

Examen 16 Décembre 2009
Transfert Radiatif Direct et Inverse

Sans document ni calculatrice

Durée : 1H45

N.B. : LA PLUPART DES QUESTIONS « I.J » SONT INDEPENDANTES.

LES FIGURES SONT A RENDRE AVEC LA COPIE.

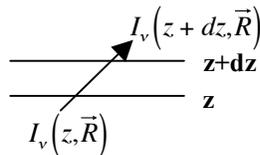
Dans ce problème, nous allons nous intéresser à l'estimation de la température et de l'humidité atmosphérique à partir d'observations réalisées dans les micro-ondes par un sondeur vertical du type SSM/T.

1. Base théorique : l'équation de transfert radiatif (notée ETR dans la suite)

Supposons une atmosphère *non-diffusante* et *plan-parallèle*.

1.1. Expliquez les termes en italique.

1.2. Soit une couche atmosphérique à l'altitude z , d'épaisseur dz , homogène en température $T(z)$ et concentrations des différents composants atmosphériques que l'on désigne par le facteur $\rho(z)$, et de coefficient d'absorption k_ν . On considère que la couche est traversée par un rayonnement $I_\nu(z, \vec{R})$ à la fréquence ν dans la direction \vec{R} .



En faisant un bilan sur les flux énergétiques :

1.2.1. Donner la définition de la transmission atmosphérique τ_ν entre z et $z+dz$.

1.2.2. Etablir que l'ETR faisant intervenir les luminances spectrales I_ν se met sous la forme :

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

Que représente J_ν ?

1.2.3. En combinant l'expression de la transmission atmosphérique établie en 1.2.1. et l'équation (1), montrer que l'ETR se met sous la forme :

$$\frac{dI_\nu(z, \vec{R})}{d\tau_\nu} = -\frac{1}{\tau_\nu}\left[I_\nu(z, \vec{R}) - J_\nu(z, \vec{R})\right] \quad (2)$$

1.3. On suppose que l'atmosphère est à l'équilibre thermodynamique local.

1.3.1. Qu'est-ce que l'équilibre thermodynamique local ? Dans quelle partie de l'atmosphère est-il valable ? Pourquoi ?

1.3.2. Qu'en déduisez-vous sur le rayonnement émis par la couche atmosphérique considérée en 1.2 ?

1.3.3. Que devient J_ν ? Réécrire l'ETR à partir de l'équation (2).

1.4. **On repère désormais l'altitude en termes de pression P et ce dans toute la suite du problème.** On note P_s la pression à la surface, T_s la température à la surface, et $\varepsilon_s(\nu)$ l'émissivité spectrale.

Par intégration de l'ETR établie en 1.3.3, montrer **en justifiant** que la luminance mesurée au sommet de l'atmosphère peut se mettre sous la forme :

$$I_\nu^{sat} = I_\nu(0) = I_\nu(P_s)\tau_\nu(P_s,0) + \int_{P_s}^0 B_\nu[T(P)] \frac{\partial \tau_\nu(P,0)}{\partial P} dP \quad (3)$$

avec la transmission

$$\tau_\nu(P,0) = \int_P^0 k_\nu(P') \rho(P') dP' \quad (4)$$

1.5. L'émissivité spectrale dans les micro-ondes est généralement très inférieure à l'unité et la réflexion du rayonnement à la surface est généralement très importante. En supposant que :

(i) la surface terrestre possède une émissivité $\varepsilon_s(\nu)$ et se trouve à la température T_s ,

(ii) la surface terrestre est opaque au rayonnement,

montrer que la contribution $I_\nu(P_s)$ de la surface au rayonnement se met sous la forme de deux termes dont vous donnerez l'expression.

2. Etude de l'absorption dans le domaine des micro-ondes

La figure 1 illustre la variation de la transmission atmosphérique en fonction de la fréquence dans le domaine des micro-ondes.

2.1. Sous quelle forme se font les échanges énergétiques dans ce domaine de fréquence ?

2.2. D'après la figure 1, quels sont les principaux corps responsables de l'absorption du rayonnement atmosphérique dans les micro-ondes ?

2.3. A quelles fréquences sont situées les principales raies d'absorption de ces corps ?

2.4. Justifier l'allure de la transmission atmosphérique totale.

2.5. Parmi les différentes raies d'absorption identifiées en 2.3, quelles sont les mieux adaptées pour réaliser une estimation du profil de la température atmosphérique ? Pourquoi ?

3. L'équation de transfert radiatif dans les micro-ondes

L'expression de la luminance au sommet de l'atmosphère fait intervenir la luminance du corps noir qui est donnée par la fonction de Planck. En fonction de la longueur d'onde λ , cette dernière peut se mettre sous la forme :

$$B_{\lambda}(T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}$$

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

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

3.2. Dans les micro-ondes, on a $\frac{h\nu}{kT} \ll 1$. En déduire l'expression approximée de la fonction de Planck dans les micro-ondes.

3.3. En déduire la variation de la fonction de Planck avec la température dans les micro-ondes. Quel est le nom de cette loi ?

3.4. Quelle est la définition de la température de brillance ?

3.5. Déduire de 3.3 et 3.4 l'expression de la température de brillance mesurée à la fréquence ν en fonction de I_{ν}^{sat} .

3.6. A partir des équations établies en 1.4 et 1.5, montrer que, dans les micro-ondes, l'ETR intégrée peut s'exprimer facilement en fonction de la température sous la forme :

$$T_B(\nu) = \varepsilon_s(\nu) T_s \tau_{\nu}(P_s, 0) + \int_{P_s}^0 T(P) \frac{\partial \tau_{\nu}(P, 0)}{\partial P} dP + (1 - \varepsilon_s(\nu)) \tau_{\nu}(P_s, 0) \int_0^{P_s} T(P) \frac{\partial \tau_{\nu}(P_s, P)}{\partial P} dP \quad (5)$$

3.7. Illustrer schématiquement à quoi correspondent les différents termes de l'équation (5).

3.8. Il est plus aisé de réécrire l'ETR en ne faisant apparaître que la transmission entre l'altitude P et le sommet de l'atmosphère.

3.8.1. En utilisant la définition de la transmission, exprimer $\tau_{\nu}(P_s, P)$ en fonction de $\tau_{\nu}(P, 0)$.

3.8.2. En déduire l'expression de $\frac{\partial \tau_{\nu}(P_s, P)}{\partial P}$ en fonction de $\frac{\partial \tau_{\nu}(P, 0)}{\partial P}$.

3.8.3. Montrer que dans ces conditions, la luminance mesurée par le satellite se résume à :

$$T_B(\nu) = \varepsilon_s(\nu) T_s \tau_{\nu}(P_s, 0) + \int_{P_s}^0 H_{\nu}(P) T(P) \frac{\partial \tau_{\nu}(P, 0)}{\partial P} dP$$

Exprimer $H_{\nu}(P)$ en fonction de $\varepsilon_s(\nu)$, $\tau_{\nu}(0, P_s)$ et $\tau_{\nu}(0, P)$.

4. Estimation de la température atmosphérique à partir des estimations de SSM/T

Le sondeur SSM/T (Special Sensor Microwave/Temperature), développé dans le cadre du DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) de l'US Air Force, a été lancé pour la

première fois en 1979, puis successivement en 1983, 1987 et 1991. Ces instruments mesurent le rayonnement à l'aide de 7 canaux situés à 50.5, 53.2, 54.35, 54.9, 58.4, 58.825 et 59.4 GHz.

4.1. Justifiez du choix de ces fréquences pour l'estimation de la température atmosphérique.

4.2. La fonction de poids d'un canal $K_v(P)$ est définie par

$$T_B^{sat}(\nu) = \varepsilon_s(\nu)\tau_v(P_s,0)T_s + \int_{P_s}^1 T(P)K_v(P)dP$$

A partir de l'équation établie en 3.8.3, montrer que $K_v(P)$ se met sous la forme

$$K_v(P) = 1 + (1 - \varepsilon_s(\nu)) \left[\frac{\tau_v(P_s,0)}{\tau_v(P)} \right]^2 \frac{\partial \tau_v(P_s,0)}{\partial P}$$

4.3. Les fonctions de poids des 7 canaux SSM/T pour un angle d'observation 0° sont tracées sur la figure 2.

4.3.1. Quels sont les parties de l'atmosphère vues par chaque canal ?

4.3.2. En utilisant la figure 1 et la figure 2, justifiez la répartition des fonctions de poids en fonction de la fréquence.

4.3.3. Tracez sur la figure 2 l'allure qu'auraient les fonctions de poids pour un angle d'observation de 57° . **Justifiez.**

4.3.4. Supposons que, pour le canal 1, la transmission soit en fait de 1 sur toute la colonne. Que devient la température de brillance du canal 1 ? A quoi donne-t-elle accès ?

4.4. En utilisant l'expression de $T_B(\nu)$ établie à la question 3.8.3, il est possible de faire tourner un programme d'estimation des profils de température à partir des observations de SSM/T. La figure 3 montre l'erreur (RMS) de l'estimation de 3 profils de température basée sur l'algorithme officiel de l'équipe SSM/T dans le cas d'une observation nuageuse (gauche), d'une observation partiellement nuageuse (milieu) et d'une observation claire.

4.4.1. Que déduisez-vous de la comparaison de ces 3 estimations ?

4.4.2. En vous appuyant sur les fonctions de poids tracées en figure 2, justifier l'évolution verticale de l'erreur obtenue sur la figure 3.

4.4.3. Quelles solutions instrumentales pourraient être retenues pour améliorer l'estimation de la température ?

FIGURES
A RENDRE AVEC LA COPIE

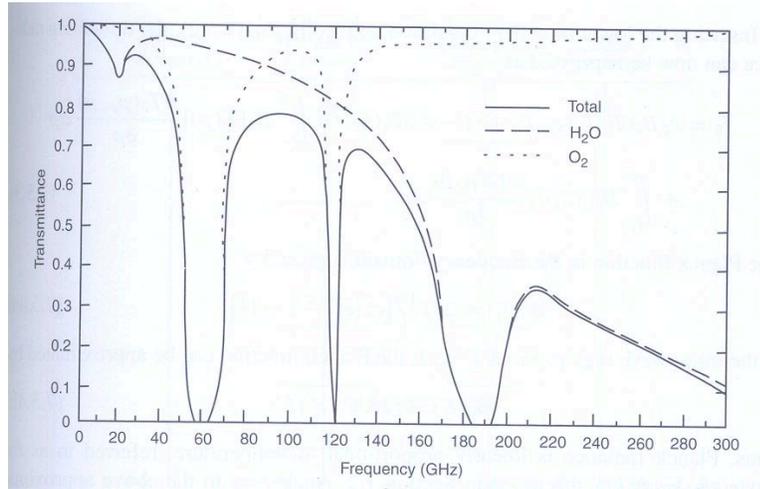


Figure 1. Evolution de la transmission atmosphérique dans les micro-ondes.

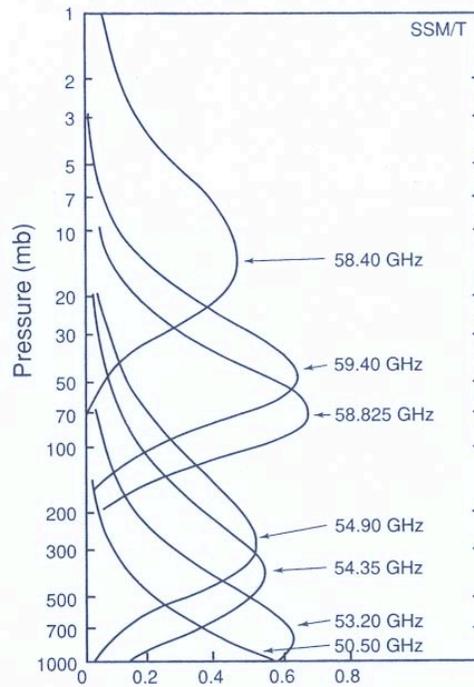


Figure 2. Fonction de poids au nadir des 7 canaux de l'instrument SSM/T.

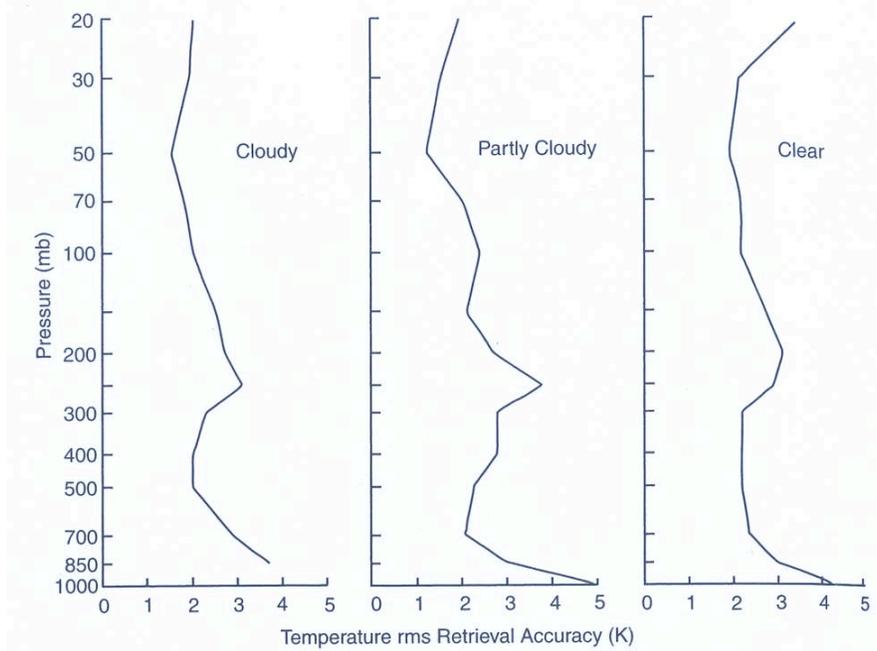


Figure 3. Erreurs sur le profil de température estimé à partir d'observations de SSM/T pour un cas nuageux (gauche), partiellement nuageux (milieu) et clair (droite).