

# Modèles simples de la Variabilité Climatique

François Lott

## Cours 3:

### L'Oscillation Quasi Biennale dans la basse stratosphère tropicale

- 1 La circulation générale dans la stratosphère (Observations)
- 2 Le modèle simple pour l'OQB (Plumb 1977)
- 3 Résolution numérique

# Observation satellitale des vents dans la moyenne atmosphère tropicale

Données UARS (Swinbanck et Orland)

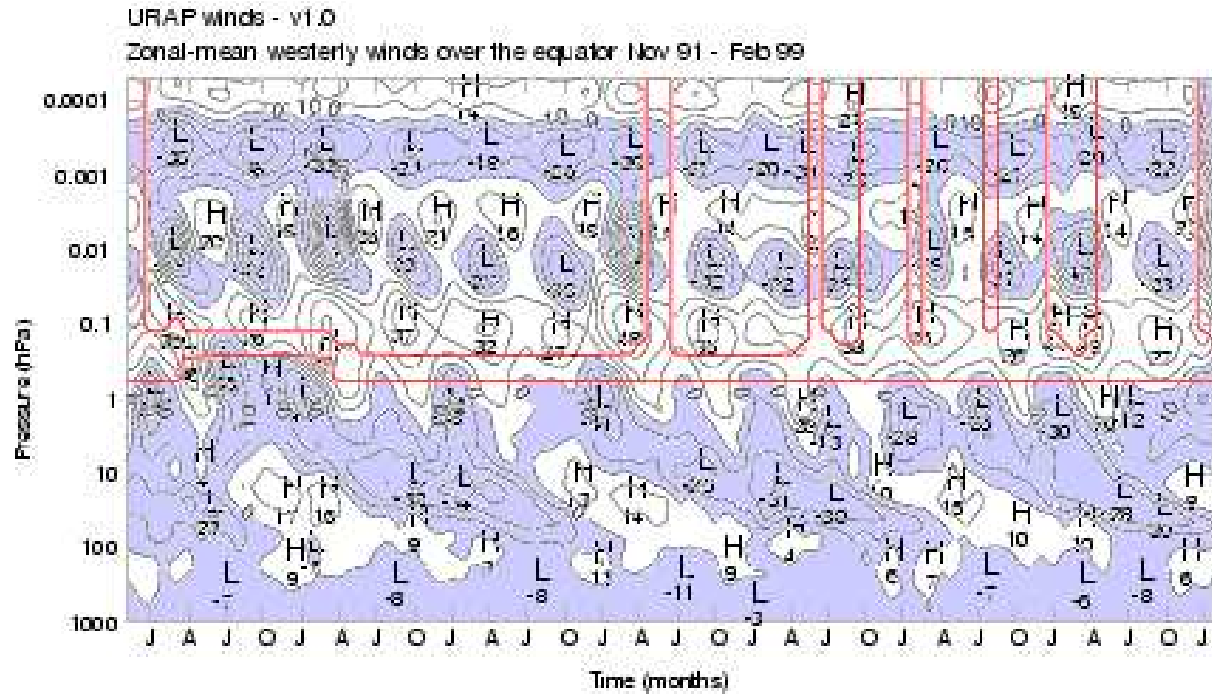
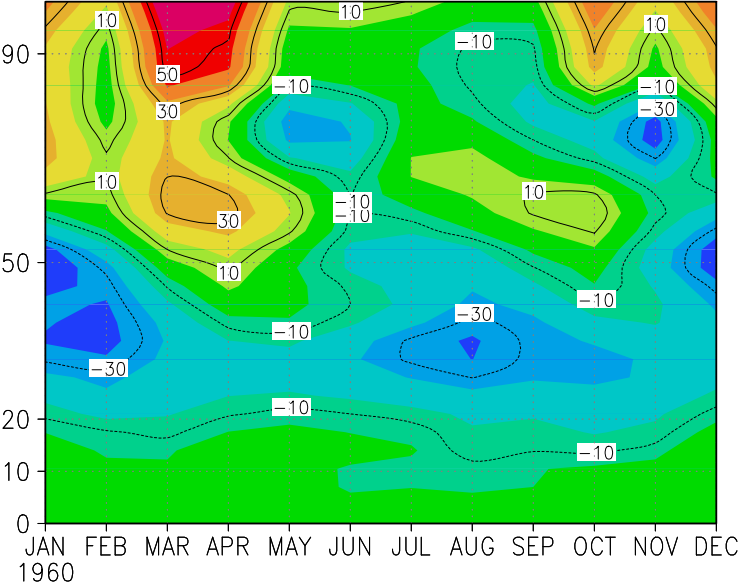


Figure 6. Time series of zonal-mean westerly winds over the equator, from November 1991 to February 1999. The tick marks along the x-axis mark each January, April, July and October. The additional lines show where the values are mainly derived from interpolated or climatological data.

# L'Oscillation semi-annuelle dans la haute stratosphère tropicale et dans la mésosphère

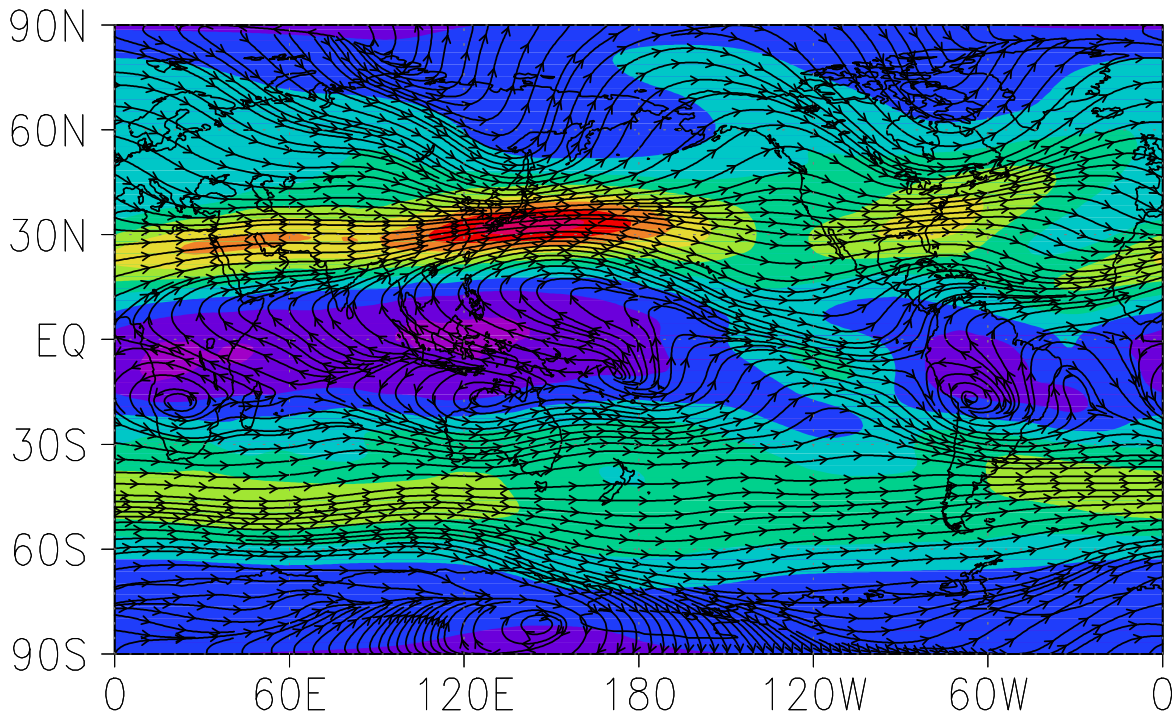
Données CIRA



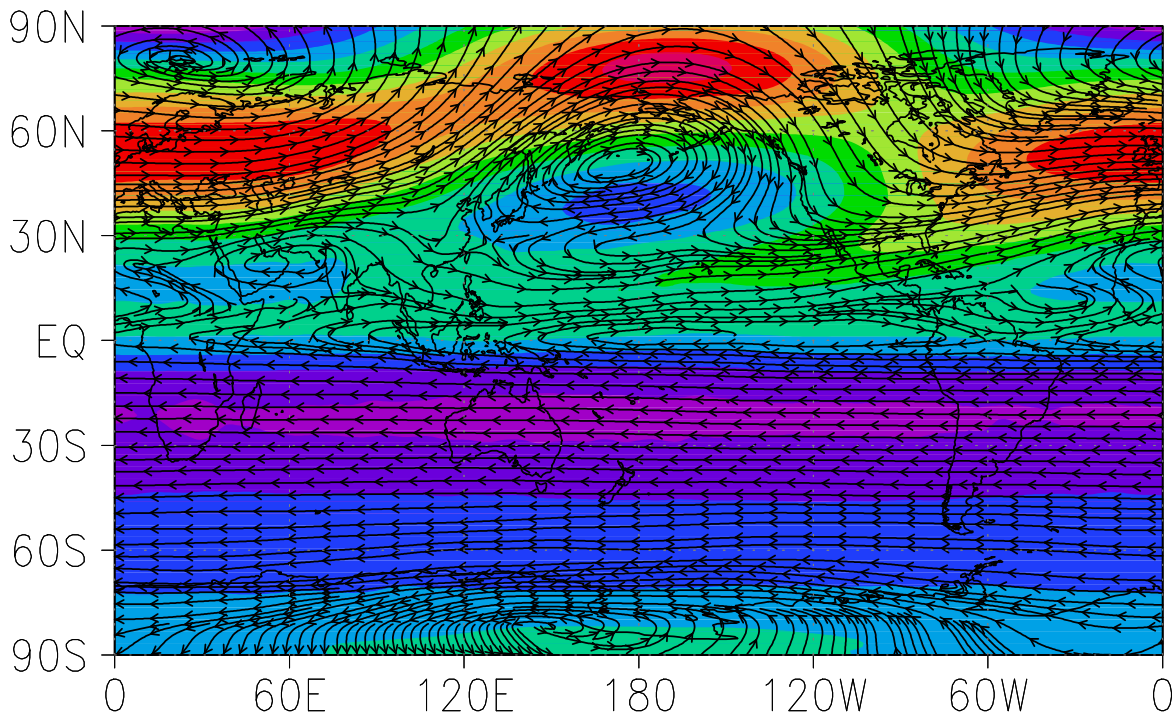
# Quelques aspects de la circulation générale de la stratosphère

Données ECMWF

ECMWF (93–97) Vents d'hiver  
Tropopause (12km)



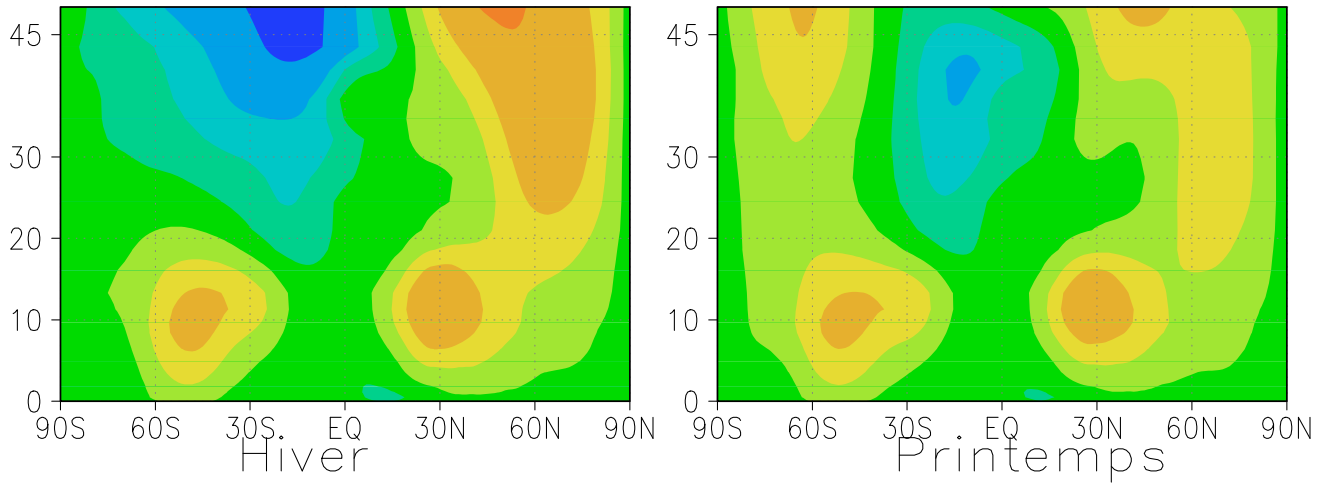
Stratosphere (40km)



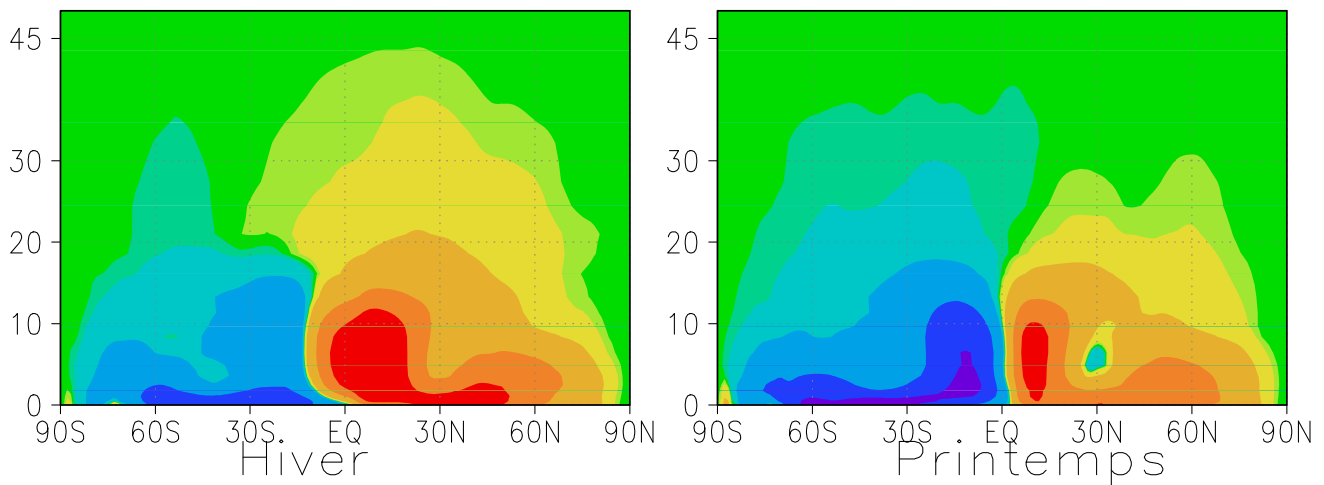
# Quelques aspects de la circulation générale de la stratosphère

Données ECMWF

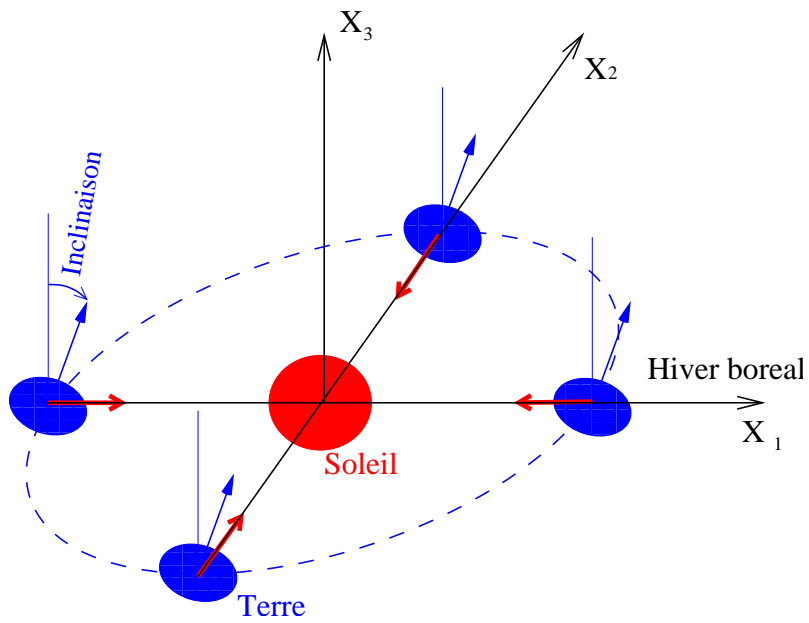
ECMWF (93–97)  
Vent Zonal Moyen



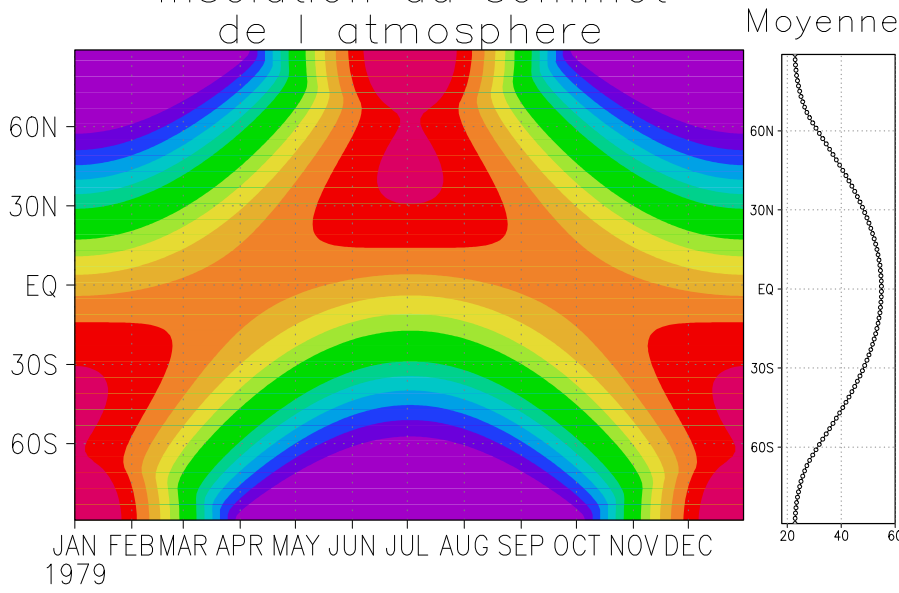
Fonction de courant de la circulation meridienne



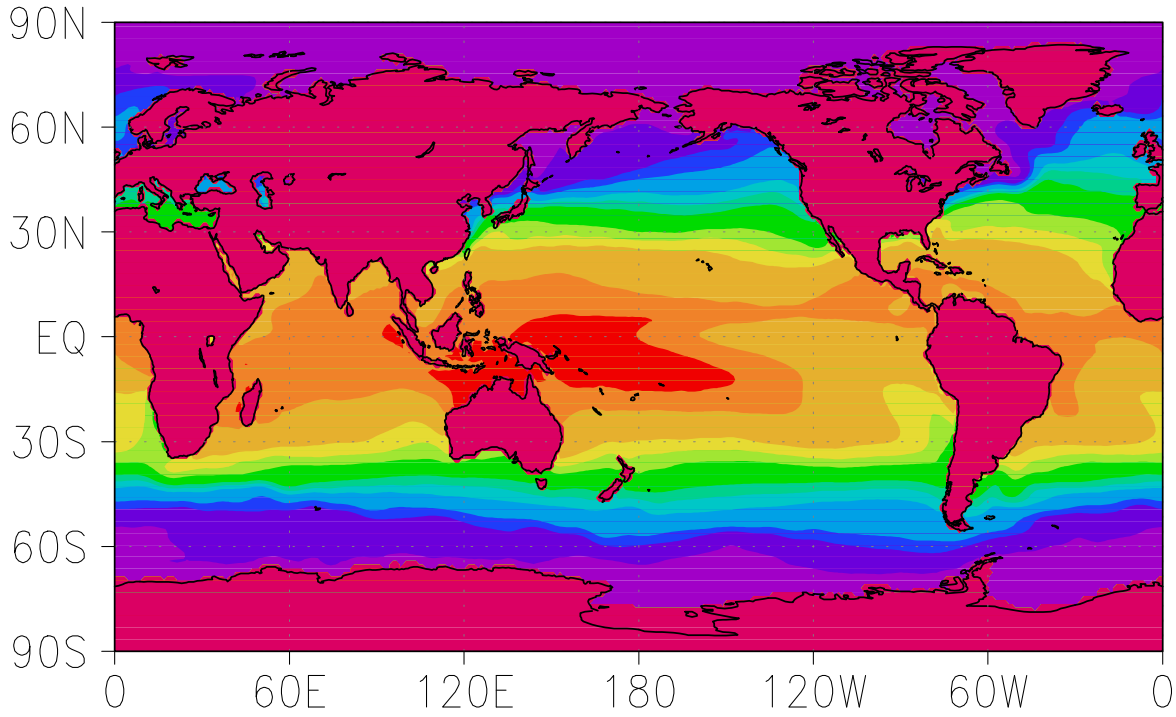
# Flux solaire moyen incident au sommet de l'atmosphère



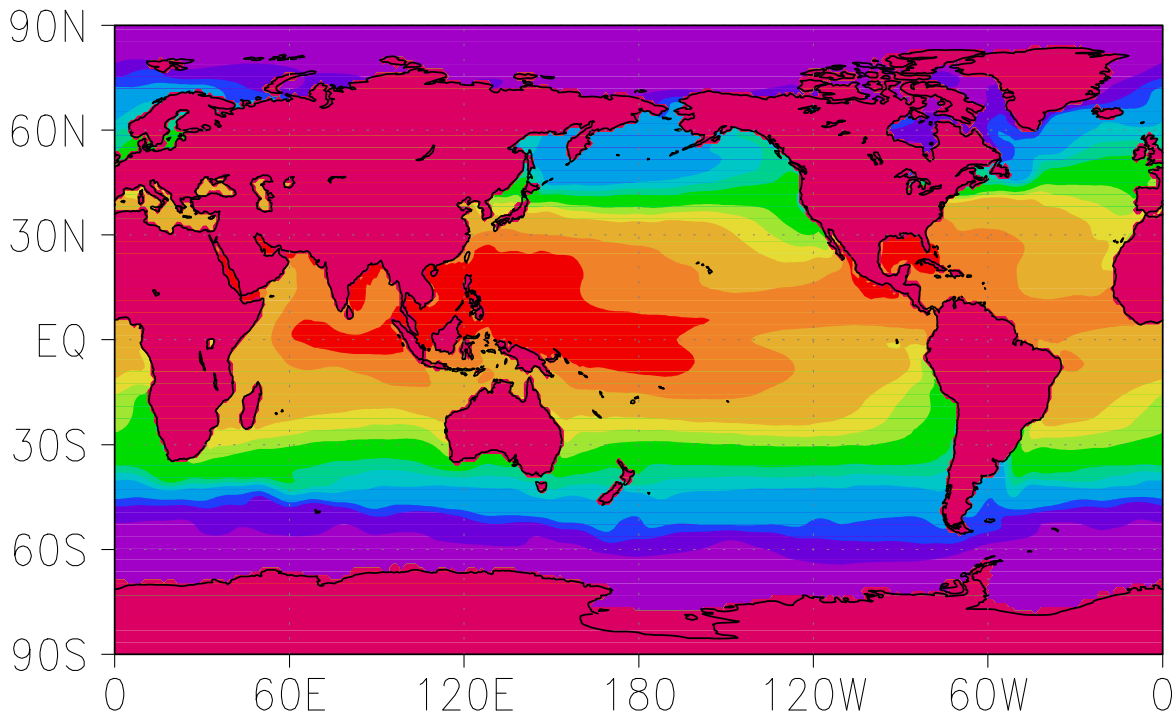
Insolation au sommet de l'atmosphère



# Temperature Surface de la mer Janvier (ECMWF 1993–1997)



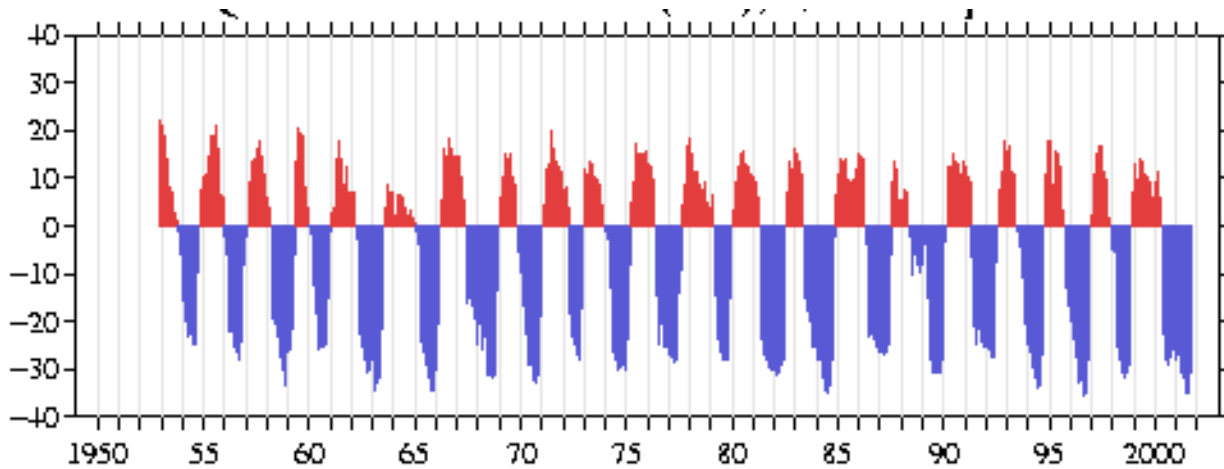
# Juillet (ECMWF 1993–1997)



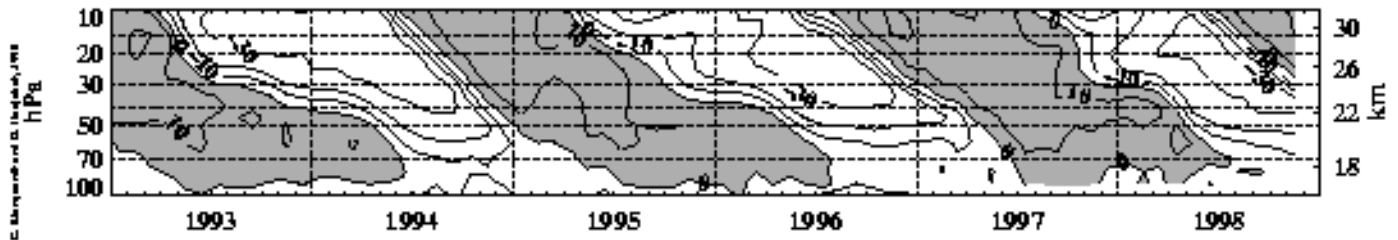
# L'oscillation quasi biennale dans la basse stratosphère tropicale

## Observations

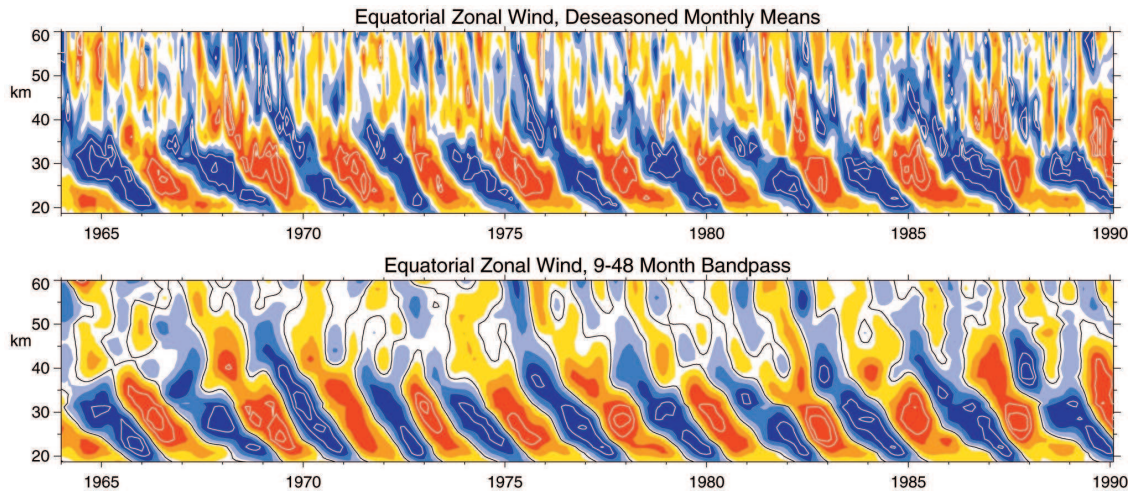
Index de l'OQB basé sur la moyenne zonale du vent zonal (m/s) à 30hPa ( $\approx 25\text{km}$ ). Extrait du site: [tao.atmos.washington.edu](http://tao.atmos.washington.edu)



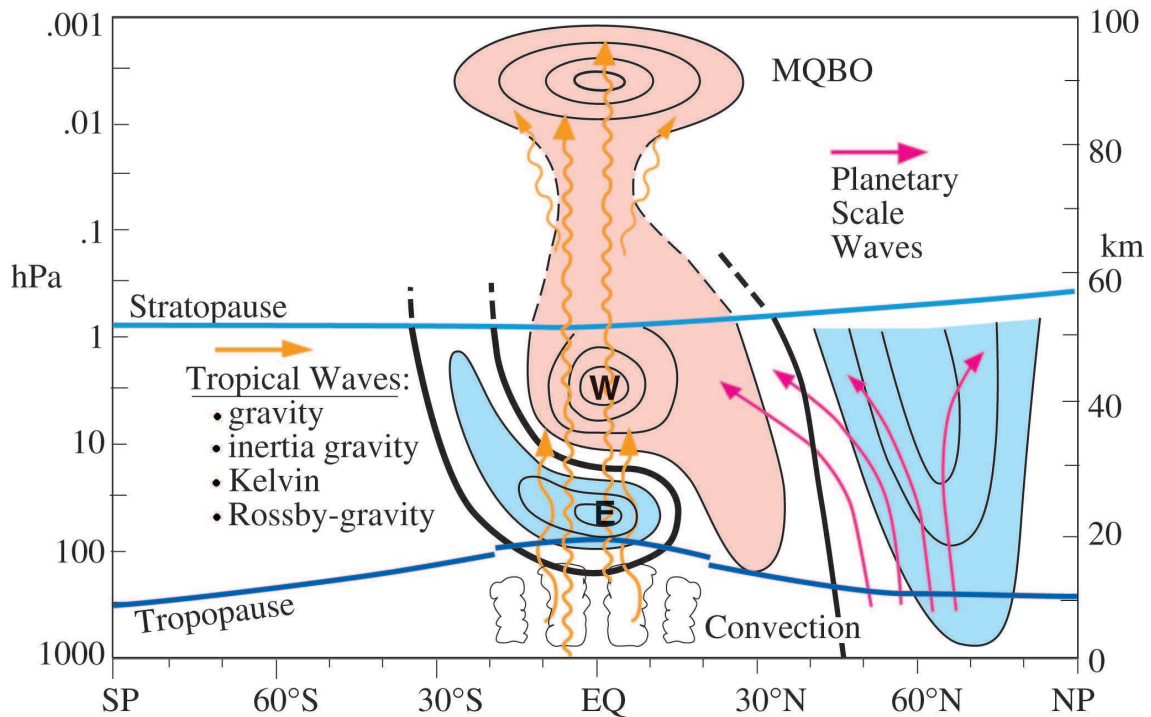
Moyenne zonale du vent zonal en fonction du temps et de l'altitude, 1993-1998. Extrait du site: [tao.atmos.washington.edu](http://tao.atmos.washington.edu)







**Plate 1.** (top) Time-height section of the monthly-mean zonal wind component ( $\text{m s}^{-1}$ ), with the seasonal cycle removed, for 1964–1990. Below 31 km, equatorial radiosonde data are used from Canton Island ( $2.8^\circ\text{N}$ , January 1964 to August 1967), Gan/Malediv Islands ( $0.7^\circ\text{S}$ , September 1967 to December 1975), and Singapore ( $1.4^\circ\text{N}$ , January 1976 to February 1990). Above 31 km, rocketsonde data from Kwajalein ( $8.7^\circ\text{N}$ ) and Ascension Island ( $8.0^\circ\text{S}$ ) are shown. The contour interval is  $6 \text{ m s}^{-1}$ , with the band between  $-3$  and  $+3$  unshaded. Red represents positive (westerly) winds. After Gray *et al.* [2001]. In the bottom panel the data are band-pass filtered to retain periods between 9 and 48 months.



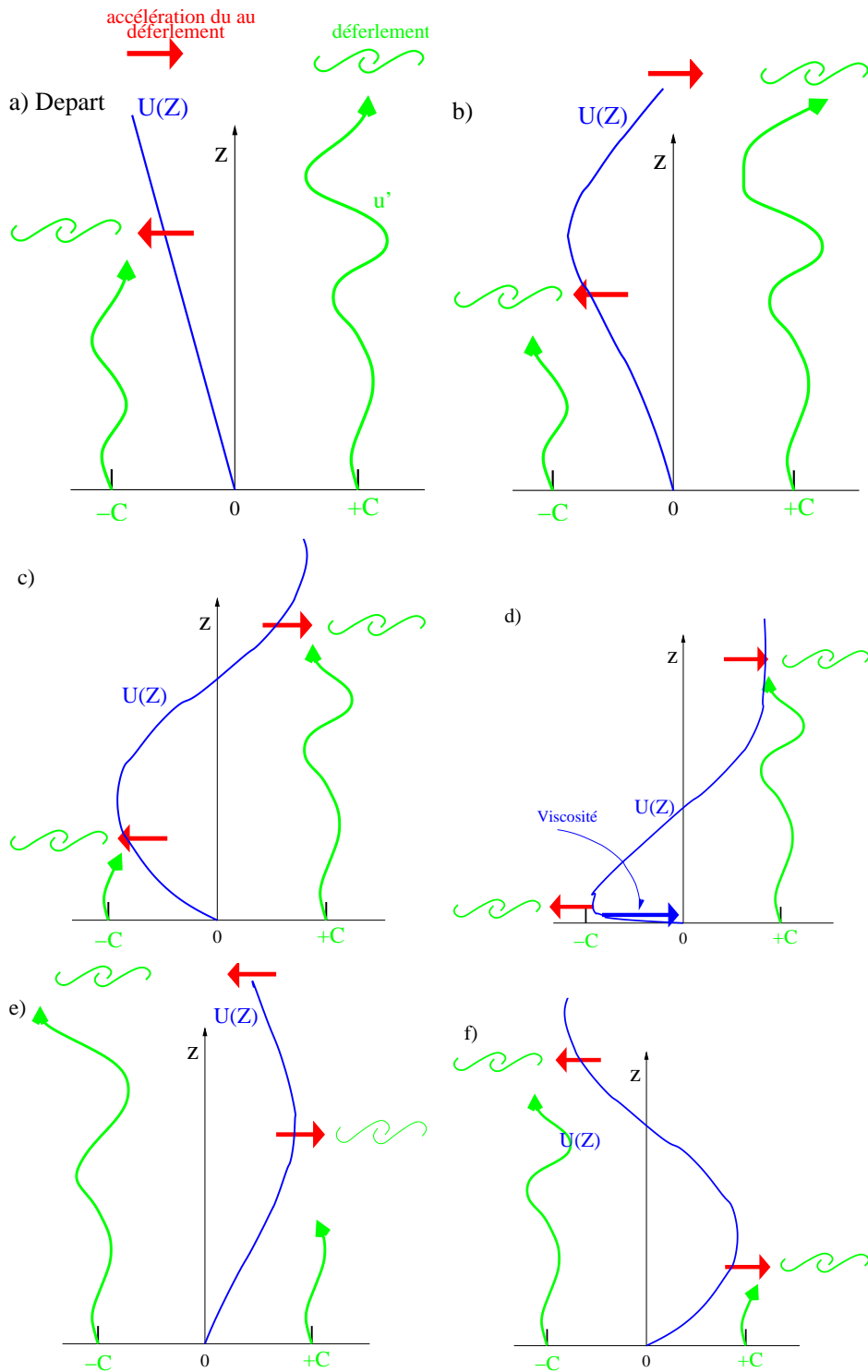
**Plate 2.** Dynamical overview of the QBO during northern winter. The propagation of various tropical waves is depicted by orange arrows, with the QBO driven by upward propagating gravity, inertia-gravity, Kelvin, and Rossby-gravity waves. The propagation of planetary-scale waves (purple arrows) is shown at middle to high latitudes. Black contours indicate the difference in zonal-mean zonal winds between easterly and westerly phases of the QBO, where the QBO phase is defined by the 40-hPa equatorial wind. Easterly anomalies are light blue, and westerly anomalies are pink. In the tropics the contours are similar to the observed wind values when the QBO is easterly. The mesospheric QBO (MQBO) is shown above  $\sim 80$  km, while wind contours between  $\sim 50$  and  $80$  km are dashed due to observational uncertainty.

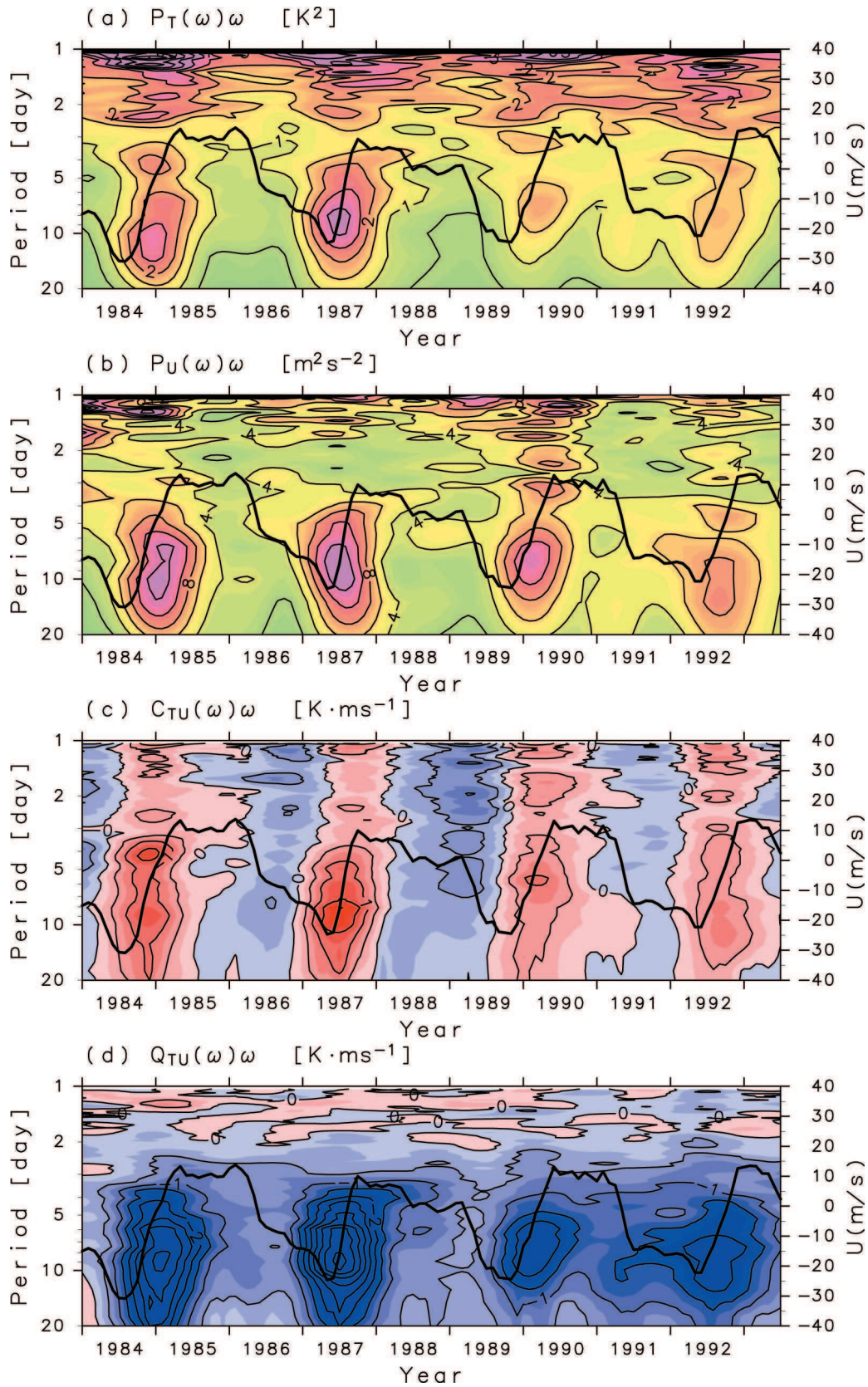
Figures tirées de Baldwin *et al.*, Reviews of Geophysics, 2001

www.nwra.com resumes baldwin

# L'oscillation quasi biennale dans la basse stratosphère tropicale

Théorie: Déferlement de 2 ondes de gravité et accélération induite sur l'écoulement zonal moyen

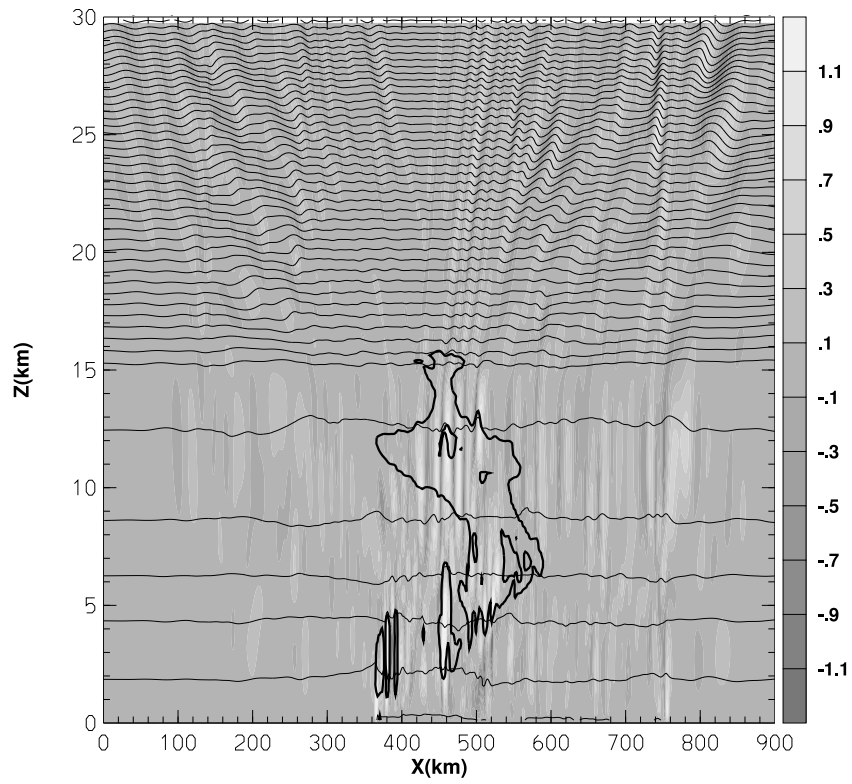




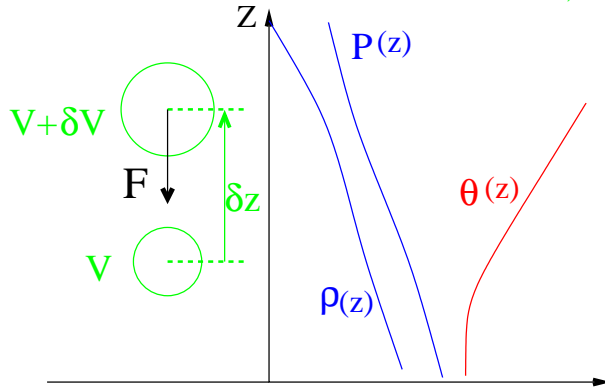
**Plate 4.** Power spectra for (a)  $T$  and (b)  $u$  fluctuations at Singapore as a function of time, averaged over 20–25 km. Contour interval  $0.5 K^2$ , and  $2 (m s^{-1})^2$ , respectively. (c) Cospectra and (d) quadrature spectra of  $T$  and  $u$  components. Contour interval  $0.5 K (m s^{-1})$ . Red and blue colors show positive and negative values, respectively. The bold solid line represents a QBO reference time series. After *Sato et al.* [1994].

# Simulations d'un champ d'ondes de gravité au dessus d'un système convectif dans les régions tropicales

Alexander et Holton, JAS, 1997



**Méthode de la parcelle:** On déplace une parcelle d'air dans un écoulement, on fait l'hypothèse que le champ de pression n'est pas affecté par ce mouvement (le principe d'Archimède s'applique)



Masse de la parcelle d'air:  $m = \rho(z)V$

Volume d'air déplacé par cette parcelle en  $z + \delta z$ ,  $V_d$ :

$$V_d \approx V \left( 1 - \frac{\gamma dp}{p dz} \delta z \right) \quad (\text{on applique } pV^\gamma = \text{cte})$$

Masse d'air déplacé:  $m_d = \rho(z + \delta z)V_d$

$$m_d \approx V \left( \rho(z) + \frac{d\rho}{dz} \delta z - \frac{\rho\gamma dp}{p dz} \delta z \right)$$

Poussée d'Archimède:

$$F = g (m_d - m)$$

Accélération verticale:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{d^2 \delta z}{dt^2} = \frac{F}{m} = g \left( \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dz} - \frac{\gamma dp}{p dz} \right) \delta z$$

En utilisant,  $\frac{p}{\rho} = RT$  et  $\theta = T \left( \frac{p}{p_r} \right)^{\gamma-1}$  on obtient:

$$\frac{d^2}{dt^2} \delta z + \frac{g d\theta}{\theta dz} \delta z = 0$$

**On appelle fréquence de Brunt Vaisala:**

$$N^2(z) = \frac{g d\theta}{\theta dz}$$

Le modèle simple de Plumb (1977)

Systeme d'équations anélastique, séparation ondes de gravité-écoulement moyen

$$\rho_0(z) \frac{\partial}{\partial t} \bar{u}(z, t) = - \sum_{j=1}^M \frac{\partial}{\partial z} \tau_j + \frac{\partial}{\partial z} \nu \frac{\partial}{\partial z} \bar{u}(z, t)$$

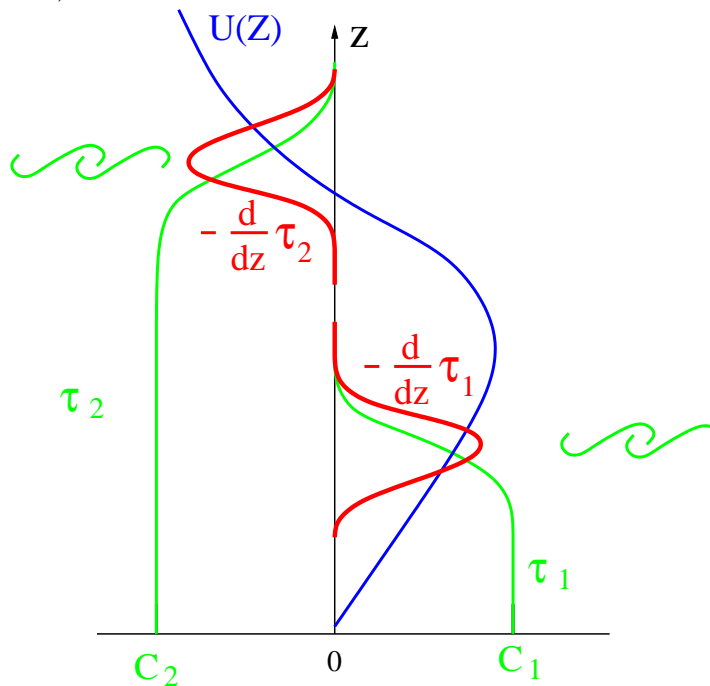
Nombre d'ondes de gravité comprises dans le modèle:  $M$

Stress due à l'onde de gravité  $i$ :  $\tau_j = \Re(\rho_0 \hat{w}_j \hat{u}_j^*)$

avec:  $u'_j = \Re(\hat{u}_j(z) e^{i(\omega_j t - k_j x)})$ ,  $k_j > 0$  par convention. (Ondes monochromatiques stationnaires).

**Théorème de Eliassen et Palm:**  $\tau_i = cte$  Sans déferlement, sans dissipation et pour une onde linéaire.

De plus,  $\text{sign}(\tau_i) = \text{sign}(c_j) = \frac{\omega_j}{k_j}$ : les ondes se propageant vers l'Est ( $c_j > 0$ ) accélèrent l'écoulement lorsqu'elles déferlent; les ondes se propageant vers l'Ouest ( $c_j < 0$ ) freinent l'écoulement lorsqu'elles déferlent.



Evaluer  $\tau$  à partir de la fonction  $\hat{\varphi} = \rho_0(z)^{-1/2} \hat{\psi}$  où  $\hat{\psi}$  est la fonction de courant:

$$\hat{u} = \frac{1}{\rho_0(z)} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial z} \quad \hat{w} = \frac{ik}{\rho_0(z)} \hat{\psi}$$

Equation pour la structure verticale de  $\hat{\varphi}(z)$ :

$$\hat{\varphi}_{zz} + \underbrace{\left( \frac{k^2 N^2}{\Omega^2} - k^2 + \frac{k \bar{u}_{zz}}{\Omega_j} - \frac{k \bar{u}_z \rho_{0z}}{\Omega \rho_0} + \frac{\rho_{0zz}}{2\rho_0} - \frac{3\rho_{0z}^2}{4\rho^2} \right)}_{S(z)=m^2(z): \text{ nombre d'onde vertical local}} \hat{\varphi} = 0$$

$\Omega(z) = \omega - k\bar{u}(z)$  est la fréquence Doppler (relative) de l'onde dans le référentiel se déplaçant à la vitesse  $\bar{u}$

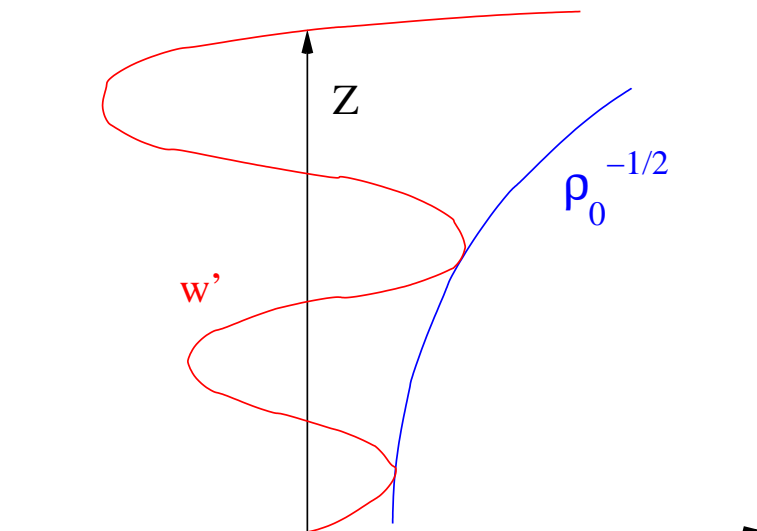
**Solution WKB (lentement variable):**

$$\hat{\varphi}(z) = \hat{\varphi}_r \left( \frac{m_r}{m(z)} \right)^{1/2} \exp \left( -i \int_0^z m(z') dz' \right)$$

où:  $m(z) = -\text{sign}(\Omega(z)) \sqrt{S(z)}$ , le signe choisi pour  $m$  assurant que la vitesse de groupe verticale est orientée vers le haut:  $C_{gz} = \partial_m \Omega > 0$ .

**Remarque:**  $m_r$  et  $m(z)$  ont le même signe. Lorsque  $m$  change de signe,  $\Omega$  s'annule et  $S(z) \rightarrow \infty$  l'onde déferle forcément. Il s'agit d'un niveau critique au delà duquel  $\hat{\varphi}(z) = 0 = \tau$

Exemple de la vitesse verticale induite par une onde monochromatique lorsque  $U = 0$ ,  $N^2 = 0$ , et  $\omega \neq 0$



Détection du déferlement (d'un niveau vertical du modèle,  $z - dz$ , à celui immédiatement au dessus,  $z$ )

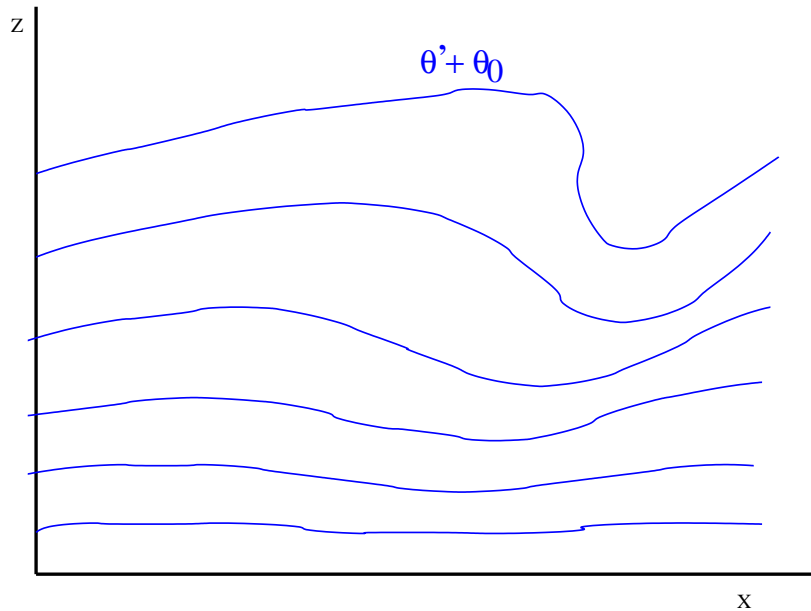
1 On lie  $\tau(z - dz)$  et l'anomalie de température potentielle  $\hat{\theta}(z)$

$$\tau(z - dz) = \tau(z) = -\frac{\rho(z)m(z)\Omega^2(z)}{k\theta_{0z}^2(z)}\|\hat{\theta}(z)\|^2$$

2 Déferlement si  $\underbrace{\text{Min}}_{0 < x < L} \theta'_z(z) < -\theta_{0z}(z)$  soit:  $\|m(z)\hat{\theta}(z)\| > \theta_{0z}(z)$

3 Si il y a déferlement, il faut diminuer  $\tau(z)$  jusqu'à:

$$\tau_c(z) = -\frac{\rho_0(z)\Omega^2(z)}{k m(z)}$$





# Principe du modèle simple de la QBO

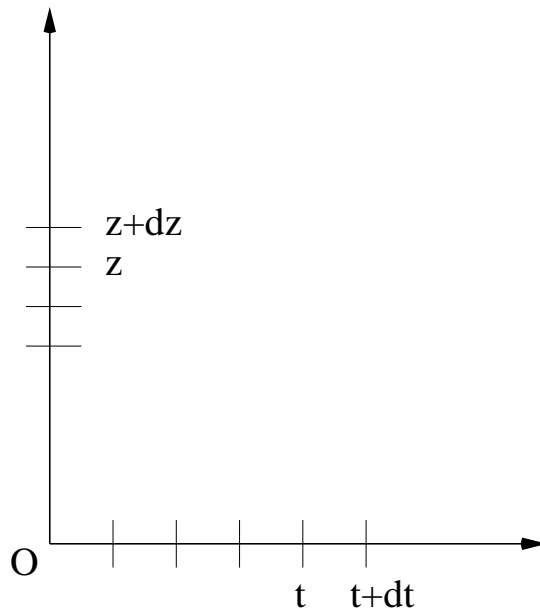
L'équation du vent moyen est intégrée par différences finies en  $t$  et en  $z$ .

On considère seulement 2 ondes de gravité:

$$\rho_0(z) \frac{\partial}{\partial t} \bar{u}(z, t) = - \sum_{j=1}^2 \frac{\partial}{\partial z} \tau_j + \frac{\partial}{\partial z} \nu \frac{\partial}{\partial z} \bar{u}(z, t)$$

Evolution de  $\bar{u}(z, t)$ :

- 1 Schéma Leapfrog centré avec filtre de Asselin pour l'effet des ondes ( $\tau$ )
- 2 Méthode implicite pour la diffusion verticale ( $\nu$ )
- 3 Condition à la limite:  $\bar{u}(0, t) = 0$



Evaluation de  $\tau_i(z)$ :

- 1 On impose  $\tau_i(0)$ , c'est à dire l'amplitude des ondes de gravité se propageant à travers la moyenne atmosphère
- 2 Passage de  $z - dz$  à  $z$ :

**i** On applique le théorème de Eliassen et Palm:  $\tau_i(z) = \tau_i(z - dz)$

**ii** On teste le déferlement:

$$\text{si } \|\tau_i(z)\| < \|\tau_{ci}(z)\|, \quad \tau_i(z) = \tau_i(z - dz)$$

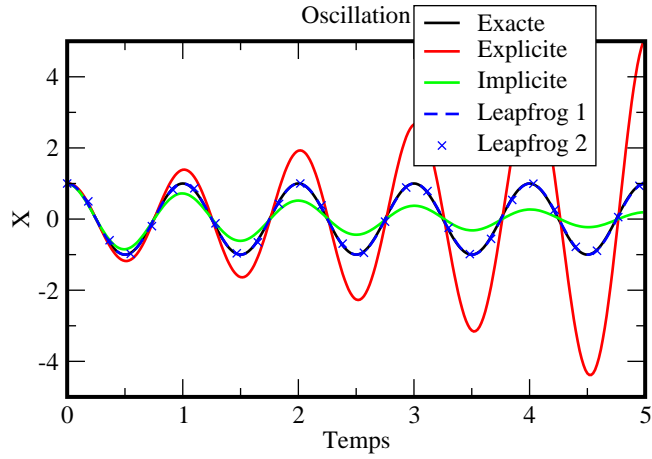
Pas d'action des ondes entre  $z - dz$  et  $z$

$$\text{si } \|\tau_i(z)\| > \|\tau_{ci}(z)\|, \quad \tau_i(z) = \tau_{ci}(z)$$

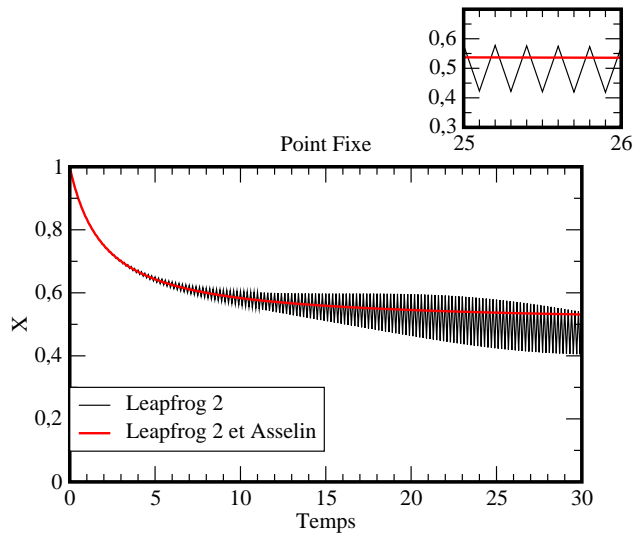
Les ondes affectent  $U$  entre  $z - dz$  et  $z$

# Méthodes Numériques

$$\frac{\partial}{\partial t} X = i\omega X$$



$$\frac{\partial}{\partial t} X = -(X - X_0)^2$$



# Résultat du modèle

$U(z,t)$  et Flux de quantité de mouvement ( $\tau_i$ ) à 2 instants donnés

