

# Circulation induite par le déferlement des ondes de gravité dans la mésosphère

Nous reprenons le propos où nous l'avions laissé au TD2. Rappelons à l'identique les éléments sur les observations dont on cherche à élucider les mécanismes sous-jacents et sur les forçages externes considérés sur le fluide atmosphérique. Ensuite, résumons les équations utiles du modèle adopté.

**Observations** Sur Terre, planète de rayon  $a = 6400$  km et de rotation  $\Omega = 7.27 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , les observations de la moyenne zonale  $\bar{u}$  du vent zonal  $u$  dans la moyenne atmosphère (stratosphère et mésosphère)

- dénote un courant-jet vers l'est  $\bar{u} > 0$  dans l'hémisphère d'hiver, dont l'amplitude croît avec l'altitude jusque dans la mésosphère puis décroît jusqu'à changer de signe vers la mésopause, devenant un courant-jet vers l'ouest.
- dénote un courant-jet vers l'ouest  $\bar{u} < 0$  dans l'hémisphère d'été, dont l'amplitude croît avec l'altitude jusque dans la mésosphère puis décroît jusqu'à changer de signe vers la mésopause, devenant un courant-jet vers l'est.

**Forçages** Le modèle fait intervenir deux forçages externes (toujours supposés exprimés en moyenne zonale) : un terme de forçage thermique (diabatique)  $\mathcal{Q}$  et un terme de forçage dynamique (friction)  $\mathcal{X}$ . On s'intéresse principalement ici à la réponse stationnaire de l'atmosphère (lorsque  $t \rightarrow \infty$ ) à ces forçages. En outre, on suppose que les réponses à ces forçages sont de suffisamment faibles amplitudes pour pouvoir être étudiées séparément (l'effet de  $\mathcal{Q}$  est étudié dans le TD2 et l'effet de  $\mathcal{X}$  dans le TD3) et pour que les termes non-linéaires puissent être négligés dans la plupart des cas.

**Modèle adopté** Nous avons adopté au TD2 une approche axisymétrique de couche mince (modèle de Saint-Venant, *toy model 1* du cours) conduisant aux trois équations suivantes, exprimées pour les vitesses zonale  $U = u \cos \varphi$  et méridienne  $V = v \cos \varphi$  ainsi que le géopotentiel  $\Phi$ .

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + \frac{V}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} \right) U - 2\Omega \mu V = \mathcal{X} \sqrt{1 - \mu^2} \quad (1a)$$

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + \frac{V}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} \right) V + 2\Omega \mu U + \frac{\mu}{1 - \mu^2} \frac{U^2 + V^2}{a} + \frac{1 - \mu^2}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial \mu} = 0 \quad (1b)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{a} \frac{\partial \Phi V}{\partial \mu} = \mathcal{Q} \quad (1c)$$

avec le forçage thermique  $\mathcal{Q}$  combinant un terme de chauffage UV par l'ozone  $Q - Q_s$  et un terme de refroidissement radiatif IR  $\alpha (\Phi - \Phi_s)$  avec  $\cdot_s$  dénotant l'état de repos et  $\alpha$  représentant une constante de relaxation radiative. L'état de repos est également caractérisé par un écoulement atmosphérique inexistant  $U_s = 0$  et  $V_s = 0$ .

## 1 Rappel des épisodes précédents

1. Rappeler brièvement comment on obtient l'expression de la vitesse zonale  $U_{O_3}$  résultant du forçage stratosphérique de chauffage par l'ozone sous la forme

$$U_{O_3} = \mathcal{U}_{O_3} \mu (1 - \mu^2)$$

où  $\mathcal{U}_{O_3}$  est une constante.

2. Indiquer quels éléments des observations de la moyenne zonale du vent zonal ne peuvent être expliqués par le forçage de l'ozone stratosphérique.

## 2 Effet dynamique du déferlement des ondes de gravité dans la mésosphère

On propose ici d'étudier l'effet sur l'écoulement moyen axisymétrique d'un forçage externe dynamique (friction)  $\mathcal{X} \neq 0$  en l'absence de forçage par l'ozone stratosphérique. Ce terme  $\mathcal{X}(\mu)$  représente à une saison particulière le transfert de quantité de mouvement aux petites échelles exercé par les mouvements turbulents qui suivent le déferlement des ondes de gravité dans la mésosphère (représentés par un terme de friction sur l'écoulement axisymétrique).

1. Expliquer pourquoi  $\mathcal{Q} \neq 0$  et donner son expression.
2. Proposer une forme des équations 1 à la fois stationnaire et linéarisée autour de l'état de repos.
3. Justifier que l'équation suivante est une bonne représentation des variations latitudinales de la friction exercée par le déferlement des ondes de gravité (forçage mécanique  $\mathcal{X}$  en hiver de l'hémisphère nord.

$$\mathcal{X} = -\mathcal{X}_0 \mu (1 + \mu^2) (1 - \mu^2)^{1/2}$$

où  $\mathcal{X}_0$  est une constante que l'on peut prendre typiquement égale à  $1 \text{ m s}^{-1}$ .

4. Trouver une expression pour  $V$  en fonction de  $\mu$ .
5. Discuter du signe de  $V$  en fonction des hémisphères et conclure sur l'accord avec la circulation de Brewer-Dobson dans la moyenne atmosphère.
6. Déterminer numériquement l'ordre de grandeur de  $V$  et commenter en comparant à l'ordre de grandeur du vent géostrophique méridien dans les moyennes latitudes ( $10 \text{ m s}^{-1}$ ).
7. Exprimer les variations du potentiel  $\Phi$  en fonction de  $\mu$ .
8. Comparer  $\Phi$  à  $\Phi_s$ , en déduire l'effet du déferlement des ondes de gravité dans la mésosphère sur la température et discuter de la cohérence avec les températures plus chaudes observées sur Terre dans la mésosphère d'hiver.
9. Trouver une expression pour  $U$  (notée  $U_{GW}$ ) en fonction de  $\mu$  sous la forme

$$U_{GW} = -\mathcal{U}_{GW} \mu (1 - \mu^2)$$

(où  $\mathcal{U}_{GW}$  est une constante) en supposant l'équilibre géostrophique vérifié.

10. Déterminer numériquement l'ordre de grandeur de  $U_{GW}$  et commenter sa comparaison à l'ordre de grandeur de  $V$ .
11. Discuter à partir de l'expression de  $U_{GW}$ 
  - de la dépendance de  $U_{GW}$  envers l'amplitude du forçage  $\mathcal{X}_0$ , la rotation planétaire  $\Omega$ , la relaxation  $\alpha$  ;
  - du signe de  $U_{GW}$  dans chaque hémisphère dans le cas terrestre et de la conformité avec la circulation observée dans la mésosphère sur Terre.

### 3 Synthèse du TD2 et TD3

1. Proposer une conclusion synthétique des contributions respectives  $U_{O_3}$  et  $U_{GW}$  du forçage thermique par l'ozone et du forçage mécanique par les ondes de gravité sur les courants-jets observés dans la stratosphère et la mésosphère.
2. Expliquer pourquoi les effets des deux forçages ne sont pas indépendants.

### 4 Approche avec le moment cinétique

1. Expliquer pourquoi le moment cinétique axial massique s'exprime

$$\mathcal{M} = aU + \Omega a^2 (1 - \mu^2)$$

2. Démontrer dans le cas du forçage thermique par l'ozone grâce à l'équation 1a que le moment cinétique axial  $\mathcal{M}$  se conserve au cours du mouvement des parcelles fluides.
3. Exprimer la position  $\mu_0$  de parcelles d'air initialement au repos ( $U_0 = 0$ ) en fonction des constantes du problème et de la position latitudinale  $\mu$  de parcelles d'air ayant une vitesse zonale  $U = U_{O_3}$ .
4. Déterminer si les parcelles se sont rapprochées ou éloignées de l'axe de rotation planétaire dans les hémisphères d'été ou d'hiver dans le cas du forçage thermique par l'ozone.
5. Justifier si l'approche par le moment cinétique axial peut s'étendre au cas de la contribution  $U_{GW}$  du forçage mécanique par le déferlement des ondes de gravité.