TD CHAPITRE THM.3 : RAYONNEMENT THERMIQUE

A SAVOIR FAIRE

Exercice 1. Autour de la loi de Wien IMPORTANT | 1 | 1

1 - Le maximum d'émission du soleil a lieu à environ dans le vert à 504 nm. En le considérant comme un corps noir, en déduire la température T_S de sa surface.

2 - Calculer la longueur d'onde maximale λ_m d'émission pour un corps noir à T = 300 K (Température moyenne de la Terre et de son atmosphère). Commenter le résultat obtenu.

3 - (IPho) Considérons une étoile dont le maximum d'émission correspond à la longueur d'onde $\lambda = 250 \text{ nm}$, tandis que le Soleil, dont la température est de $5{,}8.10^3 K$, a un maximum d'émission à $\lambda = 500 \text{ nm}$. Quelle est la température en surface de l'étoile ?

Exercice 2. Taille d'une étoile *(IPhO)* 1 | 1

On imagine deux étoiles sphériques A et B de même luminosité, ce qui signifie qu'elles émettent la même puissance lumineuse, mais dont les températures en surface varient du simple au double, avec $T_B = 2T_A$. Que peut-on dire du rayon de l'étoile B par rapport à celui de l'étoile A ?

(a) $R_B = 4R_A$ (b) $R_B = 2R_A$ (c) $R_B = R_A/2$ (d) $R_B = R_A/4$

Exercice 3. Puissance rayonnée par le Soleil IMPORTANT | 2 | 1

Le Soleil peut-être modélisé par un corps noir dont la température de surface est d'environ $T_S = 5\,800$ K.
Le rayon du soleil vaut environ $R_S = 7.10^5$ km et la distance Terre-Soleil est d'une unité astronomique soit $D_T = 1{,}5.10^8$ km.

Donnée : constante de Stefan $\sigma = 5{,}67.10^{-8}\ \text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

1 - Évaluer la puissance P_S émise par le soleil

2 - En déduire la perte masse du Soleil par seconde en utilisant l'équation d'Einstein de l'énergie de repos du Soleil $E = m_s c^2$.

3 - En déduire la puissance surfacique φ_T qui arrive sur la Terre en entrée de l'atmosphère.

4 - En déduire alors la puissance surfacique moyenne φ_m en provenance du Soleil reçue par la Terre au niveau du sol (on considère que la puissance totale reçue se répartit uniformément sur toute la surface de la Terre)

Exercice 4. Lorsqu'une vitre sert de serre IMPORTANT | 2 | 1

1 - Considérons un lopin de terre, d'aire $A = 1{,}0$ m^2, à la température T_T, assimilable à un corps noir.

Il est soumis au rayonnement solaire $\varphi_{Solaire} = 300$ W.m^{-2}. Calculer la température du sol si on le considère à l'équilibre radiatif avec le soleil.

2 - On place ce lopin sous une vitre en verre de même surface A. On suppose la vitre totalement transparente au rayonnement solaire (situé principalement dans le visible et le proche IR) mais totalement absorbante au rayonnement émis par le sol (contenu dans l'IR lointain, autour de 10 µm). Faire apparaitre sur un schéma l'ensemble des flux mis en jeu. Effectuer un bilan radiatif sur la vitre puis sur le lopin de terre (on se place en régime permanent) pour en déduire la température T_V et T_T du verre et de la terre à l'équilibre. Commenter.

3 - On considère désormais un modèle un peu plus réaliste en supposant que la vitre en verre réfléchit 4 % de la lumière incidente, en absorbe 2 % et en laisse donc passer 94 %. Faire apparaitre sur un schéma l'ensemble des flux mis en jeu. Effectuer un bilan radiatif sur la vitre puis sur le lopin de terre (on se place en régime permanent) pour en déduire la température T_V et T_T du verre et de la terre à l'équilibre. Commenter.

Donnée : constante de Stefan $\sigma = 5{,}67.10^{-8}\ \mathrm{W.m^{-2}.K^{-4}}$

Exercice 5. Equilibre thermique de la Terre IMPORTANT | 2 | 1

La température moyenne de la surface de la Terre peut être estimée expérimentalement aux alentours de 288 °K. Nous allons ici essayer de proposer des modèles permettant de retrouver cet ordre de grandeur de manière plus ou moins précise, en considérant que le rayonnement reçu par la Terre est principalement celui du Soleil considéré comme un corps noir à la température T_S.

On note φ_m la puissance surfacique moyenne φ_m en provenance du Soleil reçue par la Terre au niveau du sol, et respectivement R_S, R_T et D les rayons du Soleil et de la Terre et la distance Terre-Soleil.

Données : constante de Stefan $\sigma = 5{,}67.10^{-8}\ \mathrm{W.m^{-2}.K^{-4}}$, $\varphi_m = 340\ \mathrm{W.m^{-2}}$, $D = 1{,}50.10^8$ km, $R_S = 7.10^5$ km, $R_T = 6{,}4.10^3$ km et $T_S = 5\,800$ K.

On suppose dans un premier temps que la Terre n'a pas d'atmosphère. Elle possède un coefficient de réflexion (ou albédo) $A_T = 30\%$ vis-à-vis des rayonnements solaires et est en équilibre radiatif avec le Soleil.

1- Quelle serait la température d'équilibre de surface T_{T1} de la Terre dans ces conditions ? commenter la valeur obtenue.

Afin d'améliorer ce modèle grossier, on suppose de nouveau que le rayonnement reçu est principalement celui du Soleil considéré comme un corps noir, mais on tient à présent compte du rôle de l'atmosphère.

L'atmosphère est assimilée à une couche à l'équilibre thermique avec les propriétés suivantes :

- Elle est parfaitement transparente au rayonnement solaire incident φ_m ;
- Elle absorbe en revanche l'intégralité du rayonnement émis par la Terre (principalement infra-rouge)
- On peut la modéliser comme un corps noir à la température T_a qui émet de manière isotrope à la fois vers la Terre et vers l'espace. On considère que le coefficient de réflexion de la Terre vis-à-vis des rayons de l'atmosphère est nul.

2- Faire un bilan des différents flux mis en jeu et effectuer un bilan radiatif pour la surface de la Terre et pour l'atmosphère.

3- Déterminer la nouvelle température d'équilibre T_{T2} de surface de la Terre selon ce modèle.

Enfin, on affine encore le modèle en tenant de plus compte que la Terre a une transparence partielle au rayonnement qu'elle émet, impliquant que l'atmosphère n'absorbe qu'une fraction $A' = 66\%$ de ce rayonnement.

4- Déterminer la nouvelle température d'équilibre de surface de la terre T_{T3} selon ce modèle ; commenter.

■ EXERCICES INCONTOURNABLES

Exercice 6. Etude du filament d'une lampe à incandescence 2 | 1

Une lampe à incandescence alimentée sous une tension efficace $V = 220\,V$ consomme une puissance $P = 100\,W$. Cette lampe est constituée d'un filament de tungstène de section circulaire, placé au centre d'une ampoule de verre de forme sphérique. Les contacts thermiques du filament avec le culot de la lampe sont négligeables, et le vide est suffisamment poussé dans l'ampoule, qui ne contient rien en dehors du filament, pour considérer que toute la puissance électrique est rayonnée. On assimile le filament à un corps noir à la température T, et on le suppose de forme cylindrique de longueur l, de rayon a, de résistivité ρ uniforme et constante.

1- Montrer que la température absolue T du filament est proportionnelle à une puissance de a que l'on identifiera.

2- En réalité le tungstène se sublime peu à peu (passage de l'état solide à l'état gazeux) mais ne se redépose pas de manière uniforme : le filament présente des variations de sa section. Expliquer pourquoi ce phénomène peut conduire à la rupture du filament.

3- La température du filament étant de $T = 2500$ K et sa résistivité $\rho = 1 \times 10^{-6}\,\Omega.\mathrm{m}$, calculer les dimensions (longueur l et rayon a) du filament.

Exercice 7. Equilibre thermique par rayonnement 2 | 2

Une sphère de rayon r très faible est assimilable à un corps noir.

Elle est placée entre deux plaques opaques P_1 et P_2 à la température T_1. Elle baigne dans un fluide transparent. Elle est pleine et homogène, de capacité thermique massique c et de masse volumique μ.

Elle est supposée à chaque instant de température homogène à la température $T(t)$.

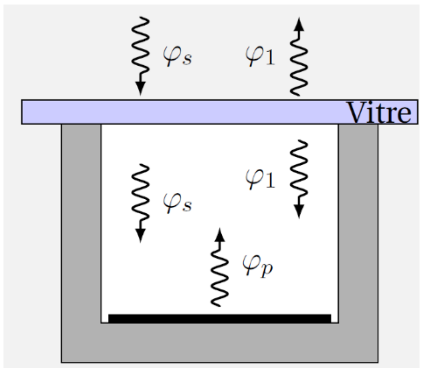
Le fluide ambiant étant à l'équilibre, les échanges conducto-convectifs sont supposés négligeables. La température initiale de la sphère est notée T_0.

1- Déterminer l'équation différentielle vérifiée par $T(t)$.

2- On suppose que $T(t)$ reste voisine de T_1 à chaque instant, en lui restant supérieure. Montrer alors que l'équation différentielle peut être remplacée par une équation différentielle du premier ordre à coefficients constants.

3- Déterminer $T(t)$ et tracer son graphe.

Exercice 8. Effet de serre à n couches 2 | 2



On étudie l'effet de serre produit par l'interposition d'une vitre au-dessus d'une plaque qui reçoit le rayonnement solaire. La plaque est noircie et assimilée à un corps noir. Le verre est supposé totalement transparent au rayonnement solaire. La vitre est en revanche totalement absorbante pour le rayonnement infra-rouge émis par la plaque qui absorbe le rayonnement solaire.

On désigne par φ_s le flux solaire surfacique supposé arriver normalement à la vitre et à la plaque.

1- On suppose l'équilibre radiatif de la plaque et de la vitre. Écrire les équations exprimant ces équilibres et en déduire la température T de la plaque. Faire l'application numérique de T avec $\varphi_s = 0{,}6\,\mathrm{kW.m^{-2}}$.

2- En déduire la valeur de la température T_1 de la vitre.

3- Reprendre la question précédente dans le cas de deux vitres. En déduire la température du sol.

4- Reprendre la question dans le cas de n vitres et montrer que $\sigma T^4 = (n+1)\varphi_s$.

En réalité, en tenant compte de la réflexion et de l'absorption du verre, la température maximale est atteinte pour un nombre fini de plaques, généralement 4 ou 5.

EXERCICES COMPLEMENTAIRES

Exercice 9. Comparaison rayonnement/convection

Considérons un corps noir de petites dimensions placé dans une enceinte dont les parois sont maintenues à la température T_p en présence d'un fluide à la température $T_F = T_p$ (de l'air par exemple). Comme le corps noir, de température $T \cong T_p$, est petit devant les dimensions de l'enceinte, on considère que son rayonnement ne perturbe pas le rayonnement présent dans l'enceinte, que l'on supposera en ERT avec les parois de l'enceinte.

1. Déterminer le flux radiatif $\varphi_R = \varphi_e - \varphi_i$ du petit objet en fonction de σ, T et T_p (σ = 5,7.10^{-8} W.m^{-2})
2. Justifier qu'à la surface du petit objet, la température du corps vérifie l'équation suivante, avec h le coefficient de conducto-convection (on note z l'axe local normal sortant à la surface de l'objet) ;

$$-\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{surface} = h(T - T_F) + \sigma\left(T^4 - T_p^4\right) \cong h\left(T - T_p\right) + 4\sigma T_p^3\left(T - T_p\right)$$

3. En déduire le rayonnement suit approximativement une loi de type loi de Newton avec un coefficient équivalent h_{ray} que l'on déterminera en fonction de σ et T_p. Calculer ce coefficient avec $T_p = 300\ K$. Commenter.

Exercice 10. Influence des gaz à effet de serre sur l'équilibre thermique de la Terre

On s'intéresse ici à un modèle simplifié d'équilibre du système Terre. On considère que le Soleil apporte une puissance thermique surfacique moyenne φ_S = 240 W.m^{-2} ; la Terre, à la température T, émet son propre transfert thermique de puissance surfacique $\phi_T = \sigma T^4$ avec $\sigma =$ 5,7.10^{-8} W.m^{-2}. Par ailleurs, une partie de cette puissance est captée par les gaz à effet de serre et renvoyée vers la Terre : avant l'ère industrielle, on estime que cette puissance valait $\varphi_{serre} =$ 155 W.m^{-2}.

1. Calculer la température d'équilibre de la Terre en l'absence d'effet de serre. Commenter.
2. Calculer la température d'équilibre de la Terre en tenant compte de l'effet de serre ; on la notera T_0.
3. Si on suppose que plus aucun gaz à effet de serre n'est émis après 2020, l'augmentation de la concentration en gaz à effet de serre due à l'activité humaine a pour effet équivalent d'augmenter φ_{serre} d'environ 3 W.m^{-2} ; en déduire la nouvelle température d'équilibre T_0'.
4. Relier la variation $T_0' - T_0$ à la capacité thermique C de la Terre, sa surface S et à la durée Δt de la transformation. On considérera pour simplifier que la Terre est à la température constante T_0 pendant toute la transformation.
5. Pour estimer C, on donne des estimations des masses de l'atmosphère $m_{air} =$ 5,1.10^{18} kg de capacité calorifique massique c = 1000 J.K^{-1}.kg-1 et des océans $m_{océans} =$ 1,4.10^{21} kg de capacité calorifique massique $c =$ 4180 J.K^{-1}.kg^{-1}. Calculer C à l'aide de ces deux contributions ; on commentera leur importance relative.
6. En déduire numériquement la rapidité du réchauffement (en degrés par siècle).
7. Sachant que la sortie de la dernière ère glaciaire a consisté en un réchauffement de 4°C sur une durée de 10 000 ans (accompagnée par une augmentation du niveau marin de 130 m), commenter les valeurs obtenues.

Exercice 11. Bilan radiatif de la Terre

On donne le rayon du Soleil R_S = 7,0.10^5 km, la distance moyenne de la Terre au Soleil D = 1,5.10^8 km, le rayon de la Terre R_T = 6400 km, la température moyenne au sol T_0 = 287 K.

1. La constante solaire E_0 est égale à la puissance reçue du soleil par unité de surface normale aux rayons solaires au « sommet » de l'atmosphère terrestre.

a) On admet qu'on peut assimiler l'émission solaire à celle d'un corps noir de température T_S (correspondant à la température superficielle du soleil). Calculer E_0 en fonction de D, R_S, T_S et de σ la constante de Stefan. On trouve expérimentalement E_0 = 1,35 kW.m^{-2}.

b) Le maximum de l'émission solaire en fonction de la longueur d'onde est obtenu pour λ_m = 0,474 μm. Cette valeur est-elle cohérente avec la valeur de T_S que l'on vient de calculer pour pouvoir assimiler l'émission solaire à celle du corps noir ?

2. L'albédo d'une surface est le rapport du flux qu'elle diffuse sans l'absorber au flux qu'elle reçoit. L'albédo A de l'ensemble Terre-atmosphère pour le rayonnement solaire est évalué à 0,34. On considérera que l'atmosphère terrestre est pratiquement transparente au rayonnement solaire. Pour tenir compte de la convexité de la Terre, on admet que la puissance solaire p reçue par unité de surface du cercle de rayon R_T vaut $E_0/4$.

a) Calculer le flux surfacique moyen φ du rayonnement émis par le sol en supposant l'équilibre radiatif au sol. On négligera dans cette question toute absorption par l'atmosphère du rayonnement émis par le sol de même que tout rayonnement propre de l'atmosphère. On exprimera φ_e en fonction de p. On assimile le sol rayonnement du sol à celui d'un corps noir de température T_p. Calculer sa valeur et la comparer à celle de T_0.

b) On tient compte maintenant du rayonnement de l'atmosphère et on suppose que le sol est modélisé par un corps noir de température T_0. On admet que seulement une fraction α du rayonnement infrarouge émis par le sol (de température T_0) peut traverser la totalité de l'atmosphère. En outre, l'atmosphère rayonne un flux surfacique moyen φ_1 au niveau du sol et dirigé vers le sol. Enfin, les couches atmosphériques les plus élevées ont un rayonnement propre vers l'extérieur du système terre-atmosphère correspondant un flux surfacique moyen φ_r (tous les flux indiqués sont comptés positivement). Faire un schéma récapitulatif et donner la condition d'équilibre radiatif au sol puis sur la frontière supérieure de l'atmosphère. Calculer φ_e, φ_r et φ_1 pour $\alpha = 0{,}25$.

3. En fait, le bilan purement radiatif précédent ne tient pas compte de divers phénomènes qui participent au bilan thermique de l'atmosphère. Ainsi, de l'eau s'évapore à la surface du sol et se recondense dans l'atmosphère. La hauteur moyenne des précipitations annuelles est de 2 mètres d'eau. Évaluer l'ordre de grandeur de la puissance surfacique moyenne ϕ_T transférée de cette façon de la Terre à l'atmosphère et conclure. On donne l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau $L_{vap} = 2600$ kJ.kg^{-1}.