



HAL
open science

Caractérisation des caméras de thermographie

Olivier Riou, Vincent Tortel, Jean-Felix Durastanti

► **To cite this version:**

Olivier Riou, Vincent Tortel, Jean-Felix Durastanti. Caractérisation des caméras de thermographie. THERMOGRAM' 2007, Dec 2007, CHALONS EN CHAMPAGNE, France. hal-04135417

HAL Id: hal-04135417

<https://hal.u-pec.fr/hal-04135417v1>

Submitted on 20 Jun 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

JOURNEES D'ÉTUDES

THERMOGRAM' 2007

THERMOGRAPHIE INSTRUMENTALE ET INDUSTRIELLE

**CENTRE D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE DE L'ENSAM DE CHALONS EN
CHAMPAGNE, 13 ET 14 DECEMBRE 2007**

CARACTERISATION DES CAMERAS DE THERMOGRAPHIE

Olivier RIOU, Vincent TORTEL, Jean Félix DURASTANTI

Maître de Conférences Energétique et Génie des Systèmes
Centre d'études et de recherche de thermique et d'environnement des systèmes (CERTES)
Université Paris XII
IUT de Sénart
Avenue Pierre Point
77127 Lieusaint
olivier.riou@univ-paris12.fr

Résumé. La présente publication répond au besoin de caractérisation des caméras thermiques à matrices. Elle dresse l'état actuel des méthodes de caractérisation des systèmes de thermographie et elle pose les limites de ces méthodes à la caractérisation des caméras thermiques à matrice. Elle propose enfin une évolution des méthodes de caractérisation des caméras de mesure thermographique basée sur la résolution spatiale, la résolution thermique et sur l'exactitude en température. Un échantillonnage de caméras commerciales est présenté et leurs performances sont comparées.

1 - GENERALITES SUR LA CHAINE DE MESURE ET D'IMAGERIE MISE EN ŒUVRE DANS UNE CAMERA DE THERMOGRAPHIE

La dernière décennie a vu se développer une nouvelle technologie d'imageurs thermiques sur la base de matrices de détecteurs infrarouges. La technologie FPA (pour « focal plane array ») associe une matrice de détecteurs à une électronique de détection et d'adressage. L'intégration de détecteurs en matrice limite l'accès au thermosignal et, dès lors, interdit le contrôle des caractéristiques de base des détecteurs (signal et bruit des détecteurs, détectivité). A quelques exceptions près, le temps d'intégration est rarement modifiable sur les caméras matricielles. Seule la thermoréponse reste accessible par un opérateur de thermographie. Il en résulte quelques limitations majeures à l'application stricte des méthodes de caractérisation des systèmes de thermographie pour des caméras matricielles. C'est pourquoi nous avons repensé une méthode de caractérisation des caméras en considérant le détecteur et son électronique (polarisation, temps d'intégration et lecture) comme une unité fonctionnelle nommée point élémentaire (PEL).

Un PEL utilise à la base un détecteur infrarouge qui transforme le flux en signal électrique (thermosignal) par conversion photon - électron (exemple : détecteur photovoltaïque, QWIP) ou par échauffement (exemple : détecteur bolométrique). Le thermosignal prend la forme d'une tension ou d'un courant suivant la technologie de lecture. Sous sa forme en courant, le thermosignal est dirigé vers une capacité électrique. La thermoréponse est alors la lecture numérique du niveau de charges stockées pendant le temps d'intégration. Dans l'étape de lecture, chaque thermoréponse est convertie en donnée numérique. Elle est ensuite corrigée des problèmes de détecteurs « aveugles », de non uniformité (problèmes spécifiques aux matrices de détecteurs) et de dérive thermique. Ces corrections aboutissent à la fourniture d'un niveau radiométrique métrologiquement « propre », parfois accessible sur certaines caméras ou logiciels de post-traitement. Enfin, la transcription niveau-température est réalisée grâce à la courbe d'étalonnage de la caméra. La température obtenue (température apparente) se réfère à un émetteur parfait type corps noir. On affecte alors au point élémentaire image, ou PIXEL, correspondant au PEL, un niveau radiométrique (carte de luminance) ou une température apparente (carte de températures ou thermogramme). En principe, l'affectation est dans un rapport 1 : 1 (1 PEL fournit 1 PIXEL). Ce n'est pas une généralité : certains logiciels d'exploitation des caméras travaillent en format CGA (320×240 PIXELS) alors que la caméra dispose de 160×120 PEL (rapport 1 :4). Dès lors, on peut supputer un grand nombre de traitements propres à l'imagerie pour améliorer le rendu des thermogrammes.

2 - IMAGEUR ET RADIOMETRE

Nous classons usuellement les caractéristiques des systèmes de thermographie dans deux espaces distincts, l'espace de l'imagerie et l'espace de la mesure radiométrique ^[1].

En imagerie, il s'agit généralement d'une simple visualisation de la distribution des températures des objets. Dans ce cas, le système fournit une image représentant les écarts de température apparente. Il s'impose que l'observation est d'autant plus intéressante que le système est capable de discriminer de faibles écarts de température. Nous voyons apparaître la notion de résolution thermique. Il faut encore ajouter deux autres critères très importants : la résolution spatiale et la température équivalente au bruit (NETD). La résolution spatiale définit le plus petit détail objet séparable par le système et la NETD représente la variation minimale de température pour que le signal correspondant varie au moins d'une quantité égale à son bruit propre.

Lorsqu'il s'agit de mettre en œuvre une évaluation quantitative des températures, le système utilisé doit de plus satisfaire à tous les critères généraux de métrologie : exactitude, proportionnalité, fidélité, fiabilité... Il existe alors une correspondance unique entre la thermoréponse délivrée par le

système et la température apparente de l'objet. Bien sûr, il existe bien d'autres critères utilisables dans la caractérisation des systèmes de thermographie, telle que la réponse spectrale qui définit les longueurs d'onde de fonctionnement mais il apparaît très vite une relation étroite entre chaque critère spécifique et les critères généraux de métrologie.

Nous rappelons sur le tableau 1 les critères fondamentaux caractérisant les imageurs thermiques d'une part et les systèmes de mesure d'autre part ^[2]. Chaque terme de ce tableau est défini dans le chapitre suivant.

Tableau 1. Critères fondamentaux caractérisant les imageurs thermiques et les systèmes de mesure	
Imageurs thermiques	Systèmes de mesure
FTM	SRF
MRTD	NETD
Uniformité	Dérive
Distorsion	uniformité

Nous verrons que, parmi les critères fondamentaux et hormis l'uniformité de la thermoréponse, aucun de ceux utilisés dans une catégorie n'a d'équivalent strict au sens de la norme dans l'autre. Nous ne pouvons pas appliquer les critères de caractérisation des imageurs aux systèmes de mesure et réciproquement dans le but de faire la comparaison entre plusieurs équipements.

3 - ETAT DE L'ART

Nous présentons, sur le tableau 2, les termes usuels de spécification des systèmes de thermographie, sur le tableau 3, les normes utilisées pour les méthodes d'évaluation des systèmes de thermographie. Ce travail est issu d'une relecture des normes disponibles (Thermographie infrarouge : caractérisation de l'appareillage, NF A 09-420 et méthodes de caractérisation de l'appareillage, NF A 09-421).

Tableau 2. Termes usuels de spécification des systèmes de thermographie				
Caractéristiques	Définition	Désignation	Unité	Norme
Champ de vue	Ouverture angulaire de l'optique (champ de vue horizontal HFOV et vertical VFOV)	FOV	degré	NF A 09-400
Champ de vue instantané	Notion purement géométrique : IFOV=FOV/ nombre de détecteurs (pour les caméras à matrice)	IFOV	mrad	NF A 09-400
Nombre de détecteurs	Pour les caméras à matrices plan focal	m (colonnes) × n (lignes)		
Taille image	Nombre de points images aux formats standard d'imagerie (colonnes × lignes)	CGA 320×240 VGA 640×480 SVGA 800×600 XGA 1024×748 SXGA 1280×1024 UXGA 1600×1200	Pixel	
Configuration de caméra	La configuration est définie par un ensemble de « réglages » de la caméra (objectif, ouverture, filtre, temps d'intégration). Chaque configuration fait l'objet d'un étalonnage spécifique			

Tableau 3. Normes pour les méthodes d'évaluation des systèmes de thermographie				
Espace imagerie	Méthodes d'évaluation	Désig.	Norme ³	Caractéristiques déduites
	<i>Fonction d'étalement de ligne (line spread function)</i>	FEL - LSF	NF A 09-421	Angle élémentaire limite Fonction de transfert de modulation
	<i>Fonction de transfert de contraste</i>	FTC	NF A 09-421	Angle élémentaire d'observation à n%
	<i>Fonction de transfert géométrique</i>	FTG	NF A 09-421	Angle d'observation suivant les balayages trame et ligne
	<i>Fonction de transfert de modulation (Transformée de Fourier de la Fonction d'Etalement de Ligne)</i>	FTM	NF A 09-421	Pouvoir de résolution spatial limite (PRSL) et Pouvoir de résolution spatiale d'observation (PRSO)
<i>Ecart Minimum De Température Séparable (Minimum Resolvable Temperature Difference)</i>	MTDR	NF A 09-421	Caractéristique subjective et sa détermination est facultative.	
Espace de la mesure	<i>Réponse spectrale relative</i>	RSR	NF A 09-421	Longueur d'onde au maximum de la réponse spectrale (λ_{pic}) : Bande spectrale [λ_1, λ_2] définie à 5% du maximum d'amplitude
	<i>Courbe d'étalonnage</i>		NF A 09-421	Calibres et étendue de mesure Sensibilité moyenne et différentielle Stabilité de la courbe d'étalonnage (Temps de stabilisation, Dérive temporelle, Influence de la température ambiante)
	<i>Résolution thermique</i>		NF A 09-421	NETD – DTEB. Rapport de la valeur efficace du bruit par la sensibilité différentielle au point de fonctionnement considéré
	<i>Fonction de réponse à une fente (Slit Response function)</i>	FRF - SRF	NF A 09-421	Pouvoir de résolution spatiale de mesure (PRSM)

4 - DISCUSSION

La notion de résolution spatiale diffère selon l'espace considéré : c'est pourquoi l'on parle des résolutions, le Pouvoir de Résolution Spatiale d'Observation (PRSO) et le Pouvoir de Résolution Spatiale de Mesure ou PRSM. L'usage est de définir le PRSO par le nombre de détecteurs de la matrice ou IFOV. Le PRSM est basé exclusivement sur la considération de résolution spatiale (angle élémentaire défini par FRF égale à 95%) et ne garantit rien d'autre qu'un pourcentage de variation de luminance.

La résolution thermique est toujours décrite par la NETD (bien que cette dernière appartenant à l'espace de la mesure soit employée ici dans sa définition imagerie...). Pour son évaluation, la norme suppose l'accès au thermosignal individuel que les caméras matricielles ne fournissent pas. C'est pourquoi en pratique elle est définie statistiquement à partir de l'écart type des thermoréponses des différents PELs à un instant donné (bruit temporel augmenté du bruit spatial fixe) au lieu d'être définie par le seul bruit temporel sur chaque PEL. Sa détermination ne peut pas respecter la norme écrite pour les caméras à mono détecteurs. Il serait nécessaire de l'adapter.

5 - CARACTERISATION SPECIFIQUE AUX CAMERAS MATRICIELLES

Pour la caractérisation des caméras matricielles, nous avons retenu trois axes : la résolution spatiale, la résolution thermique et l'exactitude de mesure. La notion d'exactitude est ici à prendre au sens restreint : elle doit se définir en dehors du temps de stabilisation de la caméra et doit tenir compte des dérives temporelles, des non uniformités de la réponse et de l'influence de la température ambiante (ce qui est inclus dans la dérive). Une maquette de caractérisation des caméras matricielles est présentée sur le tableau 4.

Tableau 4. Caractérisation des caméras thermiques à matrice

	Caractéristiques	Définition	Désignation	Unité	Norme [4]
Espace de l'imagerie	<i>Pouvoir de résolution spatiale d'observation</i>	On utilise surtout l'angle élémentaire $PRSO = FOV / \alpha_{50}$ α_{50} défini à $FRF=0,50$ ou égal à l'angle d'IFOV vu par un détecteur. Représente le nombre de points élémentaires en ligne ou colonne	PRSO	mrad	NF A 09-421
	<i>Résolution thermique</i>	Rapport de la valeur efficace du bruit par la sensibilité différentielle au point de fonctionnement considéré	NETD après NUC	°C	non normalisée
	<i>Angle de mesure d/D</i>	Angle d'observation défini par exemple à $\pm 2^\circ\text{C}$ de la température de fente en tenant compte des températures de cible et de fond (températures définies au paragraphe 8)	–	mrad	Non normalisé
Espace de la mesure	<i>Influence de la température ambiante</i>	Variation due la température radiométrique de corps noir en fonction de la température ambiante	–	–	NF A 09-421

6 - UNIFORMITE DE LA REPONSE DES CAMERAS MATRICIELLES

La caméra à matrice, comportant un grand nombre de détecteurs, présente un problème spécifique d'uniformité de réponse dans l'image thermique. On caractérise cette non uniformité par le bruit spatial fixe. Dans la mesure où la caméra est stable et fidèle, le bruit spatial fixe est en principe invariant dans le temps et peut être corrigé. La procédure de NUC présentée dans la suite est basée sur l'algorithme de Schulz qui suppose à priori la linéarité de la thermoréponse avec le flux incident. L'intérêt d'un tel algorithme est de permettre avec rapidité tous les traitements relatifs à l'imagerie. La dispersion statistique résiduelle (incluant le bruit temporel des détecteurs et le résidu de bruit spatial fixe après le NUC) est généralement représentée par un écart type autour d'une valeur moyenne que l'on assimile, pour les caméras matricielles, à la NETD. La NETD masque une réalité métrologique. Une fois le bruit spatial fixe supprimé, elle donne un ordre de grandeur statistique du bruit temporel moyen mais ne permet pas de chiffrer la dispersion dans la thermoréponse individuelle des PELs. Après correction de NUC, il n'est pas étonnant de constater des variations d'un PEL à l'autre supérieures à la NETD image. Ces écarts peuvent être amplifiés par des non linéarités de la thermoréponse avec le flux. L'écart peut varier jusqu'à cinq fois la NETD [5].

7 - VERIFICATION DE L'ETALONNAGE

La vérification est réalisée au moyen d'un corps noir de référence dont on consigne la température de test. Pour cette température, on relève les températures moyenne, minimale et maximale, l'écart type sur une zone dont la taille est spécifiée (1/4 matrice, etc...). Le test d'acceptation consiste à comparer la valeur moyenne en température à la température de corps noir : elle doit être comprise dans l'intervalle $\pm 2\sigma$ (incertitude élargie) centré sur la température de test.

8 - RESOLUTION SPATIALE ET EXACTITUDE EN TEMPERATURE

Les notions de résolution spatiale et d'exactitude en température sont indissociables. L'exactitude en température peut être évaluée à partir de la Fonction de Réponse à une Fente qui est une forme normée de la réponse de la caméra thermique lorsque celle-ci observe une fente thermique (ou un fil chaud) sur un fond froid. Les lèvres de la fente (ou le fond sur lequel se trouve le fil chaud) présentent le rayonnement L_0 ; le fil ou le corps derrière la fente, le rayonnement L_1 supérieur à L_0 (voir figure 1)

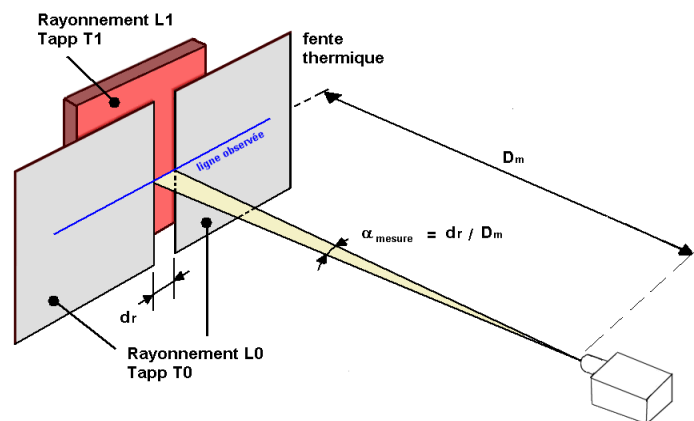


Fig. 1. Fonction de réponse à une fente (figure issue de la référence [6])

Pour chiffrer l'exactitude en température, il faut donner à l'objet une dimension angulaire qui fait correspondre à la SRF une valeur égale à $1-\varepsilon$, ε étant l'erreur consentie dans la mesure. Un écart de $\varepsilon\%$ sur la valeur relative du signal correspond à une erreur systématique en température donnée par la relation :

$$\Delta T = -\frac{\Delta N}{\langle s \rangle}$$

où ΔN est l'écart consenti en niveau sur la SRF et $\langle s \rangle$ en niveaux/ $^{\circ}\text{C}$ est la sensibilité de la caméra sur l'intervalle $[T_1, T_2]$ (T_0 : température de fente, T_1 : température de corps noir. L'erreur systématique ΔT est comptée négative car la température apparente est estimée par défaut (si $T_2 > T_1$). La dimension angulaire correspondant à $1-\varepsilon$ du niveau maximum relatif est appelée pouvoir de résolution spatiale de mesure (PRSM). En situation de prise de vue, la température de corps noir est assimilée à la température de la cible tandis que la température de fente est associée à la température de fond (niveau radiométrique situé derrière la cible). L'erreur systématique ΔT , de même que le PRSM est donnée pour ces températures. Fort heureusement et à quelques exceptions près, les caméras sont linéaires en mesure de rayonnement : elles fournissent un thermosignal proportionnel au rayonnement à mesurer ; ceci signifie que la FRF reste inchangée quelles que soient les températures de fentes et de fond ; on peut donc déduire de cette fonction un réseau de courbes donnant l'erreur systématique à différentes températures de fond et pour différent rapport D/d . Le résultat est montré sur la figure 2 pour une fente verticale placée devant un corps noir à 70°C .

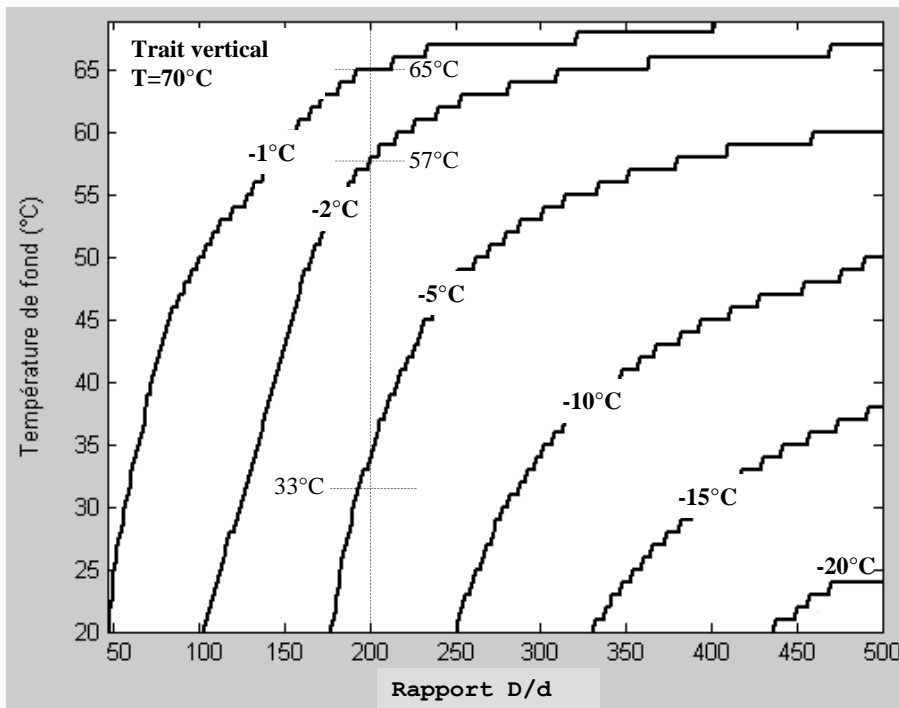


Fig. 2. Erreur systématique donnée pour un fil vertical à 70°C dans un fond radiométrique variant entre 20 et 70°C en fonction de l'ouverture réduite D/d (D : distance d'observation, d : largeur de fil)

Comment lire cet abaque ? Supposons que le fil chaud (à $T_1 = 70^\circ\text{C}$) se présente sur un fond à $T_0 = 20^\circ\text{C}$ et qu'il est vu par la caméra à une distance de 50 cm. Ce fil isolé est un $1,5 \text{ mm}^2$ (diamètre 2,5 mm) : le rapport D/d est ainsi de 200 :1. En situation de température apparente, l'erreur systématique est évaluée entre -5 et -10°C ; elle n'excède pas -2°C à 57°C et vaut au maximum -1°C si la température de fond est supérieure à 65°C. En imagerie, ce problème ne nous préoccupe pas : c'est un problème de mesure et non d'imagerie. La caméra voit très bien le fil, pourvu que celui-ci ait une température apparente différente (toujours supérieure, en pratique) de la température apparente du fond. Ainsi, l'IFOV qui est une notion liée à l'image n'implique rien sur l'exactitude de la mesure. Notons finalement que si le fil est à la même température apparente que le fond, la caméra ne le voit pas mais elle en mesure très bien la température puisque les températures sont spatialement toutes identiques.

9 - ETAT DU MARCHE ET CONCLUSIONS

Un échantillonnage de caméras du commerce a pu être caractérisé au regard des méthodes précédentes. Le résultat est montré sur les tableaux 6 et 7. Les tests utilisent un corps noir cavité Landcal P80 dont l'incertitude standard est indiquée à $\pm 0,1^\circ\text{C}$ de la température de consigne. Sa stabilité est meilleure que 1°C sur 30 min.

9.1. Vérification des caméras

On consigne la température de test à 70°C. A cette température, la stabilité du corps noir est donnée à $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Pour cette température, on relève sur une zone centrée correspondant à 1/4 matrice les températures apparentes moyenne, minimale et maximale et l'écart type. La distance de test est 500 mm. Le test d'acceptation consiste à comparer la valeur moyenne en température à la température de corps noir : elle doit être comprise dans l'intervalle $\pm 2\sigma$ de la distribution, centrée

sur la température de test. Le résultat est montré sur différentes caméras. Il est classé par écart croissant ($\Delta = 70^{\circ}\text{C} - T_{\text{moy}}$).

Numéro de caméra	Tableau 6. Vérification de l'étalonnage					
	T° Corps noir	T moy	delta / 70°C	T min	T max	Ecart type
	°C	°C		°C	°C	°C
N°7	70,0	69,6	-0,4	69,3	69,8	non disponible
N°1	70,0	70,6	0,6	70,0	71,2	non disponible
N°2	70,0	70,6	0,6	69,4	70,9	0,1°C
N°4	70,0	69,1	-0,9	67,8	69,5	non disponible
N°3	70,0	68,8	-1,2	68,3	69,2	non disponible
N°5	70,0	68,5	-1,5	67,8	68,7	non disponible
N°6	70,0	68,3	-1,7	65,6	68,7	non disponible
N°8	70,0	68,2	-1,8	66,8	68,4	non disponible

Que constatons-nous ? Cet échantillonnage démontre l'importance de la vérification de l'étalonnage des caméras : elle doit être un préliminaire à toute caractérisation et la non-conformité doit entraîner un réétalonnage. La notion d'exactitude est ici à prendre au sens strict et ne saurait dépendre de la correction de la dérive en température annoncée par les constructeurs ($\pm 2^{\circ}\text{C}$ de la pour des températures ambiantes généralement entre -20°C et 50°C). Dans cet exemple, comparé à l'exactitude du corps noir, les caméras montrent un écart de température moyenne supérieure à l'exactitude du corps noir. Il est peu probable qu'une fois la caméra ré étalonnée, le résultat soit bien meilleur (sauf pour les caméras très largement au dessus de $0,5^{\circ}\text{C}$).

9.2. Résolution spatiale et exactitude en température

Le test utilise une fente verticale réglable placée devant le corps noir. La distance d'observation des fentes est 500 mm. Pour une dimension fixe de 2,3mm (dimension caractéristique d'un câble électrique de $1,5 \text{ mm}^2$), on relève la température de lèvres, le maximum sur zone en température apparente et l'écart $70^{\circ}\text{C} - T_{\text{max}}$. L'erreur systématique en température est corrigée de l'écart delta constaté lors de la vérification de l'étalonnage. Les dimensions de fente sont exprimées en mm ou en unité d'IFOV. La même opération est refaite en ouvrant les fentes jusqu'à une erreur systématique de -2°C ou -1°C (les erreurs systématiques sont alors indiquées entre parenthèses).

Tableau 7. Test de réponse une fente (fente verticale, température de fente 70°C , D=500 mm)										
Numéro de caméra	IFOV (optique standard)	Taille matrice	Température de lèvres	Ouverture fentes	Max température @2.3mm	DELTA/ 70°C	Erreur	Ouverture fentes	Ouverture fente pour une erreur systématique de (... °C)	Ouverture fentes
unité	mrad	PELs	°C	mm	°C	°C	°C	IFOV	mm	IFOV
N°7	1,20	320X240	23,6	2,3	68,2	-1,8	-1,4	3,8	2,6 (-1°C)	4,3
N°3	0,65	640x480	23,1	2,3	66,8	-3,2	-2,0	7,1	3,5 (-1°C)	10,7
N°4	0,8	640x480	24,1	2,3	66,6	-3,4	-2,5	5,8	3,7 (-1°C)	9,25
N°1	1,30	320X240	25,4	2,3	66,5	-3,5	-4,1	3,5	4,2 (-2°C)	6,5
N°5	1,36	384x288	24,2	2,3	66,0	-4,0	-2,5	3,4	5,0 (-1°C)	7,4
N°6	1,13	384x288	24,4	2,3	66,0	-4,0	-2,3	4,1	2,6 (-2°C)	>8,8
N°8	1,50	320X240	25,6	2,3	65,7	-4,3	-2,5	3,1	>5,0 (-1°C)	3,5
N°2	2,70	160x120	24,8	2,3	61,0	-9,0	-9,6	1,7	3,8 (-2°C)	2,8

Que constatons-nous ? Cet échantillonnage démontre l'indépendance entre la notion de résolution spatiale au sens de la norme (IFOV ou PRSO) et l'exactitude des caméras lorsqu'on mesure des petits objets. Cette dernière dépend de la température de fond (ici identifiée à la température de lèvre) comme nous l'avons souligné dans un paragraphe précédent. D'autre part, il est intéressant de remarquer que la taille des matrices n'améliore pas l'exactitude mais améliore le rendu spatial du thermogramme. Il existe plusieurs limitations fondamentales dans la mesure de petit objet qui ne permet pas d'en mesurer correctement la température.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - DOMINIQUE PAJANI, TECHNOLOGIES ET APPLICATIONS, TECHNIQUES DE L'INGENIEUR R 2 741
- 2 - GILBERT GAUSSORGUES, THERMOGRAPHIE INFRAROUGE (PAGE 409)
- 3 - THERMOGRAPHIE INFRAROUGE : CARACTERISATION DE L'APPAREILLAGE, NF A 09-420 ET METHODES DE CARACTERISATION DE L'APPAREILLAGE, NF A 09-421
- 4 - THERMOGRAPHIE INFRAROUGE : VOCABULAIRE RELATIF A LA CARACTERISATION DE L'APPAREILLAGE, NF A 09-400
- 5 - OLIVIER RIOU, PIERRE BREMOND, CORRECTION DE NON UNIFORMITE (NUC) DES CAMERAS THERMIQUES, THERMOGRAM' 2003
- 6 - DOMINIQUE PAJANI. RESOLUTIONS SPATIALES DES CAMERAS THERMIQUES A MATRICE DE DETECTEURS. THERMOGRAM' 2005.