

# Mars et ses tempêtes de poussière

**Barème : un point par question numérotée, total sur 17 points (une question bonus est au choix parmi les 18 questions proposées). 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.

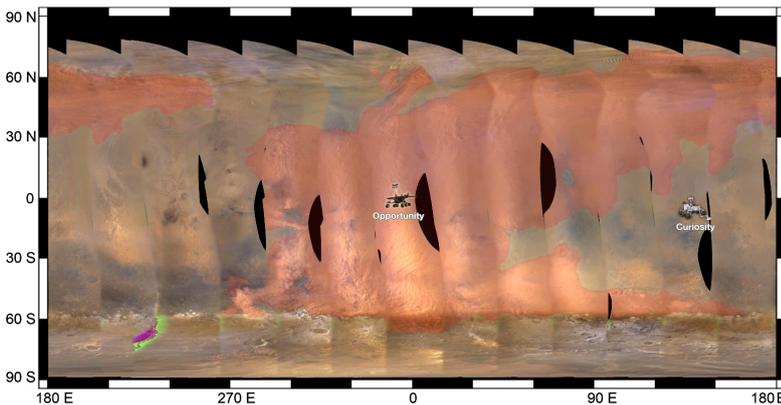


FIGURE 1 – A l'été 2018, sur Mars, une tempête de poussière "globale" a fait rage sur Mars, causant la perte du robot Opportunity. L'image est une mosaïque d'images visibles capturées depuis la sonde Mars Reconnaissance Orbiter.

**Considérations radiatives** L'atmosphère de Mars est fine, d'une pression atmosphérique à la surface d'environ 600 Pa, et composée à 95% de  $\text{CO}_2$ . S'y maintient un voile permanent de poussières en suspension de taille micrométrique. Ces poussières sont absorbantes dans l'infrarouge et très absorbantes dans le visible (environ un facteur 3 de l'absorption infrarouge). La température de surface observée en moyenne globale est 220 K.

- Q1 Expliquer brièvement la méthode pour obtenir la formule du modèle à deux faisceaux  $OLR = \frac{\sigma T_s^4}{1 + \frac{\tau_\infty}{2}}$ .
- Q2 Estimer la valeur pour Mars de l'épaisseur optique intégrée dans l'infrarouge  $\tau_\infty$  dans ce modèle.
- Q3 Commenter cette valeur de  $\tau_\infty$ . Indiquer le(s) élément(s) participant à l'effet de serre sur Mars.

**Tempêtes de poussière** A l'été sud, Mars est fréquemment traversée par des tempêtes de poussière locales et régionales. Au cours de la journée, une tempête de poussière cause un fort chauffage de l'atmosphère via l'absorption du rayonnement incident solaire par les particules de poussière mises en suspension depuis la surface. Typiquement, en une seule demi-heure, un chauffage de 7 K peut se développer entre l'intérieur de la tempête et l'extérieur (l'environnement). Certaines années, plusieurs tempêtes régionales étendues provoquent une augmentation globale significative de la quantité de poussière dans l'atmosphère de Mars (cf. Figure).

- Q4 Justifier que la température de surface la nuit est plus élevée dans une tempête de poussière.
- Q5 Expliquer ce que représente la CAPE  $\mathcal{C}$ , définie dans une ascendance convective à partir de la température  $T_p$  d'une parcelle ascendante et de la température  $T_e$  de l'environnement

$$\mathcal{C} = \int_{\text{ascendance}} g \frac{T_p - T_e}{T_e} dz$$

- Q6 Estimer et commenter la vitesse verticale en journée dans une tempête de poussière locale, se développant dans les 5 premiers kilomètres au-dessus de la surface dans un environnement tel que  $T_e = 250 \text{ K}$ .

**Structure verticale** Mars est dépourvue de stratosphère permanente comme sur Terre – la transition entre troposphère et mésosphère se fait à environ 60-80 km au dessus de la surface. A l'été sud, saison des tempêtes de poussière, la quantité de poussière augmente fortement dans la troposphère de Mars. La distribution verticale de ces particules de poussière change également. Habituellement, l'altitude  $z_{\text{dust}}$  à partir de laquelle la quantité de

particules de poussière en suspension diminue significativement est environ 40 à 50 km ; à la saison des tempêtes de poussière, cette altitude est plus proche de 70 à 80 km.

- Q7 Justifier le régime radiatif-convectif des premières dizaines de kilomètres au-dessus de la surface sur Mars.
- Q8 Expliquer pourquoi les tempêtes de poussière de Mars peuvent créer une stratosphère saisonnière.
- Q9 Expliquer ce que l'échelle de hauteur  $H$  représente. Calculer sa valeur sur Mars pour une température atmosphérique de  $T_0 = 200$  K (situation habituelle) et  $T_0 = 300$  K (situation de tempête de poussière).
- Q10 Indiquer si l'augmentation de  $z_{\text{dust}}$  suite à tempête de poussière provient d'une dilatation atmosphérique.

**Nuages** La vapeur d'eau est un gaz trace de l'atmosphère de Mars, présente en quantité absolue très faible. Des nuages d'eau se forment dans l'atmosphère de Mars ; la survenue d'une tempête de poussière sur Mars cause une disparition des nuages d'eau dans l'atmosphère de Mars.

- Q11 Expliciter les conditions atmosphériques qui pilotent la formation de particules nuageuses.
- Q12 Donner une justification possible pour que la survenue d'une tempête de poussière sur Mars
- provoque une augmentation de la couverture nuageuse
  - provoque une diminution de la couverture nuageuse

**Dynamique atmosphérique sur Mars, hors tempêtes de poussière** A l'été nord, Mars est dépourvue de tempêtes de poussière (régionales ou globales). Chaque année martienne à cette saison, la dynamique atmosphérique y est similaire : un vent zonal très faible dans l'hémisphère d'été (nord) et un courant-jet assez intense de  $100 \text{ m s}^{-1}$  dans l'hémisphère d'hiver (sud).

- Q13 Calculer pour Mars le nombre de Rossby  $\mathcal{R} = \frac{U}{\Omega L}$  avec  $U$  échelle de vent typique sur un hémisphère ( $L = R_p/2$ ). Expliquer pourquoi cela implique que l'équilibre dominant sur Mars est géostrophique.
- Q14 Justifier qu'à l'été nord, la cellule de Hadley sur Mars (circulation thermique directe à l'échelle globale) s'étend du cercle polaire nord ( $\sim 60^\circ\text{N}$ ) jusqu'au cercle polaire sud. Expliquer le lien avec les courants-jets.
- Q15 Déterminer, en utilisant la conservation du moment cinétique axial  $\mathcal{M} = R_p \cos \varphi (\Omega R_p \cos \varphi + u)$ , si l'on s'attend à un courant-jet vers l'ouest ou vers l'est à l'équateur proche de la surface sur Mars.

**Dynamique atmosphérique pendant la tempête de poussière** Pendant une tempête de poussière globale de l'été sud, la température dans la troposphère de Mars augmente fortement, particulièrement dans l'hémisphère d'été. Un fort courant-jet vers l'est d'amplitude quasiment  $200 \text{ m s}^{-1}$  est présent dans l'hémisphère nord (hémisphère d'hiver) à  $60^\circ$  de latitude. Par ailleurs, un courant-jet équatorial en super-rotation se met également en place proche de la surface pendant la tempête de poussière globale sur Mars.

- Q16 Recalculer le nombre de Rossby et expliciter la relation à employer pour déduire dans les moyennes latitudes le gradient vertical de vent zonal  $u$  en fonction du gradient méridien de température  $T$ .
- Q17 Déterminer les changements dans la circulation de Hadley induits par une tempête de poussière globale.
- Q18 Proposer des éléments d'explication du jet en super-rotation qui émerge lors de tempêtes de poussière.