



Calibration d'une lampe à ruban de tungstène

Charles de Izarra

► To cite this version:

Charles de Izarra. Calibration d'une lampe à ruban de tungstène. 7eme Colloque Capteur 2009, Bourges, Mar 2009, BOURGES, France. Actes du 7e Colloque Capteurs 2009. hal-00445665

HAL Id: hal-00445665

<https://hal.science/hal-00445665>

Submitted on 11 Jan 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Calibration d'une lampe à filament de tungstène

Charles de IZARRA

Groupe de Recherche sur l'Énergetique des Milieux Ionisés,
UMR6606 Université d'Orléans - CNRS, Faculté des Sciences, Site de Bourges,
rue Gaston Berger, BP 4043, 18028 BOURGES Cedex, France.
Charles.De_Izarra@univ-orleans.fr
Tél : 33 (0)2 48 27 27 31

Résumé

L'objet du travail présenté est la calibration d'une lampe à filament de tungstène à partir de mesures électriques à la fois simples et précises, et qui permettent de déterminer la température du filament de tungstène en fonction de l'intensité du courant d'alimentation, puis de mesurer la surface du filament. Ces données permettent alors de calibrer la lampe en terme de luminance, directement utilisable pour étalonner des capteurs comme des pyromètres optiques ou tout autre capteur photométrique. La procédure de calibration proposée a été appliquée sur une lampe à filament standard (lampe utilisée dans l'éclairage automobile), puis sur une lampe étalon à ruban de tungstène. La procédure de calibration mise au point permet de retrouver les points de calibration de la lampe (NIST) avec une précision de l'ordre de 2%.

Mots-Clés : Lampe à ruban de tungstène, Photométrie, Rayonnement thermique

Introduction

Les capteurs photométriques tels que les pyromètres optiques, destinés à mesurer la température de corps chauffés nécessitent d'être calibrés en enregistrant le signal qu'ils délivrent en analysant un corps chauffé dont on connaît à la fois la température et l'émissivité. Le corps de référence choisi est souvent un corps noir de laboratoire, dont le principal inconvénient est d'être limité à des températures assez basses (inférieures à 2000 K pour les plus courants). Une autre possibilité est l'utilisation d'une lampe étalon (mère ou fille) à ruban de tungstène, dont le prix est relativement élevé (de l'ordre de 7000 €), dont on connaît la température pour une valeur de l'intensité du courant continu utilisé pour alimenter la lampe. Dans cette communication, on expose une technique de calibration d'une lampe à filament de tungstène avec des mesures électriques alliant simplicité et précision, et avec lesquelles on détermine la température du filament de tungstène en fonction de l'intensité du courant d'alimentation.

1. L'émission radiative des corps opaques chauffés

La surface d'un corps que nous choisirons opaque, à la température T , est la source d'une émission de rayonnement continu dont la répartition de l'énergie en fonction de la longueur d'onde est donnée par la loi de Planck [Chéron, 1999], basée sur le modèle du corps noir, qui, par définition est capable d'absorber toutes les longueurs d'onde λ qu'il reçoit. Quantitativement, on utilise la luminance spectrale L_{λ}^0 donnée par :

$$L_{\lambda}^0 = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \quad (1)$$

avec :

- h : constante de Planck ($h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ J.s)
- k : constante de Boltzmann ($k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K)
- c : célérité de la lumière dans le vide ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s)

et qui est le flux émis par unité de surface apparente, par unité d'angle solide et par unité de longueur d'onde (Unité : $\text{W m}^{-2} \text{Sr}^{-1} \text{m}^{-1}$).

Dans le cas où le corps émissif est une surface S de corps noir, la puissance émise dans le demi-espace est donnée par la relation de Stefan-Boltzmann :

$$P^0 = S\sigma T^4 \quad (2)$$

où σ est la constante de Stephan ($\sigma = 5.6710^{-8} \text{ W.K}^{-4}.\text{m}^{-2}$). Lorsque le corps considéré n'est pas un corps noir, on parle alors de corps gris ou de corps réel, et les données précédentes doivent être réduites en les multipliant par l'émissivité $\varepsilon(\lambda, T)$ inférieure à 1.

2. Les données thermophysiques du tungstène

Le tungstène est le métal possédant la température du point de fusion la plus élevée ($T_F=3695 \text{ K}$). De ce fait, il a été largement étudié depuis le début du XX^{ème} siècle afin de permettre la production de filaments de lampes à incandescence [Forsythe and Worthing, 1916].

Sachant que le filament de la lampe est essentiellement une résistance morte chauffée par effet Joule, les données nécessaires au calcul de la résistance en fonction de la température sont la résistivité ρ et le coefficient de dilatation thermique β . Ces deux grandeurs sont tabulées en fonction de la température, et β est donné en % de la longueur ℓ_0 du filament à la température de 300 K [Lide, 1991-1992].

Pour une température T donnée, la résistance R d'un fil de tungstène est donnée par la relation : $R(T) = \rho(T)\ell(T)/S_f(T)$ où S_f est la section du fil, que nous supposons constante sur sa longueur. La section, pas nécessairement circulaire, peut être exprimée en fonction d'une longueur caractéristique d . Nous avons $S = Cd^2$, où C est une constante de proportionnalité qui dépend de la forme géométrique de la section. Pour fixer les idées, $C = \pi/4$ dans le cas d'une section circulaire en choisissant le diamètre du fil comme longueur caractéristique d .

Calculons la variation de la résistance $R(T)$ relativement à la résistance R_0 à la température de 300 K prise comme référence. Nous avons : $R_0 = \rho_0\ell_0/S_{f0}$ ou encore, en introduisant la longueur d_0 à 300 K : $R_0 = \rho_0\ell_0/Cd_0^2$. Pour une température T , la résistance $R(T)$ est :

$$R(T) = \frac{\rho(T)\ell(T)}{Cd^2(T)} \Rightarrow R(T) = \frac{\rho(T) \left[\ell_0 + \frac{\beta\ell_0}{100} \right]}{\left[d_0 + \frac{\beta d_0}{100} \right]^2}.$$

Le rapport $R(T)/R_0$ est alors :

$$R(T)/R_0 = \frac{100\rho(T)}{[100 + \beta]\rho_0}. \quad (3)$$

La relation (3), permet, à partir des données disponibles dans la littérature, de calculer le rapport $R(T)/R_0$ en fonction de la température T . La courbe représentative de $R(T)/R_0$ en fonction de T est donnée sur la figure 1 ; on remarque que lorsque la température augmente de 3000 K, la résistance est multipliée par 20.

Nous avons choisi de déterminer par une méthode des moindres carrés l'équation d'une parabole passant par les couples de points $(R(T)/R_0, T)$ avec une erreur relative inférieure à 0.1% pour les températures élevées (voir équation (4)).

$$R(T)/R_0 = -0,52427113 + 0,00466128T + 2,842071810^{-7}T^2 \quad (4)$$

3. Procédure de calibration d'une lampe à filament de tungstène

Les mesures ont été réalisées en utilisant une lampe Philips de type E4-2DT W21W, prévue pour fonctionner dans des conditions nominales sous une tension continue de 12 V, pour une puissance de 21 W. Le montage (figure 2) comprend une alimentation de courant continu de marque Convergence/Fontaine (type ASF1000/20.50) permettant une lecture directe de l'intensité du courant I délivré, et un voltmètre numérique de marque METRIX avec lequel on mesure la chute de tension U aux bornes de la lampe.

En faisant varier l'intensité du courant I depuis de très faibles valeurs (proches de zéro) jusqu'à environ 2.5 A, la mesure de la chute de tension U aux bornes de la lampe permet de déterminer la

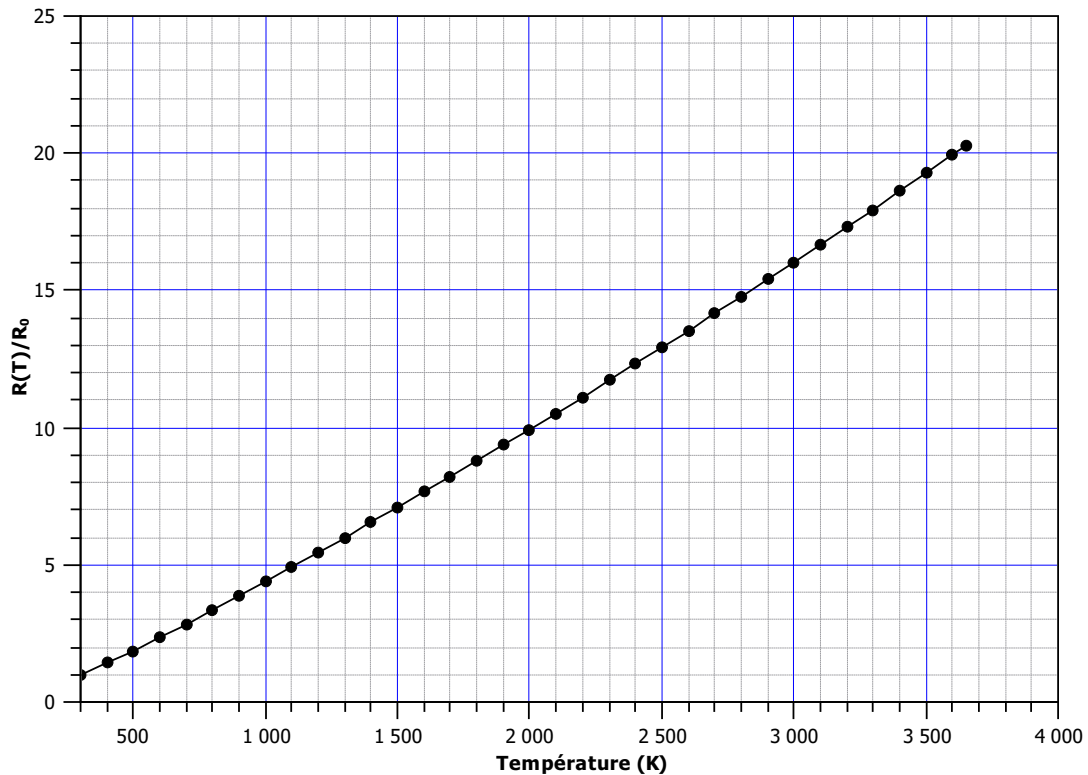


FIG. 1 – Courbe représentative de $R(T)/R_0$ en fonction de la température T pour une résistance de tungstène.

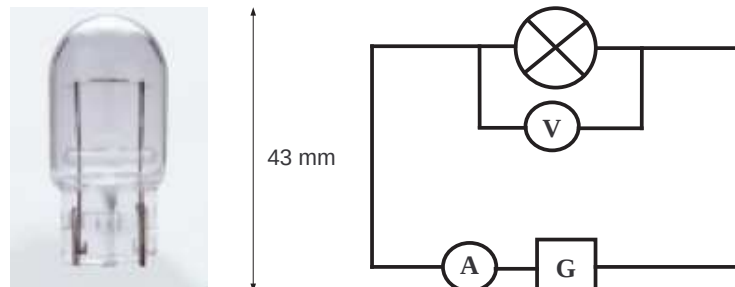


FIG. 2 – Lampe à filament de tungstène utilisée (image de gauche) et montage électrique utilisé (image de droite).

résistance R de la lampe pour chaque valeur de I en appliquant la loi d'Ohm ($R = U/I$). Lors de l'expérience, il est nécessaire d'attendre que la lampe se stabilise en température avant de relever le couple de valeurs (U, I).

Un soin tout particulier est nécessaire pour déterminer la résistance de la lampe à température ambiante R_0 qui conditionne la qualité et la précision de la procédure de calibration. Les points de mesures (R, I) à très faible intensité ont été extrapolés à courant nul en utilisant un modèle parabolique de la forme : $R(I) = R_0 + AI^2$. Une procédure d'ajustage par la méthode des moindres carrés permet de déterminer le paramètre A et la valeur de la résistance à température ambiante R_0 .

Connaissant la valeur expérimentale du rapport $R(T)/R_0$ pour chaque valeur de l'intensité du courant, on est en mesure de déterminer la température T du filament en utilisant la relation (4) (résolution d'une équation du second degré). Au final, on obtient une courbe de calibration sous la forme de la température T du filament en fonction de l'intensité du courant I (figure 3).

D'un point de vue purement énergétique, le filament de la lampe chauffé est le siège de la transfor-

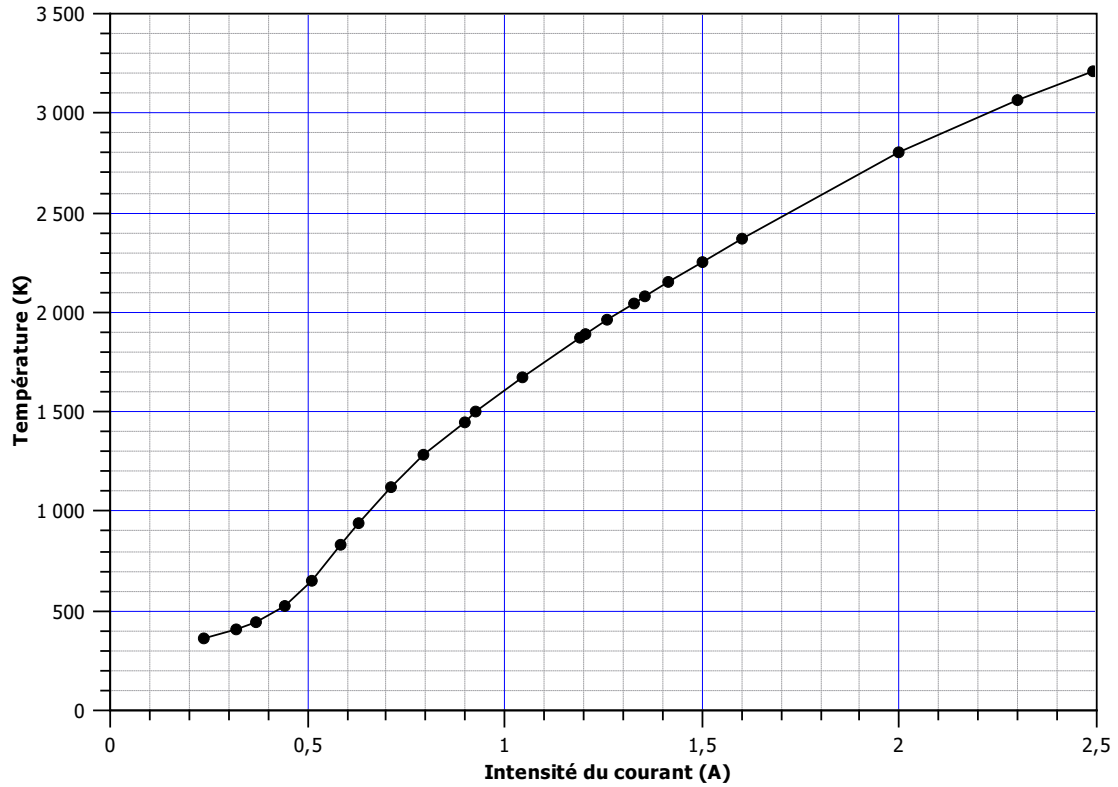


FIG. 3 – Courbe de calibration donnant la température du filament de la lampe en fonction de l'intensité du courant.

mation de l'énergie électrique sous forme de chaleur et sous forme de rayonnement. En considérant qu'un état stationnaire est atteint, on a l'égalité entre la puissance $P = UI$ dissipée par effet Joule, et la somme des puissances mises en jeu par transfert thermique entre le filament à température T et le « milieu ambiant » à température T_a et par rayonnement (loi de Stefan-Boltzmann). En appelant α le coefficient d'échange thermique incluant les phénomènes de conduction et de convection thermiques, ε l'émissivité du tungstène, et S la surface émissive du filament nous avons :

$$UI = \alpha (T - T_a) + S\varepsilon\sigma T^4. \quad (5)$$

À partir des mesures de U et I , il est simple de calculer la puissance mise en jeu, puis de considérer la quantité UI/T^4 . En effet, selon l'équation (5), nous avons :

$$\frac{UI}{T^4} = \alpha \frac{(T - T_a)}{T^4} + S\varepsilon\sigma. \quad (6)$$

L'équation (6) comporte deux termes ; le premier est prépondérant à « basse température », et le second terme est constant, sous réserve que ε soit constant en fonction de la température.

Sur la figure 4, on a représenté le graphe de la quantité UI/T^4 en fonction de T , qui est tout à fait conforme aux prévisions annoncées plus haut, et qui prouvent la validité des mesures. Pour les températures élevées, la courbe est horizontale et permet de déterminer la surface émissive du filament de tungstène.

4. Procédure appliquée à une lampe étalon

La procédure de calibration en température présentée plus haut a été appliquée à une lampe étalon à ruban de tungstène (lampe OSRAM WI 17G figure 5) étalonnée sur une valeur unique de l'intensité du courant I . L'étalonnage par le constructeur indique une température de 2689 K pour une intensité égale à 14.1 A.

Les courbes donnant la température de la lampe en fonction de l'intensité du courant et le rapport UI/T^4 en fonction de T sont présentées sur la figure 6. La valeur de la température déterminée pour

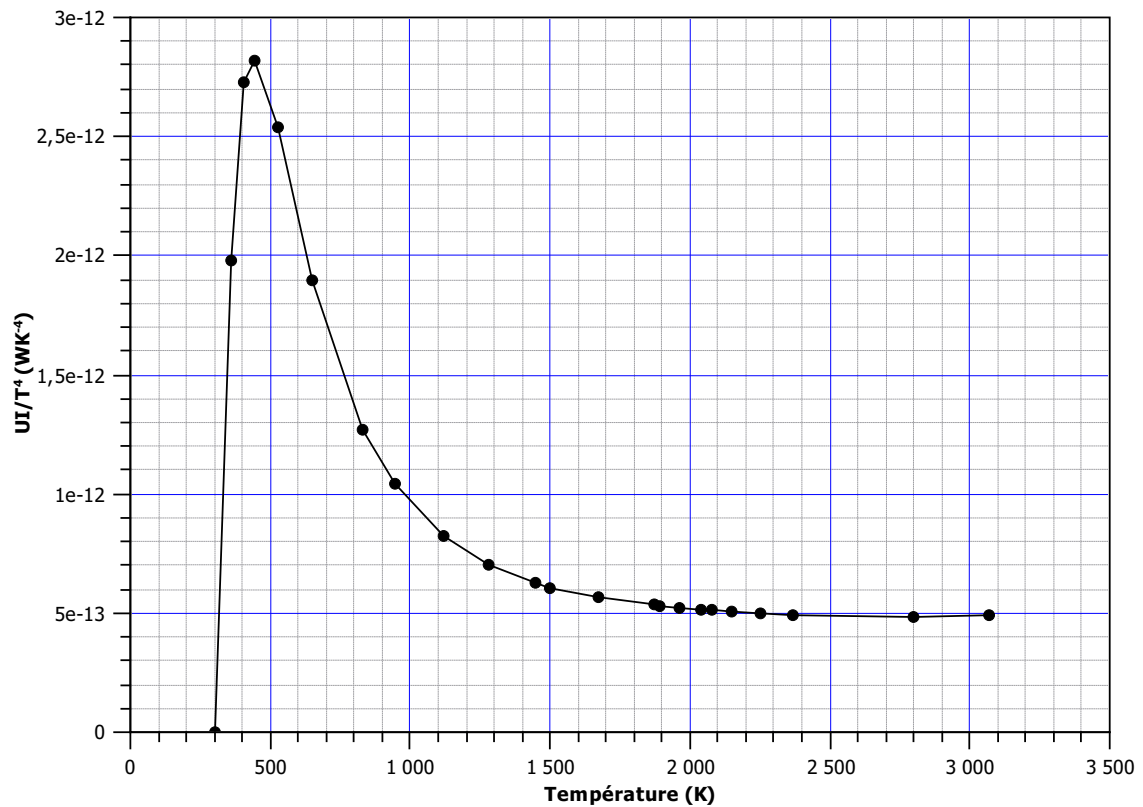


FIG. 4 – Courbe donnant le rapport UI/T^4 en fonction de T .

l'intensité de 14.1 A (intensité de calibration) est égale à 2760 K, ce qui correspond à une erreur relative de 2.6% par rapport à la température de calibration annoncée. Compte tenu du phénomène de vieillissement de cette lampe, avec une évaporation du tungstène et son dépôt sur la paroi interne de l'ampoule visible sur la figure 5, il est certain que la calibration n'est plus « optimale » et permet d'expliquer l'écart entre la température mesurée pour 14.1 A et la température de calibration.



FIG. 5 – Photographie de la lampe étalon à ruban de tungstène.

5. Conclusion et perspectives

La procédure de calibration d'une lampe à filament de tungstène présentée dans cette communication est relativement simple à mettre en œuvre, et à la portée de tout laboratoire de recherche et développement. La validation de la procédure est réalisée grâce à l'évaluation du rapport UI/T^4 en

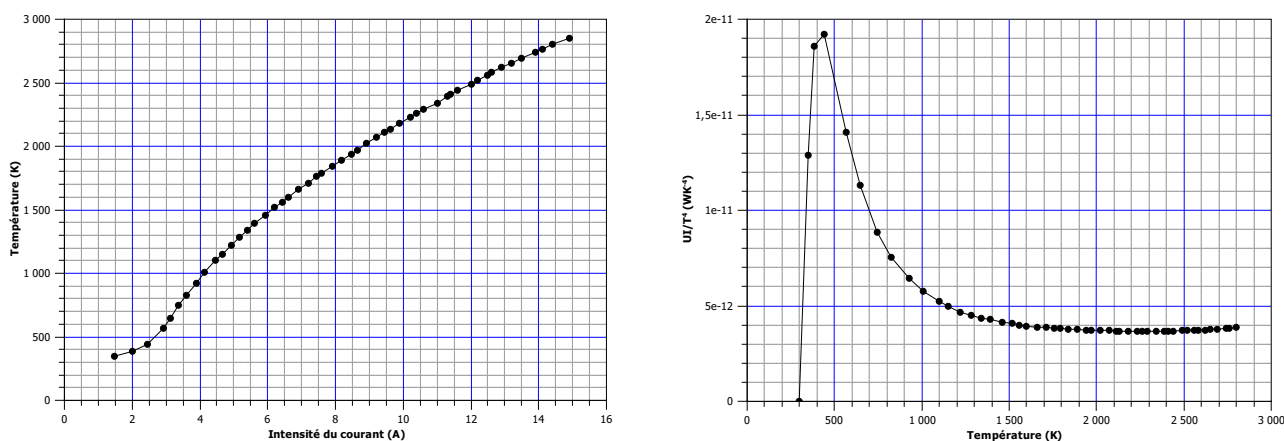


FIG. 6 – Courbes donnant la température T de la lampe à ruban de tungstène en fonction de l'intensité du courant (gauche) et le rapport UI/T^4 en fonction de T (droite).

fonction de T , dont le comportement est tout à fait conforme à ce que prévoit la théorie.

Enfin, pour être en mesure de calibrer un capteur photométrique à partir du rayonnement émis par un filament en tungstène dont on connaît la température de surface, il est nécessaire de considérer la relation (1) donnant la luminance spectrale du corps noir multipliée par l'émissivité du tungstène fonction de la température T et de la longueur d'onde λ (voir tableau 1).

Température (K)	Longueur d'onde en μm									
	0.25	0.3	0.35	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
1600	0.448	0.482	0.478	0.481	0.469	0.455	0.444	0.431	0.413	0.390
1800	0.442	0.748	0.476	0.744	0.465	0.452	0.440	0.425	0.407	0.385
2000	0.436	0.474	0.473	0.747	0.462	0.448	0.436	0.419	0.401	0.381
2200	0.429	0.470	0.470	0.471	0.458	0.445	0.431	0.415	0.896	0.378
2400	0.422	0.465	0.466	0.468	0.455	0.441	0.427	0.408	0.391	0.372
2600	0.418	0.461	0.464	0.464	0.451	0.437	0.423	0.404	0.386	0.369
2800	0.411	0.456	0.461	0.461	0.448	0.434	0.419	0.400	0.383	0.367

TAB. 1 – Emissivité du tungstène en fonction de la température et de la longueur d'onde [Lide, 1991-1992].

Références

Chéron B., 1999, *Transferts thermiques*, Ellipses.

Forsythe W.E. and Worthing A. G., 1916, *The properties of tungsten and the characteristics of tungsten lamps*, Physical Review, 7,302, 146-185.

Lide R.D., Editor-in-Chief, 1991-1992, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 72nd Ed., pp.10-285,10-286.