

LMD

L.A.L. ; Séminaires généraux



Institut
*Pierre
Simon
Laplace*

Modéliser le climat à l'heure du changement climatique

Jean-Yves GRANDPEIX

L.M.D./I.P.S.L. ; Paris ; France

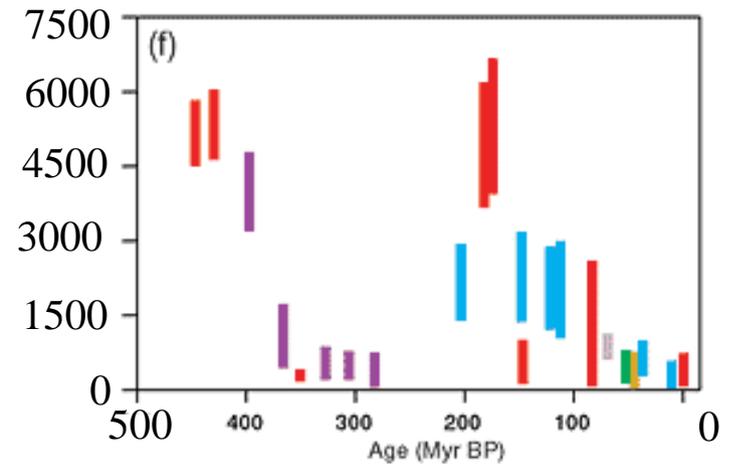
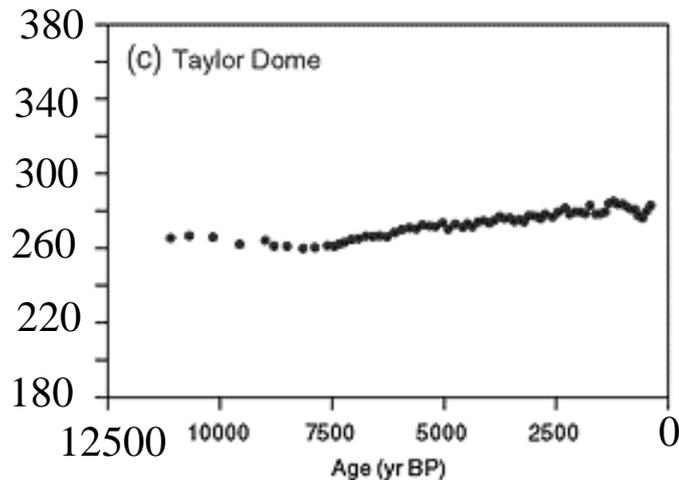
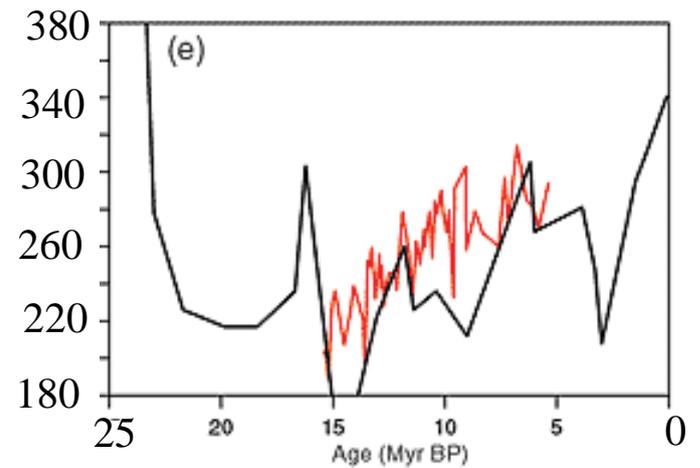
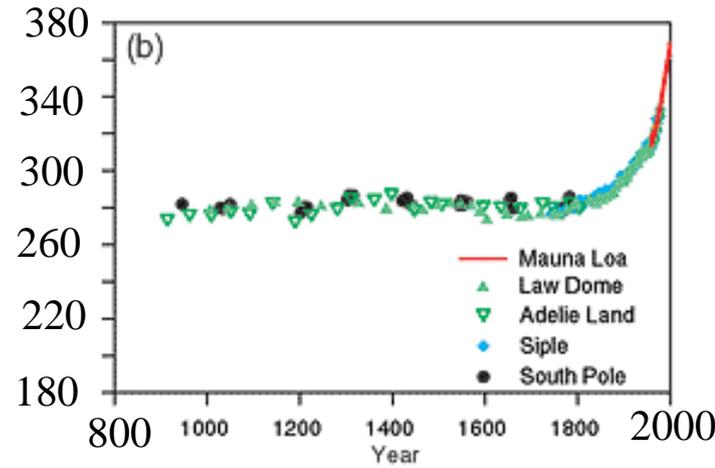
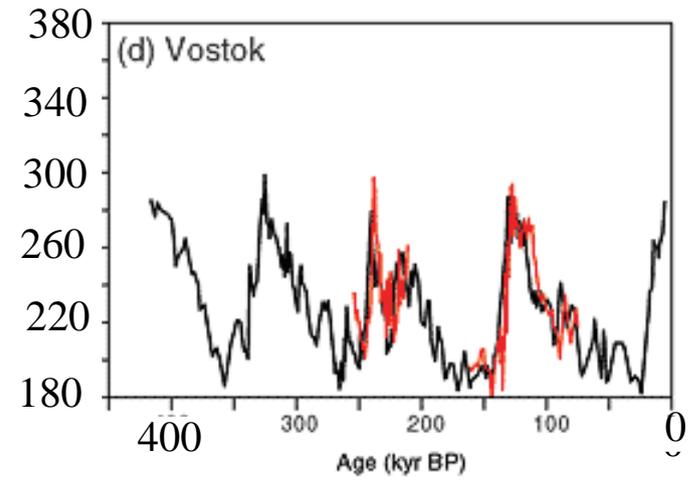
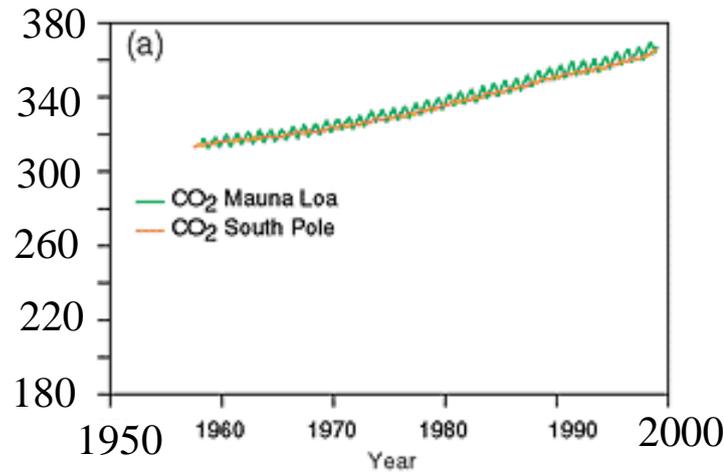
jyg@lmd.jussieu.fr

Partie 1 : Observations

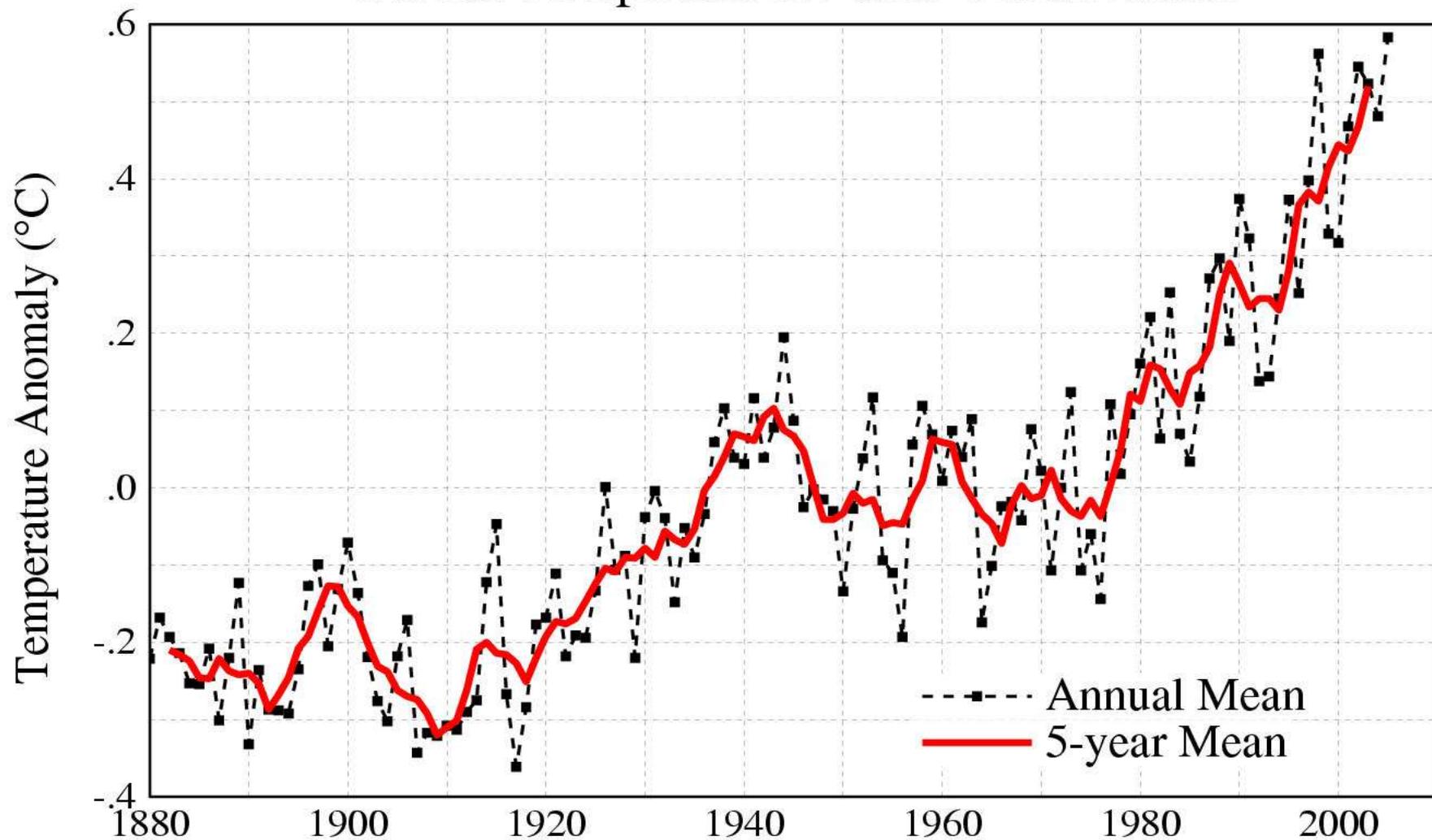
- Nous entrons dans un climat nouveaux pour l'humanité (l'homme n'a jamais connu un tel taux de CO_2 dans l'atmosphère) ; la question est de savoir à quel point il diffère des climats précédents.
- On observe un réchauffement rapide à l'échelle globale ; les effets locaux ne sont pas encore clairs.
- Hausse du niveau de la mer.
- Les choses changent suffisamment vite pour que les conférences vieillissent de 3 ans soient caduques.

Variations in atmospheric CO₂ concentrations on different time-scales (ppm)

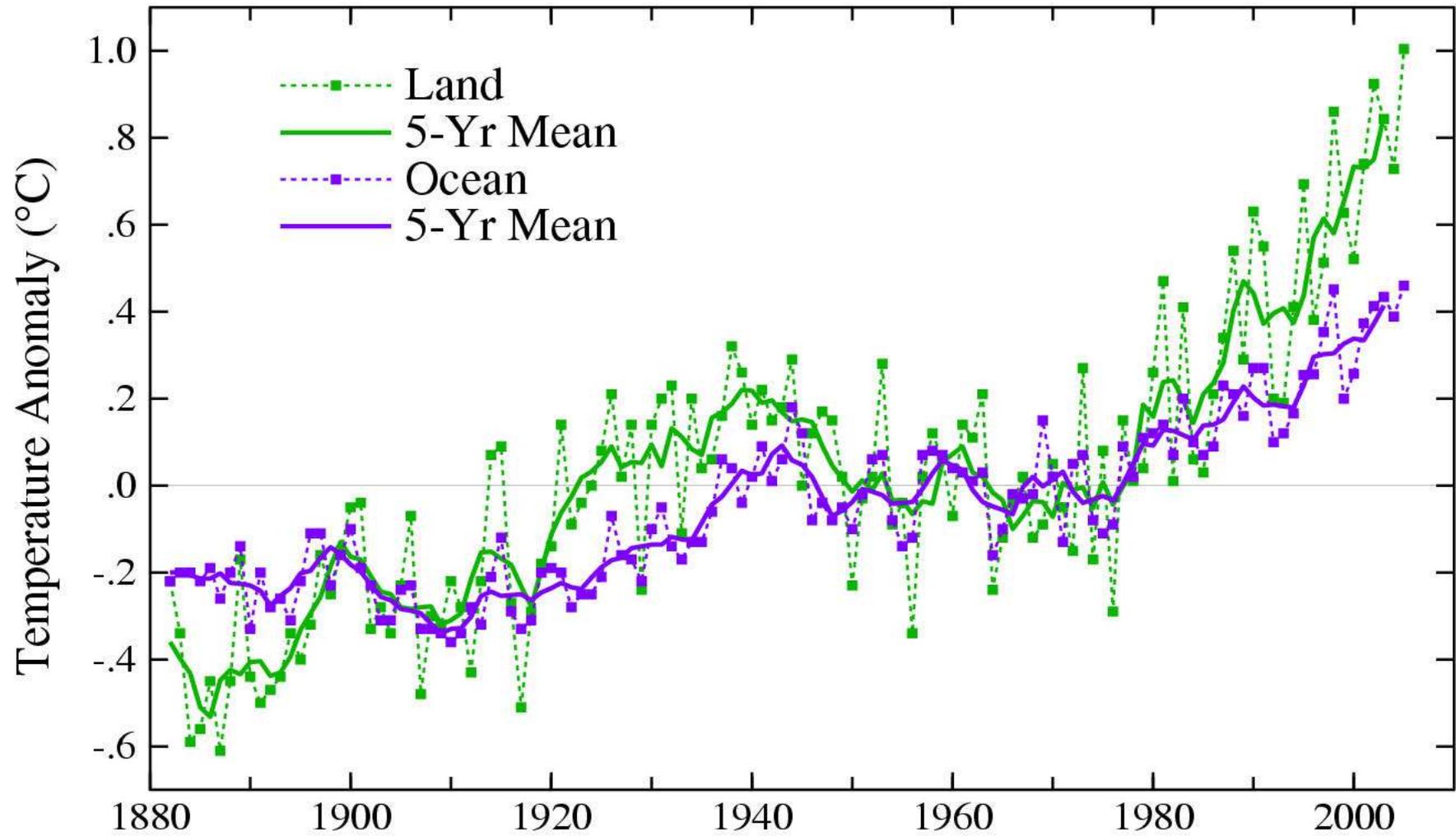
(Source:
Third IPCC Report
- 2001)



Global Temperature: Land-Ocean Index

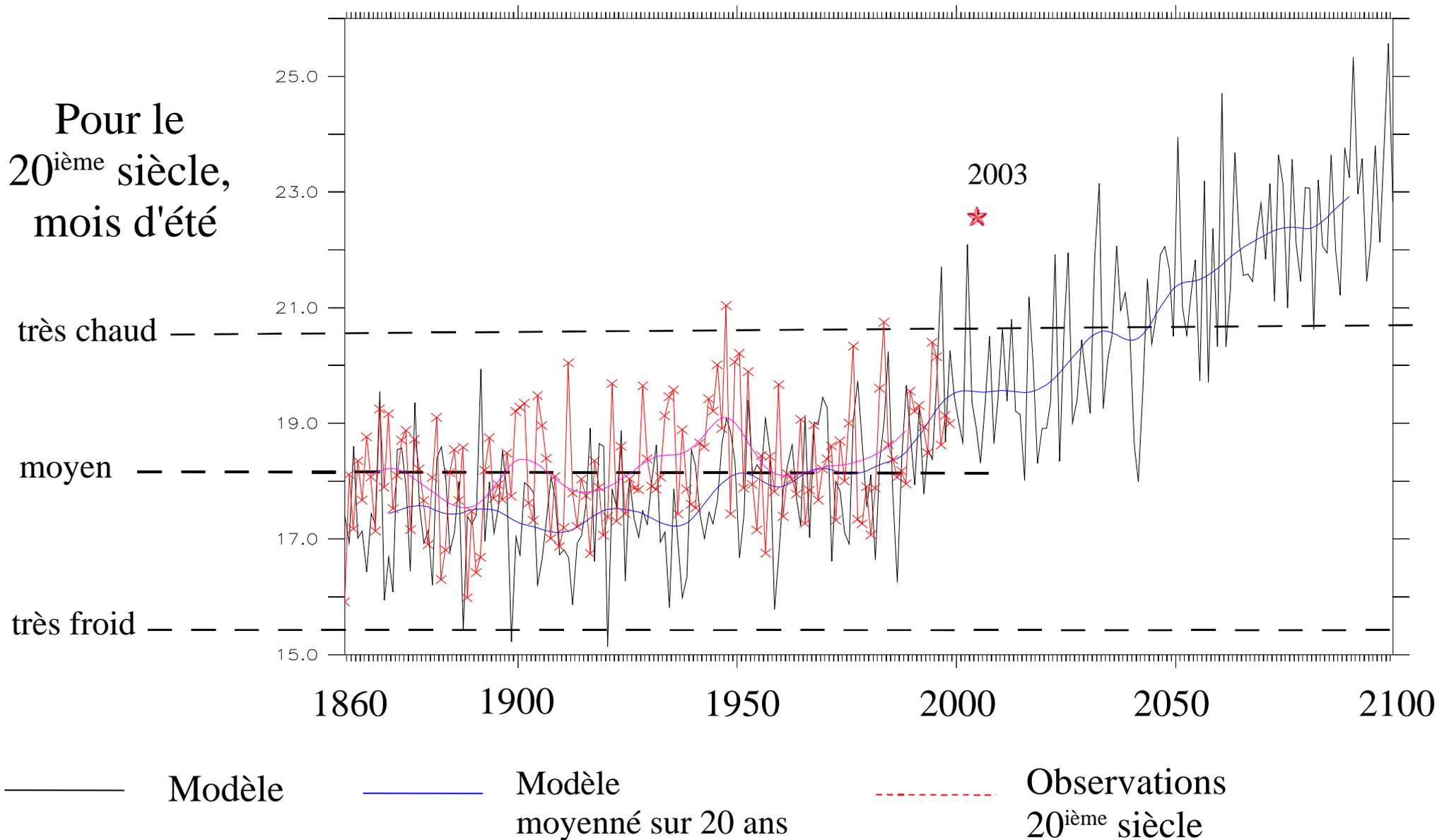


Mean Temperature over Land & Ocean



Donner du sens via des analogues

Evolution de la température moyenne en été en France de 1860 à 2100
(modèle de l'IPSL, scénario SRES A2, sans aérosols)



Partie 2 : Modèles

- GCM = modèle (ensemble d'équations et mise en oeuvre informatique associée) dont le but est de simuler le comportement au fil du temps des circulations globales de l'atmosphère et de l'océan ainsi que des processus connexes : météorologiques, chimiques, biologiques ...
- Les GCMs atmosphériques sont divisés en 2 parties : (i) la **Dynamique** résout les équations de la dynamique atmosphérique; (ii) la **Physique** représente les processus d'échanges verticaux d'échelle plus petite que la maille.
- **Découpage et raccordement** permettent le développement de sous-modèles spécifiques pour chaque partie et l'analyse des couplages entre ces parties.
- Ce qu'on attend des GCMs : (i) représenter les **valeurs moyennes** des variables climatiques ; (ii) représenter la **variabilité** des variables climatiques (diurne à séculaire), y compris les événements extrêmes ; (iii) posséder des **sensibilités correctes** (e.g. a [CO₂]) ; (iv) posséder des **rétroactions** correctes.

Découpage interne au Modèle de Circulation Générale Atmosphérique

Equations de GCM atmosphérique (extraits)

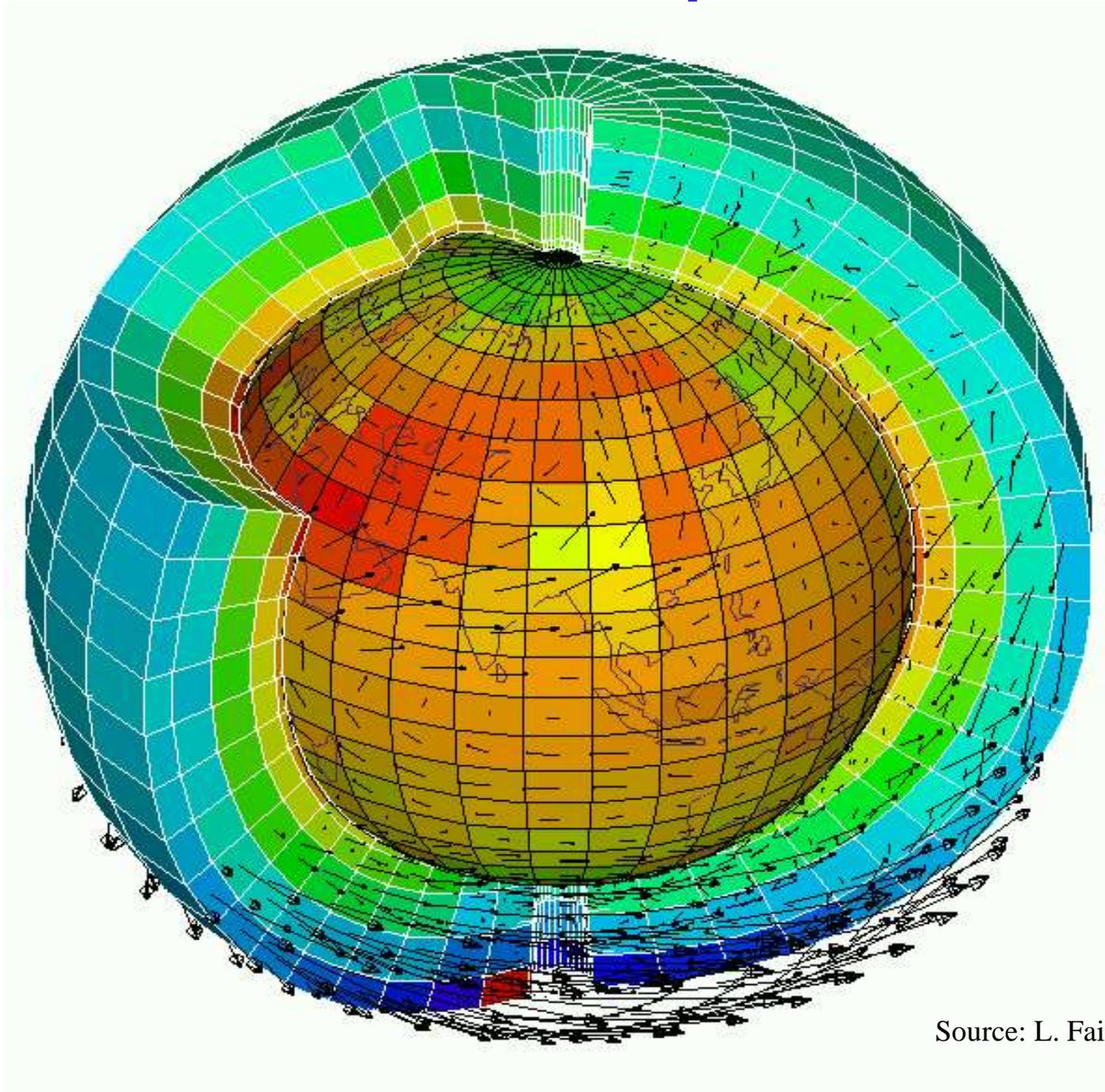
Equations dynamiques en coordonnées pression

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \partial_t \vec{V} = \underbrace{-(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V}}_{\text{transport}} - \omega \partial_p \vec{V} - \underbrace{\vec{\nabla} \Phi}_{\text{gravité}} - \underbrace{f \vec{k} \times \vec{V}}_{\text{Coriolis}} + \underbrace{\vec{S}_v}_{\text{Sources}} \\
 \vec{\nabla} \cdot \vec{V} + \partial_p \omega = 0 \\
 \partial_t q = -\vec{V} \cdot \vec{\nabla} q - \omega \partial_p q + \underbrace{S_q}_{\text{Sources}}
 \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l}
 \Phi = gz \quad \text{geopotentiel} \\
 \omega = \partial_t p \quad \text{vitesse vert.} \\
 q = \text{humidité spécifique}
 \end{array} \right. \quad (1)$$

\vec{S}_v et S_q : termes source déterminés par les **paramétrisations physiques** :

- couche limite planétaire
- convection profonde (Gros cumulus et cumulonimbus)
- nuages
- processus radiatifs
- orographie
- sol

Modélisation numérique 3D du climat

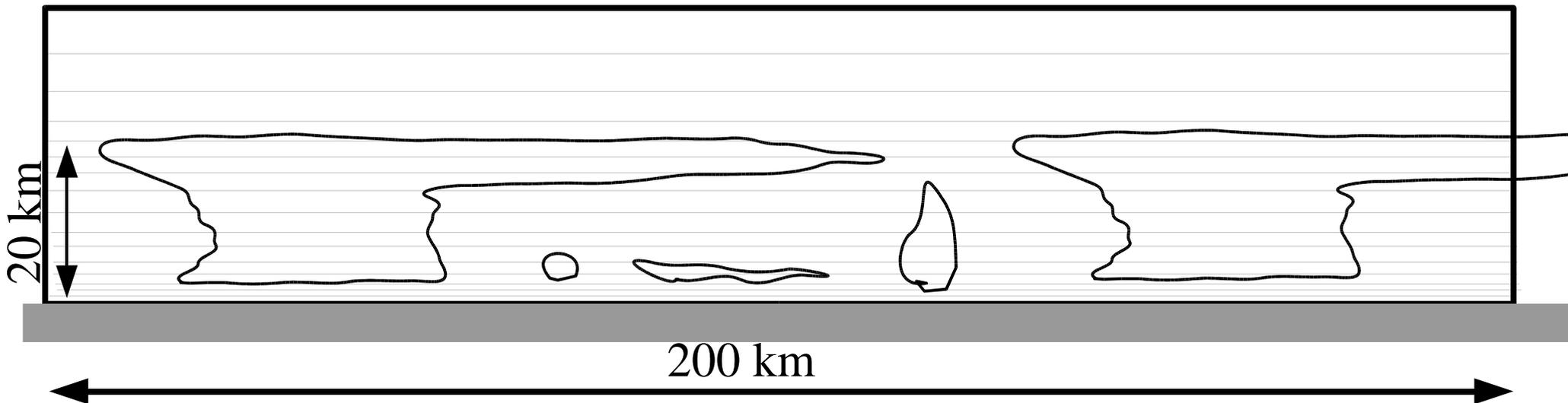


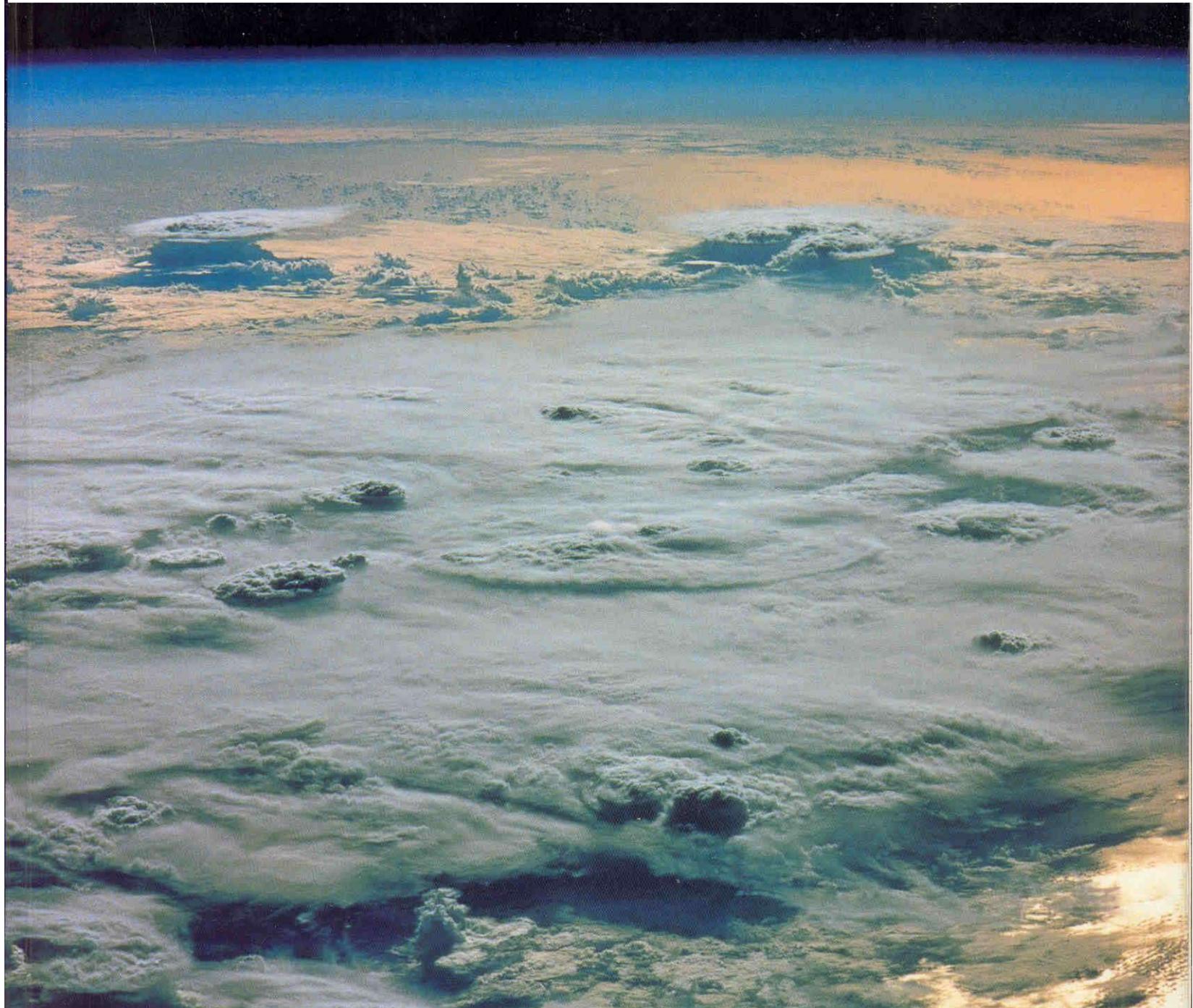
Source: L. Fairhead, LMD/IPSL

Discrétisation

- Incrément temporel : de quelques minutes à une demi-heure, selon la technique d'intégration.
- Grille horizontale : maille allant de 100 à 300 km.
- Grille verticale : maille allant de 100m (ou moins) au niveau du sol, à quelques kilomètres dans la stratosphère.

Colonne atmosphérique typique:

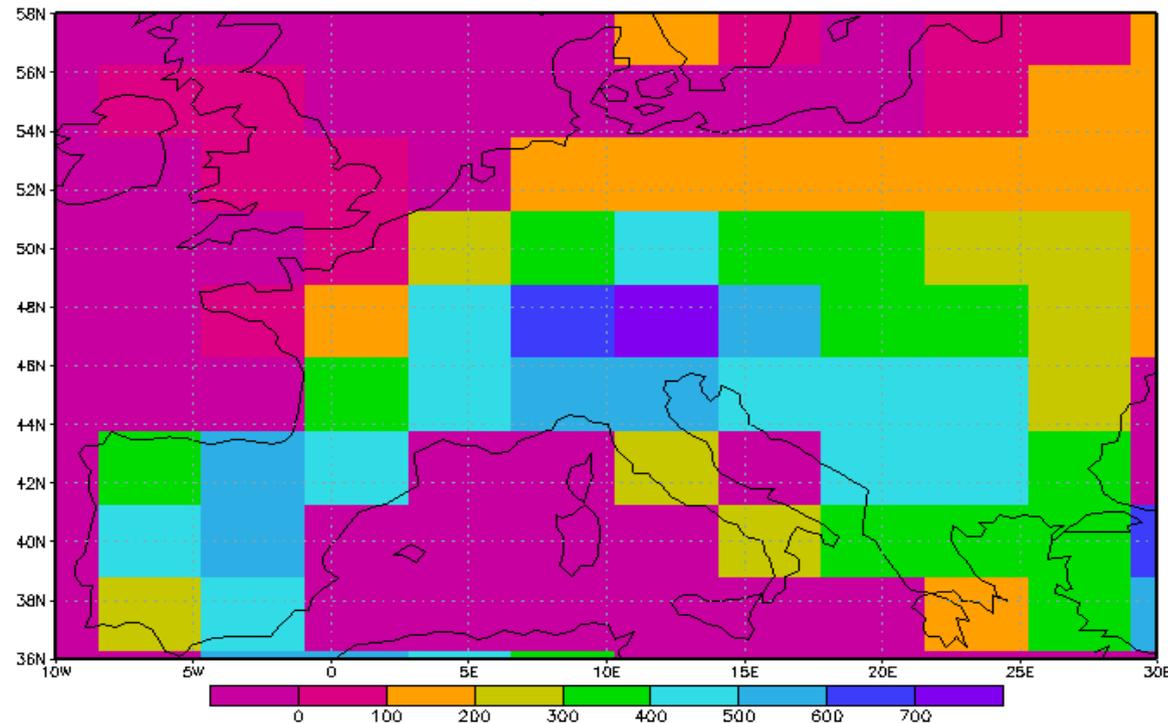




Exemple de paramétrisation

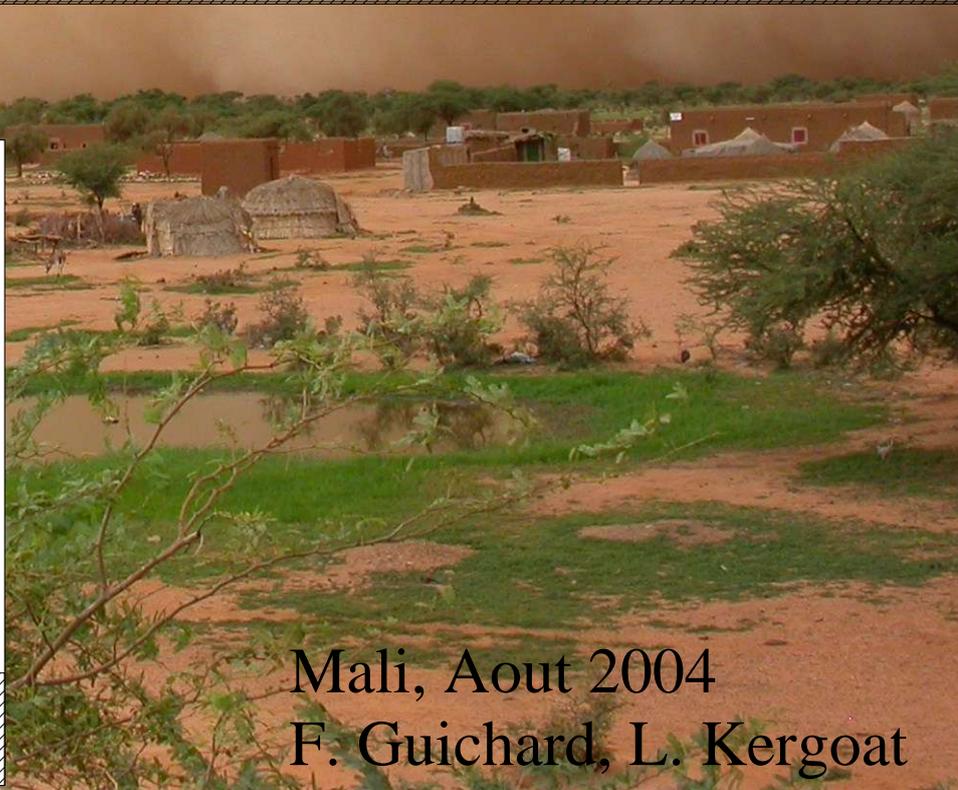
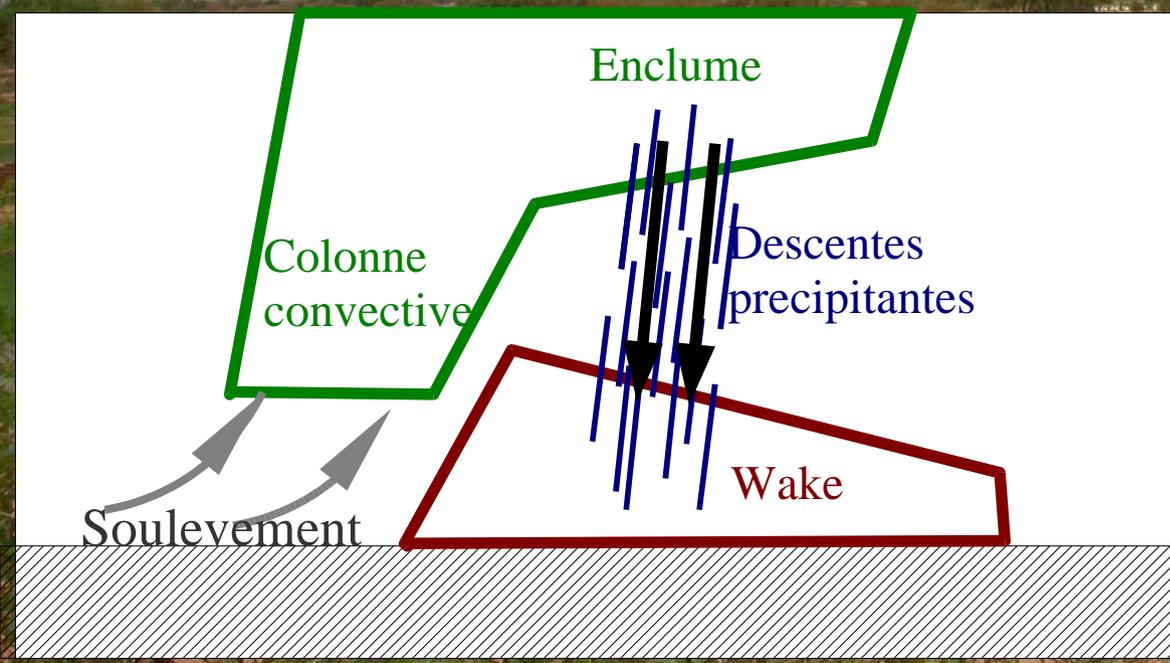
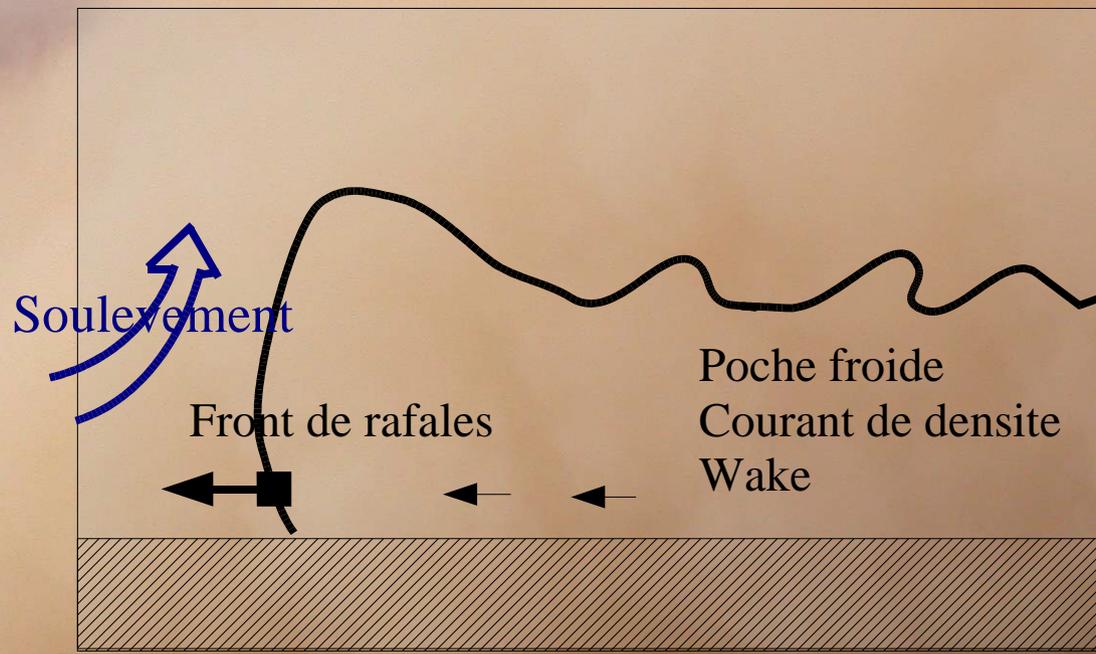
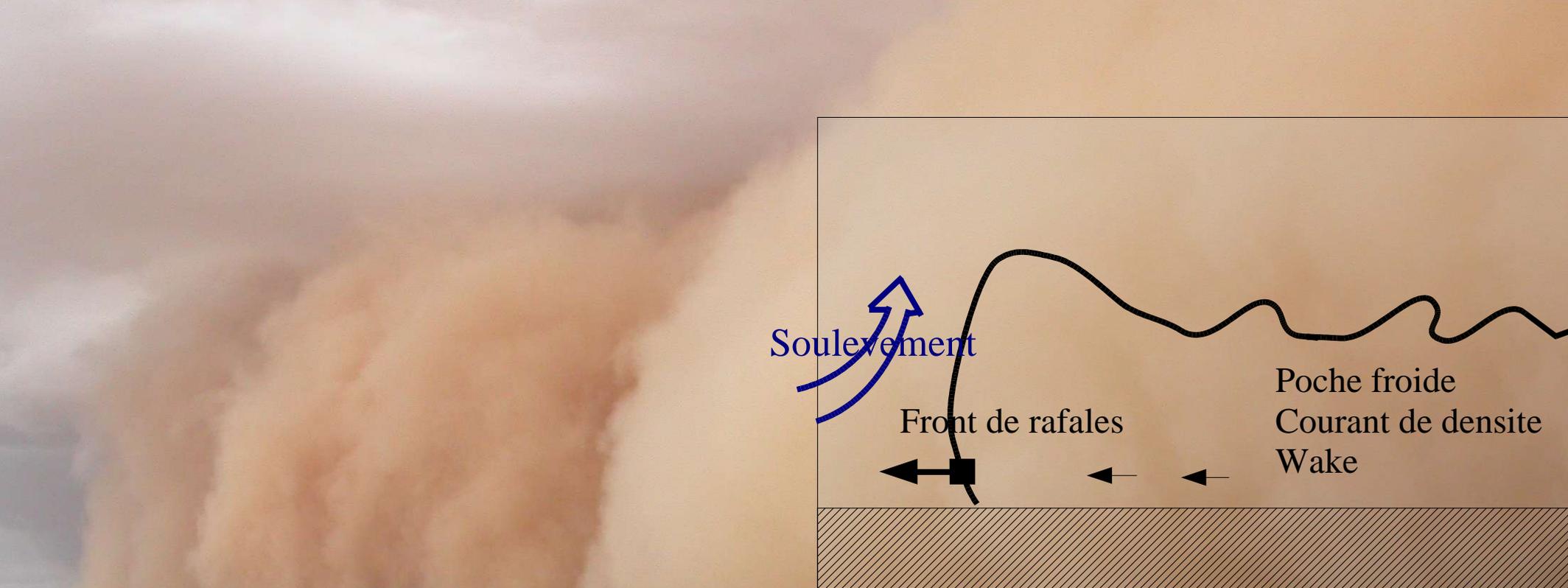
Orography

At the model grid scale, orography is poorly represented; e.g. Europe orography for 3.5x2.5 grid is:



The purpose of the parametrization of orography effect is to determine the **drag** and the **lift** due to mountains and acting on atmospheric flow. → use of high resolution orography data base.

Note that snow is still a problem.



Mali, Aout 2004
F. Guichard, L. Kergoat

Partie 3 : Prévision et analyse du changement climatique

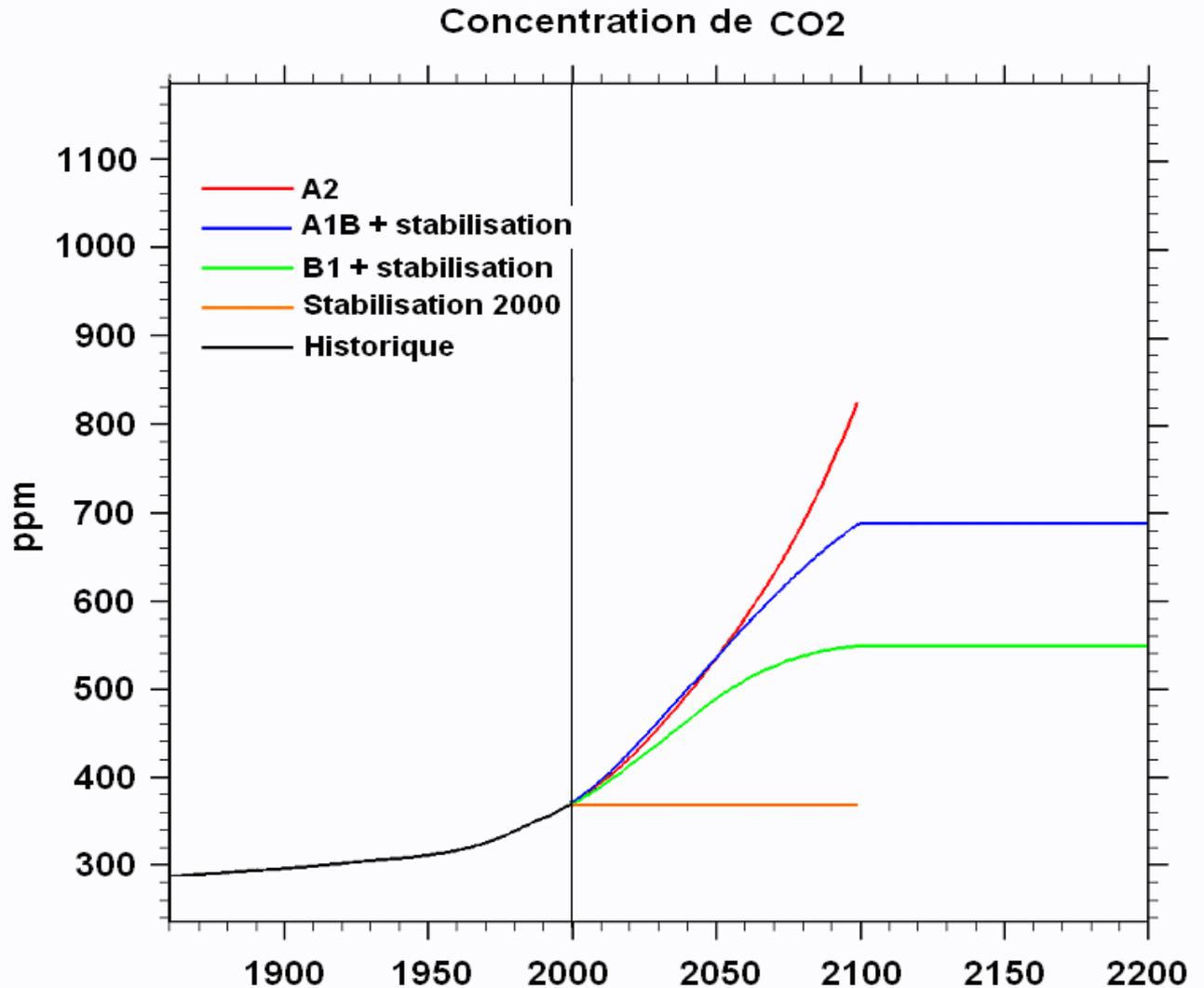
- Augmentation de l'effet de serre et amplification par la vapeur d'eau.
- Amplification ou atténuation par les nuages, selon les modèles.
- Observations des premiers signes de réchauffement.
- Prévisions.
- Le GIEC (Groupe International d'Experts sur le Changement Climatique)

Préparation du 4ème rapport du GIEC:

- Participants: 22 modèles, 15 équipes de modélisations, 9 pays.
- Données mises à la disposition de la communauté scientifique
- Analyses multi-modèles

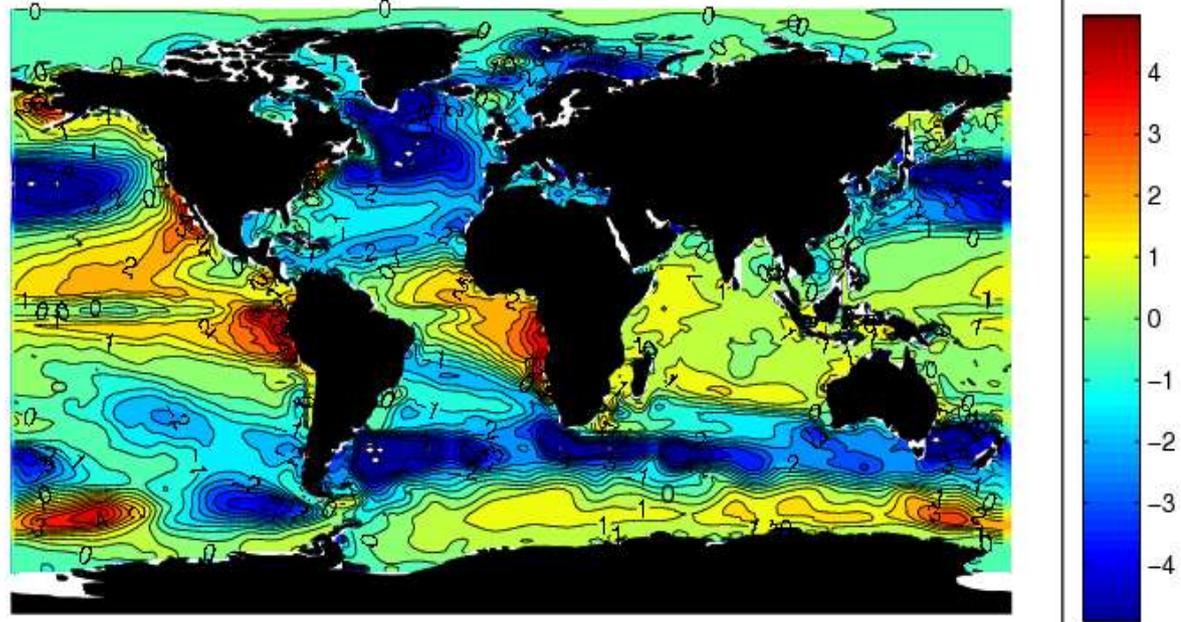
Simulations demandées

- **contrôle:** forçages constants
- **scénarios SRES** avec stabilisation
- **scénarios idéalisés:** accroissement du CO₂ de 1% par an jusqu'à 2 ou 4 fois la valeur initiale

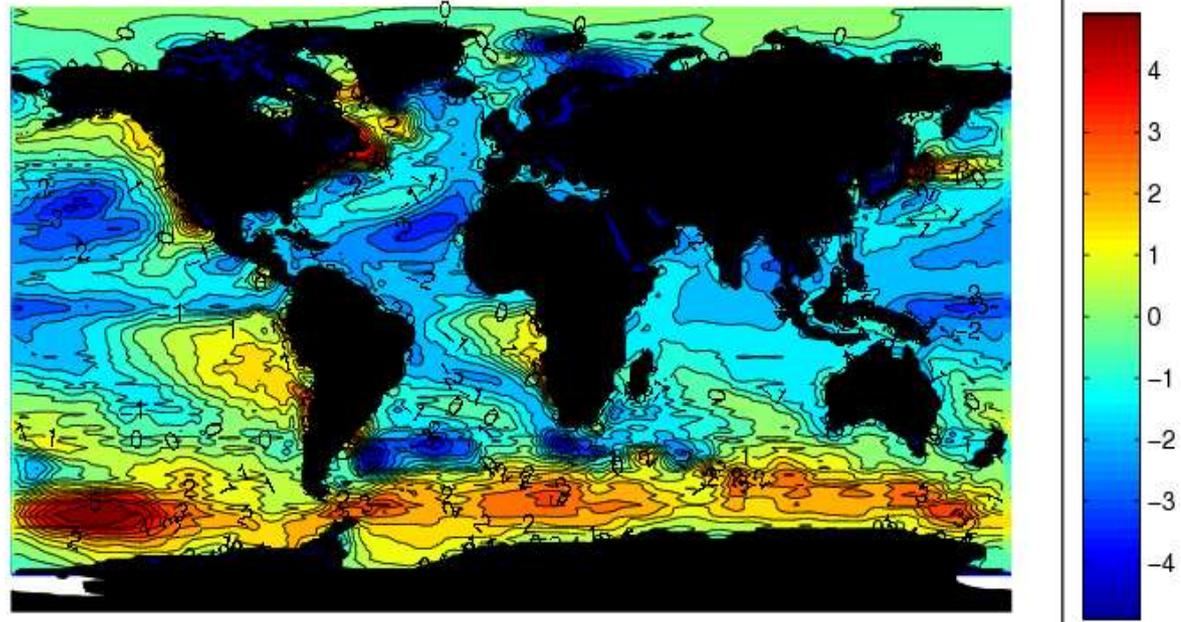


Simulation de la période
1970-1999
SST (moyenne annuelle, écarts
simulations - observations)

IPSL-CM4 →

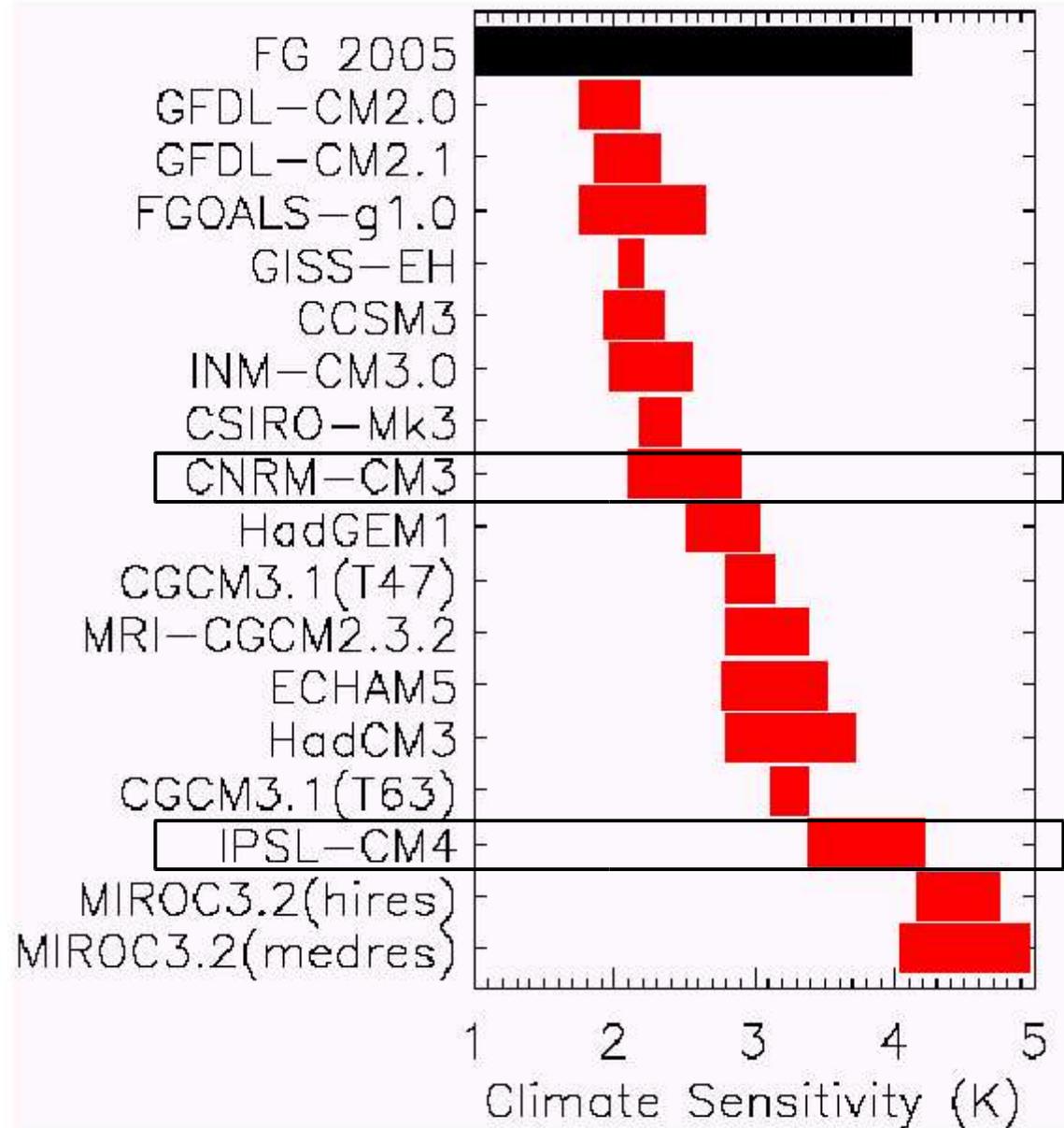


CNRM-CM3 →



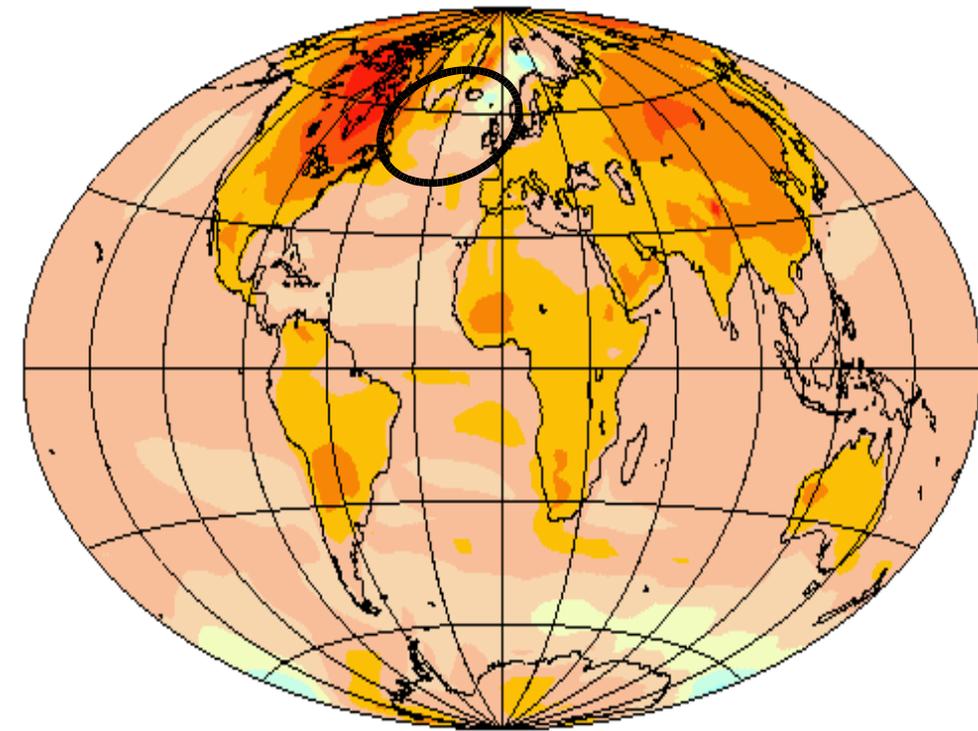
Sensibilité climatique

Estimation de l'accroissement de température à l'équilibre dû à un doublement de CO₂

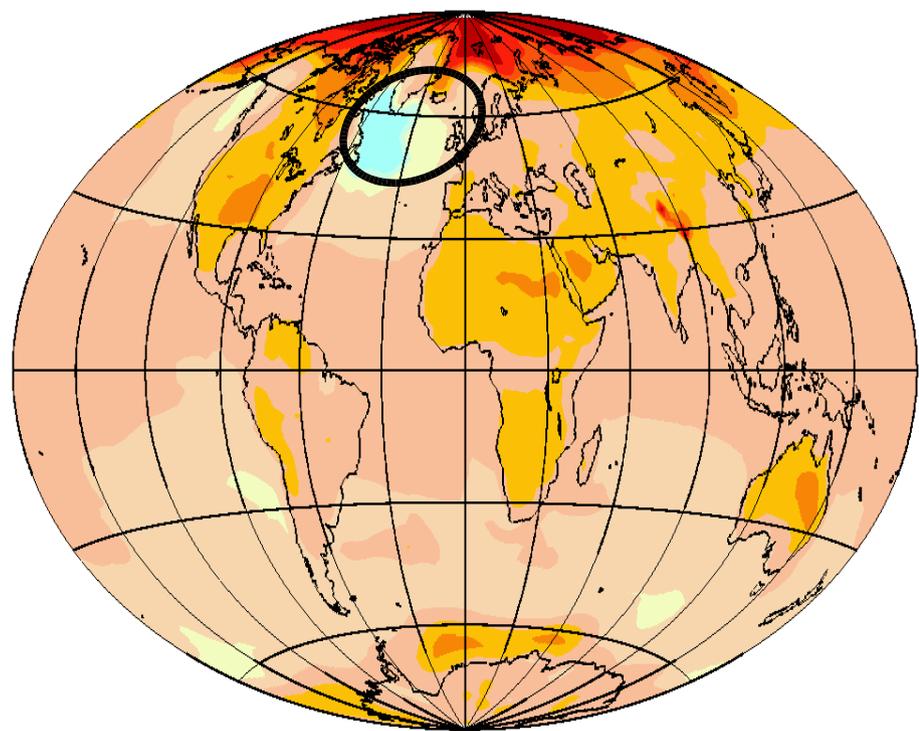


Différence 2095-2005

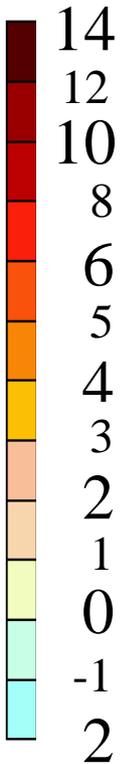
Changement des températures (°C) pour le scénario A1B



IPSL



CNRM



Vision globale du changement climatique : bilan radiatif terrestre et retroactions

- Bilan radiatif terrestre :

$$\begin{array}{ccccccc} R & = & \Phi_{SW,in} & - & \Phi_{SW,out} & - & \Phi_{LW,out} \\ W\ m^{-2} & & \text{solaire entrant} & & \text{solaire réfléchi} & & \text{ray. infra-rouge} \end{array} \quad (2)$$

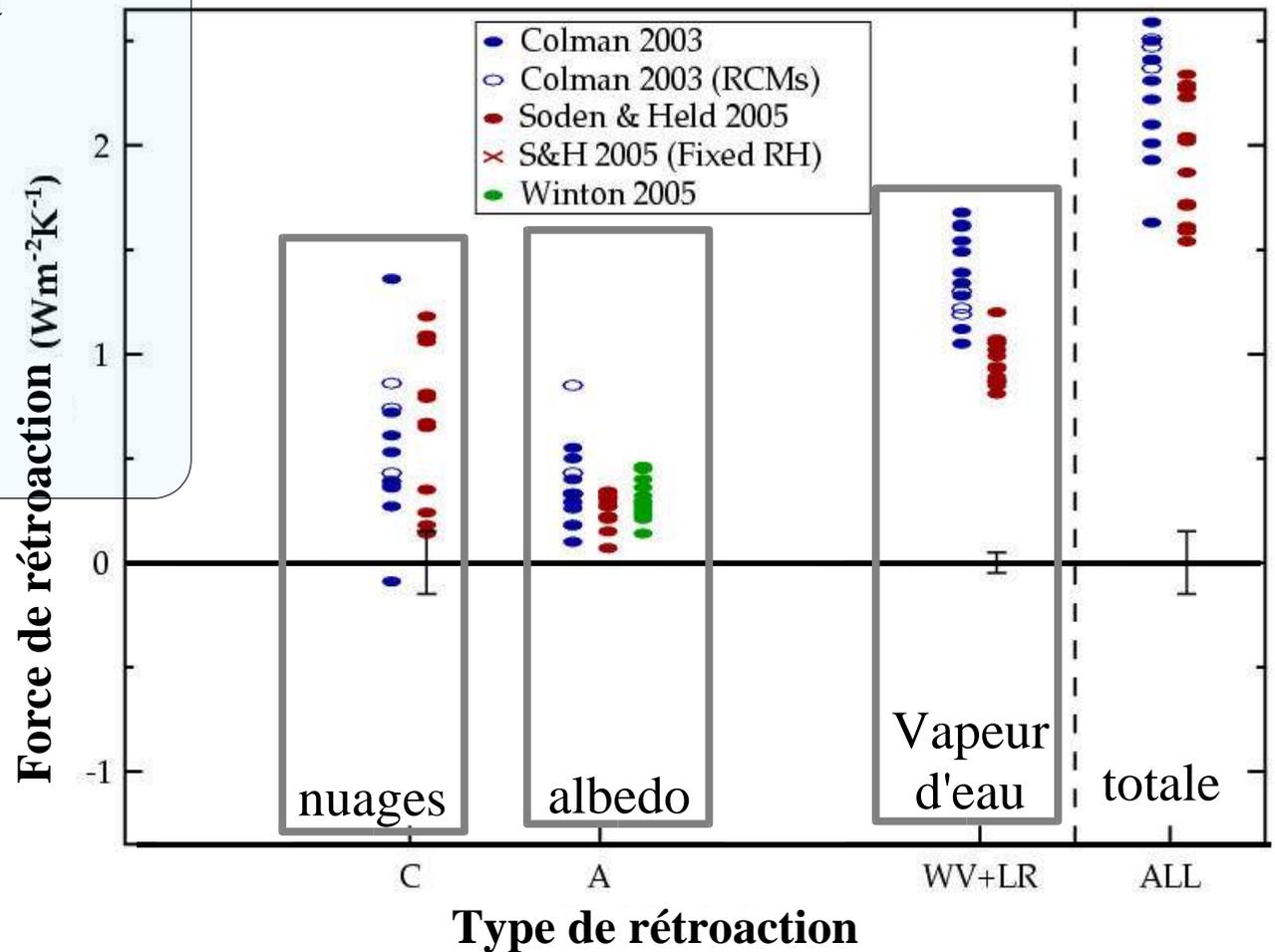
- Accroissement [CO_2] à température, humidité, nuages ... fixés
→ diminution $\Phi_{LW,out}$
→ accroissement R (chauffage de la planète) = $\Delta Q > 0$.
- Réponse de la planète à ΔQ = accroissement de la température de surface T_S ;

$$\Delta R = \Delta Q + \lambda \Delta T_S \quad (\lambda < 0)$$

- Processus contribuant à la force de rétroaction λ ($W\ m^{-2}K^{-1}$) :
 - Planck (pour ΔT uniforme dans l'atmosphère). $\lambda_P = -3.2\ W\ m^{-2}K^{-1}$
 - vapeur d'eau : $\lambda_{WV} \simeq 1\ W\ m^{-2}K^{-1}$
 - albedo : $\lambda_A \simeq 0.2$ à $0.5\ W\ m^{-2}K^{-1}$
 - nuages : $\lambda_C \simeq 0$ à $1.2\ W\ m^{-2}K^{-1}$

Incertitudes liées aux différentes rétroactions

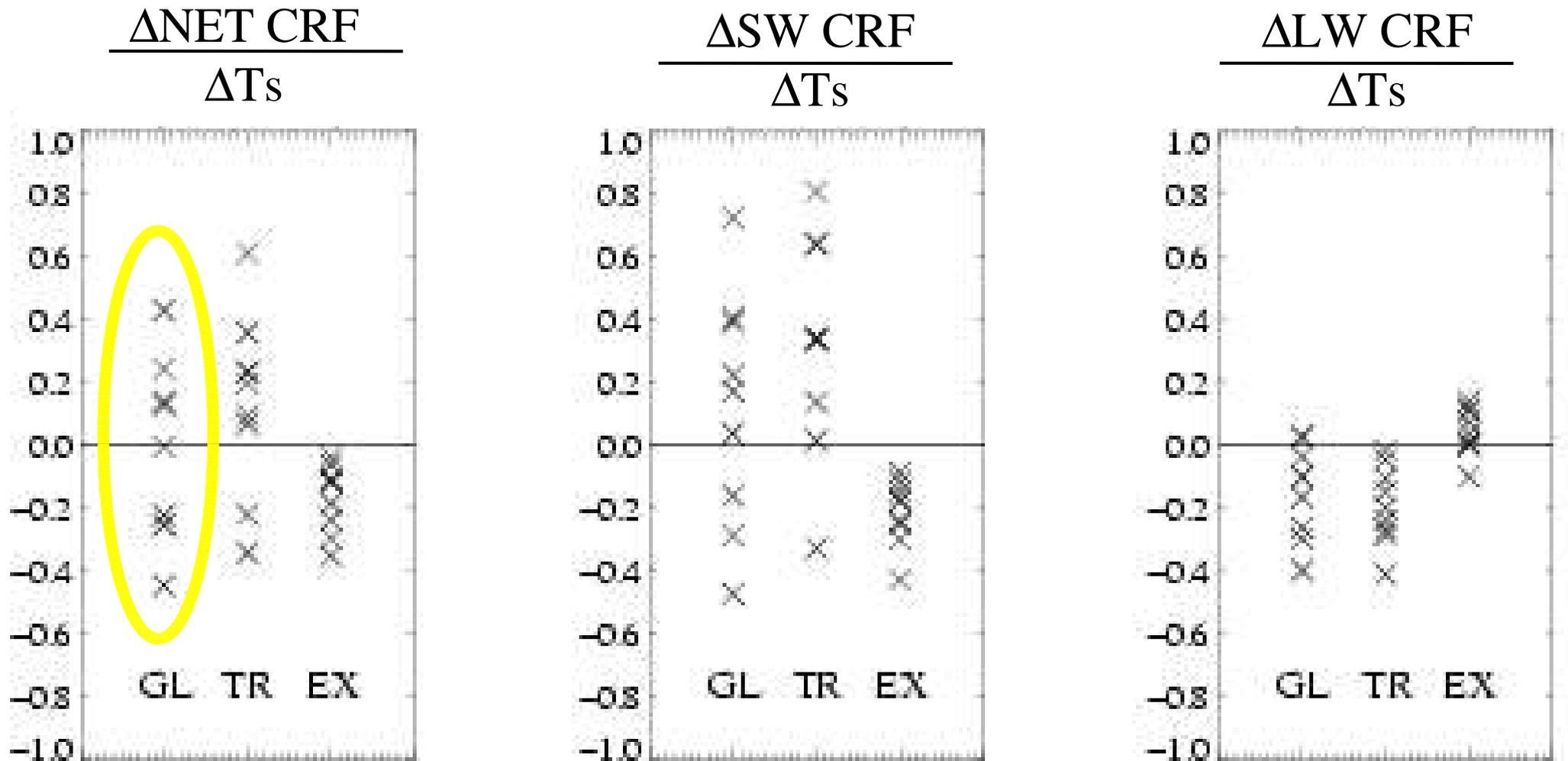
- La rétroaction la plus forte est celle liée à la vapeur d'eau.
- Depuis le précédent rapport du GIEC, il y a convergence des modèles sur les rétroactions liées à la vapeur d'eau et à la neige (même si une dispersion non négligeable demeure).
- En revanche, il n'y a aucune convergence concernant la rétroaction nuageuse = principale cause d'incertitude.



Cloud Feedback Intercomparison Project (CFMIP)

2xCO₂ experiments; 8 GCMs; slab ocean

Taux de variation du forçage radiatif des nuages (W/m²/K)



(Webb et al., Clim. Dyn., 2005)

Interannual Climate Variability

(an example, not an analogue!)

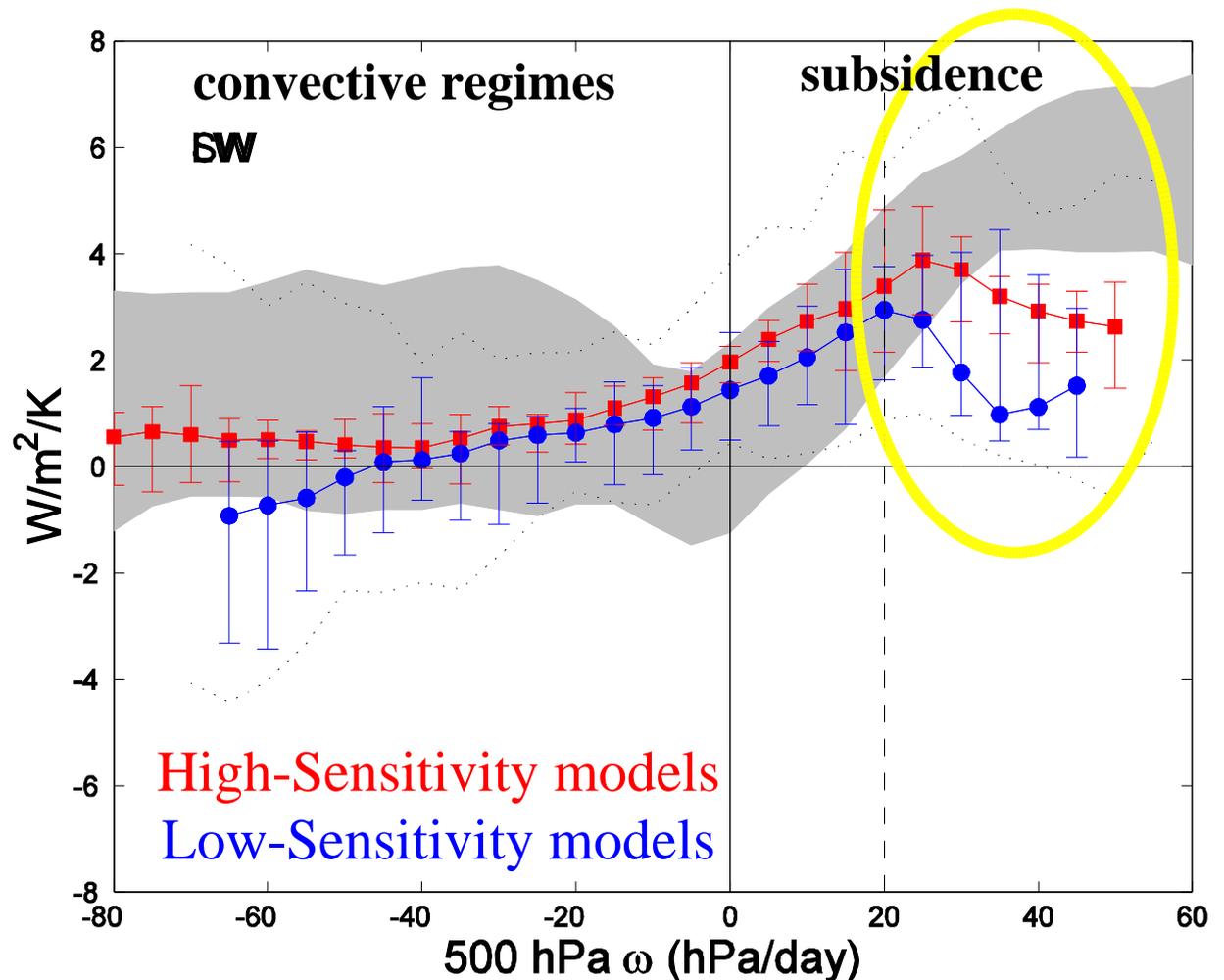
Sensitivity of the SW CRF to SST changes
composited by dynamical regimes

1984-2000 monthly data :

- ISCCP-FD radiative fluxes
- Reynolds SST
- ERA40 or NCEP2 reanalyses

AR4 OAGCMs:

- 20th century simulations
- HS (N=8) vs LS (N=7) models



Comment des modèles aussi médiocres peuvent-ils prétendre à un peu de crédibilité ?

- premier argument (mauvais mais très fort) : on ne dispose pas d'autre moyen d'investigation.
- deuxième argument (vrai, mais faible) : on met le plus de physique possible dans les modèles.

Heureusement on progresse (==> AR5) :

Au LMD :

Nouveau schéma de couche limite ; représentation des courants de densité
=> amélioration de la simulation du cycle diurne de la convection nuageuse.

Partie 4 : Etudes d'impacts

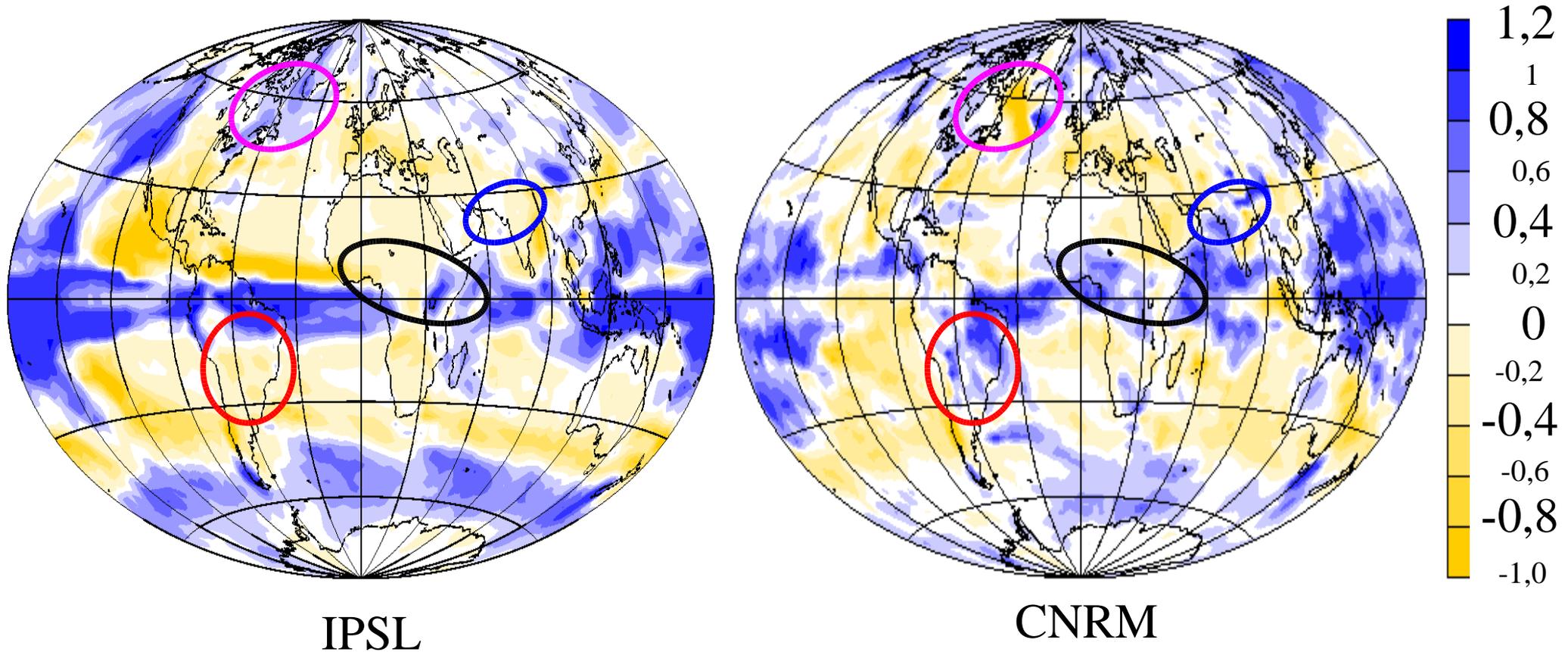
But : Déterminer l'impact du changement climatique sur des variables "locales" physiques (e.g. précipitations moyennes sur le bassin versant du fleuve Niger ; vent, température et précipitations sur le vignoble de Saint-Emilion) ou économiques (e.g. production de sorgho au Burkina-Fasso).

Méthode : codes régionaux (domaine = quelques milliers de km) ou méso-échelle (domaine = quelques centaines de km) forcés par les vents, température et humidité des simulations climatiques globales. [Lien avec la météorologie locale.]

Programmes européens ENSEMBLES, PRUDENCE : modèles climatiques trop mauvais pour le moment. Exemple de l'Afrique de l'Ouest.

Différence 2095-2005

Changement des précipitations (mm/j) pour le scénario A1B



Catastrophes ?

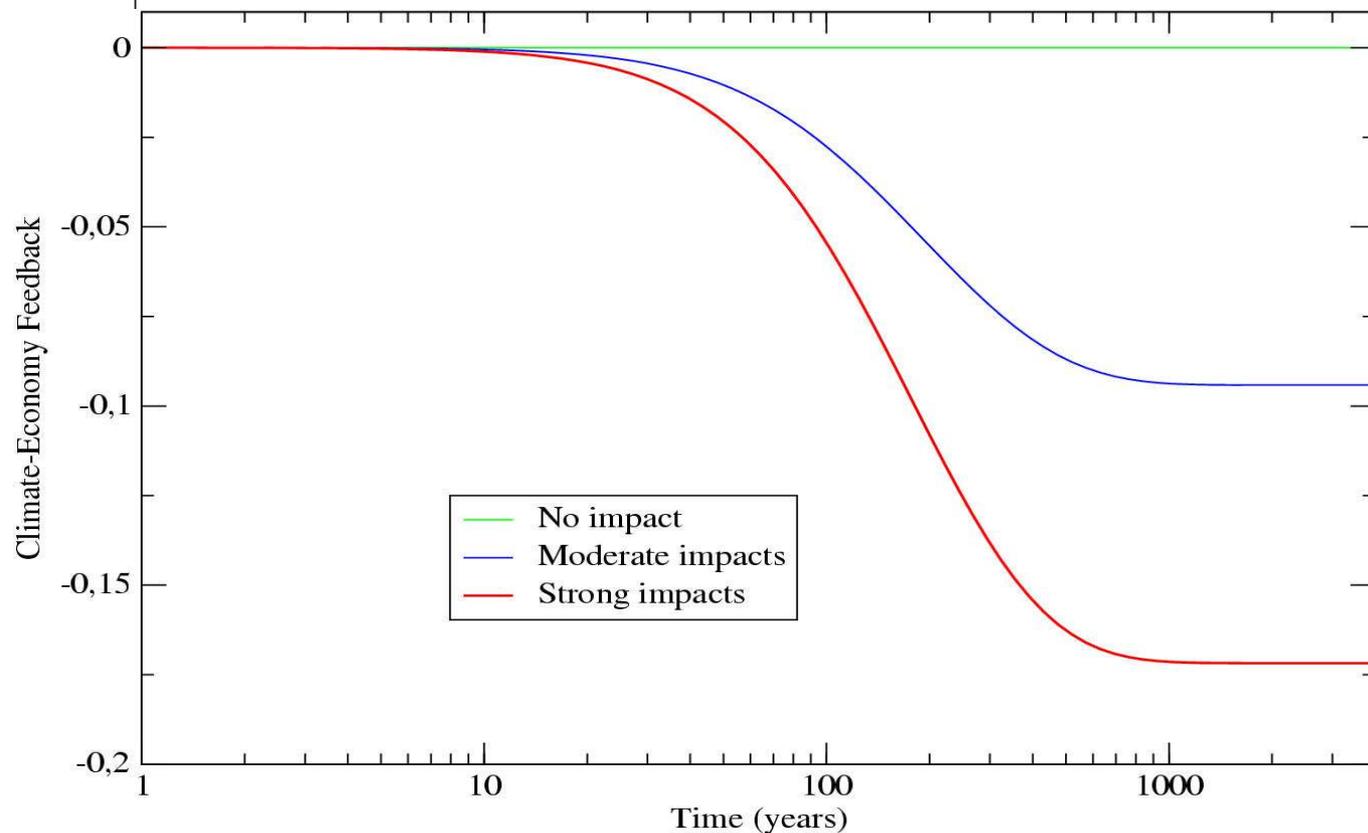
- Cycle de l'eau plus intense ; mais conséquences pas claires.
- Cyclones : augmentation de l'intensité (moteur thermique ; source froide = tropopause qui se refroidit ; source chaude = surface de la mer qui se réchauffe); avis discordants sur le nombre.
- Hausse du niveau de la mer : au moins 50 *cm* au cours du XXI siècle.
- Effondrement des calottes glaciaires (Antarctique de l'Ouest) ?
- Une vraie catastrophe réside dans le **changement** climatique lui-même, lequel va faire que des pans entiers de population vont tout perdre (les Bengalis leur terre, les vignerons de Bordeaux leur AOC ...).
- Changement \Rightarrow sécheresses, inondations, bouleversement de l'économie, migrations de populations, conflits, misère humaine.

Partie 5 : Interaction économie-climat

- Les scénarios du GIEC négligent tous les effets de rétroaction du climat sur l'économie (exemple de rétroaction : difficulté de fonctionnement d'une centrale nucléaire dans un désert ; impossibilité de cultiver du riz dans des deltas envahis par la mer).
- Des études macro-économiques simplistes semblent indiquer des temps de rétroaction supérieurs à 50 ans \implies planification nécessaire.

Rétroaction économie-climat

Fonction de rétroaction ΔE de la rétroaction économie-climat. Cette fonction donne, pour une perturbation des émissions par un saut de 1 GtC/an à $t = 0$, le changement additionnel des émissions dû à la rétroaction économie-climat



- La rétroaction ne s'exprime qu'après 20 ans
- gain statique de -10% \iff une croissance de 1% ne représentera à terme qu'une croissance de 0,9%.
- temps caractéristique d'environ 80 ans \Rightarrow pas d'autorégulation

Conclusions

- On semble vraiment parti pour un réchauffement climatique conforme aux prévisions des modèles.
- Les modèles sont toujours aussi médiocres ; mais on a des pistes pour progresser.
- Les nouvelles catastrophes brutales (cyclones ...) commencent peut-être à survenir.
- Les catastrophes longues, accompagnées de migrations de populations et de conflits, sont encore à venir.
- Les mesures de mitigation et d'adaptation doivent être planifiées ; les choix de politiques énergétiques des décennies qui viennent vont peser lourd.
- Le changement climatique anthropique reste la seule évolution climatique que l'on sache prévoir : les oscillations décennales peuvent perturber les années 2010-2020.

”Climate is what you expect, weather is what you get”