

Chapitre III : Analyse par thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge permet, via un équipement qui détecte l'énergie infrarouge émise par un objet, de la convertir en température et de la présenter sous forme d'image radiométrique de la distribution des températures.

III.1. Définition

Définition AFNOR : « la thermographie est la technique permettant d'obtenir, au moyen d'un appareillage approprié, l'image thermique d'une scène observée dans un domaine spectral de l'infrarouge ».

Thermographie signifie « écrire avec la chaleur » tout comme *photographie* signifie « écrire avec la lumière ». Ce cliché ainsi généré est appelé thermo gramme ou image thermique.

La démarche consiste donc à produire des images à partir de radiations thermiques invisibles. De ce fait, la thermographie infrarouge est un moyen instantané de détection des zones à problèmes, elle met en évidence des défauts que les méthodes plus conventionnelles ne peuvent déceler.

III.2. Domaines d'application

La thermographie infrarouge permet de détecter les problèmes dans les réseaux électriques (surtensions...) ou les déperditions thermiques (fuites dans l'isolation d'un bâtiment...). Il est également possible d'utiliser la thermographie embarquée (terrestre ou aérienne) afin de diagnostiquer rapidement un réseau (lignes à haute tension par exemple). Le thermographe évalue à l'aide de sa caméra thermique les anomalies thermiques d'une construction depuis l'intérieur ou l'extérieur de l'habitation.

- ✓ La thermographie et construction automobile.
- ✓ La thermographie du bâtiment.

- ✓ La thermographie et aéronautique / aérospatial.
- ✓ La thermographie et recherche scientifique.
- ✓ La thermographie et Contrôle Non Destructif (CND).
- ✓ La thermographie et médecine / vétérinaire

Dans le domaine de l'industrie, l'imagerie infrarouge permet (sans toucher ni dégrader l'échantillon ou l'objet étudié) de révéler de nombreux types d'anomalies dans le contrôle de fabrication, par exemple de systèmes de combustion ou de propulsion, de systèmes de refroidissement, de circuits imprimés, de nouveaux matériaux, pour étudier des phénomènes de changement de phase ou certaines réactions thermiques (exothermiques ou endothermiques), ou encore les écoulements laminaires ou certains vortex d'une conception aérodynamique.

Elle permet de mieux voir et mesurer certaines contraintes mécaniques, des phénomènes de contrainte thermique, de chocs thermiques, des anomalies de température, de dissipation thermique, de chaleur latente ou d'autres caractéristiques thermiques de matériaux, qui parfois traduisent des frottements anormaux, défaut de lubrification, des vices ou défauts cachés (bulles, fissures, interstices, phénomène de corrosion ou de délamination ou un décollement, etc.

III.3. Principe de l'analyse thermographique

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

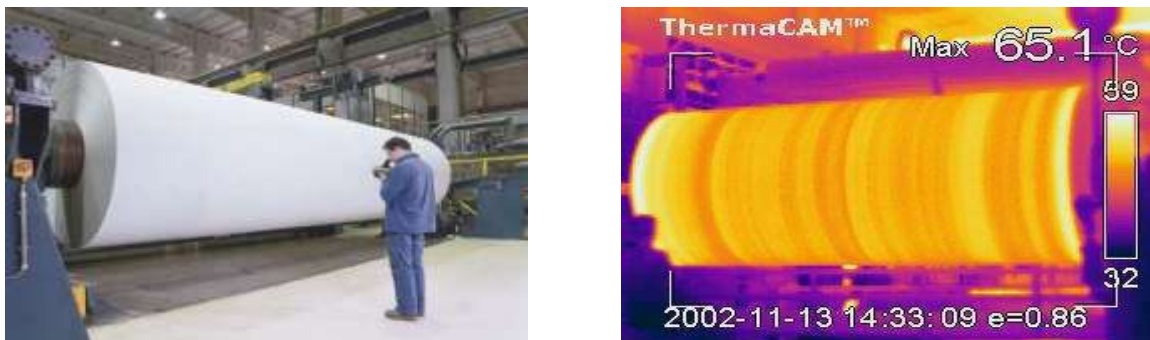


Figure III-28 : Image visible et thermo gramme correspondant d'un rouleau.

La figure III.29, montre un exemple courant de défaut dans une armoire électrique. La caméra infrarouge mesure tous les rayonnements émis et les restitue sous forme de thermo gramme :

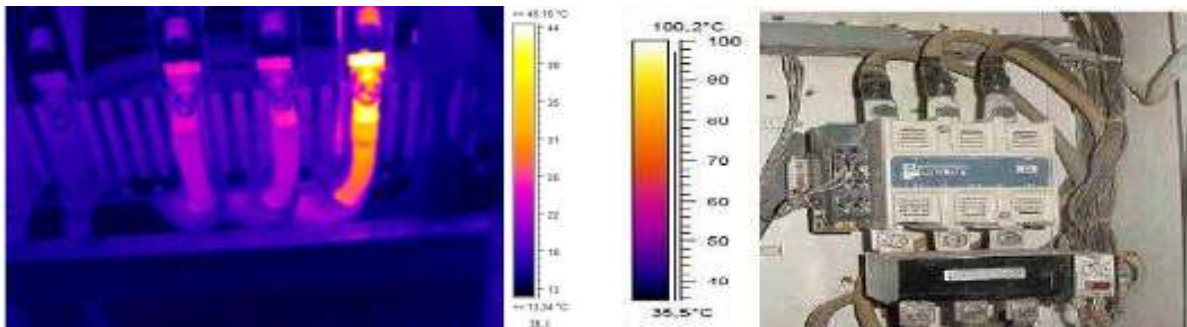


Figure III-29 : Exemple de défaut électrique de connexion (mauvais serrage).

Cette image thermique est composée par des niveaux de couleur, qui sont en corrélation avec les niveaux de T° mesures (échelle des températures). Dans ce cas, par comparaison des températures des trois connexions, le thermo gramme nous indique un mauvais serrage au niveau du câble droit.

III.4. Lois du rayonnement infrarouge

III.4.1. Le spectre électromagnétique

La lumière visible, les ondes radio, TV, les rayons X sont des rayonnements électromagnétiques. Le domaine visible s'étend des longueurs d'onde allant de 0,4 à 0,8 μm . La bande infrarouge (figure III.30) s'étend de 0,8 à 1000 μm . En thermographie infrarouge, on travaille généralement dans une bande spectrale qui s'étend de 2 à 15 μm et plus particulièrement dans les fenêtres 2-5 μm et 7-15 μm .

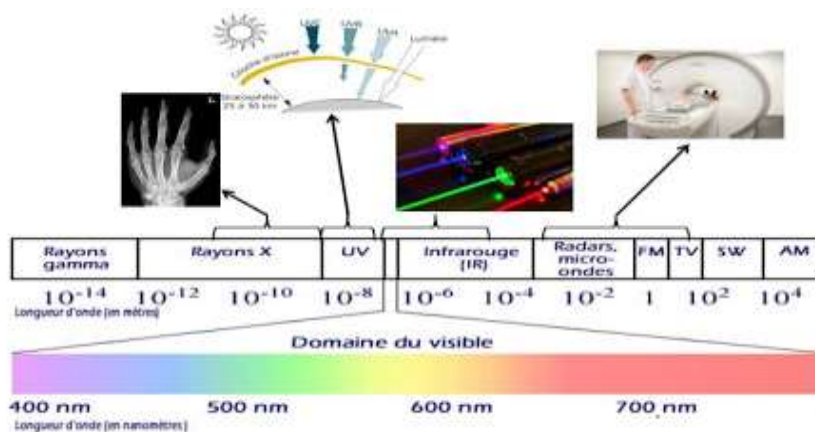


Figure III-30 : Rayonnements électromagnétiques.

III.4.2. Loi de Plank

Max Plank a calculé les flux de puissances électromagnétiques émis par un corps noir.

$$\omega_{\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c^2}{\lambda^5 (e^{h \cdot c \cdot \lambda / K \cdot T}) - 1} \left(\frac{\text{watts}}{\text{cm}^2 \mu} \right) \quad (\text{III.10})$$

Avec :

λ : Longueur d'onde.

ω_{λ} : Flux de puissance émis par un corps noir a la longueur d'onde λ .

c : Vitesse de la lumière = $3 \cdot 10^{10}$ cm/s.

h : Constante de Plank = $6,6 \cdot 10^{-34}$ Watt.s².

k : Constante de Boltzman = $1,4 \cdot 10^{-23}$ Watt.s²/°K.

T : Température absolue du corps noir en Kelvin.

Ces formulations mathématiques complexes sont représentées par des courbes (figure III.31). A partir de ces courbes, nous constatons que :

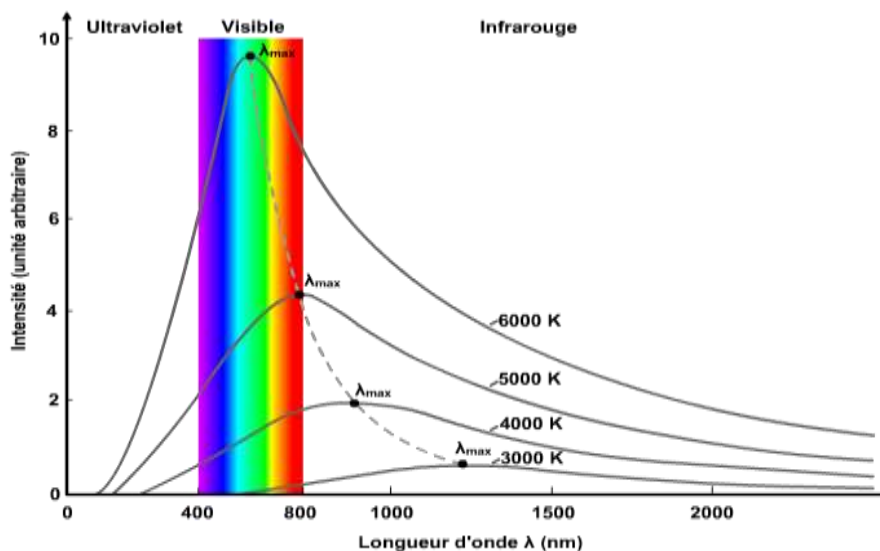


Figure III.31 : Rayonnement du corps noir pour différentes températures.

- ✓ La puissance électromagnétique émise croît avec la température du corps noir.
- ✓ L'émission de rayonnement passe par un maxima : ce maxima se produit à des longueurs d'onde de plus en plus faibles lorsque la température du corps noir croît.
- ✓ A partir d'une température de l'ordre de 520°C, l'émission du rayonnement infrarouge apparaît dans le domaine spectral visible (0,4-0,8μm) : les objets chauffés au moins à cette température deviennent donc visibles par l'œil humain de par la couleur rouge sombre.

- ✓ En-dessous de cette température, nous ne "voyons" pas les températures car l'émission de rayonnement se fait au-delà de la bande spectrale sur laquelle sont calibrés nos yeux. Des lors, pour visualiser des corps dont la T° est inférieure à 520°C , il faut utiliser des appareils dont le seuil de détection est inférieur à celui de l'œil humain.

III.4.2. Rayonnement incident

On appelle incident l'ensemble des rayonnements extérieurs à un objet qui viennent le frapper. Le rayonnement incident, noté W_{INCID} , est l'ensemble des rayonnements qui heurtent l'objet cible provenant d'une ou plusieurs sources. Une certaine partie du rayonnement, notée W_a , sera toujours absorbée, et l'objet cible en retiendra alors l'énergie. Une certaine quantité, notée W_r , sera réfléchiée. Cette dernière n'affectera aucunement l'objet cible. Il est enfin possible qu'une certaine proportion de rayonnement, notée W_t , traverse l'objet cible. Comme la quantité réfléchiée, elle n'affecte pas l'objet. Si nous écrivons cela sous forme d'une équation mathématique, nous obtenons:

$$\omega_\alpha + \omega_\rho + \omega_\tau = \omega_{INCID} = 100\%$$

Un objet possède une certaine capacité ou aptitude à :

- ✓ **Absorber** : ce que l'on appelle l'absorptivité, α
- ✓ **Réfléchir** : ce que l'on appelle la réflectivité, ρ
- ✓ **Transmettre** : ce que l'on appelle la transmissivité, τ

La somme des trois est toujours égale à 1 : $\alpha + \tau + \rho = 1$

III.4.3. Rayonnement résultant

Le rayonnement résultant, capté par une caméra infrarouge, est constitué de la somme de tous les rayonnements qui quittent la surface d'un objet, quelles qu'en soient les sources d'origine. Il provient de trois types de sources.

Sur la figure III-32, nous sommes en présence de trois sources de rayonnement : l'objet cible lui-même, une source devant et une source derrière.

Si nous observons l'objet cible depuis la droite, le rayonnement résultant est une combinaison du rayonnement de l'objet cible lui-même, du rayonnement provenant de la réflexion sur l'objet de la source de chaleur avant (située sur la droite) et du rayonnement issu de la source de chaleur arrière (située sur la gauche) traversant l'objet cible.

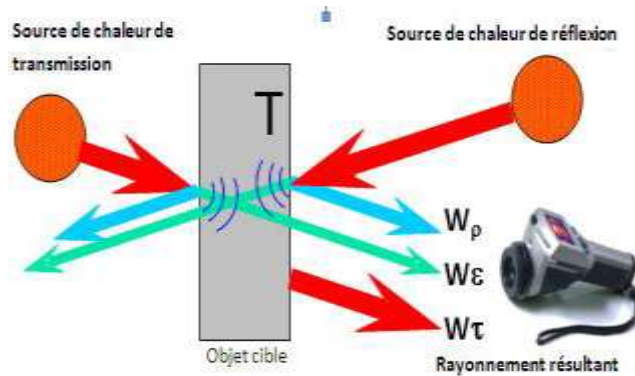


Figure III.32: Les trois sources de rayonnement réfléchi issues de l'objet.

III.4.3.1. Rayonnement émis

Intéressons-nous tout d'abord à la partie du rayonnement résultant en provenance directe de l'objet source. En thermographie infrarouge, la part la plus importante du rayonnement résultant est généralement constituée par la partie émise. Un objet dispose d'une certaine capacité ou aptitude à émettre, caractérisée par l'émissivité ϵ .

Le cote gauche de la plaque est vu comme apparemment plus chaud, pourtant la température est identique sur toute la plaque. Le pouvoir d'émission sur la cote gauche est supérieur à celui de la cote droite. L'intensité émise dépend de la température de l'objet et de son émissivité. Plus la température est élevée, plus l'intensité émise est grande. Un objet avec une émissivité supérieure rayonnera plus qu'un objet d'émissivité plus faible, même si la température est identique. C'est la combinaison de la température et de l'émissivité qui détermine la puissance du rayonnement infrarouge.

III.4.3.2. Autres sources de rayonnement

Nous avons abordé la première des trois parties qui caractérise l'énergie émise directement par l'objet cible. Les deux autres composantes proviennent des objets situés respectivement derrière et devant l'objet cible. Si l'intensité du rayonnement émis par l'objet cible dépend de sa propre température et de sa propre émissivité, les deux autres composantes du rayonnement résultant sont associées uniquement aux sources externes. Les proportions réfléchies et transmises, dépendent toutefois directement de la réflectivité et de la transmissivité de l'objet cible.

Remarque : Cela nous amené à la conclusion suivante : le rayonnement résultant peut provenir de trois sources différentes. Sur l'ensemble du rayonnement issu de l'objet cible, une certaine proportion sera :

- ✓ Émise directement par l'objet.
- ✓ Réfléchi par l'objet depuis une source située devant lui.
- ✓ Transmise par l'objet depuis une source située derrière lui.

Écrit sous forme mathématique, nous obtenons la formule suivante :

$$W_{\varepsilon} + W_{\rho} + W_{\tau} = W_{RESULT} = 100\%$$

Cette équation ressemble à celle formulée pour le rayonnement incident. La seule différence entre les deux formules est que W_{α} est remplacée par W_{ε} .

Un objet possède une certaine capacité ou aptitude à :

- ✓ Emettre – que l'on appelle l'émissivité, ε
- ✓ Réfléchir – ce que l'on appelle la réflectivité, ρ
- ✓ Transmettre – ce que l'on appelle la transmissivité, τ

La somme des trois est toujours égale à 1. : $\varepsilon + \rho + \tau = 1$.

III.5. Moyens de mesure

Pour estimer l'état de santé d'une installation, et prévenir les risques (incendie, arrêt de production, etc.), il y a nécessité de voir et de mesurer permet d'assurer cette analyse quand l'état de santé est corrélé avec les températures.

Il existe plusieurs instruments de mesure thermographie, mais les deux instruments plus connus sont :

- ✓ Le thermomètre infrarouge.
- ✓ La caméra infrarouge.

III.5.1. Le thermomètre infrarouge

Les thermomètres infrarouges sont particulièrement recommandés dans des domaines où la mesure de température par contact est impossible :

- ✓ Nécessite une réponse rapide.
- ✓ Sur des objets en mouvement.
- ✓ Derrière une fenêtre.
- ✓ Si le thermomètre peut être détruit par le contact.
- ✓ Si un profil de température existe sur la surface.

- ✓ Si la température peut être affectée par le contact.



Figure III-33: Thermomètre infrarouge.

III.5.2. La caméra infrarouge

La caméra infrarouge ne mesure pas les températures, mais les rayonnements, alors que, visualisée par le thermographe, l'image thermique que la caméra fournit pourra être transformée en thermo-gramme, en images des températures. C'est bien ce que l'on cherche pour déterminer l'état de santé des matériels et surtout prévoir ce qui se passera dans l'avenir, en maintenance prédictive. Le thermographe, aidé de sa caméra, va voir dans l'infrarouge les objets froids et, parmi ces objets, ceux qui sont anormalement chauds ou anormalement froids. Ayant vu, le thermographe pourra quantifier et fournir une cartographie des températures.



Figure III-34 : Caméra infrarouge.

III.5.3. Imageur thermique fixe

Les thermomètres infrarouges fixes sont généralement utilisés dans les procédés industriels où le thermomètre peut être installé à un poste fixe.

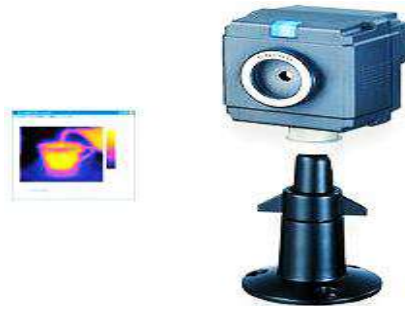


Figure III-35 : Imageur thermique fixe.

III.6. Techniques d'analyse d'images thermiques

L'analyse d'images thermiques se traduit souvent par la recherche de zones singulières dont le comportement diffère du reste de l'image. C'est la raison pour laquelle les appareils disposent de nombreuses fonctions permettant d'augmenter artificiellement les contrastes locaux. Le maniement de ces fonctionnalités permet de trouver plus facilement ce qu'on cherche à mettre en évidence dans une image. Les trois fonctions les plus importantes pour l'amélioration des images thermiques sont le **cadrage thermique, l'isotherme et les palettes**.

III.6.1. Cadrage thermique

Le cadrage thermique est l'ajustement de l'échelle de l'image permettant d'optimiser le contraste pour les besoins de l'analyse. Le cadrage thermique suppose l'utilisation des contrôles de niveau et de gain de la camera. Lorsque la zone d'intérêt de l'image est choisie, il faut ajuster ces deux paramètres de telle sorte que les couleurs de la palette couvrent au plus juste cette partie de l'image. Les zones moins intéressantes de l'image peuvent, quant à elles, se situer en dehors de l'échelle. Elles seront alors généralement représentées en noir ou blanc.

Sur l'exemple de la figure III-36, dans l'image de droite, le gain est plus réduit et le niveau est sensiblement plus élevé. Il en résulte un meilleur contraste. Cette image est plus facile à analyser car la zone thermique est mieux mise en évidence.

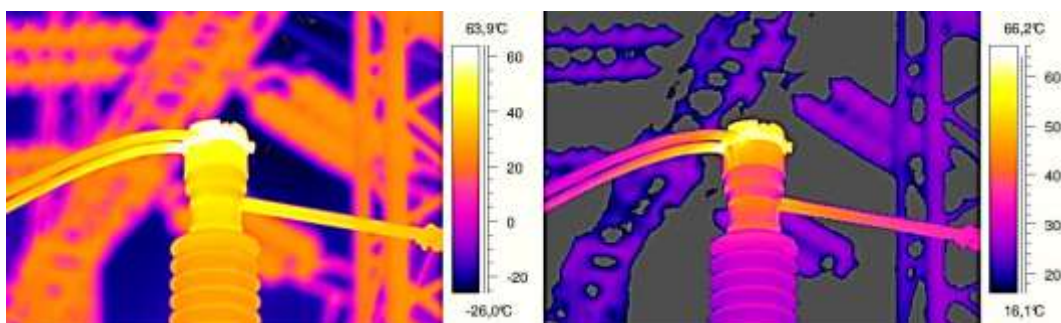


Figure III. 36 : Même image, réglée automatiquement (gauche) et cadrée thermiquement sur le composant (droite).

III.6.2. Isotherme

L'isotherme remplace certaines couleurs dans l'échelle par des tons opposés. Il marque un intervalle de température apparente égale. L'isotherme remplace uniquement une plage de couleurs par une autre contrastant plus avec les couleurs utilisées dans l'image. L'isotherme peut être déplacé de haut en bas sur l'échelle et élargi ou réduit selon vos besoins. Un exemple est illustré sur la figure III-37.

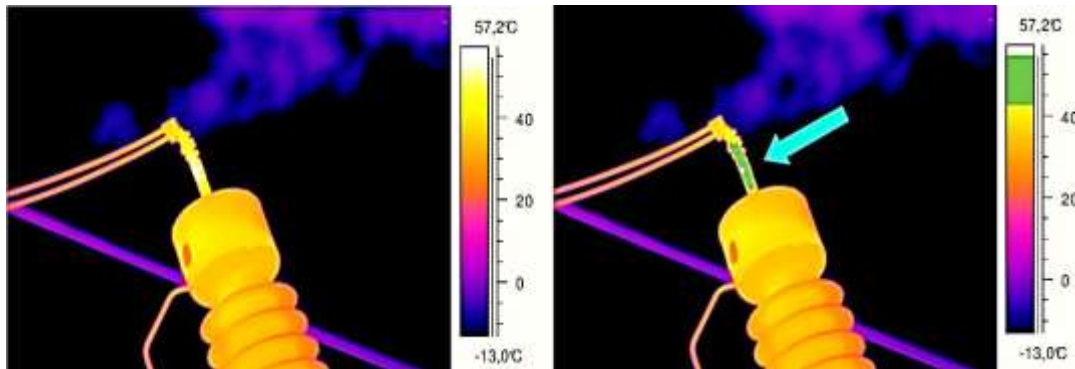


Figure III-37: Tête de transformateur haute tension avec une isotherme.

III.6.3. Palettes

Une palette assigne différentes couleurs pour marquer des niveaux de température apparente définis. Elle peut être plus ou moins contrastée selon les couleurs utilisées.

Une image thermique peut être généralement affichée avec un maximum de 256 nuances de couleur ou de gris simultanément. Sur une échelle de gris, la couleur noire se trouve à l'une des extrémités et elle s'éclaircit progressivement à chacun des 256 pas jusqu'à devenir blanche. Ce qui signifie en fait qu'il n'y aura que très peu de contraste entre, par exemple, la 93^{ème} et la 94^{ème} nuance de gris. L'image couleur permet, quant à elle, d'utiliser une large gamme de couleurs pour obtenir un meilleur contraste. Les couleurs doivent être judicieusement assorties les unes aux autres, pour donner un semblant de lisse à l'image, et pour qu'elle ne soit pas pénible à observer. Un exemple de thermo gramme d'une cuve de stockage pris avec différentes palettes est illustré sur la figure III-38.

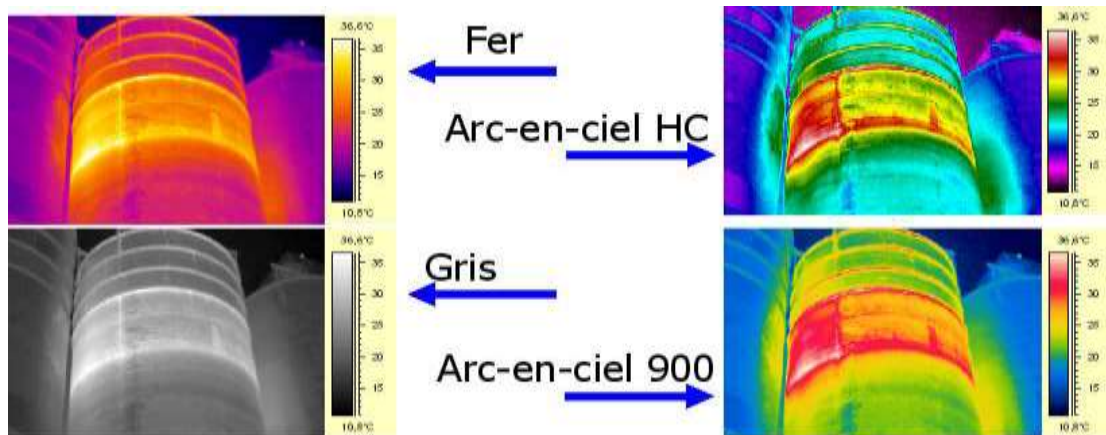


Figure III-38 : Exemples de différentes palettes.

Une règle d'or est à appliquer pour le choix de palettes:

- ✓ Utilisez des palettes très contrastées sur des objets cible peu contrastés.
- ✓ Utilisez des palettes peu contrastées sur des objets cible très contrastés.

III.7. Classification des défauts en thermographie en maintenance

III.7.1. Condition de température absolue

Si le composant peut être touché par un opérateur habilité, sa température de surface ne doit dépasser :

- ✓ Sans précaution, le seuil continu de douleur soit environ 60°C.
- ✓ Avec précaution, le seuil limite fixe par le constructeur.

Les tableaux suivants donnent des températures maximales courantes admissibles par des composants et matériaux.

Roulements à rouleaux		Roulements à billes, matériaux		Composants de transmission	
Cage plastique	120	Aluminium	120	Courroies V	60
Cage acier	300	Bronze/cuivre	175/180	Système à chaînes	Limitation du lubrifiant
Cage bronze	300	Bronze/plomb	230	Système à engrenages	Limitation du lubrifiant
Joint feutre	100	Cadmies	260		
Joint caoutchouc nitrile	130				

III.7.2. Condition de température différentielle, charge nominale

Le composant fonctionnant à charge nominale, est comparé à un autre travaillant dans des conditions similaires. Ce composant de référence :

- ✓ Peut-être situé dans le champ de visée et sa température de référence est alors mesurable simultanément à celle du composant défectueux,
- ✓ Peut-être situé en dehors du champ de visée, mais sa température de référence est mesurable sur une seconde image,
- ✓ Peut faire l'objet d'un "historique" et sa température de référence est considérée comme ayant été mesurée au moment de l'établissement des "conditions de bases".

Ecart ΔT	Critère de sévérité
< 10 °C	Cela peut être un défaut. Dans l'incertitude, c'est à surveiller.
10 à 20°C	Défaut 1 (avère). Planifier une mesure corrective.
20 à 40°C	Défaut 2 (sérieux). Mesures correctives urgentes, dans la semaine ou la quinzaine.
> 40°C	Défaut 3 (critique). Intervenir immédiatement.

Si on admet qu'un composant a une température au minimum égale à celle de l'ambiance, alors, s'il présente un ΔT supérieur à 40°C, il se retrouve classe deux fois ; vis-à-vis du critère différentiel et vis-à-vis du critère absolu. Il faut noter que l'on retrouve la même situation, avec un niveau limite très supérieur toutefois, pour des composants classes « militaires ». Notons également dans ce cas une autre base de référence, puisqu'il s'agit de l'air ambiant (MIL-STD-2194 1988).

Ecart ΔT base sur la comparaison avec la température de l'air ambiant	Critère de sévérité
10 – 25 °C	Probable
25 – 40 °C	Important
40 – 70 °C	Obligatoire
> 70°C	Immédiat

III.7.3. Condition de température différentielle, charge inférieure au nominal

Dans le cas d'un défaut de nature électrique, il convient de compenser l'écart obtenu par un facteur lié à la charge. L'écart brut ΔT et le pourcentage de charge ayant été mesurés, l'écart effectif à considérer pour le tableau de la page précédente est alors calculé selon la formule :

$$\Delta T_{\text{effectif}} = \Delta T_{\text{brut}} / (\text{Pourcentage de charge})^2$$

III.7.4. Condition de température différentielle, mesure par vent

Le vent doit être mesuré au moyen d'un anémomètre. L'écart brut ayant été mesuré, l'écart effectif à considérer pour le tableau de la page précédente est alors calculé selon la formule :

$$\Delta T_{\text{effectif}} = \Delta T_{\text{brut}} * \text{vitesse du vent}^{0,449} \text{ (Pour un vent compris entre 1 et 8 m/s)}$$

III.7.5. Condition de température différentielle, mesure par vent et charge inférieure au nominal

Les deux conditions de compensation précédentes se juxtaposent.

$$\Delta T_{\text{effectif}} = \Delta T_{\text{brut}} * \text{vitesse du vent}^{0,449} / (\text{Pourcentage de charge})^2$$