

Mesure précise et sans contact de la température des métaux réfléchissants

Albert Book

La mesure de la température des métaux réfléchissants aux basses températures est particulièrement difficile avec les thermomètres infrarouges. En effet, la très faible émissivité rend la mesure instable car très influencée par les conditions environnantes.

Cet article décrit les principes physiques, les différentes méthodes de mesure ainsi que les derniers développements technologiques et les conditions optimales pour garantir une mesure juste.

Principes physiques

Un thermomètre ou pyromètre infrarouge mesure l'énergie infrarouge émise par un objet et en détermine la température en appliquant les équations de Planck. Le résultat de la conversion dépend de la température mais aussi pour une grande part de l'émissivité du matériau. L'émissivité est une propriété propre à chaque matériau qui définit la quantité relative d'énergie radiative émise par l'objet par rapport à l'énergie radiative émise à la même température par un corps noir.

Pour un matériau non transparent, on peut définir l'émissivité ϵ comme $\epsilon + \rho = 1$ où ρ est l'indice de réflexion. Les bons émetteurs radiatifs ont une émissivité élevée et une faible réflectivité. En règle générale, les matériaux non-métalliques ont une émissivité $>80\%$. La mesure est alors souvent assez facile. Au contraire, les métaux ont une émissivité très variables : $<10\%$ pour les surfaces polies et $>80\%$ pour les surfaces oxydées et aux températures élevées. A noter également, que l'émissivité de nombreux métaux et alliages augmente lorsque la température augmente ou lorsque la longueur d'onde du détecteur diminue. Voir **Fig. 1**.

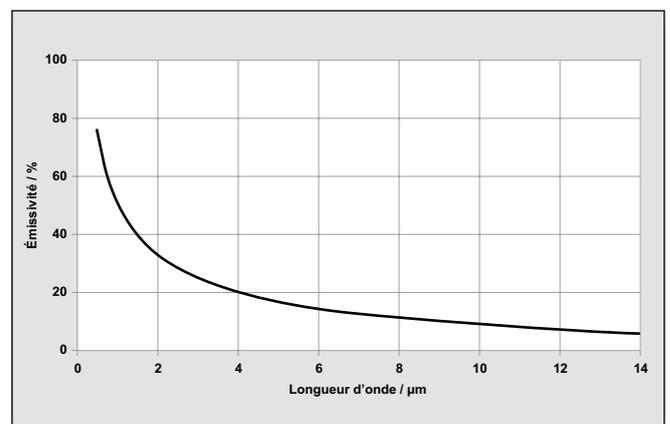


Fig. 1 L'émissivité des métaux diminue lorsque la longueur d'onde augmente

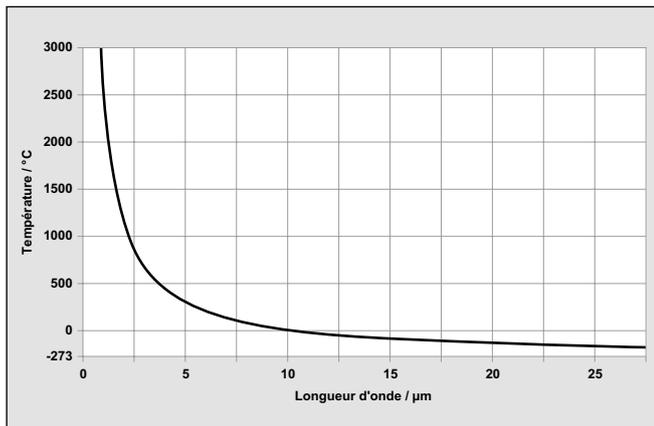


Fig. 2 Déplacement de Wien : relation entre la longueur d'onde et la température maximale

La loi du déplacement de Wien définit que la longueur d'onde à laquelle un corps noir émet le plus de flux lumineux énergétique est inversement proportionnelle à sa température. Autrement dit, plus la longueur d'onde du détecteur est courte, plus il sera capable de mesurer avec précision des températures élevées. A contrario, un modèle dit grandes longueurs d'ondes, du type 8-14 μm , sera utilisé pour les mesures ambiantes ou relativement basses.

Les métaux ont une faible émissivité aux grandes longueurs d'ondes comme le montre la figure 1. Dès lors l'énergie reçue par le thermomètre provient essentiellement des radiations réfléchies donc de l'environnement et non pas de l'objet. La mesure est imprécise et très instable : toute modification de l'environnement perturbe la mesure. De plus, la moindre variation d'émissivité de la surface du métal engendre une variation importante de la mesure.

Pour mesurer un matériau métallique aux basses températures, il faudra un détecteur avec une courte longueur d'onde pour que l'émissivité soit suffisamment élevée. Malheureusement, plus la longueur d'onde est courte, plus la température minimale mesurable augmente. Avec un détecteur 2,8 μm , il est possible de mesurer la température à partir de 50°C dans une pièce où la température ambiante n'excède pas 25°C.

Protocole de mesure

Généralement, on utilise des détecteurs photoélectriques PbS à 2,4 μm à grande sensibilité pour la mesure sur les métaux réfléchissants. Leur principal défaut est d'avoir une dérive d'environ 4% par $^{\circ}\text{C}$ de variation de leur propre température. Pour contrer ce défaut, il faut utiliser un disque obturé en rotation sur

le devant de l'instrument qui sert à calibrer en permanence l'instrument. Le thermomètre mesure la radiation émise par l'objet au travers du trou, puis l'énergie reçue par réflexion du disque interne avec une température connue. Chacun comprend dès lors qu'avoir un moteur et un disque en rotation diminue de manière importante la durée de vie de l'instrument et augmente les risques de panne.

De plus, le temps de réponse est fortement augmenté et diminue le champ des applications car il n'est pas possible de mesurer des objets en déplacement rapide.

Une autre méthode consiste à utiliser un pyromètre infrarouge 8-14 μm . A cause de la très faible émissivité sur cette plage spectrale, le signal doit être fortement amplifié et le signal est nettement plus bruité. Les conséquences sont: un temps de réponse plus long et une erreur de mesure très supérieure. De plus, toute variation ou modification de surface modifie l'émissivité et perturbe fortement la mesure. L'élévation de la température interne bien que compensée ajoute encore une erreur.

On trouve parfois un mixte des 2, à savoir des détecteurs à grandes longueurs d'ondes avec un disque rotatif (chopper) afin de mieux compenser les variations de températures ambiantes. Lorsque l'émissivité des matériaux est faible, le signal est fortement bruité. Les traitements du signal ne permettent pas de tout résoudre et cela conduit à des erreurs de l'ordre de 20°C lorsque les temps de réponse sont courts. On ne peut plus parler alors d'instrument de mesure...

Une troisième méthode consiste à utiliser des optiques à faible résolution pour augmenter l'énergie reçue. On mesure alors des surfaces plus grandes et à nouveau on restreint les applications possibles.

On peut utiliser également des lentilles de grandes tailles pour collecter plus d'énergie infrarouge. Mais il faut que ces dernières soient de grandes qualités pour compenser les aberrations optiques. Dès lors, il s'agit souvent de systèmes à focale fixe et courte. L'objet doit se trouver très précisément à la distance focale de la lentille notée f . Tout écart, même de quelques millimètres, engendre une erreur importante de mesure. En effet, le détecteur reçoit alors de l'énergie provenant de l'environnement qui peut être plus faible ou plus importante. Dans les 2 cas, la mesure est faussée. La **figure 3** montre une mesure sous-évaluée si la température ambiante est plus faible que l'objet. Un instrument à focale fixe limite les zones d'installation possibles.

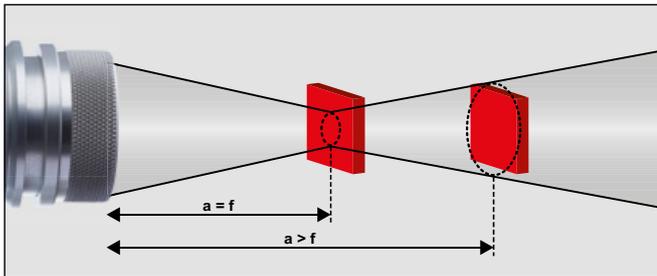


Fig. 3 La distance de travail a doit correspondre parfaitement à la focale f de l'instrument

Lors du choix du pyromètre, une attention toute particulière doit être faite sur les caractéristiques techniques telles que le temps de réponse, la méthode de mesure, les coefficients de température, la résolution optique, la précision et le NETD (Noise Equivalent Temperature Difference). Malheureusement, ces données indispensables ne sont pas toujours présentes dans les brochures ou sont parfois litigieuses. Il est vivement conseillé de les obtenir auprès du fabricant afin d'éviter toute mauvaise surprise.

Méthode de mesure alternative

Sur une bobine d'acier, il est possible de faire une mesure fiable à l'aide d'un thermomètre grandes longueurs d'ondes en se positionnant au gap. Les réflexions multiples spécifiques à cet emplacement génèrent une émissivité apparente nettement plus favorable pouvant approcher les 100%. Voir **figure 4**.

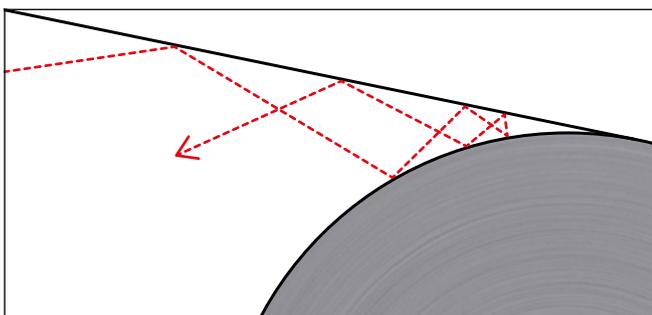


Fig. 4 Réflexions multiples du rayonnement au niveau du gap

Afin de positionner l'instrument à une distance suffisante pour éviter tous risques d'accrochage, le pyromètre infrarouge devra disposer d'une lentille avec une résolution optique élevée et sans parallaxe. Le pointeur laser est souvent recommandé pour aider à l'alignement. Le diamètre de la bobine pouvant être variable, le gap (point d'inflexion) se déplace également. Il faut donc que la visée du pyromètre suive ce déplacement.

Pour ce faire, un miroir oscillant peut être placé sur le devant de l'instrument Fig 5. Seule la température maximale de chaque cycle est conservée. Cette valeur correspond à la position où l'émissivité est maximale, c'est à dire au gap. Néanmoins cette solution n'est pas toujours facile à mettre en place et introduit un équipement en mouvement source potentielle de panne.

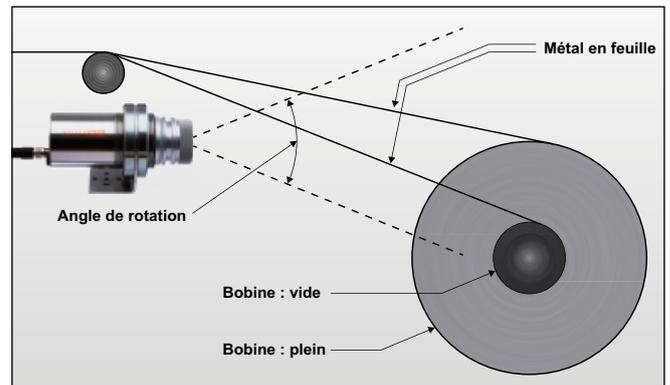


Fig. 5 Position changeante du gap lors du bobinage en fonction du diamètre

Une autre solution consiste à utiliser une cloche en or qui recouvre la zone de mesure. Les radiations se réfléchissent sur les parois de la demi-sphère et génèrent également une émissivité apparente élevée. Les inconvénients de cette méthode sont : nécessité de travailler proche de l'objet, méthode s'apparentant à une mesure contact, nécessité d'avoir toujours des parois propres souvent incompatible avec l'environnement industriel.



Fig. 6 Arc en téflon pour mesurer une tôle en acier Inox

Il est possible de faire une mesure par l'intermédiaire d'un matériau de transfert ayant une émissivité élevée. Il s'agit ici de faire la mesure sur du Téflon en contact avec le métal à mesurer. Le Téflon prend la température de l'objet et renvoie une

radiation équivalente mais avec une émissivité suffisante. Cette méthode aussi s'apparente à une mesure contact et la mise en œuvre peut être délicate.

Dernières innovations technologiques

Un pyromètre industriel doit être facile à installer, à une distance de sécurité suffisante et sans traitement particulier du signal. Cela signifie qu'il doit être capable de détecter les radiations infrarouges même avec une faible émissivité.

Il devra avoir une optique de précision pour collecter le plus d'énergie possible qui est l'information brute. Plus l'ouverture numérique de la lentille est grande, plus l'énergie collectée est importante. Mais cela augmente les aberrations optiques et nécessite des montages optiques plus complexes et plus onéreux. Cet ensemble optique de haute précision doit également garantir une faible dépendance à la variation de la taille de l'objet ou de la distance. Cette dépendance est appelée Effet Taille de Source (SSE en anglais). Le **graphique 7** montre l'influence du SSE sur 2 équipements, l'un équipé de lentilles standard, le second de lentilles de qualité supérieure.

L'instrument avec des lentilles standard nécessite que l'objet soit au minimum 2,5 plus grand que le spot de mesure pour que l'erreur n'excède pas 2%.

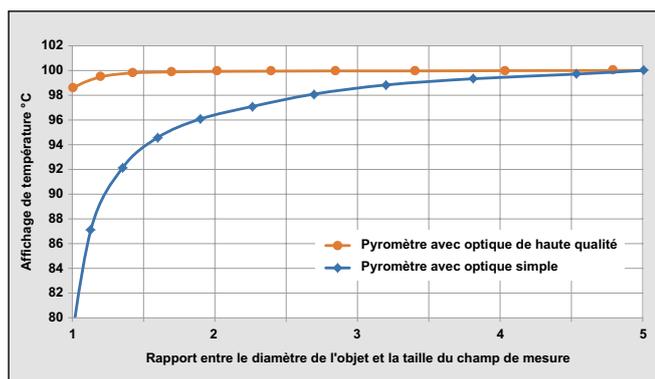


Fig. 7 Erreur de mesure lorsque la taille de l'objet varie

L'ouverture numérique élevée et la taille diminuent la profondeur de champ du système optique. L'objet doit donc se trouver à la distance focale exacte. L'utilisation d'un pyromètre avec une lentille focalisable permet de choisir sa distance de travail contrairement au modèle à focale fixe.



Fig. 8 Paramètres du capteur à onde continue pour mesurer des températures de 75°C vers le haut

Le signal émis par le détecteur étant faible, il faut un amplificateur et une électronique performants pour extraire une information précise nettoyée du bruit environnant. L'instrument disposera à cet effet d'un amplificateur faible bruit, d'un convertisseur A/D haute résolution et d'un processeur rapide pour supporter des algorithmes complexes, linéariser et compenser la température ambiante. Equipé ainsi, la mesure sera possible dès 75°C avec l'utilisation d'un détecteur courte longueur

d'onde (**Fig. 8**). Le pyromètre infrarouge mesure la température en quelques millisecondes et peut être utilisé avec des objets en mouvements. La mesure se fait à une distance raisonnable et permet la mesure sur des objets à partir de 2 mm de diamètre.

Ce nouveau type de pyromètre 2,4 μm existe en version fixe mais également en portable pour les contrôles ponctuels ou la maintenance.

Prérequis pour la mesure de température sur les objets métalliques à basses températures

Tout d'abord, la mesure directe n'est possible que si la température de l'objet est au minimum 25°C plus élevée que la température interne de l'instrument. L'augmentation de la température ambiante et/ou la diminution de l'émissivité de l'objet augmentent le seuil de détection minimal de la température comme le montre la **graphique 9**. Certains fabricants définissent les plages de mesure en considérant un corps noir avec une émissivité de 100%, d'autres ne spécifient rien... Ces valeurs ne sont donc aucunement exploitables dans les applications que nous avons décrites. A titre d'exemple, le graphique 9 montre que la température minimale mesurable est de 125 °C pour un objet avec une émissivité de 10% et dans une atmosphère à 50°C.

Cependant, pour avoir une mesure fiable sur les métaux réfléchissants à basses températures, il est recommandé voire nécessaire de travailler au travers d'un tube qui isole des radia-

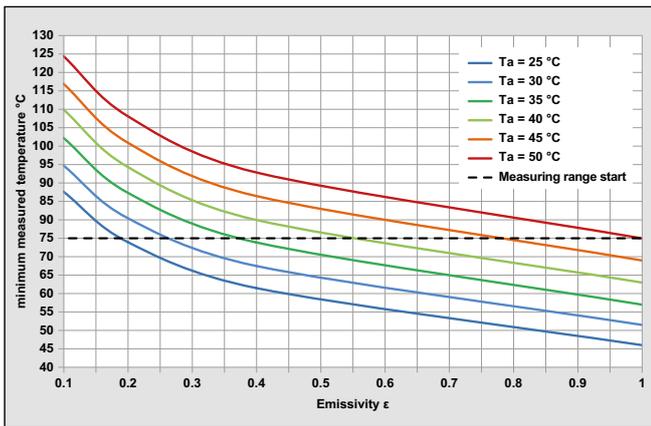


Fig. 9 Température de mesure minimale en fonction de la température ambiante T_a et de l'émissivité

tions environnantes. La lumière du jour ainsi que les lumières artificielles émettent également un rayonnement qui peut perturber la mesure. Un simple tube peut ne pas être suffisant car il peut constituer à son tour une source de radiations parasites lorsque sa température est proche de celle de l'objet. Idéalement, le tube sera plus froid et recouvert à l'intérieur d'un matériau à faible émissivité (inox ou aluminium). Son diamètre sera au moins 6 fois supérieur à la distance de travail.

Conclusion

Une mesure des basses températures précise et stable et avec peu de maintenance sur les métaux à faible émissivité est dorénavant possible avec la dernière génération de pyromètre infrarouge. Ces instruments utilisent un système optique très performant ainsi que des électroniques de dernière génération. Néanmoins, la mise en place nécessite un certains nombres de précautions et d'accessoires. Les limites atteignables dépendront en tout état de causes de l'ensemble des paramètres tels que l'émissivité, la température ambiante, la distance de travail.



Auteur

Dipl.-Ing. Albert Book
 KELLER HCW GmbH · Germany
 Infrared Thermometer Solutions
 Tél. +49 54 51 85 320
 albert.book@keller-msr.de
 www.keller-msr.fr