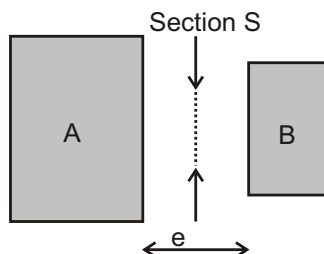


Thermodynamique - TD2 - Rayonnement thermique

On donne pour l'ensemble du sujet : $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

Exercice 1 - Échanges entre deux corps noirs proches

Deux solides A et B de températures T_A et T_B , se comportant comme des corps noirs sont placés face à face. Leur distance mutuelle e est petite. Ils sont séparés par une ouverture de section S.



- Déterminer le flux énergétique ϕ qui transite de A vers B. En donner une approximation linéaire si T_B est proche de T_A .
- Définir la résistance thermique correspondante.
- L'espace entre A et B contient de l'air de conductivité thermique λ .
 - Comparer les résistances thermiques dues au rayonnement et à la conduction pour la section S. Pour quelle valeur de la température T_A ces deux résistances sont-elles du même ordre de grandeur ? On donne : $e = 5 \text{ mm}$; $\lambda = 0,03 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.
 - Quelle est alors la résistance thermique équivalente ?

Exercice 2 - Effet de serre dû à l'atmosphère

On suppose que le Soleil et la Terre rayonnent comme des corps noirs sphériques. On donne la température du Soleil : $T_S = 5600 \text{ K}$, le rayon du Soleil : $R_S = 6,97 \cdot 10^5 \text{ km}$, la distance Terre-Soleil : $d = 1,44 \cdot 10^8 \text{ km}$, le rayon de la Terre $R_T = 6,4 \cdot 10^3 \text{ km}$.

- Quelle est la puissance totale émise par le Soleil ? La Terre reçoit-elle la totalité de ce rayonnement ?
- On ne tient pas compte de l'atmosphère, calculer la température T_T de la Terre.
- On tient compte à présent de la présence de l'atmosphère qui constitue un écran de faible épaisseur par rapport au rayon terrestre. Le modèle simplifié utilise les hypothèses suivantes :
 - L'atmosphère rayonne sensiblement une fraction β de l'énergie que rayonnerait un corps noir de température moyenne T_a ;
 - L'atmosphère absorbe une fraction α et la Terre une fraction $1 - \alpha$ du rayonnement solaire ;
 - La Terre absorbe la totalité du rayonnement de l'atmosphère vers la Terre et l'atmosphère absorbe une fraction β du rayonnement terrestre.

Soit T'_T la température d'équilibre thermique de la Terre.

- Donner l'expression littérale de T_a et T'_T en fonction de T_T , α et β .
- On donne $\alpha = 0,5$ et $\beta = 0,9$. Déterminer numériquement T_a et T'_T . Comparer T_T et T'_T .

Exercice 3 - Capteur solaire

1. Soit une plaque dont la surface S orientée vers le Soleil est noircie et considérée comme un corps noir et dont l'autre face est brillante et n'échange pas de rayonnement avec le milieu extérieur. Soit J la puissance solaire reçue au niveau du sol par unité de surface ($J=800 \text{ W.m}^{-2}$).
 - (a) Calculer la température d'équilibre T_1 de S .
 - (b) Quelle est la valeur λ_1 de la longueur d'onde du maximum de rayonnement émis ? A quel domaine spectral appartient-elle ?
2. On intercale une vitre V entre la surface noire de la plaque et le rayonnement solaire. On admettra que le verre absorbe totalement tout rayonnement infrarouge tel que $\lambda > 1\mu\text{m}$ et que le rayonnement solaire, arrivant au sol n'en contient quasiment pas. Soient T_V et T_2 les températures respectives de la vitre et de la plaque. En considérant la vitre comme un corps noir qui émet dans deux demi-espaces (vers l'extérieur et vers la plaque), écrire un nouveau bilan thermique pour S et pour V . En déduire les températures T_V et T_2 . Conclusion ?
3. De l'eau circule au contact de la surface noire S de la plaque. La température d'équilibre de S est alors $T_3 = 333\text{K}$. L'eau, à son arrivée, est à une température de 7°C .
 - (a) Effectuer un nouveau bilan thermique pour S et pour V .
 - (b) Quelle doit être la surface du capteur pour produire 15 L d'eau chaude ($T \approx T_3$) à l'heure ? On donne la capacité thermique massique de l'eau $c = 4,18\text{kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$.

Exercice 4 - Cryostat à hélium

Un cryostat à hélium est constitué de deux enceintes supposées sphériques de rayons r et r' avec $r' - r \ll r$. L'enceinte extérieure est à température ambiante $\theta_e = 20^\circ\text{C}$. L'enceinte intérieure (de rayon $r = 3 \text{ cm}$) est en équilibre thermique avec l'hélium 4 liquide qu'elle contient, à la température $T_i = 4,2\text{K}$. Elle est ouverte sur l'extérieur par un petit tube pour permettre à l'hélium qui s'évapore de s'échapper. Le vide règne entre les deux enceintes, de sorte qu'on suppose les pertes uniquement dues au rayonnement thermique (on néglige les pertes par conduction le long du tube).

1. En assimilant les deux enceintes à des corps noirs, calculer la masse d'hélium qui s'évapore de l'enceinte intérieure en une heure. On donne la valeur de l'enthalpie massique d'évaporation de l'hélium 4 : $h_v = 20\text{J.g}^{-1}$.
2. On intercale maintenant une troisième enceinte en équilibre thermique avec un réservoir d'azote liquide à $T = 77 \text{ K}$. Reprendre le calcul précédent. Conclure sachant que l'azote liquide est moins cher que l'hélium liquide.

Exercice 5 - Fusion des noyaux d'hydrogène dans le Soleil

D'après Physique nucléaire appliquée - F. Mayet édition De Boeck

L'énergie rayonnée par les étoiles trouve son origine dans les transformations nucléaires qui se produisent au cœur des étoiles. Le Soleil est une étoile jeune et peu massive qui est concernée par la chaîne pp correspondant à la conversion d'hydrogène en hélium, par fusion de noyaux légers.

Pour estimer la durée de vie du Soleil, on le modélise de la manière suivante :

- le Soleil est considéré comme formé initialement exclusivement d'hydrogène. La masse du Soleil : $M_S = 2.10^{30}\text{kg}$.
- il rayonne une puissance considérée comme constante $P = 3,83.10^{26}\text{W}$.
- Seul 10% de la masse du Soleil est concerné par la combustion de l'hydrogène (le cœur interne).
- 4 noyaux d'hydrogène sont nécessaires pour former un noyau d'hélium, l'énergie libérée par la chaîne pp est :

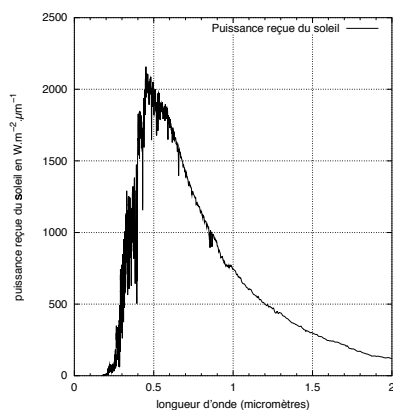
$$Q = 24,7\text{MeV}$$

Donner une estimation du temps restant avant que le Soleil ne cesse de briller.

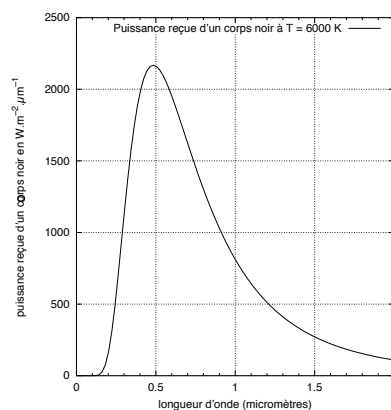
Exercice 6 - Température des planètes du système solaire

- La figure ci-dessous donne la puissance solaire reçue au sommet de l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde. En évaluant approximativement la surface sous cette courbe, estimer la constante solaire C qui représente l'éclairement produit par le Soleil sur une surface de 1m^2 placée au sommet de l'atmosphère terrestre perpendiculairement aux rayons lumineux.
- Retrouver la valeur de C en considérant que le Soleil est un corps noir sphérique de rayon $R_S = 6,9 \cdot 10^8\text{m}$ à la température $T_S = 6 \cdot 10^3\text{K}$ situé à $d_T = 1,5 \cdot 10^8\text{km}$ de la Terre.
- On considère une planète P située à une distance d_P du Soleil. Déterminer la température moyenne de la planète P en supposant qu'elle émet comme un corps noir en équilibre radiatif avec le flux solaire absorbé.
- Commenter alors les températures observées à la surface de 5 planètes du système solaire. Discuter l'influence de la pression de l'atmosphère au sol, de la rotation, de l'albédo ...

Planète	Mercure	Vénus	Terre	Mars
D (UA)	0,39	0,75	1	1,52
Albédo	0,06	0,75	0,31	0,21
T_P (K)	100-650	700	288	150-300



(a) Spectre solaire



(b) Spectre d'un corps noir à 6000 K

Exercice 7 - Extrait X ENS MPI 2023

29. La modélisation de l'effet de serre passe par celle de l'atmosphère terrestre. Nous traitons celle-ci, de manière simplifiée, comme un gaz parfait de masse molaire $M = 30\text{ g mol}^{-1}$, dont la pression P et la température T ne dépendent que de l'altitude z . Nous faisons en outre l'approximation que le gradient de température vertical est constant, $dT(z)/dz = -\Gamma$, avec $\Gamma = 6\text{ K km}^{-1}$. Le poids de l'atmosphère fait augmenter sa pression lorsque l'altitude diminue, et nous admettons que le gradient de pression, qui s'obtient en effectuant un bilan de forces, est donné par $dP(z)/dz = -MgN(z)$, où $N(z)$ est la concentration molaire à l'altitude z , et $g = 10\text{ m s}^{-2}$ est l'accélération de la pesanteur. En éliminant z entre ces deux équations, montrer que la température est une fonction de la pression de la forme $T(z)/T(0) = (P(z)/P(0))^\beta$, où β est une constante dont on déterminera l'expression en fonction de Γ , M , g , et de la constante des gaz parfaits $R = 8\text{ J mol}^{-1}\text{ K}^{-1}$.

30. Calculer la valeur numérique de β et représenter la variation de la température en fonction de la pression.

31. On note Φ la puissance surfacique moyenne reçue du Soleil par la Terre, dont une fraction α

est réfléchi vers l'espace. Quelle est la température T_E d'un corps noir qui rayonne une puissance surfacique identique à celle absorbée par la Terre ?

On note x la fraction molaire de CO_2 dans l'atmosphère, supposée uniforme et très faible, et $\mu(z)$ le nombre de moles de CO_2 par unité de surface horizontale au-delà de l'altitude z , obtenu en intégrant la densité volumique. On suppose pour simplifier que l'atmosphère au-delà de l'altitude z est opaque au rayonnement de corps noir si $\mu(z) > \mu_c$, et transparente si $\mu(z) < \mu_c$, où μ_c est un seuil qui ne dépend que des propriétés de la molécule de CO_2 . L'altitude h à laquelle le rayonnement de corps noir de température T_E est émis est alors déterminée par la condition $\mu(h) = \mu_c$, et la température T_E est celle de l'atmosphère à l'altitude h .

32. Exprimer $\mu(z)$ en fonction de $P(z)$, x , M et g . En déduire la pression $P(h)$ à l'altitude h .

33. Déterminer comment varie la température au sol en fonction de la fraction x de CO_2 dans l'atmosphère.

Dans ce qui précède, nous avons fait l'approximation implicite que le coefficient d'absorption du CO_2 ne dépend pas de la longueur d'onde. En réalité, comme on l'a vu dans les deux premières parties, cette hypothèse est fautive, ce que l'on constate sur la figure 1, où le CO_2 a une bande d'absorption centrée sur le mode n_f mentionné à la fin de la partie I.

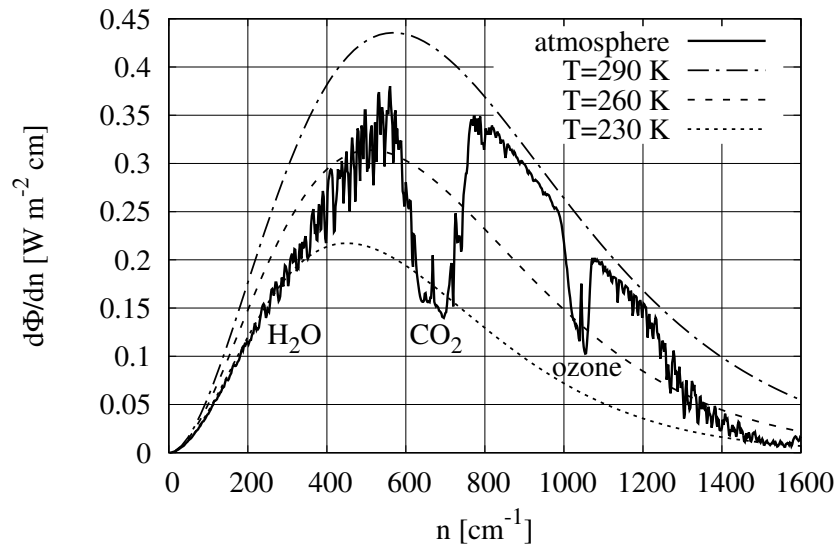


FIGURE 1 – Variation avec le nombre spectroscopique n de la puissance rayonnée par unité de surface et de n . Les lignes pointillées sont des spectres de corps noir à différentes températures. La ligne pleine est le spectre calculé du rayonnement émis de la Terre vers l'espace, tel que le flux total équilibre celui reçu du Soleil. Dans ce calcul, la température de la surface de la Terre est 288 K. L'atmosphère est transparente pour des valeurs de n comprises entre 800 et 1000 cm^{-1} . En revanche, dans d'autres intervalles de n , la vapeur d'eau, le CO_2 ou l'ozone absorbent la lumière émise par la surface. Dans ces intervalles, la lumière émise vers l'espace semble provenir d'une région atmosphérique plus froide, donc de plus haute altitude. [Le calcul a été réalisé au moyen du modèle MODTRAN <http://climatemodels.uchicago.edu/modtran/>.]

34. Quelle est la dépendance en température de l'aire sous un spectre de corps noir ?

35. Comment varie la position du maximum n_{max} du spectre de corps noir en fonction de T ?

36. À partir de la figure 1, estimer numériquement la puissance que la Terre rayonne vers l'espace par unité de surface.

37. En préservant l'équilibre avec le flux reçu du Soleil, comment est modifié le spectre émis par la Terre si on augmente la teneur de l'atmosphère en CO_2 ?