Examen 30 Janvier 2014
Transfert Radiatif Direct et Inverse

Sans document ni calculatrice

Durée : 2H00

N.B. : La plupart des questions sont <u>indépendantes</u>.

Les figures sont à rendre avec la copie.

Dans ce problème, nous allons nous intéresser à l'observation de l'atmosphère planétaire avec visée au nadir.

1. Soit B_ν (T) la luminance spectrale d'un corps noir à la température T et à la fréquence ν. On rappelle l'expression de la loi de Planck en fonction du nombre d'onde ω :

$$B_\omega(T) = \frac{2c_1\omega^3}{\left[\exp\left(\frac{c_2\omega}{T}\right)-1\right]}$$

avec $c_1 = 2hc^2$ et $c_2 = \dfrac{hc}{k}$.

Donner l'expression de loi de Planck *$B_\nu(T)$* en fonction de la fréquence ν.

2. On suppose que le Soleil est un corps noir de température équivalente T_s=5800 K et que la Terre est un corps noir de température équivalente T_e=288 K. On considère un plan infini situé juste au-dessus de la surface terrestre. On note d la distance entre la Terre et le Soleil.

2.1. Montrer que la luminance <u>spectrale</u> (le flux énergétique par unité de surface et par intervalle spectral) qui tombe sur le plan du côté de la Terre est $\pi B_\nu(T_e)$.

2.2. Montrer que la luminance spectrale qui tombe sur le plan du côté du Soleil est $(1-A)\left(\dfrac{R_s}{d}\right)^2 \pi B_\nu(T_s)$ où A est l'albedo terrestre.

3. On rappelle que $\displaystyle\int_0^\infty \frac{x^3dx}{e^x-1} = \frac{\pi^4}{15}$

3.1. Calculer l'intégrale de B_ν(T) sur l'ensemble du spectre en fonction de T et de σ avec $\sigma = \dfrac{2\pi^5k^4}{15h^3c^2}$.

3.2. Quel est le nom de cette loi ?

3.3. En intégrant sur les fréquences, et en utilisant le résultat obtenu en 2.2., calculer l'éclairement solaire total atteignant la surface terrestre.

4. Considérons l'atmosphère terrestre pour laquelle *l'hypothèse plans-parallèles* est faite. Que signifie cette hypothèse ?

5. On suppose qu'un seul corps de concentration *q(z)* absorbant dans l'infrarouge est présent dans l'atmosphère. On néglige tout phénomène de diffusion.

5.1. Soit une couche atmosphérique infinitésimale à l'altitude z, d'épaisseur dz, traversée par un rayonnement I_ν. On suppose que la couche est homogène, de température T, et on considère un rayonnement qui se propage dans la direction $\vec{R}$. En faisant un bilan sur les flux énergétiques, établir que l'équation de transfert radiatif faisant intervenir les luminances spectrales I_ν se met sous la forme :

$$\frac{dI_\nu}{dz}\left(z,\vec{R}\right) = -k_\nu(z)q(z)\left[I_\nu\left(z,\vec{R}\right) - J_\nu\left(z,\vec{R}\right)\right] \quad \textbf{(1)}$$

Que représentent k_ν et J_ν ?

5.2. On fait l'hypothèse de l'équilibre thermodynamique local.

5.2.1. Que signifie cette hypothèse ? Dans quel cas est-elle valable dans l'atmosphère terrestre ?

5.2.2. Quelle est alors l'expression de J_ν ? Préciser de quelle variable dépend désormais J_ν.

6. Considérons un radiomètre infrarouge observant l'atmosphère d'une planète avec visée au nadir. La résolution de l'équation de transfert radiatif (1) dans l'hypothèse d'équilibre thermodynamique local donne la luminance spectrale à la fréquence ν mesurée par le satellite :

$$I_\nu^{sat} = \varepsilon_\nu^{surf}\tau_\nu^{surf}B_\nu\left[T^{surf}\right] + \int_{z=0}^{z^{TOA}} B_\nu\left[T(z)\right]\frac{\partial\tau_\nu(z)}{\partial z}dz + \beta_\nu\int_{z^{TOA}}^{z=0} B_\nu\left[T(z)\right]\frac{\partial\tau_\nu(z)}{\partial z}dz \quad \textbf{(2)}$$

$$\text{où } \tau_\nu(z) = \exp\left[-\int_z^{z_{TOA}} k_\nu(z')\mu(z')\rho(z')dz'\right] \quad \textbf{(3)}$$

est la transmittance entre l'altitude z et le sommet de l'atmosphère z_{TOA}, *μ(z)* est le rapport de mélange massique de l'absorbant et *ρ(z)* est la densité atmosphérique totale.

$$\text{On pose } \chi_\nu(z) = \int_z^{z_{TOA}} k_\nu(z')\mu(z')\rho(z')dz' \quad \textbf{(4)}$$

l'épaisseur optique mesurée depuis le sommet de l'atmosphère z_{TOA}. On définit l'absorption spectrale entre *z* et z_{TOA} par $A_\nu(z)=1-\tau_\nu(z)$.

6.1. A quoi correspondent les 3 termes de l'équation 2 ?

6.2. Exprimer, en justifiant, l'expression de β(ν).

6.3. De quelles variables atmosphériques dépend $A_\nu(z)$? Que vaut $A_\nu(z^{TOA})$ au sommet de l'atmosphère ?

6.4. **Dans toute la suite de l'exercice**, nous faisons l'hypothèse que la surface de la planète se comporte comme un corps noir. Que devient l'équation (2) ?

Nous allons nous intéresser à l'expression de I_ν^{sat} à différentes fréquences qui correspondent à différentes absorptions atmosphériques.

6.5. Supposons d'abord que l'atmosphère est *transparente* au rayonnement infrarouge à la fréquence ν_1.

6.5.1. Comment varie la transmittance (ou de manière équivalente l'absorption spectrale) à ν_1 avec l'altitude ?

6.5.2. Quelle est l'expression de $I_{\nu_1}^{sat}$?

6.5.3. Déduire de la question 6.5.2. l'expression de la température de brillance à ν_1. A quelle grandeur thermodynamique l'observation à cette fréquence nous donne-t-elle directement accès ?

6.6. Supposons à présent que nous mesurions I_ν^{sat} à une fréquence ν proche de la fréquence centrale ν_0 d'une raie d'absorption et considérons une atmosphère *isotherme* telle que $T(P)=cste=T_A$. La surface de la planète se comporte toujours comme un corps noir.

6.6.1. Déterminer l'expression de I_ν^{sat} dans cette hypothèse en fonction de $A_\nu^{surf} = A_\nu(0)$ et diverses $B_\nu(T)$. Comparer son expression à celle de $I_{\nu_1}^{sat}$ obtenue en 6.5.3. **Commentaires ?**

6.6.2. Les variations spectrales de $B_\nu(T_{surf})$, $B_\nu(T_A)$ et $A_\nu(z)$ sont tracées sur la Figure 1. En utilisant les résultats obtenus à la question 6.5 et 6.6.1, tracer sur la Figure 1 la variation de I_ν^{sat} dans les **deux** cas $T_{surf} > T_A$ **et** $T_{surf} < T_A$. **Justifier**. Dans lequel de ces cas parle-t-on de raie d'émission ou d'absorption ?

6.6.3. Quel est le paramètre responsable de la variation rapide de I_ν^{sat} avec la fréquence ?

6.6.4. Si $T_{surf} = T_A$, que devient I_ν^{sat} ?

6.6.5. Ecrire I_ν^{sat} dans le cas d'une atmosphère isotherme avec $\tau_\nu^{surf}=0$. Comparer au cas du 6.6.4.

6.7. Supposons à présent que l'atmosphère est décrite par un profil de température à deux couches tel que $T(z)=T_A$ pour $0<z<z_A$ et $T(z)=T_B$ pour $z_A<z<z_{TOA}$. La température de surface est toujours T_{surf} et la surface est toujours supposée agir comme un corps noir.

6.7.1. Donner l'expression de I_ν^{sat} dans cette hypothèse, en fonction de $A_\nu(z)$ et $B_\nu(T)$ respectivement prises à différentes altitudes ou températures.

6.7.2. Supposons que $T_{surf}>T_B>T_A$ ce qui peut illustrer une atmosphère possédant une « surface très chaude », une « troposphère froide » et une « stratosphère chaude ». En se servant des variations des fonctions de Planck à ces trois températures, tracer, **en justifiant**, l'allure de I_ν^{sat} sur la figure 2. **Commentaires ?**

7. L'image fournie par le canal vapeur d'eau de METEOSAT est tracée en Figure 3. Ce canal est situé à 6,25 µm, centré sur la bande d'absorption de la vapeur d'eau. Une couleur foncée indique une température élevée ; une couleur claire indique une température faible.

7.1. A quoi correspondent les zones sombres/claires de l'image METEOSAT ?

7.2. Dans le cas d'un pixel clair (sombre), de quelle partie de l'atmosphère provient le rayonnement ?

7.3. Dans quel cas peut-on considérer que la haute troposphère est sèche (humide) ?

7.4. On désire avoir accès à un profil vertical de vapeur d'eau. Indiquer, en justifiant, comment placer différents canaux d'observation et donner leurs principales caractéristiques.

Figure 1. *Luminance spectrale du corps noir dans le domaine de fréquence considéré pour deux températures et absorption spectrale pour différentes hauteurs.*

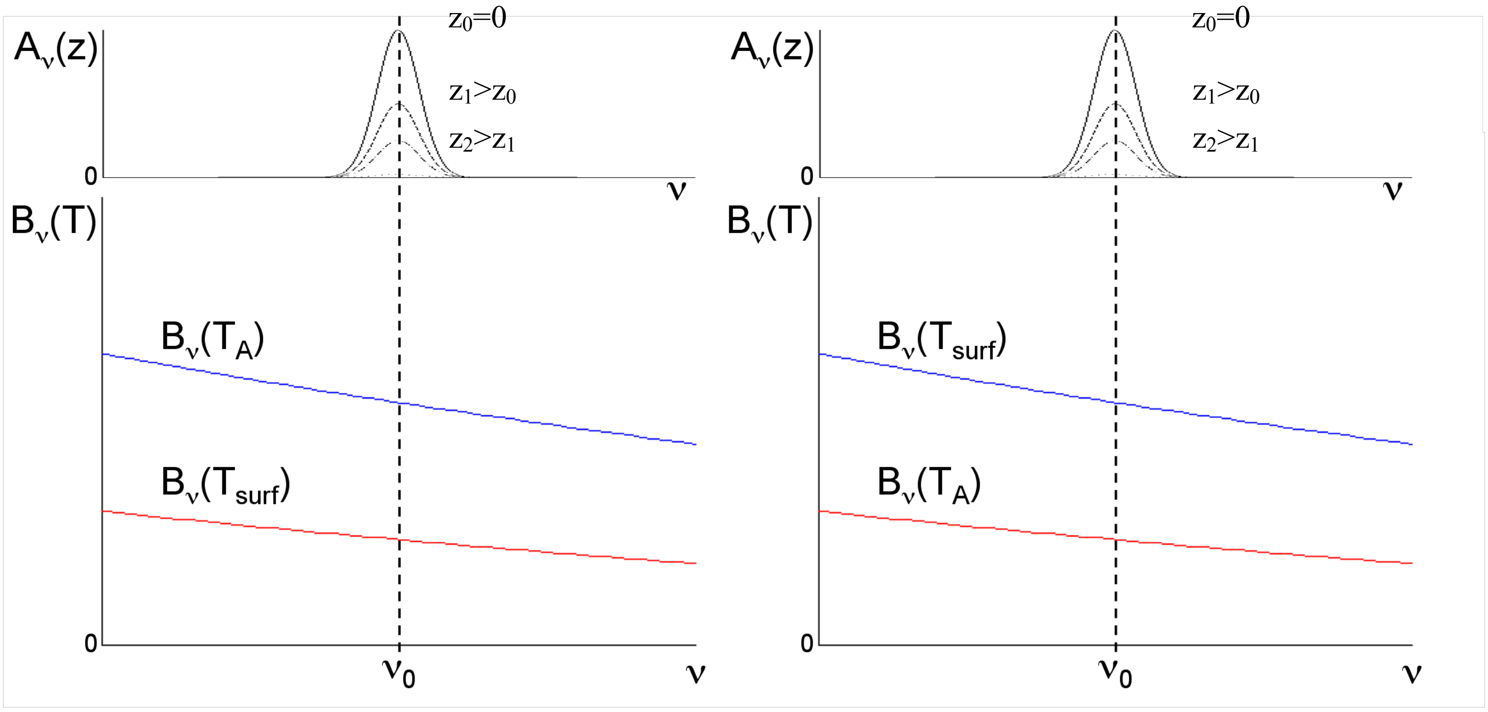

Figure 2. *Luminance spectrale du corps noir dans le domaine de fréquence considéré pour trois températures et absorption spectrale pour différentes hauteurs.*

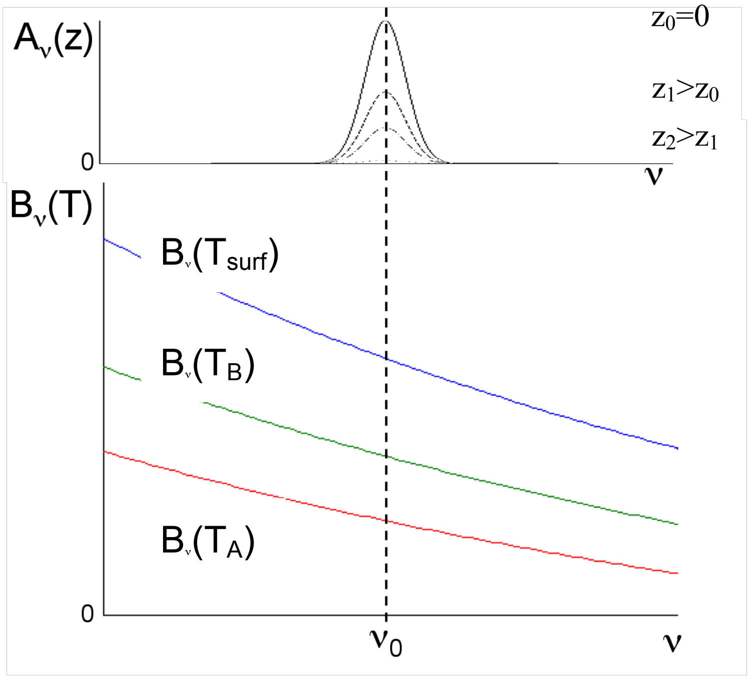

Figure 3. *Image METEOSAT, canal vapeur d'eau, du 1er Mars 1999*