

Température du filament d'une lampe à incandescence et pyrométrie optique

par **Jean-Michel GITTON**

Collège Littré - 18000 Bourges

jean-michel.gitton@ac-orleans-tours.fr

et **Charles de IZARRA**

Faculté des sciences - Site de Bourges

Université d'Orléans - 18028 Bourges Cedex

Charles.De_Izarra@univ-orleans

RÉSUMÉ

Dans le cadre des échanges entre l'enseignement secondaire et l'enseignement supérieur, nous présentons une activité proposée à des élèves en classe de troisième au cours de laquelle ils mesurent la température du filament d'une lampe à incandescence à partir de mesures électriques élémentaires. La calibration en température du filament de l'ampoule est utilisée pour mesurer la température de la résistance d'un bec électrique par une méthode classique de pyrométrie à disparition de filament.

INTRODUCTION

Chaque année depuis 2006, dans le cadre des liaisons entre l'enseignement secondaire et l'enseignement supérieur, des élèves du collège Littré de Bourges (Cher) viennent passer une journée à la faculté des sciences de Bourges au cours de laquelle ils effectuent des activités de découverte en physique et en chimie.

Quels que soient les projets dans lesquels s'inscrivent ces déplacements, les objectifs généraux restent identiques :

- ◆ faire découvrir aux élèves l'enseignement supérieur, et en particulier l'offre locale. Il s'agit ainsi de contribuer à la construction du projet d'orientation de chacun ;
- ◆ valoriser les filières scientifiques en ouvrant les élèves sur les carrières possibles après ce type d'études, en particulier dans le secteur de la recherche ;
- ◆ montrer aux élèves qu'il y a continuité entre les apprentissages et les exigences du collège, et ceux de l'université ;
- ◆ utiliser les acquis du secondaire pour ouvrir les élèves sur de nouveaux domaines des sciences.

Le programme de physique du collège permet d'aborder quelques notions relatives à l'astronomie. Cette partie intéresse au plus haut point nos élèves, captivés qu'ils sont par l'Univers et les multiples mystères qu'il recèle encore.

Il n'est pas rare que le soleil, appréhendé comme une « boule de feu », suscite alors la question : « Quelle est sa température ? ».

Lorsque les réponses viennent, à savoir environ 6000 °C à sa surface, plusieurs millions de degrés en son centre, le niveau élevé de ces valeurs, difficiles à concevoir pour eux, accroît leur fascination.

Si certains se satisfont alors de ces réponses, d'autres s'interrogent tout de même sur les moyens qui permettent d'obtenir de tels résultats. Tous sont parfaitement conscients qu'il est hors de question d'approcher notre étoile pour effectuer de telles mesures avec un thermomètre ! Mais le temps faisant souvent défaut pour des explications supplémentaires, l'on en reste là.

C'est de la volonté d'approfondir ce sujet qu'est né le projet conduit durant l'année 2008-2009 avec deux classes de troisième. Les échanges menés avec un enseignant-chercheur du GREMI (Groupe de recherches sur l'énergétique des milieux ionisés, laboratoire de recherche en spectroscopie des plasmas présent sur le site de la faculté des sciences à Bourges) ont alors fait émerger l'idée de travailler sur la température atteinte par le filament de tungstène d'une lampe à incandescence, et sur le rayonnement émis par celui-ci [1-3].

En effet, tout corps opaque chauffé est la source d'un rayonnement, qui pour partie, peut être vu par l'œil humain. Les « couleurs des lumières » émises dépendent de la température atteinte par ce corps. L'exemple du grille-pain dont la couleur de la résistance va du rouge sombre à l'orangé au fur et à mesure qu'il chauffe peut aider les élèves à appréhender le principe.

Ne serait-il donc pas possible, à partir de mesures simples et de la comparaison de la couleur d'un objet très chaud avec celle du filament d'une lampe, d'évaluer à distance la température de cet objet, et ainsi d'amener les élèves à comprendre les principes utilisés par astronomes pour déterminer la température de surface des étoiles ?

Cet article présente la base théorique permettant de déterminer la température d'un filament de tungstène d'une ampoule à partir de mesures électriques élémentaires. L'exploitation de la puissance dissipée par effet Joule permet de déterminer les caractéristiques géométriques du filament. Enfin, l'ampoule ainsi calibrée est utilisée par les élèves pour déterminer la température d'une résistance chauffée par une méthode de pyrométrie optique à disparition de filament.

1. BASES THÉORIQUES ET MESURES

1.1. L'émission lumineuse des corps 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 [4], 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 qui représente le flux émis par unité de surface apparente, par unité d'angle solide et par unité de longueur d'onde (Unité : $\text{W m}^{-2} \text{Sr}^{-1} \text{m}^{-1}$). La figure 1 présente le graphe de la luminance spectrale du corps noir pour deux valeurs de la température.

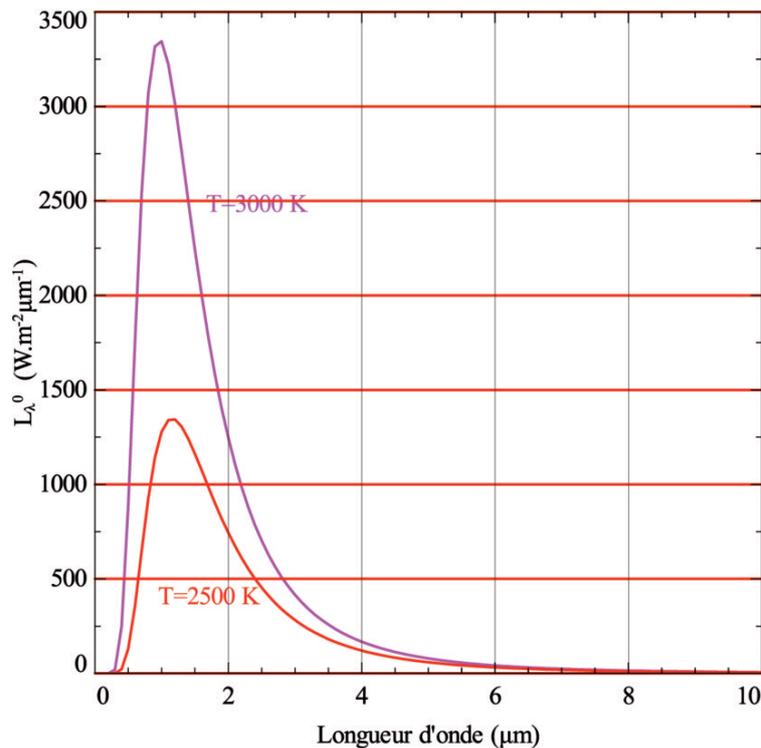


Figure 1 : Courbe donnant la luminance spectrale du corps noir en fonction de la longueur d'onde, pour deux valeurs de la température.

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 loi de Stefan-Boltzmann :

$$P = S\sigma T^4 \quad (1)$$

où σ est la constante de Stefan ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{K}^{-4} \text{ m}^{-2}$). 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 ϵ inférieure à 1.

1.2. Le tungstène et sa courbe de calibration résistance réduite-température

Le tungstène est le métal possédant la température du point de fusion la plus élevée (3695 K). De ce fait, il a été largement étudié depuis le début du xx^e siècle afin de permettre la production de filaments de lampes à incandescence [5]. Sachant que le filament d'une lampe à incandescence est essentiellement une résistance morte chauffée par

effet Joule [6], 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. Pratiquement, pour la dilatation thermique, les tables fournissent l'allongement en pour-cent d'une longueur ℓ_0 à 300 K pour diverses températures [7]. 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. 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 choisie comme référence, l'indice 0 indiquant les quantités considérées à cette température de 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 est :

$$R(T) = \frac{\rho(T)\ell(T)}{CD^2(T)} \rightarrow R(T) = \frac{\rho(T)\left[\ell_0 + \beta \frac{\ell_0}{100}\right]}{C\left[D_0 + \beta \frac{D_0}{100}\right]^2}.$$

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

$$R(T)/R_0 = \frac{100 \rho(T)}{[100 + \beta] \rho_0}. \quad (2)$$

La relation (2) permet, à partir des données disponibles dans la littérature [6], 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 2 (*cf.* page ci-contre) ; on remarque que lorsque la température augmente de 3000 K, la résistance est multipliée par vingt. Cette courbe peut être utilisée comme méthode de mesure de la température d'un filament chauffé, à condition de déterminer R_0 et R , puis le rapport R/R_0 .

Pour plus d'efficacité lors du traitement des mesures présentées par la suite, nous avons choisi de déterminer par une méthode des moindres carrés l'équation d'une parabole passant par les points avec une erreur relative inférieure à 0,1 % pour les températures élevées ; l'équation (4) permet alors de retracer aisément la courbe fournie sur la figure 2.

$$R(T)/R_0 = -0,524 + 0,00466 T + 2,8410^{-7} T^2 \quad (4)$$

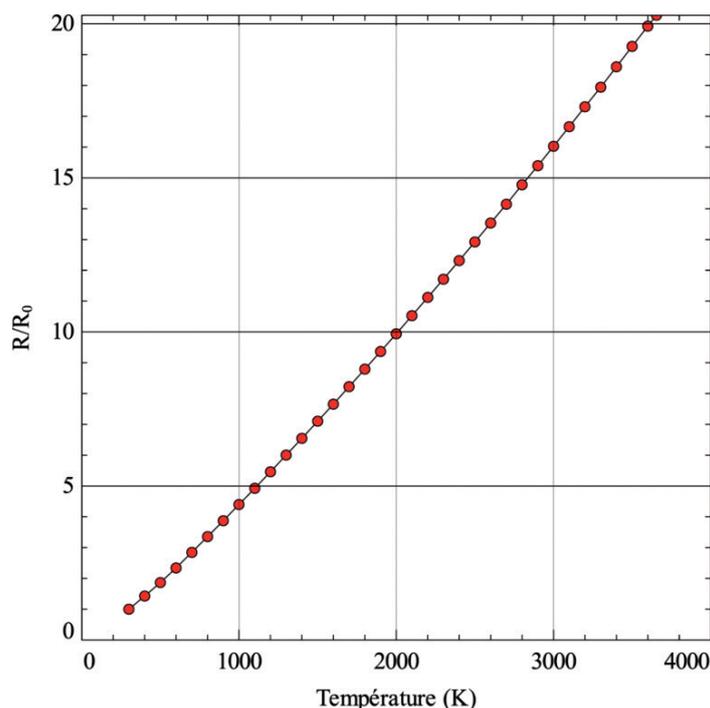


Figure 2 : Courbe représentative de $R(T)/R_0$ en fonction de la température pour une résistance de tungstène.

1.3. Détermination de la température du filament d'une lampe à incandescence

Les mesures présentées dans cette sous-section ont été réalisées sur 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 (*cf.* figure 3) comprend une alimentation de courant continu réglable, et deux multimètres numériques de marque MÉTRIX avec lesquels on mesure la chute de tension aux bornes de la lampe et l'intensité du courant circulant dans le circuit.

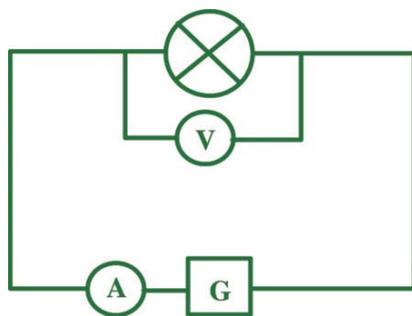


Figure 3 : Montage utilisé.

En faisant varier l'intensité du courant I depuis de très faibles valeurs (proches de zéro) jusqu'à environ 2,2 A, la mesure de la chute de tension U aux bornes de la lampe permet de déterminer la résistance R de la lampe pour chaque valeur de I en appliquant la loi d'Ohm $U = RI$. Lors de l'expérience, il est nécessaire d'attendre que la lampe se stabilise en température avant de relever chaque 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 des mesures. Les points de mesures (U, I) à très faible intensité ont été extrapolés à courant nul en utilisant un modèle parabolique de la forme : $R = AI^2 + R_0$. 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 . Il est également possible de déterminer R_0 avec une méthode graphique en traçant les points pour les valeurs de proches de zéro. La valeur de R_0 obtenue est : $0,5013 \Omega$. Soulignons, après avoir étudié une douzaine d'ampoules, que la résistance à courant nul varie d'une ampoule à l'autre ; la variation relative de résistance est de l'ordre de 10 %.

Connaissant la valeur expérimentale du rapport R/R_0 pour chaque valeur de l'intensité du courant, on peut déterminer la température T du filament par lecture graphique sur la courbe de calibration présentée plus haut (cf. figure 2). L'utilisation d'un tableur est également possible en calculant la racine positive de l'équation (4). Au final, il est possible de construire la courbe donnant la température du filament en fonction de l'intensité du courant (cf. figure 4).

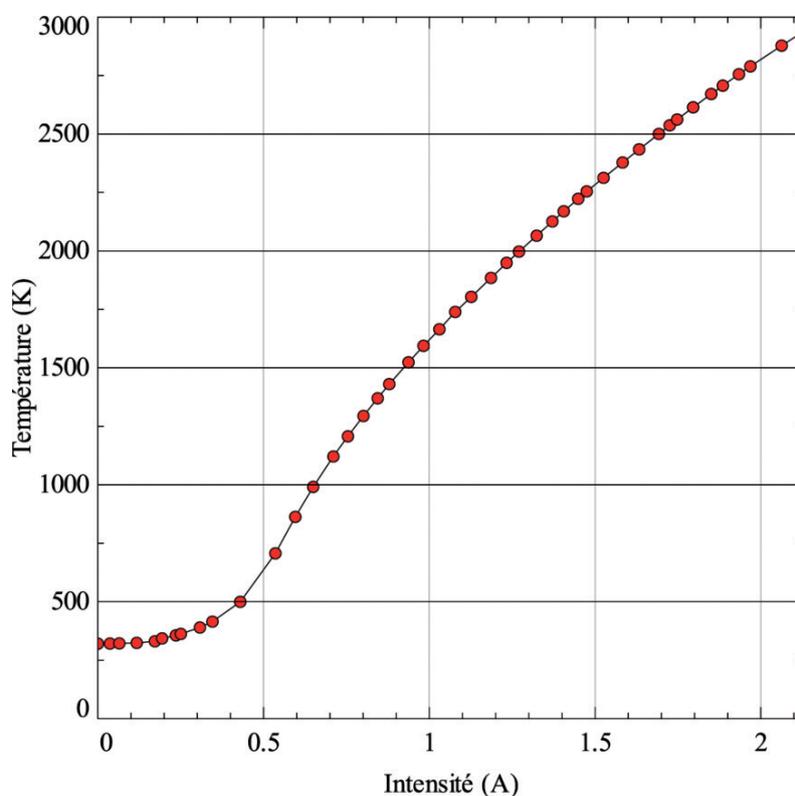


Figure 4 : Courbe donnant la température du filament de la lampe en fonction de l'intensité du courant qui la traverse.

1.4. Approche énergétique

D'un point de vue purement énergétique, le filament chauffé est le siège de la transformation de l'énergie électrique sous forme de chaleur et sous forme de rayonnement [3]. En considérant qu'un état stationnaire est atteint, on a l'égalité entre la puissance 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 du filament nous avons :

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

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

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

qui comporte deux termes ; le premier est prépondérant à « basse température », et le second terme est constant, sous réserve que ε soit indépendant de la température. Sur la figure 5, on a représenté le graphe de la quantité UI/T^4 en fonction de T , qui est tout à

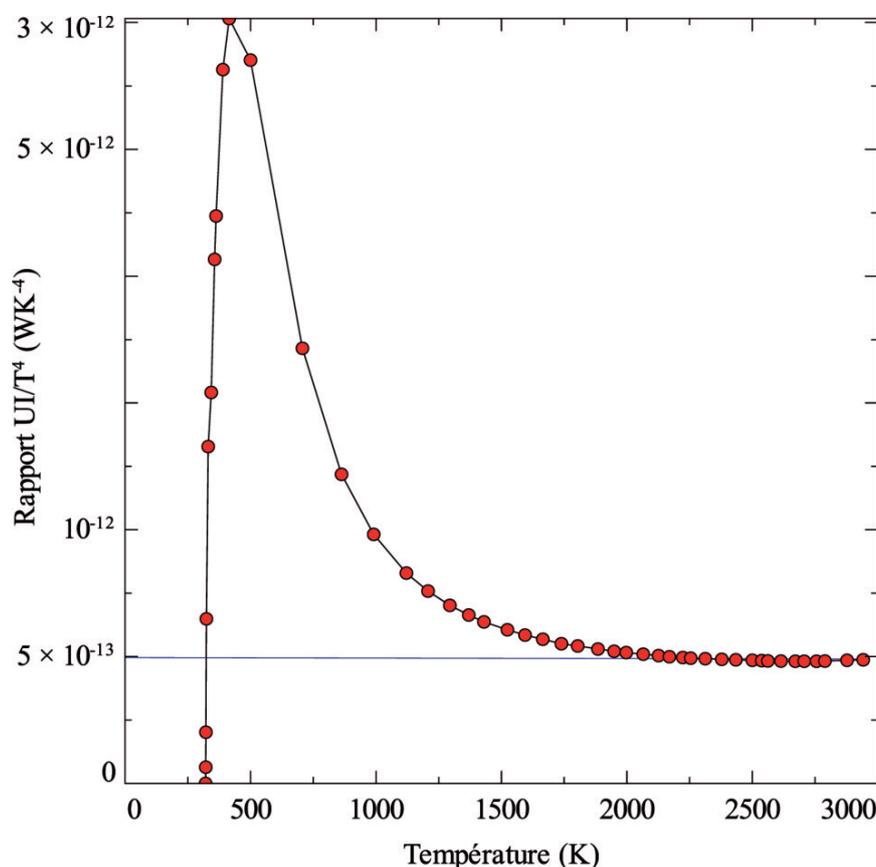


Figure 5 : Courbe donnant le rapport UI/T^4 en fonction de T .

fait conforme aux prévisions annoncées plus haut. Pour les températures élevées, la courbe tend vers une asymptote horizontale (valeur égale à $5 \cdot 10^{-13}$ SI) permettant de déterminer la surface du filament de tungstène.

1.5. Température non uniforme du filament à basse intensité

Lorsque l'intensité du courant est inférieure à 1 A, le filament de l'ampoule ne possède pas une température uniforme, et cela est nettement visible quand la température est assez élevée pour observer une émission lumineuse dans la partie visible du spectre électromagnétique. La température du filament est maximum dans sa zone centrale (cf. figure 6).

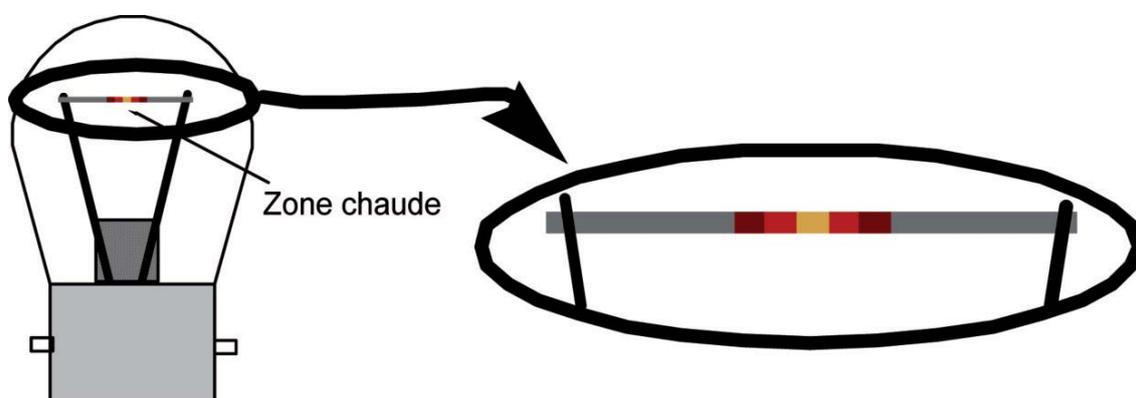


Figure 6 : Aspect du filament pour les faibles valeurs de courant.

Il est possible de justifier cet effet en considérant un modèle basé sur les transferts de chaleur : les calculs détaillés sont présentés en annexe.

2. TRAVAUX EFFECTUÉS PAR LES ÉLÈVES

2.1. Construction de la courbe température-Intensité du courant

Les élèves, répartis en binôme sur une douzaine de postes, ont effectué les mesures électriques présentées à la section 1.3, utilisant en cela leurs acquis de quatrième en électricité. La valeur de la résistance R_0 était fournie à chaque groupe ainsi qu'une copie du graphique donnant $R(T)/R_0$ en fonction de la température (cf. figure 2). Soulignons que le kelvin étant une unité inconnue des élèves de troisième, quelques explications sur les échelles de température avaient été données lors d'une phase préparatoire au collège. Ainsi, à partir de leurs mesures et de la courbe de calibration fournie, les élèves ont pu construire la courbe donnant la température en fonction de l'intensité du courant circulant dans le filament (courbe analogue à la figure 4).

2.2. Proportionnalité de la puissance avec T^4 et exploitation

En plus de tracer une courbe analogue à celle présentée sur la figure 4, il a été

demandé aux élèves de tracer la puissance dissipée dans la lampe (produit UI) en fonction de la puissance quatrième de la température, puis de remarquer que l'on obtient une droite lorsque la température est supérieure à 2000 K, soit T^4 supérieure à $16 \cdot 10^{12} \text{ K}^4$ (cf. figure 7). Les élèves ont ainsi pu établir une relation de proportionnalité en suivant une démarche déjà mise en œuvre au cours de leur scolarité (loi d'Ohm, relation poids-masse).

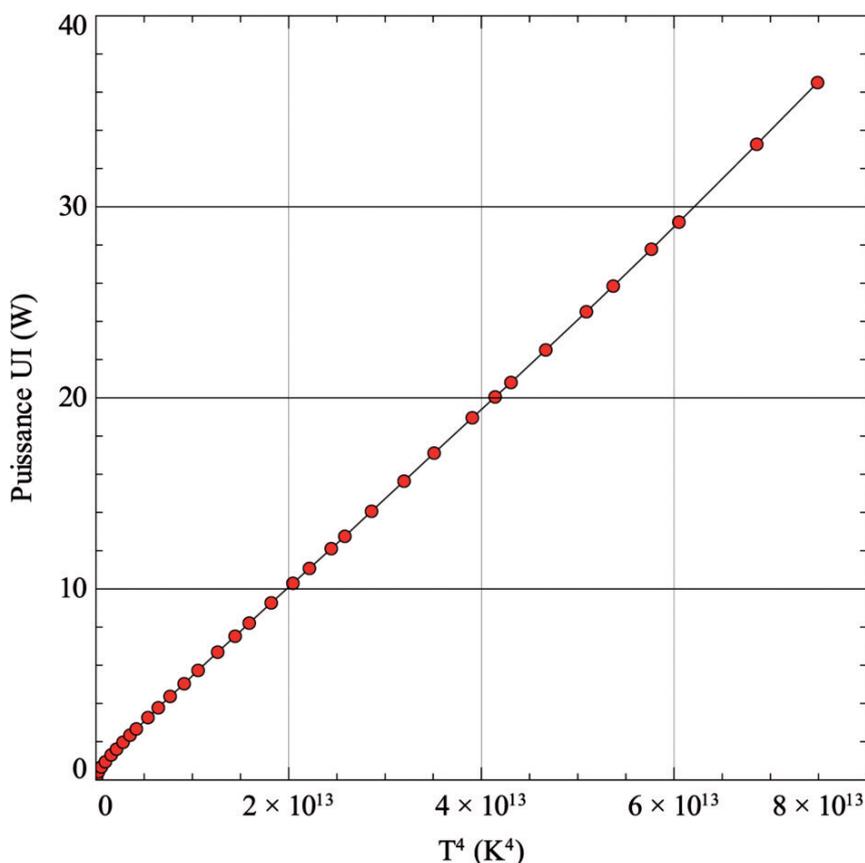


Figure 7 : Courbe donnant la puissance UI en fonction de T^4 .

La mesure graphique du coefficient directeur $a = 5 \cdot 10^{-13} \text{ SI}$ de la droite donne le produit $S\varepsilon\sigma$. La valeur de l'émissivité du tungstène à $0,6 \mu\text{m}$ moyennée sur la température est égale à 0,44 [6]. Numériquement, on peut extraire la valeur du produit $D\ell$:

$$D\ell = 6,38 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2.$$

En considérant la résistance R_0 et la résistivité du tungstène à température ordinaire $\rho_0 = 5,6 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$, nous avons $\ell/D^2 = R_0\pi/4\rho_0$, soit $\ell/D^2 = 7,0 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$.

Ces données donnent accès aux dimensions du filament : $\ell = 6,6 \text{ cm}$ et $D = 9,7 \cdot 10^{-5} \text{ m}$.

2.3. Pyrométrie optique à disparition de filament

Cette partie de l'expérience est une application directe du travail de calibration en température du filament de tungstène. L'objet chauffé dont on cherche à déterminer la température est un bec électrique utilisé en chimie (Pyromega, Pierron), essentiellement constitué par une résistance chauffée par effet Joule. Le principe de la mesure est présenté sur la figure 8 : le filament de l'ampoule est chauffé puis observé en prenant soin de le superposer sur la surface de la résistance du bec électrique. Le courant d'alimentation de l'ampoule est augmenté jusqu'à ce que le filament ait la même couleur que la résistance du bec électrique ; dans ces conditions, le filament de l'ampoule chauffé semble disparaître. La valeur de l'intensité étant connue, la courbe de calibration permet de déterminer la température de l'ampoule alors égale à la température de la résistance du bec électrique, en supposant bien sûr que les émissivités du filament et de la résistance du bec soient égales.

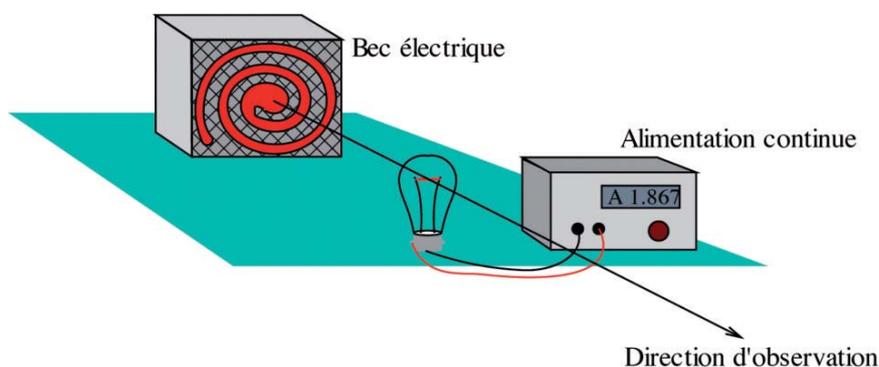


Figure 8 : Principe de la mesure de pyrométrie à disparition de filament.

Les élèves ont constaté qu'il fallait travailler avec soin. En effet, il est délicat de faire correspondre les couleurs du filament et de la résistance du bec électrique, même dans l'obscurité. Notons également que la régulation de température de l'appareil induit des variations de la teinte de cette résistance, ce qui impose d'effectuer la mesure lorsque celle-ci est stable.

Par ailleurs, la courbe $T = f(I)$ (cf. figure 4) croît rapidement sur l'intervalle de température [500 K, 1250 K] qui nous intéresse : une variation faible de la mesure de entraîne une modification significative de la valeur de T obtenue.

Conscients du soin à apporter à leur travail, les élèves ont pu déterminer par voie optique la température de cet appareil qu'ils connaissent bien pour l'avoir déjà utilisé lors d'activités expérimentales. Cette température a été comparée à la température mesurée au moyen d'une sonde thermoélectrique : les valeurs sont en accord avec un écart relatif inférieur à 5 %.

CONCLUSION

La mise en place de cette activité s'est avérée extrêmement riche, car elle a permis

de développer diverses compétences du socle commun qui doivent être acquises à l'issue du collège. Citons par exemple : exploitation de mesures et de graphiques, utilisation d'un tableur pour automatiser le traitement des données, autonomie et sens de l'observation.

Ce travail a également ouvert les élèves à d'autres domaines de la physique que ceux abordés dans le cadre des programmes, tout en s'appuyant sur leurs savoirs de collégiens. En particulier, le rapport entre couleur et température de surface d'une étoile a été bien compris, et en cela, l'objectif du projet a été atteint.

Enfin, cette expérience a été présentée lors des Rencontres des Jeunes Chercheurs du Cher, qui est une journée participative durant laquelle des élèves du primaire au supérieur présentent à d'autres élèves les projets scientifiques et techniques qu'ils ont menés au cours de l'année scolaire dans leur établissement. Les actes des Rencontres Jeunes des Chercheurs du Cher de l'année 2009 sont disponibles à l'adresse suivante :

http://www.ac-orleans-tours.fr/culture/files/tempo/actes09_web.pdf

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Gilles CHARLES et Jean-Luc THÉBAULT pour leur aide précieuse lors de l'organisation des journées d'immersion des élèves à la faculté des sciences de Bourges (Université d'Orléans).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] DURAND F. « Étude d'une lampe à incandescence ». *Bull. Un. Phys.*, octobre 2000, vol. 94, n° 827, p. 1625-1633.
- [2] DEIBER A. et KEMPF O. « Lampe à incandescence, corps noir, loi de Stefan et filtre passe-bas thermique ». *Bull. Un. Phys.*, octobre 2000, vol. 94, n° 827, p. 1595-1624.
- [3] HILD J.-C. « Estimation d'une constante fondamentale à partir du rayonnement thermique émis par une lampe à incandescence ». *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, avril 2009, vol. 103, n° 913, p. 409-414.
- [4] CHÉRON B. *Transferts thermiques*. Paris : Ellipses, 1999.
- [5] FORSYTHE W. E. and WORTHING A. G. « The properties of tungsten and the characteristics of tungsten lamps ». *Physical Review*, 1916, 7, 302, p. 146-185.
- [6] COURSIÈRES A. et BICHARD R. « Modèle électrique de la lampe à filament métallique ». *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, décembre 2004, vol. 98, n° 869, p. 1751-1760.
- [7] LIDE R. D. Editor-in-Chief, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 72nd Ed., p. 10-285, p. 10-286, 1991-1992.

Annexe

Pour les faibles valeurs de l'intensité du courant ($I < 1 \text{ A}$), la température du filament de l'ampoule n'est pas uniforme, car il apparaît rouge en son centre, et gris sur les côtés. Pour justifier ce comportement, il est nécessaire d'étudier les phénomènes de transferts de chaleur dans le filament.

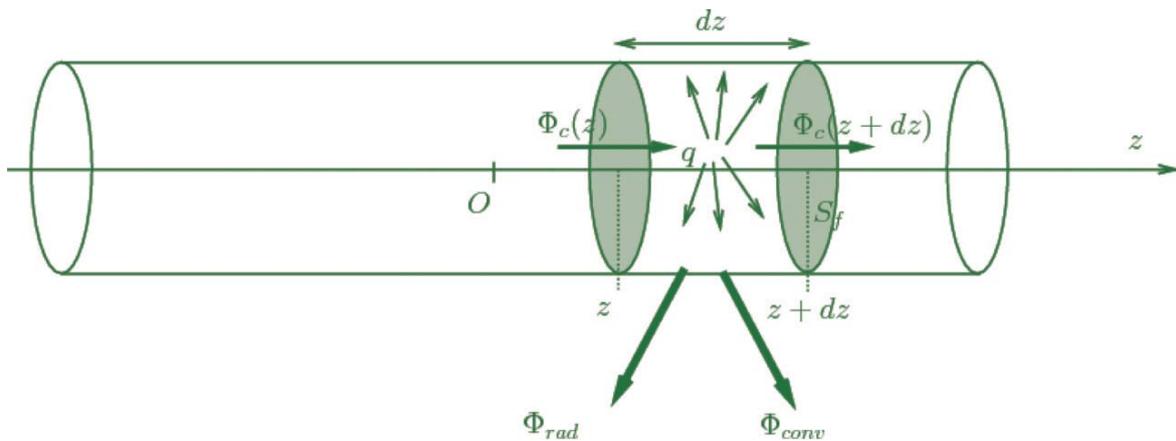


Figure 9 : Modélisation des transferts thermiques dans le filament.

Le filament est placé selon un axe $z'Oz$, avec l'origine O placée au centre du filament. La conductivité thermique κ du tungstène est supposée indépendante de la température ($\kappa = 174 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$). On suppose que la distribution de température dans le filament a atteint un régime permanent, et que la température est uniforme selon un diamètre.

La dissipation de chaleur par effet Joule au sein du fil est représentée par un terme source q (en Wm^{-3}), donné par :

$$q = \frac{RI^2}{\ell S_f} \rightarrow q = \frac{16 \rho I^2}{\pi^2 D^4}.$$

La résistivité ρ étant fonction de la température T , on choisit de la modéliser par une loi linéaire de la forme $\rho = aT$, avec $a = 3 \cdot 10^{-10} \text{ } \Omega \text{ mK}^{-1}$.

Le bilan énergétique pour le volume cylindrique de fil localisé entre les cotes z et $z + dz$ est :

Flux conductif en $z +$ production locale = Flux conductif en $z + dz +$ flux radiatif + flux convectif.

$$\Phi_c(z) + qS_f dz = \Phi_c(z + dz) + \Phi_{rad} + \Phi_{conv}$$

Les flux conductifs sont écrits en utilisant la loi de Fourier :

$$\Phi_c(z) = -\kappa \left(\frac{dT}{dz} \right)_z S_f$$

$$\Phi_c(z + dz) = -\kappa \left(\frac{dT}{dz} \right)_{z+dz} S_f = -\kappa \left[\left(\frac{dT}{dz} \right)_z + \left(\frac{d^2T}{dz^2} \right)_z dz \right] S_f.$$

Les flux radiatifs et convectifs sont respectivement donnés par les expressions suivantes, où h est un coefficient de convection naturelle dont la valeur est de l'ordre de $10 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$:

$$\Phi_{rad} = \varepsilon \sigma \pi D dz T^4$$

$$\Phi_{conv} = h \pi D dz (T - T_a).$$

L'équation de conservation de l'énergie devient, après collection des différents termes et réduction :

$$\frac{d^2 T}{dz^2} + \frac{16 I^2 a}{\kappa \pi^2 D^4} T = \frac{4 \varepsilon \sigma}{\kappa D} T^4 + \frac{4h}{\kappa D} (T - T_a) \tag{A1}$$

Pour les températures inférieures à 1000 K, nous avons tracé les différentes contributions de l'équation (A1), en prenant une valeur de l'intensité moyenne égale à 0,5 A.

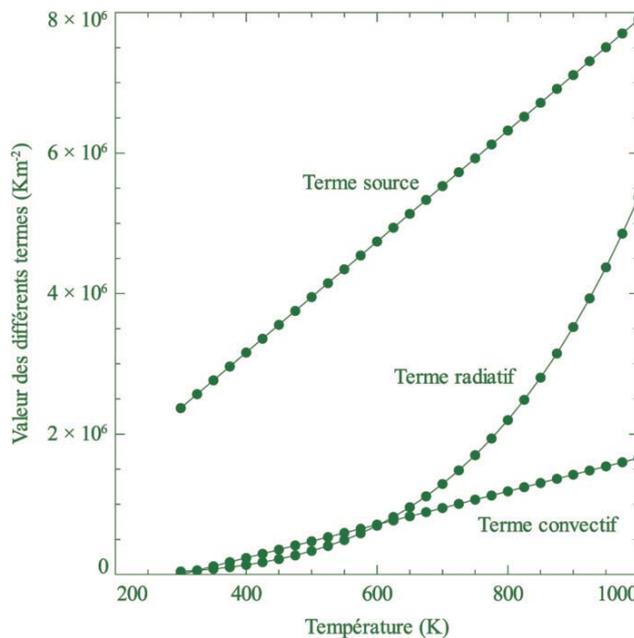


Figure 10 : Valeurs des différents termes de l'équation (A1).

Il est clair que la contribution du terme source à basse température est prépondérante devant les autres termes, et que l'équation (A1) peut être réduite à :

$$\frac{d^2 T}{dz^2} + \frac{16 I^2 a}{\kappa \pi^2 D^4} T = 0 \tag{A2}$$

dont la solution est :

$$T(z) = A \cos \sqrt{\frac{16 I^2 a}{\kappa \pi^2 D^4}} z + B \sin \sqrt{\frac{16 I^2 a}{\kappa \pi^2 D^4}} z$$

où A et B sont des constantes d'intégration. Compte tenu de la symétrie du problème ($T(z)$ est une fonction paire de z), nous ne conservons que la solution en cosinus, avec

$A = T_{\max}$, température maximum obtenue en $z = 0$. L'inverse de la quantité $\sqrt{\frac{16 I^2 a}{\kappa \pi^2 D^4}}$ est la longueur typique sur laquelle la température du filament varie de manière significative. Numériquement, cette longueur typique est égale à 1 cm, ce qui est en parfait accord avec les observations expérimentales.



Jean-Michel GITTON

Professeur
Collège Littré
Bourges (Cher)



Charles de IZARRA

Professeur
Université d'Orléans - Faculté des sciences
Site de Bourges (Cher)