

La dynamique de la stratosphère dans le GCM

LMDz

François Lott

LMD/IPSL, Ecole Normale Supérieure, flott@lmd.ens.fr

S. Bekki, D. Cugnet, L. Fairhead, L. Guez, L. Jourdain, F. Hourdin, J. Kutthipurath, F. Lefevre, P. Levan, M. Marchand, P. Maury, G. Nikulin, F. Vial

I. Climatologies moyennes

I.1) Rappels sur la circulation dans la moyenne atmosphère

I.2) Climatologies de base de LMDz

II. Les moyennes latitudes

II.1) Les ondes de Rossby, Les Réchauffements stratosphériques soudain et l'oscillation arctique

II.2) Sensibilité du climat au sol à la présence de la stratosphère

III. Les régions équatoriales

III.1) SAO et QBO

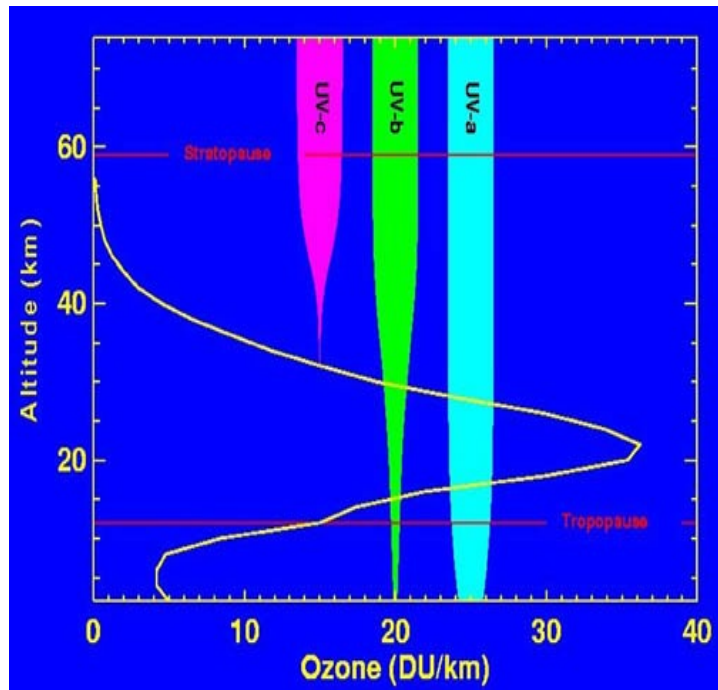
III.2) Les ondes équatoriales résolues par LMDz

IV. Couplage avec la chimie et perspectives

I. Climatologies moyennes

I.1) Rappel sur la circulation dans la moyenne atmosphère

Chauffage par l'ozone



Profil d'Ozone aux moyennes latitude et Altitude de pénétration des UV-a, UV-b, UV-c

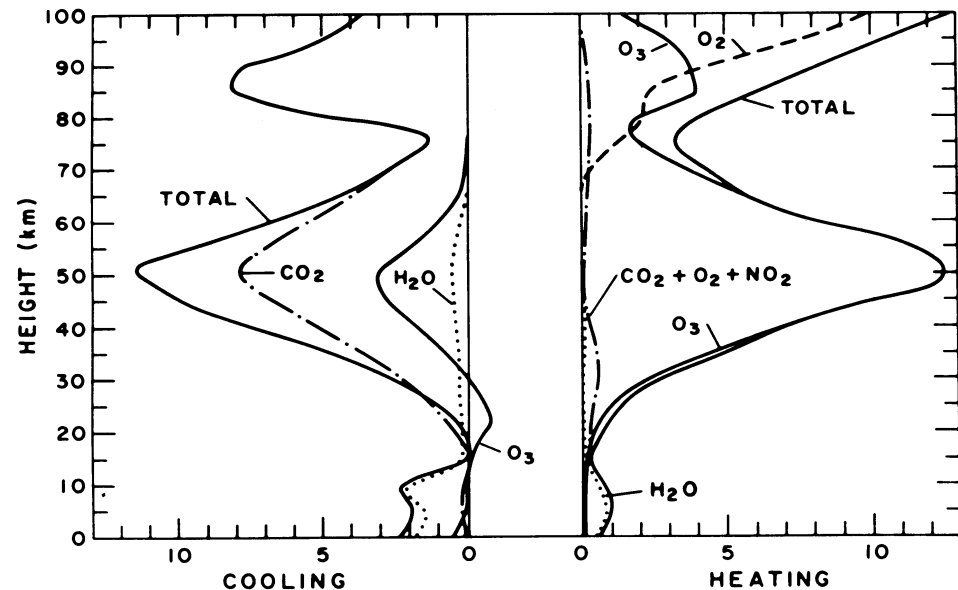


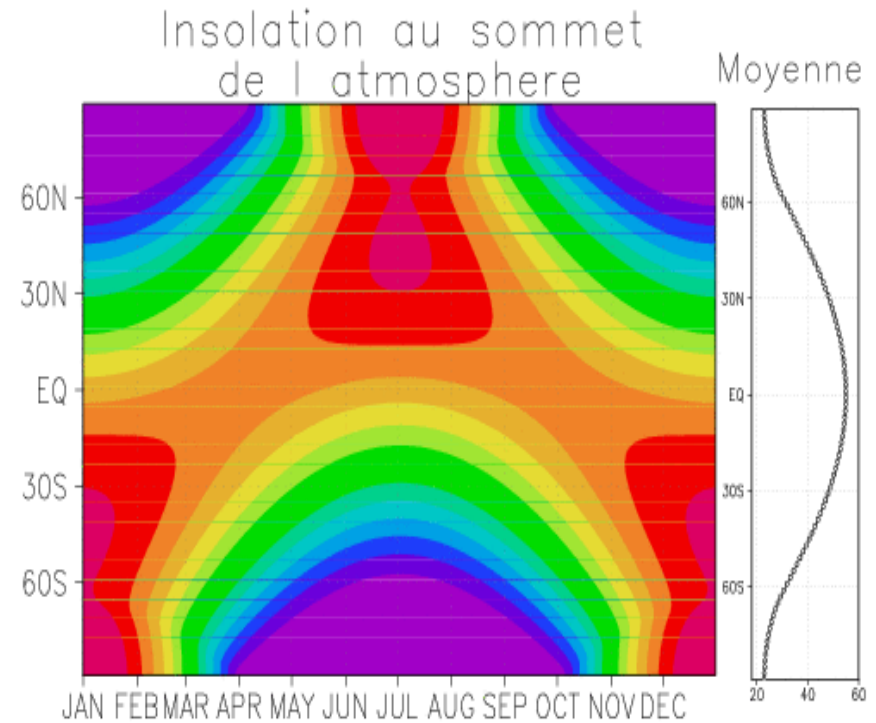
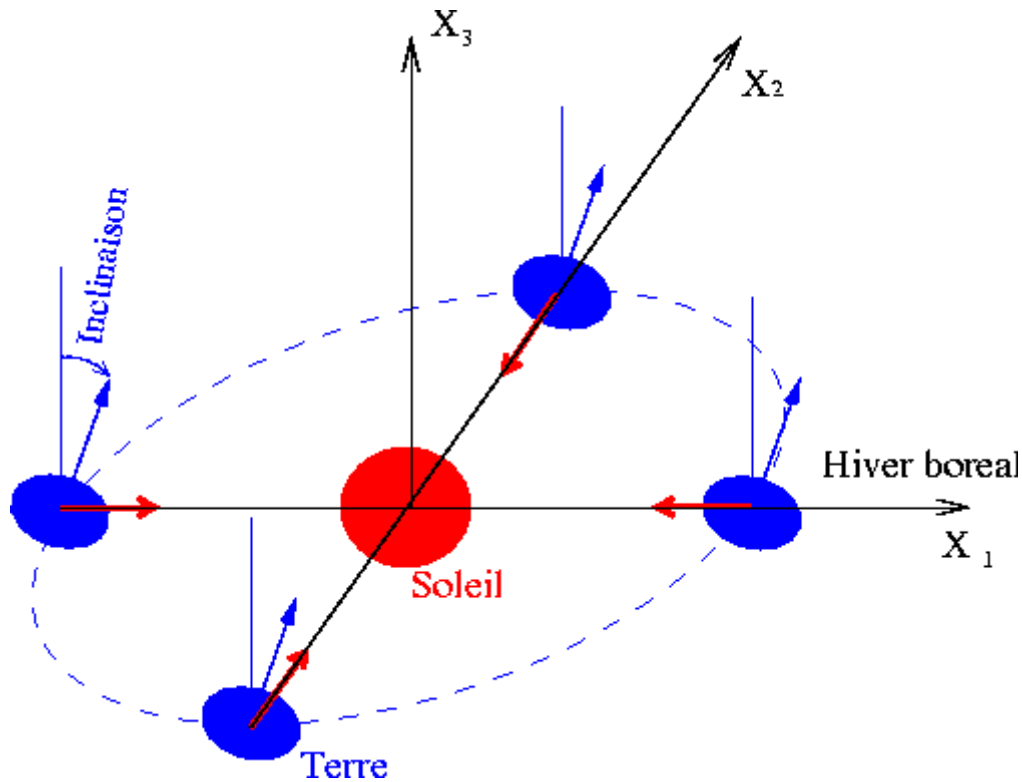
Fig. 2.1. Vertical distribution of heating due to absorption of solar radiation (right) and cooling due to emission of infrared radiation (left). [From London (1980), with permission.]

Distribution verticale du chauffage du à l'absorption des rayons solaires et du refroidissement du au rayonnement infrarouge.

I. Climatologies moyennes

I.1) Rappel sur la circulation dans la moyenne atmosphère

Cycle saisonnier de l'ensoleillement



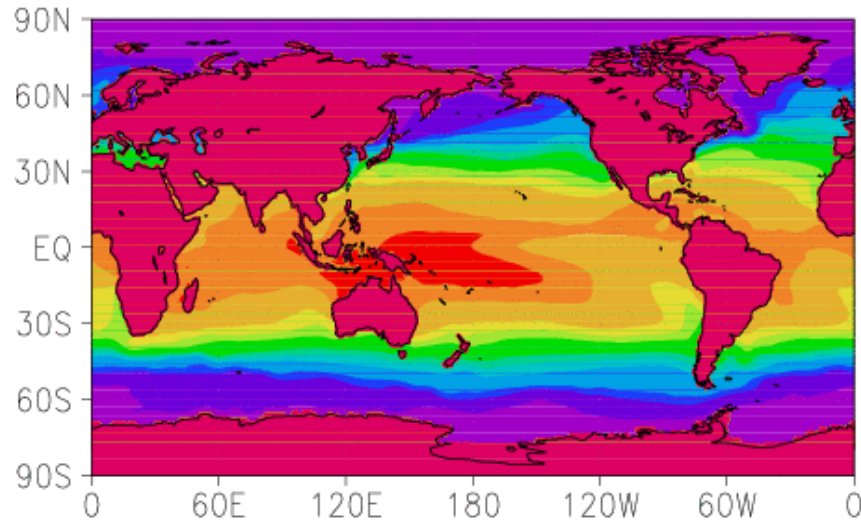
- L'Ozone réémet quasi-instantanément, et sous forme de chaleur, le rayonnement UV qu'elle absorbe
- L'ensoleillement moyen journalier est maximum aux pôles en été en partie car la journée y dure presque 24h
- En moyenne et au cours du temps l'insolation reste maximale à l'équateur

I. Climatologies moyennes

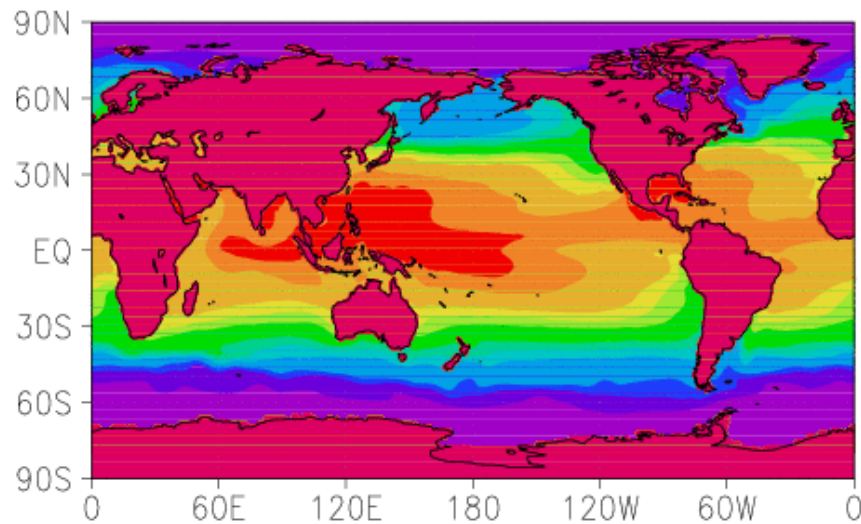
I.1) Rappel sur la circulation dans la moyenne atmosphère

L'océan est un intégrateur temporel que la moyenne atmosphère ne voit pas

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



Juillet (ECMWF 1993–1997)



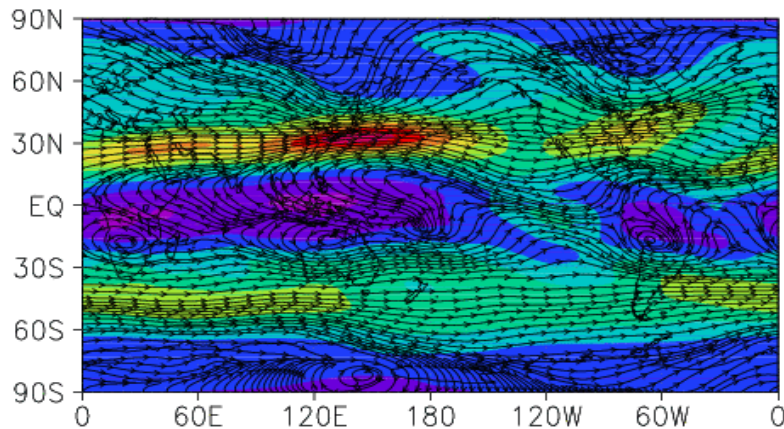
- La SST est toujours plus chaude dans la zone tropicale
- Elle maintient aussi un taux d'humidité important dans la troposphère équatoriale, et donc un effet de serre important
- La troposphère est en premier lieu forcée par le bas, et donc présentera un cycle annuel moins marqué que l'atmosphère moyenne

I. Climatologies moyennes

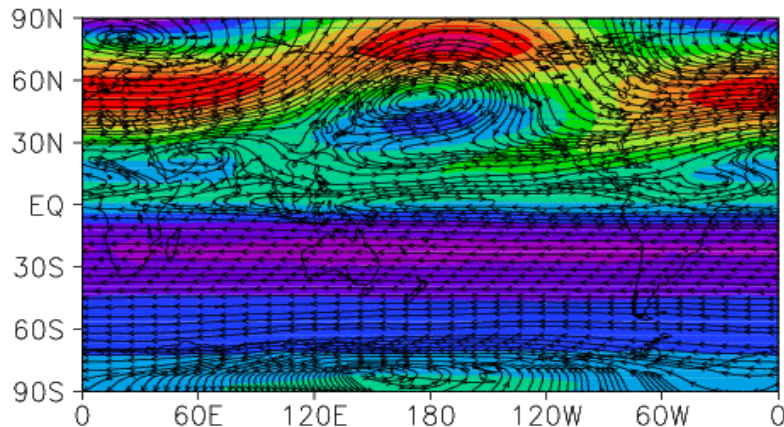
I.1) Rappel sur la circulation dans la moyenne atmosphère

Un exemple flagrant de la différence entre les circulations générales dans la troposphère et la stratosphère

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



Stratosphere (40km)



- En moyenne temporelle et en hiver:
- Les vents dans la troposphère sont vers l'Est dans les 2 hémisphères et aux moyennes latitudes
- Les vents dans la stratosphère sont vers l'Est dans l'hémisphère d'hiver, vers l'Ouest dans l'hémisphère d'été

I. Climatologies moyennes

I.2) Climatologies de base de LMDz

Version de départ

- Résolution 96x72x50
- Inclue la basse mésosphère (50-65km) mais avec une couche d'amortissement de 5km pour les ondes (Shepherd et al. 1996)
- $\Delta z \sim 1.5\text{km}$ dans la basse stratosphère (20-50km)
- Inclus un schéma de paramétrisation des ondes de gravité non-orographiques (basées sur la théorie de la dispersion Doppler de Hines 1997, Manzini et al. 1997)
- Schéma des ondes de gravité orographique (Lott et Miller 1997, Lott 1999) adapté
- SST AMIP, cycle annuel climatologique
- Ozone climatologique

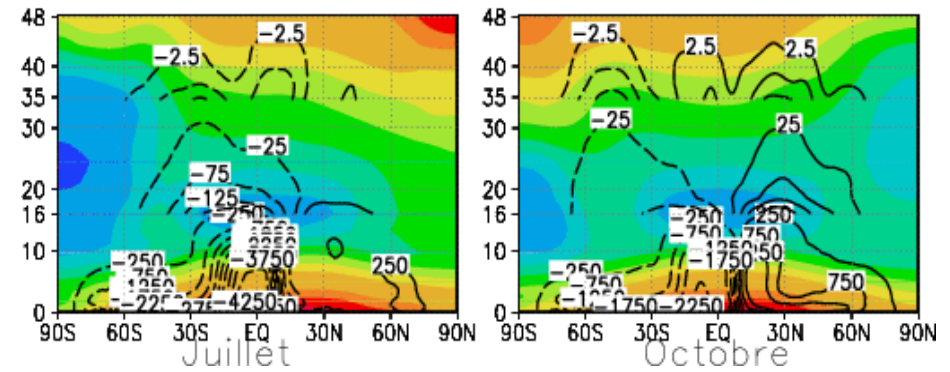
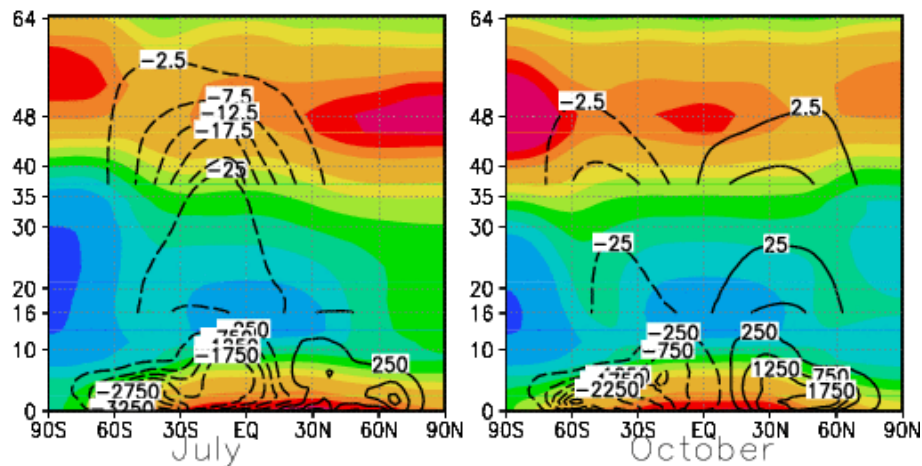
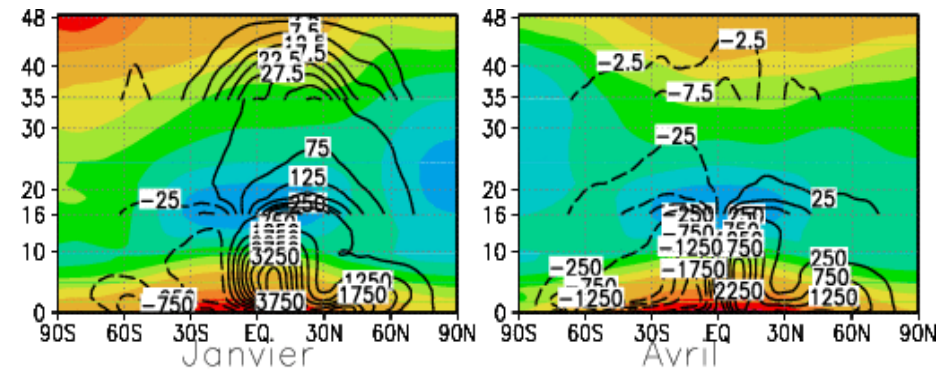
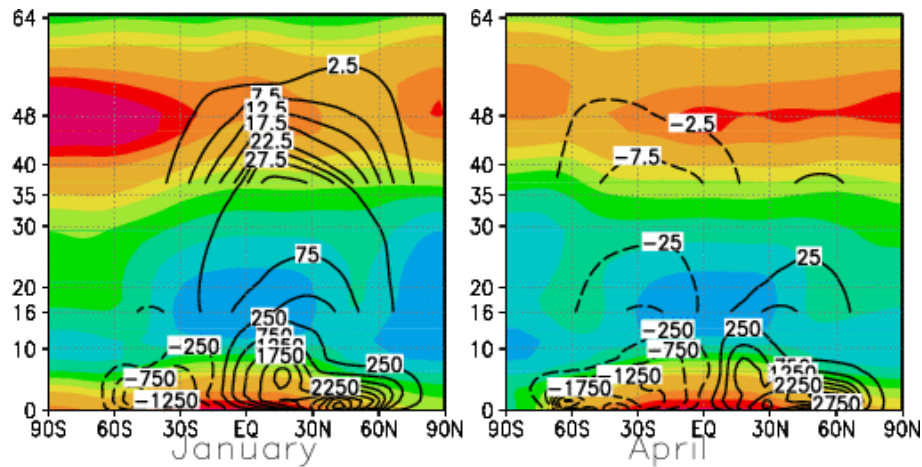
I. Climatologies moyennes

I.2) Climatologies de base de LMDz

Températures en moyenne zonale et circulation de Brewer

LMDz Dobson

ERA 40



Rappel TEM:

$$\bar{v}^* = \bar{v} - \rho_0^{-1} (\rho_0 \overline{v'\theta'}) / \bar{\theta}_z$$

$$\bar{w}^* = \bar{w} + (a \cos \phi)^{-1} (\cos \phi \overline{v'\theta'}) / \bar{\theta}_z$$

$$\frac{\partial \Psi^*}{\partial z} = -\rho_0 \cos \phi v^*$$

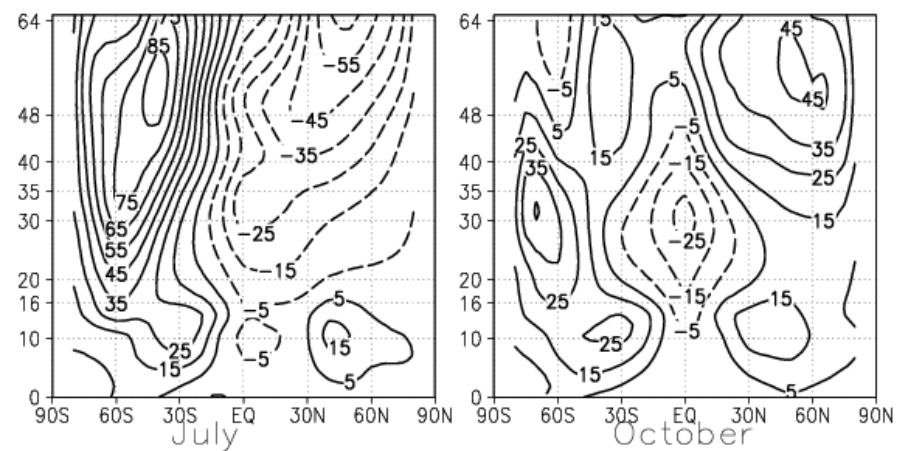
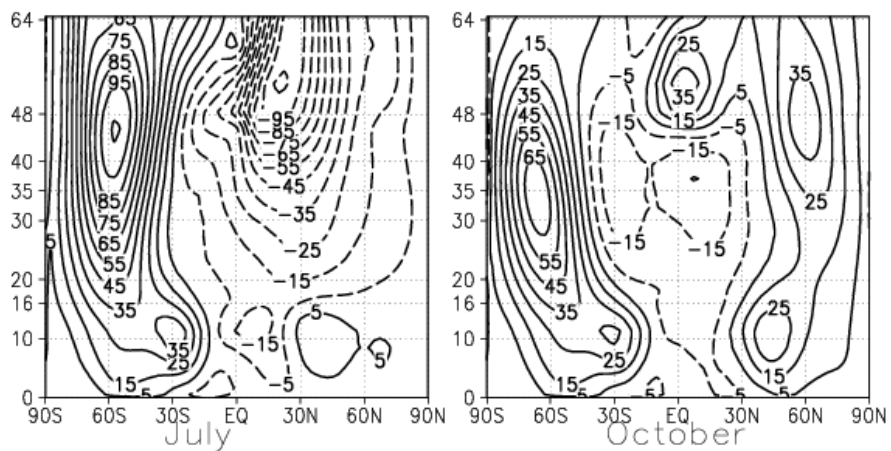
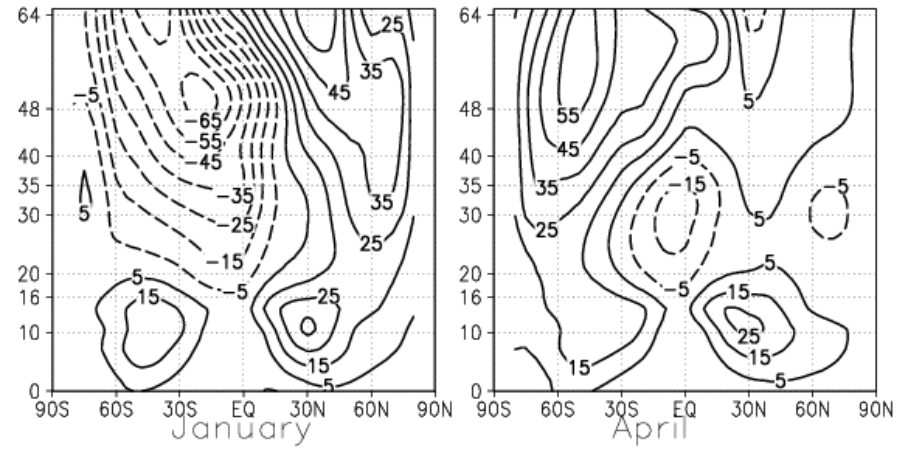
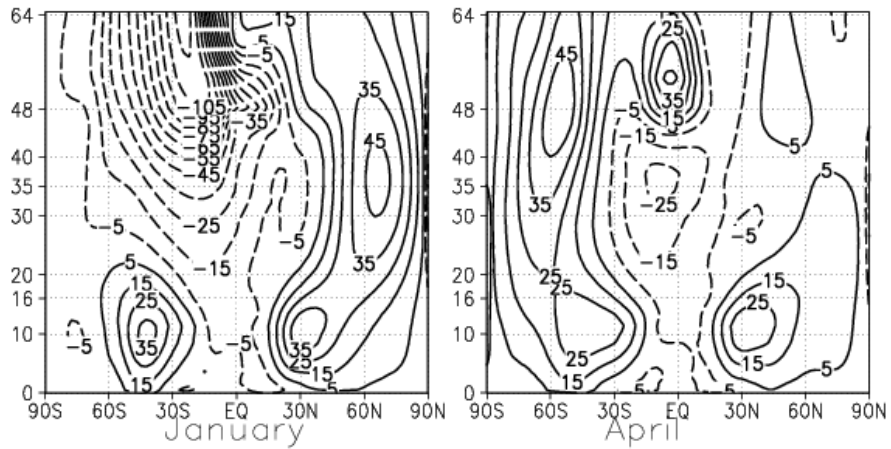
I. Climatologies moyennes

I.2) Climatologies de base de LMDz

Vent zonal en moyenne zonale

LMDz

CIRA



I. Climatologies moyennes

I.2) Climatologies de base de LMDz

Variabilité dans la troposphère aux moyennes latitudes
(Geopotentiel à 700hPa)

LMDz

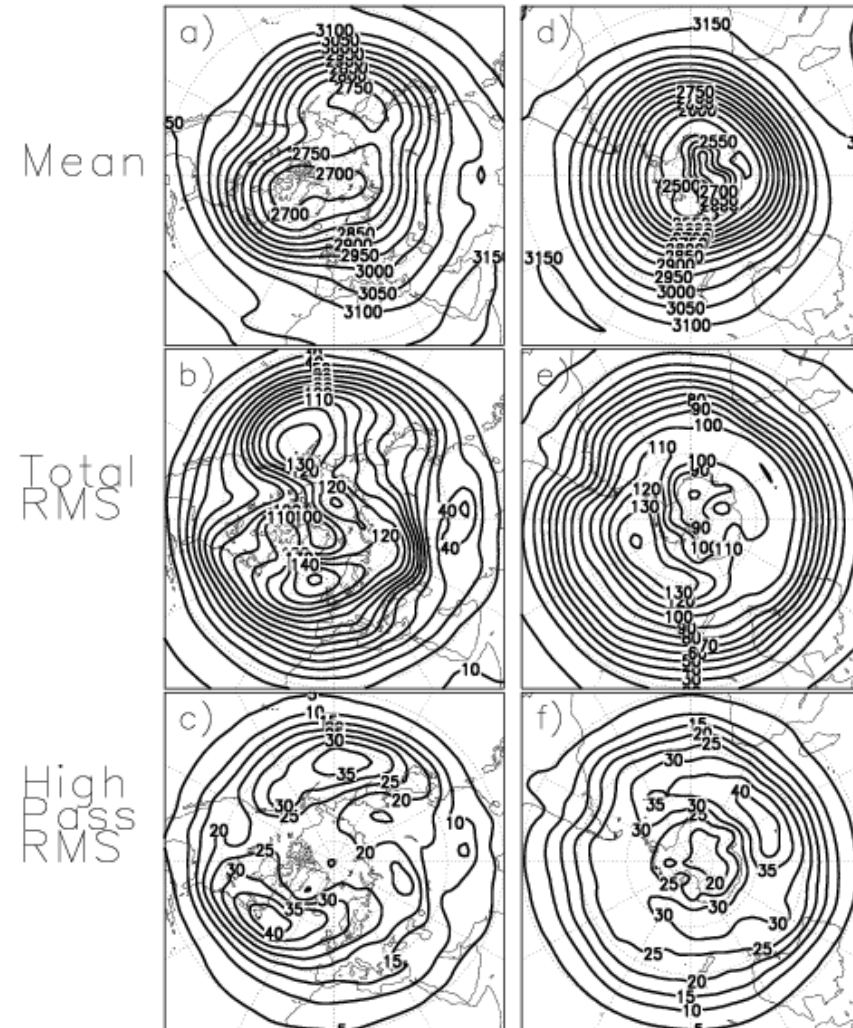
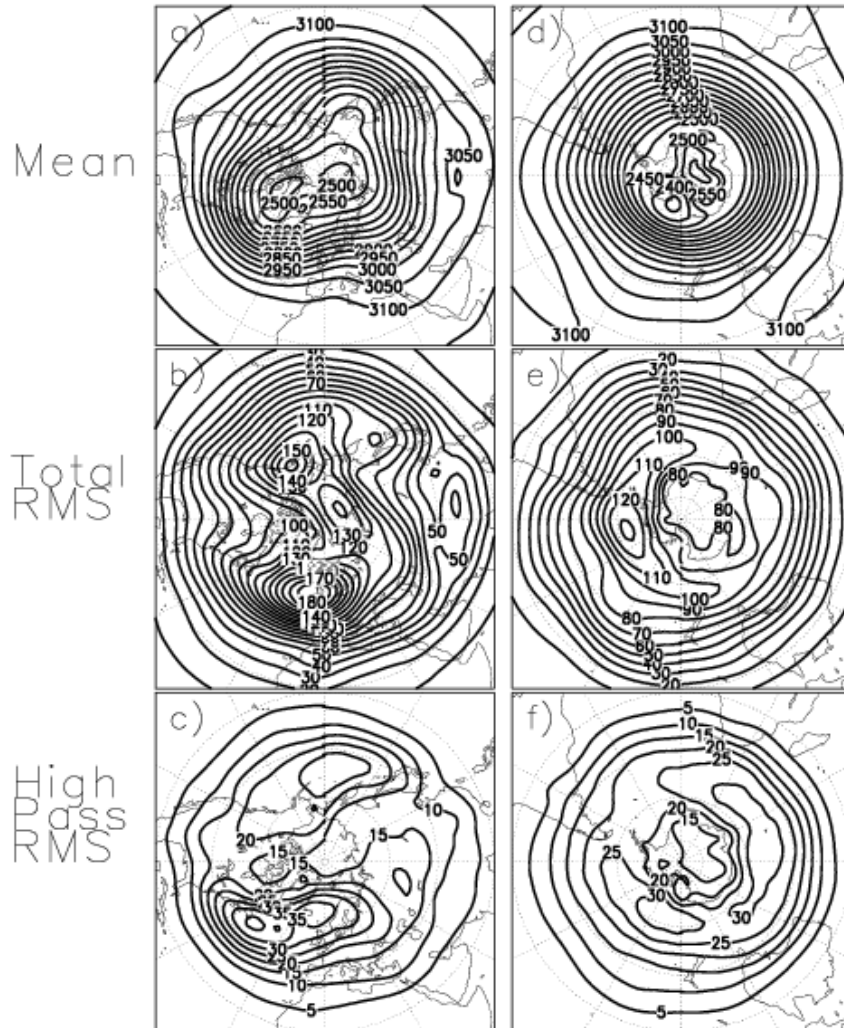
ECMWF

NH

SH

NH

SH



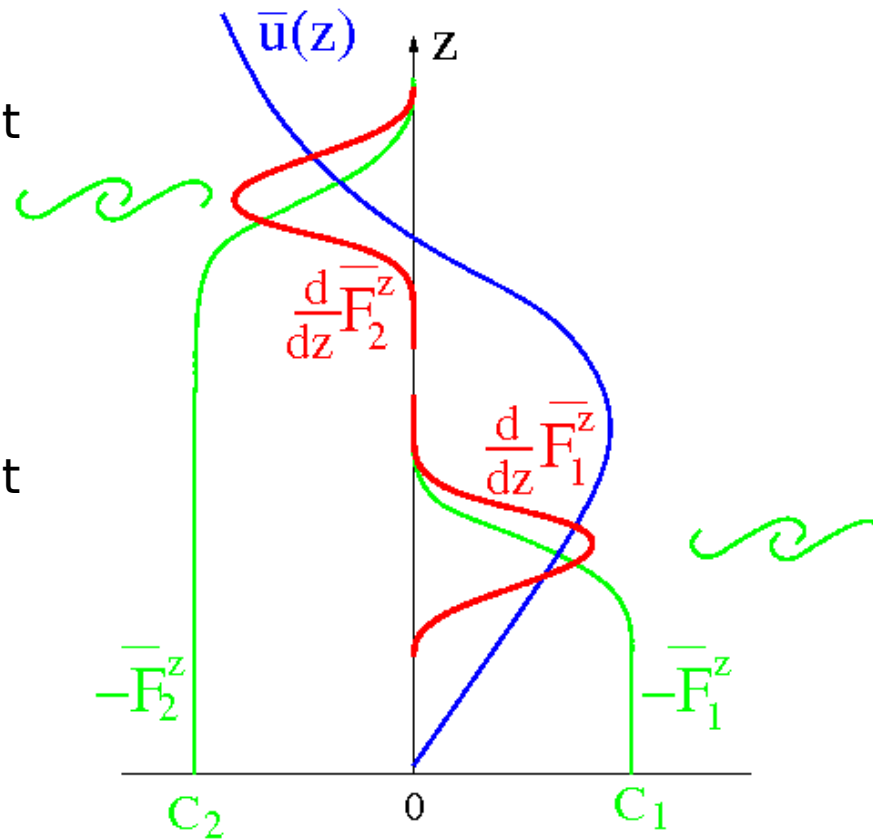
II. Les moyennes latitudes

II.1) Les ondes de Rossby

(Rappel sur les interactions ondes écoulement moyen)

Une onde se propageant vers l'Ouest freine l'écoulement moyen lorsqu'elle déferle.

Une onde se propageant vers l'est accélère l'écoulement moyen lorsqu'elle déferle.



II. Les moyennes latitudes

II.1) Les ondes de Rossby (Rappel)

Séparation entre état de base et perturbation:

$$u_g = \bar{u}_0(y, z) + u'_g + O(\alpha^2), \quad v_g = v'_g + O(\alpha^2),$$

$$\theta_e = \bar{\theta}_0 + \theta' + O(\alpha^2)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u}_0 \frac{\partial}{\partial x} \right) q' + v' \bar{q}_{0y} = Z'$$

Le gradient de vorticité potentielle de l'écoulement de base joue un rôle central:

$$\bar{q}_{0y} = \beta - \bar{u}_{0yy} - \rho_0^{-1} \left(\frac{\rho_0 f_0^2}{N^2} \bar{u}_{0z} \right)_z$$

Milieu uniforme:

Vitesse de groupe verticale

$$C_{gz} = \frac{\partial \omega}{\partial m} = \frac{\partial \hat{\omega}}{\partial m} = + \frac{2k\beta m f^2 / N^2}{\left(k^2 + l^2 + \frac{f^2}{N^2} (m^2 + 1/(4H^2)) \right)^2}$$

Impose $m > 0$, pour assurer la propagation vers le haut.

Notez aussi:

$$m^2 = \frac{N^2}{f^2} \left(\frac{\beta}{\bar{u}_0 - C} - k^2 - l^2 \right) - 1/4H^2$$

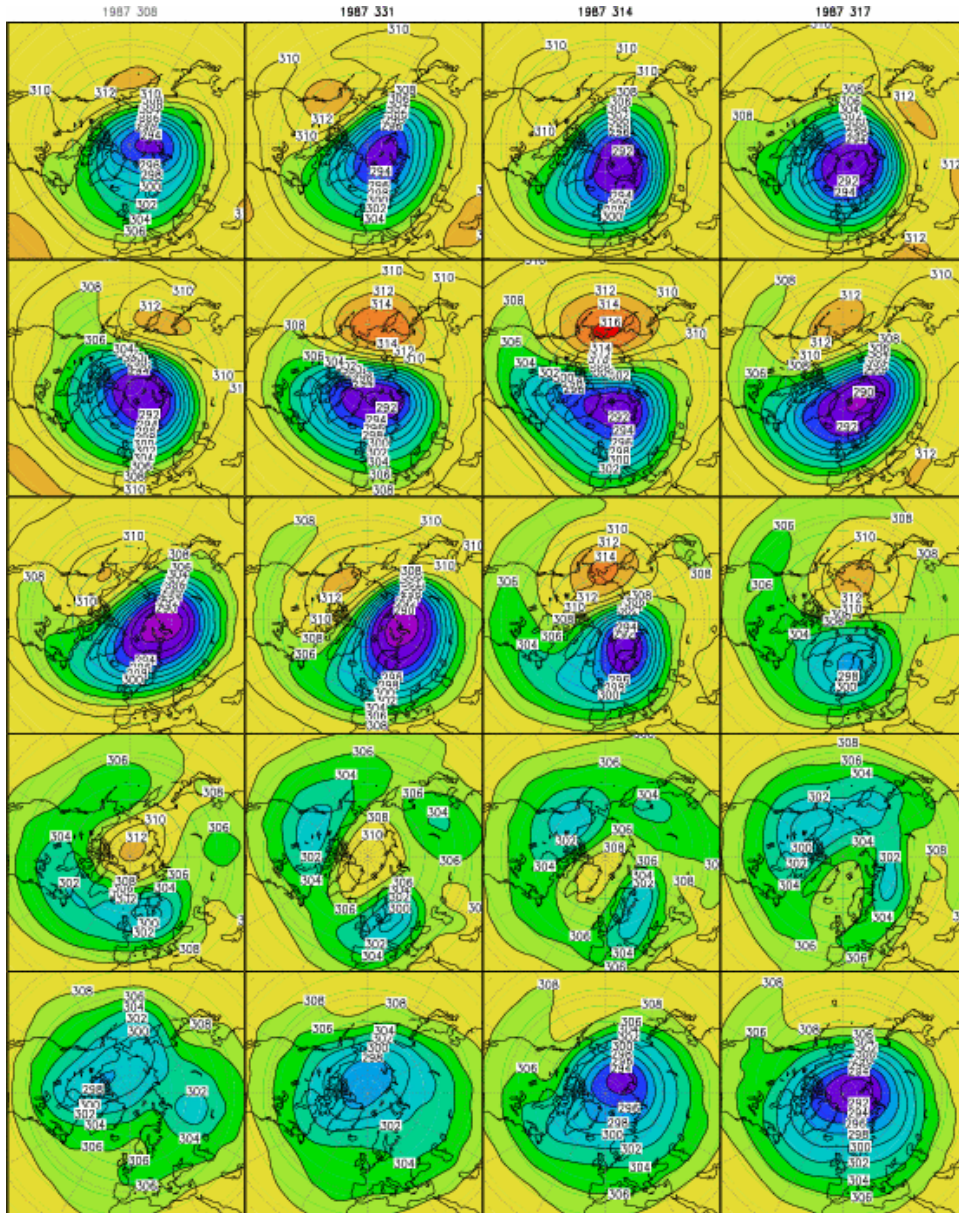
Les lignes de phases sont inclinées vers l'Est

Seules les ondes longues se propagent vers le haut.

Lorsque \bar{u}_0 est petit et >0 , plus d'ondes passent!

II. Les moyennes latitudes

II.1) Les ondes de Rossby



Un réchauffement stratosphérique:
Cartes de Z à 32km,
tout les 3 Jours en Déc. 1987
Données ECMWF

Certains mois en Hiver de l'hémisphère Nord l'activité des ondes planétaires est très forte

Lors de ces épisodes le réchauffement des régions polaires par les ondes est encore plus fort

Noter tout d'abord la forte activité de l'onde 1, puis l'apparition de l'onde 2 lorsque le réchauffement est maximum

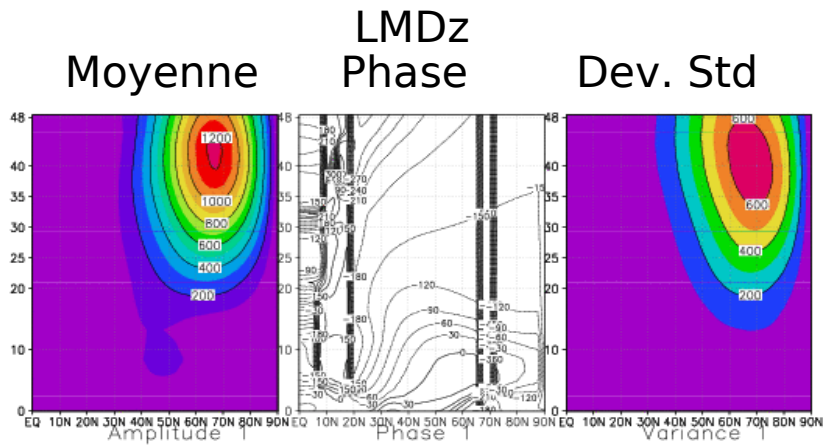
Noter aussi la reconstruction du vortex polaire à la fin

II. Les moyennes latitudes

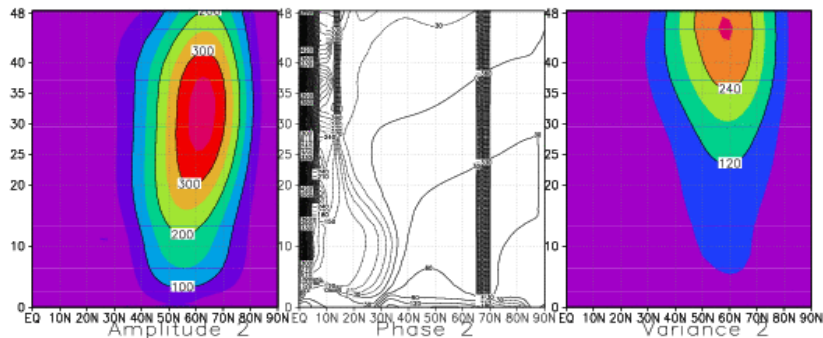
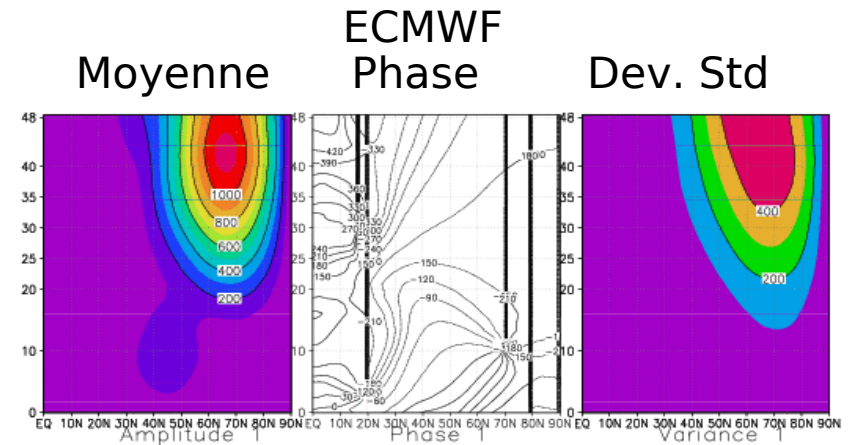
II.1) Les ondes de Rossby

Ondes planétaires dans la stratosphère, en hiver et pour l'hémisphère Nord

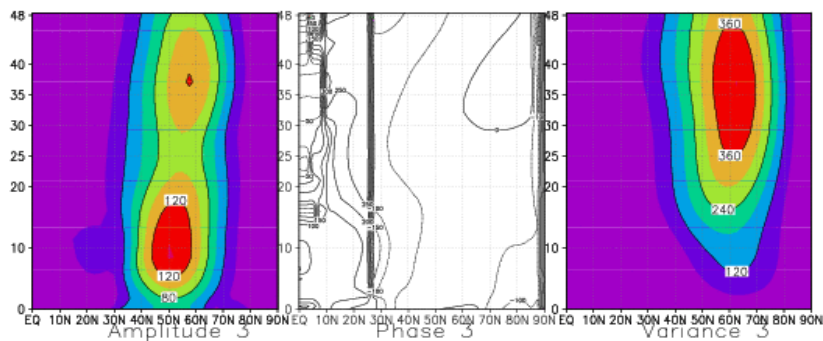
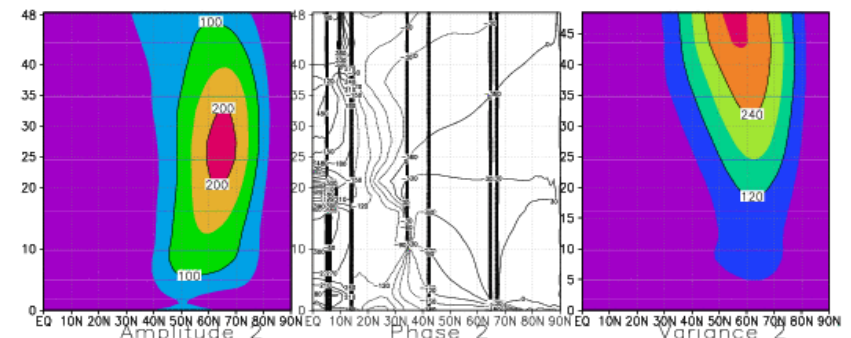
$$\Phi(\lambda, \phi, z, t) = \Phi_0(\phi, z, t) + \sum_{s=1}^3 \Phi_s(\phi, z, t) \cos[s\lambda + \alpha(\phi, z)]$$



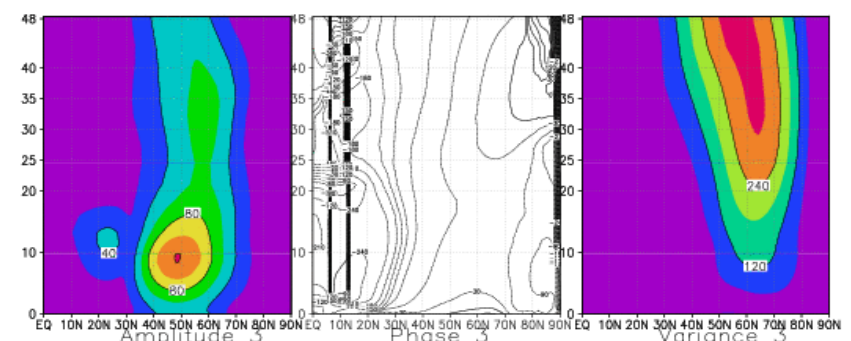
Onde 1



Onde 2



Onde 3

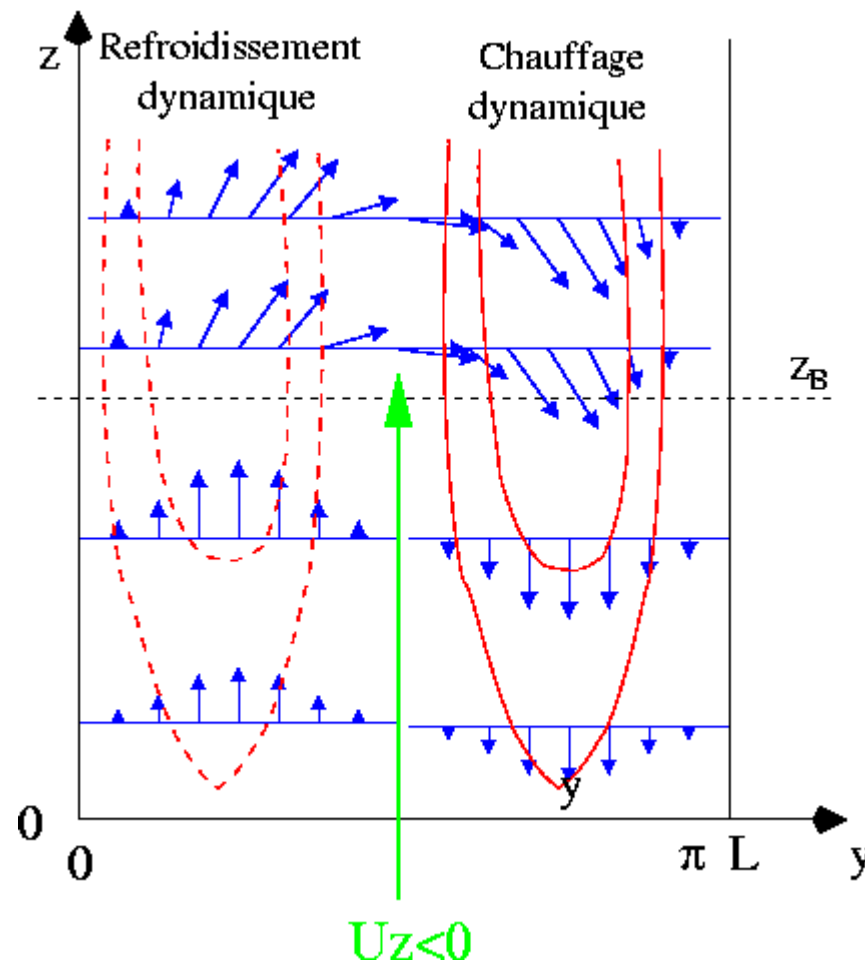


II. Les moyennes latitudes

II.1) Les ondes de Rossby

(Rappel sur le forçage des réchauffements stratosphériques soudains)

Réponse Stationnaire de l'écoulement moyen en présence d'une onde de Rossby déferlant au dessus de z_b



II. Les moyennes latitudes

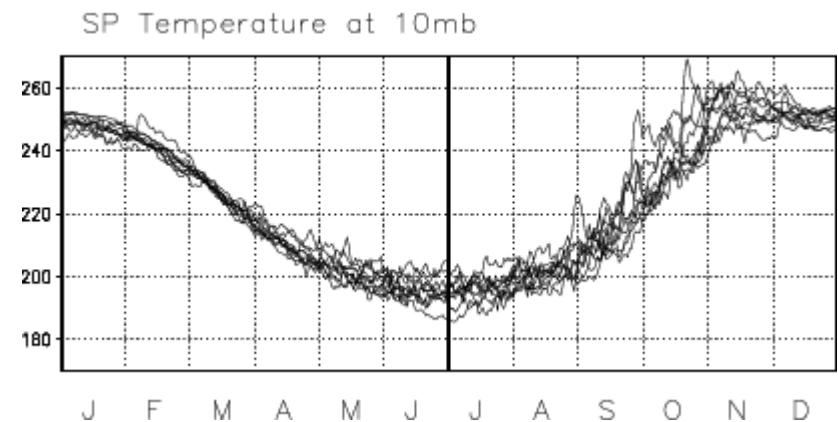
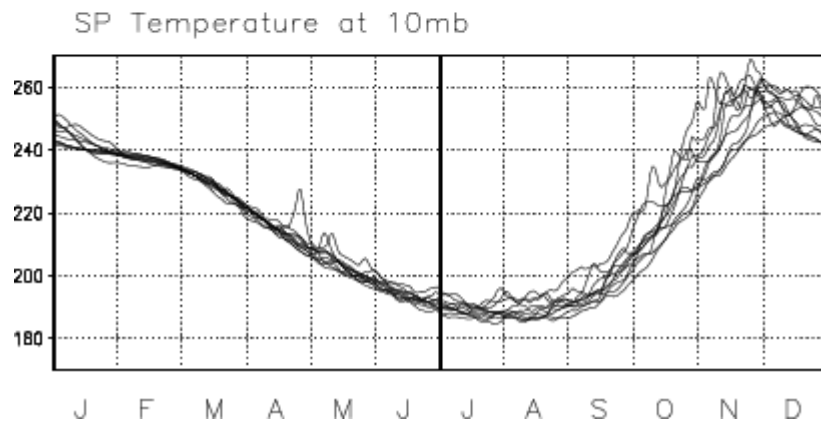
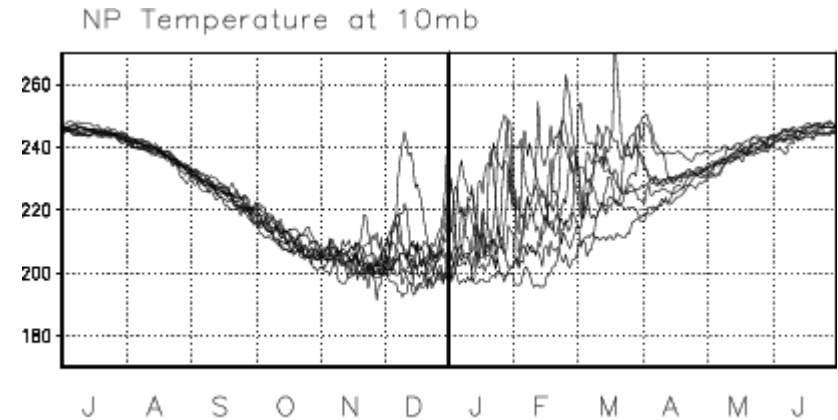
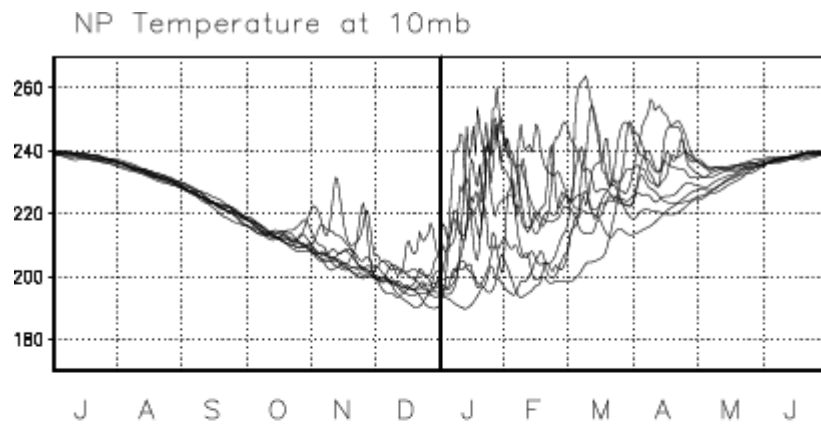
II.1) Les réchauffements stratosphériques soudains

La T° aux pôles

(Un indicateur des réchauffements stratosphériques soudains)
10 ans montrés pour que cela soit lisible

LMDz

ERA40



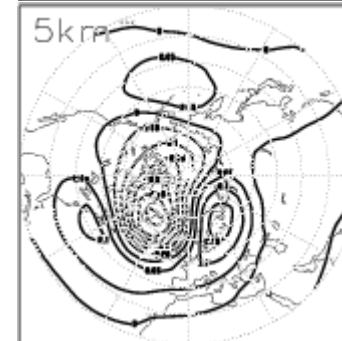
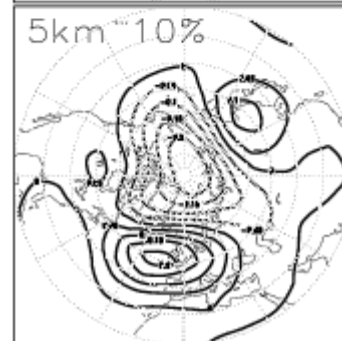
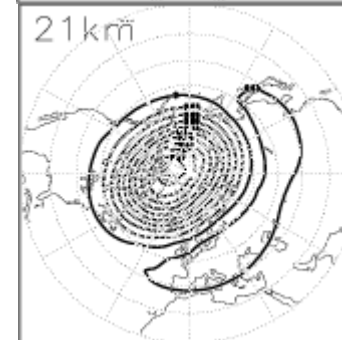
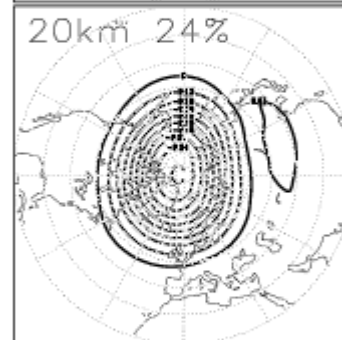
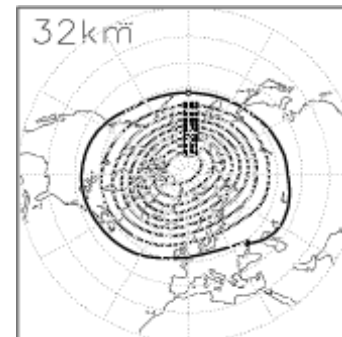
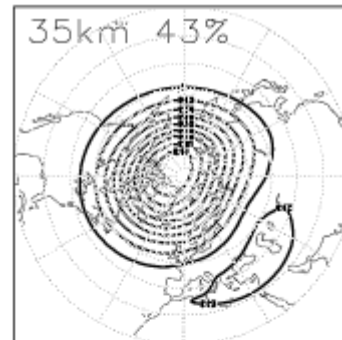
II. Les moyennes latitudes

II.1) L'oscillation Arctique

EOF1

LMDZ

ECMWF

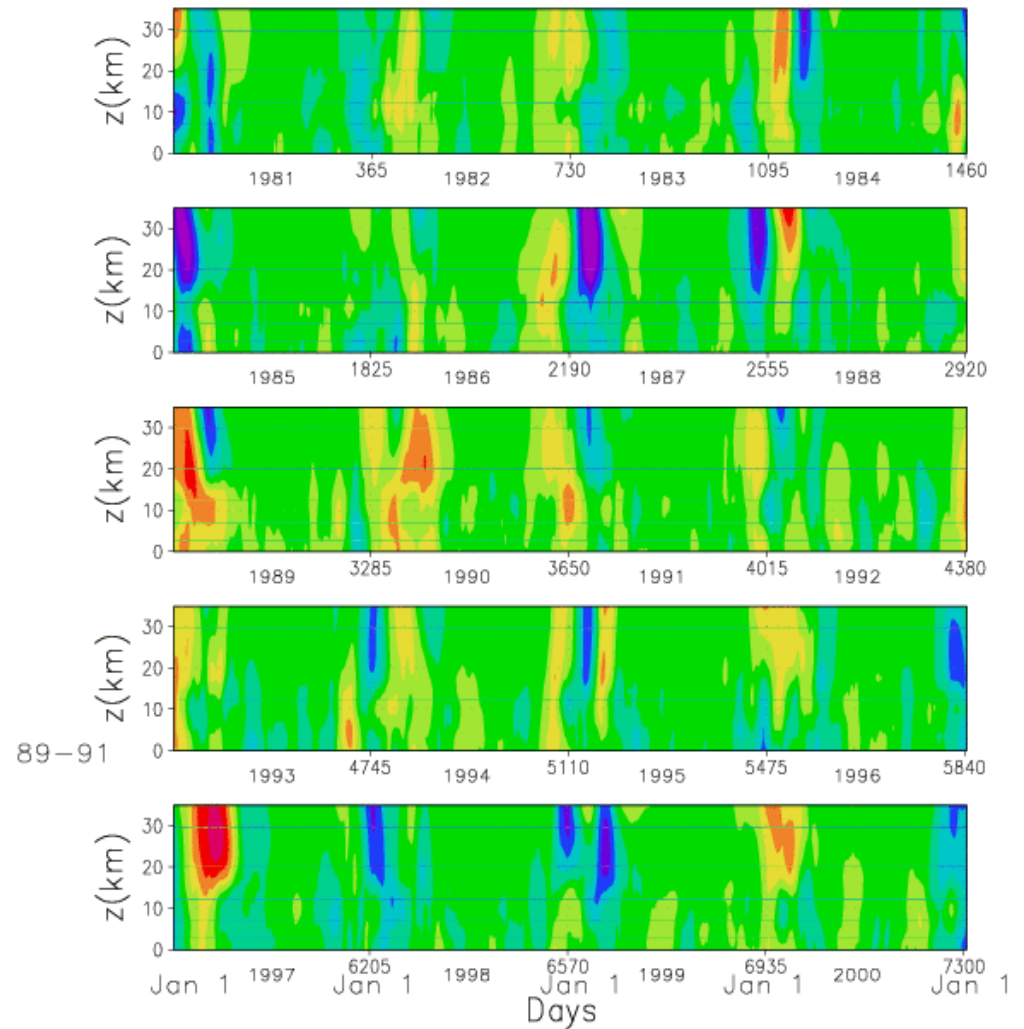
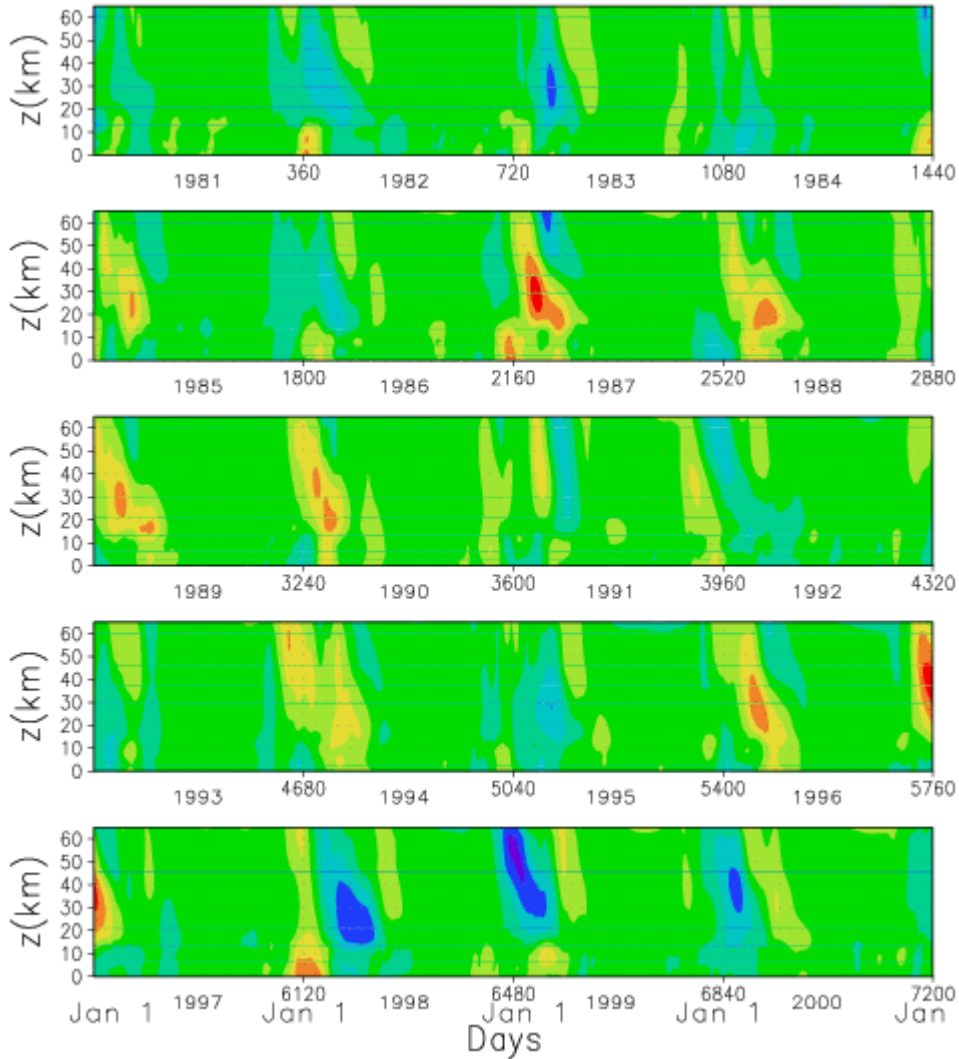


II. Les moyennes latitudes

II.1) L'oscillation Arctique

PC1
LMDZ

PC1
ECMWF



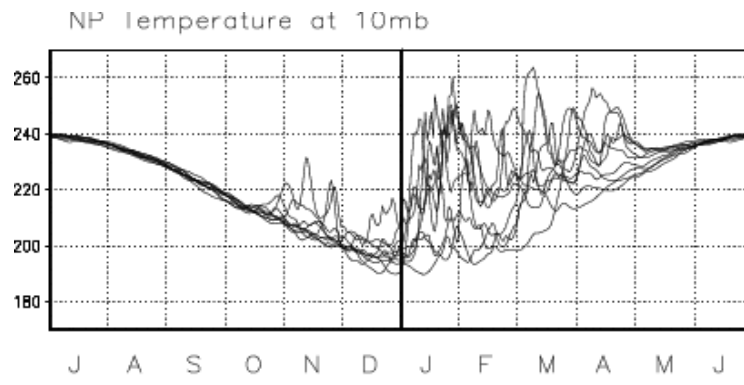
II. Les moyennes latitudes

II.2) Sensibilité du climat au sol a la présence de la stratosphère

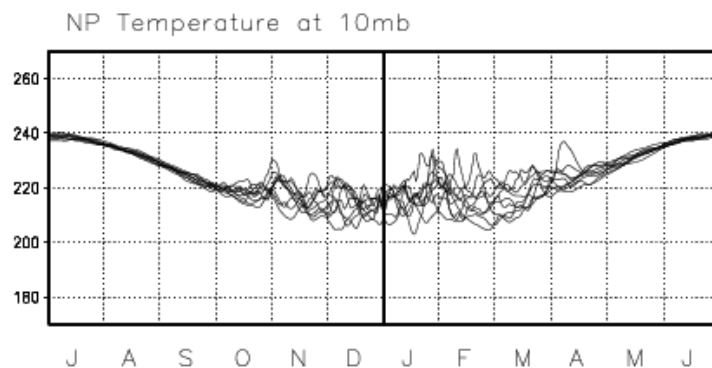
On réduit la variabilité stratosphérique en exagérant l'amplitude des ondes de gravité paramétrées

LMDZ

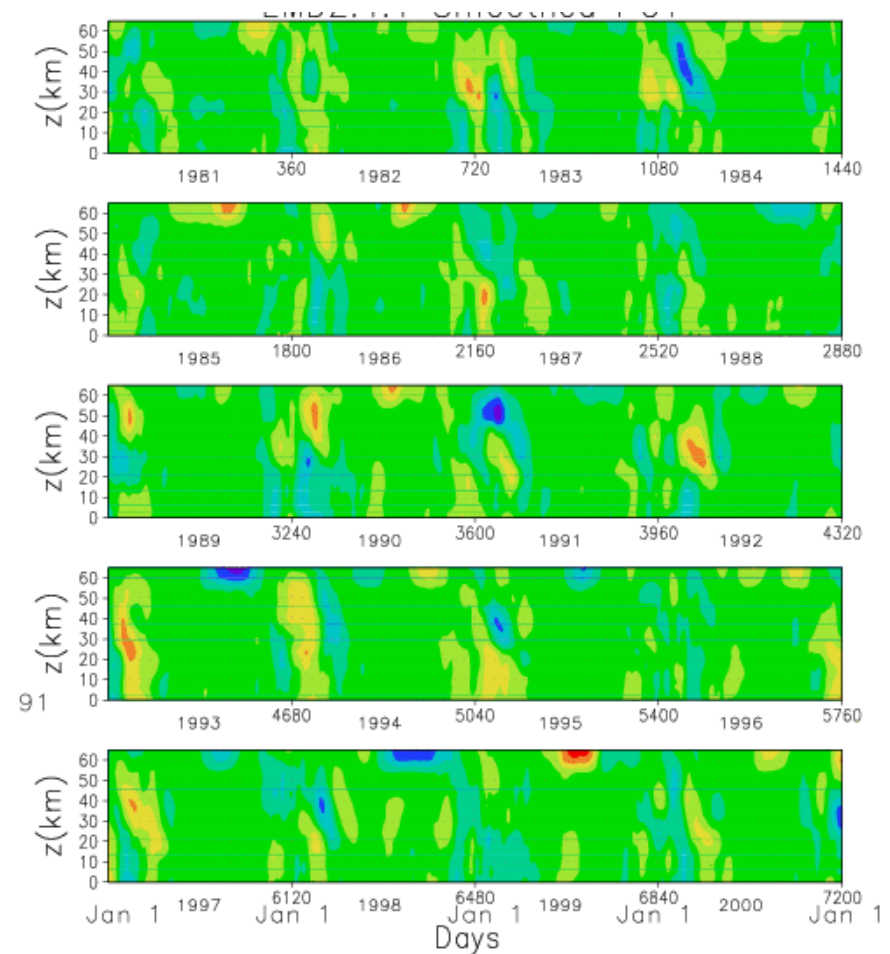
Weak OGWs



Strong OGWs



PC1 with Strong GWs

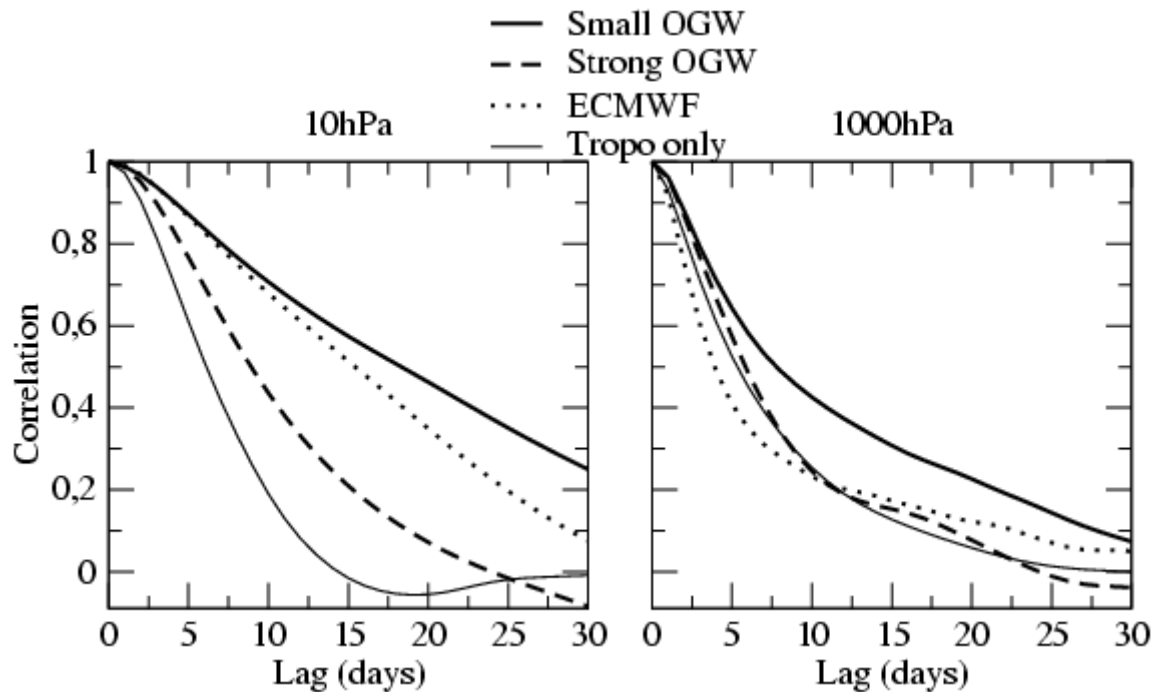


II. Les moyennes latitudes

II.2) Sensibilité du climat au sol a la présence de la stratosphère

On réduit la variabilité stratosphérique en exagérant l'amplitude des ondes de gravité paramétrées

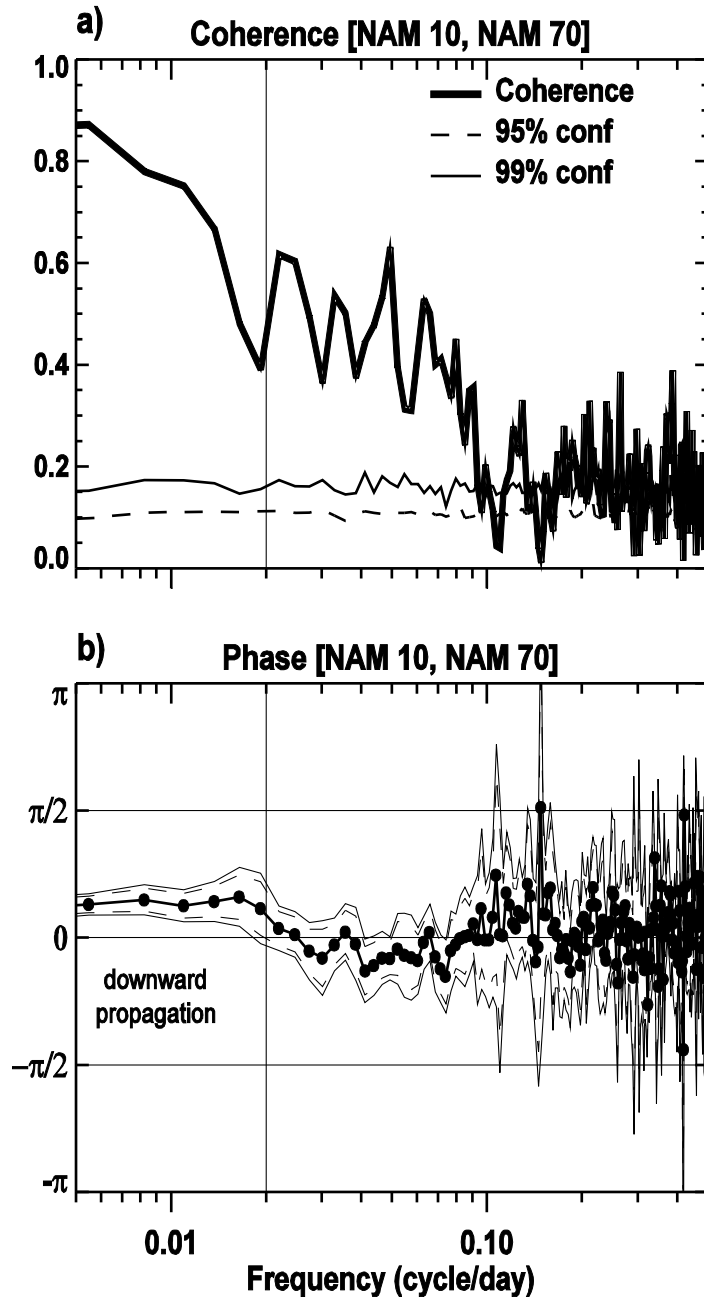
Modification de la persistance de l'AO au sol et a 32km



II. Les moyennes latitudes

II.2) Les échelles de temps de la propagation vers le bas de l'OA

NCEP/NCAR



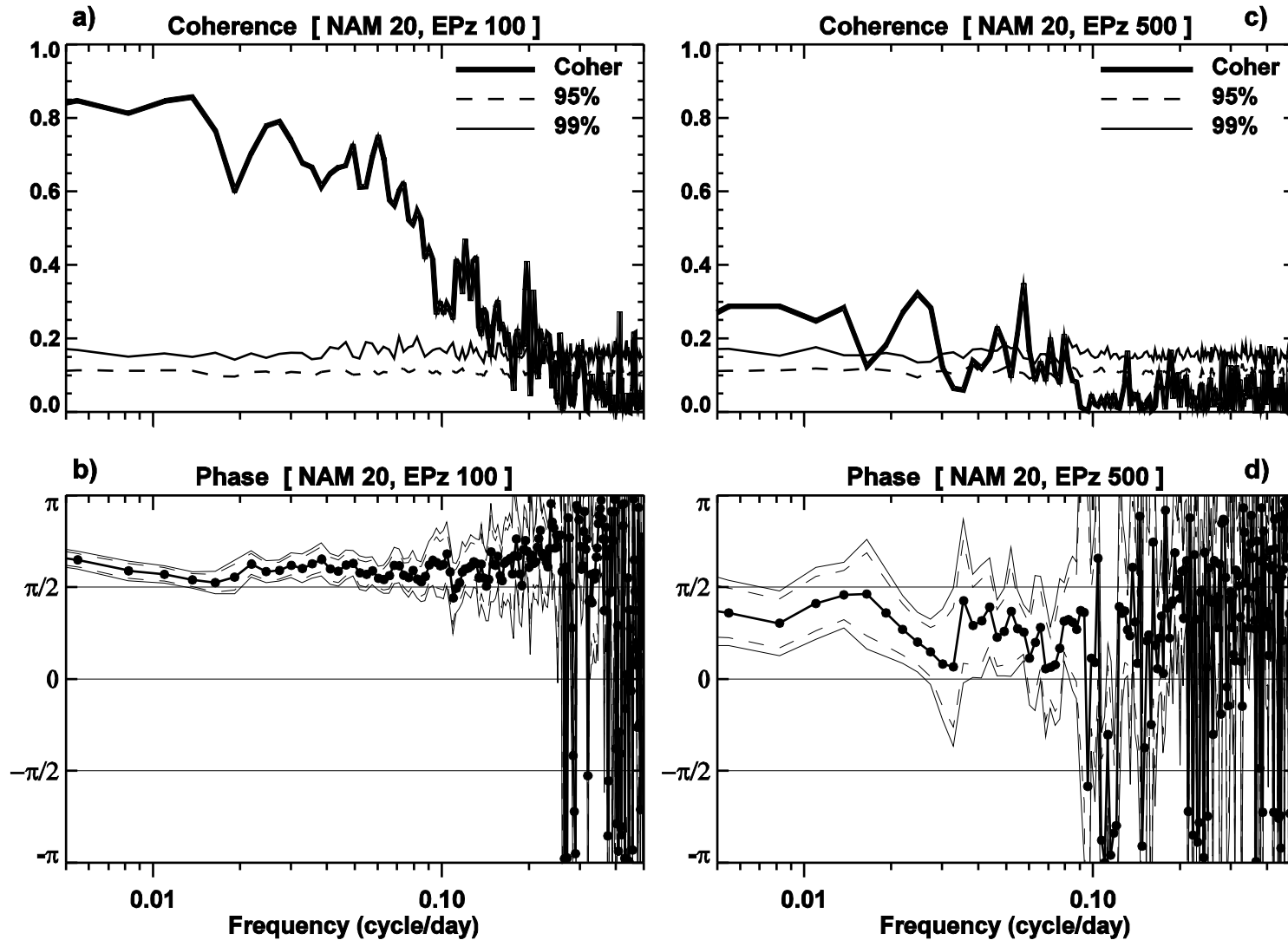
Analyse co-spectrale entre l'AO
à 10hPa et à 70hPa

II. Les moyennes latitudes

II.2) Les échelles de temps des interactions ondes écoulement moyen responsables de la propagation vers le bas de l'OA

Analyse co-spectrale entre l'AO à 20hPa et les flux d'EP à 100hPa et à 500hPa

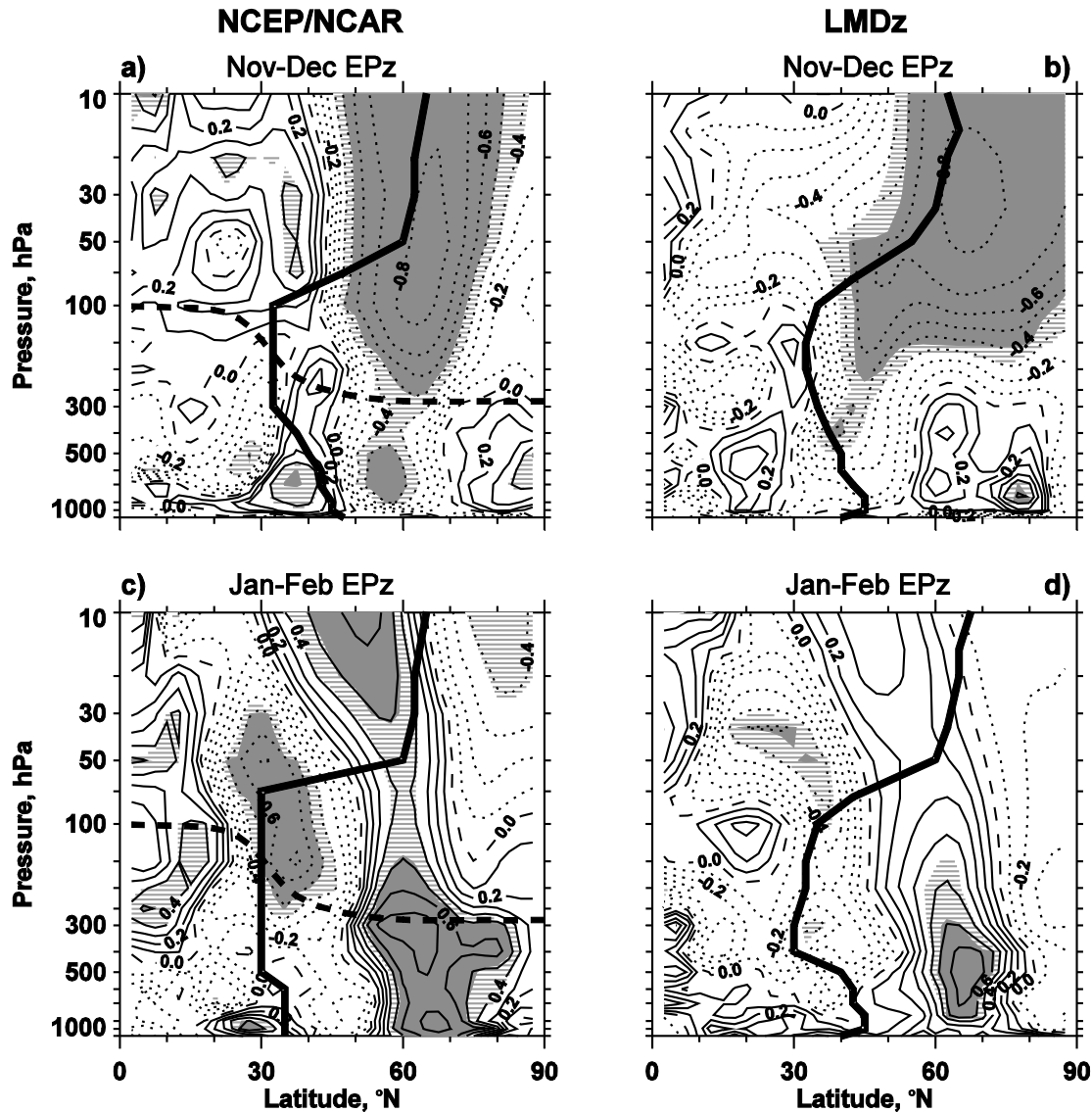
NCEP/NCAR



II. Les moyennes latitudes

II.2) Un effet en retour de la stratosphère sur les ondes planétaires dans la troposphère?

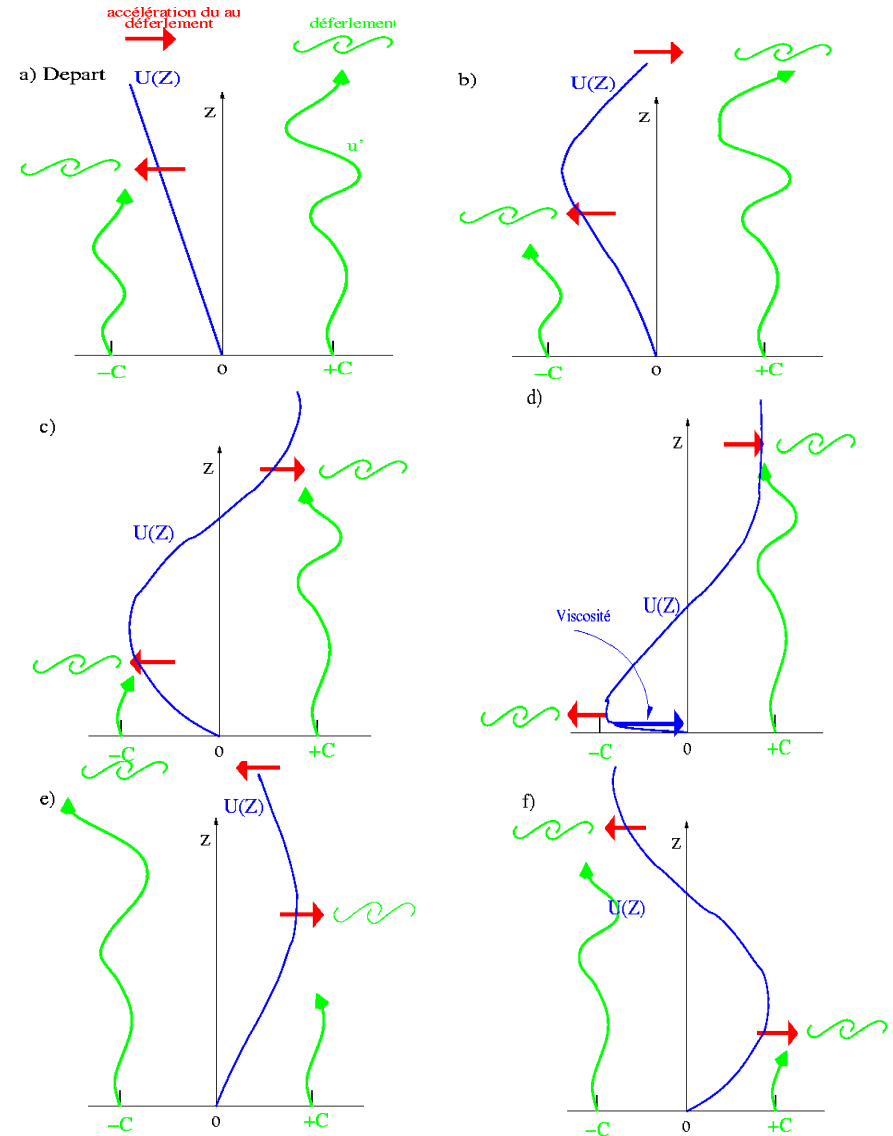
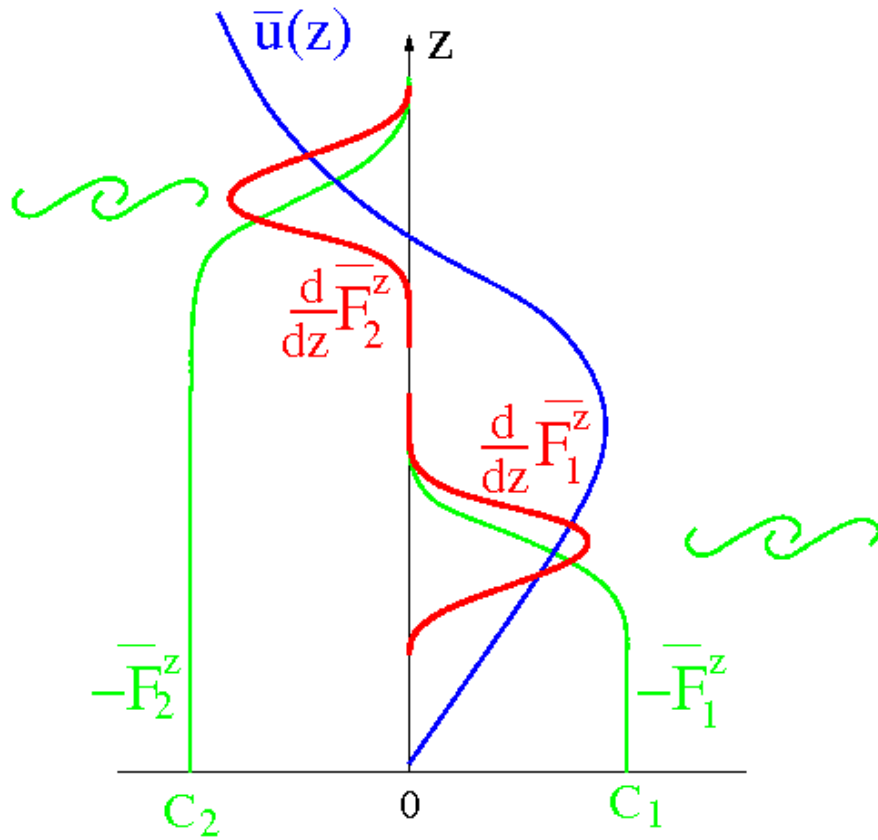
Regression du Flux vertical d'EP sur l'OA à 20hPa et en moyenne en Decembre-Janvier



III. Les régions équatoriales

III.1) QBO et SAO

Rappel des mécanismes dynamiques



III. Les régions équatoriales

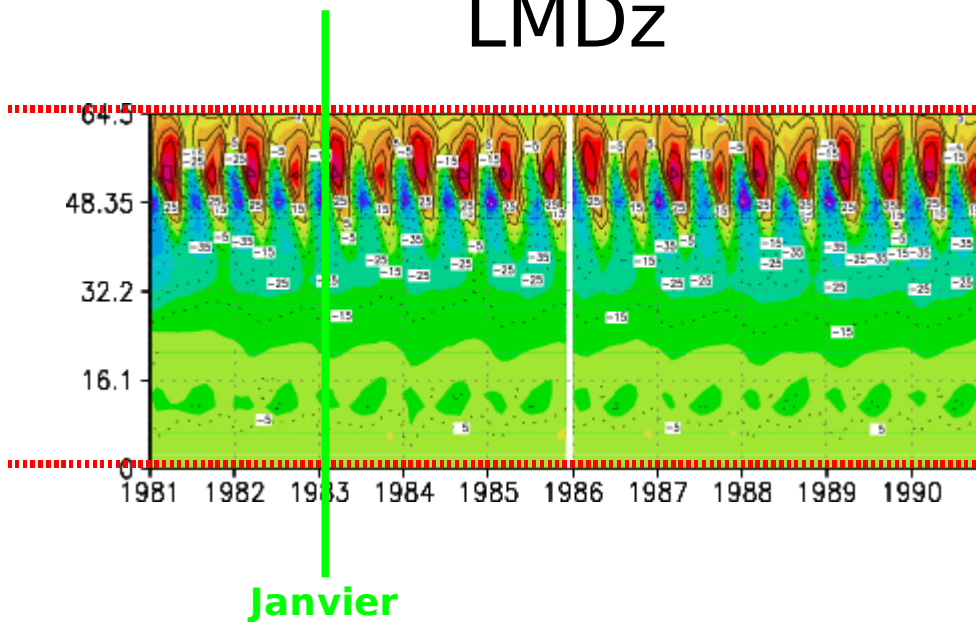
III.1) QBO et SAO

La moyenne zonale du vent zonal a l'Equateur

SAO dans la basse mésosphère en phase et avec des périodes où le vent zonal est positif (il y a des ondes de Kelvin!)

Pas de QBO dans la basse stratosphère!

LMDz



UARS

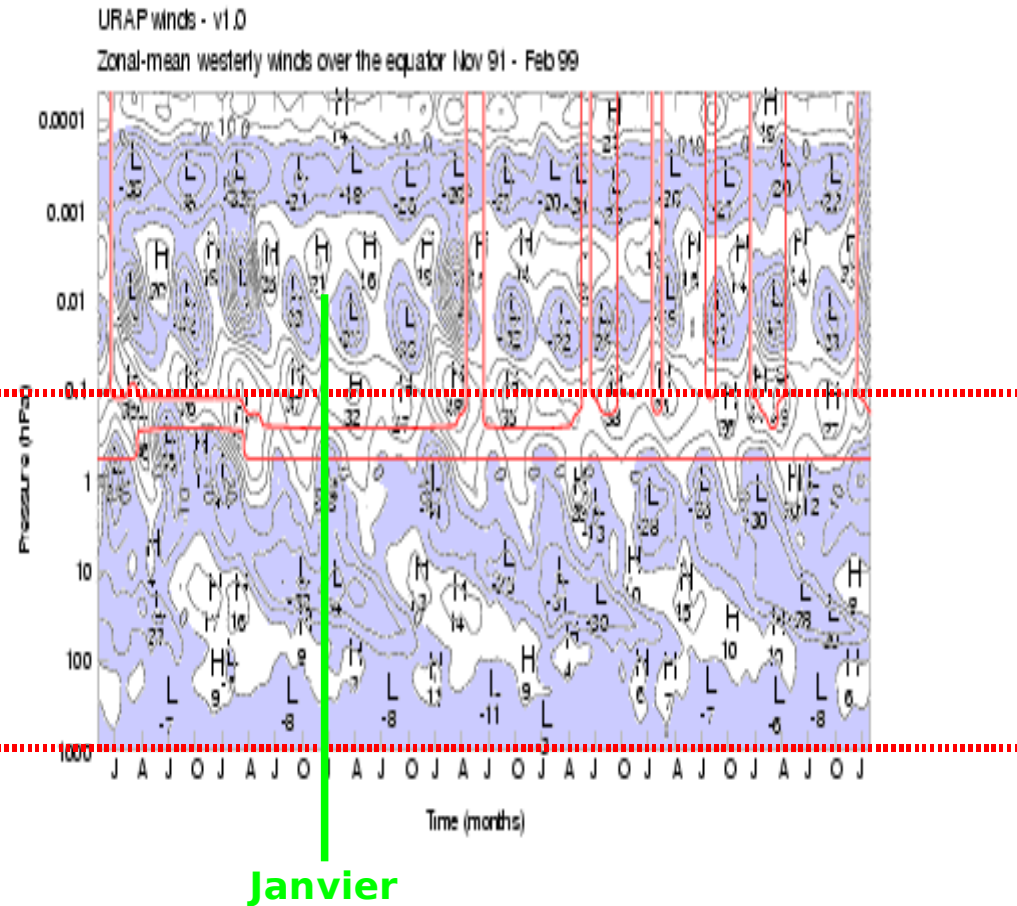


Figure 6. Time series of zonal-mean westerly winds over the equator, from November 1991 to February 1999. The tick marks along the x-axis mark each January, April, July and October. The additional lines show where the values are mainly derived from interpolated or climatological data.

III. Les régions équatoriales

III.1) QBO et SAO

Pas de QBO:

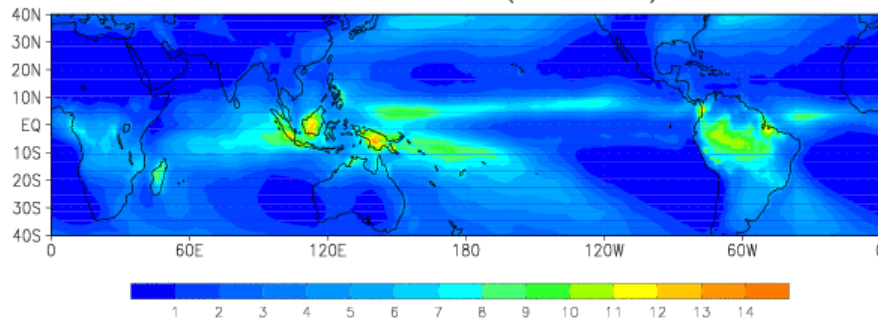
Forçage insuffisant des ondes équatoriales?

Filtrage des ondes équatoriales par une résolution verticale trop grossière?
Déficits dans les paramétrisations des ondes de gravité?

Climatologie des précipitations à l'Equateur en hiver

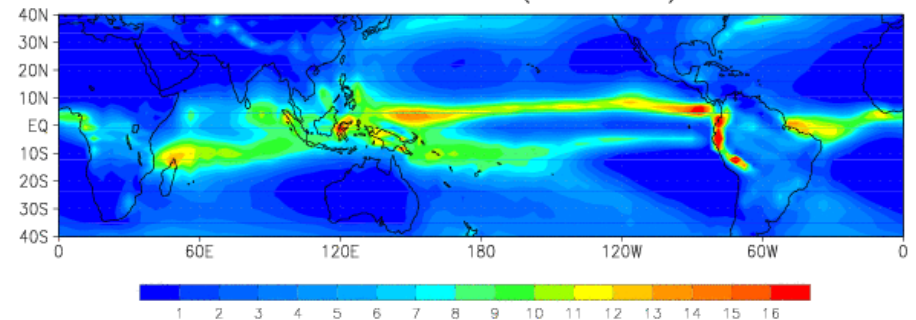
GPCP 1997-2008

Mean Winter (NDJFMA)

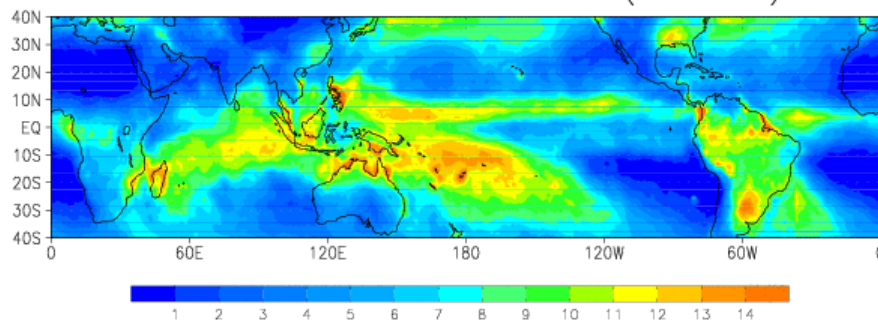


LMDz Tiedke

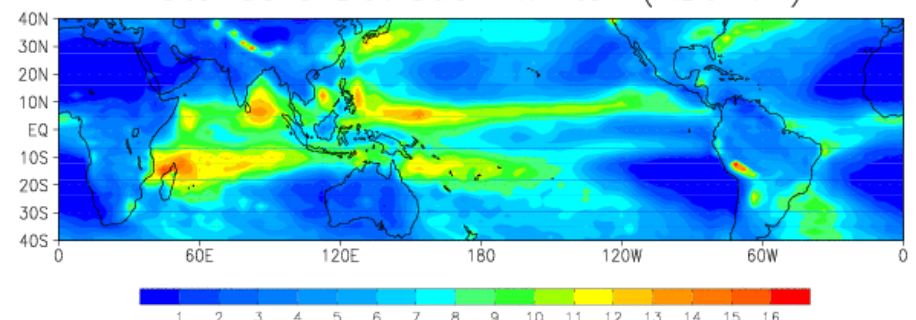
Mean Winter (NDJFMA)



Standard Deviation Winter (NDJFMA)



Standard Deviation Winter (NDJFMA)



III. Les régions équatoriales

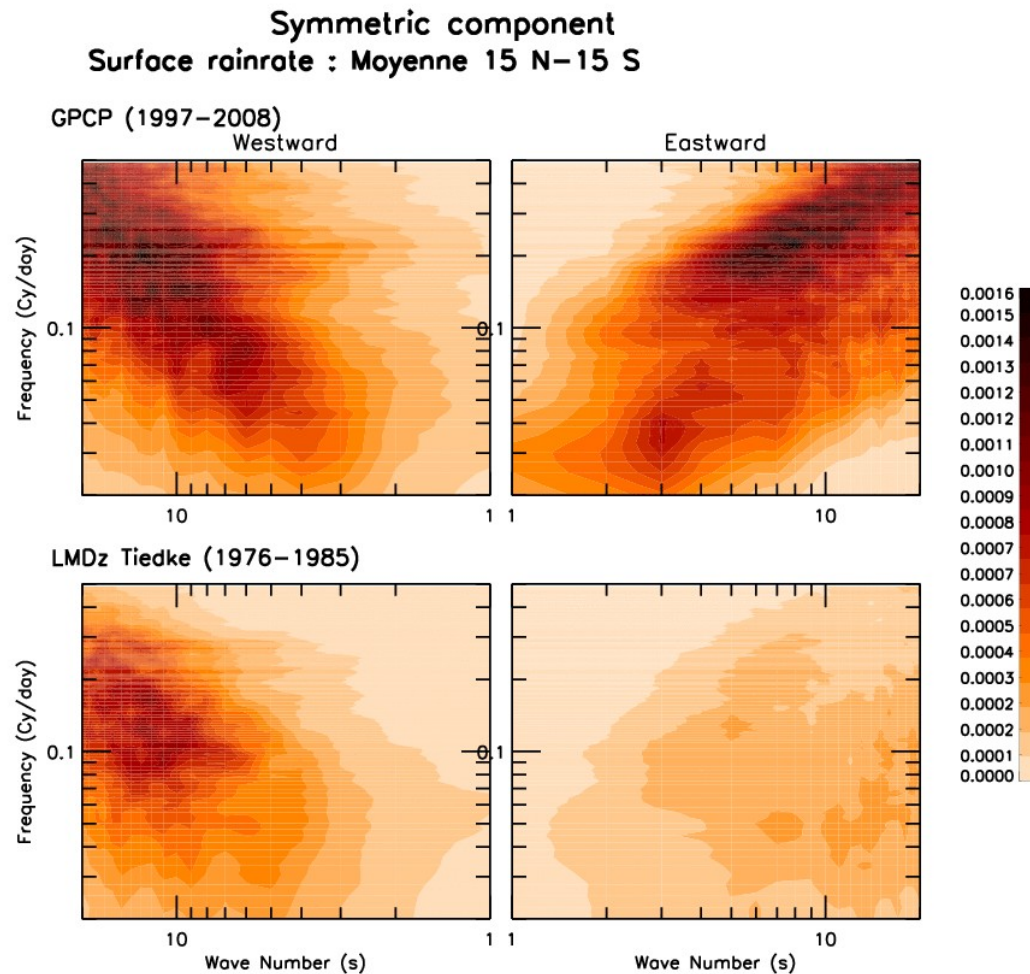
III.1) QBO et SAO

Pas de QBO:

Forçage insuffisant des ondes équatoriales?

Filtrage des ondes équatoriales par une résolution verticale trop grossière?
Déficits dans les paramétrisations des ondes de gravité?

Spectre des précipitations à l'Equateur en hiver



III. Les régions équatoriales

III.2) Les Ondes Equatoriales

Objective: Extract a 3D climatology of the gravest Equatorial Waves that propagate into the tropical stratosphere in order to evaluate the stratospheric equatorial dynamics in the LMDz GCM.

Method: Composite analysis of stratospheric fields, keyed to indexes measuring the Waves entering in the low stratosphere at a given altitude (here 21km)

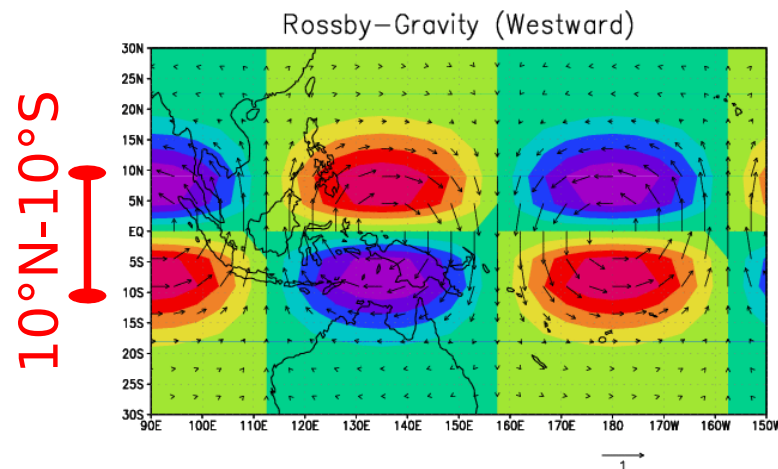
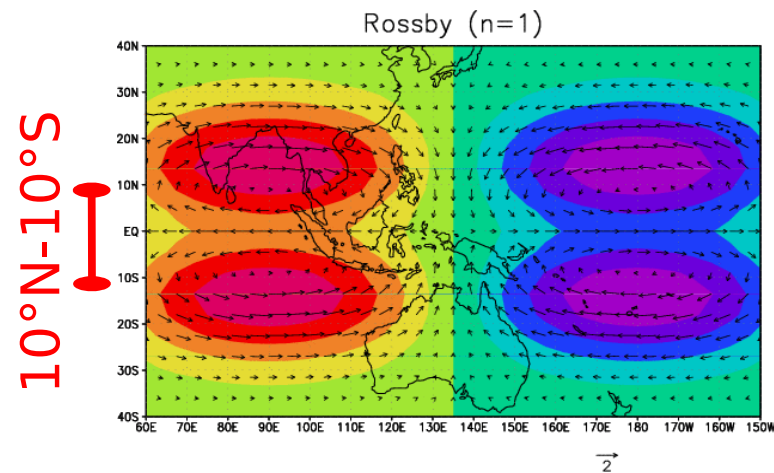
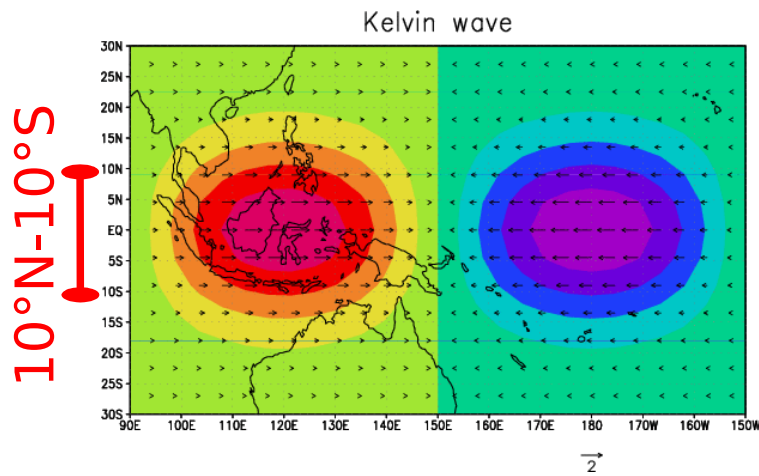
III. Les régions équatoriales

III.2) Les Ondes Equatoriales

A statistical method using simple theoretical results:

The gravest equatorial waves are characterized by the fact that a least one dynamical field is of uniform sign over the Equatorial Band and at a given longitude:

u , T , and Z for the Kelvin waves ($n=-1$) and for the Rossby waves (with $n=1$),
 v for the Rossby Gravity waves ($n=0$).



III. Les régions équatoriales

III.2) Les Ondes Equatoriales

Methode d'Analyse spectrale

Frequency (ω) versus zonal wavenumber (s) Spectra of T, Z, u, and v averaged over [10°S,10°N]

Evaluation of the Spectra

- 1) Evaluate the Equatorial mean of each quantity:

$$\bar{u}(\lambda, z, d, y) = \sum_{-10^{\circ}}^{+10^{\circ}} u(\lambda, \phi, z, d, y) d\phi$$

- 2) Extract the double Fourier transform of the fields (each years y):

$$\bar{u}(\lambda, z, d, y) = \sum_{s=0}^{s=nlo/2-1} \sum_{n=-182}^{n=182} \hat{u}(s, z, \omega_n, y) e^{i(s\lambda - \omega_n t)}$$

- 3) Build each year the Periodogram:

$$P_{\bar{u}}(s, z, \omega_n, y) = \hat{u} \hat{u}^*$$

- 4) Average the Periodograms over the years and over the altitude located in the stratosphere to estimate the Spectra:

$$S_{\bar{u}}(s, \omega_n) \approx \sum_{z=16km}^{z=32km} \sum_{y=1980}^{y=2004} P_{\bar{u}}(s, z, \omega_n, y)$$

III. Les régions équatoriales

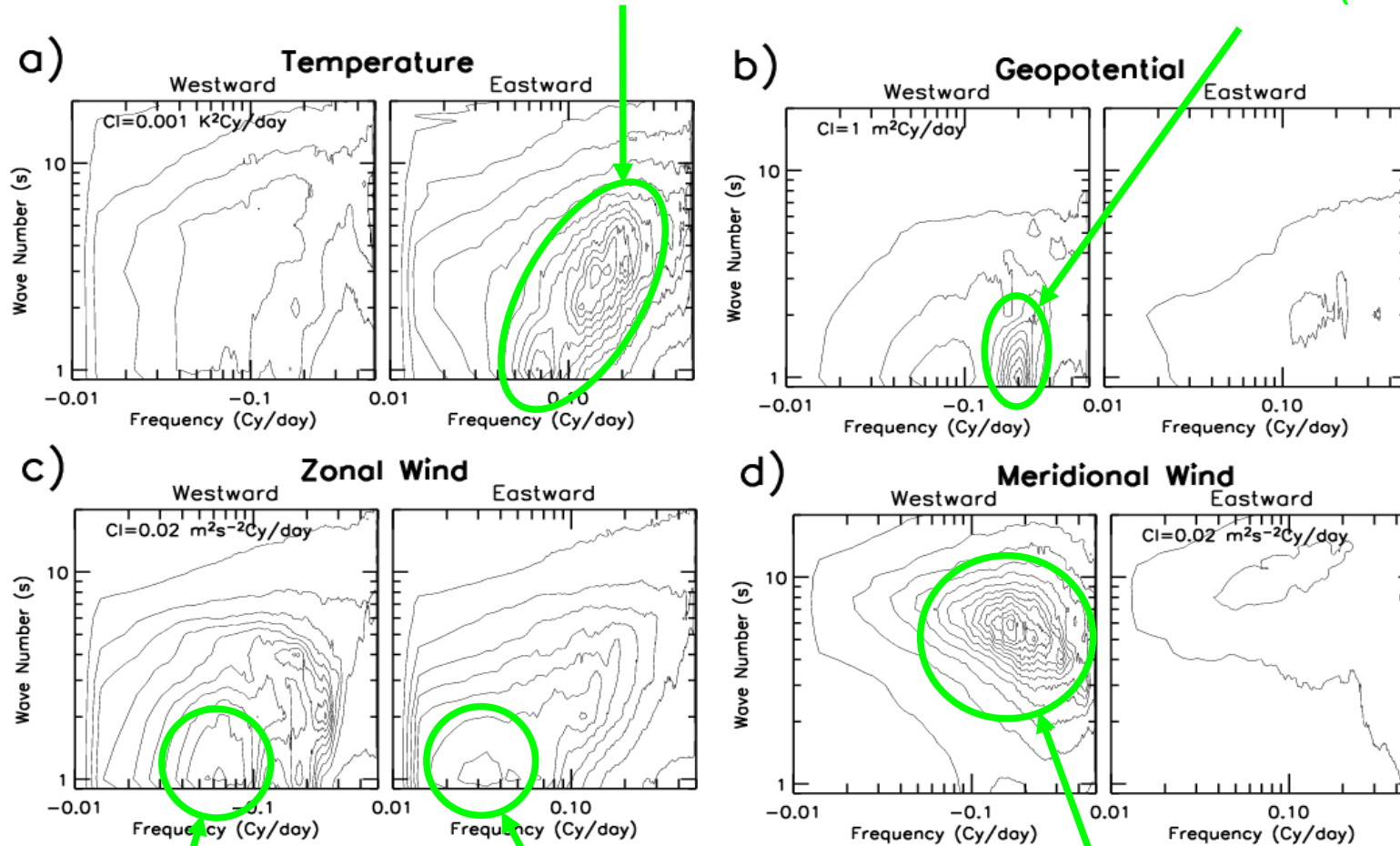
III.2) Les Ondes Equatoriales

Analyse spectrale

Frequency (ω)- Wavenumber (s) Spectra of T, Z, u, and v averaged over [10°S,10°N]
Results from Reanalysis (1980-2004)

Kelvin ($s=2-6$)

Free PW ($s=1$)



Free PW $s=1$

MJO

Rossby-Gravity
 $s=4-8$

III. Les régions équatoriales

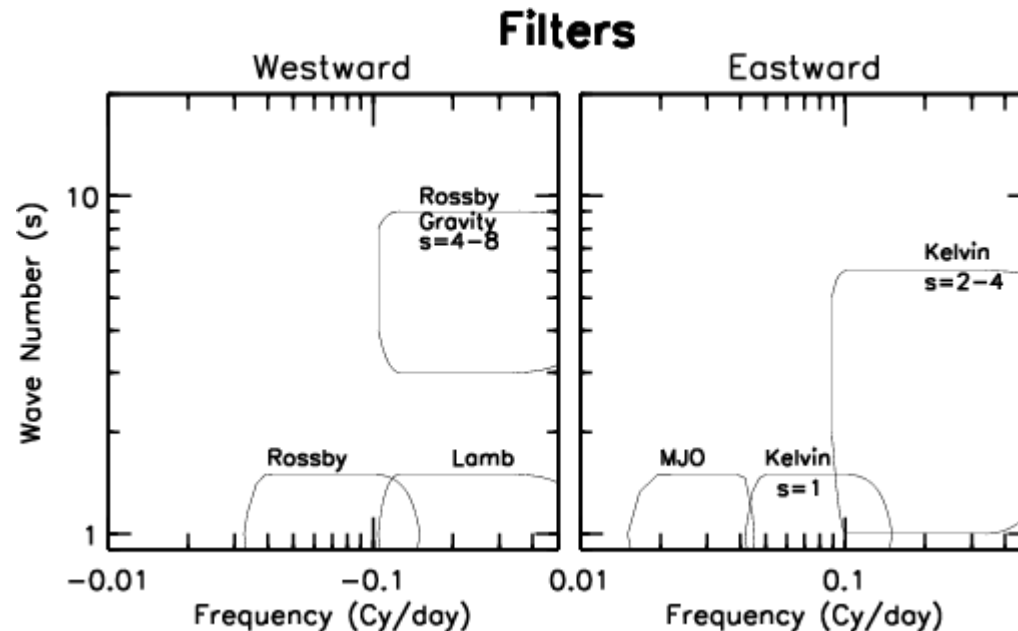
III.2) Les Ondes Equatoriales Filtrage des données

All fields in the low stratosphere are filtered by band pass filters that largely dub the Spectral Maxima identified before

For the zonal wind u , the filtered value is \tilde{u} :

$$\tilde{u}(\lambda, \phi, z, t) = \sum_{s=0}^{nlo/2} \sum_{n=-N/2+1}^{N/2-1} \hat{f}(\omega_n) \hat{g}(s) \hat{u}(s, \phi, z, \omega_n) e^{i(s\lambda - \omega_n t)}.$$

Half power points of the filter $\hat{f}(\omega) \hat{g}(s)$:



III. Les régions équatoriales

III.2) Les Ondes Equatoriales

Indexes representative of waves passing through the altitude $Z=21\text{km}$:

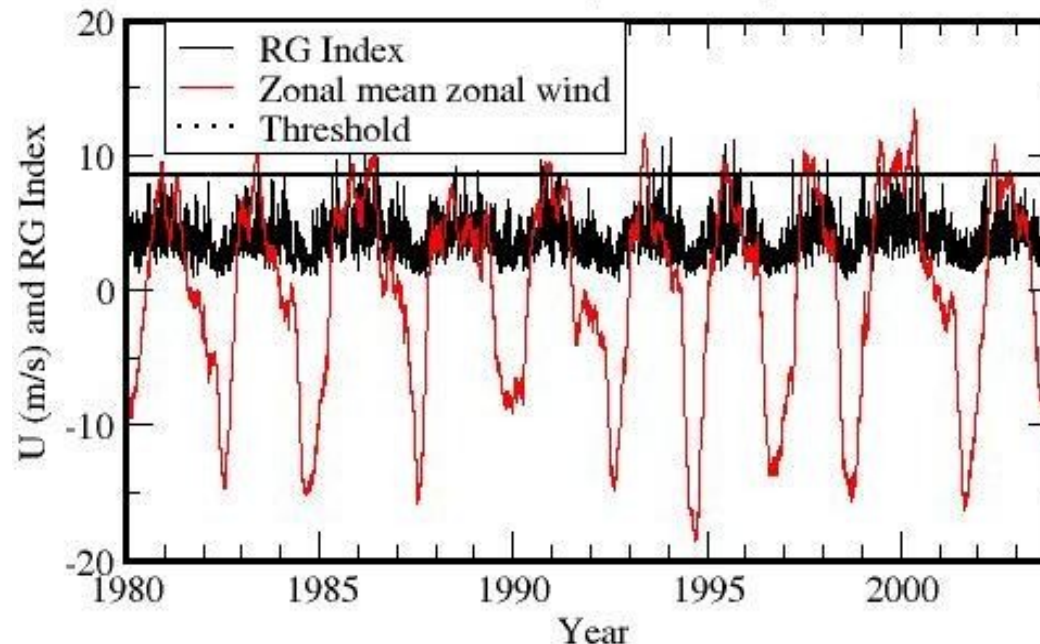
For the ($s \approx 4 - 8$) Rossby Gravity Wave, the strongest signals being on v , the index is

$$RG(\lambda, d, y) = \overline{\tilde{v}(\lambda, \phi, z = 21\text{km}, d, y)}.$$

We then identify the dates where RG exceeds a given threshold (such that 25 Cases are selected over the entire dataset).

\tilde{v} : Average over the Equatorial band of the filtered v .

Rossby Gravity Wave Index and QBO at $Z=21\text{km}$
NCEP data (1980-2004)

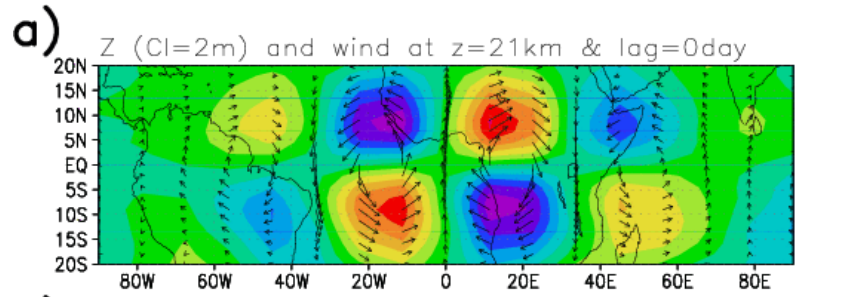


III. Les régions équatoriales

III.2) Les Ondes Equatoriales

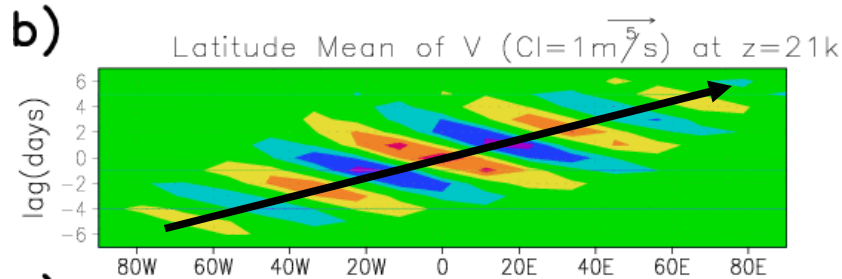
Composite from the reanalysis

Rossby-Gravity wave (key: \bar{v} at 21km in the $s=4-8$, 2-10day band)

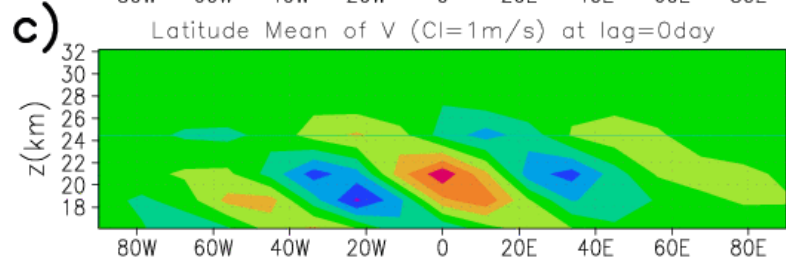


Characteristic structure of a RG Wave packet!

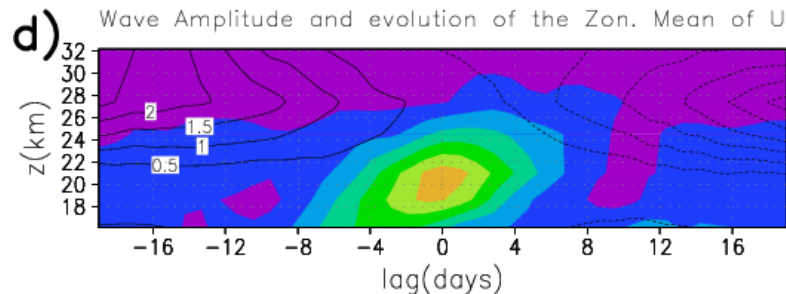
On all fields the Amplitude compares with the standard deviation of the the corresponding field in the Equatorial Band



Westward Phase propagation but **Eastward Group Velocity**



Phase tilted eastward as a function of altitude (upward propagation)



Attenuation of the wave signal with altitude, indicating wave dissipation (color).

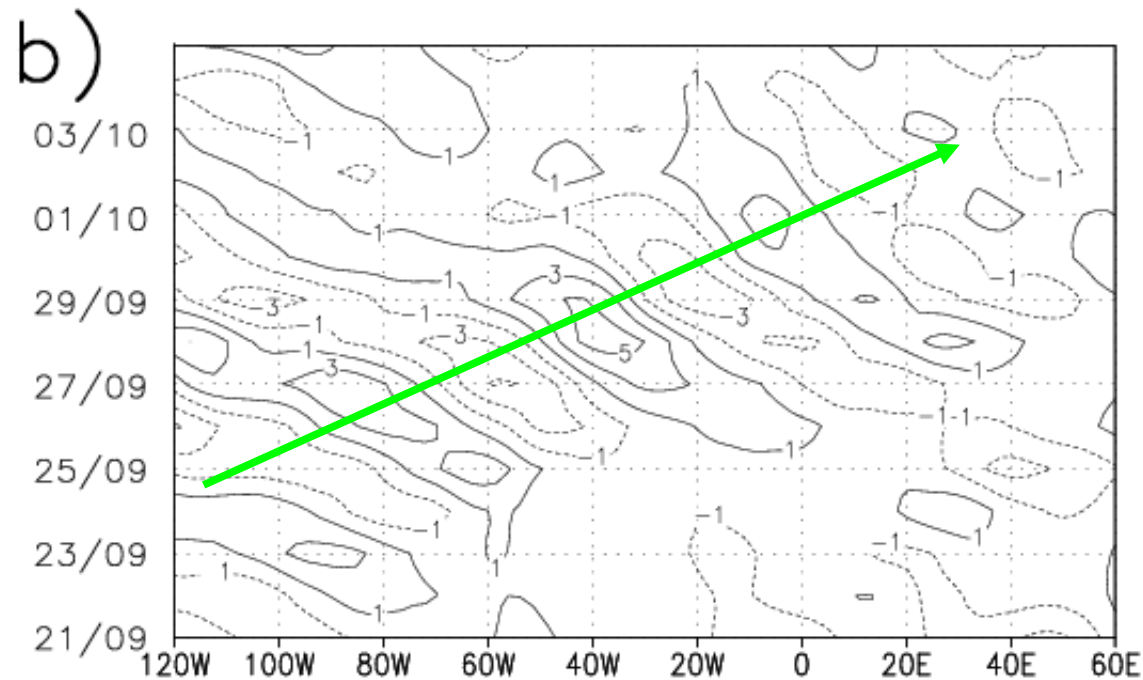
It is associated with a significant decrease of the zonal wind (black solid and dotted lines)

III. Les régions équatoriales

III.2) Les Ondes Equatoriales

Il est important que les composites est des amplitudes comparables aux amplitudes observées sans aucun filtrage!

Vitesse méridienne moyenne à l'Equateur le jour ou l'Index atteint sa valeur maximale. On retrouve la structure en paquet d'onde!

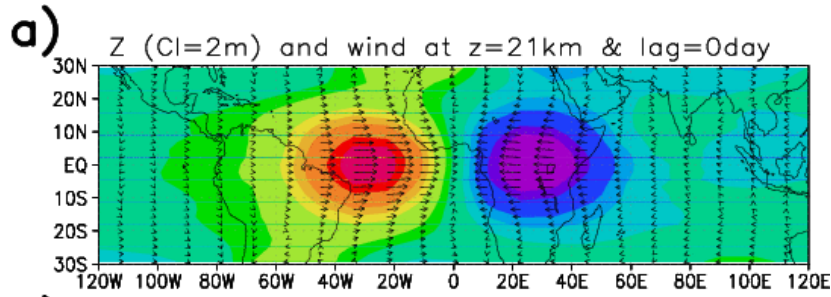


III. Les régions équatoriales

III.2) Les Ondes Equatoriales

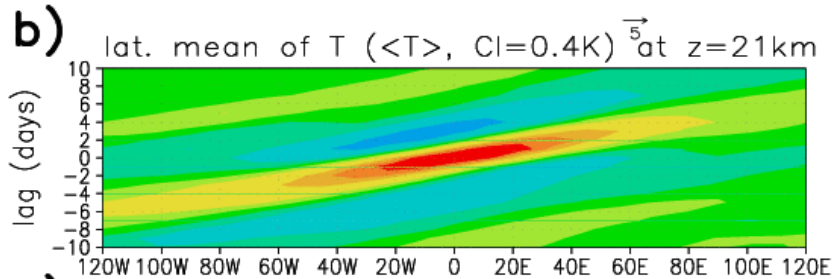
Composite from the reanalysis

Kelvin wave (key: \bar{T} at 21km in the s=2-6, 2-10day band)

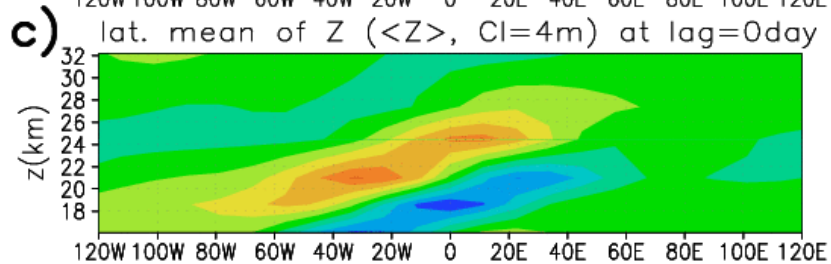


Characteristic structure of a Kelvin Wave packet

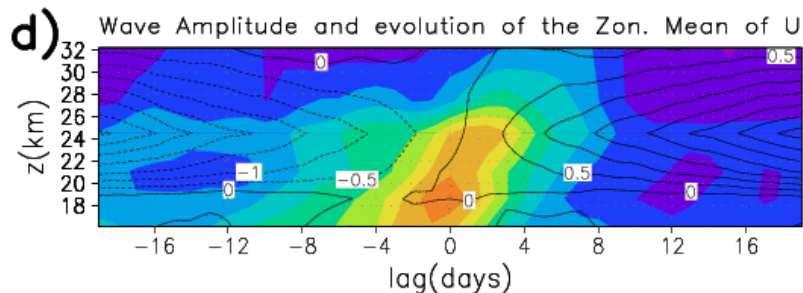
On all fields the Amplitude compares with the standard deviation of the the corresponding field in the Equatorial Band



Eastward Phase propagation



Phase tilted westward as a function of altitude (upward propagation)



Attenuation of the wave signal with altitude, indicating wave dissipation (color).

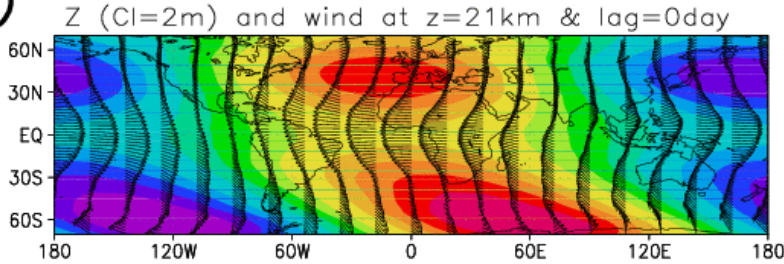
It is associated with a significant decrease of the zonal wind (black solid and dotted lines)

III. Les régions équatoriales

III.2) Les Ondes Equatoriales (?)

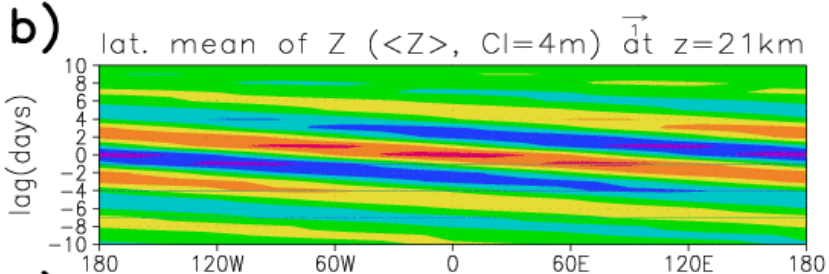
Composite from the reanalysis

a) Rossby free planetary wave (key: \bar{Z} at 21km in the $s=1, 4-6$ day band)

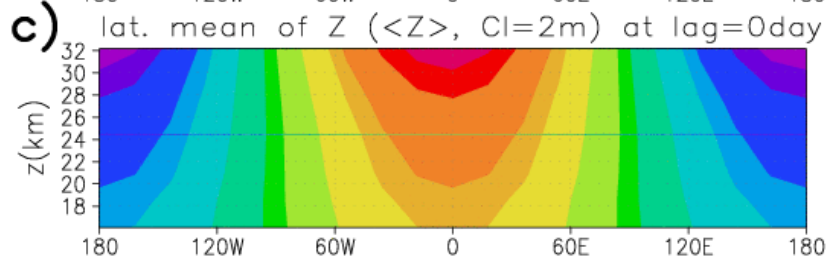


Characteristic structure of a free planetary Wave

They seem to make a detectable contribution to the stratospheric variability in the tropics!

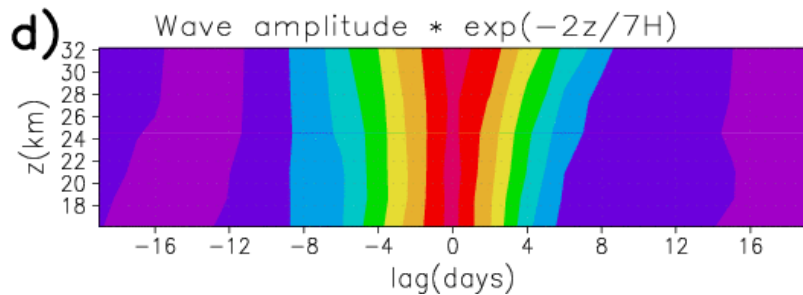


Westward Phase propagation



Almost barotropic

Increase of the wave signal with altitude,



The increase in $e^{2z/7H}$ is in agreement with that predicted by the free planetary wave theory

Bien prédites par LMDz car la variabilité aux moyennes latitudes est réaliste

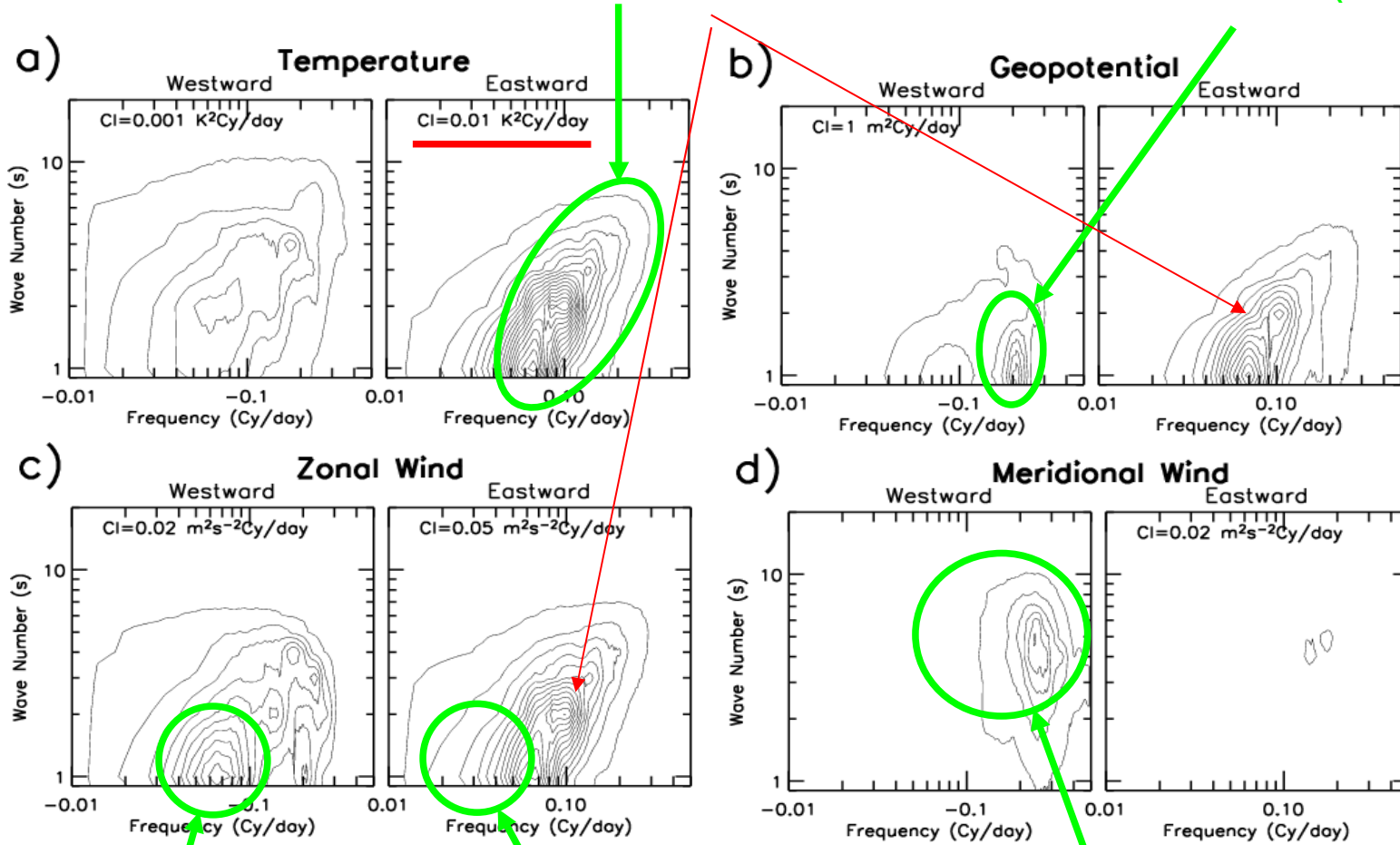
III. Les régions équatoriales

III.2) Les Ondes Equatoriales Analyse spectrale

Frequency (ω)- Wavenumber (s) Spectra of T, Z, u, and v averaged over [10°S,10°N]
Results from the LMDz-GCM (1980-2004)

Kelvin $s=1$ and larger ($s=2-6$)

Free PW ($s=1$)



Rossby $s=1$

MJO (no MJO)

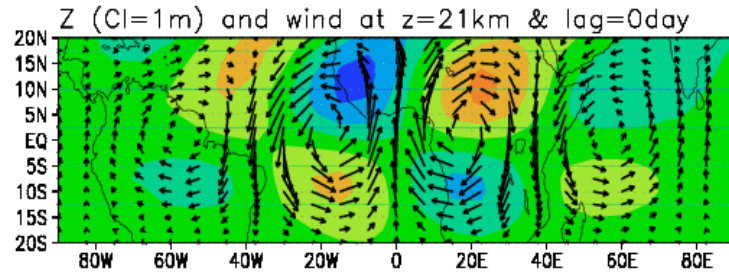
Rossby-Gravity $s=4-8$
(much smaller, due to
horizontal diffusion and dz too large)

III. Les régions équatoriales

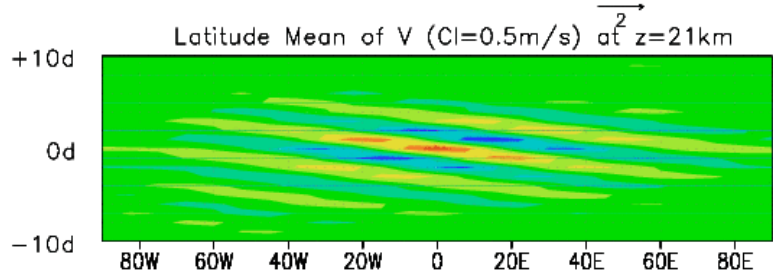
III.2) Les Ondes Equatoriales

Composite from the LMDz-GCM

Rossby-Gravity wave (key: v at 21km in the s=4-8, 2-10day band)

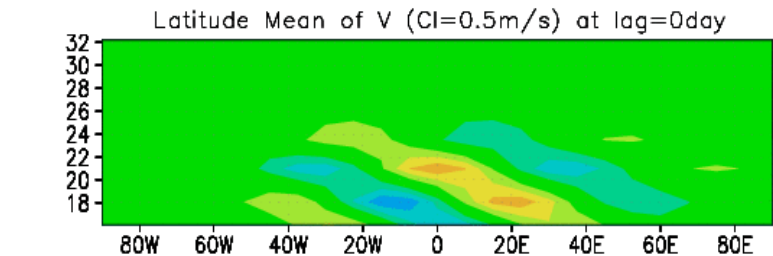


Characteristic structure of a RG Wave
But quite distorted

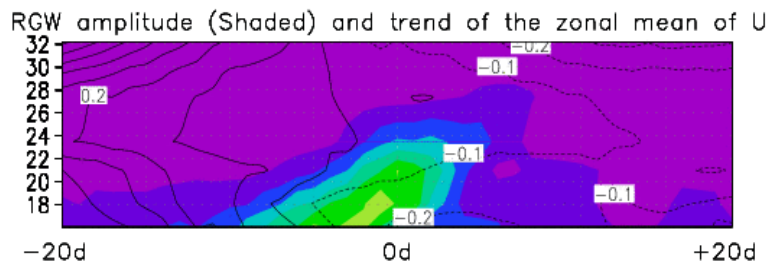


Westward Phase propagation

Phase tilted eastward as a function of altitude
(upward propagation)



Attenuation of the wave signal with altitude,
indicating wave dissipation (color)



It is associated with a significant decrease of
the zonal wind (black solid and dotted lines)

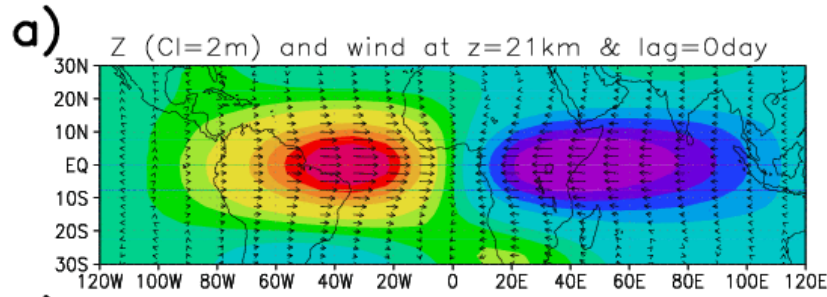
There is no QBO in LMDz! Attenuation due
to horizontal dissipation and dz too large

III. Les régions équatoriales

III.2) Les Ondes Equatoriales

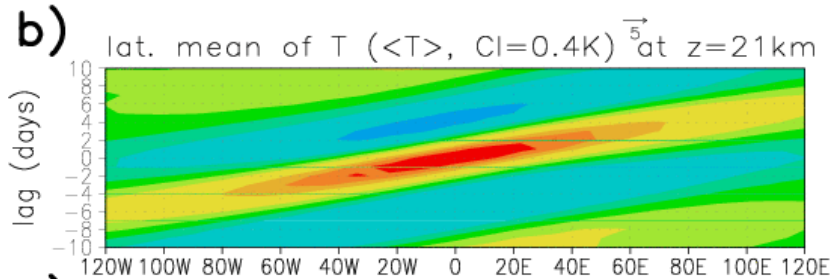
Composite from the LMDz-GCM

Kelvin wave (key: T at 21km in the s=2-6, 2-10day band)

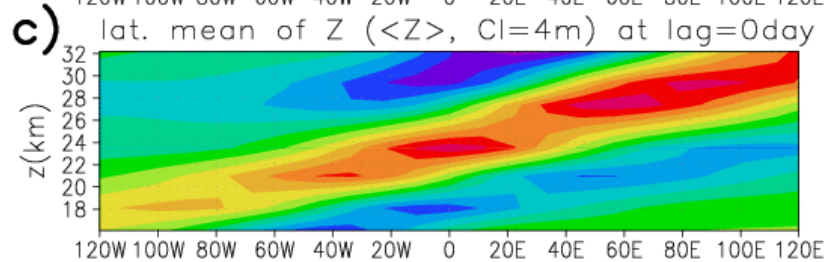


Characteristic structure of a Kelvin Wave packet

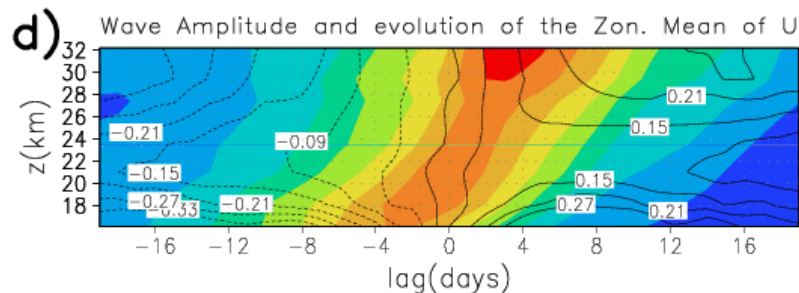
The amplitudes compare here with those from the reanalysis, but the zonal extension is much larger



Eastward Phase propagation



Phase tilted westward as a function of altitude (upward propagation). Little wave attenuation with altitude: consistent with the absence of QBO. Explains the strong values in the Spectra at the corresponding periodicities.



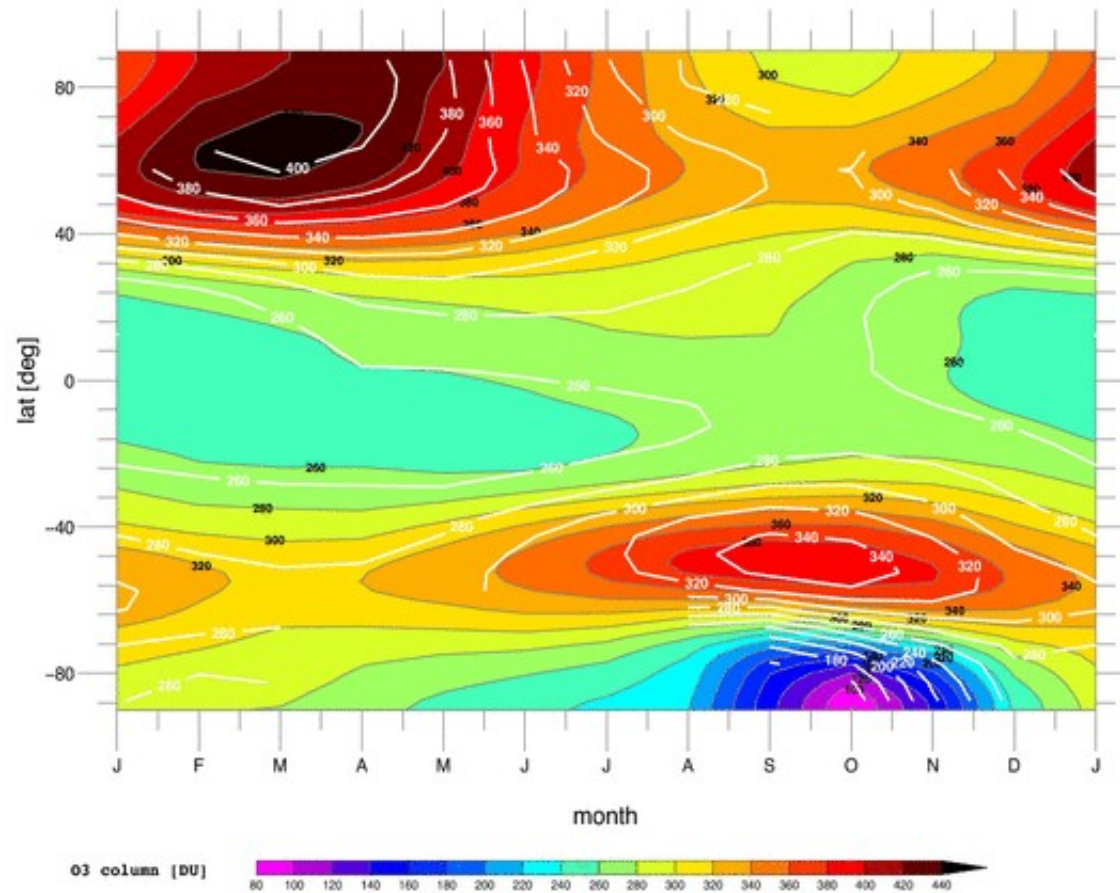
There is still an attenuation of the wave signal with altitude (apparent if we multiply by $e^{-(z/2H)}$).

It is associated with a decrease of the zonal wind (black solid and dotted lines)

VI. Couplage avec la chimie et prospective

Couplage avec Reprobus

Cycle annuel de la collone d'O3 prédite par LMDz-Reprobus



VI. Couplage avec la chimie et prospective

Perspectives

- Ondes équatoriales: sensibilité à la paramétrisation de la convection et à la résolution verticale
- Ondes de gravité:
 - Validation des paramétrisations à l'aide des données VORCORE (vols de ballons dans la basse stratosphère de l'hémisphère sud)
 - Améliorer le lien avec les sources et introduire des effets stochastiques
- Influence de la stratosphère sur le climat au sol dans les modèles couplés (avec Océan, glace et végétation interactifs)