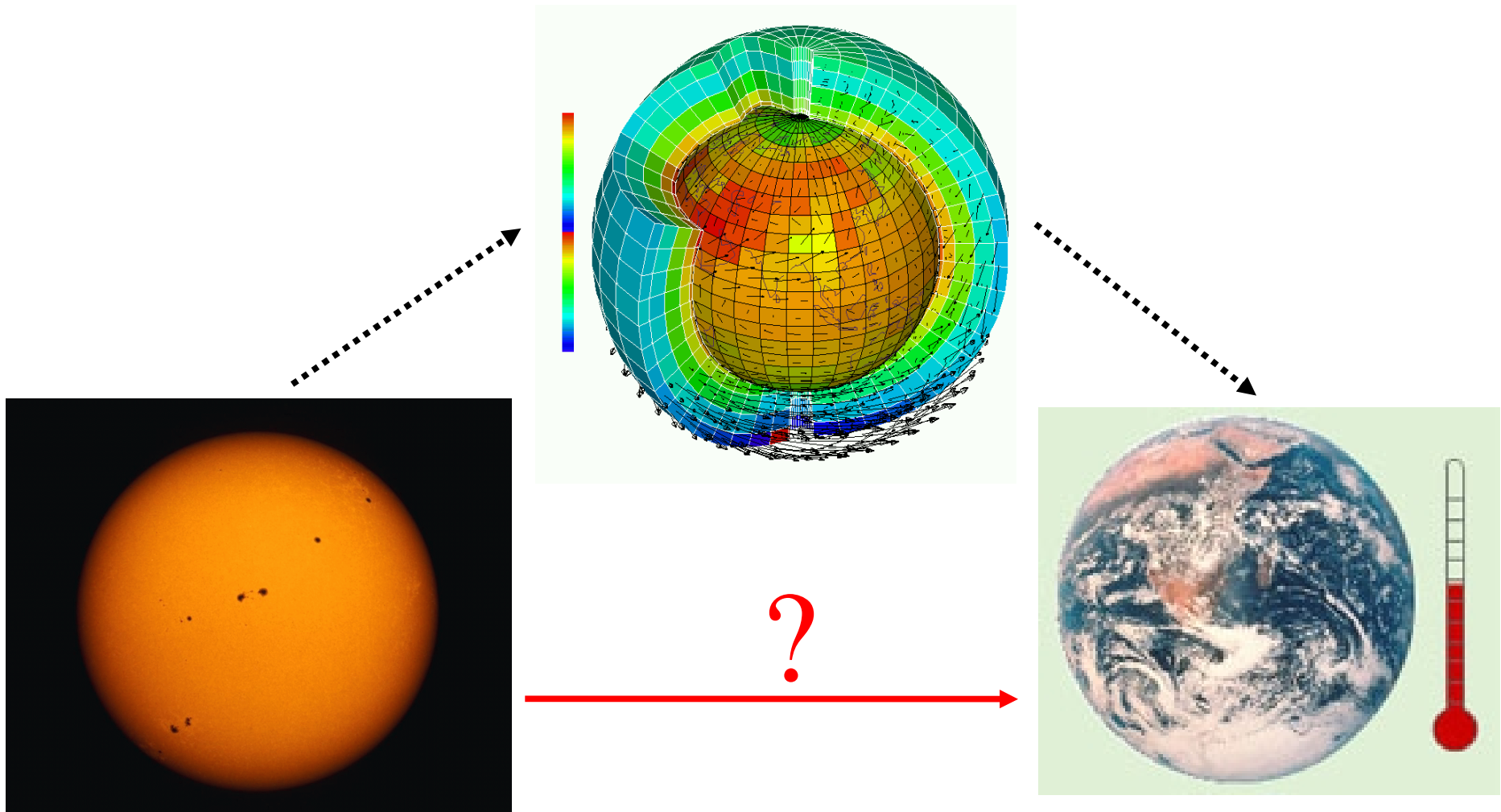
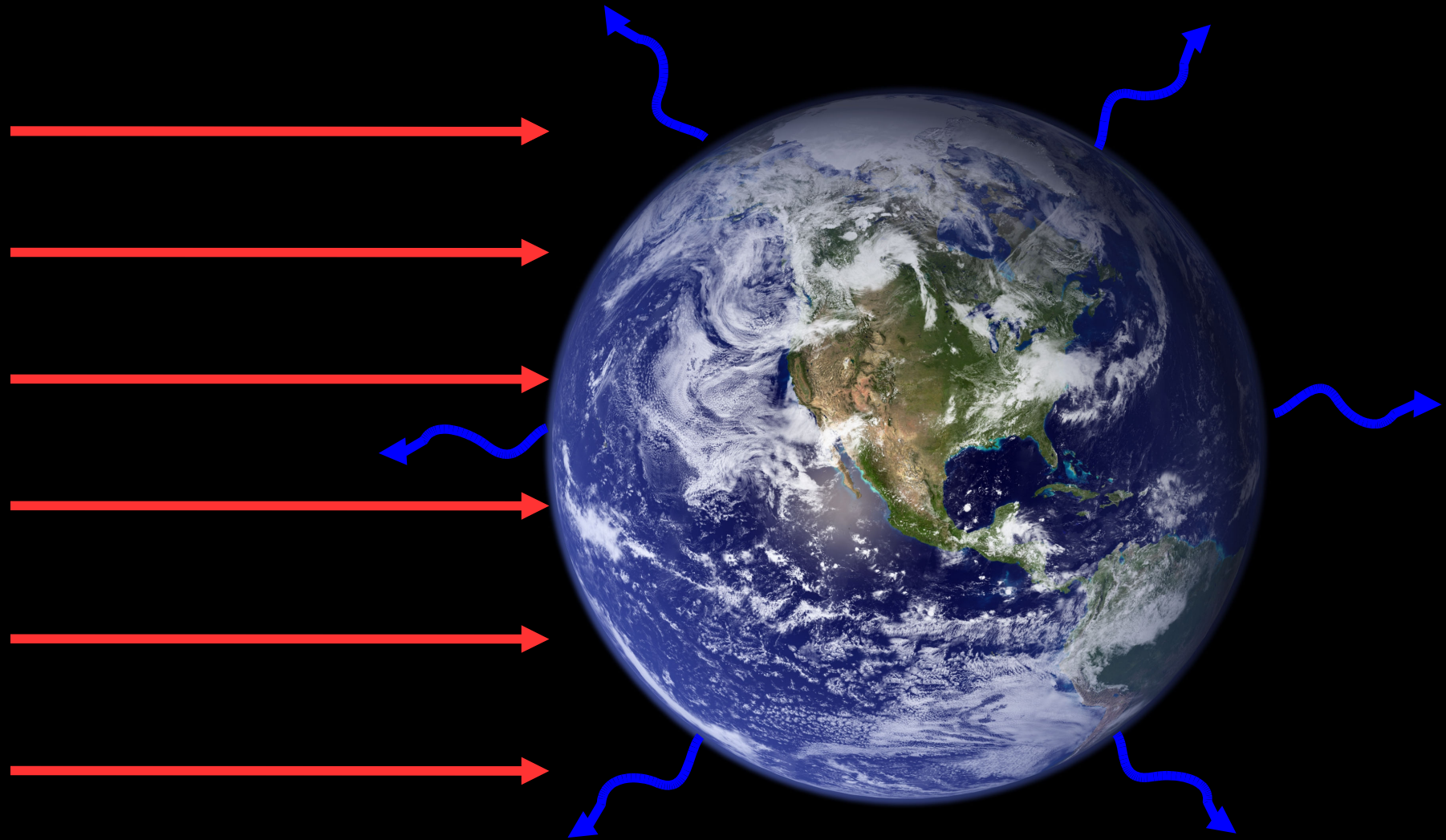


Modélisation de la Réponse du Climat à un Forçage Externe

Sandrine Bony
LMD/IPSL, CNRS, Paris



Equilibre Radiatif de la Terre :



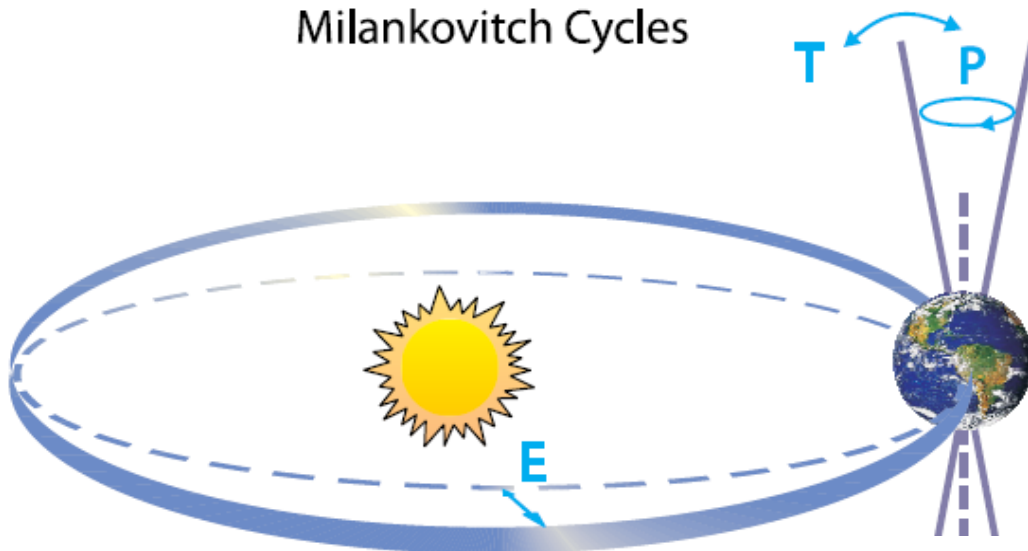
$$\frac{S_o}{4} (1 - \alpha) = \sigma T^4$$

Forçage Radiatif et Sensibilité Climatique

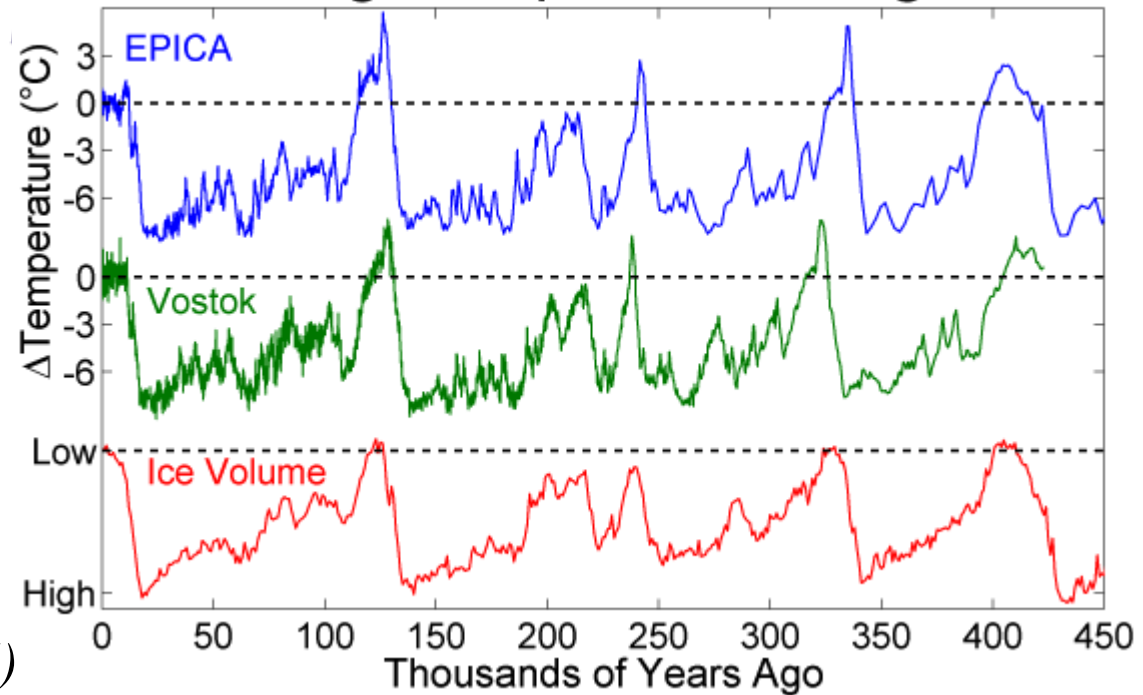
- On appelle *Forçage Radiatif* une perturbation du bilan radiatif terrestre d'origine externe (e.g. changement de l'insolation ou des propriétés radiatives de la surface ou de l'atmosphère).
- Pour relier le *Forçage Radiatif* (ΔQ) et la *réponse globale de la température de surface* (ΔT_s) qui en résulte, on utilise le concept de *Sensibilité Climatique* :
- Deux mesures de la sensibilité climatique sont couramment utilisées :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T_s = \eta \Delta Q \text{ avec } \Delta Q \text{ en W/m}^2, \quad \eta \text{ en K} \cdot (\text{W/m}^2)^{-1} \\ \Delta T_s \text{ (en K) associé à un doublement de la concentration en CO}_2 \end{array} \right.$$

Exemple de forçage externe : Variations des paramètres orbitaux



Ice Age Temperature Changes



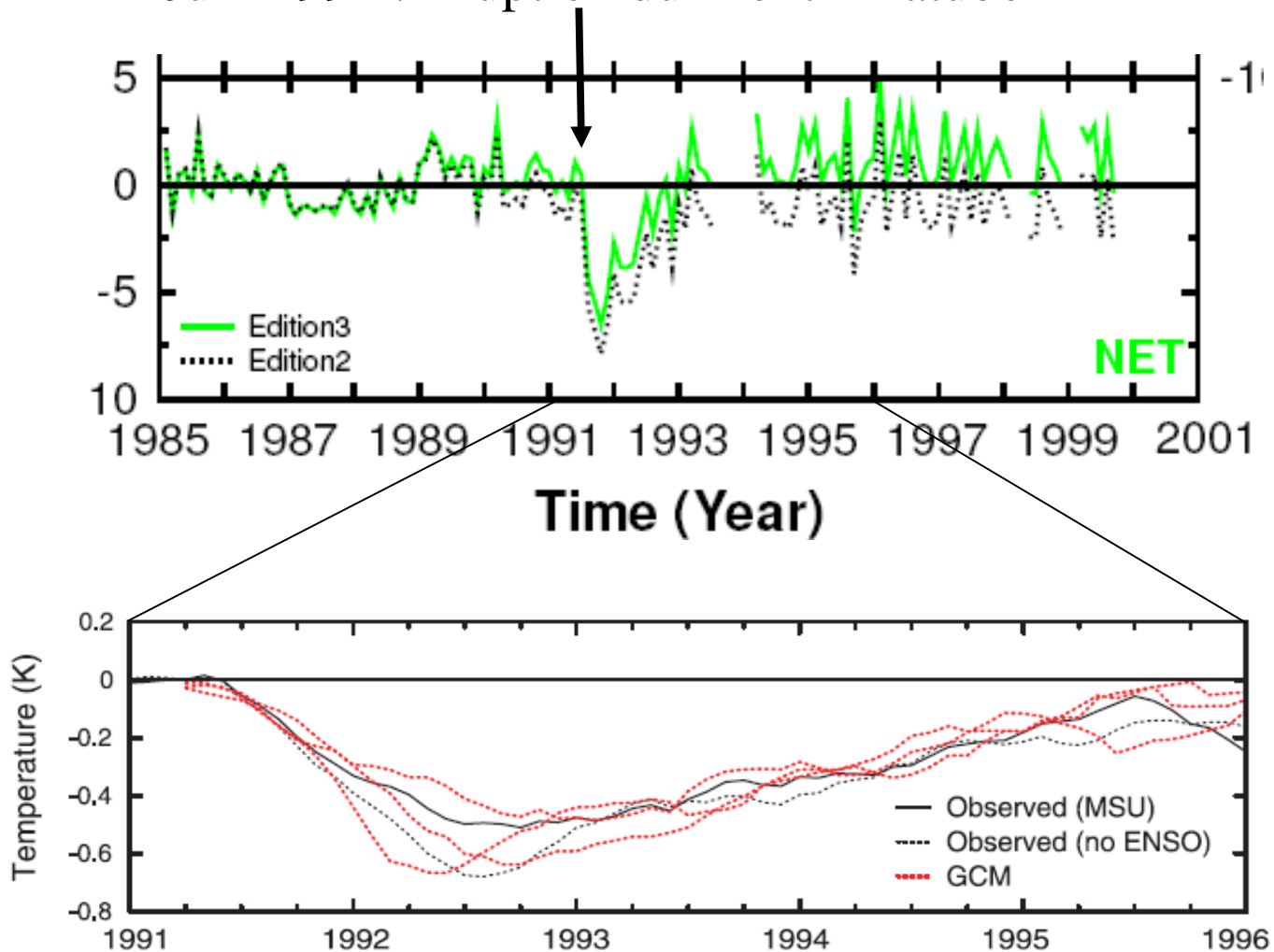
(Petit et al. 1999, EPICA 2004, GIEC 2007)

Exemple de forçage externe :
Eruptions volcaniques



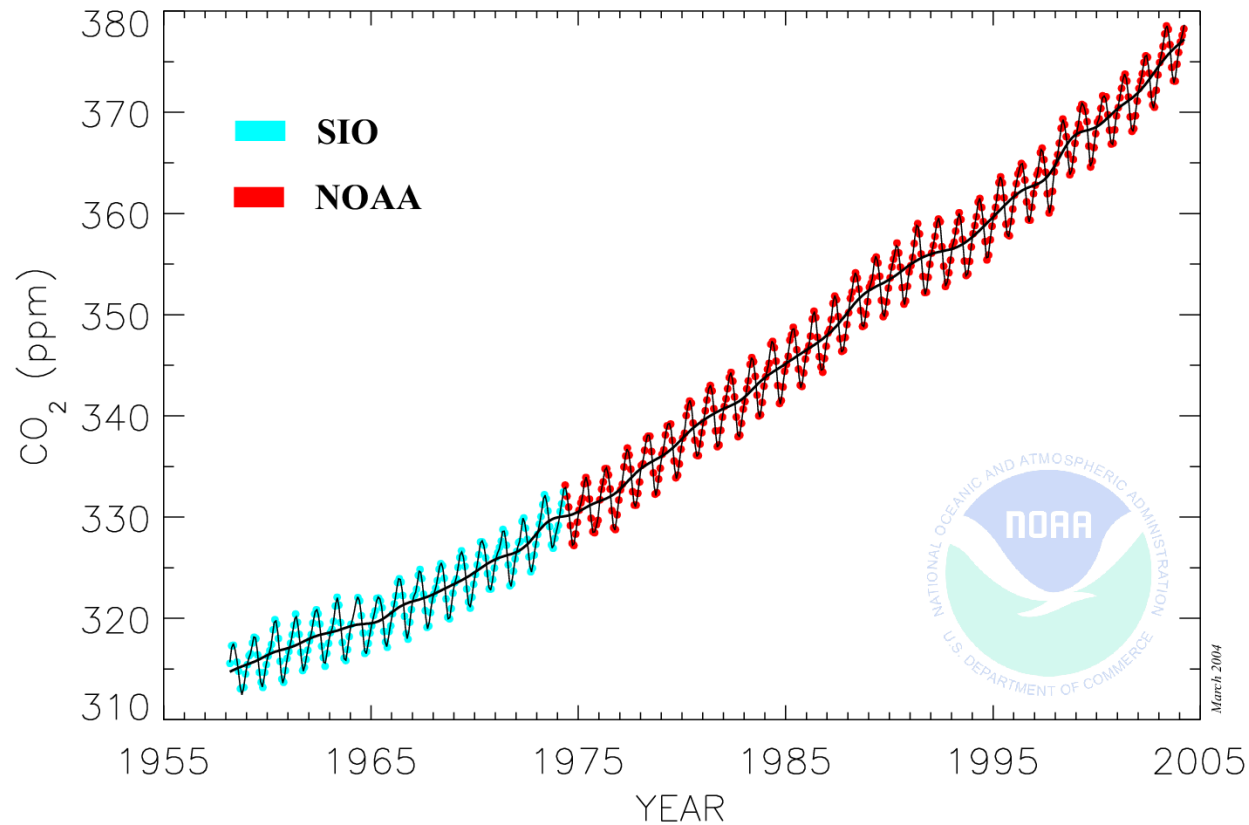
Pinatubo, 1991

Juin 1991 : Eruption du Mont Pinatubo



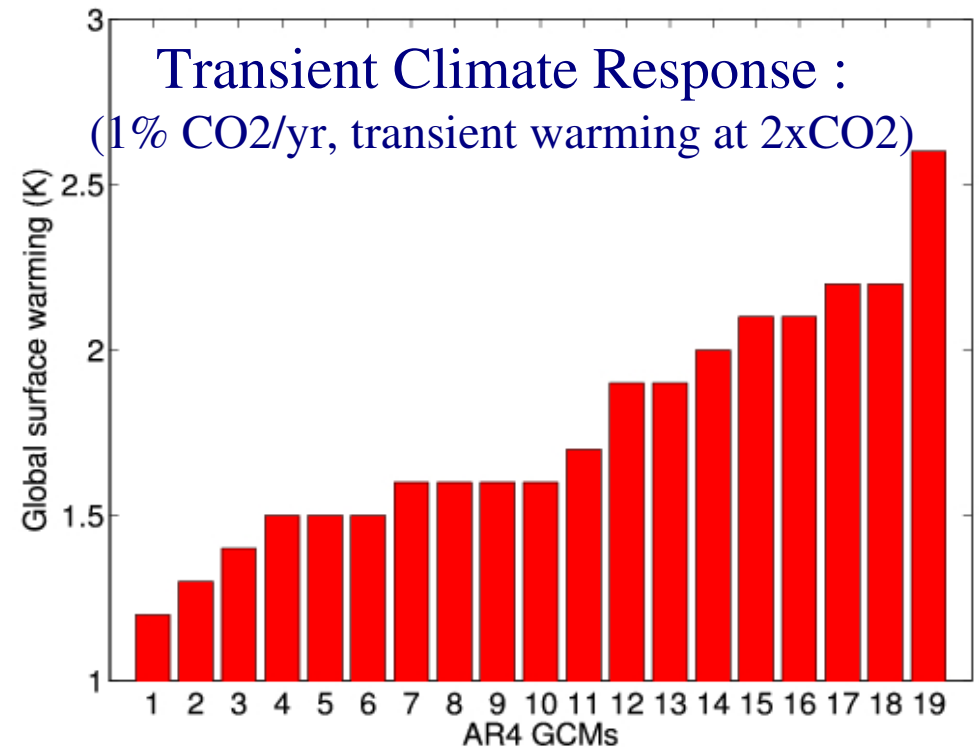
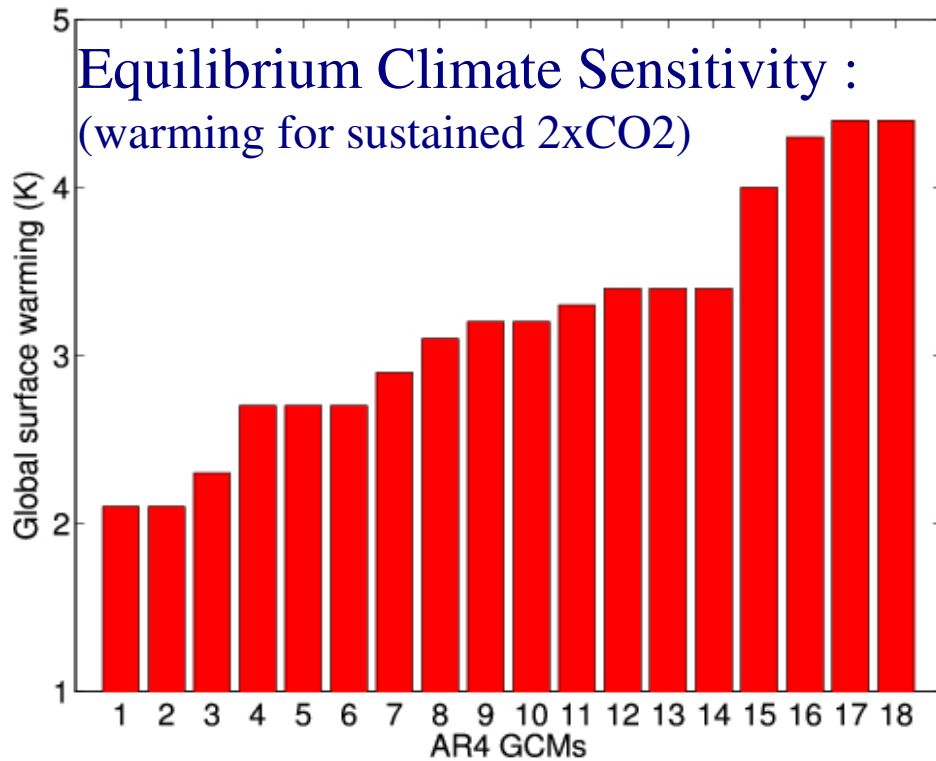
Exemple de forçage externe : Augmentation de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre

Mauna Loa Monthly Mean Carbon Dioxide



Atmospheric carbon dioxide monthly mean mixing ratios. Data prior to May 1974 are from the Scripps Institution of Oceanography (SIO, blue), data since May 1974 are from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, red). A long-term trend curve is fitted to the monthly mean values. Principal investigators: Dr. Pieter Tans, NOAA CMDL Carbon Cycle Greenhouse Gases, Boulder, Colorado, (303) 497-6678, pieter.tans@noaa.gov, and Dr. Charles D. Keeling, SIO, La Jolla, California, (616) 534-6001, cdkeeling@ucsd.edu.

Estimations de la Sensibilité Climatique
par les Modèles de Circulation Générale participant au 4ème rapport du GIEC



(GIEC 2007)

Lien entre Forçage Externe et Température Globale :

- Qualitativement robuste
- Quantitativement incertain

Plan de l'exposé :

I. La sensibilité climatique :

- Les mécanismes qui la contrôlent
- Les principales incertitudes
- Les méthodologies d'évaluation de la sensibilité des modèles

II. Spécificités du forçage solaire :

- Dépendance de la sensibilité climatique à la nature du forçage appliqué
- Mécanismes de rétroactions spécifiques

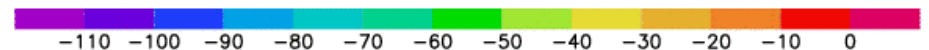
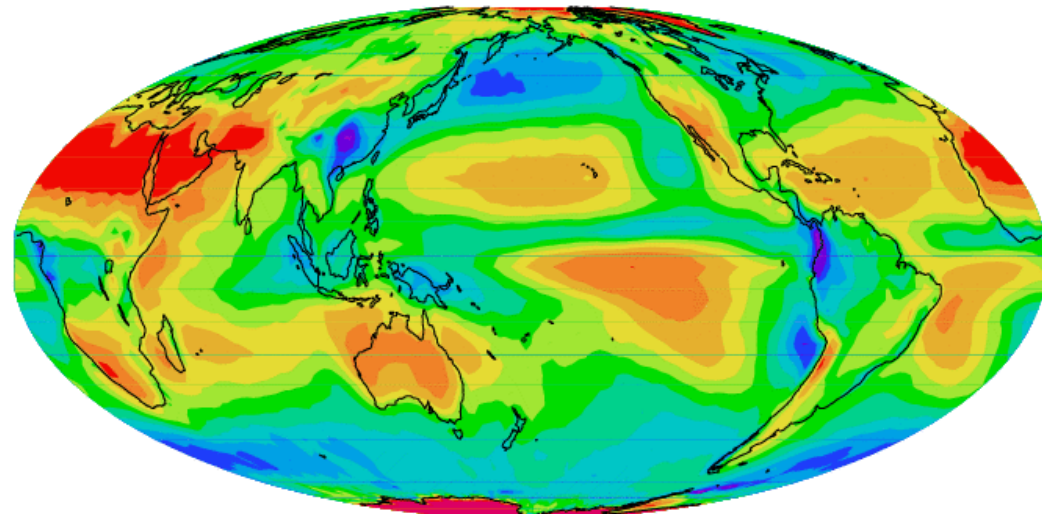
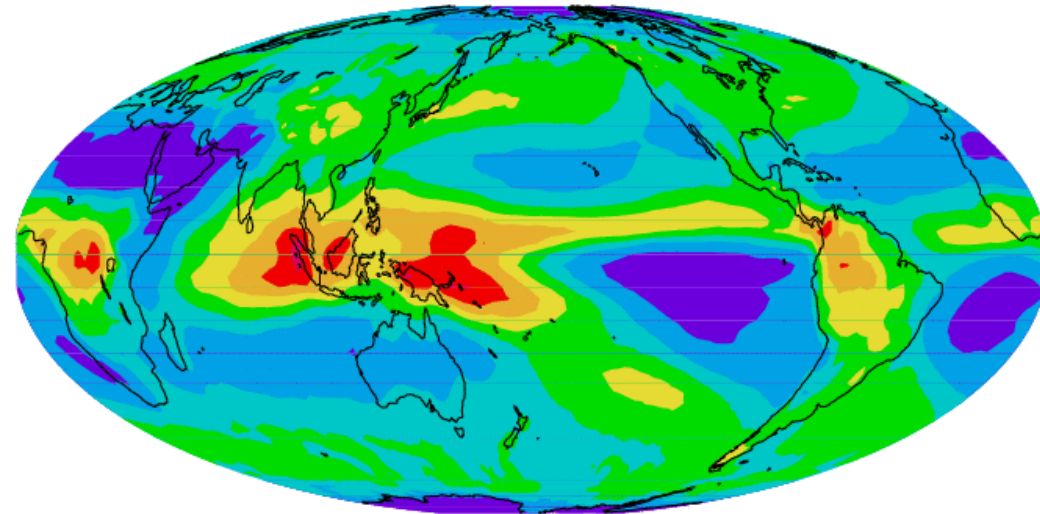
Principaux modulateurs du bilan radiatif :

- Température (à la surface + gradient vertical dans l'atmosphère)
- Vapeur d'eau (principal gaz à effet de serre de l'atmosphère terrestre)
- Neige & glace (contribution à l'albédo planétaire)
- Nuages (effets antagonistes dans le LW et dans le SW)

Impact des Nuages sur le Bilan Radiatif (Cloud Radiative Forcing ou CRF)

CERES: LW Cloud Radiative Forcing (W/m²)

CERES: SW Cloud Radiative Forcing (W/m²)

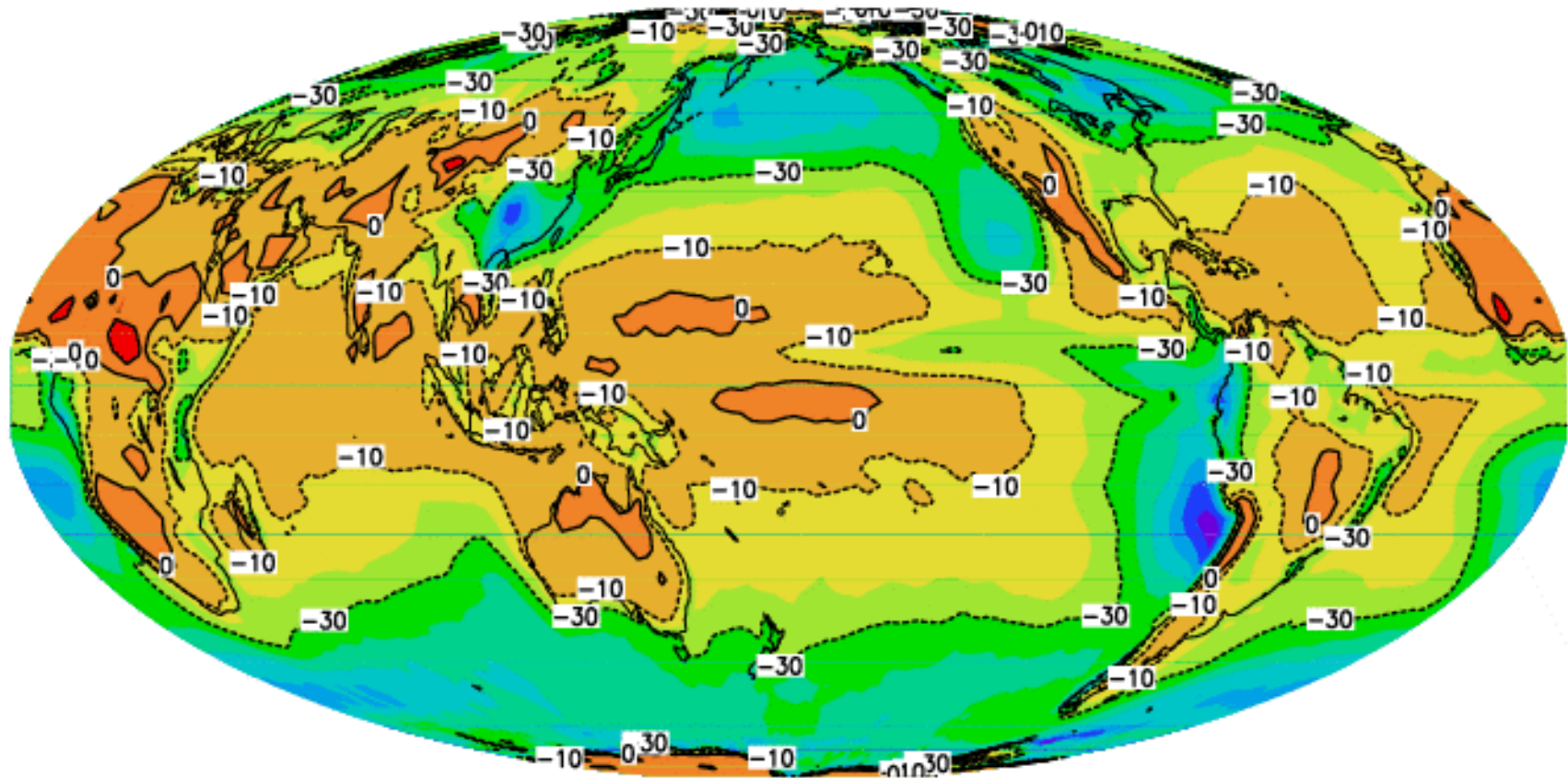


Infrarouge :
Contribution des nuages
à l'effet de serre

Visible :
Contribution des nuages
à l'albédo planétaire

Impact des Nuages sur le Bilan Radiatif (Cloud Radiative Forcing ou CRF)

CERES: NET Cloud Radiative Forcing (W/m²)



Moyenne globale : -20 W/m²

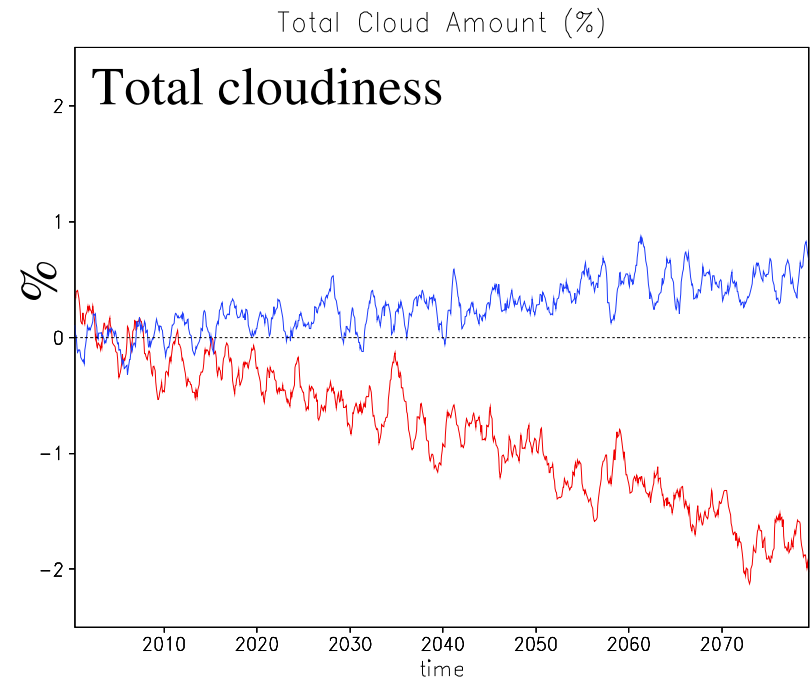
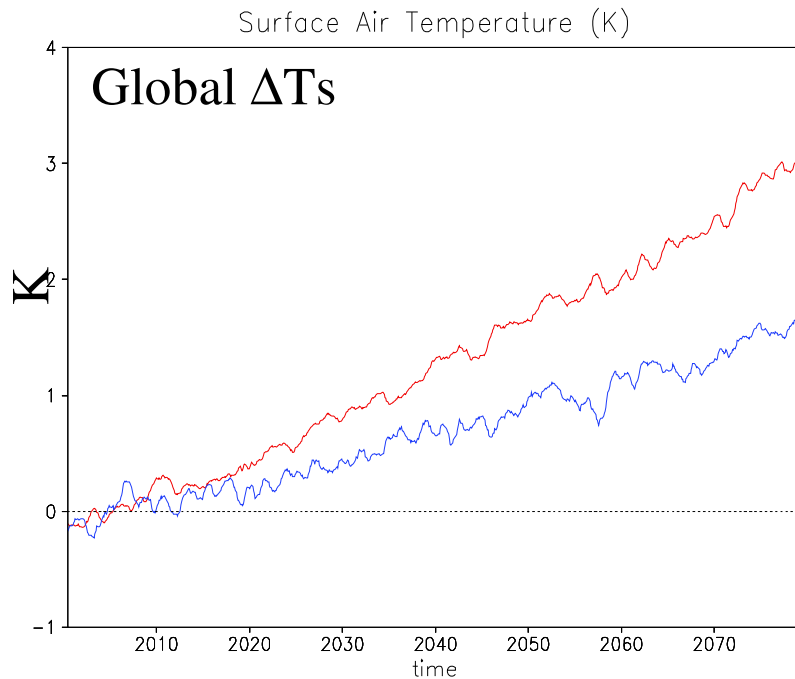
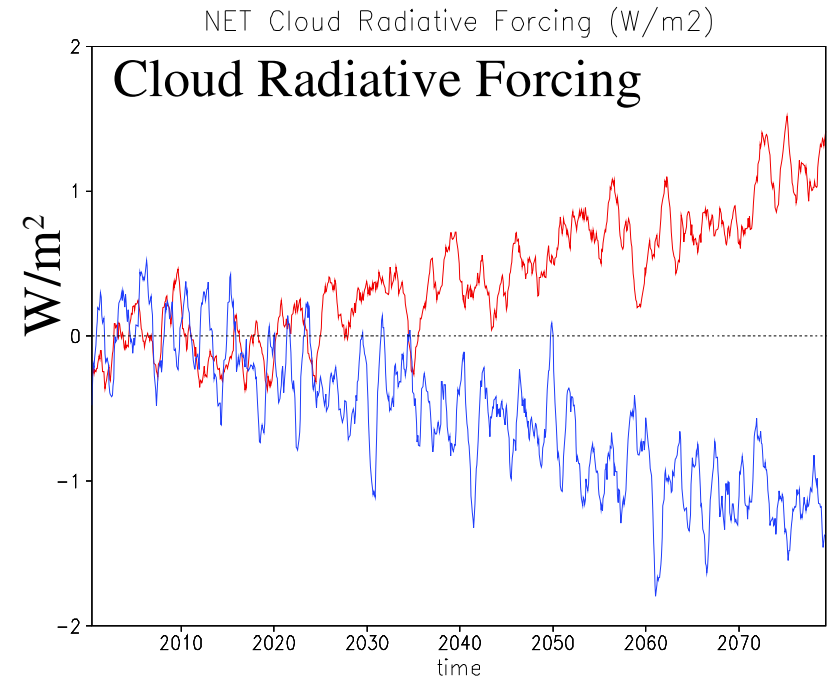
clouds & climate change

AR4 OAGCMs (+1% CO₂/yr):

MIROC-HIRES

VS

NCAR CCSM3



Réponse du système climatique global à un forçage externe ΔQ :

$$\Delta R = \Delta Q + \lambda \Delta T_s$$

R = Bilan Radiatif Terrestre

$$\lambda = \frac{\partial R}{\partial T_s} = \sum_x \frac{\partial R}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial T_s} = \lambda_P + \sum_{x \neq P} \lambda_x$$

$$\Delta T_s = \Delta T_{s,P} + \sum_{x \neq P} \Delta T_{s,x} \left(+ \Delta T_{s,K} \right)$$

$$\Delta T_{s,P} = - \frac{\Delta Q}{\lambda_P} \quad \leftarrow \text{Réponse sans rétroactions}$$

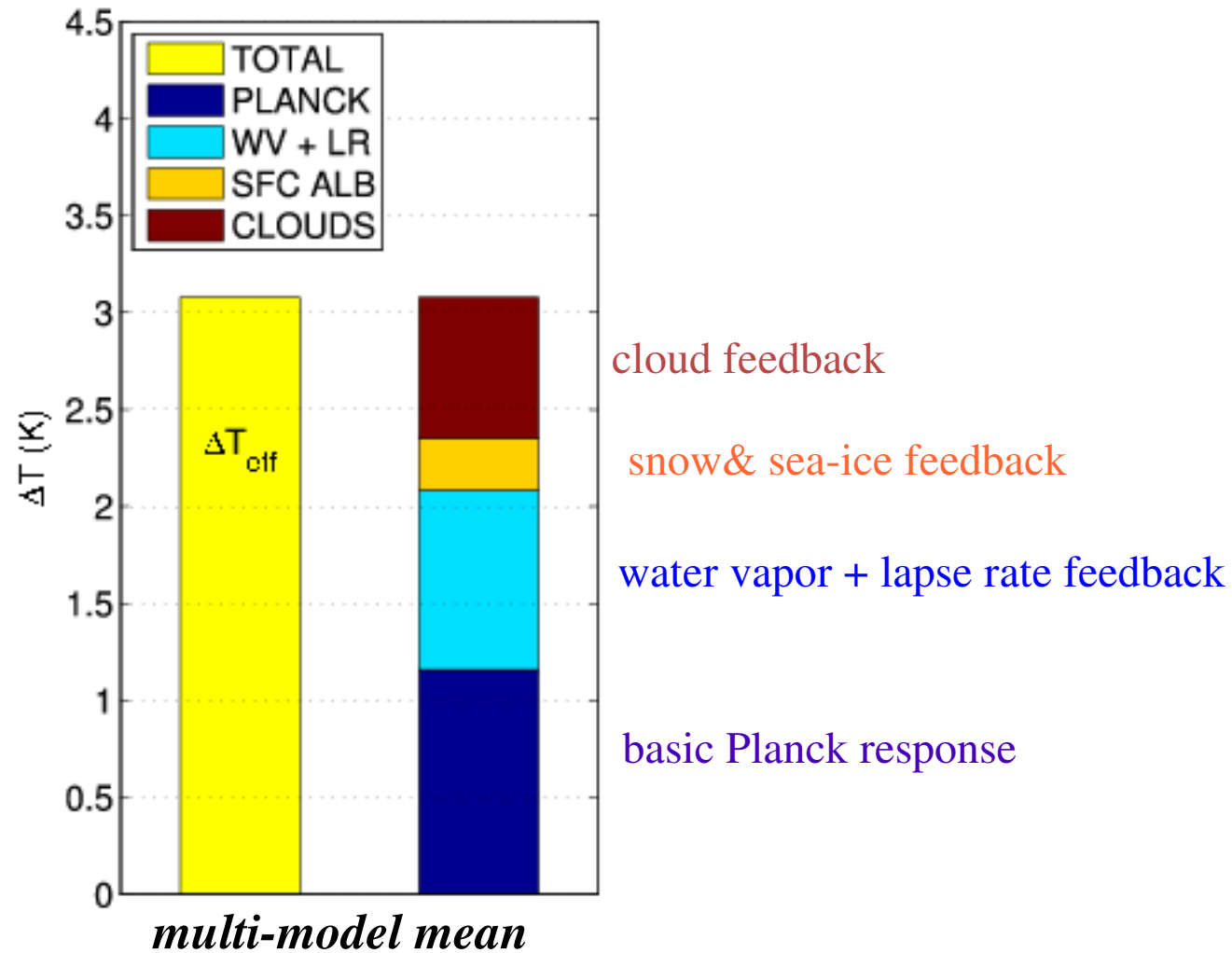
avec

$$\Delta T_{s,x} = \frac{g_x}{1 - g} \Delta T_{s,P} \quad \text{et } g_x = -(\lambda_x / \lambda_P)$$

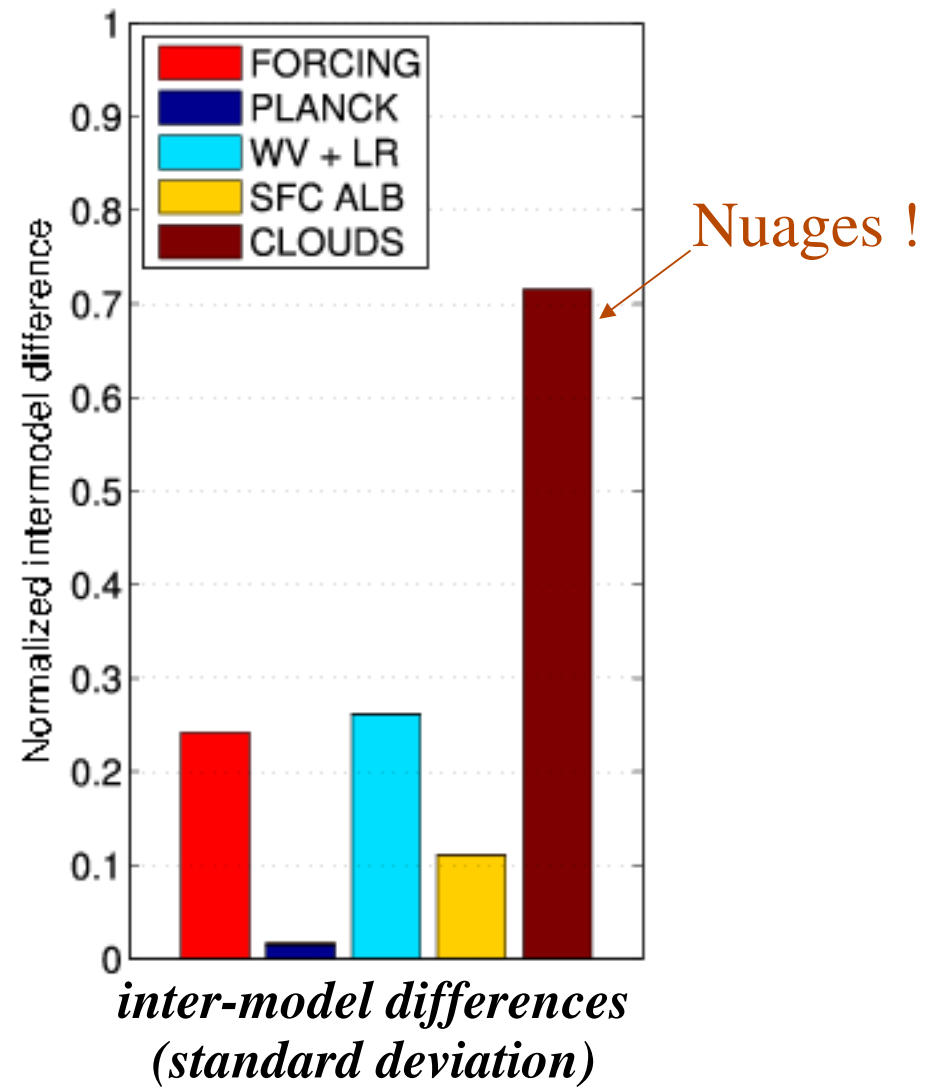
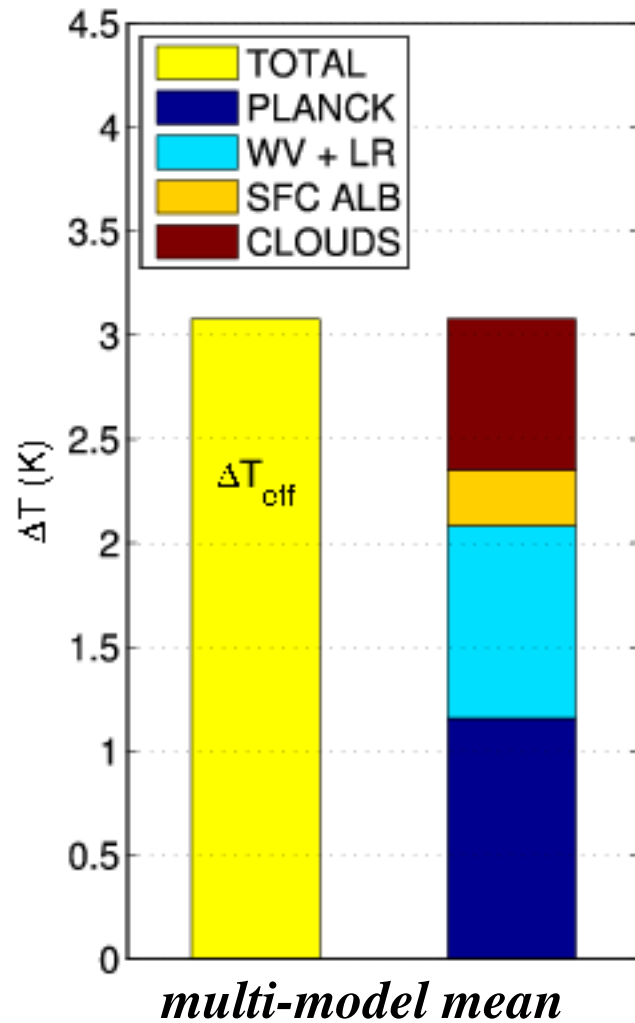
Contribution des rétroactions

Dufresne & Bony (2008)

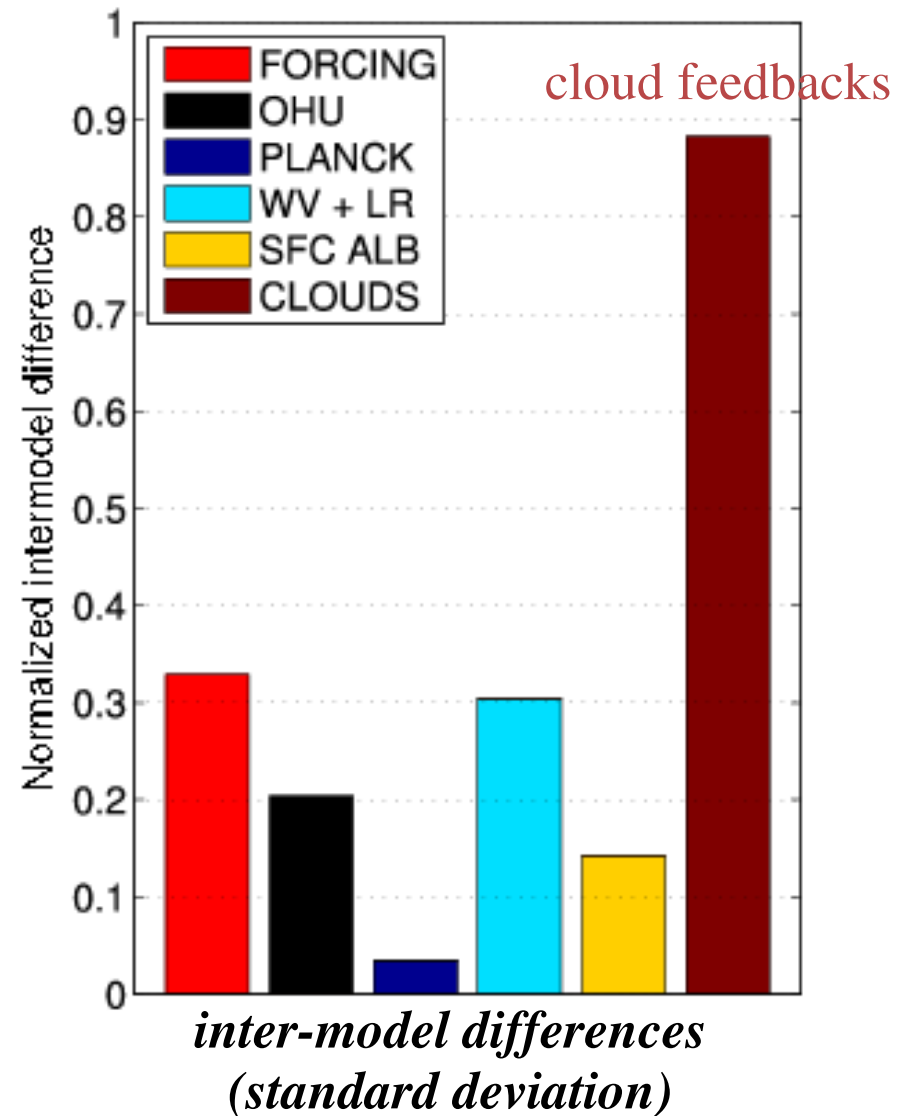
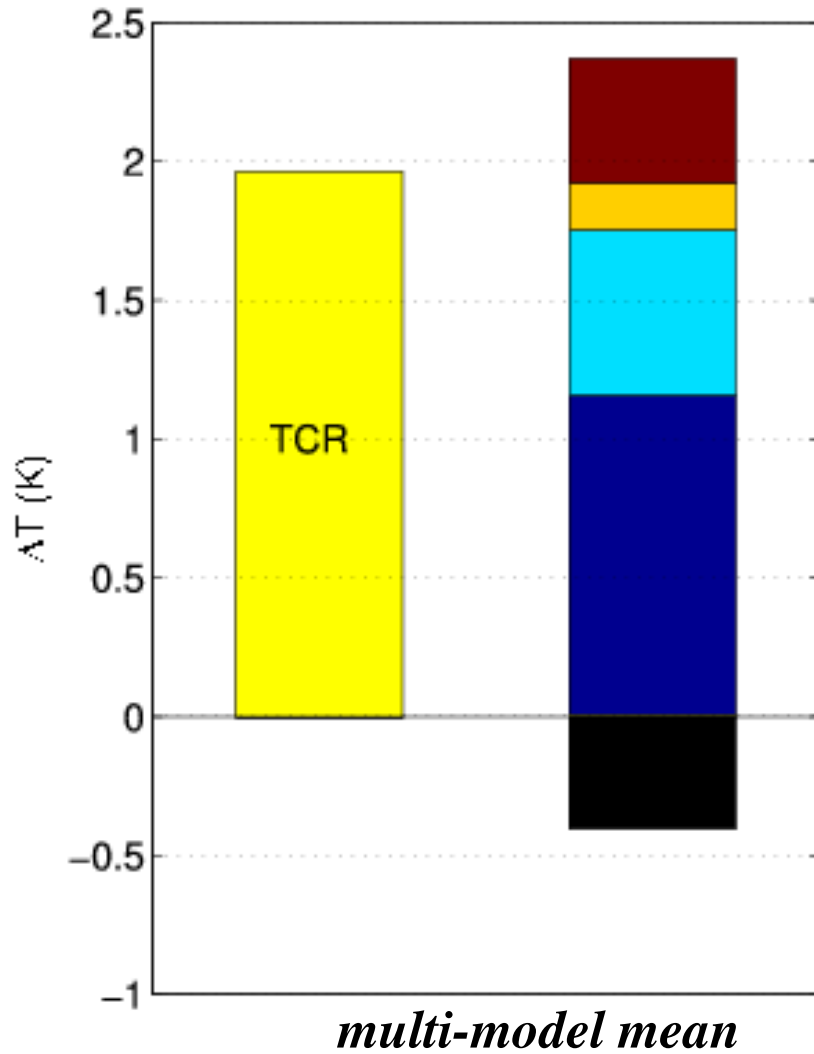
Decomposition of the equilibrium climate sensitivity
simulated by AR4 GCMs :



Decomposition of the equilibrium climate sensitivity
simulated by AR4 GCMs :



Decomposition of the Transient Climate Response
(TCR) simulated by AR4 OAGCMs :

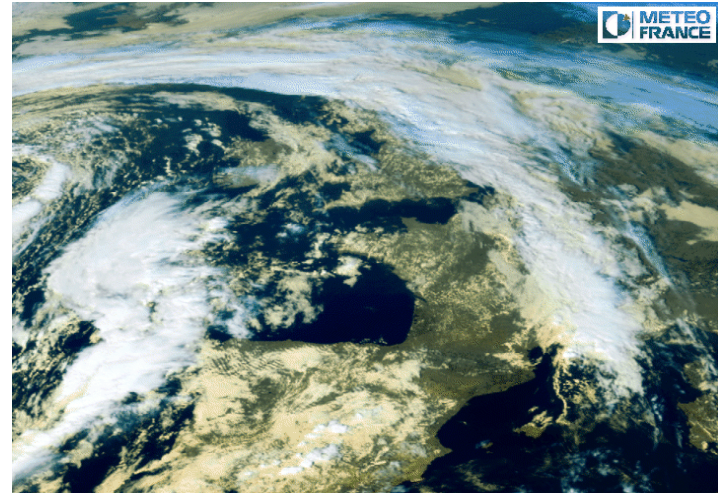


(Dufresne & Bony, J. Climate, 2008)

Many dynamical/physical processes may explain the spread of GCMs' cloud feedbacks



deep convective activity



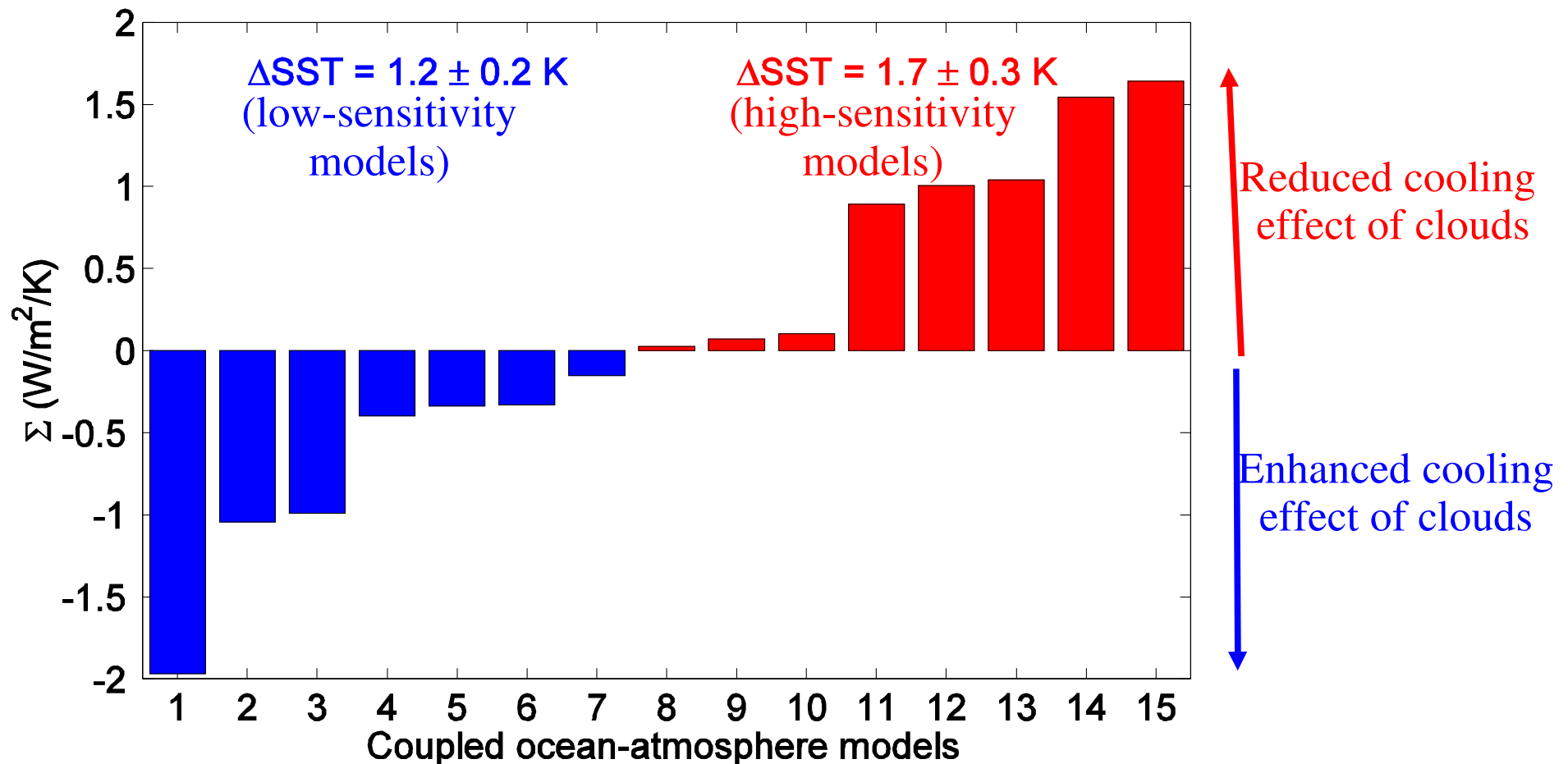
baroclinic activity & frontal clouds



boundary-layer turbulence and clouds

15 CMIP3/AR4 Coupled Ocean-Atmosphere GCMs (+1% CO₂/year experiments)

Sensitivity of the tropical NET CRF
to surface temperature change (W/m²/K)

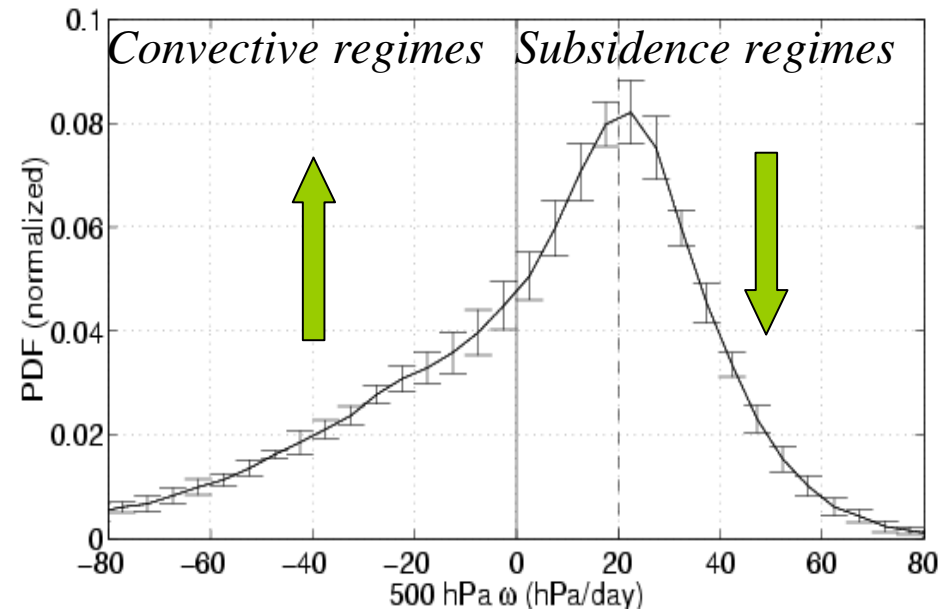


(Bony and Dufresne, GRL, 2005)

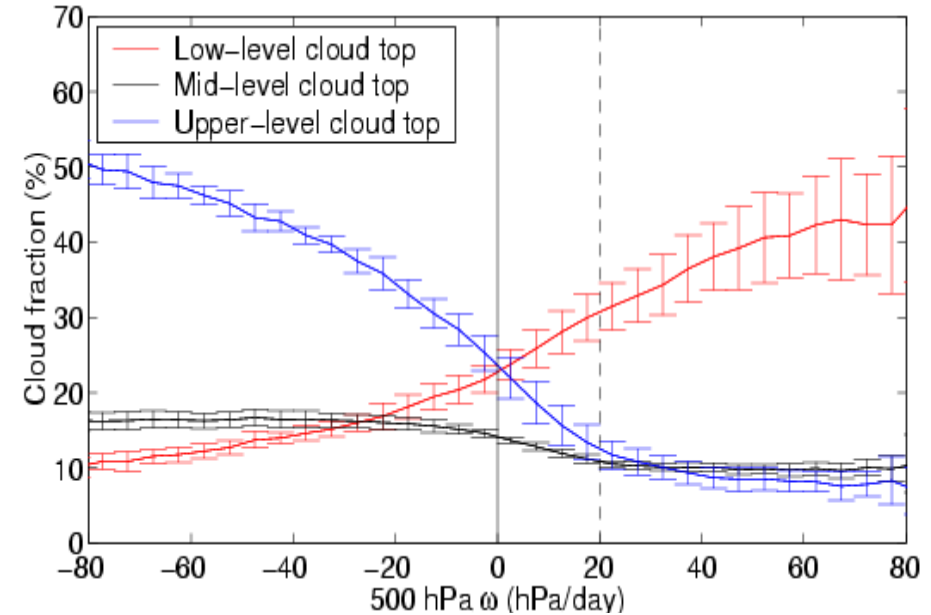
Analysis Method

(Bony et al., 2004, Bony and Dufresne, 2005)

- Proxy ω for large-scale motions: ω_{500hPa} .
- Decomposition of the tropical circulation into dynamical regimes: $\int_{-\infty}^{+\infty} P_{\omega} d\omega = 1$
- Composite of cloud or radiative variables in each dynamical regime: C_{ω}
- Tropical average: $\overline{C} = \int_{-\infty}^{+\infty} P_{\omega} C_{\omega} d\omega$



ISCCP Cloud Types sorted by dynamical regimes

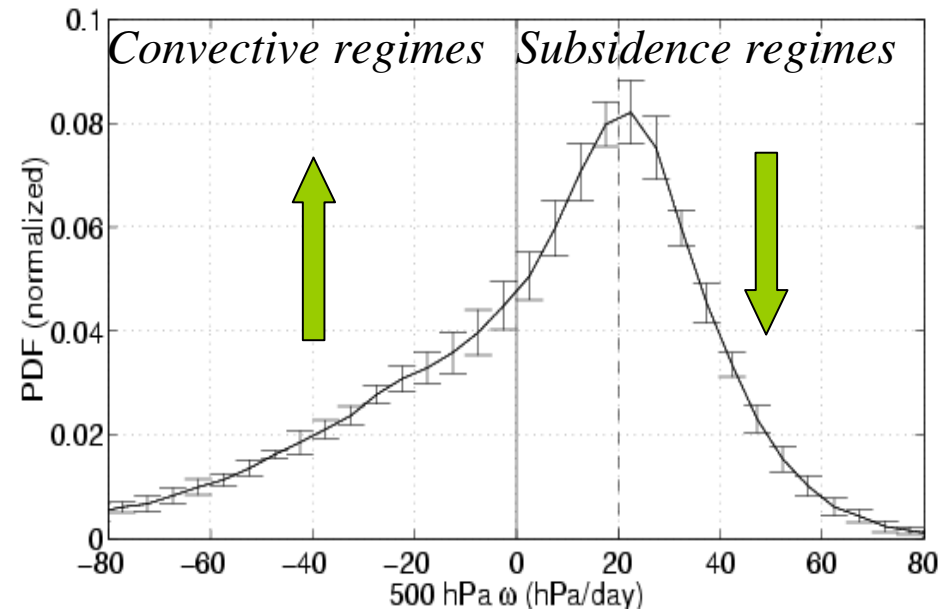


$$\overline{\delta C} = \underbrace{\int_{-\infty}^{+\infty} C_{\omega} \delta P_{\omega} d\omega}_{\text{dynamic}} + \underbrace{\int_{-\infty}^{+\infty} P_{\omega} \delta C_{\omega} d\omega}_{\text{thermodynamic}} + \underbrace{\int_{-\infty}^{+\infty} \delta P_{\omega} \delta C_{\omega} d\omega}_{\text{co-variation}}$$

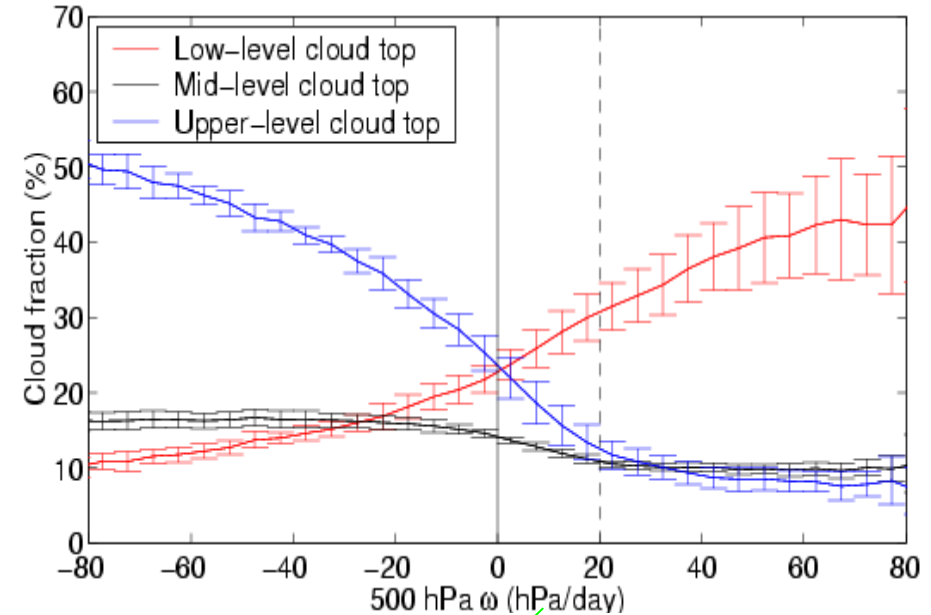
Analysis Method

(Bony et al., 2004, Bony and Dufresne, 2005)

- Proxy ω for large-scale motions: ω_{500hPa} .
- Decomposition of the tropical circulation into dynamical regimes: $\int_{-\infty}^{+\infty} P_{\omega} d\omega = 1$
- Composite of cloud or radiative variables in each dynamical regime: C_{ω}
- Tropical average: $\overline{C} = \int_{-\infty}^{+\infty} P_{\omega} C_{\omega} d\omega$



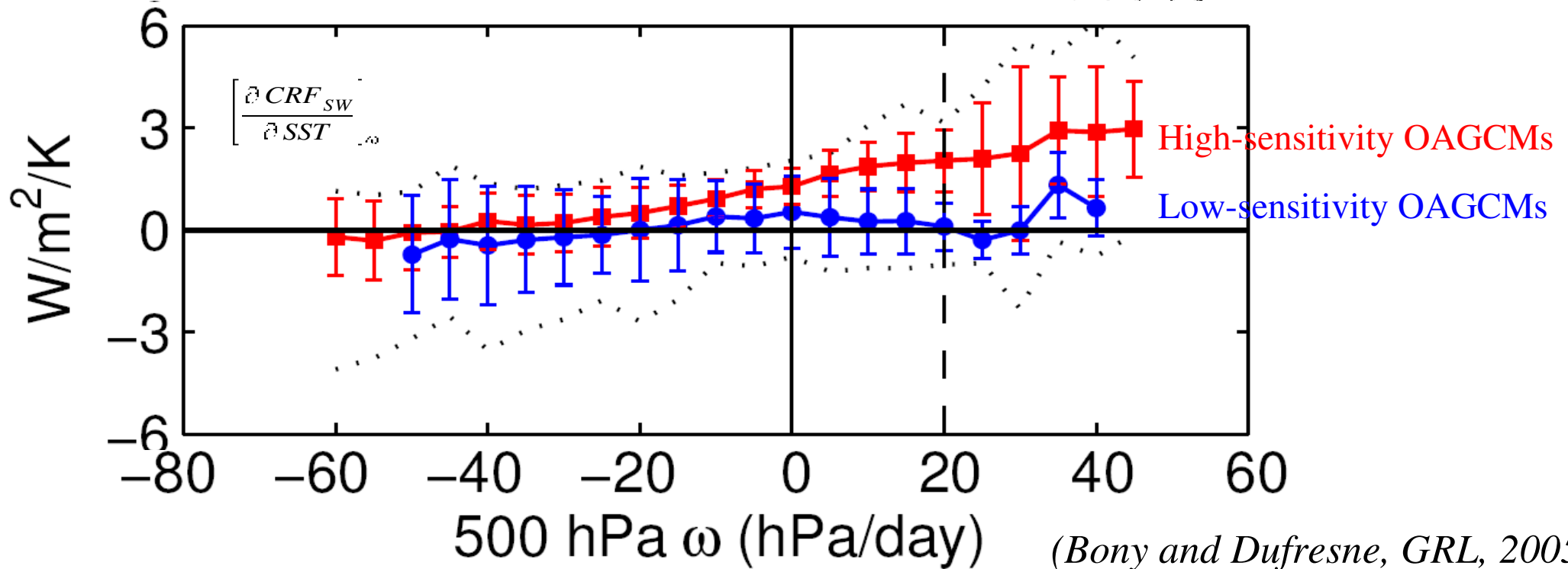
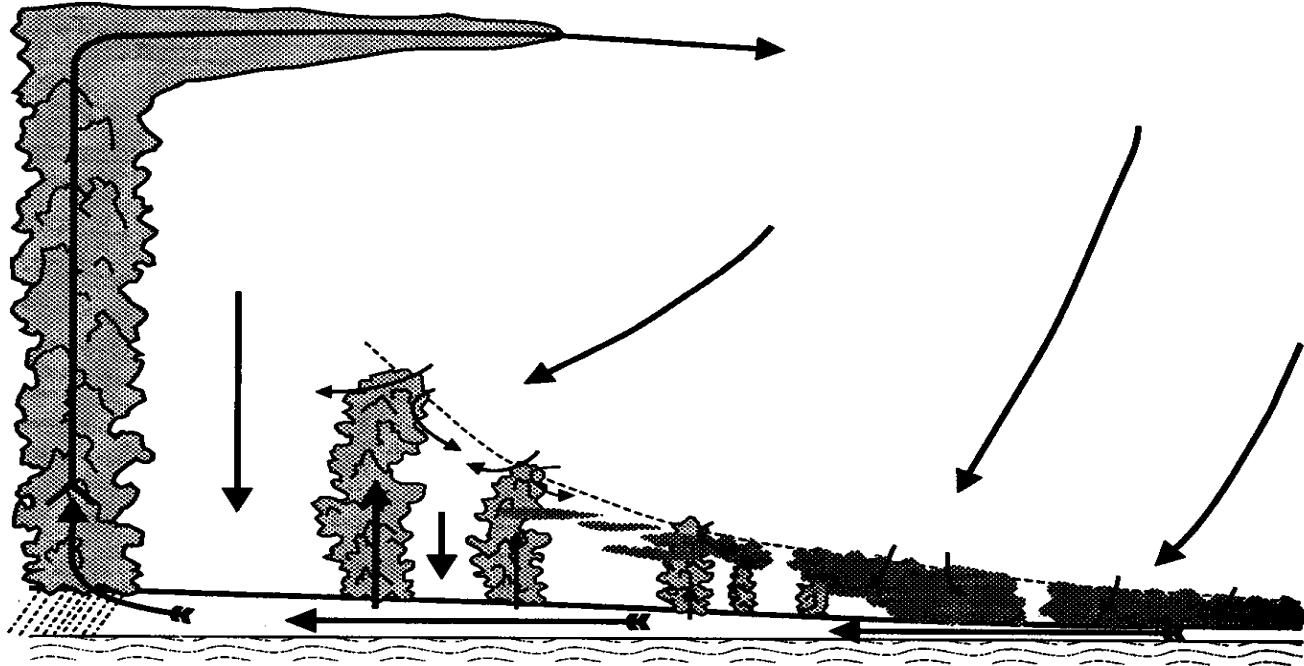
ISCCP Cloud Types sorted by dynamical regimes



$$\overline{\delta C} = \int_{-\infty}^{+\infty} C_{\omega} \delta P_{\omega} d\omega + \int_{-\infty}^{+\infty} P_{\omega} \delta C_{\omega} d\omega + \int_{-\infty}^{+\infty} \delta P_{\omega} \delta C_{\omega} d\omega$$

dynamic
thermodynamic
co-variation

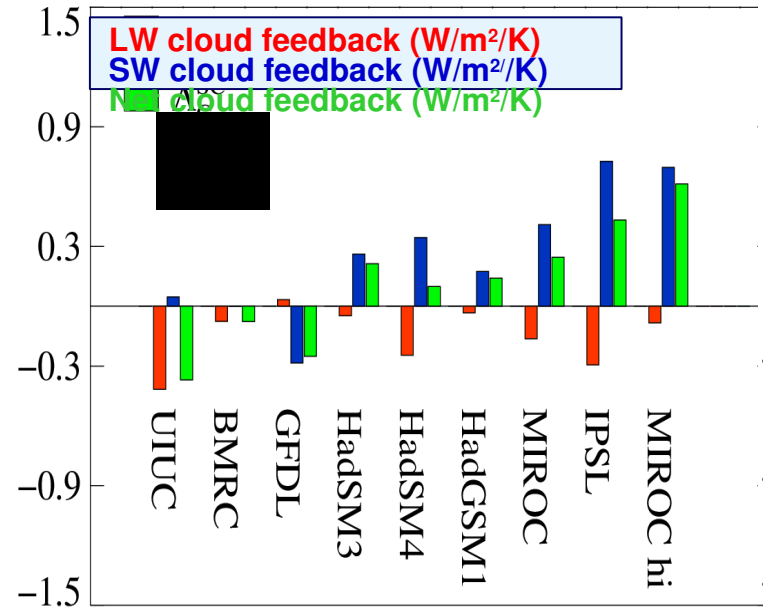
Sensitivity of the Tropical Cloud Radiative Forcing to Global Warming



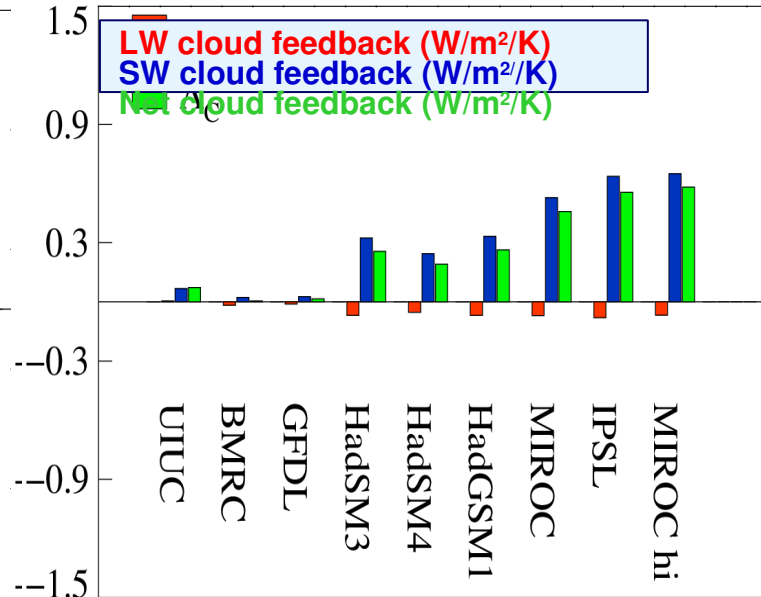
Global cloud feedbacks

(Webb et al., *Climate Dynamics*, 2006 – CFMIP models)

Global Mean

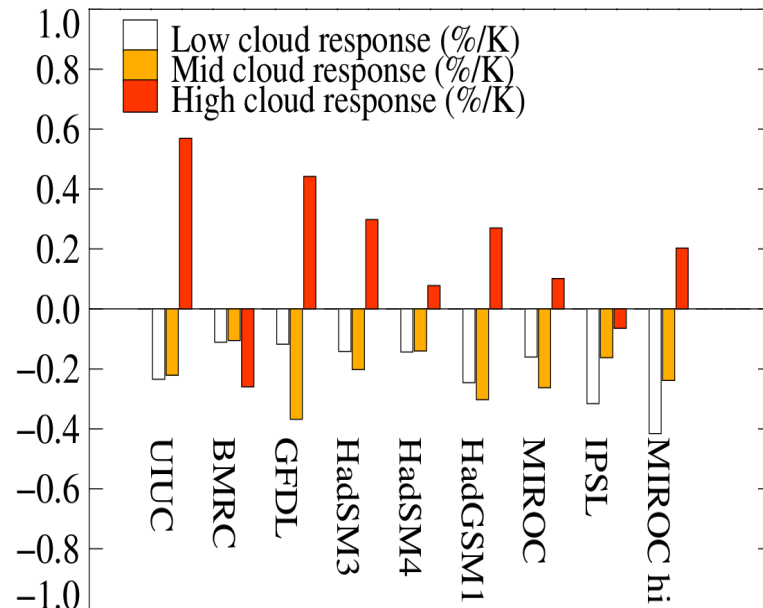


Areas of weak LW cloud feedback

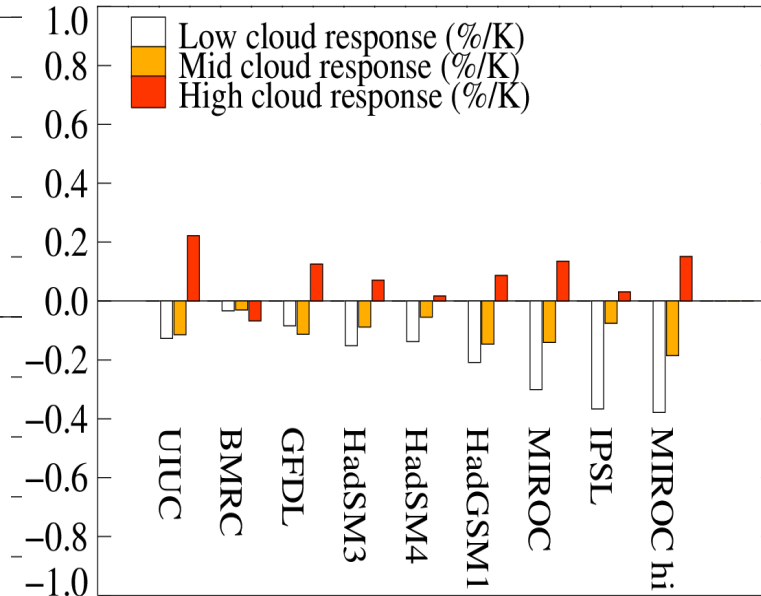


Areas with small LW cloud feedbacks explain 59% of the NET cloud feedback ensemble variance

Global Mean



Areas of weak LW cloud feedback



Cloud feedbacks in these areas are dominated by changes in **low-level cloud amount** (shown with ISCCP simulator)

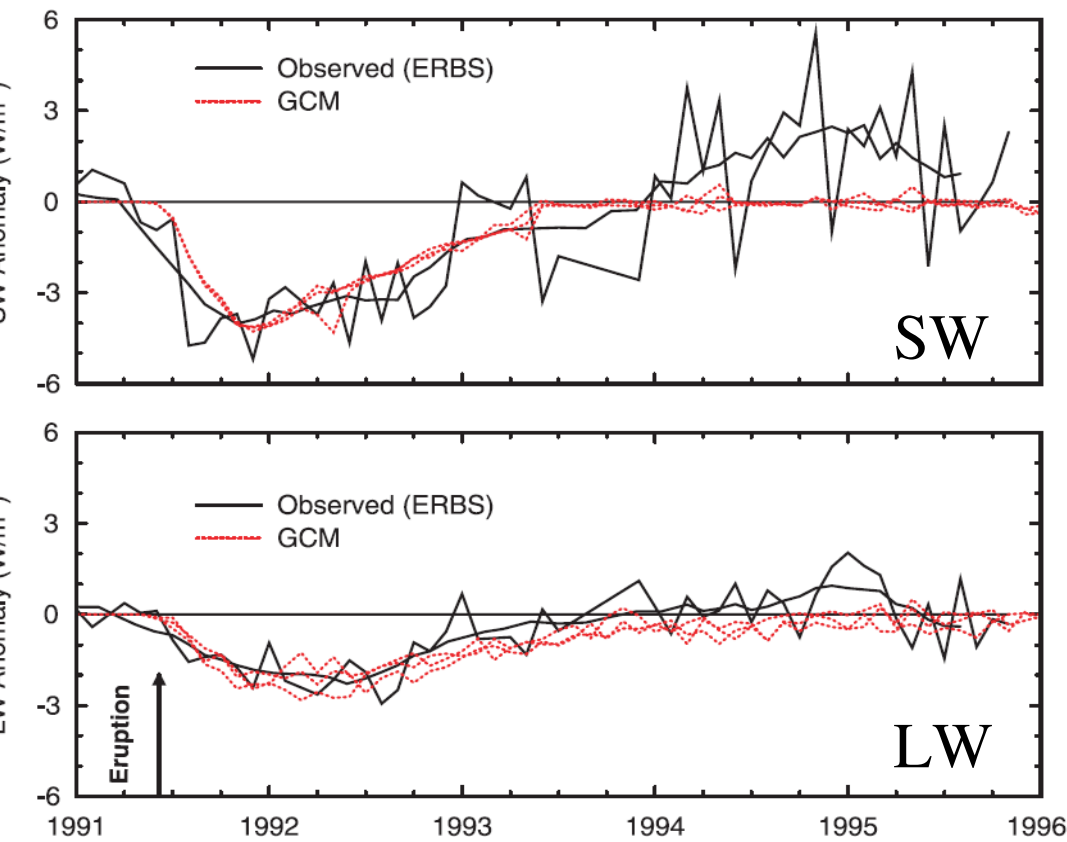
Comment évaluer la sensibilité climatique
des modèles ?

Comment évaluer la sensibilité climatique des modèles ?

1^{ère} approche : comparer modèles et observations pour différents exemples de variations forcées du climat.

Tests observationnels de la sensibilité climatique

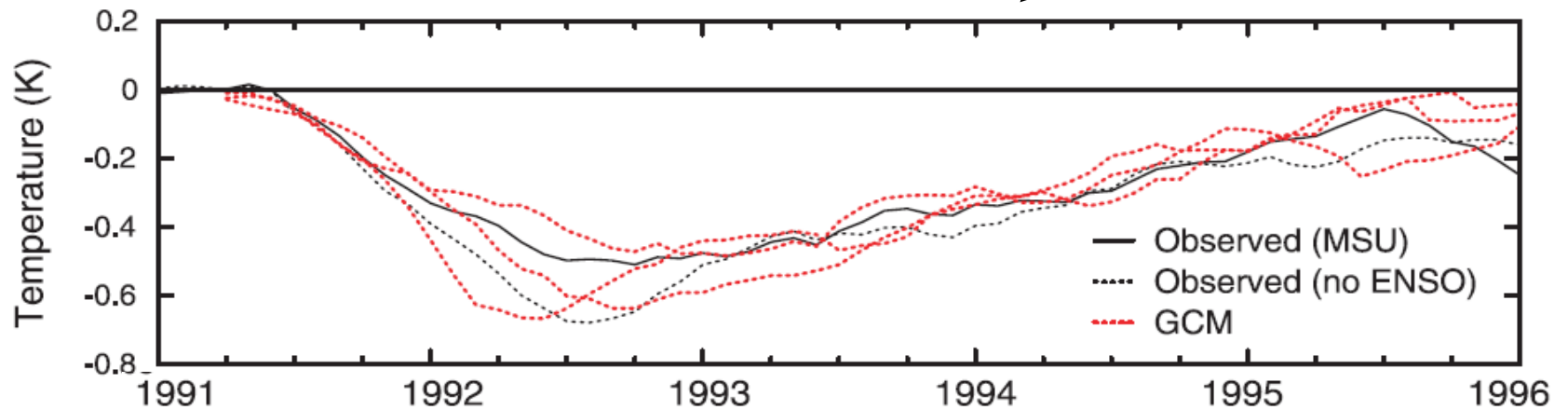
(Soden et al. 2002)



Modèle du GFDL

Anomalies des flux radiatifs
au sommet de l'atmosphère
induits par l'éruption
du Mont Pinatubo

Réponse de la température globale
de la basse troposphère

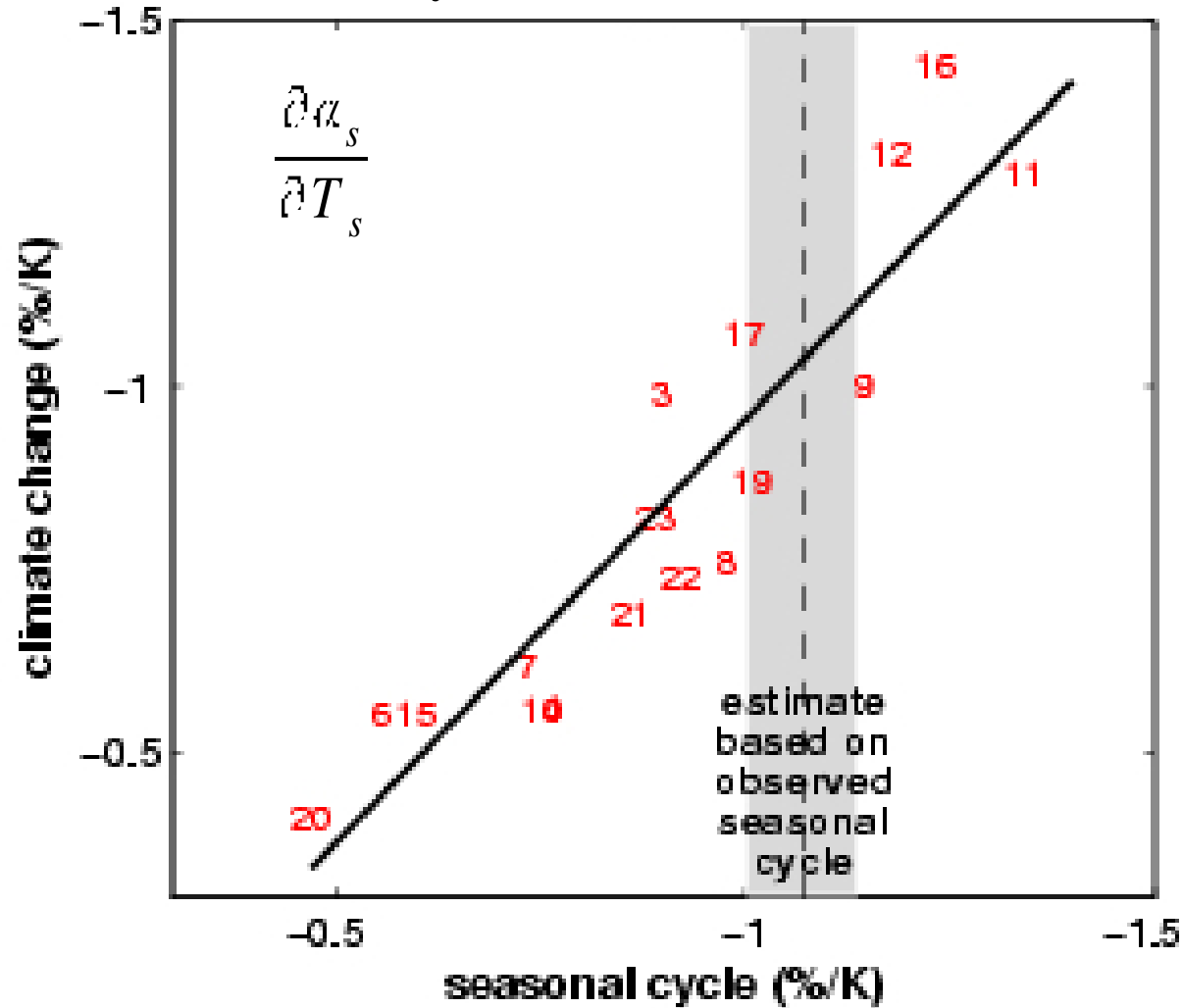


Comment évaluer la sensibilité climatique des modèles ?

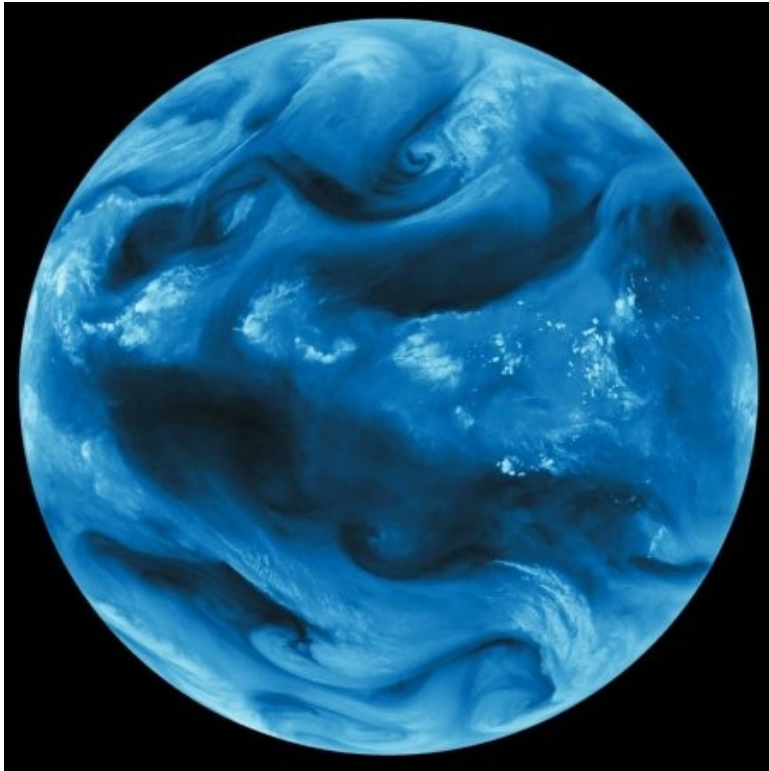
- 1^{ère} approche : comparer modèles et observations pour différents exemples de variations forcées du climat.
- 2^{ème} approche : tester les mécanismes de rétroaction climatique mis en jeu dans la réponse du climat à des forçages externes.

Evaluation de la Rétroaction Neige – Albédo Planétaire

Snow-albedo feedback in climate change and seasonal cycle contexts (AR4 OAGCMs)



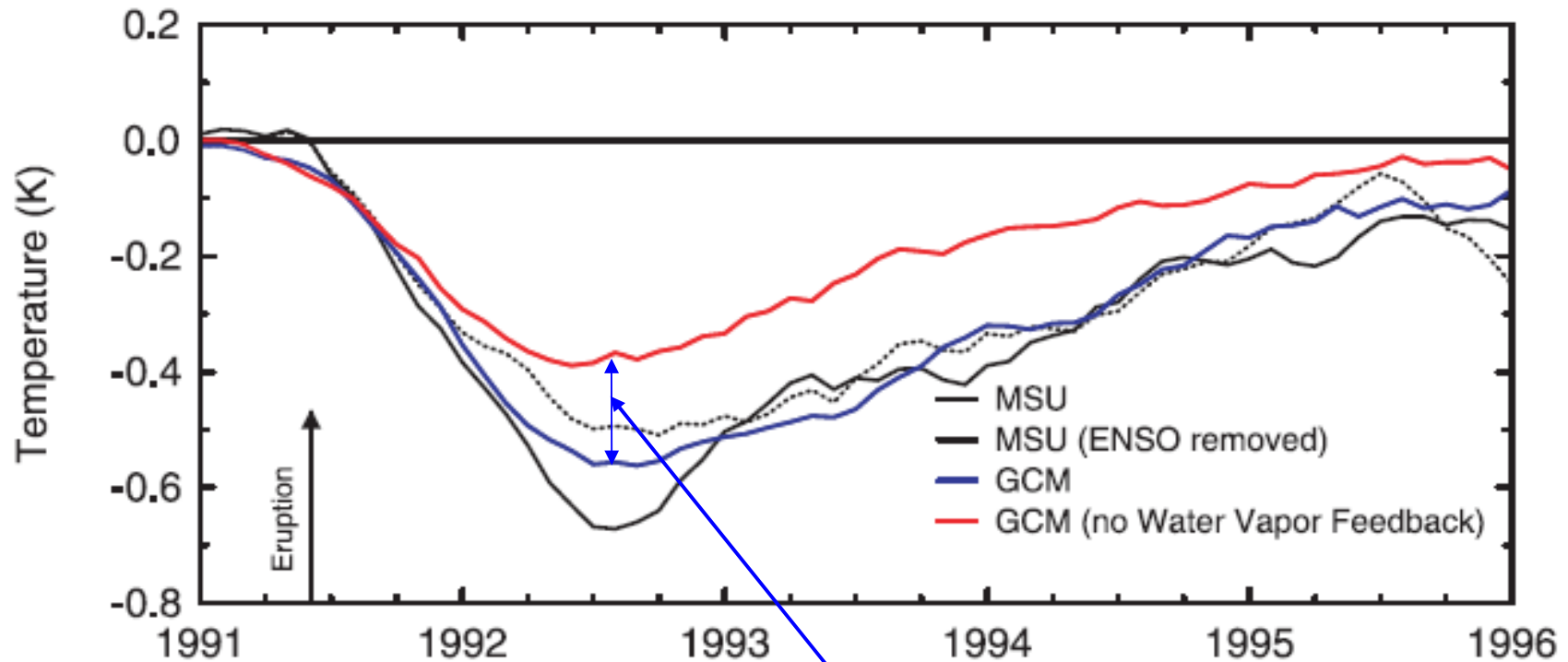
Evaluation de la Rétroaction Vapeur d'Eau



- Rétroaction climatique très amplificatrice.
- Distribution de la vapeur d'eau contrôlée par de très nombreux processus (dynamique, convection, microphysique, etc).
- Les modèles climatiques suggèrent que la réponse de la vapeur d'eau au réchauffement global se fait principalement à humidité relative constante (i.e. selon la loi de Clausius-Clapeyron), alors que rien ne les y contraint *a priori*.
- Comportement réaliste ou artéfact ?

Tests observationnels de la rétroaction vapeur d'eau (Soden et al. 2002)

Réponse de la température globale à l'éruption du Mont Pinatubo

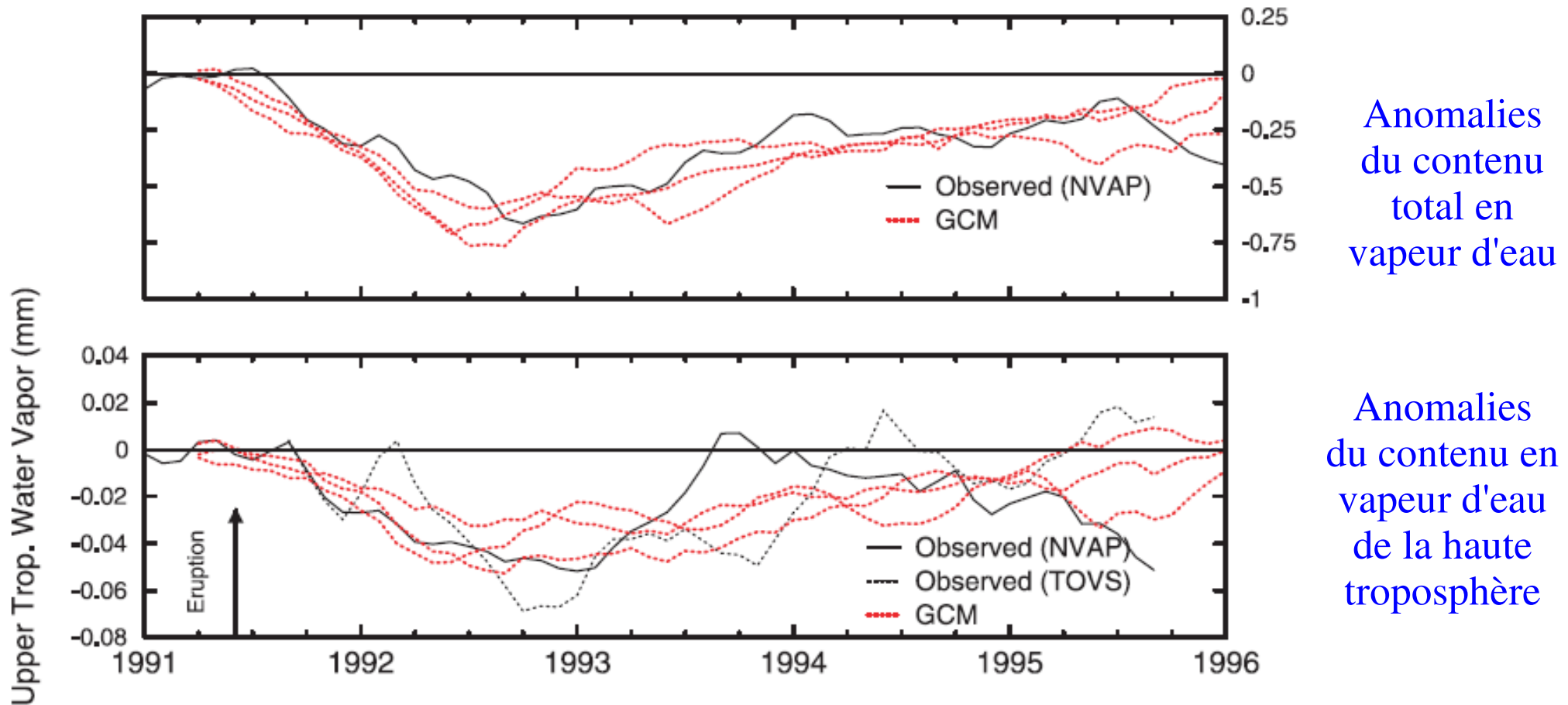


Effet amplificateur de la rétroaction vapeur d'eau

Tests observationnels de la sensibilité climatique

(Soden et al. 2002)

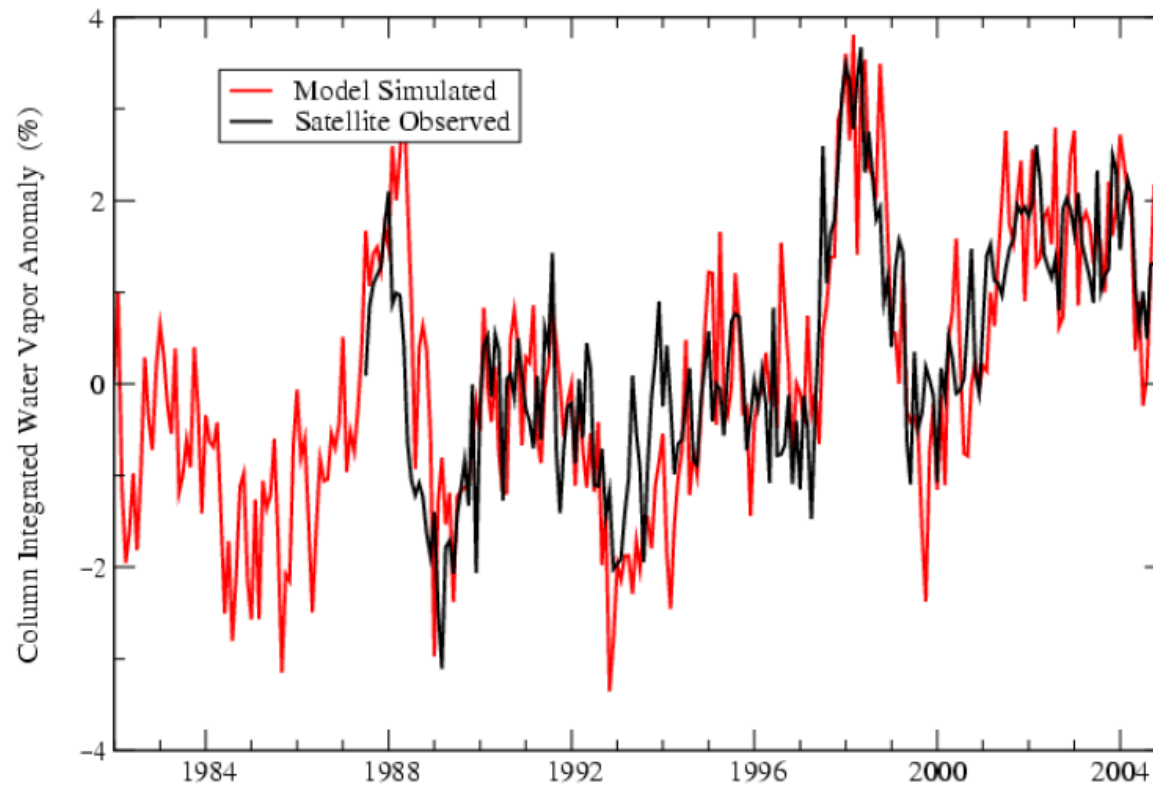
Réponse de la vapeur d'eau à l'éruption du Mont Pinatubo



- Variations simulées et observées du même ordre de grandeur
- Variations compatibles avec une réponse de la vapeur d'eau à $RH \sim \text{constante}$

Tests observationnels de la rétroaction vapeur d'eau (Soden et al. 2005)

Variations interannuelles et décennales
(température de l'océan imposée)



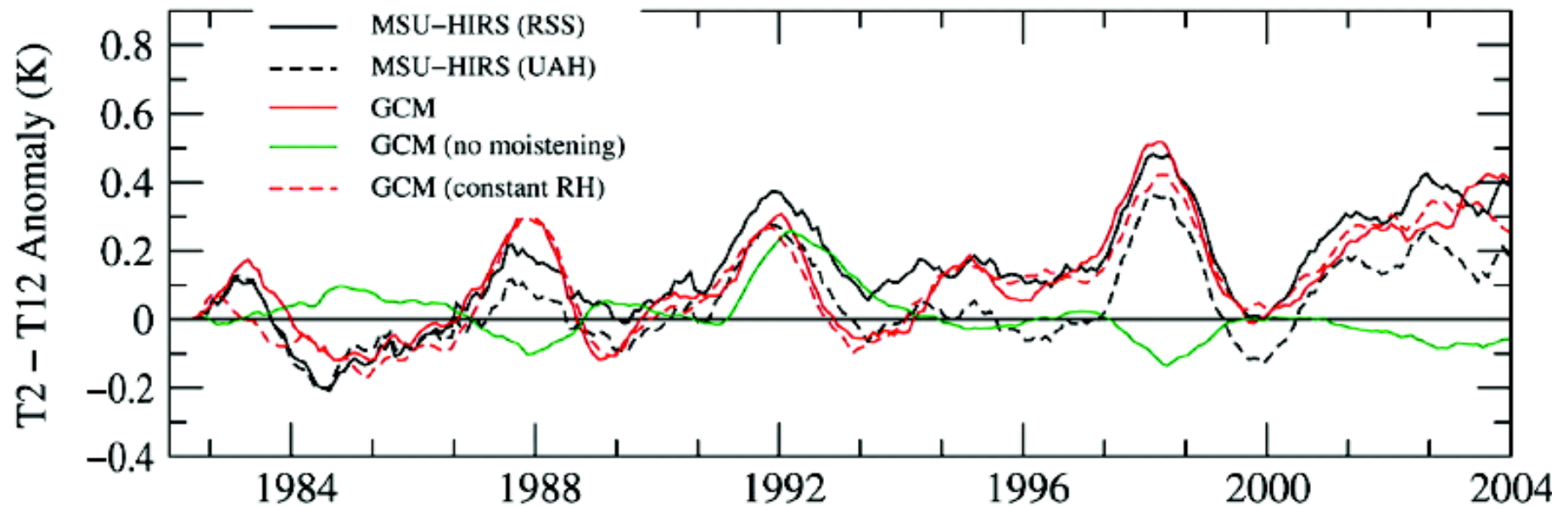
Contenu total
de l'atmosphère
en vapeur d'eau
(kg/m²)

...mais la rétroaction vapeur d'eau dépend surtout des changements de vapeur d'eau dans la haute troposphère.

Tests observationnels de la rétroaction vapeur d'eau (Soden et al. 2005)

Variations interannuelles et décennales
(température de l'océan imposée)

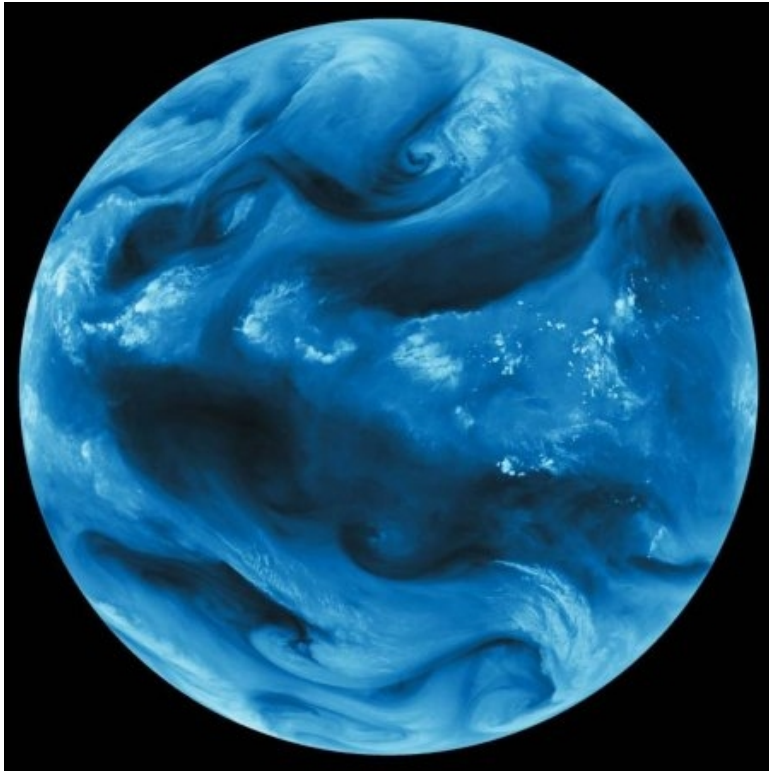
“proxy” du contenu en vapeur d'eau dans la haute troposphère



Evolution de la vapeur d'eau simulée :

- humidité relative ~ constante
- bon accord avec les observations spatiales

Evaluation de la Rétroaction Vapeur d'Eau



- Rétroaction climatique très amplificatrice.
- Distribution de la vapeur d'eau contrôlée par de très nombreux processus (dynamique, convection, microphysique, etc).
- Les modèles climatiques suggèrent que la réponse de la vapeur d'eau au réchauffement global se fait principalement à humidité relative constante (i.e. selon la loi de Clausius-Clapeyron), alors que rien ne les y contraint *a priori*.
- Comportement réaliste ou artéfact ?

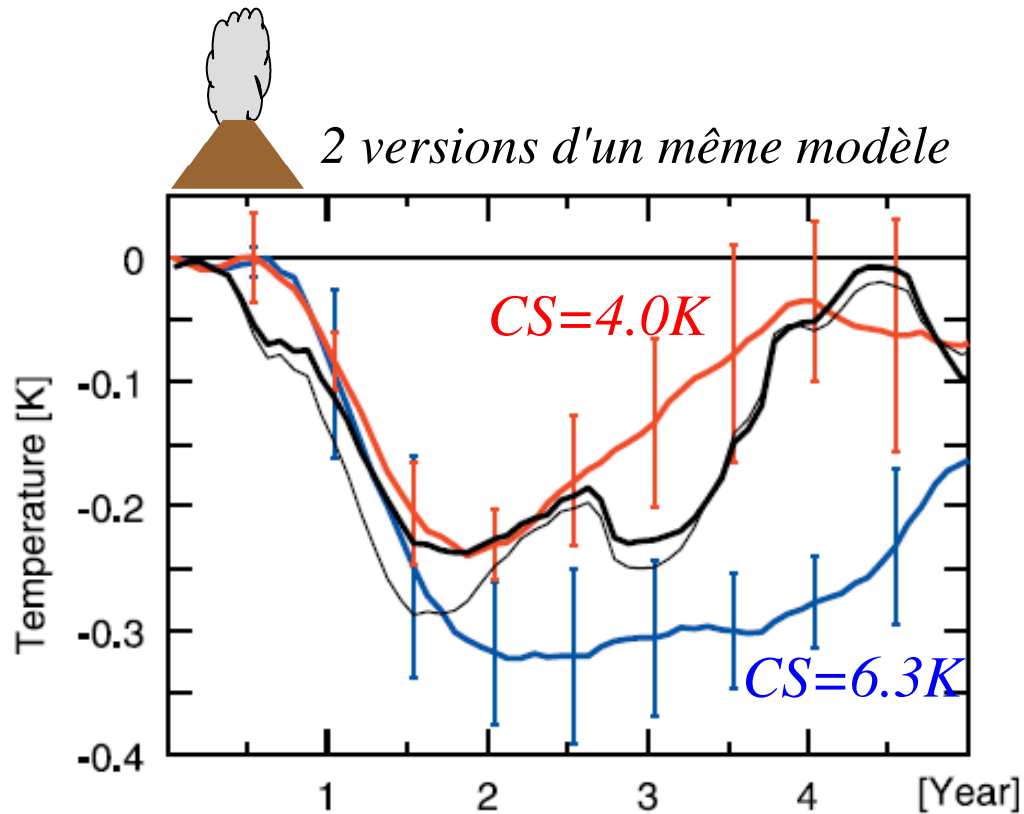
Rien ne suggère que la réponse de la vapeur d'eau simulée en changement climatique soit un artéfact des modèles :

- Comparaisons modèles-observations à diverses échelles de temps
- Robustesse vis-à-vis de la physique et de la résolution des modèles
- Confirmation par des modèles explicites de nuages
- etc ...

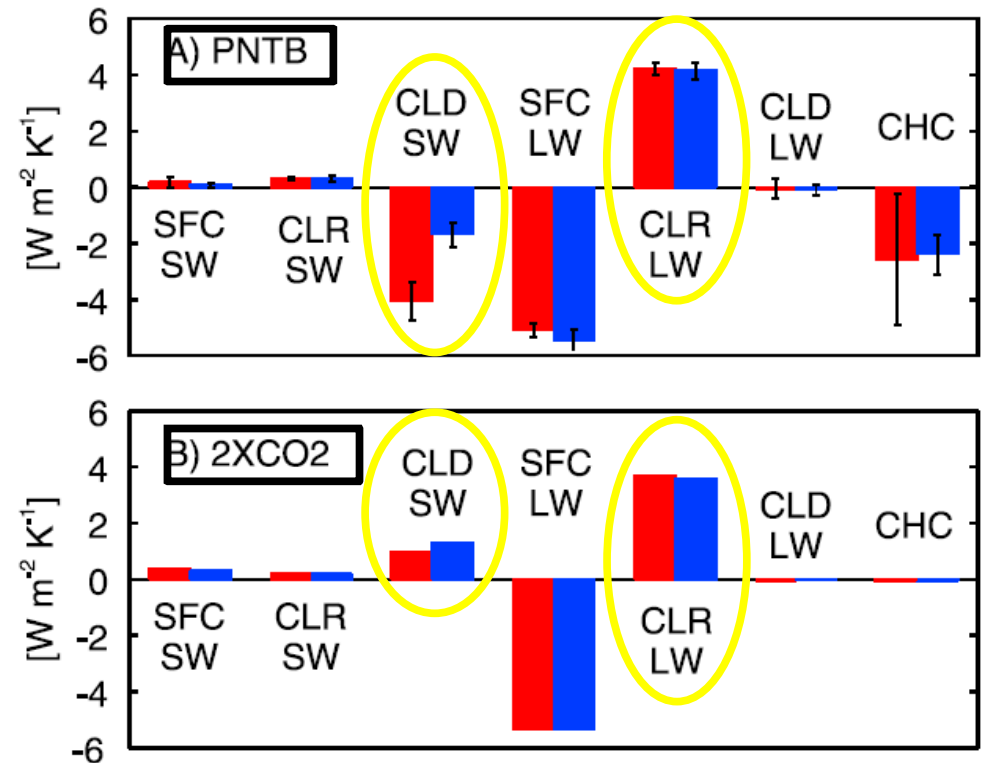
La rétroaction vapeur d'eau semblant contrôlée principalement par la loi de Clausius-Clapeyron aux longues échelles de temps; elle est probablement du bon ordre de grandeur.

Tests observationnels des rétroactions nuageuses

(Yokohata et al. 2005)

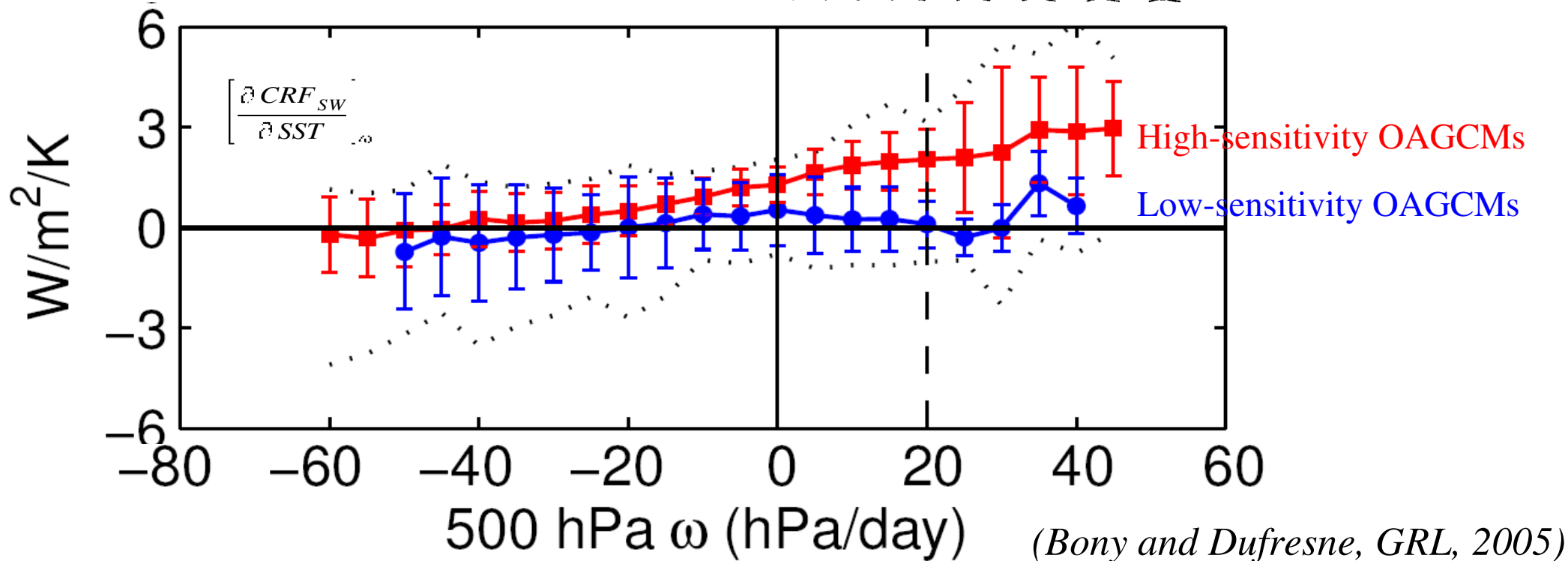
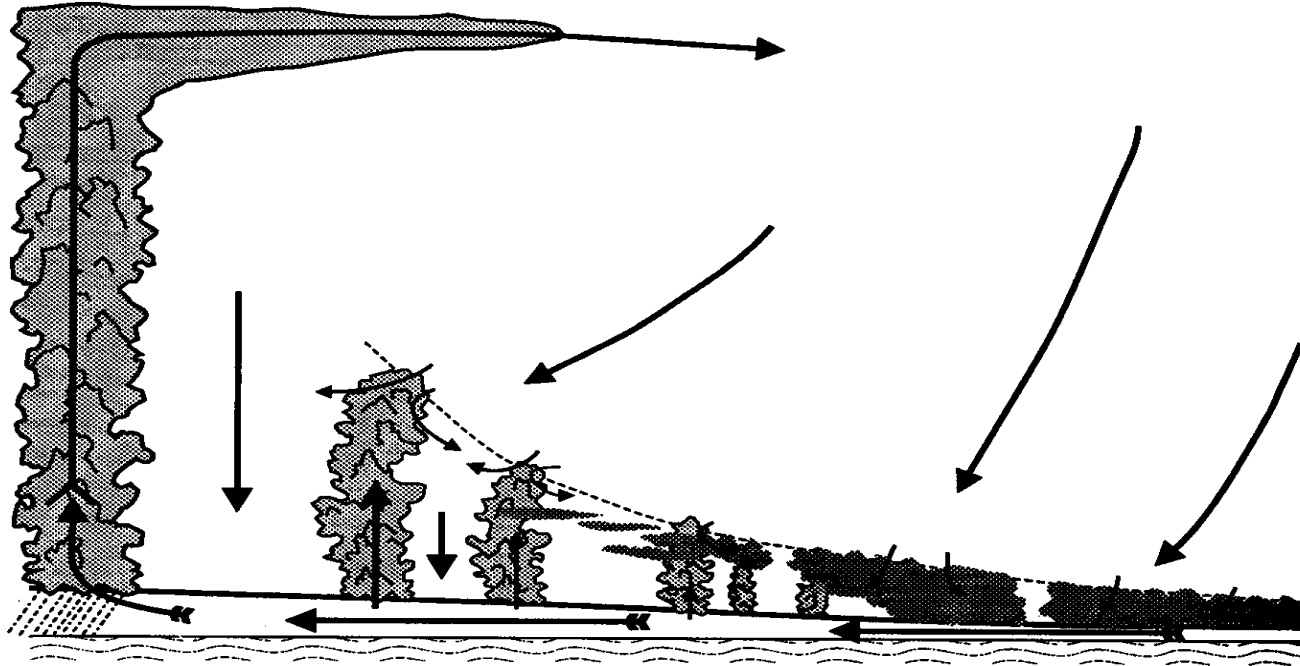


Analyse des rétroactions :



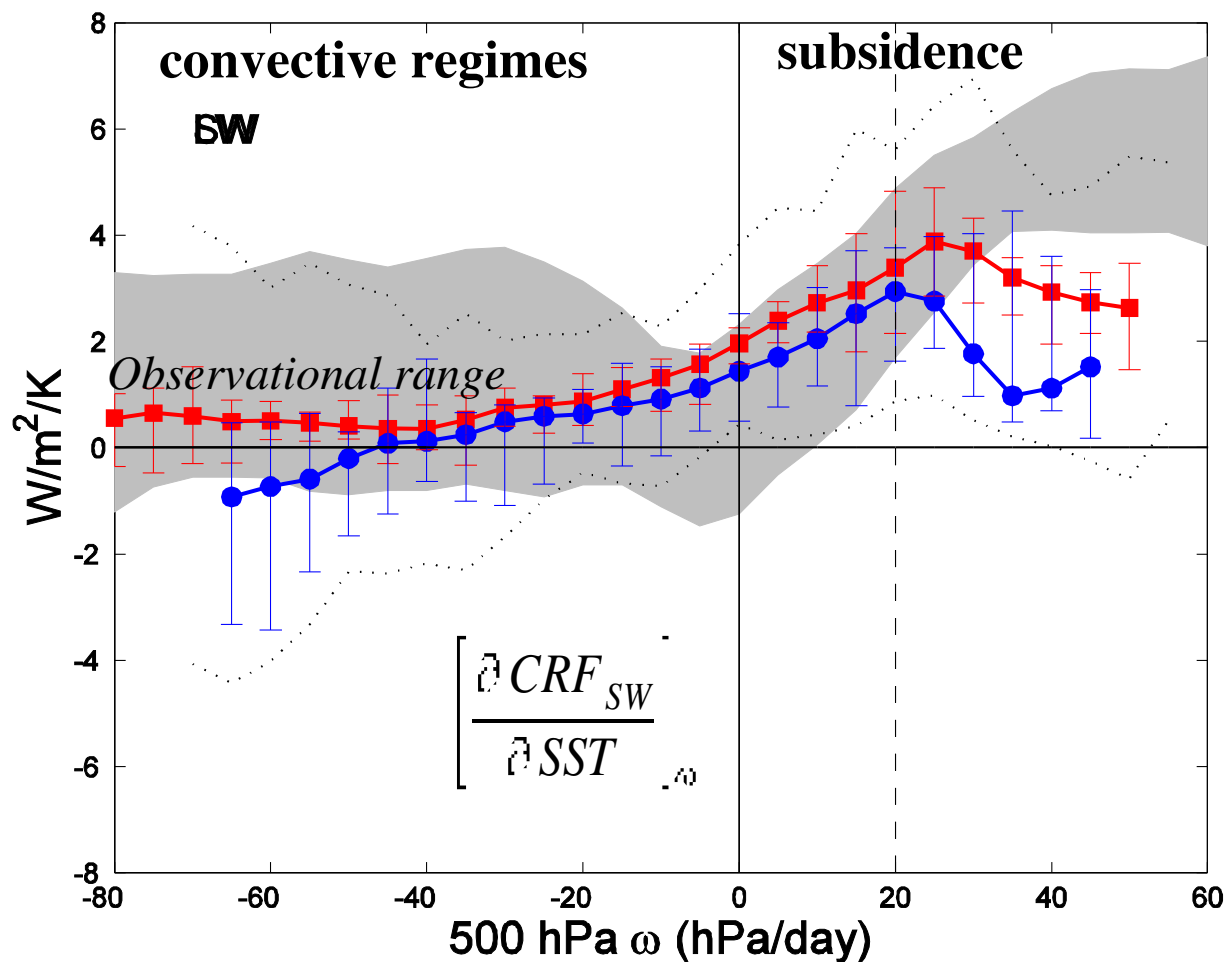
Le signe et l'amplitude des rétroactions mises en jeu ne sont pas nécessairement identiques pour tous les forçages...

Sensitivity of the Tropical Cloud Radiative Forcing to Global Warming



Sensitivity of the SW CRF to interannual SST changes
(an example, not an analogue of climate change)

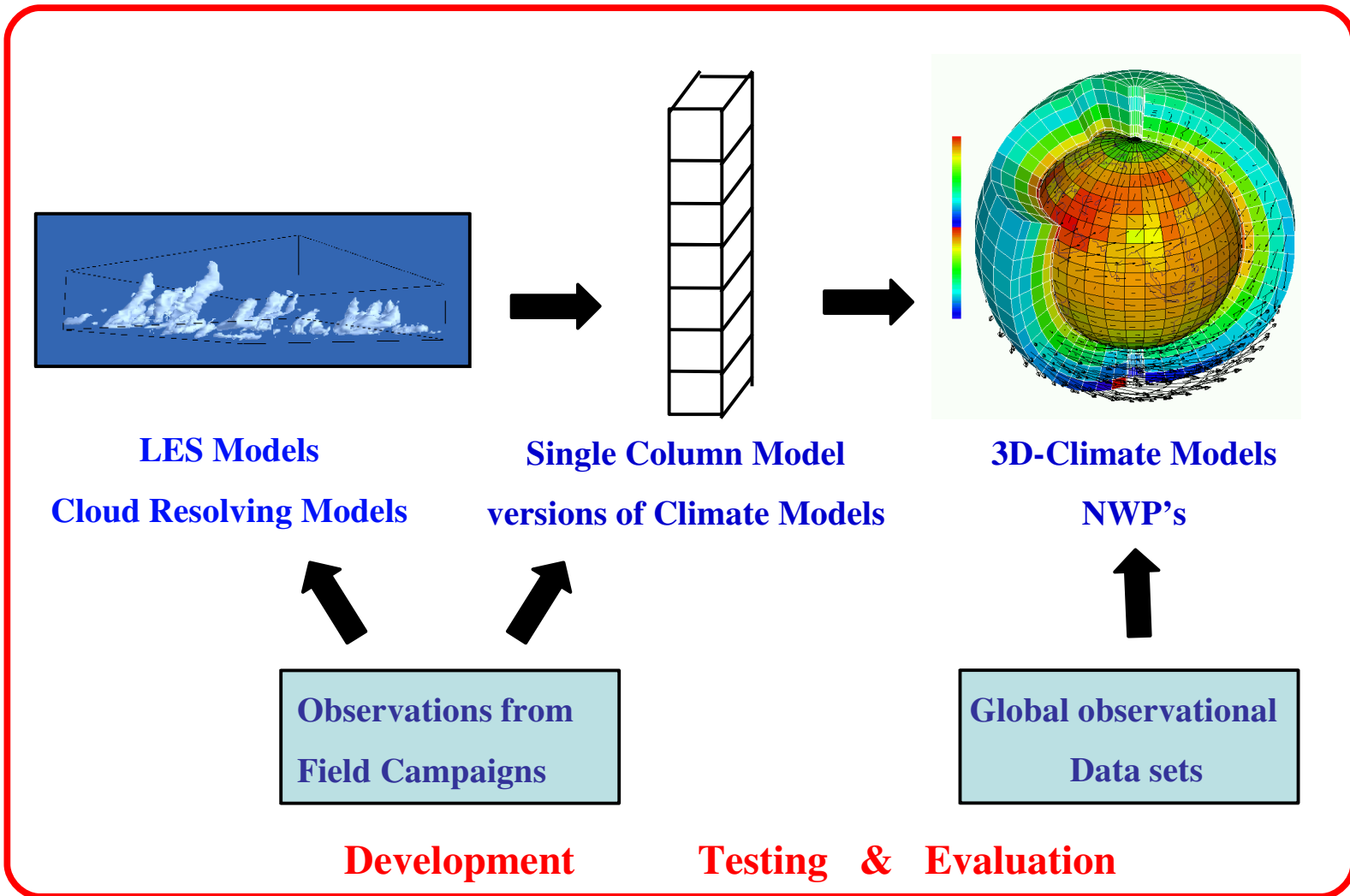
15 AR4 OAGCMs (20th Century simulations)
vs Observations



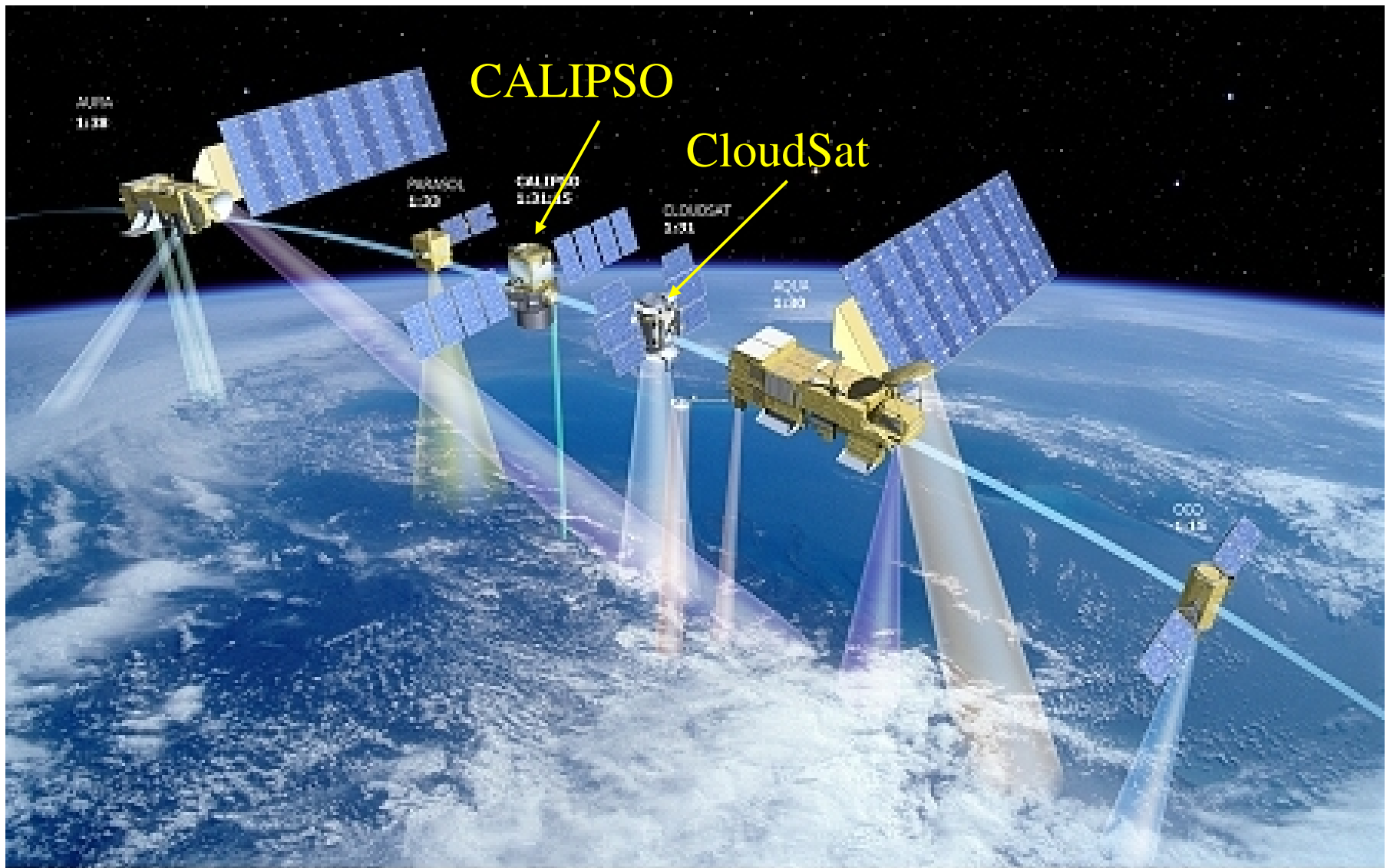
- 1984-2000 monthly data :**
- ISCCP-FD / ERBE rad fluxes
 - Reynolds SST
 - ERA40 / NCEP2 reanalyses

(Bony and Dufresne, GRL, 2005)

Méthodologie de développement et de validation des modèles climatiques



Aqua-Train constellation of satellites

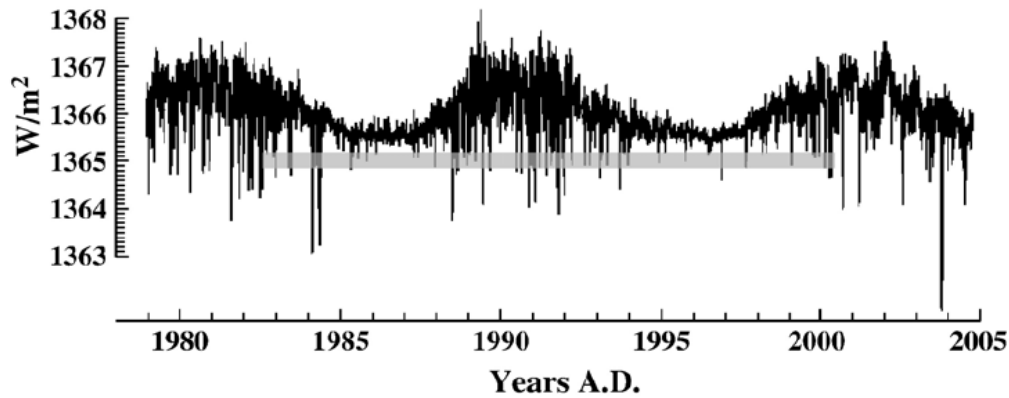


© CNRS - Avril 2008 / Illustration P. CAPPEL

Méthodologies de comparaison observations / simulations
(e.g. simulateurs de signaux radar & lidar)

Influence des variations solaires
sur le climat ?

Forçages radiatifs associés aux variations solaires :



Cycle de 11 ans :

Variations de l'irradiance solaire :

1.1 W/m² (environ 0.1 %)

Forçage radiatif du climat : 0.2 W/m²

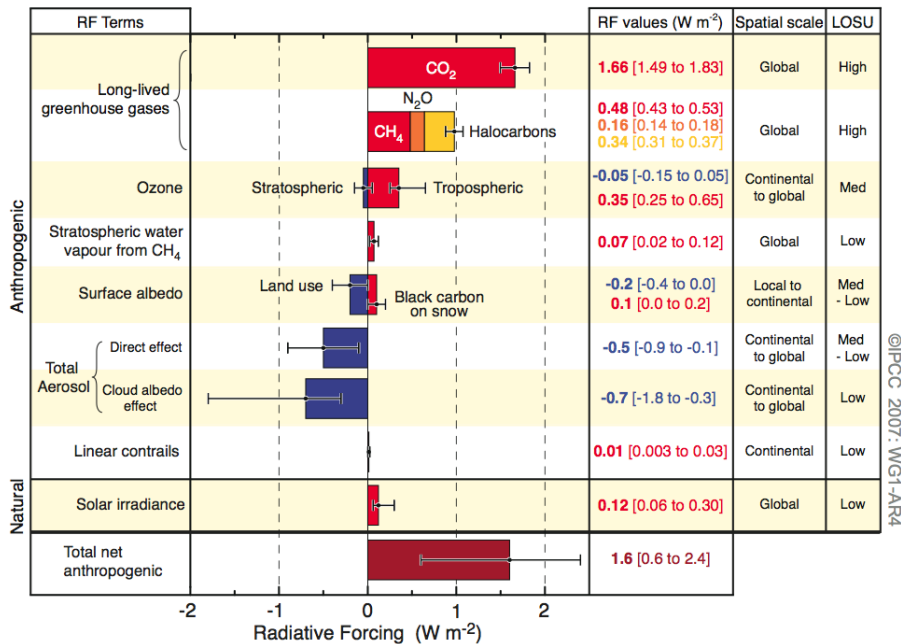
Estimations des forçages depuis 1750 :

Tendances de l'irradiance : + 0.7 W/m² (?)

Forçage radiatif associé : + 0.12 W/m²

Forçages anthropiques : + 1.6 W/m²

Radiative Forcing Components



$$\Delta T_s = \eta \Delta Q$$

En utilisant $\Delta Q = 0.12$

W/m²

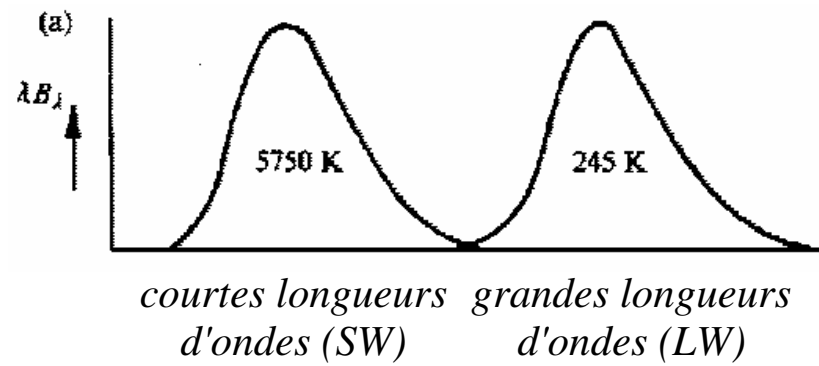
et les η estimées pour

un forçage CO₂ :

$$\Delta T_s < 0.1 \text{ K}$$

La sensibilité climatique au forçage solaire peut-elle être significativement différente de la sensibilité climatique à l'augmentation des gaz à effet de serre ?

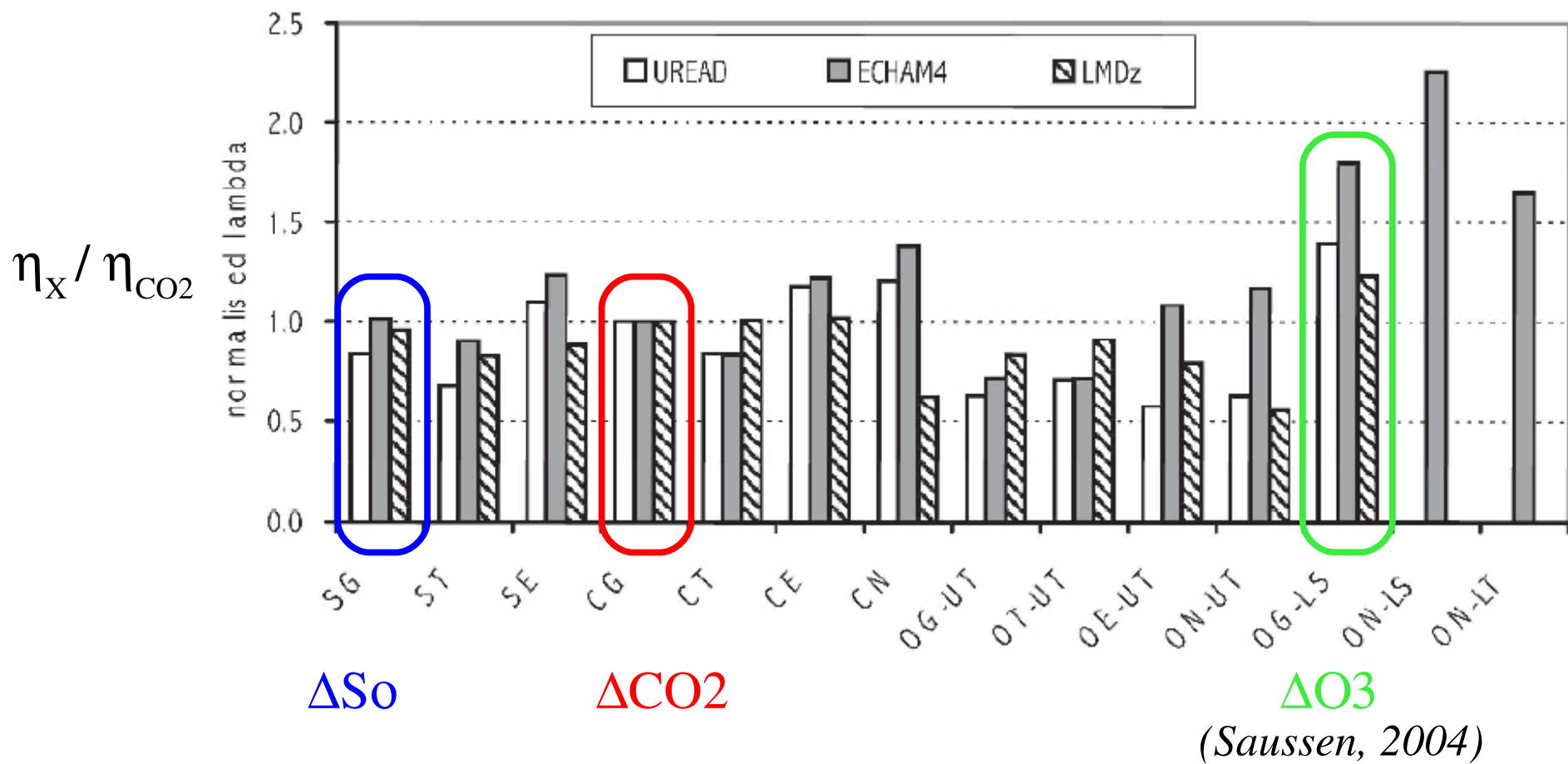
1. Dépendance de la sensibilité climatique à la nature (SW, LW) du forçage radiatif appliqué



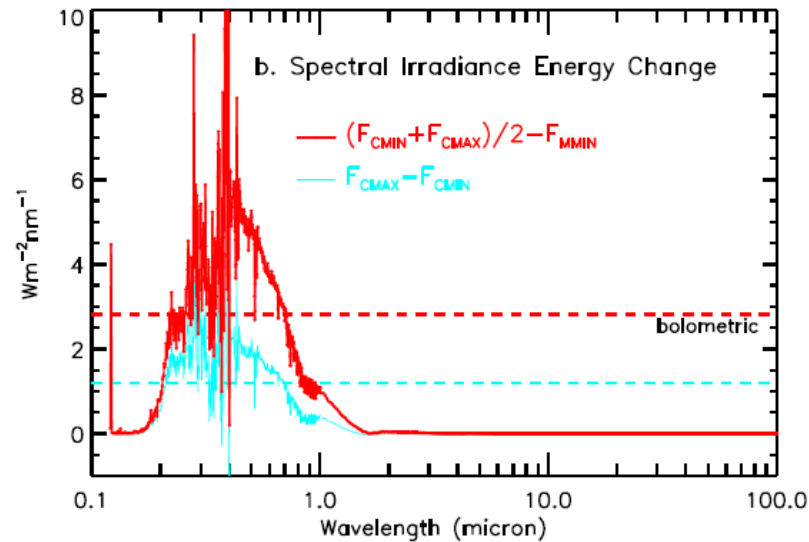
Comparaison des sensibilités climatiques associées à des forçages radiatifs de natures différentes

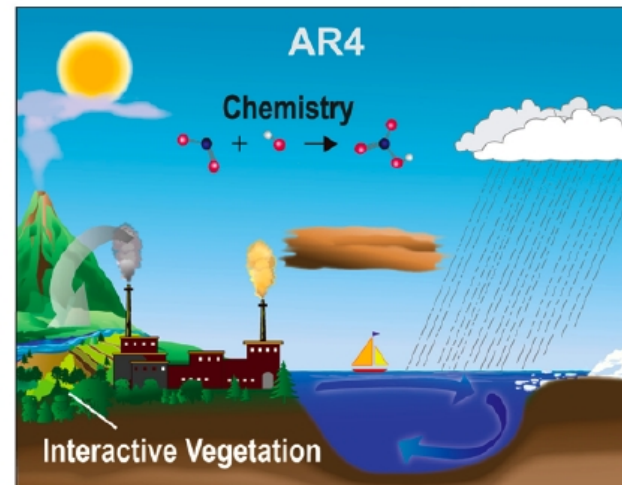
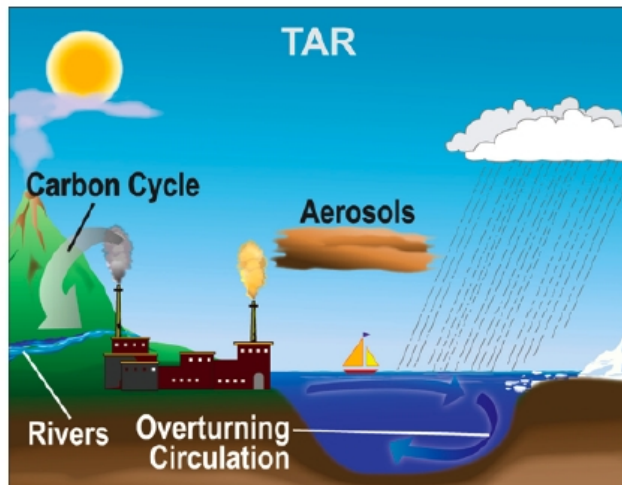
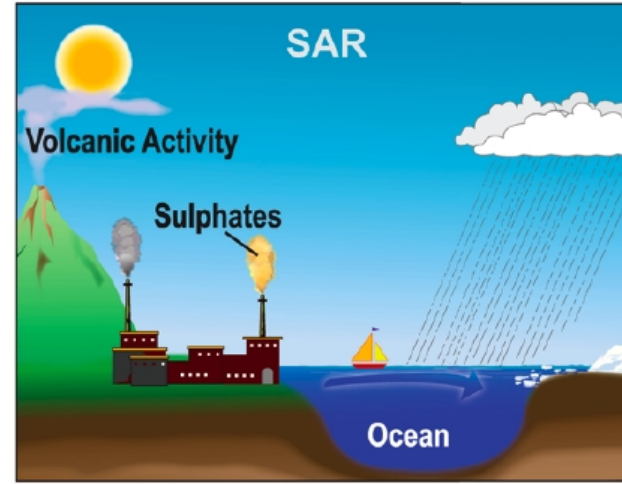
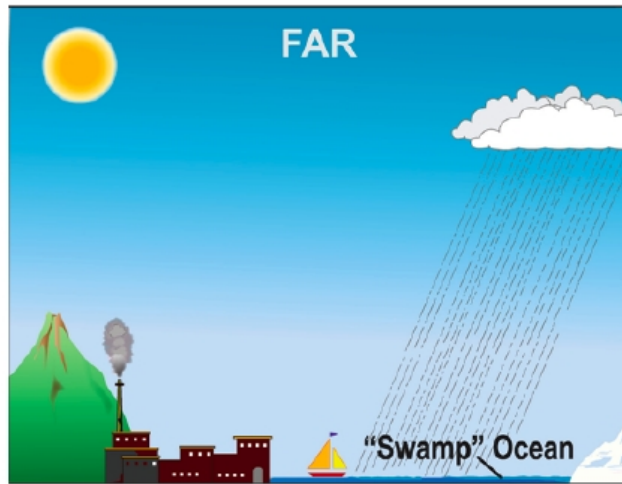
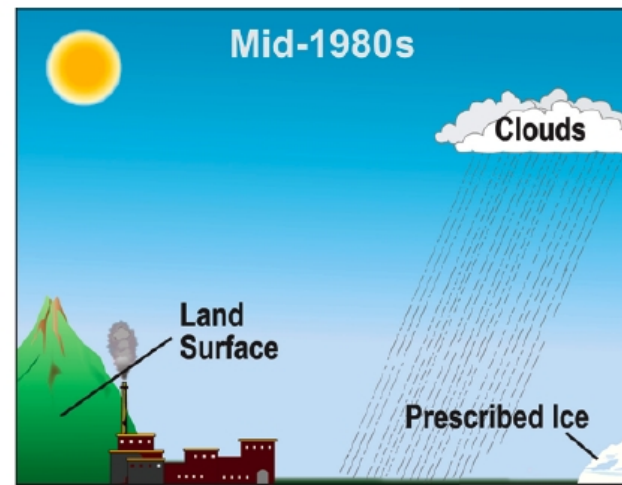
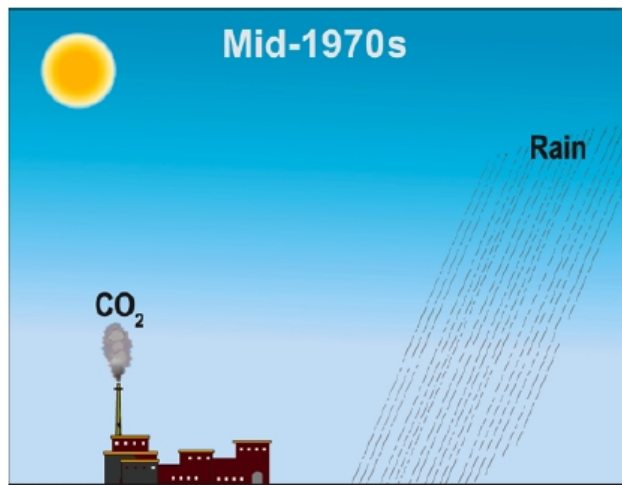
$$\Delta Q = 1 \text{ W/m}^2 ; \Delta T_s = \eta \cdot \Delta Q$$

(Rq: forçage idéalisés)



3. Dépendence de la sensibilité climatique à la répartition spectrale des variations d'irradiance (UV) et aux interactions chimie (ozone) – climat

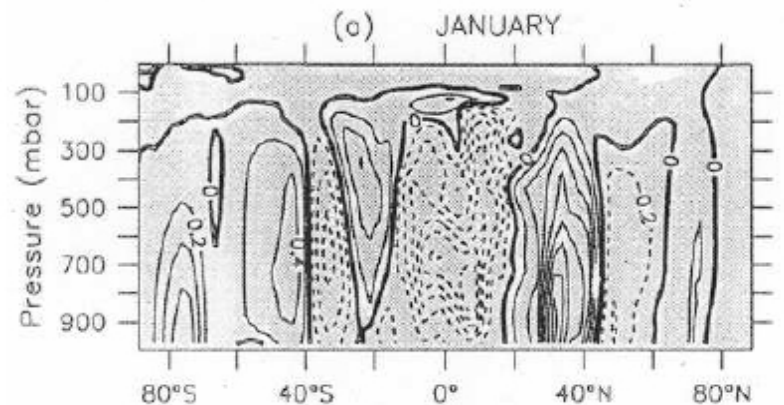
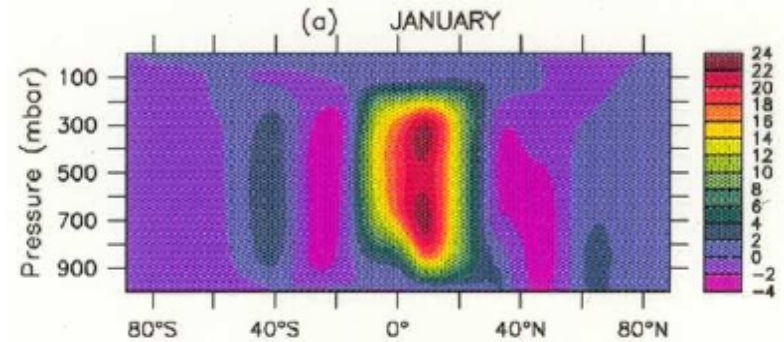
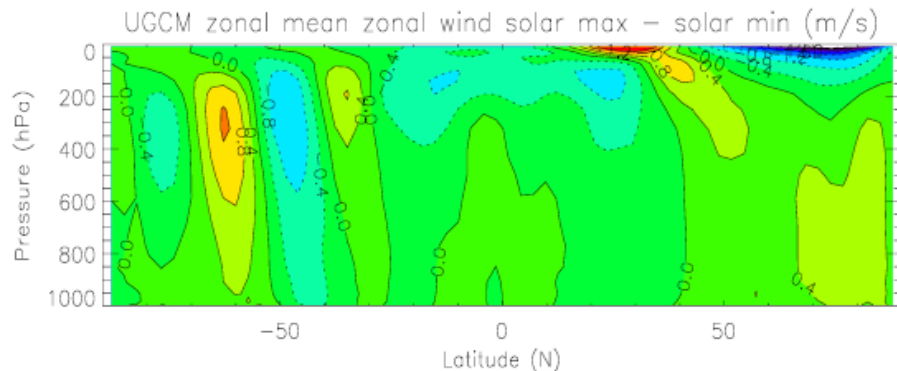
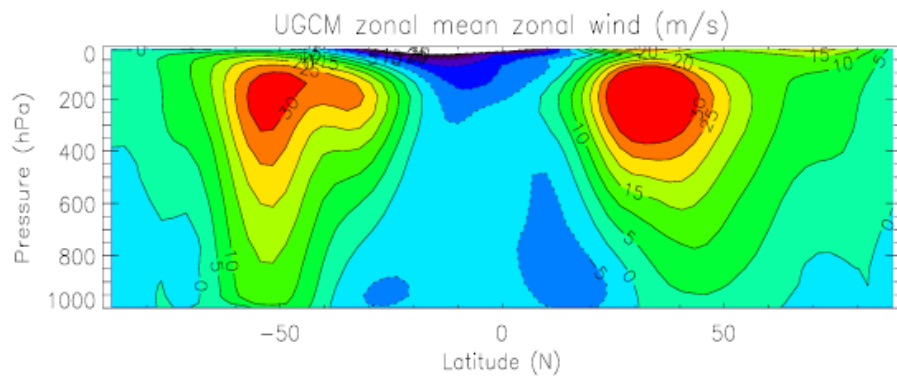




(GIEC 2007)

Simulations GCM (atmosphérique) de l'impact du cycle solaire de 11 ans - et des variations UV associées - sur le climat

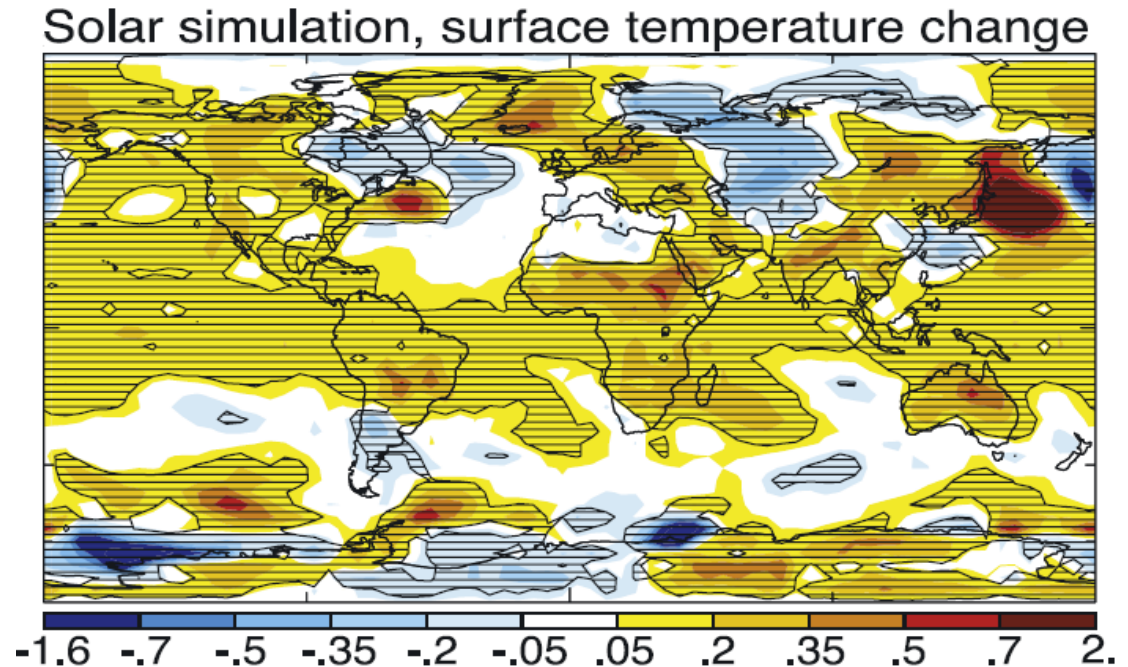
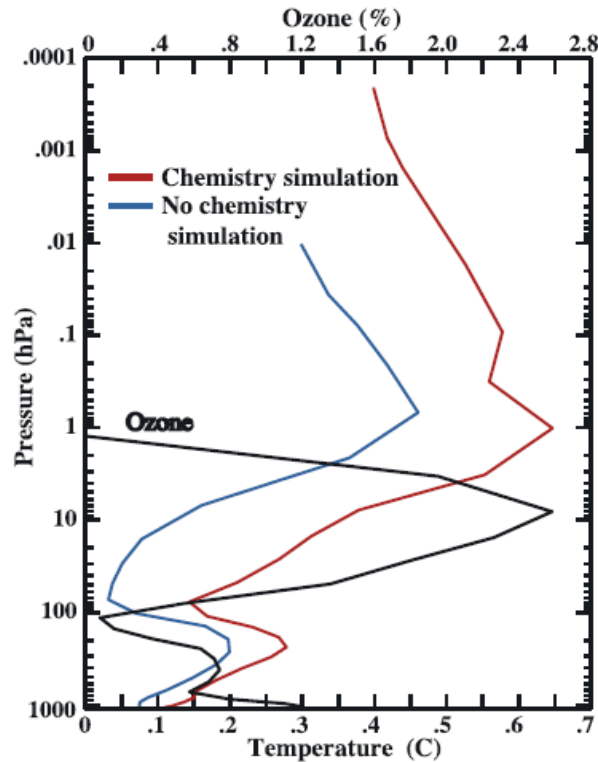
(Joanna Haigh 1996, 1999)



- Au maximum solaire:
 - léger déplacement et affaiblissement des jets subtropicaux
 - déplacement vers les pôles des zones dépressionnaires des moyennes latitudes
 - affaiblissement et élargissement de la circulation de Hadley.
- Réponse bien plus faible quand seuls les changements d'irradiance sont pris en compte.
- Rq: températures de l'océan fixes et perturbations d'ozone prescrites.

Réponse climatique au forçage solaire simulée avec couplage océan-atmosphère, variations UV, et chimie interactive

(Shindell et al. 2006)



- Le couplage UV-ozone-climat amplifie la réponse en température de la stratosphère, de la haute troposphère et (dans une moindre mesure) de la surface + changements dans la dynamique atmosphérique.
- Variation d'irradiance solaire de $+1.1 \text{ W/m}^2$ (forçage de $+0.2 \text{ W/m}^2$) à l'équilibre :
 $\Delta T_s = +0.08 \text{ C}$ sans chimie, $\Delta T_s = +0.10 \text{ C}$ avec chimie ie +20% env.
- Sensibilité η [$\text{K} \cdot (\text{W/m}^2)^{-1}$] : 0.3 sans chimie, 0.5 avec chimie (0.4 pour GHGs en transitoire)

CONCLUSIONS

- La sensibilité climatique dépend en premier lieu du signe et de l'amplitude des rétroactions liées à la vapeur d'eau et aux nuages.
- Les estimations de la sensibilité climatique varient d'un facteur 2 selon les modèles de circulation générale.
- La rétroaction vapeur d'eau, qui constitue le principal mécanisme amplificateur du système climatique, est probablement du bon ordre de grandeur.
- L'incertitude principale réside dans la réponse des nuages, et des nuages bas en particulier.
- La sensibilité climatique à des variations d'irradiance est peu différente de la sensibilité aux forçages des gaz à effet de serre lorsque l'on ne tient compte que de la perturbation radiative intégrée.
- Le spectre des variations solaires nécessite de tenir compte des interactions entre UV, ozone stratosphérique et climat.
- Si ces interactions semblent altérer la dynamique atmosphérique et les modes de variabilité du climat, elles ne semblent pas modifier considérablement la sensibilité climatique en terme de température globale.
- Mais les simulations climatiques océan-atmosphère avec couplages chimie-stratosphère-climat ne font que commencer ...