

## Caméras thermographiques :

La caméra infrarouge permet de mettre en évidence la partie du spectre électromagnétique de 2 à 14  $\mu\text{m}$ , invisible à l'œil mais porteur de la chaleur rayonnée ressentie par la peau. La caméra d'aujourd'hui, de faibles dimensions, très maniable, ne peut exister que grâce aux développements de l'électronique et de rétines spécialement sensibles aux infrarouges de ces dernières décennies. La thermographie est donc sortie d'un anonymat réservé auparavant aux applications militaires ou astronomiques. La caméra thermographique est devenue un outil de diagnostic incontournable de la maintenance prédictive, dans la recherche et la mise au point de produits, car la plupart des défauts constatés sur des machines se traduisent par des échauffements ou des refroidissements anormaux.



Caméra Flir pour la maintenance.

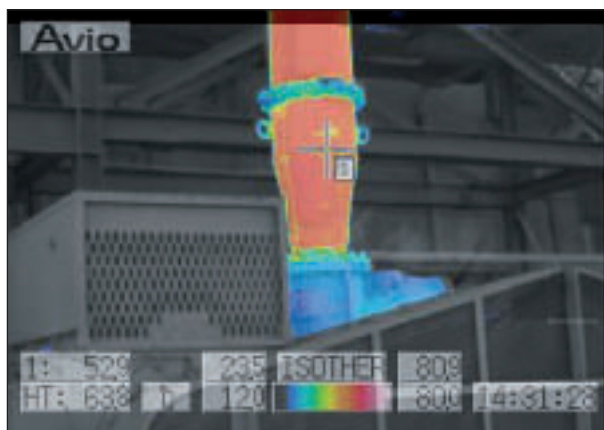
### Une structure classique mais une rétine spéciale

Les premières caméras, les plus performantes, étaient équipées d'un capteur matriciel dont la technique reposait sur des effets quantiques dans des matériaux semi-conducteurs particuliers dont la métallurgie d'élaboration était spécifique. Mais ces composants qui, de par leur nature sont sensibles à la génération thermique, doivent être refroidis à l'azote liquide (77 K) ou par une machine à cycle Stirling, ce qui ne rendait pas la caméra très facile à manipuler. Le coût était dissuasif pour un usage industriel, pour lequel les performances extrêmement élevées n'étaient pas nécessaires. Les applications se limitaient donc aux domaines militaires et scientifiques.

L'usage industriel s'est développé avec l'apparition de rétines (imageurs) infrarouges non refroidies, associées à des optiques aux lentilles au germanium laissant passer l'infrarouge. Le français Sofradir, qui figure parmi les leaders mondiaux de l'infrarouge refroidi, a créé avec le Légi un laboratoire commun qui développe, aujourd'hui, la troisième génération d'imageurs : des matrices bi-spectrales de la classe 320 x 256 pixels, avec des pas de seulement 25  $\mu\text{m}$ . Le laboratoire utilise le matériau HgCdTe

### L'infrarouge reconnu il y a 200 ans

Le corps humain possède deux types de perception électromagnétique qui sont la lumière par l'œil et la température par la sensibilité cutanée. La richesse de ce que l'on voit a fait que les développements pour capter les images se sont rapidement développés à partir de la photographie au XIX<sup>e</sup> siècle. Le rayonnement infrarouge, lui, bien qu'intuitivement perceptible par la peau exposée à la chaleur émise par une source chaude dans le noir, fut prouvé en 1800 par William Herschel, un astronome anglais, au moyen d'une expérience très simple : Herschel a eu l'idée de placer un thermomètre à mercure dans le spectre obtenu par un prisme de verre afin de mesurer la chaleur propre à chaque couleur. Le thermomètre indique que la chaleur reçue est la plus forte du côté du rouge du spectre, et même au-delà de la zone de lumière visible, là où il n'y a plus de sensations perçues par l'œil.



Fusion image thermique et visuelle chez Lot Oriel.

pour la fabrication des imageurs à microbolomètres. Non refroidis, ces derniers présentent des rapports coût/performance qui leur ouvrent les marchés civils de masse. Ulis, société essaimée du Légi, les fabrique à l'échelle industrielle et développe de nouvelles générations de bolomètres dans le cadre d'un laboratoire commun. Ils s'appuient sur le principe de la détection thermique du rayonnement infrarouge incident. La détection du flux IR est réalisée par la mesure de l'élévation de température produite par l'absorption de l'énergie incidente. Ces capteurs sont fabriqués plus facilement que les imageurs refroidis, car ils sont entièrement réalisés en silicium amorphe et peuvent donc être fabriqués avec les techniques de la microélectronique silicium des circuits intégrés classiques, à faibles coûts de fabrication et très haute fiabilité. La troisième génération de microbolomètres d'Ulis est constituée de rétines hautes performances et haute résolution de 640 x 480 pixels au pas de 25  $\mu\text{m}$ . Ces microbolomètres standard au silicium amorphe permettent aujourd'hui d'atteindre un NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) ou DTEB (Différence de température équivalente au bruit) de l'ordre de 30 mK. C'est le bruit superposé au signal sur des scènes thermiques généralement à 30 °C.

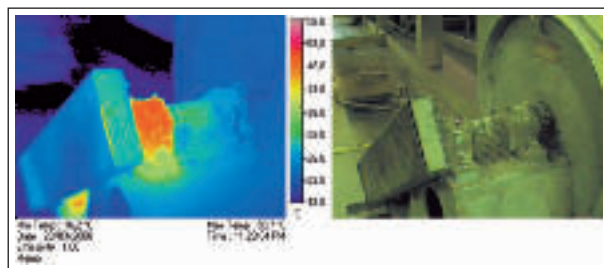


Image réalisée avec la caméra NECTH780040, commercialisée par Impac.

### Des applications multiples

Le spectre d'utilisation des caméras thermographiques est très large pour peu que l'on sache analyser correctement l'image que l'on capte. Les domaines d'utilisation les plus courants sont ceux de l'électricité, de la mécanique et du bâtiment. Généralement, les caméras y sont utilisées pour l'inspection, la maintenance prédictive et comme outil de diagnostic.

Les systèmes de thermographie infrarouge sont couramment utilisés pour l'inspection d'installations électriques. Les problèmes de connexions électriques, à l'origine de pannes ou de dysfonctionnements, sont dus à une augmentation de résistance qui entraîne une élévation de la température. L'absence de contrôle des points d'échauffement peut conduire à des élévations anormales de la température, avec risque d'endommagement ou d'incendie. Les caméras IR sont également efficaces pour le contrôle rapide de moteurs, de disjoncteurs, de transformateurs, de toute installation électrique basse, moyenne et haute tension, l'opération à distance offrant un avantage majeur dans le cas d'installation sous tension. Par

ailleurs, le balayage rapide des installations permet de sauvegarder les diverses images et de les analyser par la suite sur ordinateur.

En mécanique, la contrôle des installations constitue une partie importante des opérations de maintenance prédictive, dans la plupart des entreprises industrielles. L'usure d'une pièce mécanique conduit le plus souvent à une élévation de la température. Ainsi, les moteurs, les paliers, les poulies de convoyeurs... peuvent être contrôlés plus rapidement par thermographie infrarouge qu'avec d'autres types de mesures vibratoires. Par contre, les défauts, sur des balais de collecteurs et d'armatures de moteurs électriques, qui peuvent entraîner des échauffements importants mais pas de vibrations, ne sont perceptibles que par la thermographie.

Dans le bâtiment, la caméra infrarouge est un outil de diagnostic. Les problèmes d'isolation sur les toitures sont facilement détectés, l'eau conservant plus longtemps la chaleur du soleil que les matériaux de la toiture. La détection de fuite de gaz, de vapeur, le contrôle du niveau de corrosion des conduites peuvent être également abordés par la caméra thermographique.

### Choisir

La caméra infrarouge est un capteur qui reçoit le rayonnement émis naturellement par les objets qui nous entourent. Le flux reçu est proportionnel à la puissance quatrième de la température de l'objet et son spectre d'émission varie avec cette température. Il faut noter qu'un corps chaud dans l'environnement proche peut perturber la mesure, et l'opérateur doit avoir une bonne expérience pour une utilisation correcte de cet outil ! Certains fabricants offrent des formations adaptées à leurs produits.

Il y a au moins deux types de caractéristiques importantes à considérer, celles métrologiques et celles optiques. Les caractéristiques métrologiques concernent la réponse spectrale, la discrimination spatiale, la discrimination thermique et la fréquence image. La réponse spectrale est principalement comprise entre 8 et 14  $\mu\text{m}$  pour les caméras ondes longues et 2 et 5  $\mu\text{m}$  pour celles ondes courtes. Plus la température s'élève, plus les longueurs d'ondes diminuent. Dans des cas particuliers de hautes températures, les caméras ondes courtes s'imposent. Pour les objets à température ambiante ayant une radiation maximum à 10  $\mu\text{m}$ , les caméras à ondes longues sont les plus répandues. La discrimination spatiale dépend quant à elle du nombre de pixels de la matrice. Toutes les caméras actuelles utilisent un capteur à plan focal dont la définition est de 160 x 120, 320 x 240 ou 640 x 480 pixels ou plus. Le nombre de pixels de la matrice définit la dimension du plus petit point analysable, et pour une mesure fiable, il faut compter 2 x 2 pixels. La discrimination thermique dépend du seuil de bruit NETD. Elle est améliorée par un moyennage en temps réel des images dont il faut se méfier dans le cas de gradients thermiques rapides ou d'objets en mouvement. Il est nécessaire de savoir si on peut supprimer le moyennage, dans ce cas la fréquence image sera réellement celle spécifiée 50 Hz ou plus.

Cependant la condition d'une inspection correcte repose toujours sur les critères optiques. Pour que l'objet soit dans le champ de la caméra, on définit le FOV (Field of View) pour un objectif donné. Le FOV maximal est l'angle que font deux points aux extrémités diagonales de l'écran avec la position supposée de la caméra. Il permet de connaître la dimension de l'image infrarouge en fonction de la distance entre l'objet et la caméra. Si la caméra est utilisée pour diverses applications, il est donc nécessaire de prévoir un modèle qui permet le changement d'objectif, du grand angle au téléobjectif. La distance minimum de focalisation a aussi son importance pour l'inspection d'objets de petites dimensions. Pour obtenir une mesure convenable, le point à mesurer doit toujours occuper au moins 3 x 3 pixels dans l'objet inspecté.

Jean-Pierre Feste

## voir au-delà du rouge !

Distributeur Fabricants Site Internet	Référence produit	Gamme de mesure de température. Résolution du capteur	Résolution thermique NETD	Refroidie / non refroidie Bande spectrale	Résolution spatiale : FOV (°), IFOV (mrad)	Interfaces	Applications principales, IP	Commentaires
FLIR Systems <a href="http://www.flir.fr">www.flir.fr</a>	InfraCAM SD/BCAM SD	InfraCAM SD: -10 °C à 350 °C BCAM SD: -20 °C à 100 °C	InfraCAM SD : 0,12 °C BCAM SD : 0,1 °C	Non refroidie/ 7,5-13 µm	25° x 25°	USB Carte SD	InfraCAM SD : Electrique, mécanique BCAM SD : Bâtiment	550 g
FLIR Systems <a href="http://www.flir.fr">www.flir.fr</a>	ThermaCAM Série T/B	Série T: -20 °C à 350 °C en 2 gammes (jusqu'à 1 200 °C en option) Série B : -20 °C à 120 °C (jusqu'à 350 °C en option)	Suivant version : 0,1 °C 0,08 °C 0,07 °C 0,06 °C 0,05 °C	Non refroidie/ 7,5-13 µm	25° x 19°	USB Vidéo PAL/NTSC Carte SD	Série T : Electrique, mécanique Série B : Bâtiment	Module visible (1,3 Mpixels) 880 g
FLIR Systems <a href="http://www.flir.fr">www.flir.fr</a>	FLIR P660	-40 °C à 500 °C (jusqu'à 2 000 °C en option)	0,045 °C	Non refroidie/ 7,5-13 µm	24° x 18°	USB Wireless IrDA Carte SD	Electrique, Mécanique, Bâtiment, R&D...	Module visible (3,2 Mpixels)
FLUKE <a href="http://www.fluke.com">www.fluke.com</a>	Ti50FT	-20 °C à 350 °C; 320 x 240 pixels	0,07 °C-30 °C	non refroidie / 8 à 14 µm	23° x 17° ; 1,3 mrad	USB, via lecteur de Compact Flash	Maintenance industrielle	
HAWK-IR <a href="http://www.hawk-ir.com">www.hawk-ir.com</a>	EX/CAM AP	-20 °C à 240 °C, 160 x 120 pixels	0,1 °C à 30 °C	Non refroidie 8 à 14 µm	18° x 13° / 0,3 m 1,9 mrad	USB par station de base	Process, maintenance préventive, Atex, IP67	
IMPAC France NEC <a href="http://www.impactinfrared.fr">www.impactinfrared.fr</a>	TH 9260	-40 °C à +2 000 °C sur 4 plages 640 x 480 pixels	0,06 °C à 60 Hz	Non refroidie 8 à 14 µm	0,6 mrad	IEEE 1394, RS 232 Vidéo	R&D, Process Tertiaire Bâtiments IP 54	
IMPAC France NEC <a href="http://www.impactinfrared.fr">www.impactinfrared.fr</a>	TH 9100 MR / WR	-40 °C à +2 000 °C sur 4 plages 320 X 240 pixels	0,02 °C à 60 Hz	Non refroidie 8 à 14 µm	1,2 mrad	IEEE 1394, RS 232 Vidéo	R&D, Process Tertiaire Expertise Bâtiments IP 54	Boîtier en acier inoxydable, pressurisé par gaz neutre
IMPAC France NEC <a href="http://www.impactinfrared.fr">www.impactinfrared.fr</a>	TH 7800	-40 °C à +1000 °C sur 4 plages 320 X 240 pixels	0,02 °C à 60 Hz	Non refroidie 8 à 14 µm	1,5 mrad	USB 2.0 Vidéo	Maintenance préventive électrique et mécanique IP 54	Enregistrement en temps réel. Fusion images thermiques et visuelles Fonctions mesure
InfraTec / Jenoptik I.o.s. / <a href="http://www.InfraTec.net">www.InfraTec.net</a>	VarioCAM hr basic	-40 °C à 1 200 °C (option 2 000 °C), détecteur 320 x 240 pixels	80 mK - 30 °C (50 mK en mode premium)	Non refroidie 7,5 à 14 µm	Objectif standard 25° x 19° / IFOV = 1,4 mrad	Vidéo, RS232, FireWire, WiFi	Process, Maintenance, Bâtiment, R&D... protection IP 54	Fréquence d'images 50/60 Hz, codage A/D 16 bit, objectifs interchangeables
InfraTec / Jenoptik I.o.s. / <a href="http://www.InfraTec.net">www.InfraTec.net</a>	VarioCAM hr inspect	-40 °C à 1 200 °C (option 2 000 °C), détecteur 384 x 288 pixels (option 768 x 576 pixels)	80 mK - 30 °C (50 mK en mode premium)	Non refroidie 7,5 à 14 µm	Objectif standard 30° x 23° / IFOV = 1,4 mrad ou 25° x 19°/ IFOV = 1,2 mrad	Vidéo, RS232, FireWire, WiFi	Industries process, Maintenance Bâtiment, R&D... protection IP 54	Fréquence d'images 50/60 Hz, codage A/D 16 bit, objectifs interchangeables
LOT-Oriel Nippon Avionics <a href="http://www.lot-oriel.com">www.lot-oriel.com</a>	TVS-500EXZ	-40 °C à 500 °C (2 000 °C en option) 320 x 240	Mieux que 0,1 °C	NR 8-14 µm	0,59 à 2,35 mrad	RS232, USB, IEEE1394	Générales IP54	Enregistrement en temps réel Fusion images thermiques et visuelles
LOT-Oriel Nippon Avionics <a href="http://www.lot-oriel.com">www.lot-oriel.com</a>	TVS-200EX	-40 °C à 500 °C (2 000 °C en option) 320 x 240	Mieux que 0,08 °C	NR 8-14 µm	30,6° x 23,1° (avec 14 mm) 1,68 mrad	RS232, IEEE1394	Générales IP54	ZOOM 10-40 Image visible Transfert temps réel
Optophase <a href="http://www.optophase.com">www.optophase.com</a>	TP8	-20 °C à 800 °C (2000 °C en option) 384 x 288 pixels	80 mK	Non refroidie - 8 - 12 µm	22° x 16° 0,99 mrad	Vidéo, RS232, USB 2.0	DTE, maintenance préventive	5 obj. Au choix. Image visible Transfert temps réel
Optophase <a href="http://www.optophase.com">www.optophase.com</a>	IR928	-20 °C à 500 °C (800 °C en option) 320 x 240 pixels	80 mK	Non refroidie - 8 - 12 µm	21° x 15° 1,14 mrad	Vidéo, RS232, USB 2.0	DTE, maintenance préventive	4 obj. Au choix. Image visible Transfert temps réel
Photon Lines Devitech <a href="http://www.optophase.com">www.optophase.com</a>	IR-011	-35 °C à +65 °C 384 x 288 pixels	< 50 mK (300 K scène, f/1, 50 Hz)	Non refroidie 8-14 µm	Selon optique	RS170/CCIR Ethernet 10/100	Sécurité Sciences Industrie	Bon rapport qualité/prix
Photon Lines Devitech <a href="http://www.optophase.com">www.optophase.com</a>	IR-031	-35 °C à +65 °C 640 x 480 pixels	< 50 mK (300 K scène, f/1, 50 Hz)	Non refroidie 8 à 14 µm	Selon optique	RS170/CCIR Ethernet 10/100	Sécurité Sciences Industrie	Bon rapport qualité/prix
Testo <a href="http://www.testo.fr">www.testo.fr</a>	0563 880 V2	-20 °C à +100 °C et 0 °C à 350 °C (commutable) 160 x 120 Pixels	0,1 °C	Non refroidi 8 à 14 µm	Grand angle 32° x 24°, 3,5 mrad Téléobjectif	USB	Maintenance préventive Bâtiment IP54	
Testo <a href="http://www.testo.fr">www.testo.fr</a>	0563 880 V3	-20 °C à +100 °C et 0 °C à 350 °C (commutable) 160 x 120 Pixels	0,1 °C	Non refroidi 8 à 14 µm	Grand angle 32° x 24°, 3,5 mrad Téléobjectif	USB	Maintenance préventive Bâtiment IP54	