



1. INTRODUCTION

11 – Notions de température et de chaleur :

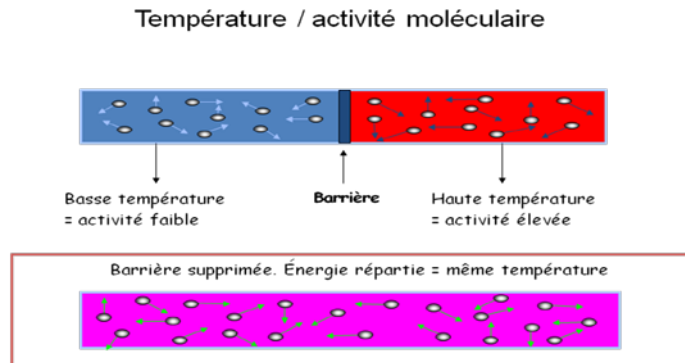
Dans un matériau, les molécules sont agitées d'un mouvement permanent, à une certaine vitesse. La température dépend de la vitesse moyenne de déplacement des molécules. La chaleur dépend de la vitesse moyenne de déplacement des molécules ainsi que de leur nombre (chaleur = énergie).

Au zéro absolu, il n'y a plus d'agitation moléculaire.

La température d'un corps est une grandeur physique qui caractérise le niveau énergétique de ce corps : celle-ci s'exprime en degrés Celsius (°C) ou en Kelvin (K). L'échelle en Kelvin est référencée au zéro absolu qui vaut $-273,15^{\circ}$.

A cette température, tout corps a une valeur énergétique nulle. La Chaleur s'exprime en Joules (J) ou en calories (cal) avec $1\text{cal} = 4,18\text{J}$. Un Joule correspond à la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C , un gramme d'un corps dont la chaleur massique est égale à celle de l'eau à 15°C sous pression de 101325 pascals.

Plus un corps a une surface importante, plus son nombre de molécules est important. Donc il rayonne beaucoup plus de chaleur qu'un corps d'une surface plus faible.



12 – Les transferts de chaleur :

La conduction :

En physique, la conductivité thermique est la grandeur introduite pour quantifier l'aptitude d'un corps à conduire de la chaleur. Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par unité de temps sous l'action d'une différence de température entre les deux extrémités d'un échantillon de ce corps, donc en présence d'un gradient de température.

La convection :

Un débit ou une circulation de liquide ou de gaz peut transporter avec lui une certaine quantité d'énergie thermique. Ce transport de chaleur porte le nom de CONVECTION thermique. Dans la convection, la chaleur se sert du fluide comme véhicule pour se déplacer. Il existe deux types de transferts convectifs:

La convection naturelle et la convection forcée

Le rayonnement :

Tous les corps de l'univers émettent un rayonnement d'ondes électromagnétique. Ce rayonnement se propage à la vitesse de la lumière. Il ne nécessite pas de milieu matériel. Il existe dans le vide.

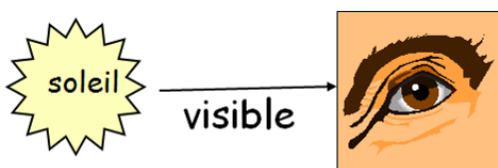
Exemple : plaque électrique dans une pièce noire :

Même si on ne « voit » pas la chaleur émise, on la « sent » progressivement. Si la plaque est à la puissance maximum, et si on ne met pas de casserole dessus, elle va devenir rouge.

Au fur et à mesure que la température augmente, les caractéristiques du rayonnement changent. Une caméra de thermographie peut « voir » les changements imperceptibles à l'œil !

13 – La caméra infrarouge :

L'énergie infrarouge est similaire à la lumière, excepté qu'elle n'est pas visible à l'œil. L'énergie visible du soleil stimule l'œil. L'énergie infrarouge du soleil est absorbée (par la peau par exemple) : les caméras de thermographie mesurent cette énergie.

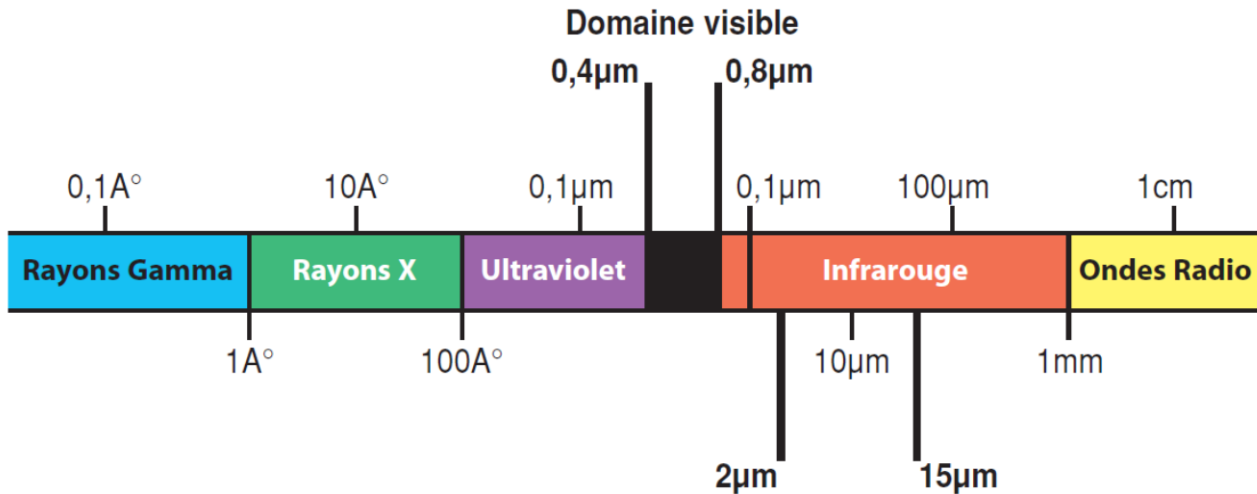




2. LES LOIS DU RAYONNEMENT

21 – 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 s'étend de 0,8 à 1000 µm et peut-être divisée en plusieurs sections :

- l'infrarouge proche : 0,8 à 3 µm ;
- l'infrarouge moyen : 3 à 6 µm ;
- l'infrarouge éloigné : 6 à 15 µm ;
- l'infrarouge lointain : 15 à 1000 µm.

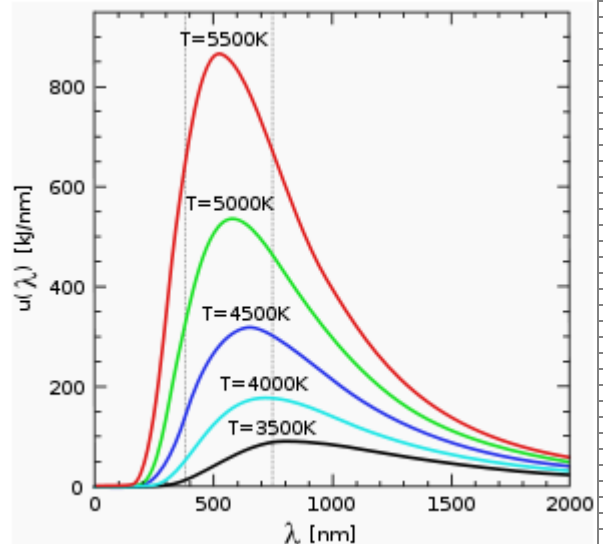
En thermographie infrarouge, on travaille généralement dans une bande spectrale qui s'étend de 2 à 15 µm et plus particulièrement dans les fenêtres 2-5 µm et 7-15 µm.

22 – Lois théoriques du rayonnement :

Tout corps à une température supérieure à 0 degré kelvin (zéro absolu, soit -273,15°C) émet un rayonnement électromagnétique appelé rayonnement thermique.

Le rayonnement infrarouge est le rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde est comprise entre 700 nanomètres et 1 millimètre. Etant donnée la loi de conservation de l'énergie, pour qu'un corps rayonne cela doit venir de lui-même : c'est une énergie interne.

En thermographie, on utilise le rayonnement pour mesurer la température des corps. Pour chaque température et longueur d'onde données, il existe une énergie maximum rayonnée que tout corps ne peut dépasser. Ces informations sont données par **les courbes de Planck**



La loi de Wien donne la longueur d'onde (en micromètre) correspondant à l'énergie maximale rayonnée d'un corps noir à une température donnée T (en Kelvin)

$$\lambda = \frac{2898}{T}$$

La longueur d'onde du maximum de rayonnement infrarouge décroît lorsque la température du corps noir augmente.

C'est la **loi de Stephan-Boltzmann** qui permet de quantifier ces échanges. L'énergie E rayonnée par un corps s'écrit :

$$E = S \cdot \sigma \cdot T^4$$

Avec:



S9- Stratégie & Organisation de la maintenance

E: énergie rayonnée exprimée en W / m^2 .
 σ : constante de Stephan-Boltzmann = $5,6703 \cdot 108 W.m^{-2}.K^{-4}$
 S : surface du corps exprimée en m^2
 T : température du corps en Kelvin

Un corps noir est un corps dont la surface absorbe la totalité du rayonnement reçu. NB : un corps noir n'existe pas matériellement, il représente un objet idéalisé dont la seule radiation émise serait la radiation thermique seulement dépendante de sa propre température.

3. GRANDEURS D'INFLUENCE POUR LA MESURE DE T° PAR THERMOGRAPHIE

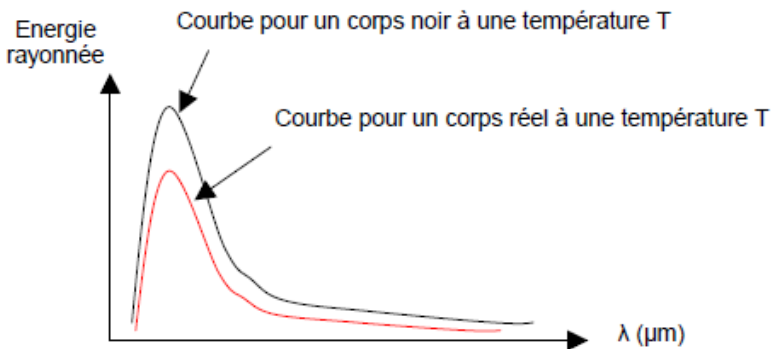
31 – Le facteur d'émissivité :

L'émissivité d'un matériau (souvent écrite ϵ), est le rapport de l'énergie qu'il rayonne par celle qu'un corps noir rayonnerait à la même température. C'est donc une mesure de la capacité d'un corps à absorber et à ré-émettre l'énergie rayonnée.

L'émissivité est une grandeur comprise entre 0 et 1.

Les lois précédentes ne sont pas tout à fait vraies et il est nécessaire d'introduire ce paramètre émissivité.

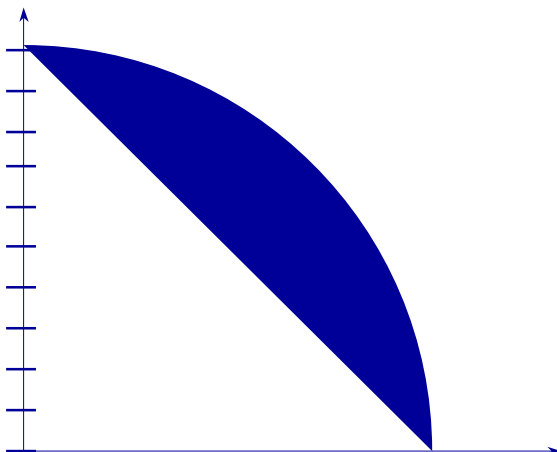
La courbe de Planck précédente devient alors :



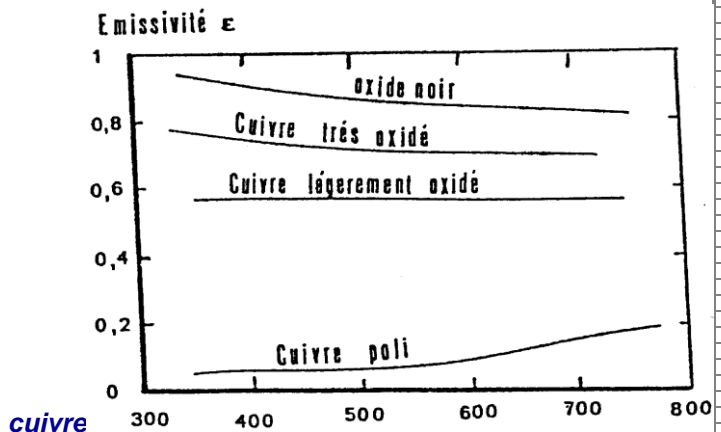
Facteurs d'influence de l'émissivité :

- Le matériau constituant le corps et son état de surface : plus la surface est rugueuse ou oxydée, plus l'émissivité est élevée.
- La longueur d'onde : l'émissivité d'un corps est sélective : comme on travaille dans des bandes spectrales étroites, un objet sélectif peut-être assimilé à un corps gris dont l'émissivité est constante.
- La direction de l'émission : l'émission du rayonnement infrarouge varie avec l'angle d'observation d'une même surface d'un corps. L'émissivité reste constante jusqu'à plus ou moins 50° par rapport à la normale : au-delà, celle-ci chute fortement.
- La température du matériau : la variation de l'émissivité est due dans ce cas à la modification de l'état de surface du matériau par la température.

Variation de l'émissivité en fonction de l'angle d'observation



Variation de l'émissivité en fonction de l'état de surface du matériau : ex du





S9- Stratégie & Organisation de la maintenance

Ainsi, pour réaliser une mesure correcte, il est nécessaire de positionner sa caméra perpendiculaire à la cible de mesure (bien en face) pour que la valeur d'émissivité entrée dans la caméra corresponde bien à la réalité. Une tolérance de +/- 45° est acceptée.

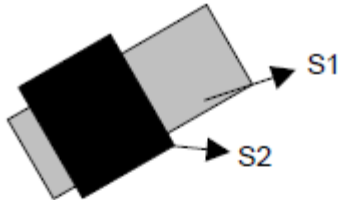
L'émissivité est un paramètre fondamental en thermographie. Il est essentiel de bien la régler avant toute prise de mesure.

Détermination du facteur d'émissivité :

Il existe cependant quelques méthodes pour déterminer l'émissivité d'un matériau :

- Tableau de valeur : bonne approximation mais attention aux conditions de validité, à utiliser avec précaution (cf. exemples page suivante) ; Expérience : pas de problème sur câbles, manchons, isolants, plastiques, caoutchouc, délicat sur métaux polis (mieux s'ils sont oxydés) ;
- Peinture de « référence » : méthode par approximations successives ; Thermocouple à contact et Sonde PT100 de référence : délicat, mais peut donner une bonne approximation.
- Selon norme ASTM E1933-99A

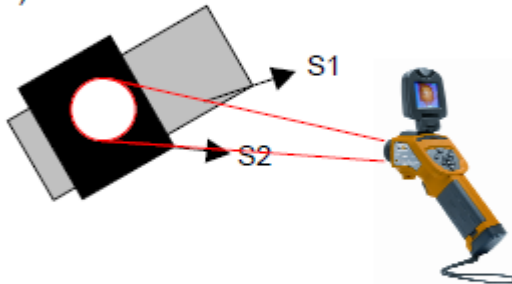
1)



Soit S1 la surface du matériau dont on cherche à déterminer l'émissivité. Appliquons sur S1 une couche de peinture noire S2 dont l'émissivité est connue.

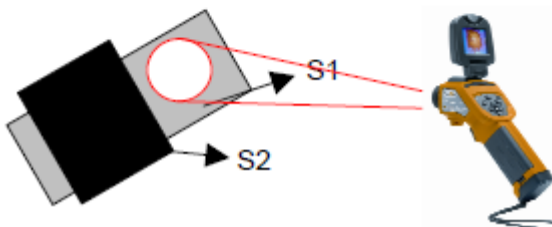
2) S1 et S2 étant dans les mêmes conditions environnementales, les deux surfaces sont à la même température.

3)



Avec la RayCAM, on mesure la température de S2 avec une émissivité de 0,95 paramétrée dans la caméra

4)



Une fois la température déterminée, on déplace la caméra vers la cible dont l'émissivité est inconnue. Il suffit de modifier ce paramètre sur la RayCAM jusqu'à obtenir sur la cible inconnue la même valeur de température que sur S2. L'émissivité du corps est alors déterminée.



S9- Stratégie & Organisation de la maintenance

Quelques exemples :

- T est la température en °C à laquelle a été réalisée la mesure.
- "dl" est la longueur d'onde en μm ou la bande spectrale.
- ϵ_n (dl & T) est l'émissivité normale pour dl et T.

Matériaux	T(°C)	dl (μm)	ϵ_n (dl & T)
Peau	30	2 à 5	0,98
Papier	30	8 à 12	0,95
Bois brut	20	2 à 5	0,83
Argile	30	8 à 12	0,95
Béton	20	2 à 5	0,94
Sol sec	20	2 à 5	0,90
Sol humide	20	2 à 5	0,95
Eau	0 à 100	8 à 12	0,93
Eau	0 à 100	2 à 5	0,95
Glace	< 0	8 à 12	0,95
Peinture mate	20 à 100	2 à 5	0,95
Peinture brillante	20 à 100	2 à 5	0,90
Vêtements (Textile)	30	8 à 12	0,95
Acier oxydé	100	2 à 5	0,74
Acier poli	100	2 à 5	0,07
Acier rouillé	20	2 à 5	0,69
Aluminium en feuille mate	100	2 à 5	0,09
Argent	30	8 à 12	0,02
Carbone graphite	30	8 à 12	0,70/0,80
Cuivre grossier	30	8 à 12	0,05/0,10
Fer galvanisé	30	2 à 5	0,25
Fonte en fusion	1300	2 à 5	0,28
Or	30	8 à 12	0,01/0,10
etc...			

32 – Le facteur de réflexion {r} & la température environnante {T°env} :

L'objet réel réfléchit en partie du rayonnement en provenance de sources de chaleur environnantes.

La quantité de rayonnement réfléchi dépend de la quantité d'énergie émise par la source auxiliaire et le coefficient de réflexion de la surface de l'objet.

Dans le cas général de mesure par thermographie, le facteur de réflexion vaut :

$$r = 1 - \epsilon$$

La quantification du rayonnement émis par la source « parasite » est assimilée à celui qui serait émis par un radiateur idéal ou corps noir : on mesure donc à l'aide du même appareil de mesure infrarouge la température de la source environnante en considérant donc son émissivité égale à 1.

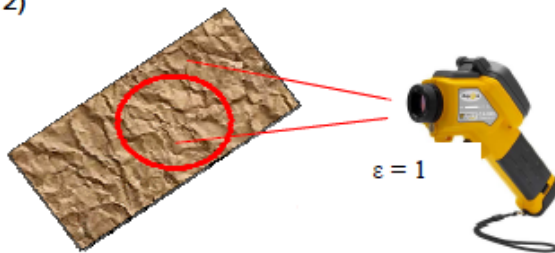
Cette température appelée température environnante intègre ainsi dans le calculateur de la caméra infrarouge le rayonnement qui se réfléchit partiellement sur la surface de l'objet.



• Détermination de Tref selon norme ASTM E1933-99A

1) On place au plus près de la scène visée, avec la même orientation par rapport à la caméra, une feuille d'aluminium ménager préalablement froissée puis défroissée grossièrement.

2)



On fait l'hypothèse que la feuille d'aluminium est un réflecteur parfait sur lequel se réfléchit un corps noir équivalent à l'environnement moyen.
Le réglage d'émissivité dans la caméra est donc : $\epsilon = 1$

3) On mesure la température du corps noir équivalent à l'environnement sur la feuille d'aluminium, au moyen d'un outil d'analyse adapté - spot avec moyennage sur plusieurs positions ou encore mieux, la moyenne calculée sur une large zone.

4) Cette Température Réfléchi est à entrer manuellement dans le calculateur. Elle deviendra active dès lors que l'émissivité d'un objet réel sera inférieure à 1.

33 – La température atmosphérique T_{atm} et la distance de mesure $\{d\}$:

L'atmosphère dans laquelle on réalise la thermographie émet des rayonnements infrarouges qui perturbent également la mesure de la température d'un corps.

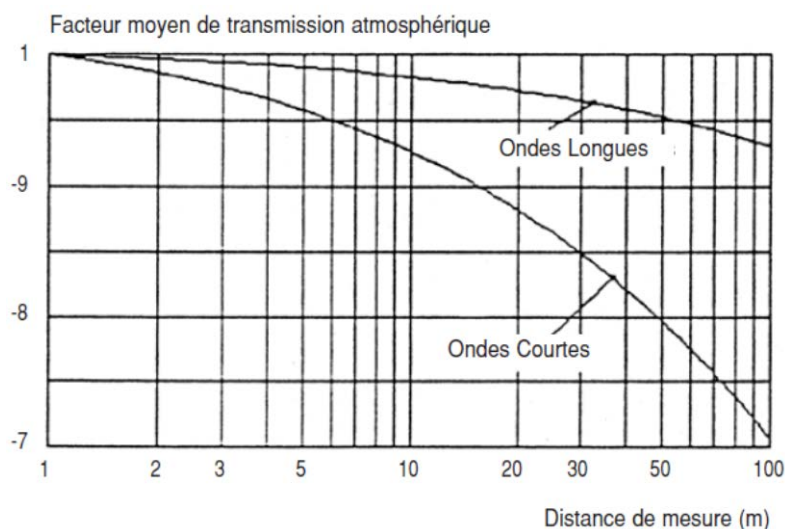
Les rayonnements émis par l'atmosphère doivent être déduits par le calculateur de la caméra thermique : ceux-ci dépendent de la température atmosphérique et de son émission.

L'atmosphère est un milieu semi-transparent aux rayonnements infrarouges : celle-ci propage tous les rayonnements en provenance de l'objet réel (émis & réfléchis).

Cette propagation n'est pas optimale et est régie par le facteur moyen de transmission atmosphérique.

Ce facteur, assimilé aux fenêtres spectrales utilisées par les caméras thermiques, dépend de la distance de mesure entre la caméra et l'objet et du taux d'humidité atmosphérique.

Le graphe ci-dessous donne les courbes du facteur moyen de transmission de l'atmosphère en fonction de la distance de mesure, pour une atmosphère à 50% d'humidité relative.





S9- Stratégie & Organisation de la maintenance

3. PRINCIPE ET METHODE, CAS DES EQUIPEMENTS ELECTRIQUES

31 – Principe de détection :

Tout équipement conducteur parcouru par un courant électrique s'échauffe : c'est l'effet Joule (Physicien anglais (1818-1889) qui étudia la chaleur dégagée par les courants électriques dans les conducteurs) :

Formule de Joule :

$$W = R \cdot I^2 \cdot t$$

- **W** Energie calorifique dissipée en Joule(s) ;
- **R** Résistance électrique de l'équipement en ohm(s) ;
- **I** Courant électrique en ampère(s) ;
- **t** Temps de passage du courant en seconde(s).

Loi de Joule :

Dans un équipement conducteur parcouru par un courant, la quantité d'énergie calorifique dissipée par échauffement est proportionnelle à la résistance électrique de l'équipement au carré du courant et au temps pendant lequel passe ce courant.

L'appareillage électrique en charge (parcouru par des courants) s'échauffe donc jusqu'à ce que l'énergie calorifique produite par les courants soit égale à l'énergie dissipée dans l'espace environnant : il y a dans ce cas équilibre thermodynamique.

Une installation électrique est composée de nombreux appareillages par lesquels transitent des courants. Ces appareils sont reliés entre eux par des éléments conducteurs : l'ensemble des liaisons génère des milliers de connexions.

- Dans des conditions identiques de fonctionnement, les équipements et connexions similaires doivent avoir le même comportement thermique.
- Dans des conditions spécifiques de fonctionnement, l'appareillage électrique doit se comporter thermiquement dans des limites nominales déterminées.

Dans chaque cas, la thermographie infrarouge met en évidence des anomalies de comportement thermique par des mesures de températures relatives ou absolues.

Ces anomalies plus communément appelées « points chauds » identifient des défauts ou dégradations locales par des élévations anormales de température.

Les points chauds trouvent généralement leur origine suite à la variation de la résistance de passage du courant.

Les défauts thermiques les plus souvent détectés sont (par ordre décroissant) :

- Problème de serrage.
- Usure, oxydation ou corrosion de contacts.
- Positionnement incorrect de contacts mobiles.
- Problème de calibration de l'appareillage.
- Déséquilibre des charges entre phases.
- Ventilation insuffisante de tableaux ou locaux électriques.
- Problème de conception des installations (Problèmes d'induction).

32 – Méthode d'inspection :

L'opérateur est muni d'une caméra infrarouge classique, portable, avec une résolution thermique faible afin de mettre en évidence de faibles écarts de température.

Les installations électriques doivent impérativement fonctionner en régime permanent sans nécessairement disposer de la pleine charge : tout le système doit être en équilibre thermodynamique.

Les équipements uniquement sous tension sont incontrôlables par thermographie : seuls les courants génèrent les échauffements à analyser.

L'inspecteur analyse les composants des cellules haute-tension (HT), basse-tension (BT), coffrets et tableaux électriques divers.

Le contrôle par infrarouge est réalisé en trois temps :



S9- Stratégie & Organisation de la maintenance

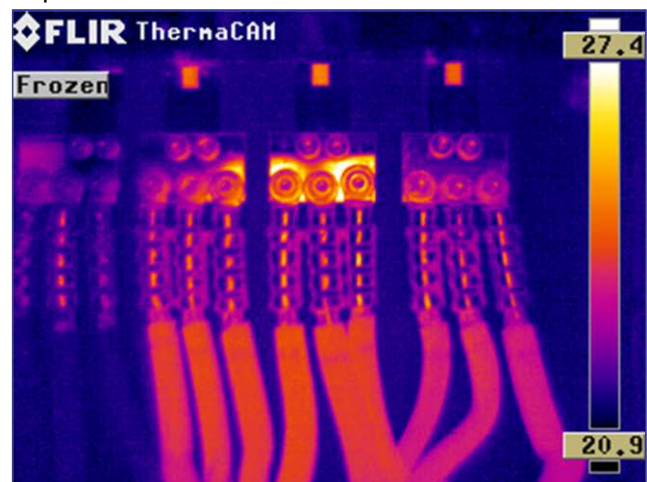
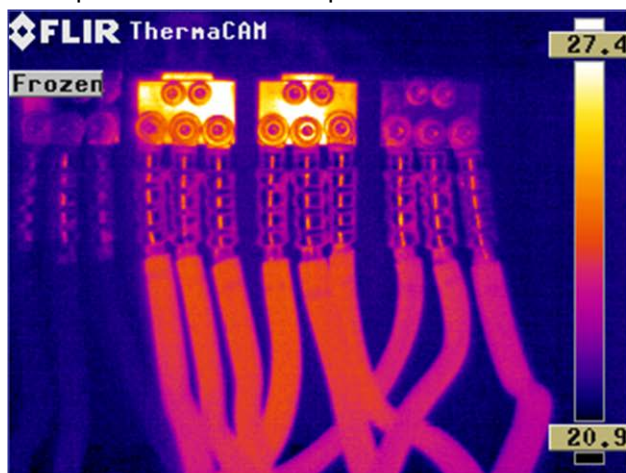
1. La visualisation du comportement thermique global des éléments d'un même tableau : celle-ci met en évidence des points dont les températures sont plus élevées.
2. L'opérateur doit interpréter la scène thermique afin de différencier les échauffements normaux (bobines de contacteurs, résistances, selfs, transformateurs) des échauffements anormaux : ces derniers sont facilement identifiables par comparaison entre composants identiques fonctionnant dans des conditions similaires. Cette opération implique une connaissance « certaine » de l'appareillage électrique ainsi que de bonnes notions pratiques dans l'application de la thermographie infrarouge :
 - beaucoup de composants électriques ont une émissivité faible (cuivre, aluminium), donc un pouvoir réfléchissant très élevé. L'opérateur ne doit pas confondre un point anormalement chaud avec « un point chaud fantôme » résultant de la réflexion d'une source de chaleur environnante, voire l'image thermique de l'analyste sur le composant.
 - Le technicien doit assurer constamment son interprétation en éliminant au maximum les phénomènes de réflexion par modification de l'angle d'observation de la caméra infrarouge ou par masquage des sources de chaleur environnantes.
3. Pour la quantification des températures des points chauds, l'opérateur cherchera toujours à réaliser la mesure des points chauds sur des parties de bonne émissivité (boulons oxydés, isolants) afin d'éliminer la prise en compte des rayonnements perturbateurs réfléchis et ainsi diminuer les temps d'analyse. Les mesures dans ce cas sont dites « relatives » : la mise en évidence d'un point chaud se fera par comparaison des températures mesurées sur l'élément défectueux et sur un élément similaire fonctionnant dans des conditions identiques (élément de référence). **C'est la différence de température ou ΔT° qui caractérise le défaut thermique** : si l'émissivité intégrée n'est pas tout à fait correcte, l'erreur de mesure se vérifie à la fois pour le point chaud et pour le point référentiel, leur différence reste sensiblement la même. Dans le cas où le technicien analyste ne peut comparer deux éléments, il doit réaliser des mesures dites « absolues » : cette technique nécessite la prise en compte de toutes les grandeurs d'influence en vue de la quantification des températures réelles ou vraies. Cette méthode s'applique généralement sur des équipements fonctionnant au-dessus de leurs limites nominales définies par les fabricants d'équipements électriques (appareillage sous calibré, installation non ventilée, etc.).

Effet du vent : Le vent « refroidit » les défauts. La correction dépend donc de la vitesse du vent (entre 1 et 8 m/s). Ce phénomène est valable en extérieur et augmente inversement à l'épaisseur des objets.

$$\Delta T_{\text{corrigé du vent}} = \Delta T_{\text{brut}} \times V^{0,45}$$

La réflexion : Un corps réel n'est pas un corps noir. Il n'émet qu'une fraction de ce qu'émettrait un corps noir porté à la même température : c'est l'émissivité. Considérant la loi de Kirchhoff, un corps réel réfléchit donc également de l'énergie provenant de son environnement. Ceci constitue le problème majeur des mesures en extérieur ou en environnement rayonnant.

Exemple de réflexion de l'opérateur sur une connexion électrique :





S9- Stratégie & Organisation de la maintenance

33 – Classement des défauts :

Conditions 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 fixé par le constructeur.
- ainsi que en électrique, la température du composant ne doit normalement pas excéder l'ambiance de +40°C.

Conditions d'écart de température.

La température d'un composant supposé défectueux est comparée avec celle d'un composant sain identique travaillant dans des conditions similaires.

Écart ΔT	Sévérité
< 10 °C	Cela peut être un défaut. Dans l'incertitude, c'est à surveiller.
10 à 20°C	Défaut 1 (avéré). Planifier une mesure corrective.
20 à 40°C	Défaut 2 (sérieux). Mesures correctives urgentes, dans la semaine généralement.
> 40°C	Défaut 3 (critique). Intervenir immédiatement.

Si on admet qu'un défaut est de nature résistive, l'écart brut de température doit être compensé en fonction du carré de la charge.

$$DT \text{ effectif} = DT \text{ brut} \times (Inominal / Imesuré)^2$$

L'écart effectif est à considérer pour la classification du défaut

Exemple : on mesure un écart de 9°C entre deux phases d'un disjoncteur de calibre 100 ampères, alors que le courant mesuré est de 30 ampères. Considérant l'écart brut (9°C), il ne s'agit pas d'un défaut.

$$DT \text{ effectif} = DT \text{ brut} \times (Inominal / Imesuré)^2$$

$$DT \text{ effectif} = 9 \times (100 / 30)^2 = 100 \text{ °C}$$

⇒ **Défaut critique: Il faut intervenir immédiatement.**

Sans considération de la charge, on aurait pu croire à un défaut mineur.

35 – Avantages de l'analyse infrarouge des installations électriques :

- Contrôle Non Destructif (CND).
- Technique de contrôle « on stream » : les installations fonctionnent normalement pour la réalisation de la thermographie.
- Analyse sans contact sur des équipements soumis à des contraintes non maximales.
- Rapidité & Précision du diagnostic des installations.
- Mesures fiables de par la précision des scanners IR modernes : sensibilités accrues.
- Sécurité d'analyse : visualisation et quantification des températures avec respect des distances de sécurité.
- Maintenance conditionnelle : interventions uniquement sur les éléments défectueux repérés par l'analyse infrarouge.

Conséquences :

- diminution des frais directs d'entretien;
- augmentation de la fiabilité des installations.
- Maintenance préventive : prévention d'anomalie potentielle avec optimalisation de l'évaluation de la gravité des défauts par adaptation de la fréquence d'analyse (suivis évolutifs, préventions des dégradations, ...).
- Coût peu élevé (proportionnellement aux coûts d'entretien classique et aux coûts d'arrêt de production).