


# Modélisation climatique et projections du climat futur



Pr Jean-Pascal van Ypersele

UCL-ASTR

(Université catholique de Louvain, Institut d'astronomie et de géophysique

G. Lemaître)

Toile: [www.climate.be](http://www.climate.be)

Courriel: [vanyp@climate.be](mailto:vanyp@climate.be)

Chaire Francqui, cours n°4, ULB, 20-3-2008

# Remerciements

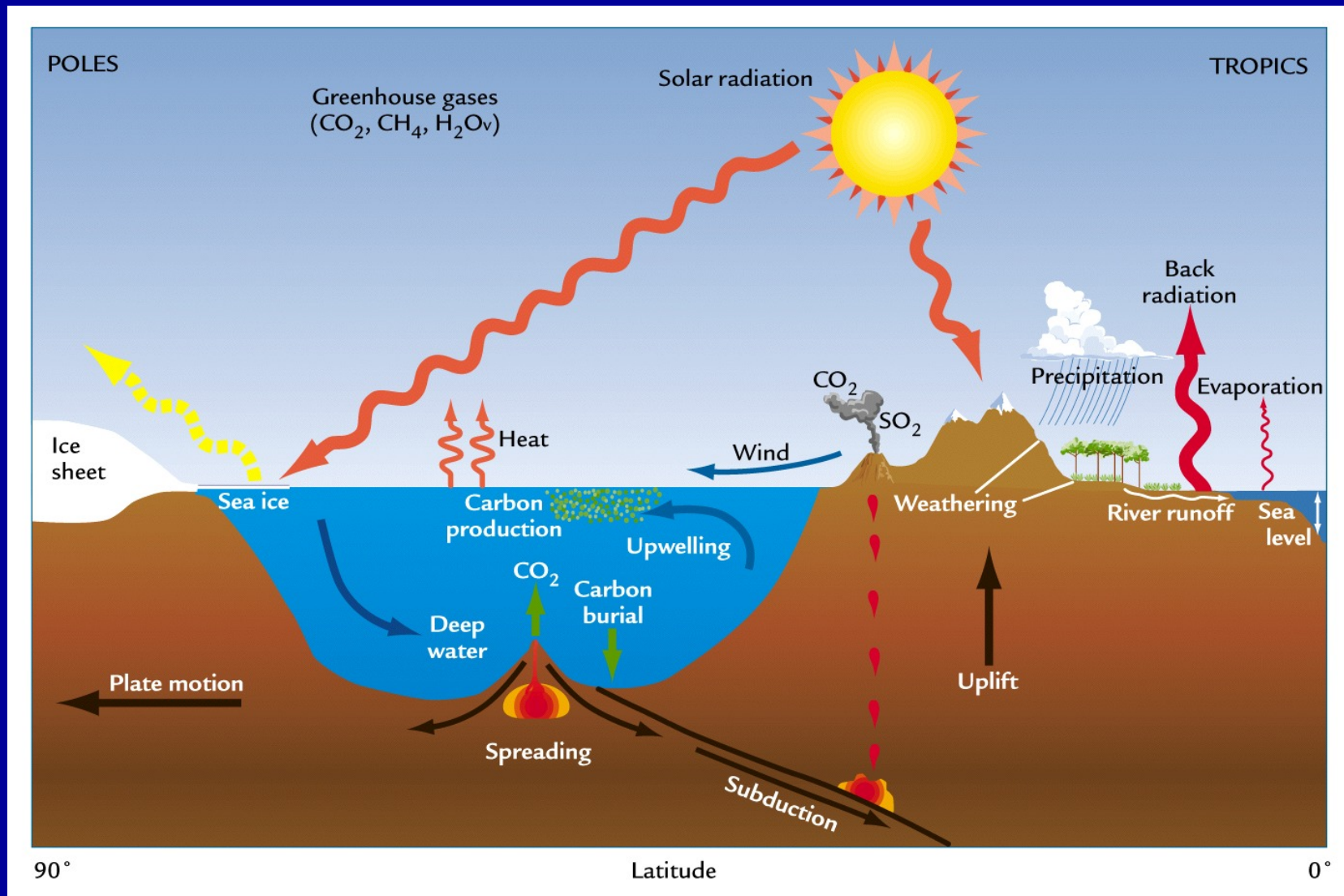


**z** à Michael Mann (Penn State), Philippe Marbaix (UCL), André Paul (Université de Bremen), Susan Solomon (GIEC), et Martin Van Coppenolle (UCL), pour certaines des dias ci-après

# Introduction

A horizontal yellow brushstroke with a textured, painterly appearance, extending across the width of the slide below the title.

Jean-Pascal van Ypersele  
([vanypersele@astr.ucl.ac.be](mailto:vanypersele@astr.ucl.ac.be))



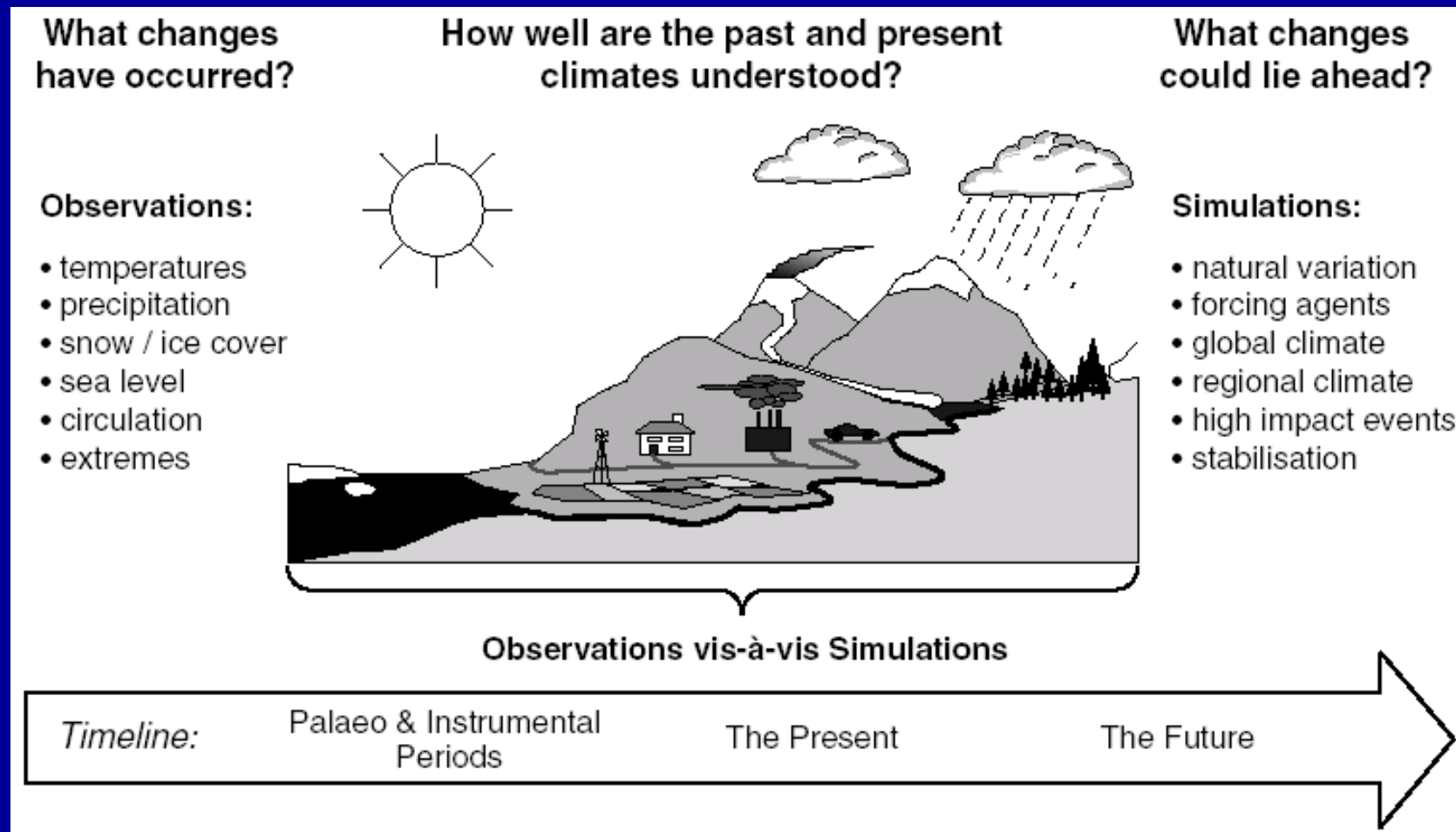
Composantes et processus du système climatique  
 [schéma 1-5 (dessus) de Ruddiman (2001)]

# But de la modélisation du climat

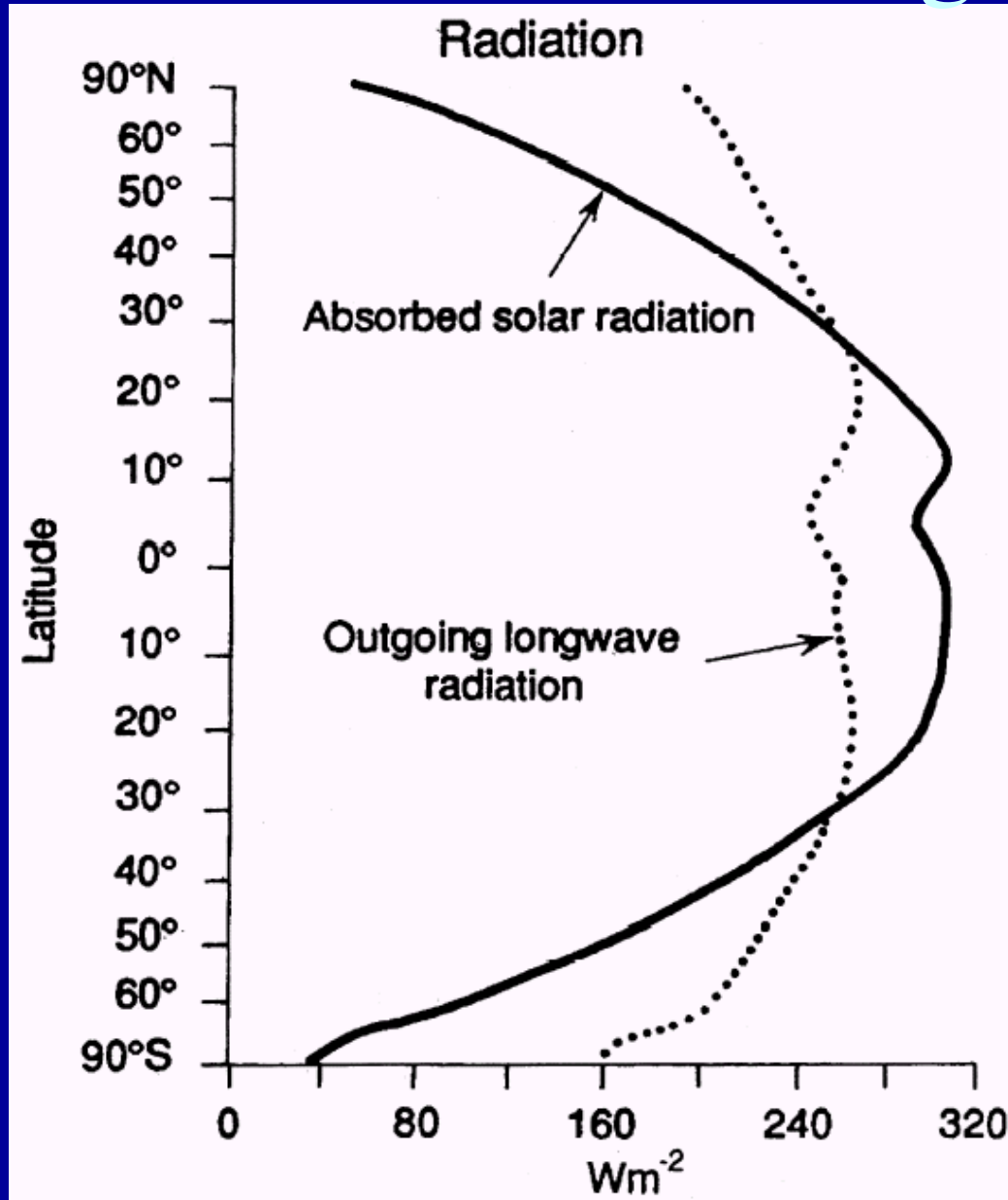


- z Comprendre les climats passés
  - Réponse aux forçages climatiques
  - Rôle des couplages et rétroactions entre les composantes du système climatique
- z Relier le climat actuel aux facteurs naturels et aux activités humaines
- z Projeter les climats futurs

# Le but de la modélisation de climat

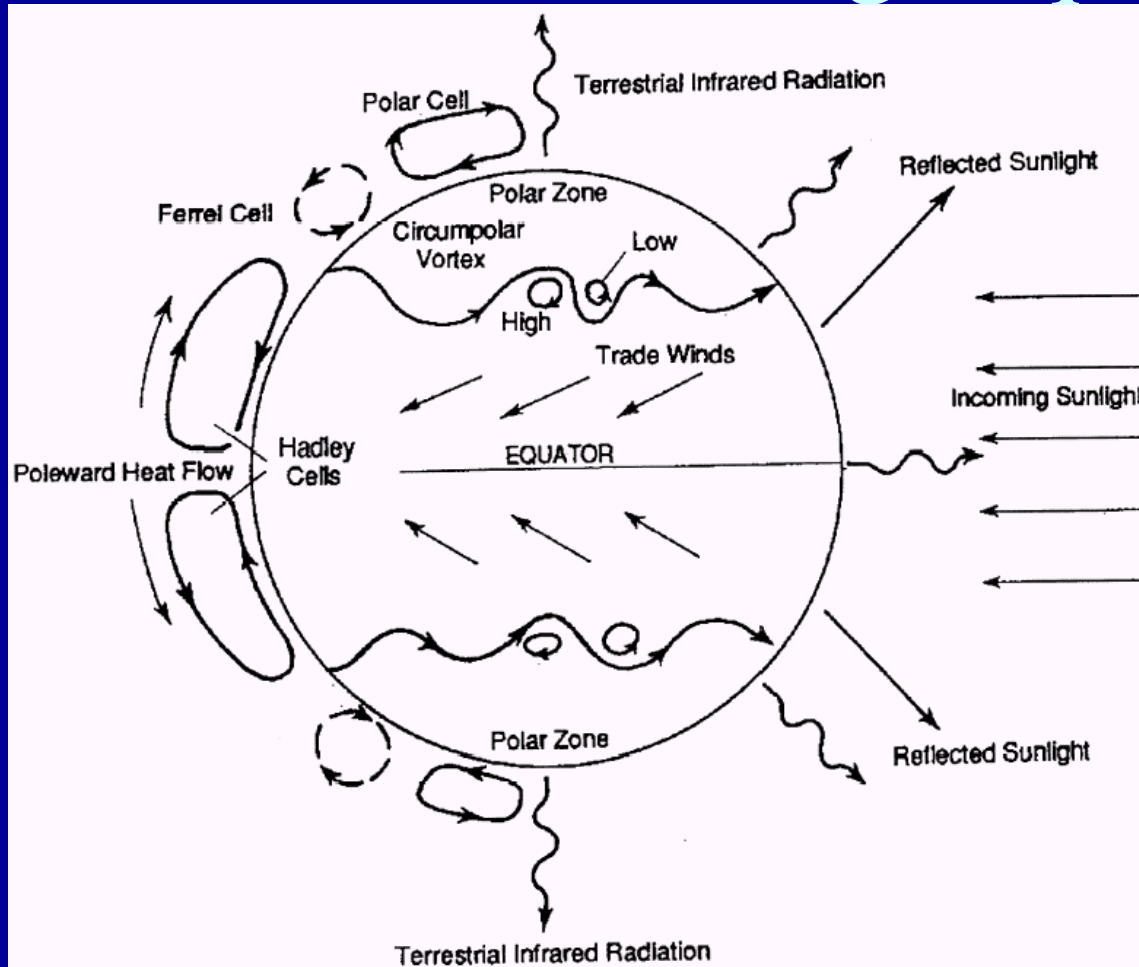


# Premier facteur explicatif du climat terrestre: chauffage différencié



Bilan énergétique  
suivant les latitudes  
[Figure 1a de  
McGuffie et  
Henderson-Sellers,  
2001]

# Circulation générale de l'atmosphère due au bilan énergétique et à la rotation



Effet du bilan énergétique et de la rotation de la terre (Force de Coriolis) [Figure 1B de McGuffie et Henderson-Sellers, 2001]



# Echelles de temps dans le système climatique

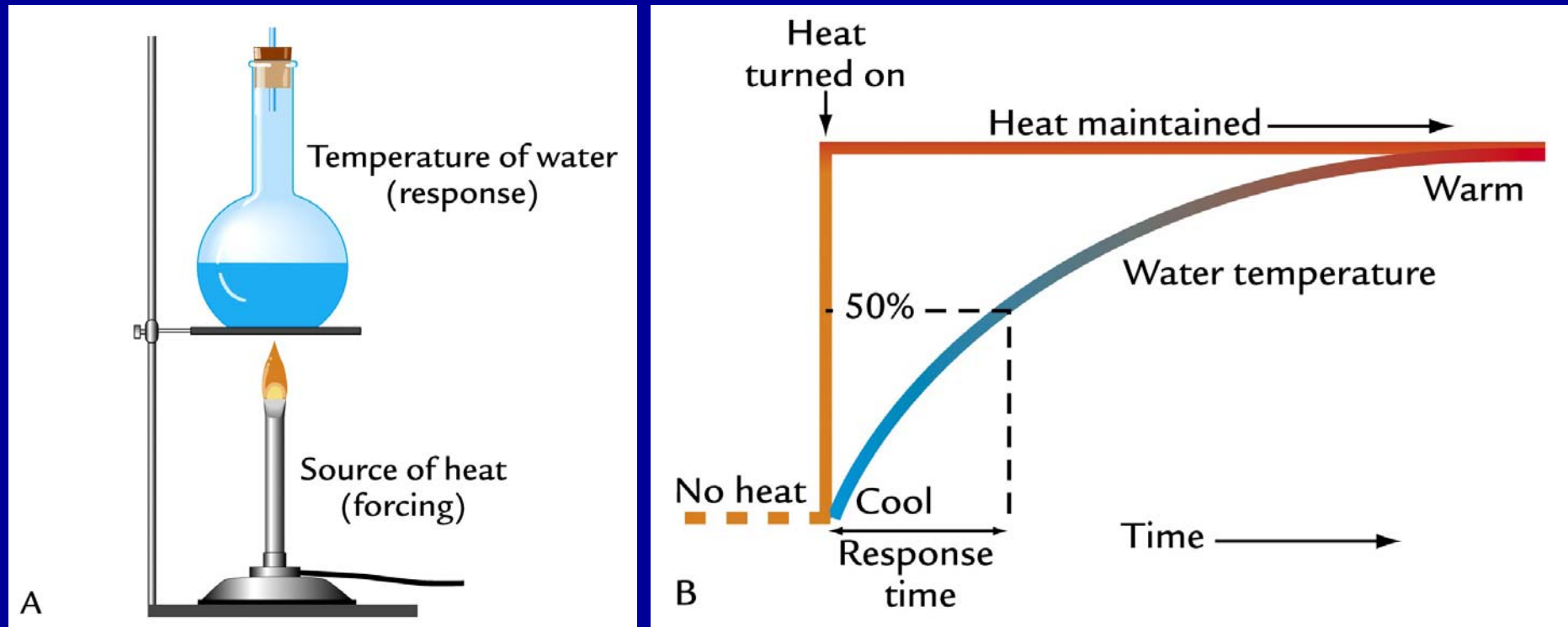


Schéma 1-6 de Ruddiman (2001)

**TABLE 1.1** Response Times of Various Climate System Components

Component	Response time (range)	Example
<b>Fast responses</b>		
Atmosphere	Hours to weeks	Daily heating and cooling Gradual buildup of heat wave
Land surface	Hours to months	Daily heating of upper ground surface Midwinter freezing and thawing
Ocean surface	Days to months	Afternoon heating of upper few feet Warmest beach temperatures late in summer
Vegetation	Hours to decades/centuries	Sudden leaf kill by frost Slow growth of trees to maturity
Sea ice	Weeks to years	Late-winter maximum extent Historical changes near Iceland
<b>Slow responses</b>		
Mountain glaciers	10–100 years	Widespread glacier retreat in 20th century
Deep ocean	100–1500 years	Time to replace world's deep water
Ice sheets	100–10,000 years	Advances/retreats of ice sheet margins Growth/decay of entire ice sheet

Ruddiman (2001)

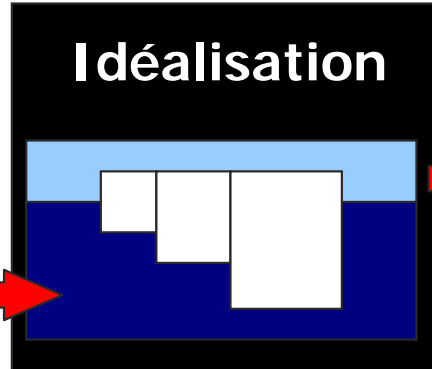
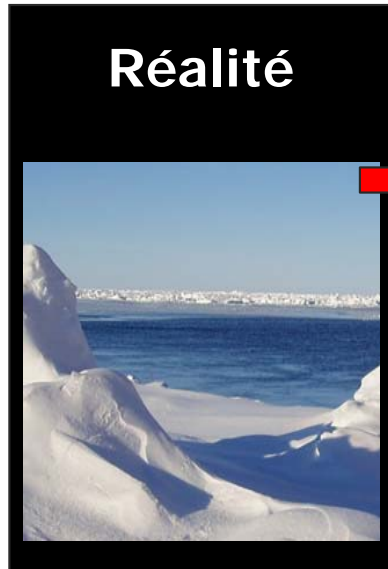
# Modèles de climat



Jean-Pascal van Ypersele  
([vanypersele@astr.ucl.ac.be](mailto:vanypersele@astr.ucl.ac.be))

# Modèles

Définition



**Formulation mathématique**

$$\rho c(S, T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(S, T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \kappa R_0 e^{-\kappa z}$$

- 1) Validation
- 2) Sensibilité

**Discrétisation Numérique**

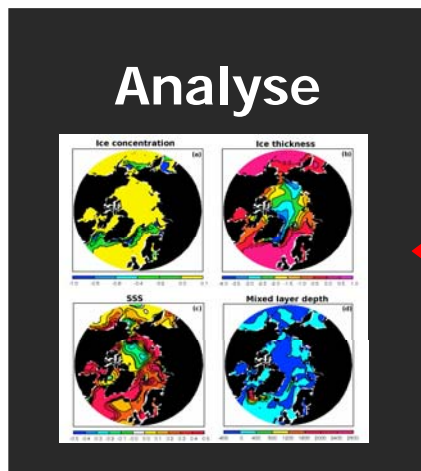
```
DO j1 = kideb , kiut
  ztitemp(j1, layer) = t_i_b(j1, layer)
  zspeche_i(j1, layer) = cpic + zga
  MAX((t_i_b(j1, layer) - rtt) * (ztio
  zeta_i(j1, layer) = rdt_ice / z

END DO
DO
layer = 1, nlay_s
DO j1 = kideb , kiut
  ztstemp(j1, layer) = t_s_b(j1, lay
  zeta_s(j1, layer) = rdt_ice / M
END DO
```



**Nombres**

```
432586309543950923149328932589
432509534590342950439509432324
3425439530429504329532450932454
43509342530429503249504950495
345904305943023914364320932193
432586309543950923149328932589
432509534590342950439509432324
3425439530429504329532450932454
4350934253042950324950495049545
345904305943023914364320932193
```



Martin Van Coppenolle (UCL)

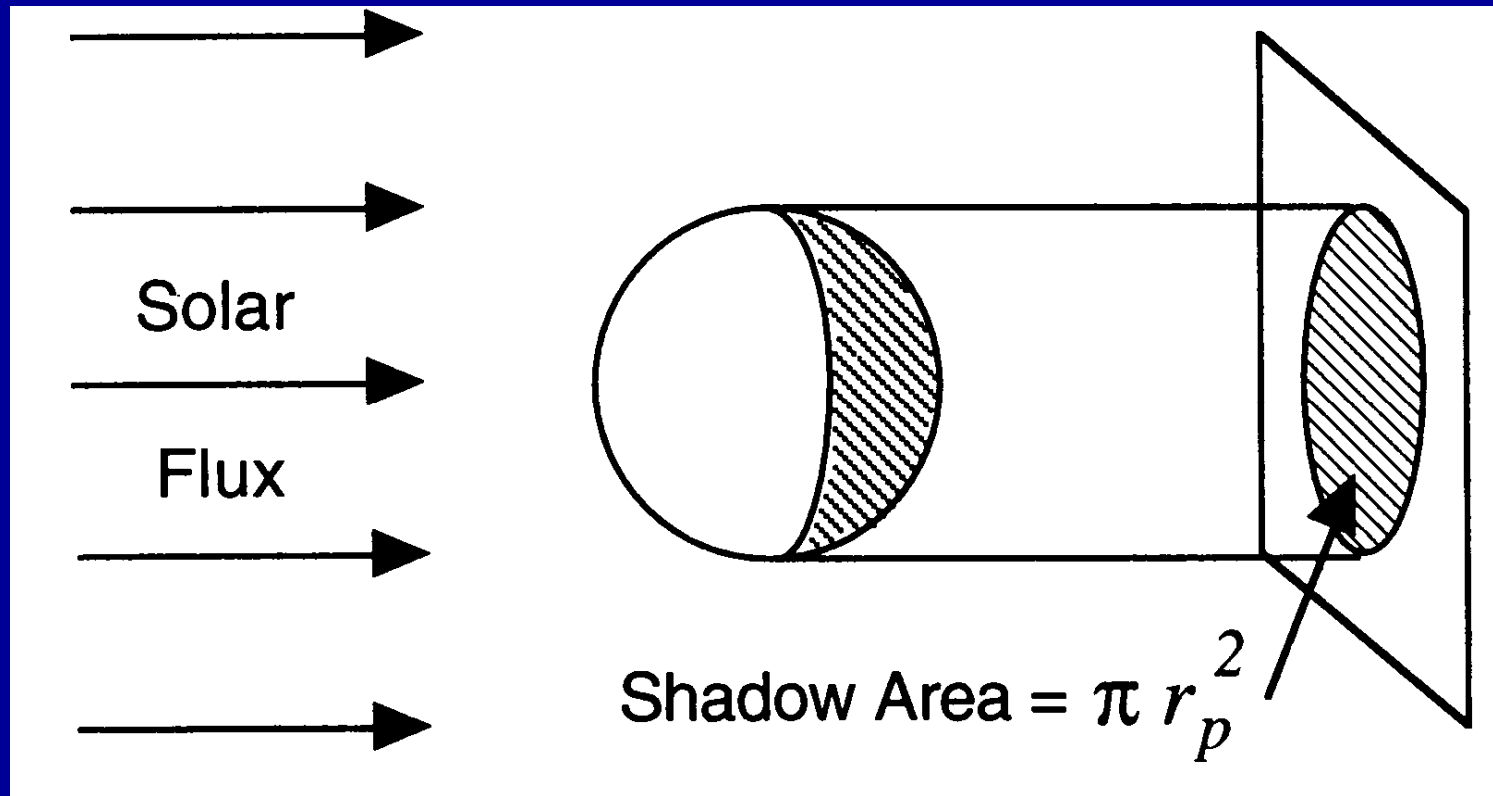
# Modèles atmosphériques

- Modèles de bilan énergétique - EBM (0D-2D)
  - Température de surface
- Modèles Radiatif-convectifs - RC (1D)
  - Profil de température
  - Transfert radiatif, convection
- Modèles Statistique-dynamique - SD (1D-3D)
  - Absence de fluctuations météorologiques
  - Équations filtrées
- Modèles de circulation générale - GCM (3D)
  - Complet/réaliste
  - Équations primitives

# Modèles de bilan énergétique (EBM)

- La manière la plus simple possible de construire un modèle du climat de la terre : modèle de bilan énergétique zéro-dimensionnel

Solar radiation absorbed = longwave radiation emitted



Ombre d'une planète sphérique [le schéma 2.2 de Hartmann (1994)]

Pour la section d'une planète de rayon  $r_p$ :

$$\text{absorbed solar radiation} = S_0 (1 - \alpha_p) \pi r_p^2.$$

Pour la surface d'une planète de rayon  $r_p$ :

$$\text{emitted longwave radiation} = \sigma T_e^4 4\pi r_p^2.$$

Une division par  $\pi r_p^2$  donne le *bilan énergétique planétaire* :

$$\frac{S_0}{4} (1 - \alpha_p) = \sigma T_e^4$$



# EBM Zéro-dimensionnel

- La solution du bilan énergétique planétaire rapporte *la température d'émission d'une* planète :

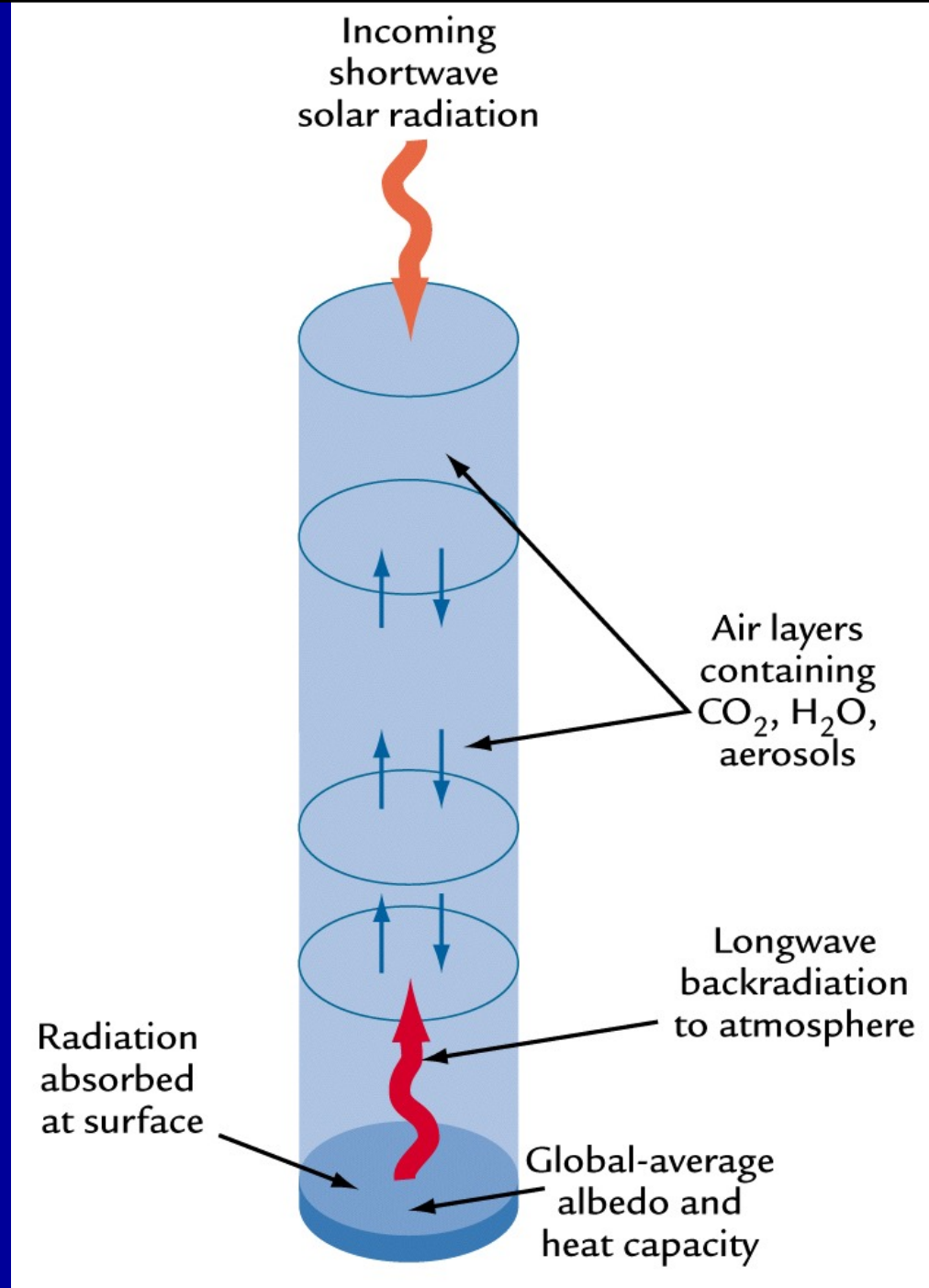
$$T_e = \sqrt[4]{\frac{(S_0 / 4)(1 - \alpha_p)}{\sigma}}$$

# EBM Zéro-dimensionnel et effet de serre

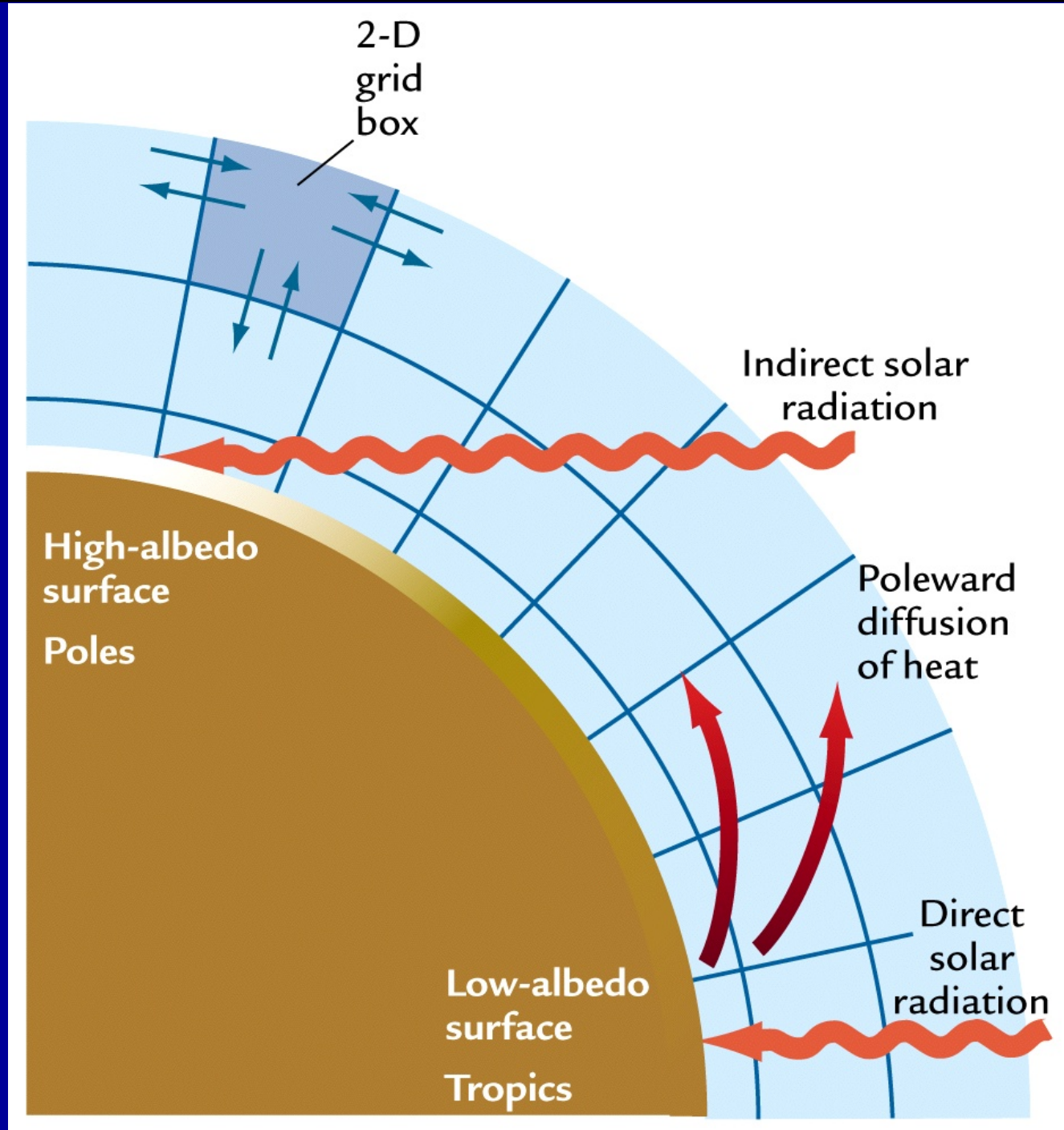
La température d'émission de la terre

$$T_e = \sqrt[4]{\frac{(1367 \text{ W m}^{-2} / 4)(1 - 0.3)}{5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}}} = 255 \text{ K} \approx -18^\circ\text{C} \text{ or } 0^\circ\text{F}.$$

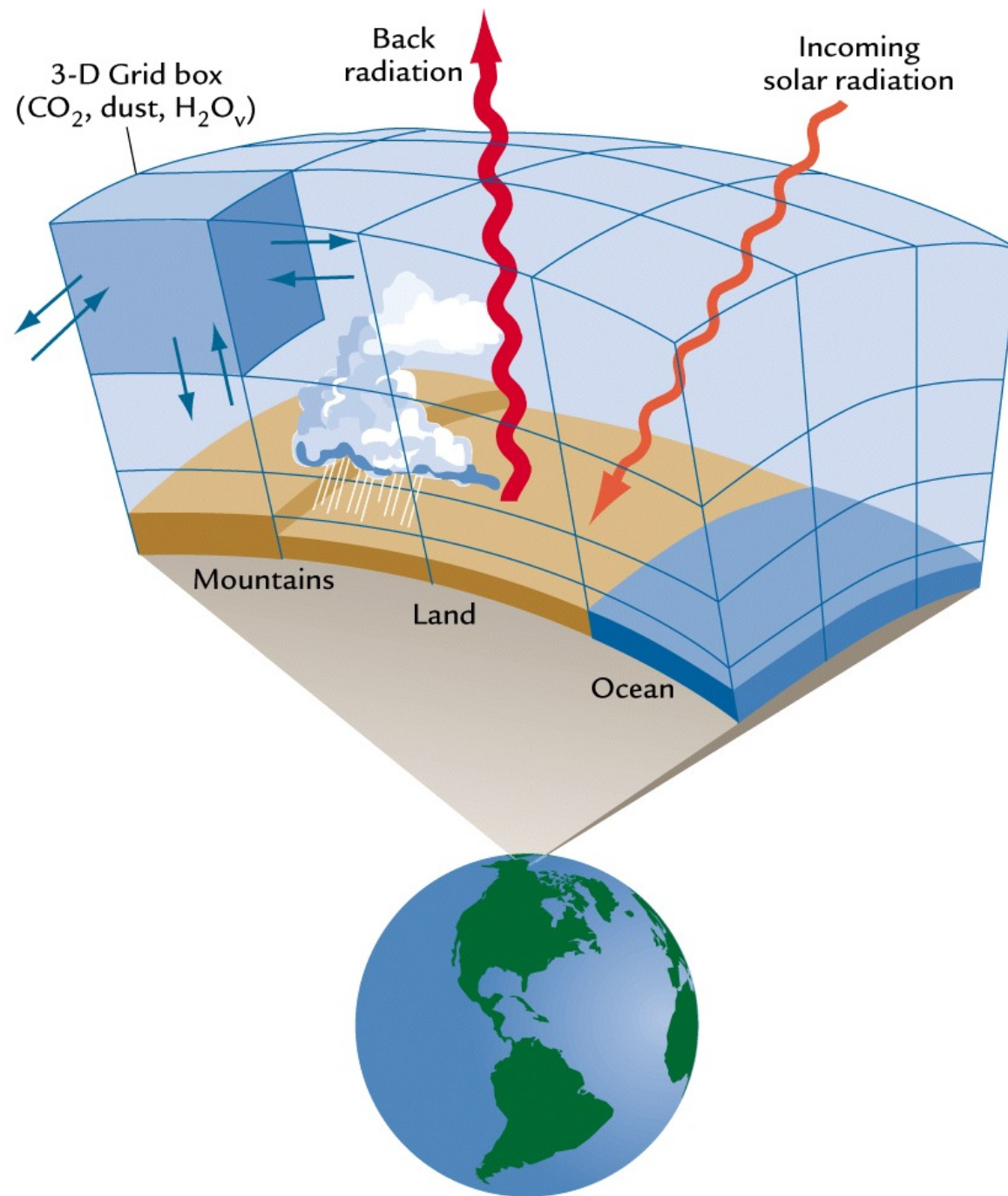
- Beaucoup moins que la moyenne globale observée pour la température de l'air en surface :  $\sim 15^\circ\text{C}$ , soit 288 K
- Il faut en effet tenir compte de l'effet de serre



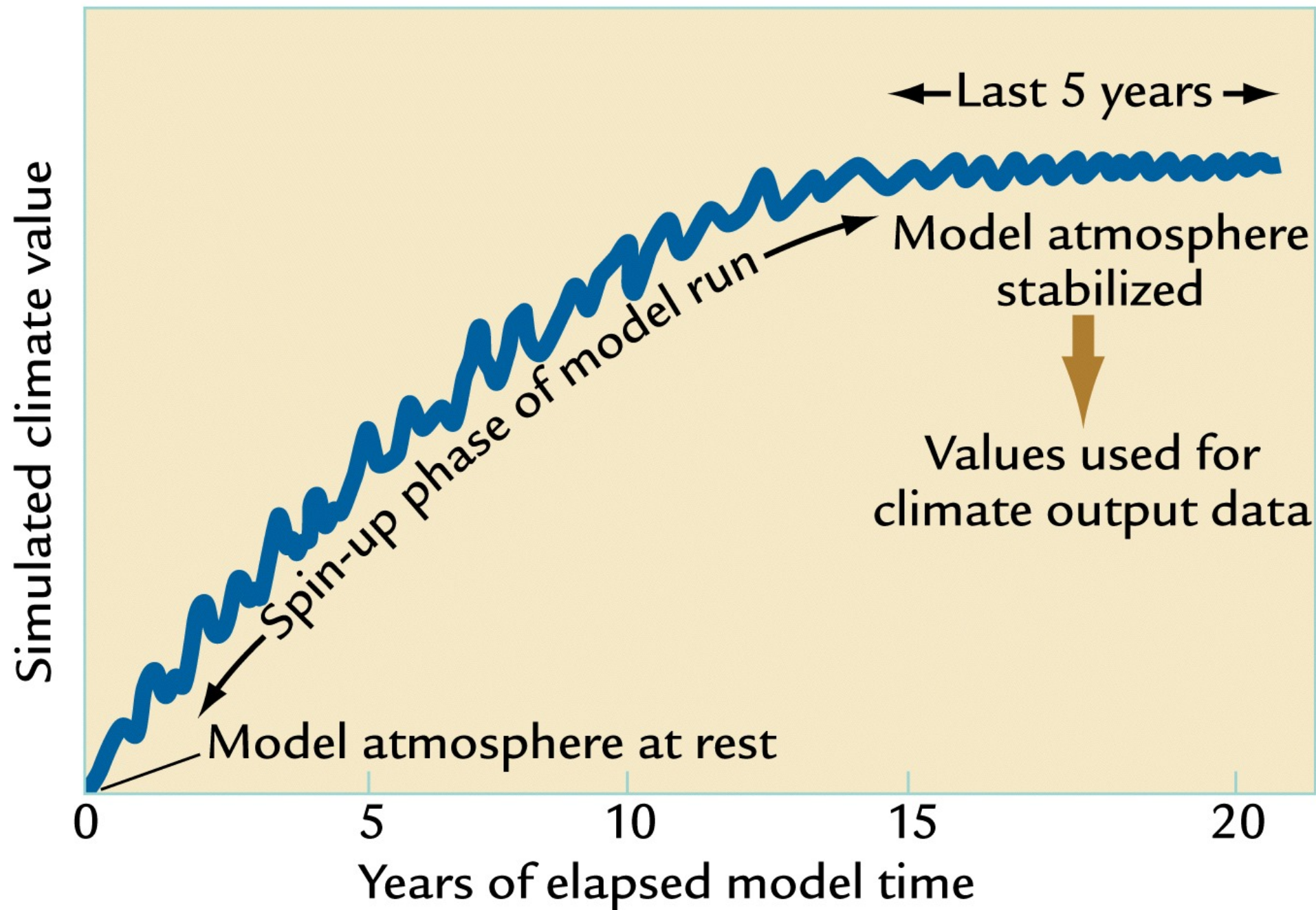
Modèles 1-D (RC) radiatif-convectifs  
[Le schéma 3-24 de Ruddiman (2001)]



Modèle 2-D (SD) statistique-dynamique  
 [Le schéma 3-25 de Ruddiman (2001)]



Modèle de circulation générale à trois dimensions (GCM)  
[Le schéma 3-26 de Ruddiman (2001)]



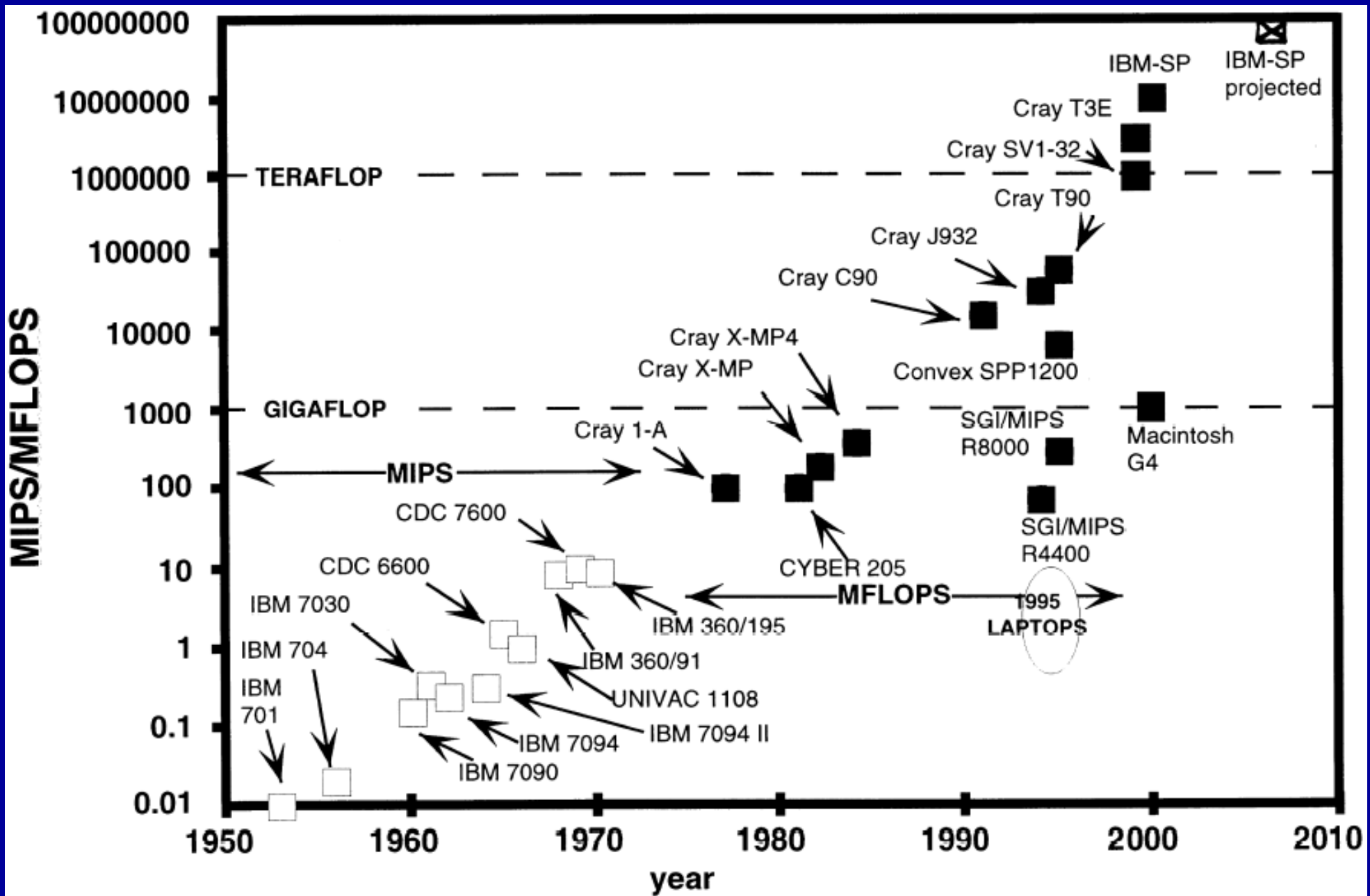
[Le schéma 3-27 de Ruddiman (2001)]

# Ordinateurs et modélisation du climat

Développement des modèles de climat



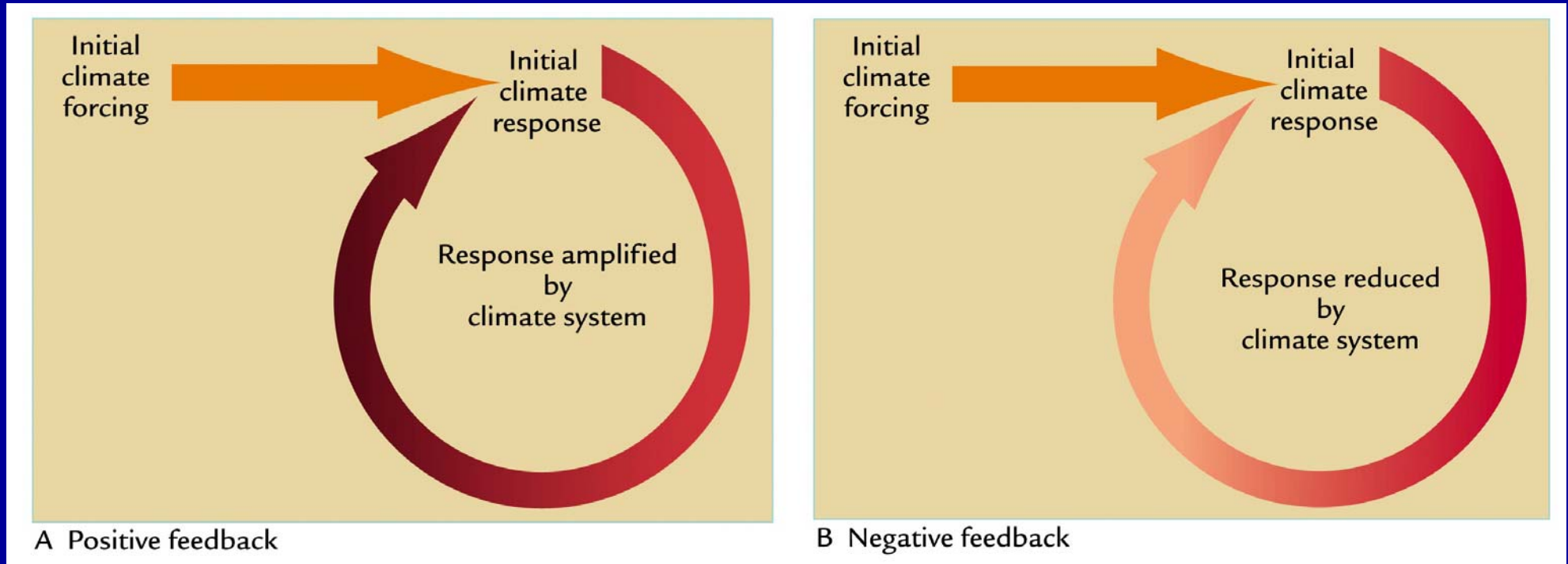
Développement des ordinateurs



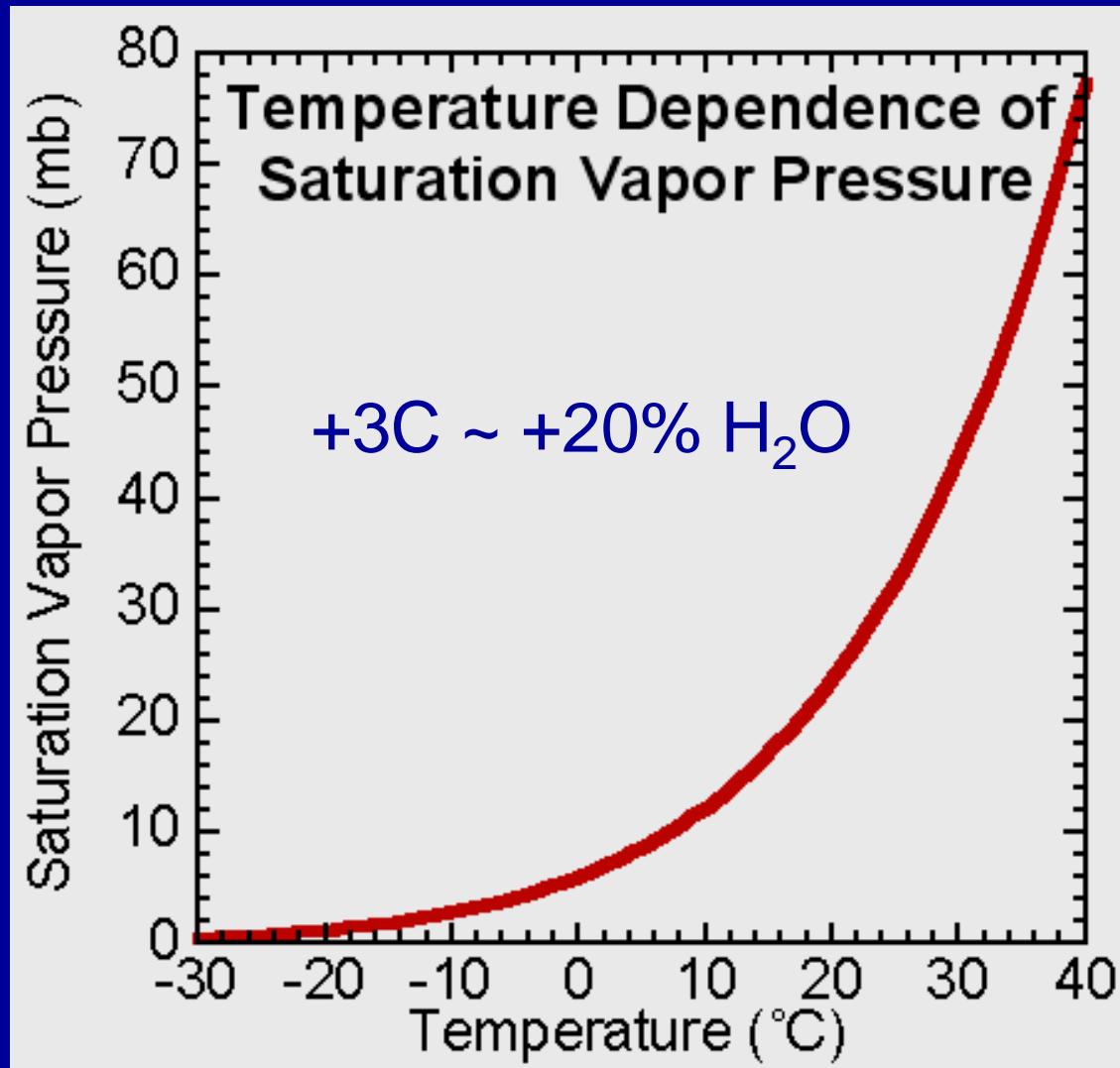
[Figure 5 from Mcguffie and Henderson-Sellers, 2001]



# Forcings and feedbacks



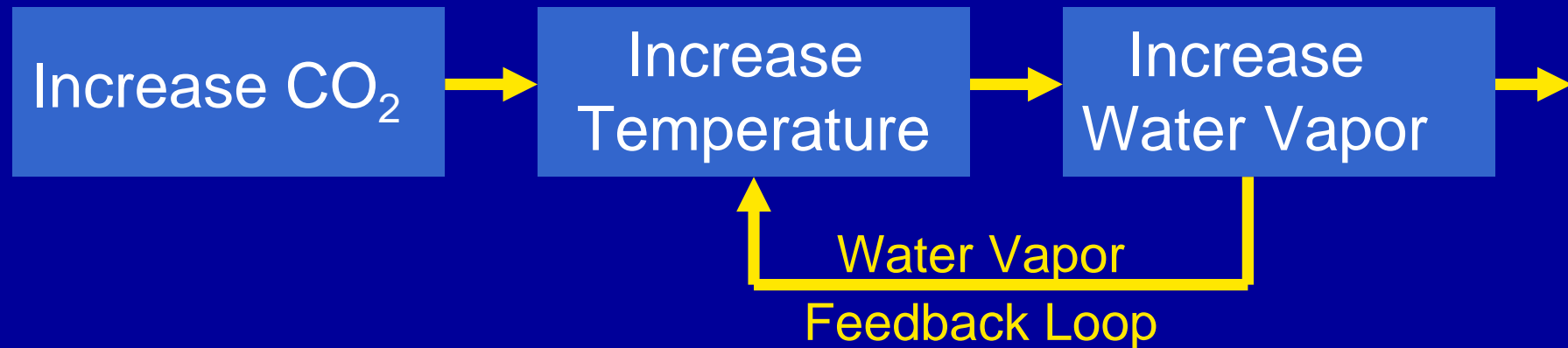
[Figure 1.11 from Ruddiman (2001)]



# Natural Feedbacks within the Climate System

## Water Vapor Feedback

+3C ~ +20% H<sub>2</sub>O



Water Vapor Feedback Approximately Doubles the Sensitivity of Climate ~1 to 2 °C warming

# Sensibilité des modèles climatiques

- Rapport entre la réponse du climat et un facteur de forçage :

$$\text{climate sensitivity} = \frac{\text{climate response}}{\text{climate forcing}}$$

$$\frac{\Delta T_s}{\Delta Q} \rightarrow \frac{dT_s}{dQ} = \lambda_R$$

$\Delta T_s$ : température de surface (K ou °C)

$\Delta Q$  : perturbation du bilan énergétique à un certain niveau ( $\text{W m}^{-2}$ )

# Sensibilité du climat

Processus	Symbole	Valeur prévue (K W <sup>-1</sup> m <sup>2</sup> )
Stefan-Boltzmann (refroidissement infrarouge)	$\frac{1}{\lambda_B}$	0.3
Vapeur d'eau	$\frac{1}{\lambda_W}$	1.0
Glace-albedo	$\frac{1}{\lambda_A}$	1.7
Nuages	$\frac{1}{\lambda_A}$	petit nombre négatif à grand nombre positif

$\lambda_B$

# Combinaison des rétroactions dans le système climatique

$$\frac{1}{\lambda_R} = \frac{1}{\lambda_B} - \frac{1}{\lambda_A} - \frac{1}{\lambda_W} - \frac{1}{\lambda_C} \cdot$$

$\lambda_B$

# General Circulation Models ou Global Climate Models (GCMs)

- Équations fondamentales
- Discrétisation
- Paramétrisation
- Solution numérique

(Adapté d'après McGuffie & Henderson-Sellers, 1987)

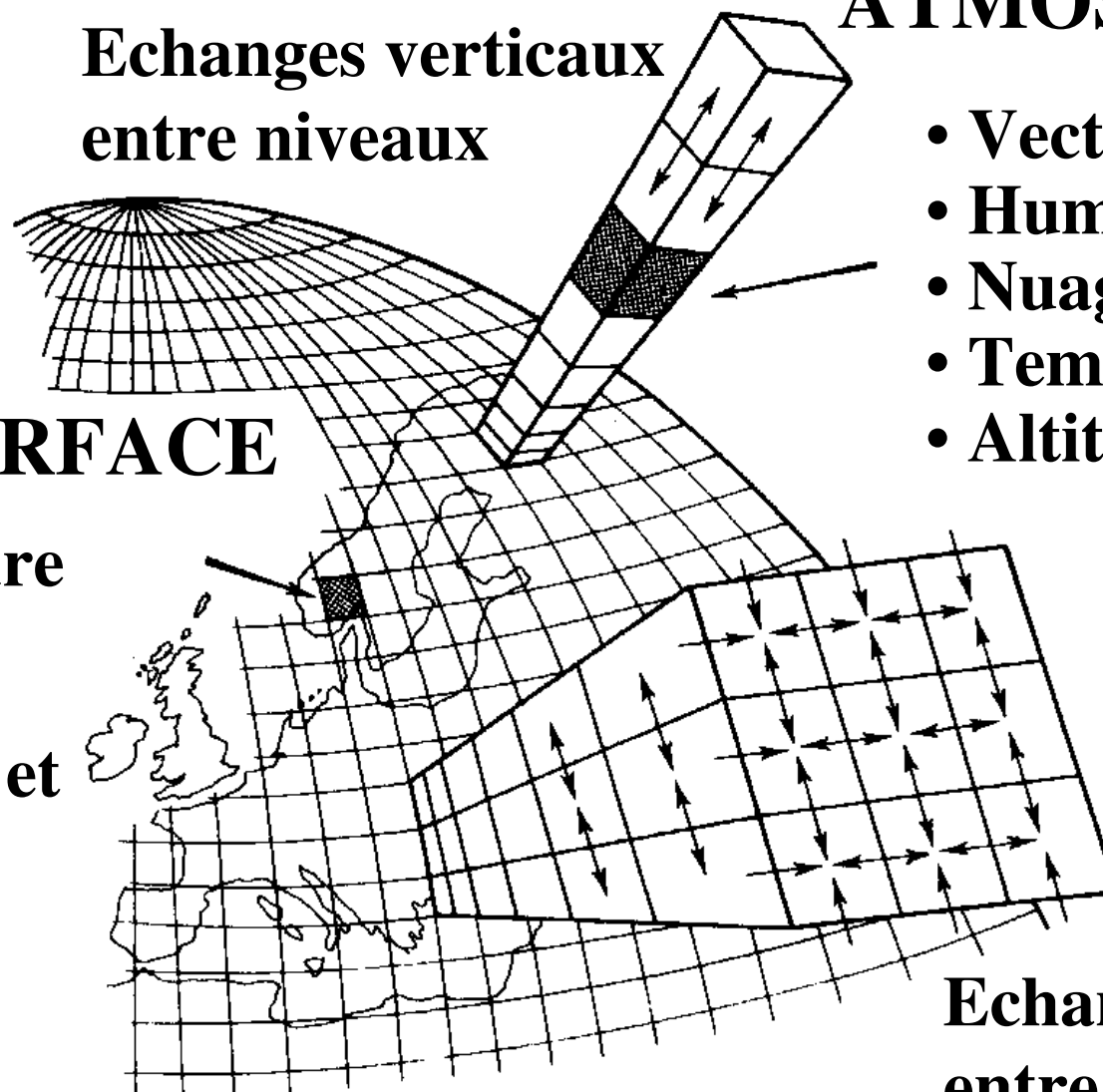
# DANS LA COLONNE ATMOSPHERIQUE

Echanges verticaux  
entre niveaux

- Vecteurs vent
- Humidité
- Nuages
- Température
- Altitude

A LA SURFACE

- Température  
au sol
- Flux d'eau et  
d'énergie



Echanges horizontaux  
entre colonnes

Intervalle de temps ~ 30 minutes

Résolution ~ 3° x 3°



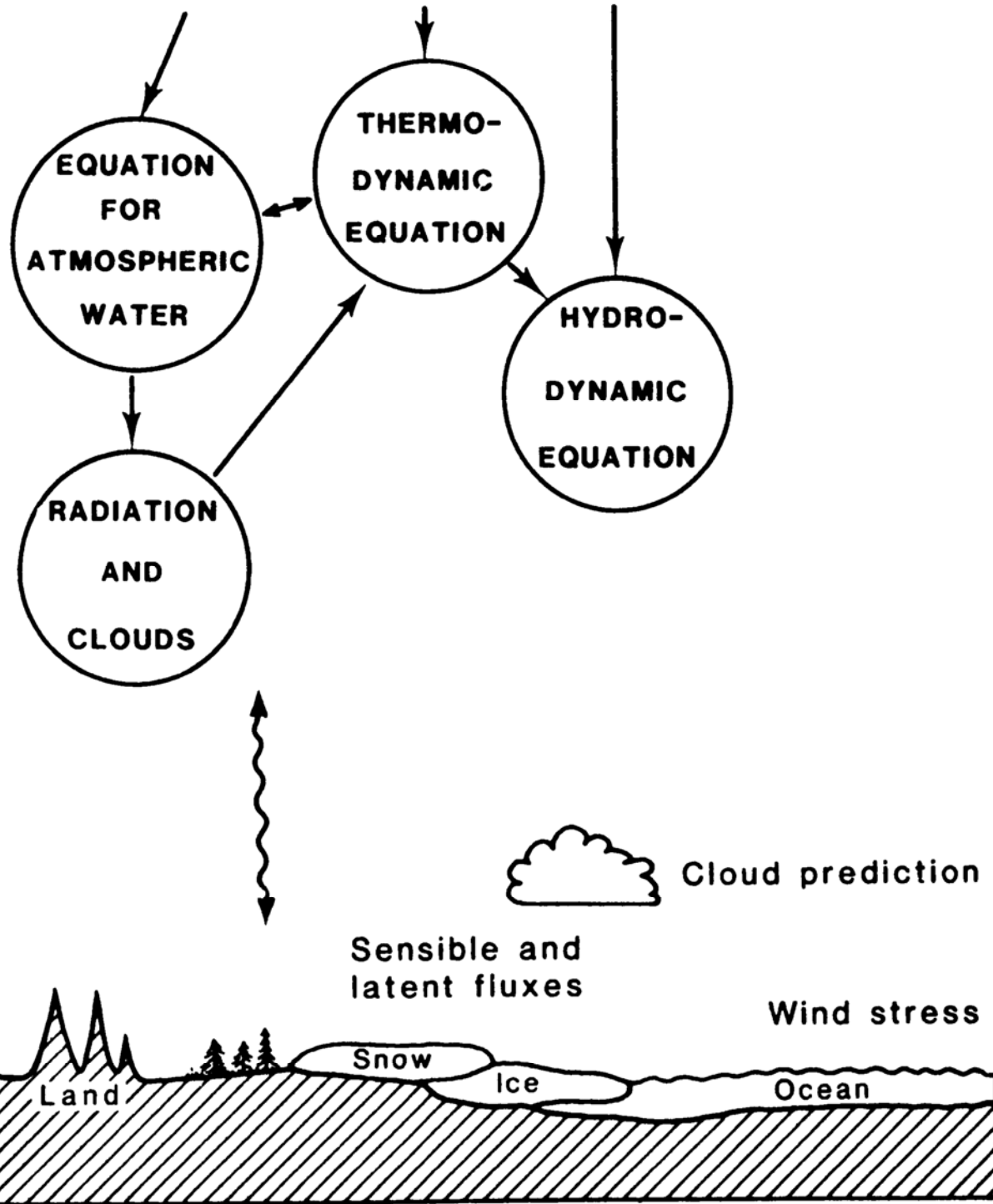
# Processus principaux dans un AGCM (Atmospheric General Circulation Model)

- Dynamique :
  - Circulation générale (vents)
- Physique :
  - Rayonnement
    - absorption de rayonnement (solaire) de courte longueur d'onde
    - émission et absorption du rayonnement (IR) grandes ondes
  - Nuages
    - Convection, précipitation
  - Thermodynamique (la température atmosphérique)
  - Humidité (humidité atmosphérique)
- Surface et océans
  - effets de la glace, neige, végétation sur la température, albédo, émissivité, rugosité
- Chimie
  - composition de l'atmosphère

"DYNAMICS"

# ATMOSPHERIC MOTIONS

"PHYSICS"



"OTHER"

Processus  
incorporés dans  
un AGCM  
[schéma 5.1 de  
McGuffie et  
Henderson-  
Sellers (1997)]

# Équations primitives (3D)

- Conservation de la masse (équation de continuité)
  - vitesse verticale
- Conservation de l'énergie (1ère loi de la thermodynamique)
  - la température
- Conservation de la quantité de mouvement (élan)(mv)
  - vitesse horizontale (vent, circulation)
- Équation d'état
  - gaz idéal/densité d'eau de mer

# Équations primitives

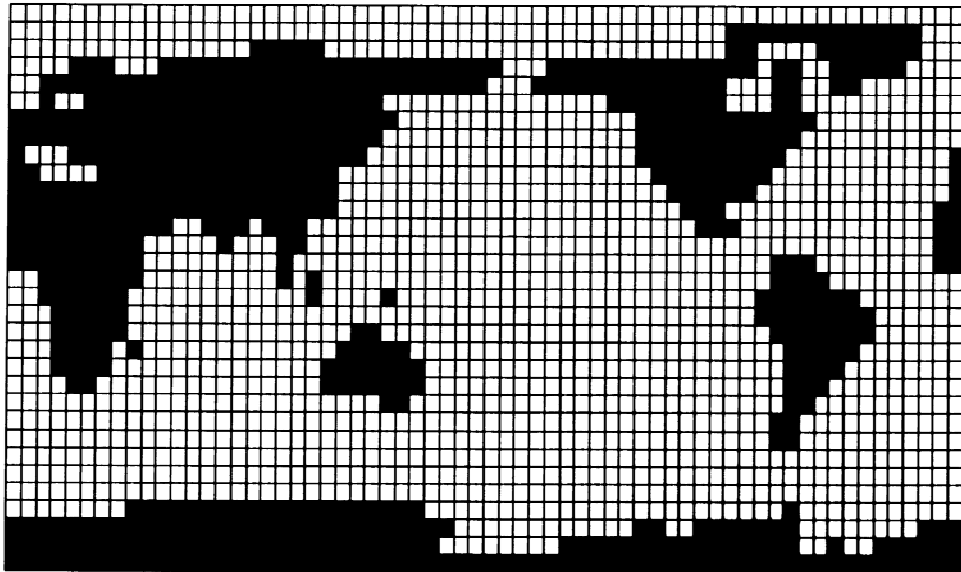
- Taux de changement = transport + sources – “puits”(sinks)
- Solution numérique
  - Différences finies
  - Méthode spectrale
  - Éléments finis

	L'atmosphère	Océan
Écoulement horizontal	sans restriction	restreint
Ampleur verticale	10 kilomètres	4 kilomètres
Vitesse horizontale	10m s <sup>-1</sup>	0.1 m s <sup>-1</sup>
Vitesse verticale	10 <sup>-2</sup> m s <sup>-1</sup>	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-5</sup> m s <sup>-1</sup>
Rayon de Rossby à 30°N/30°S	1000 kilomètres	40 kilomètres
Résolution requise	5°	1/5°
Contraste de densité	~4x10 <sup>-2</sup>	~2x10 <sup>-3</sup>
Temps caractéristique	jours	100-1000 ans
Gain de la chaleur	principalement de dessous	d'en haut
Perte de chaleur	colonne entière	sur la surface
Capacité de chaleur	négligeable	grand

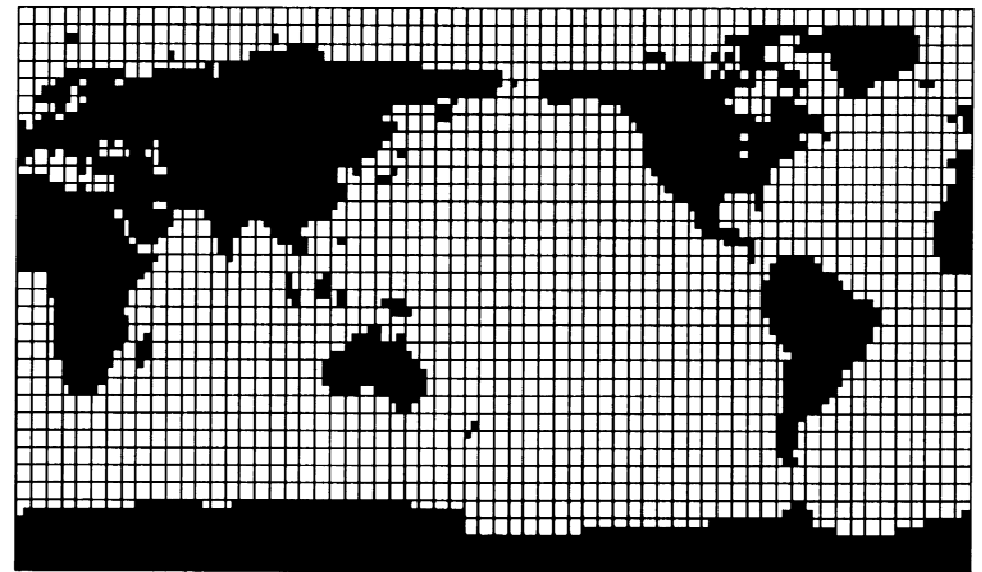
# Caractéristiques de l'atmosphère et d'océan

# Discretisation

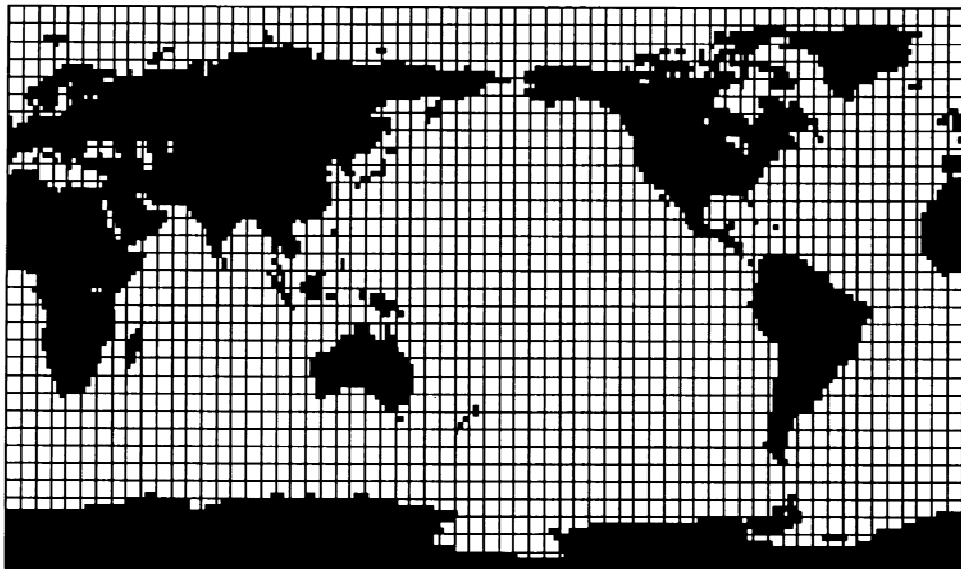
## Land-Sea Masks for ECHAM3 Truncations



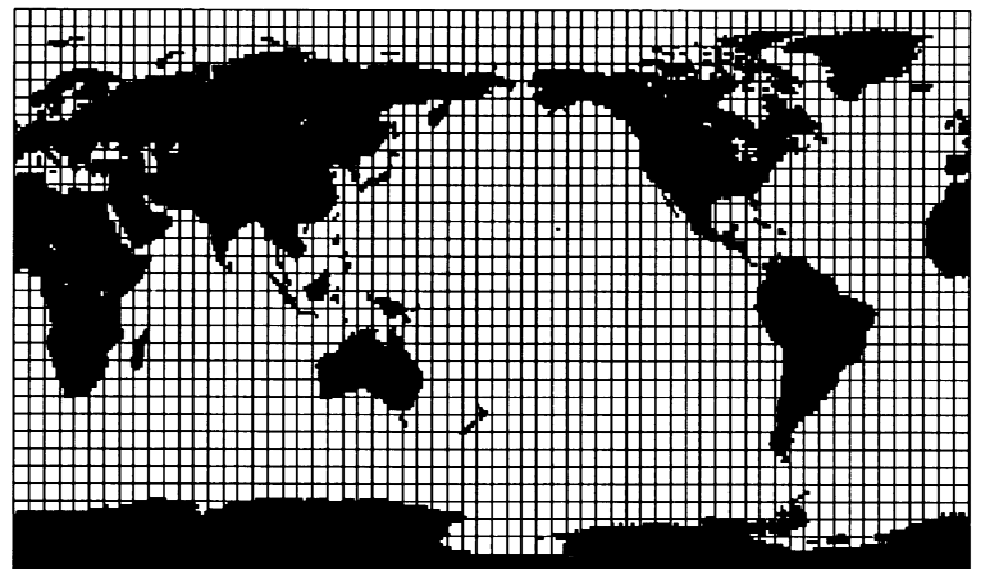
T21 (5.6°)



T42 (2.8°)



T63 (1.9°)



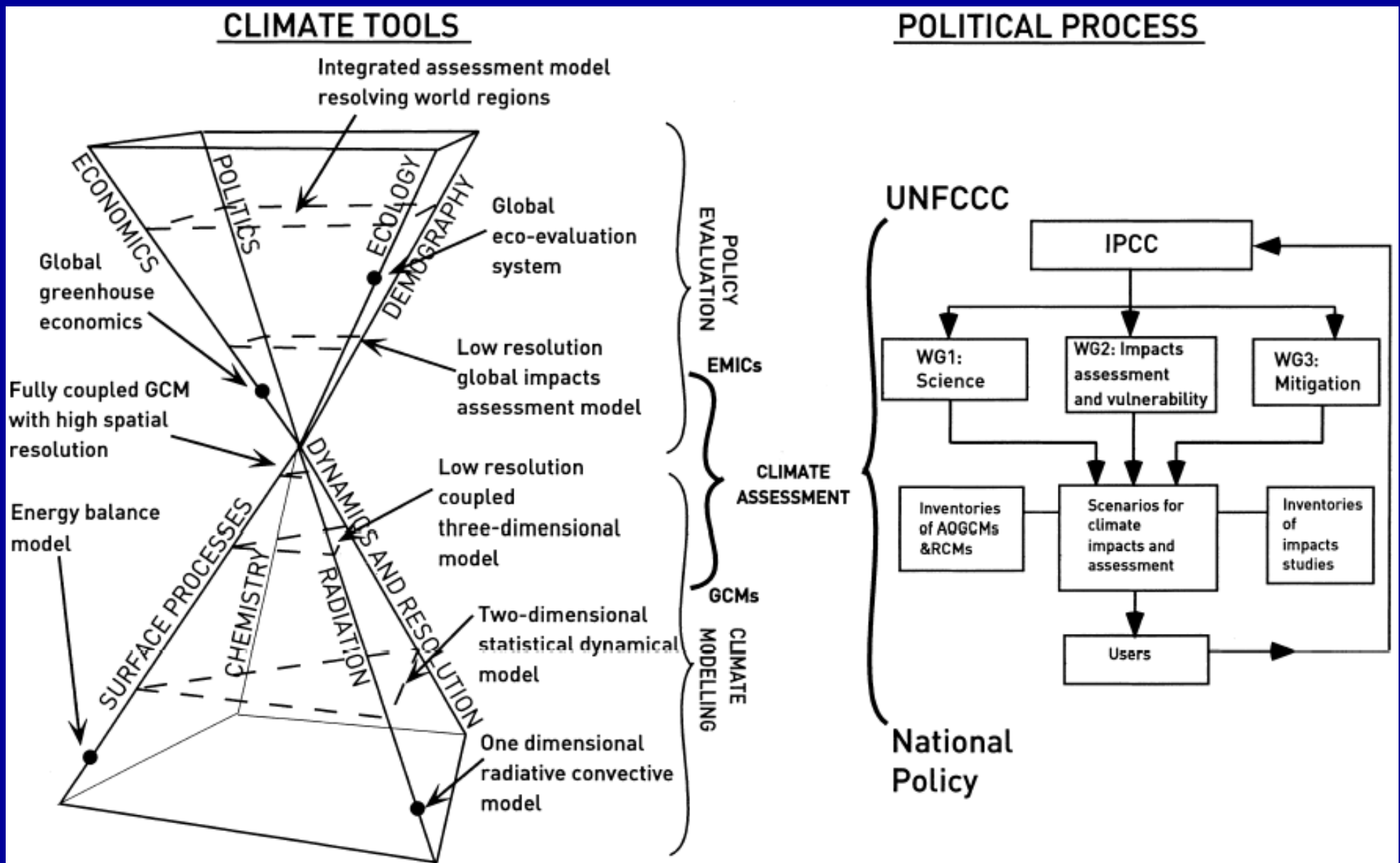
T106 (1.1°)

# Contraintes numériques

Critère de Courant-Friedrich-Levy:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{u}$$

Aucun transport ne peut parcourir plus d'une maille par pas de temps



[Schéma 10 de Mcguffie et Henderson-Sellers, 2001]

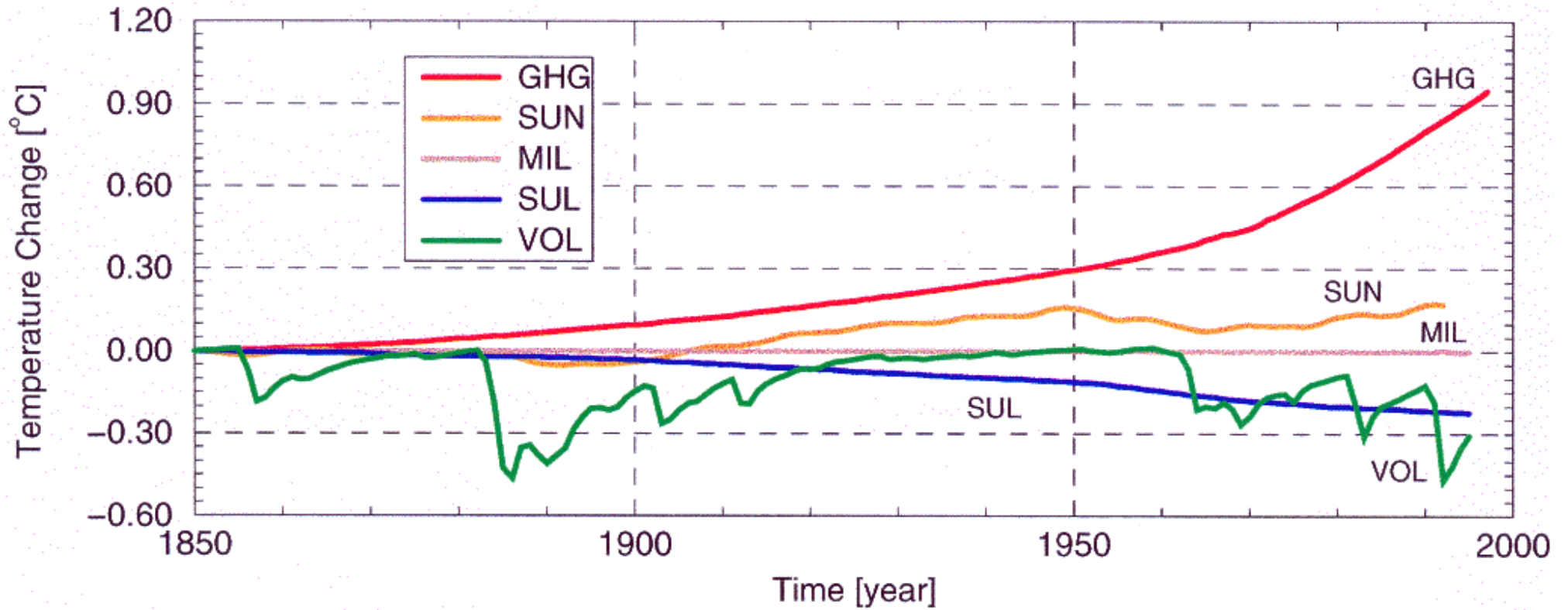


# Paramétrisation dans les modèles climatiques

- Les processus se produisant à une échelle inférieure à celle des mailles doivent être paramétrisés
  - e.g. formation des nuages, transfert d'humidité dans le sol ou tourbillons océaniques

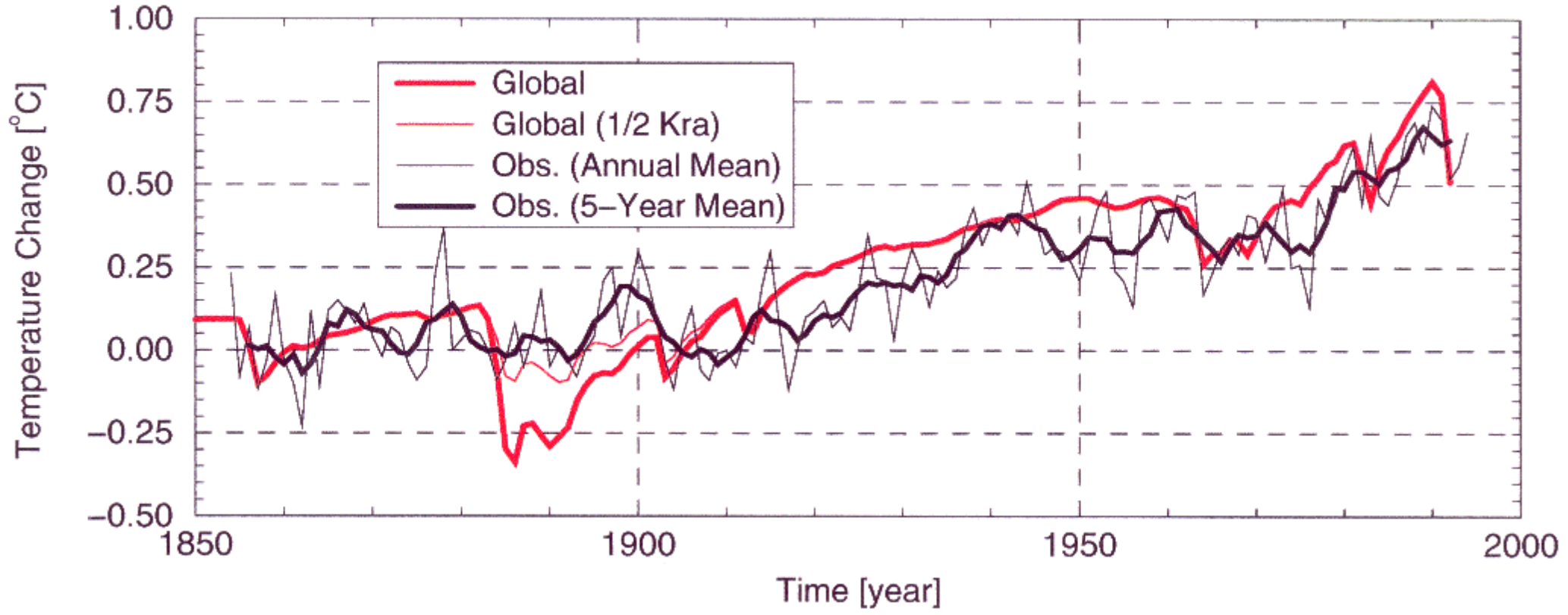
# Effet des différents facteurs sur le modèle 2D de LLN

(a) Individual Responses



# Effet des facteurs combinés sur le modèle 2D de LLN

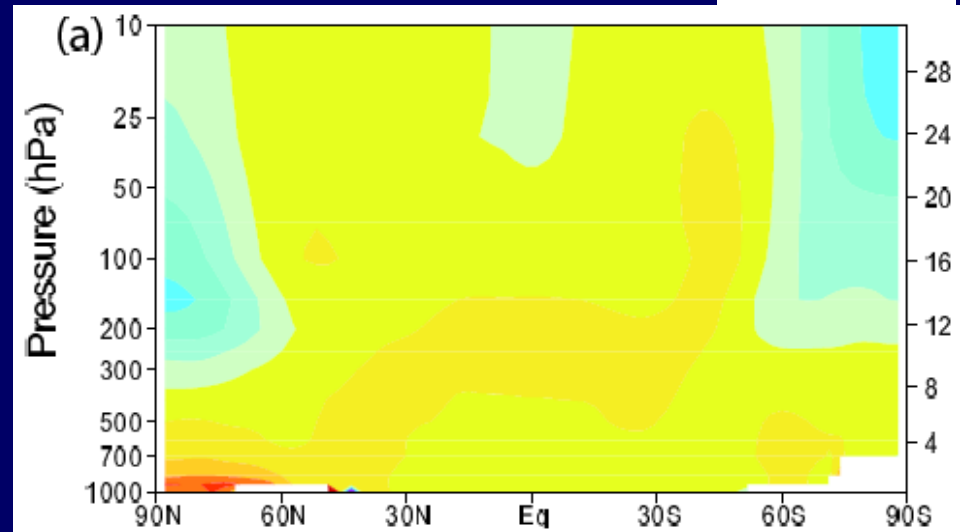
(c) Global Response



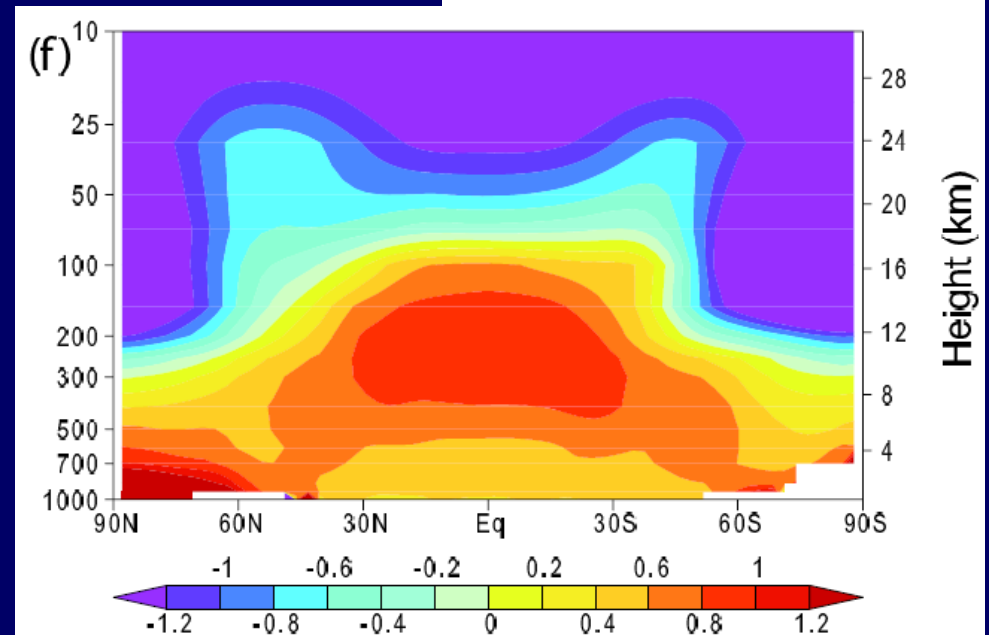
# Etudes d'attribution

- Séparer les patterns spatio-temporels de la réponse.
- Réponse au solaire a une signature très différente à celle des GES, en particulier avec l'altitude. La haute atmosphère devrait être beaucoup plus chaude qu'elle ne l'est si le rayonnement solaire était la cause du réchauffement à la surface.

Solaire

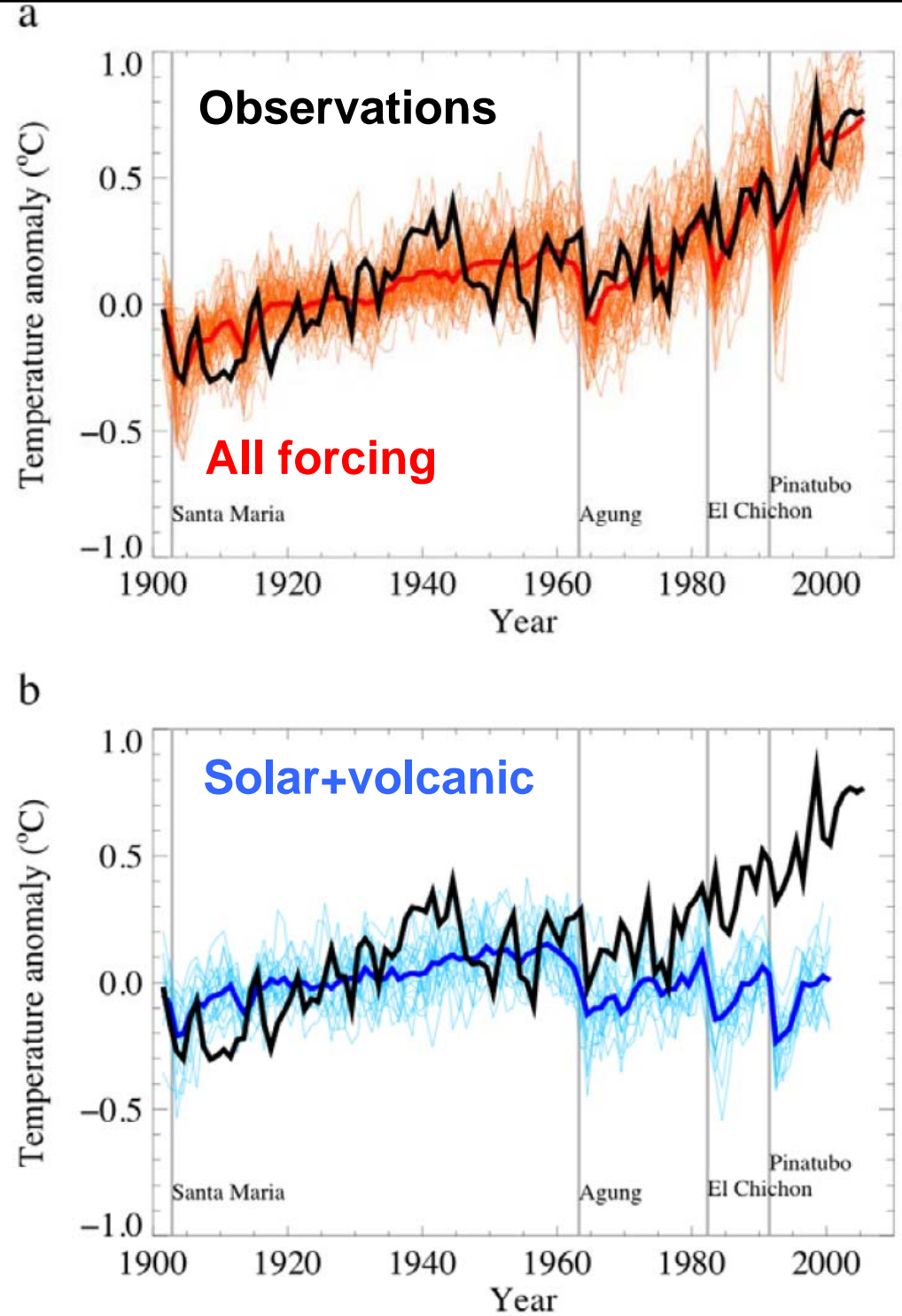


Tous les forçages



# Attribution

- are observed changes consistent with
  - expected responses to forcings
  - inconsistent with alternative explanations



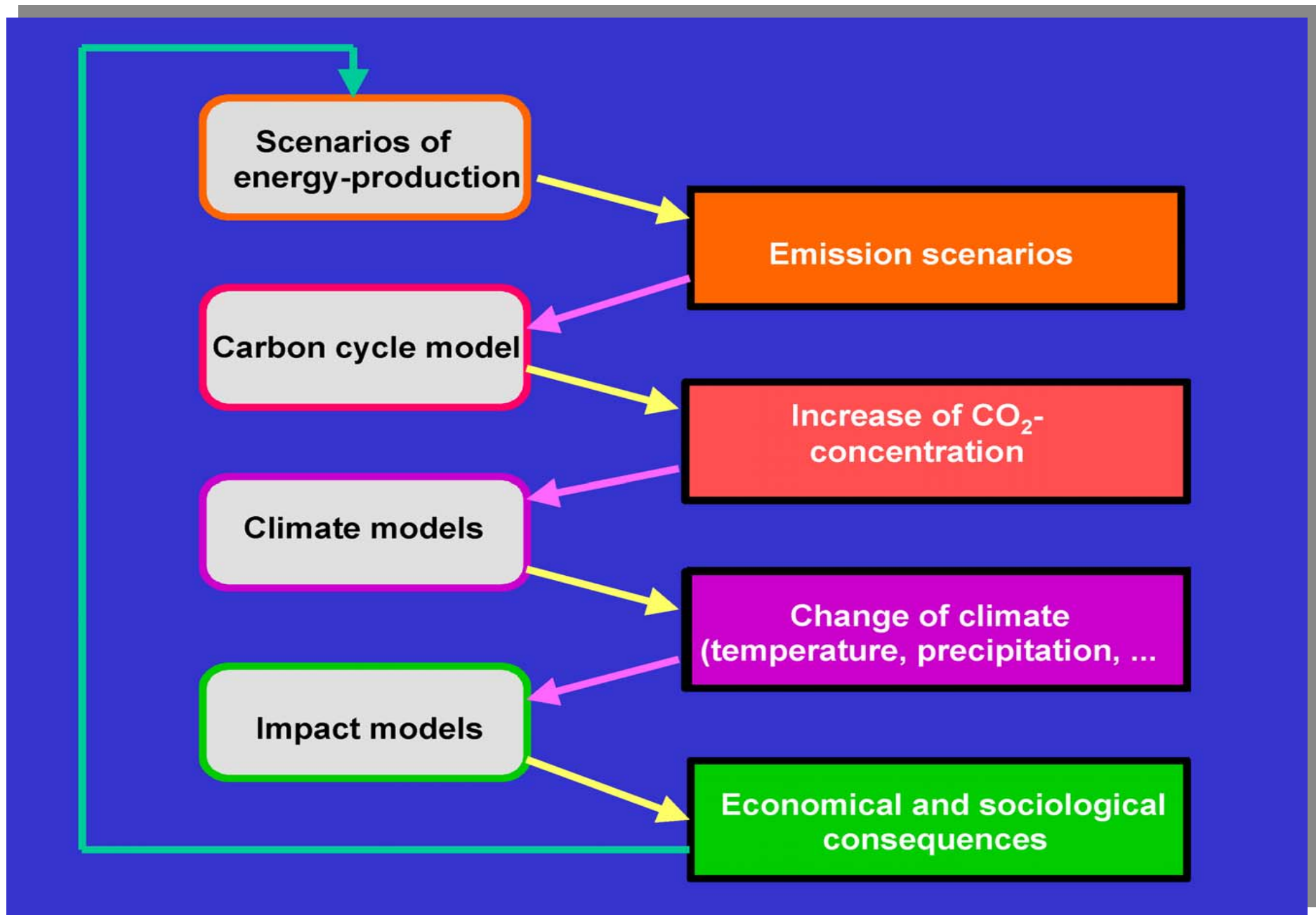
# Key conclusion from the last IPCC report (2007):

- **Most of the observed increase in globally averaged temperatures since the mid-20th century is *very likely* due to the observed increase in anthropogenic greenhouse gas concentrations**
- **NB: « Very likely » means: probability > 90%**
- **NB: Same sentence as in previous IPCC report (TAR, 2001), but then with « likely », meaning probability > 66%**

# Projections du climat futur

---

- z Scenarios**
- z Simulations**



**The information chain leading to a climate projection**



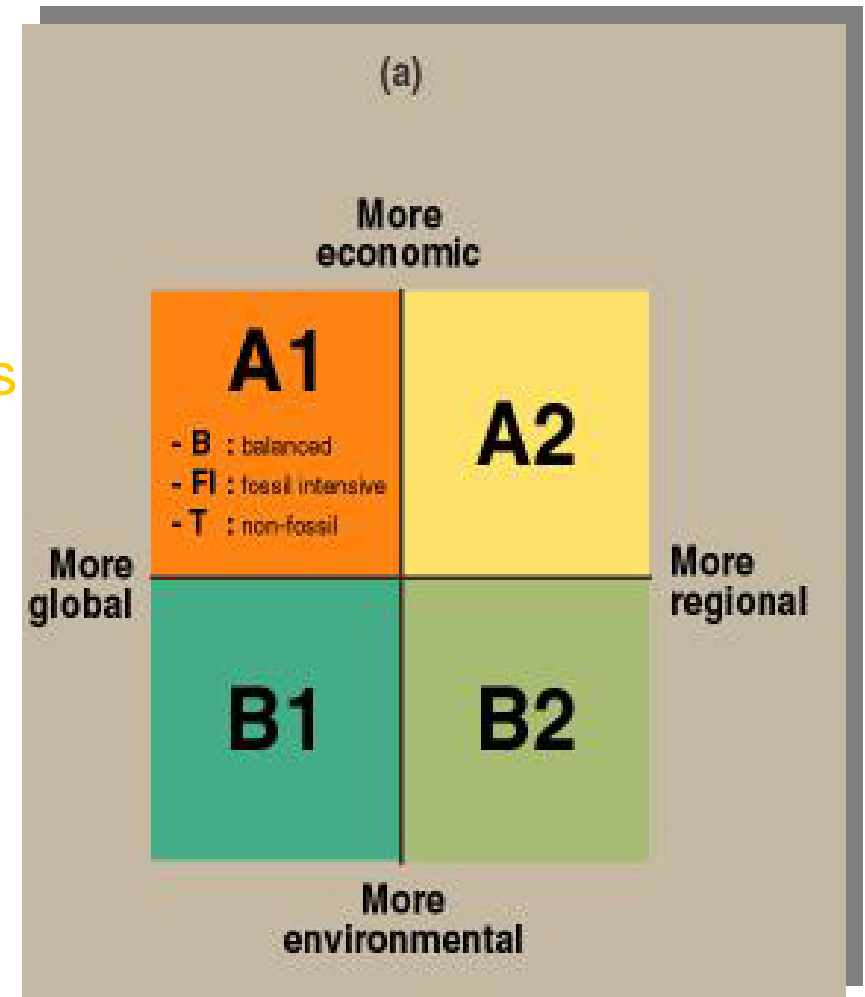
# Les scénarios SRES A1,A2,B1,B2:

**A1:** A world of rapid economic growth and rapid introductions of new and more efficient technologies

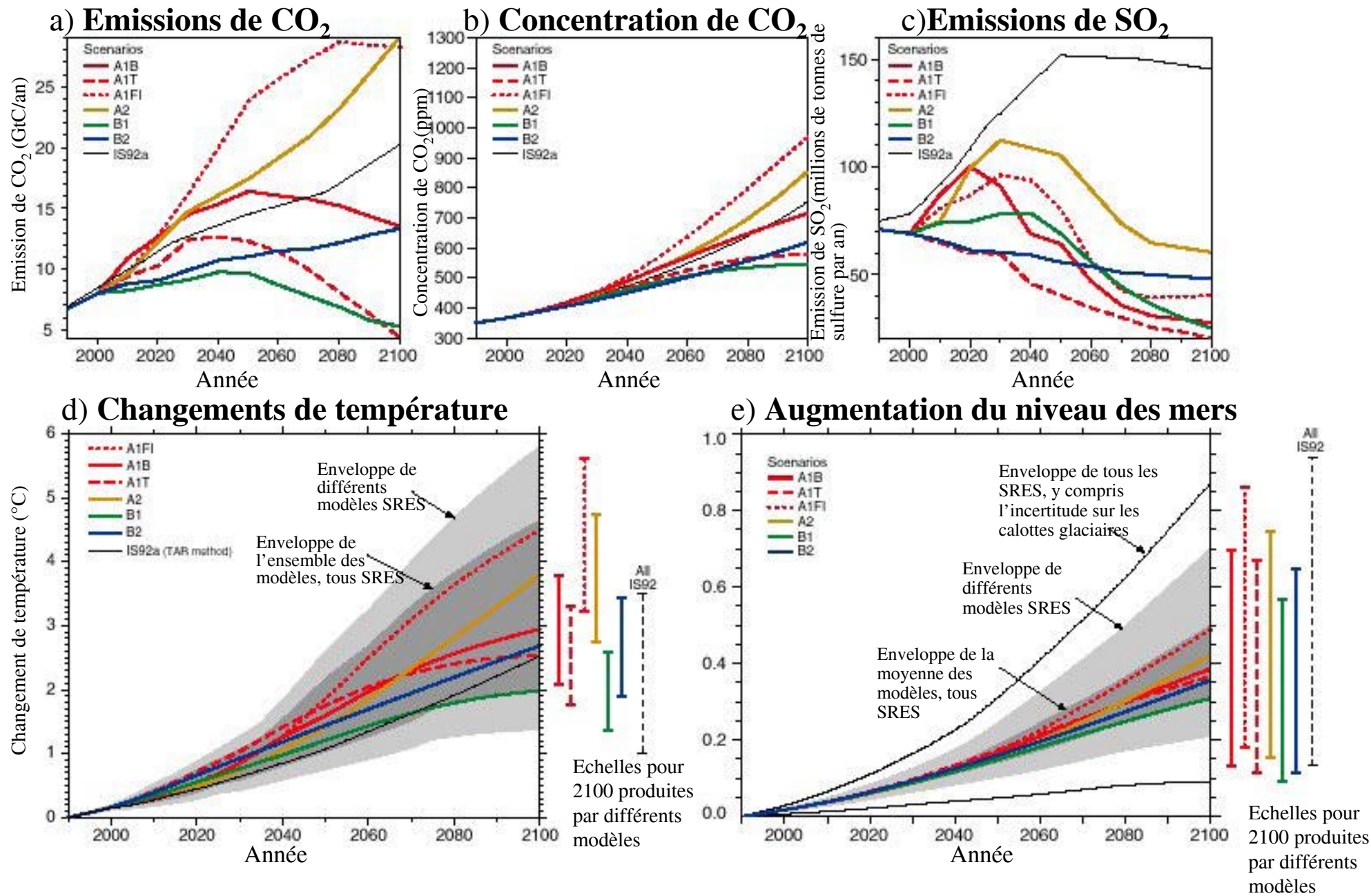
**A2:** A very heterogenous world with an emphasis on family values and local traditions

**B1:** A world of „dematerialization“ and introduction of clean technologies

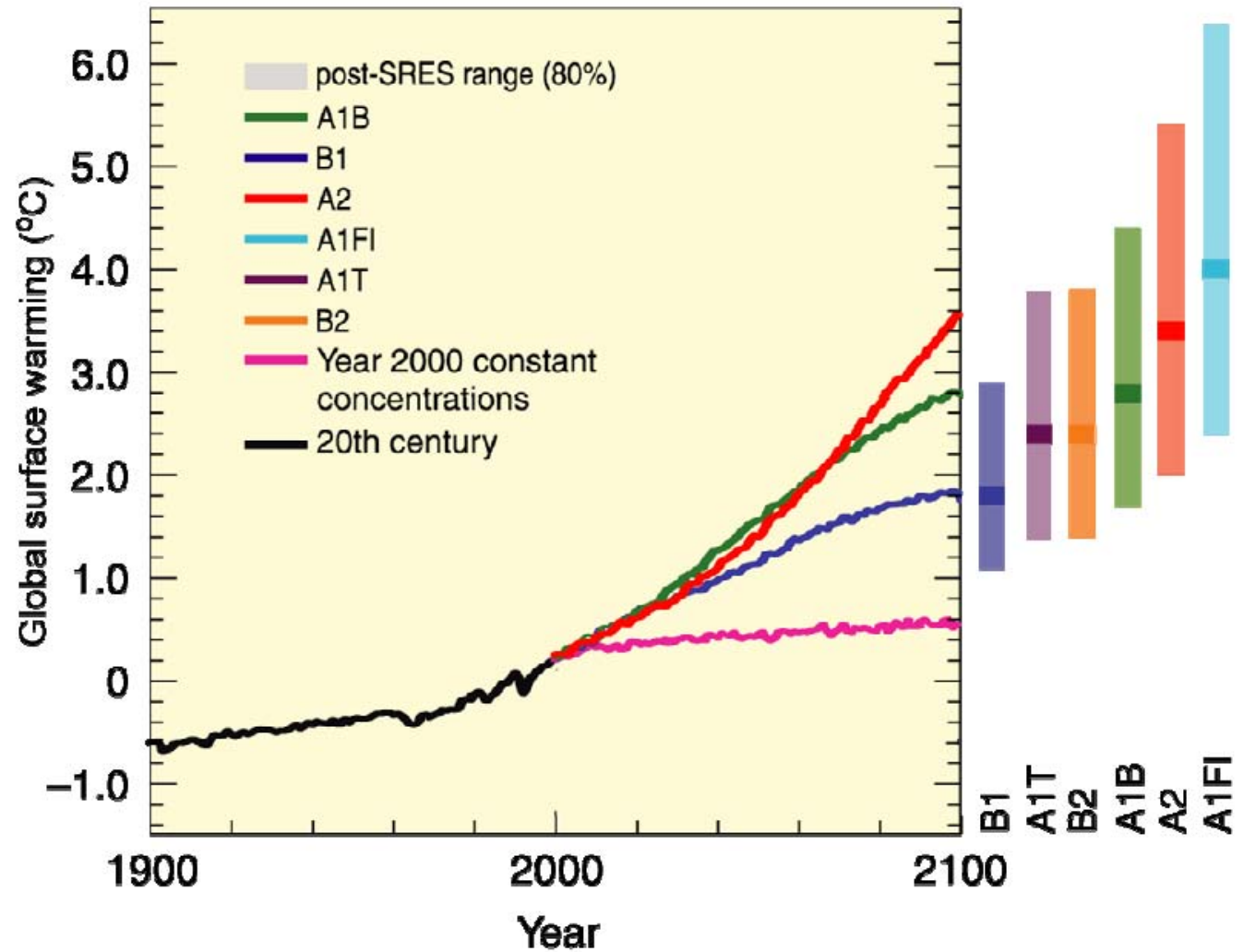
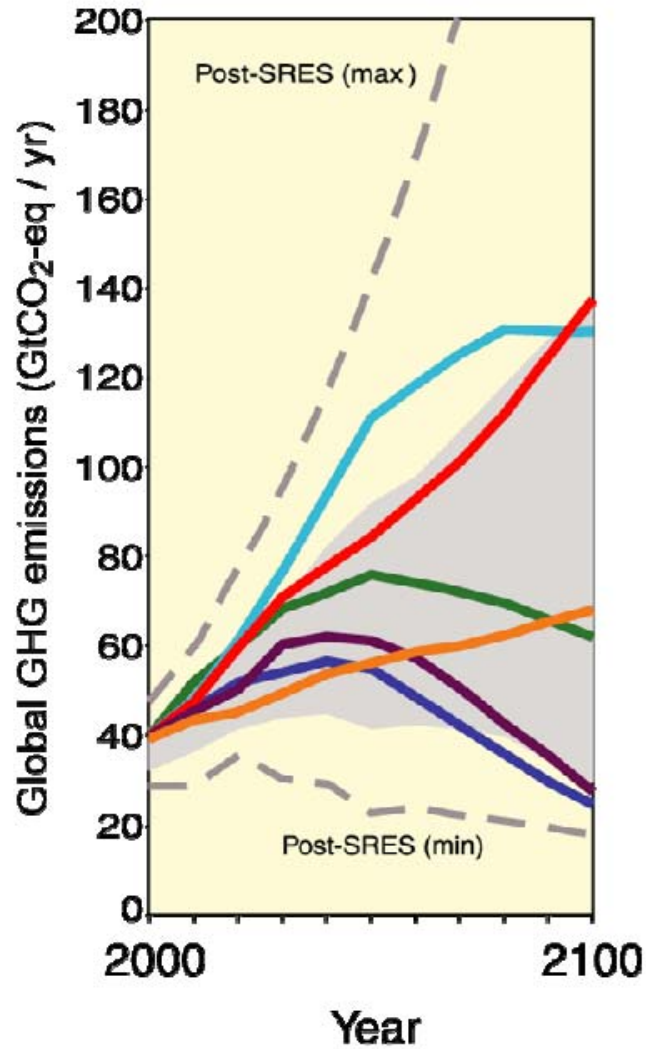
**B2:** A world with an emphasis on local solutions to economic and environmental sustainability



# On projette un changement dans la composition de l'atmosphère, qui impliquera une augmentation de la température et du niveau des mers (schéma provenant du rapport du GIEC de 2001)



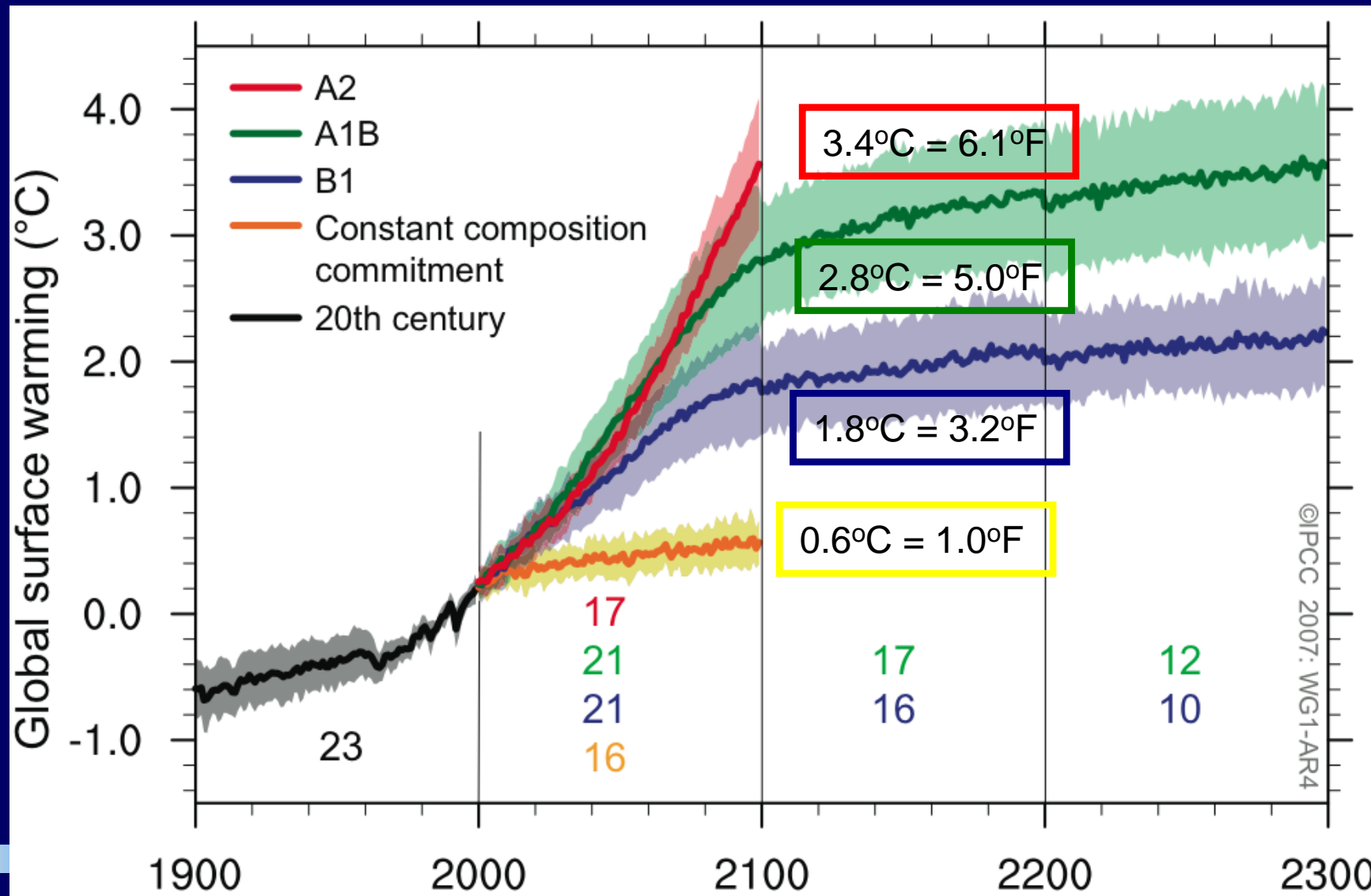
# Projections du climat futur en l'absence de mesures



NB: écart par rapport à la moyenne 1980-1999

# Projections futures

Le réchauffement continuera si les concentrations de GES augmentent. Si les concentrations étaient maintenues au niveau actuel, un réchauffement inexorable de 0.6°C se produirait d'ici à 2100. Un réchauffement plus large se produira pour les concentrations plus élevées.



Equ. CO<sub>2</sub>

850

600

400

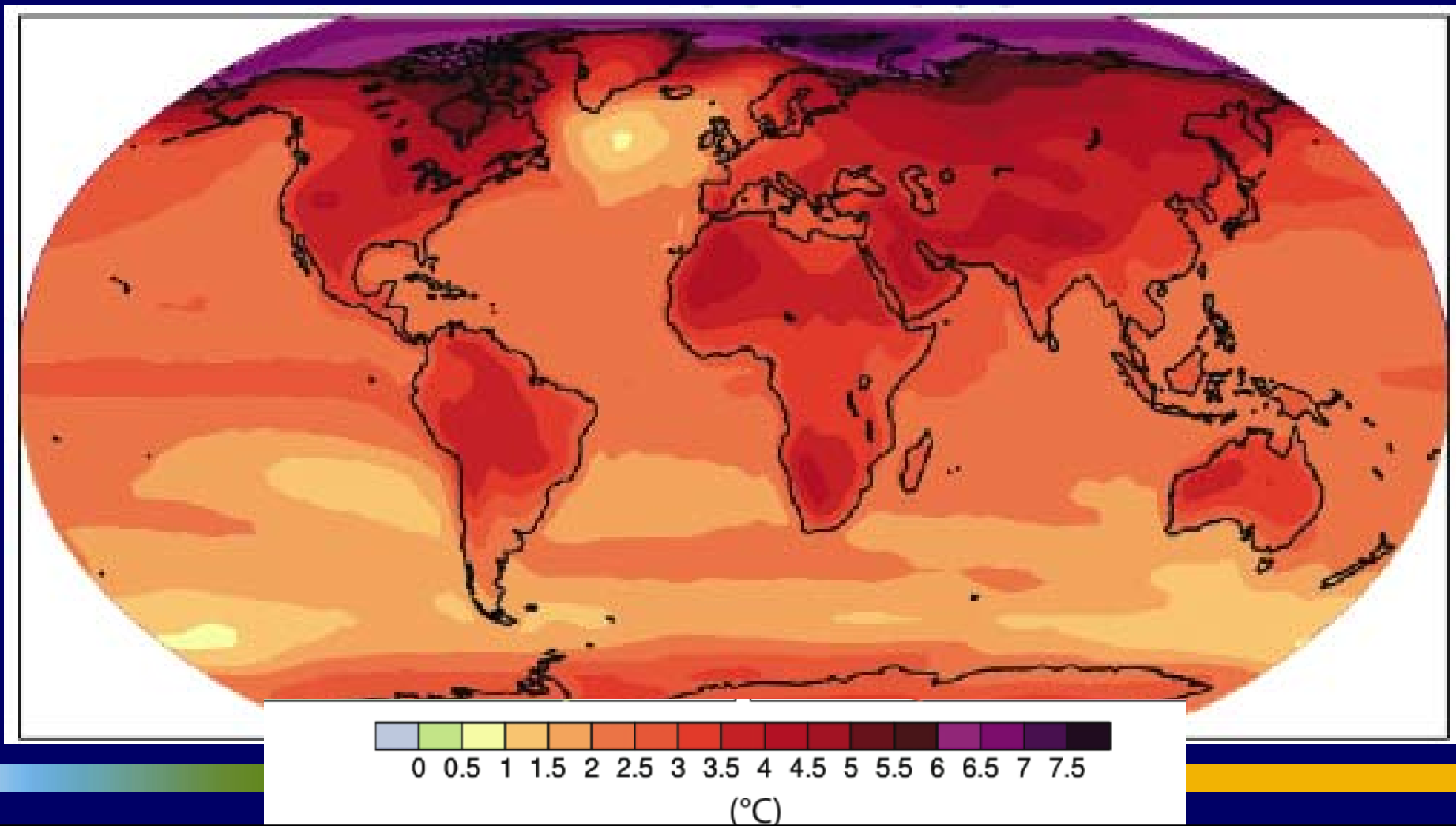
# Projected globally averaged surface warming and sea level rise at the end of the 21st century

	Temperature Change (°C at 2090-2099 relative to 1980-1999) <sup>a</sup>		Sea Level Rise (m at 2090-2099 relative to 1980-1999)
Case	Best estimate	<i>Likely</i> range	Model-based range excluding future rapid dynamical changes in ice flow
Constant Year 2000 concentrations <sup>c</sup>	0.6	0.3 – 0.9	NA
B1 scenario	1.8	1.1 – 2.9	0.18 – 0.38
A1T scenario	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.45
B2 scenario	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.43
A1B scenario	2.8	1.7 – 4.4	0.21 – 0.48
A2 scenario	3.4	2.0 – 5.4	0.23 – 0.51
A1FI scenario	4.0	2.4 – 6.4	0.26 – 0.59

A1B est un scénario “business as usual” typique

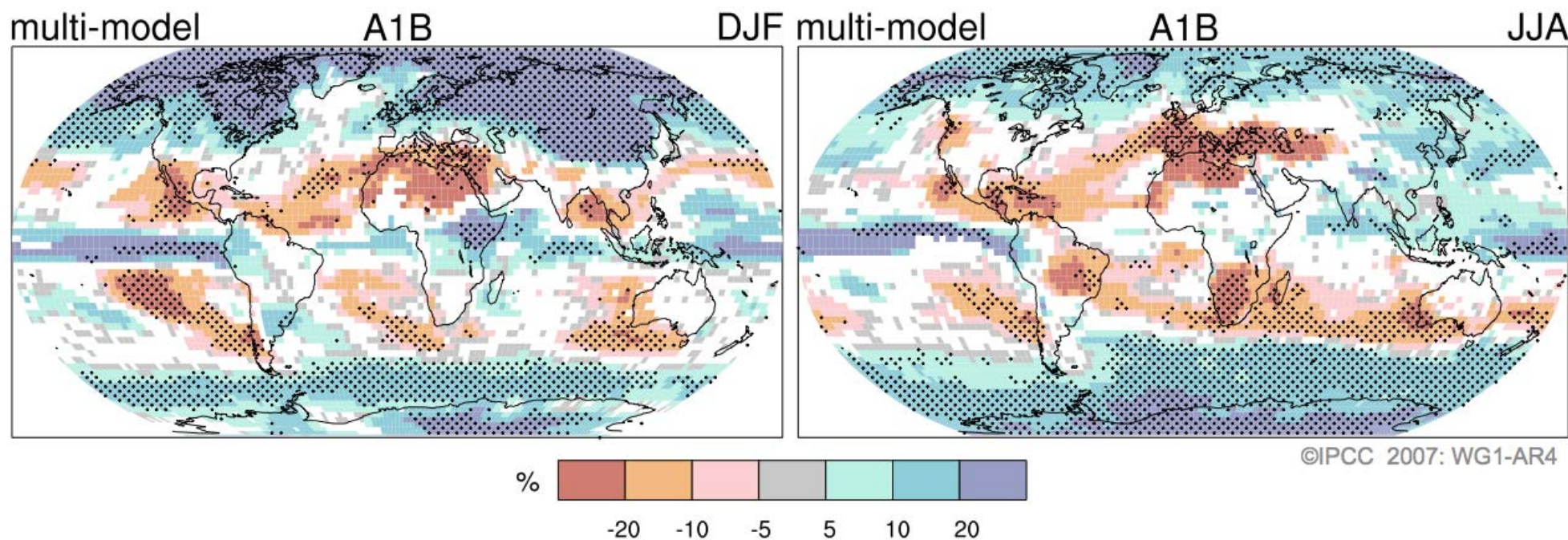
Réchauffement global (2090-2100) :  $2.8^{\circ}\text{C}$ ;  
Régions continentales se réchauffent de  $\sim 3.5^{\circ}\text{C}$ ,  
l'Arctique se réchauffe de  $\sim 7^{\circ}\text{C}$ .

Plus faible réchauffement pour émissions plus faibles



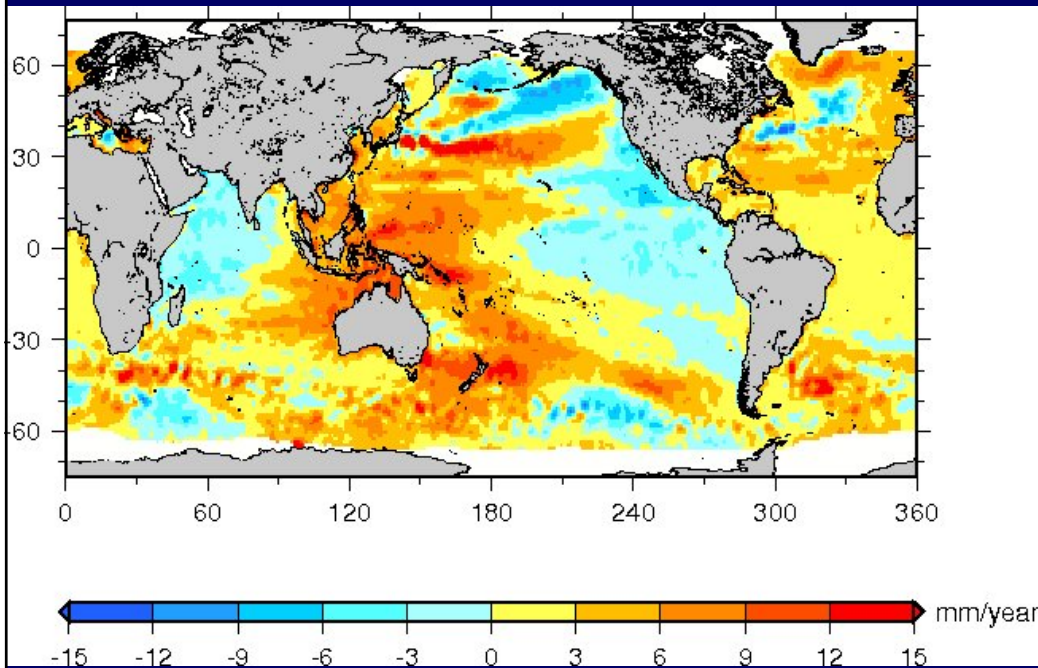
# Projections du changement climatique futur

## Projected Patterns of Precipitation Changes



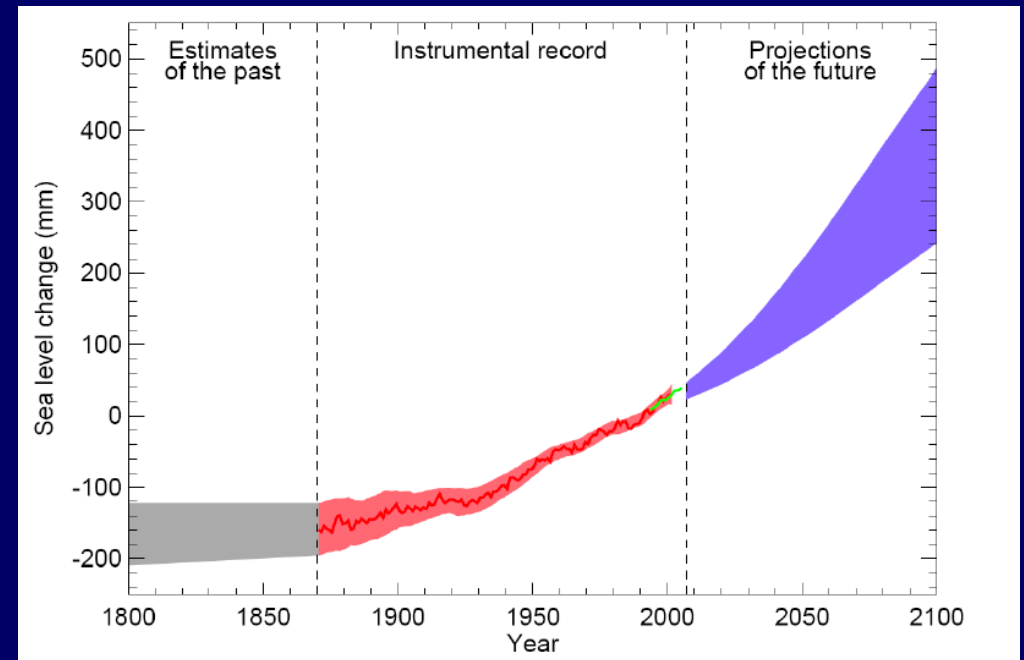
AR4 : Assèchement dans la majeure partie des régions sub-tropicales, plus de pluie aux hautes latitudes, Continue les tendances déjà observées.

# Quoi d'autre dans un monde chaud ?



Observations satellites d'élévation de niveau des mers 1993-2003.

Elévation du niveau des mers au 20<sup>ème</sup> siècle : 0.17m, principalement par dilatation océanique, plus contribution de fonte de glaciers (Alaska, Patagonie, Europe....).



Changements futurs (dilatation +glaciers) jusqu'à 0.5 m d'ici à 2100, et jusqu'à 1 mètre dans les 2-3 prochains siècles. A nouveau, dépend du niveau d'émissions des GES.

Autres processus ? Tels que débâcles rapides

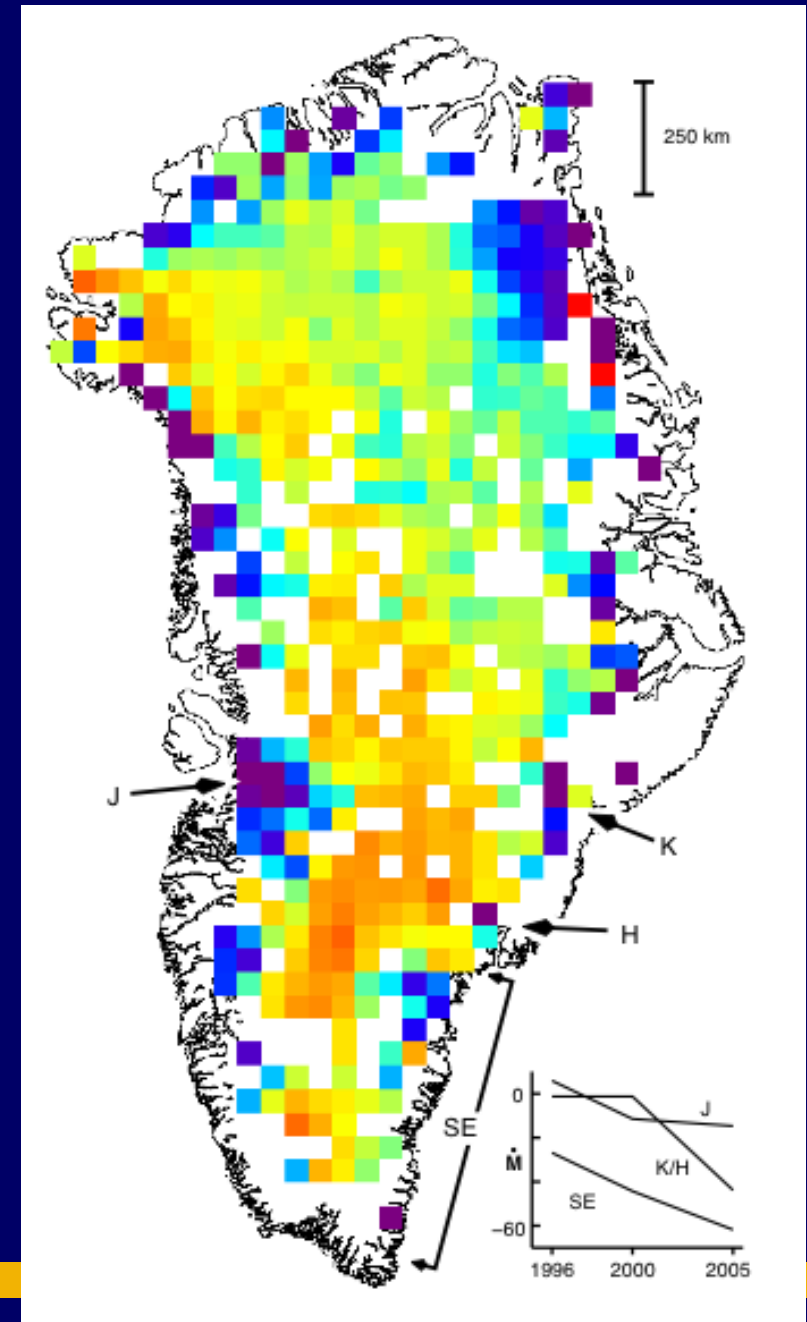


# Élévation du niveau des mers et calottes polaires

Groenland = 7 mètres d'élévation du niveau des mers. Peut fondre lentement et augmenter le niveau des mers sur des échelles de temps millénaires, pour un réchauffement supérieur à 2-5°C.

MAIS des débâcles rapides ont été observées, et ne sont pas représentées dans les modèles.

Possibilité d'élévation du niveau des mers plus rapide que prévu ? Certaines études suggèrent que c'est transitoire, d'autres que ça peut s'accélérer...



# Principales incertitudes



- **Microphysique des nuages**
- **Effets radiatifs des aérosols**
- **Interactions biosphère-atmosphère**
- **Stabilité de la circulation océanique**
- **Stabilité des calottes glaciaires**
- **Distribution des effets sur les pluies**
- **Fréquence & intensité des événements extrêmes**



# Pour en savoir plus...



- z [www.climate.be](http://www.climate.be) : ASTR-UCL
- z [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch) : IPCC ou GIEC
- z [www.unfccc.int](http://www.unfccc.int) : Convention & Pprotocole
- z [www.cfdd.be](http://www.cfdd.be) : Conseil fédéral  
développement durable
- z [www.climat.be](http://www.climat.be) : campagne climat du Gvt
- z [jcm.chooseclimate.org](http://jcm.chooseclimate.org) : modèle interactif du  
Dr B. Matthews, UCL-ASTR
- z [www.realclimate.org](http://www.realclimate.org): réponse aux sceptiques