



Les caméras matricielles sont couramment utilisées pour contrôler les armoires électriques et détecter les fils électriques chauds. Si l'on veut faire des mesures (donc rechercher une température, avec une incertitude associée) sur des fils de relativement faible diamètre, il est important de connaître ce qui se passe à l'intérieur de la caméra. Faute de quoi, la mesure risque de ne pas avoir une grande signification...

MESURES PHYSIQUES

Thermographie IR : la température des

Les mesures par thermographie infrarouge ont toujours été délicates car il y a de nombreuses causes d'erreurs de mesure, aléatoires et systématiques. Dominique Pajani de l'Institut de la thermographie se penche ici sur les causes d'erreurs systématiques des caméras matricielles dans le cas particulier, mais très répandu, des mesures sur des fils électriques chauds. La lecture de cet article permettra d'aborder avec un peu plus de discernement la lecture des spécifications indiquées dans les documentations commerciales. Prétexter qu'un spot de mesure ne fait que quelques pixels ne suffit pas pour dire que l'on peut mesurer précisément la température d'un fil à distance...

le d'Observation (PRSO), soit par le nombre de détecteurs de la matrice, soit par un angle. Ainsi, le PRSO est le produit du nombre de détecteurs sur une ligne (dite "horizontale"), ndH , et du nombre de détecteurs sur une colonne (dite "verticale"), ndV : par exemple $ndH \times ndV = 320 \times 240$.

La définition du PRSO par un angle est également assez simple. On parle ici d'angle IFOV (Instantaneous Field OfView) qui, en optique géométrique (donc parfaite), désigne l'angle sous lequel un pel (point élémentaire carré) de la matrice voit une surface élémentaire ΔS de la scène thermique. La difficulté pour définir IFOV tient au fait que les dimensions des capteurs matriciels ne sont pas standardisées. L'utilisation de la notion de distance focale de l'objectif ne présente donc pas un grand intérêt pour faire des comparaisons entre caméras*. On ne désigne donc pas un objectif par sa distance focale, mais par l'angle FOV (Field OfView), sous lequel la caméra voit la scène thermique. Il y a en fait deux FOV : HFOV (angle horizontal) et VFOV (angle vertical). A partir de là, IFOV peut être défini par la relation :

$$IFOV (^{\circ}) = \frac{HFOV}{ndH} = \frac{VFOV}{ndV}$$

En fait, pour des raisons pratiques, si le FOV (et donc HFOV et VFOV) sont exprimés en degrés d'angle, on préfère exprimer l'IFOV en milliradians (mrad) ou millimètres à la distance de mesure Dm (mm @ Dm). Les valeurs de l'IFOV en mrad ou en mm @ 1 m

sont identiques. On a :

$$IFOV \text{ (mrad)} = \frac{HFOV \cdot \pi \cdot 1000}{ndH \times 180^{\circ}} = \frac{VFOV \cdot \pi \cdot 1000}{ndV \times 180^{\circ}}$$

Ainsi, le PRSO d'une caméra disposant d'un objectif de $HFOV = 18^{\circ}$ et d'une matrice de 160×120 détecteurs peut aussi être exprimé par la valeur de l'IFOV ≈ 2 mrad ou 2 mm @ 1 m ou encore 4 mm @ 2 m, ou aussi 2 mm x dmf (m) @ dmf (m), dmf étant la distance minimale de focalisation de l'objectif -, soit par exemple 1,2 mm @ 0,6 m.

Avec l'IFOV, il faut bien avoir présent à l'esprit que l'on parle de résolution spatiale d'observation et non de résolution spatiale de mesure. Pour mieux fixer les idées, considérons l'application majeure de la thermographie, le contrôle des installations électriques, et la mesure de la température d'un fil isolé de 1,2 mm de diamètre. Si on a une caméra avec un IFOV de 1,2 mm @ 60 cm, l'image du fil couvre intégralement la surface d'un pel. Il ne faut pas en déduire que l'on peut mesurer le rayonnement (donc la température) de ce fil. En effet, très généralement, le Pouvoir de Résolution Spatiale de Mesure (PRSM) n'est pas défini par l'IFOV, l'optique ne pouvant être parfaite.

La notion de mesure "correcte"

S'agissant de mesurer les températures et non plus seulement de réaliser une image thermique, il faut s'intéresser à l'aspect métrologique de la caméra. Le VIM (Vocabulaire International de Métro-

Les caractéristiques des caméras thermiques peuvent être définies dans deux espaces distincts : l'espace de l'imagerie (la caméra fournit des images) et l'espace de la mesure thermographique (la caméra est un appareil de mesure). Une caractéristique donnée peut

donc avoir deux définitions. C'est le cas par exemple de la résolution spatiale : il y a deux résolutions spatiales, le Pouvoir de Résolution Spatiale d'Observation ou PRSO, et le Pouvoir de Résolution Spatiale de Mesure ou PRSM.

Deux façons de définir le PRSO

Pour les caméras à matrice, et dans l'espace de l'imagerie, l'usage (plus pertinent que la norme, non applicable) est de définir le Pouvoir de Résolution Spatia-

L'essentiel

- ▶ Avant toute mesure, il faut se fixer la marge d'erreur systématique que l'on s'autorise
- ▶ Cette erreur systématique va permettre les conditions limites de mesure.
- ▶ Un paramètre est plus particulièrement important pour évaluer l'erreur systématique dans le cas des mesures sur des fils chauds : c'est le FRF, Fonction de Réponse à une Fente
- ▶ On trouve aussi le critère SSR (réponse de la caméra à un disque), mais dans le cas des fils, il n'a pas le caractère réaliste de la FRF

prudence pour mesurer fils chauds

logie, norme NF X 07-001) définit l'**exactitude de mesure** : étroitesse de l'accord entre la valeur mesurée et la valeur vraie (de la grandeur mesurée). Il dit aussi que l'**incertitude de mesure** est l'étendue des valeurs dans laquelle se situe la valeur vraie. (Rappelons que le terme "précision" n'existe pas en métrologie.)

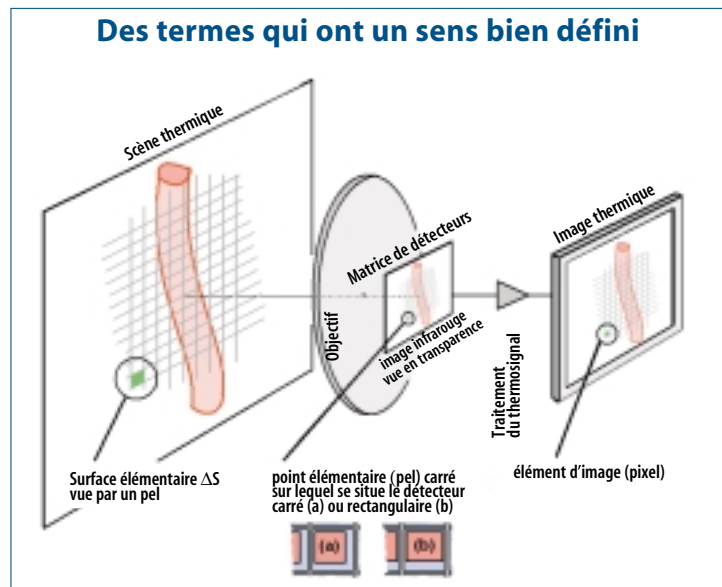
Par ailleurs, le VIM explicite l'**erreur de mesure**, qui est la différence entre la valeur mesurée et la valeur vraie, l'**erreur aléatoire**, qui est la composante imprévisible de l'erreur, et l'**erreur systématique**, qui est la composante prévisible de l'erreur.

Dire qu'une mesure (ou résultat d'un mesurage) est **exacte** semblerait signifier qu'elle est faite sans incertitude, ce qui n'est pas possible. Il faut convenir d'une incertitude minimale ou d'une erreur acceptable.

Dans le cadre prédéfini d'une application, nous dirons que nous avons fait une mesure **correcte** lorsque nous avons mis en œuvre les moyens possibles et utiles afin de réduire à des valeurs acceptables l'incertitude et l'erreur de mesure, en toute connaissance de leurs causes... La caractéristique de résolution spatiale est l'une de ces causes dont l'incidence peut se révéler majeure.

Cas concret significatif. Consultés sur la qualité de leurs mesures sur des installations électriques, des opérateurs confirmés ont dit : "nous ne sommes pas à 1 °C près" et, se souvenant que la caméra implique déjà une incertitude de ± 2 °C (donnée dans la fiche de spécification), ils poursuivent : "nous ne sommes pas à quelques degrés près", langage approximatif équivalent à son inverse : "nous sommes à quelques degrés près". "Quelques" pouvant signifier 5 °C, certains concluent :

**C'est un peu le même problème que l'on rencontre pour les objectifs des appareils photos numériques. Les focales sont indiquées mais on ne sait pas trop "ce que ça donne" en réalité. C'est la raison pour laquelle dans les guides comparatifs que l'on trouve dans les revues spécialisées, on trouve souvent la caractéristique "équivalent 24x36", plus parlante...*



La caméra observe une scène thermique. Son objectif produit une image infrarouge sur la matrice. Le traitement du thermosignal issu de la matrice aboutit à une image thermique présentée sur un écran. A cette suite [scène thermique > matrice > image thermique], correspond le détail [surface élémentaire ΔS > point élémentaire (détecteur) > élément d'image (pixel)].

"voilà qui commence à faire beaucoup". Nous admettons néanmoins ici qu'une mesure correcte d'une température vraie de 70 °C pourra être au minimum de 65 °C (ce qui, en prévention, augmente le risque d'une décision incorrecte).

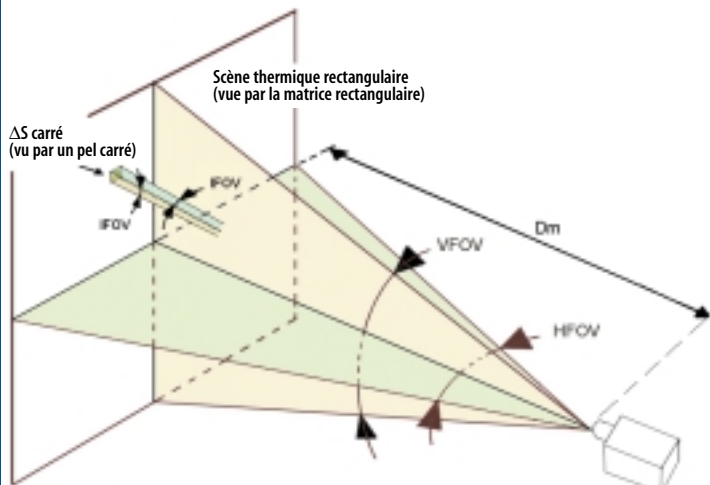
Dans un premier temps, en simplifiant les mesures thermographiques à des mesures de températures apparentes, on pourra affirmer que, dans les 5 °C qui "manquent", la caméra est responsable d'une erreur aléatoire qui peut être au maximum de -2 °C. Reste donc une erreur systématique admissible de -3 °C.

Sur un objet à 70 °C, la caméra peut idéalement mesurer 70 °C ± 2 °C. Avec l'erreur systématique, elle mesure en fait 67 °C ± 2 °C alors que l'objet est à 70 °C, ce

qui représente bien qu'il y a une erreur ; mais nous avons admis que cette erreur est ici considérée comme à la limite de l'acceptable, la mesure reste donc "correcte".

Comment s'assurer que la mesure est "correcte" ? Ou comment réduire les sources d'erreurs systématiques, celles qui donnent des résultats prévisibles ? L'un des moyens est de considérer le PRSM de la caméra. Pour revenir à l'exemple précédent, il s'agit de définir comment maintenir à moins de 3 °C l'erreur systématique due à un problème de résolution spatiale. C'est la **Fonction de Réponse** à une fente, en association avec la courbe d'étalonnage de la caméra, qui permet de répondre à cette question.

Définition de IFOV (Instantaneous Field Of View)



IFOV (Instantaneous Field of View) : angle sous lequel la caméra voit un élément de la scène thermique

$$\text{IFOV} (^\circ) = \frac{\text{HFOV}(^\circ)}{ndH} = \frac{\text{VFOV}(^\circ)}{ndV}$$

avec :

- HFOV (Horizontal Field of View) : angle horizontal sous lequel la caméra voit la scène thermique

-VFOV (Vertical Field of View) : angle vertical sous lequel la caméra voit la scène thermique

- ndH : nombre de détecteurs sur une ligne

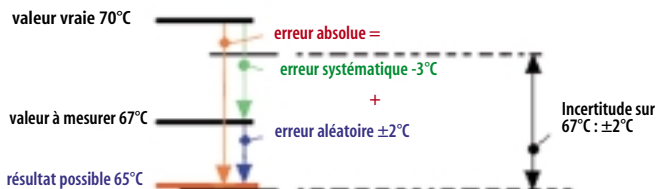
- ndV : nombre de détecteurs sur une colonne

En pratique, on préfère exprimer IFOV en mrad ou en mm@1 m, à l'aide de la relation

$$\text{IFOV (mrad ou mm@1 m)} = \frac{\text{HFOV}(^\circ) \cdot \pi \cdot 1000}{ndH \cdot 180^\circ} = \frac{\text{VFOV}(^\circ) \cdot \pi \cdot 1000}{ndV \cdot 180^\circ}$$

IFOV sert à définir le pouvoir de résolution spatiale d'observation (PRSO)

Influence de l'erreur systématique



Cette illustration montre l'incidence de la présence d'une erreur systématique (de -3°C) due à la problématique de la résolution spatiale. A cause de cette erreur, la caméra ne mesure pas la température vraie de 70°C mais la température de 67°C . Si l'incertitude de la caméra est de $\pm 2^\circ\text{C}$, la valeur effective fournie par la caméra est comprise entre 63 et 65°C .

La Fonction de Réponse à une Fente ou FRF

La Fonction de Réponse à une Fente (FRF) est une notion normalisée très intéressante : c'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. La FRF explicite (c'est d'ailleurs son intérêt essentiel) la précaution à prendre pour que la mesure de température du fil soit "correcte".

Le fond sur lequel se trouve le fil chaud présentent le rayonnement L_0 , le fil ou le corps derrière la fente, le rayonnement $L_1 (> L_0)$. A largeur de fente d_f décroissante (ou diamètre de fil d_f décroissant), et en dessous d'une certaine valeur de d_f , la valeur L_{max} du thermosignal diminue pour s'établir à une valeur comprise entre L_1 et L_0 .

Ainsi, la réponse normée de la caméra vaut :

$$\text{FRF} = (L_{\text{max}} - L_0) / (L_1 - L_0)$$

FRF dépend de d_f , d_f peut être exprimé en longueur (mm) ou en angle α_{mesure} (mrad) pour la distance de mesure D_m :

$$\alpha_{\text{mesure}} = d_f / D_m$$

A 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 L_1 et L_0 ; on peut donc porter la fente et le corps de référence à des températures quelconques (la caméra restant sur le même calibre).

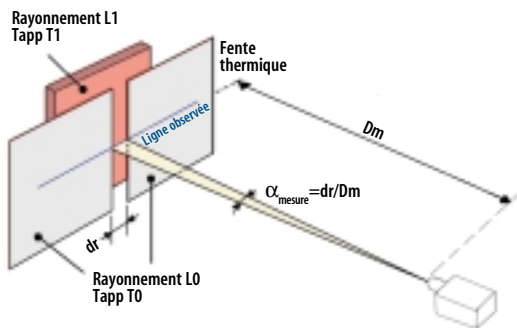
Sous réserve de quelques précautions métrologiques (en particulier, attention à la dérive des caméras à matrice!), il est aisé de relever la fonction FRF. Il convient néanmoins de mettre en œuvre des réglages micrométriques afin de décaler la caméra par rapport à la fente ou au fil et, ainsi, trouver le maximum de réponse de la caméra par la fonction "maximum sur profil" (et non par la fonction "maximum sur zone" laquelle implique d'autres conditions pour ce relevé); ceci donnera une FRF_{max} (le minimum donnant la FRF_{min}). Cette attitude, applicable lors de la caractérisation en laboratoire, est peu réaliste en situation de mesure. On peut donc dire que la FRF est "indéfinie" dès que la réponse de la caméra dépend de sa position relativement à la fente, soit pour une FRF inférieure à environ 0,8.

Le pouvoir de résolution spatiale de mesure (PRSM) de la caméra est donc défini par les valeurs élevées de la FRF.

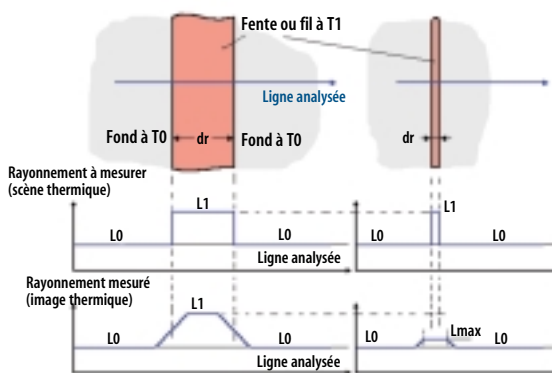
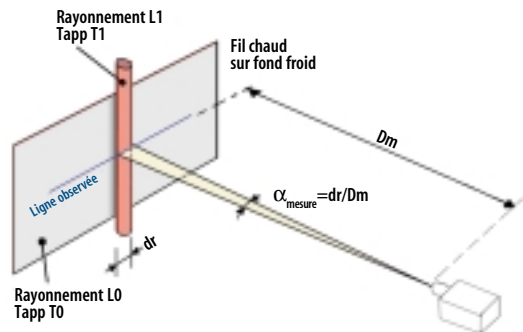
L'intérêt de la FRF, c'est de donner une

Fente thermique et fil chaud

Fente thermique



Fil chaud



d_f : largeur de la fente ou diamètre du fil. Lorsque d_f est en deçà d'une certaine valeur, la caméra ne mesure plus la valeur L1 mais une valeur Lmax inférieure à L1. Plus d_f est faible, plus Lmax est faible

$$FRF = \frac{L_{max} - L_0}{L_1 - L_0}$$

FRF dépend de Lmax et donc de d_f

indication du diamètre minimum du fil (ou la largeur de la fente) que l'on peut accepter en fonction du critère de mesure correcte que l'on s'est fixé. On l'a dit, on considère ici que la mesure est correcte si l'erreur systématique ne dépasse pas de 3 °C. On trouvera dans les encadrés "Correspondance entre la fonction de réponse à une fente et la largeur de la fente" et "Evaluation de l'erreur systématique", les valeurs minimales de d_f autorisées pour rester dans cet objectif de 3 °C. On y voit que pour une différence de température de 50 °C entre le point chaud et le fond froid, il faut que le diamètre du fil soit supérieur à 3,5 IFOV (voir dans l'encadré la correspondance entre d_f et le nombre d'IFOV). Pour un écart de température de 25 °C, il

suffit que le diamètre du fil dépasse 3 IFOV. Si l'écart de température se réduit encore, on pourra mesurer correctement la température de fils de diamètre encore plus faible.

En imagerie, ce problème ne nous préoccupe pas : c'est un problème de mesure et non d'image. La caméra voit très bien le fil, pourvu que celui-ci ait une température apparente différente de la température apparente du fond. Ainsi, l'IFOV est une notion liée à l'image et n'implique rien sur la validité 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. Quel que soit le diamètre du fil, la mesure sur un seul IFOV (donc par

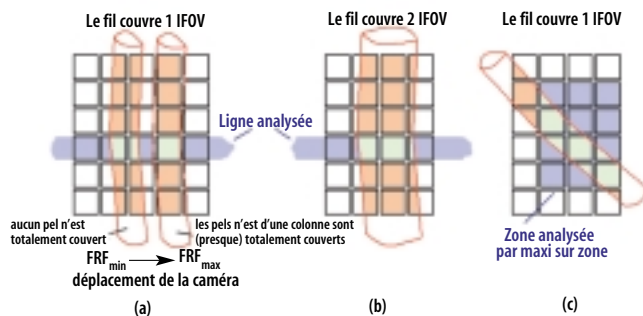
un seul pel de la matrice ou sur le pixel correspondant de l'image) est donc correcte, tous les pixels de l'image présentant des valeurs identiques.

Maintenance et prévention

Pourquoi a-t-on choisi la valeur de 70 °C sur un fond à 20 °C? 70 °C est la température maximale admissible pour l'isolant PVC des fils de faibles sections, température définie par la norme NF C 15-100. Or c'est la mesure sur de tels fils dans des armoires pouvant être à 20 °C qui pose problème au sens du PRSM des caméras. C'est une préoccupation en prévention des risques de dégradation des propriétés des isolants. A fortiori, quand ces fils partent en torons dans les goulottes et les chemins de câbles, leur température augmentera dans des proportions inconnues. Il est donc impératif qu'ils soient à température plus faible

Correspondance théorique entre l'image du fil (ou de la fente) et les pels du capteur matriciel de la caméra, selon la position relative de la caméra et du fil. On peut dire que la FRF est indéfinie dès que la réponse de la caméra dépend de sa position relativement au fil (ou à la fente), soit pour une FRF inférieure à environ 0,8 ;

Fente ou fil vus par la caméra



En (a), le fil ne couvrant qu'un IFOV, il n'est pas sûr qu'un pel (point élémentaire du capteur matriciel de la caméra) soit couvert par l'image du fil. Il faut déplacer la caméra pour s'en assurer et obtenir le signal maximum.

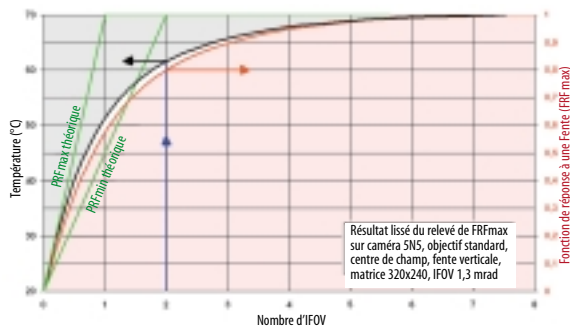
En (b), un fil couvrant deux IFOV est la limite pour assurer qu'au moins un pel est toujours complètement couvert par l'image du fil.

En (c), le fil couvre 1 IFOV, mais la fonction "maximum sur zone" n'est pas capable de trouver un pel intégralement couvert quelle que soit l'orientation relative du fil et de la caméra.

Correspondance entre la fonction de réponse à une fente (FRF) et la largeur de la fente

En rouge, relevé de la FRFmax (à fente verticale) d'une caméra 5N5 (8 à 12 μm), obtenu en laboratoire.

En noir, courbe correspondance en température pour des valeurs particulières de LO et L1, rayonnements de corps à températures apparentes $T_0 = 20^\circ\text{C}$ et $T_1 = 70^\circ\text{C}$ (correspondant à la température du fond et la température de la fente).



La largeur de la fente (d_f) est ici exprimée en nombre d'IFOV, c'est-à-dire le nombre d'angles IFOV sous lequel est vue la fente par la caméra.

Explication : d_f peut être exprimé en angle de mesure α_{mesure} pour la distance de mesure D_m (on a $\alpha_{\text{mesure}} = d_f/D_m$). A partir de là, on définit le nombre d'IFOV par la relation :

$$\text{Nombre d'IFOV} = \alpha_{\text{mesure}} / \text{IFOV}$$

Comment lire ce graphique? 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 sous un angle de 2 IFOV : la FRF lue sur la courbe rouge vaut 0,80 (la caméra mesure LO augmenté de 80 % de l'écart "L1 - LO"). Sur la courbe noire, pour 2 IFOV la température apparente mesurée sur le fil n'est pas de 70°C , mais de 62°C . Pour la caméra dont l'IFOV est de 1,2 mm @ 0,6 m, ce fil est de 1,5 mm ϕ (diamètre = 2,5 mm = 2 IFOV).

Pour un fil couvrant 4 IFOV, la mesure sera de $68^\circ\text{C} (\pm 2^\circ\text{C})$ au lieu de $70^\circ\text{C} (\pm 2^\circ\text{C})$.

Pour un fil couvrant 1 IFOV, la caméra répond à hauteur de 55 à 60 %, ce qui est proche de la valeur (50 %) qui définit l'IFOV des caméras à scanner. Même si une colonne de pels est couverte exactement par l'image du fil sur la matrice, le thermosignal prendra une valeur sensiblement égale à la demi-somme des rayonnements LO et L1. On ne mesure donc pas correctement la valeur du rayonnement et la mesure de température n'est pas correcte (52°C au lieu de 70°C).

dans les armoires elles-mêmes.

La précaution de 4 IFOV est donc une précaution en prévention. Dans la mesure où le fil couvrant ces 4 IFOV n'atteint pas 70°C (dans une armoire à 20°C), il est garanti que la mesure est correcte. Si le fil est clairement plus froid, la mesure de sa température est sans grand intérêt, comme d'habitude en maintenance où l'on s'intéresse aux échauffements plutôt qu'aux valeurs de températures absolues. Au-delà, si le fil dépasse 70°C , le contrôleur indiquera une priorité d'intervention, la valeur exacte n'ayant plus grande importance non plus. C'est donc proche des valeurs de seuils (ici 70°C) que la mesure se doit d'être correcte.

Le Distance to Spot Size Ratio ou SSR

Venons-en maintenant à un autre mode de caractérisation de la résolution spatiale. Le Distance to Spot Size Ratio (ou plus communément Spot Size Ratio, SSR) est une caractéristique (non normalisée) qu'un fabricant de pyromètres a reprise de la pyrométrie afin de spécifier le PRSM de la première caméra thermique qu'il a construite. Puis d'autres fabricants se sont mis à l'employer. C'est une notion proche de la FRF dans le principe, mais au lieu d'une fente thermique (ou fil chaud sur fond froid) on a affaire à un disque "thermique" chaud sur un fond froid. Le disque est de diamètre d_d et est vu à la distance de mesure Dm. Le SSR vaut par définition Dm/d_d (avec d_d défini plus bas) ; par principe, on ramène le dénominateur à l'unité, on a donc $SSR = (Dm/d_d) / 1$ que l'on écrit " $(Dm/d_d) : 1$ ". Par exemple, $d_d = 10 \text{ mm}$ @ 1 m donne un $SSR = 1000/10 = 100:1$.

D'origine, le SSR était destiné à spécifier les pyromètres Haute Température ; ils fournissent un signal L1 sur une cible étendue (d_d très grand) et LO = 0 (unité de rayonnement ou "ur") sur une cible à la température ambiante du labo de caractérisation. Si l'on diminue d_d , le signal prend une valeur Lm inférieure à L1. d_d est le diamètre de la cible lorsque le rayonnement mesuré a chuté de 10 % soit $Lm = 0,90 \times L1$.

Réutilisée ensuite pour les pyromètres Basse Température, la définition prend en compte, comme pour la FRF, l'écart de luminance entre L1 et LO ; d_d est donc le diamètre de la cible lorsque l'écart de rayonnement mesuré a chuté de 10 %, soit donc

$$Lm - LO = 0,90 \times (L1 - LO)$$

Appliquée à la thermographie, la notion demande de considérer maintenant la valeur maximale Lmax mesurée par la caméra lorsqu'elle observe la même cible, un ensemble de pels étant concerné par cette cible (on

La fonction de réponse à une fente (FRF) est une notion normalisée. Elle consiste à analyser la réponse de la caméra thermique lorsque celle-ci observe une fente thermique ou un fil chaud (de température apparente T_1) sur un fond froid (de température apparente T_0).

mesure donc L_{max} par la fonction "maximum sur zone". On a donc de la même façon $0,90 = (L_{max} - L_0) / (L_1 - L_0)$ obtenu pour le diamètre d_f .

Tout comme pour la FRF, les 10 % de sous-estimation de l'écart de rayonnement (erreur systématique en rayonnement) n'ont aucune correspondance avec ce qui serait une erreur relative (rapport de l'erreur et de la valeur vraie) de 10 % en température!

Mais on se retrouve avec le même problème que pour la FRF, puisque le SSR est également basé sur les rayonnements et non sur les températures. Aussi convient-il d'agir comme précédemment pour définir si la mesure de température est correcte ou non. Et pour que la caractéristique de SSR ait un sens (tout comme la FRF ou le nombre d'IFOV à utiliser), on doit donc nécessairement indiquer simultanément les températures T_0 et T_1 , l'erreur systématique que l'on accepte tout autant que le pourcentage qui sert à le définir (ici 90 %, non normalisé).

Et tout le reste ?

Influence de l'émissivité sur l'incertitude de mesure.

Nous avons parlé jusqu'ici en températures apparentes. Or ce n'est pas ce qui nous intéresse lors de l'exploitation des caméras où l'on veut des températures "vraies". Voyons rapidement l'influence qu'a l'émissivité sur la mesure, en admettant que le fil chaud a une émissivité comprise entre 0,83 et 0,87 (dispersion constatée pour l'isolant PVC entre 8 et 12 μ m), en supposant que l'environnement qui éclaire ce fil est à température uniforme de $T_e = 25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. En nous basant sur les calculs d'incertitude valables pour des mesures non répétitives et en utilisant la somme des incertitudes élémentaires tout aussi plausibles les unes que les autres, on obtient $70 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ainsi, la caméra mesure (sur un fil de fort diamètre à $70 \text{ }^\circ\text{C}$) une température apparente de $64 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$; la température calculée, avec une émissivité de $0,85 \pm 0,02$ et une température d'environnement de $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, est de $70 \text{ }^\circ\text{C} \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$.

Garantir une mesure correcte (soit au minimum $65 \text{ }^\circ\text{C}$) ne laisse maintenant plus que $2 \text{ }^\circ\text{C}$ d'erreur systématique possible. On est ainsi rendu au critère des 4 IFOV déjà évoqué pour évaluer l'erreur systématique acceptable pour réaliser une mesure correcte.

Influence de la forme du détecteur sur l'incertitude de mesure. Le pel est carré, mais le détecteur est le plus souvent rectangulaire, la grande dimension étant suivant l'horizontale. Ainsi, la FRF est plus faible lorsque la fente est horizontale. La caméra n'est pas

Evaluation de l'erreur systématique

La norme NF A 09-400 demande de relever les valeurs de d_f correspondant aux valeurs de FRF de 0,50, 0,90, 0,95 et 0,98. Dans le tableau, les valeurs de d_f ont été converties en nombre d'IFOV (voir encadré "Correspondance entre la fonction de réponse à une fente (FRF) et la largeur de la fente". Ce tableau donne également les incertitudes sur la valeur de la température. Celles-ci s'expriment en $^\circ\text{C}$ et non (comme on le voit parfois) en pourcentage d'une température, ce qui n'aurait aucun sens. Autre erreur courante, cela n'a aucun sens de dire qu'à une FRF de 95 % correspond une incertitude sur la température de 5 %, ou une exactitude de 95 % !

FRF	d_f (en nombre d'IFOV)	Erreur systématique	
		$T_1 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ sur $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_1 = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ sur $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
0,98	5	-1 $^\circ\text{C}$	-0,5 $^\circ\text{C}$
0,95	4	-2 $^\circ\text{C}$	-1,25 $^\circ\text{C}$
0,90	3	-4 $^\circ\text{C}$	-2,5 $^\circ\text{C}$
0,50	≈ 1	$\approx -18 \text{ }^\circ\text{C}$	$\approx -12,5 \text{ }^\circ\text{C}$

De la notion de "mesure correcte" où l'on accepte une erreur systématique de $3 \text{ }^\circ\text{C}$, il se déduit que l'on peut mesurer correctement la température apparente d'un fil couvrant 3,5 IFOV, fil à $70 \text{ }^\circ\text{C}$ se présentant sur un fond à $20 \text{ }^\circ\text{C}$. On prendra donc 4 IFOV.

Ainsi, prenons une caméra à matrice de $ndH \times ndV$ détecteurs, d'objectif d'angle horizontal HFOV($^\circ$) et de distance minimale de focalisation (ou de distance minimale autorisée) D_{mf} (m). Dans l'encadré "Correspondance entre la fonction de réponse à une fente (FRF) et la largeur de la fente", on a vu la relation qui liait le nombre d'IFOV et le diamètre du fil pour la distance de mesure D_m :

$$\text{nombre d'IFOV} = (d_f/D_m)\text{IFOV}$$

d'où on tire :

$$d_f = (\text{nombre d'IFOV}) \cdot D_m \cdot \text{IFOV}$$

Rappelons la relation de conversion de l'IFOV de radians en degrés (voir encadré "définition de l'IFOV") :

$$\text{IFOV (mrad ou mm@1 m)} = \text{HFOV}(^\circ) \cdot \pi \cdot 1000 / ndH \cdot 180^\circ$$

Ce qui donne la valeur d_f :

$$d_f = (\text{nombre d'IFOV}) \cdot D_m \cdot \text{HFOV}(^\circ) \cdot \pi \cdot 1000 / ndH \cdot 180^\circ$$

Pour revenir à l'exemple concret, on fera une mesure "correcte" sur un fil (à $70 \text{ }^\circ\text{C}$ sur un fond à $20 \text{ }^\circ\text{C}$) si le nombre d'IFOV est égal à 4, ce qui donne, pour le diamètre minimum du fil :

$$d_f = 70 \cdot \text{HFOV}(^\circ) \times D_{mf} \text{ (m)} / ndH$$

Pour un fil à $45 \text{ }^\circ\text{C}$ sur fond à $20 \text{ }^\circ\text{C}$, on admettra (voir tableau) un fil couvrant 3 IFOV pour obtenir une erreur systématique de l'ordre de $3 \text{ }^\circ\text{C}$.

Si l'écart de température se réduit encore, on pourra mesurer correctement la température de fils de diamètre de plus en plus faible.

"symétrique". Ce constat a amené certains auteurs à préconiser la caractérisation du PRSM par le SSR et non plus par la FRF : le SSR est beaucoup moins sensible à la translation de la caméra par rapport au disque et est pratiquement insensible à la rotation de la caméra autour de son axe optique.

En considérant la FRFmax pour une fente horizontale, le critère 4 IFOV se renforce encore davantage.

Influence d'autres facteurs sur la qualité de la mesure.

Le fil est cylindrique alors que la fente thermique est plane. La diminution de l'émissivité en fonction de l'angle d'observation implique que la fonction de réponse de la caméra à un fil chaud (FRFC) est

plus faible que la FRF.

Par ailleurs, la FRF est optimale au centre du champ, sur l'axe optique. Elle se dégrade quand on s'éloigne et a fortiori quand la caméra n'est pas focalisée sur le fil (ce qui se constate sur les fils de bords de champ avec les objectifs très ouverts des caméras à matrice non refroidie). Ainsi, on devra réaliser les mesures correctes au centre du champ. Enfin, la FRF varie en fonction de la distance de mesure D_m . Selon la conception des optiques, elle peut se dégrader pour les valeurs proches de la distance minimale de focalisation (D_{mf}).

Dominique Pajani
Institut de la thermographie