

# Exploration des caractéristiques de l'exoplanète GJ581c

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  $\text{g mol}^{-1}$  qui dépend de la composition atmosphérique.  $P$  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. Les paramètres planétaires utiles sont donnés dans le tableau suivant.

Planet	Radius $R_p$ (m)	Stellar flux $\mathcal{F}_s$ ( $\text{W m}^{-2}$ )	Rotation rate $\Omega$ ( $\text{s}^{-1}$ )	Albedo $A_b$	Gravity $g$ ( $\text{m s}^{-2}$ )	Specific heat capacity $c_p$ ( $\text{J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ )
Earth	$6.371 \times 10^6$	1368	$7.272 \times 10^{-5}$	0.306	9.798	1004
GJ581c	$1.179 \times 10^7$	3471	$5.59 \times 10^{-6}$	0.3	18.4	1003
Venus	$6.052 \times 10^6$	2614	$6.229 \times 10^{-7}$	0.75	8.87	900

L'exoplanète GJ581c a été découverte en 2007 en orbite autour de la naine rouge Gliese 581 à environ 20 années-lumière du Soleil. La question de sa présence dans la zone habitable de son étoile s'est notamment posée.

- Q1 Rappeler l'équilibre TOA et calculer la température de surface  $T_s$  de GJ581c si  $OLR = \sigma T_s^4$ .
- Q2 Estimer une nouvelle valeur de cette température  $T_s$ , en supposant que l'atmosphère de GJ581c est d'épaisseur optique totale  $\tau_\infty = 1$  dans l'infrarouge (utiliser le résultat du modèle à deux faisceaux). Commenter sur la possibilité de la présence d'eau liquide à la surface de GJ581c (un critère d'habitabilité).

L'exoplanète GJ581c a été détectée par la méthode de vélocimétrie radiale, mais est-il possible de mesurer les propriétés de son atmosphère par transit ? Dans un transit vu depuis un télescope sur Terre, la planète passe devant son étoile. Il en résulte une diminution du flux stellaire perçu depuis la Terre, associée au disque planétaire. Si l'atmosphère est suffisamment épaisse, elle peut causer une diminution supplémentaire de flux stellaire perçu depuis la Terre. La précision de détection d'une diminution de flux par transit est  $10^{-3}$ .

- Q3 Calculer l'échelle de hauteur  $H$  de l'atmosphère de GJ581c pour une température  $T_0 = 200 \text{ K}$  pour
- une atmosphère dominée par  $\text{N}_2$  (cas 1, super-Terre,  $M = 28 \text{ g mol}^{-1}$ )
  - une atmosphère dominée par  $\text{H}_2$  (cas 2, mini-Neptune,  $M = 2 \text{ g mol}^{-1}$ )
- Q4 Expliquer pourquoi  $H$  est une bonne indication de l'épaisseur de l'atmosphère.
- Q5 Comparer la surface de transit du disque planétaire de GJ581c à celle de son atmosphère, puis conclure sur la possibilité de détecter l'atmosphère par transit, dans les deux cas (super-Terre ou mini-Neptune).

On cherche à obtenir des informations sur les variations de température selon la verticale sur GJ581c.

- Q6 Justifier que la température troposphérique décroît plus vite avec l'altitude sur GJ581c que sur Terre.
- Q7 Montrer que la fréquence de Brunt-Väisälä  $N$  dont le carré est  $N^2 = \frac{g}{\theta} \frac{d\theta}{dz}$  (où  $\theta$  est la température potentielle) s'écrit également

$$N^2 = \frac{g}{T} \left( \frac{dT}{dz} + \frac{g}{c_p} \right)$$

- Q8 Calculer  $N^2$  pour une atmosphère isotherme  $T_0 = 200 \text{ K}$  et indiquer son caractère stable ou instable.
- Q9 Expliquer quelles caractéristiques physiques de l'atmosphère de GJ581c doivent être réunies pour que des nuages d'eau puissent s'y former.

En raison de la rotation synchrone, un fort maximum de température est attendu à l'équateur au voisinage du point substellaire de GJ581c (point faisant face à l'étoile) par rapport aux autres régions de la planète.

Q10 Justifier quelles circulations thermiques directes se développent sur GJ581c, en réponse à ces contrastes de température (un schéma du champ de pression en fonction de l'altitude peut être utilisé pour illustrer).

Q11 Calculer pour GJ581c, la Terre et Vénus, le nombre de Rossby

$$\mathcal{R} = \frac{U}{fL}$$

en considérant un vent de  $U = 50 \text{ m s}^{-1}$  se développant sur la moitié de la planète ( $L = R_p/2$ ) avec un paramètre de Coriolis  $f = 2\Omega \sin \phi$  évalué à  $45^\circ$  de latitude. Déterminer quel équilibre (géostrophique, cyclostrophique, vent gradient) prédomine sur chacune des trois planètes.

Q12 Expliquer comment calculer l'augmentation avec l'altitude du vent zonal  $u$  dans les moyennes latitudes, à partir du contraste de température entre région substellaire et pôle (**calcul non demandé**).

Q13 Justifier par un argument de conservation du moment cinétique axial

$$\mathcal{M} = R_p \cos \varphi (\Omega R_p \cos \varphi + u)$$

qu'une circulation du pôle vers le point substellaire à l'équateur devrait donner naissance à un courant-jet vers l'ouest (rétrograde) proche de l'équateur.

Des simulations numériques montrent au contraire que les vents équatoriaux de GJ581c sont en super-rotation prograde (vers l'est) sous l'influence d'ondes de Rossby de taille planétaire.

Q14 Expliquer graphiquement la propagation vers l'ouest des ondes de Rossby planétaires.

Q15 Calculer pour GJ581c le rayon de déformation de Rossby  $\mathcal{L}$ , qui indique la taille typique des ondes atmosphériques qui se développent dans l'atmosphère de GJ581c

$$\mathcal{L} = \sqrt{\frac{NH}{\beta}} \quad \text{avec} \quad \beta = \frac{2\Omega}{R_p}$$

Commenter le résultat.

Références: Leconte et al. *A&A* 2013, Showman and Polvani *ApJ* 2011.