

## TDT2 – Transferts thermiques

### 0 Exercices classiques vus en cours :

- II.B.1 : Bilan de puissance volumique (géométries cartésienne, cylindrique et sphérique)
- II.B.2.a : Démonstration de l'équation de la diffusion thermique (géométries cart., cyl. et sph.)
- II.B.2.b : Lien entre les échelles caractéristiques  $\tau$  et  $L$
- II.C.2.b : Résolution de l'équation de Laplace – Résistance thermique (géométrie cart.)
- II.E.1 : Etablir le schéma numérique explicite relatif à l'équation de la diffusion thermique
- III.A.4 : Exploitation des lois de Wien et de Stefan
- III.B : Application à l'effet de serre

Capacités exigibles	Ch T2	Ex 1	Ex 2	Ex 3	Ex 4	Ex 5-6	Ex 7	Ex 8	Ex 9	Ex 10-12	Ex 13
<b>Conduction, convection et rayonnement.</b> Reconnaître un mode de transfert thermique. <i>Mettre en œuvre un dispositif expérimental utilisant une caméra thermique ou un capteur dans le domaine des infrarouges.</i>	•										
<b>Flux thermique. Vecteur densité de flux thermique.</b> Calculer un flux thermique à travers une surface orientée et interpréter son signe.	•	•	•		•	•		•			
<b>Premier principe de la thermodynamique.</b> Effectuer un bilan local d'énergie interne pour un solide dans le cas d'une situation à une variable d'espace en géométrie cartésienne, cylindrique ou sphérique.	•		•		•	•	•	•	•		
<b>Loi de Fourier.</b> Interpréter et utiliser la loi de Fourier. Citer quelques ordres de grandeur de conductivité thermique dans les conditions usuelles : air, eau, verre, acier. <i>Mesurer la conductivité thermique d'un matériau.</i>	•		•		•	•		•			
<b>Équation de la diffusion thermique.</b> Établir l'équation de la diffusion thermique sans terme de source au sein d'un solide dans le cas d'une situation à une variable d'espace en géométrie cartésienne, cylindrique ou sphérique. Utiliser une généralisation de l'équation de la diffusion en présence d'un terme de source. Utiliser une généralisation en géométrie quelconque en utilisant l'opérateur Laplacien et son expression fournie. Analyser une équation de diffusion thermique en ordre de grandeur pour relier des échelles caractéristiques spatiale et temporelle. Capacité numérique : à l'aide d'un langage de programmation, résoudre l'équation de la diffusion thermique à une dimension par une méthode des différences finies dérivée de la méthode d'Euler explicite de résolution des équations différentielles ordinaires.	•			•			•	•			
<b>Régime stationnaire. Résistance thermique.</b> Définir la notion de résistance thermique par analogie avec l'électrocinétique. Déterminer l'expression de la résistance thermique d'un solide dans le cas d'un problème unidimensionnel en géométrie cartésienne. Exploiter les lois d'association de résistances thermiques.	•	•	•						•		
<b>Coefficient de transfert thermique de surface ; loi de Newton.</b> Utiliser la loi de Newton comme condition aux limites à une interface solide-fluide.	•				•						•
<b>Approche descriptive du rayonnement thermique dans le cas d'un corps noir. Loi de Wien. Loi de Stefan. Effet de serre.</b> Exploiter les expressions fournies des lois de Wien et de Stefan. Analyser quantitativement l'effet de serre en s'appuyant sur un bilan énergétique sur un modèle à une couche.	•									•	•

**Données pour l'ensemble des exercices :**

Coordonnées cylindriques

$$\overrightarrow{\text{grad}}f = \left(\frac{\partial f}{\partial r}\right)_{\theta,z} \cdot \vec{u}_r + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial f}{\partial \theta}\right)_{r,z} \cdot \vec{u}_\theta + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)_{r,\theta} \cdot \vec{u}_z$$

$$\text{div } \vec{a}(M) = \frac{1}{r} \frac{\partial(r a_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial a_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial a_z}{\partial z}$$

$$\Delta f = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

Coordonnées sphériques

$$\overrightarrow{\text{grad}}f = \left(\frac{\partial f}{\partial r}\right)_{\theta,\varphi} \cdot \vec{u}_r + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial f}{\partial \theta}\right)_{r,\varphi} \cdot \vec{u}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \left(\frac{\partial f}{\partial \varphi}\right)_{r,\theta} \cdot \vec{u}_\varphi$$

$$\text{div } \vec{a}(M) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 a_r)}{\partial r} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial(\sin(\theta) a_\theta)}{\partial \theta} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial a_\varphi}{\partial \varphi}$$

$$\Delta f = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \cdot \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial f}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2}$$

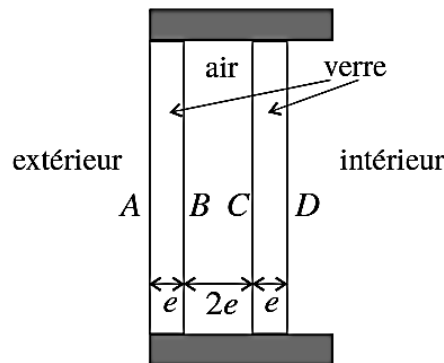
◆ **Loi de Wien** pour un corps noir à la température  $T$  :  $\lambda_{\max} \cdot T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$

◆ **Loi de Stefan** pour un corps noir à la température  $T$  :  $\varphi^e = \sigma \cdot T^4$  avec  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

**1 Double vitrage**

1. Une fenêtre simple vitrage est constituée d'une plaque de verre de surface  $S$  et d'épaisseur  $e$ . La conductivité thermique du verre est  $\lambda_v = 1,0 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Les pertes dues au cadre de la fenêtre sont négligées.

Exprimer la puissance thermique perdue à travers la fenêtre,  $P_f$ , en fonction de  $\lambda_v$ ,  $e$ ,  $S$ ,  $T_i$  température à l'intérieur de la maison et  $T_e$  température à l'extérieur.



2. Une fenêtre double vitrage est composée de deux vitres identiques d'épaisseur  $e$  et de surface  $S$ , séparées par une épaisseur  $2e$  d'air (voir figure). La conductivité thermique de l'air est  $\lambda_a = 2,0 \times 10^{-2} \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

On appelle  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$  les quatre surfaces indiquées sur la figure. Les températures des surfaces  $A$  et  $D$  sont  $T(A) = T_e$  et  $T(D) = T_i$ .

- Exprimer les résistances thermiques  $R_{\text{th},AB}$ ,  $R_{\text{th},BC}$  et  $R_{\text{th},CD}$  en fonction de  $e$ ,  $\lambda_v$ ,  $\lambda_a$  et  $S$ .
- Exprimer la résistance thermique totale  $R_{\text{th},AD}$ .
- Montrer que la puissance thermique perdue à travers la fenêtre double vitrage  $P'_f$  est telle que  $\frac{P'_f}{P_f} \simeq \frac{\lambda_a}{2\lambda_v}$ . Conclure.
- Représenter le schéma électrocinétique équivalent à la fenêtre double vitrage.
- En déduire l'expression de  $T_B - T_C$  en fonction de  $T_i - T_e$  et des résistances thermiques, puis en fonction de  $T_i - T_e$ ,  $\lambda_v$  et  $\lambda_a$ . Faire l'application numérique et conclure.

## 2 Isolation thermique d'un ballon d'eau chaude → Résistance thermique en cylindriques

Le ballon est modélisé par un cylindre creux en acier d'épaisseur  $e = 30 \text{ mm}$ , de hauteur  $h = 157 \text{ cm}$  et de rayon  $l = 57 \text{ cm}$  dont les parois planes sont parfaitement calorifugées.

1) Montrer que le flux thermique sortant d'un cylindre de rayon  $r$  ( $l < r < l + e$ ) ne dépend pas de  $r$  en régime stationnaire.

2) Par une analogie à préciser, en déduire la résistance thermique du ballon. La calculer numériquement.

On décide d'isoler le dispositif. Une première solution consiste à utiliser de la laine de verre d'épaisseur  $e' = 300 \text{ mm}$ . Une autre possibilité est de choisir du polyester d'épaisseur  $e'' = 50 \text{ mm}$ .

3) Calculer la nouvelle résistance thermique.

4) Quel est le meilleur choix ?

**Données** : conductivités thermiques

Acier :  $\lambda = 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ; Laine de verre :  $\lambda' = 0,035 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ;

Polyester :  $\lambda'' = 0,022 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

## 3 Cuisson d'un œuf d'autruche (Type « résolution de problème »)

☞ Estimer la durée nécessaire pour faire cuire à la coque un œuf d'autruche.

**Donnée** : Un œuf de poule a une masse environ 25 fois inférieure à celle d'un œuf d'autruche.

## 4 Ailette de refroidissement → Prise en compte de transferts thermiques (convectifs) latéraux.

Pour améliorer le refroidissement de circuits électroniques ou de moteurs, on y ajoute des ailettes de refroidissement en nombre et forme variés afin d'évacuer de la chaleur vers l'air ambiant par transfert conducto-convectif.

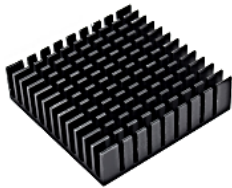


Figure 4 – Ailettes de refroidissement d'un processeur.

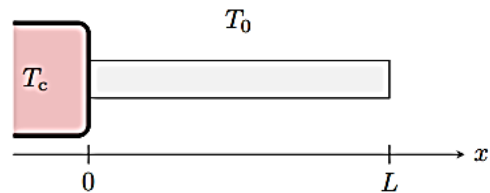


Figure 5 – Schéma de l'ailette étudiée.

On étudie ici une ailette parallélépipédique, de longueur  $L$  dans la direction  $x$  et de côtés  $a$  et  $b$  dans les directions  $y$  et  $z$ , faite d'un matériau de conductivité thermique  $\lambda$ . Cette ailette est accolée au composant à refroidir, de température  $T_c$ , et placée dans l'air de température supposée uniforme  $T_0$ . Les échanges entre l'ailette et l'air sont modélisés par la loi de Newton : le flux  $d\varphi$  cédé à l'air par un élément de surface  $dS$  de l'ailette situé à l'abscisse  $x$  s'écrit

$$d\varphi(x) = h(T(x) - T_0) dS.$$

**Hypothèses de travail :**

- ▷ le régime est stationnaire ;
- ▷ la température est uniforme sur une section donnée de l'ailette ;
- ▷ l'ailette est en contact thermique parfait avec le matériau à refroidir ;
- ▷ la longueur de l'ailette est assimilée à une longueur infinie.

1 - Montrer que la température vérifie l'équation différentielle

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{1}{\delta^2}T = -\frac{1}{\delta^2}T_0,$$

avec  $\delta$  à exprimer en fonction des données. Préciser ce que signifie l'hypothèse d'ailette infinie.

2 - Résoudre cette équation différentielle.

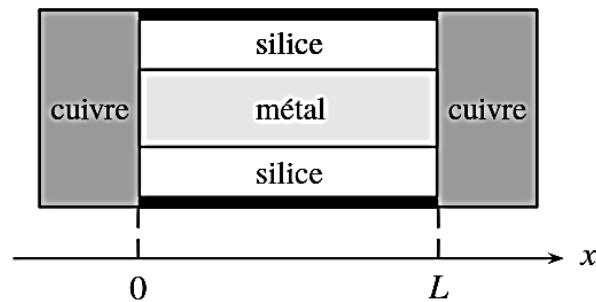
3 - Calculer la puissance thermique totale dissipée par l'ailette.

4 - On observe sur la figure 4 plusieurs ailettes montées les unes à côté des autres. Quel en est l'intérêt par rapport à une seule ailette de plus grandes dimensions ? On pourra comparer la puissance dissipée par  $N^2$  ailettes de dimensions latérales  $a \times b$  à celui d'une unique ailette plus grande, de dimensions  $Na \times Nb$ .

## 5 Fusible (d'après Physique – Modélisation E3A PSI 2017)

→ Prise en compte d'un terme source (effet Joule)

Un fusible en céramique est constitué d'un fil métallique cylindrique de section  $S$ , de longueur  $L$  et de conductivités thermique  $\lambda$  et électrique  $\gamma$ . On considère que toutes ces grandeurs sont uniformes dans le fil métallique et indépendantes de la température. Le fil métallique est soudé à ses deux extrémités sur des plots de cuivre massif que l'on considère conducteur électrique et thermique parfait. Le cuivre est maintenu à une température constante  $T_0$ . Il s'agit de la température de l'air extérieur au fusible. Le fil métallique est inséré dans une gaine en silice assurant une isolation latérale thermique et électrique parfaite. Le fil métallique est parcouru par un courant d'intensité  $I$ .



1. Montrer que l'équation aux dérivées partielles vérifiée par la température peut s'écrire sous

$$\text{la forme : } \mu c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{I^2}{\gamma S^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}.$$

2. Établir le profil de température dans le fil métallique en régime stationnaire. Tracer l'allure de ce profil.

3. La température de fusion du métal est notée  $T_F$ . Donner la position du fil métallique où débute la fusion du métal lorsque le courant atteint l'intensité maximale supportée par le fusible. Déterminer l'expression littérale de l'aire  $S$  à prévoir. Faire l'application numérique avec :  $\lambda = 65 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $\gamma = 1,2 \times 10^6 \text{ SI}$ ;  $T_0 = 290 \text{ K}$ ;  $L = 2,5 \text{ cm}$ ;  $T_F = 390 \text{ K}$ ;  $I_{\max} = 16 \text{ A}$ .

4. Exprimer le flux thermique  $\Phi(0)$  à travers la section en  $x = 0$  en fonction de la résistance électrique du fil,  $R = \frac{L}{\gamma S}$ , et  $I$ . Préciser si ce flux est reçu ou fourni par le fil. Commenter.

## 6 Croûte continentale

→ Prise en compte d'un terme source (désintégration nucléaire)

La croûte continentale terrestre a une épaisseur  $l$  d'environ 35 km; elle est équivalente à une couche homogène de conductivité  $\lambda = 23 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Au niveau du sol, la température est  $T_2 = 273 \text{ K}$ , et à la profondeur  $l$ , elle vaut  $T_1 = 873 \text{ K}$ .

0. Justifier que pour l'étude on peut négliger la courbure de la Terre. On travaillera alors en coordonnées cartésiennes avec (Ox) l'axe normal à la croûte terrestre.

1. Calculer la puissance géothermique par unité de surface  $J_{th}$  issue de la croûte continentale.

2. Les éléments radioactifs de la croûte dissipent une puissance volumique  $\sigma_u = 3 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ . Déterminer l'équation différentielle satisfaite par la température de la croûte.

3. En déduire la puissance géothermique par unité de surface,  $J'_{th}$ , au niveau du sol, quand on tient compte des éléments radioactifs. Conclure.

## 7 Effet de cave – Onde thermique sinusoïdale (exercice proche de CCINP MP 2014)

L'atmosphère occupe le demi-espace  $x < 0$  et le sol le demi-espace  $x > 0$ . On négligera la présence de matériaux radioactifs dans le sol.

La température au niveau du sol est  $T(0, t) = T_0 + a \cdot \cos(\omega t)$ . On utilisera la notation complexe :

$$\underline{T}(0, t) = T_0 + a \cdot \exp(j\omega t)$$

Pour le sol, on note la masse volumique  $\mu = 3,0 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , la capacité thermique massique  $c = 515 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  et la conductivité thermique  $\lambda = 1,2 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ .

$$\text{On pose } \delta = \sqrt{\frac{2\lambda}{\mu c \omega}}$$

1. On cherche une solution de la forme  $\underline{T}(x, t) = T_0 + \underline{f}(x) \exp(j\omega t)$ . Déterminer  $\underline{f}(x)$  et en déduire  $T(x, t)$ .
2. Calculer les variations de température à une profondeur de 50 cm pour une amplitude de variation journalière de la température  $T(0)$  de  $15^\circ\text{C}$  autour d'une température moyenne de  $3^\circ\text{C}$  en hiver.

## 8 Igloo (Type « résolution de problème »)

Un explorateur sur la banquise construit un igloo de rayon intérieur  $R = 1 \text{ m}$ . La température extérieure est de  $-20^\circ\text{C}$  et la température minimale nécessaire à la survie est égale à  $10^\circ\text{C}$ .

➔ Quelle doit être l'épaisseur minimale des murs de l'igloo ?

**Données :**

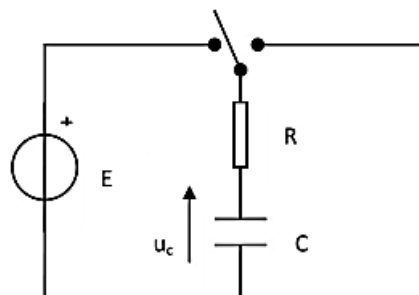
Conductivité thermique de la glace  $\lambda = 0,050 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Le métabolisme de l'homme dégage une puissance de  $50 \text{ W}$

## 9 Maquette de maison (d'après oral CCINP TSI)

On dispose d'une boîte en plastique, fermée, pouvant représenter sommairement une maquette de maison. Cette boîte contient une résistance électrique chauffante alimentée par une tension continue réglable. Un capteur de température, relié par une interface à un ordinateur, permet de suivre l'évolution de la température de l'air à l'intérieur de la boîte en fonction du temps. Un autre capteur mesure la température extérieure.

1. Expliquer à quoi correspondent les cinq paliers de température sur la courbe de la fenêtre 2 du document 1.
2. On peut définir une résistance thermique globale de la boîte. Donner la valeur de cette résistance thermique.
3. De quels paramètres dépend cette résistance thermique ? On précisera comment chacun de ces paramètres influencerait les résultats de l'expérience si on le modifiait.
4. On arrête le chauffage à la fin de la première expérience et on laisse la maquette de la maison se refroidir. Proposer un bilan thermique sur la maquette, permettant ainsi de prévoir l'évolution de la température lors de cette phase de refroidissement. On établira en particulier l'équation différentielle vérifiée par la température et sa résolution en faisant intervenir, entre autres, la capacité thermique  $C$  de la maquette.
5. On donne le circuit électrique suivant.



Souligner les analogies qui existent entre ce circuit électrique et l'expérience de chauffe et refroidissement de l'intérieur de la boîte en plastique précédente. On établira en particulier l'équation différentielle vérifiée par la tension  $u_c(t)$ .

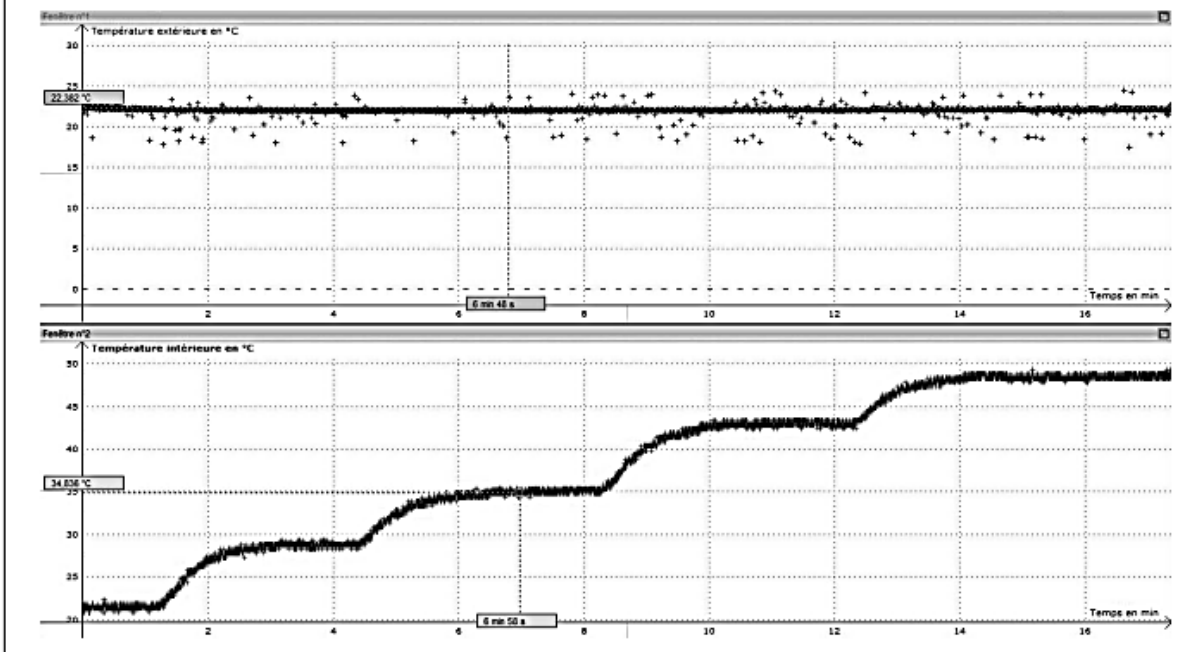
6. Un étudiant veut suivre avec un boîtier d'acquisition (impédance d'entrée  $R_e$  de l'ordre de  $10 \text{ M}\Omega$ ) la tension aux bornes du condensateur dans la phase de charge. Le choix des paramètres est  $R = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $C = 10 \mu\text{F}$  et  $E = 5 \text{ V}$ . Durée d'acquisition  $100 \text{ ms}$ , période d'échantillonnage  $1 \text{ ms}$ , déclenchement manuel.

6.a. En régime permanent,  $u_c$  n'atteint pas  $5 \text{ V}$ . Quel est le problème ?

6.b. Il n'observe pas du tout la courbe de charge du condensateur. Proposer des explications et améliorations.

### Document 1 : première expérience

On mesure les évolutions temporelles des températures à l'extérieur (fenêtre 1) et à l'intérieur (fenêtre 2) de la boîte.

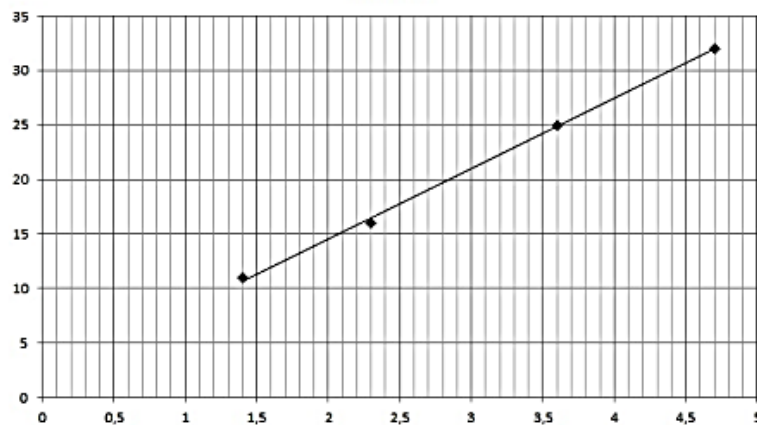


### Document 2 : deuxième expérience

En régime permanent établi, on mesure la puissance  $P$  (en W) fournie par la résistance chauffante et la différence de température  $\Delta T$  (en °C) entre l'intérieur et l'extérieur de la boîte.

$P$	$\Delta T$
4,7	32
1,4	11
2,3	16
3,6	25

$$\Delta T = f(P)$$



## 10 ✎ Justifications de la loi de Wien et de la loi de Stefan

On rappelle la loi de Planck qui exprime la densité spectrale de flux surfacique émis par un corps noir isotherme à la température  $T$  :

$$F^e(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1}$$

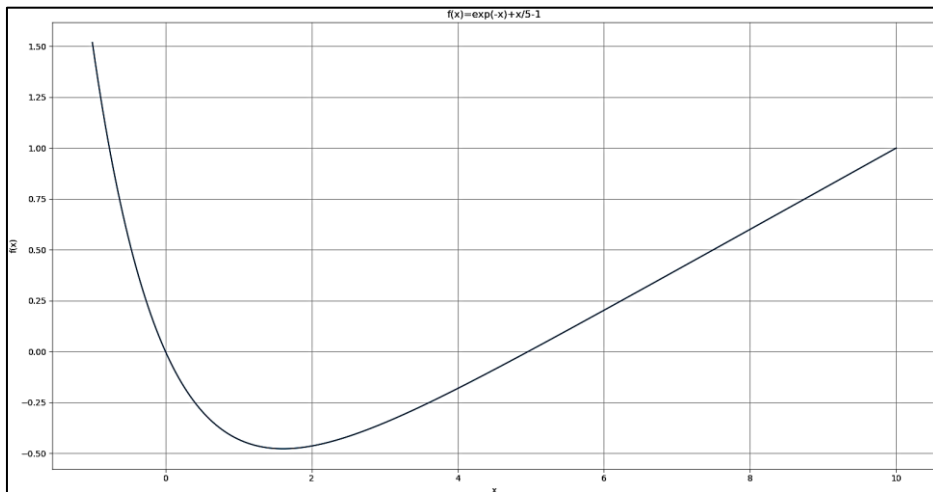
Avec  $h$  la constante de Planck :  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  et  $k_B$  la constante de Boltzmann :  $k_B = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ .

1) La fonction densité spectrale de flux surfacique admet un maximum pour une longueur d'onde notée  $\lambda_{max}$  que l'on souhaite relier à la température  $T$  du corps noir étudié. Pour cela, on pose  $x = \frac{hc}{\lambda k_B T}$  et on note  $x_{max} = \frac{hc}{\lambda_{max} k_B T}$ .

a) Montrer que  $x_{max}$  vérifie l'équation  $e^{-x_{max}} + \frac{x_{max}}{5} - 1 = 0$ .

b) Déterminer une valeur approchée de  $x_{max}$  avec la courbe ci-dessous

c) Conclure sur la loi de Wien.



2) a) Rappeler la relation entre le flux surfacique total émis et la densité spectrale de flux surfacique émis par un corps noir.

b) On pose à nouveau  $x = \frac{hc}{\lambda k_B T}$ . Montrer que  $\varphi^e = \frac{2\pi k_B^4 T^4}{h^3 c^2} \int_0^{+\infty} \frac{x^3}{e^x - 1} dx$ .

c) Conclure sur la loi de Stefan.

**Donnée :**  $\int_0^{+\infty} \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \frac{\pi^4}{15}$

## 11 ✎ Lampe à incandescence

Une lampe à incandescence a les caractéristiques suivantes :

- filament de tungstène de forme cylindrique de surface  $S_F = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$  ;
- ampoule de verre de faible épaisseur et de forme sphérique de rayon  $R = 2,5 \text{ cm}$ .

La puissance rayonnée par le filament est  $P$ .

On fait l'hypothèse que le rayonnement du filament est celui d'un corps noir de température  $T_F$ .

- 1) Calculer  $T_F$  pour une puissance rayonnée  $P = 60 \text{ W}$ . Quelle est la valeur de la longueur d'onde  $\lambda_{max}$  correspondant à l'émission maximale ?
- 2) 98% du flux émis est compris dans l'intervalle  $[0,5 \cdot \lambda_{max}; 8 \cdot \lambda_{max}]$ . Commenter.

## 12 ✎ Bilan radiatif de la Lune (d'après CCMP2 MPI 2023)

On s'intéresse au bilan radiatif de la Lune. On note :

- $T_S$  et  $T_L$  les températures respectives à la surface du Soleil et de la Lune ;
  - $R_S$  et  $R_L$  les rayons respectifs du Soleil et de la Lune ;
  - $D_{SL}$  la distance Soleil-Lune ;
  - $A$ , l'albédo de la Lune, c'est-à-dire la fraction de l'énergie solaire reçue qui est réfléchiée par la Lune.
- 1) Déterminer l'expression de la puissance solaire absorbée par la Lune.
  - 2) En l'assimilant à un corps noir, déterminer l'expression de la puissance émise par la Lune.
  - 3) Déterminer enfin l'expression de la puissance perdue par la Lune.

## 13 Résistance thermique relative au rayonnement thermique

On considère une personne à la température  $T_h$  et telle que la surface  $S$  de sa peau est  $S \approx 2 \text{ m}^2$ .

Cette personne est placée dans un milieu de température  $T_a = 300 \text{ K}$ .

On considère que la personne et le milieu ambiant émettent un rayonnement assimilé à celui d'un corps noir et on suppose que la personne absorbe tout le rayonnement émis par le milieu ambiant.

On s'intéresse au flux surfacique radiatif pour la personne :  $\varphi^R = \varphi^e - \varphi^a$  avec  $\varphi^e$  le flux surfacique émis par la personne et  $\varphi^a$  le flux surfacique qu'elle absorbe.

- 1) Montrer que, lorsque  $\frac{|T_h - T_a|}{T_a} \ll 1$ , on peut écrire  $\varphi^R \approx K \cdot (T_h - T_a)$  avec  $K = 4\sigma T_a^3$ ,  $\sigma$  étant la constante de Stefan.
- 2) Comparer cette expression à celle de la loi de Newton. Conclure en exprimant la résistance thermique relative au rayonnement thermique.