.

6.2 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.

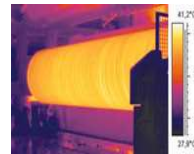
Ces contrôles sont assurés par des opérateurs de terrain ou, pour certains d'entre eux, par des appareillages à poste fixe.

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.



Une différence de température

Une différence de température à la surface d'un objet constitue souvent une indication importante pour le contrôle qualité.



Rouleau sécheur

Contrôle de l'uniformité en température.

6.3 Contrôle des procédés.

Le procédé est l'ensemble des opérations successives que subit un produit pour, d'un état initial, être transformé en un produit final dont la qualité dépend de nombreux paramètres intervenant au cours des opérations. Dans le cas général, la température est un paramètre primordial.

6.4 Vérification de procédé

La vérification de procédé met en œuvre les caméras en tant qu'instrument de mesure destiné à informer sur la stabilité ou l'évolution favorable du procédé.

La caméra thermique permettra :

- ✓ de vérifier que les températures nécessaires au procédé sont effectivement atteintes et maintenues ;
- ✓ d'améliorer la qualité des produits ;
- ✓ de diminuer les périodes de réglages et d'ajustages en réduisant ainsi les quantités rebutées ;

- ✓ d'économiser l'énergie en maîtrisant les consommations et en appliquant les actions correctives adéquates, à chacune des phases du procédé, pour diminuer les coûts de fabrication, d'exploitation et d'entretien.

(Exemple: l'enrobage de déchets radioactifs par du bitume ou du verre en fusion; le couchage de plastique sur carton; le calandrage de papier; le soudage; le réchauffage de rives en sidérurgie...).

7. Conclusion

Nous n'avons pas pu être exhaustifs. Il existe bon nombre d'autres applications non évoquées dans ce projet.

Sous l'angle principal du système de mesure par infrarouge que nous avons considéré tout au long de notre projet, la thermographie est une technique complexe d'instrumentation. Les caractéristiques sont nombreuses et interdépendantes : elles définissent des *limites d'exploitation* en fonction du domaine d'activités.

La thermographie est une **technique pluridisciplinaire**. L'opérateur joue un rôle primordial avec ses propres *limites*. Bien maîtriser la technique demande plus de deux années de pratique à temps plein, et avec les capacités de base suffisantes.

La thermographie 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.

L'utilisateur consultera avec intérêt les ouvrages français d'imagerie thermique ainsi que les ouvrages de mesure thermographique, afin de bien utiliser une caméra infrarouge.

Bibliographie

Ouvrages

PAJANI (D.) et AUDAIRE (L.). . Thermographie. Technologies et applications [R 2 741], traité Mesures et Contrôle, 2001.

MEYZONNETTE (J.-L.) et RUNCIMAN (H.). . Radiométrie et sources non cohérentes. [E 4 010], traité Électronique, 1995.

HUETZ-AUBERT (M.). . Rayonnement thermique des matériaux opaques. [A 1 520], traité Génie énergétique, 1992.

PETIT (A.). . Théorie des spectres atomiques. [P 2 655], traité Analyse et Caractérisation, 1999.

DALIBART (M.) et SERVANT (L.). . Spectroscopie dans l'infrarouge. [P 2 845], traité Analyse et Caractérisation, 2000.

DANA (G.). . Constantes des spectres infrarouges. [K 1 010], traité Constantes physico-chimiques, 1999.

MICHERON (F.), MEYZONNETTE (J.-L.), POCHOLLE (J.-P.) et

GAUSSORGUES (G.). . Détecteurs infrarouges. [E 4 060], traité Électronique, 1996.

MEYZONNETTE (J.-L.). . Conception de systèmes optroniques. [E 4 075], traité Électronique, 1998.

GAUSSORGUES (G.). . Caractérisation des systèmes infrarouges. [E 4 080], traité Électronique, 1997.

Site Internet :

Cedip infrared

Infratec

Flir système

Mesures .com

Raytek

Landinst.com

Locadif.fr

Directindustriy.fr