

Thermodynamique

Rayonnement infrarouge

Thermodynamics

Infrared radiation

Réf :
253 174

Français – p 1

English – p 31

Version : 0000

Banc d'essai infrarouge

Infrared test bench

Sommaire

Introduction	3
1. Partie théorique : Principe de la thermographie infrarouge	3
1.1 Définition	3
1.2 Principe	4
1.3 Rayonnement infrarouge	5
1.3.1 Le spectre électromagnétique	5
1.3.2 Eléments de radiométrie	6
1.4 La thermographie	8
1.4.1 Fiabilité des mesures	8
1.4.2 Détection	8
1.4.3 Résolution thermique	8
1.4.4 Précision thermique.....	9
1.4.5 Résolution spatiale	9
1.4.6 Conditions des mesures.....	9
1.5 Techniques d'analyse d'images thermiques	10
1.5.1 Cadrage thermique.....	10
1.5.2 Isotherme	11
1.5.3 Palettes	11
2. Partie expérimentale	13
2.1 Etude comparative de l'émissivité de différents matériaux	15
2.2 Calibrage de l'émissivité sur la caméra thermique	15
2.3 Détermination de l'émissivité d'un matériau	15
2.4 Influence de l'état de surface du matériau sur son émissivité	15
2.5 Etude de l'influence de l'angle sur la mesure	15
2.6 Etude du paramètre résolution spatiale à l'aide de la fente	15
2.7 Cas particulier : matériau transparent	15
2.8 Mise en évidence de la réflexion des matériaux	15
3. Service Après-Vente	26

Introduction

Lors de ces travaux pratiques, nous allons effectuer plusieurs manipulations et mesures à l'aide d'une caméra infrarouge. L'objectif est de caractériser le comportement thermique des matériaux, de régler la caméra en fonction du cas à étudier afin de porter un regard critique sur la mesure effectuée par thermographie infrarouge.

1. Partie théorique : Principe de la Thermographie Infrarouge

La thermographie infrarouge est une technique qui permet la mesure de température, sans contact, de faire un diagnostic sur l'état d'un système électrique, mécanique, thermique en fonctionnement. Elle est largement utilisée pour optimiser les tâches de maintenance sans interrompre le flux de production, et réduire au maximum les coûts d'entretien.

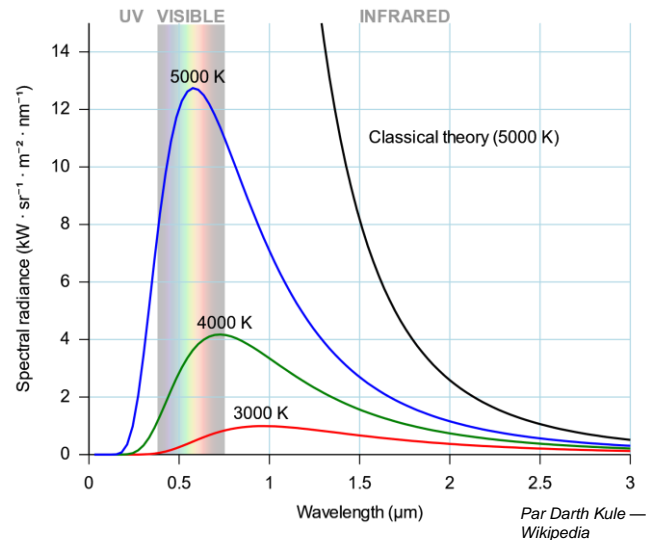
1.1 Définition

La thermographie infrarouge est une technique permettant d'obtenir, au moyen d'un appareillage approprié, l'image thermique d'une scène thermique observée dans le domaine spectral de l'infrarouge. Autrement dit la thermographie infrarouge permet de visualiser des gradients de température que l'on ne peut voir dans le visible.

1.2 Principe

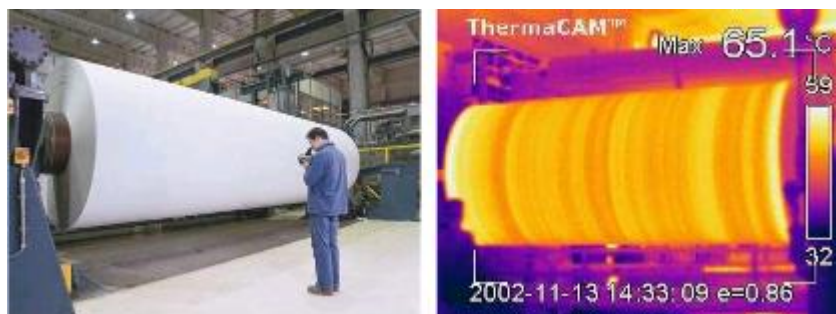
Tout objet dont la température dépasse le zéro absolu (soit $0^\circ\text{Kelvin} = -273,15^\circ\text{C}$), émet un rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement dépend directement de la température de surface de l'objet.

L'œil humain peut « voir » la chaleur pour des hautes températures : soleil (6000°C) ; filament de tungstène (2200°C), fer rouge (600°C), mais pour les objets à basse température ($<500^\circ\text{C}$) qui émettent peu de rayonnement, l'œil humain est inadapté (voir graphique Loi de Planck). L'utilisation de capteurs de rayonnement infrarouge pallie à ce



défaut : les caméras infrarouges, qui captent le rayonnement entre 3,6 et 13 microns de longueurs d'onde, convertissent ce rayonnement en image thermique, et elles permettent l'intégration des températures.

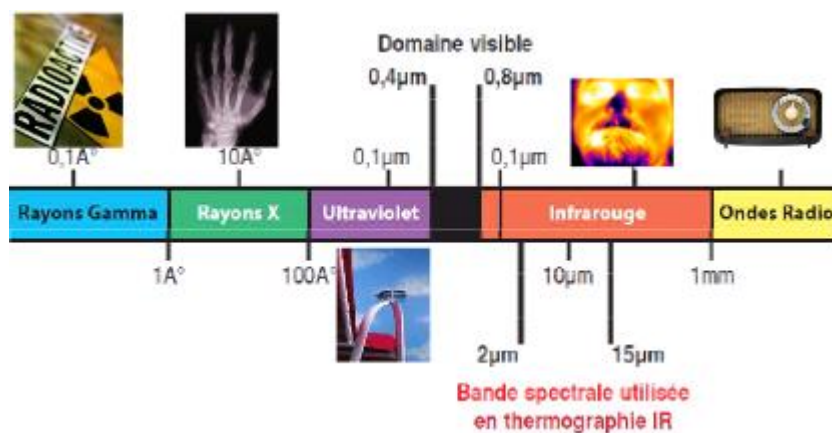
Une caméra infrarouge est un radiomètre ayant comme signal d'entrée une puissance de rayonnement (W/m^2) et comme signal de sortie une tension électrique proportionnelle au signal d'entrée. Cette tension est traduite en indications visuelles et numériques. Les caméras thermographiques ont été conçues pour fournir une image, appelée thermogramme, de phénomènes statiques ou dynamiques dans le domaine spectral de l'infrarouge.



1.3 Rayonnement infrarouge

1.3.1 Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique est divisé, plus ou moins arbitrairement, en plages appelées bandes, principalement suivant les méthodes d'émission ou de détection des rayonnements. Il n'y a pas de différence fondamentale entre les rayonnements des différentes bandes du spectre électromagnétique. Ils respectent tous les mêmes lois, avec des nuances résultant des différences de longueur d'onde.



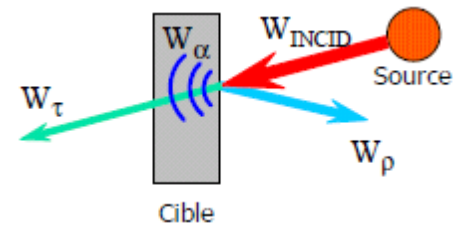
La lumière visible, les ondes radio, TV, les rayons X sont des rayonnements électromagnétiques. Le domaine visible s'étend des longueurs d'onde allant de $0,4$ à $0,8 \text{ μm}$. La bande infrarouge s'étend de $0,8$ à 1000 μm . En thermographie infrarouge, on travaille généralement dans une bande spectrale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

Les longueurs d'ondes sont exprimées le plus souvent en μm (micromètres) ou nm (nanomètres) mais une unité ancienne est encore souvent utilisée : l'Ångström (Å). La relation entre ces différentes unités est : $10\,000 \text{ Å} = 1\,000 \text{ nm} = 1 \text{ μm}$, ou bien $1 \text{ Å} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 0,1 \text{ nm}$

1.3.2 Eléments de radiométrie

a. Principe

On appelle *incident* l'ensemble des rayonnements extérieurs à un objet qui viennent le frapper. Dans le schéma ci-contre, 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_{α} , sera toujours absorbée, et l'objet cible en retiendra alors l'énergie. Une certaine quantité, notée W_{ρ} , sera réfléchie. Cette dernière n'affectera aucunement l'objet cible. Il est enfin possible qu'une certaine proportion de rayonnement, notée W_{τ} , traverse l'objet cible. Comme la quantité réfléchie, elle n'affecte pas l'objet. Si nous écrivons cela sous forme d'une équation mathématique, nous obtenons :

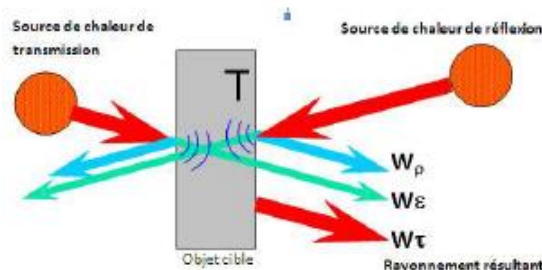


$$W_{\alpha} + W_{\rho} + W_{\tau} = W_{\text{INCID}} = 100\%$$

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 : $\alpha + \rho + \tau = 1$



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, 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.

b. Emissivité

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 .

Elle est notée ε et varie avec la température et la longueur d'onde.

$$\varepsilon = \frac{\text{Quantité de rayons émis par l'objet réel}}{\text{Quantité de rayons émis par le corps noir}}$$

c. Notion de corps noir

Un corps noir est un élément rayonnant idéal qui absorbe 100 % d'un rayonnement incident, ce qui signifie qu'il ne réfléchit ni ne transmet aucun rayonnement. Cela n'existe pas dans la réalité, puisqu'il y a toujours un petit quelque chose de réfléchi par exemple. Pour un corps noir, l'émissivité $\varepsilon = 1$ (et $\rho + \tau = 0$).

d. Notion de corps gris

Le terme de corps gris est une notion abstraite qui permet d'effectuer des mesures relatives. On pose comme hypothèse de base que dans la bande des 3 à 5 μm , l'objet mesuré est un corps gris.

e. Les corps brillants

Les corps brillants, tels les miroirs, ont une très grande réflectivité. En se reportant à l'équation de Drapper, on a : $\varepsilon(\lambda) = 0$.

1.4 La thermographie

1.4.1 Fiabilité des mesures

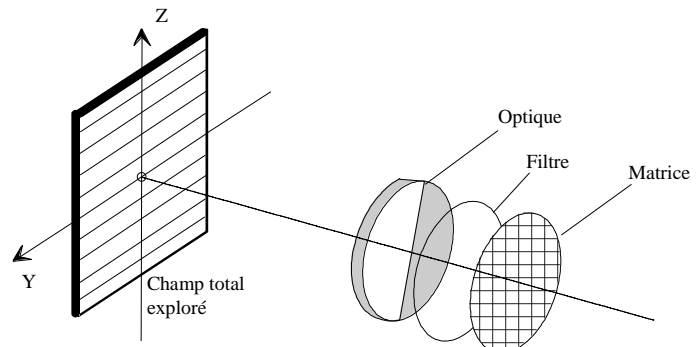
Un des principaux problèmes posés par la thermographie infrarouge réside dans la fiabilité des mesures. Elle dépend :

- du contrôle de la dérive des températures absolues ;
- du contrôle du bruit, c'est-à-dire de la perturbation, générée par l'élévation de température du capteur.

Pour éviter ce phénomène, on peut refroidir le capteur mais les caméras de dernière génération n'ont plus besoin d'être refroidies, un système logiciel de correction de la dérive des mesures est inclus dans l'appareil. Régulièrement (toutes les 30 s) des sondes de température intégrées dans la caméra informent de la température. La partie traitement peut ainsi en tenir compte pour recalibrer la mesure.

1.4.2 Détection

Les caméras à infrarouge sont équipées d'une matrice en oxyde de vanadium regroupant une multitude de capteurs qui transforment le rayonnement reçu en tension électrique.



1.4.3 Résolution thermique

C'est la plus petite variation de température discernable par l'appareil. C'est aussi ce l'on appelle le M.R.T.D (*Minimum Resolvable Temperature Difference*).

En d'autres termes il s'agit du contraste de températures apparentes nécessaire pour séparer les détails d'une image. Exemple : 0,1°C à 30°C.

Elle dépend :

- de la surface du détecteur ;
- de la bande passante de l'électronique (le bruit augmente avec la bande) ;
- de la détectivité spécifique du capteur (minimum requis) ;
- de la quantité de flux émise.

1.4.4 Précision thermique (justesse)

C'est la valeur absolue de la mesure, connue avec plus ou moins de précision. Exemple : 0,5°C d'erreur pour 15°C soit 3 %. Cette précision est appelée aussi N.E.T.D. : *Noise Equivalent Temperature Difference*. Le bruit apparaît comme l'effet de neige lorsqu'une caméra travaille avec une luminosité trop faible. Il ne faut pas confondre précision et résolution.

1.4.5 Résolution spatiale

C'est la capacité à mesurer avec précision la température de petits objets, "petit" étant défini par rapport à la dimension totale de l'image. C'est aussi le nombre de points séparables. La résolution spatiale est liée à des facteurs tels que la qualité de l'optique, la bande passante de l'électronique, les caractéristiques du balayage donc du détecteur. Elle définit la taille du phénomène que l'on peut observer sur un corps en fonction de la distance d'enregistrement. On sait que :

$$L_{\text{reçu}} = L_{\text{objet}} + L_{\text{environnement}}$$

1.4.6 Conditions des mesures

Il faut respecter les conditions suivantes :

- angle de mesure ne dépassant pas 45 ° par rapport à l'objet ;
- émissivité > 0,6 ;
- taille de l'objet conforme à la résolution spatiale ;
- prise en compte de l'environnement extérieur.

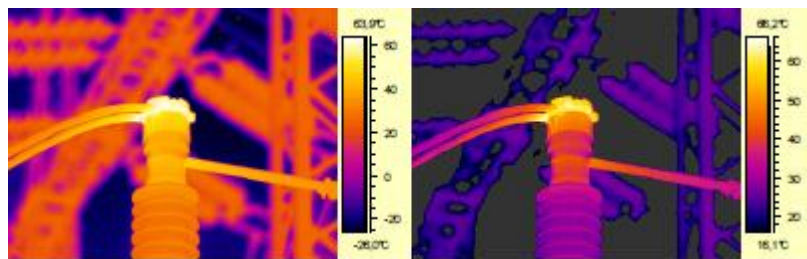
1.5 Techniques d'analyse d'images thermiques

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*.

1.5.1 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 caméra. 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.

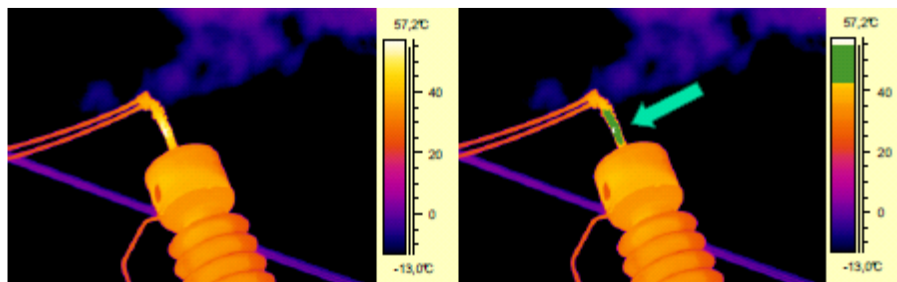
Sur l'exemple de la figure ci-dessous, dans l'image de droite, le gain est plus réduit et le niveau est sensiblement plus élevé. Il en résulte un meilleur contraste. Cette image est plus facile à analyser car la zone thermique est mieux mise en évidence.



Même image, réglée automatiquement (gauche) et cadrée thermiquement sur le composant (droite)

1.5.2 Isotherme

Certaines caméras thermiques disposent d'une option Isotherme qui permet de remplacer 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.

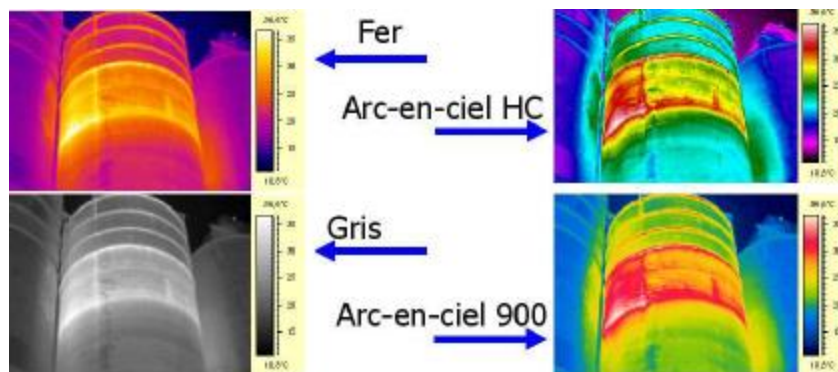


Tête de transformateur haute tension avec une isotherme

1.5.3 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 thermogramme d'une cuve de stockage pris avec différentes palettes est illustré sur la figure ci-après.



Exemples de différentes palettes

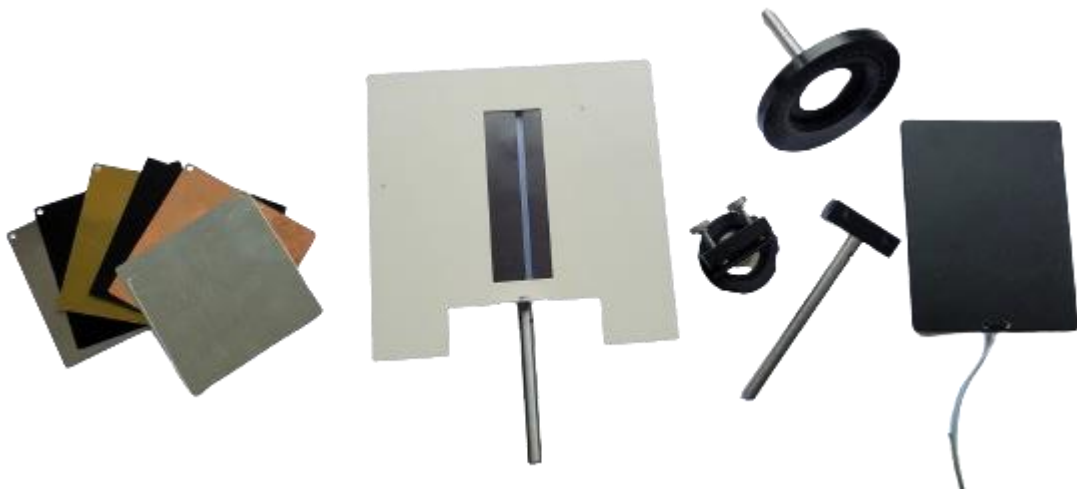
Une règle d'or est à appliquer pour le choix de palettes :

- Utilisez des palettes très contrastées sur des objets cibles peu contrastés
- Utilisez des palettes peu contrastées sur des objets cibles très contrastés

2. Partie expérimentale

Matériel nécessaire – inclus dans « Banc d'essai IR »

- Lot de 8 échantillons de différents matériaux : aluminium, inox (1 face brute, 1 face polie), cuivre, laiton, acier (1 face brute, 1 face peinte en noir), inox, PP transparent, PET transparent.
- 1 résistance chauffante,
- 1 fente de largeur réglable,
- 2 supports de matériaux,
- 1 support angulaire.



Compléments nécessaires

Pieds d'optique ou banc d'optique avec cavaliers



Alimentation 12 V - 5 A



Caméra thermique Jeulin



Avant le TP

Fixer la caméra sur le pied ou banc et identifier les différents disques.



Acier
1 face peinte / 1 face brute



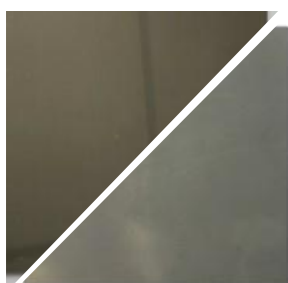
Cuivre



Laiton



Aluminium



Inox
1 face brute / 1 face polie



PET Lumex
transparent



PP translucide



Inox

2.1 Etude comparative de l'émissivité de différents matériaux

Rappel : *La capacité ou l'aptitude d'un objet à absorber le rayonnement incident est toujours identique à sa capacité à rayonner sa propre énergie. Si un objet est capable d'absorber les rayonnements incidents, il pourra aussi émettre sa propre énergie sous forme de rayonnement. L'inverse est bien entendu vrai, un objet peu absorbant aura forcément une émissivité faible. Un objet opaque avec cette caractéristique est en réalité un bon réflecteur. Par conséquent, un bon réflecteur aura une émissivité faible.*

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 . Elle est notée ε et varie avec la température et la longueur d'onde.

$$\varepsilon = \frac{\text{Quantité de rayons émis par l'objet réel}}{\text{Quantité de rayons émis par le corps noir}}$$



Pendant cette manipulation, on utilise l'échantillon en acier bi-face qui a une face traitée avec peinture noire (1) et une face non traitée (2).

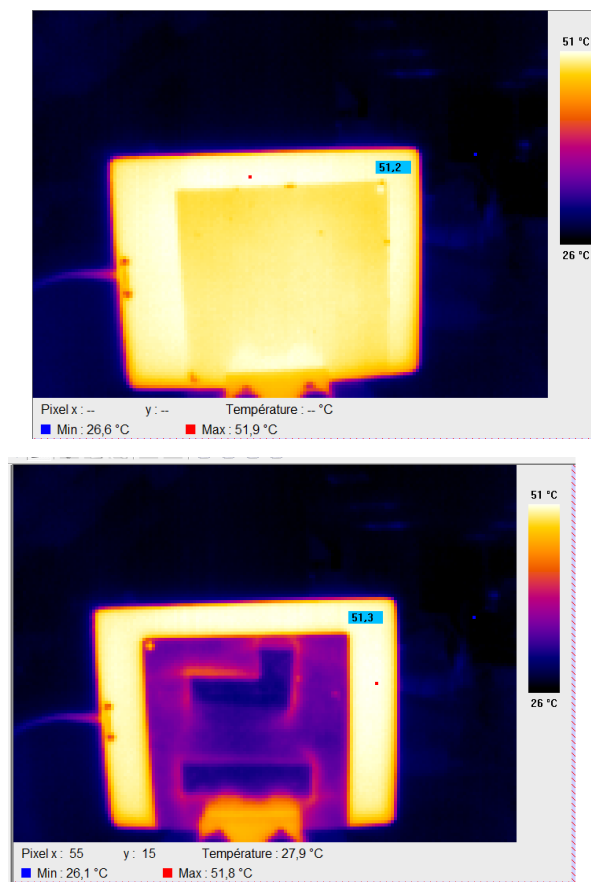
Fixer le matériau contre la plaque chauffante. Mesurer la température de l'échantillon sur chacune des 2 faces.

En chauffant par une même plaque, les deux faces du matériau ont la même température. Mais comme la peinture noire change l'émissivité de matériau, les deux faces ont une émissivité différente.

Par conséquent, leurs températures observées sur la caméra sont différentes. La face 1 a la même émissivité que la plaque chauffante, donc sur l'image infrarouge, leurs couleurs sont homogènes.

On peut donc mesurer différentes températures avec une caméra infrarouge, mais il faut se méfier des résultats obtenus, car il y a une influence sur les mesures si on surestime ou sous-estime l'émissivité.

(NB : les traces constatées sur la plaque sont dues à des traces de peintures sur l'échantillon de matériaux utilisé)



2.2 Calibrage de l'émissivité sur la caméra thermique

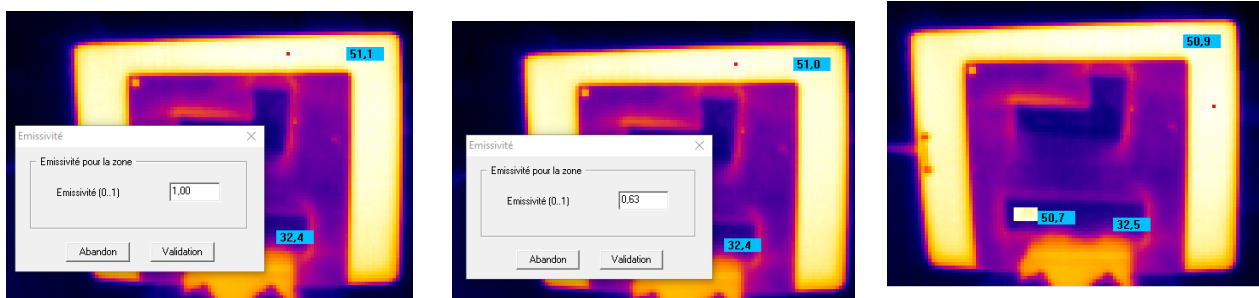
Rappel : *L'émissivité est un des paramètres fondamentaux de la thermographie infrarouge. Une mesure de température par rayonnement sur un objet d'émissivité inférieure à 0,6 sera imprécise.*

On utilise le même matériau que la manipulation 1. La face 1 est traitée par peinture noire qui peut représenter le corps noir, et la face 2 est non traitée. Chauffer l'échantillon et mesurer la température de chaque face. Noter les deux températures et comparer.

La face 1 a une émissivité de 0,95, elle a la même température observée que la plaque chauffante, qui est sa température réelle. En revanche, la température observée de la face 2 est beaucoup moins importante que celle de la face 1. Il va donc falloir ajuster son émissivité.

Sur la face 2, modifier l'émissivité jusqu'à obtenir la même température que la face 1. Pour cela, il suffit d'effectuer un cliquer-glisser sur la zone à définir directement sur l'image.

Une fenêtre s'ouvre alors, permettant de renseigner une valeur d'émissivité, puis de Valider.

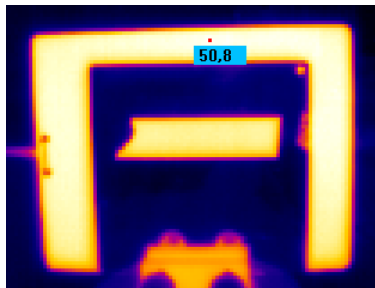


Selon les manipulations 1 et 2, on peut conclure qu'il n'est donc pas possible de mesurer une température exacte si l'on ne connaît pas l'émissivité des matériaux observés et si l'on n'a pas fait un calibrage approprié de la caméra.

2.3 Détermination de l'émissivité d'un matériau dont on ne connaît pas la nature

Rappel : *L'émissivité d'un matériau, 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 réémettre l'énergie rayonnée. L'émissivité dépend de plusieurs facteurs: la température, la direction du rayonnement, et sa longueur d'onde.*

Il est difficile de mesurer par thermographie infrarouge la température de matériaux très réfléchissants. Afin d'obtenir les valeurs correctes et d'éviter l'influence de réflexion, il faut modifier son état de surface par exemple en utilisant le chatterton. Le Chatterton noir est très souvent utilisé par les thermiciens en maintenance industrielle et dans le bâtiment. Lorsqu'ils réalisent des thermogrammes dans des armoires électriques, ils placent ces petites bandes de scotch sur l'isolant des conducteurs (dont on ne connaît pas l'émissivité réelle) de façon à être proche d'une émissivité de 1 et être ainsi certains de mesurer la bonne température.

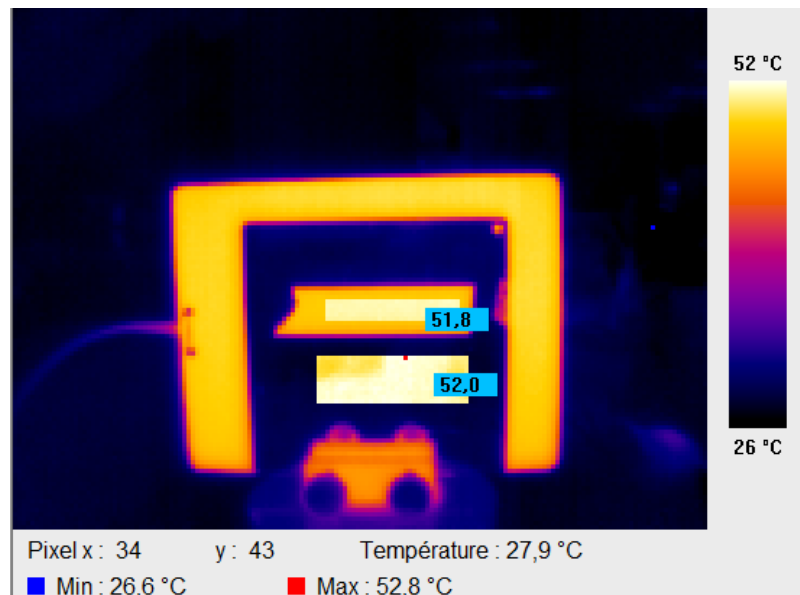


Placer sur le matériau un chatterton assez grand pour couvrir le spot de mesure. Mesurer ensuite sa température en ayant réglé l'émissivité sur 0,95. A l'aide du logiciel, mesurer la température d'une zone voisine située sur l'objet et modifier l'émissivité jusqu'à obtenir la même température. On a alors déterminé l'émissivité

exacte du matériau mesuré.

La première étape consiste à ouvrir l'image dans le logiciel et sélectionner deux points, un sur le chatterton, l'autre sur le matériau. Bien qu'ils aient la même température réelle, on peut voir que leurs températures observées sont différentes.

Réaliser alors une zone sur l'image, et régler l'émissivité sur une valeur inférieure (0.8 par exemple). Renouveler l'opération jusqu'à obtenir une température de zone égale à la température de la résistance chauffante. On a ainsi réalisé une estimation de l'émissivité du matériau étudié.



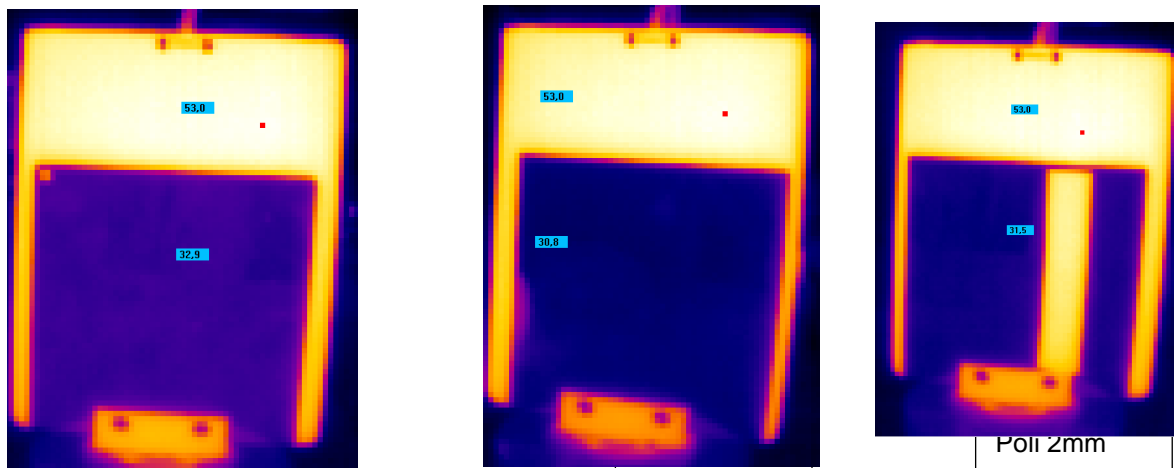
2.4 Influence de l'état de surface du matériau sur son émissivité

Rappel : L'énergie incidente sur un objet est divisée en 3 parties qui sont la réflexion, l'absorption et la transmission. On peut donc écrire un bilan énergétique, en posant que l'énergie incidente est égale à 1. A une longueur d'onde λ , on obtient $A(\lambda) + R(\lambda) + T(\lambda) = 1$ (A : absorption, R : réflexion, T : transmission). Et l'émissivité est égale à l'absorption. $A(\lambda) = \varepsilon(\lambda)$

L'émissivité des métaux et du verre varie également avec la température. Ainsi l'oxydation de surface du métal en fusion ou le changement de phase liquide/solide peut faire fluctuer grandement l'émissivité.

A l'aide du disque d'inox avec différents traitements de surface (1 face brute, 1 face polie), on peut observer l'influence de l'état de surface du matériau sur son émissivité.

Fixer l'échantillon d'inox poli et d'inox non poli contre la plaque chauffante, mesurer et enregistrer la température pour chacune des 2 faces concernées, et comparer.



On constate que leurs températures observées sont différentes. Donc l'émissivité de ces deux états de surface n'est pas égale, bien qu'ils soient du même matériau. Par cet exemple, on peut conclure que l'état d'une surface a une influence importante sur l'émissivité d'un matériau. On remarque de plus que la surface polie a une émissivité moins élevée que les autres surfaces.

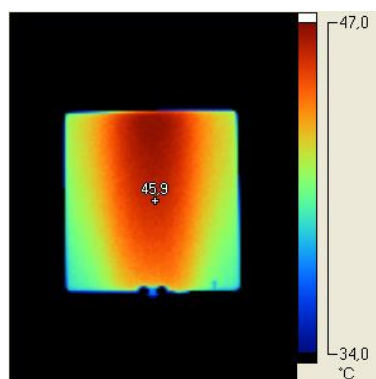
Pour aller plus loin, on peut faire les mêmes mesures que la manipulation 3. Déterminer leurs émissivités à l'aide du chatterington et comparer.

2.5 Etude de l'influence de l'angle sur la mesure

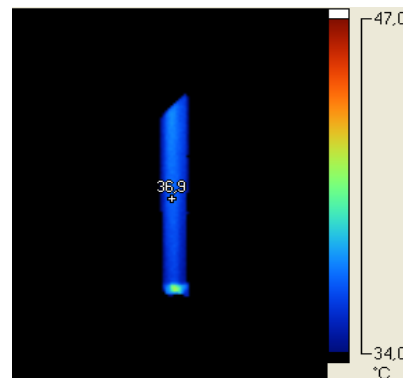
Cette manipulation cherche à mettre en évidence l'importance de l'angle d'observation vis-à-vis du matériau visé.

Dans cette manipulation, on met la plaque chauffante sur le support angulaire pour réaliser différents angles d'incidence depuis un même point fixe d'observation. Afin de mettre en évidence cette influence, il faut changer manuellement la gamme de température de la caméra. Ici, comme la température plus haute est vers 46°C, on fixe la gamme de 34°C à 47°C.

Modifier l'angle de la plaque de -90° à 90° et observer le changement de couleur sur les images. Noter la température de chaque 10° et tracer la courbe angle-température.



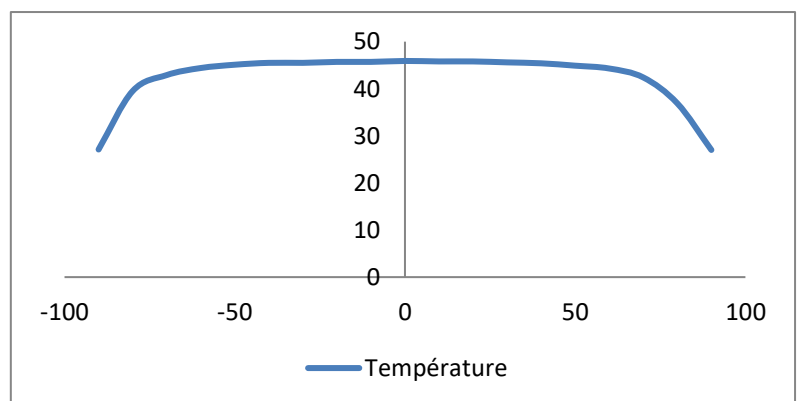
L'image infrarouge à 0°



L'image infrarouge à 80°

Sur l'image, on peut observer que la température reste constante au début, donc l'émissivité est constante. Par contre, la température chute à 80°, la plaque émet beaucoup moins. On constate que l'émissivité ϵ d'un objet est fonction de l'angle incident d'observation.

La courbe ci-dessous permet de mieux comprendre ce phénomène :

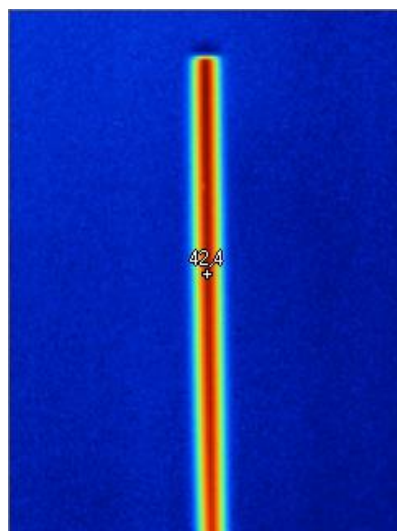


2.6 Etude du paramètre résolution spatiale à l'aide de la fente

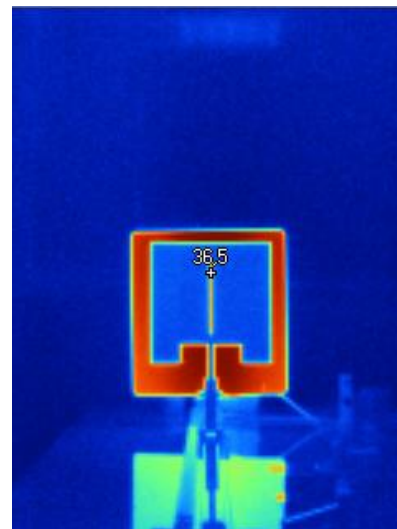
Rappel : *La résolution spatiale est une mesure de la finesse des détails d'une image, pour une dimension donnée. Elle permet de déterminer la dimension du plus petit détail observable.*

Pour déterminer l'influence de la résolution spatiale de la caméra, on utilise une fente réglable et la plaque chauffante qui représente un corps noir presque parfait. Placer la fente réglable à 30 cm environ de la plaque chauffante. Placer la caméra à 20 cm de la fente réglable. Régler une largeur de 3 mm sur la fente.

Au début de l'essai, la fente est fine et la caméra est proche de la fente, la température présente celle de la plaque chauffante. Noter la distance entre la caméra et la fente « d ». Ensuite reculer la caméra progressivement jusqu'à ce qu'on observe une température différente de celle de la plaque chauffante. A cette distance-là, élargir la fente et retrouver la température.



$d = 20\text{cm}$

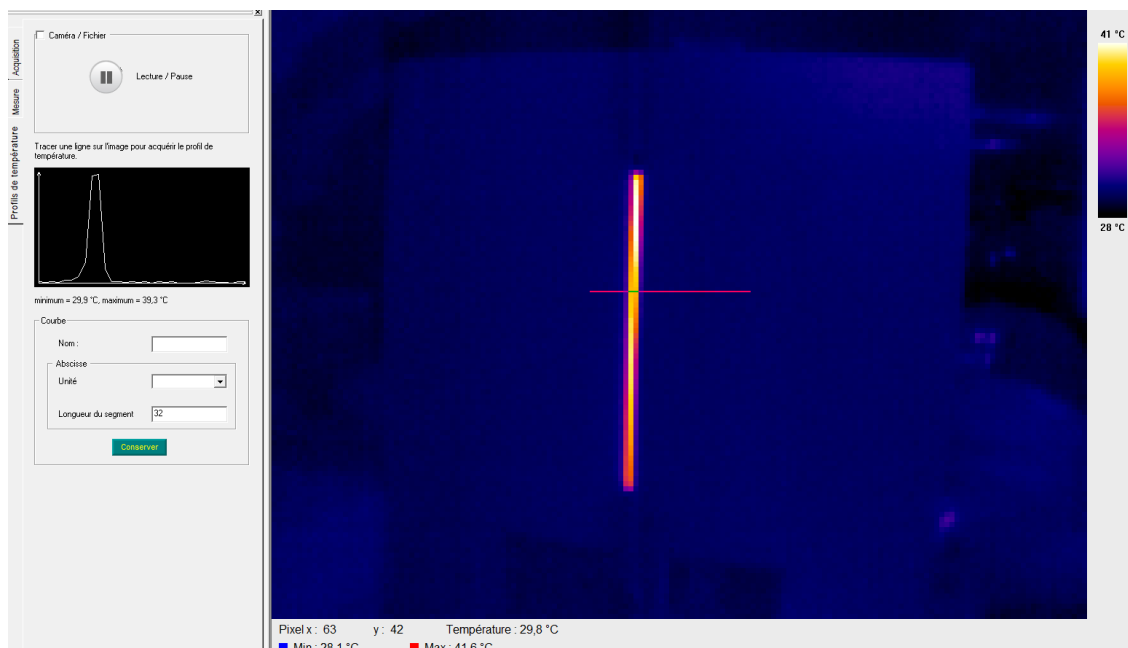
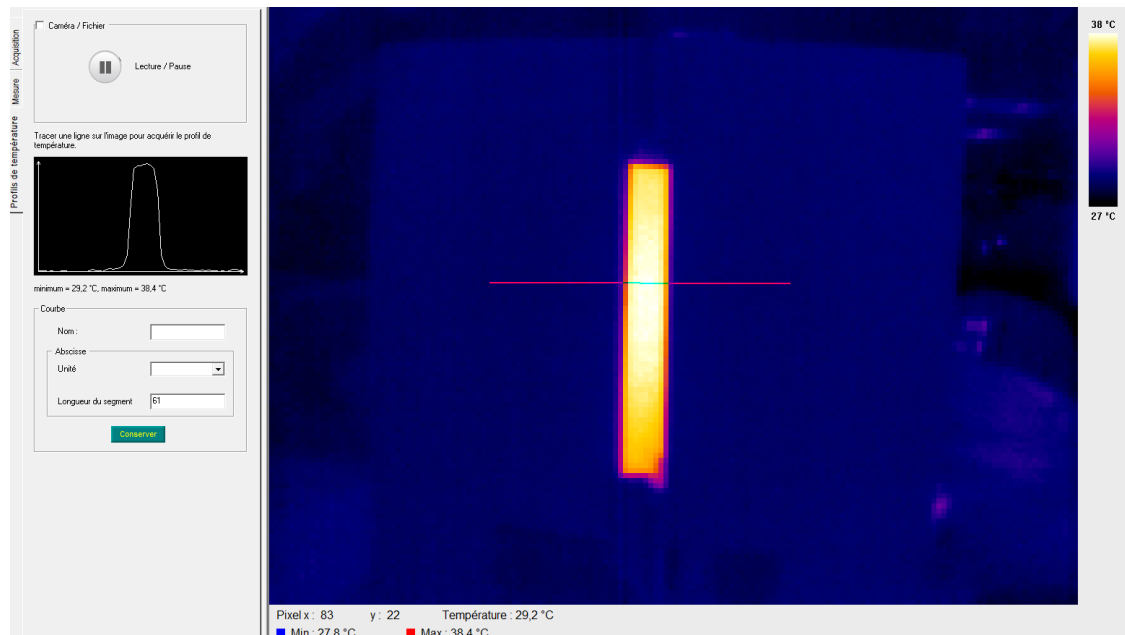


$d = 160\text{cm}$

De plus, il est particulièrement intéressant d'analyser le signal de température à l'aide du logiciel. Sélectionner l'onglet **Profils de température**, et tracer un trait sur une zone qui comprend une partie de la fente. L'allure de la courbe est alors visible dans le petit graphique de gauche ?

Pour conserver cette courbe, renseigner son nom et l'unité des abscises. Si un repère de longueur est possible, utilisez-le au moment du tracer du profil.

A une distance assez loin, quand la fente est grande, le signal de température présente un palier avec une température constante comme on peut le constater sur la figure 1 ci-dessous. Par contre, quand la fente est fine, le signal ne présente plus ce palier horizontal, mais juste un pic précis sur le profil de la température.



Largeur de la fente = 3mm, d=160cm

2.7 Cas particulier : matériau transparent

Pendant cette manipulation, on utilise les échantillons de PP transparent et de PET transparent. On utilise aussi la fente pour les fixer.

Observer à l'œil l'état de surface des 2 matériaux. L'un permet une meilleure visibilité au travers que le second.

Régler la largeur de la fente au maximum. A l'aide des deux portes magnétiques, fixer l'échantillon de PP transparent contre la fente. Et observer l'image infrarouge.

Pour les rayons dans le domaine du visible, le disque est transparent, les formes sont visibles au travers, mais sans détail. Dans le champ de la caméra infrarouge, celle-ci laisse passer les rayons infrarouges plus distinctement que ce que l'œil ne peut percevoir, puisque la température de surface de la résistance chauffante est clairement perçue.



L'image réelle



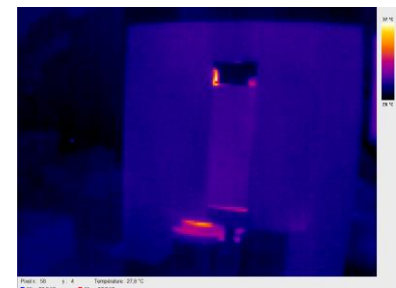
L'image infrarouge

Remplacer l'échantillon de PP par le PET.

A l'œil, ce matériau apparaît comme beaucoup plus transparent que le précédent. Cependant, les rayons infrarouges ne traversent pas ce matériau et l'on ne distingue pas la température de surface de la résistance chauffante.



L'image réelle



L'image infrarouge

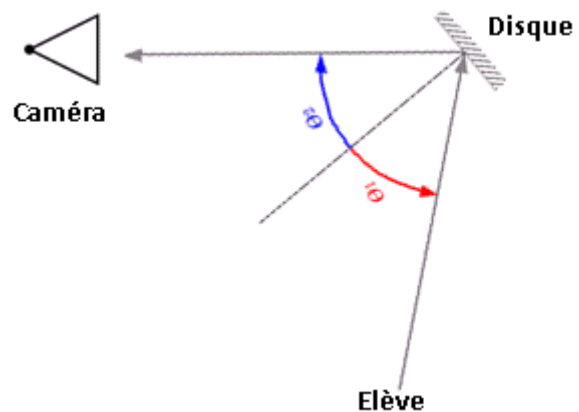
On constate que la composition/qualité des matériaux transparents influence leur capacité à transmettre le rayonnement infrarouge.

2.8 Mise en évidence de la réflexion des matériaux, température réfléchie

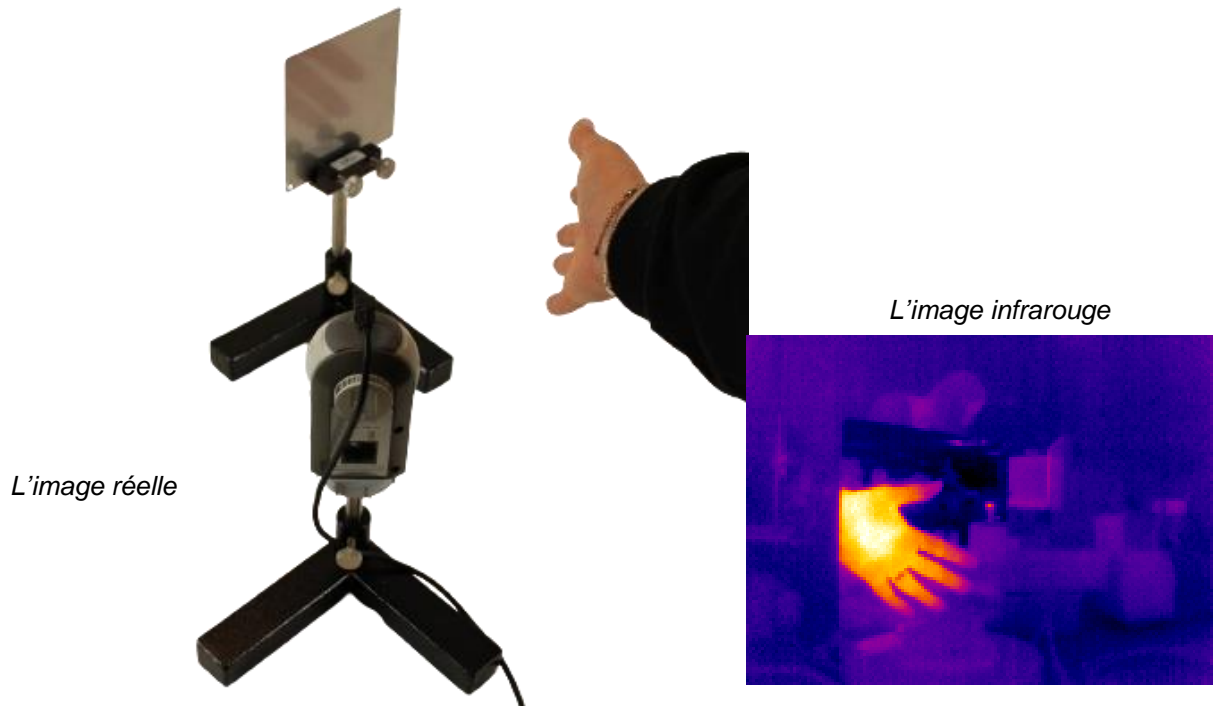
Rappel : *Le rayonnement résultant, capté par une caméra infrarouge, est constitué de la somme de tous les rayonnements qui quittent la surface d'un objet, quelles qu'en soient les sources d'origine. Il provient de trois types de sources. Le rayonnement résultant est une combinaison du rayonnement de l'objet cible lui-même, du rayonnement provenant de la réflexion sur l'objet de la source de chaleur avant et du rayonnement issu de la source de chaleur arrière traversant l'objet cible.*

Pour cette manipulation, on utilise l'échantillon d'inox poli qui a une très bonne capacité de réflexion.

Fixer l'échantillon sur le support angulaire et mesurer la température du de la surface de l'échantillon. Ensuite un élève peut se positionner à côté du disque. Modifier l'angle et tracer un schéma de propagation de la lumière pour trouver un angle adapté pour qu'on puisse voir l'image de l'élève dans la caméra. Observer le changement de la température.



Dans notre exemple, nous avons simplement placé une main à proximité de l'échantillon.



On constate qu'avec la réflexion, la température n'est plus la température ambiante, mais celle de la main.

Pour aller plus loin, il est possible d'utiliser les matériaux moins réfléchissants pour comparer les images thermiques résultantes.

3. Service après-vente

La garantie est de 2 ans.

Pour tous réglages, contacter le **Support Technique** au 09 69 32 02 10*.

Le matériel doit être retourné dans nos ateliers et pour toutes les réparations ou pièces détachées, veuillez contacter :

JEULIN – S.A.V.
468 rue Jacques Monod
CS 21900
27019 EVREUX CEDEX France
* non surtaxé

Summary

Introduction	28
1.Theoretical part: Principle of infrared thermography	28
1.1 Definition	28
1.2 Principle	28
1.3 Infrared radiation	29
1.3.1 The electromagnetic spectrum	29
1.3.2 Elements of radiometry	30
1.4 Thermography	32
1.4.1 Measurement reliability	32
1.4.2 Detection	32
1.4.3 Thermal resolution.....	33
1.4.4 Thermal accuracy.....	33
1.4.5 Spacial resolution	34
1.4.6 Measurements conditions	34
1.5 Thermal image analysis techniques.....	35
1.5.1 Thermal framing	35
1.5.2 Isotherm	35
1.5.3 Palettes	36
2. Practical part.....	38
2.1 Comparative study of the emissivity of different materials	40
2.2 Calibrating emissivity on the thermal camera.....	42
2.3 Determining the emissivity of an unknown material	43
2.4 Influence of the material's surface condition on its emissivity.....	45
2.5 Study of the influence of angle on measurement	46
2.6 Study of the spatial resolution parameter using the slot.....	47
2.7 Special case : transparent material.....	49
2.8 Demonstrating the reflection of materials, reflected temperature	50
3. After sales service	51

Introduction

In this practical course, we'll be carrying out a number of manipulations and measurements using an infrared camera. The aim is to characterize the thermal behavior of materials, to adjust the camera to the case under study, and to take a critical look at the measurements made using infrared thermography..

1. Theoretical part: Principle of infrared thermography

Infrared thermography is a non-contact temperature measurement technique used to diagnose the state of an electrical, mechanical or thermal system in operation. It is widely used to optimize maintenance tasks without interrupting production flow, and to minimize maintenance costs..

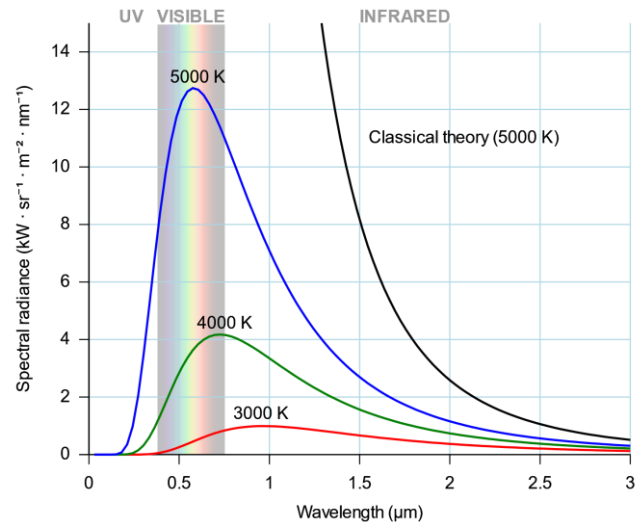
1.1. Définition

Infrared thermography is a technique that uses appropriate equipment to obtain a thermal image of a thermal scene observed in the infrared spectral range. In other words, infrared thermography makes it possible to visualize temperature gradients that cannot be seen in the visible range.

1.2. Principle

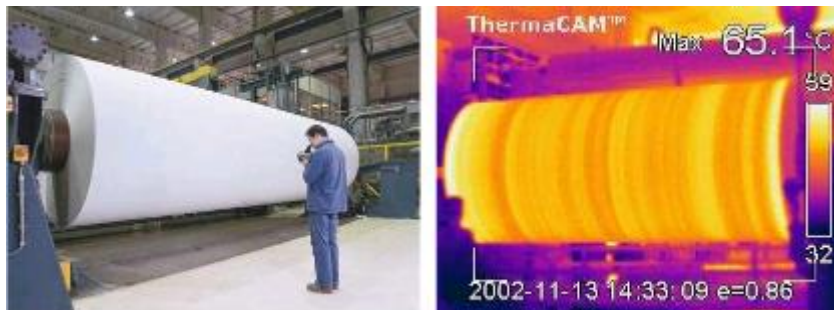
Any object whose temperature exceeds absolute zero (i.e. $0^\circ\text{Kelvin} = -273.15^\circ\text{C}$) emits electromagnetic radiation. This radiation depends directly on the object's surface temperature.

The human eye can “see” heat at high temperatures: sun (6000°C), tungsten filament (2200°C), red iron (600°C), but for low-temperature objects ($<500^\circ\text{C}$), which emit little radiation, the human eye is inadequate (see



Planck's Law graph). The use of infrared radiation sensors makes up for this shortcoming: infrared cameras, which capture radiation between 3.6 and 13 microns in wavelength, convert this radiation into a thermal image, and allow temperatures to be integrated.

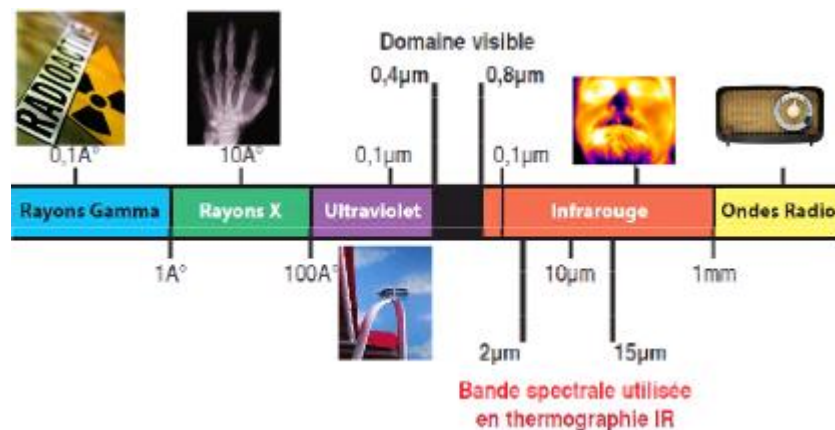
An infrared camera is a radiometer whose input signal is radiation power (W/m^2), and whose output signal is an electrical voltage proportional to the input signal. This voltage is translated into visual and digital indications. Thermographic cameras are designed to provide an image, called a thermogram, of static or dynamic phenomena in the infrared spectral range..



1.3. Infrared radiation

1.3.1. The electromagnetic spectrum

The electromagnetic spectrum is divided more or less arbitrarily into ranges called bands, depending mainly on the methods used to emit or detect radiation. There is no



fundamental difference between radiation in the different bands of the electromagnetic spectrum. They all respect the same laws, with nuances resulting from differences in wavelength.

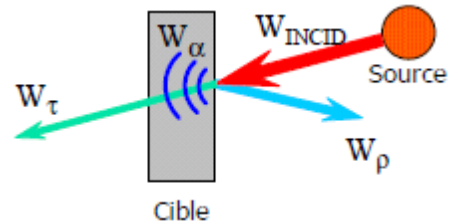
Visible light, radio waves, TV and X-rays are all electromagnetic radiation. The visible range covers wavelengths from 0.4 to $0.8 \mu\text{m}$. The infrared band [figure 7.3] extends from 0.8 to $1000 \mu\text{m}$. In infrared thermography, we generally work in a spectral band that extends from 2 to $15 \mu\text{m}$ and more specifically in the $2\text{-}5 \mu\text{m}$ and $7\text{-}15 \mu\text{m}$ windows.

Wavelengths are most often expressed in μm (micrometers) or nm (nanometers), but an older unit is still often used: the Ångström (\AA). The relationship between these different units is: $10,000 \text{ \AA} = 1,000 \text{ nm} = 1 \mu\text{m}$, or $1 \text{ \AA} = 1.10^{-9} \text{ m} = 0.1 \text{ nm}$.

1.3.2. Elements of radiometry

a. Principle

Incident radiation refers to all radiation striking an object from outside. In the figure, the incident radiation, noted W_{INCID} , is all the radiation striking the target object from one or more sources. A certain proportion of the radiation, noted W_{α} , will always be absorbed, and the target object will retain its energy. A certain amount, W_{ρ} , will be reflected. The latter will not affect the target object in any way. Finally, a certain proportion of the radiation, W_{τ} , may pass through the target object. Like the quantity reflected, it will not affect the object. If we write this as a mathematical equation, we obtain:

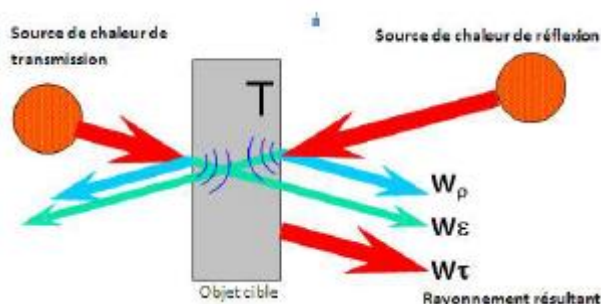


$$W_{\alpha} + W_{\rho} + W_{\tau} = W_{\text{INCID}} = 100\%$$

An object has a certain capacity or ability to :

- Absorb: this is called absorptivity, α
- Reflect: so-called reflectivity, ρ
- Transmit: transmissivity, τ

The sum of the three is always equal to 1: $\alpha + \rho + \tau = 1$.



The resulting radiation captured by an infrared camera is the sum of all the radiation leaving the surface of an object, whatever its source. It comes from three types of source. In the figure, we have three sources of radiation: the target object itself, a source in front and a source behind. If we look at the target object from the right, the resulting radiation is a combination of the radiation from the target object itself, the radiation from the reflection on the object and the radiation from the source behind.

radiation from the reflection on the object of the front heat source (located on the right) and radiation from the rear heat source (located on the left) passing through the target object.

b. Emissivity

In infrared thermography, the most important part of the resulting radiation is generally the emitted part. An object has a certain capacity or ability to emit, characterized by its emissivity ε .

This is denoted ε and varies with temperature and wavelength.

$$\varepsilon = \frac{\text{Quantity of rays emitted by the real object}}{\text{Quantity of rays emitted by the black body}}$$

b. Notion de corps noir

A black body is an ideal radiating element that absorbs 100% of incident radiation, meaning it neither reflects nor transmits any radiation. This does not exist in reality, as there is always a little something reflected, for example. For a black body, the emissivity $\varepsilon = 1$ (et $\rho + \tau = 0$).

c. Notion of gray body

The term “gray body” is an abstract notion that enables relative measurements to be made. The basic assumption is that in the 3 to 5 μm band, the object being measured is a gray body.

d. Glossy bodies

hiny bodies, such as mirrors, are highly reflective. Referring to Drapper's equation, we have : $\varepsilon(\lambda) = 0$.

1.4. Thermography

1.4.1. Measurement reliability

One of the main problems with infrared thermography is the reliability of the measurements. This depends on :

- control of absolute temperature drift ;
- control of noise, i.e. the disturbance generated by rising sensor temperatures.

To avoid this phenomenon, the sensor can be cooled, but the latest-generation cameras no longer need to be cooled, as a software system for correcting measurement drift is included in the device. Regularly (every 30 s), temperature sensors integrated into the camera provide temperature information. The processing unit can then take this information into account to recalibrate the measurement.

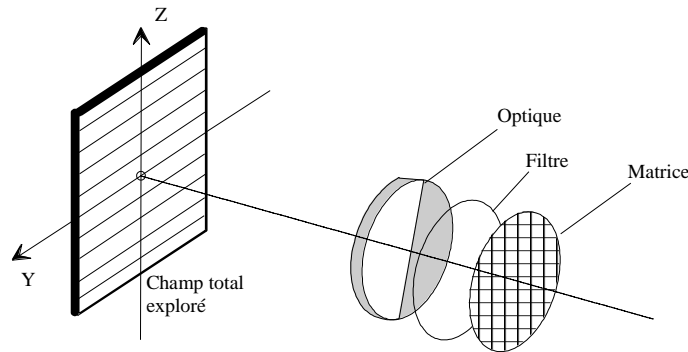
1.4.2. Detection

One of the main problems with infrared thermography is the reliability of the measurements. This depends on :

- control of absolute temperature drift ;
- control of noise, i.e. the disturbance generated by rising sensor temperatures.

To avoid this phenomenon, the sensor can be cooled, but the latest-generation cameras no longer need to be cooled, as a software system for correcting measurement drift is included in the device. Regularly (every 30 s), temperature sensors integrated into the camera provide temperature information. The processing unit can then take this information into account to recalibrate the measurement.

Infrared cameras are equipped with a vanadium oxide matrix containing a multitude of sensors that transform the radiation received into electrical voltage.



1.4.2. Thermal resolution

This is the smallest temperature variation discernible by the device. It's also known as the M.R.T.D. (Minimum Resolvable Temperature Difference).

In other words, it's the apparent temperature contrast required to separate the details of an image. Example: 0.1°C at 30°C .

It depends on: - detector surface ;

- electronic bandwidth (noise increases with bandwidth) ;
- specific sensor detectivity (minimum required) ;
- the amount of flux emitted

1.4.3. Thermal accuracy (trueness)

This is the absolute value of the measurement, known with varying degrees of precision. Example: 0.5°C error for 15°C , i.e. 3%. This precision is also called N.E.T.D.: Noise Equivalent Temperature Difference. Noise appears like the snow effect when a camera works with too little light. Precision must not be confused with resolution.

1.4.4. Spatial resolution

It's the ability to accurately measure the temperature of small objects, “small” being defined in relation to the total dimension of the image. It is also the number of separable points. Spatial resolution is linked to factors such as the quality of the optics, the bandwidth of the electronics, and the scanning characteristics of the detector. It defines the size of the phenomenon that can be observed on a body as a function of the recording distance. We know that:

$$L_{\text{received}} = L_{\text{object}} + L_{\text{environnement}}$$

1.4.5. Measurement conditions

The following conditions must be met:

- measurement angle no greater than 45° to the object ;
- emissivity > 0.6 ;
- object size consistent with spatial resolution;
- consideration of the external environment.

1.5. Thermal image analysis techniques

The analysis of thermal images often involves the search for singular zones whose behavior differs from the rest of the image. For this reason, a number of functions are available to artificially enhance local contrasts. Handling these functions makes it easier to find what you want to highlight in an image. The three most important functions for enhancing thermal images are thermal framing, isotherm and palettes.

1.5.1. Thermal framing

Thermal scaling is the adjustment of image scale to optimize contrast for analysis purposes. Thermal scaling requires the use of the camera's level and gain controls. Once the area of interest in the image has been selected, these two parameters need to be adjusted so that the colors in the palette cover this part of the image as closely as possible. Less interesting areas of the image may be outside the scale. In this case, they will generally be represented in black or white.

In the example shown in figure 5.1, in the right-hand image, the gain is smaller and the level significantly higher. The result is better contrast. This image is easier to analyze, as the thermal zone is better highlighted..

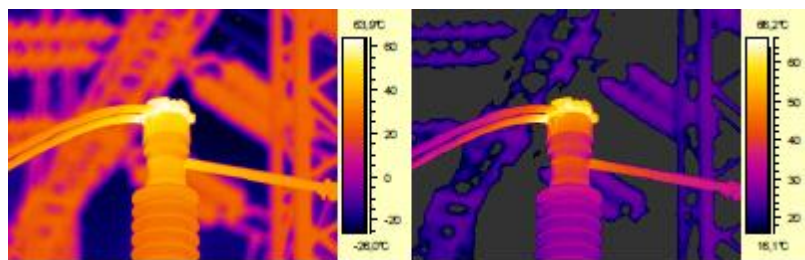
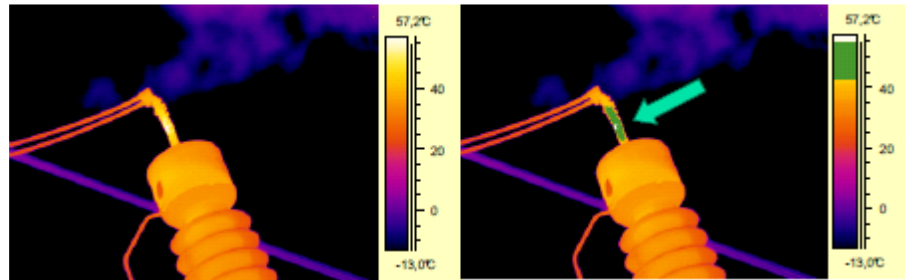


Fig.5.1 Same image, automatically adjusted (left) and thermally registered on the component (right)

1.5.2. Isotherm

Some thermal imaging cameras feature an Isotherm option that allows certain colors in the scale to be replaced by opposite tones. It marks an interval of equal apparent temperature. The isotherm replaces only one color range with another that contrasts more with the colors used in the image. The isotherm can be moved up and down the



scale, and enlarged or reduced as required..

1.5.3. Palettes

A palette assigns different colors to mark defined apparent temperature levels. It can be more or less contrasty, depending on the colors used.

Fig.5.2 High-voltage transformer head with isotherm

A thermal image can generally be displayed with a maximum of 256 shades of color or gray simultaneously. On a grayscale, the black color is at one end of the scale, and becomes progressively lighter with each of the 256 steps until it becomes white. This means that there will be very little contrast between, say, the 93rd and 94th shades of gray. Color images, on the other hand, use a wide range of colors to achieve better contrast. The colors must be carefully matched to each other, to give the image a semblance of smoothness, and so that it is not painful to observe. An example of a thermogram of a storage tank taken with different palettes is shown in figure 5.3..

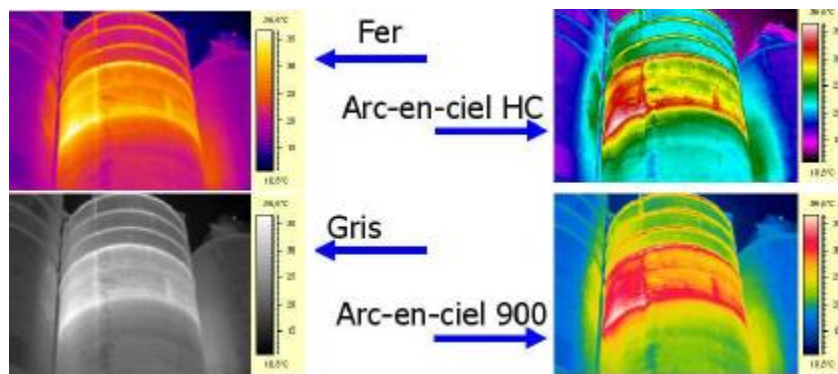


Fig.5.3 Examples of different palettes

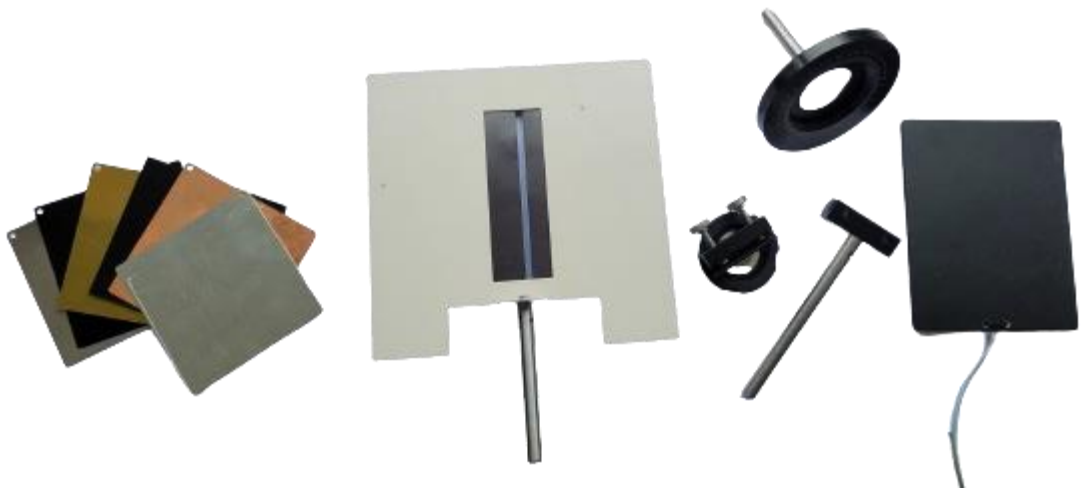
There's a golden rule to apply when choosing palettes:

- Use high-contrast palettes on low-contrast target objects
- Use low-contrast palettes on high-contrast target objects

2. Experimental part

Equipment required - included in "IR test bench".

- Set of 8 samples of different materials: aluminum, steel (1 raw side, 1 polished side), copper, brass, steel (1 raw side, 1 black-painted side), stainless steel, transparent PP, transparent PET.
- 1 heating resistor,
- 1 adjustable-width slot,
- 2 material supports,
- 1 angular support.



Necessary complements

Optical stands or optical bench with jumpers



Alimentation 12V 5 A



Caméra thermique Jeulin



Before the test

Mount the camera on the stand or bench and identify the various disks.



*Steel : 1 side
painted/1 side
unfinished*



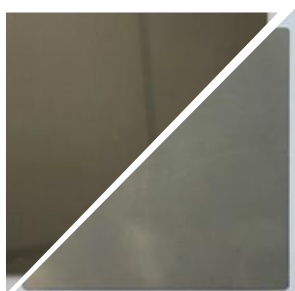
Copper



Brass



Aluminium



*Stainless steel : 1
raw face / 1 polished
face*



PET Lumex clear



PP translucent



Stainless steel

2.1. Comparative study of the emissivity of different materials

Remember: *The capacity or ability of an object to absorb incident radiation is always identical to its capacity to radiate its own energy. If an object is capable of absorbing incident radiation, it will also be able to emit its own energy in the form of radiation. The reverse is of course true: an object with a low absorption capacity will necessarily have a low emissivity. An opaque object with this characteristic is actually a good reflector. Consequently, a good reflector will have a low emissivity. In infrared thermography, the most important part of the resulting radiation is generally the emitted part. An object has a certain capacity or ability to emit, characterised by its emissivity ϵ . This is denoted ϵ and varies with temperature and wavelength.*

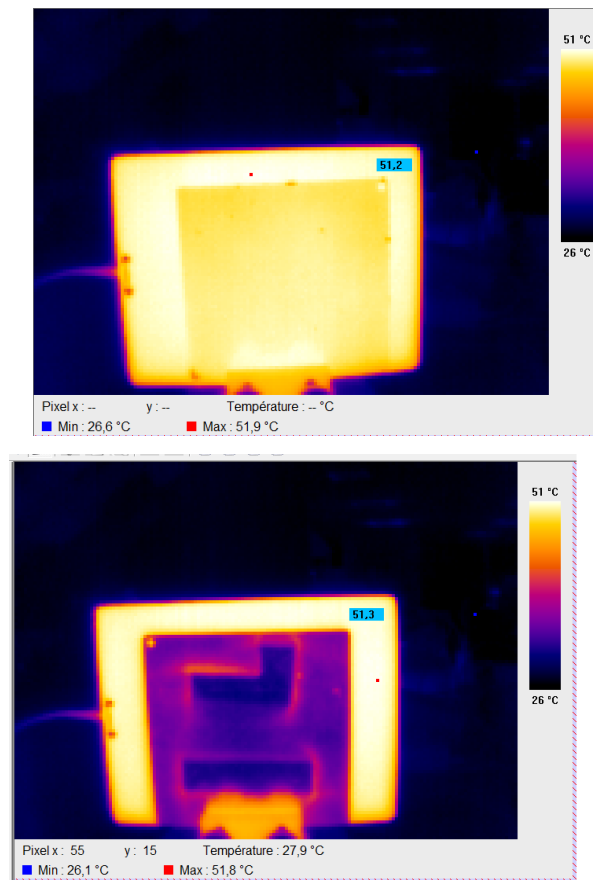
$$\epsilon = \frac{\text{Quantity of rays emitted by the real object}}{\text{Quantité de rayons émis par le corps noir}}$$



A two-sided steel sample is used, with one side treated with black paint (1) and the other untreated (2). Hold the material against the hot plate. Measure the temperature of the sample on each of the 2 sides.

When heated by the same plate, the two sides of the material have the same temperature. But because the black paint changes the emissivity of the material, the two sides have different emissivities. As a result, the temperatures observed on the camera are different. Side 1 has the same emissivity as the heating plate, so in the infrared image their colours are the same. You can therefore measure different temperatures with an infrared camera, but you need to be wary of the results you obtain, as over- or under-estimating emissivity can influence the measurements.

(NB: the marks on the plate are due to traces of paint on the sample of material used).

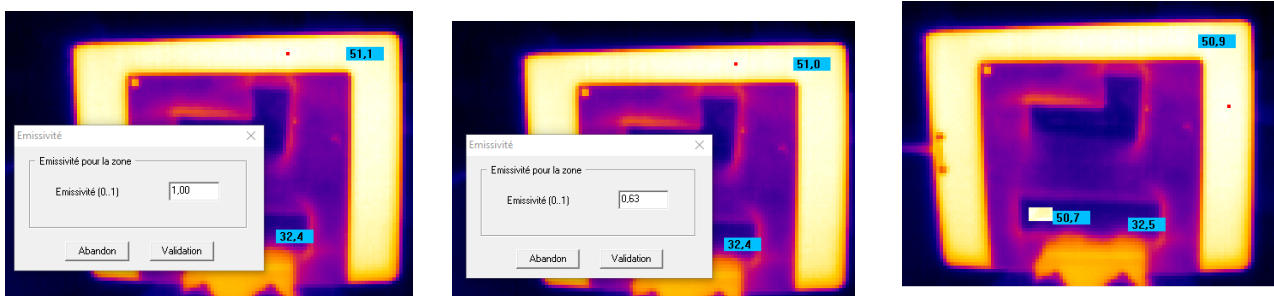


2.2. Calibrating emissivity on the thermal camera

Reminder: *Emissivity is one of the fundamental parameters of infrared thermography. A temperature measurement by radiation on an object with an emissivity of less than 0.6 will be inaccurate.*

We use the same material as for experiment 1. Side 1 is treated with black paint, which may represent the black body, and side 2 is untreated. Heat the sample and measure the temperature on each side. Note the two temperatures and compare. Side 1 has an emissivity of 0.95, so it has the same observed temperature as the hot plate, which is its actual temperature. However, the observed temperature of side 2 is much lower than that of side 1, so its emissivity will have to be adjusted. On side 2, change the emissivity until you obtain the same temperature as side 1. To do this, simply click and drag on the area to be set directly on the image.

A window will then open, allowing you to enter an emissivity value, and then confirm..

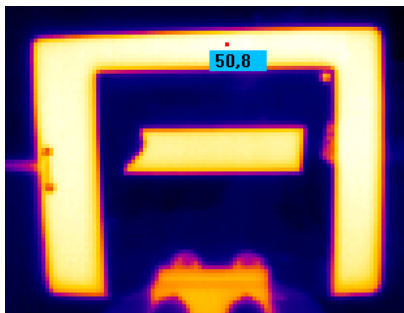


Based on tests 1 and 2, we can conclude that it is not possible to measure an exact temperature if we do not know the emissivity of the materials observed and if we have not properly calibrated the camera.

2.3. Determining the emissivity of an unknown material

Reminder: *The emissivity of a material is the ratio of the energy it radiates to the energy that a black body would radiate at the same temperature. It is therefore a measure of a body's ability to absorb and re-emit radiated energy. Emissivity depends on several factors: the temperature, the direction of the radiation and its wavelength.*

It is difficult to measure the temperature of highly reflective materials using infrared thermography. In order to obtain the correct values and avoid the influence of reflection, the surface must be modified, for example by using Chatterton. Black Chatterton is very often used by thermographers in industrial maintenance and in the building industry. When they carry out thermograms in electrical cabinets, they place these small strips of tape on the insulation of the conductors (whose actual emissivity is unknown) so as to be close to an emissivity of 1 and thus be certain of measuring the correct temperature.

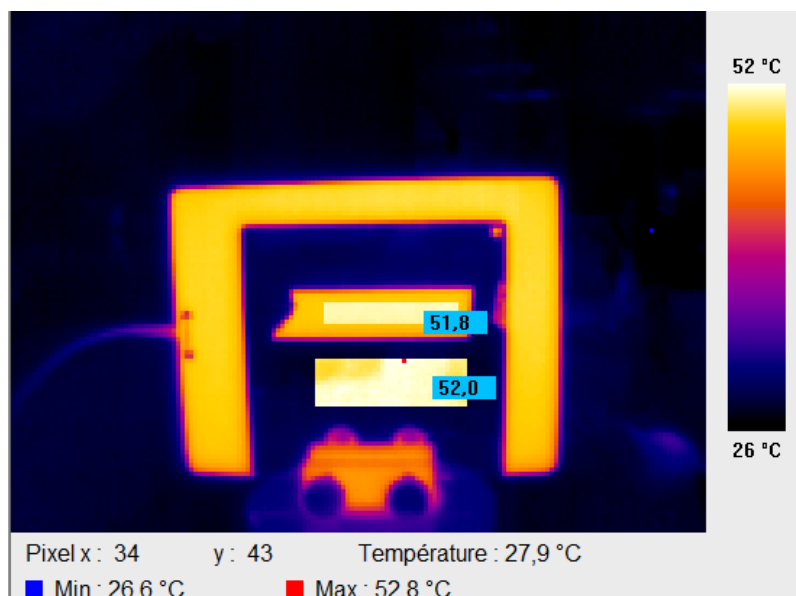


Place a rubber tape large enough to cover the measurement spot on the material. Then measure its temperature, having set the emissivity to 0.95. Using the software, measure the temperature of a neighbouring area on the object and change the emissivity until you obtain the same temperature. The exact emissivity of the measured material.

The first step is to open the image in the software and select two points, one on the rubber tape, the other on the material. Although they have the same actual temperature, you can see that their observed temperatures are different.

Select a zone on the image and set the emissivity to a lower value (0.8, for example).

Repeat the operation until you obtain a zone temperature equal to the temperature of the heating resistor. You have now estimated the emissivity of the material under study.



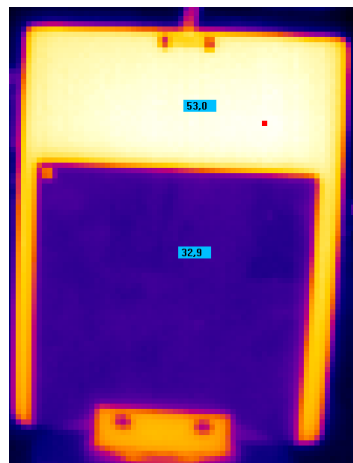
2.4. Influence of the material's surface condition on its emissivity

Reminder: The energy incident on an object is divided into 3 parts: reflection, absorption and transmission. We can therefore write an energy balance, assuming that the incident energy is equal to 1. At a wavelength λ , we obtain $A(\lambda) + R(\lambda) + T(\lambda) = 1$ (A : absorption, R : reflexion, T : transmission). And emissivity is equal to absorption $A(\lambda) = \varepsilon(\lambda)$

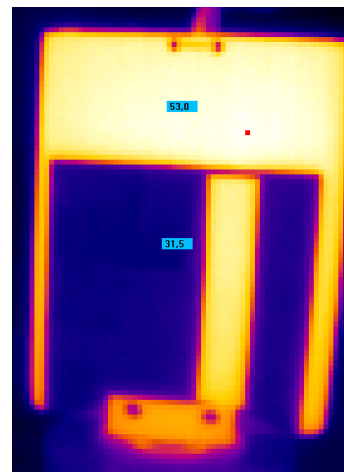
The emissivity of metals and glass also varies with temperature. Surface oxidation of molten metal or liquid/solid phase change can cause emissivity to fluctuate greatly.

Using a stainless steel disc with different surface treatments (1 rough side, 1 polished side), we can observe the influence of the material's surface condition on its emissivity.

Hold the polished and unpolished stainless steel samples against the hot plate, measure and record the temperature for each of the 2 surfaces concerned, and compare the results..



Brut 0.5mm



Polished 2mm

We can see that their observed temperatures are different. So the emissivity of these two surface conditions is not equal, even though they are made of the same material. From this example, we can conclude that the state of a surface has a significant influence on the emissivity of a material. We also note that the polished surface has a lower emissivity than the other surfaces..

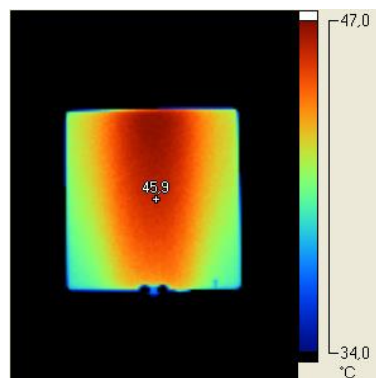
To take this further, you can do the same measurements as in experiment 3. Determine their emissivities using the duct tape and compare.

2.5. Study of the influence of angle on measurement

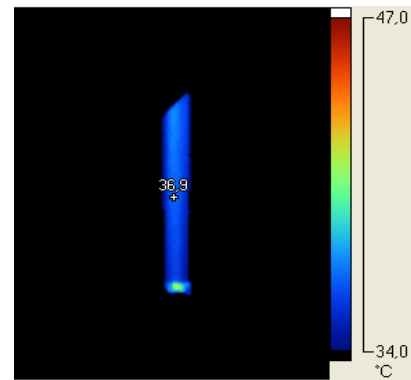
The aim of this experiment is to highlight the importance of the angle of observation in relation to the material in question.

In this experiment, the heating plate is placed on the angled support to produce different angles of incidence from the same fixed observation point. In order to demonstrate this influence, the temperature range of the camera must be changed manually. Here, as the highest temperature is around 46°C, we set the range from 34°C to 47°C.

Change the angle of the plate from -90° to 90° and observe the colour change in the images. Note the temperature for each 10° and plot the angle-temperature curve..



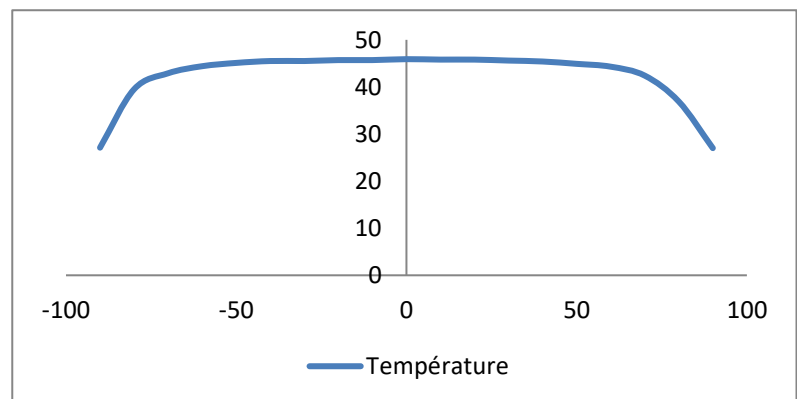
Infrared image at 0°



The 80° infrared image

In the image, we can see that the temperature remains constant at the beginning, so the emissivity is constant. However, when the temperature drops to 80°, the plate emits much less. We can see that the emissivity ϵ of an object is a function of the incident angle of observation.

The curve below gives a better understanding of this phenomenon:

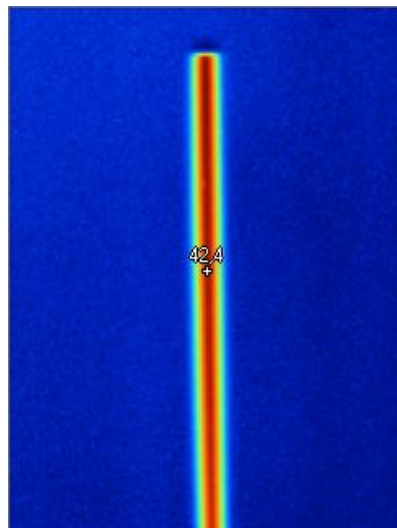


2.6. Study of the spatial resolution parameter using the slot

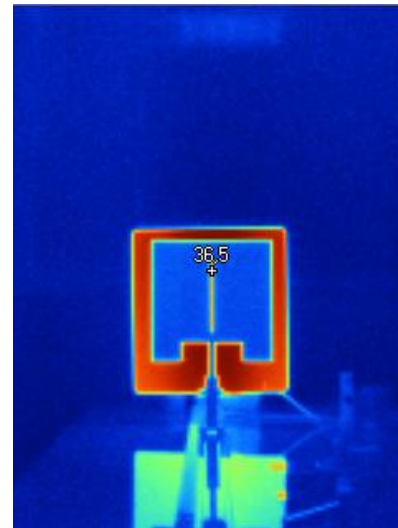
Reminder : *Spatial resolution is a measure of the fineness of detail in an image, for a given dimension. It is used to determine the size of the smallest observable detail..*

To determine the influence of the camera's spatial resolution, we use an adjustable slit and the heating plate, which represents a near-perfect black body. Place the adjustable slit approximately 30 cm from the heating plate. Place the camera 20 cm from the adjustable slit. Adjust the slit to a width of 3 mm..

At the start of the test, the slit is thin and the camera is close to the slit, so the temperature is that of the hot plate. Note the distance between the camera and the slit " d ". Then move the camera back gradually until a temperature different from that of the hot plate is observed. At this distance, widen the slit and find the temperature.



$d=20cm$

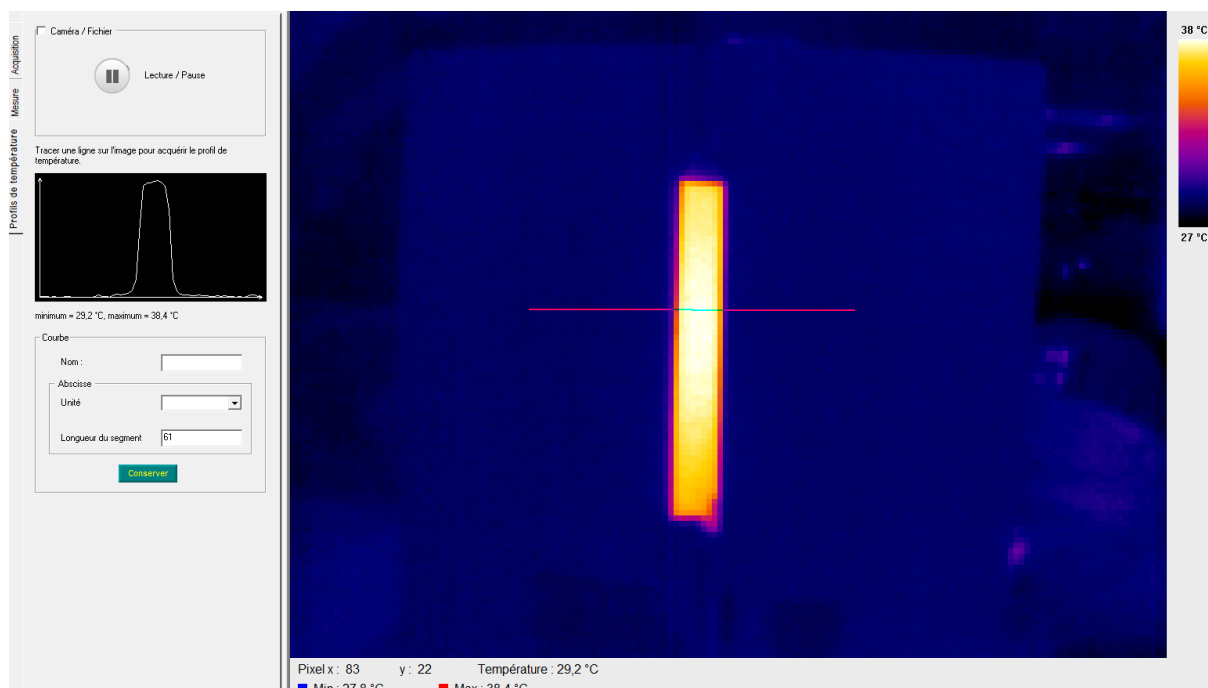


$d=160cm$

It is also particularly interesting to analyse the temperature signal using the software. Select the **Temperature Profiles** tab, and draw a line over an area that includes part of the slot. The shape of the curve can then be seen in the small graph on the left.

To save this curve, enter its name and the abscissa unit. If a length marker is available, use it when drawing the profile.

At a fairly long distance, when the slit is large, the temperature signal shows a plateau with a constant temperature, as can be seen in Figure 1 below. However, when the slit is narrow, the signal no longer shows this horizontal plateau, but just a precise peak on the temperature profile..



2.7. Special case : transparent material

Transparent PP and transparent PET samples are used for this manipulation. The slit is also used to fix them. Look at the surface of the 2 materials. One allows better visibility through than the other. Adjust the width of the slot to the maximum. Using the two magnetic holders, fix the transparent PP sample against the slit. Observe the infrared image.

For rays in the visible range, the disc is transparent and the shapes are visible through it, but without detail. In the field of view of the infrared camera, infrared rays pass through more clearly than the eye can perceive, since the surface temperature of the heating resistor is clearly perceived.



The real image



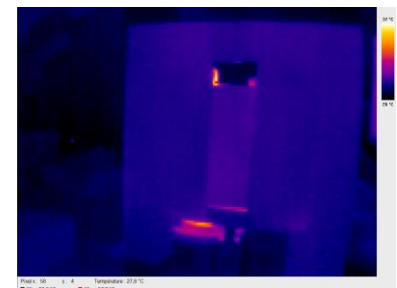
The infrared image

Replace the PP sample with PET.

To the eye, this material appears much more transparent than its predecessor. However, infrared rays do not penetrate this material and the surface temperature of the heating resistor cannot be distinguished..



The real image



The infrared image

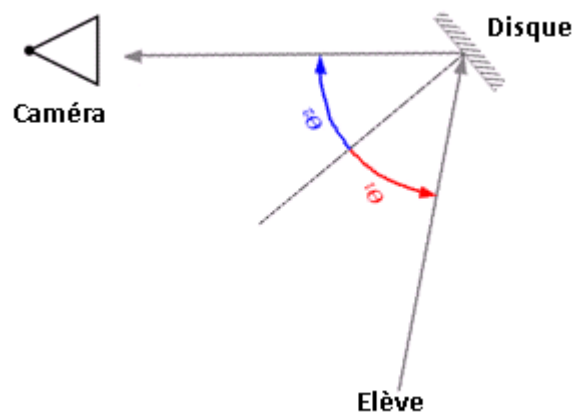
The composition/quality of transparent materials influences their ability to transmit infrared radiation.

2.8. Demonstrating the reflection of materials, reflected temperature

Reminder : *The resulting radiation, captured by an infrared camera, is the sum of all the radiation leaving the surface of an object, whatever its source. It comes from three types of source. The resultant radiation is a combination of the radiation from the target object itself, the radiation from the reflection of the front heat source on the object and the radiation from the rear heat source passing through the target object.*

To do this, we use a polished stainless steel sample, which has very good reflective properties..

Attach the sample to the angled support and measure the temperature of the surface of the sample. A student can then stand next to the disc. Change the angle and draw a light propagation diagram to find a suitable angle so that the student's image can be seen in the camera. Observe the change in temperature



In our example, we simply placed a hand close to the sample.



The real image



The infrared image

We can see that with reflection, the temperature is no longer the ambient temperature, but that of the hand. To take this further, less reflective materials can be used to compare the resulting thermal images.

1. After-sales service

The device is under a 2-year guarantee, it must be sent back to our workshops.

For any repairs, adjustments or spare parts please contact:

JEULIN – TECHNICAL SUPPORT

468 rue Jacques Monod
CS 21900
27019 EVREUX CEDEX FRANCE

+33 (0)2 32 29 40 23