

Exploration de l'atmosphère de Jupiter

Documents et calculatrices autorisés. Les questions sont indépendantes autant que possible. Les réponses doivent être formulées avec concision et rigueur. La constante de Stefan-Boltzman vaut $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$. La constante des gaz parfaits vaut $R^* = 8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$, la version massique étant notée $R = R^*/M$ où M est la masse molaire en g mol^{-1} qui dépend de la composition atmosphérique. P représente la pression atmosphérique, T la température, ρ la masse volumique, z l'altitude, ϕ la latitude, u v w les composantes zonale/méridienne/verticale du vent. Les paramètres planétaires utiles sont donnés dans le tableau suivant.



Depuis 2016, la sonde orbitale Juno scrute la planète Jupiter, permettant des progrès notables sur la connaissance de son atmosphère, avec notamment l'ambition de découvrir ce qui se cache sous la couche de nuages visible.

Bilan énergétique Les dernières interprétations du survol de Jupiter par la mission Cassini indiquent que le flux de chaleur interne (reste de contraction gravitationnelle lors de la formation planétaire) F_{int} vaut 5.4 W m^{-2} .

- Q1 Calculer le flux de rayonnement infrarouge sortant OLR de l'atmosphère de Jupiter en W m^{-2} en supposant l'équilibre TOA (*Top-Of-Atmosphere*) vérifié. Commenter en comparant à F_{int} .

Structure atmosphérique verticale Sur les planètes géantes, l'altitude n'est pas utilisée comme coordonnée verticale en raison de l'absence de surface.

- Q2 Expliquer pourquoi la pression peut toujours être utilisée comme coordonnée verticale dans l'atmosphère.
 Q3 Calculer l'échelle de hauteur H de l'atmosphère de Jupiter pour une température $T_0 = 220 \text{ K}$.
 Q4 Rappeler comment on obtient la formule du profil radiatif dans la troposphère de Jupiter

$$\frac{d \ln T}{d \ln P} = \frac{1}{4(1 + \tau)} P \frac{d\tau}{dP}$$

avec τ épaisseur optique dans l'infrarouge. *La démonstration complète n'est pas demandée.*

- Q5 Trouver la pression limite pour laquelle l'atmosphère est instable. Supposer que, sous l'effet respectivement de l'élargissement collisionnel et de la variation de la capacité calorifique avec la température, $\tau = P/P_0$ et $c_p = c_p^0 + P/100$ avec $P_0 = 5 \times 10^4 \text{ Pa}$ et c_p^0 la valeur dans le tableau en tête d'énoncé.

Zones, ceintures et nuages L'apparence visible de Jupiter montre des ceintures (bandes sombres rougeâtres) et des zones (bandes blanches brillantes). Les zones de Jupiter ont une couverture nuageuse étendue, avec des nuages formés de particules de glace d'eau et d'ammoniac (NH_3). Dans la haute troposphère de Jupiter, la température est plus élevée dans les ceintures que dans les zones ; la tendance s'inverse dans la basse troposphère. Par ailleurs, l'étude des nuages et de la répartition d'ammoniac indique une subsidence dans les ceintures et une ascendance dans les zones, à la fois dans la basse et haute troposphère.

- Q6 Expliquer les mécanismes généraux régissant l'apparition et la croissance des particules nuageuses.
- Q7 Justifier si les courants verticaux dans une ceinture et une zone contiguës correspondent à une circulation thermique directe ou indirecte, en raisonnant avec la température dans la haute troposphère.
- Q8 Expliquer pourquoi, dans la basse troposphère, les ascendances dans les zones chaudes et les subsidences dans les ceintures froides sont incompatibles avec des transferts d'énergie de manière adiabatique.
- Q9 Donner un mécanisme diabatique possible pour réchauffer la basse troposphère dans les zones de Jupiter.

Dynamique atmosphérique Jupiter donne à voir plusieurs manifestations de dynamique atmosphérique. La circulation atmosphérique de Jupiter est dominée par des grands courants zonaux (jets) d'une échelle de vitesse typique de $50\text{-}100\text{ m s}^{-1}$ sur une échelle spatiale d'environ 10000 km (extension selon la latitude). Les mesures de champ de gravité de Juno ont très récemment permis de savoir que ces jets zonaux se prolongent jusqu'à une profondeur de 3000 km sous la couche de nuages. La grande tache rouge de Jupiter est une large région de haute pression située à une latitude de 20° dans l'hémisphère sud, autour de laquelle les vents peuvent atteindre une vitesse de 100 m s^{-1} dans la troposphère. Par ailleurs, les images haute résolution de Juno ont montré une grande richesse d'ondes et de tourbillons à plus petite échelle. L'échelle des ondes et instabilités qui se développent dans l'atmosphère de Jupiter est donnée par le rayon de déformation de Rossby, combinant les échelles typiques de l'équilibre hydrostatique et de l'équilibre géostrophique, qui est défini par

$$L_D = \frac{\sqrt{gH}}{f}$$

avec le paramètre de Coriolis $f = 2\Omega \sin \phi$.

- Q10 Justifier que Jupiter suit en bonne approximation l'équilibre géostrophique.
- Q11 Déterminer le sens de rotation des vents dans la grande tache rouge de Jupiter.
- Q12 Expliciter comment lier quantitativement les mesures de champ de densité ρ , obtenues par mesures gravimétriques, à la décroissance de l'intensité des jets zonaux u avec l'altitude.
- Q13 Calculer une taille typique des ondes et instabilités dans l'atmosphère de Jupiter. Commenter.
- Q14 Etudier les conditions d'apparition de l'instabilité barotrope dans un jet vers l'ouest sur Jupiter qui suit un profil méridien parabolique

$$u(y) = -u_0 + \xi (y - y_0)^2$$

où ξ est une constante. La condition nécessaire pour qu'un jet zonal de vitesse u soit en instabilité barotrope est que

$$\beta - \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

change de signe, avec y la coordonnée cartésienne locale méridienne du sud vers le nord, qui est telle que $dy = R_p d\phi$, et β la dérivée selon y du paramètre de Coriolis f .

Références: Li et al. (Nature Communications 2018), Kaspi et al. (Nature 2018), Ouvrage Sanchez-Lavega (CRC Press 2011), Chapitre Ingersoll et al. (Cambridge University Press 2004), Image par G. Eichstädt and S. Doran à partir de données JunoCAM.