

Les questions sont relativement indépendantes. Les réponses doivent être formulées avec concision et rigueur.  $P$  représente la pression atmosphérique,  $T$  la température,  $\rho$  la masse volumique,  $z$  l'altitude,  $\phi$  la latitude,  $u$   $v$   $w$  les composantes zonale/méridienne/verticale du vent. La constante de Stefan-Boltzman vaut  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ .

Considérons Titan à l'été de l'hémisphère sud. La figure donne les variations verticales et latitudinales de la moyenne zonale de la température mesurée par spectrométrie infra-rouge à bord de Cassini (**attention l'hémisphère sud, hémisphère d'été, est situé à droite sur la figure**). L'équation du mouvement sur l'axe méridien [MAM] et l'équilibre du vent thermique sur les coordonnées  $x, y, P$  [VT] sont :

$$\frac{dv}{dt} + \frac{u^2 \tan \phi}{a} + \frac{wu}{a} = -2\Omega u \sin \phi - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad [\text{MAM}] \quad 2\Omega \sin \phi \frac{\partial u}{\partial P} + 2u \frac{\partial u}{\partial P} \frac{\tan \phi}{a} = -\frac{R}{aP} \frac{\partial T}{\partial \phi} \quad [\text{VT}]$$

- Q1 Expliciter la température équivalente  $T_e$  en fonction de  $A_b$ ,  $\mathcal{F}_s$  et  $\sigma$  et calculer sa valeur sur Titan.
- Q2 Exprimer  $\tau_\infty$  du modèle à deux faisceaux en fonction de  $T_e$  et  $T_s$ . Indiquer quel phénomène physique  $\tau_\infty$  représente. Calculer la valeur de  $\tau_\infty$  correspondant aux données de Titan.
- Q3 Proposer une adaptation du modèle à deux faisceaux (résolution non demandée) pour ajouter les aérosols stratosphériques absorbants dans le visible. Justifier que cette brume exerce un "anti-effet de serre".
- Q4 Exprimer l'échelle de hauteur  $H(z)$  telle que  $dp/p = -dz/H(z)$  et en estimer une valeur approximative  $H_0$  dans l'atmosphère de Titan en choisissant une valeur constante de température.
- Q5 Comparer l'épaisseur de l'atmosphère de Titan (évaluée environ à 10 fois  $H_0$ ) au rayon planétaire. Discuter le cas terrestre et conclure sur le respect de l'hypothèse "atmosphère couche mince" sur Titan.
- Q6 Donner quelques éléments généraux contrôlant la formation de nuages dans les atmosphères planétaires (tels les nuages de méthane sur Titan).
- Q7 Dans la troposphère de Titan ( $P > 2$  mbar), la température est maximale à l'été sud à  $\phi_0 \sim 60^\circ\text{S}$ , alors que sur Terre  $\phi_0 \sim 15^\circ\text{S}$ . Expliquer cette différence (la surface de Titan est composée de roches et poussières).
- Q8 Expliquer pourquoi le contraste troposphérique de température entre hémisphères donne naissance dans la stratosphère de Titan à une circulation méridienne de l'hémisphère d'été vers l'hémisphère d'hiver. Proposer un schéma  $z - \phi$  (altitude-latitude) comportant les lignes isobares et la circulation correspondante.
- Q9 Éclaircir le mécanisme qui cause le maximum polaire de température de 200 K à 0.01 mbar dans les mesures. Proposer une évaluation numérique du chauffage induit par un mouvement sur une décade de pression.
- Q10 Indiquer dans MAM et VT quels termes définissent les équilibres géostrophique et cyclostrophique. Justifier quel équilibre (cyclostrophique ou géostrophique) est de mise dans l'atmosphère de Titan.
- Q11 Donner deux raisons distinctes pour lesquelles la circulation méridienne de la stratosphère de Titan à l'été sud peut s'étendre quasiment d'un pôle à l'autre, contrairement au cas terrestre.
- Q12 Justifier que sur Titan les variations de vent zonal  $u$  peuvent s'évaluer grâce à l'expression

$$\frac{\partial u^2}{\partial \ln P} = -\frac{R}{\tan \phi} \frac{\partial T}{\partial \phi}$$

- Q13 A partir des mesures de température au niveau 3 mbar entre les latitudes  $60^\circ\text{N}$  et  $30^\circ\text{N}$ , et en supposant un vent nul au niveau 10 mbar, calculer le vent zonal  $u$  à 0.1 mbar au voisinage de la latitude  $45^\circ\text{N}$ . Commenter en comparant au jet d'ouest de  $190 \text{ m s}^{-1}$  simulé par un modèle de climat global de Titan.
- Q14 (Bonus) La zone équatoriale de Titan est soumise à des vents en super-rotation. Justifier pourquoi cela ne peut être causé par les circulations axisymétriques (c'est-à-dire de symétrie zonale).

Sources utilisées : Achterberg et al. Icarus 2008. Lebonnois et al. Phil. Trans. R. Soc. A 2009.

	Terre	Titan	description
$a$ (km)	6378	2575	rayon planétaire moyen
$g$ ( $\text{m s}^{-2}$ )	9.81	1.35	accélération de la gravité
$T_s$ (K)	288	95	température de surface (moy)
$\Omega$ ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )	7.3	0.46	taux de rotation planétaire
$\mathcal{F}_s$ ( $\text{W m}^{-2}$ )	1367	15	constante solaire
$A_b$	0.31	0.22	albedo bolométrique (intégré)
$p_0$ (bar)	1	1.5	pression de référence
$c_p$ ( $\text{J K}^{-1} \text{ g}^{-1}$ )	1.00	1.04	capacité calorifique ( $p$ cst)
$R$ ( $\text{J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ )	287	299	constante des gaz massique
$\mu$ ( $\text{g mol}^{-1}$ )	28.9	27.8	masse molaire atmosphérique

