

Rayonnement thermique

L'objectif de cette séance de T.P. est d'illustrer divers aspects du transfert de chaleur par rayonnement. On s'intéressera ainsi à la variation du flux radiatif quittant une surface en fonction de sa nature, son état de surface et sa température. On s'intéressera en outre à l'influence d'un écran en verre.

1 Quelques notions

1.1 Généralités

Tout corps à une température absolue $T > 0$ K émet un rayonnement de nature électromagnétique dit rayonnement thermique parce que fonction de T . Cette émission d'onde électromagnétiques est une conversion d'énergie interne du matériau en énergie radiative, l'émission a donc tendance à refroidir le matériau émetteur. Ce rayonnement ne concerne qu'une portion restreinte du spectre électromagnétique (de $0.1 \mu\text{m}$ à $100 \mu\text{m}$) comprenant, par ordre croissant de longueur d'onde, les domaines ultra-violet, visible et infrarouge.

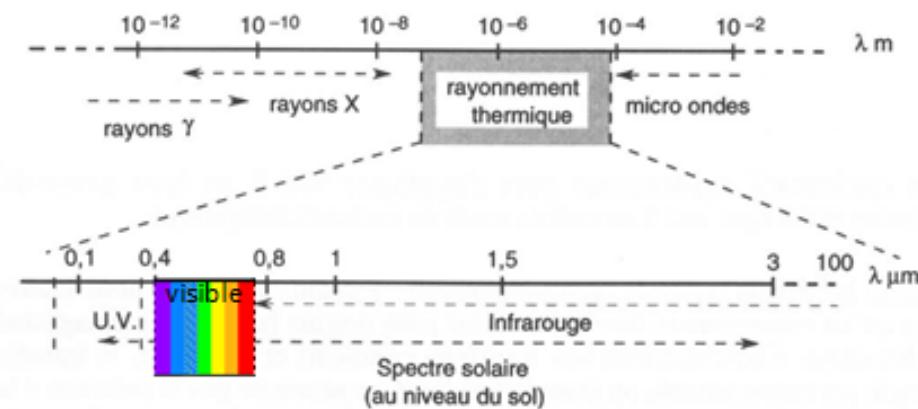


FIGURE 1 – Situation du rayonnement thermique dans le spectre électromagnétique

Contrairement aux autres modes de transferts thermiques (conductif et convectif), le mode radiatif ne nécessite pas de support matériel pour se manifester. Il se propage en outre en ligne droite dans un milieu d'indice optique constant. La taille et la position relative des surfaces émettrices et réceptrices impliquées dans un échange radiatif seront ainsi très importantes pour évaluer la puissance échangée entre ces surfaces par rayonnement.

1.1.1 Le corps noir

La température absolue et la longueur d'onde sont également des grandeurs agissant sur le flux radiatif émis par un corps. Ainsi, Planck a établi l'expression de la puissance M_λ^0 émise par un élément de surface d'un *radiateur idéal* (*le corps noir*), qui, à une température donnée, possède la propriété d'émettre le flux maximum), dans le demi-espace qui lui fait face¹, par unité de longueur d'onde λ et en fonction de la température :

$$M_\lambda^0 (W m^{-2} \mu m^{-1}) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1}, C_1 = 3,741 \cdot 10^8 W m^{-2} \mu m^4 m^{-2}, C_2 = 14\ 388 \mu m K \quad (1)$$

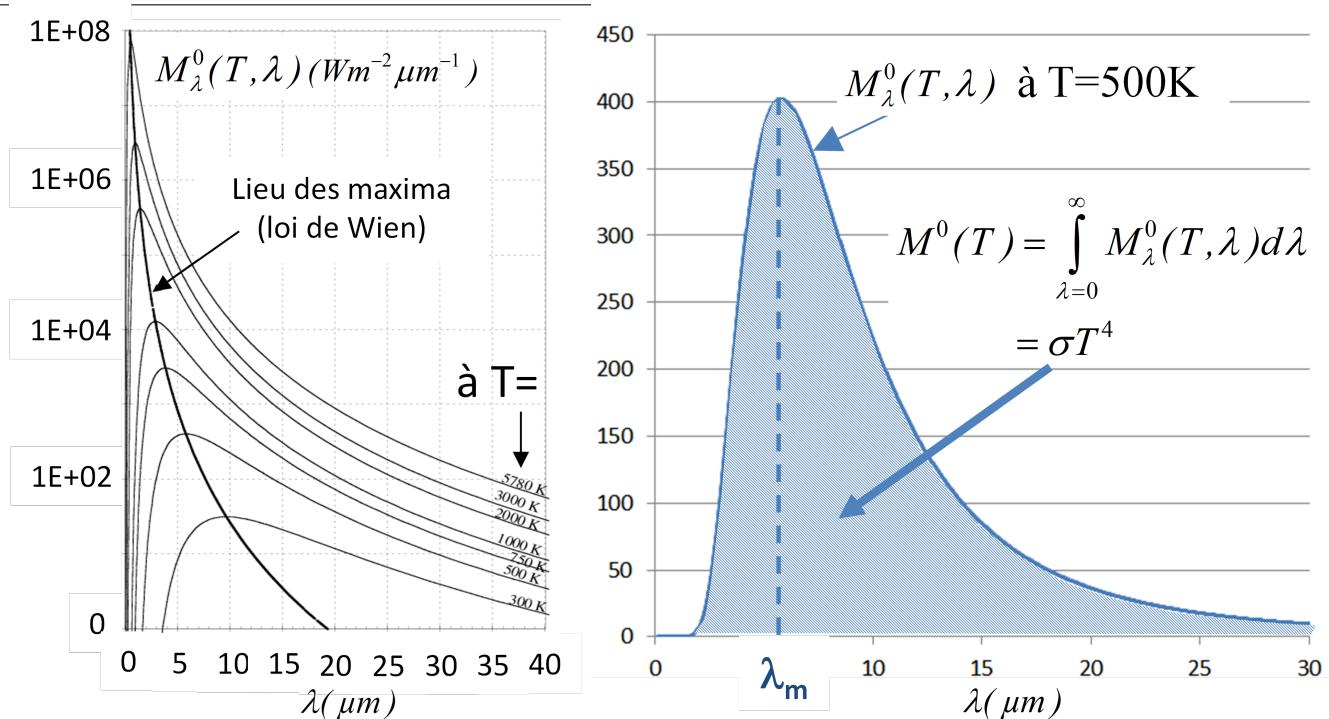


FIGURE 2 – A Gauche : flux hémisphérique émis par le corps noir en fonction de la longueur d'onde pour différentes températures (Loi de Planck). L'axe des ordonnées est en échelle logarithmique pour permettre d'afficher d'une large gamme de valeurs. A droite : obtention de la loi de Stefan-Boltzmann ($M^0(T) = \sigma T^4$ en $W m^{-2}$) par intégration de la loi de Planck sur tout le spectre.

Cette loi est tracée en fonction de la longueur d'onde pour différentes températures sur la figure 2. Ce graphe montre que, pour chaque température, il existe une longueur d'onde λ_m pour laquelle la puissance émise est maximale. Si la température augmente, cette longueur d'onde décroît selon la première loi de Wien (avec λ_m en μm) :

$$\lambda_m T = 2\ 898\ \mu m K \quad (2)$$

On montre en outre que la majeure partie de l'énergie (96%) est émise entre $0,5\lambda_m$ et $5\lambda_m$. Enfin, le flux total² hémisphérique émis par le corps noir à la température T s'obtient en intégrant l'équation (1) de zéro à l'infini pour obtenir la loi de Stefan-Boltzmann (figure 2, à droite) :

$$M^0(T) (W m^{-2}) = \int_{\lambda=0}^{\infty} M_\lambda^0(T, \lambda) d\lambda = \sigma T^4, \text{ avec } \sigma = 5,67 \cdot 10^8 W m^{-2} K^{-4} \quad (3)$$

En pratique l'intégration ‘totale’ (de $\lambda = 0$ à ∞) doit avoir lieu sur l'étendue utile de la fonction de Planck pour donner un résultat proche de σT^4 . Si expérimentalement, ce résultat n'est pas obtenu c'est le signe que cette intégration n'est pas réalisée correctement par le capteur de flux, par exemple parce qu'il n'est pas sensible dans la bonne gamme de longueur d'onde ou parce qu'il ne reçoit pas tout le flux qu'il doit intégrer (filtrage de certaines longueurs d'onde sur le trajet de la ligne de visée, etc...).

1.1.2 Facteur de forme

Soient 2 surfaces S_1 et S_2 (voir figure 3) qui peuvent rayonner l'une vers l'autre. Le facteur de forme $F_{1 \rightarrow 2}$ correspond à la fraction (entre 0 et 1) du flux partant de S_1 qui va atteindre S_2 ³.

1. c'est-à-dire dans un angle solide correspondant à un hémisphère, soit 2π stéradians.
2. c'est-à-dire concernant l'ensemble du spectre.
3. en supposant que ce flux soit rayonné (par émission ou réflexion) de façon diffuse (donc avec la même luminance $L(W/msr)$ dans toutes les directions)

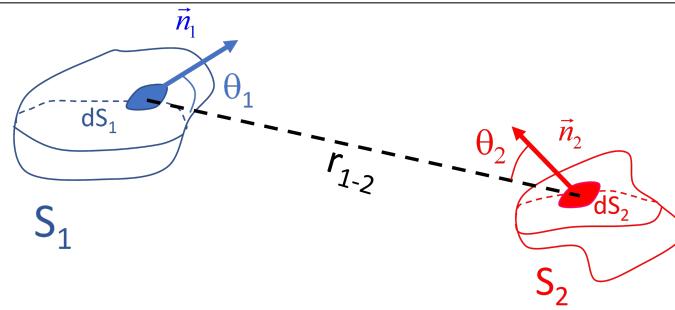


FIGURE 3 – Données géométriques nécessaires au calcul du facteur de forme $F_{1 \rightarrow 2}$ entre S_1 et S_2

C'est une grandeur purement géométrique (voir équation (4)).

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{\text{flux } (W) \text{ partant de } S_1 \text{ vers } S_2}{\text{flux } (W) \text{ partant de } S_1 \text{ partout}} = \frac{1}{S_1} \int_{S_1} \int_{S_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi r_{1-2}^2} dS_1 dS_2 \quad (4)$$

La relation de réciprocité permet d'exprimer un facteur de forme $F_{1 \rightarrow 2}$ quand on connaît son réciproque $F_{2 \rightarrow 1}$ car ils sont liés par : $S_1 F_{1 \rightarrow 2} = S_2 F_{2 \rightarrow 1}$. Dans une enceinte fermée constituée par exemple de $N = 3$ surfaces, on a pour chaque surface S_i ($i=1$ à N) : $F_{i \rightarrow 1} + F_{i \rightarrow 2} + F_{i \rightarrow 3} = 1$ ($F_{ii} \neq 0$ si S_i est concave et peut rayonner vers elle-même (" S_i se voit")).

1.1.3 Source ponctuelle

Soit, au point O, une source ponctuelle isotrope délivrant le flux total (en W) dans tout l'espace (4π stéradians) (voir figure 4).

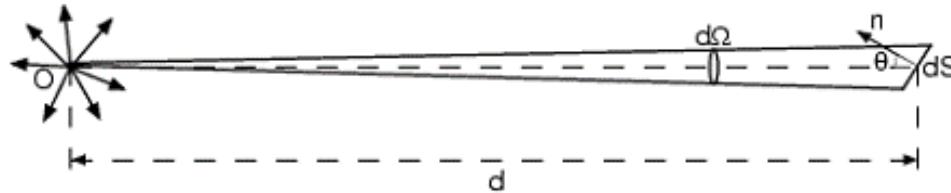


FIGURE 4 – flux reçu par un élément de surface dS venant d'une source ponctuelle en O.

L'intensité totale du flux (en Wsr^{-1}) dans n'importe quelle direction vaut alors :

$$I(Wsr^{-1}) = \frac{\Phi}{4\pi} \quad (5)$$

La puissance totale reçue par un élément de surface dS placé à la distance d de la source et incliné d'un angle θ par rapport à la direction $O - dS$ vaut :

$$d\Phi(W) = Id\Omega = \frac{\Phi}{4\pi} \frac{dS \cos \theta}{d^2} \quad (6)$$

Le facteur de forme entre la source ponctuelle et la surface dS est alors un simple rapport d'angle solide (équation 7).

$$F_{O \rightarrow dS} = \frac{\text{flux } (W) \text{ partant de } O \text{ vers } dS}{\text{flux } (W) \text{ partant de } O \text{ partout}} = \frac{d\Phi}{\Phi} = \frac{d\Omega}{4\pi} = \frac{dS \cos \theta}{d^2} / 4\pi \quad (7)$$

1.2 Propriétés radiatives des matériaux

Les grandeurs monochromatiques⁴ seront indiquées par la longueur d'onde λ . Les grandeurs totales ne seront pas indiquées. Un corps gris est un corps dont les propriétés radiatives sont constantes sur tout le spectre. Sauf indication, toutes les grandeurs évoquées ici sont hémisphériques.

4. c'est-à-dire pour une longueur d'onde λ donnée

1.2.1 En émission

On a vu que le corps noir avait la propriété d'être un émetteur parfait. Le pouvoir émissif de tous les corps sera comparé à cette référence idéale à travers son émissivité ϵ_λ ou ϵ , inférieure à 1. Ainsi, un corps réel à la température T émet le flux monochromatique M_λ et le flux total M tels que

$$M_\lambda(Wm^{-2}\mu m^{-1}) = \epsilon_\lambda M_\lambda^0 \quad \text{et} \quad M(Wm^{-2}) = \epsilon M^0 \quad (8)$$

1.2.2 En réception

Lorsqu'un corps reçoit un rayonnement incident, une fraction α_λ (ou α) est absorbée par le corps, une autre fraction ρ_λ (ou ρ) est réfléchie et une dernière fraction τ_λ (ou τ) est transmise⁵. Ces fractions (absorptivité, reflectivité et transmittivité) sont inférieures à 1 et la conservation de l'énergie impose :

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad \text{et} \quad \alpha + \rho + \tau = 1 \quad (9)$$

Précisons qu'il existe deux types de réflexion possibles d'un flux incident par une surface : la réflexion spéculaire qui obéit aux lois optiques de la réflexion (angle d'incidence = angle de réflexion) et la réflexion diffuse (réflexion dans toutes les directions de l'hémisphère).

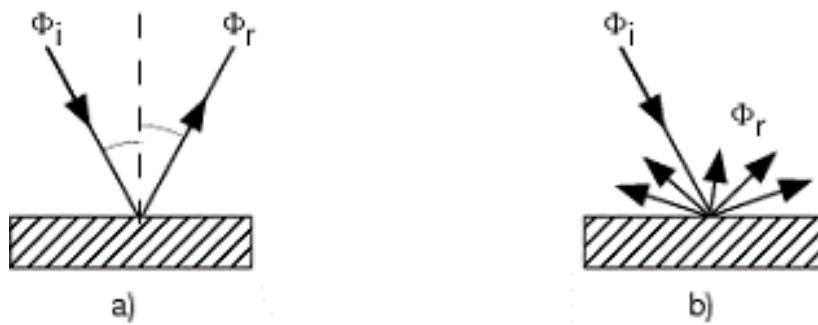


FIGURE 5 – réflexions a) spéculaire et b) diffuse.

1.2.3 Relation émission - absorption : loi de Kirchhoff

Kirchhoff a démontré que, à une température T donnée, pour une longueur d'onde λ et une direction donnée, l'émissivité *monochromatique directionnelle* d'un corps est égale à son absorptivité *monochromatique directionnelle* :

$$\epsilon'_\lambda = \alpha'_\lambda \quad (10)$$

L'extension de cette loi aux grandeurs monochromatiques hémisphériques ($\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda$) est possible uniquement si l'émission et l'éclairage de la surface sont diffus. Et si de plus, le corps est gris en émission et en absorption, on peut écrire la relation (10) en grandeurs totales : $\epsilon = \alpha$. La conséquence pratique de telles relations dans le cas de corps opaques ($\tau_\lambda = \tau = 0$) compte tenu de 9 est, en fonction des hypothèses valides :

$$\epsilon_\lambda = 1 - \rho_\lambda \quad \text{et} \quad \epsilon = 1 - \rho \quad (11)$$

1.2.4 Flux net

On appellera 'flux net' au niveau d'une surface opaque S la différence suivante (en W) :

$$\Phi^{\text{net}} = \Phi^{\text{partant de } S} - \Phi^{\text{incident sur } S} = (\Phi^{\text{émis par } S} + \Phi^{\text{réfléchi par } S}) - (\Phi^{\text{absorbé par } S} + \Phi^{\text{réfléchi par } S}) \quad (12)$$

5. précisons qu'il existe en fait 4 facteurs d'émissivité, d'absorptivité et de transmittivité et 8 facteurs de reflectivité lorsque l'on prend en compte les aspects monochromatique ou total, hémisphérique ou directionnel (avec en plus, pour la réflexion, la direction d'incidence et la direction de réflexion).

$$\Phi^{\text{net}} = \Phi^{\text{émis par S}} - \Phi^{\text{absorbé par S}} \quad (13)$$

On parle de *flux radiatif perdu* par S puisque ce flux est compté positivement s'il est *perdu* par S (c'est-à-dire si S émet plus qu'elle n'absorbe).

2 Matériel

2.1 Sources radiatives

2.1.1 Basse température : cube multi-faces

Ce cube présente 4 faces latérales en aluminium chauffées par une ampoule à incandescence de 100 W placée au centre (Figure 6). La température de chacune des faces peut raisonnablement être supposée égale et uniforme. Elle est réglée en agissant sur la puissance délivrée par la lampe intérieure et est mesurée par un thermistor placé dans un coin inférieur du cube. (La courbe donnant l'évolution de la résistance du thermistor en fonction de sa température est fournie). Les 4 faces présentent un état de surface différent : peinture noire mate, peinture blanche mate, aluminium non poli, aluminium poli. Attention les faces peuvent atteindre au maximum 130 °C.

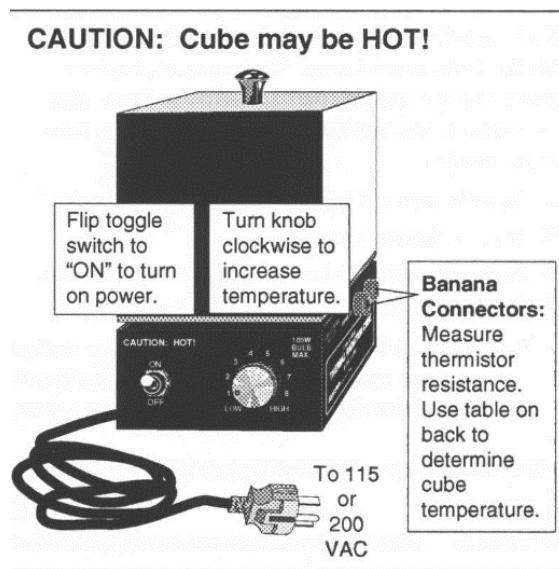


FIGURE 6 – Schéma du cube multi-faces aux quatre faces latérales différentes chauffées par une ampoule centrale.

2.1.2 Haute température : lampe à filament de tungstène

Elle est alimentée par une tension continue réglable jusqu'à 24 V au maximum pour une puissance maximale de l'ordre de 20W. La température T du filament est déterminée en mesurant précisément la tension à ses bornes et le courant qui le traverse pour en déduire sa résistance R . La formule permettant de calculer T est alors donnée par l'équation (14) avec R_a la résistance du filament à la température ambiante T_a :

$$T = -0,053(\rho_a R / R_a)^2 + 36,1(\rho_a R / R_a) + 125 \quad \text{avec} \quad \rho_a = 5,65 \mu\Omega \text{cm} \quad (14)$$

2.2 DéTECTEUR de rayonnement thermique

Le détecteur utilisé, une thermopile, est de la famille des détecteurs thermiques : il est basé sur la mesure de la variation de température de la face avant S_{capteur} d'une fine feuille métallique noircie soumise à des variations de son flux radiatif net $\Phi_{\text{capteur}}^{\text{net}}$ en face avant. Cet élément sensible est

instrumenté de plusieurs jonctions thermoélectriques en série, les jonctions *chaudes* étant placées en face avant et les jonctions de références étant maintenues à température ambiante en face arrière.

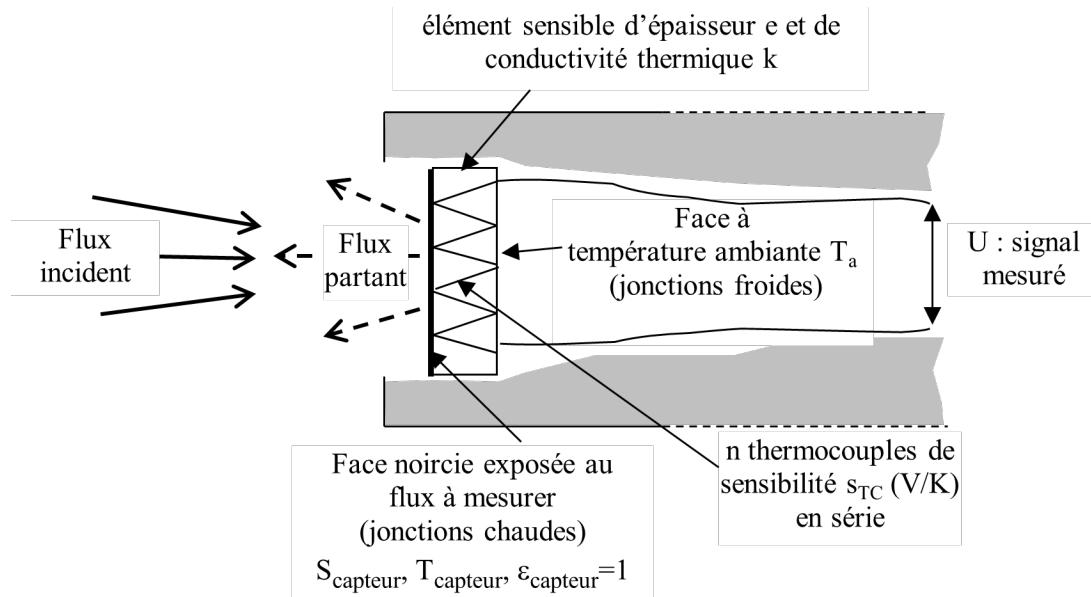


FIGURE 7 – Fonctionnement schématique de la thermopile. La température en face avant T_{capteur} reste de l'ordre de T_a fixe en face arrière car l'élément sensible est une fine feuille de métal noirce (faible résistance thermique donc le ΔT à ses bornes est faible mais mesurable grâce aux nombreux thermocouples en série).

La série de thermocouple ainsi construite délivre une variation de tension proportionnelle à la différence entre le flux incident sur la face avant et le flux partant de cette même face :

$$U(V) = s[\Phi_{\text{capteur}}^{\text{incident}} - \Phi_{\text{capteur}}^{\text{partant}}] = -s\Phi_{\text{capteur}}^{\text{net}} = s[\Phi_{\text{capteur}}^{\text{absorbé}} - \Phi_{\text{capteur}}^{\text{émis}}] = U(V) \quad (15)$$

Le flux émis par le capteur noir $\Phi_{\text{capteur}}^{\text{émis}}$ est constant si la température de la face avant T_{capteur} s'élève peu et reste donc voisine de l'ambiante T_a , ce que l'on admettra. Cette condition implique que l'**exposition de la thermopile aux rayonnements thermiques à mesurer doit être courte (3 secondes maximum)** pour éviter le chauffage parasite des jonctions de référence et la dérive de la mesure. Le flux absorbé par le capteur $\Phi_{\text{capteur}}^{\text{absorbé}}$ dépendra de l'objet présenté face au capteur, notamment du facteur de forme $F_{\text{capteur} \rightarrow \text{objet}}$, de T_{objet} , ϵ_{objet} etc. Ce type de détecteur, basé sur la mesure d'un phénomène thermique, a l'inconvénient d'être relativement lent (temps de réponse de l'ordre de la seconde) mais possède une réponse plate sur une large plage spectrale : entre 0.6 μm et 30 μm. Sa sensibilité est de $s = 22mV/mW$ et sa réponse est linéaire entre 10^{-6} et $10^{-1} W/cm^2$ de flux incident.

Précautions

- Danger** : NE JAMAIS METTRE SES DOIGTS SUR LES FACES VERTICALES DU CUBE : risques de brûlures avec le Cube multi-faces (ses surfaces peuvent atteindre 130 °C). De plus, même froid, les traces de doigt modifient les propriétés radiatives des surfaces. Toujours manipuler le cube par sa base.
- Attention** : le filament de la lampe est détruite pour une tension à ses bornes supérieure à 25V ou une puissance supérieure à 25 W. Ne dépasser en aucun cas ces valeurs critiques.
- Attention** : ne jamais exposer plus de trois secondes la thermopile au flux à mesurer.

3 Travail de préparation

Voir le travail de préparation demandé sur AMETICE

4 Expériences

4.1 Approche qualitative

L'objectif est ici de se familiariser avec la notion d'émetteur et de récepteur de rayonnement ainsi que de dégager qualitativement des tendances de comportement de différentes surfaces.

4.1.1 Sensibilisation au pouvoir émissif d'une surface

Chauder un seul cube jusqu'à l'équilibre thermique en allumant son ampoule centrale à sa puissance maximale. Chaque face est un émetteur de rayonnement à température T supérieure à T_a placé dans un environnement à T_a . Utiliser la main en guise de récepteur (sans jamais toucher le cube!) successivement devant chaque face et classer alors celles-ci en fonction des impressions ressenties. En prenant comme référence les sensations éprouvées lorsque le cube est à T_a , en déduire un classement du « pouvoir émissif » des différentes surfaces.

4.1.2 Prise en main de la thermopile

Vérifier le fonctionnement de la thermopile en testant notamment le signe de la tension qu'elle délivre lorsqu'on lui présente une surface à $T < T_a$ (viser une surface intérieure du frigo présent en salle 112), $T = T_a$ (dans la pièce) et $T > T_a$ (votre main à 33°C en surface). Comparer le fonctionnement de la thermopile et le signe de la tension qu'elle délivre au fonctionnement de la main et aux sensations éprouvées dans la partie précédente.

4.1.3 Analyse des surfaces en réception

Disposer la thermopile face à une face d'un cube à T_a . Puis « éclairer » cette face avec un flux issu de la face noire d'un autre cube à T de l'ordre de 50°C (ou même de vos mains), en prenant soin de ne pas éclairer directement la surface sensible de la thermopile. Déduire des différents signaux un classement des surfaces en termes de « pouvoir réfléchissant ». En comparant ce classement à celui des « pouvoirs émissifs », indiquer quelle loi du rayonnement thermique vous venez de constater expérimentalement. Exprimer de façon générale les composantes du flux partant d'une surface à température T placée dans un environnement à T_a .

4.2 Approche quantitative

4.2.1 Influence de la nature de la surface et de sa température (à basse température)

Il s'agit ici d'appréhender le rôle de la nature de la surface rayonnante sur la puissance du flux radiatif qui la quitte à une température donnée. Le but est ici de démontrer expérimentalement la validité de la loi de Stefan-Boltzmann pour le corps noir (équation (3)) et sa modification pour un corps réel (équation (8)). On utilise pour cela le cube multi-facese dont les quatre faces sont à la même température à l'équilibre thermique. L'expérience consiste à placer le cube à différents niveaux (une dizaine) de température (T_{cube} de l'ambiance à la température max) et à relever le signal délivré par la thermopile placée successivement devant chaque face (visée à incidence normale), toujours à la même distance (le support de la thermopile venant en butée avec la base du cube, voir la figure 8 gauche).

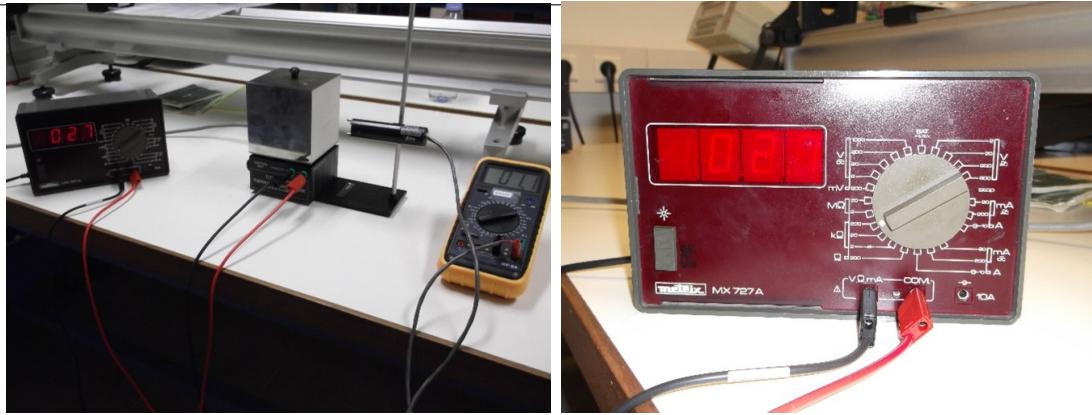


FIGURE 8 – Gauche : mesure par la thermopile face au cube multi-faces. Droite : calibre de l'ohmètre mesurant la thermistance incluse dans le cube.

Précautions, consignes

1. **Attention** : ne laisser la thermopile que 2 ou 3 secondes devant chaque face pour ne pas la surchauffer. Entre 2 sessions de mesure, exposer la thermopile à une surface à température ambiante.
2. **Consigne** : Suivre le protocole présent en séance de TP pour le pilotage de la température du cube (potentiomètre en position maximum, switch sur 'on' pour faire chauffer le cube, 'off' pour le laisser atteindre un équilibre à un niveau choisi. Viser des paliers de température séparés de 20° environ).
3. **Consigne** : Devant la face noire, une cinquième mesure sera effectuée en intercalant une lame de verre entre la thermopile et la face noire.

Détailler théoriquement chaque composante du signal U de la thermopile donné par l'équation 15. Pour cela, on suppose que le capteur est suffisamment proche du cube pour qu'il ne voit que le cube $F_{capteur \rightarrow cube} = 1$.

1. Exprimer le flux (en W) $\Phi_{capteur}^{\text{émis}}$ émis par $S_{capteur}$.
2. Exprimer le flux (en W) $\Phi_{capteur}^{\text{absorbé}}$ absorbé par $S_{capteur}$. Attention, il s'agit du flux partant de S_{cube} vers $S_{capteur}$ qui comporte plusieurs composantes (S_{cube} est à température T_{cube} , a une émissivité ϵ_{cube} et fait face à un environnement noir à T_a !). Faire apparaître le facteur de forme $F_{capteur \rightarrow cube}$.
3. Déduire des expressions précédentes que, dans cette situation, le signal de la thermopile peut se mettre sous la forme :

$$U(V) = K\sigma[T_{cube}^4 - T_a^4] \quad (16)$$

Indiquer les différents termes de la constante K .

Tracer un graphe donnant le signal $U(V)$ obtenu pour chaque face en fonction de $\sigma[T^4 - T_a^4]$ (quelle unité ?). Quelle est l'allure attendue pour chaque courbe d'après la théorie déroulée précédemment ? Tracer les courbes de tendances adéquates et donner leurs équations. En déduire les émissivités des faces blanche, métallique rugueuse et métallique lisse sachant que l'émissivité de la face noire vaut $\epsilon_{noire} = 0,94$. Est ce que le classement des émissivités obtenu est conforme au classement obtenu dans la partie qualitative 4.1.1 ?

Compléter qualitativement les graphes de réflectivités monochromatiques de la figure 9, c'est-à-dire indiquer si chaque peinture est fortement ou faiblement réfléchissante dans le visible et dans

l'infrarouge, en précisant bien :

1. sur lesquelles de vos observations (avec vos yeux...) et/ou mesures (avec vos expériences) et/ou lois théoriques (évoquées dans la partie qualitative 4.1) vous vous appuyez.
2. à quelles longueurs d'onde correspondent les gammes du 'visible' et de 'l'infrarouge' sur lesquelles vous vous prononcez. Pour l'infrarouge, considérez les longueurs d'ondes émises par le cube à sa température maximale obtenue pendant votre expérience.

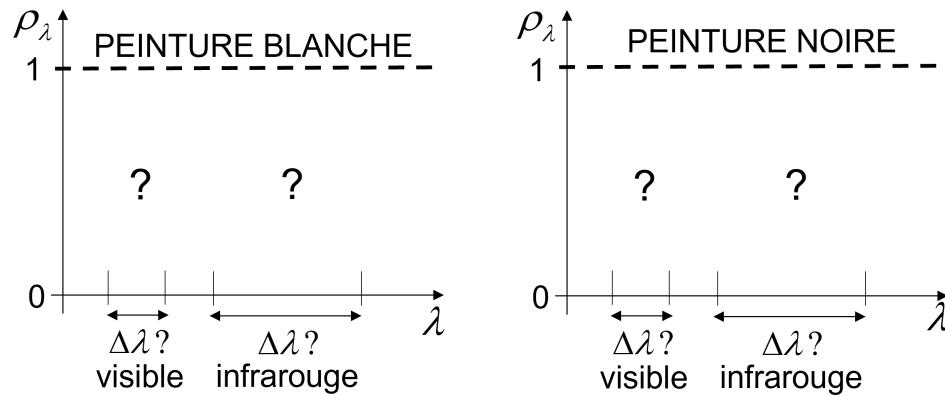


FIGURE 9 – Réflectivité monochromatique des peintures noire (gauche) et blanche (droite) : compléter tous les points d'interrogation.

En quoi les peintures noire et blanche se ressemblent ou se différencient ? Finalement, après votre analyse comparative des peintures noire et blanche : peut-on savoir en regardant la couleur d'une peinture si elle sera réfléchissante ou pas dans l'infrarouge ?

4.2.2 Transmission du rayonnement

On cherche ici à étudier le comportement en transmission d'une lame de verre vis-à-vis des différentes longueurs d'onde que peut couvrir le rayonnement thermique. Quels sont les résultats des mesures dans l'expérience précédente en intercalant la lame de verre entre la surface noire et le détecteur ? Qu'en déduisez-vous sur la transmittivité du verre aux longueurs d'onde concernées (rappeler lesquelles). De plus, comment se comporte le verre pour les longueurs d'onde visible ? Compléter alors le graphe de la figure 10.

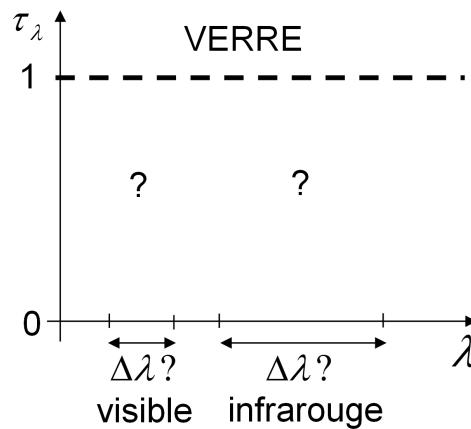


FIGURE 10 – Transmittivité monochromatique de la lame de verre : compléter tous les points d'interrogation.

Application : fonctionnement de l'effet de serre. Dans une voiture exposée au soleil, pourquoi le tableau de bord (supposé noir dans toutes les longueurs d'onde) derrière le pare-brise en verre sera

plus chaud que s'il n'y avait pas de pare-brise ? Aidez-vous d'un schéma détaillant les différents flux mis en jeu.

4.2.3 Influence de la température de la source (à haute température)

La source radiative est ici la lampe à filament de tungstène incandescent à une température variable, donnée par l'équation (14). Avant d'allumer la lampe, mesurer la température ambiante T_a et la résistance R_a du filament, avec un montage 4 fils présenté sur la photo de gauche de la figure 11.

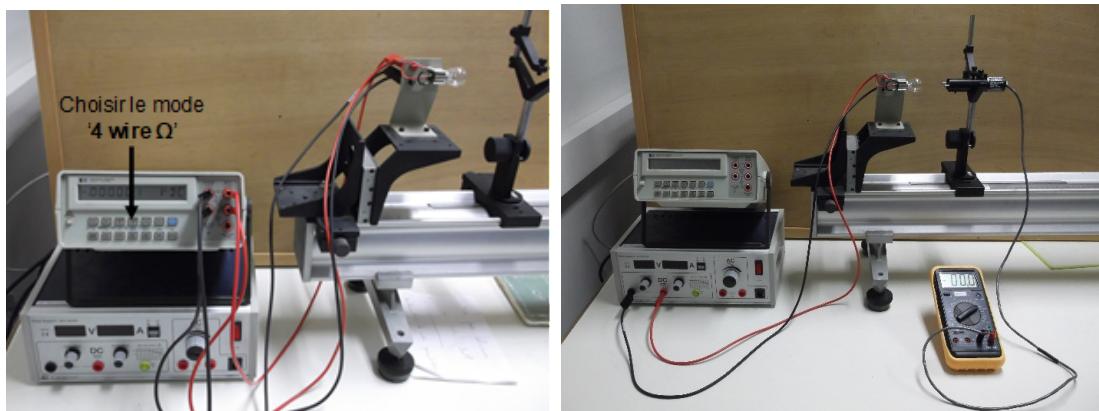


FIGURE 11 – Gauche : montage 4 fils pour mesurer la résistance du filament de tungstène à l'ambiante. Droite : alimentation de la lampe et mesure par la thermopile

Puis débrancher ce montage et brancher l'ampoule sur l'alimentation continue qui affiche le courant et la tension (photo de droite sur la figure 11). Faire varier la température du filament (bloquer le bouton du courant en position centrale et modifier la tension de volt en volt, jusqu'à 25V) et relever le signal délivré par la thermopile placée à 6 cm du filament. A chaque température de filament, réaliser deux mesures : une sans vitre entre l'ampoule et la thermopile et une avec vitre.

Précaution

Attention : placer un écran opaque entre la thermopile et l'ampoule entre deux mesures, pendant le réglage de la tension aux bornes du filament (pour ne pas surchauffer le capteur), voir figure 12.

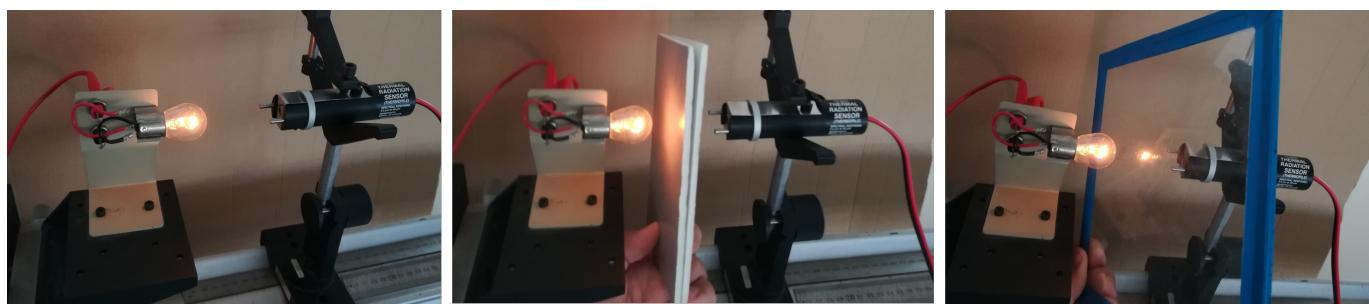


FIGURE 12 – Gauche : mesure normale. Centre : Protection de la thermopile entre 2 mesures. Droite : mesure avec vitre intercalée

Cette fois la thermopile (capteur noir à T'_a) reçoit le flux partant de l'objet (filament de température T_{fil} et d'émissivité ϵ_{fil} mais aussi de l'environnement (surface noire à T_a). Comme le capteur ne voit pas seulement le filament, le facteur de forme $F_{capteur \rightarrow fil}$ est inférieur à 1, mais pas connu précisément. On admet que le signal U de la thermopile s'écrit alors selon l'équation (17).

$$U(V) = sS_{capteur}F_{capteur \rightarrow fil}\sigma[T_{fil}^4 - T_a^4] \quad (17)$$

En admettant que $T_{fil}^4 \gg T_a^4$ (vous pourrez le vérifier), le signal doit donc être maintenant proportionnel à T_{fil}^4 si la loi de Stefan Boltzmann est vérifiée. Pour le vérifier, tracer vos points U en fonction de la température de la source en T_{fil} en K (et non pas en fonction de $\log(T_{fil})$!), sur un graphe **en échelles Log-Log** et vérifier qu'il suivent une pente 4 (voir le graphe attendu sur la figure 13).

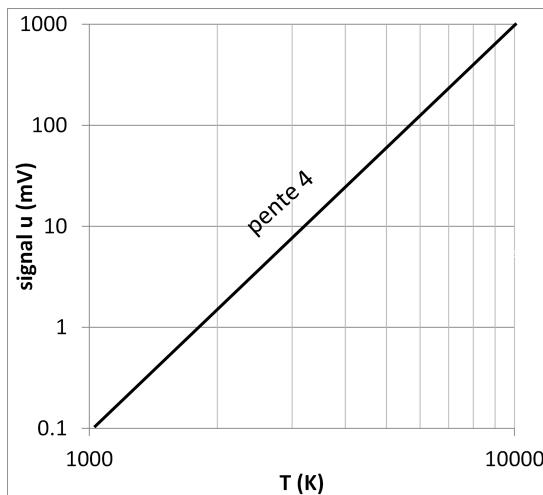


FIGURE 13 – Placer vos points U (signal thermopile) en fonction de T (du filament) sur ce graphe Log-Log avec ces échelles. On rappelle que pour tracer une pente 4 en graphe log-log, il faut avancer en abscisse d'une décade et monter en ordonnée de 4 décades. C'est donc la première bissectrice ici, tracée 'à main levée' avec l'outil 'ligne droite' dans le menu 'Insertion/Formes'

Attention

1. Ne pas chercher une courbe de tendance qui passerait au mieux par tous les points expérimentaux et qui aurait une pente 'proche de 4', ce raisonnement est FAUX et sera pénalisé !
2. Chercher plutôt lesquels de vos points expérimentaux suivent une pente rigoureusement égale à 4 (explicables par la loi de Stefan-Boltzmann) et ceux qui ne la suivent pas, et pour lesquels il faut trouver une explication.

Question : Vos points suivent-ils une allure analogue à la loi de Stefan-Boltzmann sur toute la gamme de température ? Sinon, quel phénomène peut expliquer l'écart observé ?

Piste

La loi de Stefan-Boltzmann vient d'une intégration sur toutes les longueurs d'ondes (formule (3) et Figure 2). Il semble donc que pour certaines températures du filament, la thermopile ne reçoive pas toutes les longueurs d'onde, empêchant ainsi l'intégration totale...