

LA DÉTERMINATION DE LA TEMPÉRATURE DES CORPS PAR LA LOI DE PLANCK

1. Le but du travail

- L'utilisation de la formule de Planck pour la détermination de la température d'un corps à l'aide du pyromètre optique avec disparition de filament;

- Le calcul des coefficients linéaire et carré de variation avec la température de la résistance électrique du filament d'une lampe à incandescence.

2. Des aspects théoriques

Les corps chauffés émettent des ondes électromagnétiques par la transformation de l'énergie d'agitation thermique des particules dans l'énergie de radiation. La radiation électromagnétique d'un corps en équilibre thermodynamique est nommée *rayonnement thermique*.

On appelle *pouvoir spectral d'émission* d'un corps la grandeur $E_{\nu,T}$, numériquement égale à la densité superficielle de la puissance rayonnée thermique, pour un intervalle de fréquence de largeur unité:

$$E_{\nu,T} = \frac{dW}{d\nu} \quad (1)$$

où dW est l'énergie de la rayonnement thermique émis par l'unité de surface du corps par l'unité de temps, dans l'intervalle de fréquence compris entre ν et $\nu + d\nu$. Le pouvoir spectral d'émission dépend de la température, de la fréquence, du matériel duquel le corps est constitué, de sa forme et de l'état de la surface.

On appelle *facteur spectral d'absorption* d'un corps la grandeur $A_{\nu,T}$, qui montre la fraction de l'énergie dW_{inc} transmise, dans l'unité de temps à l'unité de surface du corps, par les ondes électromagnétiques incidentes, avec la fréquence comprise entre ν et $\nu + d\nu$, qui est absorbée par le corps, dW_{abs} :

$$A_{\nu,T} = \frac{dW_{abs}}{dW_{inc}} \quad (2)$$

Un corps est dit *corps noir* si, à toute température, il absorbe intégralement toute l'énergie des ondes électromagnétiques incidentes:

$$A_{\nu,T}^{noir} = 1 \quad (3)$$

Entre les pouvoirs spectraux émissif et absorbant d'un corps non transparent quelconque, on a la relation:

$$\frac{E_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = \varepsilon_{\nu,T} \quad (4)$$

Ça veut dire que, pour une fréquence et une température arbitraire, le rapport entre le pouvoir spectral d'émission et le facteur spectral d'absorption est le même, et, pour tous les corps, il est égal avec le *pouvoir émissif spectral du corps noir*, $\varepsilon_{\nu,T}$, ceci étant une fonction seulement de la fréquence et de la température (la loi de Kirchhoff sous la forme différentielle).

La théorie de Planck sur les quanta d'énergie électromagnétique conduit à l'expression suivante pour le pouvoir émissif spectral du corps noir:

$$\varepsilon_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{kT} - 1} \quad (5)$$

Si on veut exprimer le pouvoir spectral d'émission du corps noir, en se rapportant à un intervalle infinitésimal $d\lambda$ pour la longueur d'onde, en tenir compte de la relation $c = \lambda\nu$, on obtient une autre expression pour la formule de Planck:

$$\varepsilon_{\lambda,T} = \varepsilon_{\nu,T} \frac{d\nu}{d\lambda} = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \frac{h}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1} \quad (6)$$

Puisque le domaine de température dans lequel on va travailler ne va dépasser 3000 K, on peut utiliser l'approximation de Wien, valable pour les fréquences hautes ($h\nu \gg kT$):

$$\varepsilon_{\lambda,T} \cong \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} e^{-\frac{hc}{k\lambda T}} \quad (7)$$

Pour un corps quelconque, on va écrire le pouvoir spectral d'émission:

$$E_{\lambda,T} = A_{\lambda,T} \varepsilon_{\lambda,T} \quad (8)$$

On définit la *température brillante* (pour un intervalle étroit de longueurs d'onde) d'un corps avec la température réelle T , comme la température T_s du corps noir qui, pour la même longueur d'onde, a le pouvoir d'émission spectrale égale à celui du corps à la température T .

$$\varepsilon_{\lambda,T_s} = \varepsilon_{\lambda,T} \quad (9)$$

Notant $C_1 = 2\pi hc^2$ et $C_2 = \frac{hc}{k}$, on a l'égalité:

$$C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T_S}} = A_{\lambda, T} C_1 e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} \cdot \lambda^{-5} \quad (10)$$

et, puis:

$$\ln A_{\lambda, T} = \frac{C_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_S} \right) \quad (11)$$

On obtient, à la fin, la liaison entre la température réelle et la température brillante d'un corps avec le facteur spectral d'absorption $A_{\lambda, T}$:

$$T = \frac{C_2 T_S}{\lambda T_S \ln A_{\lambda, T} + C_2} \quad (12)$$

En mesurant expérimentalement, à l'aide du pyromètre, la température brillante T_S et en connaissant $A_{\lambda, T} = 0,40$ pour tungstène, $C_2 = 1,438 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{grad}$ et $\lambda = 0,655 \mu\text{m}$, on calcule la température réelle à l'aide de la formule ci-dessus.

3. L'installation expérimentale

Dans ce travail, le mesurage de la température brillante se fait à l'aide d'un pyromètre optique monochromatique avec disparition de filament, le principe de fonctionnement duquel est basé sur la comparaison et l'égalisation des éclats des deux sources de radiation.

Dans la figure 1 on a représenté le schéma de principe du pyromètre utilisé. Le corps incandescent S, la température duquel on mesure, forme son image à l'aide de l'objectif O₁ dans un plan où se trouve le filament d'une lampe électrique de comparaison L. L'observateur, en regardant par l'oculaire O₂, voit l'image du filament projetée sur le fond de l'image du corps incandescent. Le filtre rouge FR laisse passer seulement une partie, presque monochromatique, de la radiation émise par le corps et le filament L.

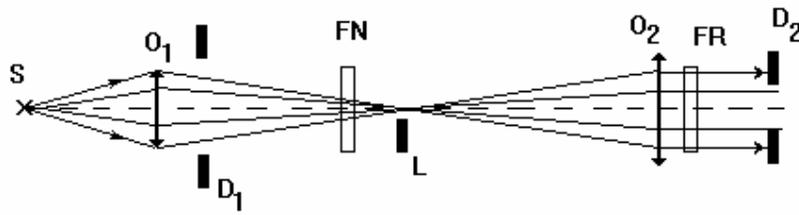


Figure 1

Ainsi, un observateur peut comparer l'éclat du corps (dans le cas de ce travail, le corps incandescent d'étude est le filament d'un bec) avec l'éclat du filament du pyromètre. On peut distinguer trois cas esquissés dans la figure 2: l'éclat du filament doit être plus grand que celui de l'image du corps (fig.2a), plus petit (fig.2c), ou les deux éclats doivent être égaux (fig.2b), cas dans lequel l'image du filament "disparaît" sur le fond de l'image du corps.

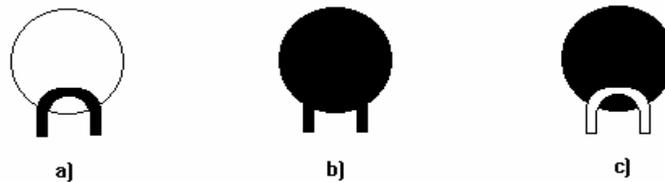


Figure 2

Si la température du corps est haute, il faudra utiliser un courant électrique de grande intensité pour le filament du pyromètre, ce que peut provoquer une usure rapide et une diminution de la précision de l'appareil. Cet inconvénient a été écarté par l'utilisation du filtre neutre FN monté entre l'objectif et la lampe de comparaison, pour réduire l'éclat de l'image du corps.

4. Manipulation

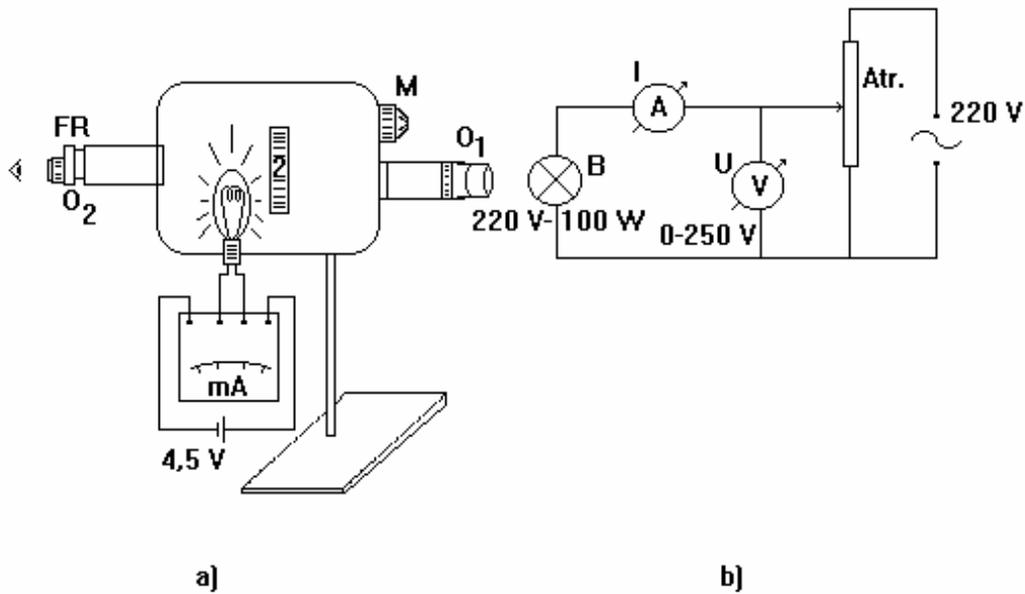


Figure 3

Pour mesurer la température réelle du filament incandescent en wolfram d'un bec et étudier la variation de sa résistance avec la température, on fait le montage de la figure 3. Pour mesurer la température brillante du filament de B, on procède de la manière suivante :

a) À l'aide de l'autotransformateur Atr. on applique au bec une tension de 60 V.

b) On vise avec le pyromètre optique (fixé sur un statif) le filament du bec et on règle la position de l'objectif O₁ jusqu'on observe, par l'oculaire O₂, l'image claire du filament dans le plan de la lampe L. En cette observation, le filtre neutre FN est sur le degré 1 et le filtre rouge FR est devant l'oculaire (on observe le point rouge sur lui).

c) On connecte la lampe L du pyromètre à l'appareil de mesure (échelle 0-400 mA) et la batterie de 4,5 V en tournant vers droit le manchon M. Quand la lampe est connectée, on va observer que le milliampèremètre indique une valeur et son filament rougissent.

d) On met le pyromètre tel que le filament de la lampe L est superposé à l'image du filament du bec (de la source) rangé (mis au point).

e) On tourne le manchon M jusque l'éclat des filaments est le même (la situation de la figure 2 b)

Dans ce cas, on lit le courant indiqué par le milliampèremètre au pyromètre et, sur le tableau annexé, on lit la température brillante correspondante au courant lu et au degré choisi. Pour ne pas faire des erreurs trop grandes à l'appréciation de l'égalité des éclats, on répète l'opération d'égalisation et de lecture d'au moins 5 fois.

On lit la tension et le courant appliqués au bec B.

f) On change la tension appliquée au bec B de 20 en 20 V jusqu'à 200 V et on répète les opérations e).

Pour les tensions de l'intervalle 60 - 140 V, on travaille avec le filtre FN du degré 1 et, pour 160-200 V, sur le degré 2.

4. Indications pour le traitement des données expérimentales

4.1) À l'aide du tableau qui donne les températures brillantes correspondantes aux certaines valeurs du courant du pyromètre on trace sur un graphique la courbe d'étalonnage de l'appareil $T_S(I_L)$. En utilisant cette courbe, on trouve les températures brillantes du filament du bec pour les valeurs du courant lues sur le milliampèremètre de la lampe L à l'égalisation des éclats.

4.2) Les températures brillantes pris du graphique, transformées en degrés K, s'introduisent dans la relation (12) et on calcule les températures réelles.

Dans l'intervalle de mesure de la température brillante du filament en wolfram, le facteur spectral d'absorption $A_{\nu,T}$ varie très peu, et va être considéré constant et égal à 0,40.

4.3) Les données expérimentales vont être écrites dans un tableau, sous la forme:

No	U_{bec} (V)	I_{bec} (A)	$R=U/I$ (Ω)	i (mA)	t_S ($^{\circ}\text{C}$)	T_S (K)	T (K)	t ($^{\circ}\text{C}$)

4.4) En connaissant que la résistance du filament du bec varie avec la température d'après la loi:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2) \quad (13)$$

on calcule les coefficients α et β comme suivant:

On trace le graphique de la résistance R en fonction de la température. On choisit deux points, (R_1, t_1) et (R_2, t_2) , de la partie concave de la courbe et on les introduit dans la relation (13). On obtient le système:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_0(1 + \alpha t_1 + \beta t_1^2) \\ R_2 &= R_0(1 + \alpha t_2 + \beta t_2^2) \end{aligned} \quad (14)$$

La résistance à $t = 0^{\circ}\text{C}$ est considérée connue, $R_0 = 25 \Omega$.

Du système (14), on détermine les coefficients α et β .

5. Questions et devoirs supplémentaires:

5.1) Justifier l'approximation des fréquences hautes dans la relation (7), en tenir compte de l'ordre de grandeur des fréquences du spectre optique.

5.2) Indiquer les sources possibles d'erreurs qui peuvent affecter les résultats.

6. Annexe

Le tableau d'étalonnage de la lampe du pyromètre:

Le courant i (mA) par le filament du pyromètre	150	200	240	290
La température t_S (°C) brillante du filament du pyromètre	1166	1240	1541	1875