

# Caractérisation de l'atmosphère de Neptune

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 $g$ ( $\text{m s}^{-2}$ )	Heat capacity $c_p$ ( $\text{J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ )	Gas "constant" $R$ ( $\text{J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ )
Earth	$6.371 \times 10^6$	1368	$7.272 \times 10^{-5}$	0.306	9.798	1004	288.7
Neptune	$2.462 \times 10^7$	1.53	0.000 108 3	0.29	11.15	$1.15 \times 10^4$	4157

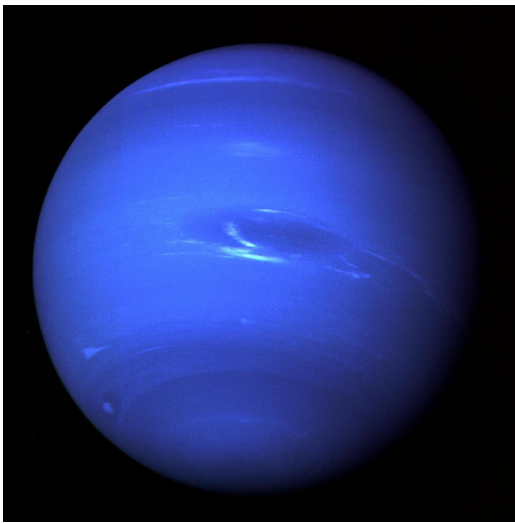


Figure 1: Il y a trente ans, en 1989, Voyager 2 survolait Neptune. La sonde a capturé cette image de la couche atmosphérique visible de Neptune située à environ 1 bar ( $10^5 \text{ Pa}$ ). Depuis, les études de cette planète géante gazeuse à l'atmosphère encore mystérieuse se basent sur des observations par télescopes, au sol ou spatiaux, dont les progrès présents et futurs s'accroissent. Une mission orbitale dédiée pourrait voir le jour à la décennie 2030.

**Bilan énergétique et structure verticale** Sur Neptune, le flux de chaleur interne (reste de contraction gravitationnelle lors de la formation planétaire) est  $F_{\text{int}}$  vaut  $0.43 \text{ W m}^{-2}$ . Sur les planètes géantes comme Neptune, la pression plutôt que l'altitude est utilisée comme coordonnée verticale en raison de l'absence de surface.

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

0.27

Q2 Expliquer ce que l'échelle de hauteur  $H$  représente. Calculer sa valeur pour Neptune avec  $T_0 = 65 \text{ K}$ .

24

Q3 Expliquer comment le profil vertical de température pour Neptune à l'équilibre radiatif peut être obtenu et pourquoi l'information sur la présence d'une surface n'est pas nécessaire pour ce calcul.

**Saisons sur Neptune** La durée d'une année Neptune est 165 années terrestres. La constante de temps radiative  $\tau$  est le temps caractéristique que met une couche atmosphérique à évacuer une perturbation de température par rayonnement infrarouge. Pour une couche d'épaisseur  $h = H/10$  (avec  $H$  l'échelle de hauteur) considérée à une pression  $P$ , elle peut s'exprimer simplement par

$$\tau = \frac{c_p (P/R) h}{OLR}$$

La constante de temps radiative  $\tau$  peut être considérée comme l'équivalent atmosphérique de l'inertie thermique.

- Q4 Calculer la constante de temps radiative pour Neptune au niveau visible  $P = 10^5$  Pa (1 bar). Comparer à la durée d'une année Neptune et conclure sur la possibilité de variations saisonnières.

78 années terrestres

- Q5 Expliquer pourquoi cette situation de constante de temps radiative relativement élevée pour Neptune indique que les cellules de Hadley sur Neptune se comportent vraisemblablement comme sur Terre.

**Nuages** Les taches blanches visibles sur les images de Neptune sont des orages formés de particules de glace d'eau et d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ). Ils sont le signe de la présence d'une épaisse couche de nuages d'eau située à une pression de 100 bars, ainsi que d'une couche de nuages d'ammoniac située à une pression de 10 bars.

- Q6 Détailler quels mécanismes contrôlent la formation de particules nuageuses.
- Q7 Expliquer comment est modifié le gradient vertical de température dans la troposphère de Neptune en présence de nuages d'eau et en quoi cela peut favoriser de puissants orages.

**Dynamique atmosphérique** Neptune est une planète à rotation rapide. La circulation atmosphérique de Neptune est dominée entre  $45^\circ\text{S}$  et  $45^\circ\text{N}$  par un grand courant-jet zonal vers l'ouest (rétrograde) d'une vitesse typique de  $400 \text{ m s}^{-1}$  et deux courants-jets vers l'est (prograde) présentant un maximum de vitesse de  $200 \text{ m s}^{-1}$  aux latitudes  $60^\circ\text{N}$  et  $60^\circ\text{S}$ . Les images Voyager 2 de Neptune indiquent par ailleurs la présence d'un *Great Dark Spot*, zone de haute pression à la latitude  $20^\circ\text{S}$ .

- Q8 Justifier que Neptune suit en bonne approximation l'équilibre géostrophique. Indiquer le sens de rotation des vents dans le Great Dark Spot de Neptune.

Rossby =  $7 \times 10^{-2}$

- Q9 Expliquer par un argument de dynamique atmosphérique (différent donc de celui en Q5) que les cellules de Hadley sur Neptune sont vraisemblablement confinées aux tropiques.

- Q10 Expliquer sous quelles conditions le moment cinétique axial

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

se conserve. Justifier qu'une circulation des tropiques vers l'équateur devrait donner naissance à un courant-jet vers l'ouest (rétrograde) proche de l'équateur.

- Q11 Calculer la vitesse du courant rétrograde équatorial considérant une parcelle initialement de vitesse zonale  $u_0 = 0$  à la latitude  $\varphi_0 = 30^\circ\text{N}$  se dirigeant vers l'équateur. Commenter le résultat.

$u = 8 \times 10^2$

- Q12 Détailler comment estimer la variation verticale du vent zonal  $u$ , à partir du vent zonal et du champ horizontal de température mesurés à une altitude donnée (par exemple sur la couche visible de Neptune).

- Q13 Expliquer pourquoi la présence du Great Dark Spot proche de l'équateur implique l'émission d'ondes de Rossby. Expliquer graphiquement la propagation vers l'ouest de ces ondes.

- Q14 Justifier pourquoi ces ondes pourraient expliquer les différences entre le calcul Q11 et les observations.

Références: LeBeau & Dowling (Icarus 1998), Ouvrage Sanchez-Lavega (CRC Press 2011).