

# Etalonnage en températures infrarouges 101

L'emploi d'un bon outil améliore le travail et la productivité

## Note d'application



Les thermomètres infrarouges permettent de mesurer la température de surface d'une cible à une certaine distance sans la toucher physiquement. C'est vraiment un jeu d'enfant de simplement viser et pointer sur une cible pour mesurer sa température. Cette note d'application démystifie la thermométrie infrarouge (ou « IR ») en expliquant pourquoi un étalonnage régulier est important pour rentabiliser au maximum ces appareils.

### Comment les thermomètres infrarouges mesurent la température

Les thermomètres infrarouges mesurent le **rayonnement électromagnétique** émis par un objet en fonction de la température de l'objet. L'essentiel du rayonnement, avant que l'objet ne devienne très chaud, est compris dans une bande de longueurs d'onde appelée le spectre infrarouge. Les objets très chauds émettent une lumière visible qui est aussi une forme de rayonnement électromagnétique.

Si l'œil humain est très sensible à la lumière jaune aux longueurs d'onde avoisinant 0,555 micromètre, il ne peut pas détecter la lumière aux longueurs d'onde supérieures à 0,700 micromètre (rouge) et inférieures à 0,400 micromètre (violet). Même si nos yeux ne peuvent pas détecter l'énergie en dehors de cette bande étroite de longueurs d'onde, le spectre visible, nous savons qu'elle est toujours là car nous pouvons la détecter à l'aide d'un **radiomètre**.

#### « Visualiser » la température

Nous savons d'une certaine manière mesurer la température en détectant le rayonnement électromagnétique avec les yeux. Des objets présentant un rayonnement thermique nous sont familiers, par exemple les braises

d'un foyer, la lueur jaune d'une chandelle et la lueur blanche d'une ampoule de lumière incandescente. La couleur que nous percevons est liée à la température de l'objet chauffé. D'ailleurs, les sidérurgistes déclarent pouvoir mesurer avec précision la température de l'acier fondu dans une fourchette de 50 °C, uniquement en fonction de sa couleur.

Comme les yeux des sidérurgistes, les thermomètres infrarouges sont conçus pour être sensibles à une bande spécifique de **longueur d'onde**. La **bande spectrale** la plus utilisée pour les thermomètres infrarouges universels est comprise entre 8 µm et 14 µm (8 à 14 micromètres).

Le rayonnement infrarouge est un rayonnement électromagnétique, avec des longueurs d'onde plus longues que la lumière visible et plus courtes que le rayonnement d'onde millimétrique. Les termes de longueur d'onde et d'amplitude servent à décrire le rayonnement infrarouge et d'autres formes de rayonnement électromagnétique. Par exemple, l'amplitude de signal décrit l'intensité du rayonnement électromagnétique et la longueur d'onde permet notamment de déterminer s'il s'agit d'un rayonnement de type micro-ondes, infrarouge ou en lumière visible.

### Quelle est la taille d'un micromètre ?

Un micromètre est très petit ; c'est l'équivalent d'un millionième de mètre. Pour mettre cette taille en perspective, il faut environ 100 micromètres pour obtenir l'épaisseur d'un cheveu.



L'étalonnage est facile avec le calibrateur infrarouge de précision 4180.

## Étalonnage en températures infrarouges

### Source de température

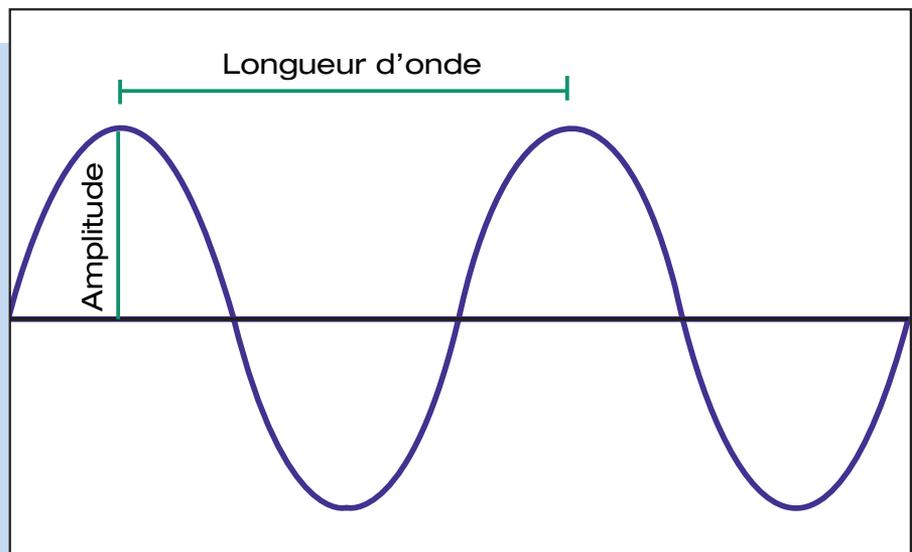
En dépit de notre expérience des températures visualisées, la confiance des mesures de température IR repose habituellement sur l'utilisation d'instruments étalonnés. L'étalonnage se définit par une série d'opérations exécutées selon une procédure documentée, comparant les mesures relevées par un instrument à celles obtenues avec un instrument ou une norme plus précise dans le but de détecter et de signaler, ou d'éliminer par ajustement, les erreurs de l'instrument testé.

Un étalonnage en températures IR commence par une surface de mesure faisant office de source de température ; il peut s'agir d'une surface plane ou d'une cavité servant d'étalon ou de référence. La géométrie de l'étalonnage, qui comprend la taille de la surface de mesure et sa distance au thermomètre étalonné joue un rôle important dans le résultat de la mesure. La stabilité et l'**uniformité** de la température sont également des éléments critiques, de même que les propriétés physiques de la surface d'émission telle que son émissivité.

### Conversion de la température d'entrée en radiance

La surface de mesure d'un calibrateur fait office de sonde en convertissant l'énergie thermique en rayonnement thermique. L'intensité d'une partie du rayonnement infrarouge émis par la surface de mesure est calculée par le thermomètre infrarouge pour obtenir une température. La surface de mesure est analogue au capteur d'une sonde RTD qui convertit l'énergie thermique en une résistance mesurée par

un thermomètre et utilisée pour calculer une température. Il est intéressant de noter que l'essentiel de l'erreur dans la mesure d'une température est liée au capteur de température, ce qui souligne l'importance de son étalonnage. L'une de ces sources d'erreur dans la surface de mesure et peut-être la plus grande dans un étalonnage de température infrarouge est l'**émissivité**.



L'uniformité de la température est importante pour l'étalonnage des caméras thermiques et des thermomètres infrarouges.

**Emissivité**

L'énergie radiante provenant d'une cible **opaque** combine la radiance émise provoquée par la température de la cible et la **radiance** réfléchie provenant de l'environnement. La **transmission** traversant l'objet est une autre source d'énergie radiante qu'il faut considérer lorsque les objets ne sont pas opaques. La quantité de

L'émissivité est considérablement affectée par la finition de la surface et le type de matériau d'un objet. Les métaux présentant une finition de surface lisse tendent à présenter une faible émissivité et une forte réflectivité, tandis que les longs orifices étroits présentent une émissivité élevée et une très faible réflectivité. La somme de l'émissivité, de la réflectivité et de la transmission est toujours égale à un.

Les fours thermiques infrarouges doivent présenter une émissivité connue qui doit

rester constante dans la plage de température de fonctionnement. Malheureusement, l'émissivité est un facteur négligé dans l'étalonnage de la plupart des calibrateurs IR. Ces calibrateurs sont eux-mêmes étalonnés en

**Emissivité, corps noirs et corps gris**

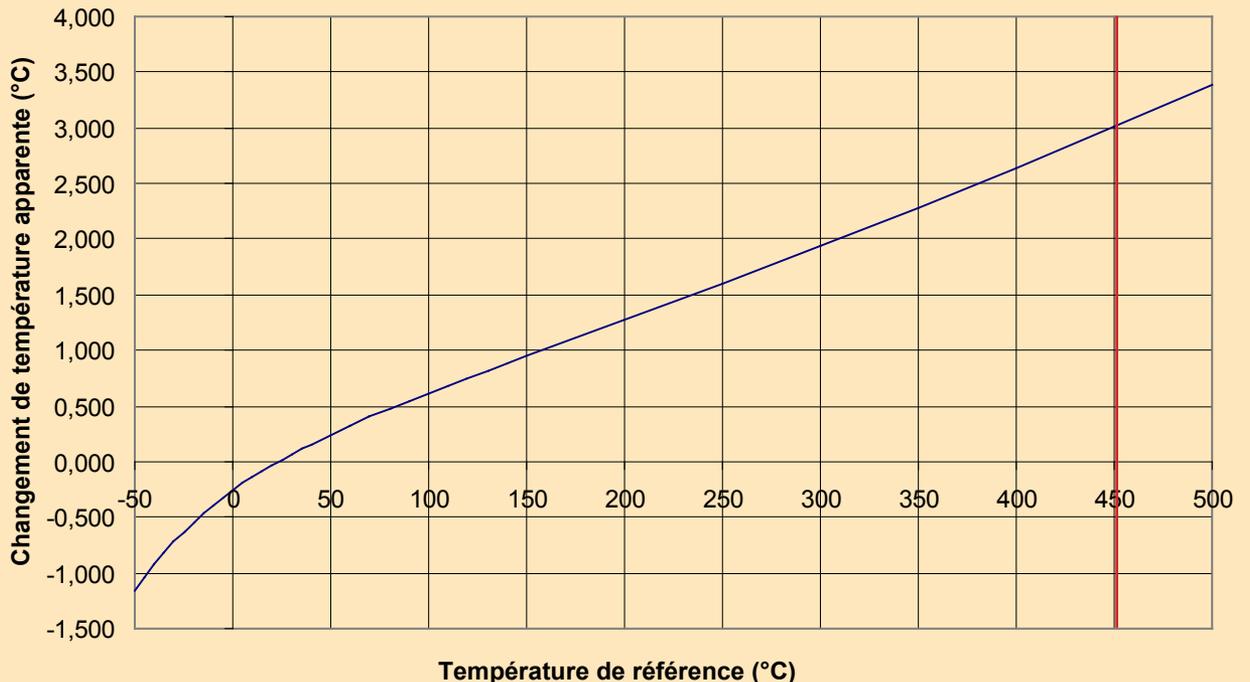
L'émissivité peut avoir n'importe quelle valeur entre zéro et un compris. Avec une émissivité zéro, aucune énergie lumineuse ne sera rayonnée, quelle que soit la température d'un objet. Avec une émissivité égale à un, la surface rayonnera parfaitement à toutes les longueurs d'onde. Les scientifiques donnent à ces objets spéciaux au rayonnement parfait le nom de « corps noir ». Les objets dont l'émissivité est très proche de un sont souvent appelés corps noirs également. Un calibrateur à surface plane présentant une émissivité d'environ 0,95 est appelé **corps gris** si l'émissivité est uniforme sur l'ensemble des longueurs d'onde.

**réflectivité + émissivité + transmissivité = 1**

Relation entre émissivité, réflectivité et transmission.

lumière émise à une température particulière est déterminée par l'émissivité de la surface. L'émissivité est le rapport entre l'énergie radiante émise par une surface et celle émise par un **corps noir** à la même température.

**Effet d'une augmentation de 1 % de l'émissivité sur la température apparente**  
 TBG=23 °C, ε=0,95, λ=8 μm à 14 μm



Erreurs de température équivalentes à une erreur de 1 % dans l'émissivité. Une erreur de 1 % dans l'émissivité risque d'entraîner une erreur de 3 °C dans la température à 450 °C.

introduisant un thermomètre à contact tel qu'une sonde PRT (sonde à résistance de platine) physiquement dans la cible. Cette technique néglige également les pertes de température au niveau de la surface de la cible infrarouge. Avec ce type d'étalonnage, l'utilisateur est susceptible d'ignorer que des corrections compliquées relatives à l'émissivité

sont requises à chaque température pour obtenir la précision revendiquée par le fabricant. Ces corrections sont basées sur la différence entre l'émissivité réelle mesurée de la cible et le réglage d'émissivité du thermomètre. Une erreur de 1 % dans l'émissivité à 500 °C entraînerait une erreur de 3,5 °C dans l'étalonnage. Par ailleurs, les consignes d'émissivité proposées par les fabricants ne représentent généralement que des valeurs typiques non vérifiées par étalonnage. Cela risque d'entraîner une perte de traçabilité et des résultats non homogènes dans le temps et entre calibrateurs.

Pour corriger les erreurs de température dans la surface de mesure, un four infrarouge doit être étalonné à l'aide d'un radiomètre qui mesure, à chaque température, la quantité d'énergie rayonnant de la cible d'étalonnage. Un affichage de température ayant subi un **étalonnage radiométrique** n'a pas besoin de température relatif à l'émissivité supplémentaire sauf si le réglage d'émissivité du

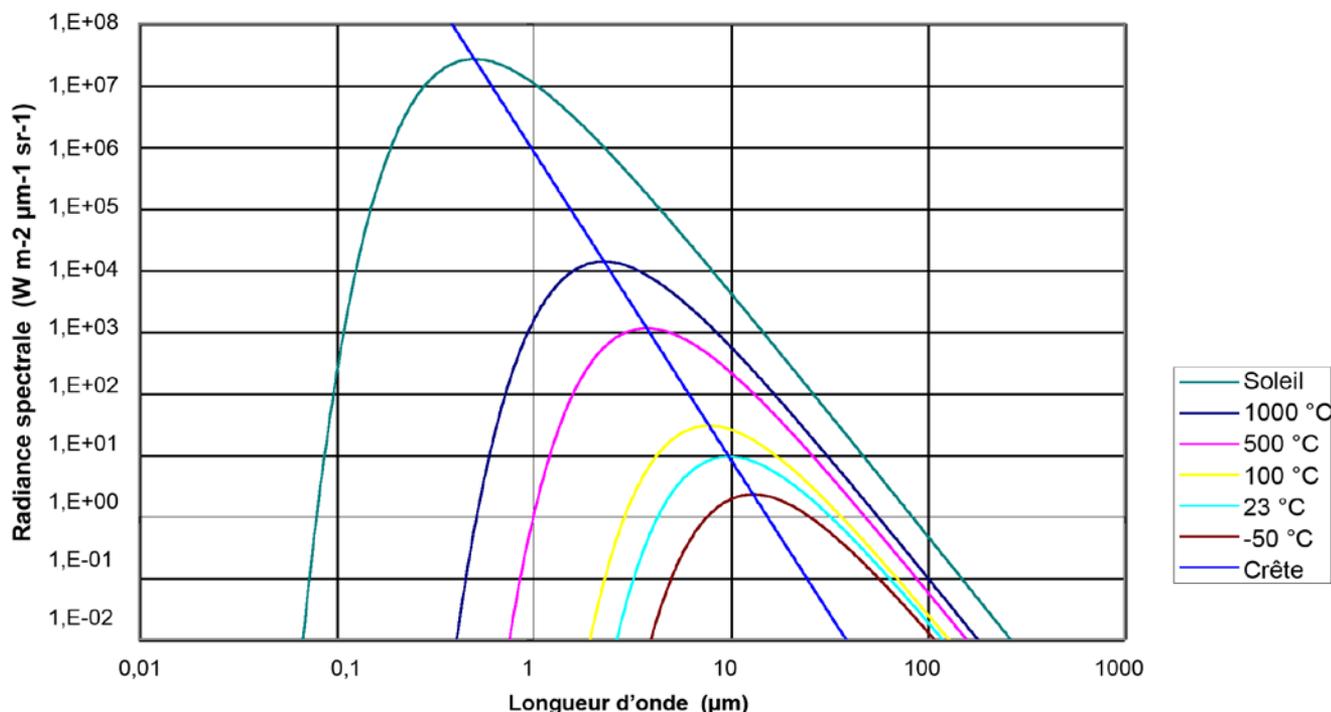
thermomètre ne correspond pas à celui du calibrateur. Recherchez un calibrateur capable de compenser les réglages d'émissivité des thermomètres infrarouges.

Comme le montre le graphique de température et de radiance spectrale ci-dessous, la lumière est produite à différentes longueurs d'onde lorsque la température entraîne un objet à émettre la lumière. C'est ce que l'on appelle la radiance spectrale (voir le graphique ci-dessous). Si toutes les ondes étaient alignées de la plus courte à la plus longue, les ondes les plus lumineuses seraient les ondes intermédiaires. Si on augmentait ensuite la température de l'objet émettant la lumière, on remarquerait que les ondes courtes deviennent plus lumineuses que les ondes longues. Lorsque l'objet devient suffisamment chaud, même les ondes très courtes de 0,400 µm à 0,700 µm commencent par être suffisamment lumineuses que le rayonnement émis par l'objet est visible à l'œil nu et l'objet paraît luire. L'émissivité à

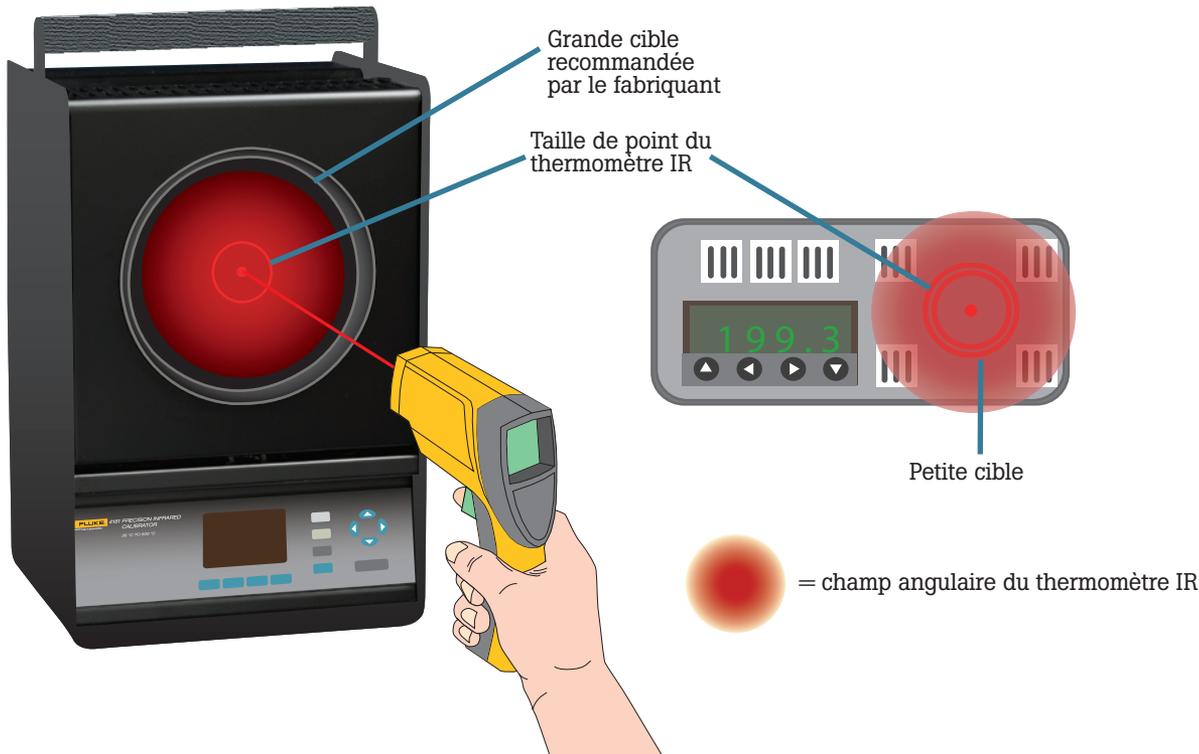
## Conseil technique :

Si la cible présente une température inférieure au **point de rosée**, la glace est susceptible de former des motifs cristallins qui entraîneront le changement de l'émissivité de surface, en introduisant des erreurs dans l'étalonnage. La purge au gaz sec permet d'empêcher le développement des cristaux qui risquent éventuellement de former une feuille de glace, masquant de fait la température de la cible pour provoquer des erreurs encore plus grandes.

## Radiance spectrale et température



La crête sur le graphique correspond aux longueurs d'onde les plus lumineuses. La crête se déplace vers la gauche, et la courbe monte à mesure que la température augmente.



La vision périphérique des thermomètres infrarouges exige d'utiliser de grandes cibles dans beaucoup d'étalonnages.

chaque longueur d'onde, appelée l'émissivité spectrale, détermine la luminosité de chaque onde. Le thermomètre utilise la luminosité totale d'une bande sélectionnée de ces ondes pour déterminer la température.

### Détection de la radiance à l'aide d'un thermomètre

L'énergie lumineuse rayonnée de la surface du calibrateur est transmise dans l'air jusqu'à sa détection par un thermomètre. La poussière, la fumée et les surfaces vitrées peuvent faire obstacle à la lumière en affectant les résultats de la mesure. Le détecteur doit collecter la lumière sur une zone précise de la cible prévue afin de ne pas mesurer les objets non souhaités de l'arrière-plan. Le rapport de la **distance par rapport à la taille du point** (D:S) aide l'utilisateur à trouver la bonne position du thermomètre.

Toutefois, la **taille du point** n'est qu'un pourcentage du **champ angulaire** complet du thermomètre. Comme l'œil humain, le thermomètre infrarouge dispose d'une vision périphérique. La vision périphérique des thermomètres IR, appelée aussi **diffusion** peut représenter entre 1 % et 35 % de l'énergie totale mesurée selon la

qualité de l'instrument. Si la taille du point est souvent adéquate pour les mesures pratiques sur le terrain, elle n'est pas toujours appropriée pour la précision de laboratoire requise lors d'un étalonnage. L'étalonnage de la plupart des thermomètres IR requiert donc une cible sensiblement plus grande que la taille suggérée par le rapport de la distance à la taille du point du thermomètre.

L'énergie infrarouge collectée par le thermomètre est filtrée par son système optique, qui n'est sensible qu'à une bande spectrale spécifique, de 8  $\mu\text{m}$  à 14  $\mu\text{m}$ . Le rayonnement réfléchi provoqué par la température ambiante de la salle fait partie de l'énergie collectée. La **réflexion** est liée à l'émissivité de façon particulière. Le rayonnement infrarouge détectable provenant du calibrateur combine le rayonnement thermique émis de la surface de mesure, et l'énergie réfléchie d'autres objets chauds dans l'environnement, tels que les fenêtres, les murs et les individus. Pour un objet opaque, émissivité plus réflectivité est égal à un.

Par conséquent, si l'émissivité d'une cible opaque est zéro, alors aucune énergie rayonnée provenant que cette cible

est provoquée par sa propre **température thermodynamique**.

Toute la lumière détectée par le thermomètre correspond au rayonnement réfléchi d'une autre source et frappant la cible depuis un autre point de la salle. Si l'émissivité de la cible est 0,95, sa réflectivité est de 0,05. En d'autres termes, la cible absorbe 95 % de l'énergie de la salle et réfléchit les 5 % restants. Cela signifie également que l'énergie émise par la cible liée à la température correspond de 95 % de ce qu'elle serait si elle provenait d'un corps noir parfait. Les thermomètres IR tentent de compenser l'énergie réfléchie par une cible ; toutefois, lorsqu'une cible refroidit considérablement par rapport à l'environnement ambiant, ou si l'émissivité est très faible, l'énergie réfléchie risque de compliquer la lecture de la température correcte car elle représente une part relativement importante du signal reçu par le thermomètre lorsque la température ciblée est en dessous de la température ambiante. Cette situation est souvent désignée par le rapport signal-bruit.

Les thermomètres IR mesurent un groupe de longueurs d'onde : la **bande spectrale**.

Les thermomètres IR sont des thermomètres à bande spectrale car ils mesurent la **radiance spectrale**, la radiance collective de toutes les longueurs d'onde à l'intérieur d'une bande spectrale particulière, 8  $\mu\text{m}$  à 14  $\mu\text{m}$  p. ex.

### **Calcul de la température à partir de la radiance**

Enfin, le calcul d'une température précise requiert de régler l'émissivité du thermomètre en fonction de l'émissivité réelle des objets mesurés. De plus, dans le cas d'une cible avec étalonnage radiométrique, l'émissivité du thermomètre doit correspondre à l'émissivité réelle étalonnée de la cible pour permettre une comparaison directe entre la température infrarouge de la cible du calibrateur et le thermomètre infrarouge testé.

### **Conclusion**

Les thermomètres infrarouges sont utilisés dans divers cas lorsque des mesures avec contact ne sont pas pratiques à réaliser. Souvent mal comprises, les applications impliquant ces appareils aboutissent à une confiance limitée des mesures obtenues. Mais la confiance dans ces mesures augmente avec l'étalonnage. Lorsque les enjeux sont cruciaux, ou que l'application est importante, cette confiance supplémentaire mérite un investissement constant pour tester ou étalonner régulièrement le thermomètre IR.

Tous les étalonnages ne sont pas égaux, et le choix de l'équipement fait toute la différence. En choisissant un calibrateur, choisissez-en un doté d'une cible suffisamment large pour tenir compte de la vision périphérique du thermomètre. Vous devez probablement choisir une cible de même taille que celle utilisée par le fabricant pour ses étalonnages ; les fabricants de thermomètres recommandent aussi d'utiliser la distance d'étalonnage qu'ils utilisent eux-mêmes pour obtenir les niveaux de précision de laboratoire lors des étalonnages.

Si le calibrateur est dépourvu d'étalonnage radiométrique, il faut connaître l'émissivité de sa cible pour calculer les corrections appropriées. Ces calculs sont difficiles de sorte qu'il est crucial de commencer par obtenir l'étalonnage correct. Des calculs similaires doivent être effectués si les paramètres d'émissivité du thermomètre ne correspondent pas à ceux du calibrateur ; l'utilisation d'un calibrateur bien conçu, capable d'établir ces calculs, permet donc d'éviter les pertes de temps et les soucis, ce qui privilégie la productivité.

## Glossaire

### Absorption :

Processus de conversion de l'énergie rayonnante, tombant sur une surface, en énergie thermique interne.

### Bande spectrale :

Energie électromagnétique dans une gamme de longueur d'onde continue bien définie. La gamme de 8 à 14 microns utilisée par de nombreux thermomètres infrarouges est un exemple de bande spectrale.

### Champ angulaire :

Le champ angulaire (FOV) est la région spatiale contenant une quantité d'énergie radiante spécifiée, captée par le système optique d'un thermomètre infrarouge. Le champ angulaire FOV est habituellement exprimé en degrés angulaires (p. ex. 1°). La surface de mesure doit remplir entièrement le champ angulaire du thermomètre pour fournir des mesures de température précises.

### Corps gris :

Une surface émettant un rayonnement à une émissivité constante sur toutes les longueurs d'onde et températures est un corps gris. Même si les corps gris n'existent pas en pratique, ils offrent une bonne approximation de nombreuses surfaces réelles.

### Corps noir :

Un corps noir est une surface idéale qui émet et absorbe le rayonnement électromagnétique avec la quantité maximum d'énergie possible à une température donnée. Une telle surface ne permet au rayonnement ni de s'y réfléchir ni de la traverser. En laboratoire, un corps noir est réalisé par une grande cavité avec une petite ouverture. La réflexion est interdite car la lumière pénétrant dans l'orifice doit se réfléchir plusieurs fois sur les parois de la cavité, entraînant son absorption avant qu'elle ne s'échappe.

### Diamètre du point lumineux :

Le diamètre du point de mesure d'un radiomètre. Il est souvent défini en tant que diamètre d'un point qui recueille un pourcentage défini de la puissance totale recueillie par le radiomètre, p. ex. 95 %. Ce diamètre de point varie selon la distance du radiomètre.

### Diffusion :

Cet effet provoqué par la non-régularité d'un milieu force la lumière à se déplacer dans une direction qui dévie d'une ligne directe.

### Emissivité :

L'émissivité d'une surface indique l'efficacité de son rayonnement comparée à un corps noir de même température. Elle est mesurée par le rapport entre l'énergie rayonnée par le matériau et l'énergie rayonnée par un corps noir de même température.

### Etalonnage radiométrique :

Etalonnage comparant les mesures établies par un instrument aux mesures établies par un radiomètre de référence, dans le but de détecter et de documenter ou d'éliminer par ajustements les erreurs de l'instrument testé.

### Longueur d'onde :

Distance dans la direction d'une onde progressive, nécessaire à l'exécution d'un cycle. Dans une onde, une propriété telle que le potentiel électrique varie dans un rapport cyclique avec la position. Dans une onde progressive, la position change également au fil du temps.

### Opaque :

Un objet opaque ne permet pas au rayonnement électromagnétique de le traverser. Une surface peut être opaque à certaines longueurs d'onde et transparentes à d'autres. Par exemple, le verre est opaque au rayonnement infrarouge aux longueurs d'onde supérieures à ~3 microns, mais transparent à la lumière visible.

### Point de rosée :

Le point de rosée est la température à laquelle l'air doit être refroidi à une pression barométrique donnée pour que la vapeur se condense en eau.

### Radiance :

Mesure de l'intensité du rayonnement électromagnétique émis par ou traversant une zone particulière dans une direction spécifique. Elle est définie en tant que *puissance* par unité de *surface* et par unité d'*angle solide*. L'unité de radiance SI est le watt par stéradian par mètre carré ( $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$ ).

### Radiance spectrale :

Mesure de l'intensité du rayonnement électromagnétique à une longueur d'onde spécifique, émis ou traversant une zone particulière dans une direction spécifiée. Elle est définie par la *radiance* par unité de *longueur d'onde*. La radiance spectrale utilise les unités SI  $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-3}$  lorsqu'elle est mesurée par unité de longueur d'onde.

### Radiomètre :

Appareil utilisé pour mesurer la puissance, également appelé flux radiant, dans le rayonnement électromagnétique. Voir aussi Thermomètre infrarouge.

### Rapport distance à diamètre de la cible :

Le rapport distance à diamètre de la cible (D:S) est le rapport entre la distance à l'objet et le diamètre de la zone contenant un pourcentage spécifique de l'énergie totale détectée par le thermomètre infrarouge. Le rapport D:S sert de guide pour déterminer la distance appropriée qui permet d'établir des mesures de température infrarouge pratiques.

**Rayonnement électromagnétique :**

Energie émise par une surface traversant l'espace sous forme d'onde avec ses composants magnétiques et électriques. Exemples : ondes radio, micro-ondes, rayonnement d'onde millimétrique, rayonnement infrarouge, lumière visible, rayonnement ultraviolet, rayons X et gamma.

**Rayonnement infrarouge :**

Le rayonnement infrarouge (IR) est un rayonnement électromagnétique avec des longueurs d'onde supérieures à la lumière visible et inférieures au rayonnement d'onde millimétrique. Toutes les surfaces de températures supérieures au zéro absolu (-273,15 °C) émettent un rayonnement infrarouge.

**Réfectivité :**

La fraction du rayonnement incident réfléchi par une surface.

**Réflexion :**

Le rayonnement électromagnétique est réfléchi lorsqu'il change de direction au niveau d'une surface, tout en restant dans le premier milieu sans passer dans le deuxième.

**Température thermodynamique :**

Valeur de température reposant sur une échelle cohérente avec toutes les lois connues de la thermodynamique.

**Thermomètre à infrarouge :**

Appareil qui calcule la température d'un objet en mesurant le rayonnement infrarouge émis par l'objet. On l'appelle également thermomètre sans contact, en raison de sa capacité à mesurer la température d'une surface sans établir de contact avec cette surface.

**Transmission :**

Processus par lequel une certaine fraction de l'énergie électromagnétique dirigée sur une surface parvient à traverser le matériau de cette surface. On suppose que la transmission est égale à zéro pour les surfaces qui sont opaques au niveau de la bande spectrale mesurée.

**Transmissivité :**

Mesure la quantité d'onde électromagnétique traversant une surface. Elle est calculée à partir du rapport entre la valeur traversant la surface et la valeur atteignant la surface.

**Uniformité :**

Une caractéristique d'uniformité exprime la différence maximale permise entre les résultats de deux mesures dans la région délimitée par une surface ou un milieu de mesure.

**Fluke. Keeping your world up and running.**®

**Fluke Corporation**  
PO Box 9090, Everett, WA - Etats-Unis 98206

**Fluke Europe B.V.**  
PO Box 1186, 5602 BD  
Eindhoven, Pays-Bas

**Pour plus d'informations, composez le :**  
Aux Etats-Unis Tél. (800) 443-5853 ou  
Fax (425) 446-5116  
En Europe/Moyen-Orient/Afrique  
Tél. (31 40) 2 675 200 ou  
Fax (31 40) 2 675 222  
Au Canada Tél. (800)-36-FLUKE ou  
Fax (905) 890-6866  
Dans les autres pays  
Tél. +1 (425) 446-5500 ou  
Fax +1 (425) 446-5116  
Accès Internet : <http://www.fluke.com>

© 2007 Fluke Corporation. Specifications subject to change without notice. Printed in U.S.A.  
11/2007 3789603 A-FR-N Rev A  
Pub\_ID: 11329-fre, rev 01