

Spectrophotométrie - Pyrométrie

Avertissement

Dans votre compte rendu, il est impératif que vos graphes soient numérotés, légendés et discutés dans le texte ; il est également important que vos tableaux soient présentés de manière pertinente : **un tableau ou une figure sans légende et dont le contenu n'est pas discuté dans le texte n'a aucune utilité dans un compte rendu.**

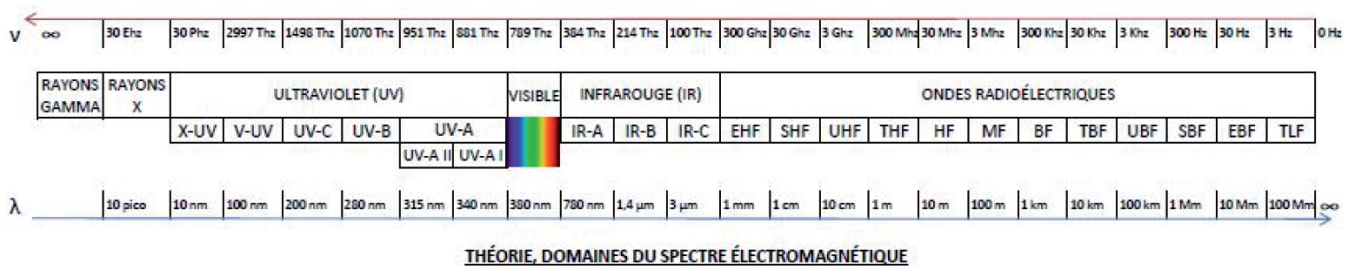
But du TP :

Étudier le spectre de différentes sources de rayonnement afin de savoir identifier un **rayonnement thermique**, et d'en déduire la **température** de la source de rayonnement. C'est le principe d'une méthode de mesure de température, sans contact, obéissant à loi d'émission de rayonnement thermique : **la pyrométrie**.

1 Éléments théoriques et questions préliminaires

1.1 Le spectre électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique est divisé en plusieurs domaines repérables par une plage de longueurs d'onde λ ou de fréquences ν . Ce rayonnement se divise en plusieurs catégories, voir figure 1.



Spectre visible par l'œil humain

λ (nm)	< 400	500	590	630	> 750
couleur	ultraviolet	bleu	jaune	rouge	infrarouge



FIGURE 1 – le spectre électromagnétique

- La partie la plus familière à l'être humain est le domaine du **spectre visible**, défini par des longueurs d'onde comprises entre 380 et 780 **nm** (ordre de grandeur en fréquence ~ 500 THz). L'œil humain a une sensibilité spectrale qui correspond à ce domaine, dans lequel vont rayonner les principales sources lumineuses de la vie courante telles que le soleil et les éclairages artificiels. Ce sont les rayonnements de ces sources, réfléchis par les objets, qui nous permettent de les voir.

- Les rayonnements **les plus énergétiques**¹ (très hautes fréquences) sont, dans l'ordre croissant, : les ultraviolets eux-mêmes classés en UVA, UVB et UVC, les rayons X utilisés par exemple en médecine, les rayons γ produits par les réactions nucléaires. Dans cette dernière catégorie, se trouvent les rayons cosmiques produits par les étoiles.
- Les rayonnements **les moins énergétiques** sont, dans l'ordre décroissant en fréquence, les infrarouges eux-mêmes classés en proches infrarouges, infrarouges moyens et infrarouges lointains (aux températures courantes pour l'être humain, le rayonnement thermique se situe essentiellement dans l'infrarouge), les micro-ondes et les ondes hertziennes.

Pour un rayonnement donné, la courbe donnant l'intensité lumineuse (luminance monochromatique) en fonction de la longueur d'onde est appelée **spectre**. Sa forme dépend du mode de production de la lumière.

Dans ce TP, nous allons nous intéresser au rayonnement thermique dû aux mouvements des électrons dans les milieux continus et le comparer au rayonnement dû à la désexcitation des atomes ou des molécules d'un gaz.

1.2 Le rayonnement thermique

Le rayonnement thermique d'une surface peut se comparer au rayonnement du **corps noir qualifié d'émetteur et absorbeur parfait**. Celui-ci absorbe toute la lumière qu'il reçoit à toutes les longueurs d'onde, et émet le rayonnement maximum en fonction de la longueur d'onde et de la température. La **loi de Planck** décrit la répartition de l'énergie électromagnétique rayonnée par un corps noir à une température donnée T , en fonction de la longueur d'onde λ dans un milieu d'indice de réfraction n .

La luminance monochromatique du corps noir, c'est-à-dire le flux émis par unité de surface apparente, par unité d'angle solide et par unité de longueur d'onde, s'exprime communément² en $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{sr}^{-1}$ et s'écrit :

$$L^0(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} = C_1 \lambda^{-5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad \leftarrow \text{Loi de Planck} \quad (1)$$

avec :

- la célérité de la lumière dans le milieu $c = c_0/n = \lambda\nu$ en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, c_0 étant la célérité dans le vide, et ν , la fréquence de l'onde en Hz,
- la constante de Planck $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$,
- la constante de Boltzmann $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$,
- les constantes $C_1 = 2hc^2 = 1,19106 \cdot 10^{-16} \text{ W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{sr}^{-1}$ et $C_2 = \frac{hc}{k} \approx 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$.

Il est à noter que pour certaines valeurs de longueurs d'onde et de température, le terme exponentiel devient très grand devant 1 et la loi de Planck peut être simplifiée.

La loi de Planck, éq. 1 et illustrée fig. 2, montre que plus un corps est **chaud**, plus le **flux lumineux** qu'il émet **est grand** à toutes les longueurs d'onde. De plus, la **luminance** monochromatique passe par un **maximum** pour un λ_{max} qui dépend de T , la **température** de la source de rayonnement. La **loi du déplacement de Wien** permet de connaître la position de ce maximum en fonction de la température T :

$$\lambda_{max} \text{ en } \mu\text{m} = \frac{h c}{4,9651 k T} = \frac{2898}{T} \quad \leftarrow \text{Loi de Wien} \quad (2)$$

1. Un rayonnement très énergétique, $E = h\nu$, est caractérisé par une fréquence ν élevée, donc une petite longueur d'onde λ .

2. Dans le Système International, l'unité de luminance est le $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1}$

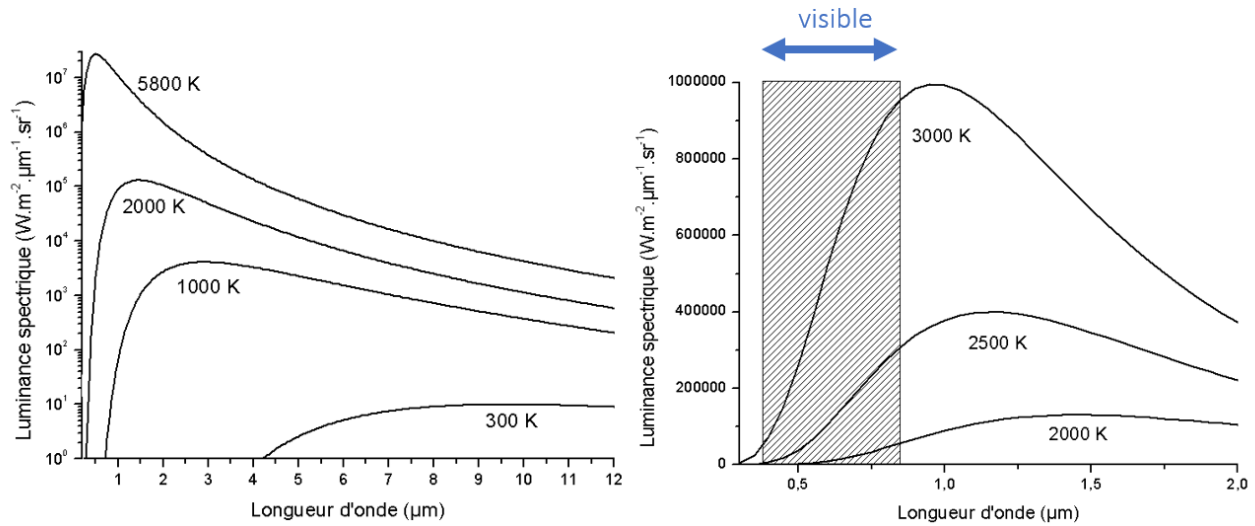


FIGURE 2 – La loi de Planck

Pour un corps réel à une température T , la luminance $L(\lambda, T)$ peut s'exprimer en fonction de celle du corps noir $L^0(\lambda, T)$ et de son émissivité ε qui est toujours inférieure à 1 (car seul le corps noir a une émissivité égale à 1) :

$$L(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot L^0(\lambda, T) = L^0(\lambda, T_L) \quad (3)$$

Une autre façon de décrire l'émissivité d'un corps à une longueur d'onde donnée est de déterminer la température de luminance T_L , c'est-à-dire la température provoquant chez un corps noir la même luminance $L(\lambda, T) = L^0(\lambda, T_L)$.

Cette température de luminance, T_L , est toujours inférieure à la température du corps réel T . Sa mesure permet de calculer la température réelle si et si seulement si l'émissivité ε de celui-ci est connue.

Remarque : lorsque l'émissivité ε est indépendante de λ , le corps réel est appelé corps gris.

Lorsque la température de la source de rayonnement est suffisamment élevée pour pouvoir écrire que $\exp(C_2/\lambda T) \gg 1$, cette expression se simplifie :

$$L(\lambda, T) \approx \varepsilon(\lambda, T) \exp\left(\frac{-C_2}{\lambda T}\right) = \exp\left(\frac{-C_2}{\lambda T_L}\right) \approx L^0(\lambda, T_L) \quad (4)$$

1.3 Le pyromètre optique

Le schéma général d'un pyromètre optique peut être assimilé à un dispositif optique simple : une lentille (ou un miroir) forme l'image de la source à mesurer sur toute la surface d'un détecteur photo-électrique. Il existe trois grandes familles de pyromètres : les monochromatiques, les bi-chromatiques, et ceux à large bande qui mesurent une énergie. Ce TP va vous faire découvrir l'intérêt de la mesure de la luminance d'une source à 2 longueurs d'onde (bi-chromatique) qui est de pouvoir s'affranchir de la connaissance de l'émissivité, ε , de la source.

La **pyrométrie monochromatique** consiste à mesurer la luminance d'un corps à une seule longueur d'onde afin d'en déduire sa température T . Cependant, il faut toujours garder à l'esprit que cette mesure ne peut être interprétée correctement que si l'on connaît par ailleurs la valeur de l'émissivité du corps $\varepsilon(\lambda, T)$.

Certains pyromètres fonctionnent par comparaison : l'œil de l'utilisateur va comparer la luminance de l'objet à mesurer avec celle d'une source présente dans l'appareil (une lampe à filament de tungstène), dont il va faire varier la température afin d'égaliser la luminance à celle du corps à mesurer. Il

s'agit de pyromètres à disparition de filament.

La **pyrométrie bi-chromatique** consiste, elle, à mesurer le rapport de deux luminances à deux longueurs d'onde λ_1 et λ_2 de la même source de rayonnement.

1.4 Travaux préliminaires

Les réponses à ces questions devront apparaître dans le compte rendu et montrés à l'enseignant au cours de la séance

1. Retrouver l'expression de λ_{max} (équ. 2), la longueur d'onde du maximum de la luminance donnée par la loi de Planck.
2. Lorsque la température d'un objet augmente, le maximum de son spectre d'émission :
 - (a) se décale vers de plus petites longueurs d'ondes.
 - (b) se décale vers de plus grandes longueurs d'ondes.
 - (c) ne se décale pas, car il ne dépend pas de la température.

Justifiez votre réponse.

3. Lorsque la température d'un objet augmente petit à petit, le premier rayonnement émis par cet objet, qui est visible par votre œil, sera de couleur :
 - (a) bleu
 - (b) blanc
 - (c) rouge
 - (d) violet
 - (e) noir
 - (f) vert
 Justifiez votre réponse.

4. Expliquez comment est obtenue l'expression $\frac{1}{T} - \frac{1}{T_L} = \frac{\lambda}{C_2} \ln(\varepsilon(\lambda, T))$, reliant la température vraie T et la température de luminance T_L d'un corps réel.

Avec un pyromètre monochromatique, vous visez un objet qui est à la température $T = 1500$ K.

- (a) À $\lambda = 0,85 \mu\text{m}$, avec un objet ayant une émissivité $\varepsilon(\lambda, T) = 0,9$, vous mesurez une luminance $L(\lambda, T) = 3,035 \cdot 10^9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{sr}^{-1}$. Déduisez la valeur de T_L .
- (b) Toujours à $0,85 \mu\text{m}$, vous mesurez maintenant, face à un autre matériau d'émissivité $\varepsilon(\lambda, T = 1500 \text{ K}) = 0,1$, une luminance $L(\lambda, T) = 3,373 \cdot 10^8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{sr}^{-1}$. Quelle est dans ce cas la valeur de T_L ? Qu'en concluez-vous ?

5. La figure 3 montre le schéma de l'expérience de la partie pyrométrie du TP et sa représentation sous forme d'une succession de transferts. En utilisant l'expression simplifiée de la loi de Planck, équ. 4, établissez l'expression de la tension v_{λ_1} mesurée en bout de chaîne :

$$v_{\lambda_1} = K(\lambda_1)\varepsilon(\lambda_1)\exp\left(\frac{-C_2}{\lambda_1 T}\right) \text{ Donner l'expression de la constante } K(\lambda_1) \text{ en Volts.}$$

2 Expériences à réaliser lors de la séance

2.1 Spectrophotométrie

2.1.1 Matériel

Le dispositif expérimental se compose d'un spectrophotomètre piloté grâce au logiciel SPID-HR, de plusieurs sources de rayonnement et de plusieurs filtres. Ce spectrophotomètre est un appareil qui permet de mesurer le spectre du rayonnement de la source que l'on souhaite analyser. Comme l'illustre la figure 4, une fibre optique amène le rayonnement devant un miroir parabolique qui va réfléchir celui-ci, sous la forme d'un faisceau parallèle, vers un réseau.

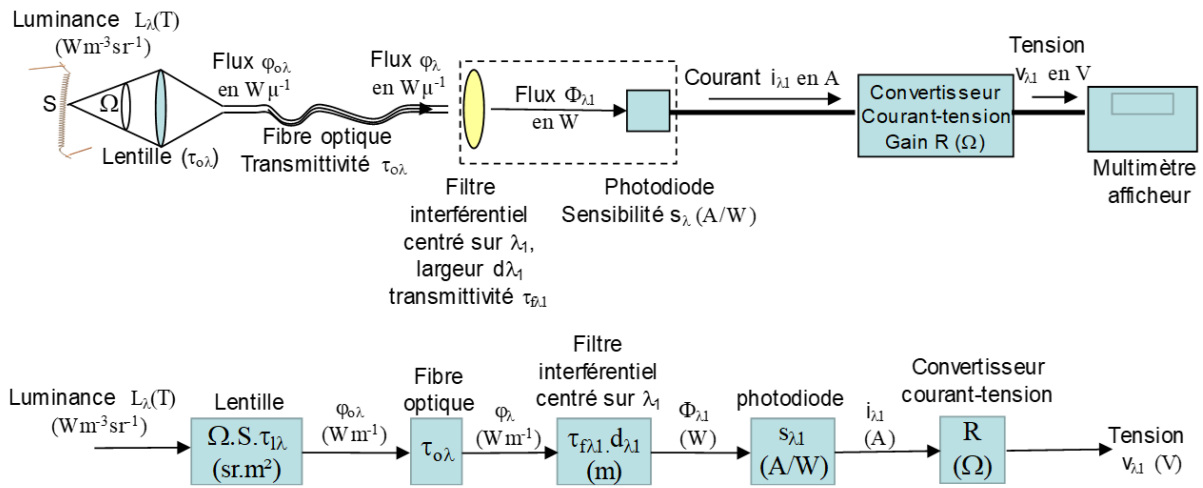


FIGURE 3 – Schéma du dispositif expérimental constituant le pyromètre

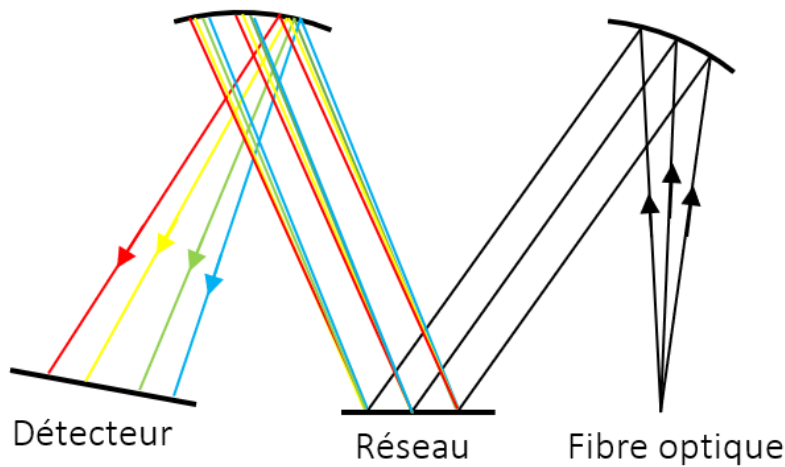


FIGURE 4 – Principe du spectrophotomètre

Le réseau est une surface gravée de manière régulière de telle façon que le pas du réseau soit de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. Lorsqu'il est éclairé, le réseau produit des figures de diffraction pour chaque longueur d'onde ; il se produit alors des interférences entre les faisceaux réfléchis qui vont être constructives pour une longueur d'onde donnée dans une direction. Le faisceau parallèle incident est ainsi réfléchi en autant de faisceaux parallèles que de longueurs d'onde. Ces faisceaux sont de nouveau réfléchis par un miroir parabolique qui focalise la lumière sur le détecteur. Ce qui n'était qu'un cône de lumière polychromatique à la sortie de la fibre optique est, à la sortie du spectromètre, un alignement de points de lumière monochromatiques. Ce spectromètre permet d'analyser la lumière comprise entre 376 nm et 846 nm.

Le détecteur est une barrette CCD (Charged Coupled Device) composé de 2048 pixels de $12,7 \mu\text{m}$ de large. Chaque pixel reçoit la lumière correspondant à une petite plage de longueurs d'onde (470 nm divisés par 2048 photodiodes, soit 0,23 nm par pixel, ce qui constitue un ordre de grandeur de la résolution du système). Pendant le temps de pose (réglable avec le logiciel), chaque pixel produit une quantité d'électrons proportionnelle au flux lumineux reçu ; ces électrons sont stockés dans des condensateurs qui sont déchargés à la fin du temps de pose afin de mesurer le courant reçu. Le logiciel SPID-HR (cf notice sur place) pilote l'acquisition des spectres et permet leur affichage en temps réel sur l'écran.

2.1.2 Expériences à réaliser

- Observez le spectre d'émission des différentes sources à votre disposition : les tubes fluorescents, la lampe halogène et son réflecteur dichroïque, la lampe à décharge, les diodes électroluminescentes, une flamme de bougie, etc... Sur la table, vous trouverez plusieurs matériaux, filtres au travers desquels il est intéressant d'observer certaines de ces sources.
- Parmi les sources que vous avez observées, choisissez-en quatre dont la lampe à décharge et la lampe à filament de tungstène, dont vous commenterez les spectres en indiquant la nature du rayonnement observé : s'agit-il d'un rayonnement thermique ? (Reportez-vous aux explications en annexe 3 si vous avez besoin d'explications)
- Identifiez les raies du spectre discret de la lampe à décharge. Vous trouverez sur la table les valeurs des raies spectrales de la lampe à décharge, dont nous disposons. Comparez les valeurs que vous avez mesurées sur votre spectre avec ces données. Est-ce que le spectrophotomètre est correctement étalonné ?
- Observez le spectre d'émission de la lampe à filament de tungstène pour trois températures de filament (déduites de la tension et du courant d'alimentation de la lampe). Est-ce en accord avec ce que vous savez du rayonnement thermique ?

Remarque : faites une présentation synthétique de vos mesures et analysez vos résultats.

2.2 Pyrométrie

Dans cette deuxième partie, il s'agit de mettre au point un pyromètre bi-chromatique afin de mesurer la température d'une source de rayonnement thermique.

2.2.1 Matériel à votre disposition

La **lampe à filament de tungstène** est une lampe classique à incandescence, qui peut être alimentée avec un courant variable allant jusqu'à 1 A (valeur maximum à respecter) pour une alimentation continue. Plus le courant est important, plus la température du filament est élevée, et plus sa résistivité $\rho(T)$, sa longueur $\ell(T)$ et sa section $S_{fil}(T)$ augmentent.

La mesure de la résistance, R , du filament, comparée à sa valeur R_0 à température ambiante (≈ 300 K), permet de remonter à la température T , voir figure 5, et d'établir l'expression :

$$T = -0,053 (\rho_0 R(T)/R_0)^2 + 36,1 \rho_0 R(T)/R_0 + 125$$

avec la résistivité du tungstène $\rho_0 = 5,65 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ et $R_0 = 1,65 \Omega$, la résistance du filament à température ambiante.

Un voltmètre et un ampèremètre permettent de réaliser les mesures de tension et de courant et donc de déduire la résistance $R(T)$ de la lampe. À partir de la figure 5 (que vous retrouverez aussi en salle), vous déduirez la température du filament lors de vos différentes mesures.

La **lentille** permet de former une image floue du filament afin d'éclairer l'entrée de la fibre optique de manière uniforme.

La **fibre optique** est plus exactement un faisceau de fibres optiques à saut d'indice disposées en couronne. Ce faisceau se divise en trois : une fibre centrale qui ne nous servira pas, une première couronne de fibres qui amène le flux lumineux jusqu'à une photodiode à travers un filtre interférentiel centré sur 940 nm, et une seconde couronne de fibres qui amène le flux lumineux jusqu'à une photodiode à travers un autre filtre interférentiel centré sur lui sur 800 nm.

Les **photodiodes** transforment en courant électrique le flux lumineux, qu'elles reçoivent aux longueurs d'onde correspondant aux filtres interférentiels placés devant elles. Un boîtier électronique

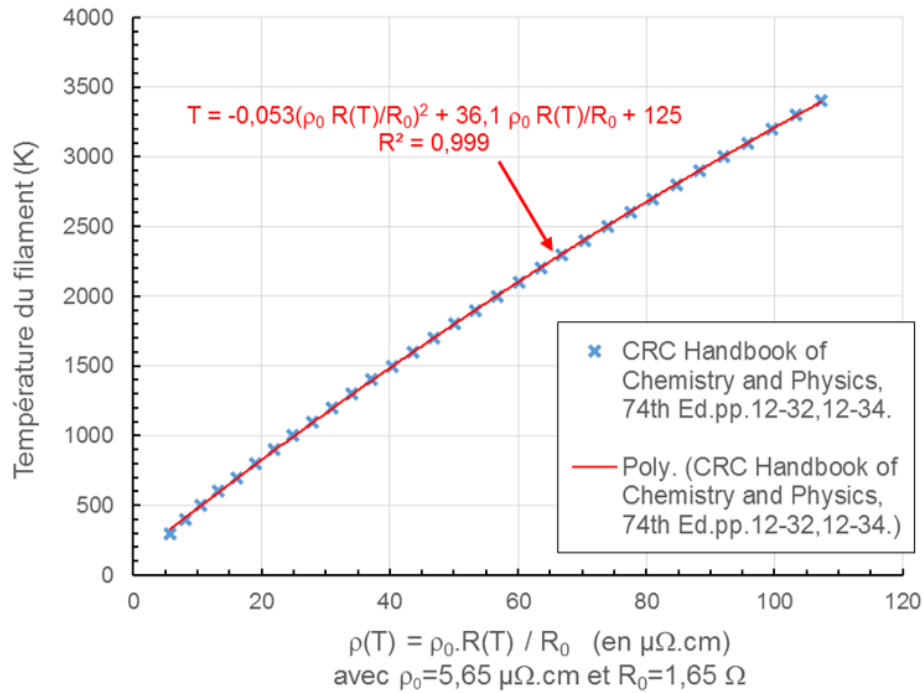


FIGURE 5 – Variation de la résistance du filament de tungstène en fonction de la température

vous permet ensuite de convertir ce courant en tension $V_{conv} = RI$, lue sur un multimètre Keithley (tension maximum : 12 V). Le facteur de proportionnalité entre le courant et la tension peut être ajusté sur la face avant du boîtier. Dans la suite du texte, nous appellerons ce boîtier le convertisseur courant/tension.

L'**amplificateur logarithmique** permet lui de délivrer une tension proportionnelle au logarithme du rapport des courants qu'il reçoit, c'est-à-dire $V_{out} = 5 \cdot \ln(I_1/I_2)$

2.2.2 Expériences à réaliser

Pour plusieurs valeurs d'intensité d'alimentation de la lampe à filament de tungstène, inférieures à 1 A :

- Mesurez la résistance $R(T)$ et déduisez la température T du filament ;
- Mesurez la tension en sortie du convertisseur courant/tension V_{conv} pour au moins une photodiode branchée en entrée ;
- Mesurez la tension de sortie de l'amplificateur logarithmique V_{out} .

Attention : ne pas confondre le courant d'alimentation du filament de tungstène avec le courant fourni par les photodiodes.

Exploitation des mesures de courant des photodiodes (utilisez le travail préliminaire) :

- Pour les deux photodiodes, tracez l'évolution du logarithme de la tension en fonction de $1/T$.
- Ces courbes sont-elles conformes à ce que vous attendiez ?
- Quelle information peut-on retrouver grâce à chacune de ces courbes ? Les différences observées avec la réalité peuvent-elles s'expliquer par les incertitudes de mesure ?
- Est-il possible d'utiliser ces courbes comme étalonnage pour mesurer la température d'une autre source lumineuse que la lampe à incandescence ? Si oui, pourquoi et sous quelles conditions ? Sinon, quel est l'élément qui rend cette mesure impossible ?

Exploitation des mesures de tension de sortie de l'amplificateur logarithmique :

- Tracez l'évolution de la tension V_{out} en fonction de $1/T$.
- Est-il possible d'utiliser cette courbe comme étalonnage pour mesurer la température d'une autre source lumineuse que la lampe à incandescence ? Si oui, pourquoi et sous quelles conditions ? Sinon, quel est l'élément qui rend cette mesure impossible ?

D'après votre expérience, quelle est la meilleure méthode pyrométrique ? Utilisez la méthode de votre choix pour mesurer la température d'une autre source thermique.

3 Annexe : les sources lumineuses

Le rayonnement atomique et moléculaire

Le rayonnement issu de la désexcitation des atomes ou des molécules d'un gaz présente bien souvent un spectre très différent d'un spectre d'origine thermique. La différence la plus flagrante est la présence de pics d'émission. Ces raies s'expliquent par la mécanique quantique, qui apprend que l'énergie d'un atome ou d'une molécule ne peut pas prendre n'importe quelle valeur. Par ce fait, les énergies des photons émis par le passage d'une de ces particules d'un état d'énergie excité vers un état plus stable ont des valeurs bien particulières qui dépendent uniquement de la nature de la particule émettrice. Cette particularité permet d'ailleurs d'identifier les espèces présentes dans le milieu émetteur. Les intensités relatives des raies émises par une même espèce permettent également d'obtenir la température du milieu. En effet, si le milieu est transparent, l'intensité d'une raie émise par les atomes d'un milieu de température T est proportionnelle à la densité N^* d'atomes dans l'état excité, à la probabilité A pour que l'atome se désexcite, et à l'énergie de la transition $h\nu$.

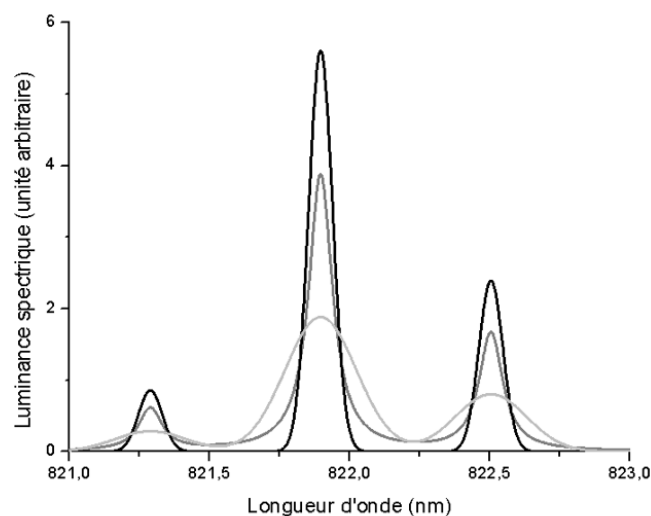


FIGURE 6 – Les trois raies d'émission de l'azote à température d'équilibre de 6000 K enregistrées dans différentes conditions

Si les niveaux d'énergie des atomes et molécules avaient des valeurs infiniment précises, les raies seraient des pics infiniment fins, mais il existe des phénomènes physiques qui contribuent à élargir ces raies : le principe d'incertitude d'Heisenberg, l'effet Doppler, les collisions entre les particules, les champs électrique (effet Stark) et magnétique (effet Zeeman). La mesure elle-même induit une incertitude et les raies mesurées ont en fait l'allure de gaussiennes ou de lorentziennes ou d'une combinaison de ces formes. La figure 6 représente trois raies d'émission de l'azote atomique à une température d'équilibre de 6000 K enregistrée dans différentes conditions.

Les lampes à décharge

Une décharge électrique excite les atomes de mercure, zinc et cadmium présente dans l'ampoule. Ces atomes se dés excitent en émettant un rayonnement spectralement fin dont la longueur d'onde leur est caractéristique.

Exemple : le Tube fluorescent appartient à la famille des lampes à décharge. C'est un tube rempli d'un gaz rare à faible pression et d'un peu de mercure à l'état gazeux. La décharge électrique dans le tube excite les atomes de mercure qui émettent alors un rayonnement dans l'ultraviolet. Ce rayonnement est converti en lumière visible par la poudre fluorescente déposée sur les parois du tube. La couleur de la lumière émise dépend de la nature de la poudre fluorescente utilisée.

La diode électroluminescente

La diode est traversée par un courant qui produit une recombinaison électron-trou au niveau de la jonction et de l'énergie est libérée sous forme de photons. La puissance lumineuse émise est une fonction linéaire de l'intensité du courant qui traverse la diode.

Exemples de rayonnement thermique

La lampe à incandescence

Dans une ampoule sous basse pression, un filament de tungstène est porté à incandescence. L'efficacité lumineuse est d'autant plus grande que la température est élevée, mais l'évaporation du filament augmente avec la température et diminue la durée de vie de l'ampoule.

La lampe halogène

Le principe est le même que pour la lampe à incandescence mais la tension d'alimentation est plus basse. A puissance égale, l'intensité du courant est plus élevée et la température du filament, qui est également plus gros, est plus élevée. La durée de vie est allongée par la combinaison des vapeurs de tungstène avec l'halogène présent dans l'ampoule ; le composé formé se redépote sur le filament en libérant l'halogène. La température du filament étant plus élevée, la lumière émise est plus proche du visible. La lampe peut être associée avec un réflecteur parabolique dichroïque dont le coefficient de réflexion est grand dans le visible et faible dans l'infrarouge. Ce dispositif permet également de contrôler l'ouverture du faisceau lumineux.

4 Références

- CRC Handbook of Chemistry and Physics, 74th Ed. pp.12-32,12-34
- Calibration d'une lampe à ruban de tungstène, C. De Izarra. 7eme Colloque Capteur 2009, Bourges, Mar 2009, BOURGES, France
- Pyrométrie optique, F. CABANNES, Techniques de l'ingénieur R2610 (1990)
- Characterization of an optical fiber bundle sensor, L. Bergognoux, J. Misguich-Ripault, and J-L. Firpo, Review of Scientific Instruments, Vol. 69, 5, 1985-1990 (1998)

- Rédacteurs et contacts :

Laurence Bergognoux (laurence.bergognoux@univ-amu.fr)

Christian Mariani (christian.mariani@univ-amu.fr)

Fabrice Rigollet (fabrice.rigollet@univ-amu.fr)

Mise à jour janvier 2025