



"Échelles de temps, ruptures et crises climatiques"

Les Climats de la Terre à l'échelle géologique

Gilles Ramstein

Unité Mixte de Recherche CEA/CNRS /UVSQ/IPSL

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement

gilles.ramstein@lsce.ipsl.fr



CIEEIST - Université Paris Sud 11 - le 26 Janvier 2011

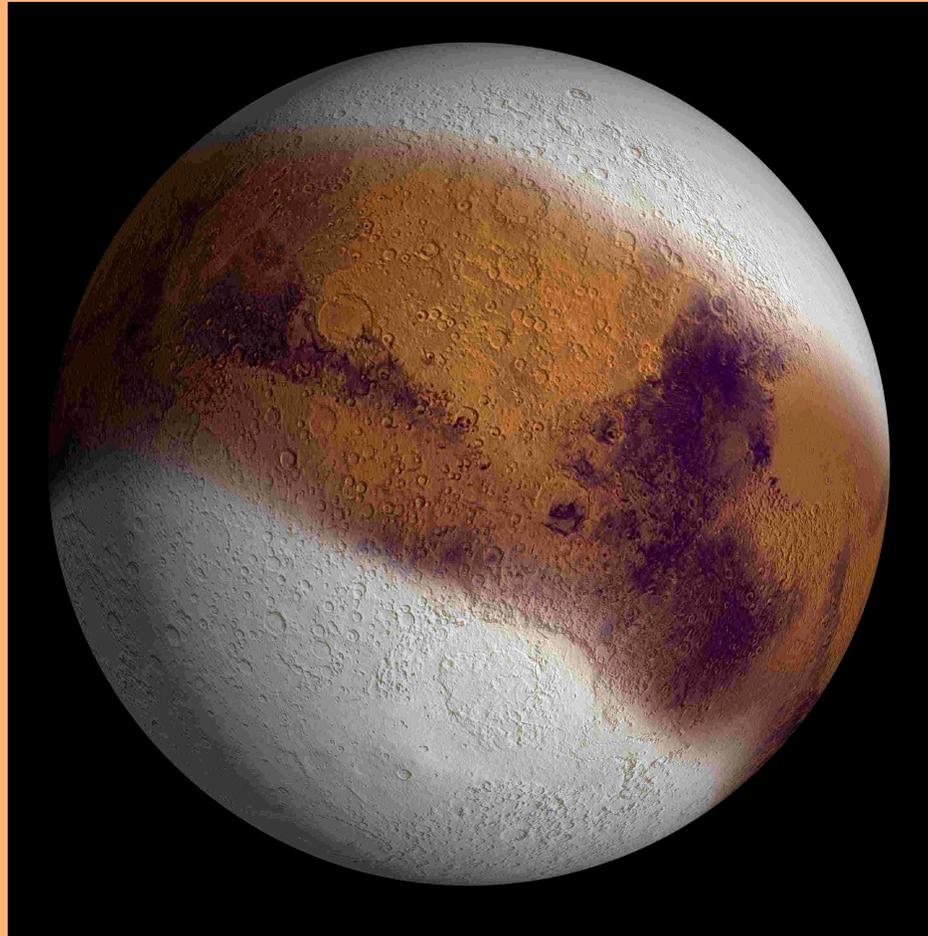


Climats de la Terre : **D'un extrême à l'autre...** ou comment la Terre se régule ou pas...



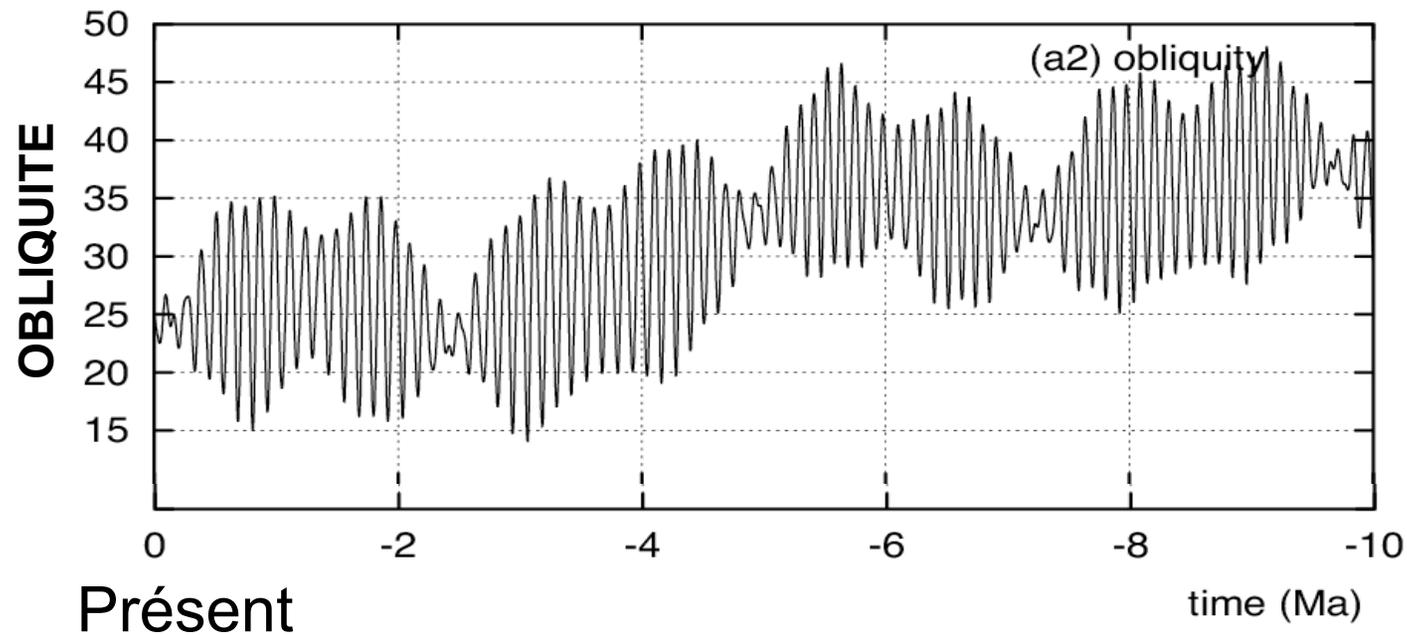
Mars

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

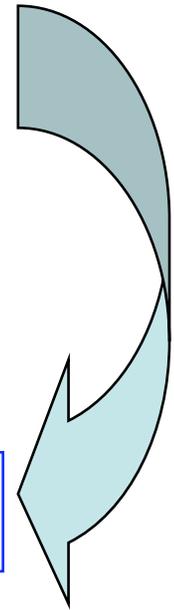


**Pression
au sol :**
6 à 8 mbar
**150 fois
plus faible
que sur la
TERRE**

Les variations climatiques dans le passé récent de Mars sont liées aux modifications de son obliquité et de son orbite.

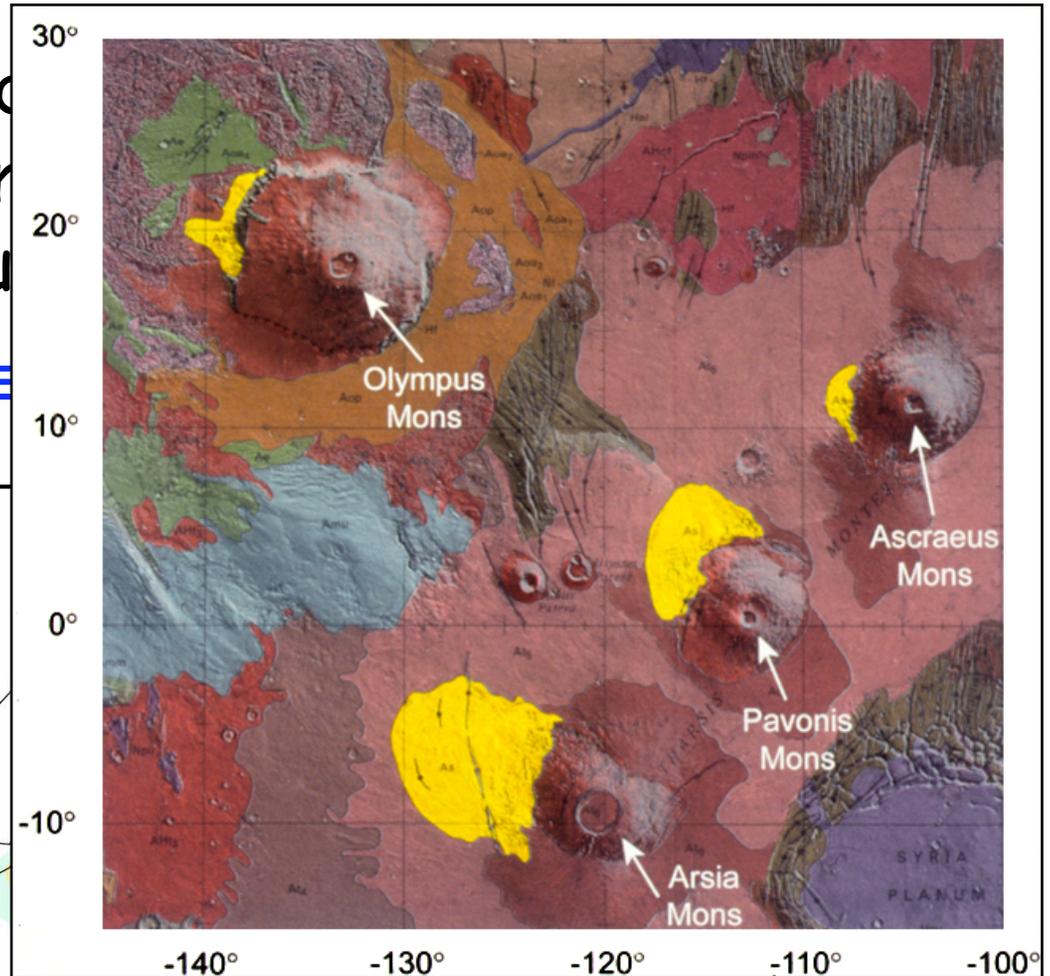
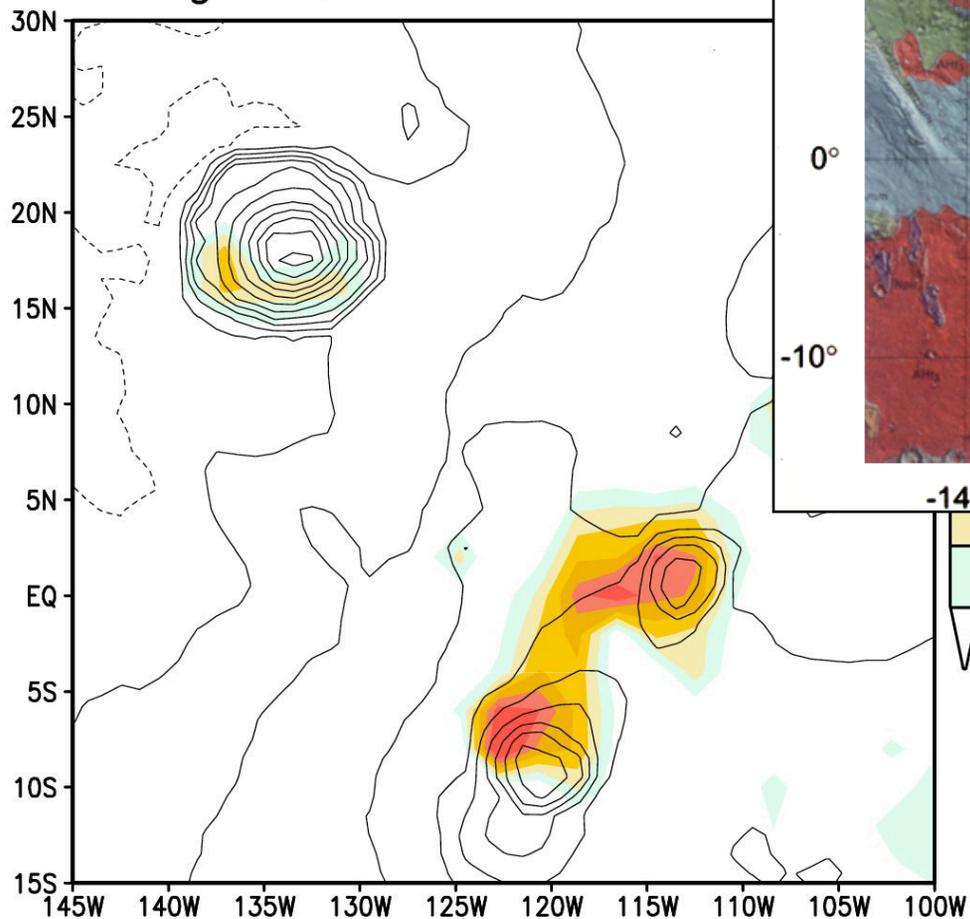


Pendant l'histoire de Mars, l'obliquité était d'environ 41.8° (Laskar et al. 2004)



La formation de taux de glace (n très hau

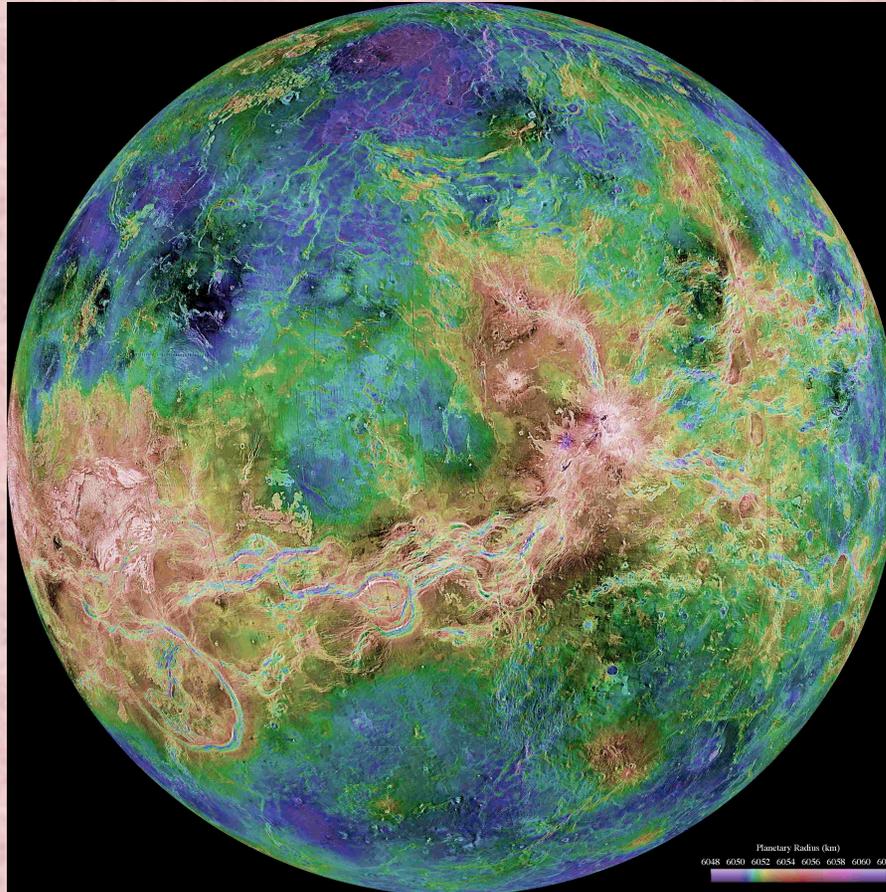
Forget et al. 2005 : Obliquité = 45° , E



**Dépôts et moraines
Caractéristiques de
glacier à base froide**

Vénus

**Température
au sol:
470°C**



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

Terre

**Température
au sol:**

15°C

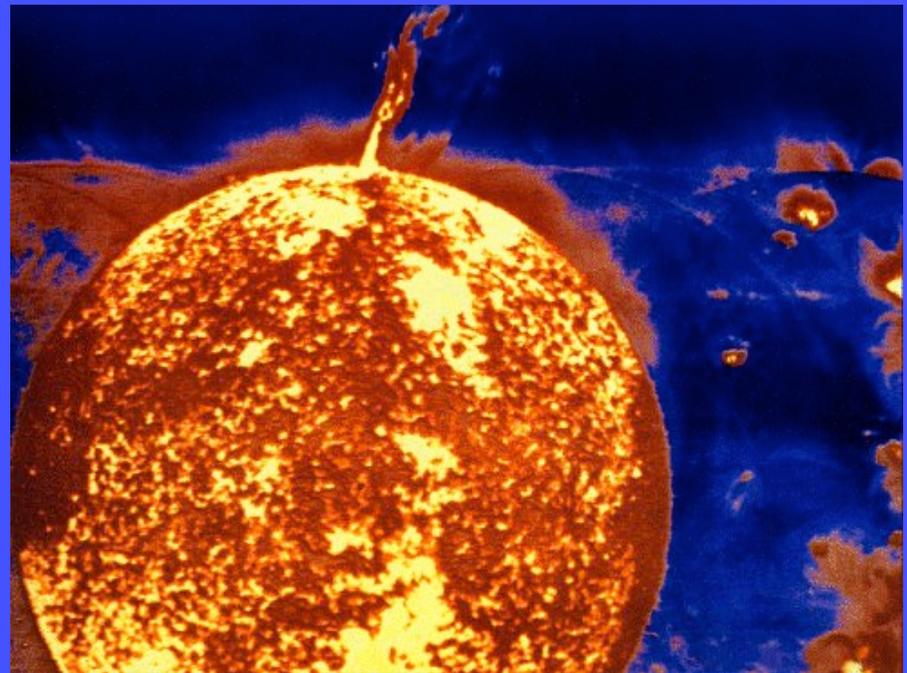
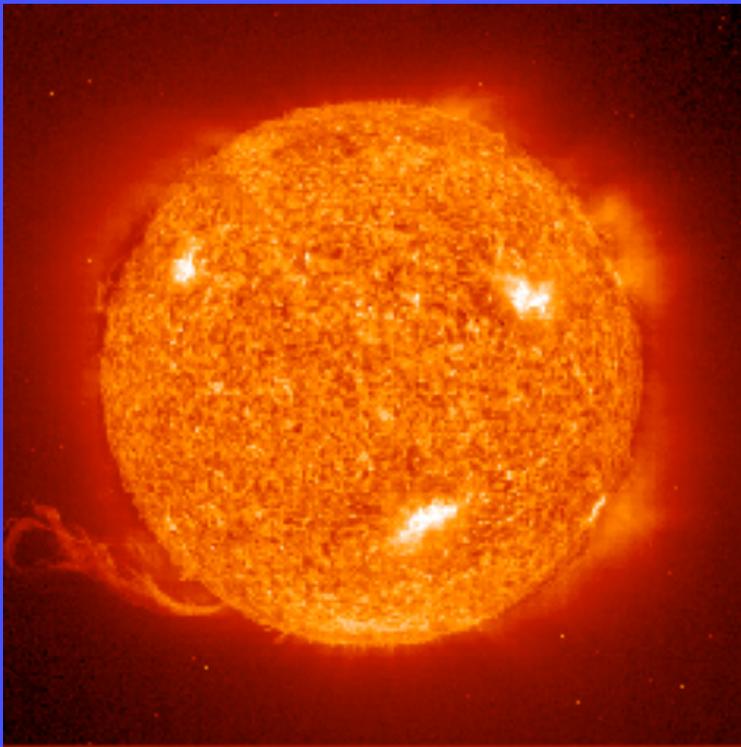


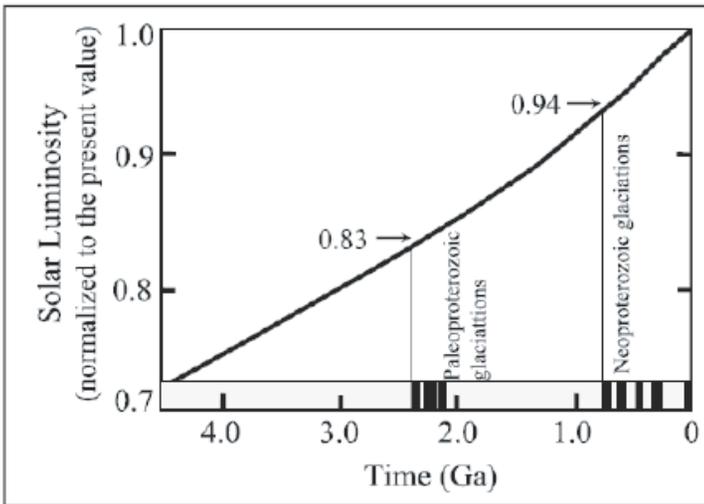
**Pression au sol:
1013 mbar
(1 atm)**

***Le soleil jeune avait à ses débuts
une plus faible luminosité***

-30% il y a 4.6 Milliards d'années

-6% il y a 750 Millions d'années





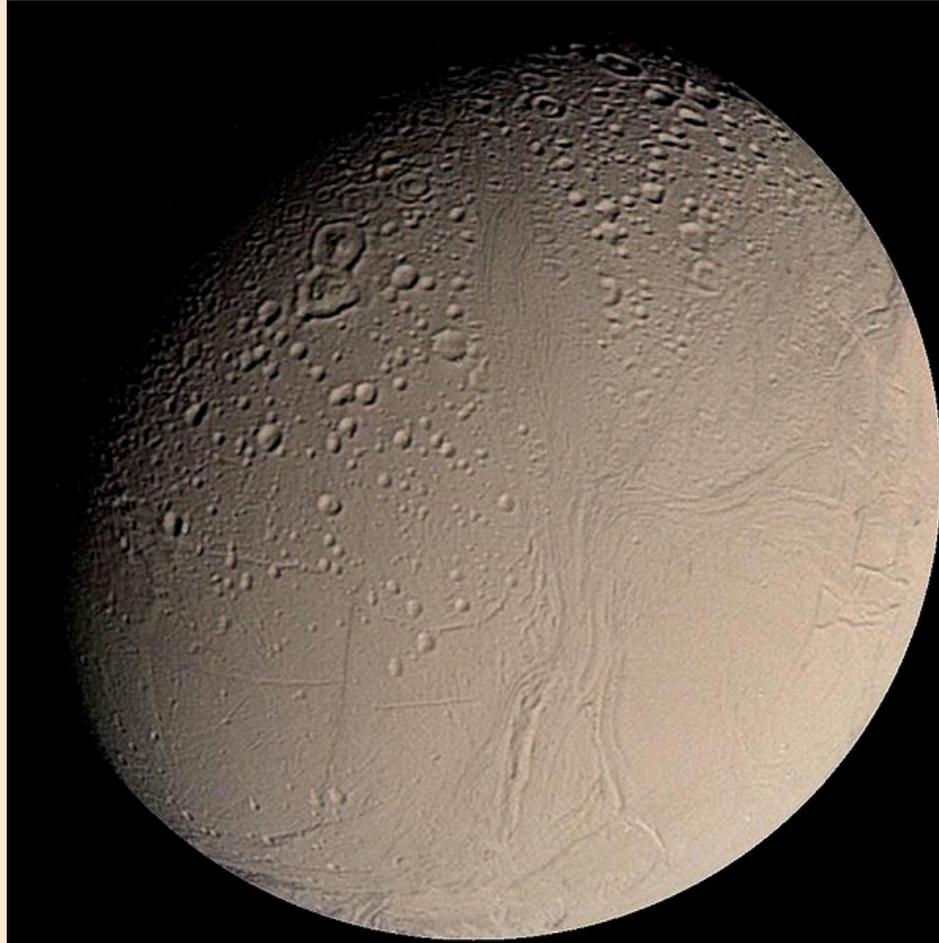
Formule de Gough (1981),

$$S = S_0 / (1 + 0.4t/t_0)$$

S_0 représente la constante solaire actuelle (1368 W/m²)
 $t_0 = 4.6$ Ga, et $t =$ temps (en Ga) avant l'époque présente.

Il y a 0.7Ga, notre Soleil était 6% moins intense qu'aujourd'hui
 constante solaire Néoprotérozoïque = 1286W/m²

Encelade, satellite naturel de la planète Saturne



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.

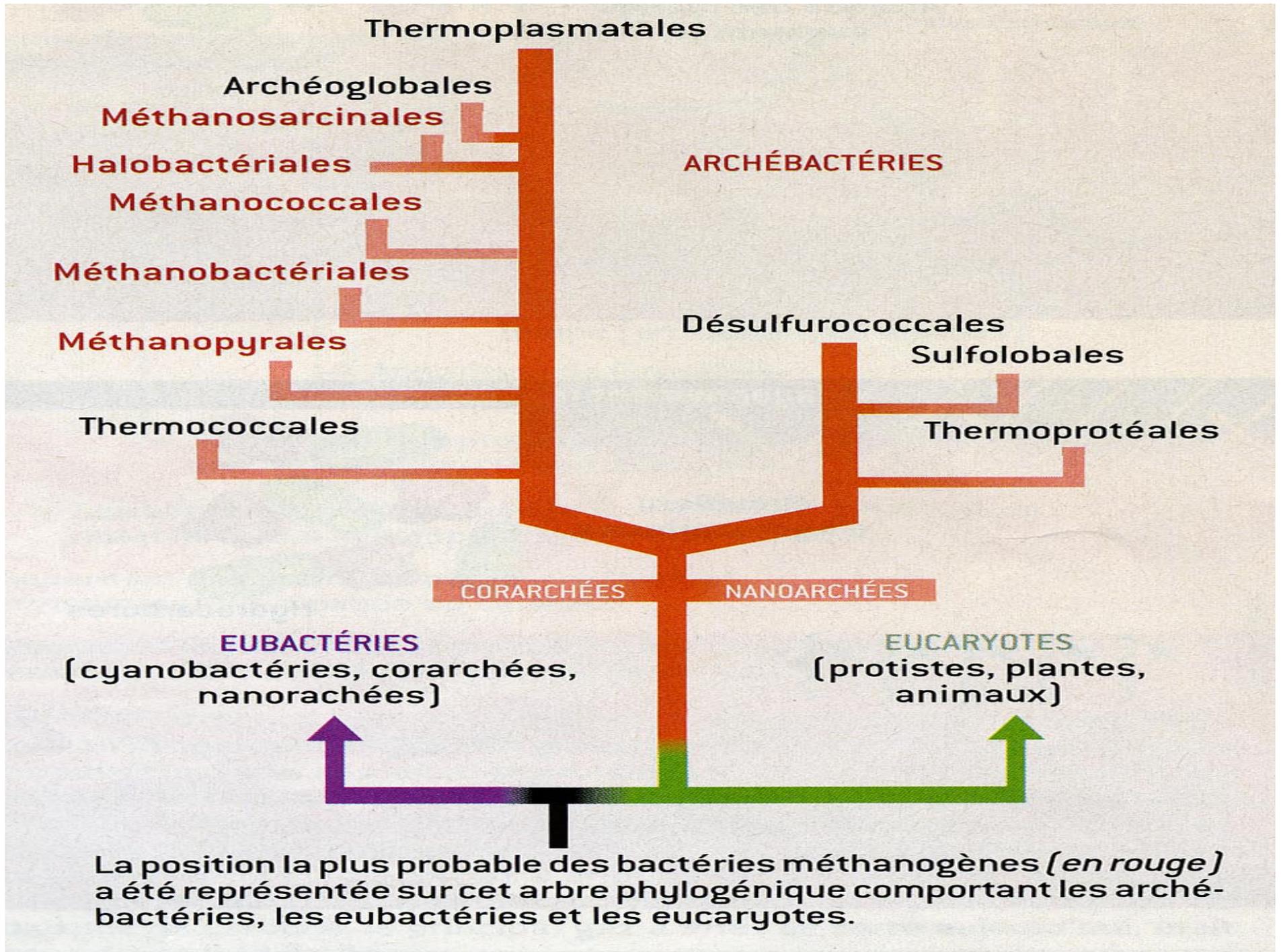
Les gaz à effet de serre ont plus que compensé la moindre puissance solaire.

- 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**

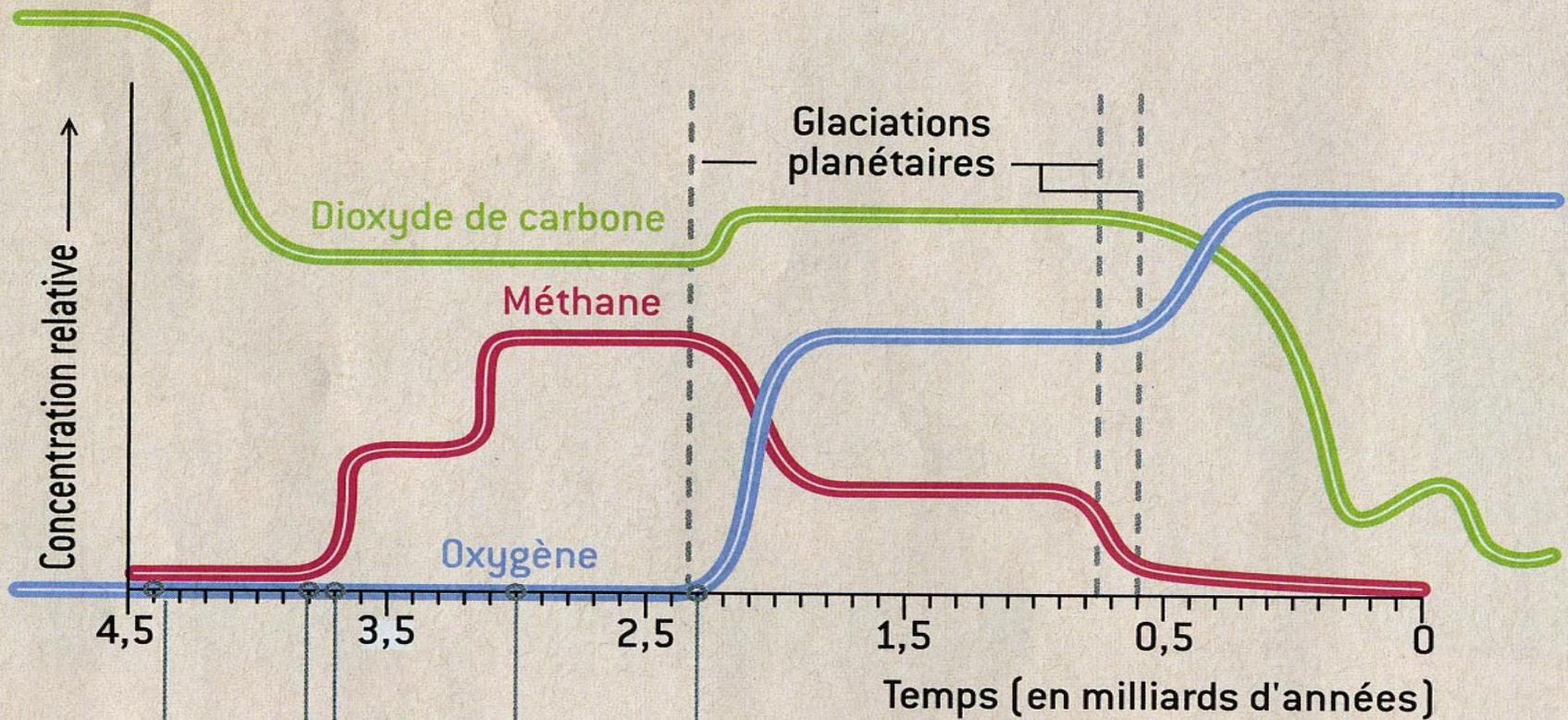
Titan: *satellite rose orangé de Saturne avec une atmosphère de méthane et d'hydrocarbures*





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)



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 Paléoprotozoïque**
 - Effondrement par oxydation du Méthane

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

***UNE TERRE
TOTALEMENT
GELEE,***



***EST-CE
POSSIBLE?***

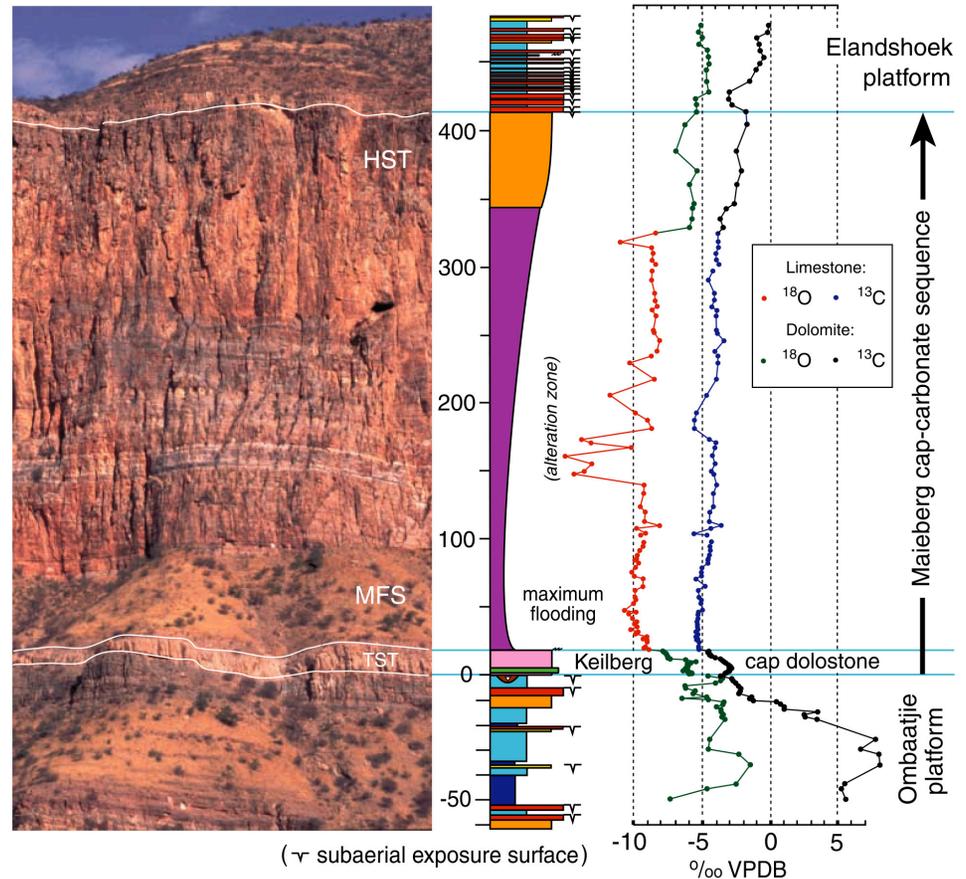
Nature particulière des sédiments associés aux glaciations néoprotérozoïques



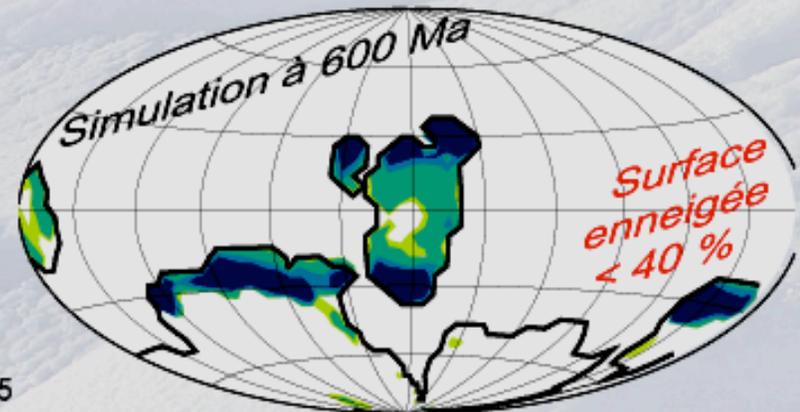
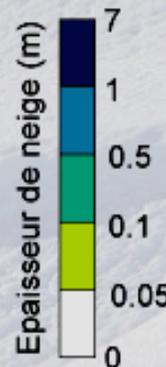
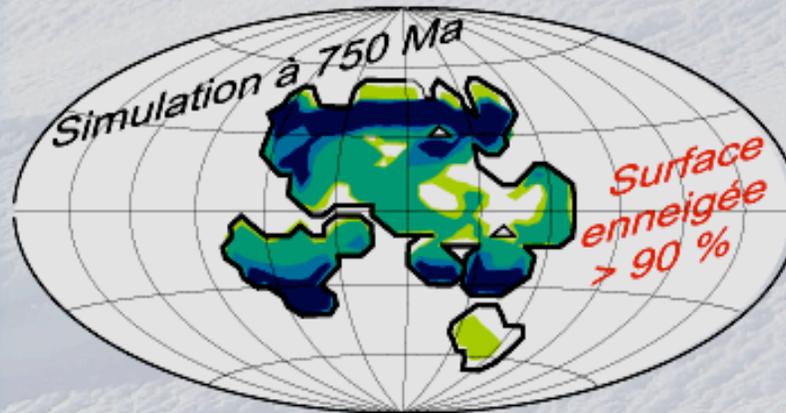
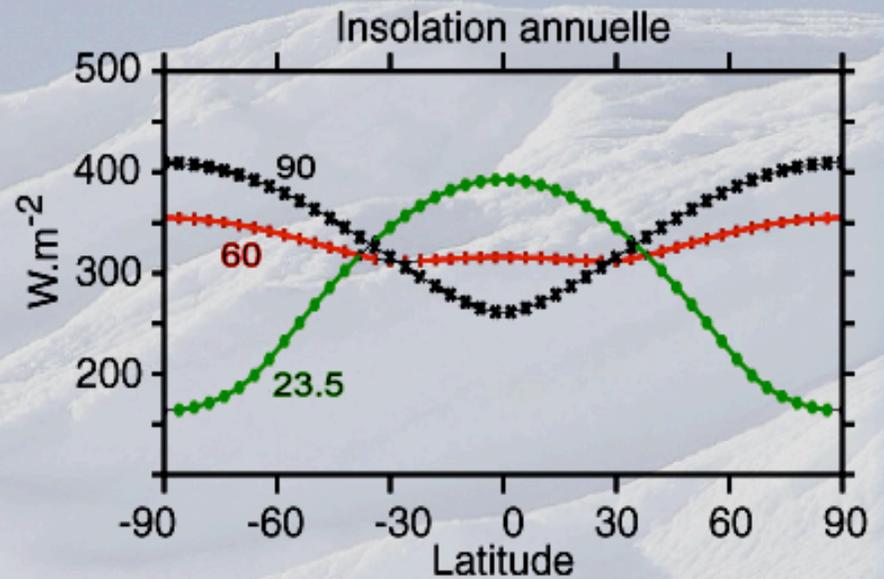
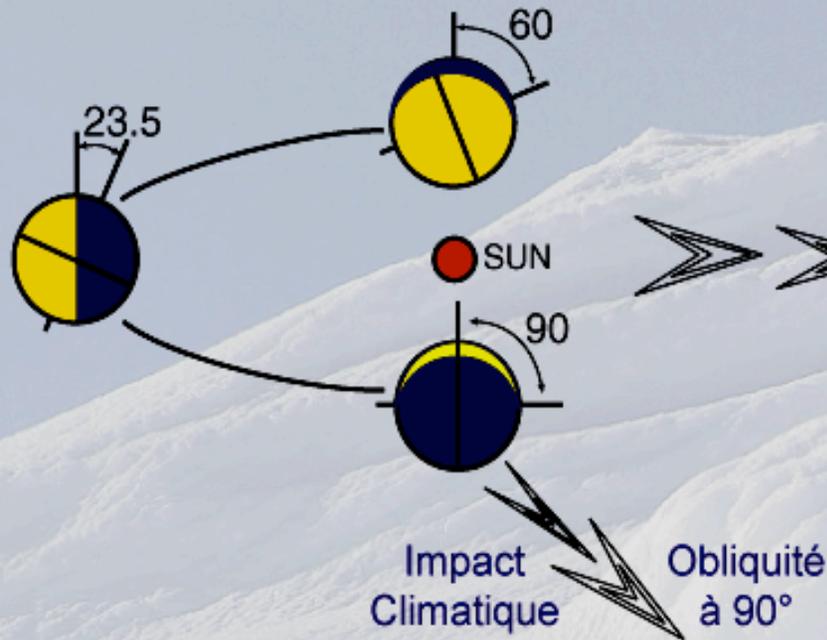
>> Formation de fer rubané

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

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

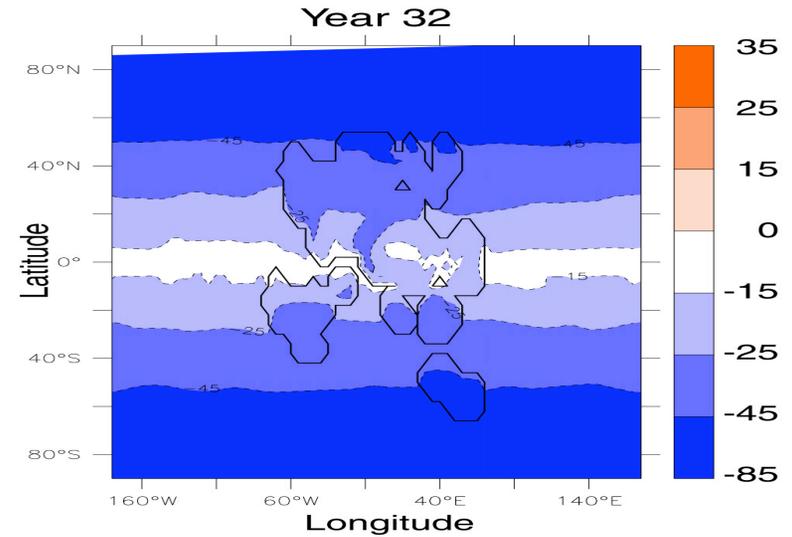
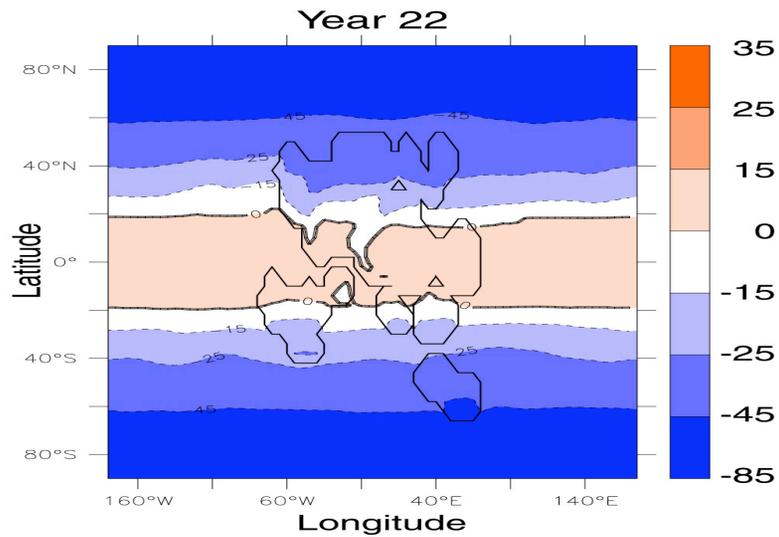
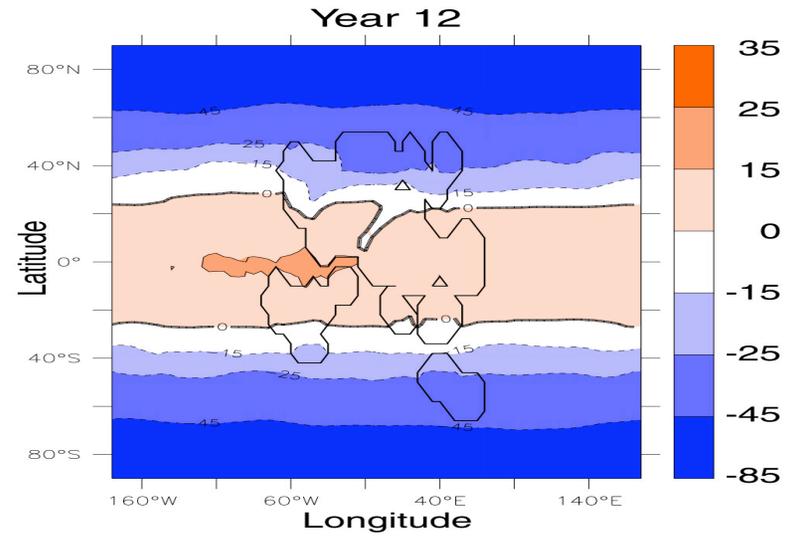
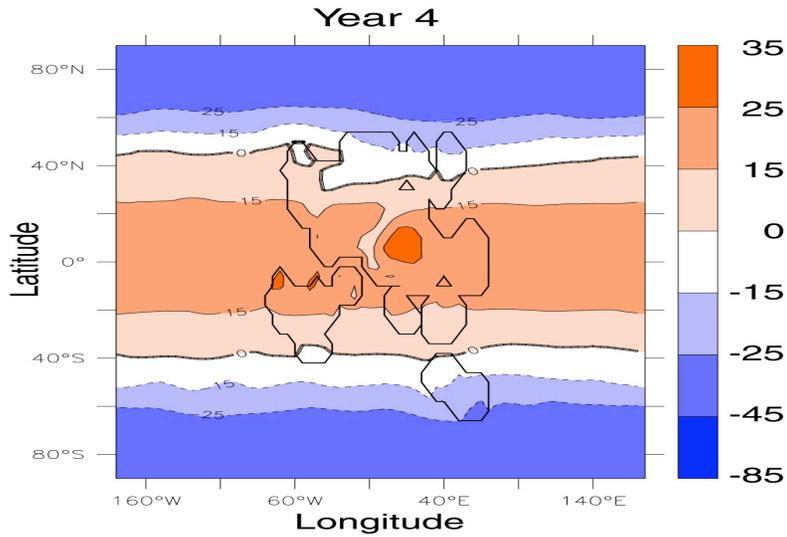


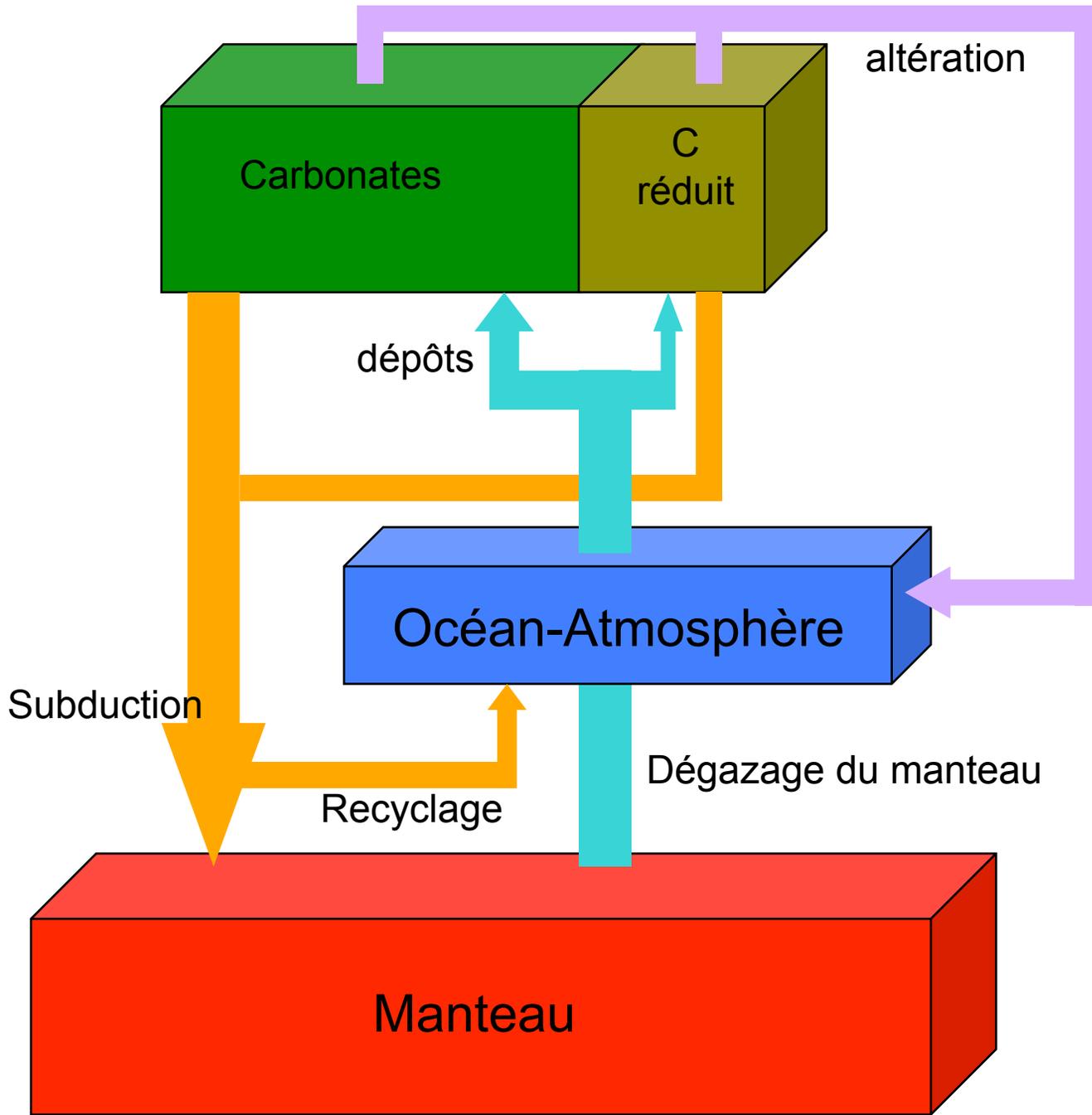
Une obliquité plus forte pour une jeune Terre peut-elle expliquer les glaciations du Néoprotérozoïque ? *



* Donnadieu et al., GRL, 2002

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





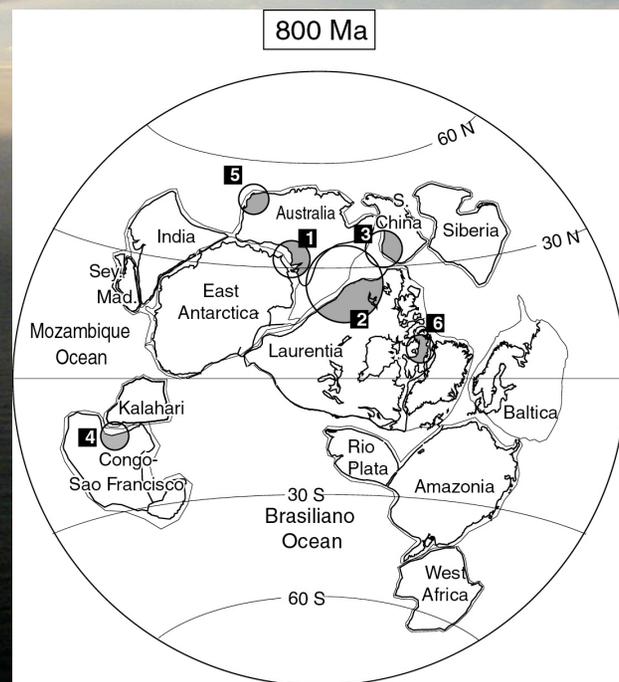
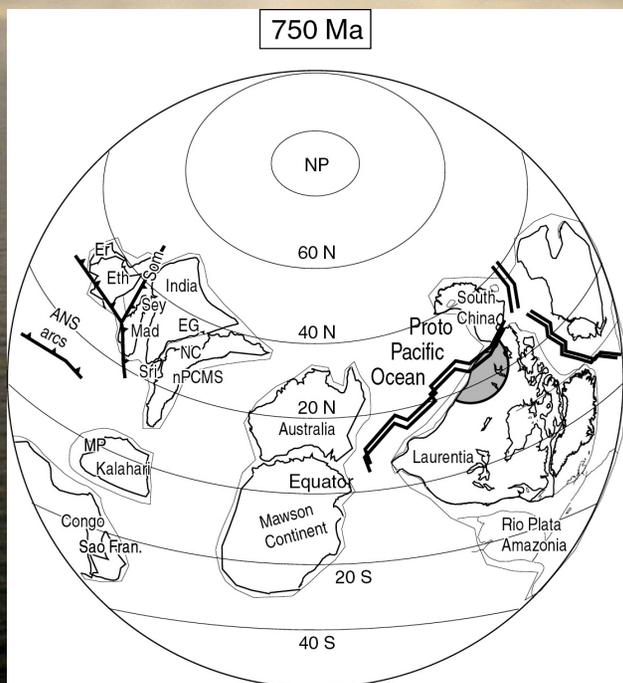
Cycle du carbone

Mécanismes de refroidissement global à long terme:

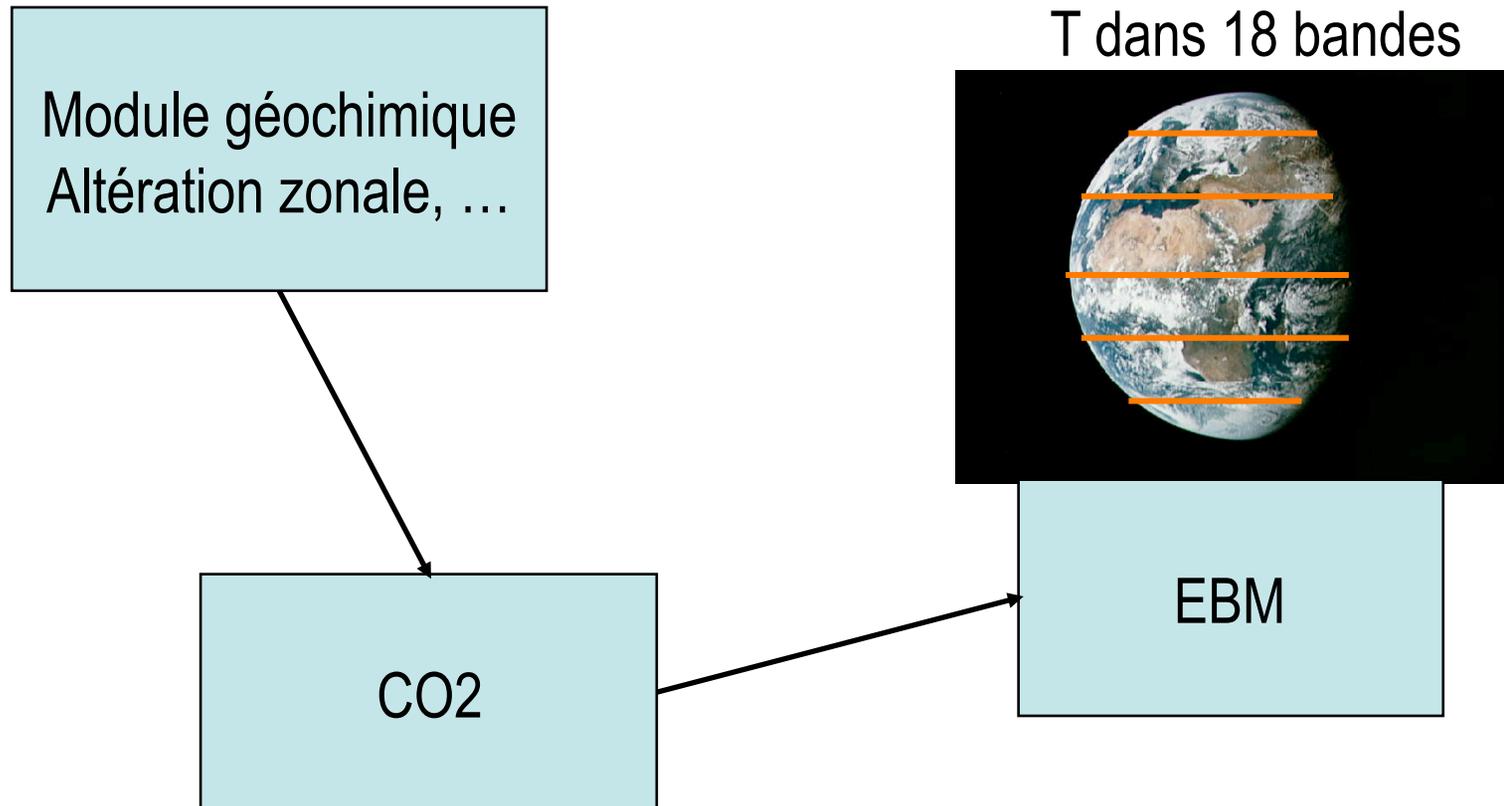
1 – Apparition de traps successives

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 ...

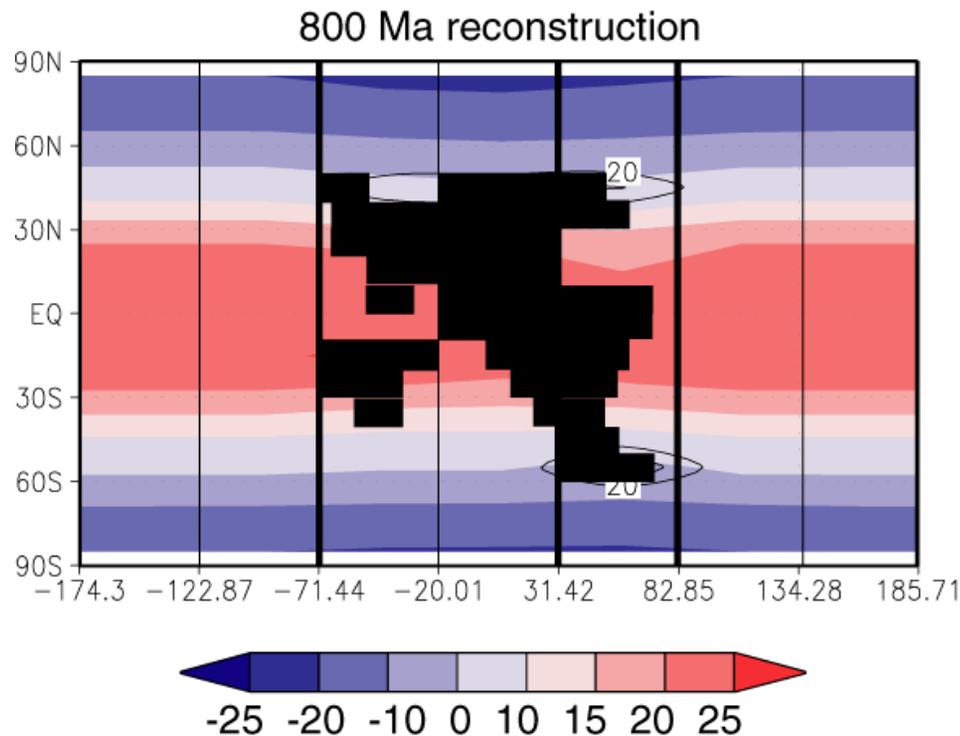
1 - A 800 Ma



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



Soit une température
globale moyenne de
10.2 °C



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

Les premiers résultats ...

1 - A 750 Ma



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

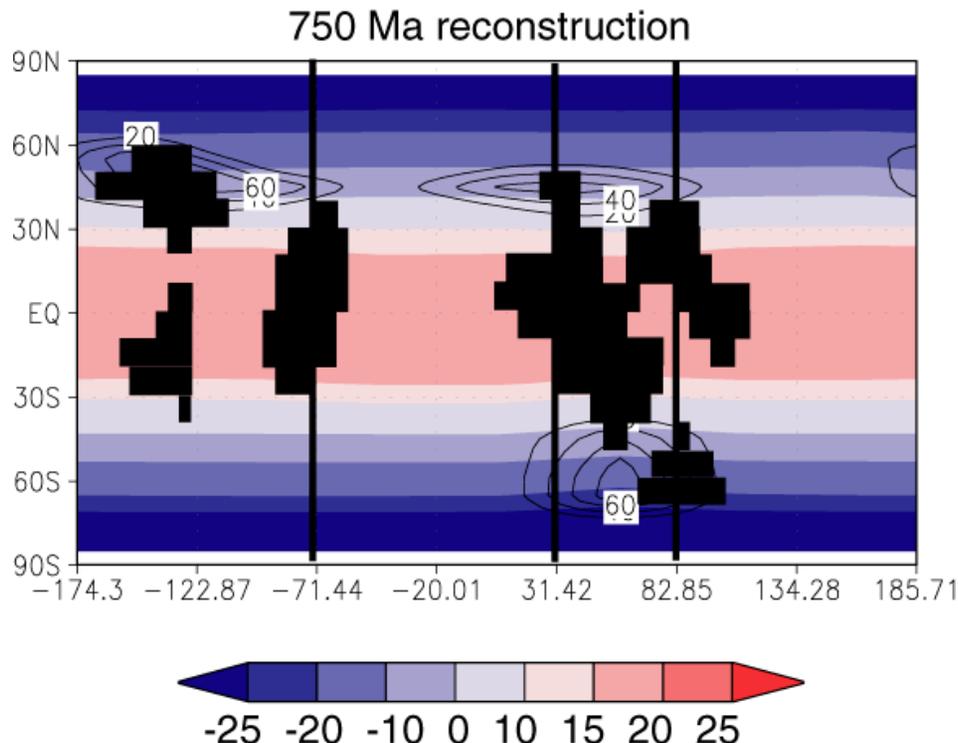
Réduction de 1300
ppm



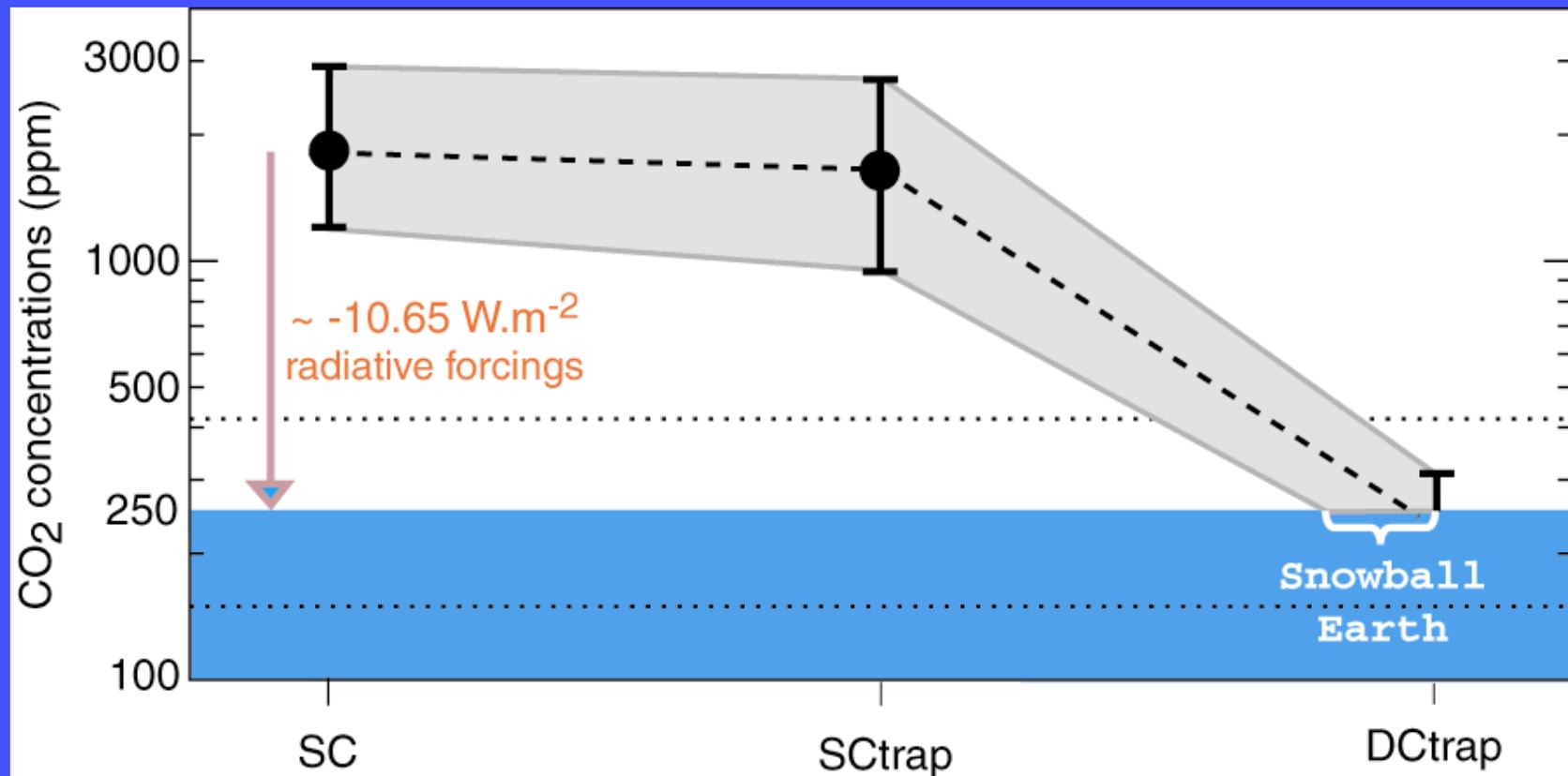
Soit une température
globale moyenne de
2°C

Réduction de 8.2°C

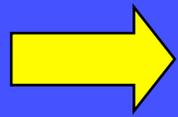
Une configuration ou
les continents sont
plus petits et plus
dispersés apparaît
très favorable au
déclenchement d'une
glaciation importante



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

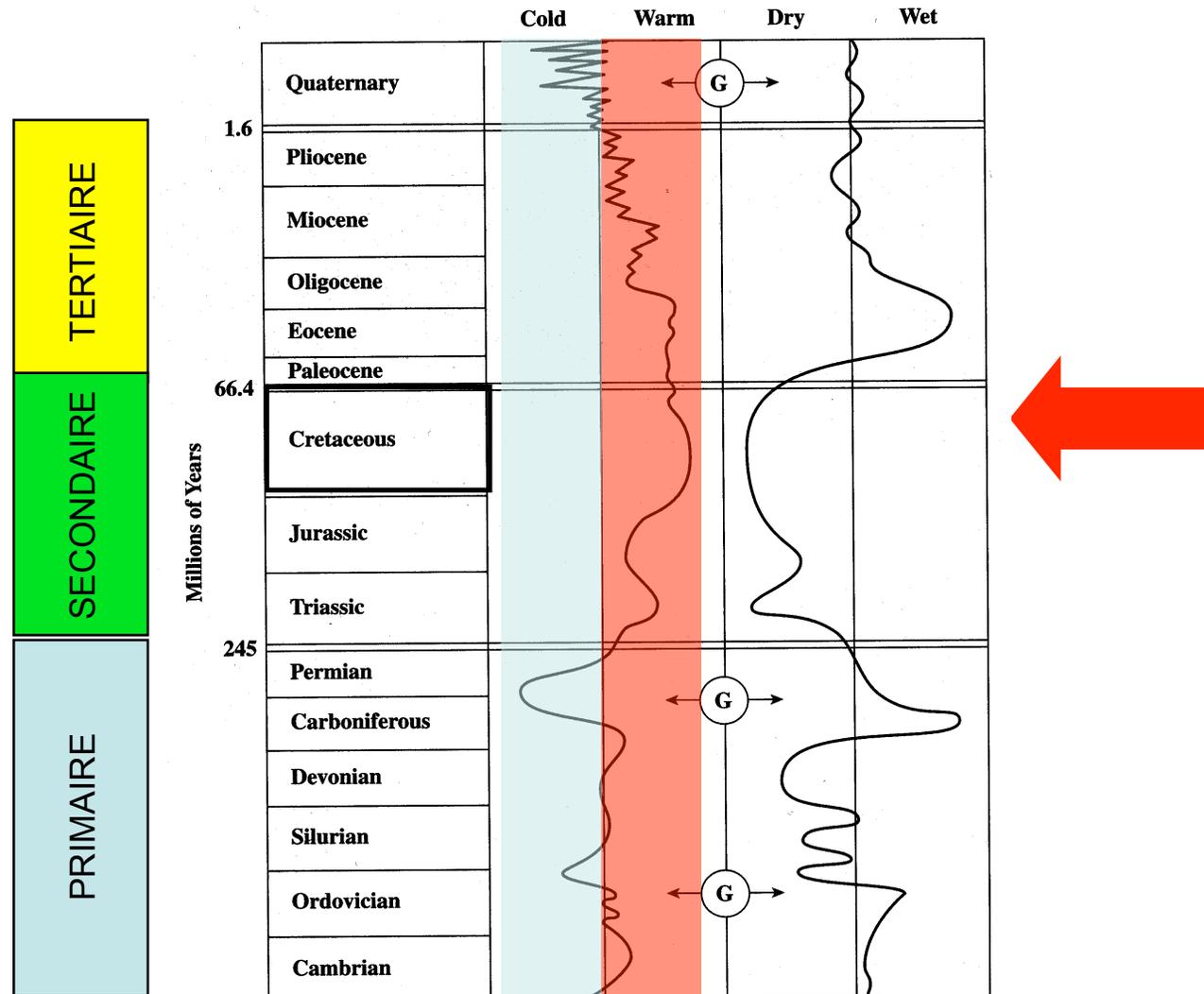
 Enfouissement d'une quantité énorme de CO₂ dans les océans

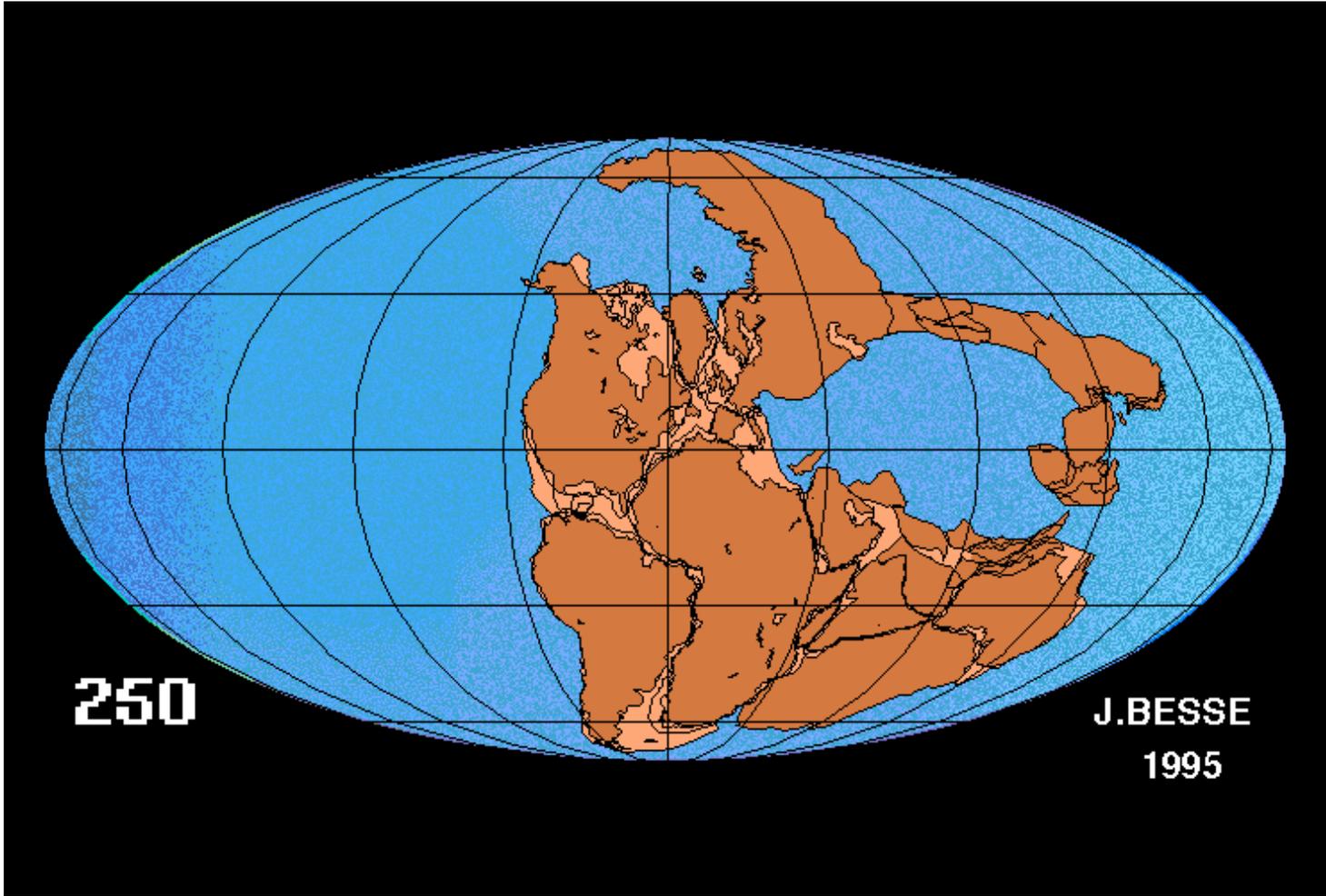
Quelle variation du Ph et de l'alcalinité ?

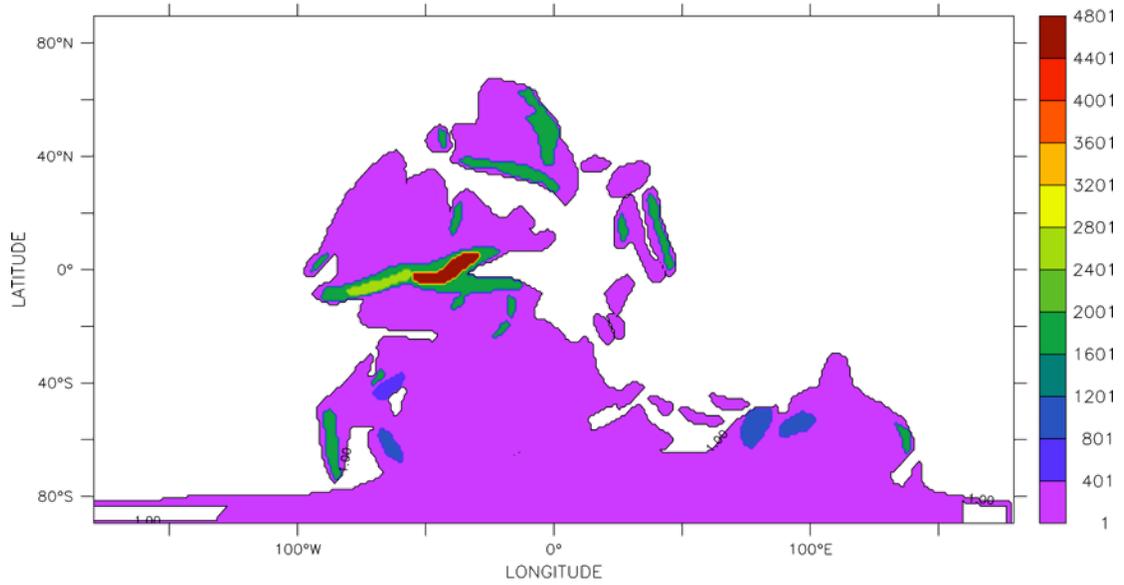
Quel impact sur la vie dans les océans ?

Calcification etc...

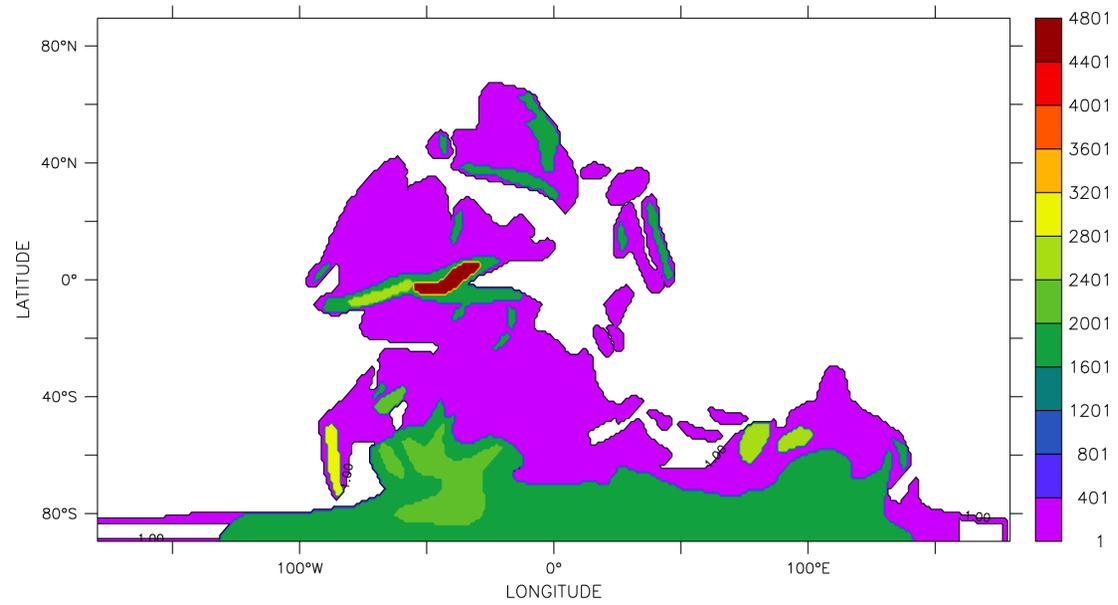
Les périodes climatiques chaudes représentent 75% des 540 derniers millions d'années



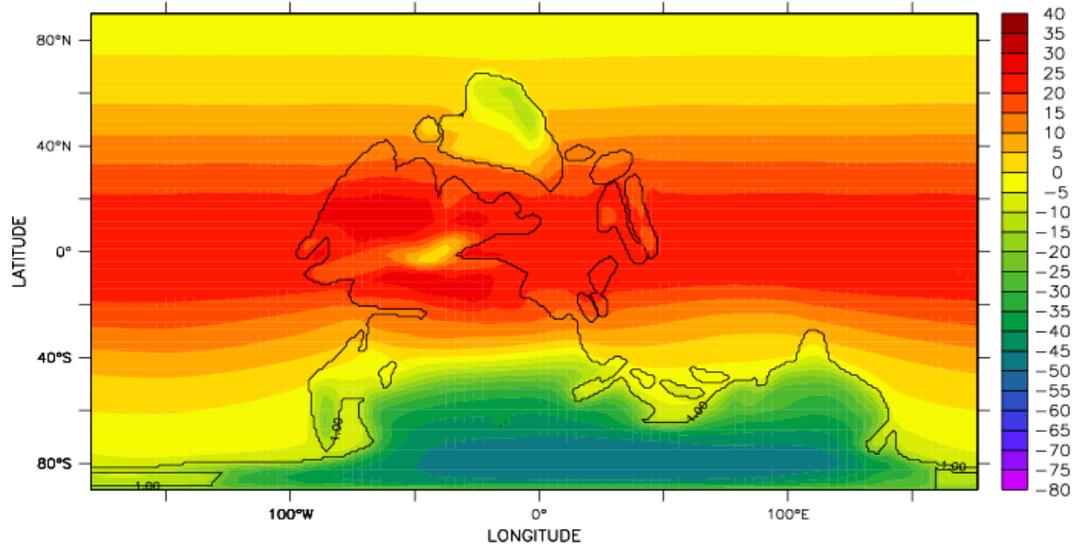




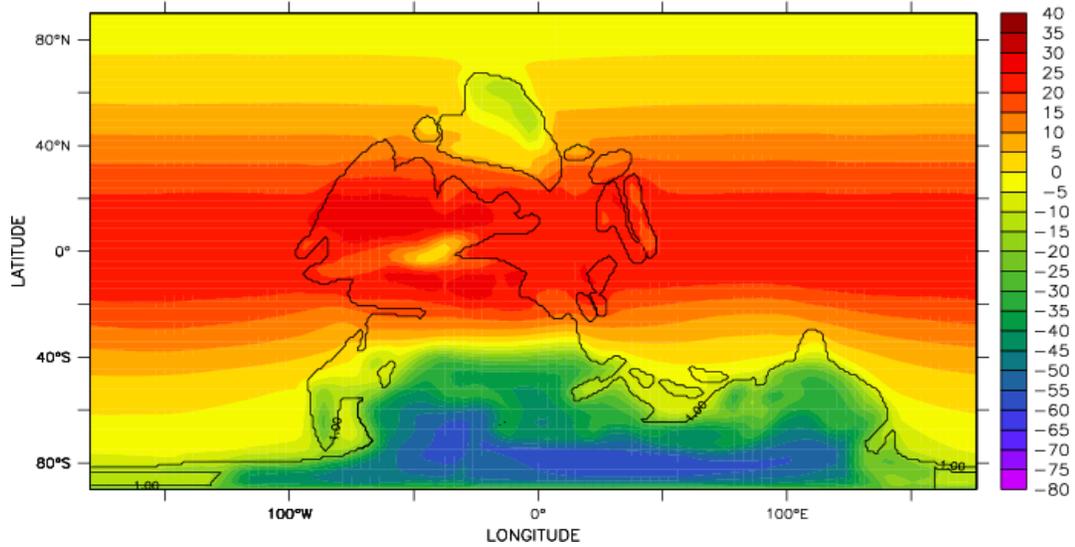
Relief (m) au Permo-Carbonifère de la simulation sans calotte de glace



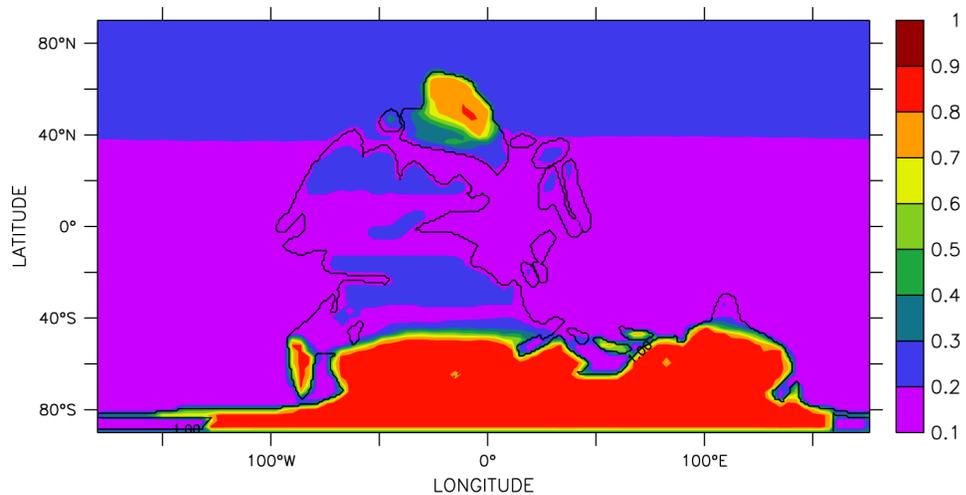
Relief (m) au Permo-Carbonifère de la simulation avec calotte de glace



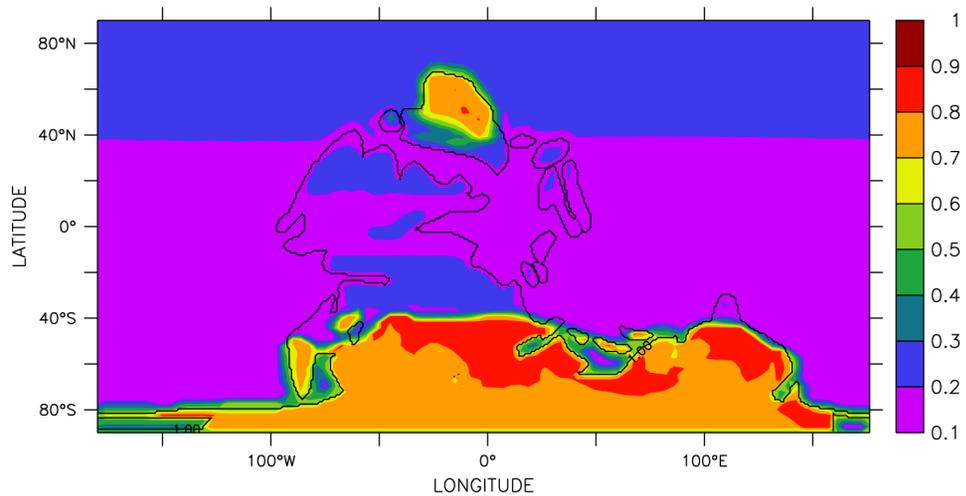
Températures annuelles (°C) de la simulation sans calotte de glace



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



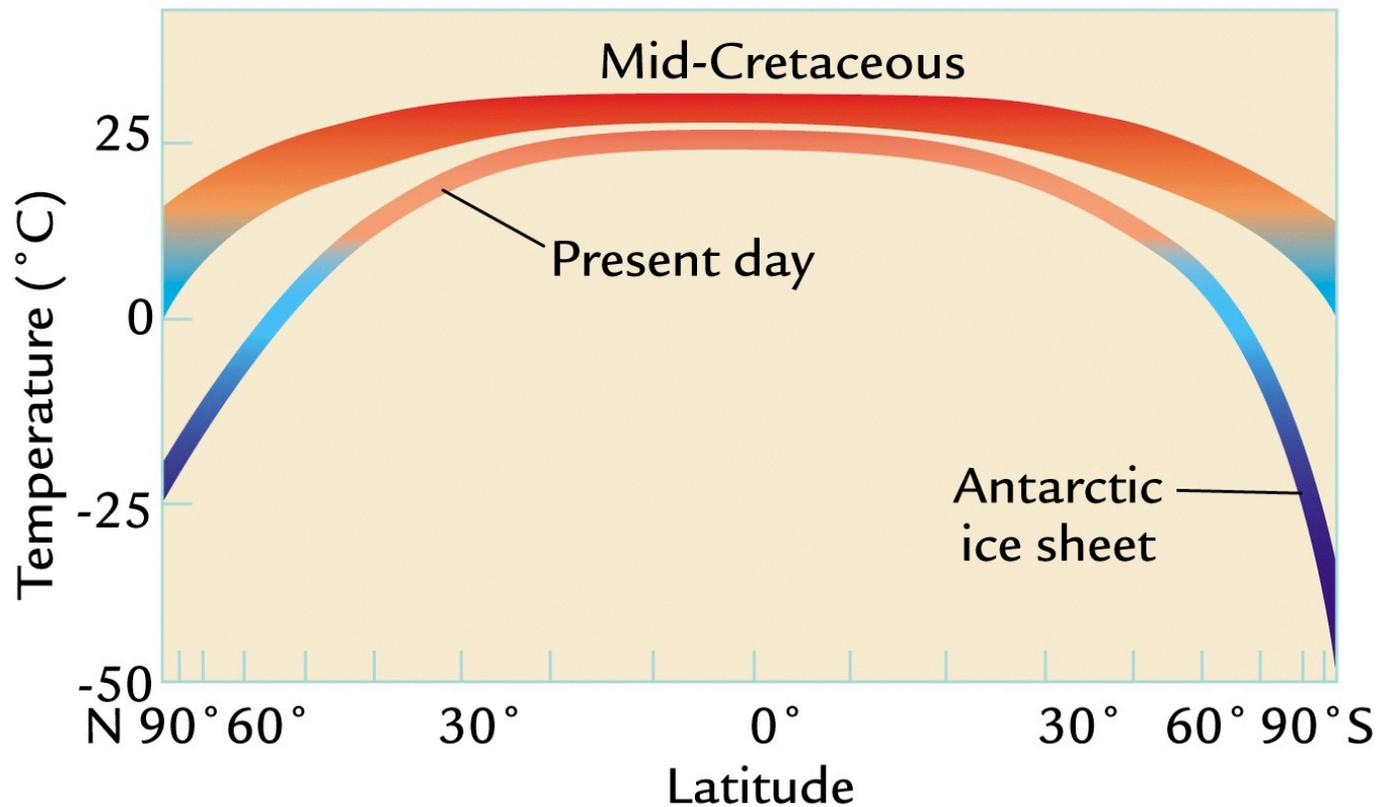
Dinosaures sur l'île d'Axel Heiberg (72°N)



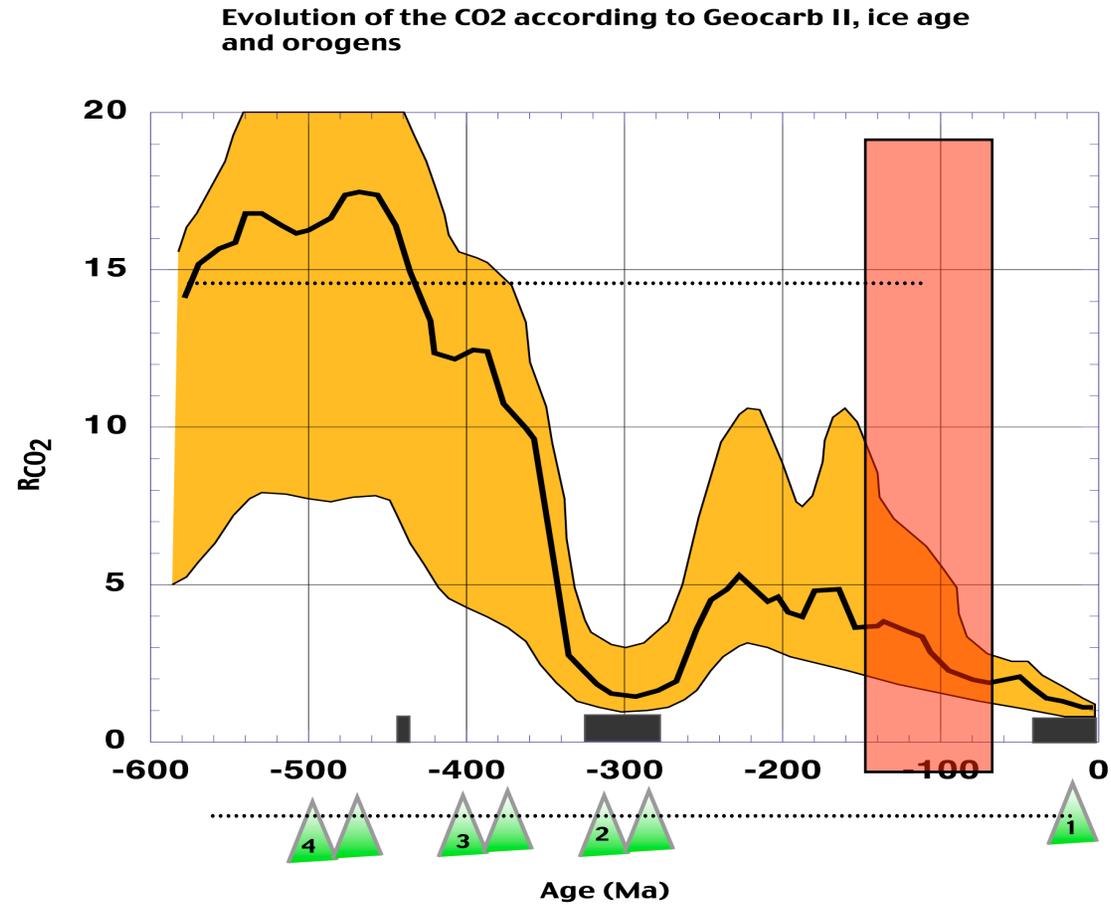
Feuille fossile découvert dans la région Arctique Canadienne

⇒ 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



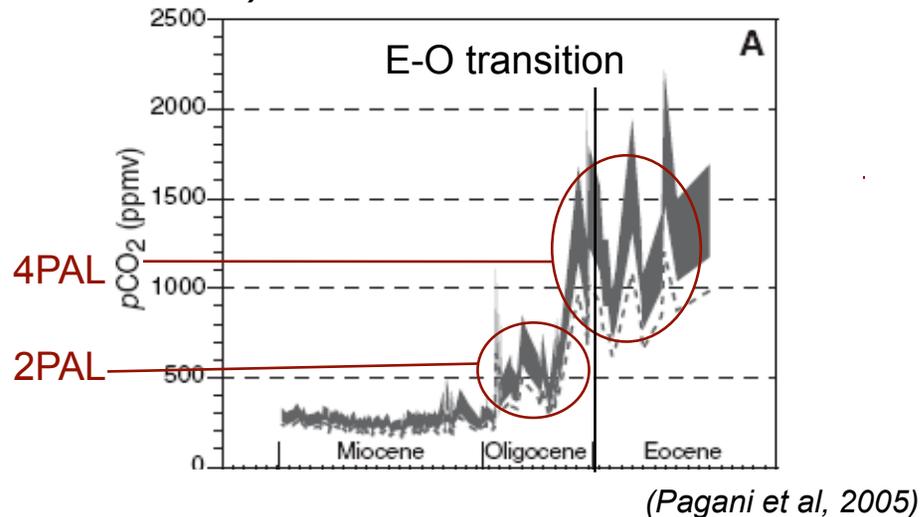
Evolution de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone (CO₂) à l'échelle des temps géologiques



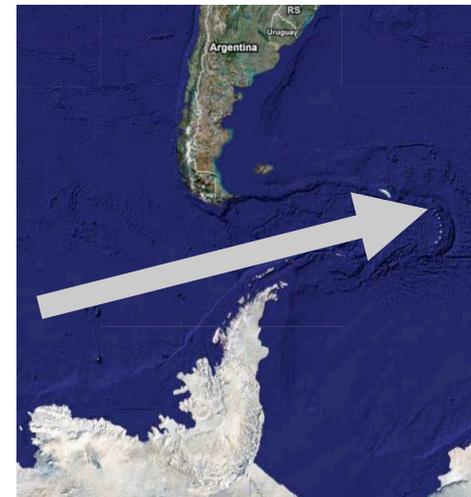
The Antarctic Ice Sheet inception at the Eocene-Oligocene

Previous modeling studies successfully captured the effect of:

1. the decreasing $p\text{CO}_2$ on the inception of the Antarctic Ice Sheet (AIS) (DeConto and Pollard, 2003)



2. the DP configuration on ocean's dynamics and global climate (Sijp and England, 2004)



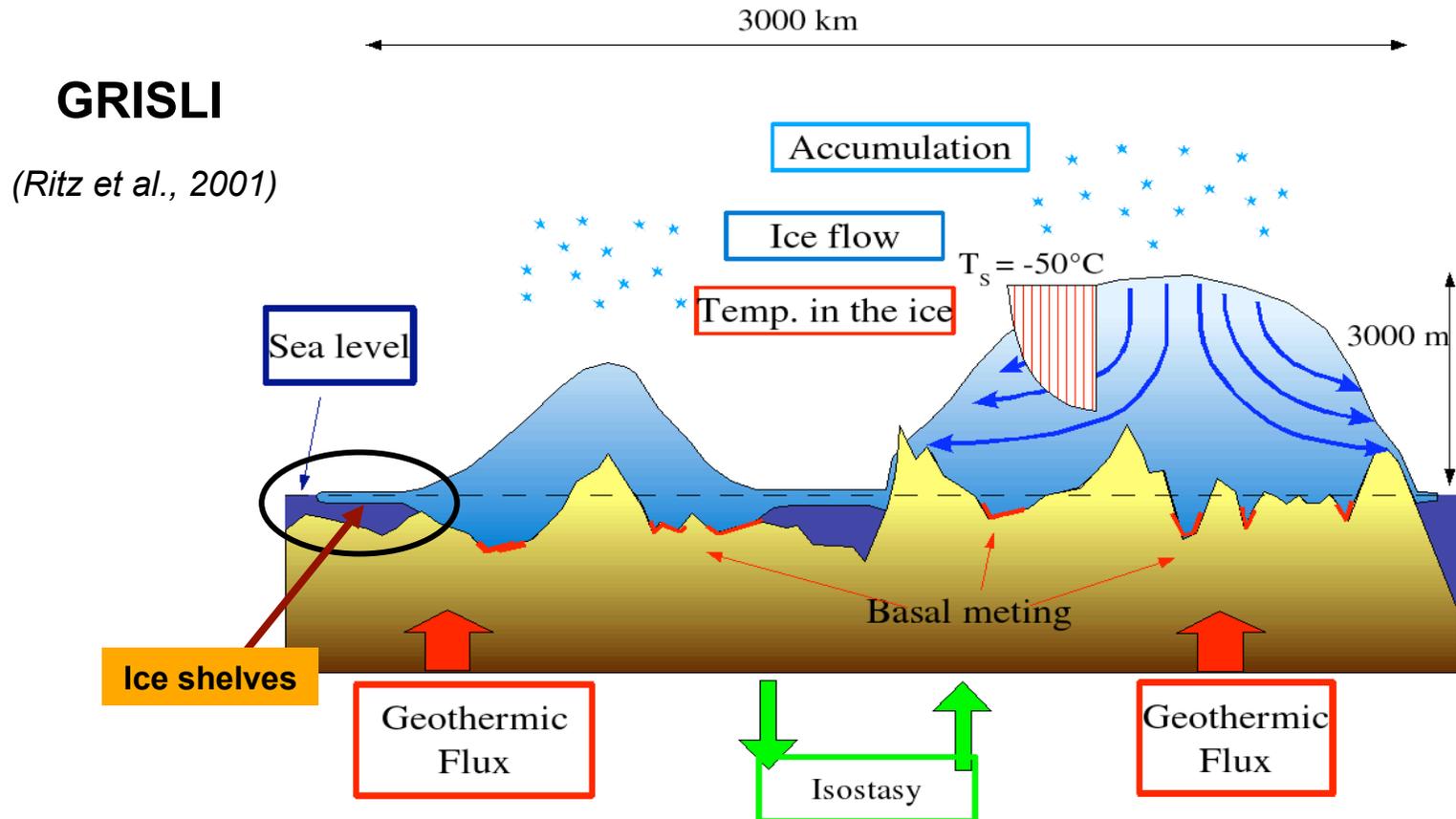
(Image from google maps)

Objective

Explicitly capture the effect of **both** $p\text{CO}_2$ and the Drake Passage evolution at the time, by covering **a large range of simulations.**

The coupled CLIMBER-GRISLI model

A climate model of intermediate complexity (CLIMBER 2.3) coupled with a 3D thermo-mechanical ISM for the SH (GRISLI)

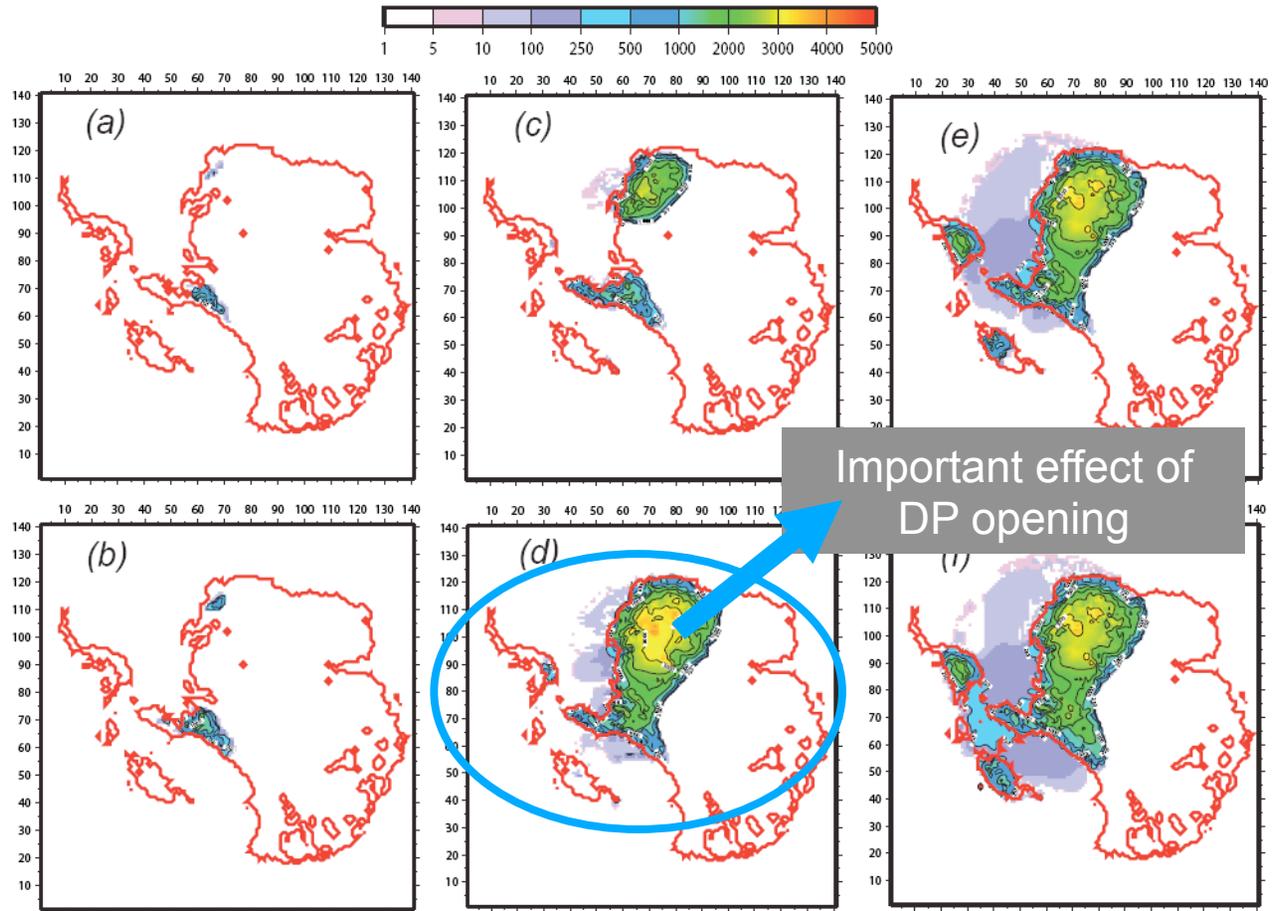


The model includes a treatment of the grounding line and simulates the evolution of grounded ice + **ice shelves** and **ice streams**.

Results. AIS topography

Closed DP

Open DP



High scenario (4 PAL).
Eocene

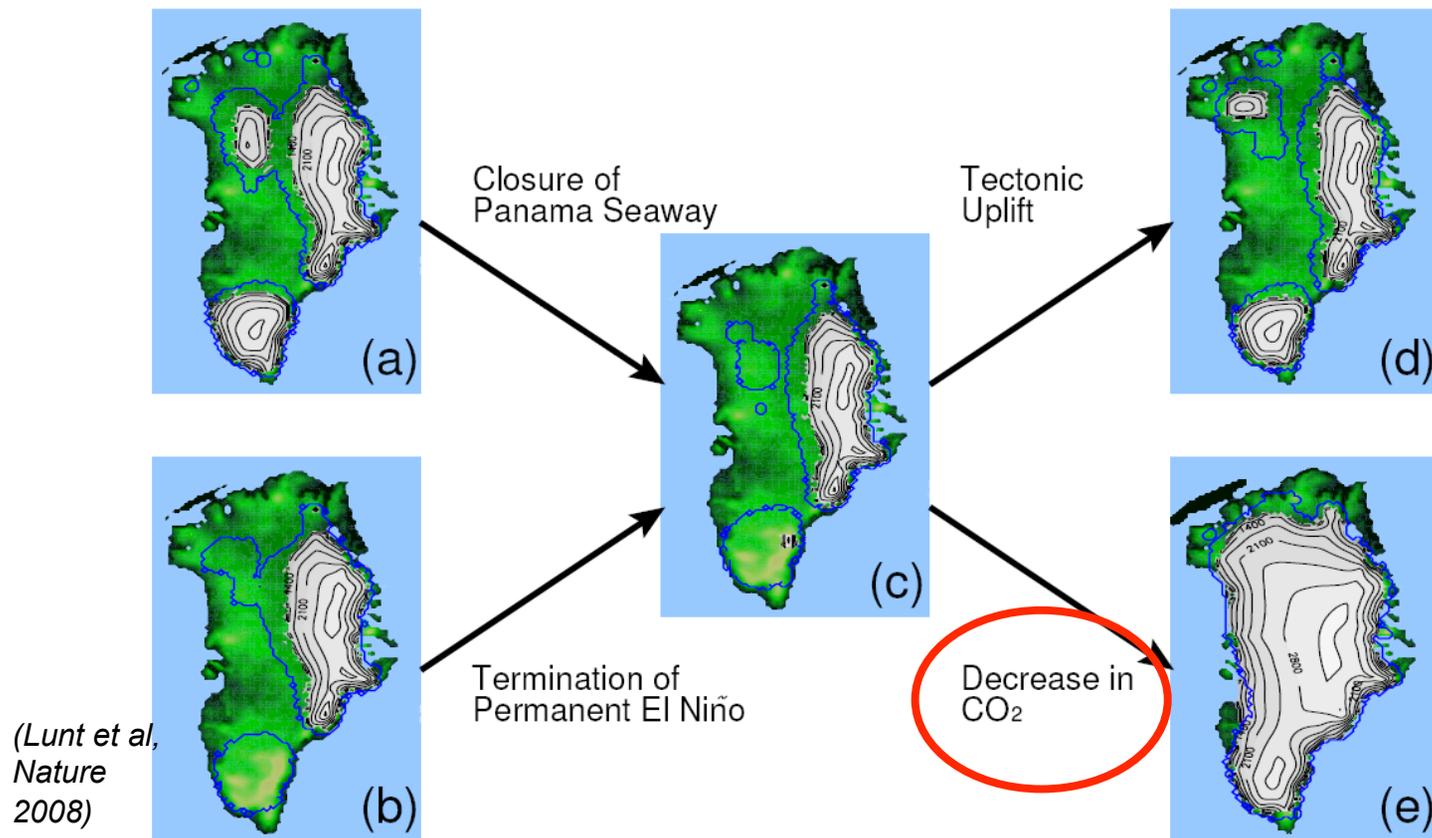
Intermediate
scenario (3 PAL).
Eocene-Oligocene
transition ???

Low scenario (2 PAL).
Oligocene

The Greenland late Cenozoic glacial inception

Motivation

A recent study by D. Lunt showed the predominant role of the progressive decrease in pCO₂ from 400 to 280ppm against other appealed reasons

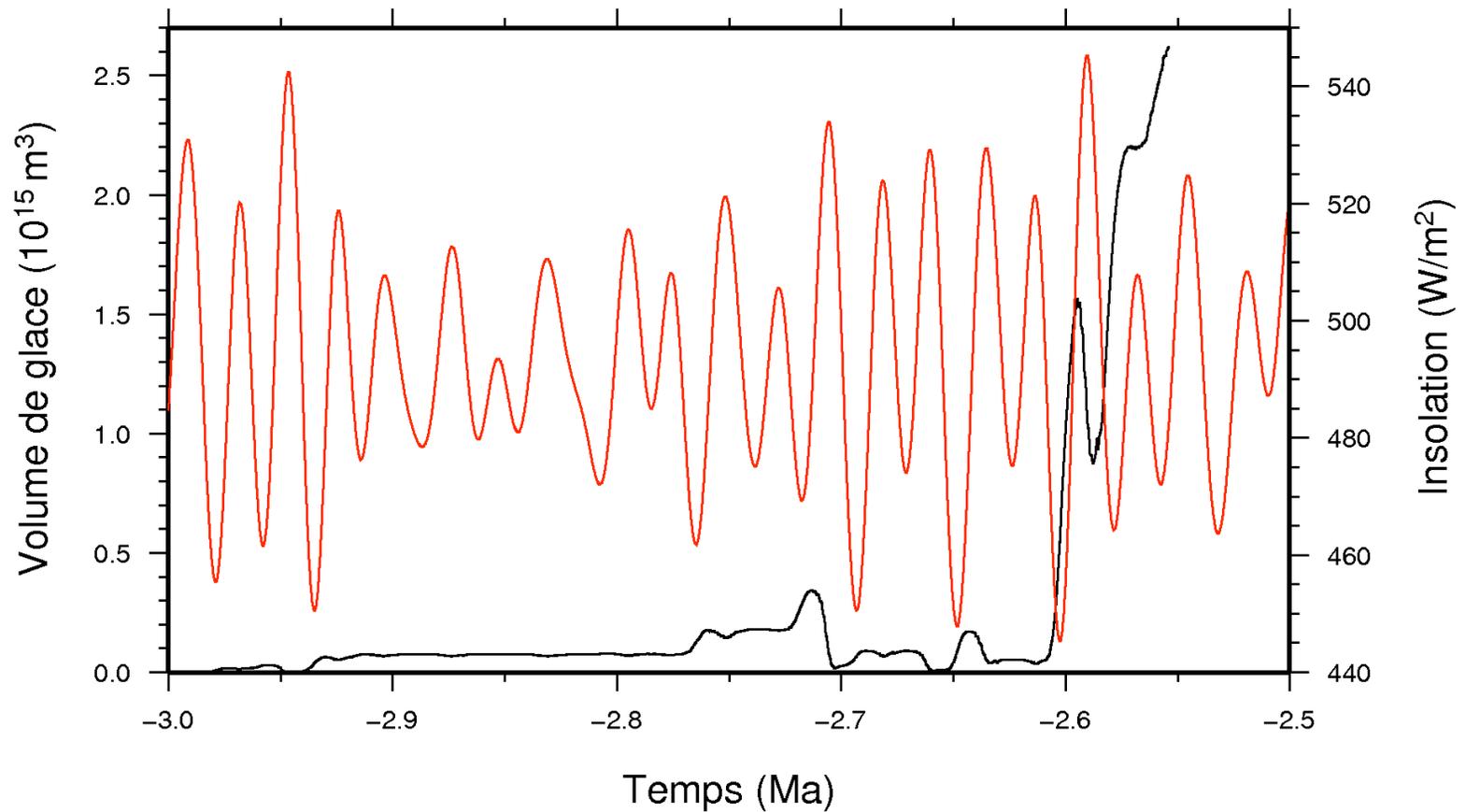


What about the influence of the evolution of the radiative forcing during the late Pliocene: a calculated insolation during a 500kyr transitory simulation

Simulation de l'englacement du Groenland

- Modèle couplé climat-calotte :
- CLIMBER-GREMLINS-GRISLI
- CO₂ constant 1PAL
- Insolation Laskar 2004
- Simulation de 500 000 ans entre 3 et 2,5 Ma

Volume de glace du Groenland et Insolation entre 3Ma et 2.5 Ma

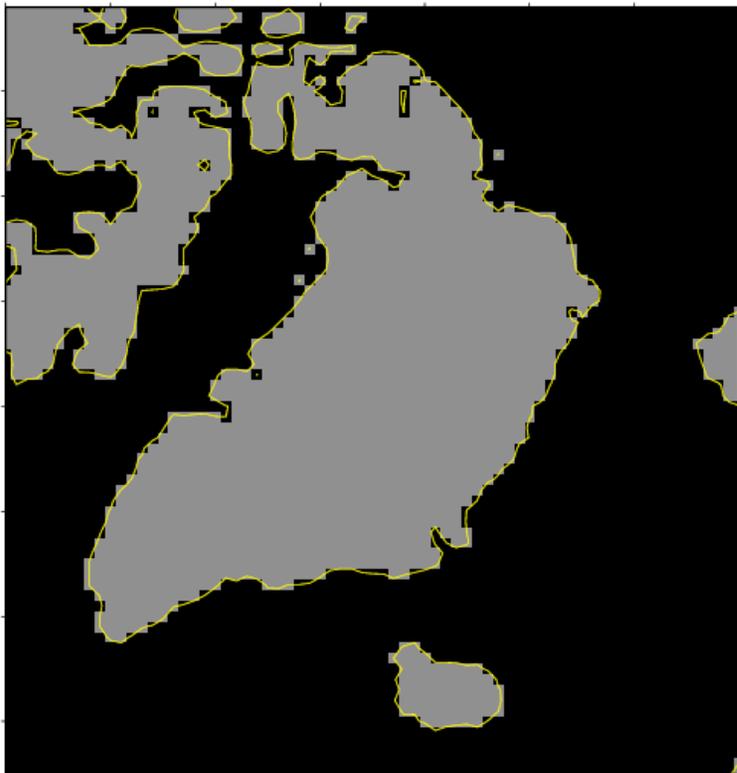
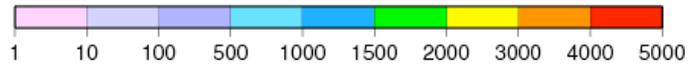


Greenland : 150 ky simulation at 3.88 Ma

CO₂=280 ppm

Greenland

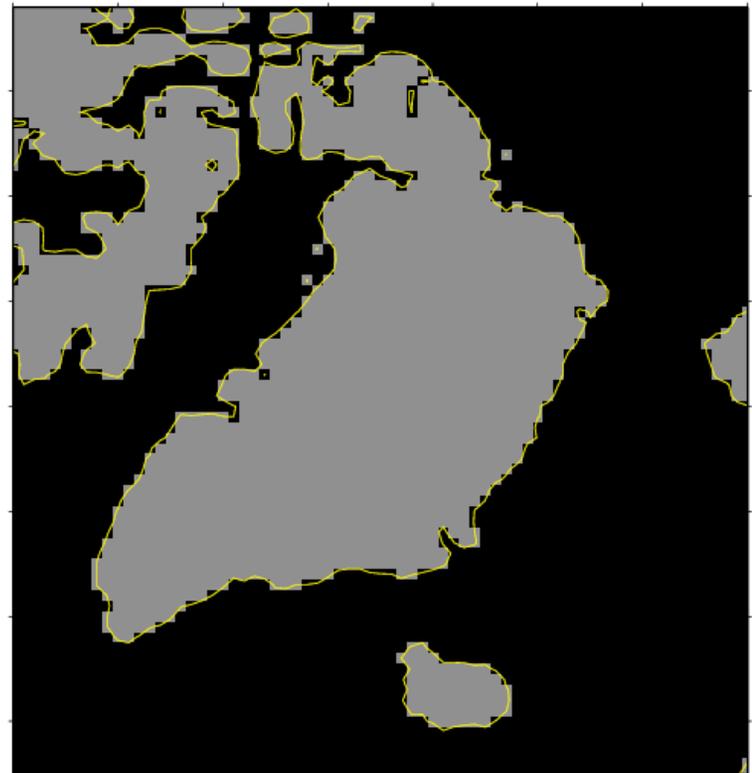
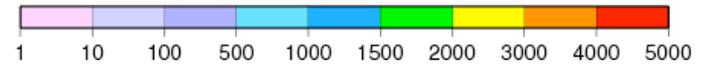
t = -3880 ky BP



CO₂=320 ppm

Greenland

t = -3880 ky BP

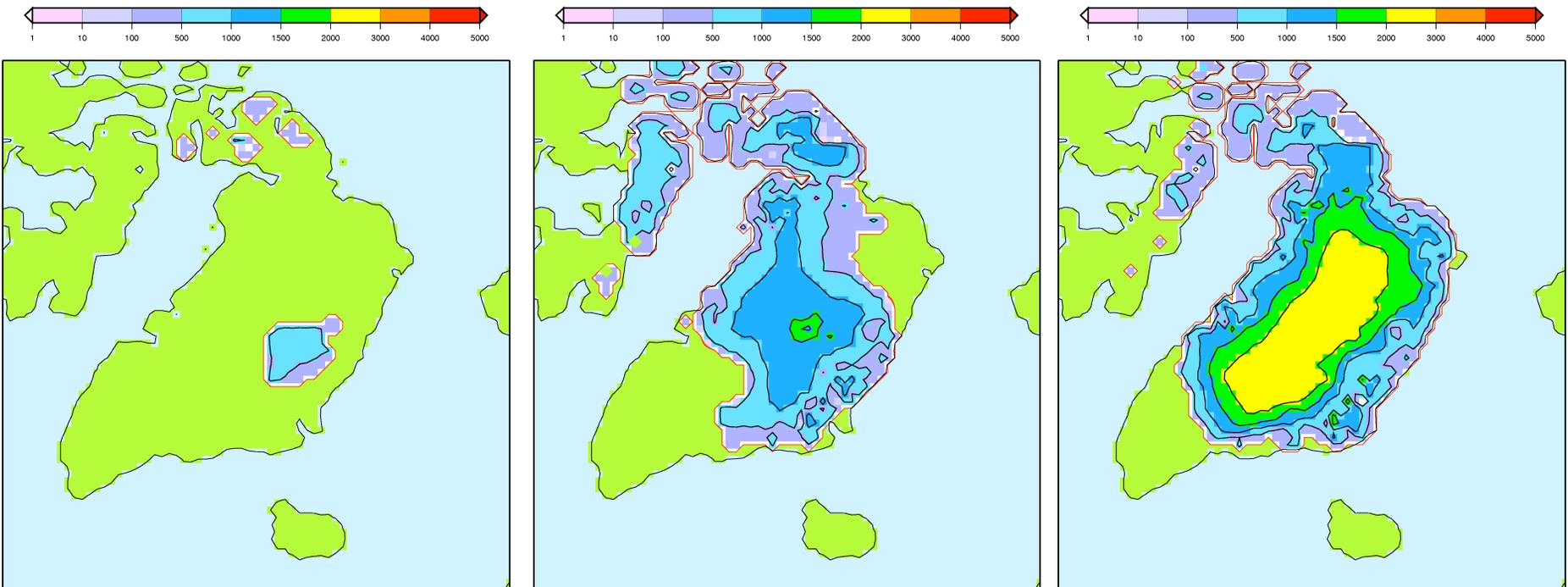


Epaisseur de glace

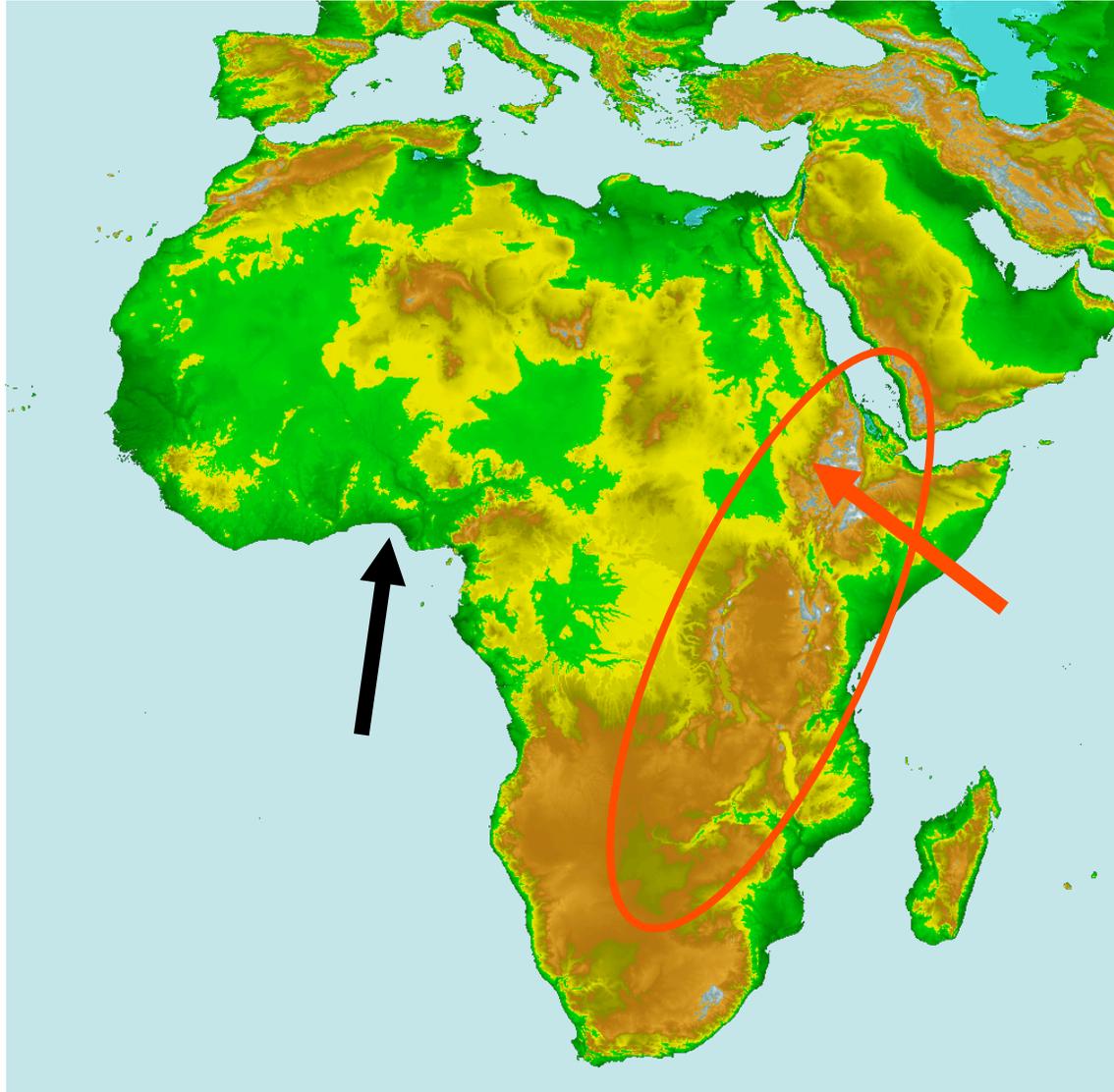
2.8 Ma

2.6 Ma

2.54 Ma

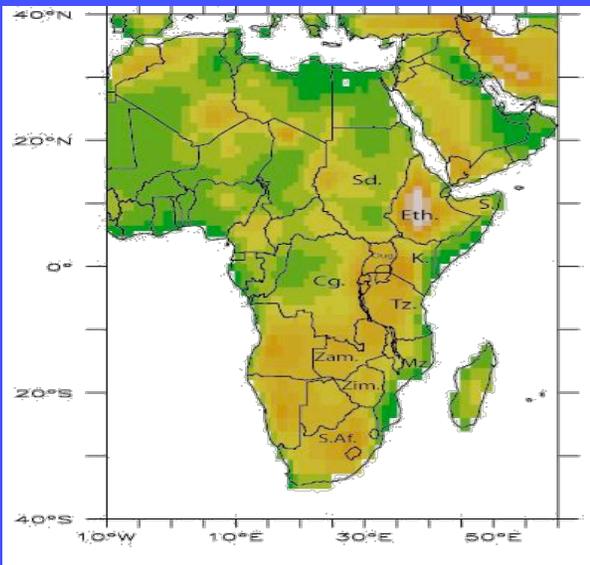


Quel est l'impact de la tectonique ?

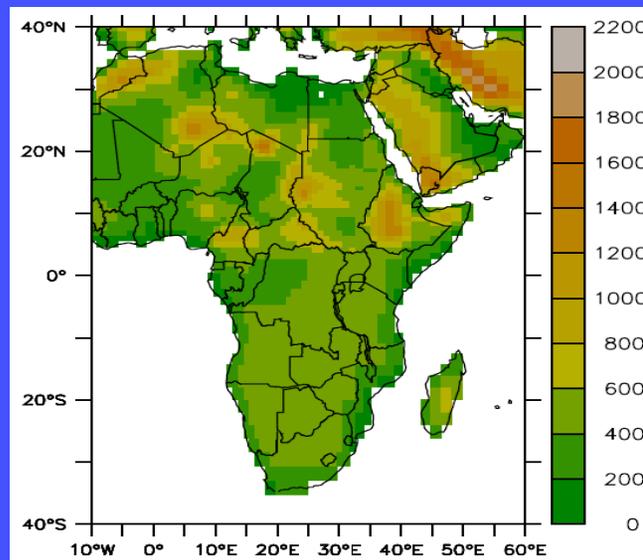


Différents scénarios topographiques

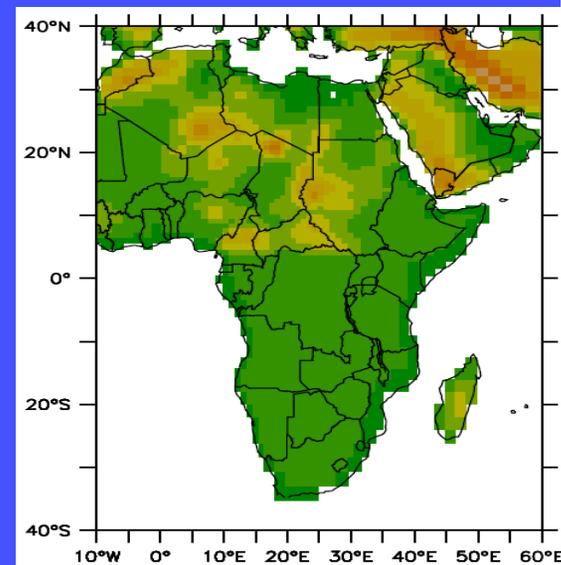
Present



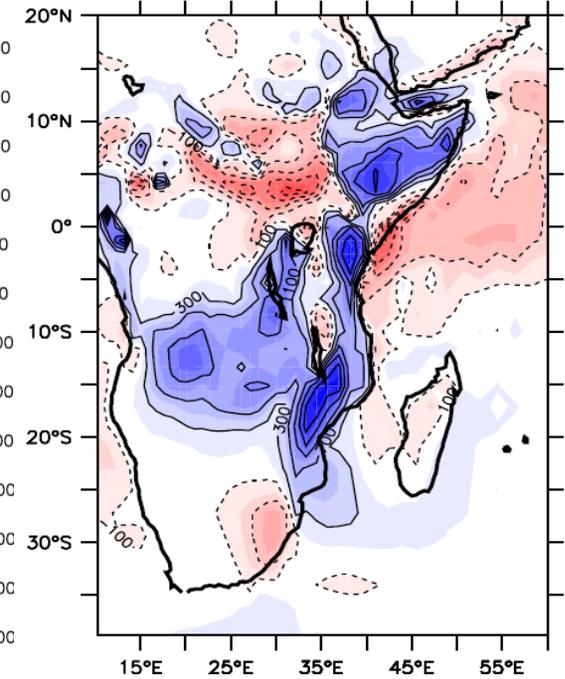
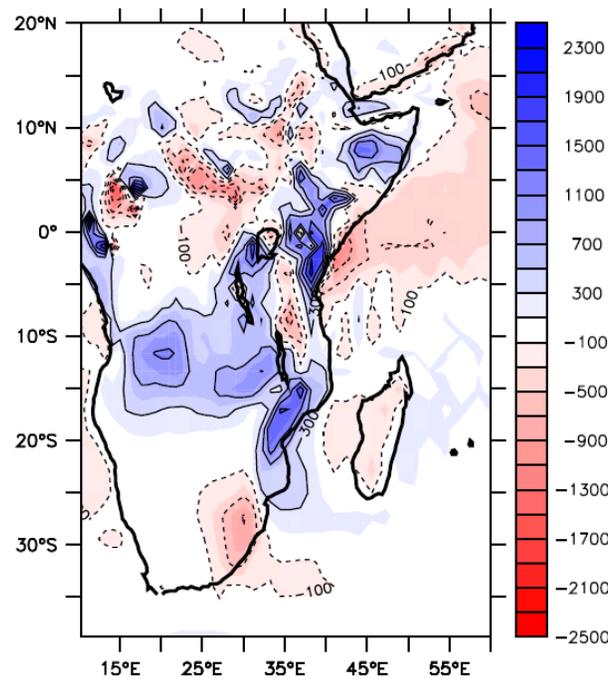
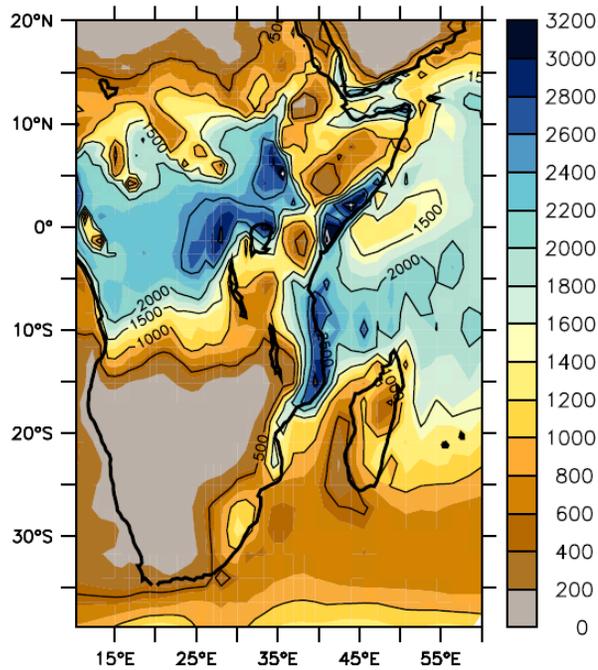
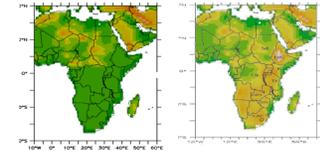
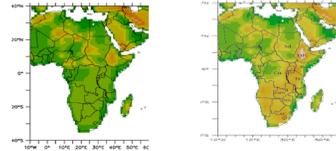
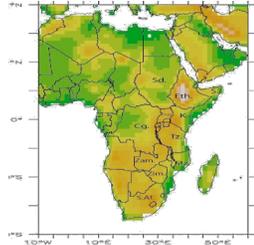
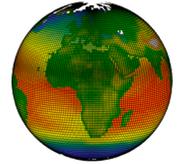
Traps



NoRel

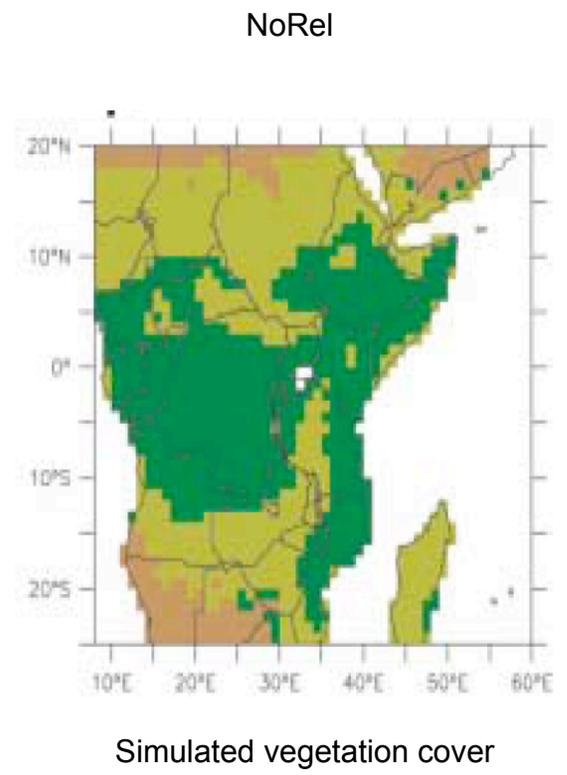
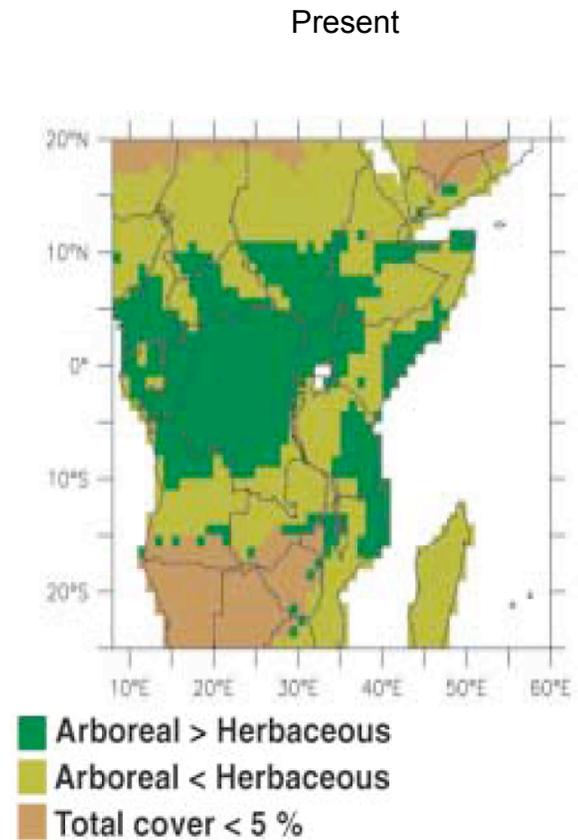
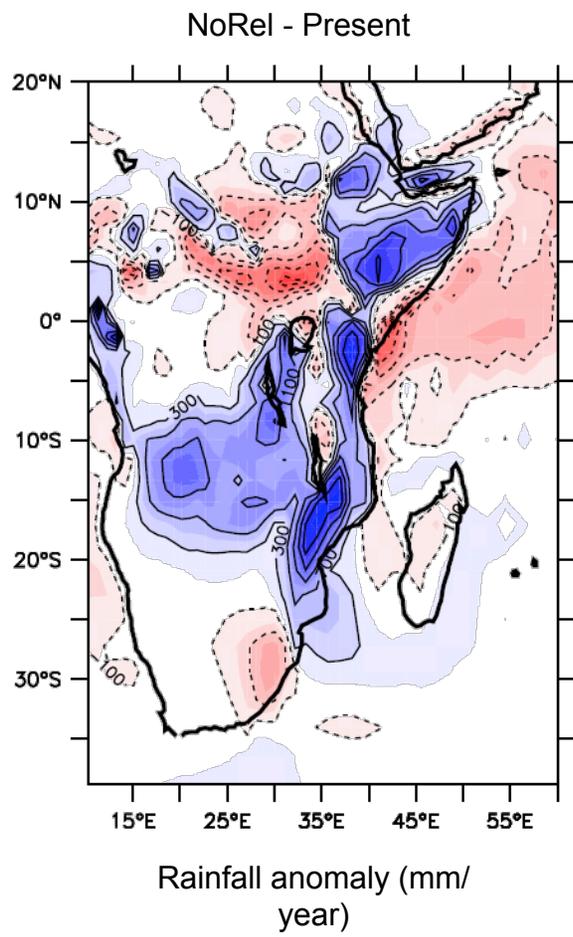


Rainfall patterns : mm / year

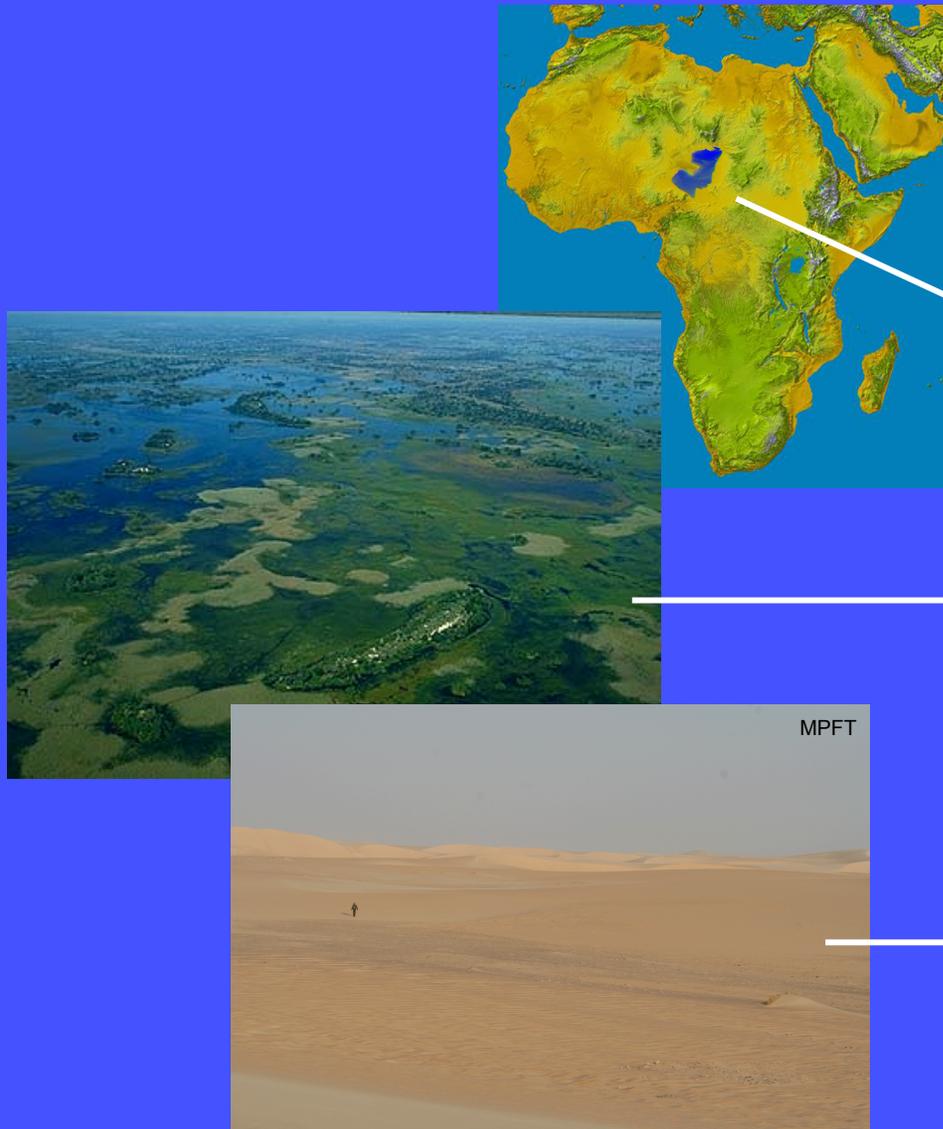


- Convection is also enhanced due to increased continental temperatures.
- Rainfall is increased.

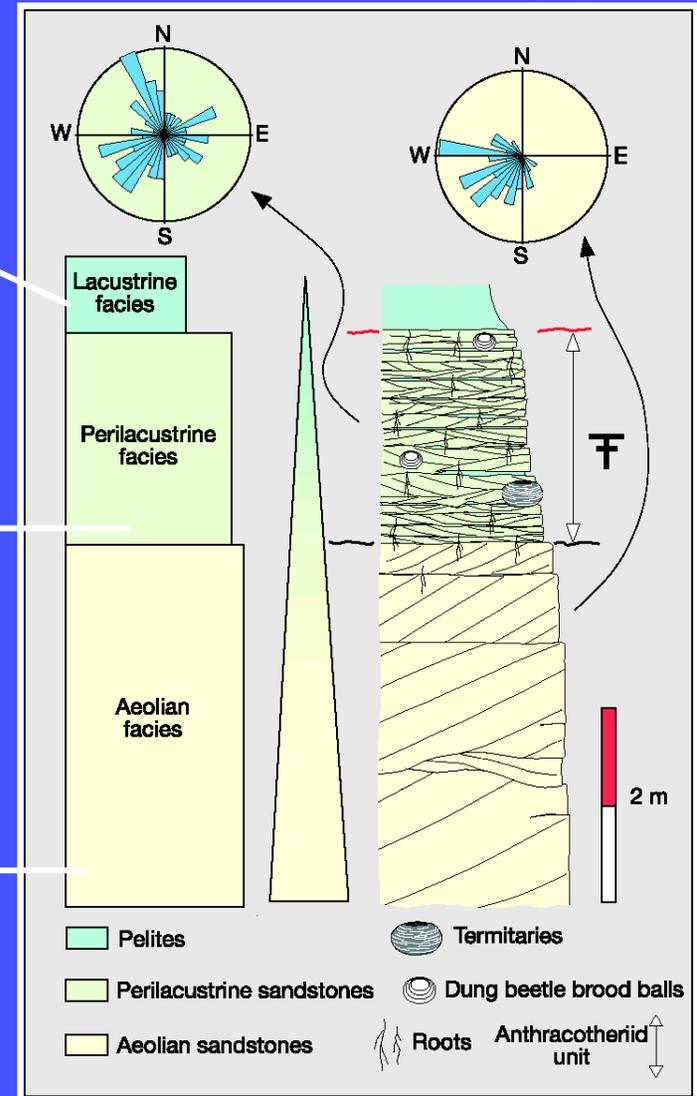
Uplift led to eastern Africa aridification...



Le bassin du Tchad au Miocène supérieur



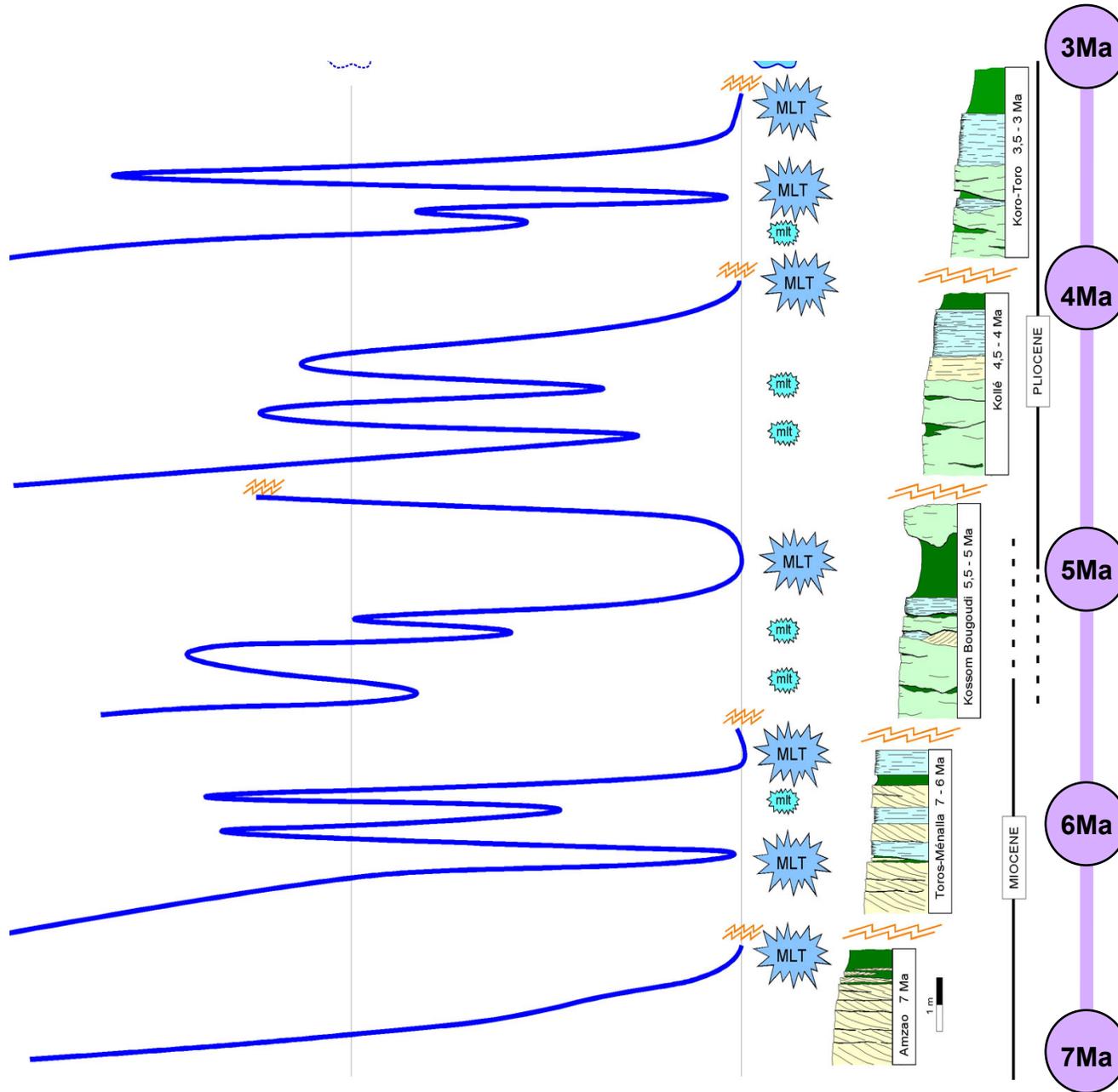
Contexte sédimentologique :



Vignaud et al.

Alternance de phases désertiques, de marécages et d'un lac géant

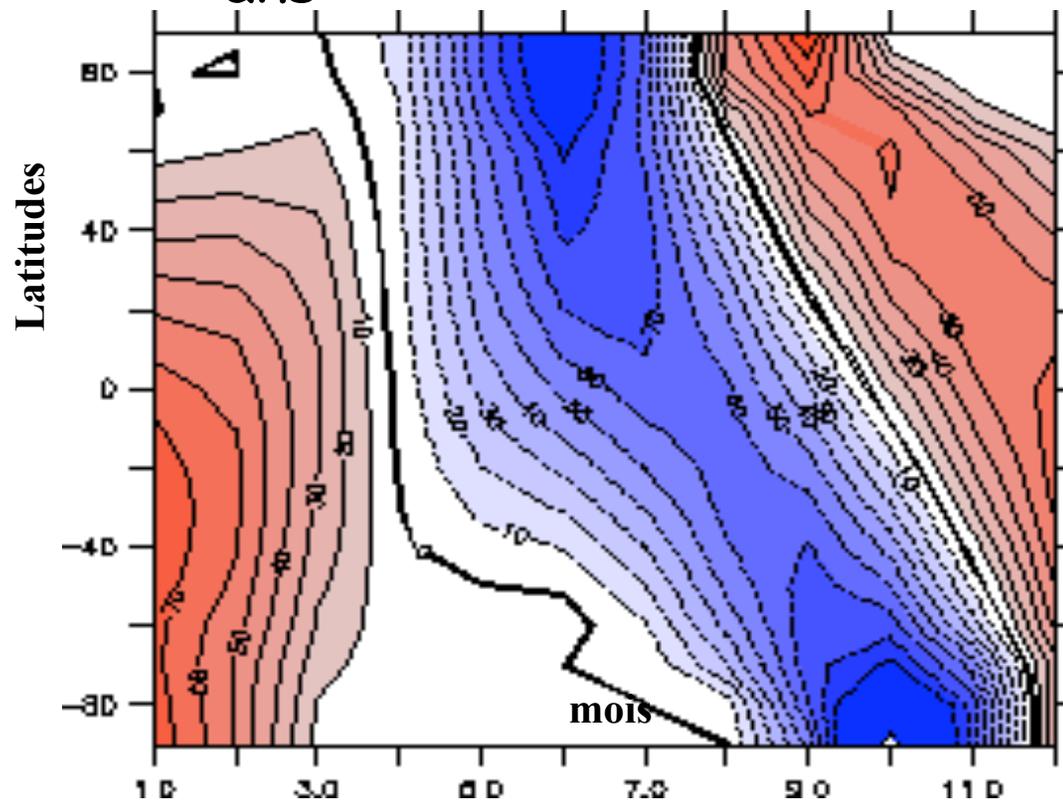
Des oscillations répétitives



Hypothèses: L'insolation

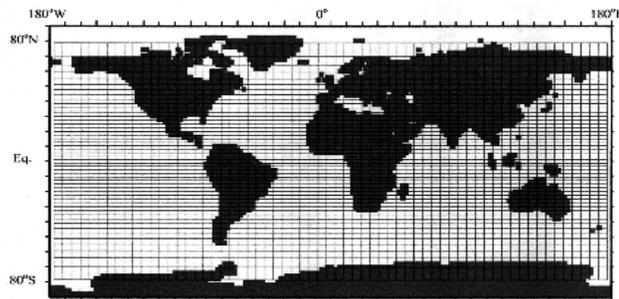
Test de la théorie de Milankovitch

115 000 ans - 126 000
ans



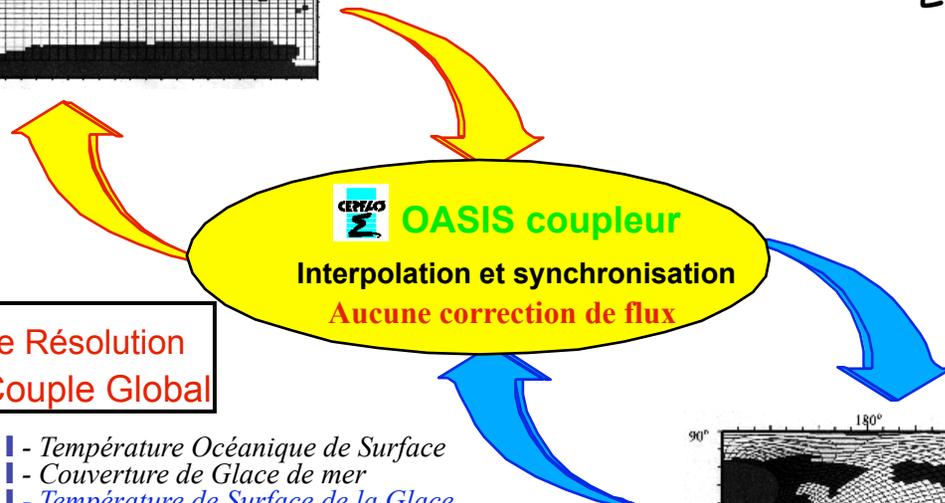
Le rôle de l'océan

▢ Le modèle couplé de l'IPSL



 **LMD 5.3**
Modèle d'Atmosphère
(64 x 50 x 11)

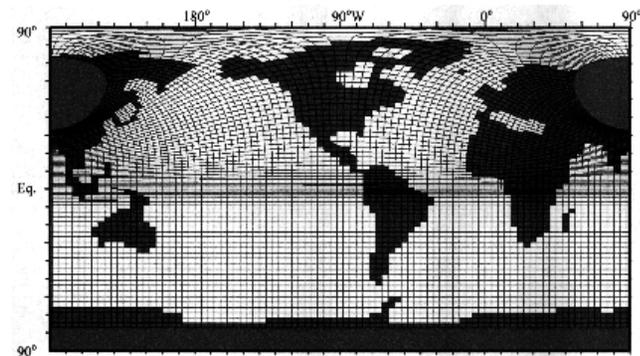
Le Clainche (2000)



 **IPSL Basse Résolution**
Modèle Couple Global

- *Température Océanique de Surface*
- *Couverture de Glace de mer*
- *Température de Surface de la Glace*
- *Albédo de Surface de la Glace*

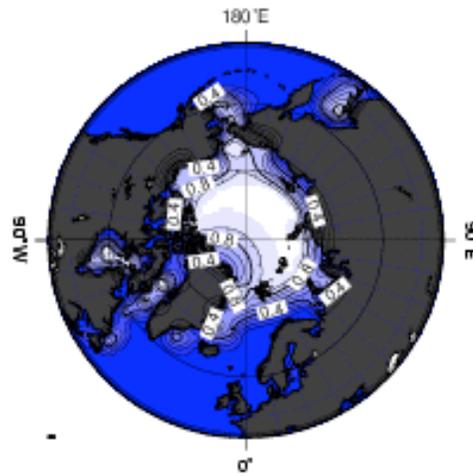
 **OPA-ICE7**
Modèle Océan-Glace
(92 x 76 x 30)



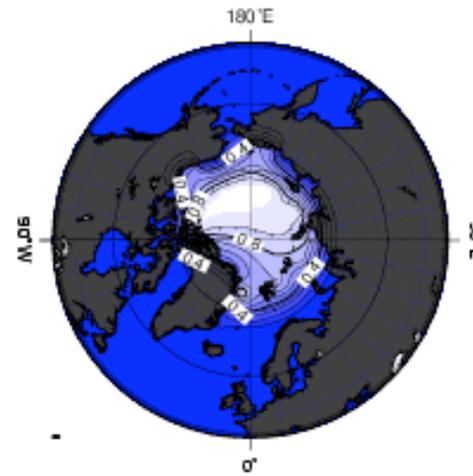
Le rôle de l'océan **Le modèle couplé de l'ITDCI**

Couverture de la glace de mer

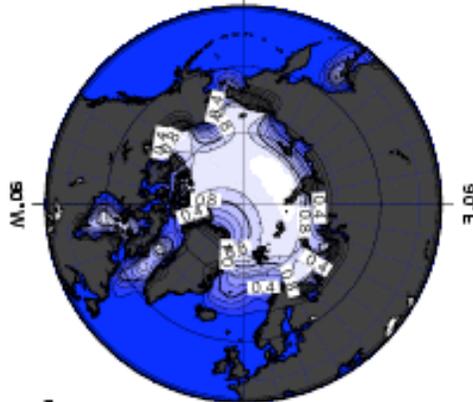
AMIP Climatology
Mean - March



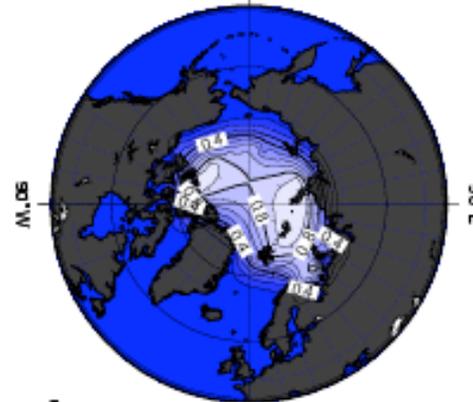
AMIP Climatology
Mean - September



Le Clainche (2000)



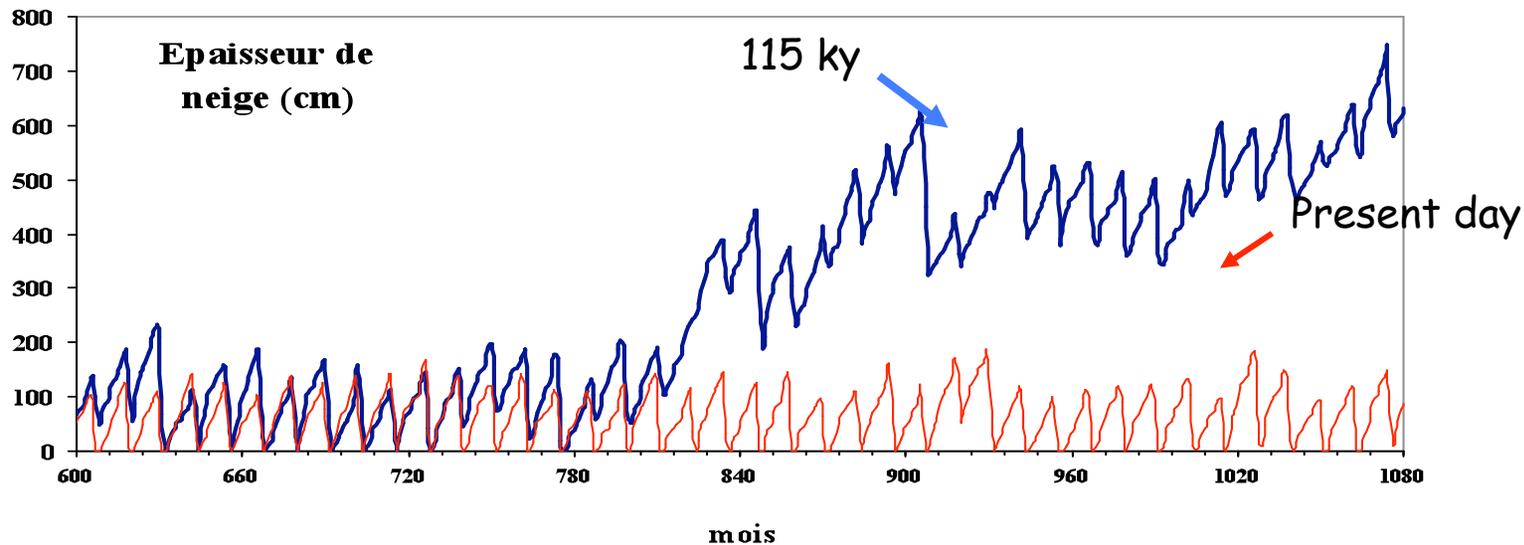
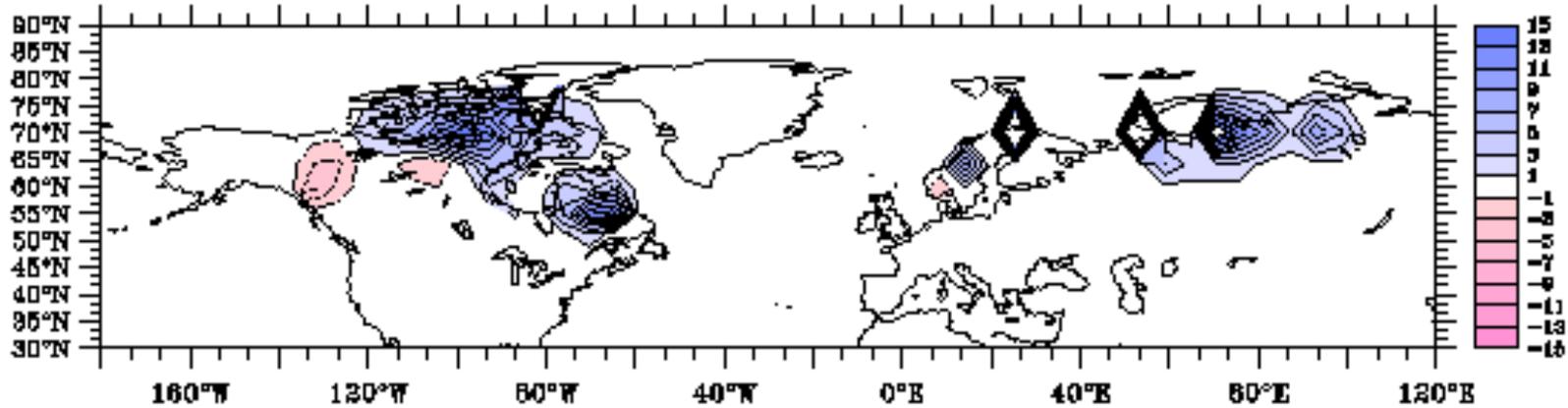
Max: $13,7 \times 10^6 \text{km}^2$
(13,5, Gloersen et Campbell, 1991)



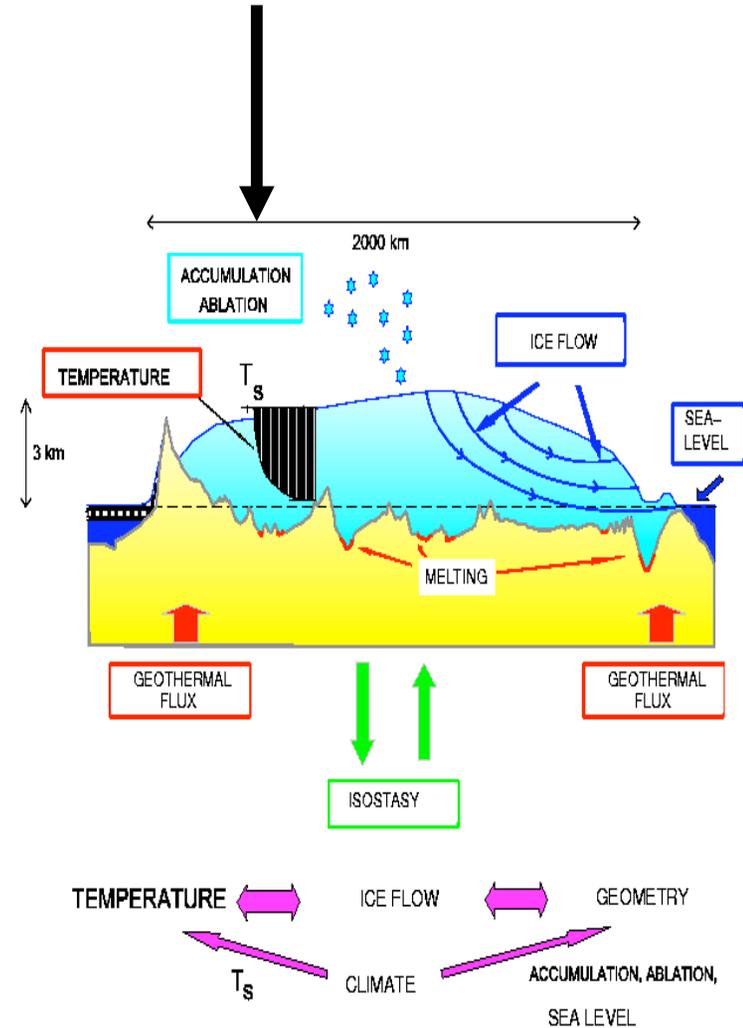
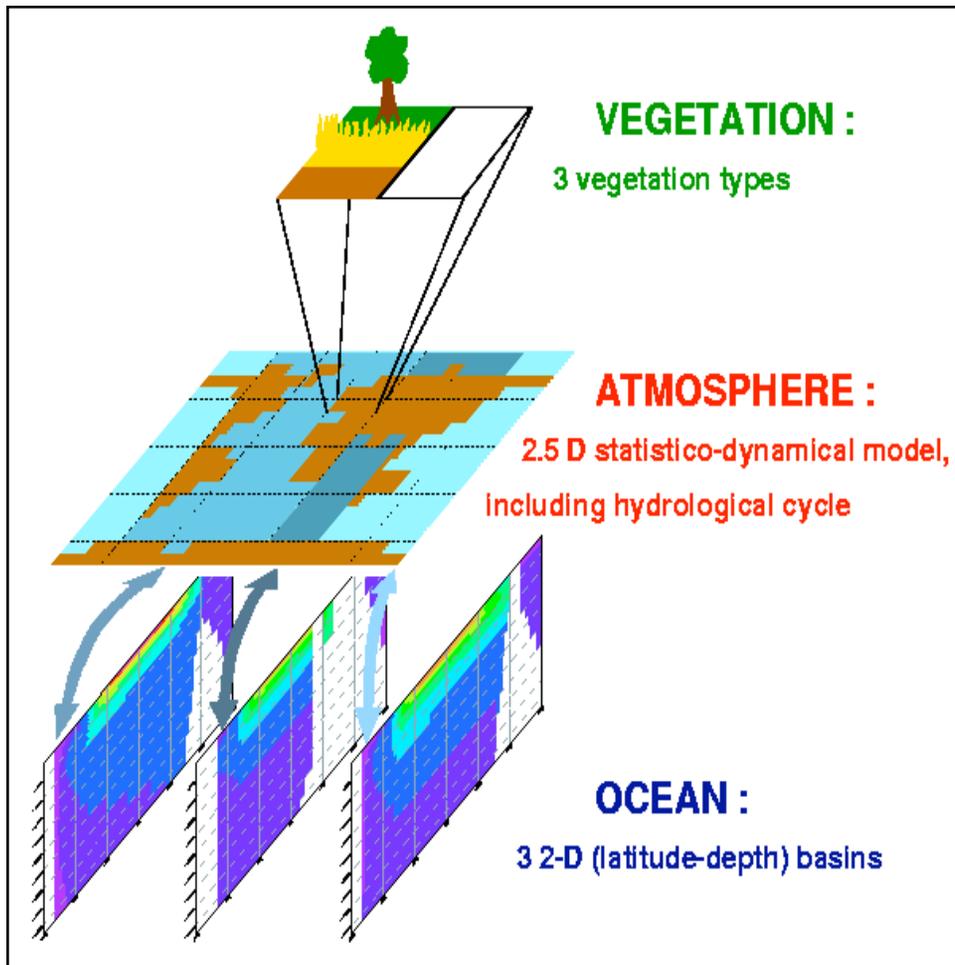
Min: $7,5 \times 10^6 \text{km}^2$
(6, Gloersen et Campbell, 1991)

Le rôle de l'océan Dernière entrée en glaciation

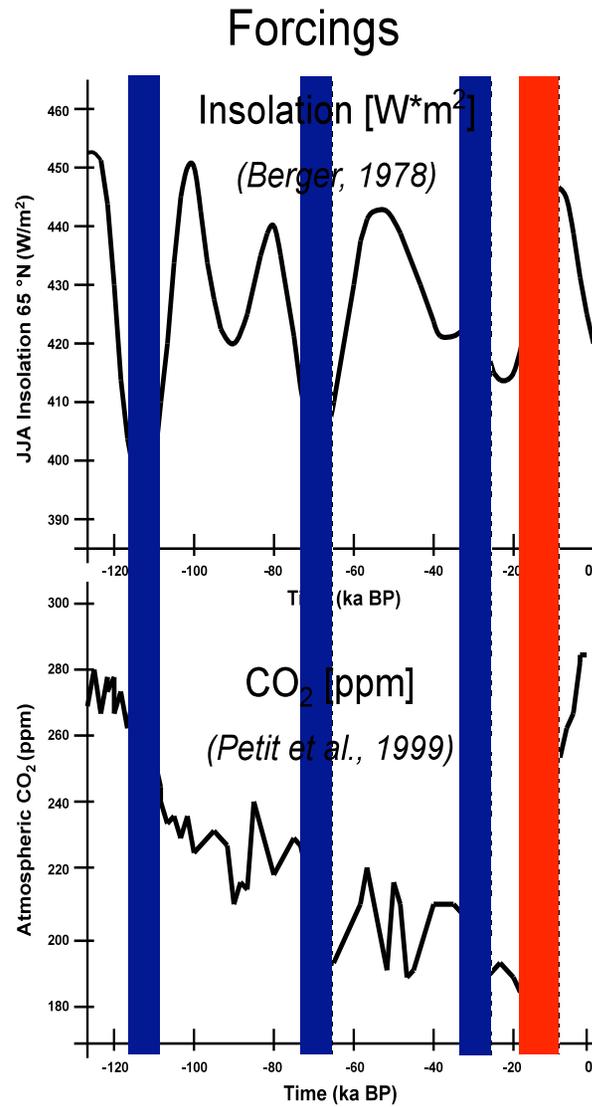
Changement de l'épaisseur de neige en été (cm)



Rencontre CLIMBER-GREMLINS



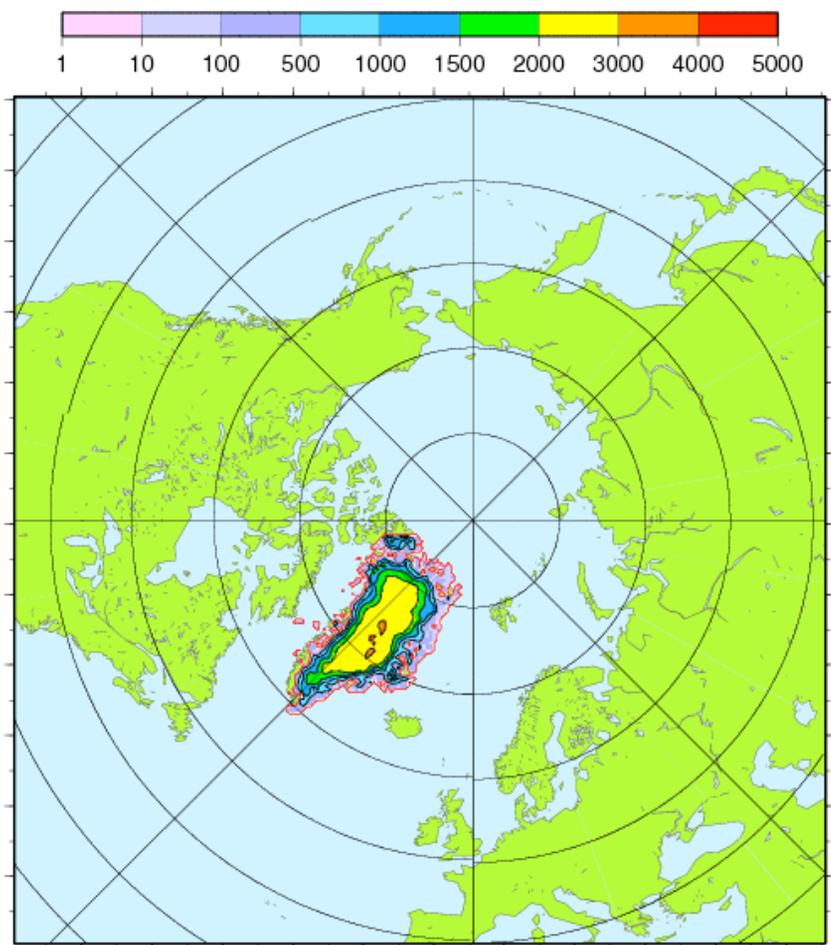
Driver of Climate – Ice sheet model



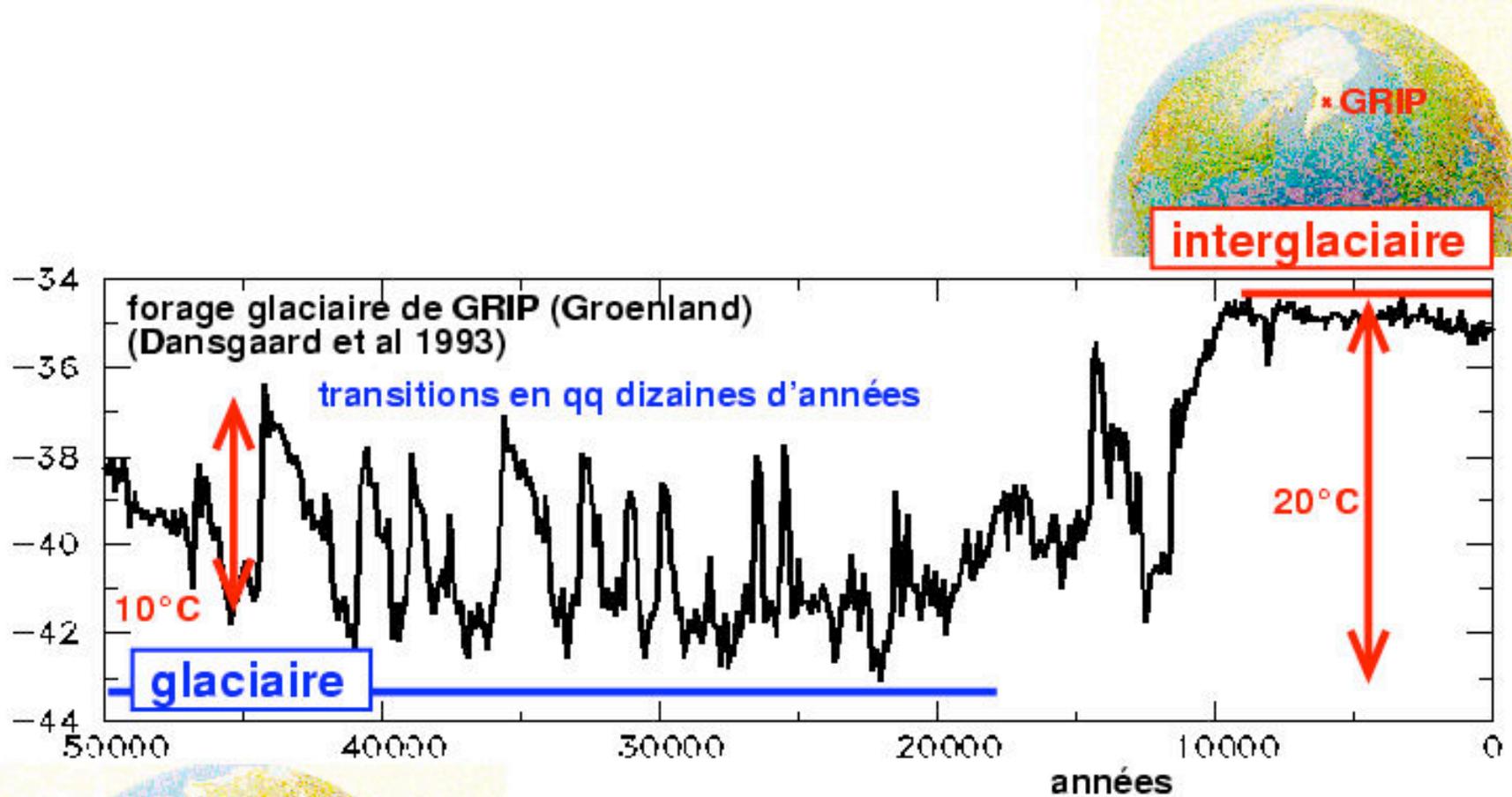
(Bonelli et al., *CI of the Past*, accepted.)

Nouveau Cycle: MIS5 à présent

Cycle Gremlins
t = - 126000 ans



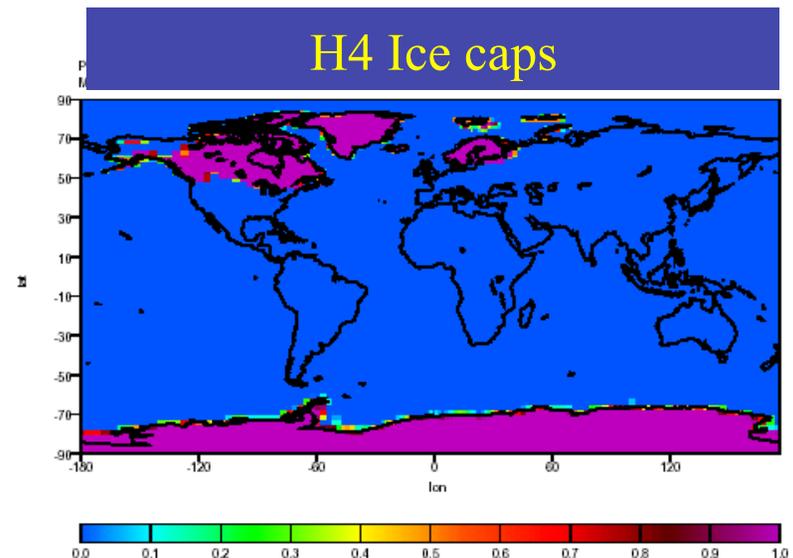
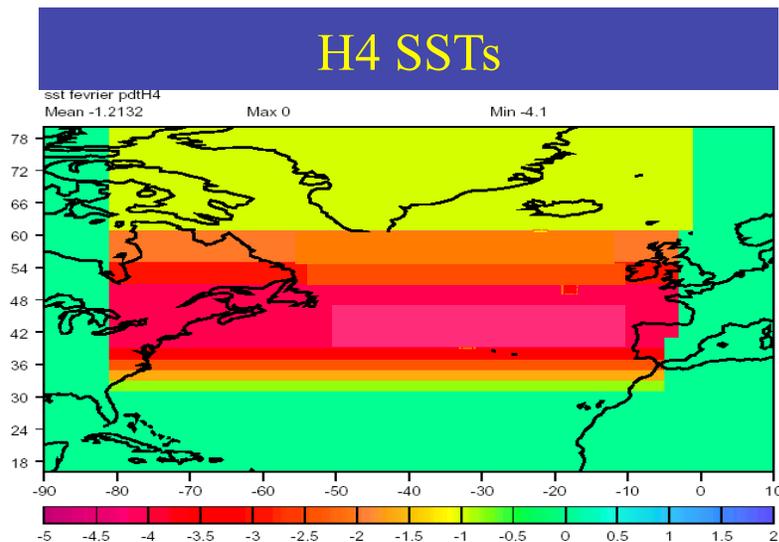
Variabilité millénaire



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

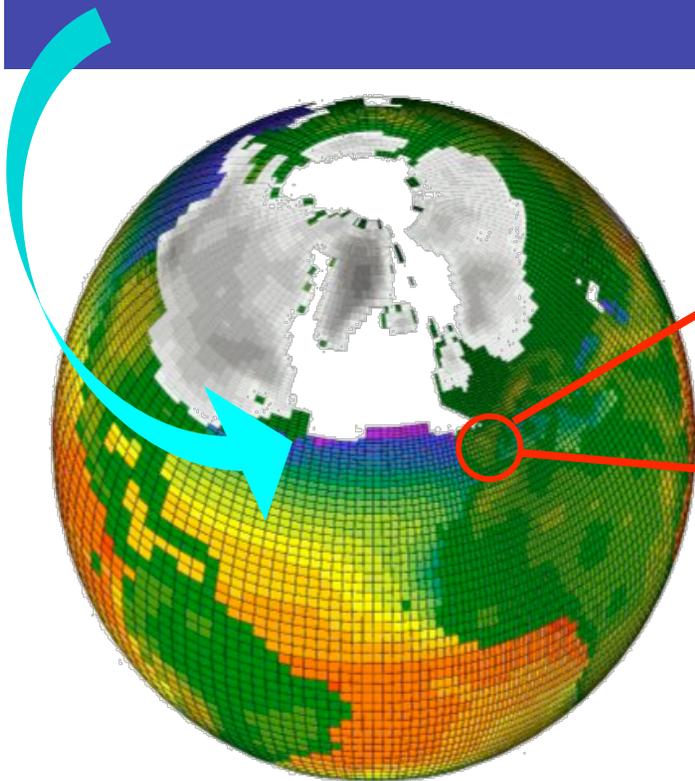
Atmospheric General Circulation Model: LMDZ.3.3 zoomé (144 x 108)

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

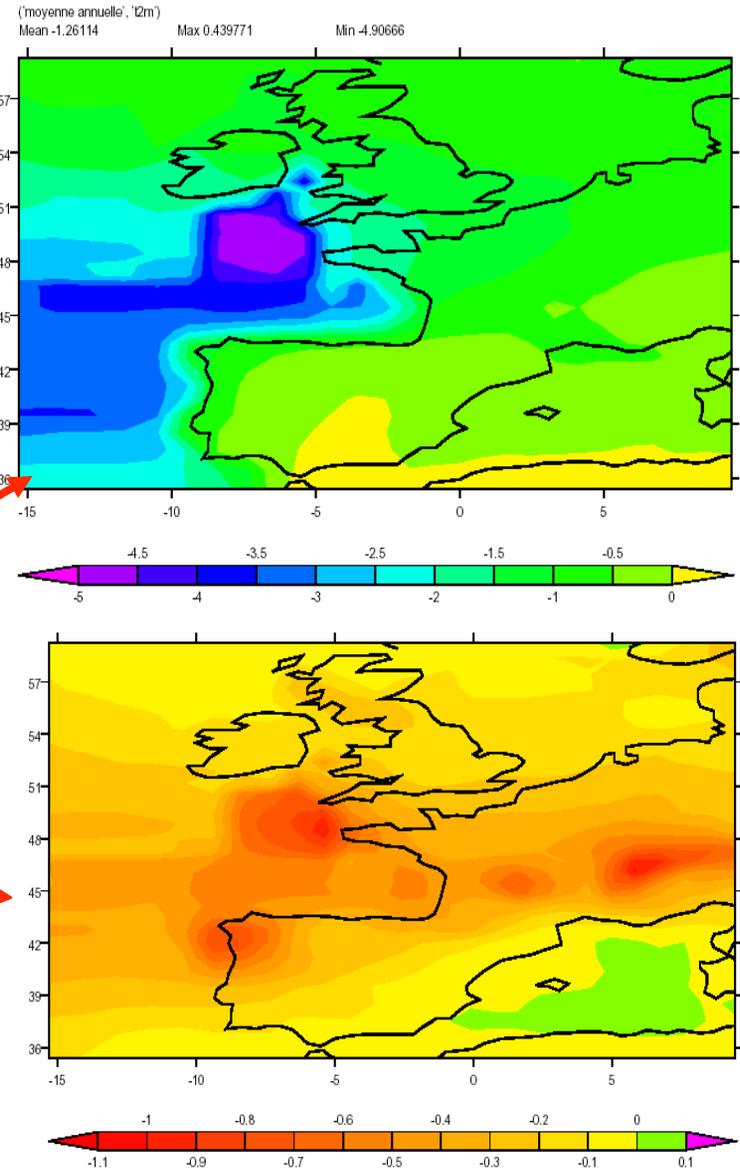


Impact de l'événement de Heinrich 4 sur la péninsule ibérique (Résultats clim.)

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



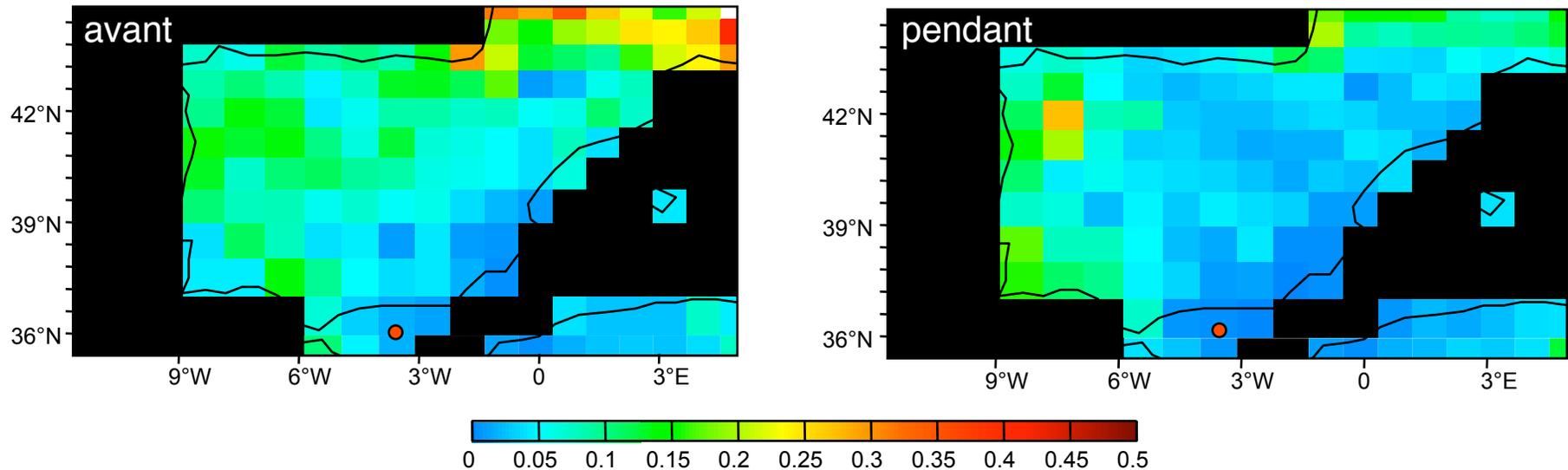
Impact de l'événement de Heinrich 4 sur la péninsule ibérique (Résultats bio.)

Sorties LMDZ



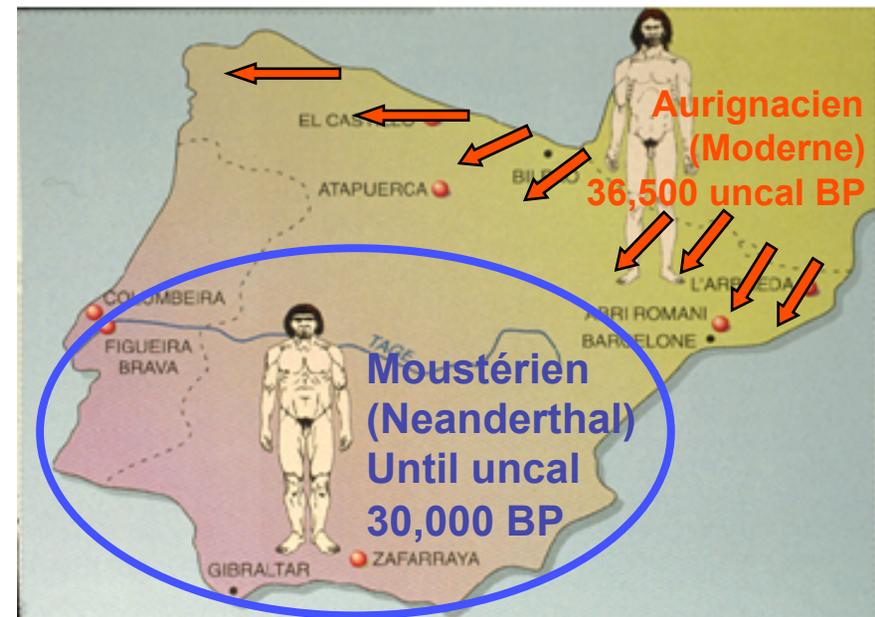
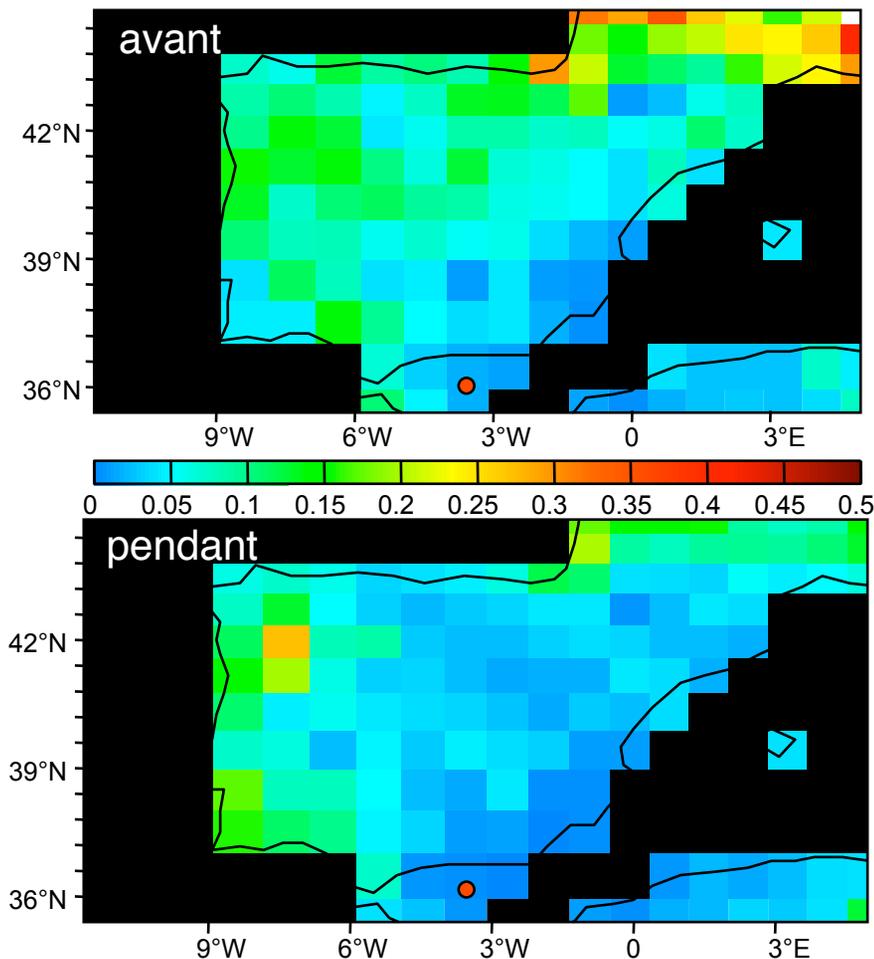
Forçage off-line d'ORCHIDEE

Simulation du changement de végétation (ici couvert arboré avant et pendant l'H4)



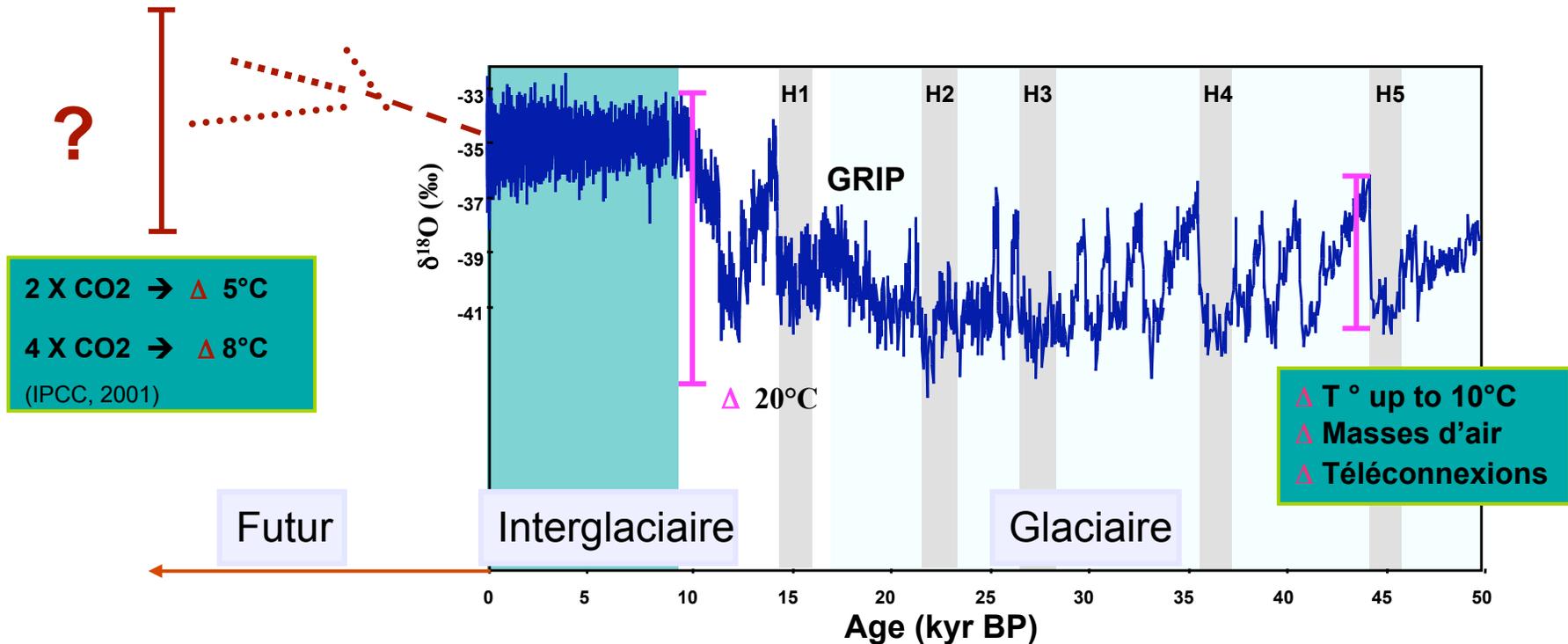
Environnement des derniers hommes de Neanderthal

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

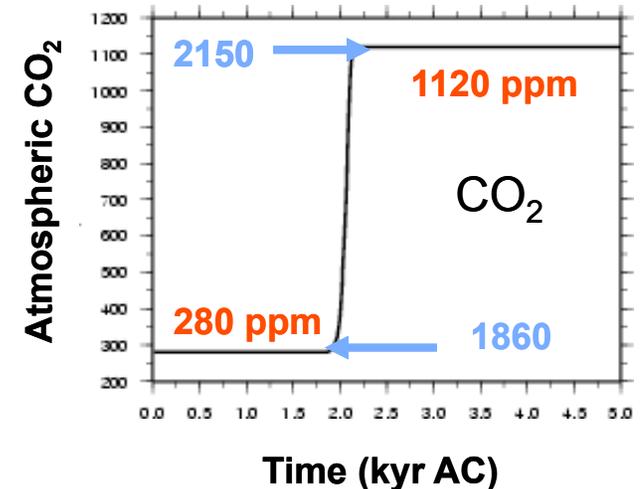
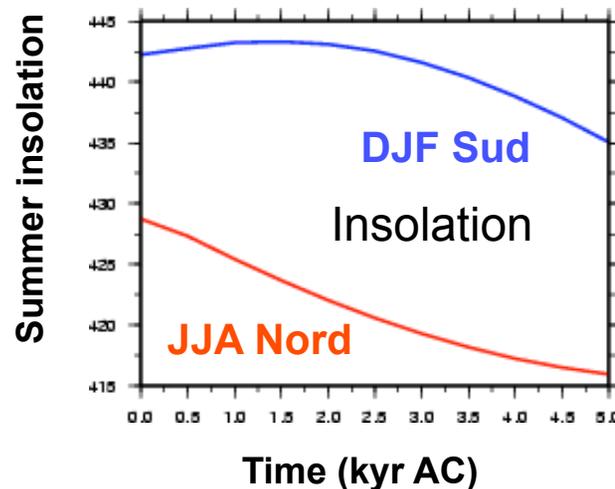
?

Oscillations de faible amplitude

Changements climatiques rapides

Les conditions expérimentales : 0 – 5 kyr

Forçages
Externes



Forçages
Climatiques

→ *Perturbation des températures*
(seulement pour GRISLI)

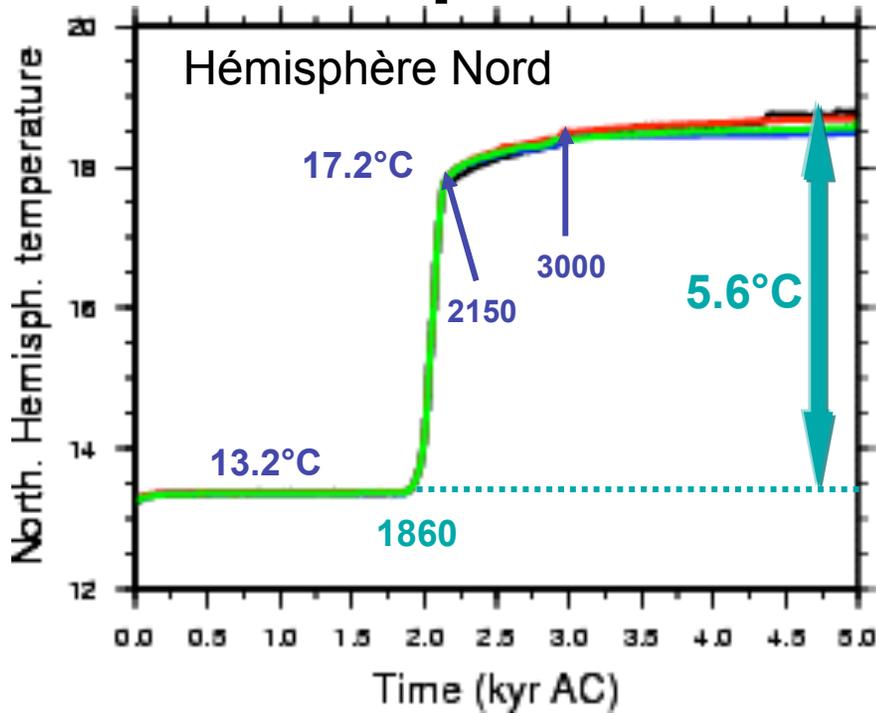
$$\text{Temp (t)} = T_{\text{obs}} + T_{\text{c}}(t) - T_{\text{c}_{0k}}$$

Avec $T(t)$ et T_{0k} fournies par CLIMBER et interpolées sur la grille de modèle de glace GRISLI

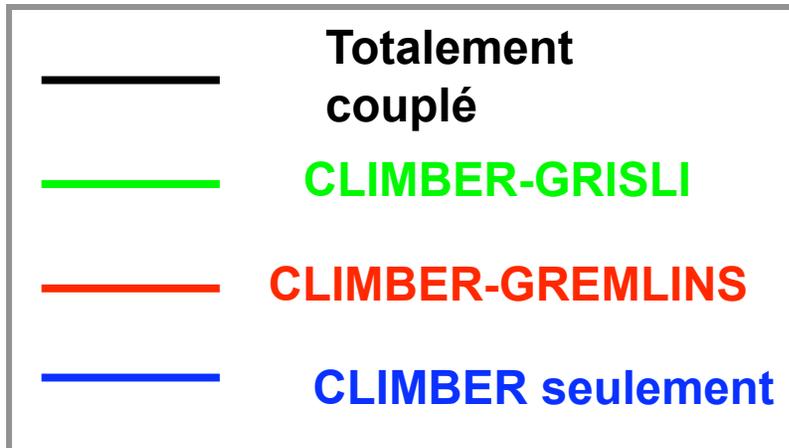
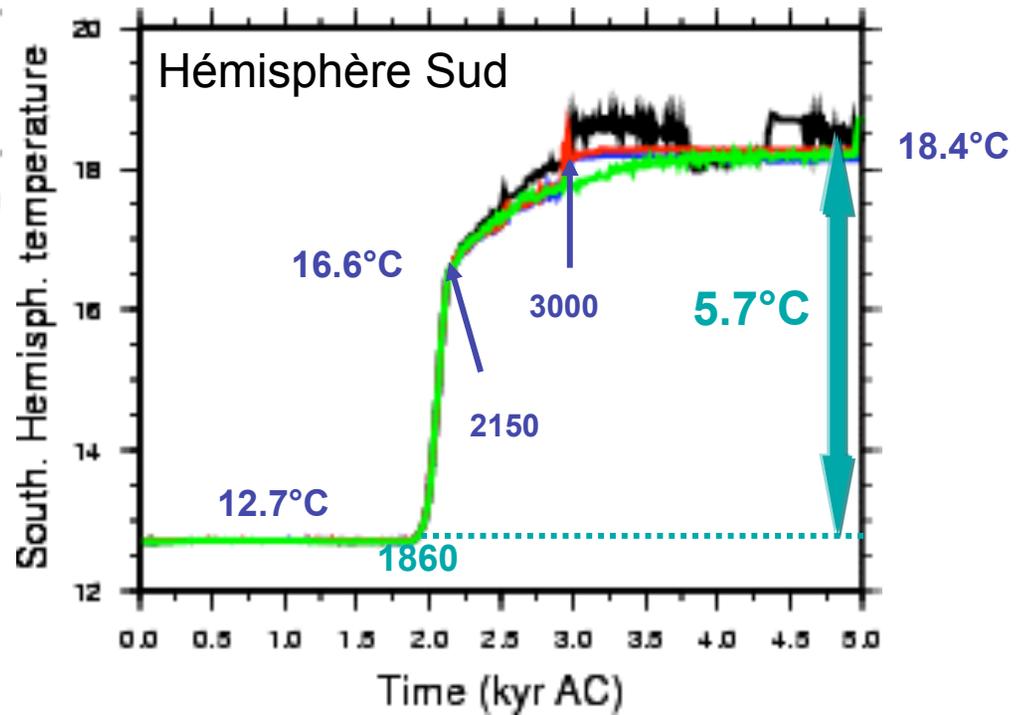
Condition
Initiale

Relief, extension des calottes de glace observées à l'Actuel pour les Hémisphères Nord et Sud
La simulation dure 5 000 ans

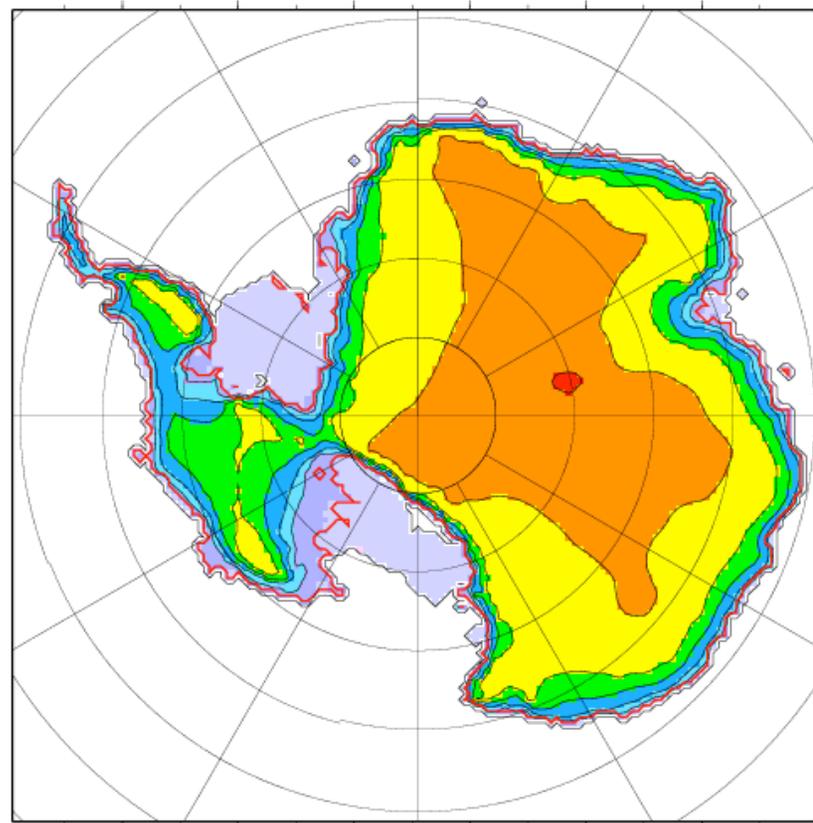
Impact sur les températures ...



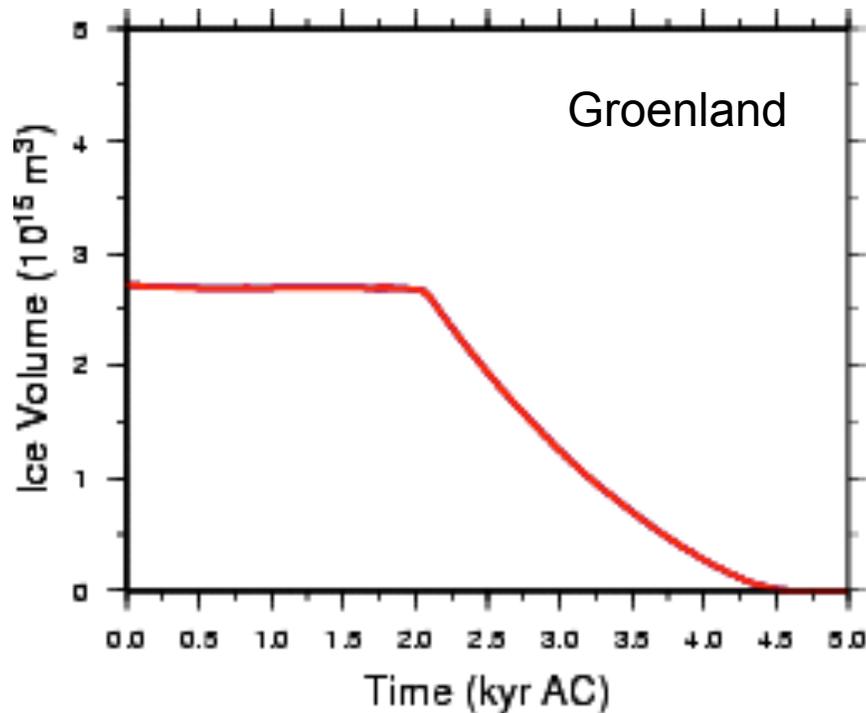
Effet du couplage clairement visible pour l'Hémisphère Sud



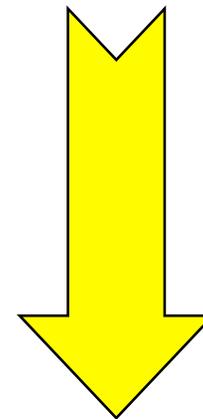
Simulation Futur
t = 00000



L'évolution du volume de la calotte groenlandaise et la remontée du niveau marin associé

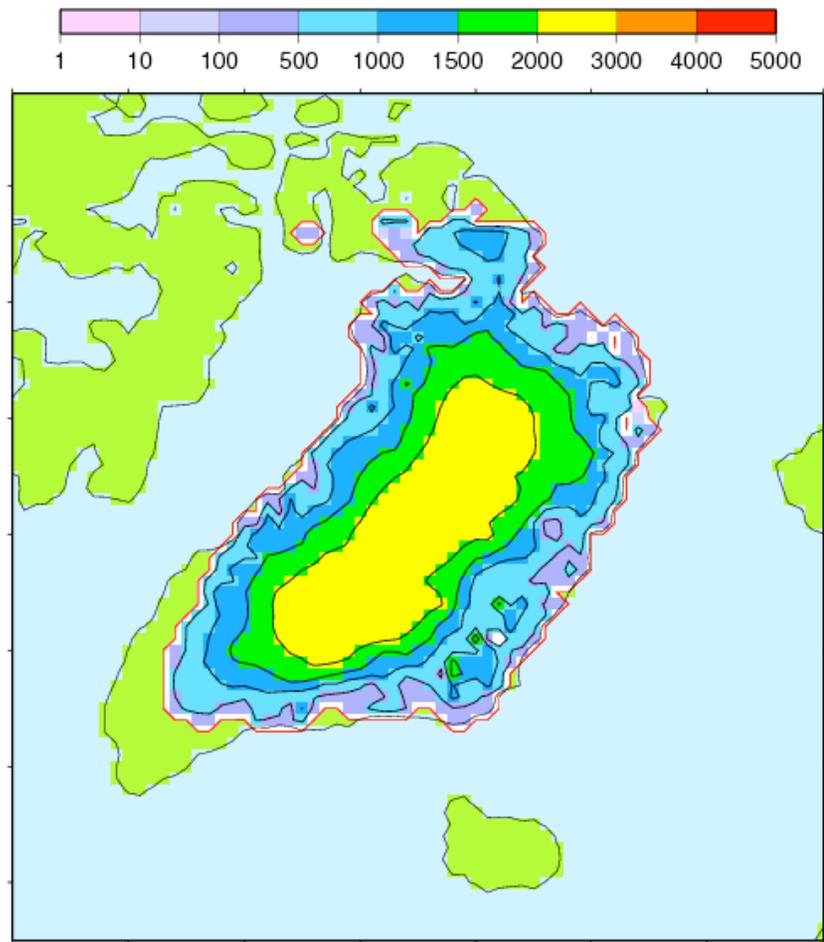


$\Delta V = 2.7 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$
Surface Océanique : $3.6 \cdot 10^{14} \text{ m}^3$



Montée du niveau marin = 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...



