



HAL
open science

Résolution spatiale et exactitude en température des caméras thermiques à matrice

Olivier Riou

► **To cite this version:**

Olivier Riou. Résolution spatiale et exactitude en température des caméras thermiques à matrice. journées de thermographie Instrumentale & industrielle Thermogram'2005, Oct 2005, Lieusaint, France. hal-04135865

HAL Id: hal-04135865

<https://hal.u-pec.fr/hal-04135865v1>

Submitted on 21 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.

JOURNEES D'ETUDES

THERMOGRAM' 2005

THERMOGRAPHIE INSTRUMENTALE ET INDUSTRIELLE

20 ET 21 OCTOBRE 2005

IUT SENART FONTAINEBLEAU - UNIVERSITE PARIS EST CRETEIL

INSTITUT DE LA THERMOGRAPHIE

Résolution spatiale et exactitude en température des caméras thermiques à matrice

Olivier RIOU

(1) 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.
Courriel : olivierriou@hotmail.com

Résumé. *Le secteur du contrôle thermographique des installations électriques est un grand utilisateur de caméras thermiques. Ce secteur, très concurrentiel, dispose d'une très grande variété de caméras dont le rendu visuel est un atout commercial. Cependant, il ne suffit pas à garantir une mesure exacte de température. C'est dans ce contexte que se pose le choix de la caméra thermique la mieux adaptée. Après avoir présenté les caractéristiques des caméras, nous développerons la notion de résolution spatiale et nous en présenterons les limites en analysant le comportement fin d'un système optique simple (lentille mince). Pour une caméra utilisant une matrice de détecteurs, la tache de diffusion est associée à la réponse impulsionnelle du détecteur. Nous proposerons, dans ce cadre, une méthode d'évaluation de l'incertitude systématique en température basée sur le test de réponse à une fente d'un système de thermographie. La méthode est appliquée à une caméra dans le contexte des inspections électriques.*

1. INTRODUCTION

Le secteur du contrôle thermographique des installations électriques est un grand utilisateur de caméras thermiques. Ce secteur, très concurrentiel, dispose d'une très grande variété de caméras dont le rendu visuel est un atout commercial. Cependant, il ne suffit pas à garantir une mesure exacte de température. C'est dans ce contexte que se pose le choix de la caméra thermique la mieux adaptée.

Parmi les critères de choix, la résolution spatiale et l'exactitude de mesure des caméras sont privilégiées. La résolution spatiale est associée au pouvoir de séparation des caméras thermiques. Il s'agit ici de pouvoir distinguer sur l'objet deux traits voisins sans risque de confusion. L'exactitude de mesure résulte en partie des qualités de métrologies du système, en particulier de sa sensibilité, de son étendue de mesure, de sa reproductibilité et de sa stabilité temporelle. L'autre partie est liée à l'utilisation des caméras par un opérateur de thermographie. Ce dernier se doit en effet de maîtriser sa caméra et la situation de mesure, en particulier, il doit savoir prendre en compte les grandeurs d'influence que sont l'émissivité de l'objet et la température d'environnement.

Nous devons toujours garder en mémoire que L'objet de la mesure est un flux. De part sa nature, il existe un lien étroit entre la résolution spatiale du système (aptitude à le percevoir) et son exactitude de mesure (aptitude à l'évaluer correctement).

CARACTERISTIQUES DES CAMERAS THERMIQUES

Les caméras thermiques associent les fonctions de radiomètre et d'imageur. Nous classons communément leurs caractéristiques dans deux espaces distincts, l'espace de l'imagerie et l'espace de la mesure thermique. Les deux espaces superposés réunissent les caractéristiques des caméras¹.

Rappelons-en les principales distinctions. L'imageur thermique a pour vocation de présenter sur un écran des images thermiques de bonne qualité, au standard vidéo et pour des scènes aux températures ordinaires. Ces imageurs sont principalement caractérisés en termes de « résolution » thermique, spatiale et temporelle. Il n'a pas la prétention ni les capacités à quantifier ces images en carte de luminance ou à les transcrire en température. Ces fonctions sont dédiées au radiomètre. Un radiomètre est conçu pour la mesure de flux ou de températures quelconques, non plus seulement aux températures ordinaires. Les radiomètres satisfont aux critères généraux de métrologie : sensibilité, d'étendue de mesure, exactitude de mesure et stabilité temporelle, etc... Il existe alors une correspondance unique entre le photosegnal délivré par le système et la température apparente de l'objet.

Nous pouvons rappeler sur le tableau 1, les caractéristiques des caméras thermiques et leurs méthodes de détermination selon la norme NF A09 420².

La notion récente de « Spot Measurement Size »^{3,4} est à rapprocher du pouvoir de résolution spatiale de mesure (PRSM).

2. RESOLUTION SPATIALE

Comme pour tout système optique, la résolution spatiale est associée à son pouvoir de séparation. Il s'agit ici de pouvoir distinguer deux traits voisins sans risque de confusion. Le pouvoir de séparation est usuellement décrit en trait par millimètre. Pour les systèmes fonctionnant dans le visible, le pouvoir de séparation atteint 400 traits au millimètre ($2,5 \cdot 10^{-3}$ mrad). Comme nous allons le montrer, les systèmes fonctionnant dans la bande spectrale 8-12 μ m présentent au mieux un pouvoir de séparation de l'ordre de 20 traits par millimètre (0,05 mrad).

Pour une caméra à matrice de détecteur, le pouvoir de séparation est à distinguer du champ élémentaire instantané. Ce champ élémentaire contient le flux reçu par chaque détecteur. Il est défini par l'angle solide sous tendu par la surface sensible du détecteur depuis l'optique principale de la caméra. Le champ élémentaire est associé à l'IFOV (instantaneous field of view). Ce nombre est calculé en divisant le champ total de la caméra par le nombre de détecteur en ligne.

La nature ondulatoire de la lumière impose une limite à la finesse des détails fournis par une chaîne optique. Principalement à cause des phénomènes de diffraction et d'aberration, l'image d'un point lumineux n'est pas ponctuelle. Ces phénomènes dégradent le pouvoir de séparation des systèmes optiques.

| Tableau 1. Méthodes de caractérisation des systèmes de thermographie | | | | |
|--|---|-----------------------------------|-------------|--|
| | Méthodes de caractérisation | Désig. | Norme | Caractéristiques déduites |
| Espace imagerie | <i>Fonction d'étalement de ligne (ligne spread function)</i> | FEL / LSF | NF A 09-421 | Angle élémentaire limite |
| | <i>Fonction de réponse à une fente (Slit Response function)</i> | FRF / SRF | NF A 09-421 | Angle élémentaire de mesure Pouvoir de résolution spatiale de mesure (PRSM) : angle d'ouverture à FRF=0,98 par exemple |
| | <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 spatiale limite (PRSL) Pouvoir de résolution spatiale d'observation (PRSO) |
| | <i>Résolution thermique</i> | NETD ou DETB | NF A 09-421 | « Différence de température du corps thermorayonnant équivalent à la valeur efficace du bruit de l'appareillage » |
| | Espace de la mesure | <i>Réponse spectrale relative</i> | RSR | NF A 09-421 |
| <i>Courbes d'étalonnages</i> | | | NF A 09-421 | Calibres et étendue de mesure Sensibilité moyenne et différentielle Linéarité Temps de stabilisation Dérive temporelle Influence de la température ambiante |
| <i>Résolution thermique</i> | | | | (Uniformité de réponse dans l'image thermique) = bruit spatial fixe résiduel / sensibilité |

Notes : les écarts minima de température détectable (Minimum Detectable Temperature Difference, MRTD) et écart minimum De température séparable (Minimum Resolvable Temperature Difference, MRTD) sont des Caractéristiques subjectives et leur détermination est facultative.

2.1. LES LIMITES DE LA RESOLUTION SPATIALE

La diffraction et les aberrations géométriques sont des phénomènes physiques incontournables dans la construction des images. Ils sont présents dans tous les systèmes utilisant des pupilles (lentille, diaphragme...). A cause de la diffraction, l'image d'un point lumineux fournie par un système optique parfait à pupille circulaire n'est pas ponctuelle. Les aberrations chromatiques et géométriques agissent de la même façon : elles transforment l'image d'un point en une tache de diffusion.

L'étendue des taches de diffusion dépendra principalement de l'ouverture optique F/N du système optique. Parfois aux effets antagonistes, elles pourront être corrigées. Les procédés de corrections sont bien connus des opticiens.

Dans quelques cas simples, il est possible de déterminer l'étendue angulaire de la tache de diffusion d'un système. Projetée dans le plan objet, on donnera le pouvoir de séparation du système. L'étude est donnée pour une lentille simple en Germanium, très utilisé dans l'infrarouge en raison de sa transmission spectrale étendue et de sa dispersion très faible sur le domaine 8-12 μ m.

2.1.1. La diffraction

A cause de la diffraction, l'image d'un point lumineux fournie par un système optique parfait à pupille circulaire n'est pas ponctuelle. La figure de diffraction obtenue, dite tâches d'Airy, présente une symétrie de révolution avec un maximum d'amplitude central entouré d'anneaux d'amplitude nulle alternés

Le maximum central contenant la presque totalité du rayonnement, le diamètre du premier anneau « obscur » $2r_0$ donne la dimension de la tâche image. Il est défini par le premier zéro de la fonction de Bessel du premier ordre :

$$\Phi_{\text{diffraction}} = 2,44 \lambda \frac{f}{2h}$$

Pour de faibles angles, cette dimension est associée à un angle solide de diffraction donné par la relation suivante :

$$d\theta \approx \frac{\Phi}{f} = 2,44 \frac{\lambda}{2h}$$

Pour un système optique de diamètre de pupille $2h = 50 \text{ mm}$, de focale $f = 100 \text{ mm}$ et fonctionnant dans la bande $8\text{-}12 \mu\text{m}$ ($\lambda = 10 \mu\text{m}$), le diamètre de la tâche de diffraction est, à la distance focale, de l'ordre de $50 \mu\text{m}$ ($d\theta = 0,49 \text{ mrad}$). A noter que ces dimensions augmentent avec l'ouverture optique N ($N = f/2h$).

2.1.2. Les aberrations

Comme pour la diffraction, les aberrations affectent la qualité des images. On distingue deux types d'aberrations : les aberrations chromatiques et les aberrations géométriques. Elles projettent l'image d'un point sous la forme d'une tâche de révolution dont le diamètre est mesuré par un angle solide de diffusion $d\theta$.

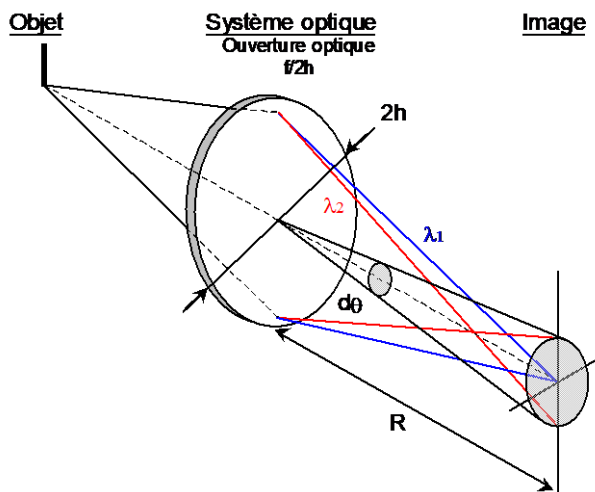


Fig.2. Aberrations chromatiques. Un système optique d'ouverture $N=f/2h$ produit une tâche chromatique issue des variations de la focale du système sur la bande spectrale du rayonnement.

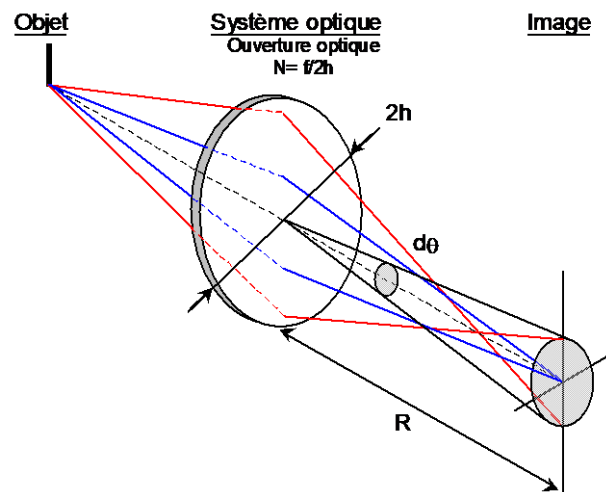


Fig. 3. Aberrations sphériques. Le système produit une tâche géométrique issue de la variation de la focale avec l'ouverture des optiques (écarts aux conditions de Gauss)

Les aberrations chromatiques sont dues aux variations de l'indice de réfraction des matériaux avec la longueur d'onde. Ces variations affectent directement la focale du système qui prend des valeurs différentes suivant les valeurs de λ . Pour une lentille, la dispersion de la focale avec la longueur d'onde est appelée constringence ν du matériau. L'angle de diffusion de la tâche chromatique est donné par la relation suivante :

$$d\theta = \frac{1}{2N\nu} \times \frac{f}{R}$$

Pour le système précédent, l'ordre de grandeur du de la tache de diffusion est, au plan focal, de 22 μm (la constringence du Germanium est donnée sur la bande spectrale 8-12μm : ν= 1112). Ce terme reste du même ordre de grandeur de la tache principale de diffraction.

Pour des ouvertures plus faibles (F/1 ou moins), Le chromatisme peut être si important qu'il interdise toute observation. Bien entendu, il existe plusieurs moyens de réduire ces aberrations. La correction des aberrations chromatiques se fait par association de plusieurs lentilles telles que la dispersion de l'une compense la dispersion de l'autre. Le système corrigé est dit achromatiques ou apochromatiques (corrections chromatiques d'ordre supérieur). Les systèmes optiques ne comportant que des miroirs ne sont pas affectés par les aberrations chromatiques.

En dehors des phénomènes de diffraction et d'aberrations chromatiques, Les aberrations géométriques sont dues à ce que les rayons éloignés de l'axe ne convergent pas au même point que les rayons paraxiaux (écarts à la condition de Gauss). Il en résulte un flou de l'image obtenue, préjudiciable là aussi à sa qualité.

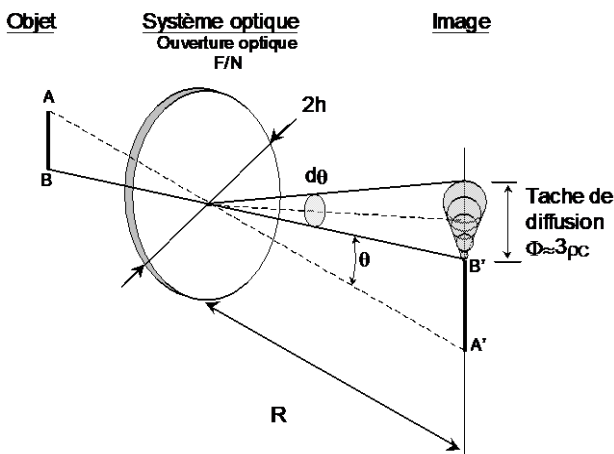
On distingue quatre aberrations fondamentales caractérisées par un développement du troisième ordre de l'aberration géométrique transversale : les aberrations sphériques (étendue géométrique $\Phi \sim (f/N)^3$), le coma ($\Phi \sim R \times (f/N)^2$), L'astigmatisme et la courbure de champ ($\Phi \sim R^2 \times (f/N)$) et la distorsion ($\Phi \sim R^3$).

De part sa dépendance en $(f/N)^3$, Il est intéressant de regarder le comportement des aberrations sphériques avec l'ouverture optique N. Le résultat est donné pour une lentille simple en germanium au plan focal image⁵ :

$$\text{Germanium } n=4,0 \quad d\theta \approx 10^{-3} \times \frac{8,7}{N^3} \text{ (radian)}$$

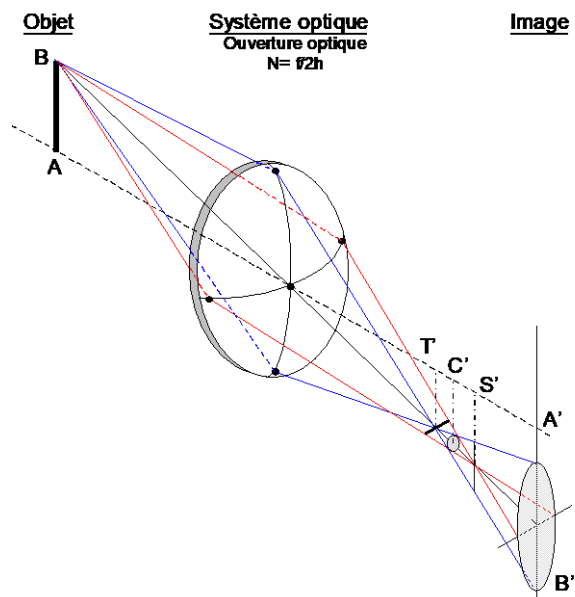
Pour le système précédent, le calcul indique un angle de diffusion de 1 mrad (diamètre de diffusion : 100μm). L'angle de diffusion diminue rapidement quand l'indice de réfraction augmente.

La coma et l'astigmatisme affectent exclusivement l'image des points les plus excentrés. La coma donne une tache de diffusion qui ne possède pas de symétrie de révolution. La figure obtenue est un glissement de taches circulaires (rayon $2\rho_c$) sur la distance $3\rho_c$ ⁶. La figure de la coma et son ouverture angulaire maximale sont présentées sur la figure 4.



$$d\theta_{\text{coma}} = \frac{\theta}{16(n+2)N^2}$$

Fig. 4. Figure de la Coma d'un système optique



$$d\theta_{\text{Astigmatisme}} = \frac{\theta^2}{2N}$$

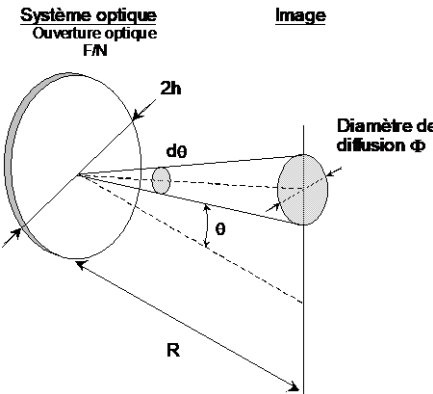
Fig. 5. Figure d'astigmatisme d'un système optique

Le terme d'astigmatisme est proportionnel à l'ouverture optique et se manifeste aussi dans des systèmes de faible ouverture. La courbure de champ résulte des écarts à la loi d'Abbe. Le faisceau, lorsqu'il est entaché d'astigmatisme, présente au voisinage de l'image deux zone d'amincissement. Ces zones

appelées « focales d'astigmatisme » sont représentées par deux petits segments orthogonaux T' et S' où le faisceau se réduit à un pinceau. La distance T'S' est appelée distance d'astigmatisme. Située au milieu de T'S', se trouve une zone pour laquelle la tache image est sensiblement circulaire. Sa dimension correspond au cercle de moindre diffusion C'. En dehors de C', la section du faisceau est elliptique. Ces ellipses deviennent progressivement des cercles en s'éloignant de la zone focale⁷. La figure d'astigmatisme et l'ouverture angulaire de moindre diffusion sont présentées sur la figure 5.

Le défaut de distorsion n'est pas traité car il ne provoque pas d'effet de flou comme les autres défauts. Il se traduit par une déformation de l'image, sans dégradation de sa qualité.

2.2. PRESENTATION SYNTHETIQUE DES LIMITES DE LA RESOLUTION SPATIALE

| Tableau 2. Angle de diffusion optique | | | | | |
|---|--------------------------------|------------------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------|
|  | | | <p>Ouverture optique F/N, $N = \frac{f}{2h}$</p> <p>Lentille simple</p> <p>Diamètre de diffusion $\approx R \times d\theta$ (faibles angles)</p> | | |
| Diffraction (rad) | Aberrations chromatiques (rad) | Aberrations sphériques (rad) | | Coma (rad) | Astigmatisme (rad) |
| $d\theta = 2,44 \frac{\lambda}{2h}$ | $d\theta = \frac{1}{2N\nu}$ | $n=4,0$ | $d\theta \approx 10^{-3} \times \frac{8,7}{N^3}$ | $d\theta = \frac{\theta}{16(n+2)N^2}$ | $d\theta = \frac{\theta^2}{2N}$ |

2.3. DISCUSSION DANS LE CAS D'UNE LENTILLE MINCE

Evaluons la diffusion optique d'une lentille simple en Germanium ($n=4$). La lentille présente une focale caractéristique de 100mm et un diamètre $2h=50$ mm. Elle est ouverte à F/2 pour un champ total de 12° . Le diamètre de diffusion est, donné à la distance focale pour les bandes spectrales 3-5 μm (constringence $\nu=88$) et 3-5 μm (constringence 1112). Le résultat est présenté sur le tableau 3.

| Tableau 3. Evaluation des taches de diffusion pour une lentille mince | Bande spectrale 3-5 μm | | Bande spectrale 8-12 μm | |
|---|-----------------------------------|---|------------------------------------|---|
| | Ouverture angulaire (mrad) | Diamètre de diffusion (μm) | Ouverture angulaire (mrad) | Diamètre de diffusion (μm) |
| Diffraction à 10 μm | 0,194 | 19,4 | 0,488 | 48,8 |
| Chromatisme (bande spectrale 8-12 μm) | 2,84 | 284 | 0,225 | 22,5 |
| Aberration sphérique | 1,087 | 108,7 | 1,087 | 108,7 |
| Coma | 0,26 | 26 | 0,26 | 26 |
| Astigmatisme | 2,5 | 250 | 2,5 | 250 |
| Etendue de diffusion hors coma et astigmatisme | 4,12 mrad (412 μm) | | 1,8 mrad (180 μm) | |
| Etendue totale de diffusion | 6,88 mrad (688 μm) | | 4,56 mrad (456 μm) | |

Le pouvoir séparateur des optiques infrarouges est en général bien inférieur à celui des optiques conçues pour le domaine visible. Il est très dépendant de l'ouverture optique du système. Dans le domaine

infrarouge, il n'est pas rare de rencontrer des ouvertures au-delà de F/1. Nous avons vu qu'une lentille simple en Germanium de 100 mm de focale, ouverte à F/2 donne une tache de diffusion centrale de l'ordre de 1,8 mrad pour un champ total de 12°. La coma et l'astigmatisme, affectant les points images les plus excentrés (demi champ $\theta=6^\circ$), dégradent le pouvoir de séparation tandis que le chromatisme, important en ondes courtes, interdirait une observation fine de l'objet !

Un système optique parfaitement corrigé donnerait un champ élémentaire voisin de la limite angulaire de diffraction. Le calcul d'un système constitué par une lentille simple « de meilleur forme » en Germanium sur la bande 8-12 μm donne un résultat plus proche de la réalité. Le calcul porte sur l'évaluation des aberrations sphériques, du coma et de l'astigmatisme. Il est fait en plaçant le plan image dans le plan du cercle de moindre diffusion de l'aberration sphérique (la défocalisation à donner est de $-1,035$ mm ramenant la focale du système à 98,96 mm au lieu de 100 mm). Le résultat, issu de la référence ⁸, est présenté sur le tableau 4.

| Tableau 4. Evaluation des taches de diffusion pour une lentille mince de « meilleur forme » | Bande spectrale 8-12 μm |
|---|------------------------------------|
| | Ouverture angulaire (mrad) |
| Aberration sphérique | 1,6 |
| Coma | 0,6 |
| Astigmatisme | 5,4 |
| Etendue de diffusion hors coma et astigmatisme | 2,3 mrad (230 μm) |
| Etendue totale de diffusion | 8,3 mrad (830 μm) |

Une telle lentille donnerait un champ élémentaire paraxial de 2,3 mrad et une tache image d'environ 230 μm . Le pouvoir de séparation correspondant est d'un peu plus de 4 traits par millimètre. Ce résultat est à comparer au pouvoir de séparation de 20 traits par millimètre pour une lentille limitée uniquement par la diffraction (bande 8-12 μm).

2.4. AUTRES LIMITES A LA RESOLUTION SPATIALE DES CAMERAS THERMIQUES

Dans le cas de caméras à matrice de détecteurs, le pouvoir de séparation est aussi limité par la dimension du détecteur, par la variation de sa sensibilité locale et par l'électronique de lecture.

2.5. REPONSE IMPULSIONNELLE LINEAIRE

Tous ces facteurs donnent la figure de réponse d'un détecteur, encore appelée réponse impulsionnelle linéaire $D(x)$ du système. On modélise la réponse impulsionnelle par une fonction Gaussienne dans laquelle σ représente le rayon de la tache globale de diffusion correspondant à 84% du flux reçu.

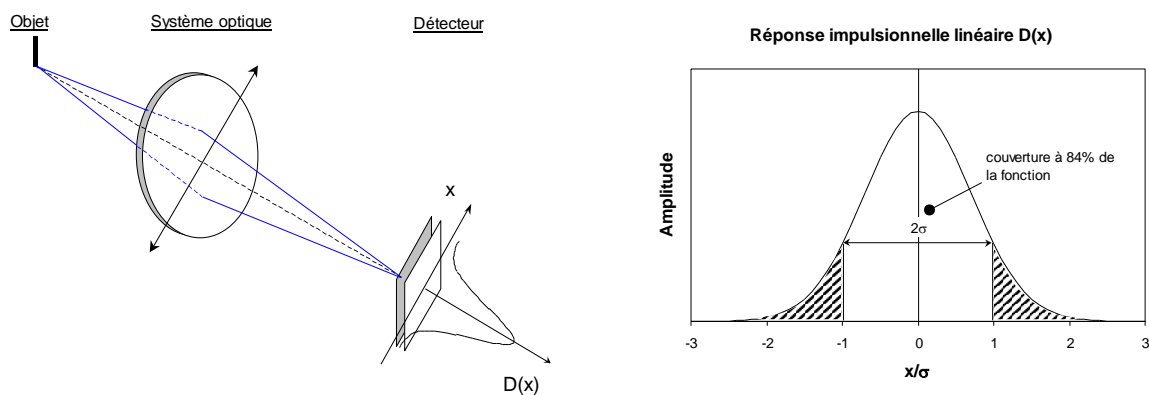


Fig. 6. Réponse impulsionnelle linéaire $D(x) = e^{-\frac{x^2}{\sigma^2}}$ du système

Les caméras thermiques à matrices sont conçues de telle manière à ce que $4\sigma^2$ couvre la surface moyenne occupée par un détecteur (environ $4d^2$ si on tient compte de l'espacement entre deux

détecteurs du même ordre que leur dimension d). Il est inutile de faire mieux. Ainsi, σ est du même ordre que d. L'angle solide associé σ/f s'identifie au champ élémentaire instantané de la caméra (IFOV)

3. FONCTION DE REPONSE A UNE FENTE

Dans ce formalisme, il est possible de mesurer le pouvoir séparateur du système en donnant à l'objet la structure d'une fente de fort contraste thermique de largeur a ou d'ouverture angulaire a/D (D : distance fentes-caméras). On procède ici au test normalisé de fonction de réponse à une fente (NF A09-421)

La répartition normalisée de luminance de l'objet $L^0(x)$ est alors définie par la fonction rectangle :

$$L^0(x) = \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right)$$

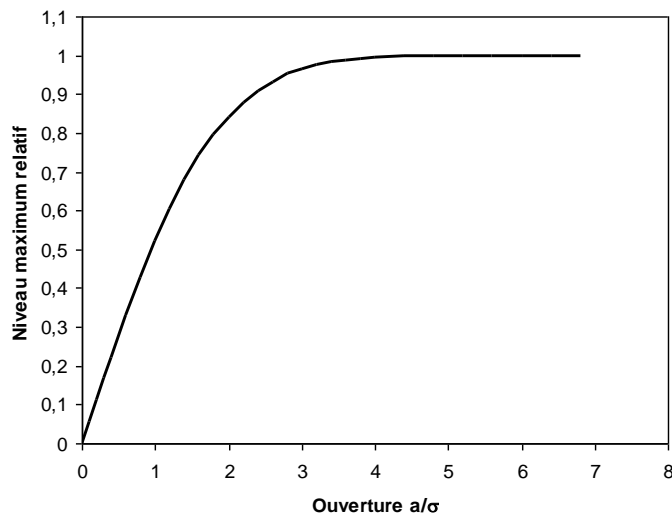
La réponse à cette fente ou image de la fente donnée par le système s'exprime par le produit de convolution

$$I(x) = L^0(x) * D(x) = \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} D(x - x_0) dx$$

La réponse maximale du système, obtenue pour $x_0=0$ (centre du détecteur), est exprimée en valeur relative par

$$I_{\max}(a) = \frac{\int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} e^{-\frac{x^2}{\sigma^2}} dx}{\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{\sigma^2}} dx}$$

Cette fonction donne la valeur maximale relative du signal donné par une fente ou SRF (Slit Response Function). Elle est calculée par intégration numérique. Le résultat est montré sur la figure 7 et quelques valeurs sont données dans le tableau 5.



| | | | | |
|---------------|------|-----|------|------|
| $I_{\max}(a)$ | 0,5 | 0,8 | 0,9 | 0,99 |
| a/σ | 0,96 | 1,8 | 2,32 | 3,64 |

Fig. 7. Valeur maximale relative sur le signal donné par une fente de largeur a.

Lorsque la largeur de fente est réduite de telle façon que l'amplitude du signal est la moitié de celle fente ouverte, la résolution spatiale dite à 50% de modulation est représentée par la dimension σ (ou l'ouverture angulaire $\sigma/f = \text{IFOV}$ de la caméra).

Enfin, en fermant la fente jusqu'à une largeur bien inférieure à σ , le profil du signal correspondant est la réponse impulsionnelle linéaire $D(x)$ encore appelée LSF (Line Spread Function ou fonction d'étalement de ligne). Sa détermination est normalisée (NF A 09-421). En raison de la faiblesse des signaux, cette caractéristique est en pratique difficilement accessible pour les caméras thermiques commerciales.

4. RESOLUTION SPATIALE ET EXACTITUDE EN TEMPERATURE

Dès qu'il s'agit de mesure, le système doit présenter les caractéristiques générales d'un instrument de mesure : reproductibilité et exactitude.

Nous avons montré que, lorsque la largeur de fente est comparable à la tache globale de diffusion, chaque point élémentaire de la matrice reçoit au mieux la moitié du flux total ! Pour en mesurer l'intégralité, il faudrait une fente d'ouverture supérieure à 4σ . Bien entendu, il n'est pas toujours possible ni souhaitable de s'imposer de telle contrainte. On cherchera plutôt à concilier une image correctement résolue dont au moins un Pel donnera la température d'émission dans une « bonne » exactitude.

4.1. EXACTITUDE EN TEMPERATURE

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

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

où ΔI_{\max} est l'écart consenti en niveau sur la SRF et $\langle s \rangle$ en niveaux/°C est la sensibilité de la caméra sur l'intervalle $[T_1, T_2]$ (T_1 : température de fente, T_2 : température de corps). L'erreur systématique ΔT est comptée négative car la température radiométrique est estimée par défaut. La sensibilité est déduite de la courbe d'étalonnage de la caméra. La procédure est illustrée sur la figure 8.

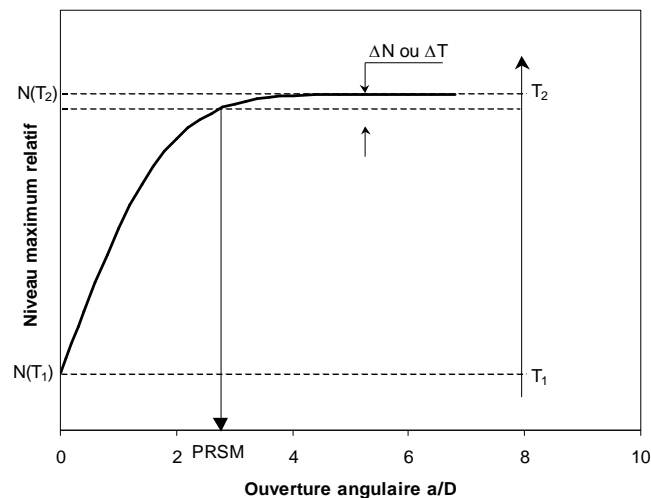


Fig. 8. Résolution spatiale et exactitude en température (gauche : SRF ; à droite : courbe d'étalonnage). a/D est l'ouverture angulaire de la fente (T_1 : température des fentes, T_2 : température de corps noir). La sensibilité moyenne est estimée aux valeurs limites du niveau maximum relatif par $(N(T_2)-N(T_1))/(T_2-T_1)$. L'ouverture angulaire correspondant à $1-\varepsilon$ du niveau maximum relatif est appelée pouvoir de résolution spatiale de mesure (PRSM).

En pratique, la température de corps noir est associée à la température objet tandis que la température de fente est associée à la température de fond (environnement radiométrique situé derrière l'objet).

L'erreur systématique ΔT , de même que le PRSM est donnée pour ces températures.

4.2. DISCUSSION DANS LE CAS DES INSPECTIONS ELECTRIQUES

Le secteur du contrôle thermographique des installations électriques est un grand utilisateur de caméras thermiques. Ce secteur, très concurrentiel, utilise une très grande variété de caméras dont le rendu visuel est un atout commercial.

C'est dans ce contexte que se pose le choix de la caméra thermique la mieux adaptée au contrôle thermographique. Ce choix doit répondre à deux problématiques :

- La première est de disposer d'un imageur capable de scruter l'installation pour avoir une vue d'ensemble du dispositif et pouvoir situer correctement les anomalies de température en toute sécurité ;
- La seconde est de disposer d'un radiomètre permettant de quantifier correctement le flux émis en réduisant les erreurs systématiques inhérentes à une mauvaise utilisation de l'appareil afin d'estimer la température de câble dans la limite de l'exactitude instrumentale de $\pm 2^\circ\text{C}$, sans avoir des a priori sur la géométrie et la position des câbles par rapport au champ de vision.

4.2.1. Contexte du contrôle thermographique

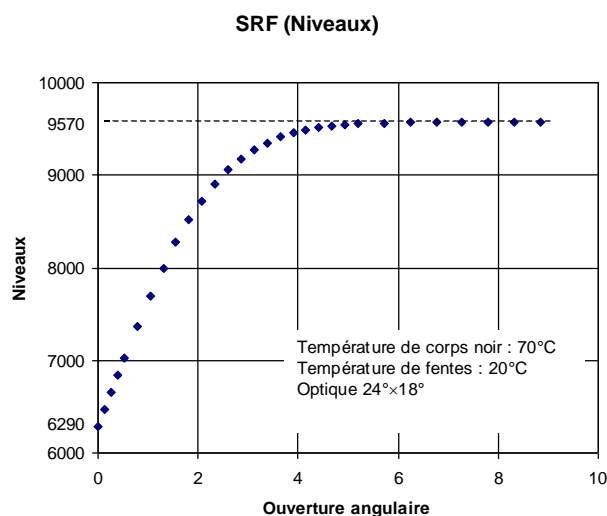
L'expérience des contrôles thermographiques des installations électriques démontre que les échauffements anormaux concernent tous les types de conducteurs petits ou gros. Ainsi, beaucoup d'échauffements anormaux sont constatés sur des câbles de $1,5 \text{ mm}^2$ (2,5 mm de diamètre).

La distance d'inspection en régime basse tension est prescrite par la publication UTE C 18-510 qui impose d'être à plus de 30 cm des pièces nues sous moyenne tension. En régime haute tension, cette distance est portée à 60 cm. Dans le cas d'un contrôle d'une armoire électrique, cette prescription fixe la distance minimale de sécurité à 50 cm si l'on tient compte de la profondeur moyenne de l'armoire (environ 20 cm, profondeur qui reste à normaliser).

Concernant la température des câbles, nous pouvons prendre comme référence les valeurs de la norme C15 100 (70°C pour un câble gainé PVC et 90°C pour ceux gainés PR). Les températures de fond communément recensées varient de 20 à 50°C . En l'absence d'indication spécifique, la température de 20°C est réaliste car peu contraignante.

4.2.2. Caméra

Examinons par exemple une caméra thermique 320×240 dont la résolution spatiale à partir de l'observation du signal donné par une fente présentant un fort contraste thermique. Les fentes sont éclairées par un corps noir dont on règle la température à 70°C . Les fentes, rendues émissives, sont à la température de 20°C . Elles sont placées à la distance minimale de mise au point de la caméra, soit $D=30$ cm. L'ouverture angulaire d'observation est définie par le rapport a/D où a est l'ouverture de fente. Le test est donné pour une optique standard ($24^\circ \times 18^\circ$) après le temps de stabilisation du système. Le résultat est présenté sur la figure 9 et quelques valeurs particulières dans le tableau 6.



| Tableau 6. Valeur maximale relative du signal donné par une fente | | | | | |
|---|-----|-----|------|------|------|
| I_{\max} (%) | 0,5 | 0,9 | 0,95 | 0,98 | 0,99 |
| PRSM (mrad) | 1,3 | 3,1 | 3,9 | 4,4 | 5 |

Fig. 9. SRF

La valeur maximale relative du signal reproduit bien l'IFOV de la caméra ($24^\circ \leftrightarrow 0,419 \text{ rad}/320 = 1,3 \text{ mrad}$ horizontal).

4.2.3. Analyse des données

Compte tenu des valeurs limites relevées, on peut déterminer la sensibilité moyenne de la caméra sur les températures de test : $\approx 66 \text{ niveaux}/^\circ\text{C}$. Sa connaissance nous permet maintenant de convertir les valeurs maximales relatives du signal en température. Le résultat est montré sur le tableau 7.

| Tableau 7. Erreur systématique en température | | | | | |
|---|-------|-----|------|-----|------|
| PRSM (mrad) | 1,3 | 3,1 | 3,9 | 4,4 | 5 |
| ΔI_{max} (niveau) | 1640 | 328 | 164 | 66 | 33 |
| ΔT ($^\circ\text{C}$) | -24,8 | -5 | -2,5 | -1 | -0,5 |

L'erreur systématique de mesure varie grandement avec le PRSM. Elle est de l'ordre de l'incertitude instrumentale pour un PRSM de l'ordre de 4 mrad. Projeté sur le plan objet, la taille caractéristique de la zone de mesure est, à 50 cm, de l'ordre de 2 mm. Cet imageur est, à première vue, qualifié pour la mesurer d'un câble de 2,5 mm de diamètre.

4.3. REMARQUES COMPLEMENTAIRES

L'erreur systématique inhérente au choix du PRSM se rajoute à l'incertitude instrumentale. Etant découplées, l'erreur globale est la somme quadratique des deux termes. Dans l'exemple, l'erreur globale est de l'ordre de 3°C . Si on souhaite réduire l'erreur globale à l'incertitude expérimentale, on recherchera un PRSM de l'ordre de $0,5^\circ\text{C}$ seulement.

La valeur moyenne de la sensibilité repose sur la transcription flux-température. Elle est constante si courbe d'étalonnage est linéaire sur les températures de test $[T_1, T_2]$. Dans le cas contraire, la sensibilité moyenne et l'erreur systématique varient avec les températures de test.

Le résultat est donné pour une disposition verticale des fentes. De part l'asymétrie des matrices, le PRSM peut se dégrader dans la disposition horizontale ou si l'objet à la forme d'un disque. Il est donc tout aussi important de reproduire les résultats du test dans ces dispositions et de convenir du choix d'un PRSM dans la situation la moins favorable^[3].

5. CONCLUSION

Une analyse fine du processus de formation des images a montré les limites de la résolution spatiale chez le système optique constitué d'une lentille mince. Une étude chiffrée de la tache de diffusion est donnée et indique une très forte sensibilité avec l'ouverture optique du système et la bande spectrale du système. Appliquée à une caméra à matrice focale, la tache de diffusion est associée à la réponse impulsionnelle $D(x)$ d'un détecteur dont l'étendue est comparable au champ élémentaire de mesure ou IFOV du système. Dans ce formalisme, nous proposons une interprétation du signal fourni par l'observation d'une fente présentant un fort contraste thermique. L'intensité maximale relative du signal (SRF) est étudiée pour des ouvertures angulaires. La connaissance de la SRF se révèle être un outil indispensable dans l'évaluation de l'erreur systématique de mesure. Appliquée à un contrôle par thermographie des installations électriques, nous montrons qu'une erreur systématique de -1°C sur la température d'émission correspond à une ouverture angulaire de l'ordre de 4 IFOV.

REFERENCES

- 1 Dominique Pajani, Technologie et applications, Techniques de l'ingénieur R 2 741 pages 12-14
- 2 Thermographie infrarouge : caractérisation de l'appareillage, NF A 09-420 et méthodes de caractérisation de l'appareillage, NF A 09-421
- 3 Warren C. Garber, applying distance to spot ratio values to infrared imagers for accurate temperature measurement, Infrasppection institute 225 Ellis street Burlington, NJ 08016 - USA. (site web :http://www.irinfo.org/Articles/article_10_20_2002_applying_distance.html). Les indications portées dans cet article sont à prendre avec précautions dans les mesures où l'auteur ne précise pas le système optique des caméras ni le mode d'obtention des résultats.
- 4 FLIR Thermacam E65, www.flirthermography.com/E65data
- 5 G. Gaussorgues, la thermographie infrarouge : principes, technologies, applications (4^{ème} édition). Voir page 211
- 6 G. Gaussorgues, la thermographie infrarouge : principes, technologies, applications (4^{ème} édition). Voir page 160
- 7 G. Gaussorgues, la thermographie infrarouge : principes, technologies, applications (4^{ème} édition). Voir pages 164
- 8 G. Gaussorgues, la thermographie infrarouge : principes, technologies, applications (4^{ème} édition). Voir page 223