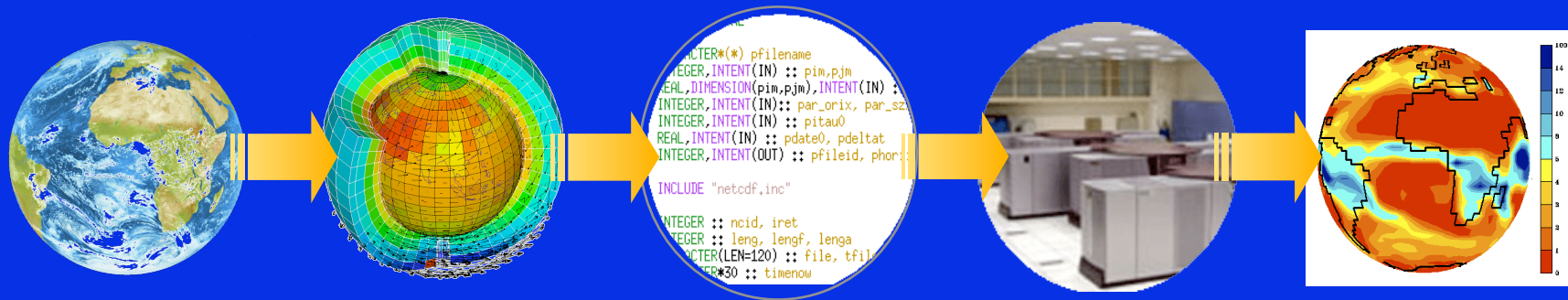


Une hiérarchie de modèles de complexité croissante pour simuler les climats passés et futurs



Myriam Khodri
Institut de Recherche pour le Développement (IRD)

Que veut-on modéliser?



Les atmosphères des planètes du système solaire se composent de divers gaz, de particules, et de liquide.

Les atmosphères sont également dynamiques permettant la redistribution de chaleur et d'autres formes d'énergie.

Ici, nuages de cirrus dérivant à travers le ciel bleu au-dessus des montagnes San Miguel (Colorado).

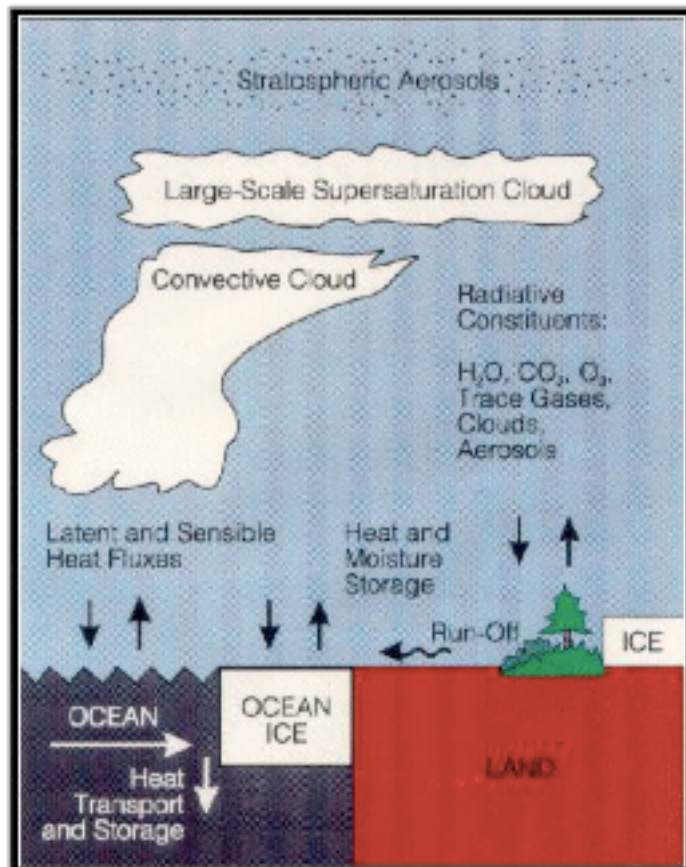
Peut-on modéliser les caractéristiques fondamentales de l'atmosphère?

Que veut-on modéliser?

- Climat à la surface terrestre traditionnellement défini par les cycles saisonniers de la température et des précipitations, éventuellement des vents
- Simulation du **bilan radiatif** qui va déterminer Température, Humidité, Précipitation, Pression atmosphérique et vents
- Ces variables dépendent de beaucoup de facteurs, par exemple:
 - Le type de surface (via l'albédo)
 - La circulation atmosphérique (transport d'air plus ou moins chaud et/ou humide)

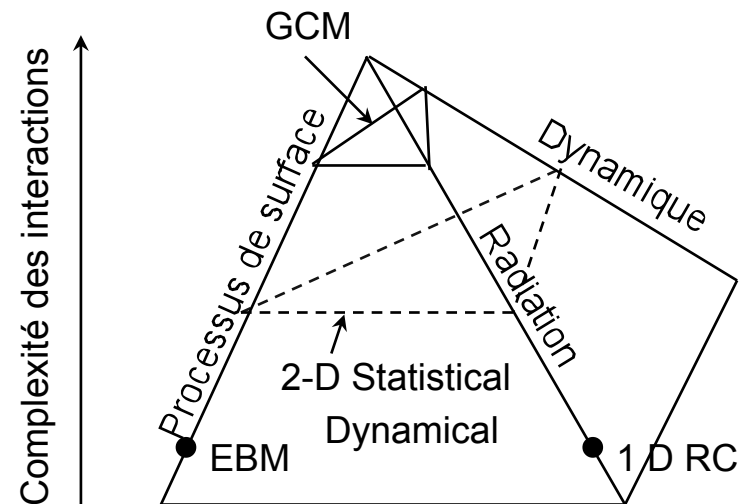
Le système climatique (1)

Atmosphère, océan, végétation
cryosphère (glaciers, banquise)



D'après Hanse et al, 1990)

Pyramide des modèles de climat



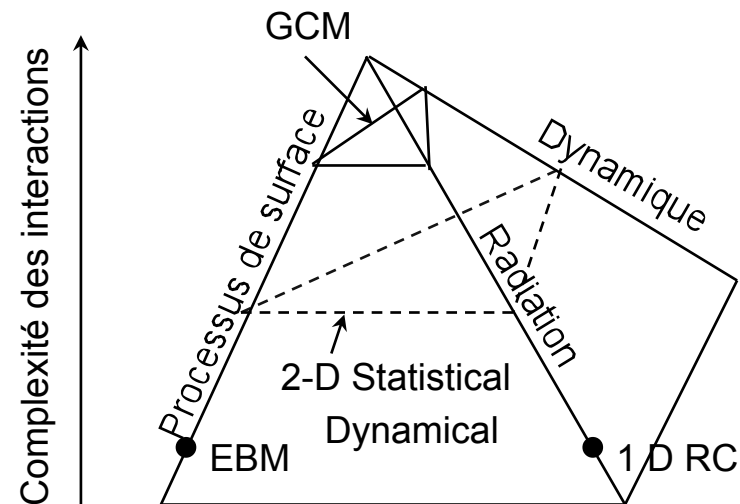
D'après Henderson-Sellers and McGuffie 1990)

Le système climatique (2)

Interaction entre forçage solaire, bilan radiatif et le système interne

- 1 Comment le calcul du bilan radiatif détermine le bilan énergétique de la Terre
- 2 Comment la dynamique et les mouvements d'énergie dans l'atmosphère sont représentés
- 3 Comment les processus de surface sont représentés
- 4 La résolution dans l'espace et le temps

Pyramide des modèles de climat



D'après Henderson-Sellers and McGuffie 1990)

Le système climatique (3)

- Une variable telle que la température à la surface terrestre dépend de l'état de chacune des composantes du système climatique
- Ces rétroactions à l'intérieur du système climatique sont très importantes
- Idéalement, un modèle de climat devrait inclure une représentation de chacune des composantes du système climatique

Approche générale

- Modèle: ensemble d'hypothèses, de processus, dont on pense qu'ils sont nécessaires pour une représentation satisfaisante du climat pour la question que l'on se pose
- Une question, un modèle ou plusieurs modèles

Plusieurs types de modèles

- Modèles de circulation générale (pour l'atmosphère et l'océan)
Les plus détaillés dans la description de ces composantes, et donc les plus coûteux en temps de calcul → au maximum 1000 ans de simulation
- Modèles de complexité intermédiaire
Une représentation simplifiée des composantes rapides (atmosphère, océan aussi, parfois) pour pouvoir représenter d'autres composantes (végétation, calottes glaciaires) et l'évolution du système climatique sur de longues périodes de temps
- Modèles simples:
peu de variables prises en compte,
mise en évidence de certains mécanismes

Modèles de circulation générale

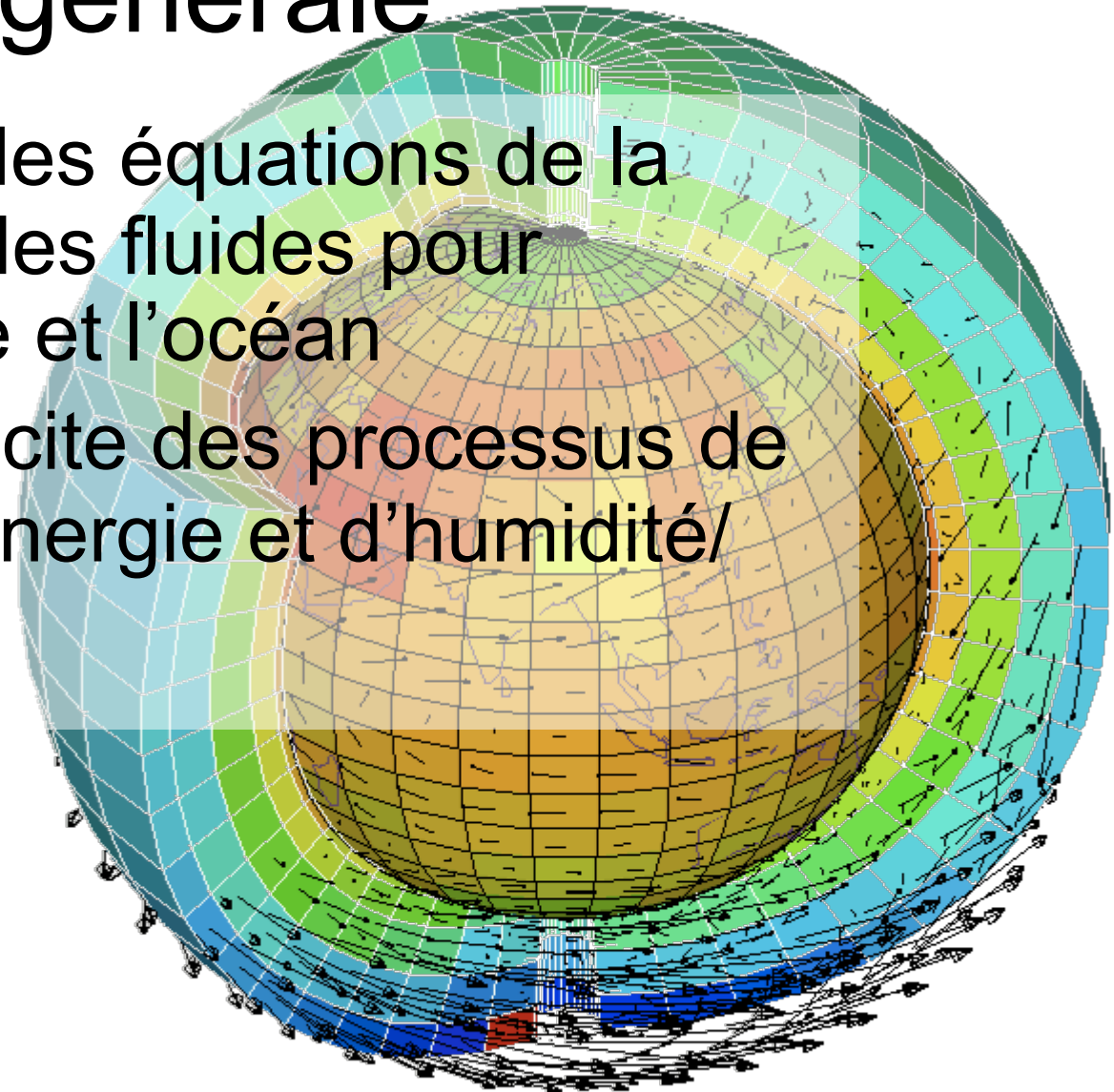
- Discrétisation des équations de la mécanique des fluides pour l'atmosphère et l'océan
- Simulation explicite des processus de transport d'énergie et d'humidité/
de sel
- Dans chaque cellule

Résolutions des équations fondamentales:

- Conservation de l'énergie
- Conservation du moment
- Conservation de la masse
- Conservation de l'eau
- Lois des gaz rares

Paramétrisation:

- Basées sur des données empiriques ou des hypothèses physiques simplifiées



Modèles de circulation générale

Il y a cinq équations physiques fondamentales utilisées pour décrire l'évolution de l'atmosphère

Basic Equations

Conservation of momentum:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} - \frac{1}{\rho} \nabla p - \vec{g} - 2\vec{\Omega} \times \vec{V} + \nabla \cdot (k \nabla \vec{V}) - \vec{F}_d$$

Conservation of energy:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho c_p (\vec{V} \cdot \nabla) T - \nabla \cdot \vec{R} + \nabla \cdot (k \nabla T) + C + S$$

Conservation of mass:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \rho - \rho (\nabla \cdot \vec{V})$$

Conservation of H₂O (vapor, liquid, solid):

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) q + \nabla \cdot (k \nabla q) + S_q + E$$

Equation of state:

$$p = \rho R_d T$$

$\vec{V}$ = velocity

T = temperature

p = pressure

ρ = density

q = specific humidity

$\vec{g}$ = gravity

$\vec{\Omega}$ = rotation of earth

$\vec{F}_d$ = drag force of earth

$\vec{R}$ = radiation vector

C = conductive heating

c_p = heat capacity, const. p

E = evaporation

S = latent heating

S_q = phase-change source

k = diffusion coefficients

R_d = dry air gas constant

Les échelles de temps en jeu

- Atmosphère: heures, jours
- Océan:
 - de surface: jours, mois
 - profond: jusqu'à plusieurs milliers d'années
- Végétation:
 - mois (e.g. cycle saisonnier de la végétation)
 - jusqu'à plusieurs centaines d'années (par exemple pour qu'une forêt grandisse)
- Cryosphère:
 - banquise: jours, mois
 - Calottes glaciaires: jusqu'à plusieurs milliers d'années

Conditions aux limites

i.e. des conditions fixes qui décrivent des paramètres qui affectent le climat, mais qui ne sont pas modifiées en retour par les calculs du modèle climatique

Pour l'atmosphère:

- Conditions à la surface
 - Distribution continent / océan
 - Type de surface continentale (végétation, calottes glaciaires, lacs)
 - Relief
- Teneur en gaz à effet de serre
- Paramètres orbitaux

Conditions initiales

i.e. la description de l'état initial du modèle

Pour l'atmosphère en chaque point:

- Température
- pression
- vents
- Humidité

Pour l'océan en chaque point:

- Température
- Salinité

Forçage climatique

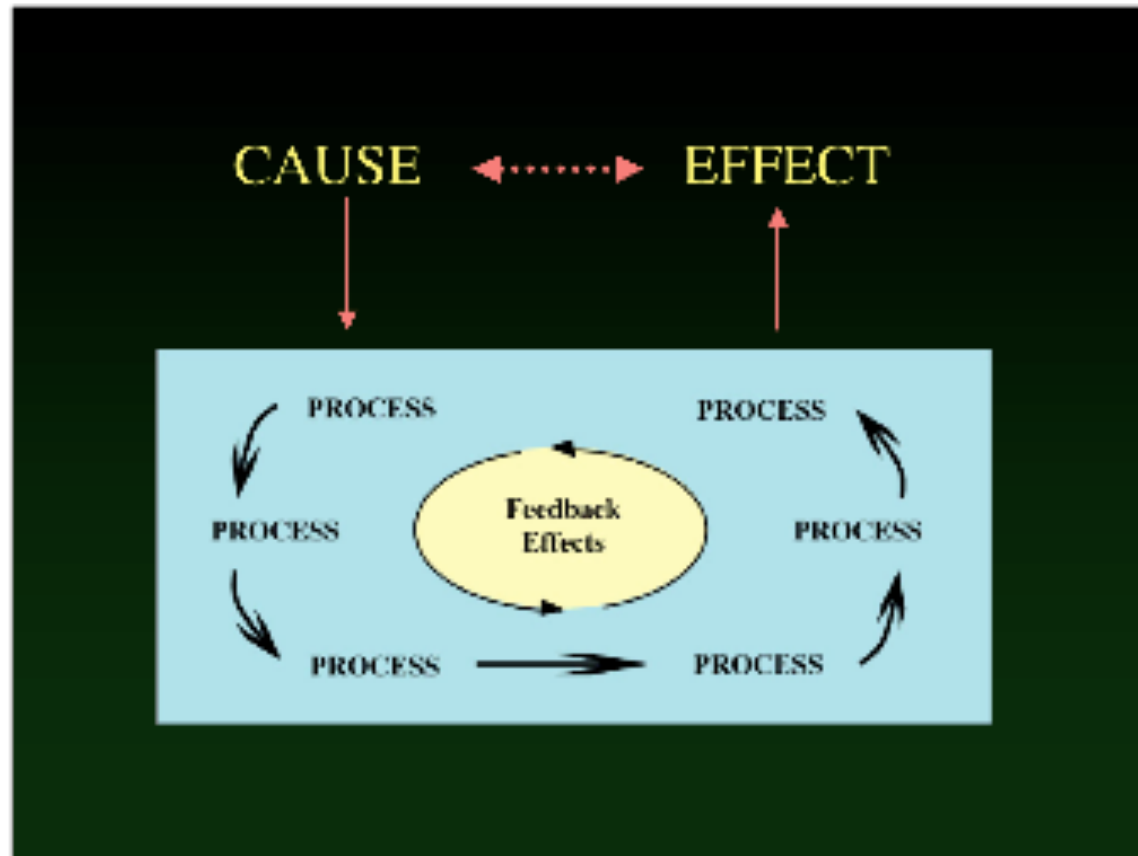
i.e. perturbation de l'état d'équilibre du système

Exemples

- Augmentation de la teneur en gaz à effet de serre pour le climat future (2x CO₂)
- Aérosols volcaniques (goutte d'acide sulfurique injectée dans l'atmosphère)
- Paramètres orbitaux et leur impact sur l'insolation
- Présence de calotte de glace (Dernier Maximum Glaciaire, il y a 21 000 ans)

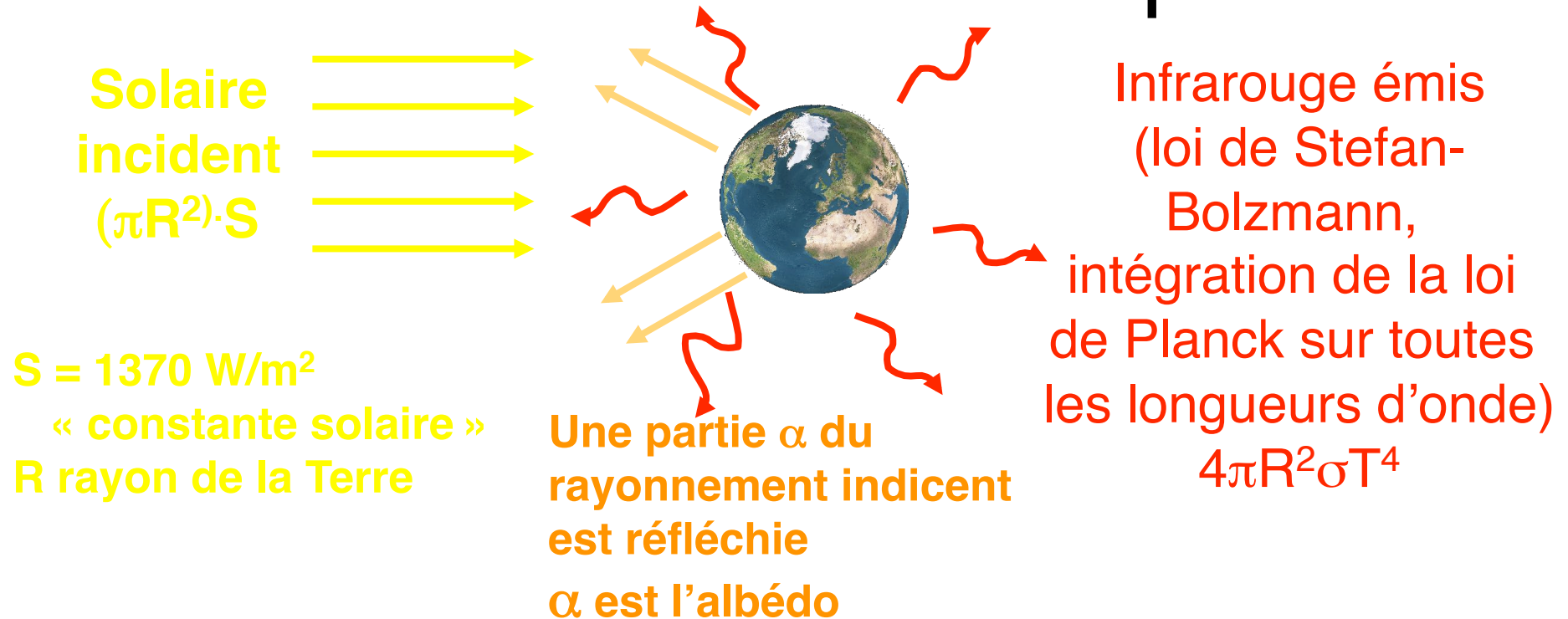
Rétroactions climatiques

Feedbacks



Rétroactions dominantes: Vapeur d'eau, nuages, albédo de la glace

Rétroactions climatiques



$$R = (S_0/4)(1 - \alpha) - \text{OLR}$$

R Budget Radiatif

S_0 = insolation

α = albédo planétaire

OLR = Infrarouge

émis au sommet

Rétroactions du système climatique

A l'équilibre $R = 0$

Perturbation $\Delta Q =$ forçage radiatif

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

λ Paramètre de feedback

Les plus importants:

1. la vapeur d'eau
2. l'albédo de la glace
3. les nuages

Rétroactions du système climatique

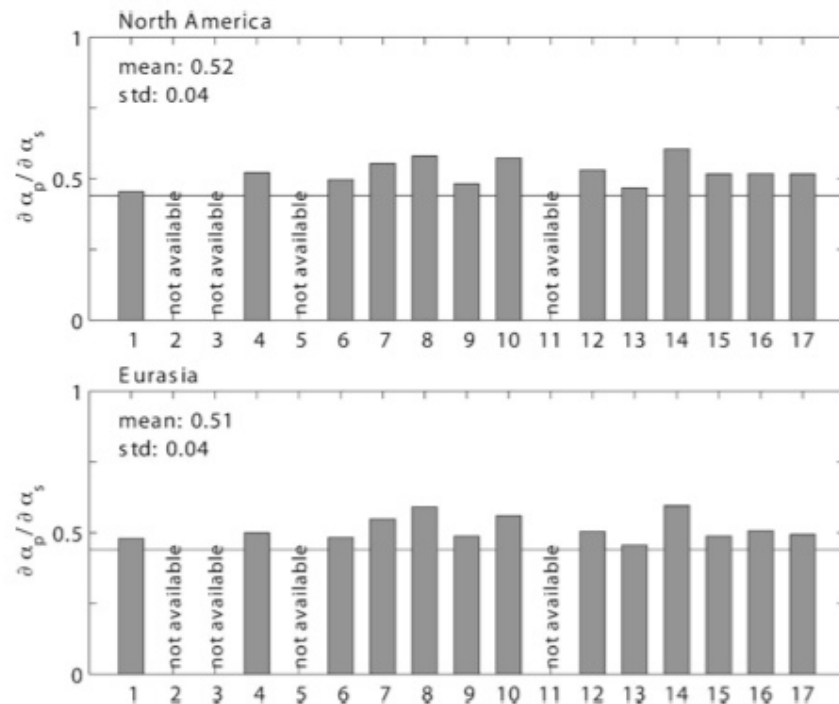
Si la température augmente en réponse à $2\times\text{CO}_2$...

- + de vapeur d'eau dans l'atmosphère : augmentation de l'effet de serre lié à ce gaz
- de glace de mer aux pôles : diminution de l'albédo, diminution de l'énergie réfléchie vers l'espace
- + de nuages (?) rétroaction positive ou négative (via albédo et effet de serre)

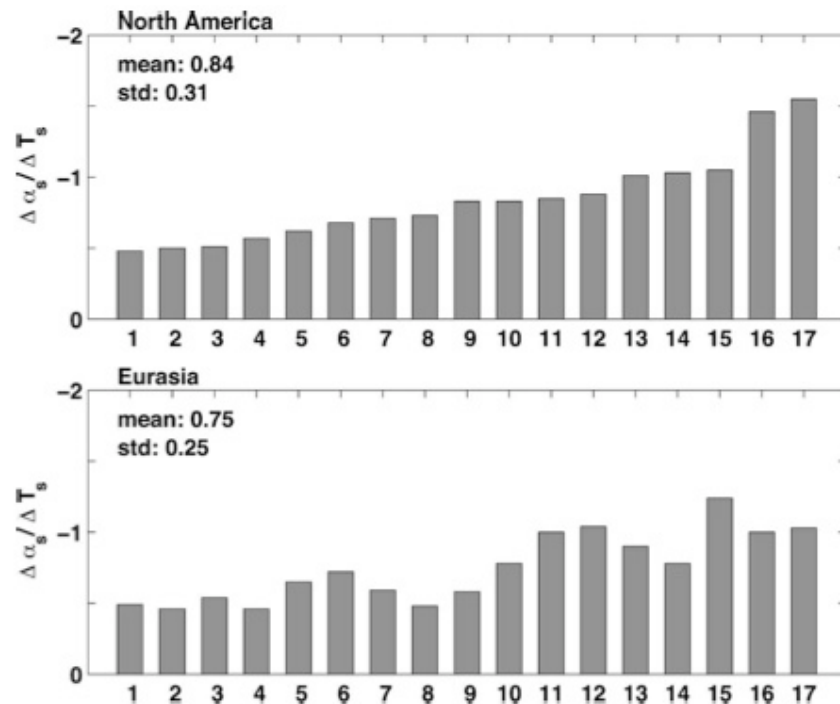
→ Quel bilan ?

Rétroactions du système climatique albédo

Albédo planétaire vs albédo surface



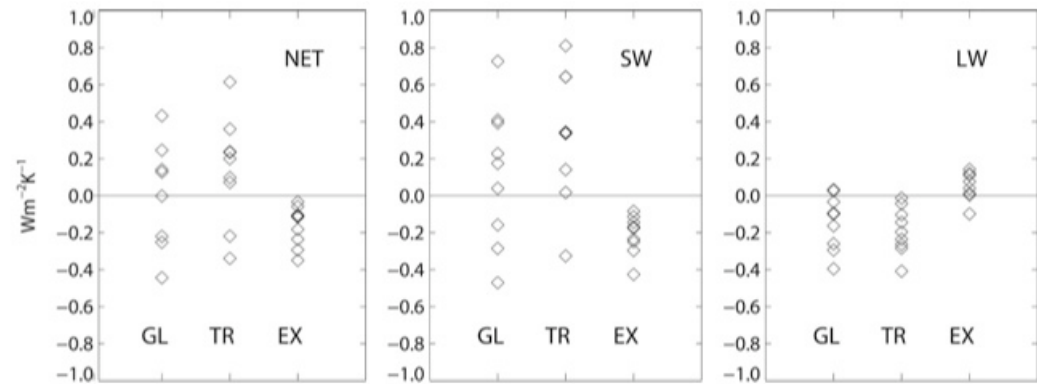
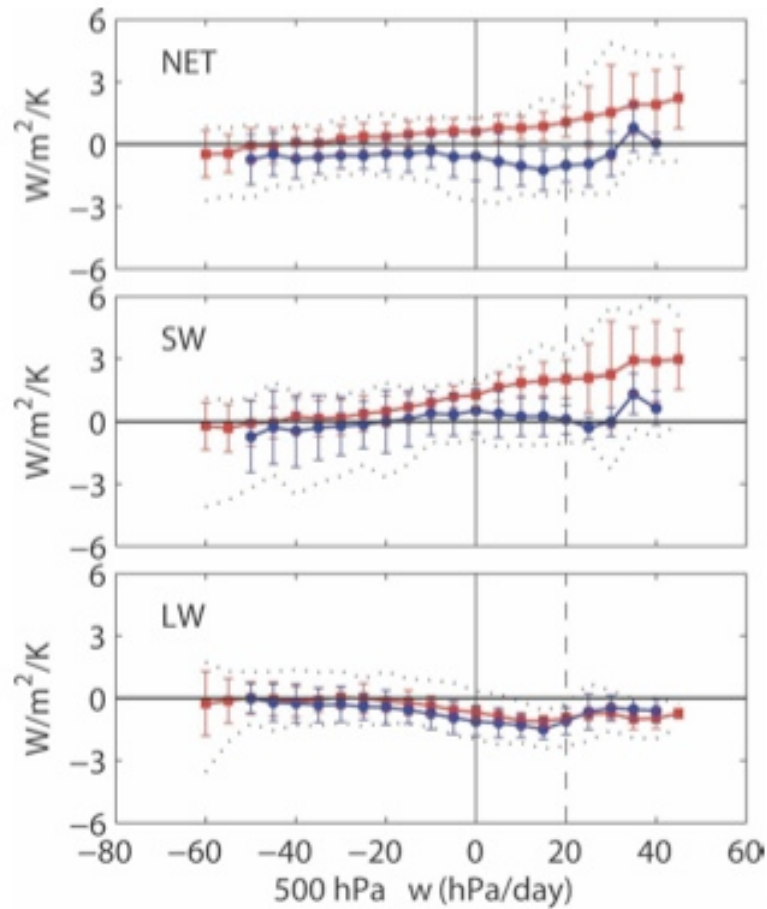
Feedback de l'albédo surface sur T_s



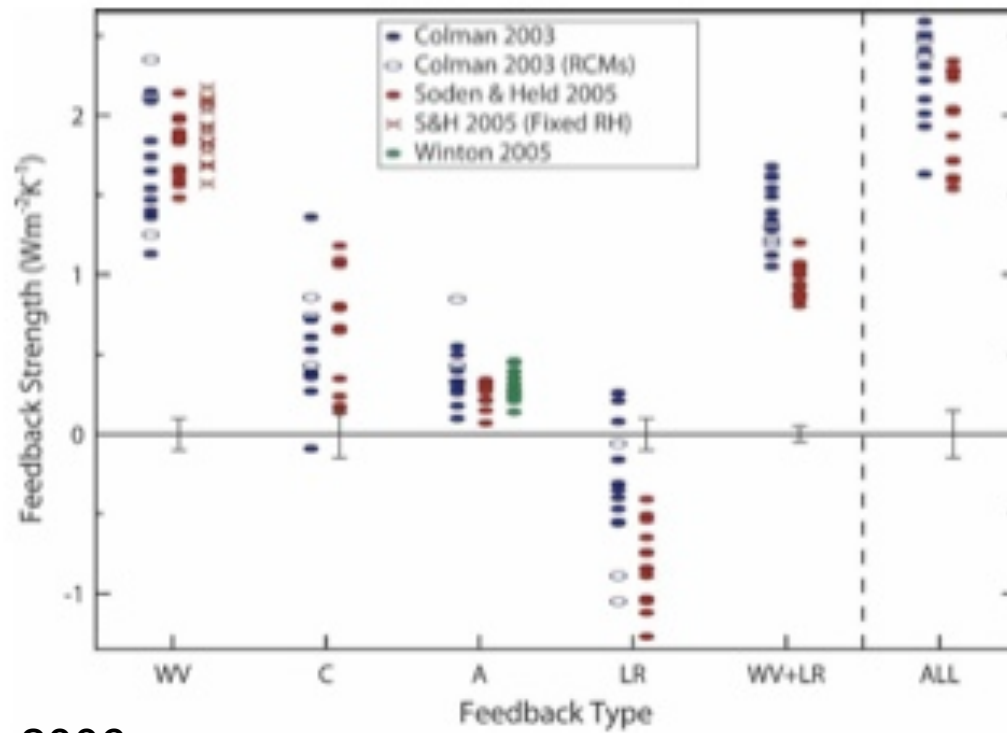
50% Albédo planétaire expliqué par albédo surface

Bony et al, 2006

Rétroactions du système climatique les nuages

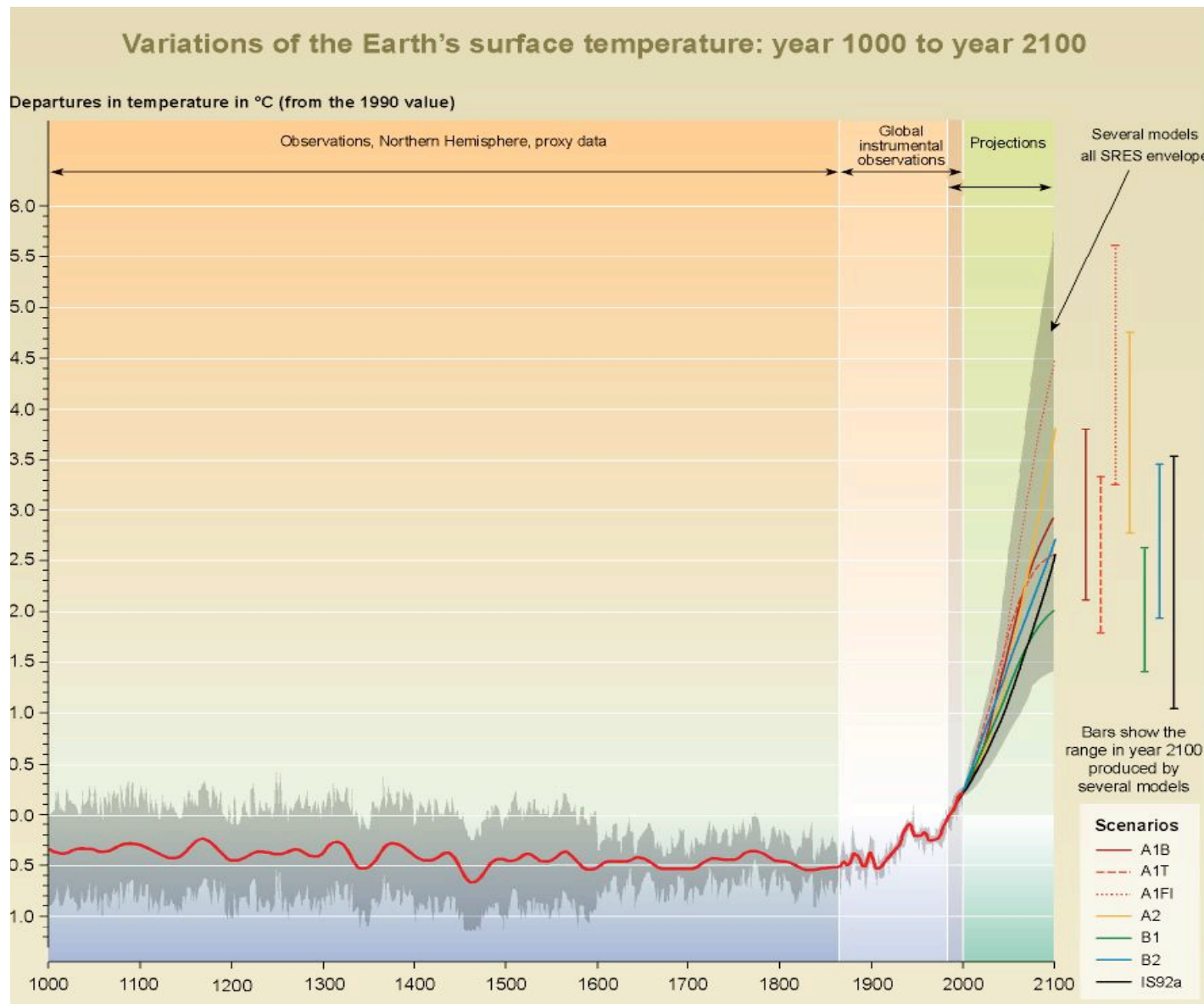


Bilan....

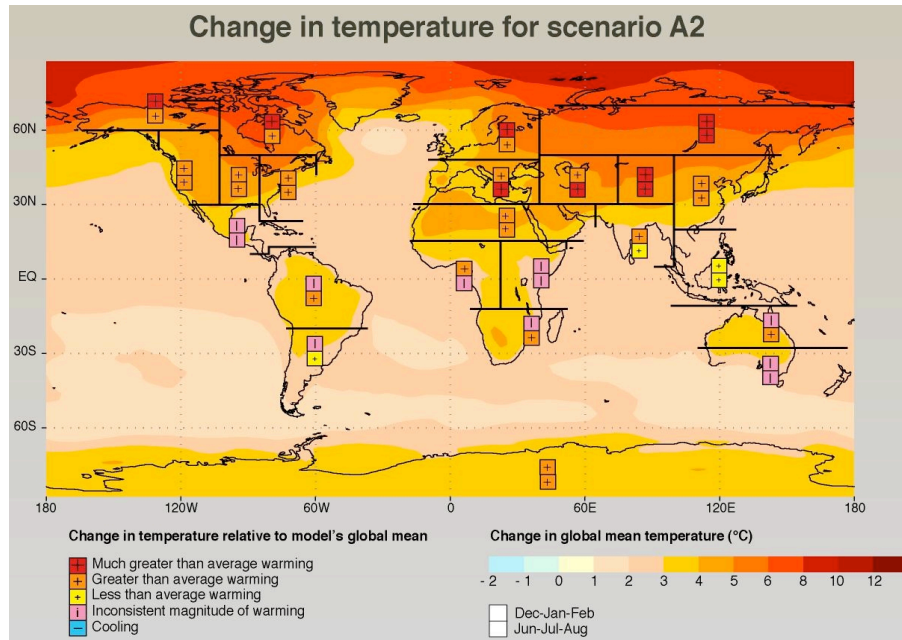


Bony et al, 2006

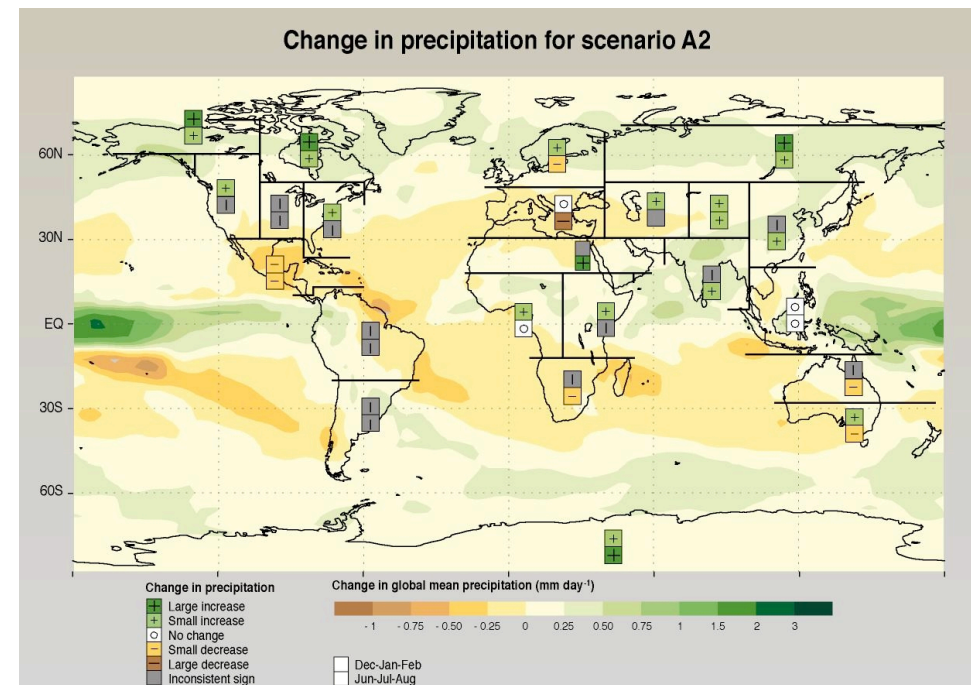
Prévisions climatiques



Répartition géographique des changements climatiques



IPCC Fourth assessment report, 2007,
<http://www.ipcc.ch/>



Exemple du Dernier Maximum Glaciaire (il y a 21000 ans)

- Conditions du projet PMIP

Forçage climatique:

- Calottes Peltier ICE4G
- SST/banquise CLIMAP
- Gaz à effet de serre:
CO₂: 185 ppm (280 ppm)
CH₄: 350 ppb (760 ppb)
N₂O: 200 ppb (270 ppb)

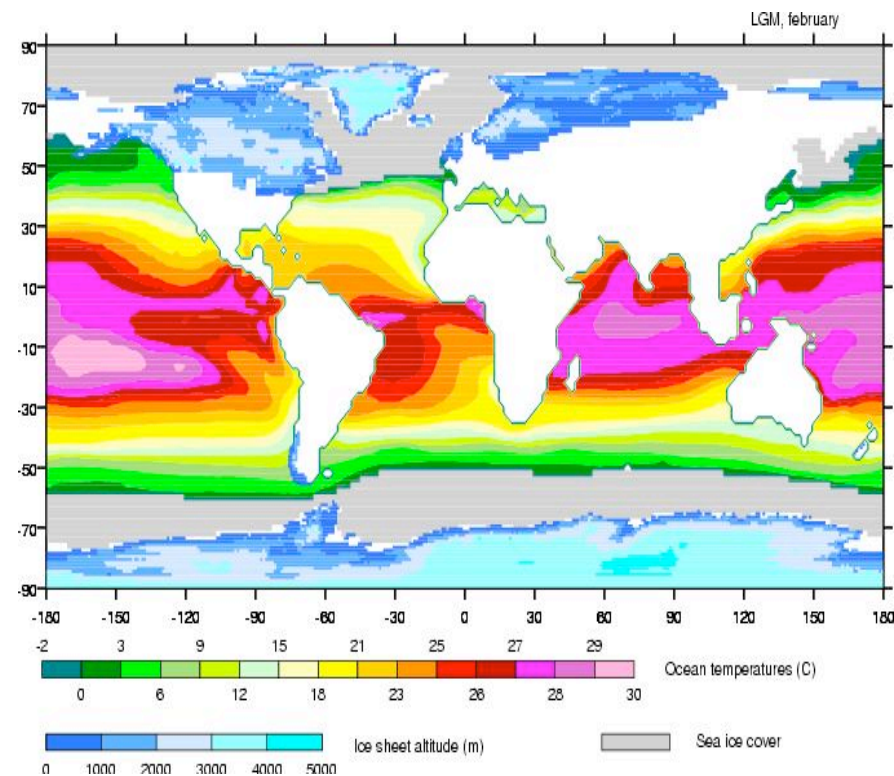


Figure provided by M. Kageyama (LSCE)

Dernier Maximum Glaciaire

- Résultats des modèles du projet PMIP(1995):
Températures annuelles (LGM-CTRL),
moyenne de tous les modèles

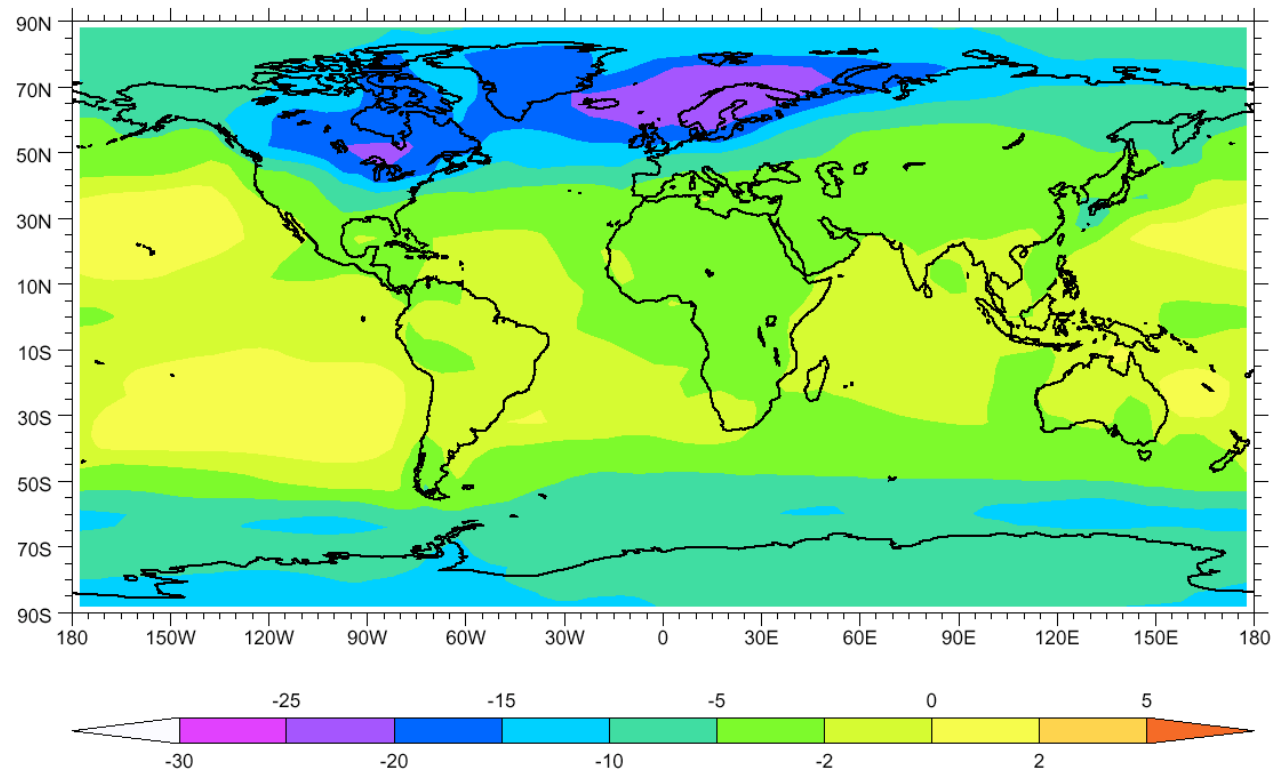
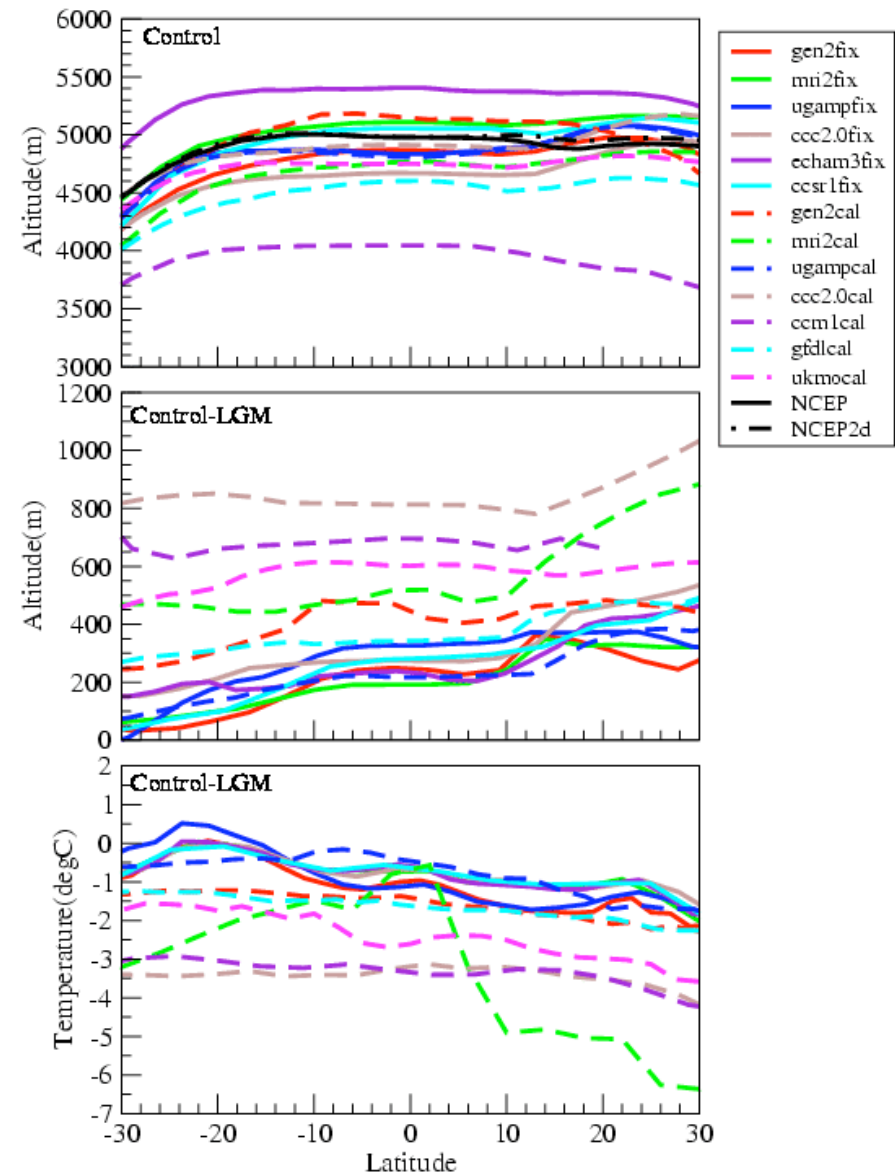


Figure provided by M. Kageyama (LSCE)

Dispersion des résultats des modèles

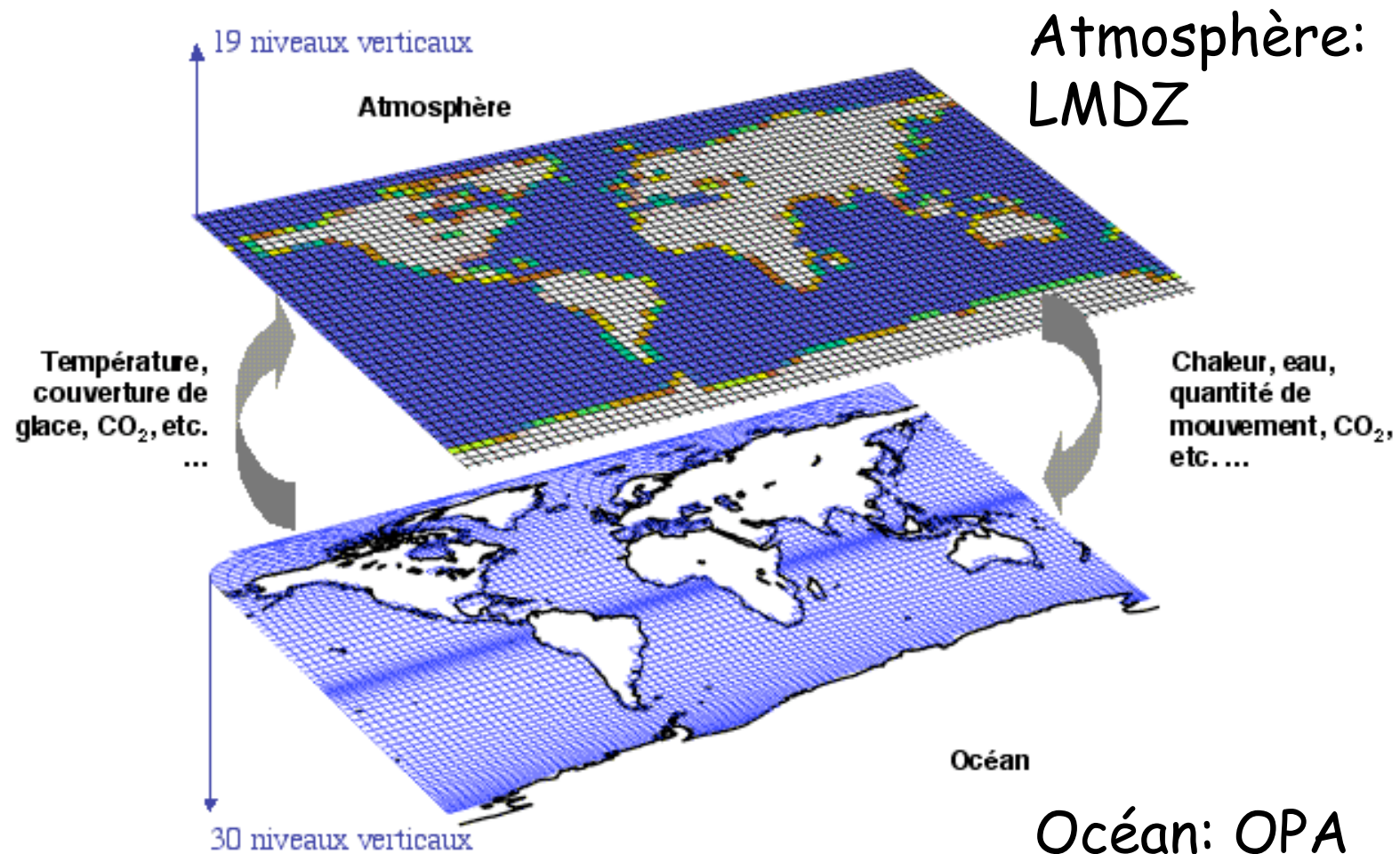
- Les modèles n'utilisent pas les mêmes paramétrisations, leurs résultats sont différents
- Ici, exemple de l'altitude maximale atteinte par l'isotherme 0°C



Kageyama et al, 2005

Modèles couplés océan-atmosphère

Exemple du modèle de l'IPSL



Conditions initiales

- Peu importantes pour l'atmosphère, qui s'ajuste vite (< 1 an)
- Très importantes pour l'océan, dont la circulation profonde peut mettre plusieurs (dizaines, centaines d') années à s'ajuster

MAIS

On n'a plus besoin de cartes globales de SST et banquise

Les évolutions de l'océan et de l'atmosphère sont calculées de manière cohérente

Coûts de calcul

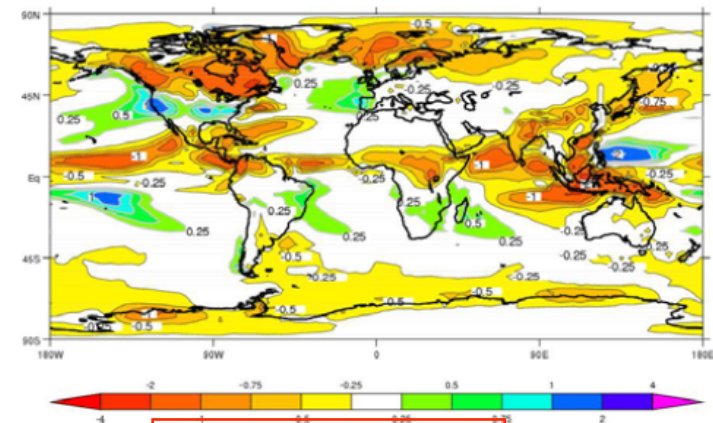
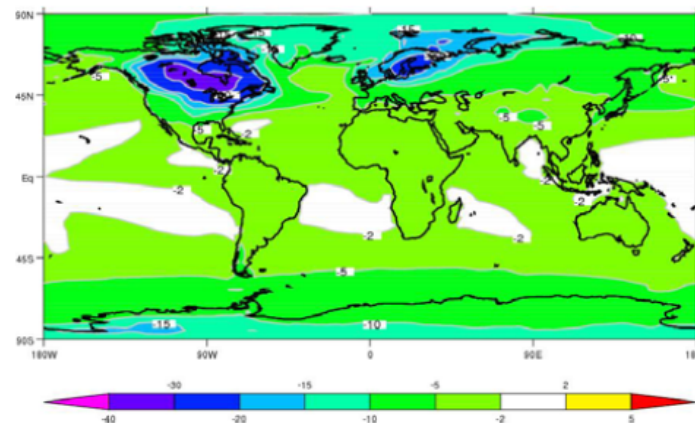
- Modèle de l'IPSL, basse résolution, sur le super ordinateur du CEA (NEC-SX8)
 - Coût lié majoritairement au modèle d'atmosphère: ~30 min de calcul pour un mois de simulation
 - Pour une simulation de plusieurs centaines d'années, il faut plusieurs mois de calcul

Modélisation du climat du DMG avec des modèles couplés AO

Annual mean temperature

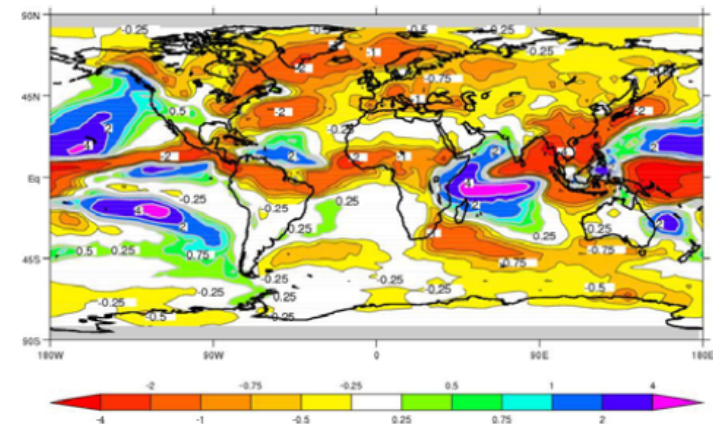
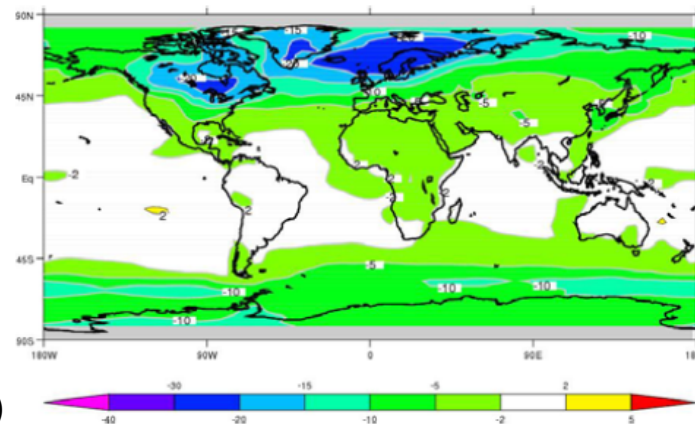
Annual mean precipitation

(a) PMIP2 OA mean model



Larger cooling
at high
latitudes,
Larger cooling
on land

(b) PMIP1 SSTf mean model

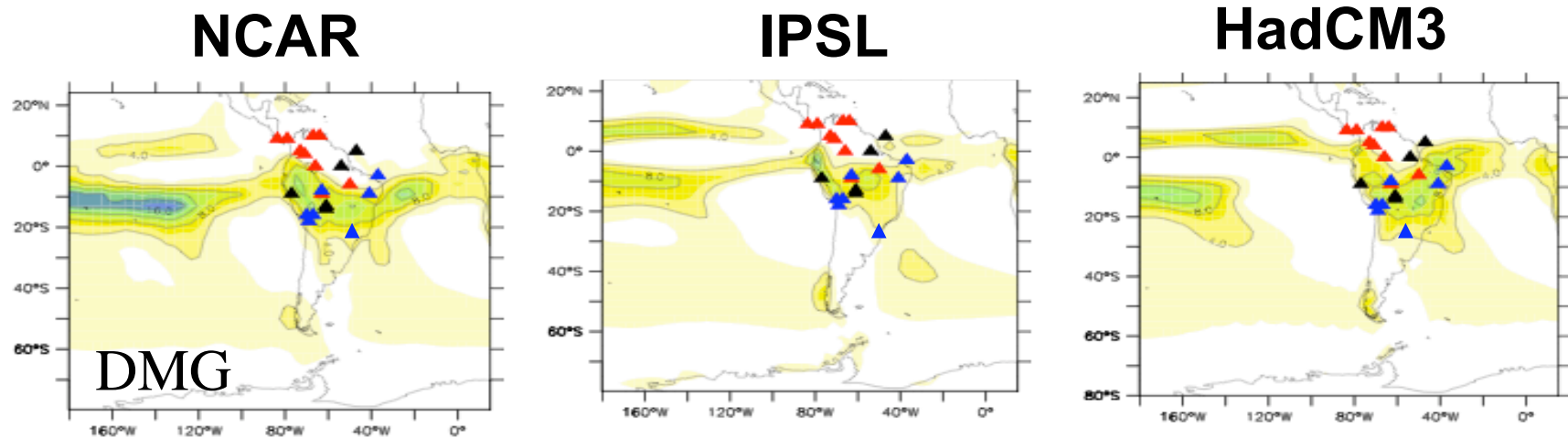


Mainly drier

Figures provided by
M. Kageyama (LSCE)

Réponse du cycle hydrologique en Amérique du Sud

Comparaison Modèle-Données



les données: + humide ▲ + sec ▲ Hiatus/+s ec ▲

DJF Precipitation (mm/day)

Approche générale

- Modèle: ensemble d'hypothèses, de processus, dont on pense qu'ils sont nécessaires pour une représentation satisfaisante du climat pour la question que l'on se pose
- Une question, un modèle

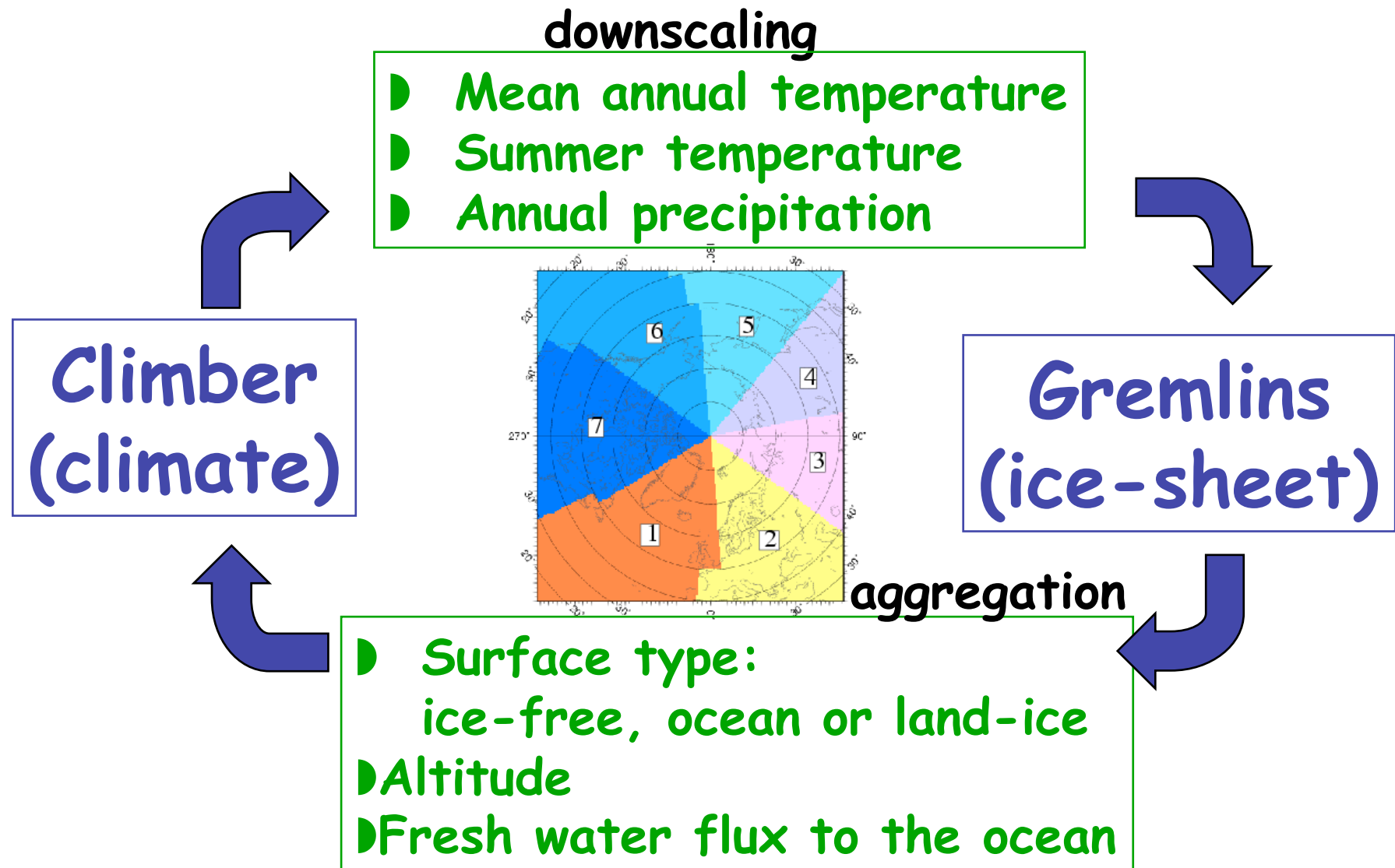
Confrontation modèles-données

- Analyse des processus à l'origine des changements de climat
 - Par exemple: rôle de chaque composante du système climatique
- La comparaison modèles-reconstructions paléoclimatiques constitue un test important pour les modèles

Utilité des modèles de complexité intermédiaire

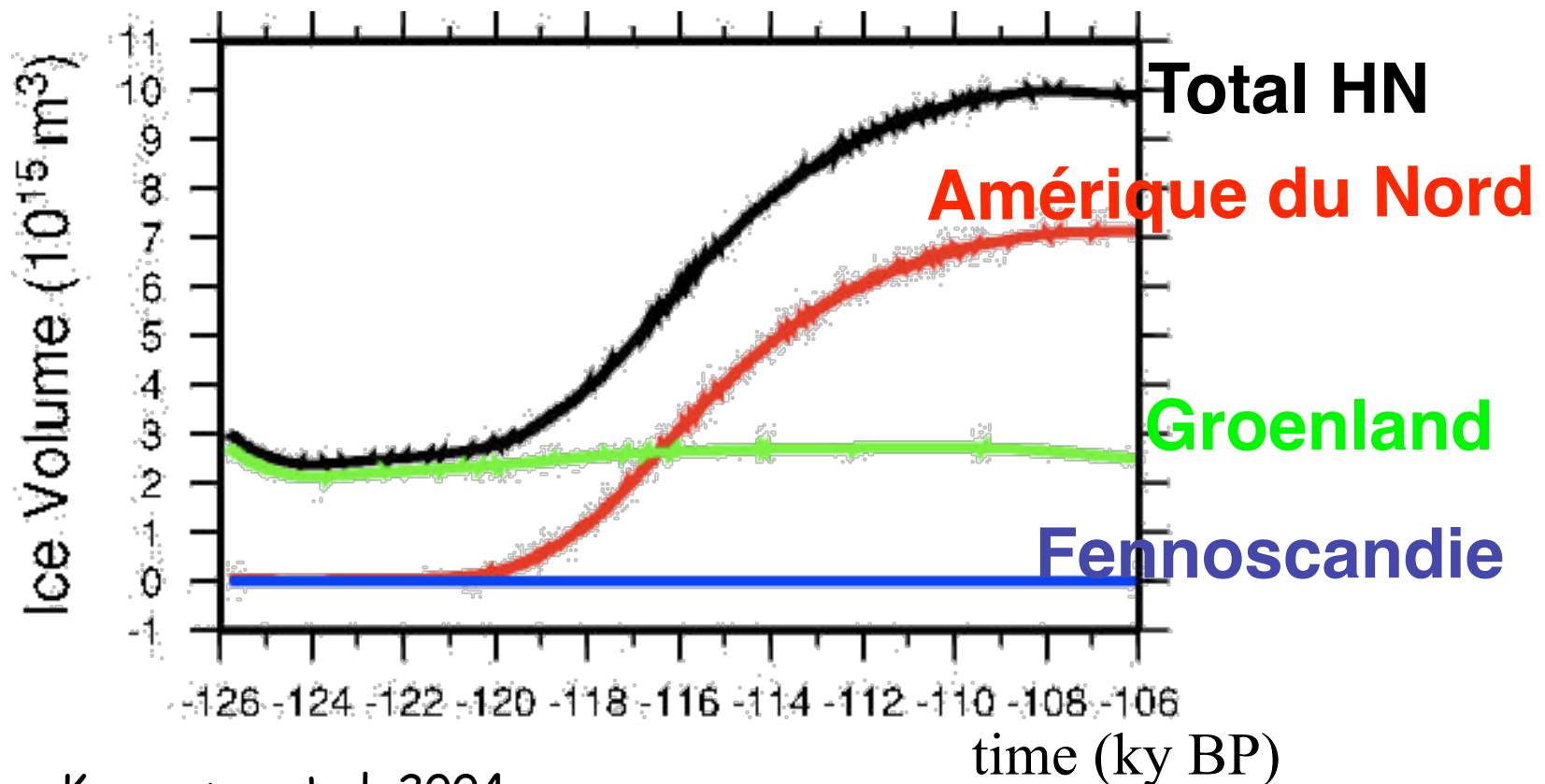
- Tests sur de nombreux scénarios
- Possibilité d'effectuer des simulations longues (10000 ans ou plus)
- Garder les hypothèses à la base de la construction du modèle à l'esprit:
 - Par exemple, pour CLIMBER: les changements de circulation océanique ne peuvent être que des changements de circulation méridienne dans un ou plusieurs bassins

Modèle climat-calottes de l'hémisphère nord



Exemple de la dernière entrée en glaciation (il y a 115000 ans)

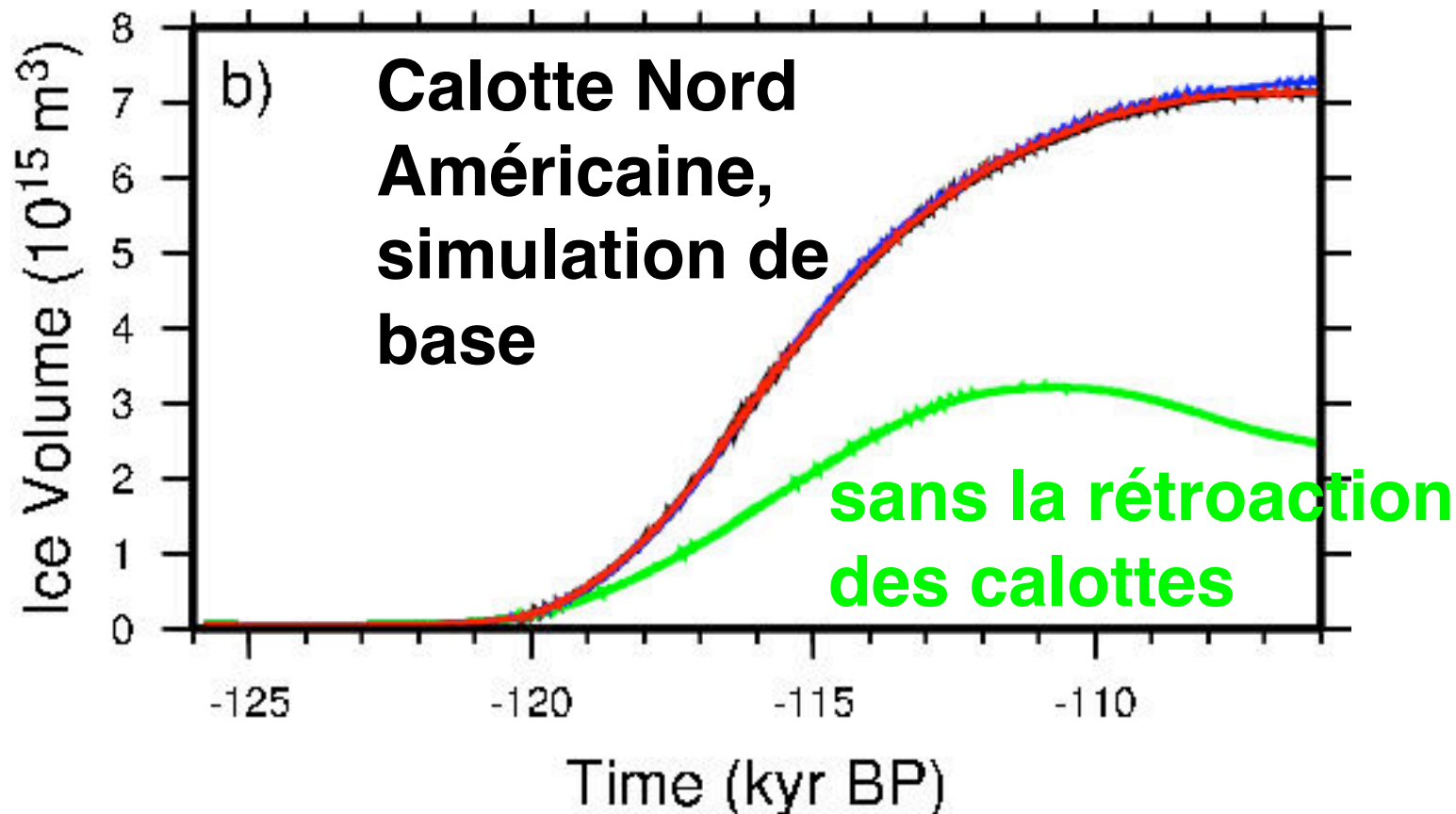
- Début de la simulation: 126000 ans
- On impose CO2 et insolation



Kageyama et al, 2004

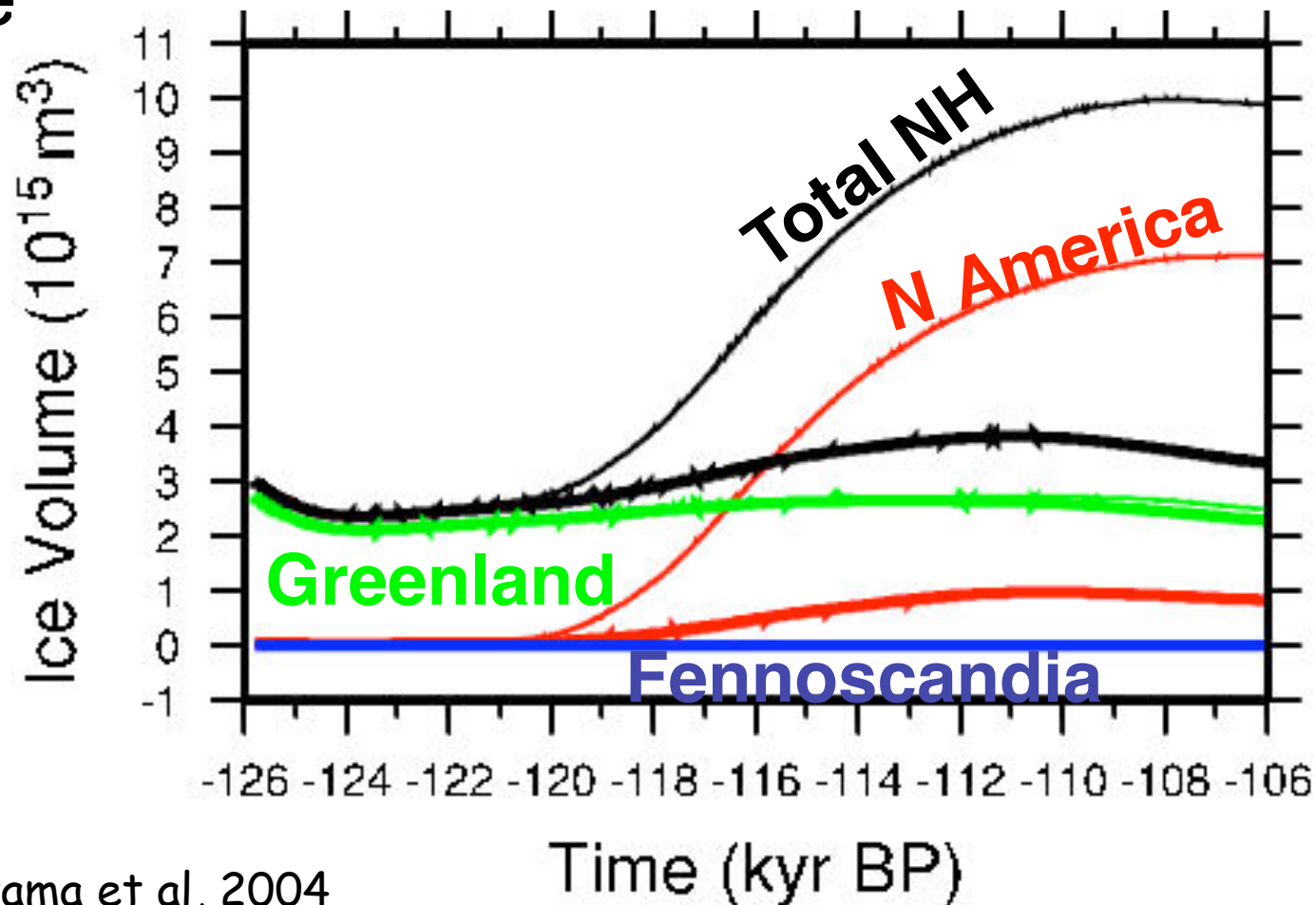
Rôle des calottes glaciaires

- Albédo, altitude, flux d'eau douce vers l'océan



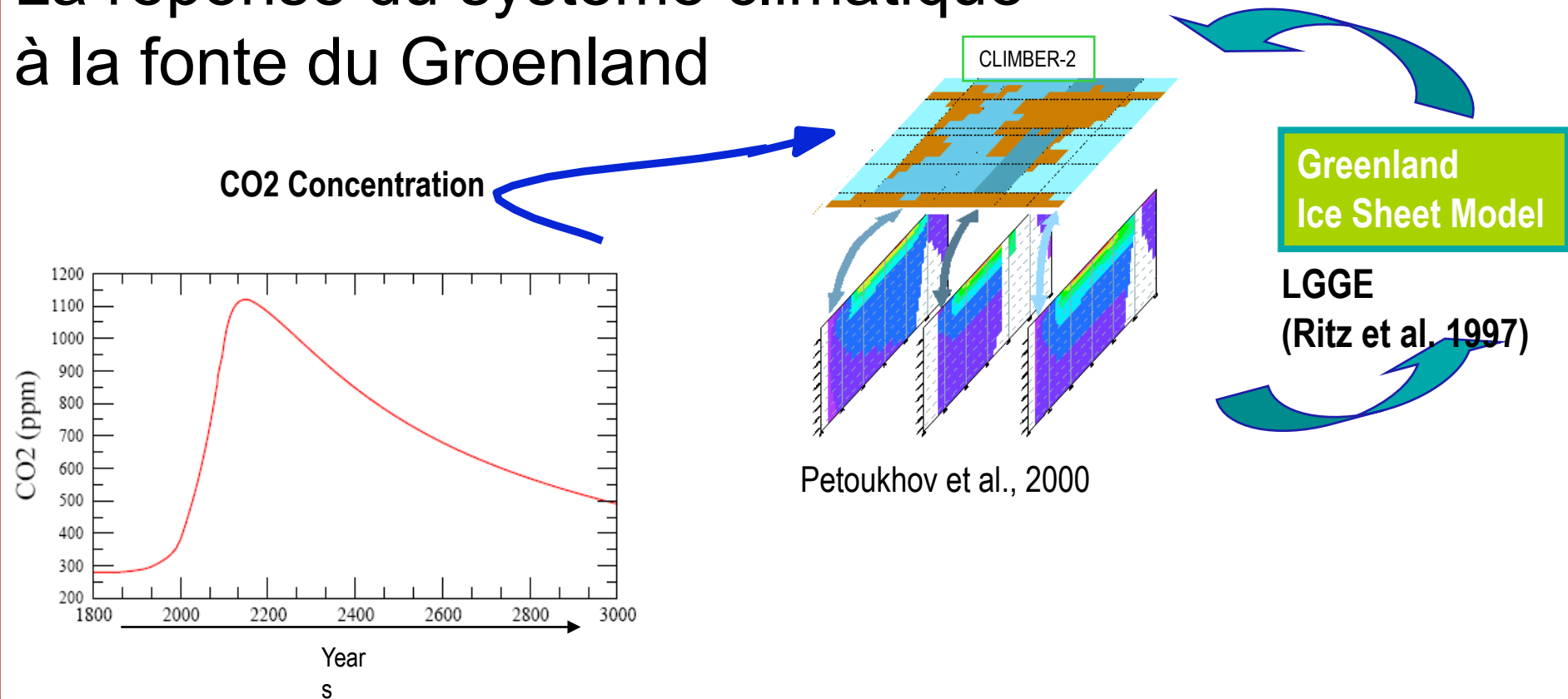
Rôle de la végétation

- Albédo de la végétation, albédo de la neige



Climat des prochains siècle

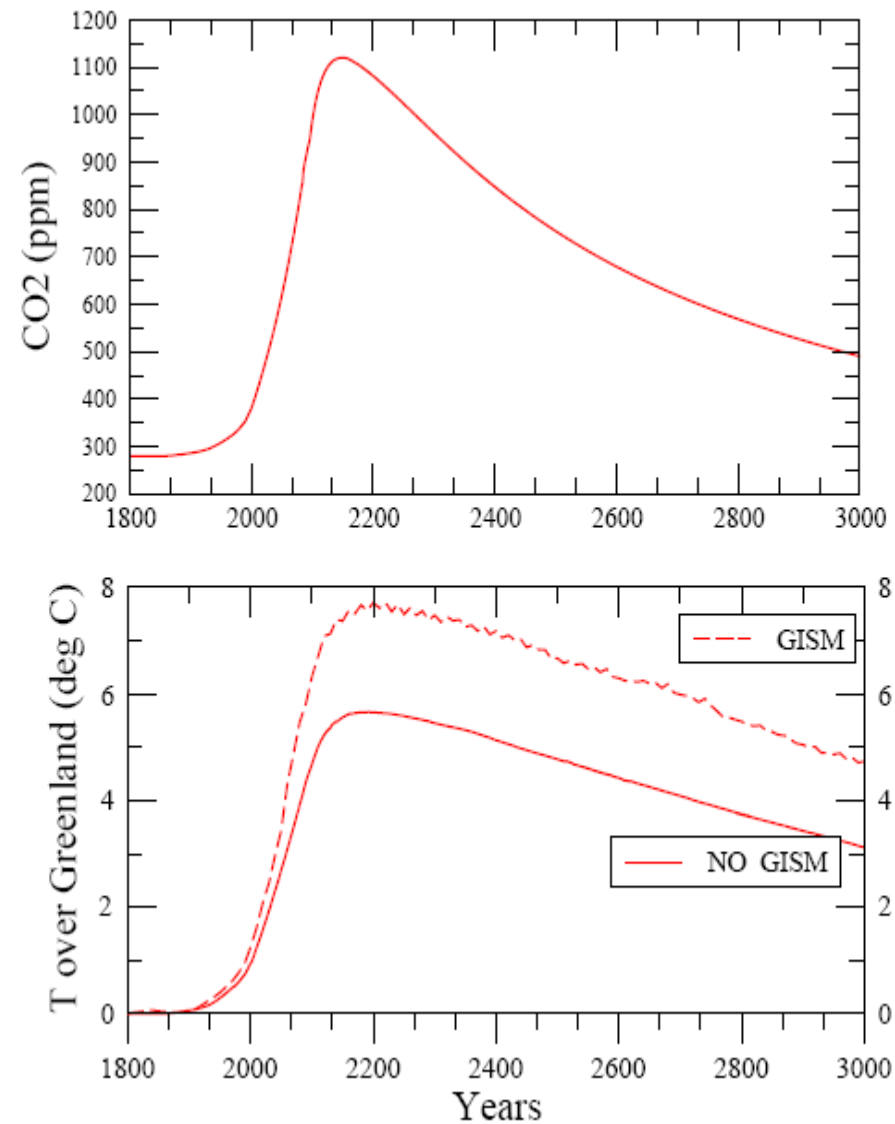
La réponse du système climatique à la fonte du Groenland



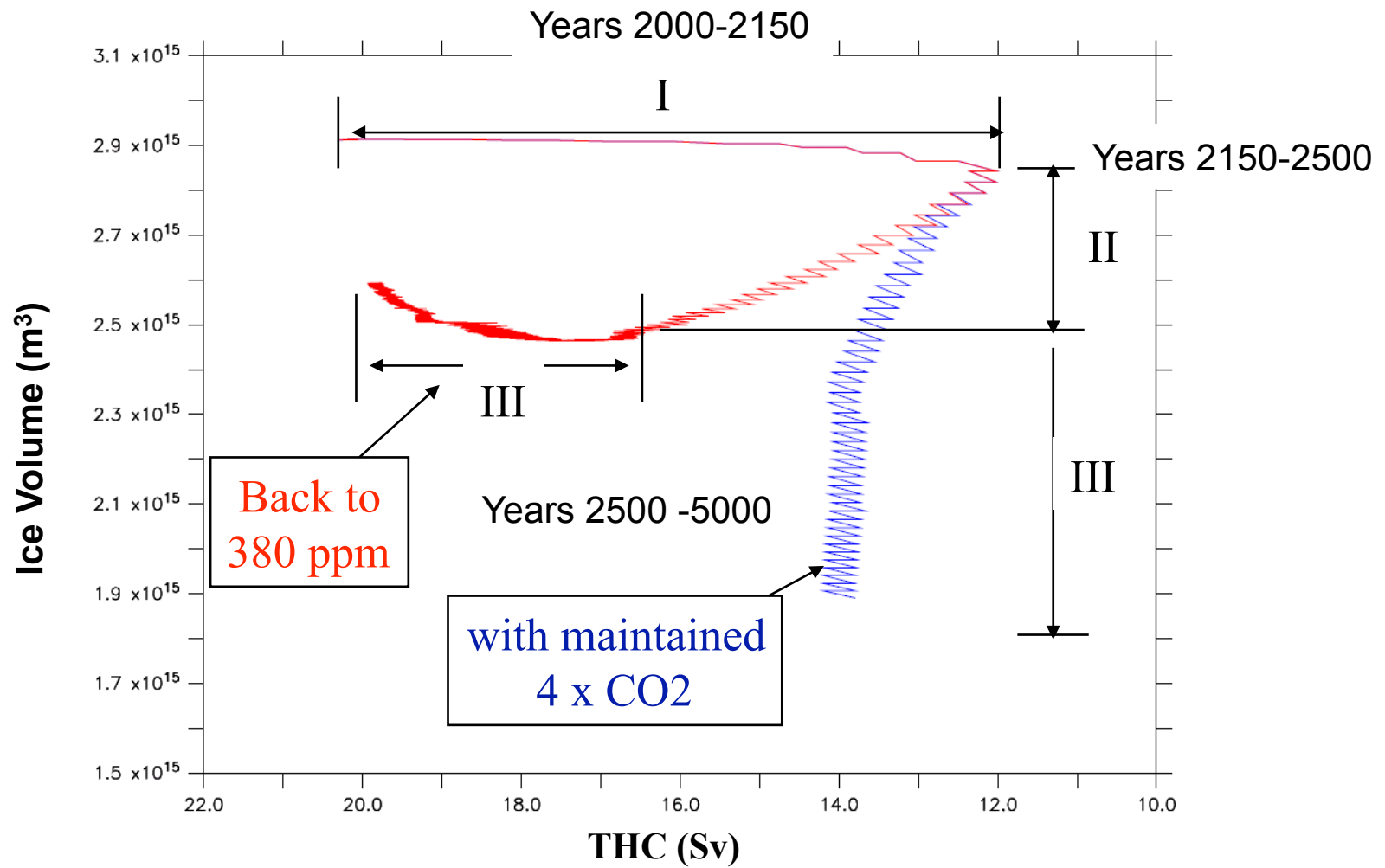
CLIMBER-ISM :

➡ Evaluation des flux d'eau douce et l'évolution de la calotte du Groenland

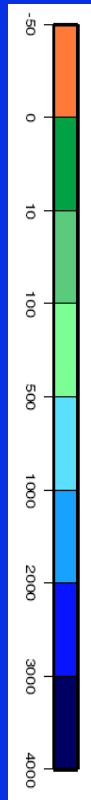
Changement de température au dessus du Groenland



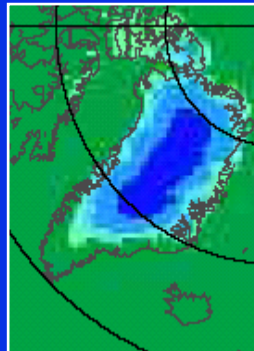
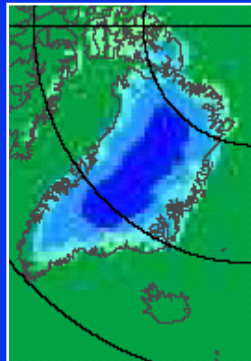
Domaine de stabilité du système Océan-Atmosphère-Calotte



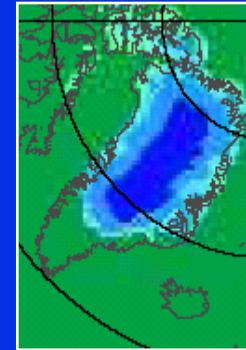
Additional freshwater flux to
the Ocean : 0.05 Sv



2000 → 2150

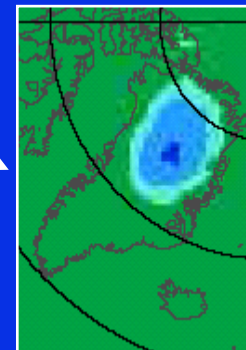


3000



Back to
380 ppm

with maintained
4 x CO₂



Fin!