

Caractérisation d'un corps noir de transfert pour l'étalonnage de pyromètres jusqu'à 3 000 °C

Characterisation of a blackbody source for the calibration of radiation thermometers up to 3 000 °C

Olga KOZLOVA, Stéphan BRIAUDEAU, Lydia RONGIONE, Frédéric BOURSON, Séverine GUIMIER, Stéphane KOSMALKI et Mohamed SADLI

Laboratoire commun de métrologie LNE-CNAM (LCM), CNAM, 61 Rue du Landy, 93210 La Plaine-Saint Denis, France, olga.kozlova@lne.fr.

Résumé

L'étalonnage de pyromètres industriels dans le domaine de températures compris entre 1 000 °C et 3 000 °C nécessite une cavité corps noir de transfert, dont la température est mesurée à l'aide d'un pyromètre de référence. L'utilisation de cette cavité est imposée par les caractéristiques du pyromètre à étalonner car son champ de visée, habituellement de l'ordre de 10 mm à 30 mm, est incompatible avec les dimensions des points fixes utilisés pour l'étalonnage des pyromètres de référence. Les pyromètres à comparer peuvent également avoir des caractéristiques spectrales très différentes. La largeur de transmission du filtre du pyromètre de référence est généralement de l'ordre de 20 nm alors qu'elle atteint plusieurs centaines de nanomètres pour le pyromètre à étalonner. Une comparaison sans biais des deux instruments ne peut donc être obtenue qu'avec une cavité de transfert d'émissivité égale à 1. Les caractéristiques spectrales et spatiales très différentes des deux pyromètres imposent donc la détermination de l'émissivité effective de la cavité ainsi que celle du profil radial des surfaces interceptées par les visées des pyromètres. Le four à haute température Thermogauge HT-9500 du LNE-CNAM a été caractérisé en vue de son utilisation comme cavité de transfert. Pour cela, les gradients radial et longitudinal de la cavité ont été mesurés par différentes méthodes. L'émissivité effective de la cavité a été calculée. Une estimation des corrections et des incertitudes associées à l'émissivité non-unitaire est présentée dans cet article.

MOTS CLÉS : CORPS NOIR, ÉMISSIVITÉ, HAUTE TEMPÉRATURE, ÉTALONNAGE DES PYROMÈTRES, GRADIENT THERMIQUE.

Abstract

Calibration of the industrial pyrometers in the temperature range between 1 000 °C and 3 000 °C requires a blackbody cavity source

which temperature is measured using a reference pyrometer. The use of such blackbody cavity source is imposed by the characteristics of the pyrometers to be calibrated, because of the large field-of-view (usually of the order of 10 mm to 30 mm), which is not compatible with the dimensions of the fixed points used to calibrate reference pyrometers. The reference pyrometer and the pyrometer under the calibration can also have very different spectral characteristics. The filter's transmission bandwidth of the reference pyrometer filter is generally of the order of 20 nm, but it can reach several hundred nanometers for the pyrometer under calibration. An unbiased comparison of the two instruments can be only obtained with a transfer blackbody cavity with emissivity equal to 1. The different spectral and spatial characteristics of the compared pyrometers require a determination of the effective emissivity of the cavity and a determination of the radial profile of surfaces intercepted by the field-of-view of pyrometers. The high temperature furnace Thermogauge HT-9500 LNE-CNAM has been characterized for use as a transfer cavity. For this, the longitudinal and radial gradients in the cavity have been measured by various methods. The effective emissivity of the cavity was calculated. An estimate of the corrections and uncertainties associated with non-unit emissivity are presented in this article.

KEY WORDS: BLACKBODY SOURCE, EMISSIVITY, HIGH TEMPERATURE, RADIATION THERMOMETER CALIBRATION TECHNIQUE, THERMAL GRADIENT.

1. Introduction

La mesure des hautes températures est un enjeu scientifique et industriel important dans des domaines tels que la métallurgie, la verrerie, l'énergie, l'aéronautique, la défense, etc. La connaissance de la température permet

d'optimiser et/ou de sécuriser des processus industriels, ainsi que de minimiser la dépense énergétique engendrée par ces processus.

Parmi les trois modes possibles de transfert de chaleur, la conduction, la convection et le rayonnement, ce dernier devient prépondérant aux très hautes températures, cela permet donc d'appliquer les méthodes de mesure par rayonnement optique avec une incertitude maîtrisée. Dans les applications industrielles les températures accessibles par contact sont limitées à 1 700 °C (ou sous conditions particulières jusqu'à 2 300 °C). Au-delà de ces températures, les méthodes de mesure de température par rayonnement deviennent les seules possibles.

Dans cet article, nous nous intéressons aux moyens d'étalonnage de pyromètres industriels aux très hautes températures, et plus particulièrement au four corps noir de transfert. Les particularités de l'étalonnage des pyromètres industriels ainsi que les méthodes d'étalonnage imposées par ces particularités sont présentées et discutées dans la partie 2 de l'article. Le dispositif utilisé au LNE-Cnam pour l'étalonnage de pyromètres industriels est présenté dans la partie 3. Les résultats de la caractérisation du four corps noir de transfert sont présentés dans la partie 4 (Distribution de températures) et la partie 5 (Émissivité). Grâce à cette caractérisation les corrections à appliquer lors d'un étalonnage ont pu être estimées (partie 6). Finalement, une conclusion est donnée dans la partie 7 de l'article.

2. Méthode d'étalonnage d'un pyromètre industriel par comparaison

Les mesures de température par rayonnement sont basées sur la loi de Planck qui relie la densité spectrale de luminance émise par un corps noir à sa température thermodynamique et à la longueur d'onde par la relation (1) :

$$L_{CN}(\lambda, T) = \frac{c_{1L}}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (1)$$

où c_{1L} et c_2 sont les constantes de rayonnement, de valeurs : $c_{1L} = 1,191044 \times 10^{-16} \text{ W}\cdot\text{m}^2$ et $c_2 = 0,01438769 \text{ m}\cdot\text{K}$; λ est la longueur d'onde et T la température thermodynamique.

L'échelle internationale de température dont la dernière version date de 1990 (EIT-90) permet de définir la température par extrapolation à partir du rapport de la loi de Planck exprimée à deux températures. Au-delà du point de congélation de l'argent (961,78 °C), la température T_{90} ¹ est définie dans l'EIT-90 par le rapport des densités spectrales de luminance d'un corps noir à une température inconnue et d'un corps noir à un point fixe de l'EIT-90 (argent, or ou cuivre), dont le choix est laissé à l'expérimentateur [1] :

$$\frac{L_\lambda(T_{90})}{L_\lambda[T_{90}(X)]} = \frac{\exp[c_2/(\lambda T_{90}(X))] - 1}{\exp[c_2/(\lambda T_{90})] - 1} \quad (2)$$

¹ La notation T_{90} correspond à la température dans l'échelle de l'EIT-90, en kelvin.

où $L_\lambda[T_{90}(X)]$ est la densité spectrale de luminance du corps noir porté à la température $T_{90}(X)$ correspondant à la température de congélation de l'argent, de l'or ou du cuivre, point fixe de température le plus élevé de l'EIT-90. $L_\lambda(T_{90})$ est la densité spectrale de luminance du corps noir porté à la température T_{90} à déterminer.

L'absence de points fixes de l'EIT-90 au-delà du point de cuivre (1 084,62 °C) génère une augmentation de l'incertitude notamment en raison d'une connaissance imparfaite de la sensibilité spectrale du pyromètre.

La référence des mesures des températures au-delà de 1 000°C est un sujet d'étude actif dans un certain nombre de laboratoires nationaux de métrologie en raison de la nécessité grandissante de réduire les incertitudes dans ce domaine. La réduction des incertitudes est désormais rendue possible par l'émergence de nouveaux points fixes eutectiques [2,3] : Co-C (1 324 °C), Pd-C (1 492 °C) Pt-C (1 738 °C), Ru-C (1 954 °C) et Re-C (2 474 °C).

Ces points fixes eutectiques peuvent être utilisés pour étalonner un pyromètre de laboratoire avec une meilleure incertitude. Cependant, en raison du petit diamètre de la cavité corps noir à ces points fixes (environ 3 mm) [4], il est impossible de les utiliser pour l'étalonnage d'un pyromètre industriel dont le champ de visé est souvent supérieur à 3 mm.

Dans le cas d'un pyromètre industriel, la méthode d'étalonnage généralement utilisée consiste en l'usage d'un pyromètre de référence et d'un corps noir de transfert. Cette méthode consiste à affecter au corps noir de transfert une température déterminée à l'aide du pyromètre de référence, préalablement caractérisé et étalonné à un point fixe de l'EIT-90. Cette méthode d'étalonnage peut être illustrée par deux cas idéaux :

- Le premier cas se présente lorsque le pyromètre de référence et le pyromètre à étalonner sont identiques spectralement et spatialement. Dans ce cas le rapport des densités spectrales de luminances mesurées par les deux instruments est égal au rapport de leurs réponses. Il n'est donc pas nécessaire de connaître l'émissivité totale de la cavité. Mais il est évidemment impossible d'avoir un pyromètre de référence identique à chaque pyromètre commercial à étalonner.
- Le deuxième cas consiste en une cavité de comparaison parfaitement isotherme d'émissivité unitaire. Dans ce cas, les températures de luminance mesurées par les deux pyromètres sont égales à la température de la cavité. Ce cas idéal est celui du corps noir, irréalisable en pratique compte tenu de l'ouverture de la cavité et du gradient de température le long de cette dernière.

D'une manière générale, les deux pyromètres ne sont pas identiques et la cavité de comparaison n'est pas parfaite. Le rapport des densités spectrales de luminance mesuré par les deux pyromètres n'est pas unitaire, il est donc biaisé. Le premier biais est dû à la différence des champs

de visée des deux pyromètres. Le deuxième est lié à la méconnaissance de la sensibilité spectrale du pyromètre à étalonner, celle-ci étant généralement beaucoup plus large que celle du pyromètre de référence.

Ces biais sont accentués par le gradient longitudinal de la cavité de transfert qui dégrade l'émissivité de cette dernière. Dans ce cas, le biais lié à la différence des sensibilités spectrales des deux pyromètres doit être corrigé.

Le gradient radial de température doit quant à lui, être pris en considération pour la correction liée aux champs de visée différents des deux pyromètres.

Compte tenu de ces deux biais, la correction C à ajouter aux lectures du pyromètre à étalonner peut être modélisée comme suit :

$$C = T_{\text{ref}} - T_{\text{ind}} + \text{Corr}_1 + \text{Corr}_2,$$

où T_{ref} et T_{ind} sont respectivement les températures lues par le pyromètre de référence et par le pyromètre à étalonner, Corr_1 et Corr_2 sont respectivement les corrections dues aux différences des champs de visée et de sensibilités spectrales des instruments.

Dans le processus d'étalonnage, les incertitudes portant sur ces corrections doivent être prises en compte. L'incertitude totale d'étalonnage sur la correction d'un pyromètre industriel par la méthode décrite peut s'écrire :

$$U^2 = U_{\text{CN}}^2 + U_{\text{étal}}^2 + U_{\text{réf}}^2 + U_{\text{ind}}^2 + U_{\text{Corr1}}^2 + U_{\text{Corr2}}^2 \quad (3)$$

où U_{CN} est l'incertitude liée à la stabilité du corps noir ; $U_{\text{étal}}$ est l'incertitude d'étalonnage du pyromètre de référence ; $U_{\text{réf}}$ et U_{ind} sont respectivement des incertitudes de répétabilité des pyromètres de référence et celles du pyromètre à étalonner ; U_{Corr1} est l'incertitude portant sur la correction des champs de visée des deux pyromètres et U_{Corr2} est l'incertitude sur la correction de sensibilité spectrale des instruments. Dans cet article, nous nous focalisons sur les corrections dues aux différences de champs de visée (Corr_1) et de sensibilités spectrales des instruments (Corr_2), que nous avons estimé grâce à une meilleure caractérisation de corps noir de transfert.

3. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé au LNE-Cnam pour étalonnage des pyromètres industriels dans le domaine de températures compris entre 1 000 °C et 3 000 °C est composé d'un pyromètre de référence et d'un four corps noir de transfert (fig. 1).

3.1. Pyromètre de référence

Le pyromètre de référence du LCM, nommé LP3, est le Linear Pyrometer LP3 8045 provenant de la société KE Technologie. Il est équipé de cinq filtres interférentiels interchangeables de longueurs d'onde centrales de l'ordre de 650 nm, 750 nm, 850 nm, 900 nm et 950 nm et de largeurs à mi-hauteur comprises entre 10 nm et 20 nm. Le

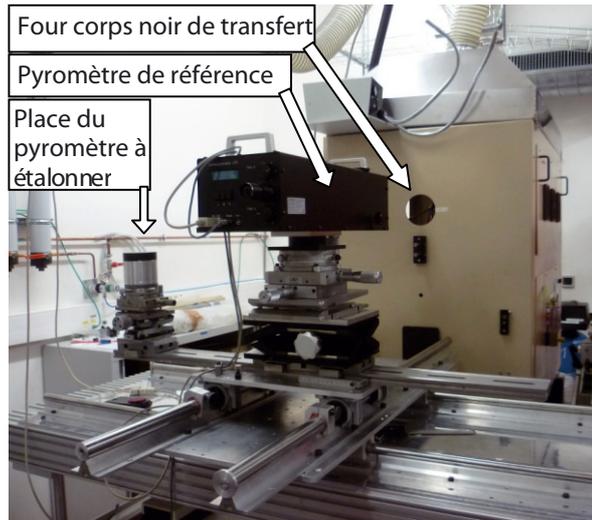


Fig. 1. – Dispositif expérimental utilisé pour étalonnage des pyromètres industriels dans le domaine de températures compris entre 1 000 °C et 3 000 °C.

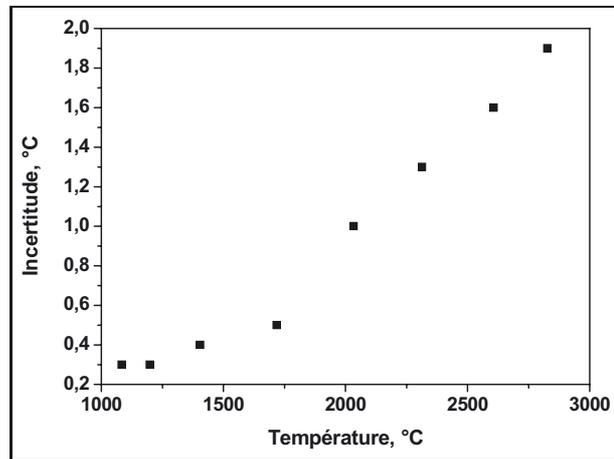


Fig. 2. – Incertitude d'étalonnage du pyromètre LP3.

champ de visée est de 1,4 mm pour la distance de focalisation de 1 000 mm. Régulièrement, le pyromètre LP3 est étalonné soit face à un corps noir de température variable dont la température est déterminée dans l'EIT-90 par comparaison à un corps noir au point fixe du cuivre, soit face aux points fixes directement. L'incertitude d'étalonnage du pyromètre LP3 est présentée, pour exemple, sur la figure 2. Le pyromètre LP3 a été caractérisé par le LCM, les détails de cette caractérisation ont été publiés en 2006 [5].

3.2. Four corps noir de transfert

Le four corps noir de transfert est un four Thermo-gauge HT-9500 équipé d'une cavité corps noir cylindrique avec un fond plat. Le diamètre de la cavité est de 25,4 mm et sa longueur est de 142 mm.

Afin d'estimer les corrections (dues aux différents champs de visée et dues aux différentes longueurs d'ondes) nous avons caractérisé la distribution de la

température dans la cavité Thermogauge (les gradients longitudinaux et radiaux), ainsi que l'émissivité de la cavité.

4. Caractérisation du profil thermique de la cavité du four corps noir de transfert

Nous avons caractérisé la distribution de la température dans la cavité du four corps noir de transfert Thermogauge.

4.1. Gradient radial

Le profil radial de température du fond de la cavité a été mesuré avec le pyromètre LP3 à trois températures de consigne : 1 085 °C, 1 738 °C et 2 474 °C. Ces températures ont été choisies intentionnellement proches de celles des points fixes de Cu, Pt-C et Re-C [2] dans le but de minimiser l'incertitude d'interpolation entre les points d'étalonnage du LP3. Les profils verticaux et horizontaux ont été mesurés par déplacement du pyromètre LP3 suivant les deux axes, par pas de 1 mm. Les cartographies de surface (fig. 3) représentant les écarts de températures par rapport au centre, ont été obtenues par extrapolation des mesures sur les deux axes.

4.2. Gradient longitudinal

Différentes méthodes d'estimation du profil de température longitudinal de la cavité du four de transfert peuvent être utilisées [6–8] : par modélisation, par mesure avec un thermocouple, par mesure avec un pyromètre incliné visant les parois ou encore, par mesure avec un pyromètre visant une cible placée à l'intérieur de la cavité.

Selon notre expérience [9], la méthode avec un pyromètre visant une cible semble être la moins biaisée. Cette méthode consiste à déplacer une cible le long de la cavité et à mesurer le rayonnement émis par la microcavité formée entre cette cible et la cavité du four (fig. 4a et 4b). L'émissivité de cette microcavité de l'ordre de 0,99 permet de faire l'hypothèse d'égaliser les écarts de températures de luminances mesurées, avec les écarts de températures de la cavité.

Le déplacement de la cible, effectué lorsque le four est froid, nécessite une consigne de stabilisation répétable. Celle-ci est obtenue par le pyromètre de régulation du four, et vérifiée par le pyromètre LP3 par une visée sur le centre du fond de la cavité du four. Les mesures ont été effectuées aux trois températures du four 1 085 °C, 1 738 °C et 2 474 °C (fig. 5).

5. Émissivité de la cavité

L'émissivité spectrale directionnelle $\varepsilon(\lambda, \theta, \phi, T)$ d'une surface est égale au rapport de la luminance émise par une surface à la température T , pour une longueur d'onde λ donnée, dans une direction θ, ϕ donnée, à la luminance émise par un corps noir $L_{BB}(\lambda, \theta, \phi, T)$ à la

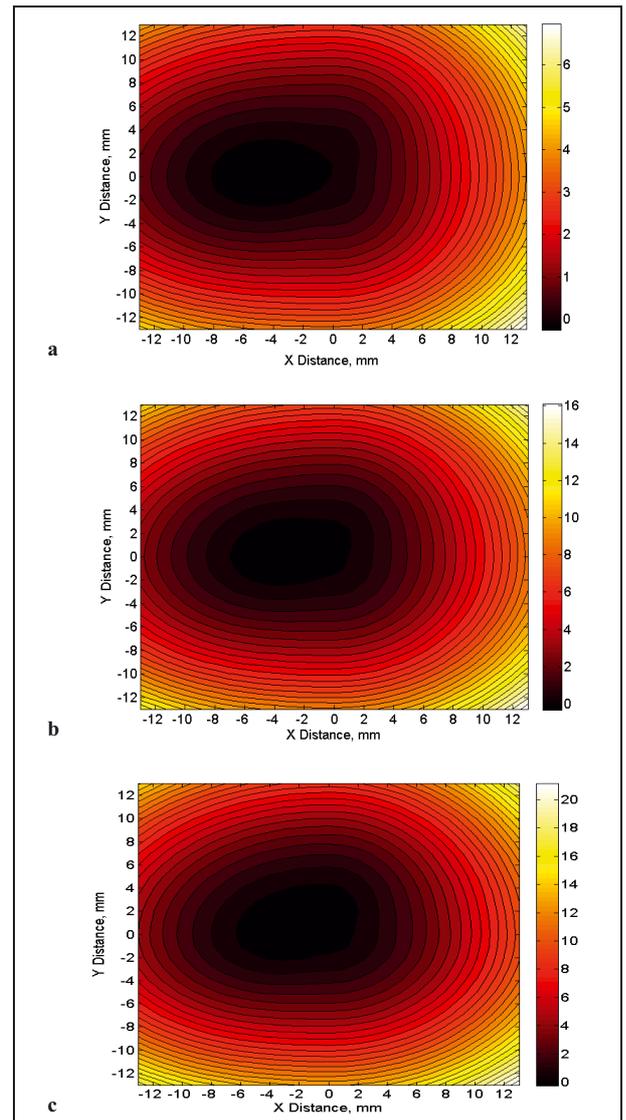


Fig. 3. – Distribution de la température au fond de la cavité pour trois températures du four : 1 085 °C (a), 1 738 °C (b) et 2 474 °C (c). Les couleurs correspondent aux différences de températures par rapport à celle au centre $\Delta T = T(x,y) - T(0,0)$, (les échelles de température sont à droite des graphiques). Les incertitudes sur la température relative sont inférieures à 0,2 °C, 1,1 °C et 1,5 °C pour les températures du four 1 085 °C (a), 1 738 °C (b) et 2 474 °C (c), respectivement.

même température, à la même longueur d'onde et dans la même direction. Dans cet article, nous allons utiliser une notion d'émissivité effective de la cavité qui peut être définie comme le rapport entre une luminance d'une cavité à la température T observée par un instrument de mesure et une luminance du corps noir à la même température observée par le même instrument. Dans cette définition de l'émissivité effective de la cavité, c'est l'instrument de mesure qui définit la longueur d'onde (une bande spectrale de 10 nm–20 nm) et l'angle solide d'observation (10^{-4} sr). L'existence possible du gradient de température au sein de la cavité implique le choix d'une température de référence prise généralement au centre du fond de la cavité considérée.

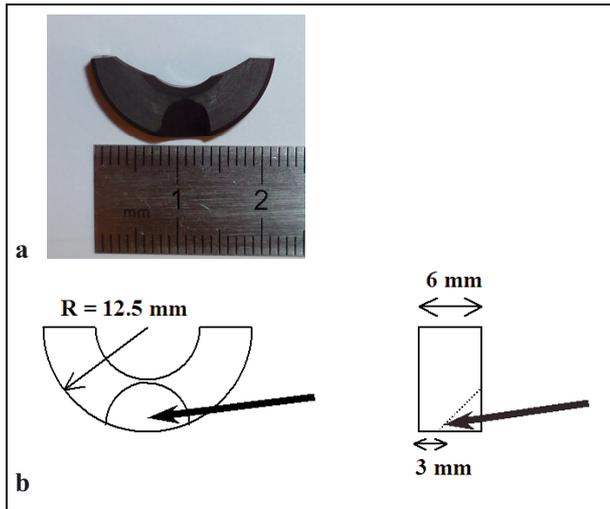


Fig. 4. – Cible utilisée pour les mesures du gradient longitudinal (photo (a) et schéma (b)); sur la figure (b) une flèche en gras montre le point de focalisation du pyromètre.

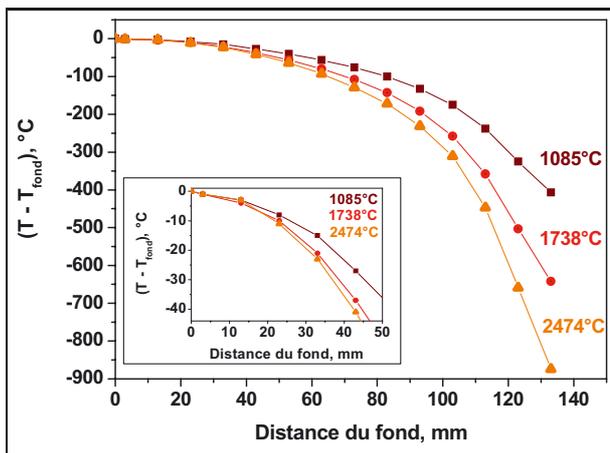


Fig. 5. – Profil longitudinal de la cavité du four de transfert mesuré pour trois températures du four 1085 °C, 1738 °C et 2474 °C. Les différences de températures sont données par rapport au fond de la cavité. Les incertitudes sur la température relative sont inférieures à 0,7 °C, 1,5 °C et 2,5 °C pour les températures du four 1085 °C (a), 1738 °C (b) et 2474 °C (c), respectivement.

Pour estimer l'émissivité effective de la cavité corps noir du four de transfert nous avons utilisé trois méthodes. Deux de ces méthodes sont expérimentales : l'une utilise l'approximation de Wien, l'autre est basée sur une comparaison avec une cavité d'émissivité connue. La troisième méthode utilise un logiciel de modélisation de tracés de rayons STEEP-3 développé par la société Virial International dont l'algorithme est décrit dans [10]. La comparaison des résultats obtenus par ces trois méthodes permet de déterminer la valeur de l'émissivité d'une manière fiable.

5.1. Méthode basée sur l'approximation de Wien

La première méthode utilise l'approximation de Wien et suppose que l'émissivité de la cavité du four est indépendante de la longueur d'onde. Le domaine spectral suffisamment petit du pyromètre de transfert associé à l'émissivité totale de la cavité de l'ordre de 0,98 permettent de faire cette approximation.

En introduisant la notion de température de luminance T_λ (la température du corps noir ayant la même luminance $L_{BB}(T_\lambda)$ que celle de la surface étudiée $L(T)$ dans une bande spectrale définie), l'émissivité peut être définie par la relation (4) :

$$\varepsilon(T) = \frac{L_{BB}(T_\lambda)}{L_{BB}(T)}. \quad (4)$$

En utilisant l'approximation de Wien pour $(\lambda T) \ll c_2$:

$$L_{BB}(T) = \frac{c_{1L}}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right), \quad (5)$$

l'émissivité s'écrit alors :

$$\varepsilon(T) = \frac{\exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T_\lambda}\right)}{\exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right)}, \quad (6)$$

d'où

$$\frac{1}{T_\lambda} = \frac{1}{T} - \frac{\ln(\varepsilon(T))\lambda}{c_2}, \quad (7)$$

où c_{1L} et c_2 sont respectivement la première et la deuxième constante de rayonnement.

En écrivant l'équation (7) aux deux longueurs d'ondes λ_1 et λ_2 , pour une température de référence T unique, nous obtenons par soustraction :

$$\frac{1}{T_{\lambda_2}} - \frac{1}{T_{\lambda_1}} = -\frac{\ln(\varepsilon(T))}{c_2} \times (\lambda_2 - \lambda_1). \quad (8)$$

L'inverse des températures de luminance exprimé à deux longueurs d'ondes λ_1 et λ_2 est donc proportionnel à leur différence $\lambda_2 - \lambda_1$ par le coefficient $\alpha = -\ln(\varepsilon(T))/c_2$.

L'émissivité totale de la cavité du four de transfert pour une température T donnée peut donc être déduite de la température de luminance T_λ mesurée à deux longueurs d'onde.

Pour une température de cavité donnée, les températures de luminance ont été mesurées à trois longueurs d'onde, dans le but d'estimer l'émissivité effective de la cavité à partir de trois couples possibles de longueurs d'ondes. Ce recoupement permet d'estimer l'incertitude sur l'émissivité effective de la cavité.

La figure 6 montre les résultats de mesure de l'inverse de température en fonction de la longueur d'onde pour différentes températures. Les valeurs obtenues sont en accord avec une loi de régression linéaire ; ce qui confirme que l'hypothèse d'une émissivité constante (corps gris)

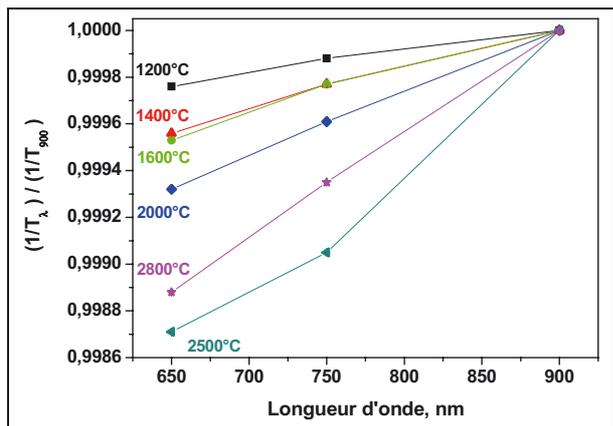


Fig. 6. – Inverse des températures de luminance en fonction de la longueur d'onde pour différentes températures de cavité. Pour chaque température, les valeurs $(1/T_\lambda)$ sont normalisées par rapport à la valeur à 900 nm $(1/T_{900})$, pour une meilleure visibilité.

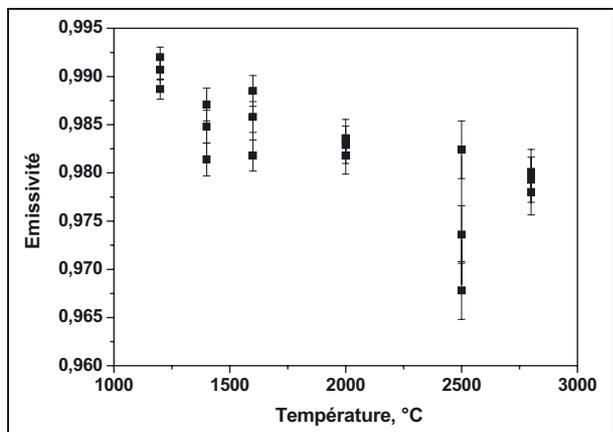


Fig. 7. – Émissivité effective de la cavité corps noir du four de transfert obtenue avec la méthode basée sur l'approximation de Wien de la loi du rayonnement de Planck.

est correcte. Le coefficient α , donc la valeur de l'émissivité, est obtenu pour chaque couple de longueurs d'onde : 650 nm–750 nm, 650 nm–900 nm et 750 nm–900 nm (fig. 7).

Une valeur moyenne de l'émissivité ϵ peut donc être calculée, elle vaut : $\epsilon = 0,983 \pm 0,020$.

5.2. Méthode de comparaison avec une cavité connue

La deuxième méthode est basée sur la comparaison avec une cavité dont l'émissivité est connue. Pour cette expérience nous avons utilisé une pièce mécanique supplémentaire avec une mini-cavité de diamètre 3 mm et de longueur 14 mm (fig. 8). L'émissivité de cette cavité a été obtenue avec le programme de calcul STEEP-3 et elle est égale à $\epsilon_{\text{mini-cavité}} = 0,996 \pm 0,002$.

La mini-cavité a été introduite dans le fond de la cavité du four. Pour une température de four donnée, deux mesures ont été prises simultanément : la première, I_{centre} , sur l'axe longitudinal de la mini-cavité, la deuxième,

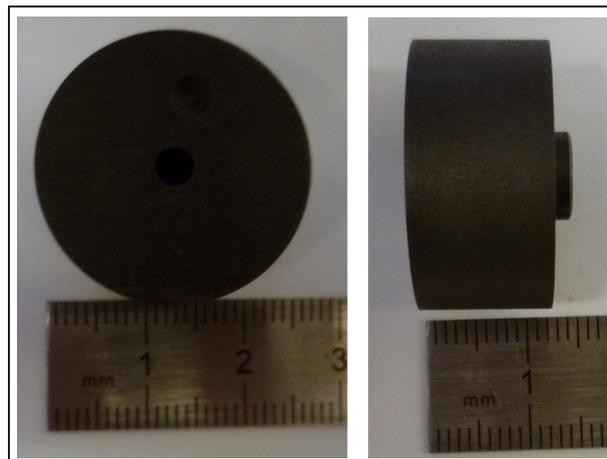


Fig. 8. – Cylindre de graphite équipé d'une mini-cavité.

$I_{6 \text{ mm}}$ sur la face frontale du cylindre de graphite après que le pyromètre ait été désaxé de 6 mm. Le rapport des températures de luminance (le rapport des photocourants) mesurées par le pyromètre est alors égal au rapport des émissivités des deux cavités.

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_{\text{mini-cavité}}} = \frac{I_{6 \text{ mm}}}{I_{\text{centre}}} \quad (9)$$

Plusieurs mesures ont été faites avec les filtres du pyromètre LP3 centrés autour de 650 nm, 750 nm, 850 nm, 900 nm et 950 nm et à différentes températures proches des points fixes couramment utilisés au-dessus de 1 000 °C : 1 085 °C (Cu), 1 324 °C (Co-C), 1 738 °C (Pt-C), 1 953 °C (Ru-C), 2 474 °C (Re-C) et 2 800 °C. Les courbes d'émissivité de la cavité du four en fonction de la température et de la longueur d'onde sont présentées sur les figures 9a et 9b. Notons que, pour le domaine de longueurs d'onde utilisé, la dépendance de l'émissivité en fonction de longueur d'onde reste faible.

La valeur moyenne de l'émissivité de la cavité corps noir de transfert mesurée par cette méthode est : $\epsilon = 0,981 \pm 0,023$.

5.3. Méthode par modélisation avec STEEP-3

L'estimation théorique de l'émissivité de la cavité de transfert est réalisée par le logiciel STEEP-3 qui permet de prendre en considération l'émissivité du graphite ainsi que les distributions de températures radiales et longitudinales mesurées le long de la cavité (fig. 3 et 5). Le constructeur du four Thermogauge ne précise pas les propriétés du graphite utilisé pour réaliser la cavité corps noir, ni sa stabilité dans le temps. Pour la modélisation avec le logiciel STEEP-3, nous avons utilisé les valeurs typiques d'émissivité et de diffusivité publiées pour le graphite pour la bande spectrale 600 nm–1 000 nm et pour la gamme de températures 1 000 °C–3 000 °C (fig. 10). Notons que les valeurs utilisées (0,875–0,925) sont en accord avec les valeurs d'émissivité obtenues dans [11] pour le graphite neuf et vieilli. De la même manière, les valeurs extrêmes de diffusivité, correspondantes au graphite neuf et vieilli (modèle parfaitement diffus), ont été

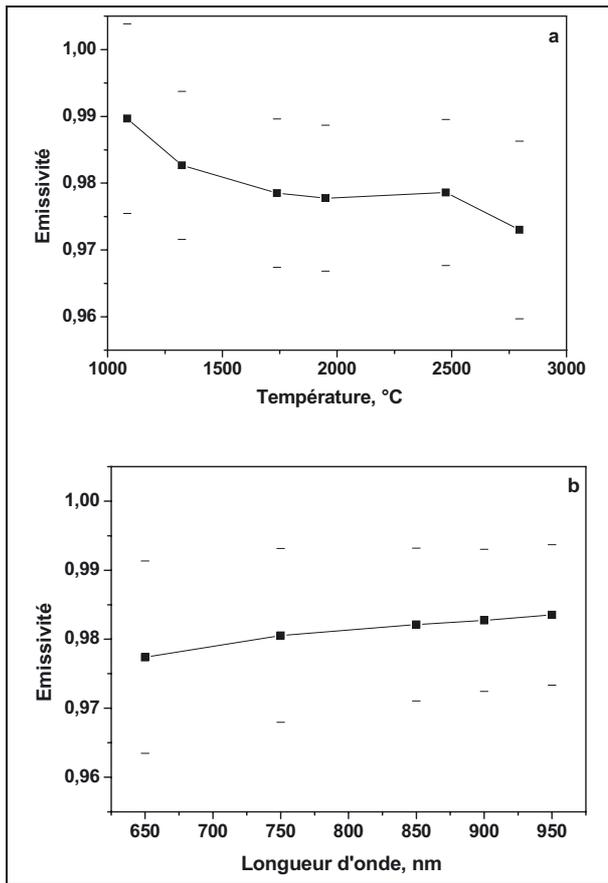


Fig. 9. – Émissivité effective de la cavité corps noir de transfert mesurée par comparaison avec la mini-cavité : (a) température ; (b) en fonction de la longueur d'onde.

utilisées. L'émissivité de la cavité du four Thermogauge a donc été estimée en considérant les cas extrêmes et l'émissivité réelle de la cavité à l'intérieur des valeurs obtenues.

Pour différentes propriétés du graphite, la dépendance en fonction de la longueur d'onde reste faible : les variations de l'émissivité sont inférieures à 0,3 % dans la gamme étudiée (600 nm–1 000 nm).

La valeur moyenne de l'émissivité de la cavité corps noir du four Thermogauge obtenue par cette méthode est : $\epsilon = 0,985 \pm 0,015$.

5.4. Valeur d'émissivité

Les valeurs des trois méthodes utilisées sont en accord. Les trois méthodes montrent que l'émissivité effective de la cavité peut être considérée constante (corps gris), la dépendance de l'émissivité à la longueur d'onde reste faible dans le domaine de longueurs d'onde utilisées. Les deux méthodes expérimentales montrent que l'émissivité effective diminue avec l'augmentation de la température du corps noir. Une modélisation avec STEEP-3 affiche une tendance inverse. Néanmoins, compte tenu des incertitudes, les valeurs de l'émissivité effective restent en accord, et à cette incertitude, il n'est

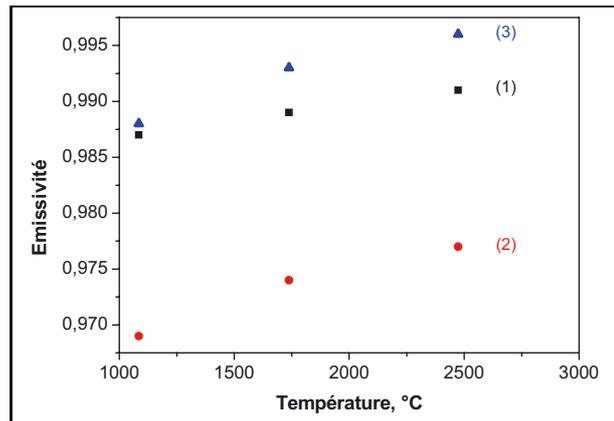


Fig. 10. – Émissivité effective de la cavité du four thermogauge obtenue avec le logiciel STEEP-3 pour trois modèles différents de propriétés de graphite : (1) la valeur d'émissivité du graphite est prise d'après [12] (0,9 à 600 nm et 0,925 à 1 000 nm), les propriétés diffusives sont prises pour 658 nm d'après [13]; (2) la valeur d'émissivité est prise d'après [14] (0,875 pour 650 nm à 2 200 °C), la diffusivité varie linéairement de 0,9 à 0,5 pour les angles de 0° à 90° ; (3) la valeur d'émissivité est prise d'après [14] (0,875 pour 650 nm à 2 200 °C), modèle parfaitement diffus.

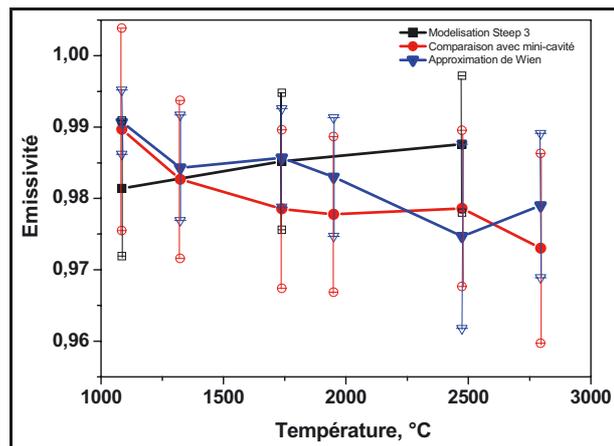


Fig. 11. – Émissivité effective de la cavité corps noir de transfert en fonction de la température ; comparaison des résultats des différentes méthodes : synthèse des figures 7, 9a et 10.

pas possible de montrer le lien entre l'émissivité effective de la cavité et sa température (fig. 11).

L'émissivité effective de la cavité corps noir de transfert est donc de $0,98 \pm 0,02$ dans la plage de températures de 1 000 °C à 3 000 °C et pour les longueurs d'onde de 650 nm à 950 nm.

6. Estimation des corrections sur la température mesurée

Lorsque l'émissivité du corps noir de transfert n'est pas égale à 1 et lorsque le pyromètre à étalonner n'est pas identique au pyromètre de référence, des corrections doivent être appliquées. Dans cette partie nous donnons une estimation des corrections dues aux différents

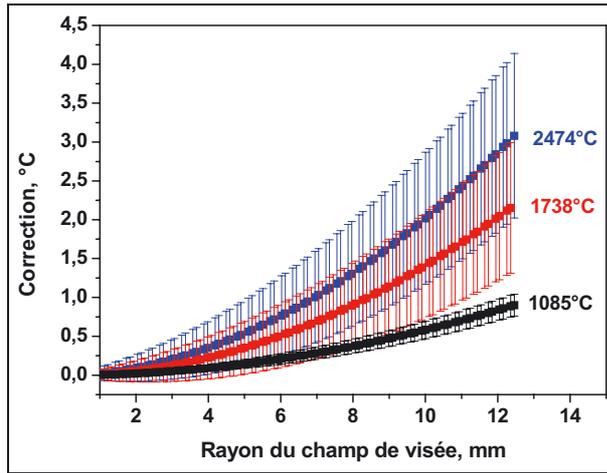


Fig. 12. – Correction sur la température mesurée due aux différents champs de visée du pyromètre de référence et de celui à étalonner.

champs de visée et longueurs d'ondes effectives des deux pyromètres.

6.1. Correction due à la différence des champs de visée des pyromètres de référence et à étalonner

Un des biais possibles lors de l'étalonnage d'un pyromètre industriel est dû à la différence de surface visée avec celle du pyromètre de référence. Ce biais est généré par le gradient radial de température du fond de cavité. Si nous estimons que la sensibilité radiale du pyromètre $S(r)$ peut être approximée par une fonction rectangulaire, soit :

$$S(r) = 1 \quad \text{pour } r \leq r_0$$

$$S(r) = 0 \quad \text{pour } r > r_0,$$

où $2r_0$ est le diamètre du champ de visée du pyromètre de référence.

Alors, la correction peut être estimée par la différence entre les températures moyennes ($T_{\text{moy}}(\text{réf})$ et $T_{\text{moy}}(\text{ind})$) mesurées sur les surfaces visées par les deux pyromètres (fig. 12) :

$$\text{Corr}_1 = T_{\text{moy}}(\text{ind}) - T_{\text{moy}}(\text{ref}). \quad (10)$$

Notons que cette approximation revient à négliger l'effet de taille de source du pyromètre. Ceci est possible pour le pyromètre LP3 compte tenu de la valeur relative de l'effet de quelques 10^{-4} . Pour les pyromètres industriels, cet effet doit être caractérisé.

Pour un pyromètre ayant un effet taille de source important, la réponse $T(R)$ de l'instrument peut être calculée de la manière suivante :

$$T(R) = C(\lambda) \times \int L(T(r))S(r)rdr, \quad (11)$$

où $C(\lambda)$ est la sensibilité du pyromètre, $L(T(r))$ est la luminance de la cavité, $T(r)$ est la fonction de la distribution de températures au fond de la cavité et $S(r)$ est la fonction définissant la sensibilité radiale du pyromètre.

6.2. Correction due à la différence des sensibilités spectrales des deux pyromètres

L'autre biais possible lors d'un étalonnage d'un pyromètre industriel provient de la différence entre sa sensibilité spectrale et celle du pyromètre de référence. La correction due à cette différence de sensibilités spectrales des deux pyromètres et l'incertitude associée peuvent être estimées pour un corps noir de transfert d'émissivité connue.

Elle peut être calculée à partir de l'expression de la température de luminance dans l'approximation de Wien (Eq. (7)), définie pour la longueur d'onde effective du pyromètre de référence ($\lambda_{\text{réf}}$) et celle du pyromètre à étalonner (λ_{ind}) :

$$\frac{1}{T_{\lambda_{\text{réf}}}} = \frac{1}{T} - \frac{\ln(\epsilon)\lambda_{\text{réf}}}{c_2}, \quad (12)$$

$$\frac{1}{T_{\lambda_{\text{ind}}}} = \frac{1}{T} - \frac{\ln(\epsilon)\lambda_{\text{ind}}}{c_2}. \quad (13)$$

En soustrayant ces deux équations, nous obtenons une expression pour $T_{\lambda_{\text{réf}}}$:

$$T_{\lambda_{\text{ind}}} = \frac{T_{\lambda_{\text{réf}}}}{1 + \ln(\epsilon)(\lambda_{\text{réf}} - \lambda_{\text{ind}})T_{\lambda_{\text{réf}}}/c_2}, \quad (14)$$

et une expression de correction à appliquer :

$$\begin{aligned} \text{Corr}_2 &= T_{\lambda_{\text{ind}}} - T_{\lambda_{\text{réf}}} \\ &= \frac{T_{\lambda_{\text{réf}}}}{1 + \ln(\epsilon)(\Delta\lambda)T_{\lambda_{\text{réf}}}/c_2} - T_{\lambda_{\text{réf}}} \end{aligned} \quad (15)$$

où $\Delta\lambda = \lambda_{\text{réf}} - \lambda_{\text{ind}}$.

Pour une longueur d'onde effective du pyromètre de référence fixée à $\lambda_{\text{réf}} = 650 \text{ nm}$ et une émissivité de la cavité du four Thermogauge estimée à $\epsilon = 0,98 \pm 0,02$, nous pouvons calculer la correction due à la différence des longueurs d'onde effectives des deux pyromètres à partir des courbes de la figure 13.

7. Conclusions

Dans cet article, ont été présentés les résultats de la caractérisation de la cavité corps noir de transfert destinée à l'étalonnage de pyromètres industriels. Les distributions (radiale et longitudinale) de température de la cavité ont été mesurées à différentes températures, proches des points fixes hautes températures développés au-delà de 1000 °C . L'émissivité effective de la cavité a été estimée par deux méthodes expérimentales et une modélisation avec le logiciel STEEP-3. Les valeurs d'émissivité données par ces trois méthodes sont en accord. Grâce à cette étude, il est possible d'estimer les corrections à appliquer lors de l'étalonnage de pyromètres industriels. Ces résultats vont permettre d'améliorer l'incertitude d'étalonnage de pyromètres dans le domaine de températures de 1000 °C à 3000 °C .

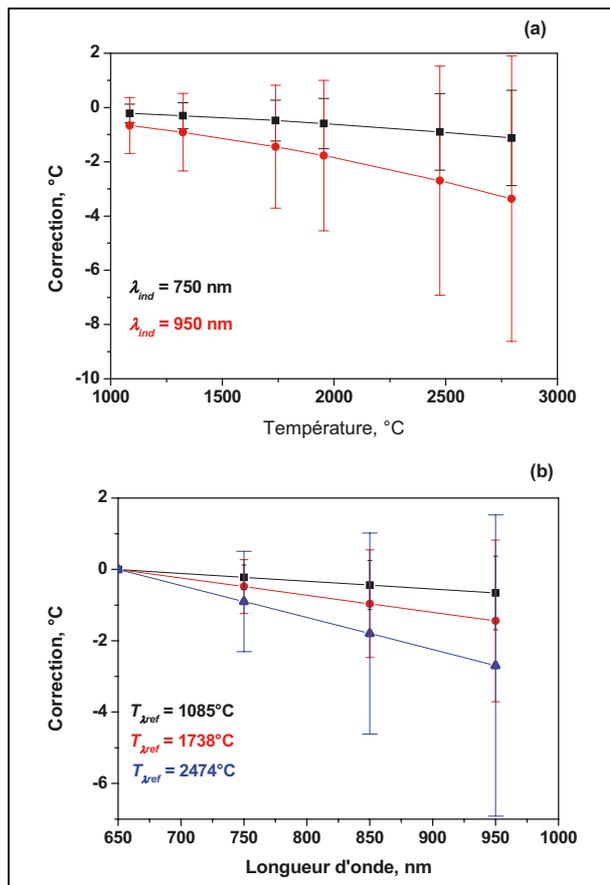


Fig. 13. – Correction due à la différence de longueur d'onde effectives du pyromètre de référence (LP3 à 650 nm) et de celui à étalonner : (a) en fonction de la température de référence ; (b) en fonction de la longueur d'onde.

Références

[1] “Échelle Internationale de Température de 1990”, *Collection des monographies du Bureau national de métrologie*, **17**, Bureau national de métrologie, 1998.

[2] WOOLLIAMS E.R., MACHIN G., LOWE D.H. et WINKLER R., “Metal (carbide)-carbon eutectics for thermometry and radiometry: a review of the first seven years”, *Metrologia*, **43**, 2006, R11-R25.

[3] SADLI M., FISCHER J., YAMADA Y., SAPRITSKY V., LOWE D. et MACHIN G., “Review of metal-carbon eutectic temperatures : proposal for new ITS-90 secondary fixed points”, *Tempmeko* 2004, 341-347.

[4] BOURSON F., SADLI M., ROUGIÉ B. et BRIAUDEAU S., “Study and comparison of newly developed ITS-90 Silver and Copper-point cells”, *Int. J. Thermophys.*, **32**, 2011, 1602-1610.

[5] BOURSON F., FANJEUX M., ROUGIÉ B. et SADLI M., “Caractérisation et étalonnage d'un pyromètre de référence pour la mesure des hautes températures”, *Revue française de métrologie*, **6**, 2006, 3-8.

[6] CHAHINE K., BALLICO M., REIZES J. et MADADNIA J., “Optimisation of a Graphite tube blackbody heater for a Thermogauge Furnace”, *Int. J. Thermophys.*, **29**, 2008, 386-394.

[7] SADLI M., ANHALT K., BOURSON F., SCHILLER S. et HARTMANN J., “Thermal effects in the HTBB-3200pg furnace on metal-carbon eutectic point implementation”, *Int. J. Thermophys.*, **30**, 2009, 69-76.

[8] WANG T., DONG W. et LIU F., “Optimization of the Thermogauge furnace for realizing high temperature fixed points”, *AIP Conf. Proc.*, **1552**, 2013, 386-392.

[9] KOZLOVA O., BRIAUDEAU S., RONGIONE L., BOURSON F., GUIMIER S., KOSMALKI S. et SADLI M., “Calibration of radiation thermometers up to 3000 °C: Effective emissivity of the source”, présenté à *Tempmeko 2013* (à paraître dans *Int. J. Thermophysics*).

[10] PROKHOROV A.V., “Monte Carlo method in optical radiometry”, *Metrologia*, **35**, 1998, 465-471.

[11] GALAL S., YOUSEF, SPERFELD P. et METZDORF J., “Measurement and calculation of the emissivity of a high-temperature black body”, *Metrologia*, **37**, 2000, 365-348.

[12] HANSSEN L.M., MEKHONTSEV S.N., ZENG J. et PROKHOROV A.V., “Evaluation of blackbody cavity emissivity in the infrared using total integrated scatter measurements”, *Int. J. Thermophys.*, **29**, 2008, 352-369.

[13] PATRICK H.J., HANSSEN L.M., ZENG J. et GERMER T.A., “BRDF measurements of graphite used in high-temperature fixed point blackbody radiators: a multi-angle study at 405 nm and 658 nm”, *Metrologia*, **49**, 2012, S81-S92.

[14] KOSTANOVSKII A.V., ZEODINOV M.G. et KOSTANOVSKAYA M.E., “The determination of thermal conductivity and emissivity of graphite at high temperatures”, *High Temperature*, **43**, 5, 2005, 793-795.

Article reçu le 31 décembre 2013, version révisée reçue le 17 octobre 2014.