

Le "système Terre" : régulation (et dérégulation) du climat

Gilles Ramstein

Unité Mixte de Recherche CEA/CNRS Laboratoire des
Sciences du Climat et de l'Environnement

gilles.ramstein@cea.fr

Climats de la Terre :

D'un extrême à l'autre...

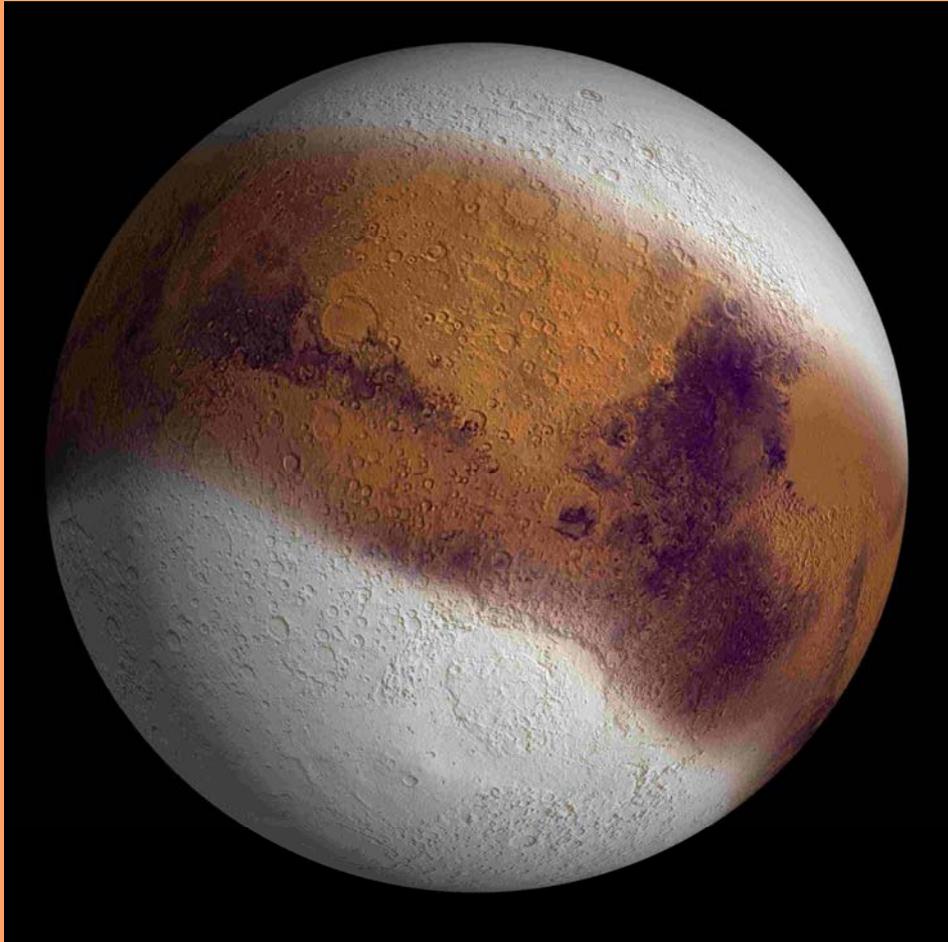
ou comment la Terre se régule ou pas...





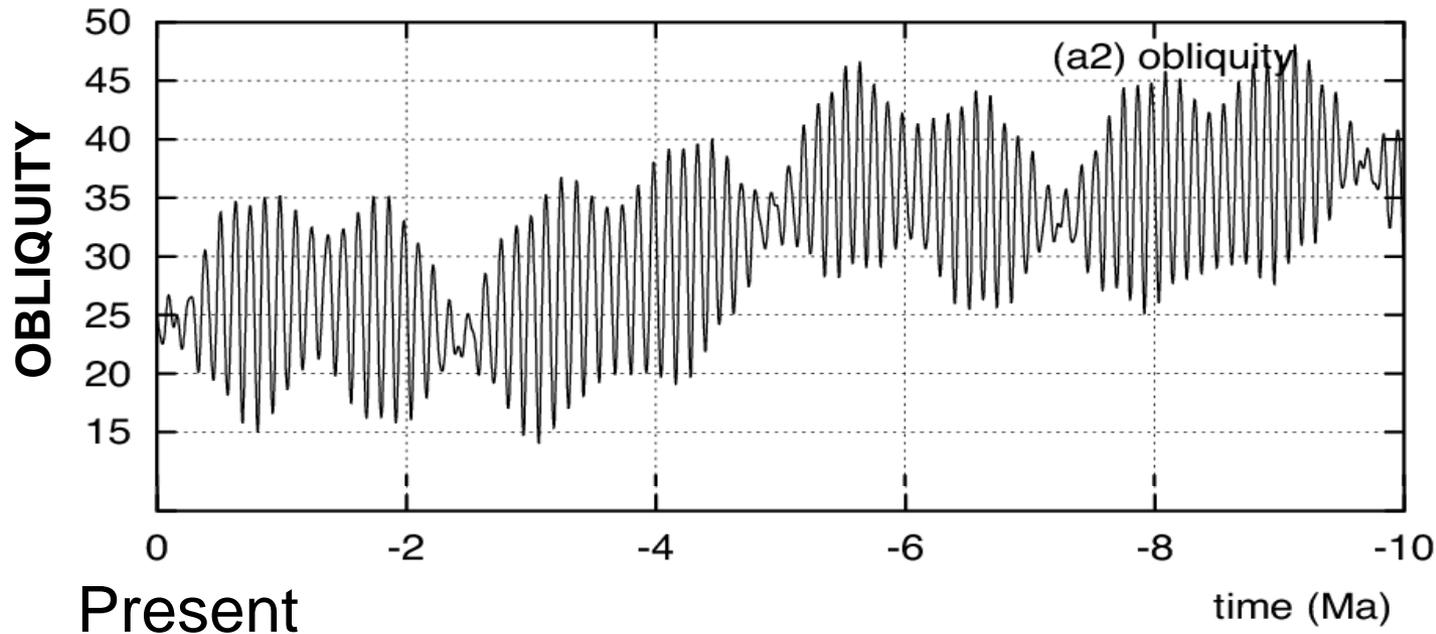
Mars

**Température
au sol :**
Jour **+20°C**
Nuit **-140°C**

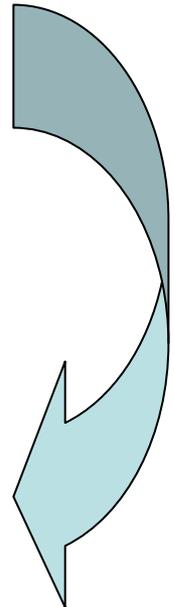


**Pression
au sol :**
6 à 8 mbar
**150 fois
plus faible
que sur la
TERRE**

Climate variation in the recent past: orbit and obliquity variations

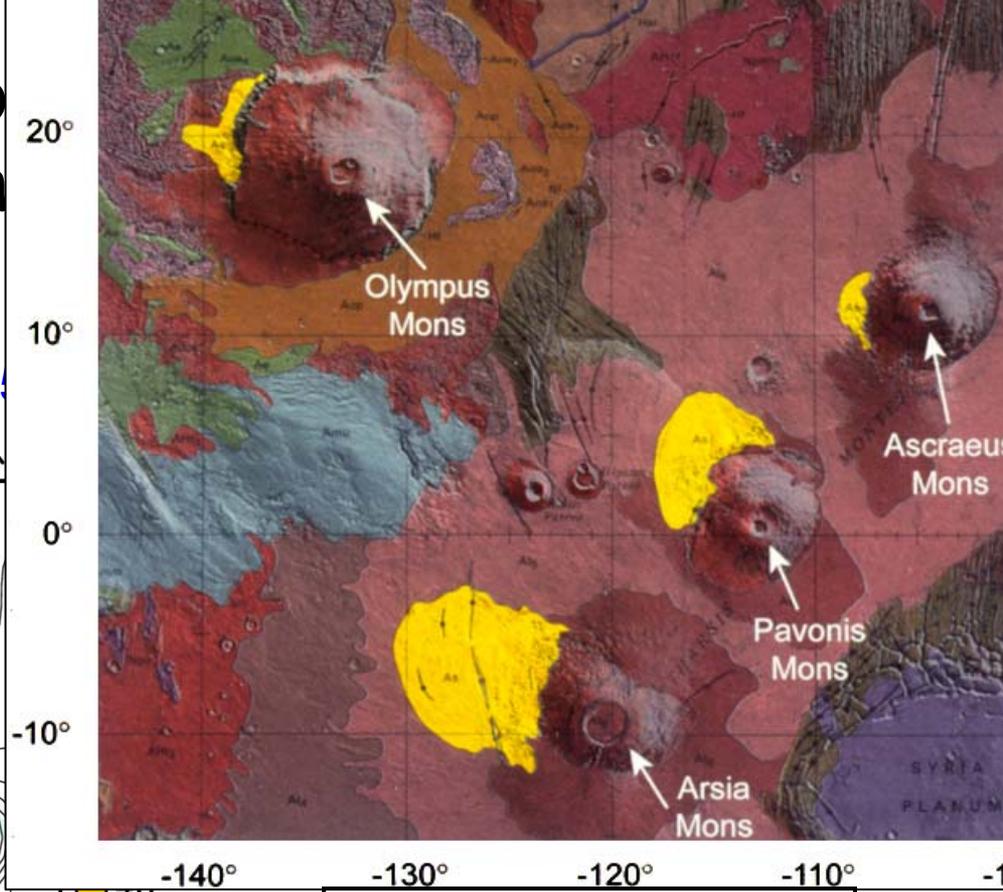
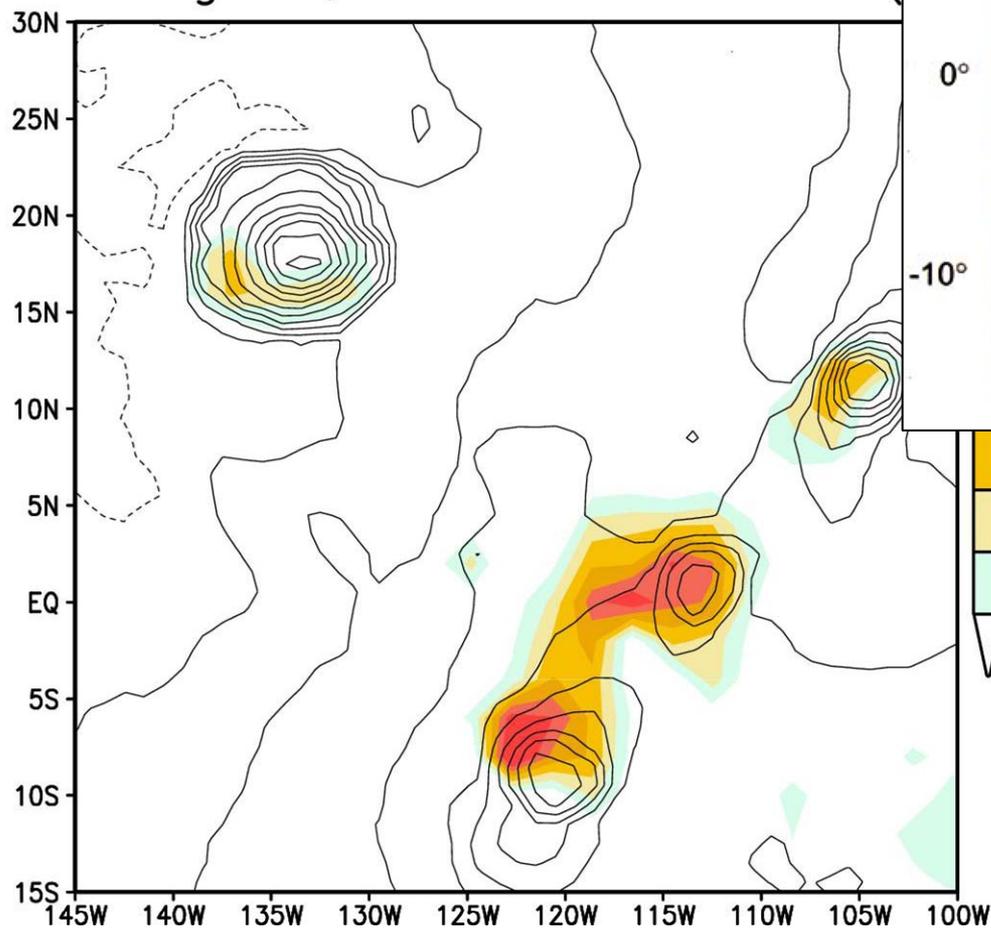


During Mars History, most likely
obliquity: 41.8° (Laskar et al. 2004)



The formation of rate (mm/yr) in

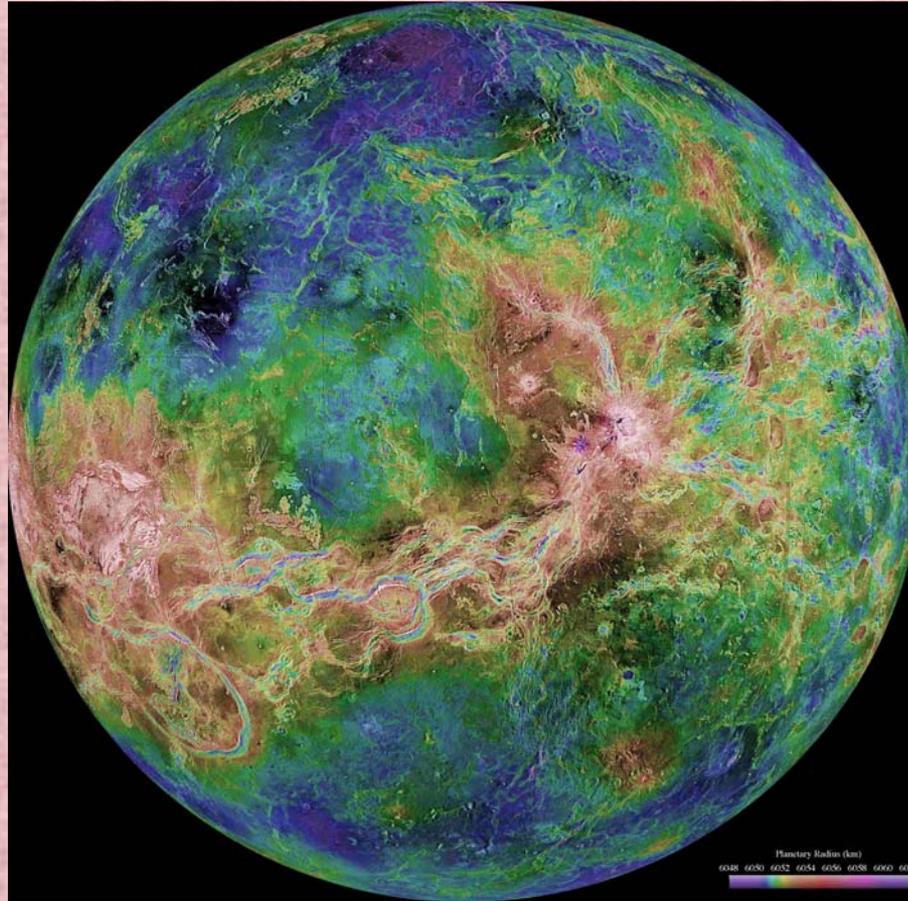
Forget et al. 2005 : Obliquity = 4.



**Fan shaped
deposits, drop
moraines
characteristic of cold
based glaciers**

Vénus

**Température
au sol:
470°C**



**Pression au sol:
100 fois la
pression
atmosphérique
terrestre**

Terre

**Température
au sol:**

15°C

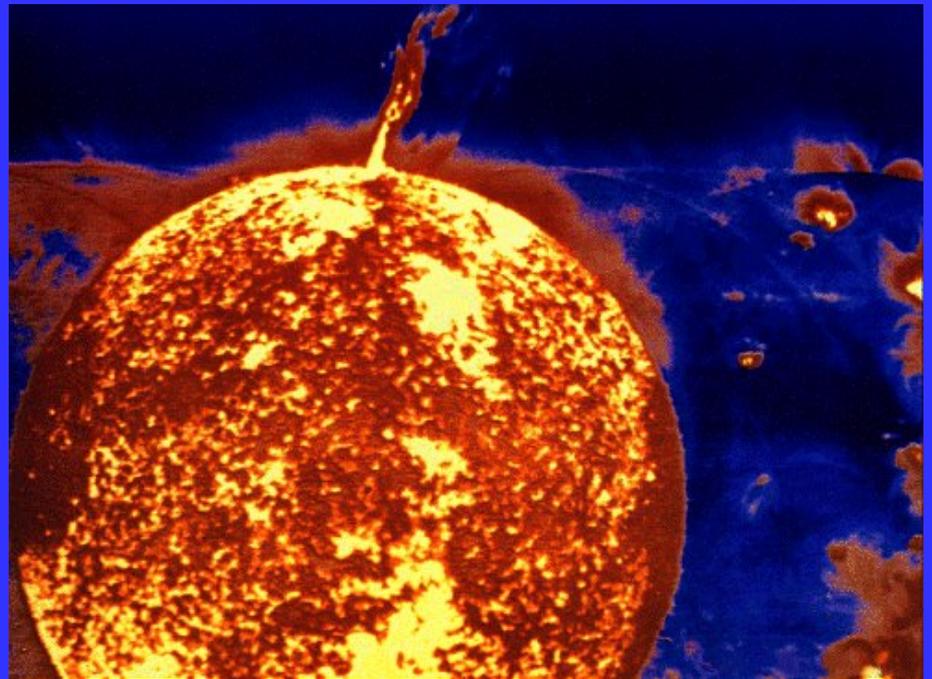
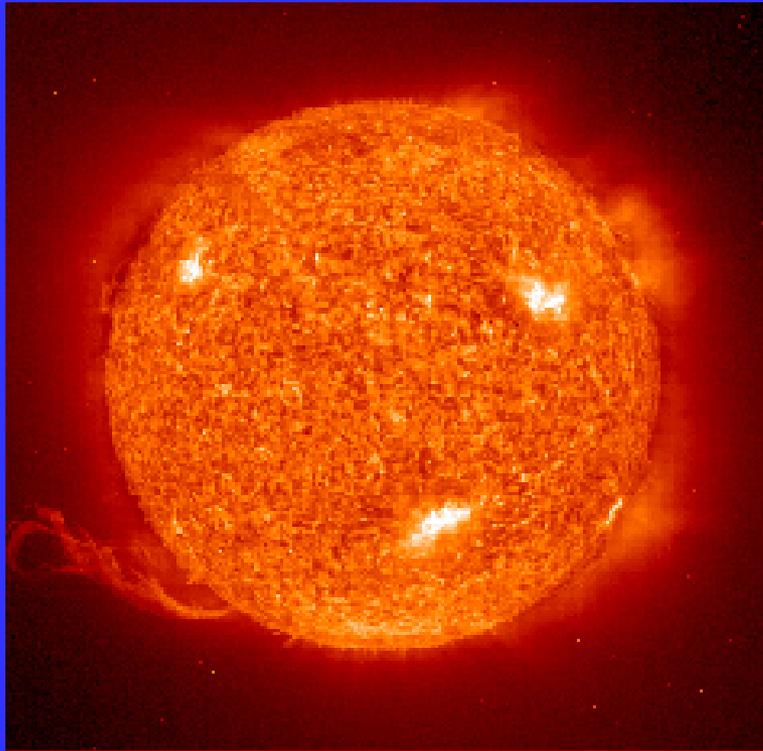


**Pression au sol:
1013 mbar
(1 atm)**

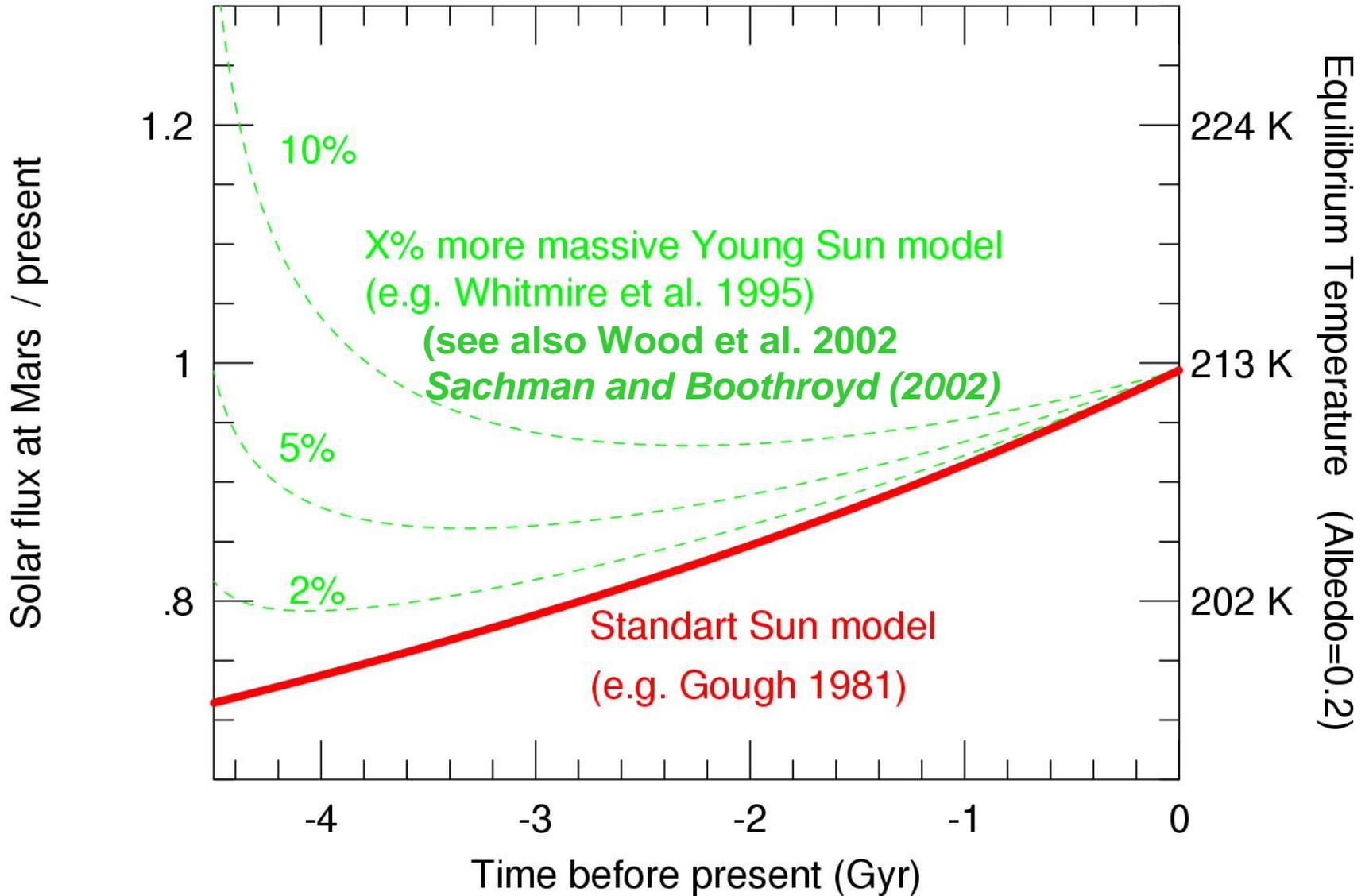
Le soleil jeune avait à ses débuts une plus faible luminosité

-20% il y a 4.6 Milliards d'années

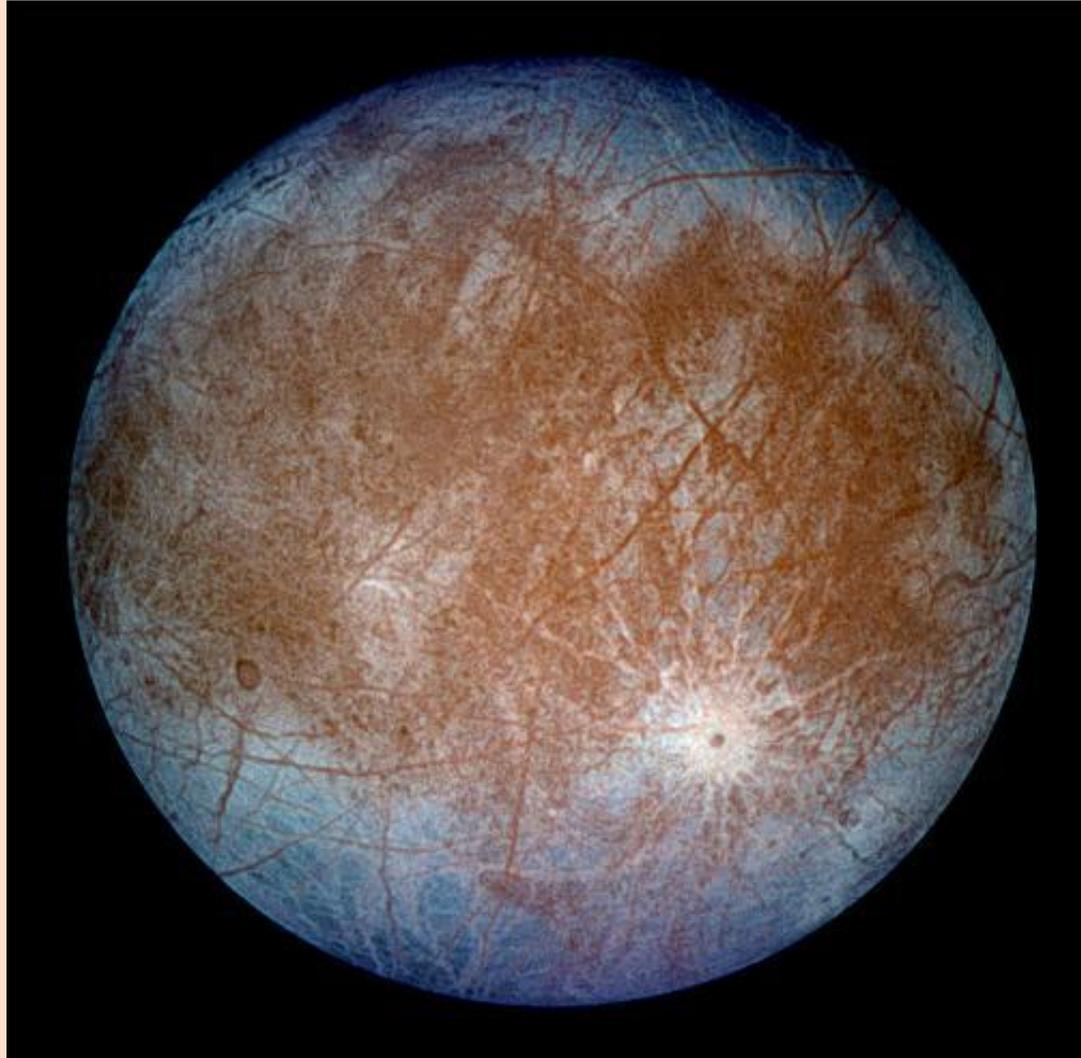
-6% il y a 750 Millions d'années



Evolution of Solar flux at Mars



EUROPE, *satellite gelé de Jupiter*



Echapper à la glaciation globale...

La Terre aurait du s'englacer totalement.

Or non seulement la Terre des 4 premiers milliards d'années est globalement sans calotte de glace, mais elle est chaude à très chaude.

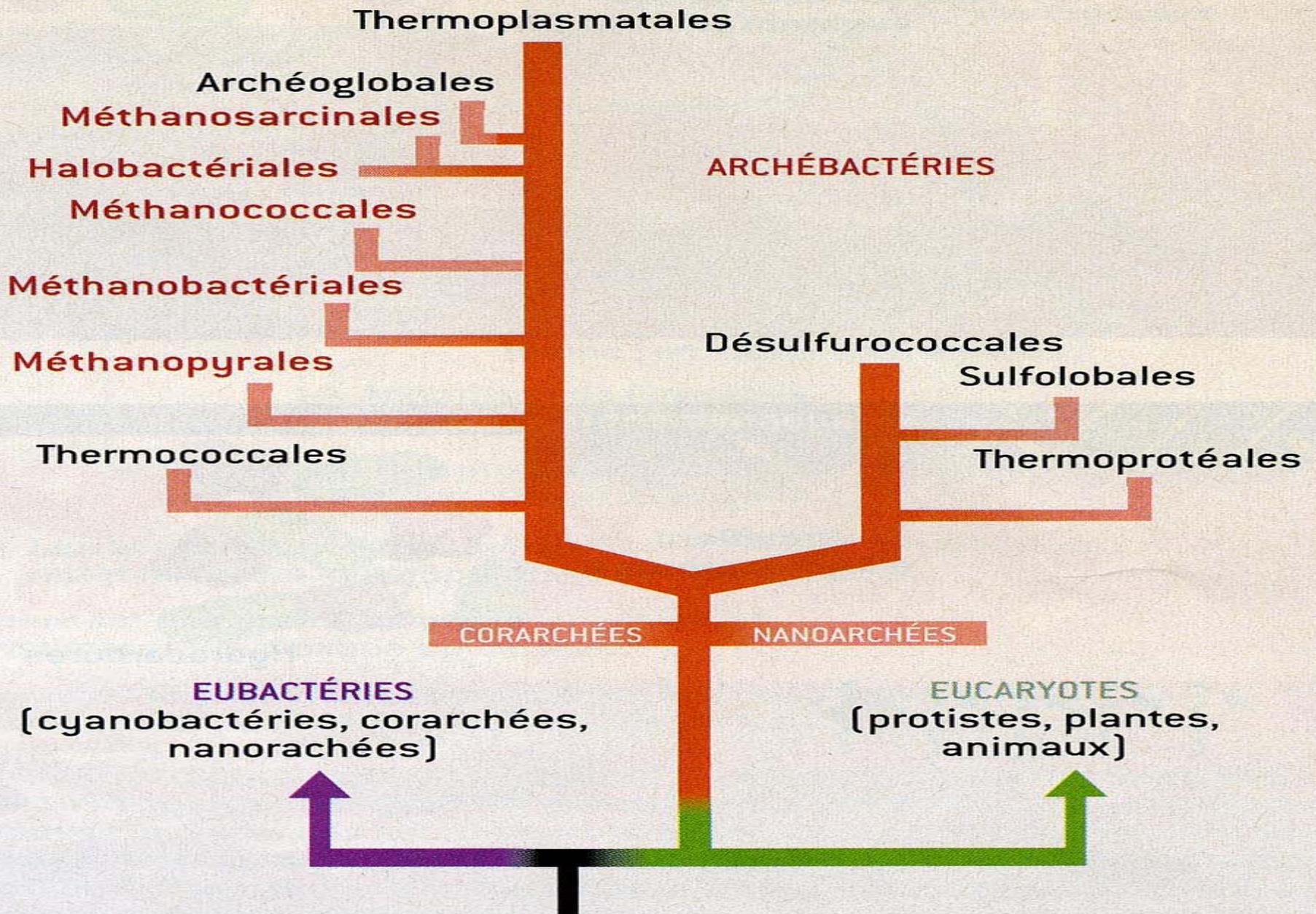
Les gaz à effet de serre ont plus que compensé la moindre puissance solaire.

- Les gaz à effet de serre comme couverture chauffante. Mission, préserver la Terre d'une glaciation globale et irrémédiable ?
- Sagan 80's NH_4 ammoniac
 - Peu présent dans une atmosphère dépourvue d'oxygène
- Un candidat dans le vent : CO_2
Quantité telle qu'il produirait de la sidérite (FeC) dans les sols
 - Pas de sidérite dans les vieux cratons
- Le Méthane (organique) de façon prédominante et le CO_2

- **Pendant 2 milliards d'années, aucune trace de glaciation sur Terre**
- **La Terre a été protégée des glaciations grâce aux gaz à effet de serre CO₂, CH₄**
- **Quel mécanisme régulateur?**
- **Archées méthanogènes/phénomènes de halo**

Titan: *satellite rose orangé de Saturne avec une atmosphère de méthane et d'hydrocarbures*

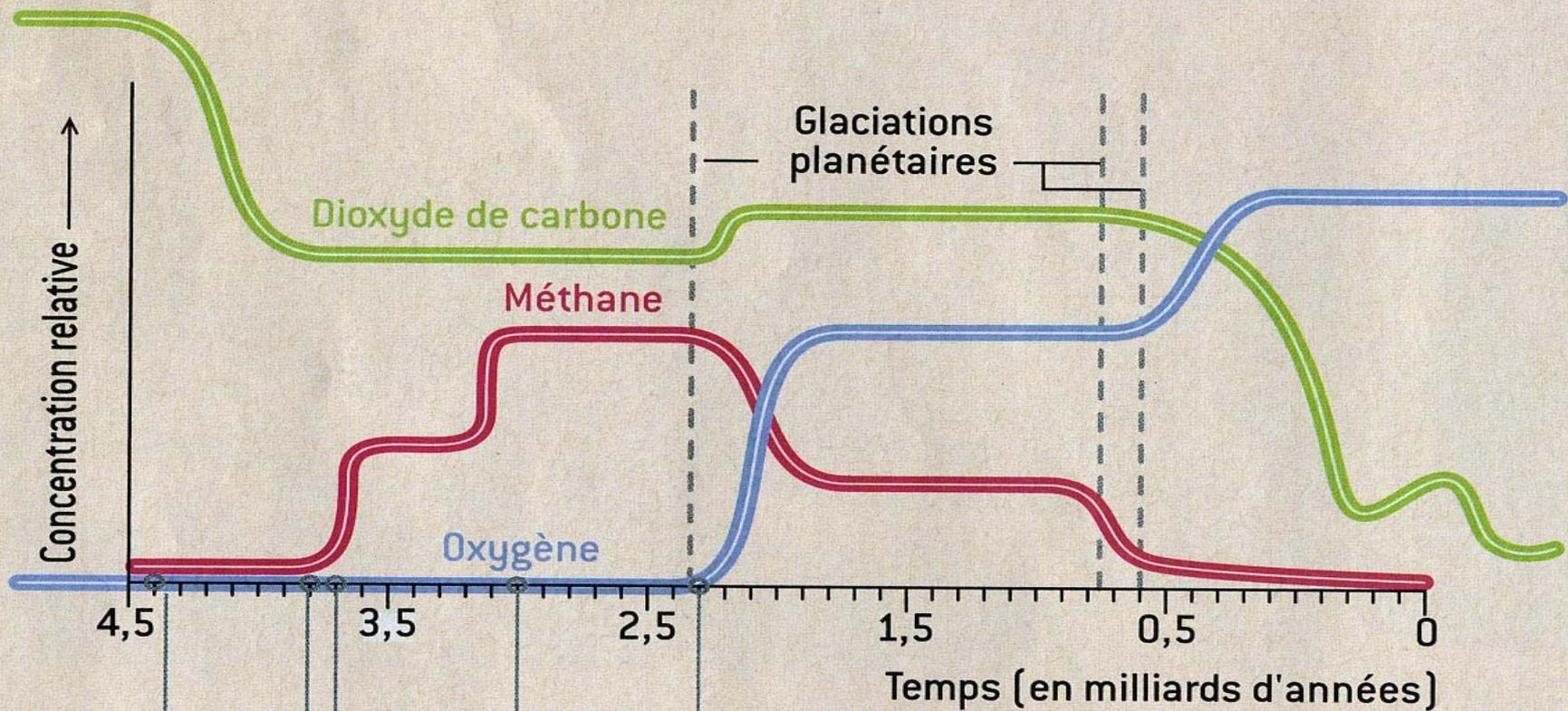




La position la plus probable des bactéries méthanogènes (en rouge) a été représentée sur cet arbre phylogénique comportant les archéobactéries, les eubactéries et les eucaryotes.

2 crises géologiques majeures dans un paysage globalement chaud pendant 4 Milliards d'années.

- Glaciation Huronienne(2.3 / 2.6 Ma)
Synchrone d'un effondrement du méthane lié à l'oxygénation de l'atmosphère
- Glaciations Néoprotérozoïques (750 – 570 Ma)
Pour 750 Ma lié à l'effondrement du CO₂ (Tectonique et Volcanisme)



Glaciations planétaires

Dioxyde de carbone

Méthane

Oxygène

4,5

3,5

2,5

1,5

0,5

0

Temps (en milliards d'années)

Apparition de l'oxygène dans l'atmosphère

Apparition des premières bactéries productrices d'oxygène

Les bactéries méthanogènes commencent à contribuer notablement à la composition de l'atmosphère

Apparition des premiers micro-organismes consommant le dioxyde de carbone

L'effet de serre dû à la concentration élevée du dioxyde de carbone atmosphérique compense le faible éclat du jeune Soleil

2 périodes où les rétroactions lentes [climat – gaz à effet de serre] perdent la main

- **Glaciation Paléoproterozoïque**
 - Effondrement par oxydation du Méthane

- **Glaciation Néoproterozoïque**
 - Eclatement Est Ouest d'un Supercontinent
 - Enfouissement massif de CO₂

***UNE TERRE
TOTALEMENT
GELEE,***



***EST-CE
POSSIBLE?***

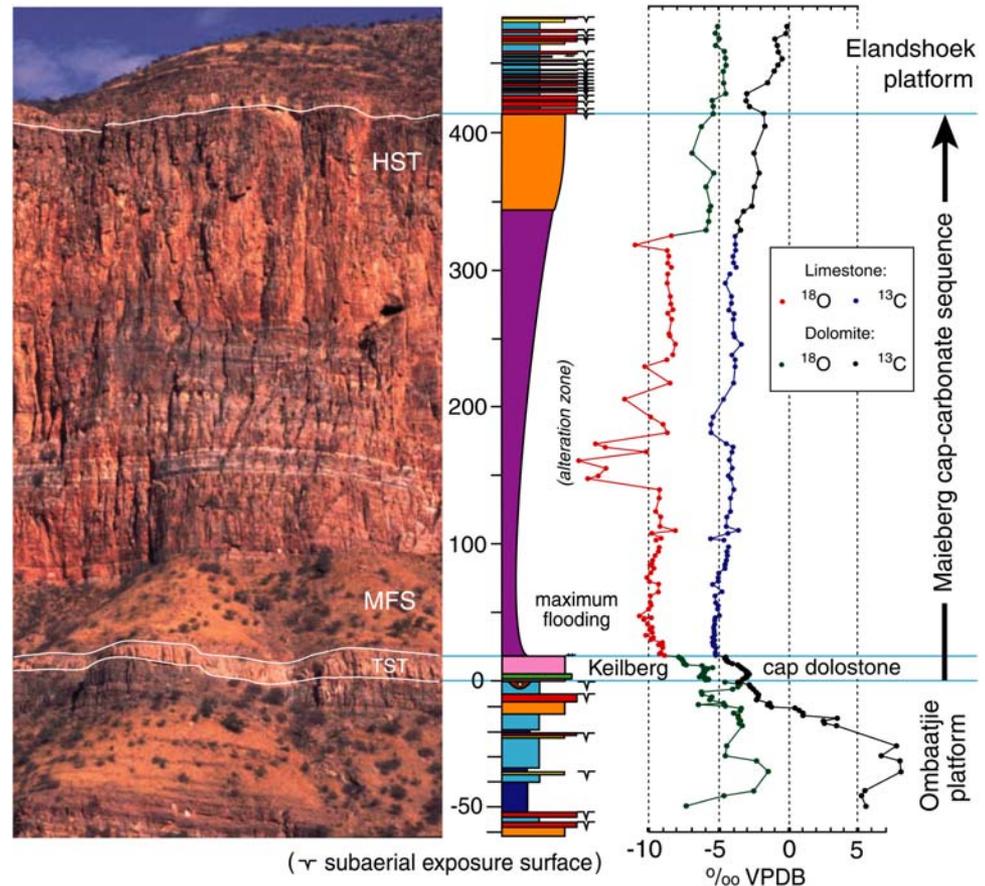
Nature particulière des sédiments associés aux glaciations néoprotérozoïques



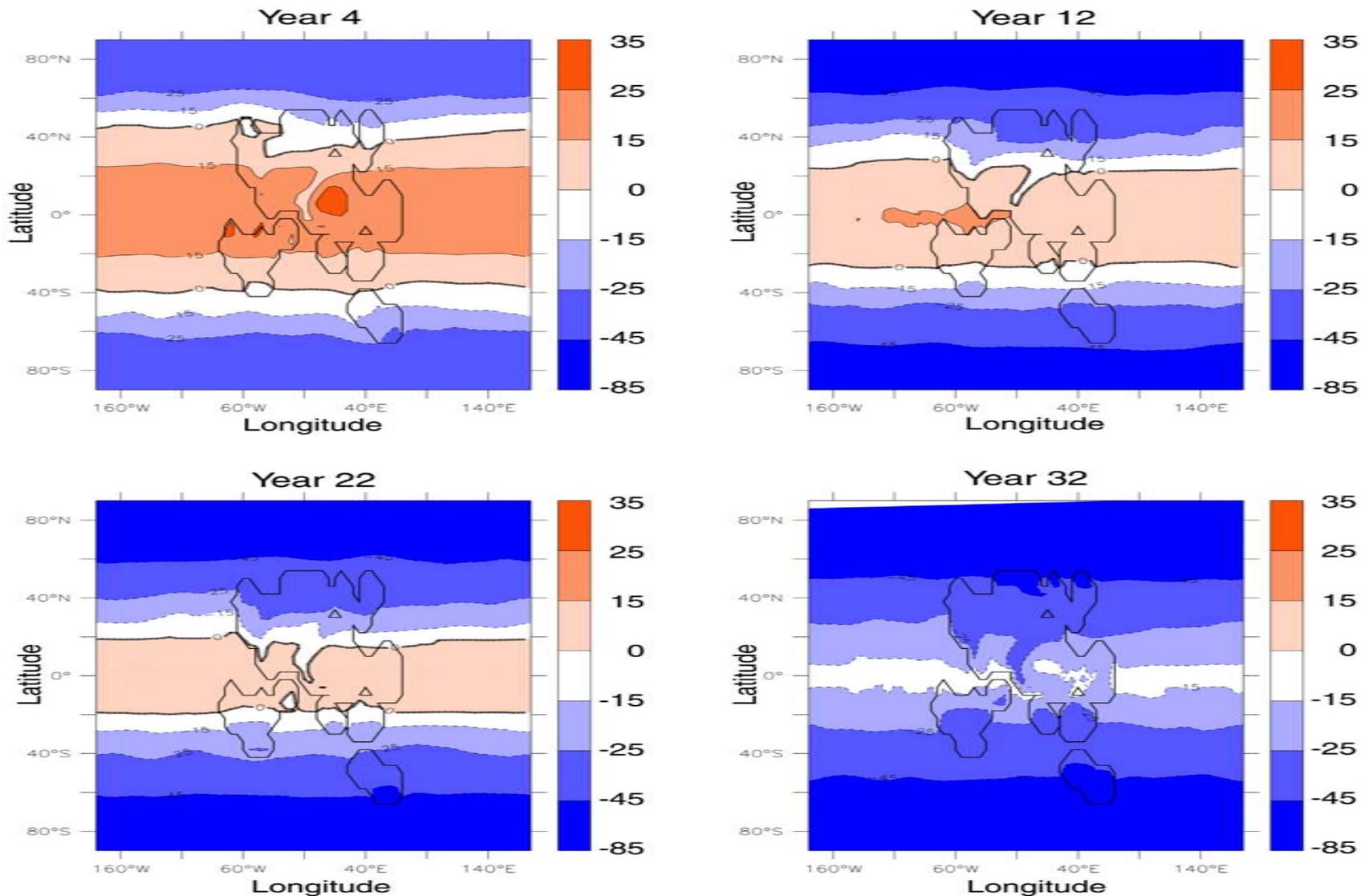
>> Formation de fer rubané

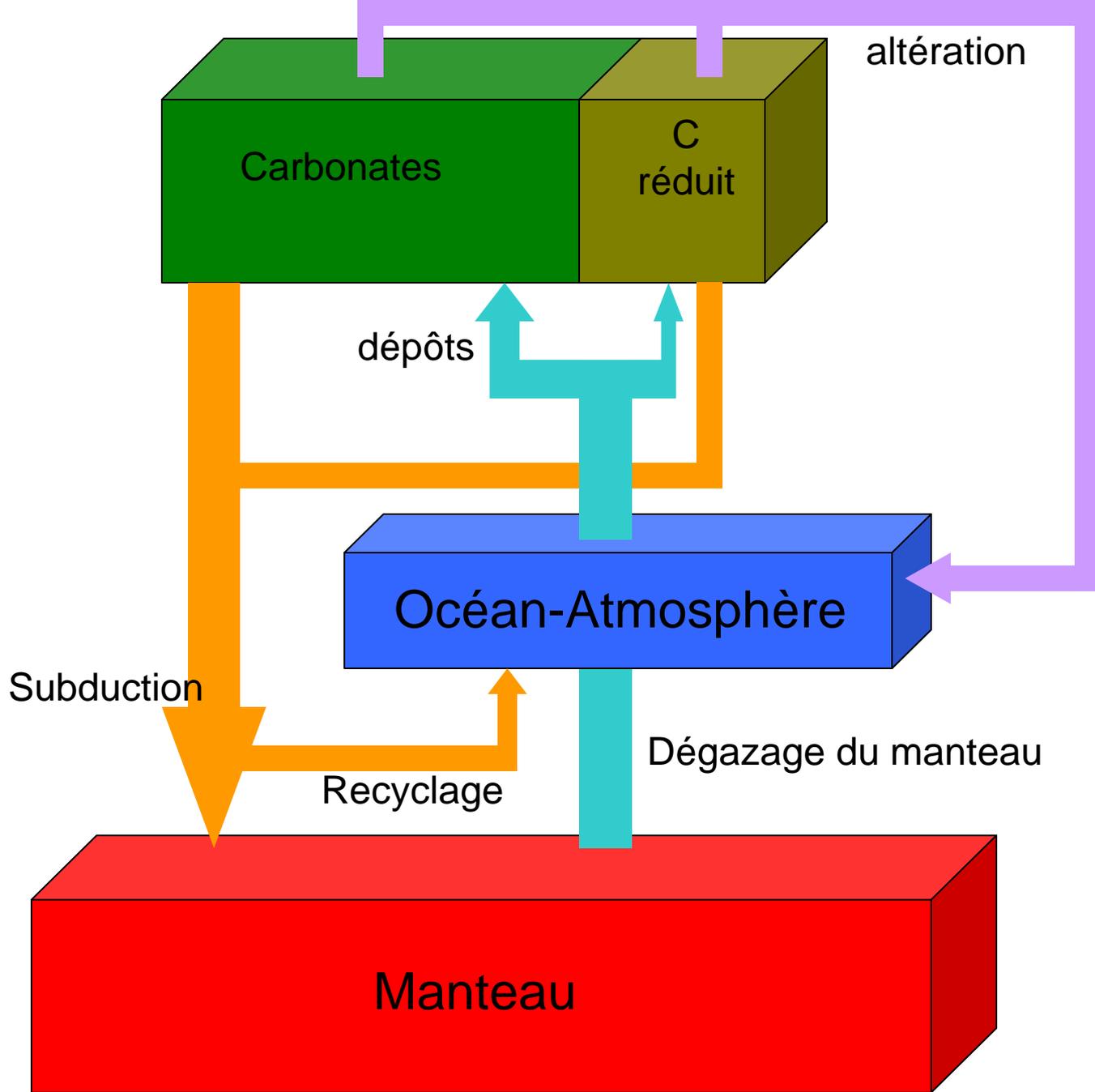
Après chaque glaciation, dépôt de cap-carbonates sur une épaisseur importante >>

Fortes variations du $\delta^{13}\text{C}$ de l'ordre de 10 ‰ >>



Simulation de l'évolution des températures lors de l'englacement menant à une Terre boule de neige à partir du MCGA *LMDz*





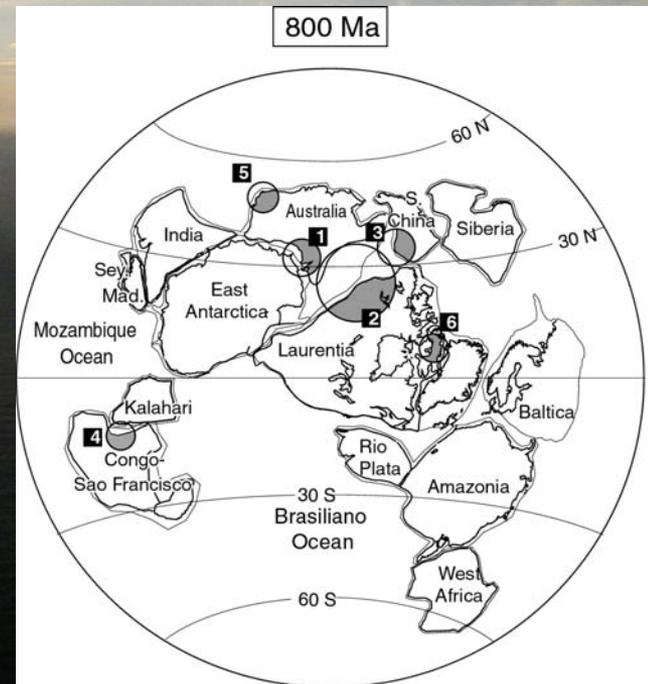
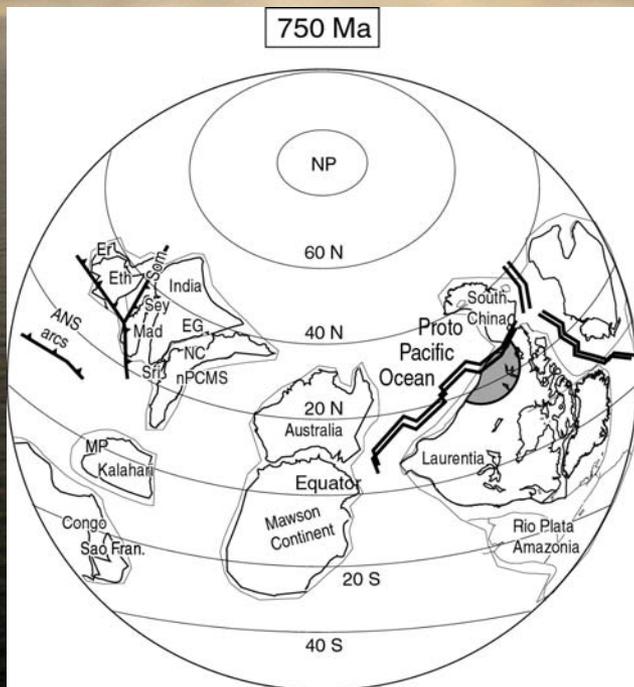
Cycle du carbone

Mécanismes de refroidissement global à long terme:

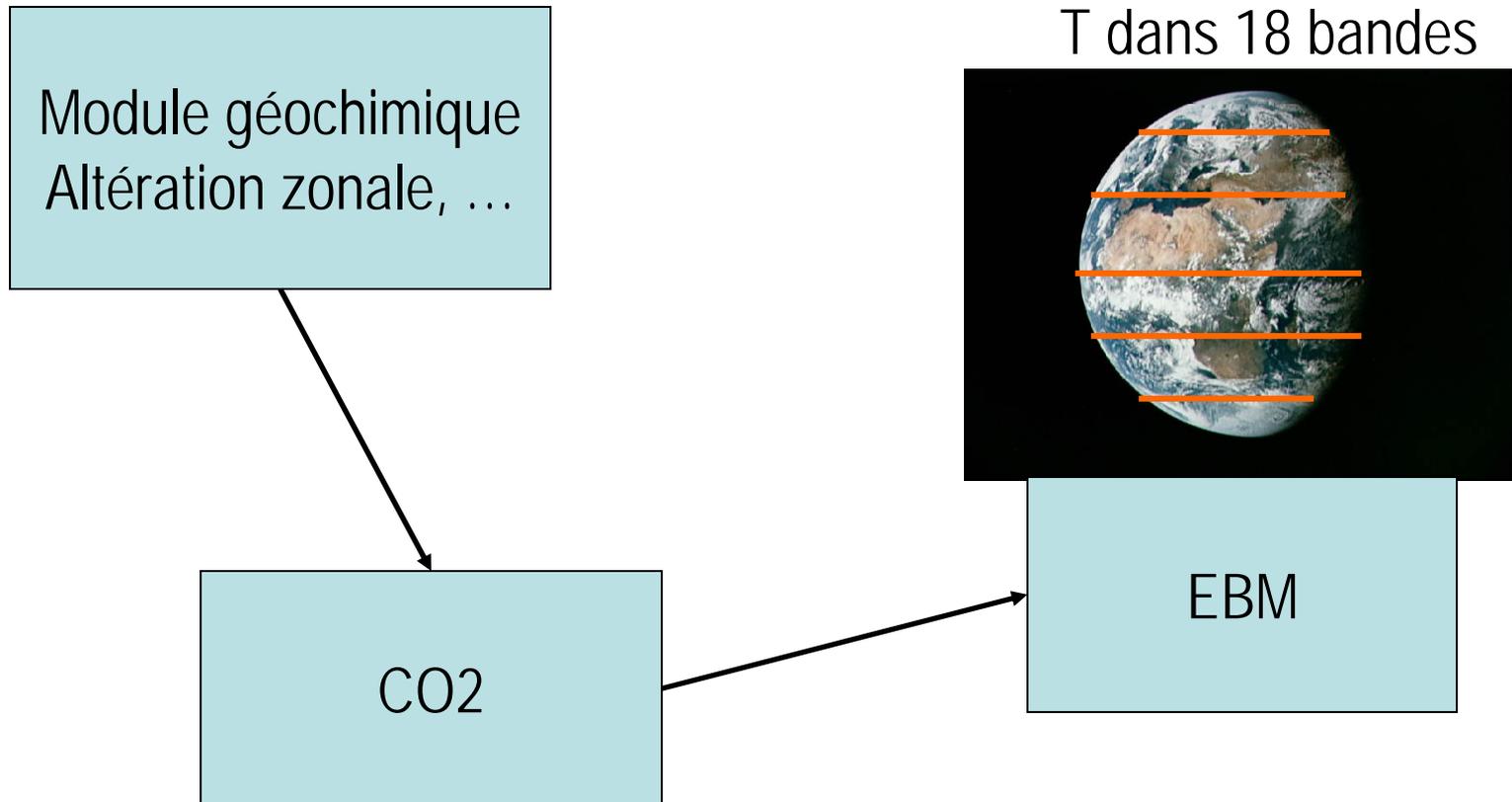
1 – Apparition de traps successives

2 – Position à basses et moyennes des continents

3 - Fragmentation du supercontinent Rodinia



Connection climat-CO₂ dans les modèles géochimiques:
Utilisation du modèle Géochimie-Climat COMBINE pour tester
L'impact du trap Laurentien



Les premiers résultats ...

1 - A 800 Ma

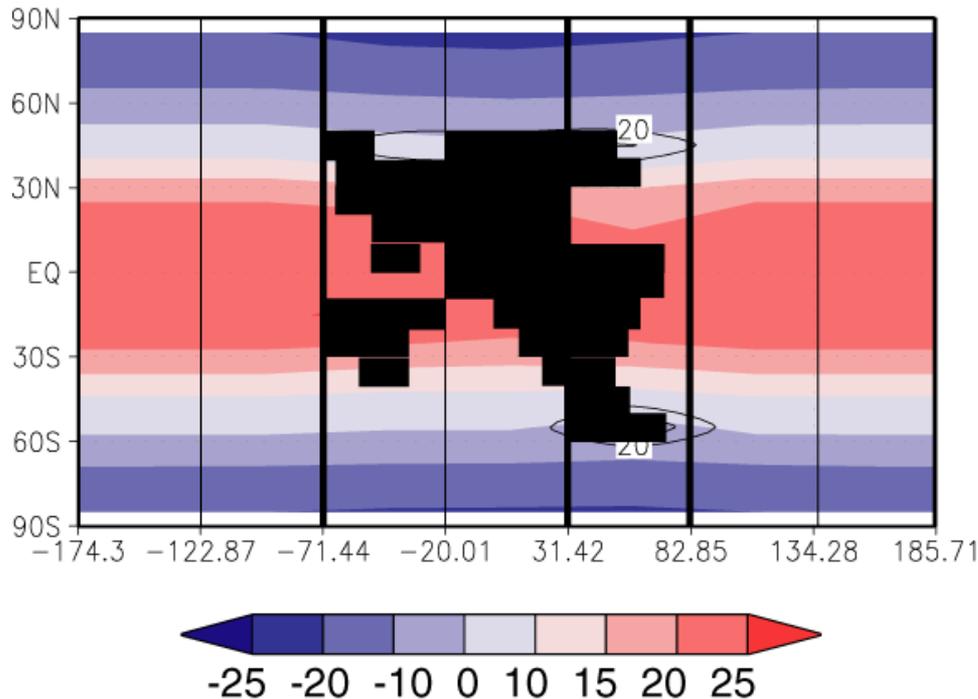


Le modèle s'équilibre
à un pCO₂ d'environ
1800 ppm



Soit une température
globale moyenne de
10.2 °C

800 Ma reconstruction



Une position tropicale
des continents ne
semble pas être une
condition suffisante à
la formation de
calotte de glaces
continentale mais le
climat est quand
même relativement
froid



Le modèle s'équilibre
à un pCO₂ d'environ
500 ppm

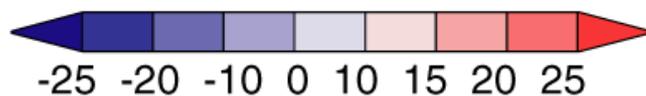
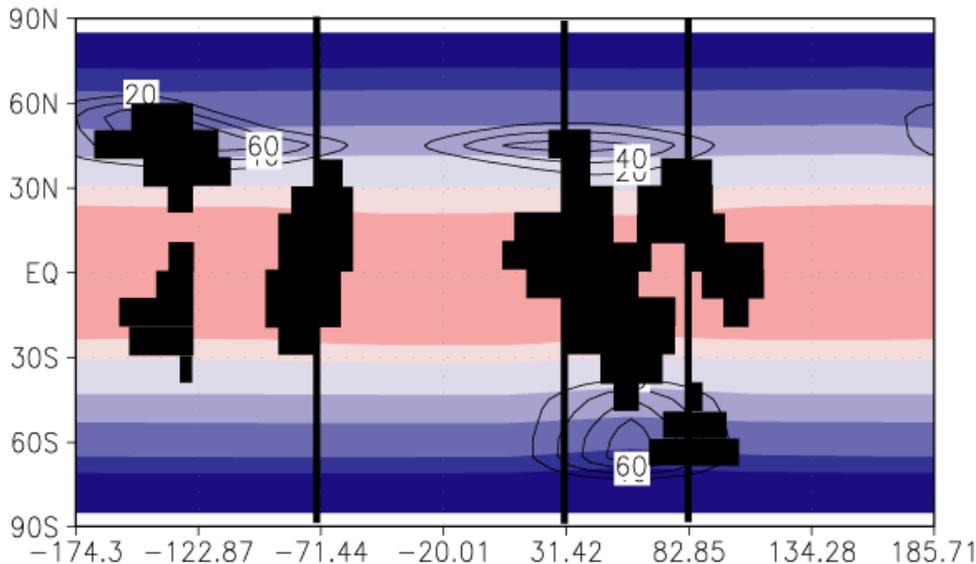
Réduction de 1300
ppm



Soit une température
globale moyenne de
2°C

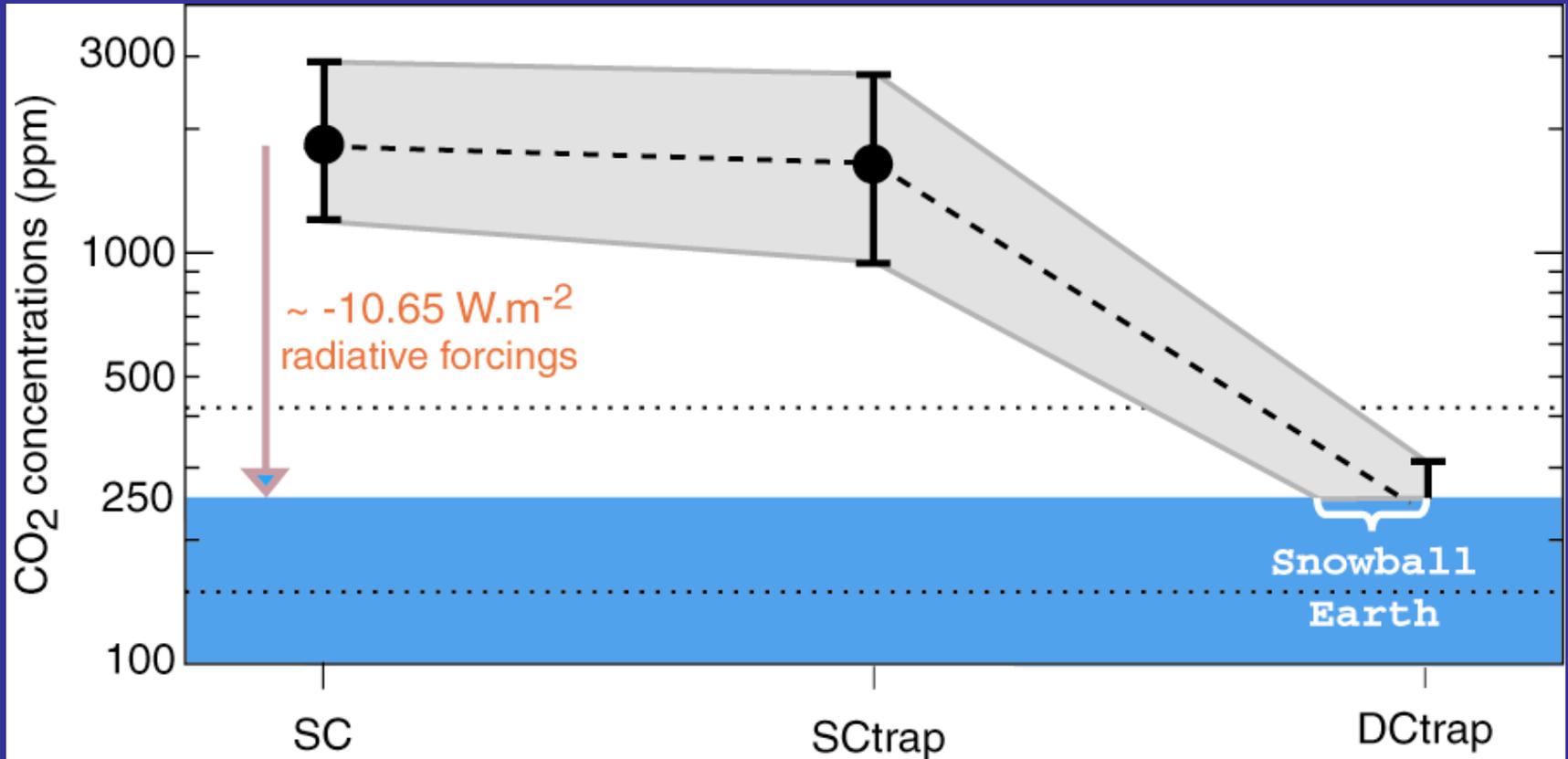
Réduction de 8.2°C

750 Ma reconstruction

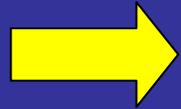


Une configuration ou
les continents sont
plus petits et plus
dispersés apparaît
très favorable au
déclenchement d'une
glaciation importante

Impact on the CO_2



Sortir de là...



La vision « OA » Boudyko – Sellers

Un soleil 1.5 fois plus puissant

« Si la Terre avait été globalement englacée, ça se saurait... Elle le serait toujours »



La vision « ST »

Pendant la glaciation globale, le volcanisme continue, et le cycle du Carbone est coupé

Revivre grâce au CO₂

La déglaciation globale d'une terre gelée est un phénomène violent à l'échelle géologique

Très rapidement, l'atmosphère va se « vider » de son CO₂ lorsque le cycle du carbone va se remettre en route

Très chaud  pluies diluviennes  altération  érosion

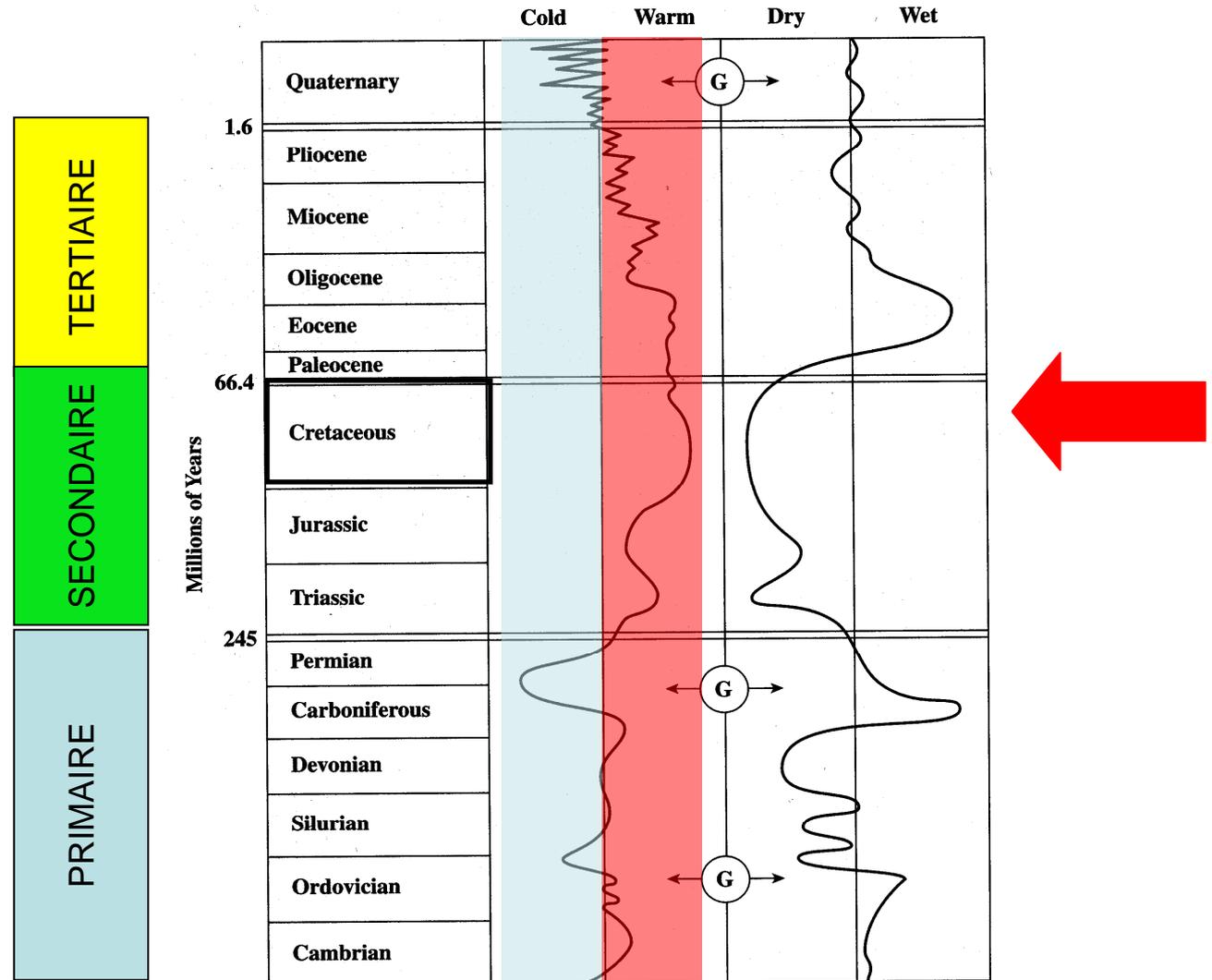
 Enfouissement d'une quantité énorme de CO₂ dans les océans

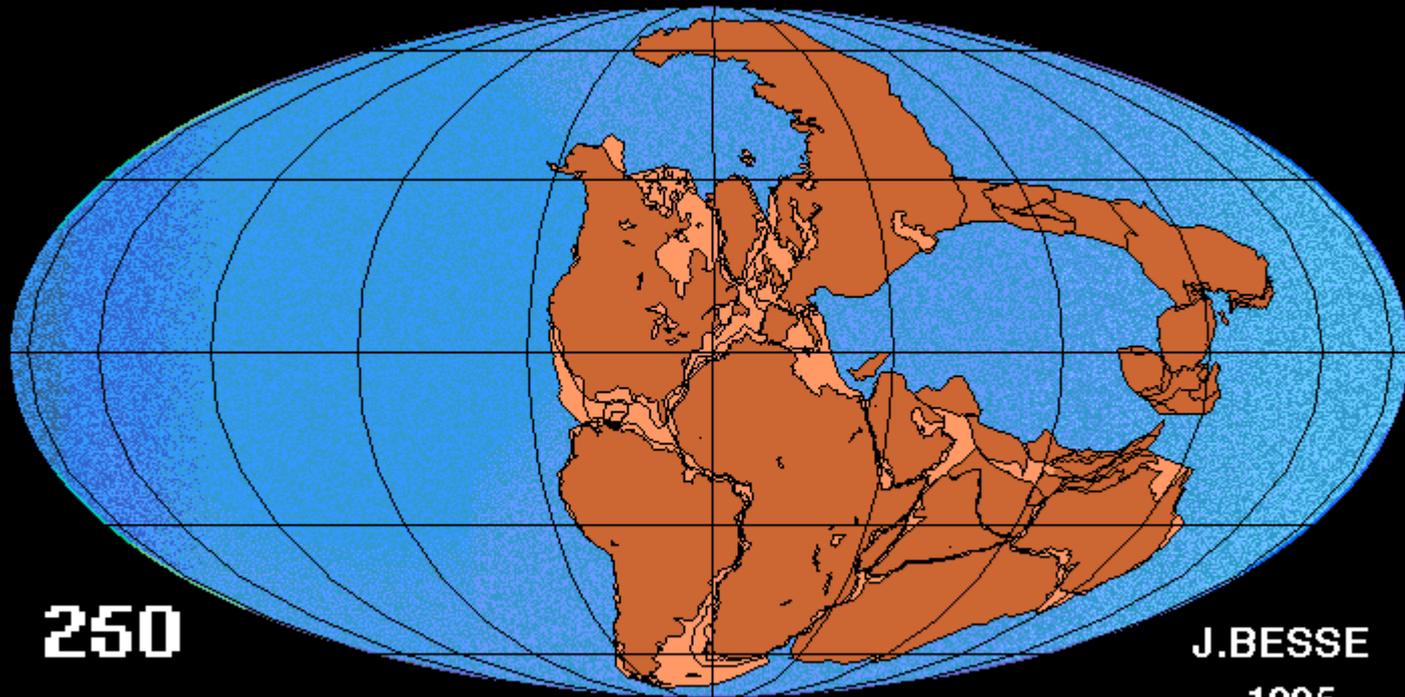
Quelle variation du Ph et de l'alcalinité ?

Quel impact sur la vie dans les océans ?

Calcification etc...

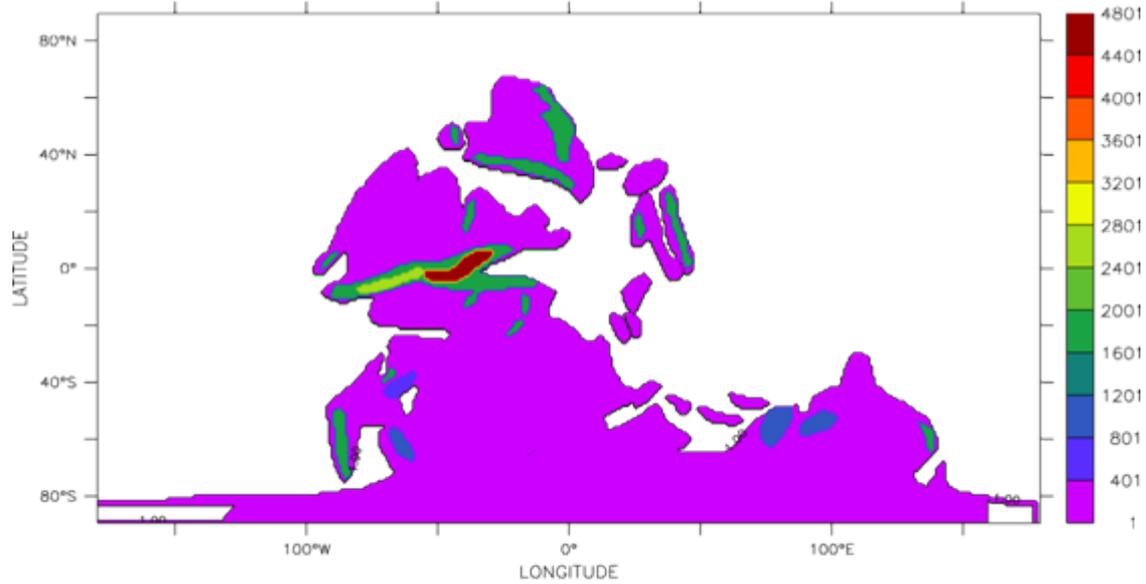
Les périodes climatiques chaudes représentent 75% des 540 derniers millions d'années



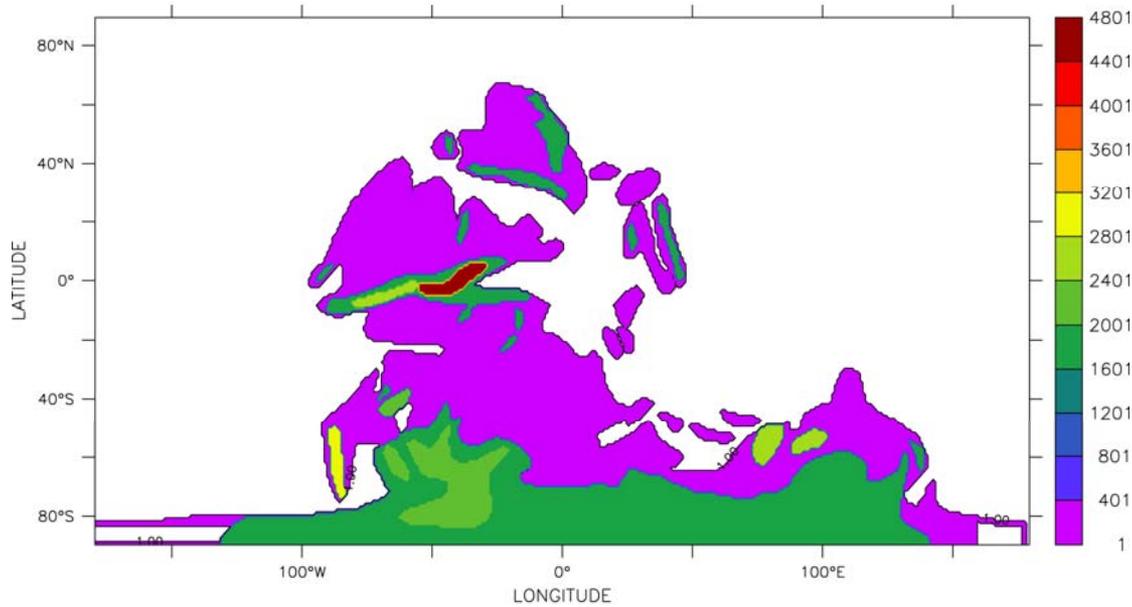


250

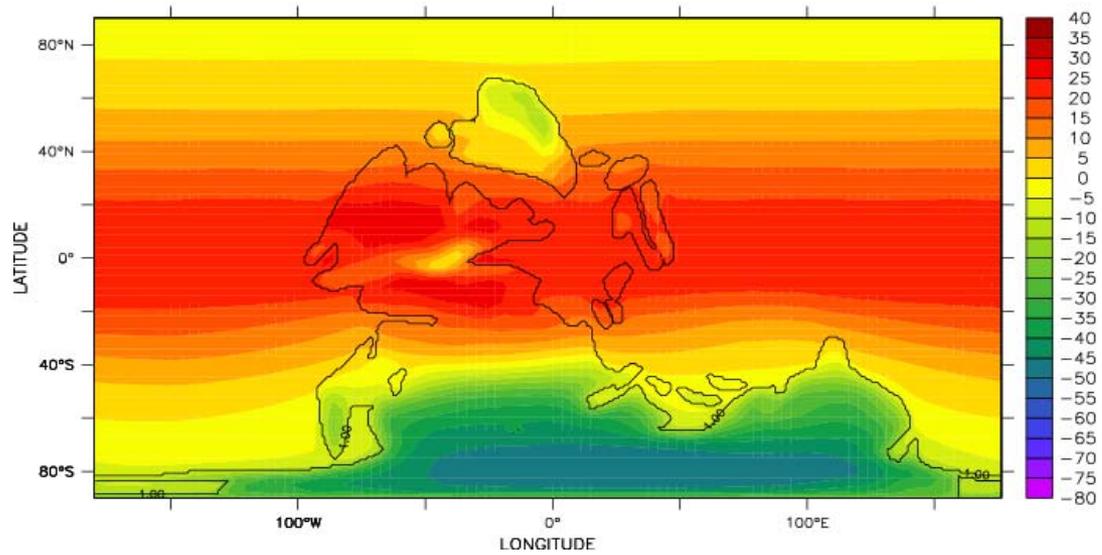
**J.BESSE
1995**



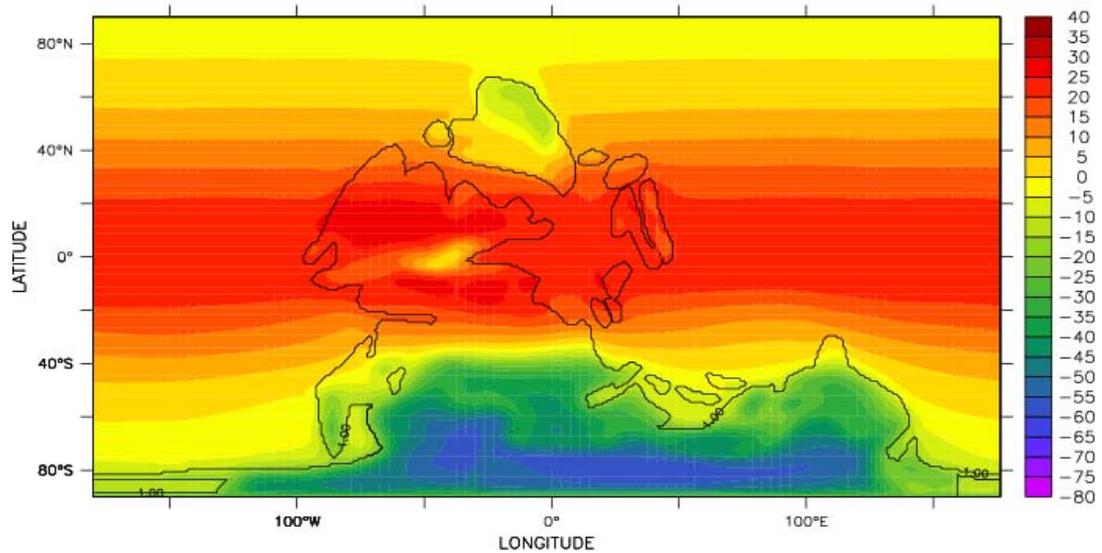
Relief (m) au Permo-Carbonifère de la simulation sans calotte de glace



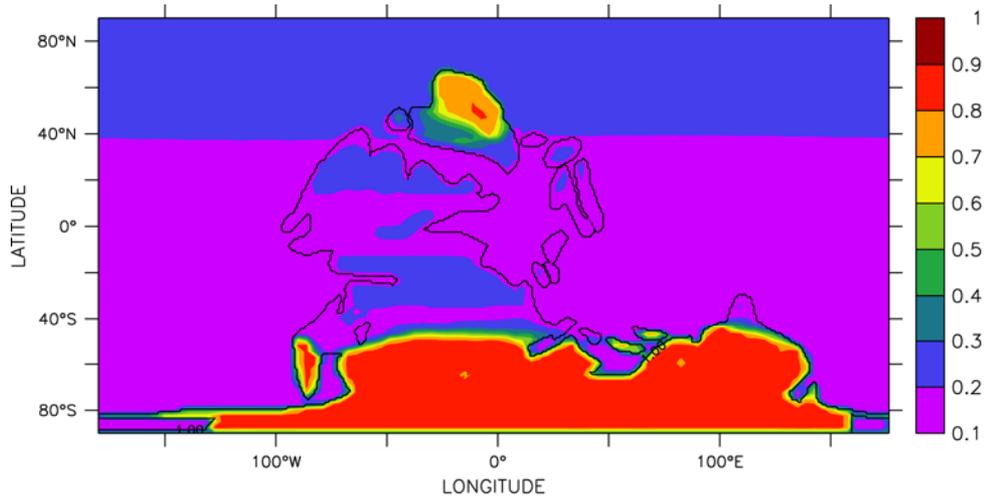
Relief (m) au Permo-Carbonifère de la simulation avec calotte de glace



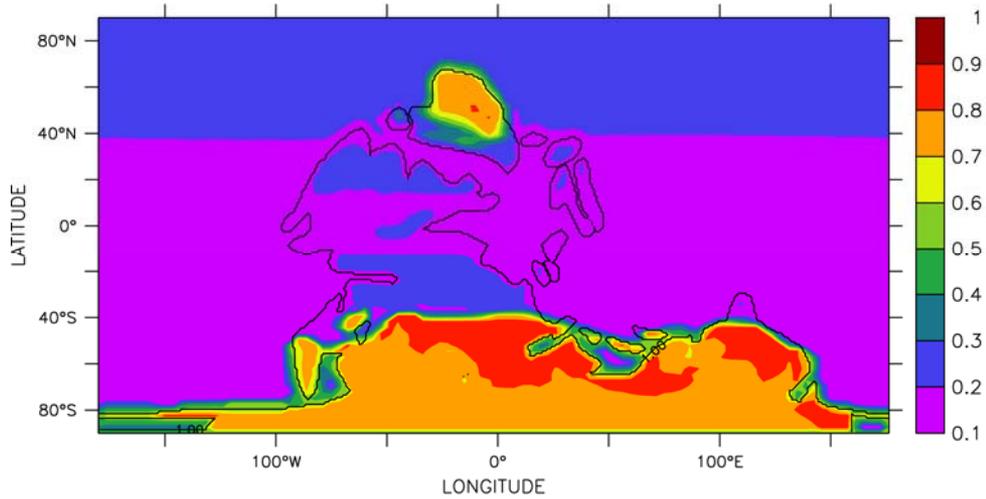
Températures annuelles (°C) de la simulation sans calotte de glace



Températures annuelles (°C) de la simulation avec calotte de glace



Albédo DJF, simulation sans calotte de glace



Albédo DJF, simulation avec calotte de glace

Le Crétacé

la référence en matière de climat globalement chaud



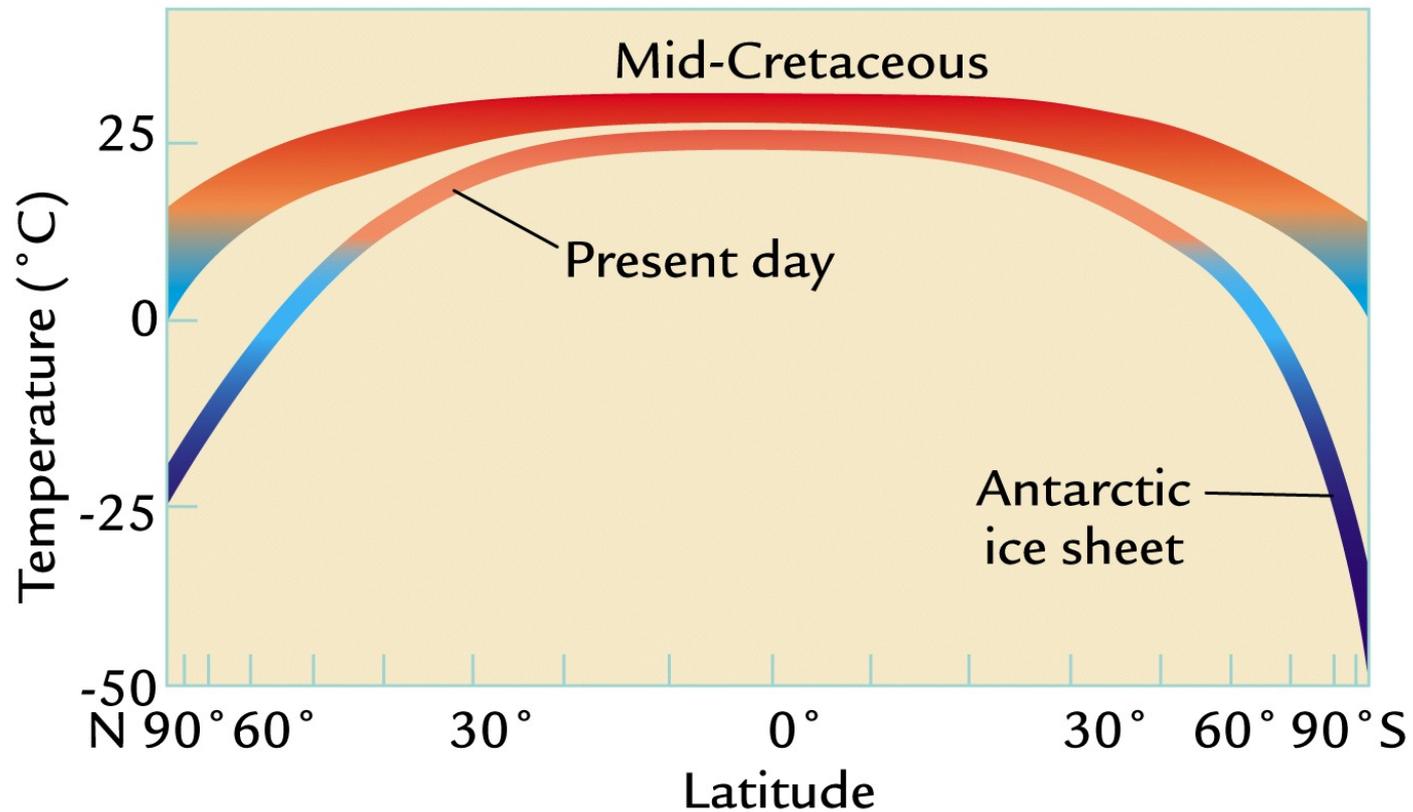
Dinosaures sur l'île d'Axel Heiberg (72°N)



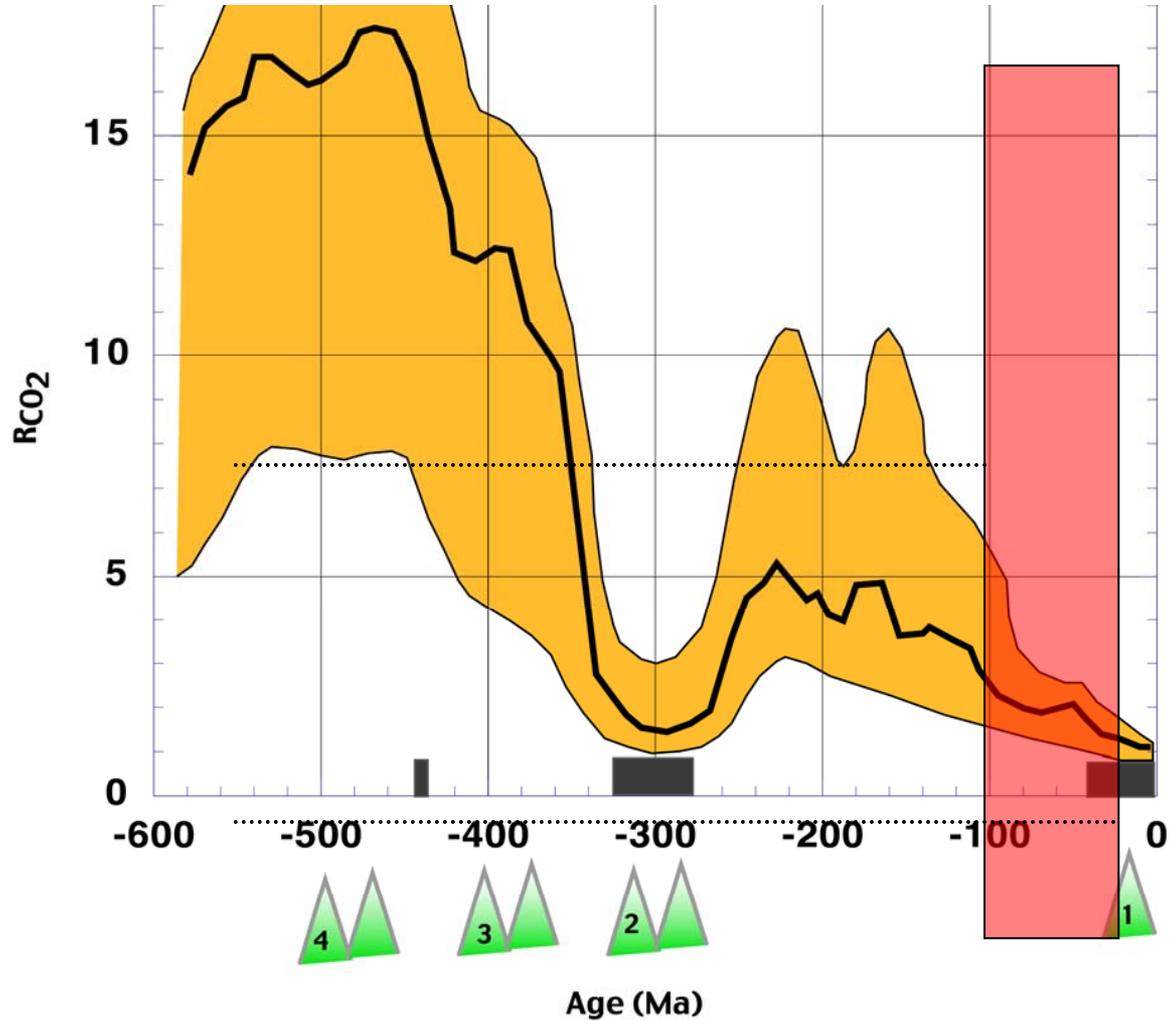
Feuille fossile découvert dans la région Arctique Canadienne

⇒ Migration des niches écologiques \approx 2000 km

La température moyenne du globe au cours des périodes les plus chaudes au Crétacé serait de 6°C supérieur à l'actuel

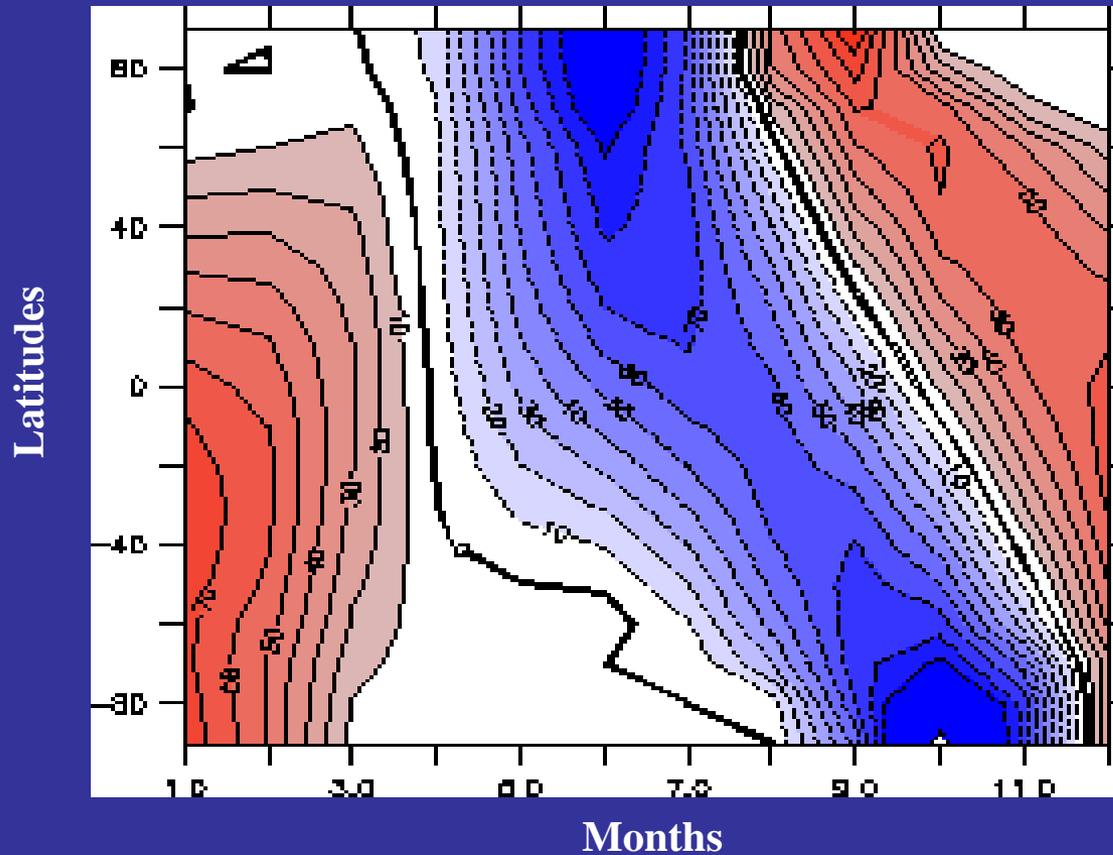


Evolution de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone (CO₂) à l'échelle des temps géologiques

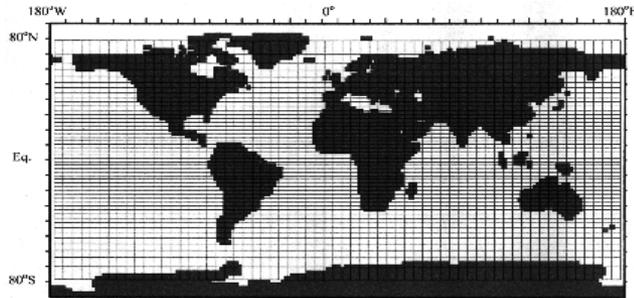


Hypothesis First forcing: Insolation

115 Ky - 126 Ky

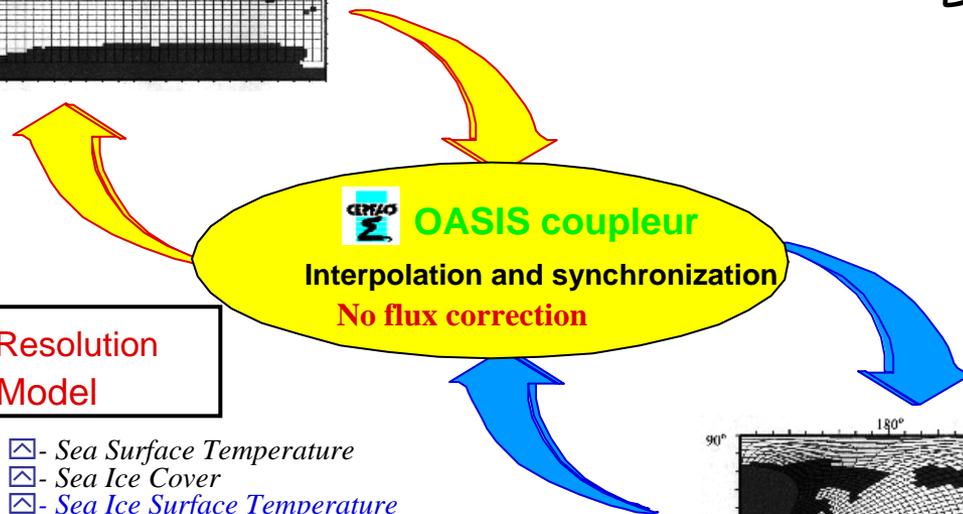


IPSL - Coupled Ocean Atmosphere Model



 **LMD 5.3**
Atmospheric Model
(64 x 50 x 11)

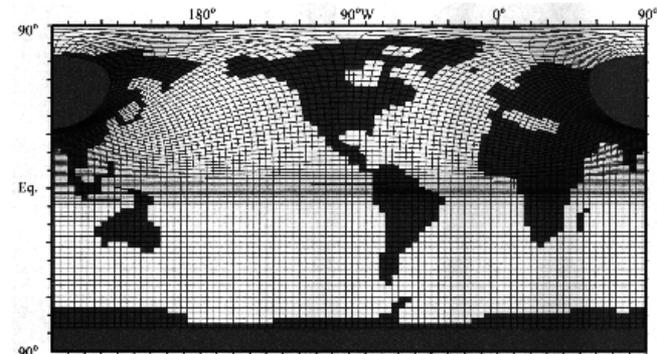
Le Clainche (2000)



 **IPSL Low Resolution Coupled Model**

- ☒ - Sea Surface Temperature
- ☒ - Sea Ice Cover
- ☒ - Sea Ice Surface Temperature
- ☒ - Sea Ice Albedo

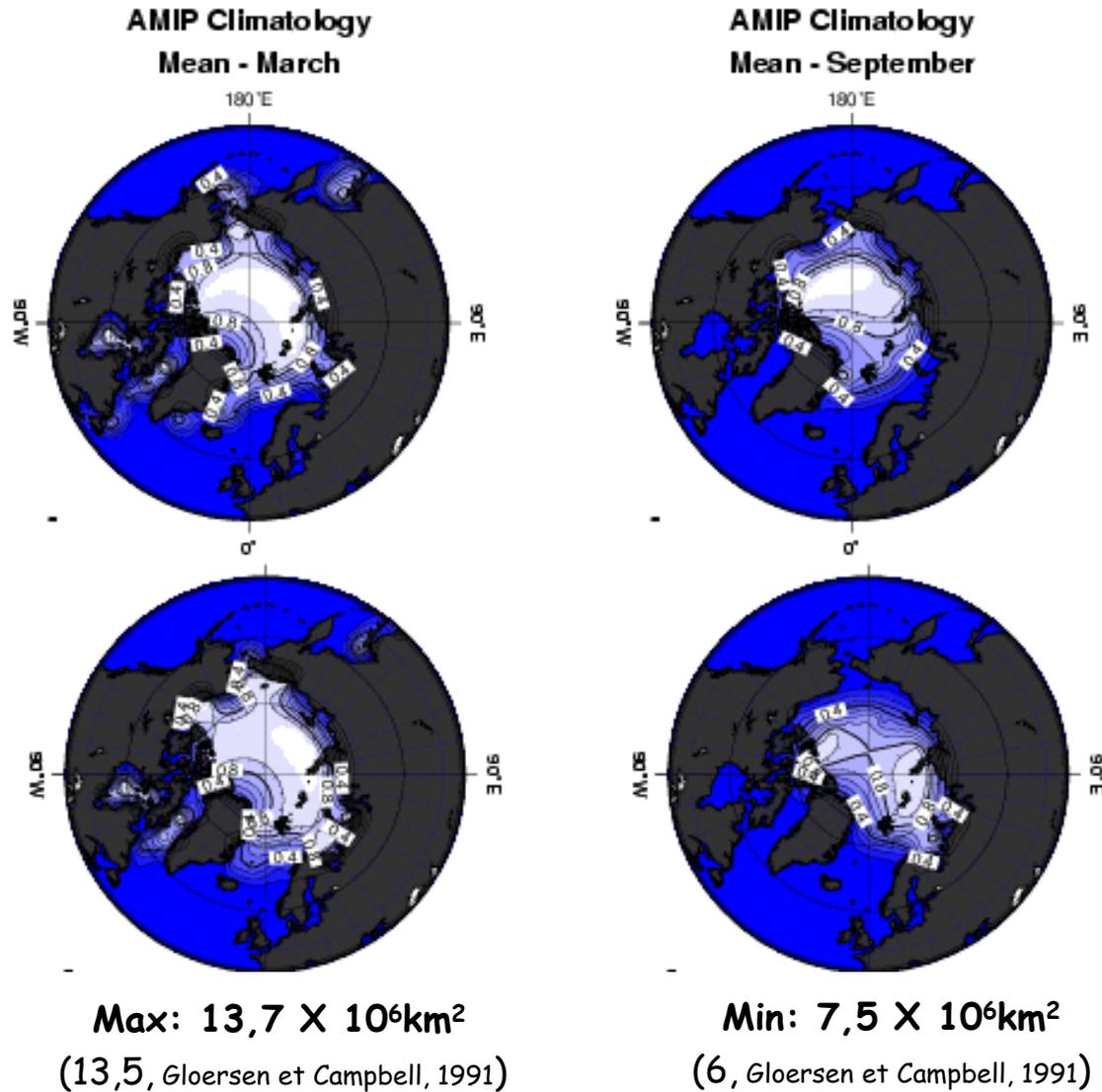
 **OPA-ICE7**
Ocean Sea Ice Model
(92 x 76 x 30)



IPSL - Coupled Ocean Atmosphere Model

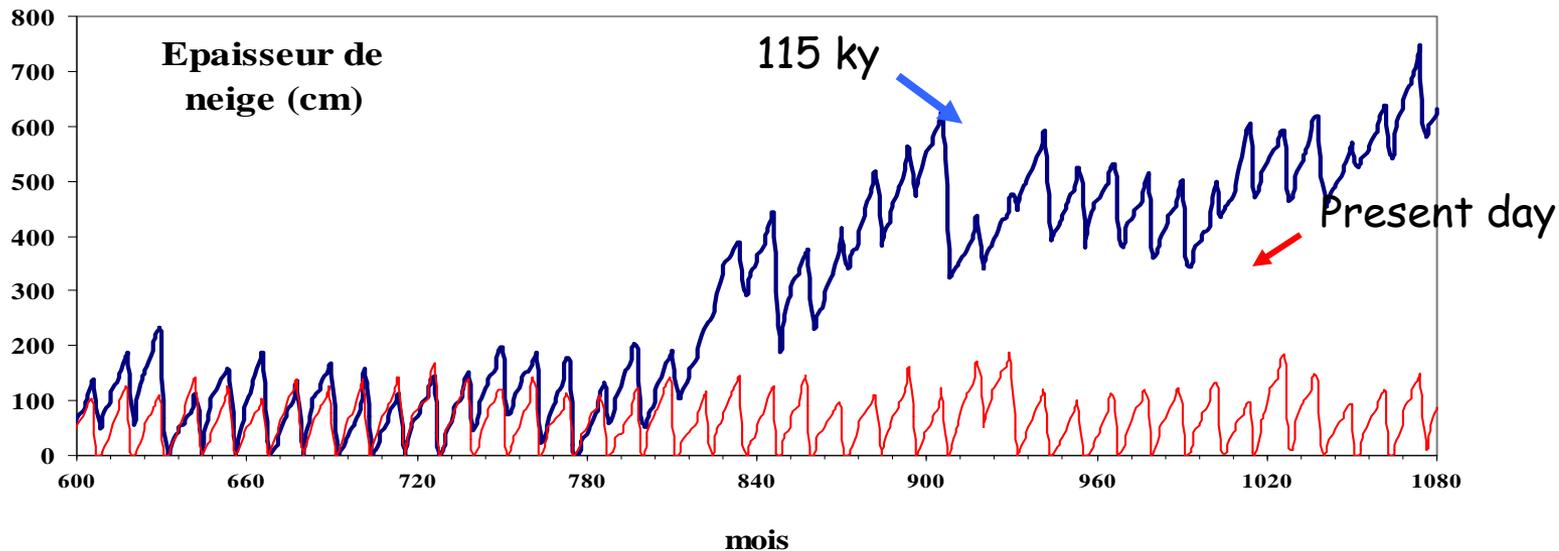
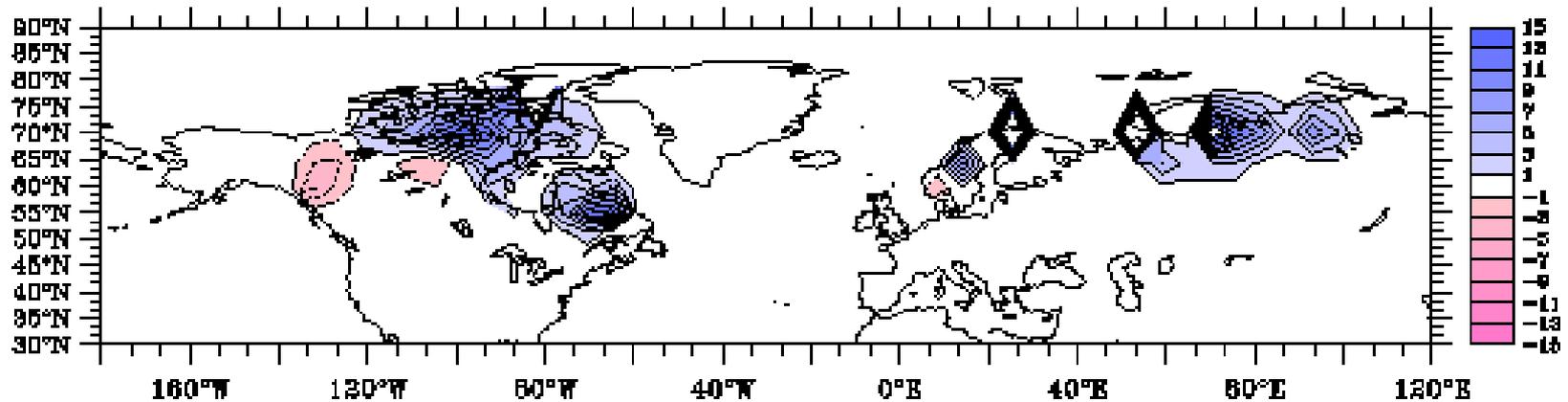
Sea Ice Cover

Le Clainche (2000)



The role of Ocean Last Glacial Inception

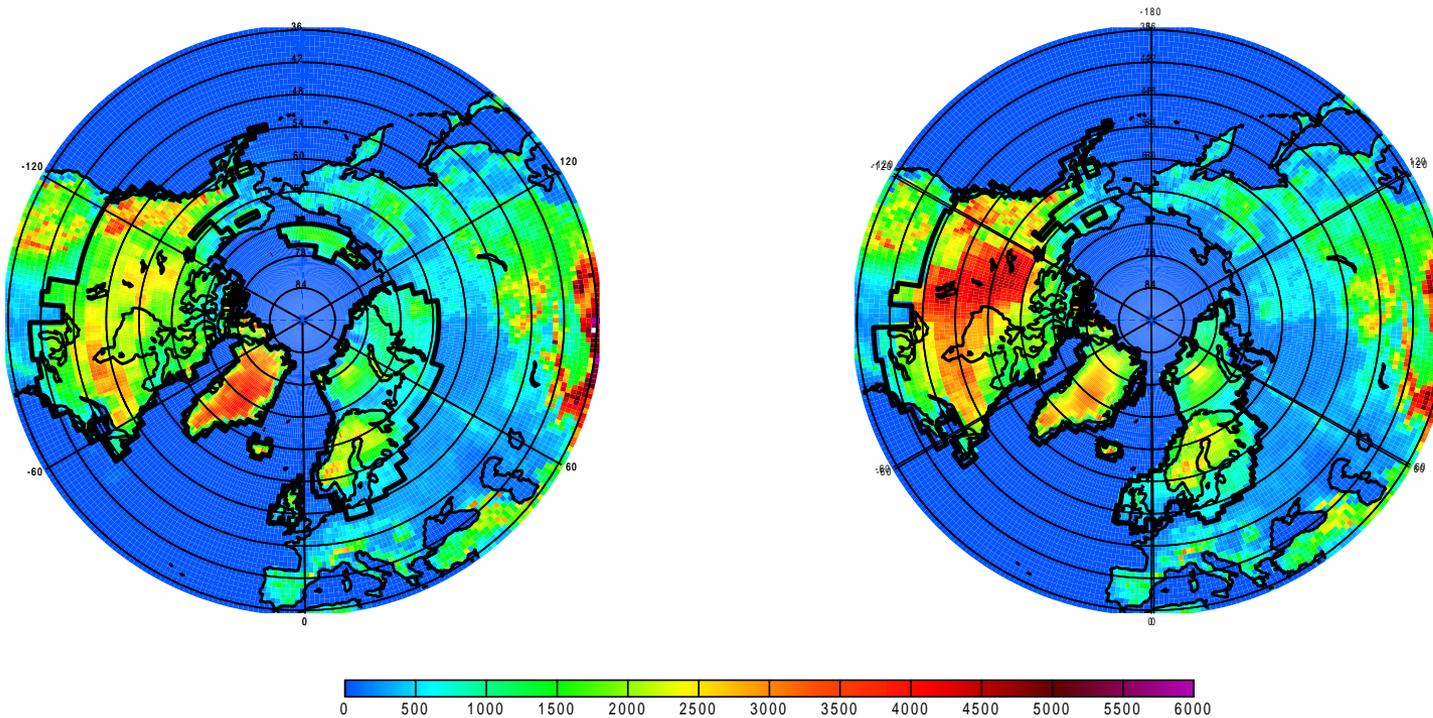
Changes in snow depth during summer (cm)



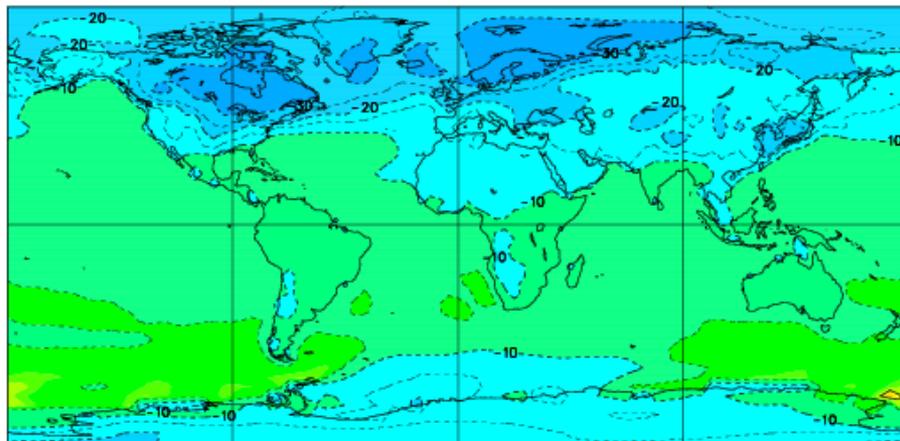
New ice5G reconstruction (Peltier, 2004)

Better constraint for Laurentide ice sheet include results from EU QUEEN group for Fennoscandia ice-sheet

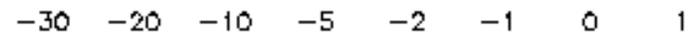
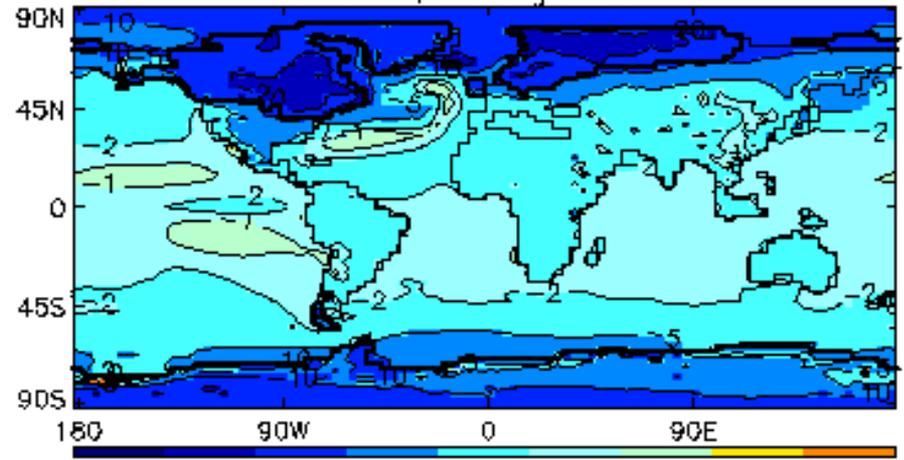
Peltier's ICE4G vs ICE5G ice-sheets



CCCMA 21K-0K SAT (deg C)

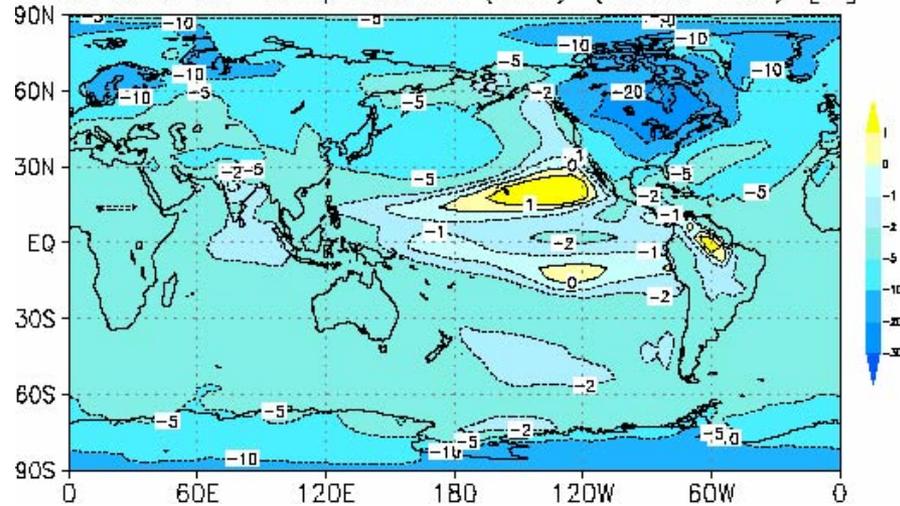


HadCM3, average -3.8K



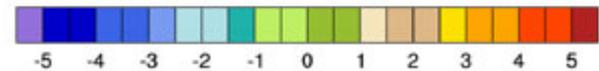
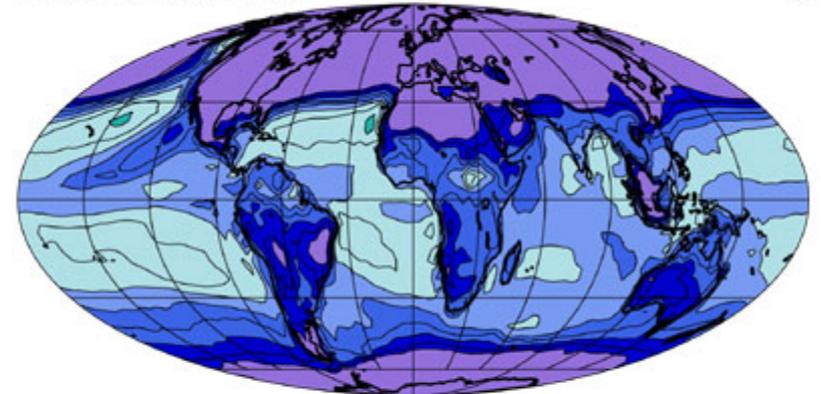
Annual mean surface air temperature 21ka-0ka

Surface air temperature (ann) (21ka-0ka) [C]

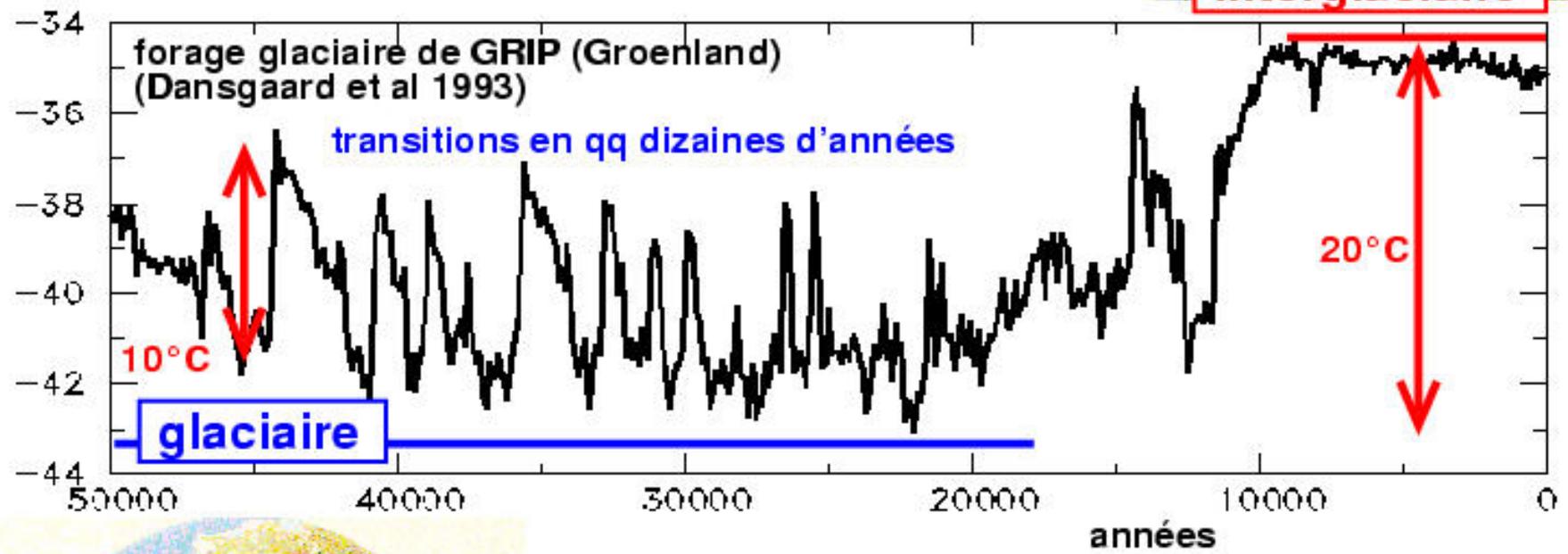


CSM

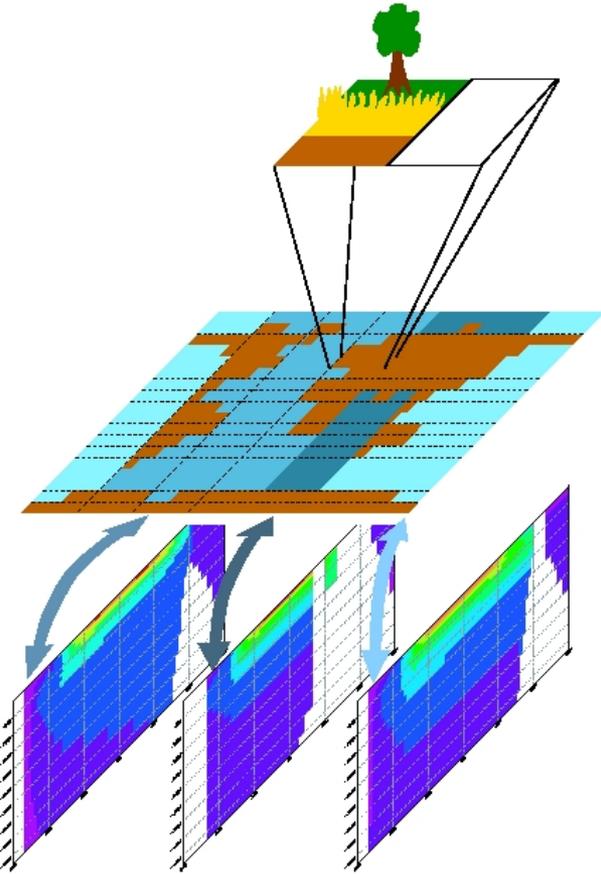
Surface temperature (radiative)



Variabilité millénaire

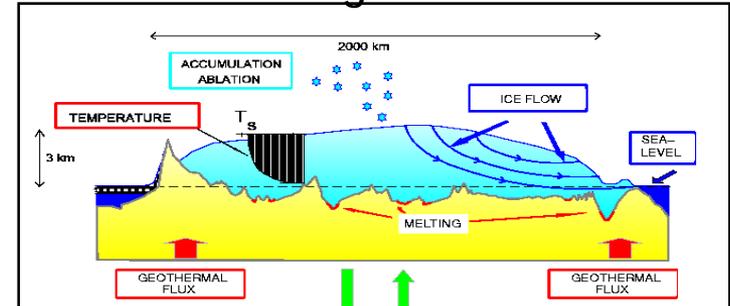


Le modèle CLIMBER



Développé initialement au PIK, Potsdam

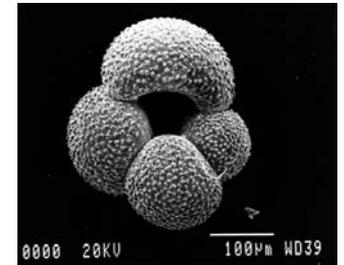
GREMLINS : modèle de calottes de glace



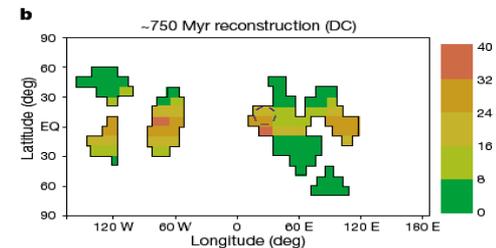
*Interactions
cryosphère - climat*

Modélisation des traceurs
isotopiques : ^{18}O , ^{13}C

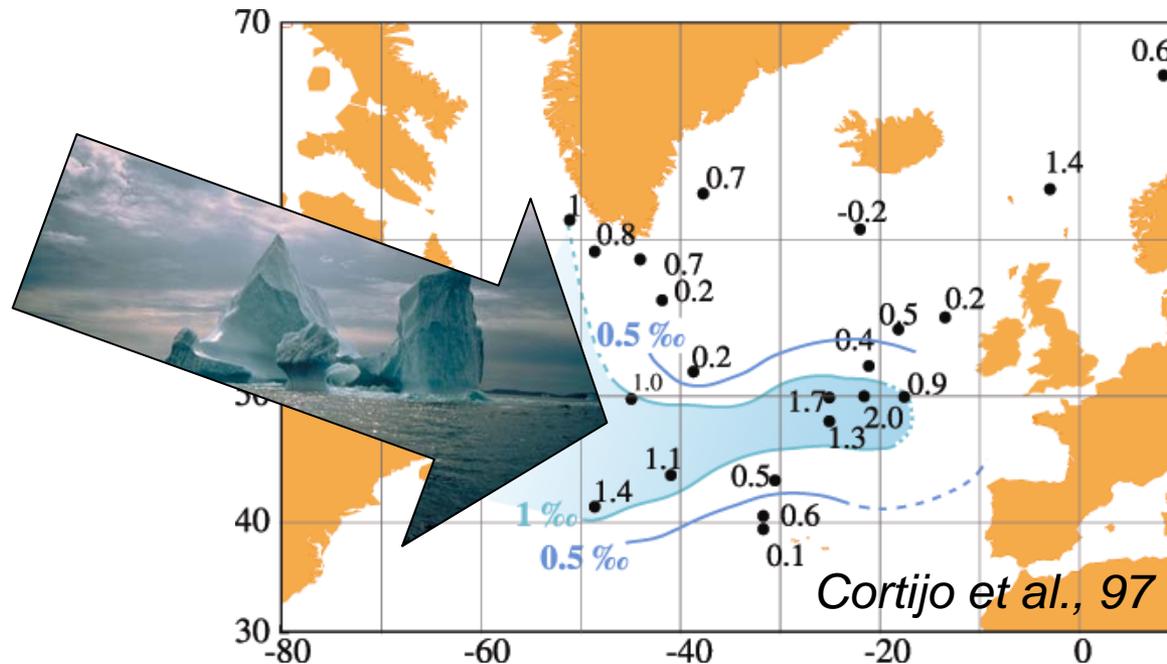
*Comparaison
modèle - données*



GEOCLIM : le CO_2 aux échelles
de temps géologiques



Evènement de Heinrich : une fonte catastrophique d'icebergs en Atlantique nord



Mécanisme :

Fonte
d'icebergs



Apport d'eau
douce à l'océan
Atlantique



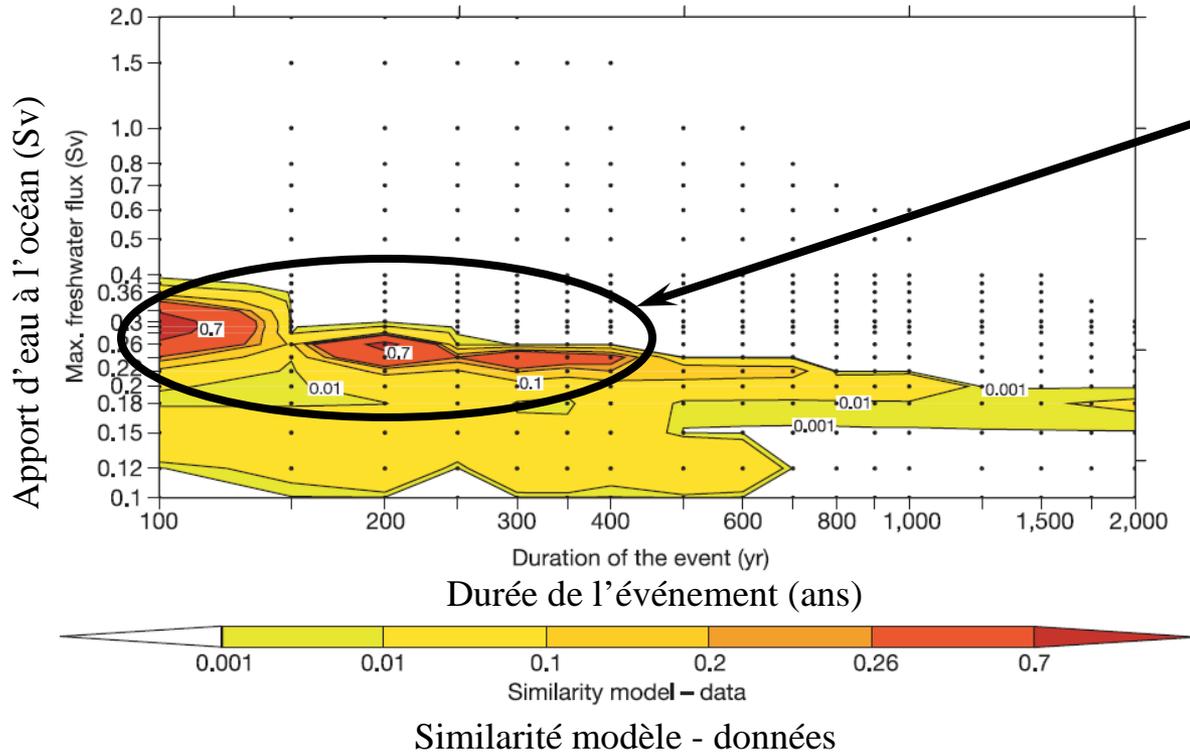
Arrêt de la
circulation
thermohaline

Questions posées :

Durée de l'évènement ?

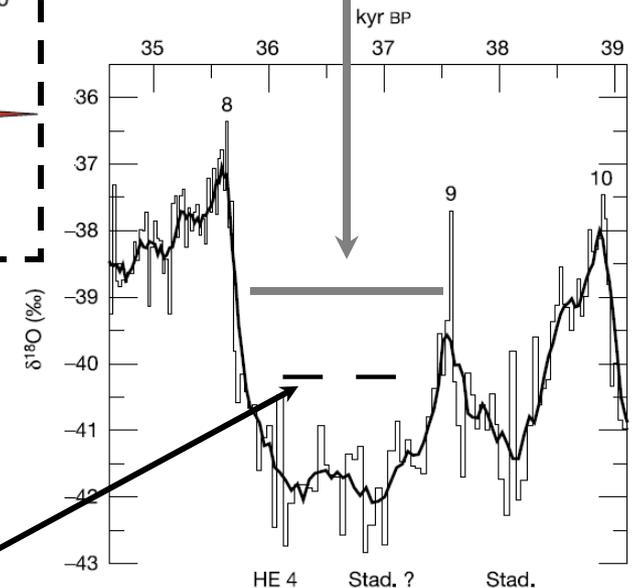
Volume d'icebergs émis ?

Utiliser un modèle de complexité intermédiaire pour évaluer un espace de phase : exemple avec le modèle CLIMBER



Zone de meilleur accord modèle - données

Durée estimée avant cette étude



Durée estimée avec cette étude

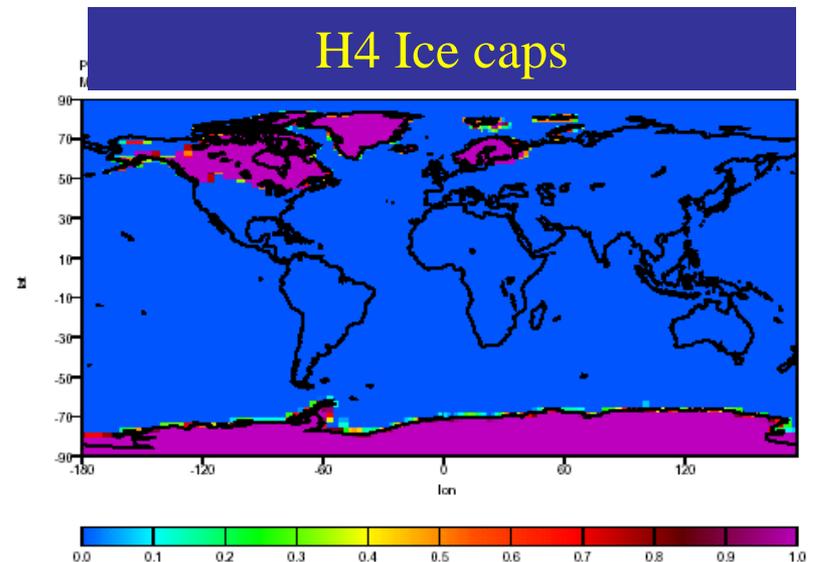
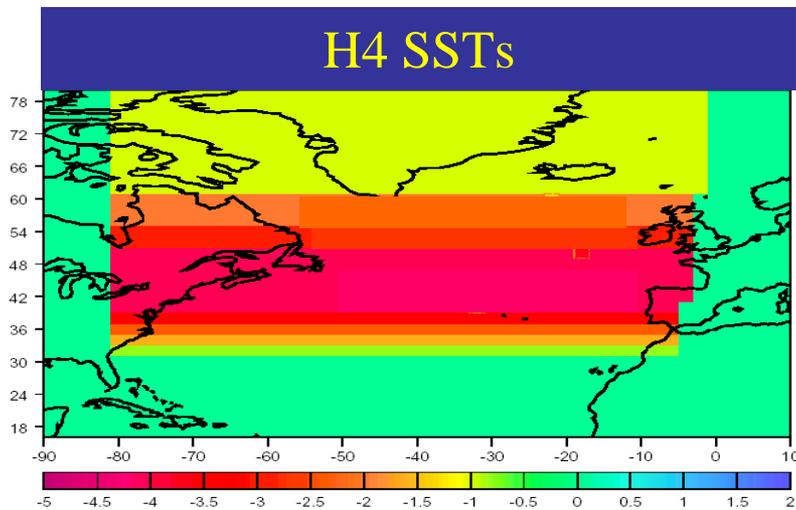
D. Roche, D. Paillard & E. Cortijo

NATURE | VOL 432 | 18 NOVEMBER 2004

Impact de l'événement de Heinrich 4 sur la péninsule ibérique

Atmospheric General Circulation Model: LMDZ.3.3 zoomé (144 x 108)

Simulations	Conditions limites
Avant Heinrich 4	LGM SSTs + 39 ky BP o.p., CO ₂ at 209 ppmv (Vostok), Reduced Ice sheets*
Pendant Heinrich 4	Baisse des SST (sur Atlantique Nord) + conditions limites H4

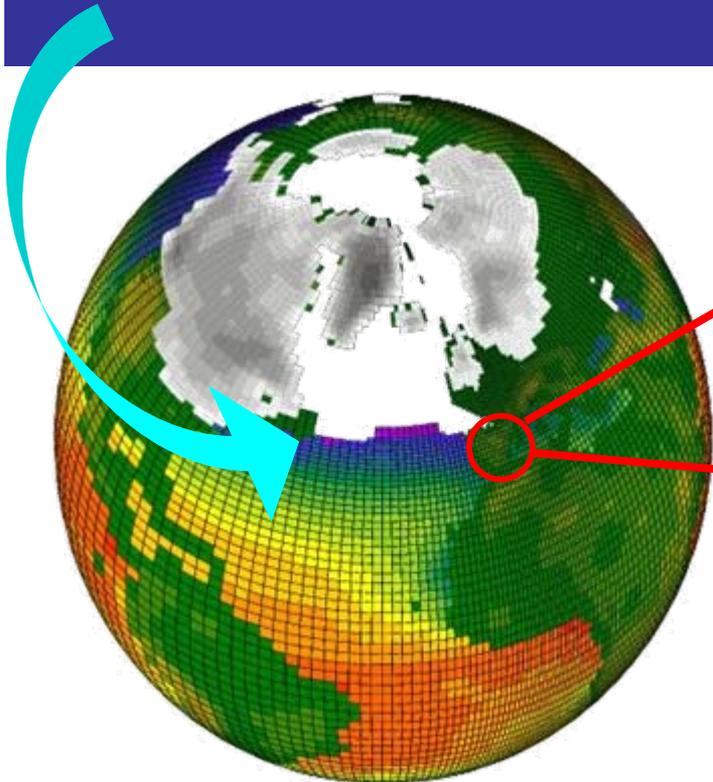


Impact de l'événement de Heinrich 4 sur la péninsule ibérique (Résultats clim.)

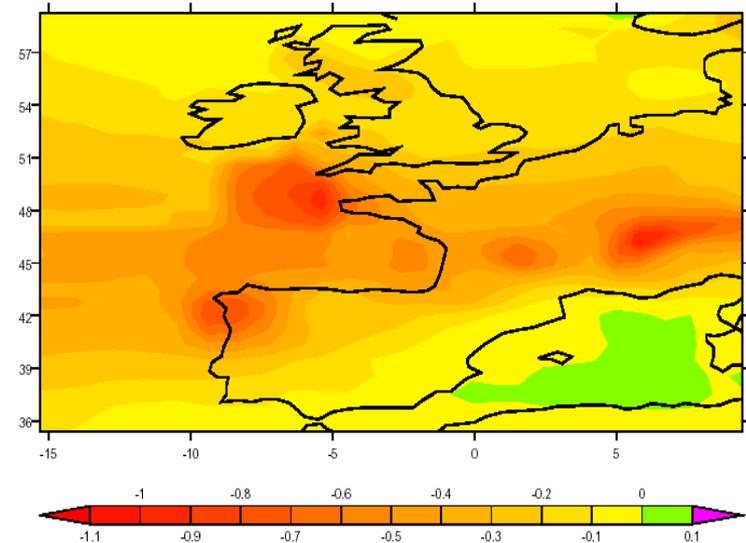
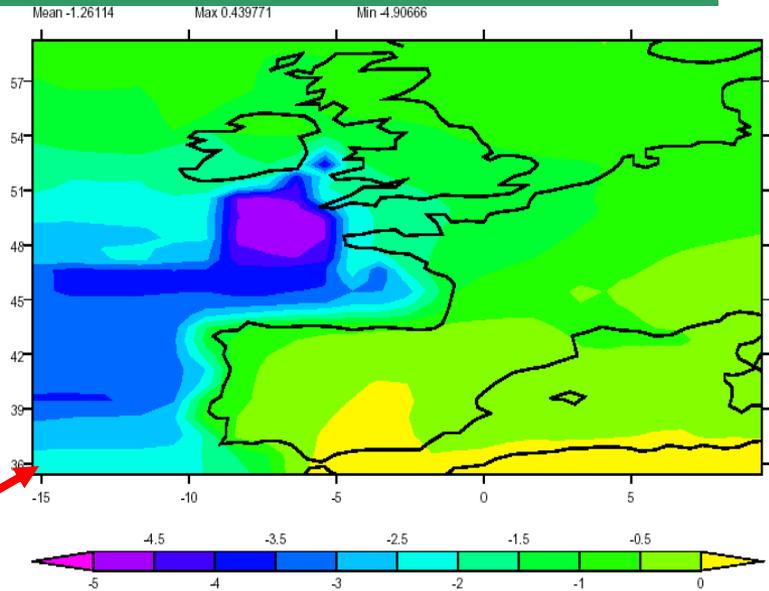
2 simulations autour de 39kyBP:

BH4 : SST LGM, param. Orb. à 39ky, CO2 à 209 ppmV, calottes réduites

H4 : Idem mais réductions des SSTs sur l'Atlantique Nord

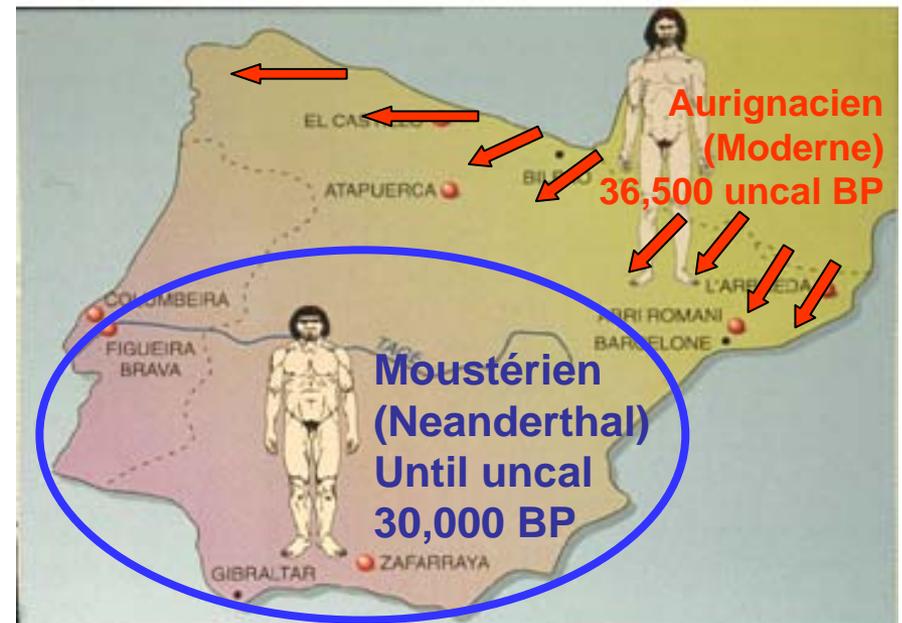
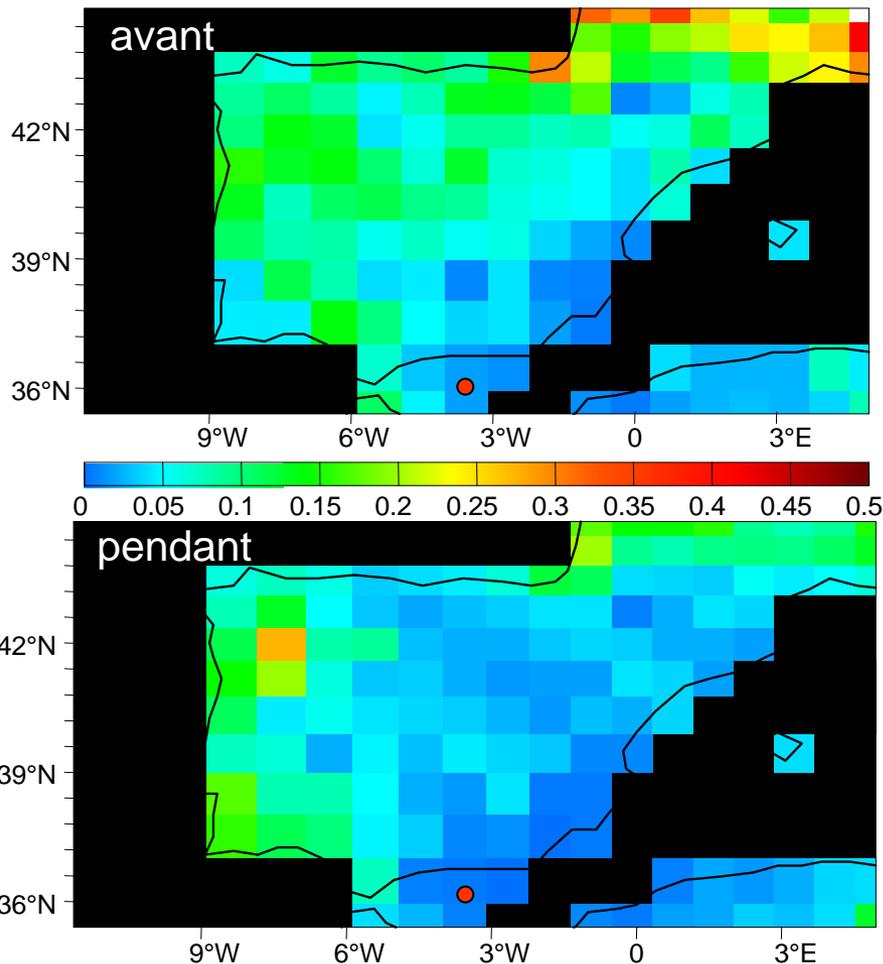


H4 - BH4



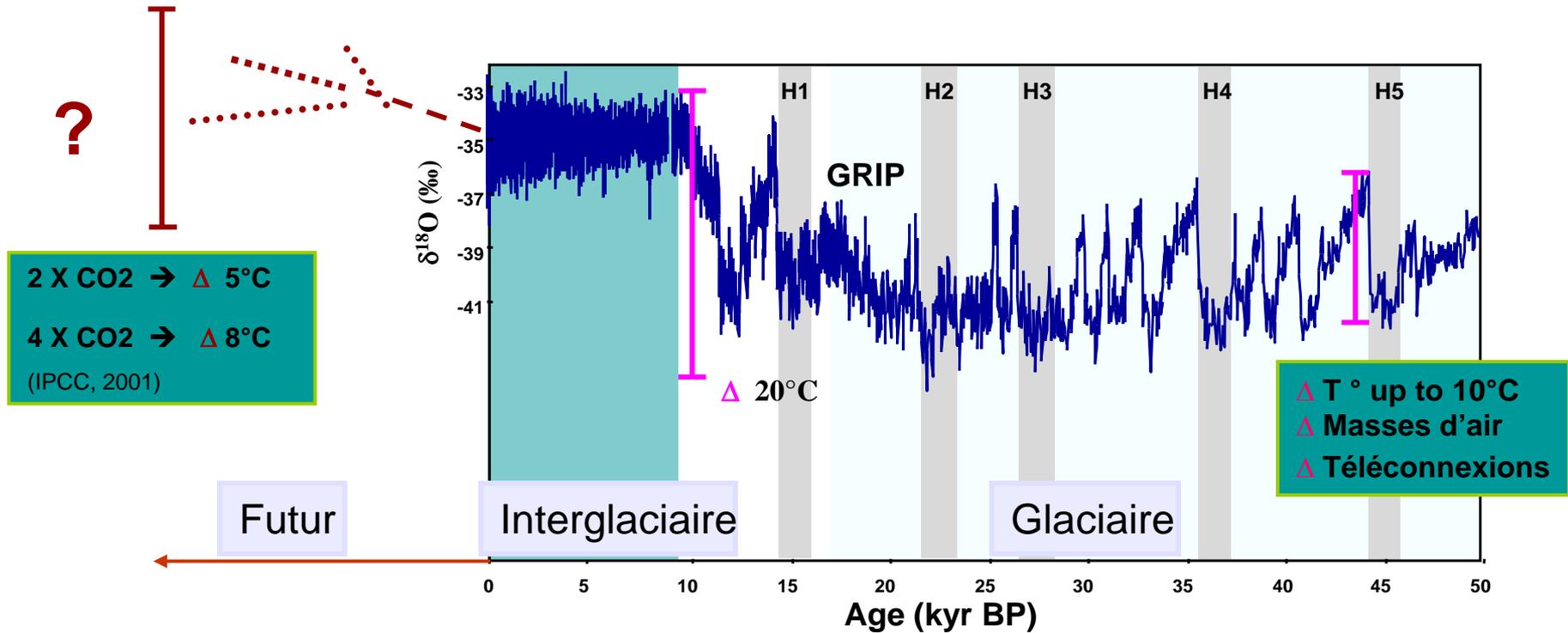
Environnement des derniers hommes de Neanderthal

Couvert arboré simulé
avant et pendant H4



Conditions environnementales
prévenant l'invasion de la
péninsule par l'homme moderne
(*H. sapiens sapiens*)
→ Maintien de *H. s. neanderthalensis*
au cours de cet événement froid,
retard de son extinction

Stabilité du système climatique à l'échelle du millénaire



Déstabilisation des calottes Groenlandaise et Antarctique

Calottes Groenlandaise et Antarctique stables

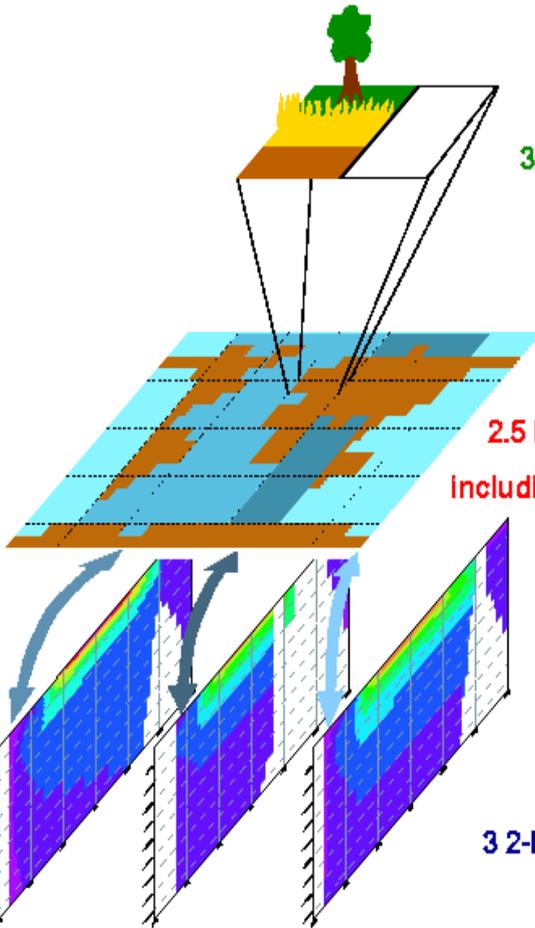
Calottes Laurentide et Fennoscandienne instables

?

Oscillations de faible amplitude

Changements climatiques rapides

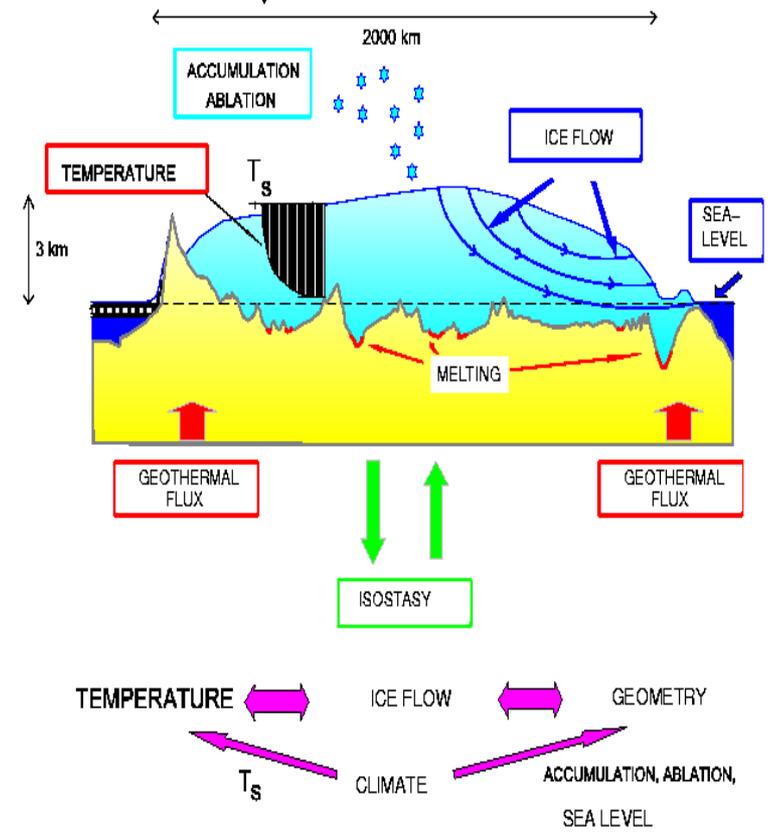
Rencontre CLIMBER-GREMLINS



VEGETATION :
3 vegetation types

ATMOSPHERE :
2.5 D statistico-dynamical model,
including hydrological cycle

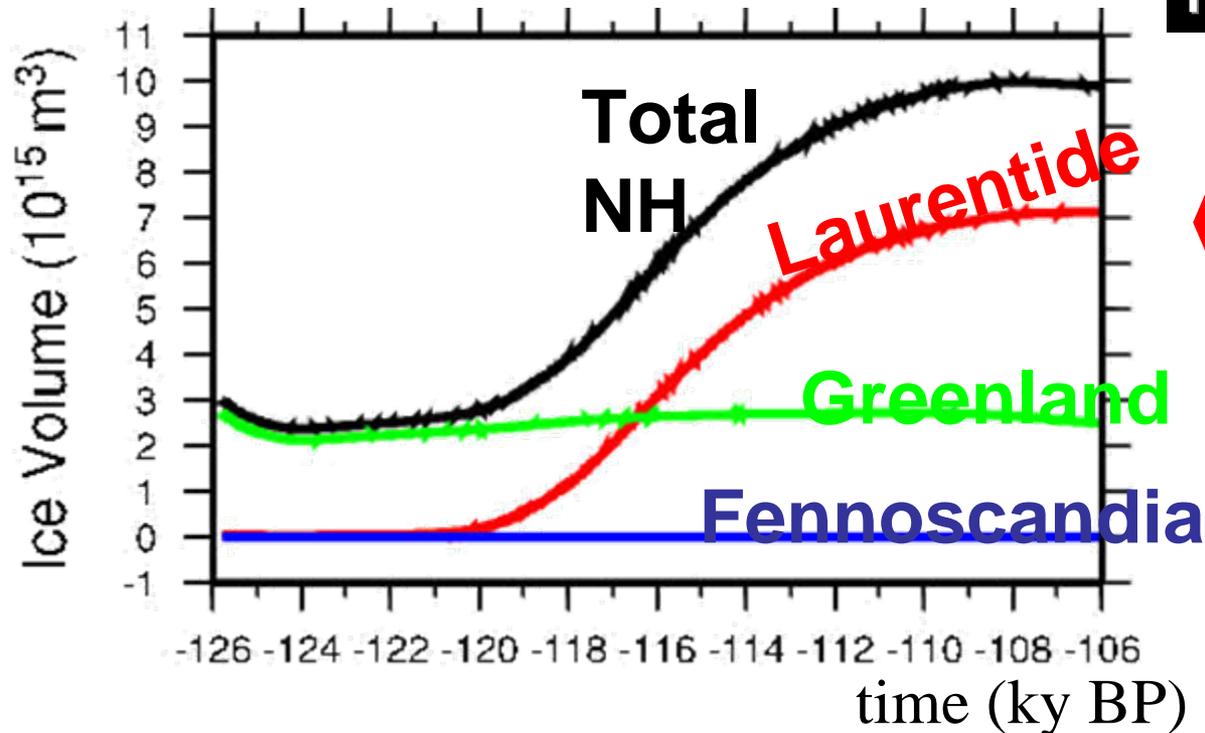
OCEAN :
3 2-D (latitude-depth) basins



L'entrée en glaciation avec CLIMBER-GREMLINS

→ *Début de la simulation : 126 000 ans*

→ *On impose CO₂ et insolation*



-17 m de Niveau marin à 106 ka

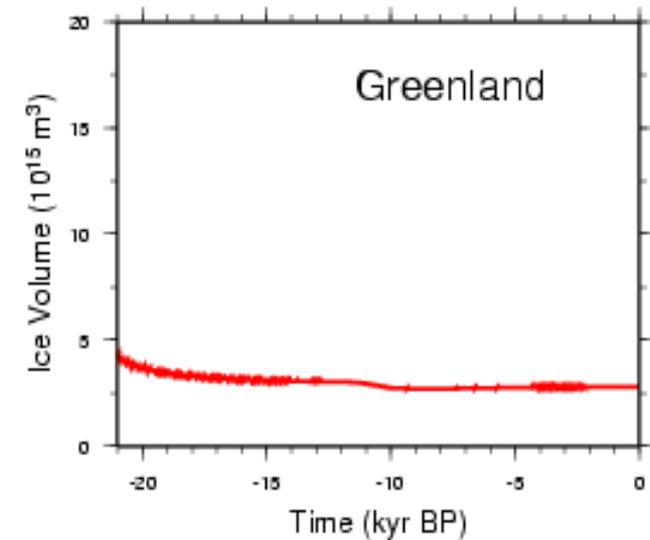
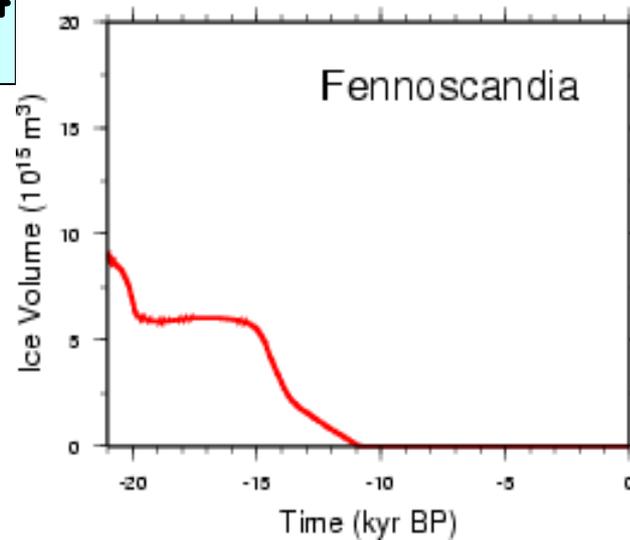
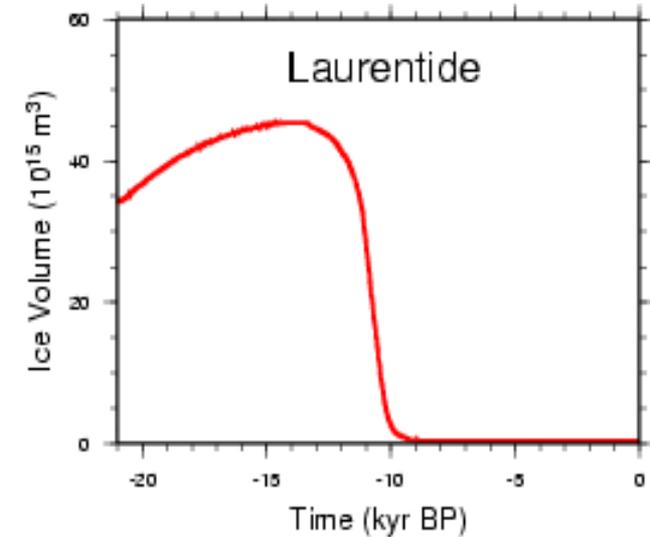
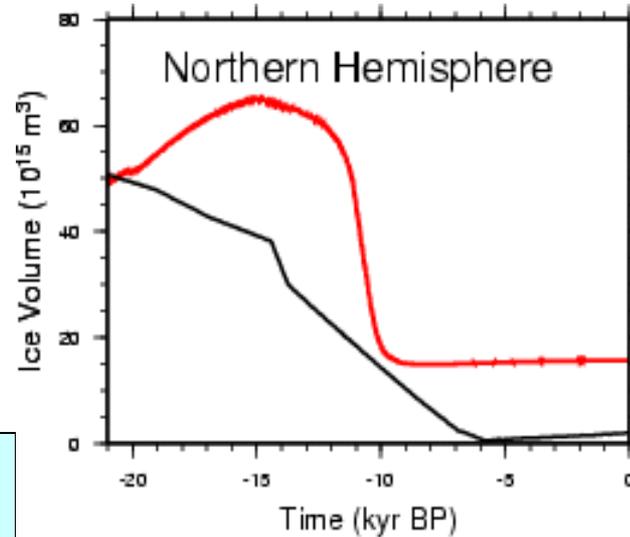


Déglaciation standard :

Volume de glace

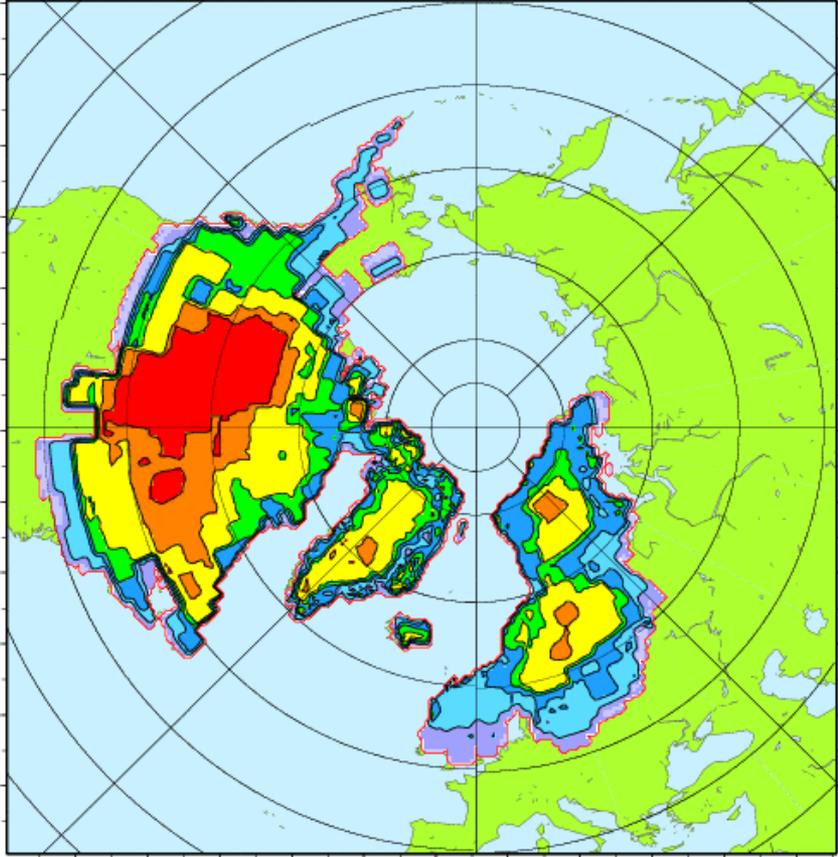
Forçages externes
Insolation + CO₂

Topo initiale :
ICE-5G (Peltier, 2004)



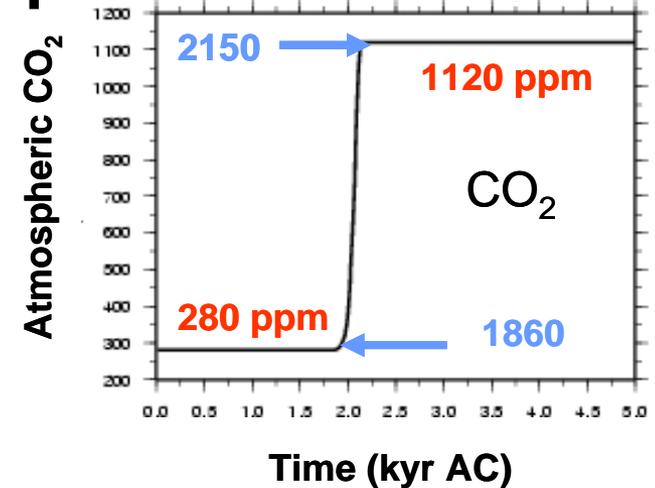
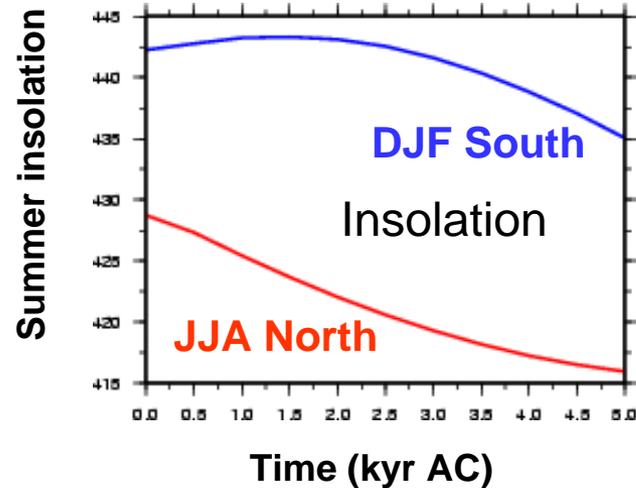
Cycle Gremlins

t = -021 ky BP



The experimental set-up : 0 – 5 kyr

External forcings



Forcing climate

→ **Use of temperature anomalies (only for GRISLI)**

$$\text{Temp (t)} = T_{\text{obs}} + T_{\text{c}}(t) - T_{\text{c}_{0k}}$$

With $T(t)$ and T_{0k} given by CLIMBER and interpolated on the GRISLI grid

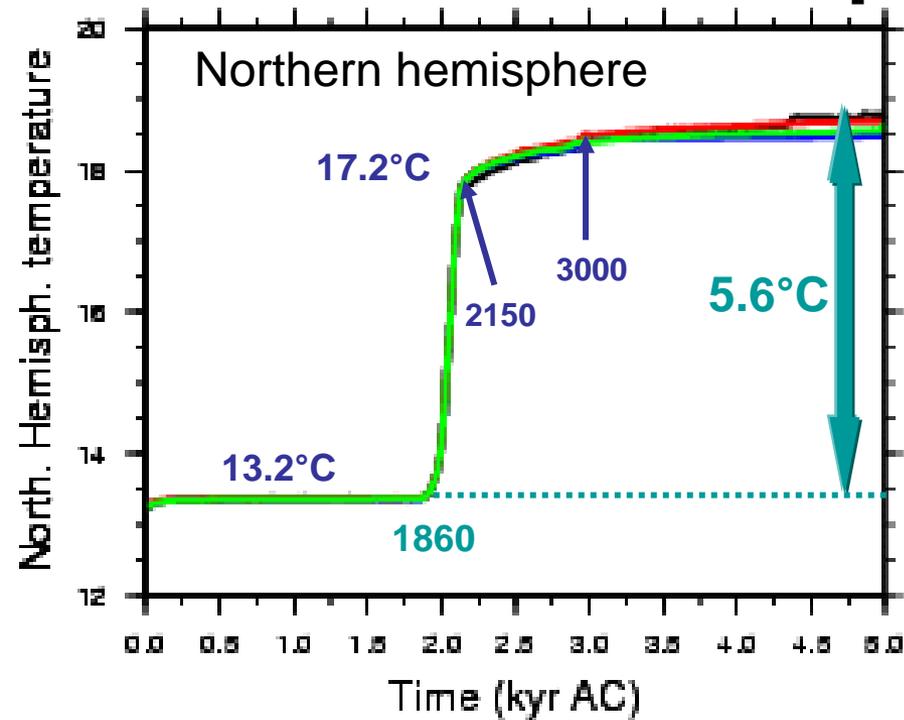
Initial state

Present-day observed ice sheet topography for both northern and southern hemispheres

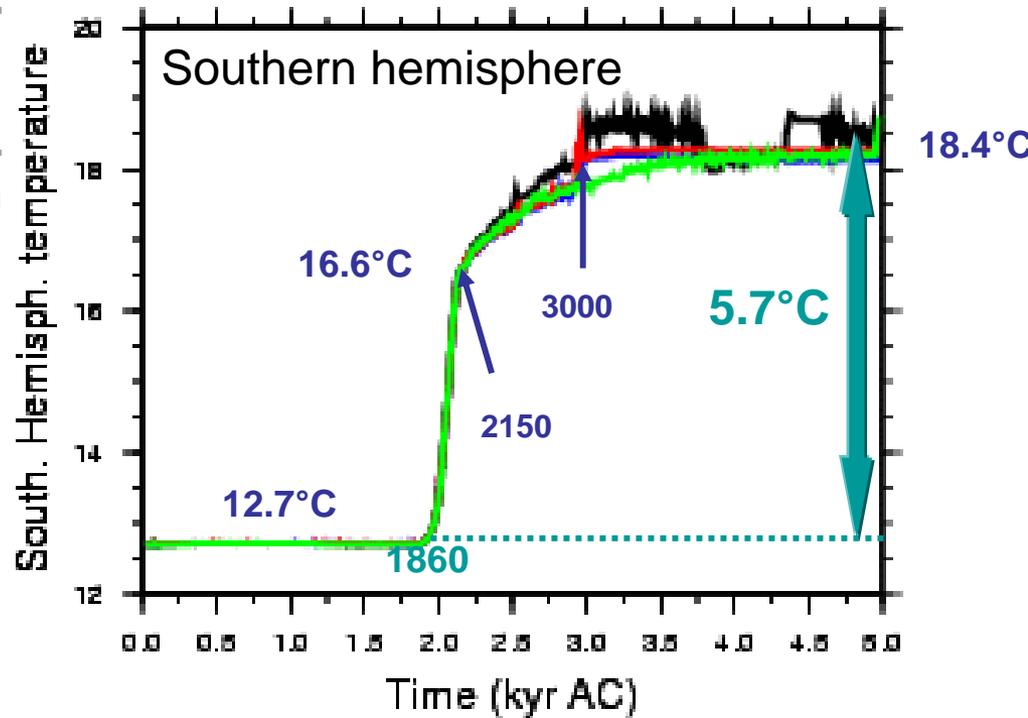
ISM forced during 200 kyr with PD observed climatic conditions

A new climatic state is then derived by integrating only CLIMBER during 10 kyr

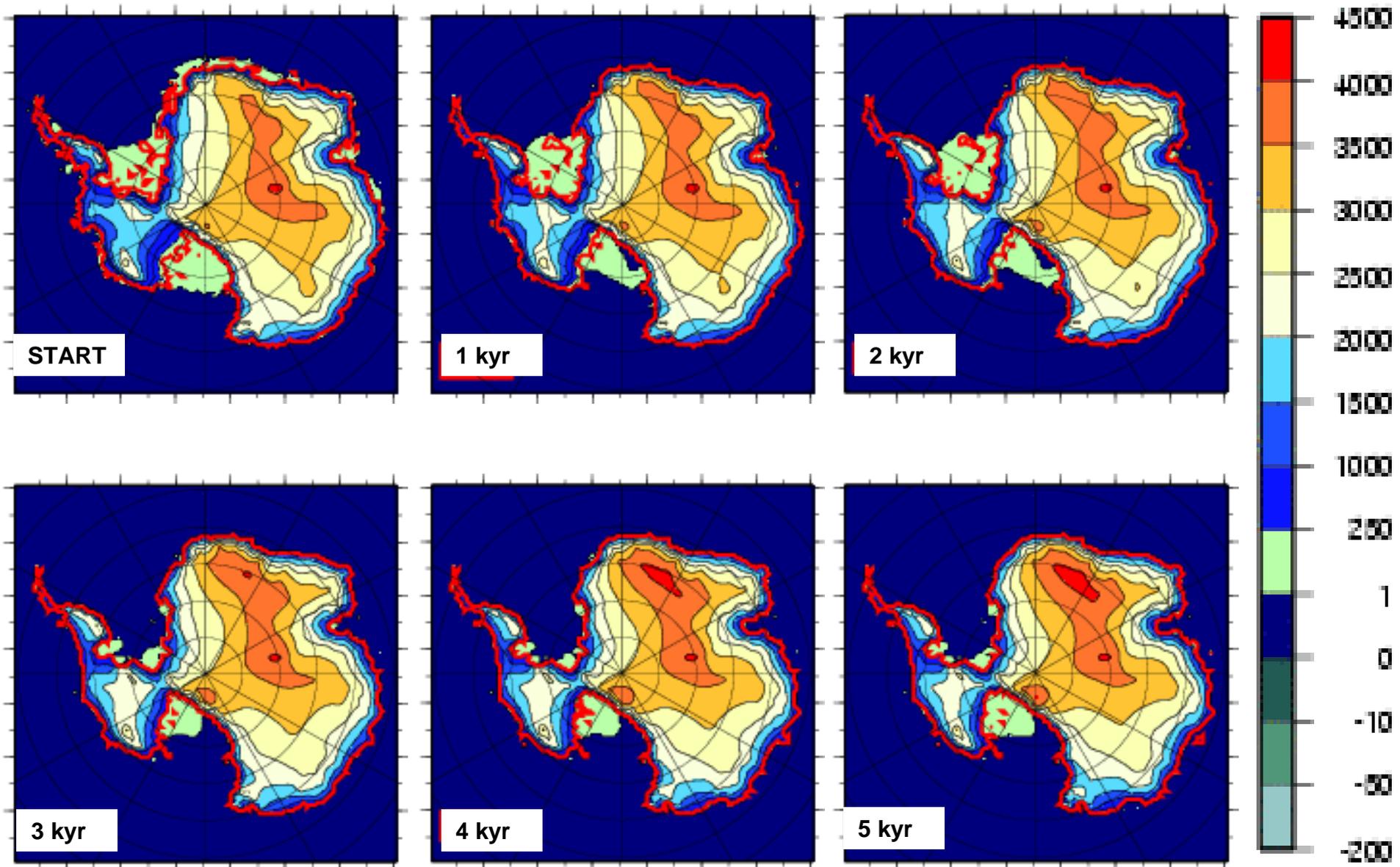
Impact on temperature ...



Effects of coupling clearly visible in southern hemisphere

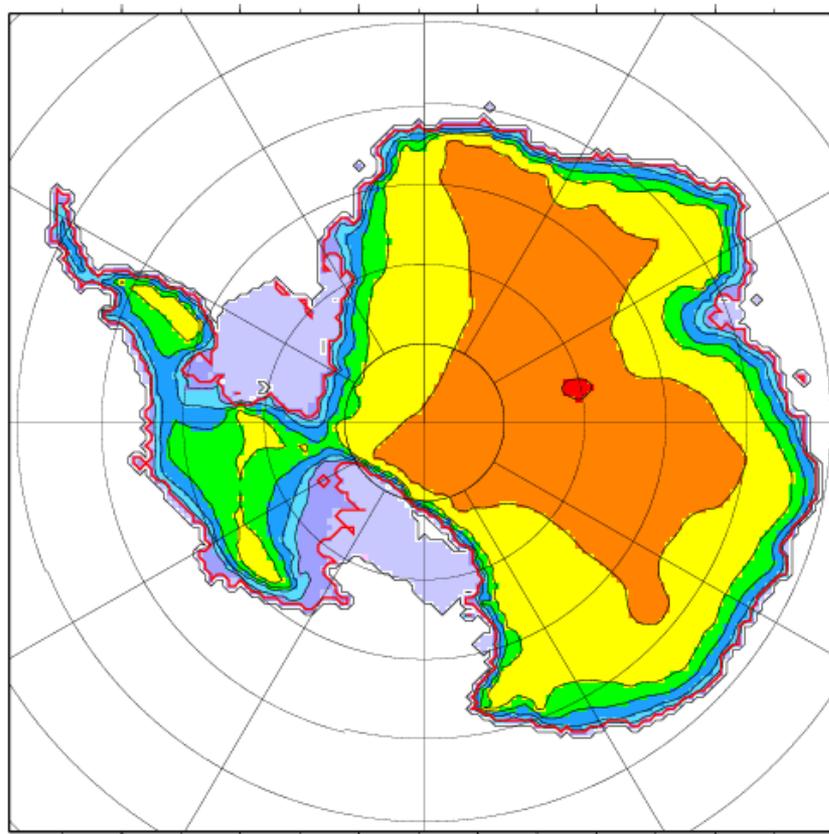
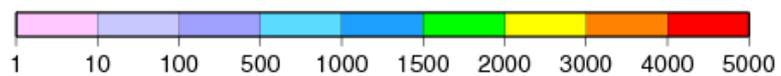


Altitude of the Antarctic ice sheet

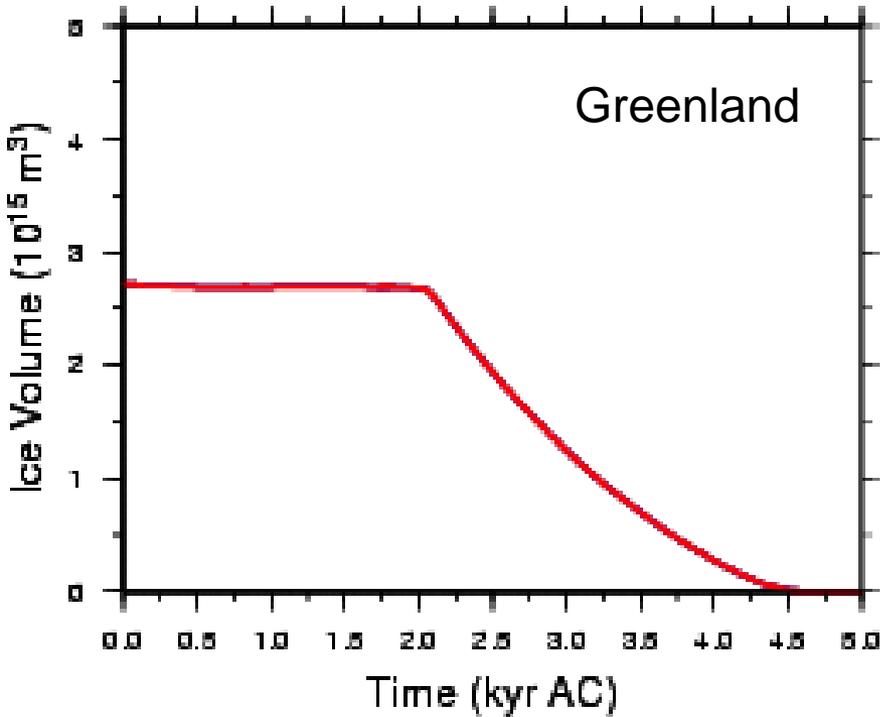


Simulation Futur

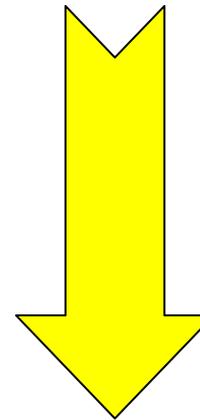
t = 00000



The Greenland ice volume evolution and ice equivalent sea-level rise

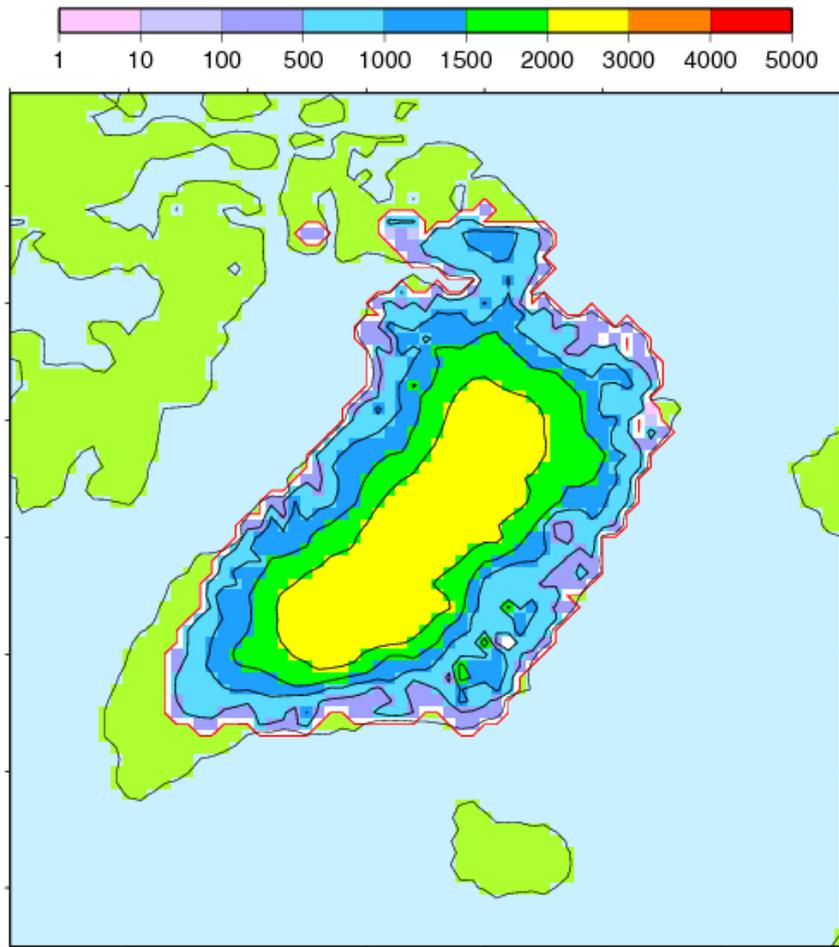


$\Delta V = 2.7 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$
Oceanic surface : $3.6 \cdot 10^{14} \text{ m}^3$



Ice equivalent sea-level = 7.5 m

Simulation Futur
t = 00100



Conclusions

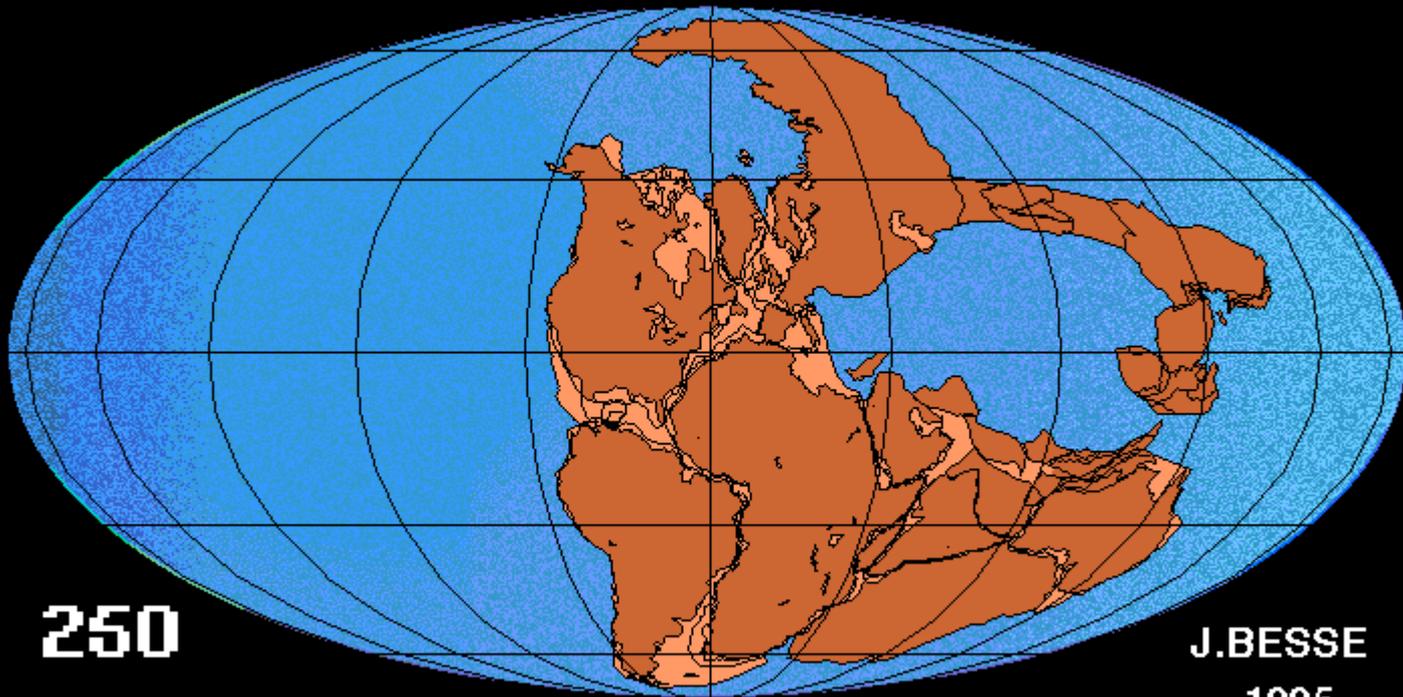
→ Vie climatique pré – Cambrienne (4 Milliards d'années)

L'histoire climatique précambrienne (4 milliards d'années) de la Terre a été, comme celles de Vénus et Mars, assez agitée

→ Le climat le plus fréquent de la Terre aussi bien avant qu'après le Cambrien est chaud et sans calotte.

Les glaciations correspondent à des dérèglements marqués de la « régulation » par les gaz à effet de serre

→ La prochaine « dérégulation marquée », c'est nous-mêmes qui allons la produire...



250

**J.BESSE
1995**



Des bouffées de Méthane

A au moins 3 réponses, on peut penser qu'il y a eu des destockages massifs de clathrate

- 1. Entre Néoprotérozoïque et Explosion Cambrienne (610 – 540 Ma)**
- 2. A la limite Permo – Trias (250 Ma)**
- 3. LPTM Paléocène / Eocène**

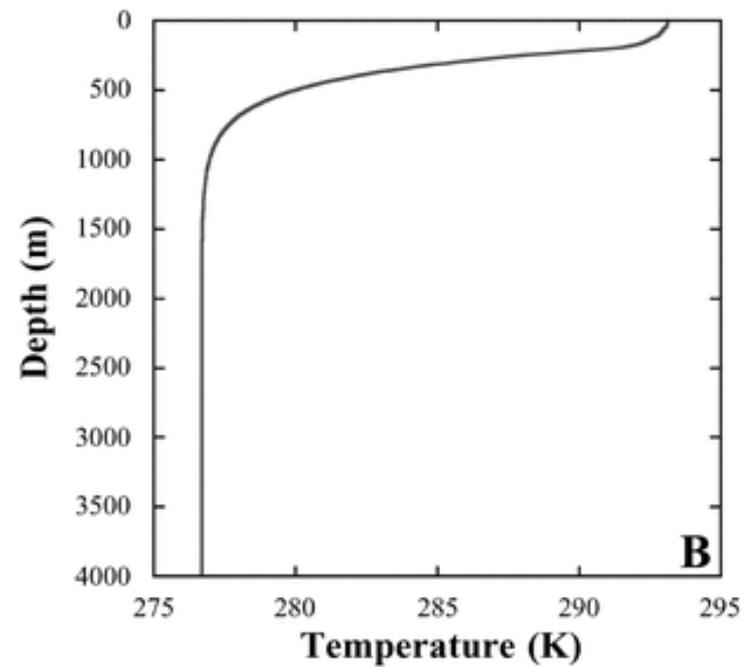
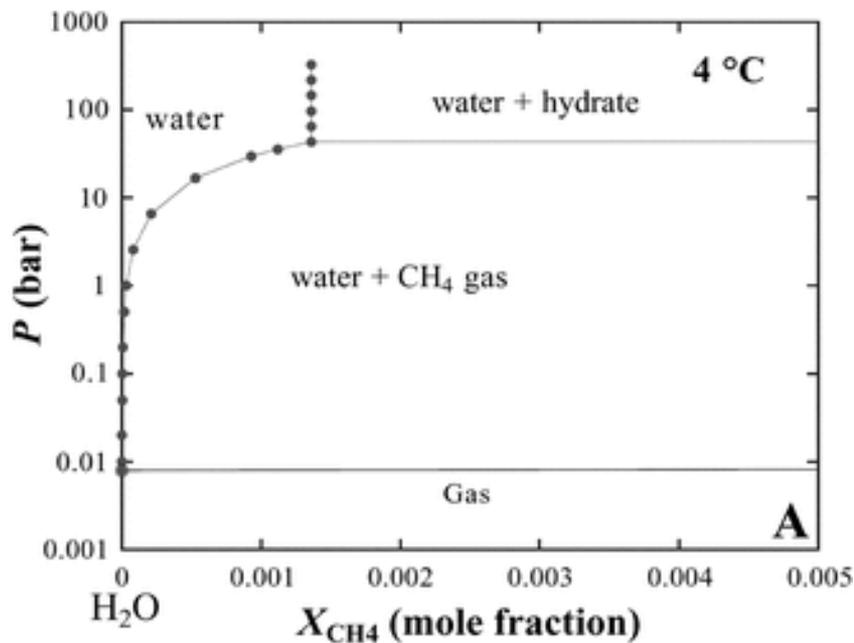
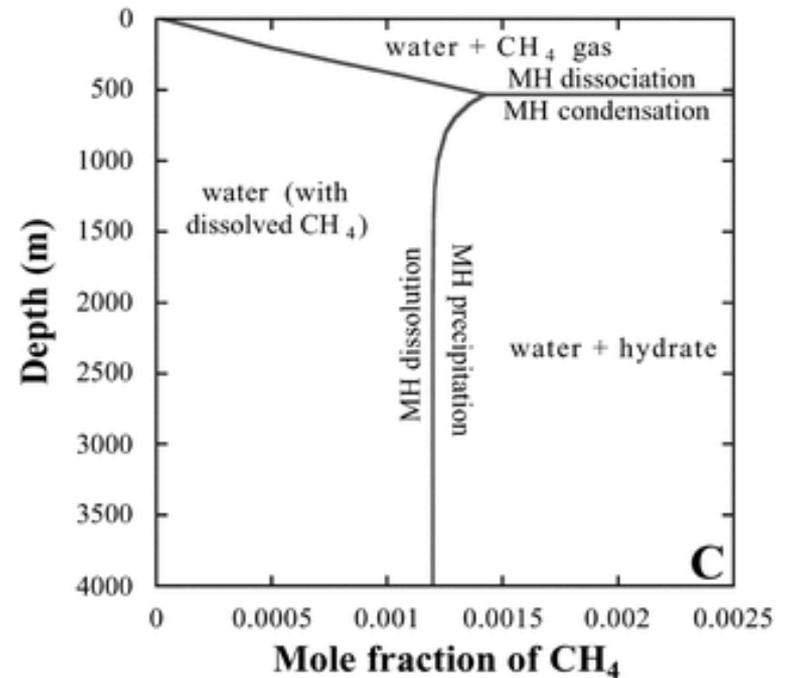


Figure 1. Diagrams pertinent to the methane-seawater system showing (A) methane **phases** with respect to pressure, (B) typical temperature profile in the ocean, and (C) expected phases with hydrostatic pressure gradient and 4 °C deep water incorporated into the depth axis (adapted from Zhang and Xu, 2003). MH is methane hydrate.



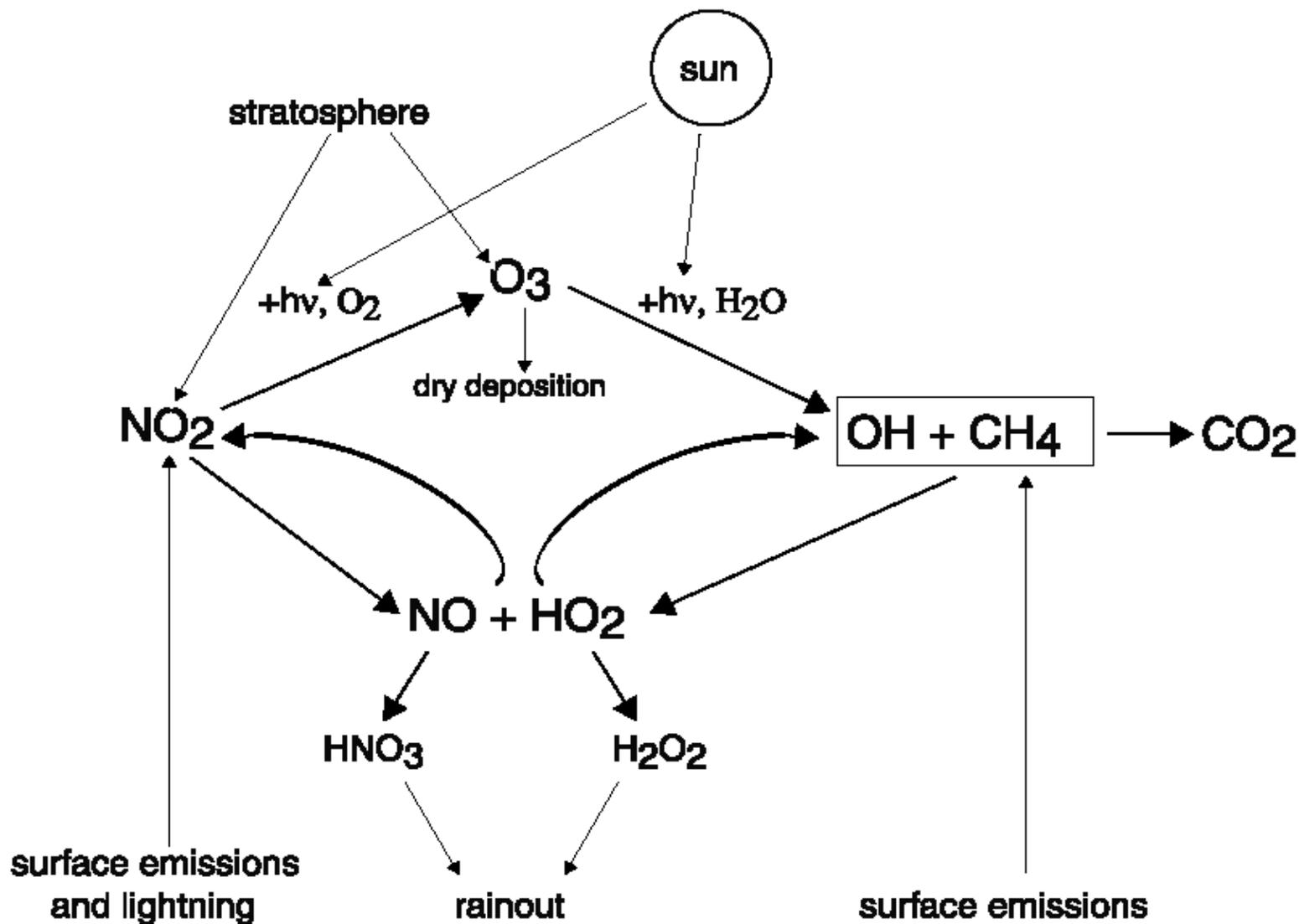


Figure 1. Simplified schematic of the tropospheric chemistry scheme, showing the primary pathways for OH radical generation and loss. For clarity, some intermediate reactions and the effects of CO and higher hydrocarbons are not shown. Increases in CH_4 decrease the OH/ HO_2 ratio and also increase the sink of HO_2 via H_2O_2 (see text for details).

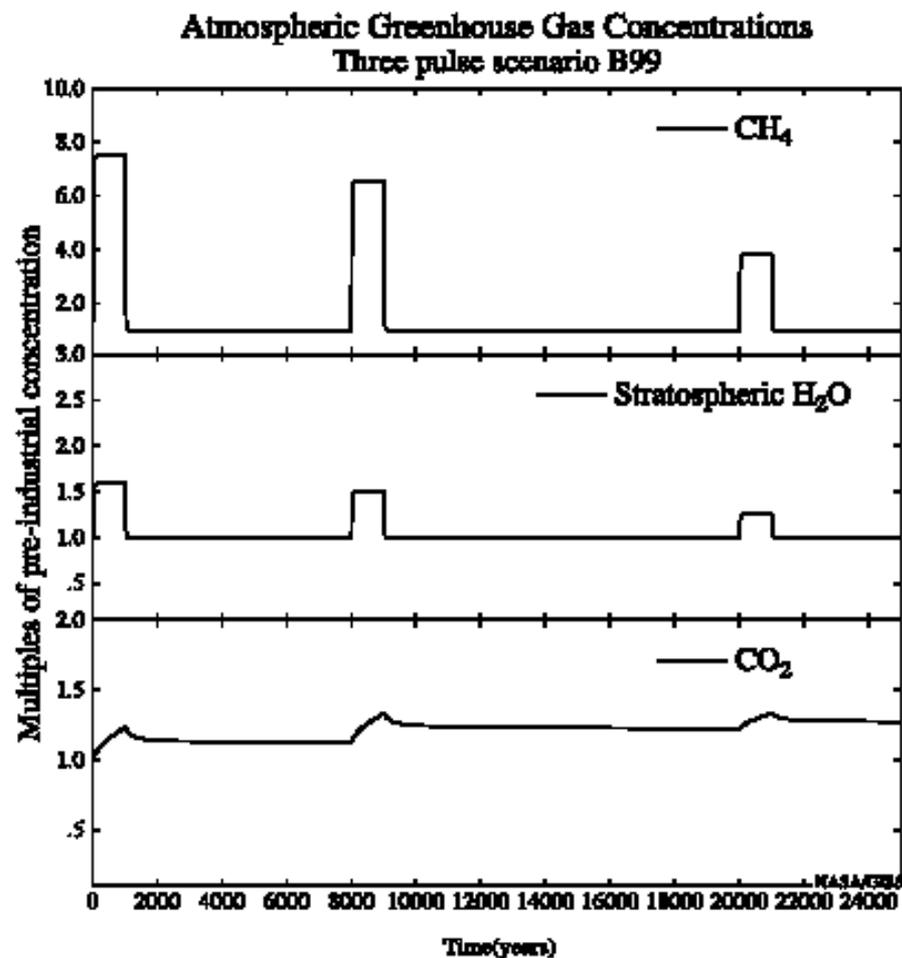
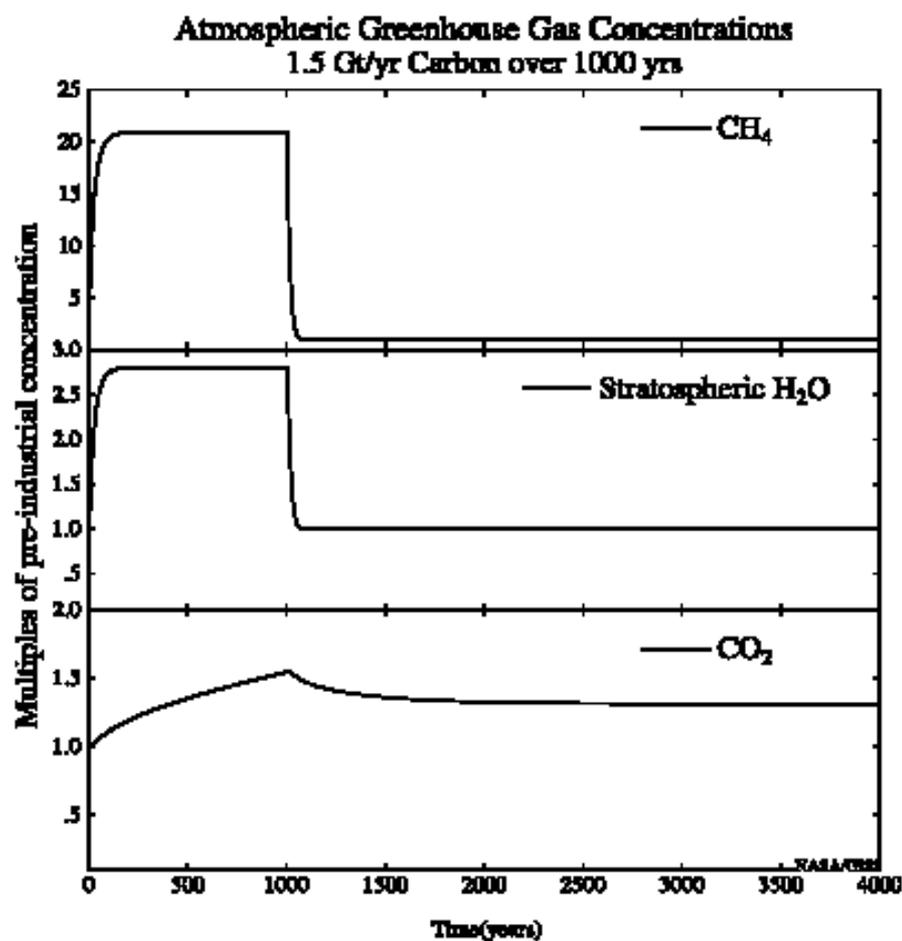


Figure 2. Selected transient scenarios for large CH₄ releases based on 2-D chemistry model estimates of the tropospheric sink and the transient equations outlined in the text. Other uniform scenarios resemble the first panel.

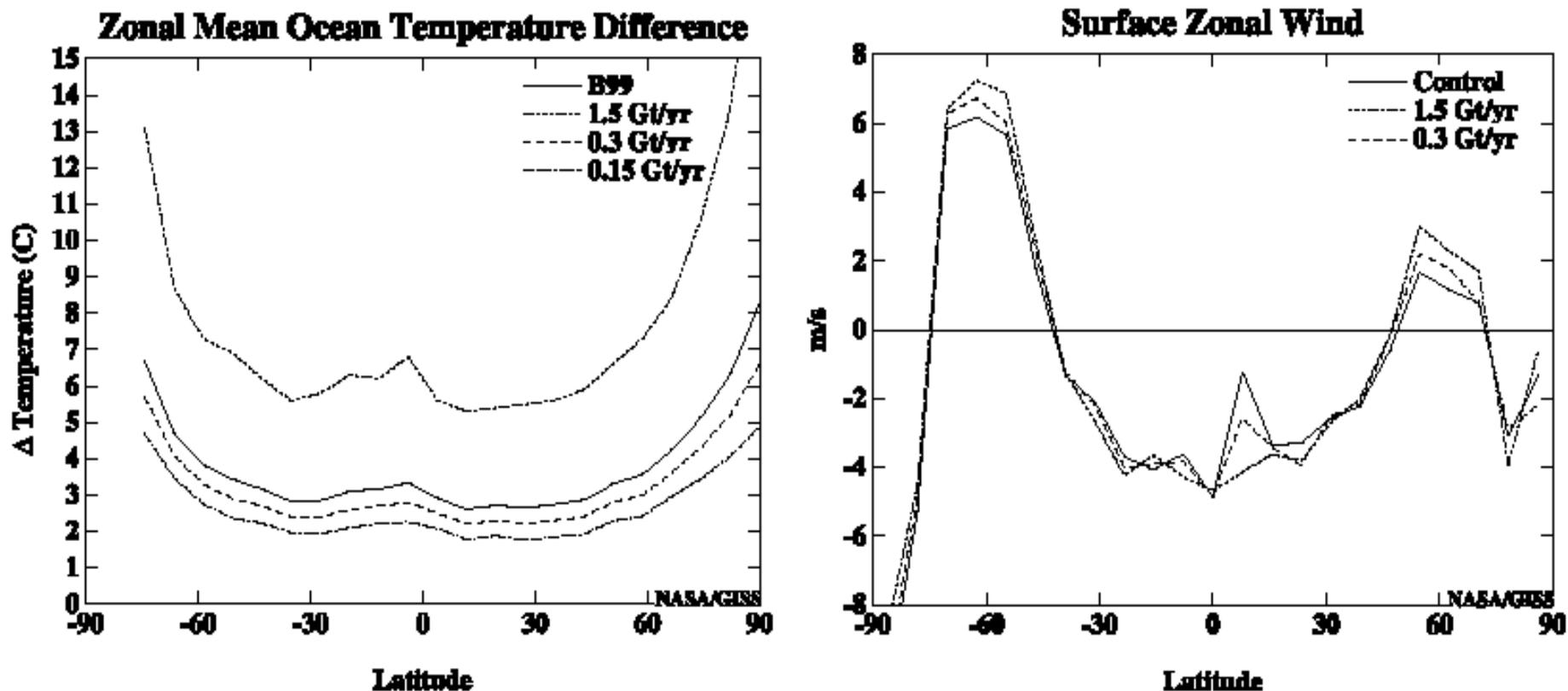
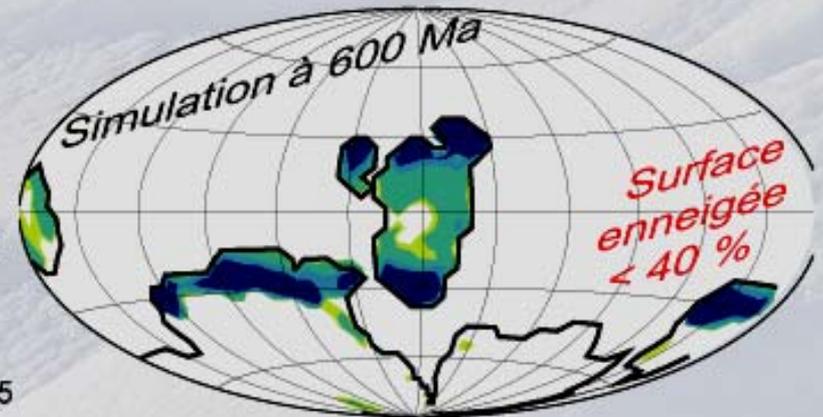
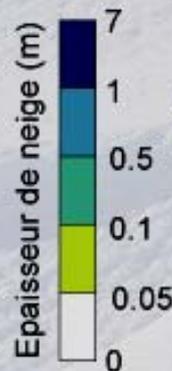
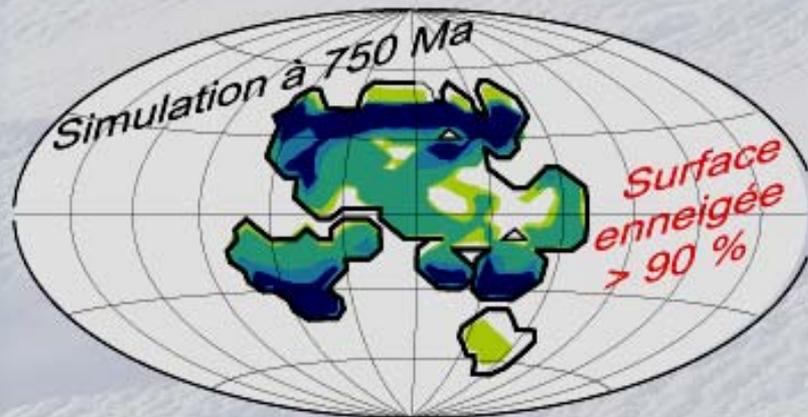
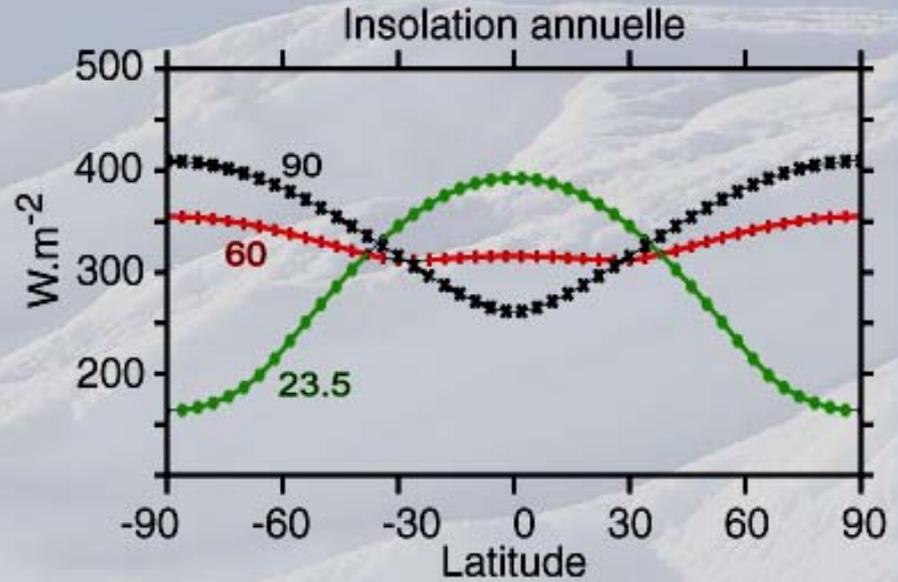
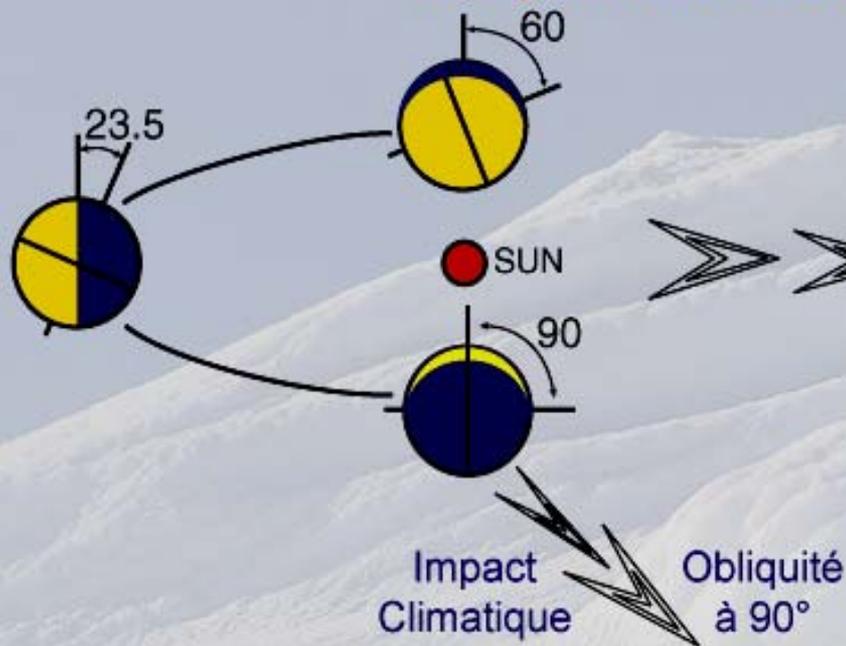


Figure 3. (a) Equilibrium zonal mean annual average surface ocean temperature difference from the control and (b) surface zonal winds from GCM simulations using the CH_4 and CO_2 concentrations from scenarios described in Table 2.

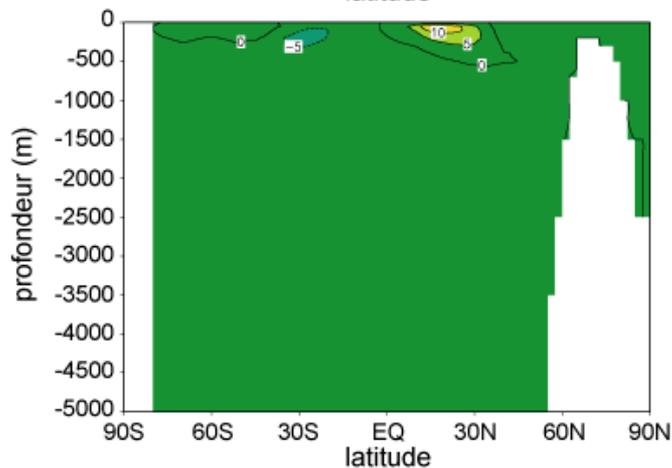
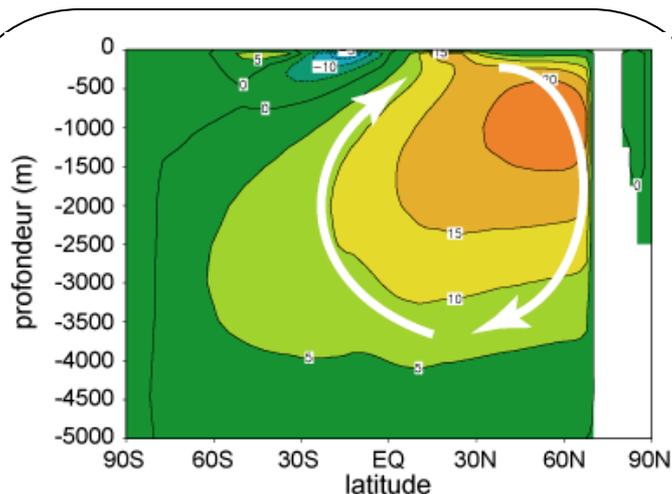
Une obliquité plus forte pour une jeune Terre peut-elle expliquer les glaciations du Néoprotérozoïque ? *



* Donnadieu et al., GRL, 2002

Des données aux modèles : application au Maastrichtien (65-70Ma) Simulations avec CLIMBER-2

Passage Arctique-Pacifique fermé



Pacifique et
Océan
Indien

Téthys et
Atlantique

Passage Arctique-Pacifique ouvert

