

PARTIE OPTIQUE (durée conseillée 1 h 15)**ÉTUDE D'UN PYROMÈTRE OPTIQUE**

Un **pyromètre optique monochromatique à disparition de filament** (voir schéma 1a) permet de mesurer à distance la température T_S d'une source étendue S incandescente, en comparant l'émittance monochromatique M de l'image S' de cette source, fournie par un objectif L, à celle d'un filament étalon f, placé en S'.

L'observation peut se faire à l'œil nu à travers un oculaire (non étudié dans ce sujet), formé de deux lentilles minces L_1 et L_2 . De plus, cette observation est faite en lumière monochromatique grâce à un filtre interférentiel placé à la sortie de l'oculaire.

Le filament a été étalonné au préalable avec un corps noir placé au même endroit que la source S étudiée. La courbe d'étalonnage du filament permet de faire correspondre à toute valeur de la tension U_f aux bornes du filament une valeur de la température T_f du filament égale à celle du corps noir quand ils ont la même émittance.

Puis, pour mesurer la température T_S de la source étendue, on règle la tension U_f jusqu'à avoir l'égalité des émittances de S' et de f (voir schéma 1b) :

- si le filament apparaît sombre sur le fond de l'image S' de S, c'est que la température T_S de la source est supérieure à T_f : $T_S > T_f$;
- si on ne peut distinguer le filament : $T_S = T_f$;
- si le filament apparaît clair sur fond sombre : $T_S < T_f$.

Les parties 1, 2 et 3 sont indépendantes.

Partie 1 : Position de la source par rapport à l'objectif de l'appareil

L'objectif L est assimilable à une lentille mince convergente de centre O et de distance focale image $f' = +10$ cm (voir schéma 1a).

Dans l'utilisation normale de ce pyromètre, la distance $D' = OS'$ entre l'objectif L et le filament f vaut $D' = 15$ cm.

1.1 - Quelle doit être la valeur de la distance $D = OS$ entre la source S et l'objectif L, pour que l'on puisse former l'image S' de la source S sur le filament f ?

Partie 2 : Étude du filtre interférentiel

La source S incandescente émet de la lumière blanche : $\lambda \in [380 \text{ nm} ; 780 \text{ nm}]$.

Le filtre interférentiel, placé à la sortie de l'oculaire après L_2 et éclairé sous incidence normale, sélectionne la longueur d'onde $\lambda_0 = 656,3$ nm (raie H_α de l'hydrogène). Voir schéma 1a.

Ce filtre est une lame mince à faces parallèles, d'épaisseur e et d'indice $n = 1,564$ pour la longueur d'onde λ_0 .

Un traitement a été effectué sur chaque face (parties grisées du schéma 2), ce qui confère, sous une incidence quasi-normale, un coefficient de réflexion en intensité élevé pour chacune de ces faces : $R = 0,90$. On obtient ainsi une cavité de Fabry-Pérot.

Le rayon incident (rayon 0 du schéma 2) subit une multitude de réflexions à l'intérieur de cette lame, ce qui génère une infinité de rayons transmis (rayons 1, 2, 3, etc... du schéma 2) qui interfèrent à l'infini.

2.1 - Soit $\delta = [\ell_2] - [\ell_1]$ la différence de chemin optique entre deux rayons transmis successifs pour une incidence normale.

- 2.1.1 - Donner l'expression de δ en fonction de e et de n .
- 2.1.2 - En déduire l'expression de l'ordre d'interférence $p = \frac{\delta}{\lambda}$ quand la lame est éclairée par une onde de longueur d'onde λ .
- 2.1.3 - Enfin, donner l'expression de la différence de phases $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ entre deux ondes transmises successives, en fonction de n , e , λ .
- 2.2 - L'intensité transmise I_{tr} , et par conséquent la transmittance T de la lame, rapport entre cette intensité et l'intensité incidente I_0 , sont maximales si les ondes transmises successives donnent des interférences constructives.
- 2.2.1 - Donner l'expression de l'épaisseur e de la lame, en fonction de n et de λ_0 , pour que l'onde de longueur d'onde λ_0 soit transmise avec le maximum d'intensité.
- 2.2.2 - Calculer la valeur minimale, e_0 de cette épaisseur pour que la lame transmette l'onde de longueur d'onde λ_0 avec le maximum d'intensité.

Dans toute la suite du problème, on utilise une lame d'épaisseur $e = e_0$.

- 2.3 - La lame a l'épaisseur minimale e_0 .
- 2.3.1 - Montrer que l'ordre d'interférence a pour expression : $p = \frac{\lambda_0}{\lambda}$.
- 2.3.2 - Exprimer la différence de phases $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ en fonction de la longueur d'onde λ_0 et de la longueur d'onde λ de l'onde incidente.
- 2.3.3 - Vérifier que la longueur d'onde λ_0 est la seule du domaine visible [380 nm ; 780 nm] qui soit transmise avec un maximum d'intensité.
- 2.4 - La courbe, $T = f(\lambda)$, donnant les variations de la transmittance T de la lame en fonction de la longueur d'onde λ est représentée sur le schéma 3 au voisinage de $\lambda_0 = 656,3$ nm.
- 2.4.1 - Quelle est la couleur de la lumière transmise par ce filtre interférentiel ?
- 2.4.2 - Calculer l'absorbance A du filtre pour la longueur d'onde λ_0 en utilisant le schéma 3 du document réponse.
- 2.4.3 - Déterminer graphiquement la bande passante de ce filtre interférentiel, définie par l'ensemble des longueurs d'onde pour lesquelles la transmittance appartient à l'intervalle : $\frac{T_{\max}}{2} \leq T \leq T_{\max}$. Rendre le document-réponse complété (schéma 3).
- 2.4.4 - Calculer la largeur $\Delta\lambda$ de la bande passante.
- 2.4.5 - Vérifier numériquement que la largeur de la bande passante est donnée par la formule :

$$\Delta\lambda \approx \frac{2\lambda_0}{\pi\sqrt{m}} ;$$

la constante m , fonction du facteur de réflexion en intensité R , vaut : $m = \frac{4R}{(1-R)^2}$.

Partie 3 : Mesure des températures

On suppose que le filtre "H_α" a été placé à la sortie de l'oculaire et que toutes les mesures se font donc à la longueur d'onde $\lambda_0 = 656,3 \text{ nm}$.

On mesure alors la température T_S de la source en faisant varier l'émittance du filament étalonné jusqu'à la rendre égale à celle de l'image de la source. La courbe d'étalonnage du filament donne $T_S = 2600 \text{ K}$.

L'émittance M_0 de la source est analogue à celle du corps noir pour la longueur d'onde $\lambda_0 = 656,3 \text{ nm}$. La courbe traduisant les variations de M_0 en fonction de T , au voisinage de $T_S = 2600 \text{ K}$ et correspondant au tableau de valeurs ci-dessous (T en kelvins et M_0 en gigawatts par mètre cube), est représentée sur le schéma 4.

T(K)	2590	2592	2594	2596	2598	2600	2602	2604	2606	2608	2610
M₀(GW.m⁻³)	647,3	651,6	655,8	660,1	664,4	668,7	673,1	677,5	681,9	686,3	690,7

On suppose qu'un œil normal standard peut apprécier sans difficulté, dans cette région du spectre, une variation relative d'émittance de 1 %, soit : $\frac{|M_0(T) - M_0(T_S)|}{M_0(T_S)} = \frac{\Delta M_0}{M_0(T_S)} = \frac{1}{100}$.

3.1 - Pour calculer l'incertitude absolue ΔT sur la mesure de $T_S = 2600 \text{ K}$, on peut linéariser la courbe $M_0 = f(T)$ au voisinage du point ($T_S = 2600 \text{ K}$; $M_0(T_S) = 668,7 \text{ GW.m}^{-3}$).

3.1.1 - Calculer le coefficient directeur, a , de la droite confondue avec la courbe $M_0 = f(T)$ au voisinage du point étudié.

3.1.2 - En déduire la valeur de l'incertitude absolue ΔT sur la mesure de T_S , correspondant à

$$\frac{\Delta M_0}{M_0(T_S)} = \frac{1}{100}.$$

3.2 - Vérifier numériquement que l'incertitude absolue sur T_S est donnée par :

$$\Delta T \approx \frac{1}{100} \cdot \frac{\lambda_0 T_S^2}{C_2} \text{ avec } C_2 = \frac{hc}{k} = 1,439 \cdot 10^{-2} \text{ m.K.}$$

(h , constante de Planck ; c , célérité de la lumière dans le vide ; k , constante de Boltzmann).

3.3 - Conclure sur la précision des mesures de température faites avec cet appareil.

Schéma 1 : principe du pyromètre à disparition du filament.

Schéma 1a :

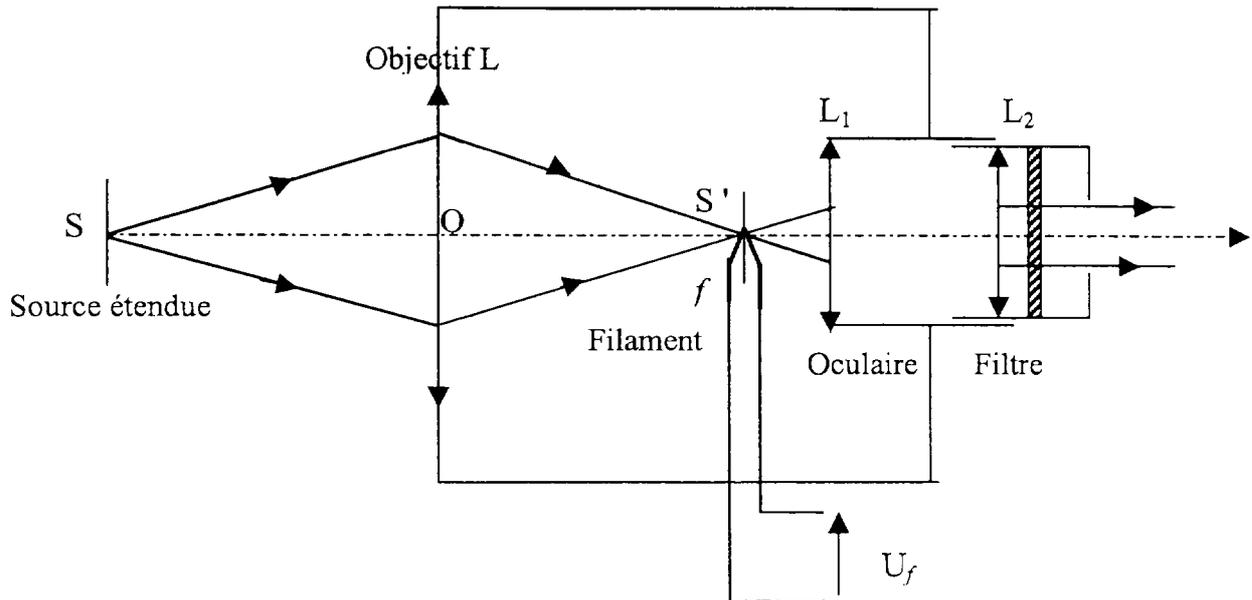


Schéma 1b :

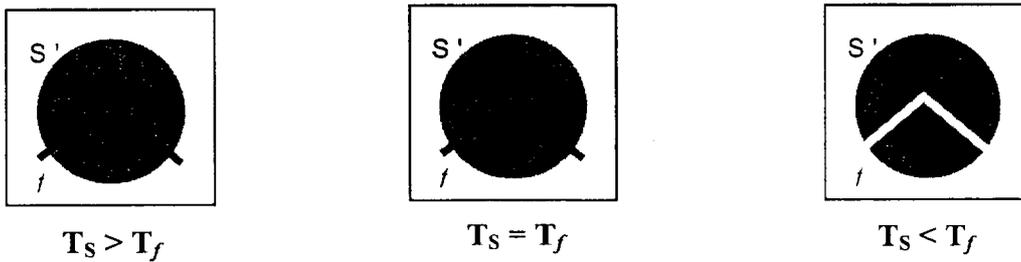
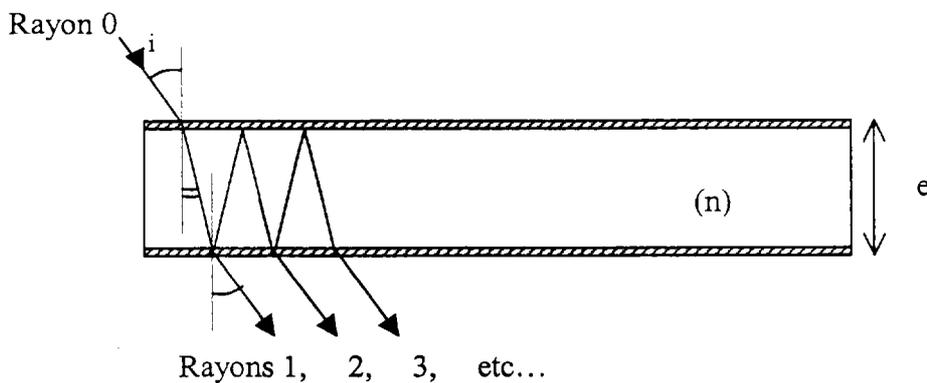


Schéma 2 : principe du filtre interférentiel.



DANS CE CADRE

NE RIEN ÉCRIRE

Académie : _____ Session : _____

Examen ou Concours _____ Série* : _____

Spécialité/option* : _____ Repère de l'épreuve : _____

Épreuve/sous-épreuve : _____

NOM : _____

(en majuscules, suivi s'il y a lieu, du nom d'épouse)

Prénoms : _____ N° du candidat

Né(e) le : _____

(le numéro est celui qui figure sur la convocation ou la liste d'appel)

* Uniquement s'il s'agit d'un examen.

Durée : 4 H
Coefficient : 4

Session : 2006

Repère : TPSP
Page : 13/14

DOCUMENT RÉPONSE

(à rendre obligatoirement avec la copie)

Schéma 3 : Transmittance du filtre interférentiel, au voisinage de $\lambda_0 = 656,3$ nm.

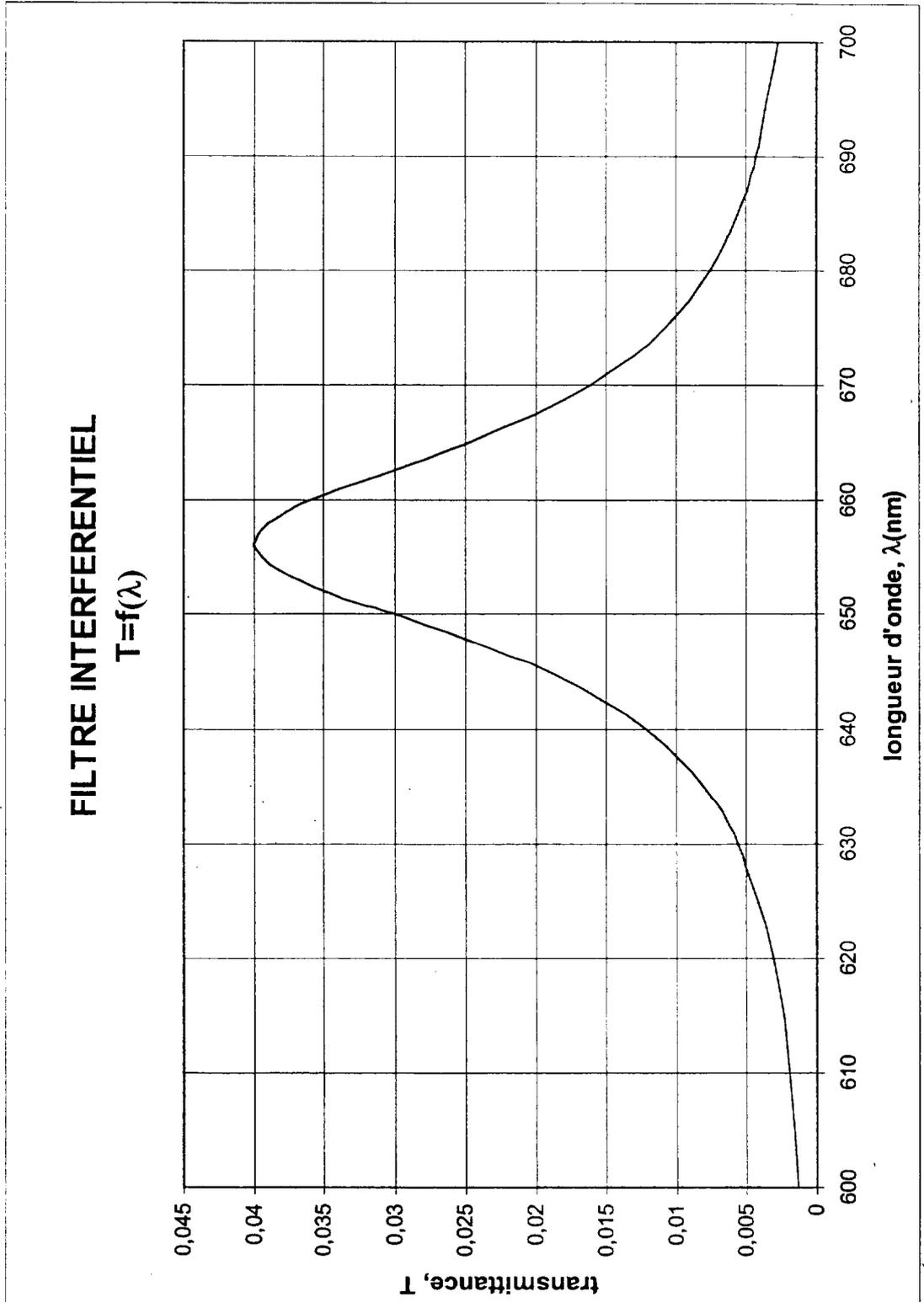


Schéma 4 : Émittance du corps noir pour $\lambda_0 = 656,3$ nm, au voisinage de $T_s = 2600$ K.

