

# **Climat et gaz carbonique: le système Terre à l'échelle géologique**

**Gilles Ramstein**

Unité Mixte de Recherche CEA/CNRS

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement

[gilles.ramstein@cea.fr](mailto:gilles.ramstein@cea.fr)

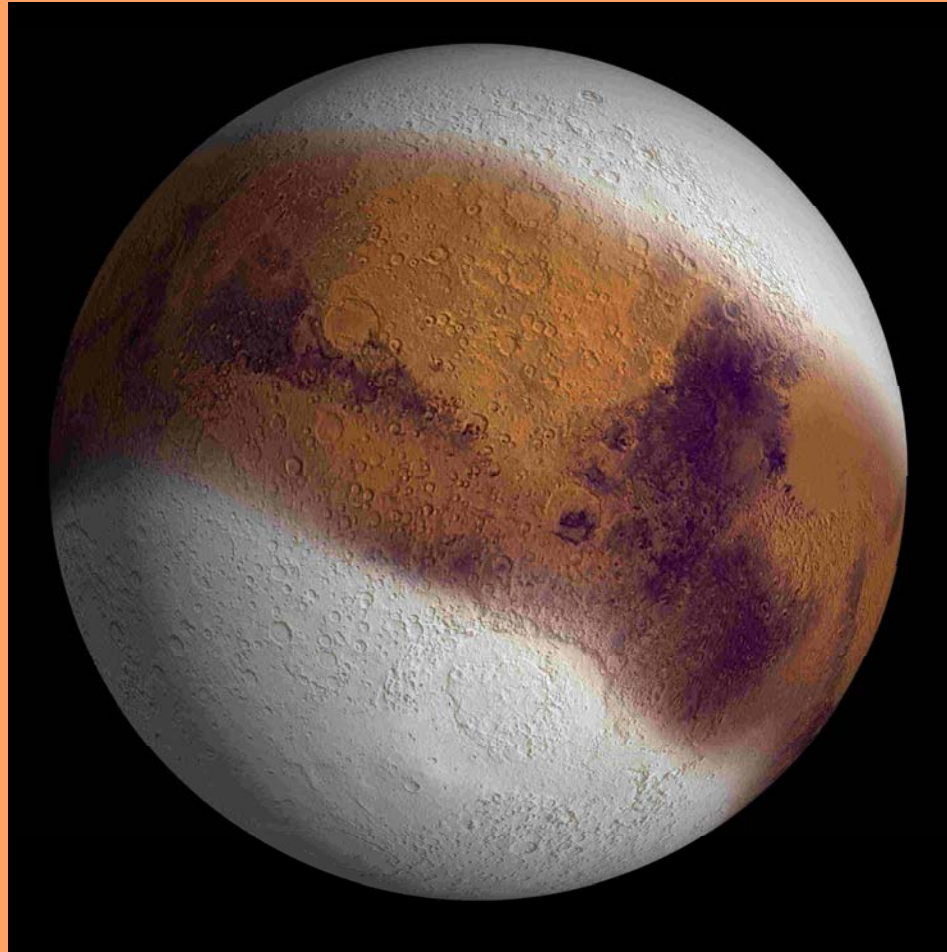
ESPCI, Paris le 21 Janvier 2010

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



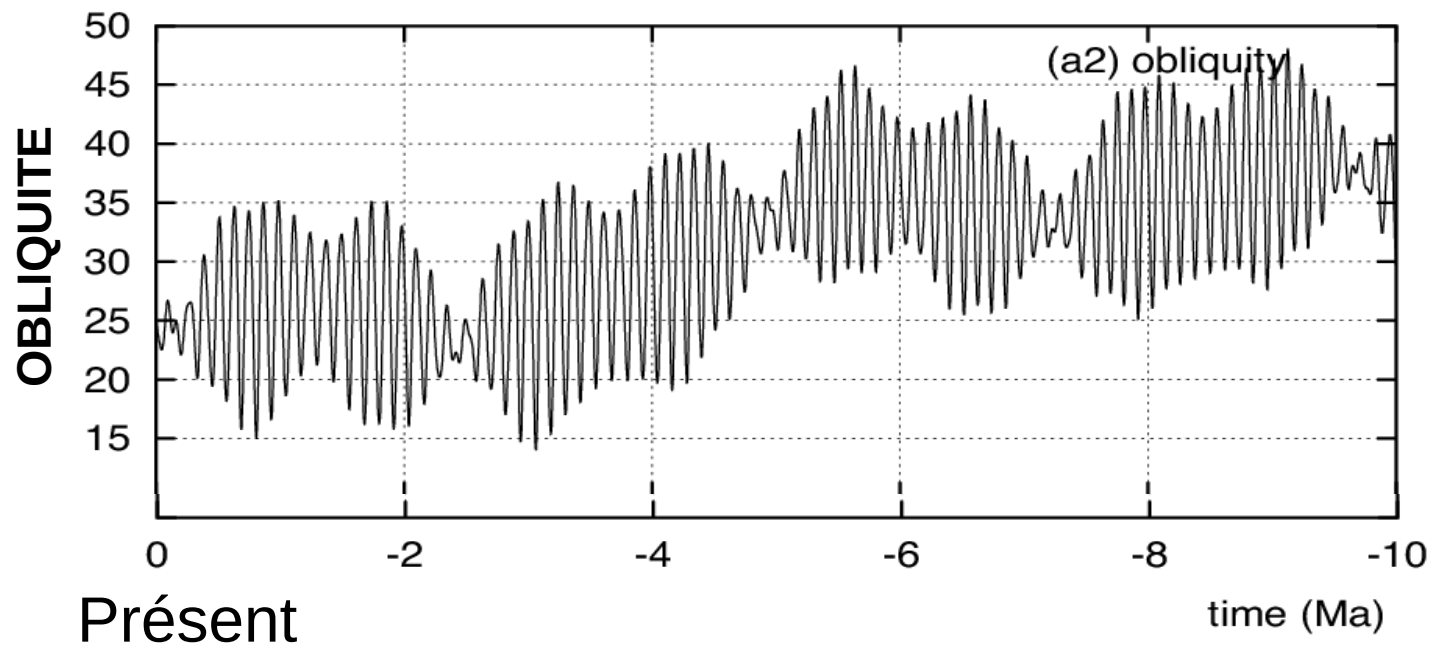
# Mars

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.

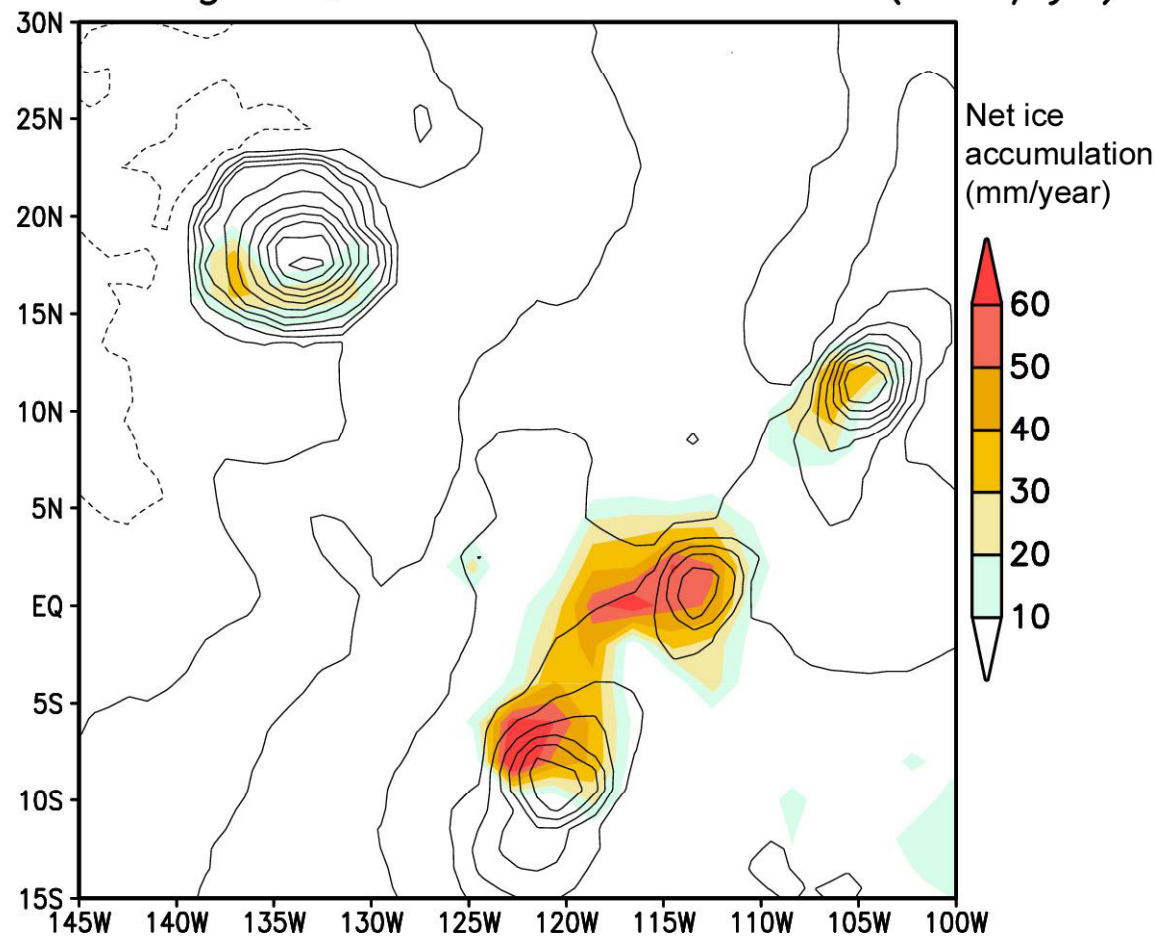


Pendant l'histoire de Mars, l'obliquité était d'environ 41.8° (Laskar et al. 2004)



# La formation de glacier : accumulation du taux de glace (mm/an) dans une simulation à très haute résolution spatiale

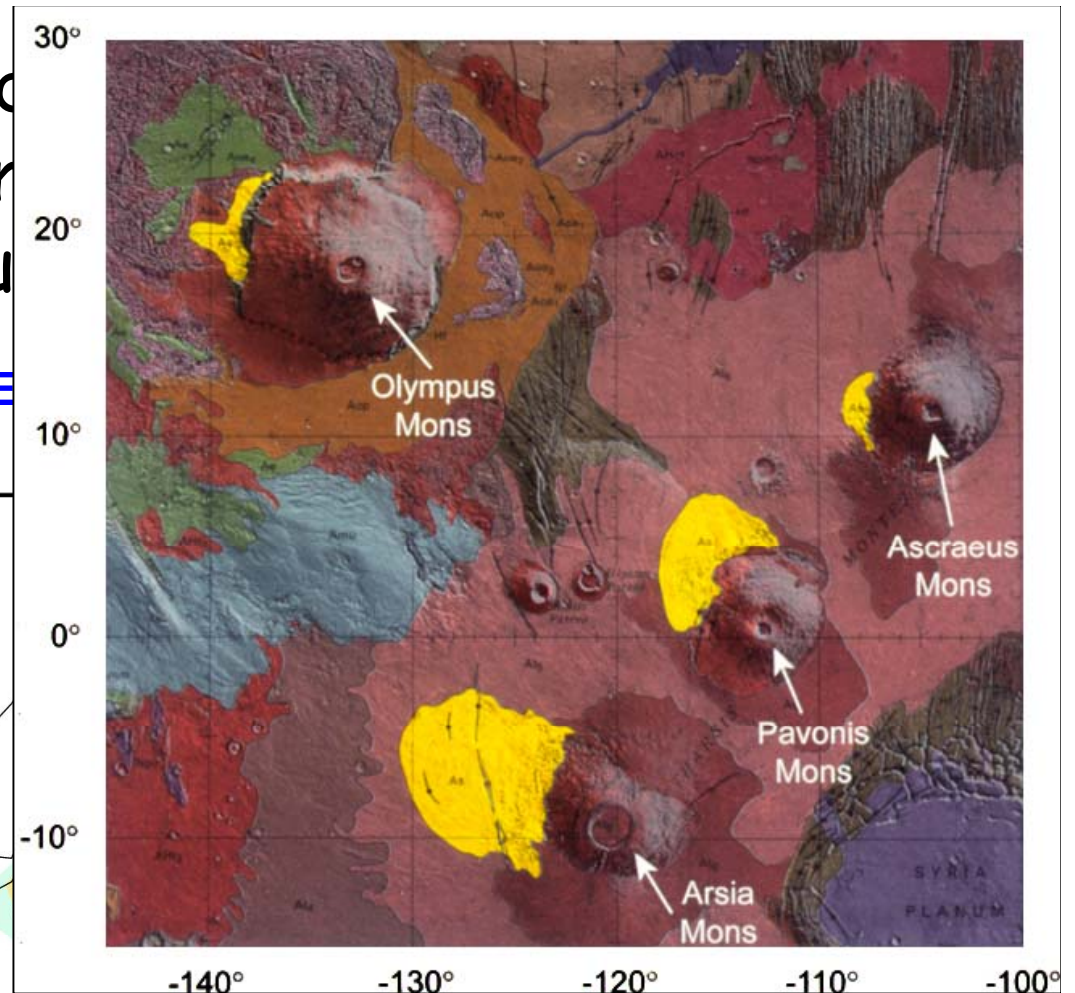
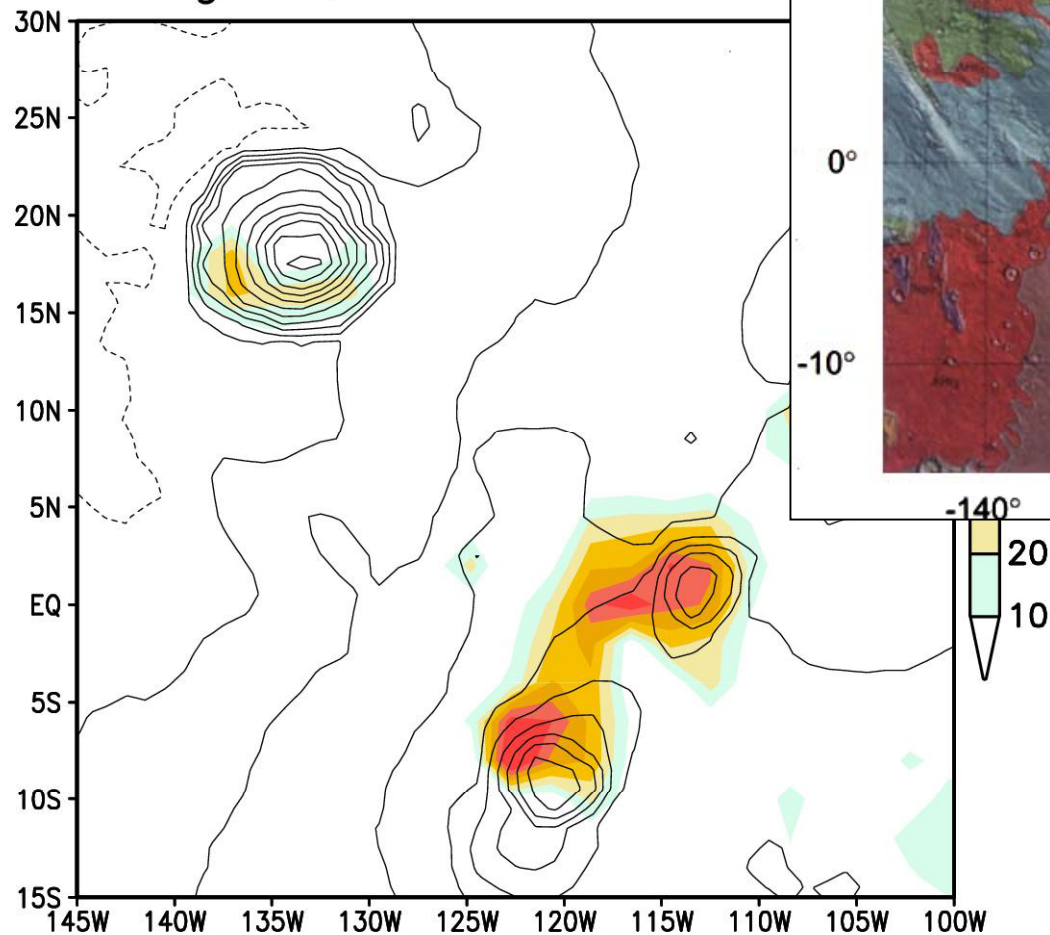
Forget et al. 2005 : Obliquité =  $45^\circ$  , Excentricité = 0, Opacité des poussières = 0.2



Dépôts et moraines  
Caractéristiques de  
glacier à base froide

# La formation d' taux de glace (r très hau

Forget et al. 2005 : Obliquité =  $45^\circ$  , E

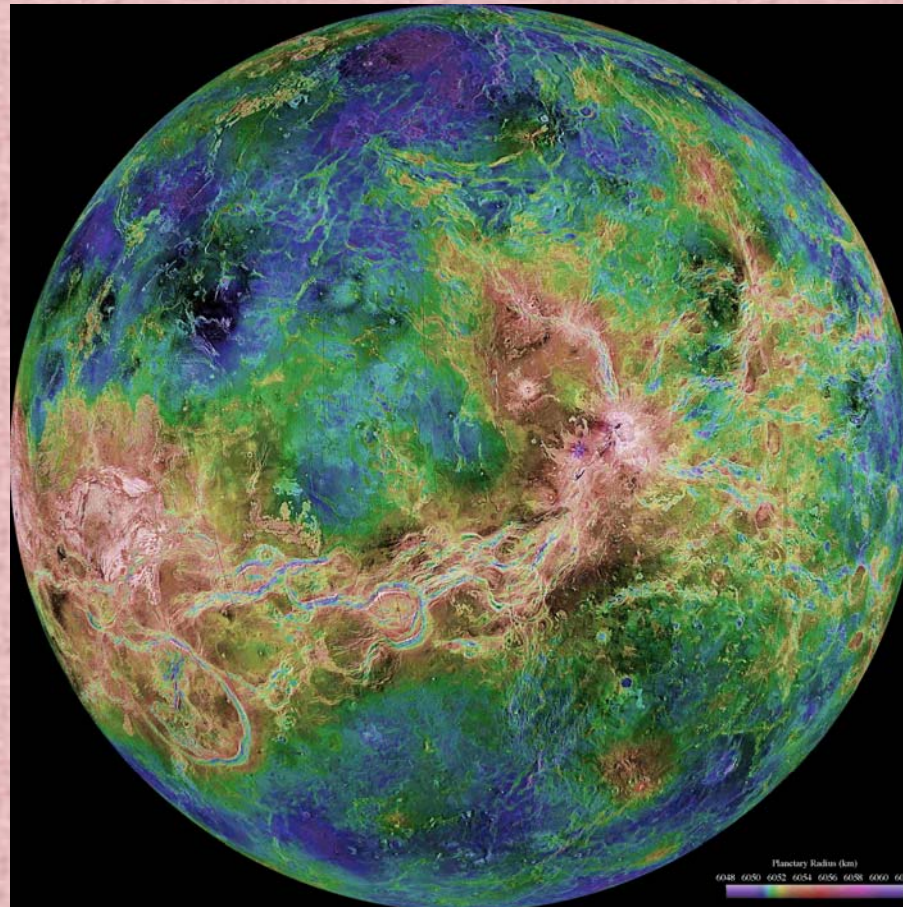


Dépôts et moraines  
Caractéristiques de  
glacier à base froide



# Vénus

**Température  
au sol:  
470°C**

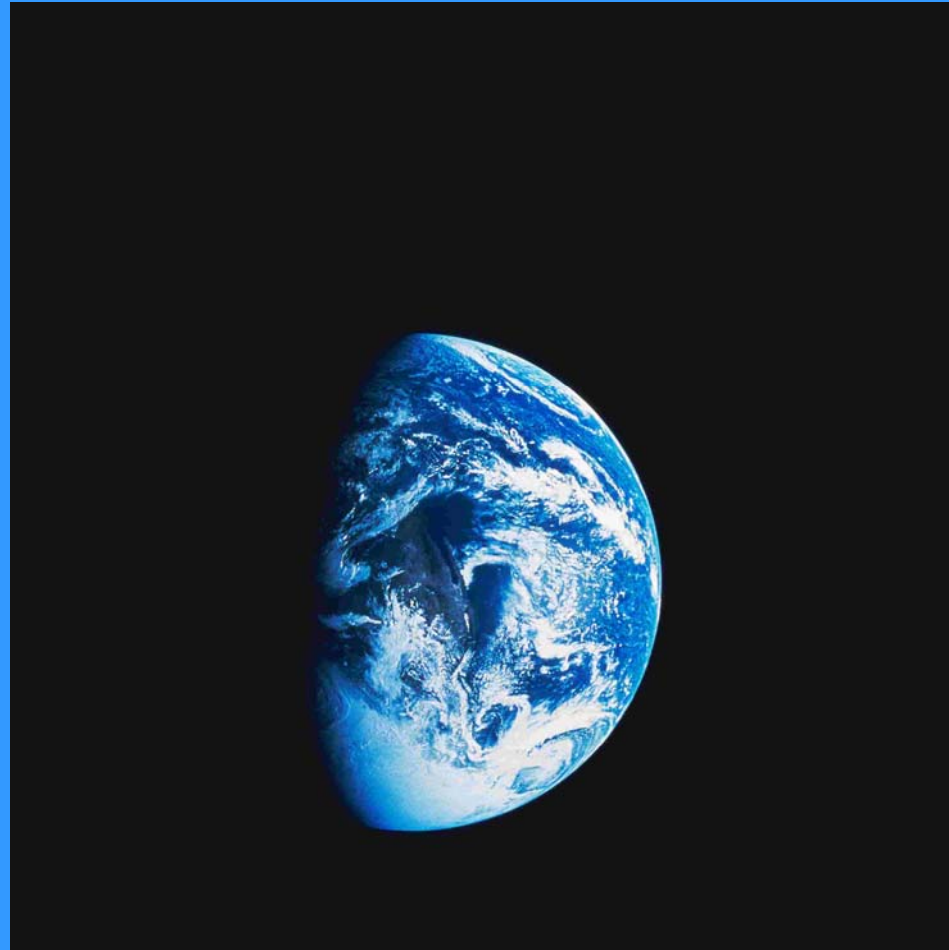


**Pression au sol:  
100 fois la  
pression  
atmosphérique  
terrestre**

# Terre

**Température  
au sol:**

**15°C**

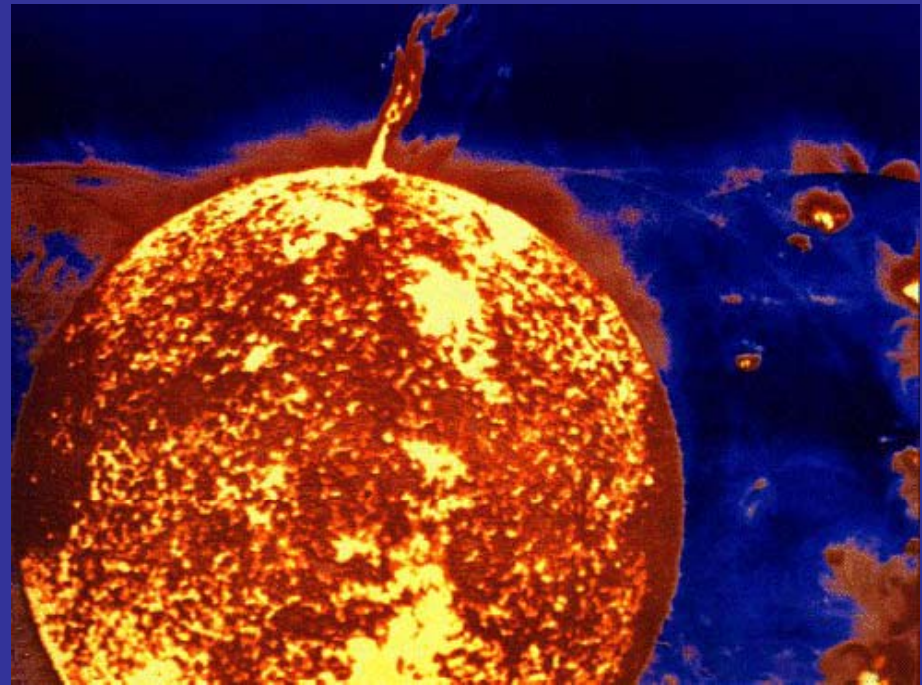
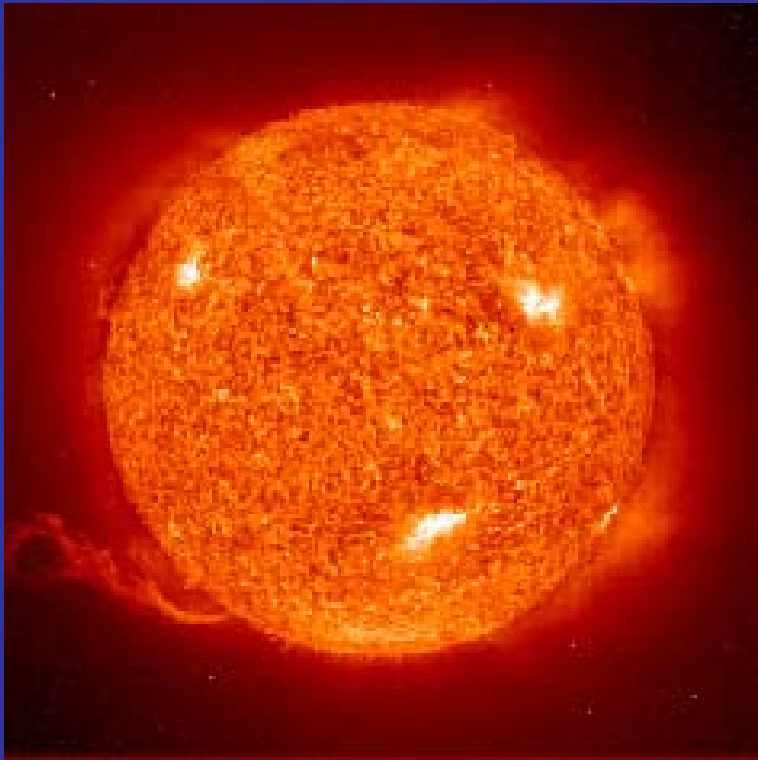


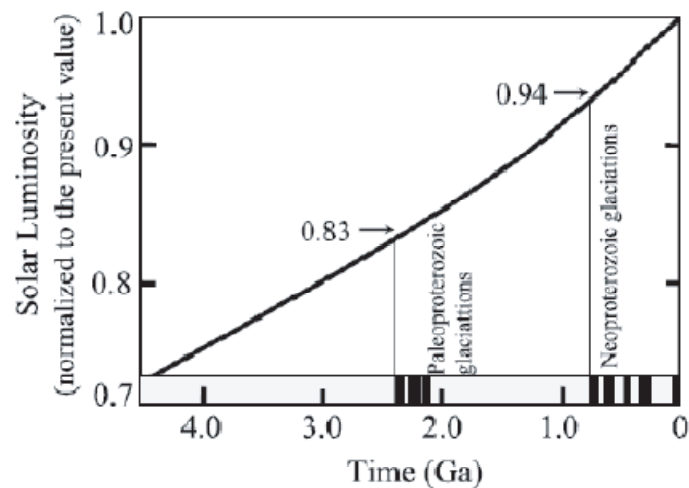
**Pression au sol:  
1013 mbar  
( 1 atm)**

# ***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),

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

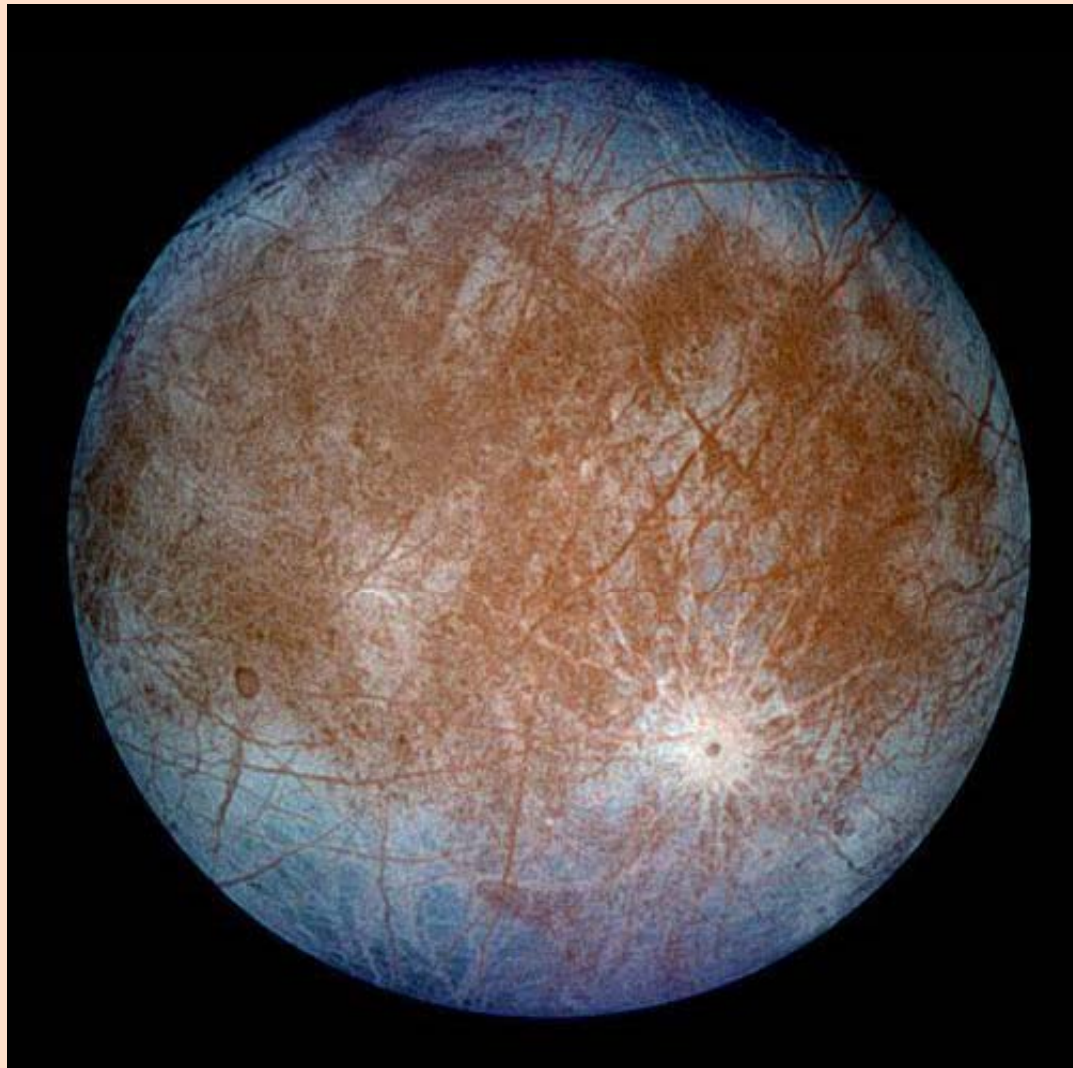
$S_0$  représente la constante solaire actuelle (1368 W/m<sup>2</sup>)

$t_0 = 4.6$  Ga, et  $t$  = temps (en Ga) avant l'époque présente.

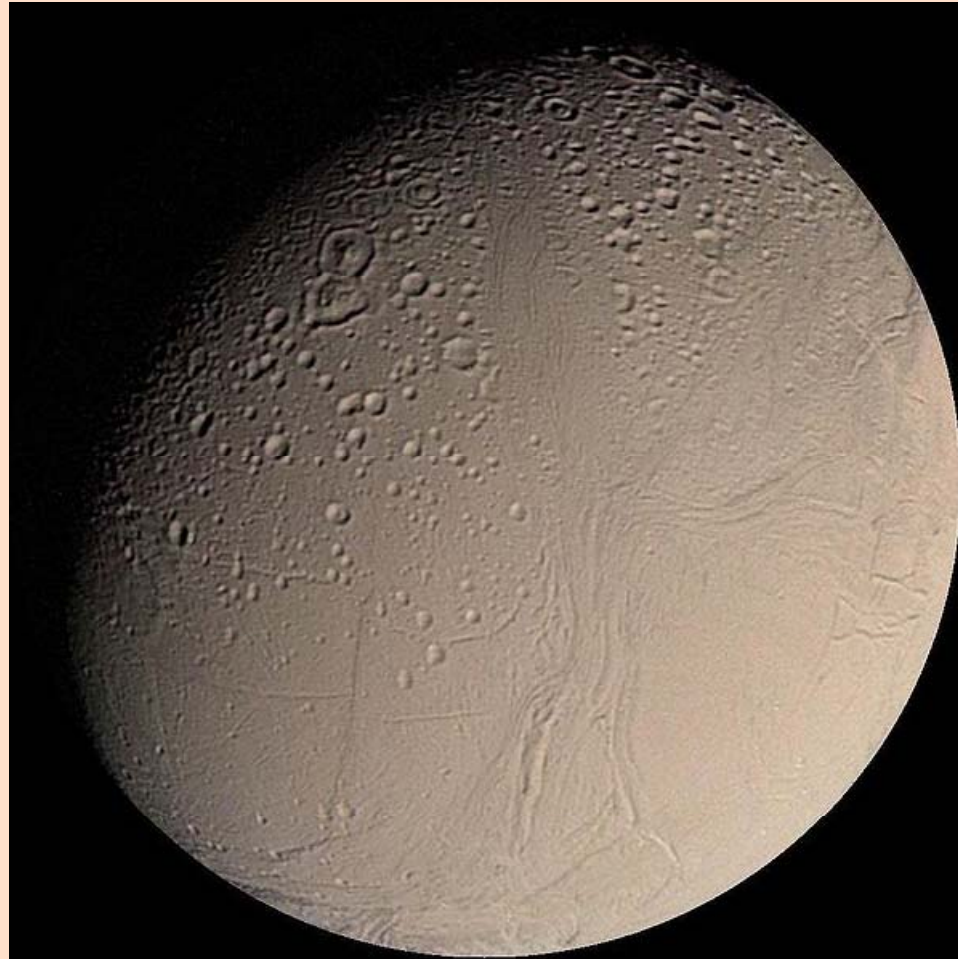
Il y a 0.7 Ga, notre Soleil était 6% moins intense qu'aujourd'hui  
constante solaire Néoprotérozoïque = 1286 W/m<sup>2</sup>



# **EUROPE**, *satellite gelé de Jupiter*



# **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.

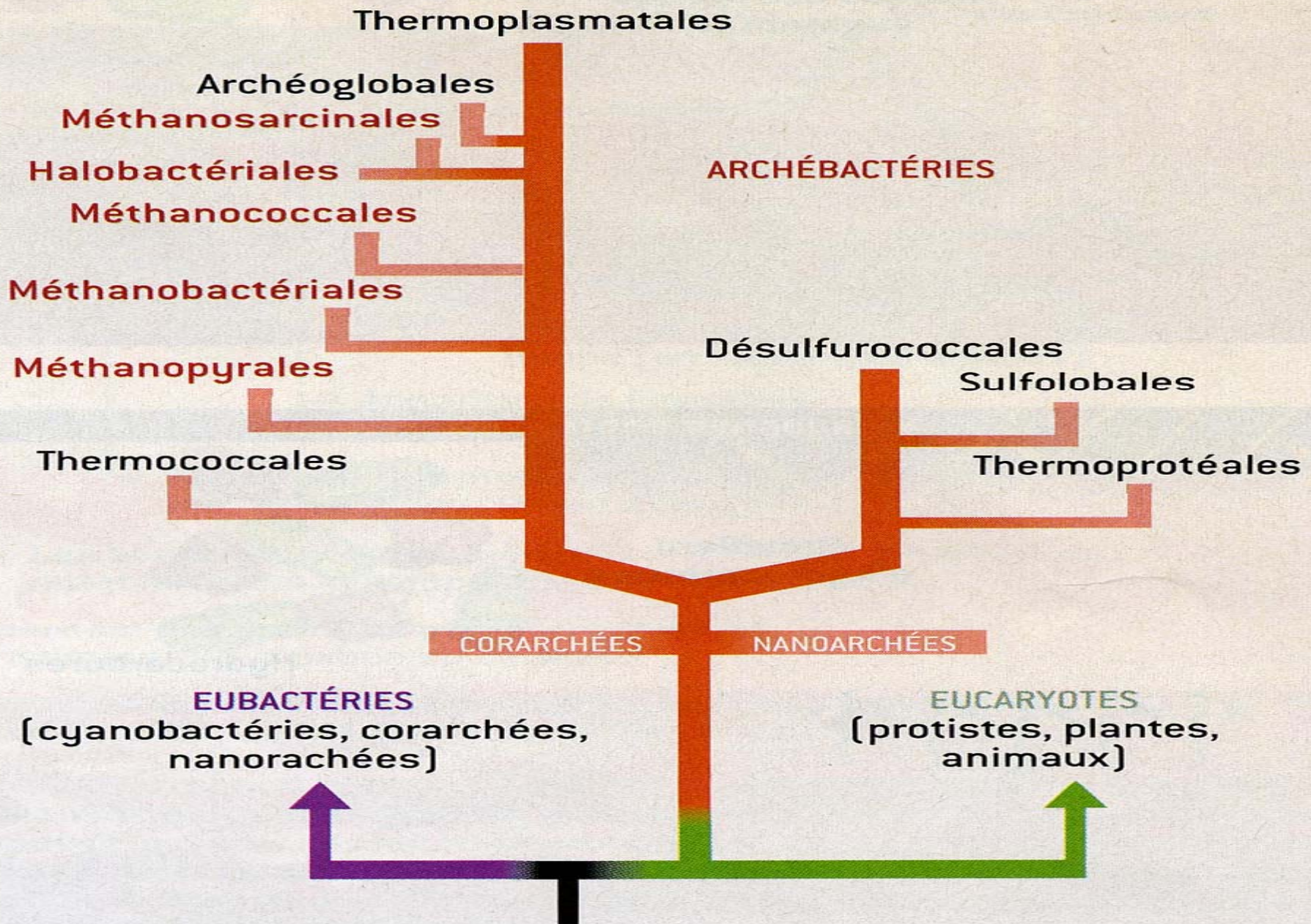
- Les gaz à effet de serre comme couverture chauffante. Mission, préserver la Terre d'une glaciation globale et irrémédiable ?
- Sagan 80's  $\text{NH}_4$  ammoniac
  - Peu présent dans une atmosphère dépourvue d'oxygène
- Un candidat dans le vent :  $\text{CO}_2$   
Quantité telle qu'il produirait de la sidérite ( $\text{FeC}$ ) dans les sols
  - Pas de sidérite dans les vieux cratons
- Le Méthane (organique) de façon prédominante et le  $\text{CO}_2$



- 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 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>
- Quel mécanisme régulateur?
- Archées méthanogènes/phénomènes de halo

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



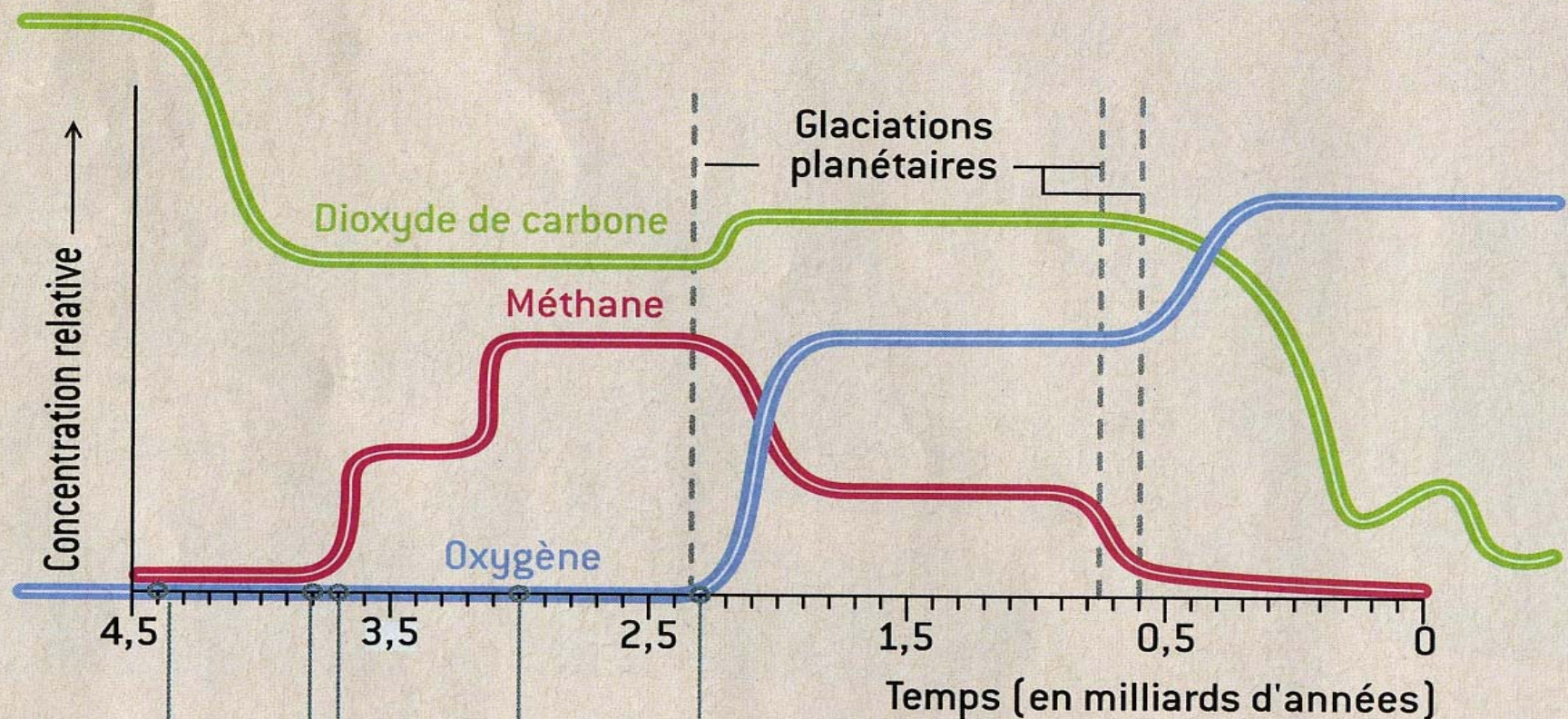


La position la plus probable des bactéries méthanogènes (en rouge) a été représentée sur cet arbre phylogénique comportant les archéobactéries, les eubactéries et les eucaryotes.

**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 CO<sub>2</sub>  
(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 Paléoproterozoïque**
  - Effondrement par oxydation du Méthane
- **Glaciation Néoproterozoïque**
  - Eclatement Est Ouest d'un Supercontinent
  - Enfouissement massif de CO<sub>2</sub>

*UNE TERRE  
TOTALEMENT  
GELEE,*



*EST-CE  
POSSIBLE?*

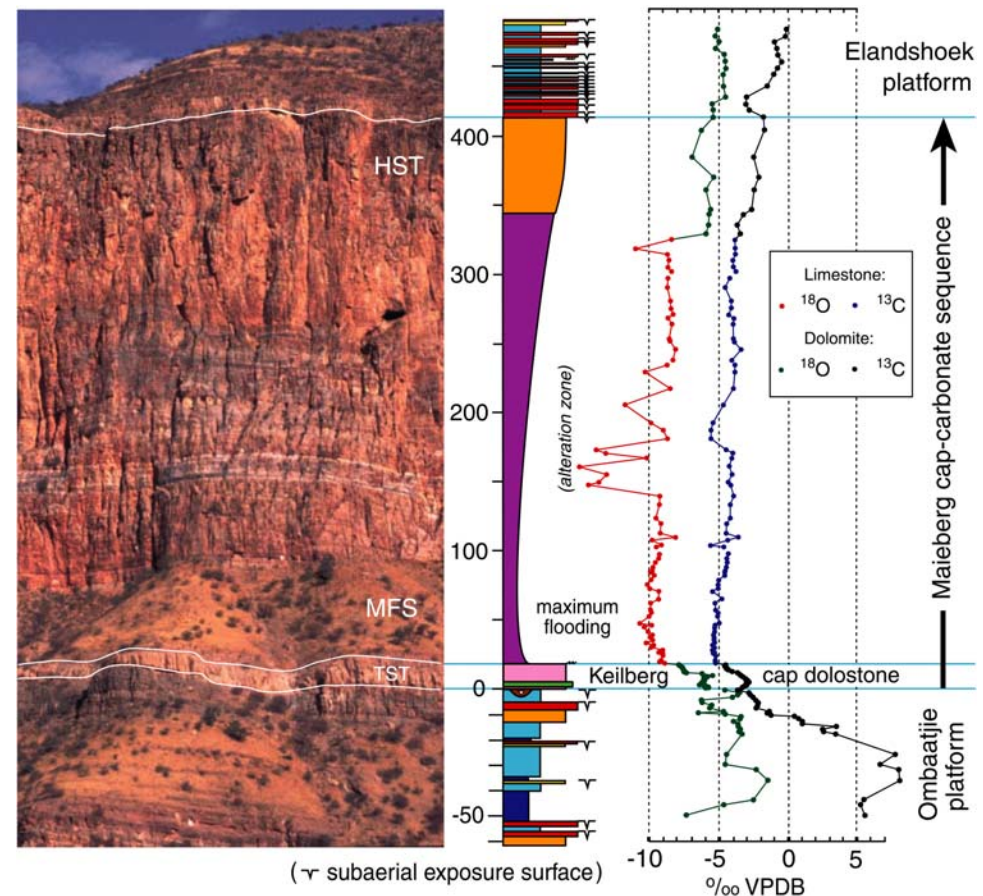
## Nature particulière des sédiments associés aux glaciations néoprotérozoïques



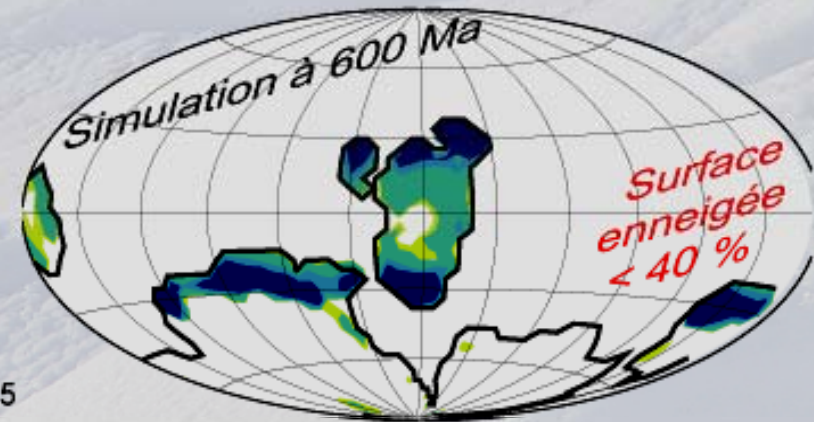
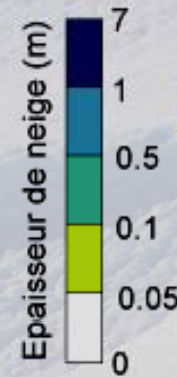
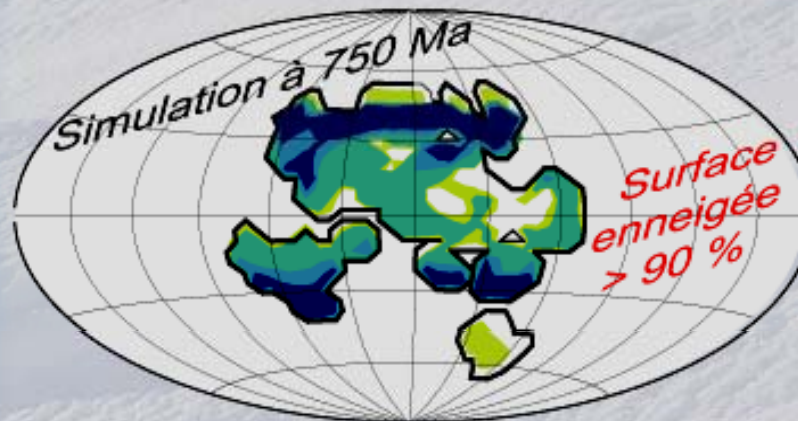
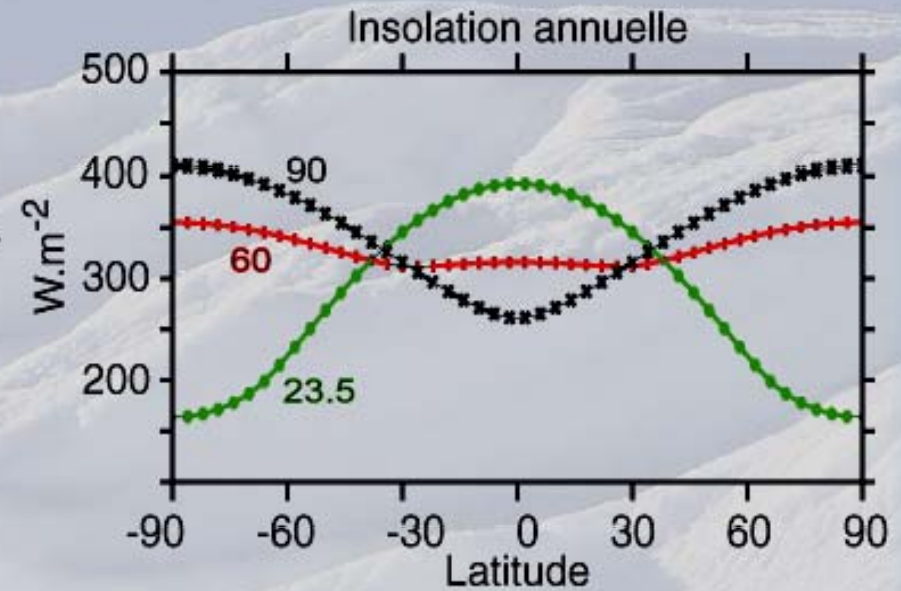
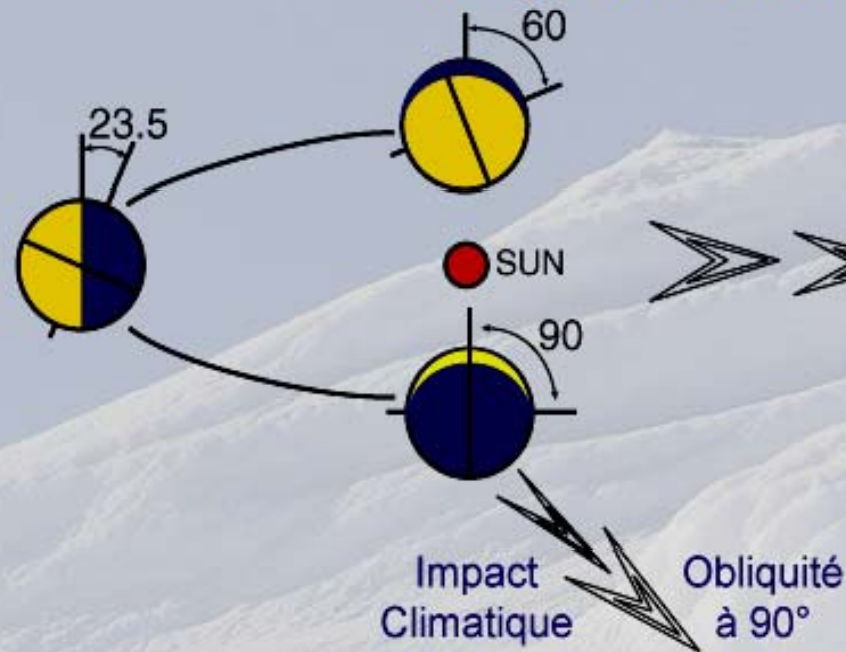
>> Formation de fer rubané

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

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



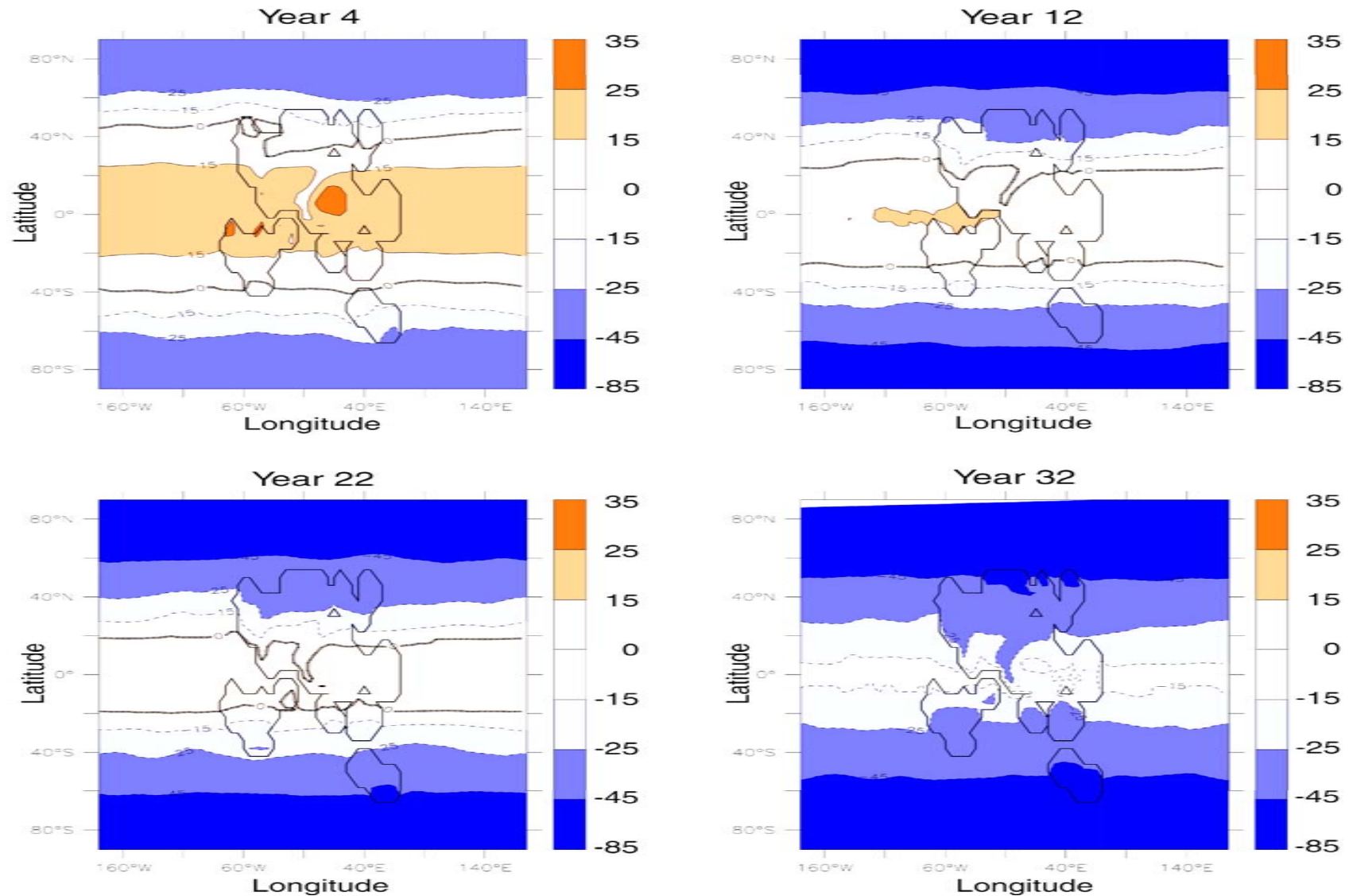
# Une obliquité plus forte pour une jeune Terre peut-elle expliquer les glaciations du Néoprotérozoïque ? \*

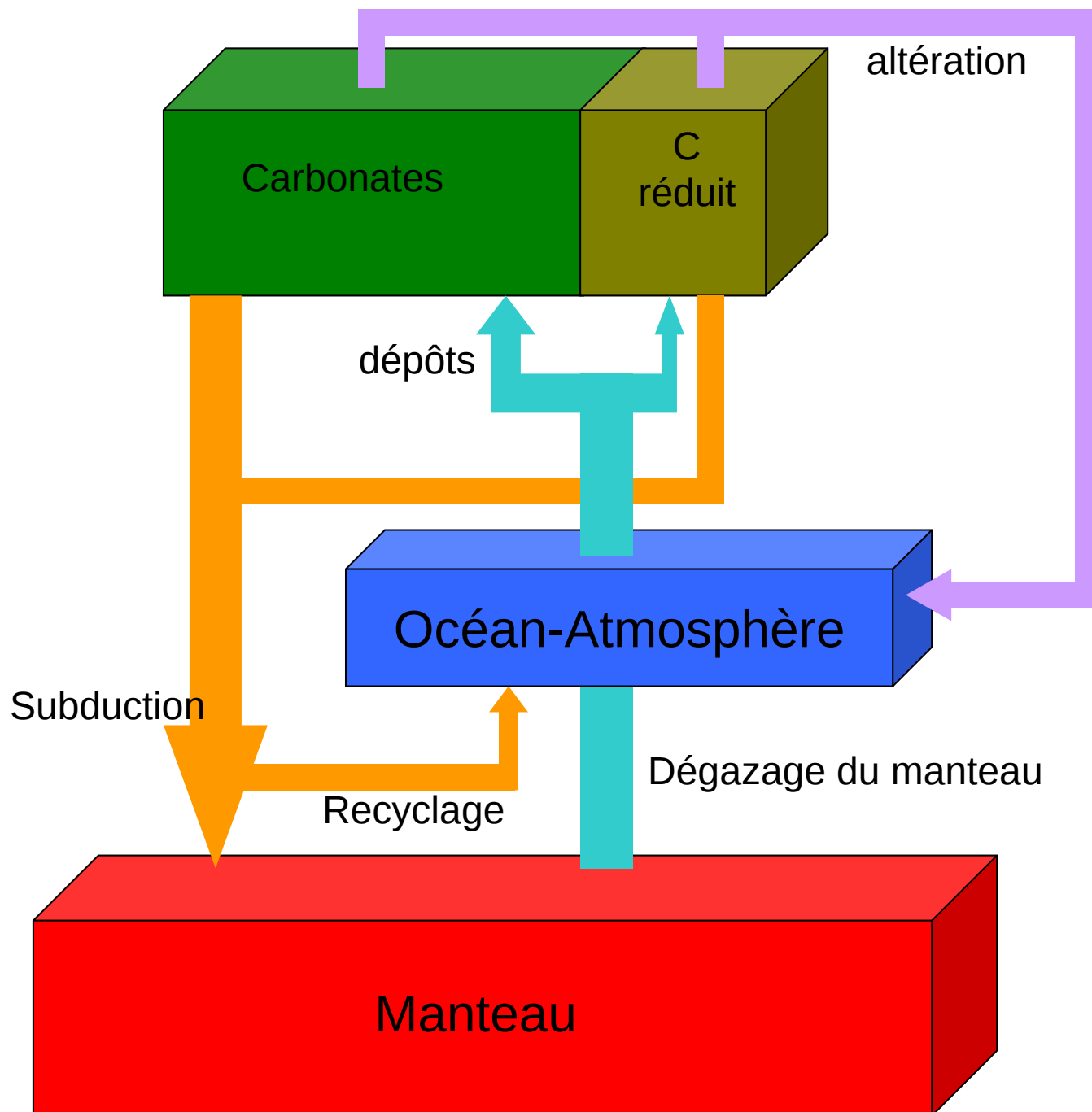


\* Donnadieu et al., GRL, 2002



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





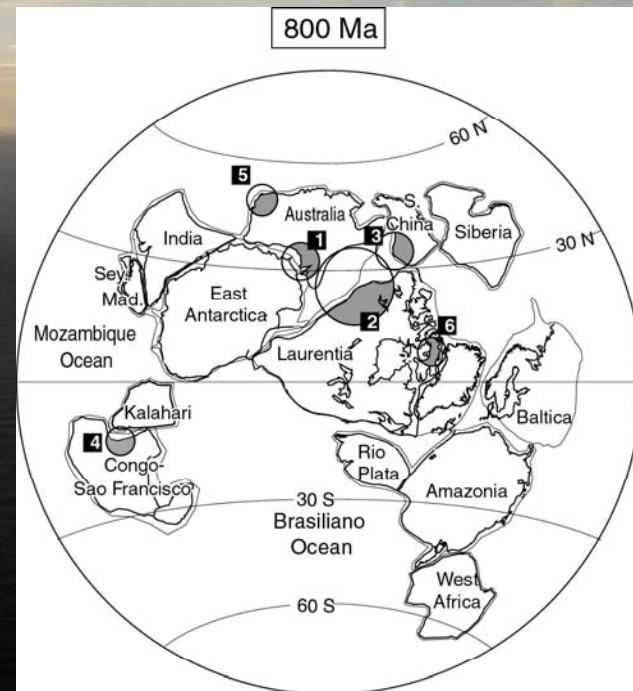
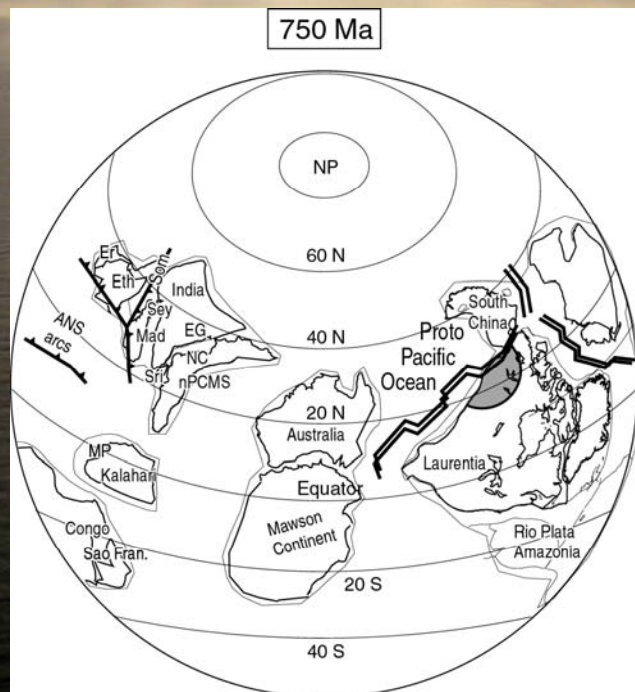
Cycle du carbone

# Mécanismes de refroidissement global à long terme:

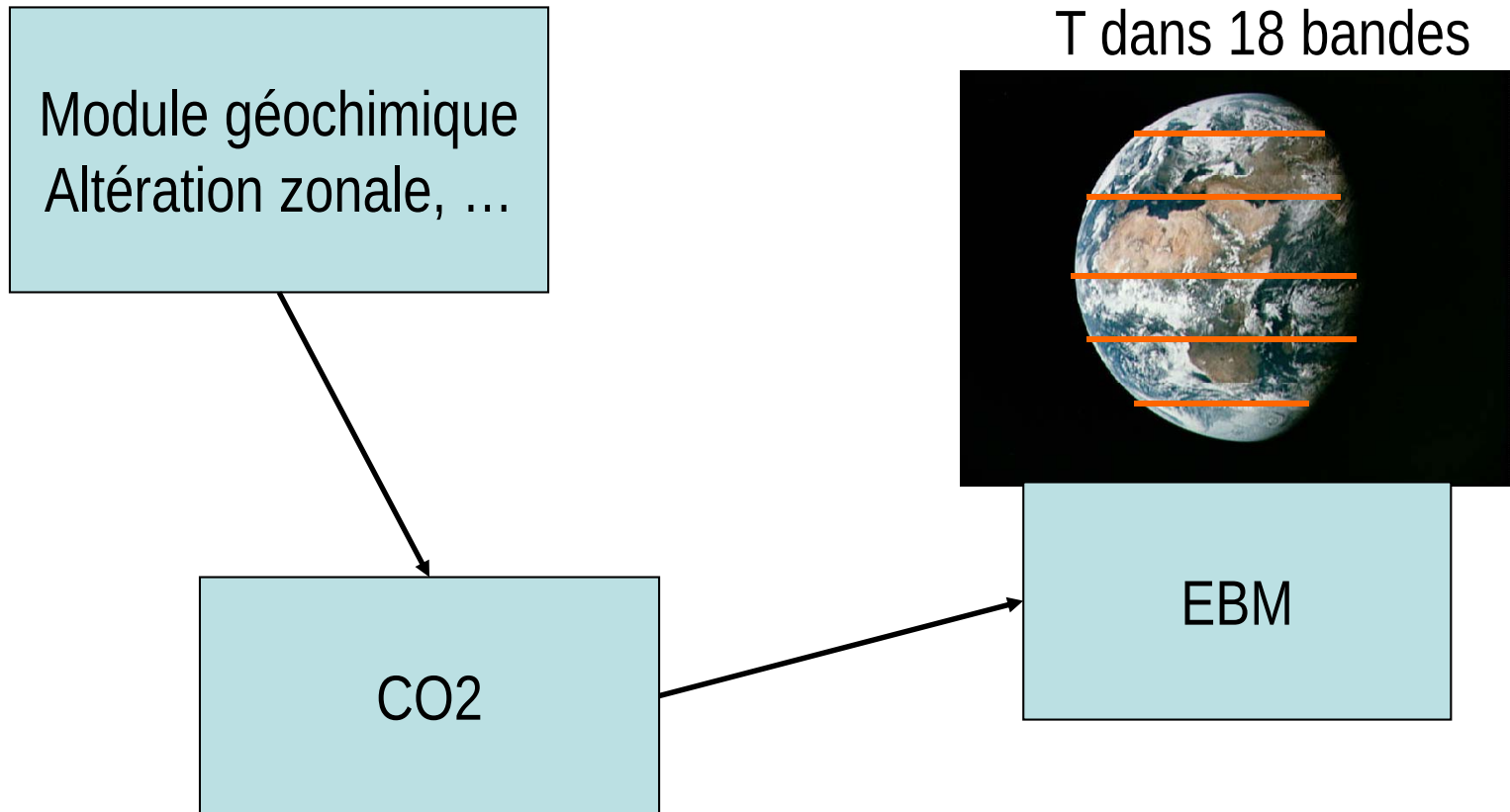
1 – Apparition de traps successives

2 – Position à basses et moyennes latitudes des continents

3 - Fragmentation du supercontinent Rodinia



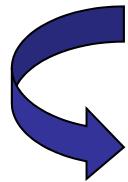
Connection climat-CO<sub>2</sub> dans les modèles géochimiques:  
Utilisation du modèle Géochimie-Climat COMBINE pour tester  
L'impact du trap Laurentien





## Les premiers résultats ...

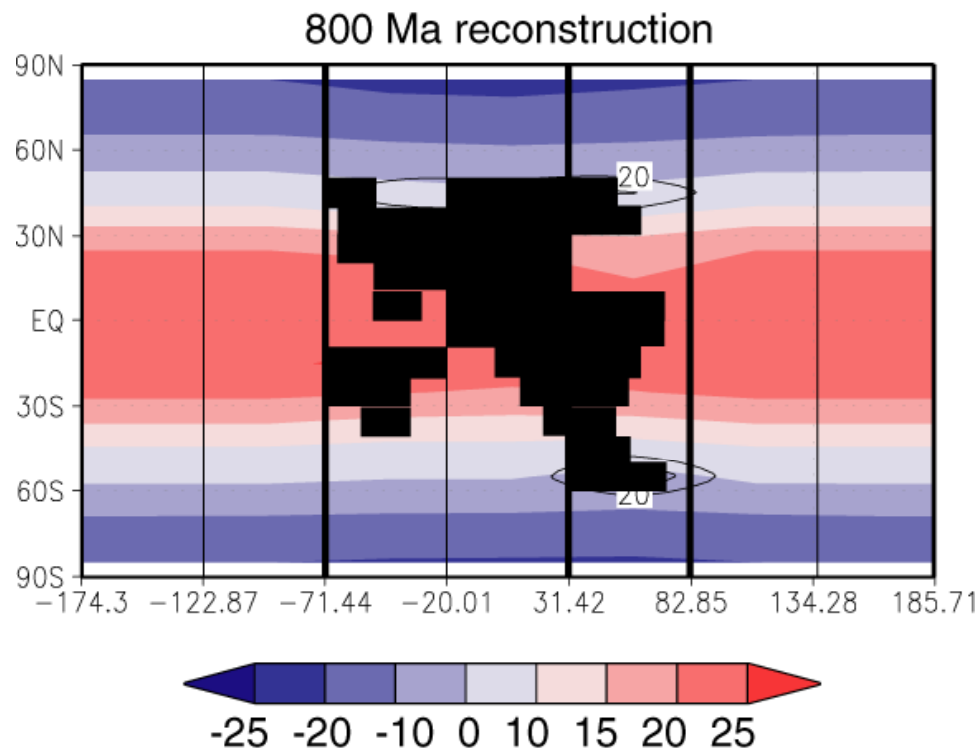
1 - A 800 Ma



Le modèle s'équilibre  
à un  $p\text{CO}_2$  d'environ  
1800 ppm



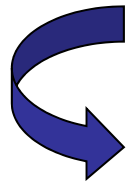
Soit une température  
globale moyenne de  
10.2 °C



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



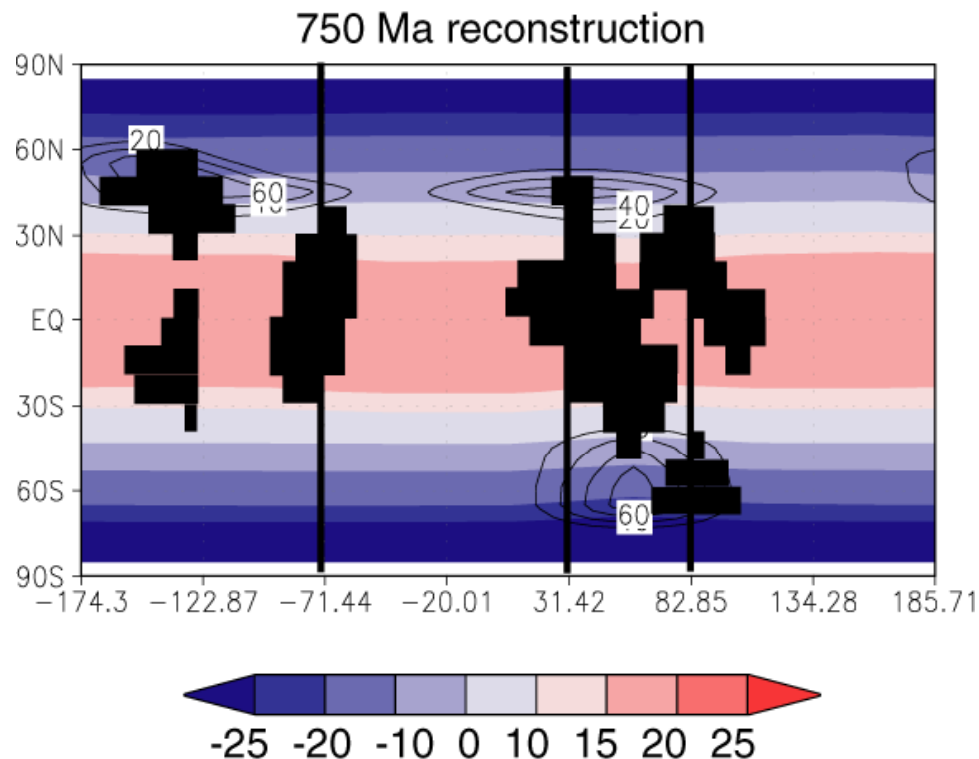
Le modèle s'équilibre  
à un  $p\text{CO}_2$  d'environ  
500 ppm

Réduction de 1300  
ppm



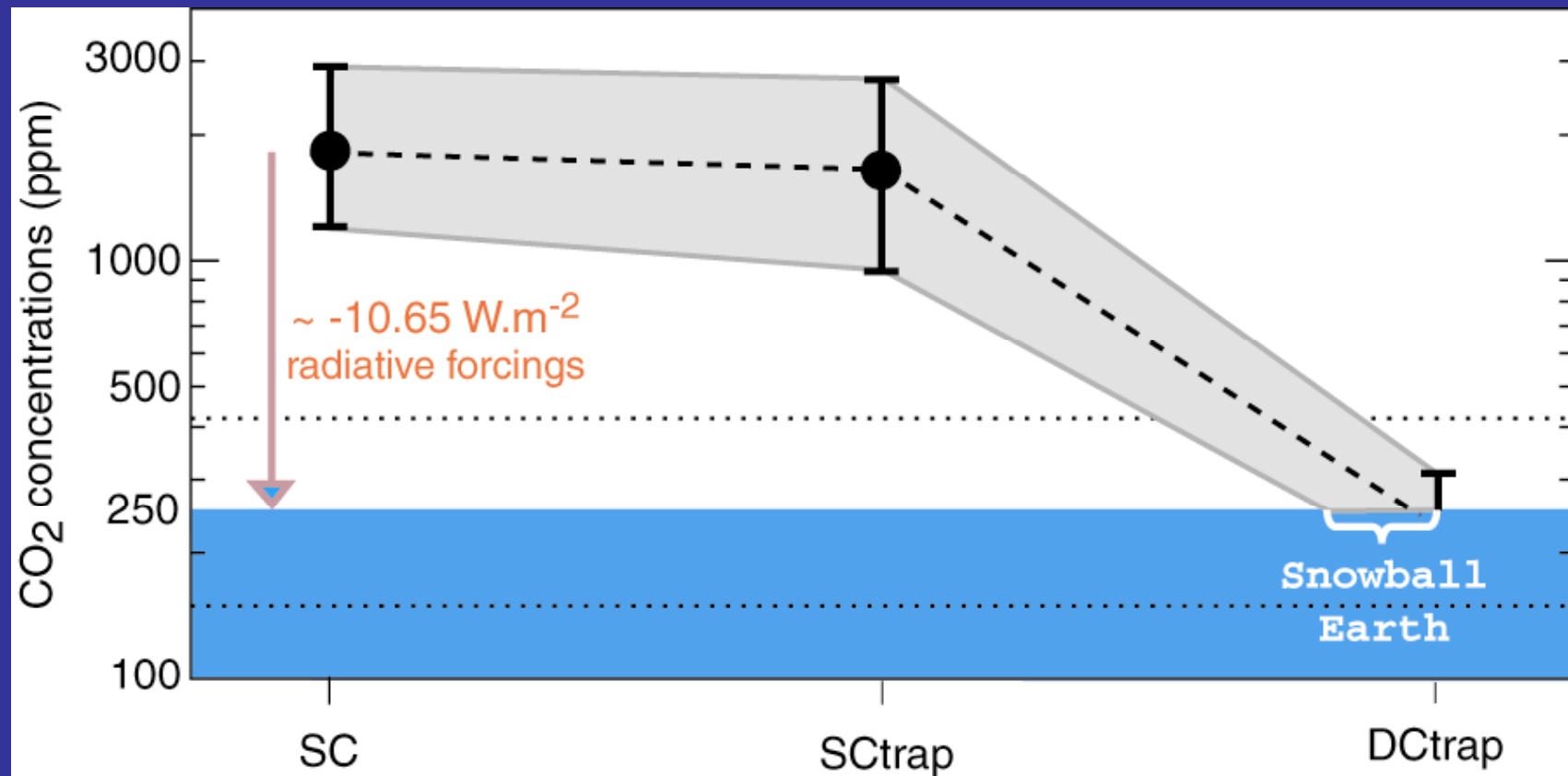
Soit une température  
globale moyenne de  
 $2^\circ\text{C}$

Réduction de  $8.2^\circ\text{C}$

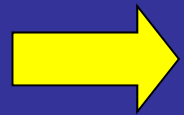


Une configuration où  
les continents sont  
plus petits et plus  
dispersés apparaît  
très favorable au  
déclenchement d'une  
glaciation importante

## Impact on the $CO_2$



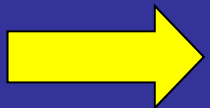
## Sortir de là...



### **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 CO<sub>2</sub>



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

**Très rapidement, l'atmosphère va se « vider » de son CO<sub>2</sub> lorsque le cycle du carbone va se remettre en route**

**Très chaud  pluies diluviennes  altération  érosion**

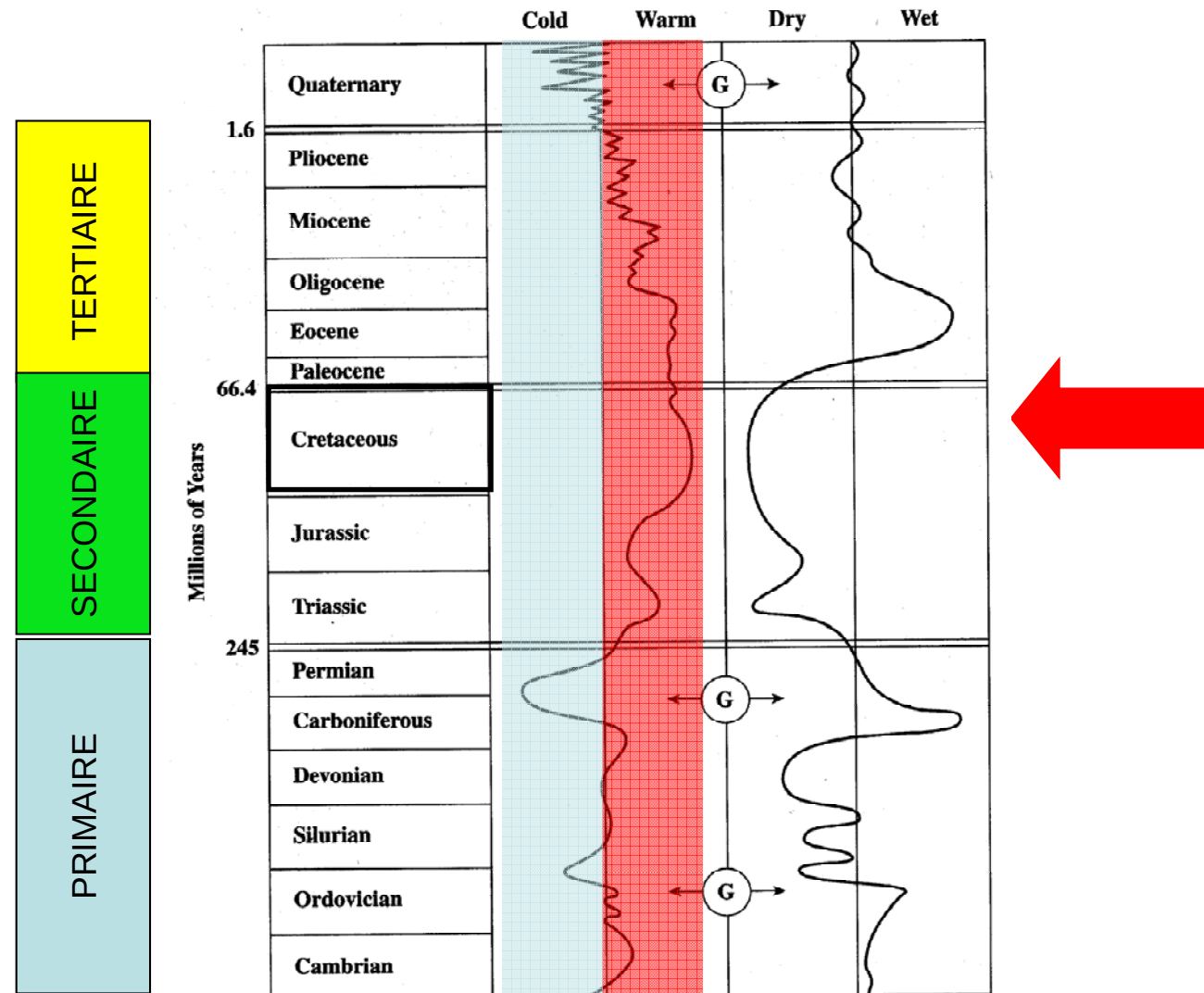
** Enfouissement d'une quantité énorme de CO<sub>2</sub> dans les océans**

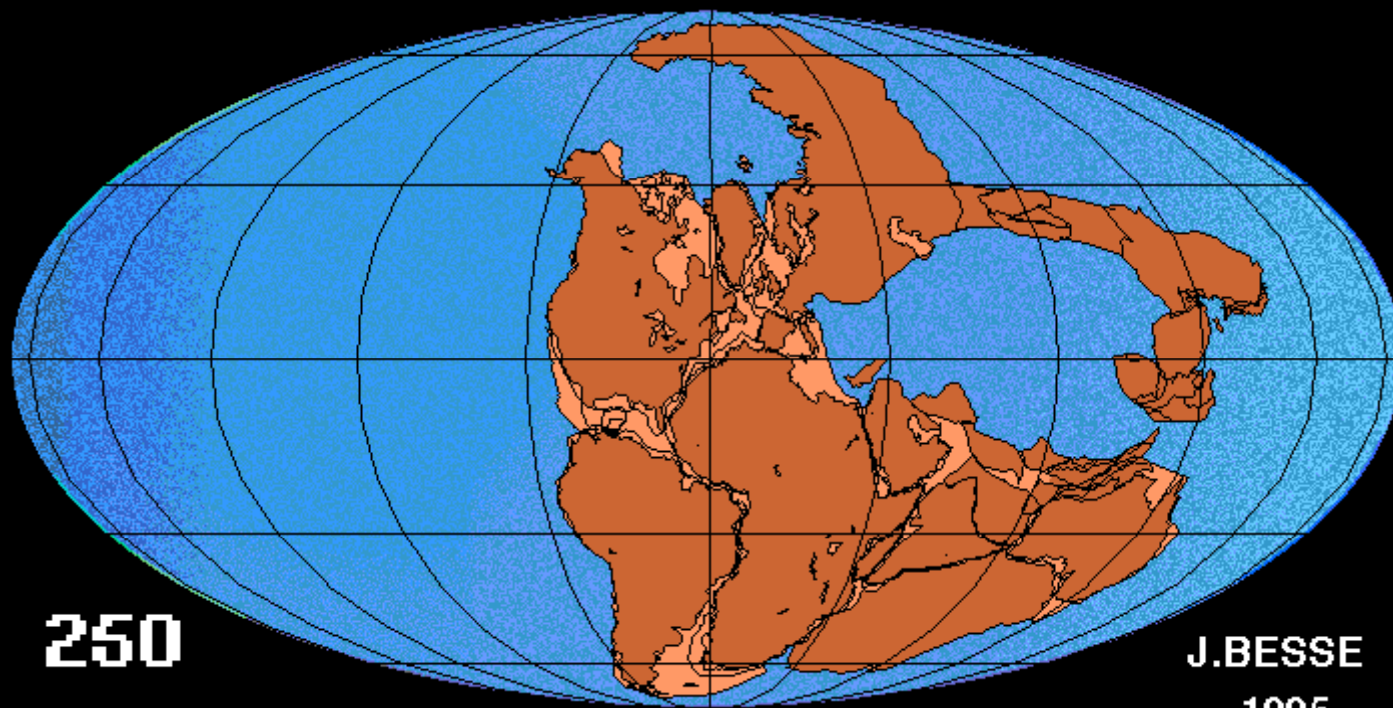
**Quelle variation du Ph et de l'alcalinité ?**

**Quel impact sur la vie dans les océans ?**

**Calcification etc...**

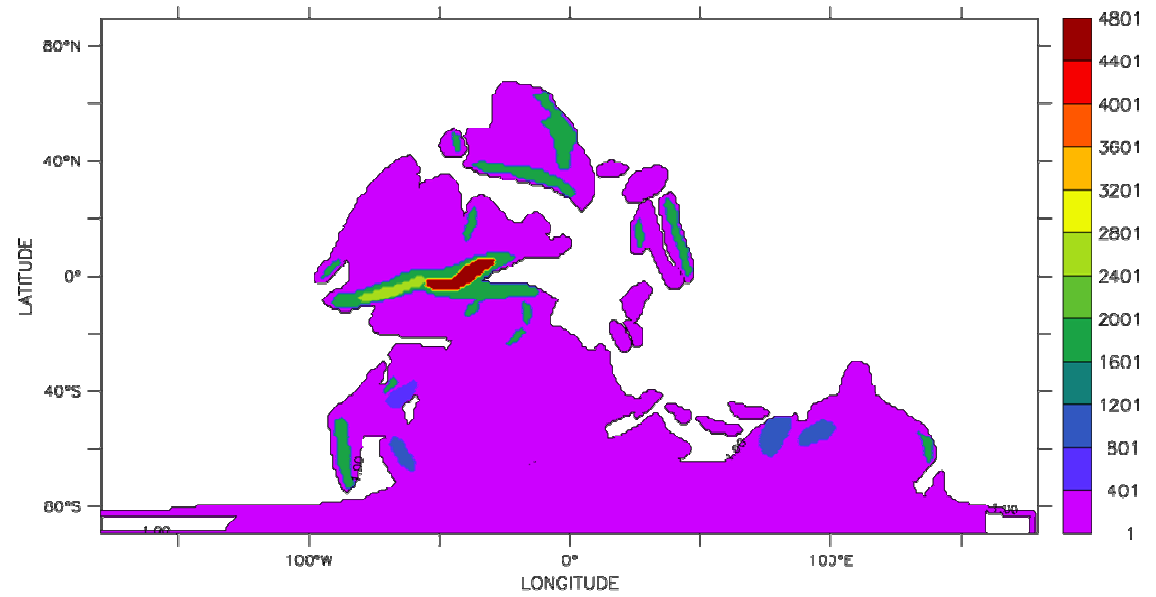
***Les périodes climatiques chaudes représentent  
75% des 540 derniers millions d'années***



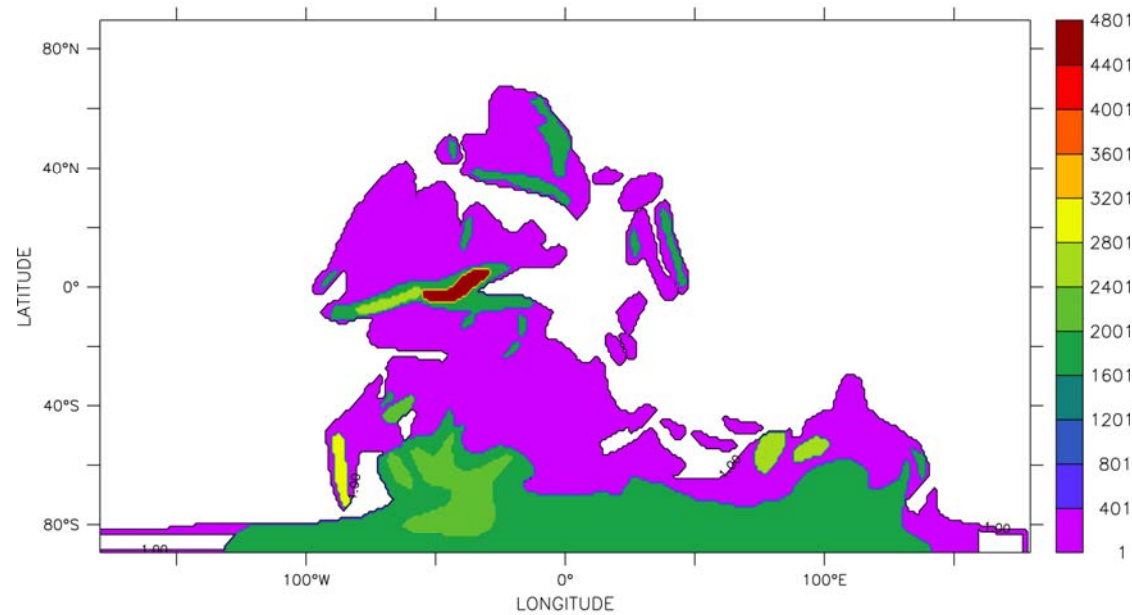


250

J.BESSE  
1995

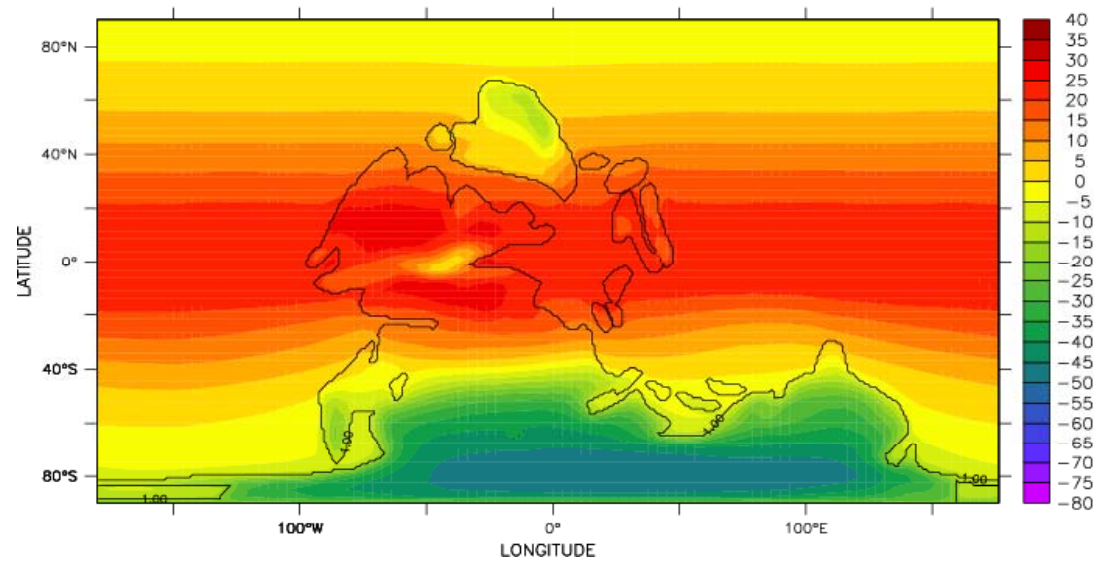


Relief (m) au Permo-Carbonifère de la simulation sans calotte de glace

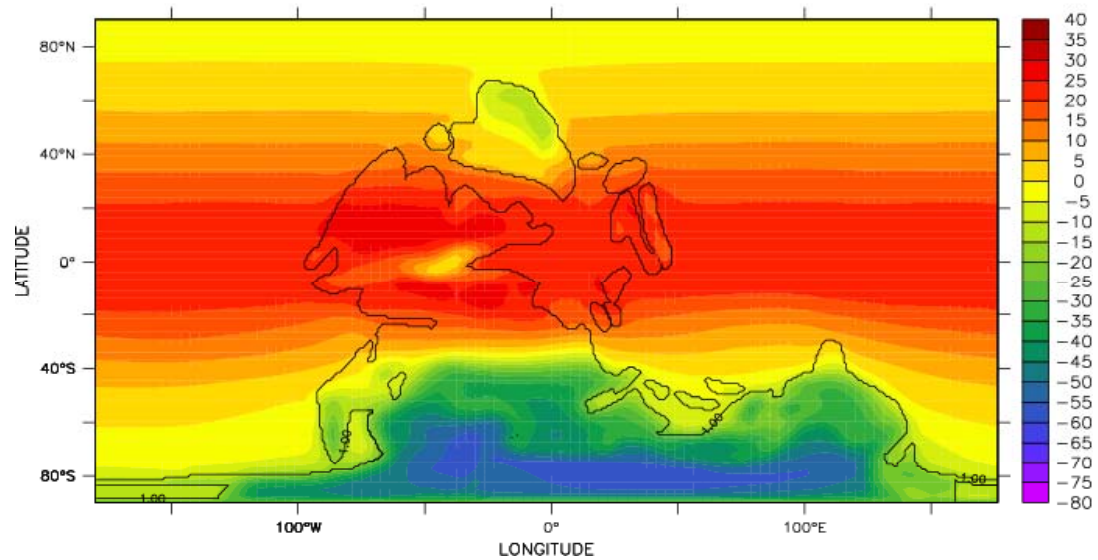


Relief (m) au Permo-Carbonifère de la simulation avec calotte de glace

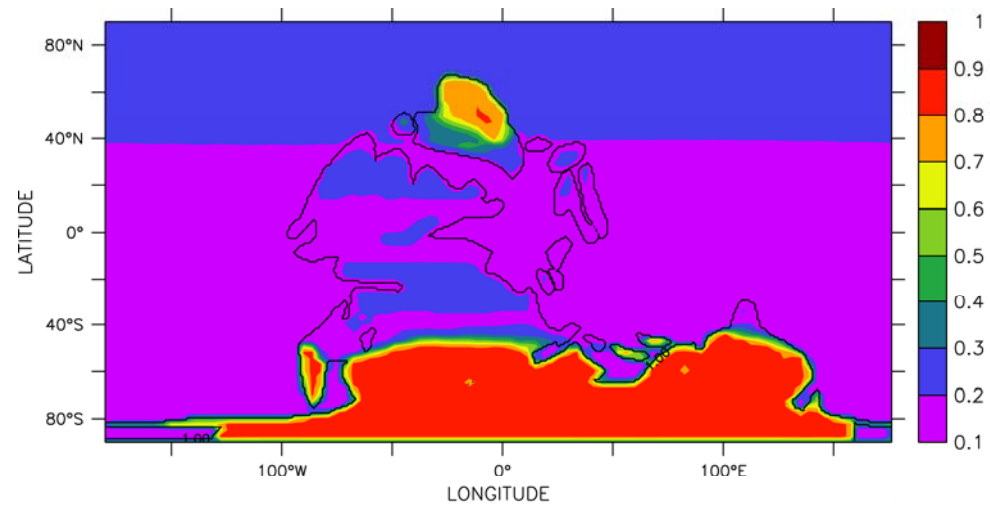




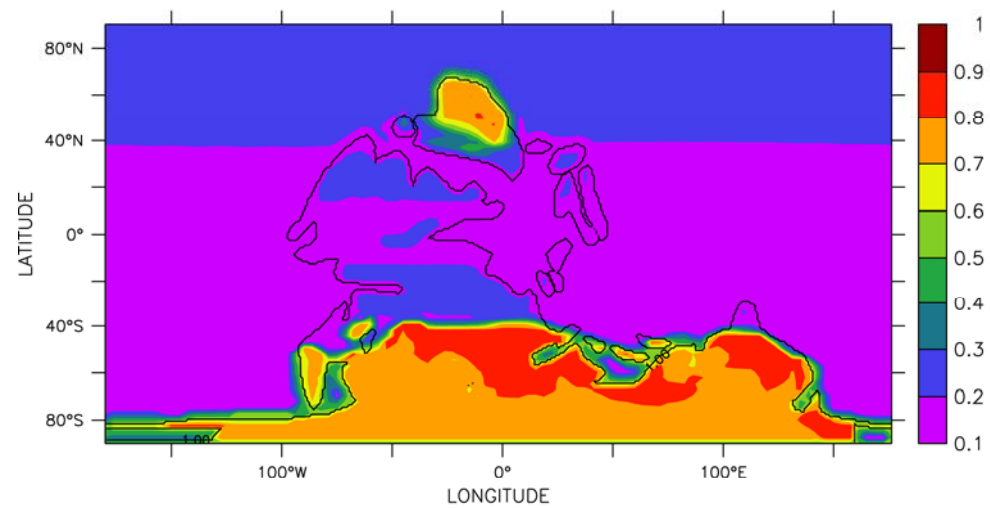
Températures annuelles (°C) de la simulation sans calotte de glace



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



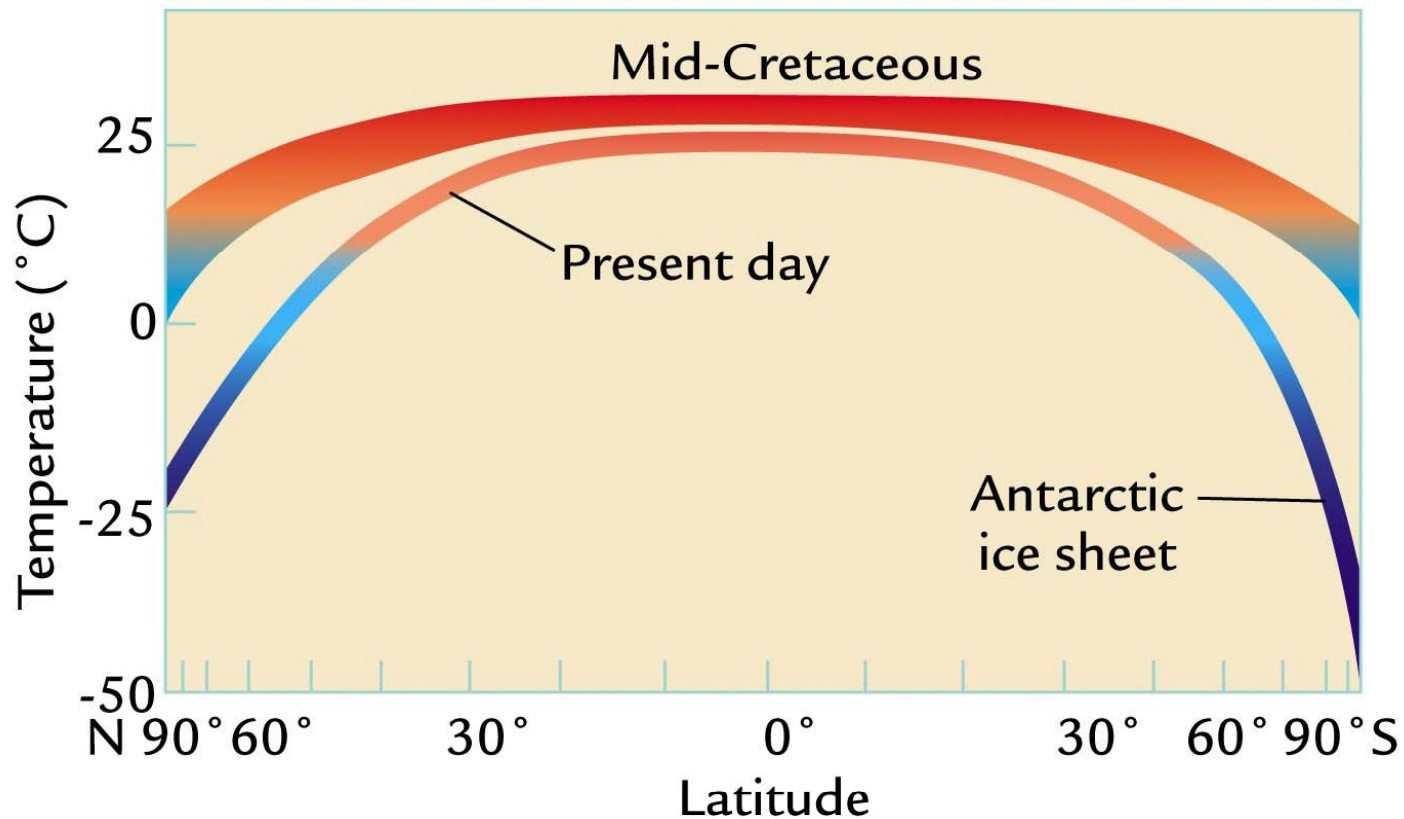
**Dinosaures sur l'île d'Axel Heiberg (72°N)**



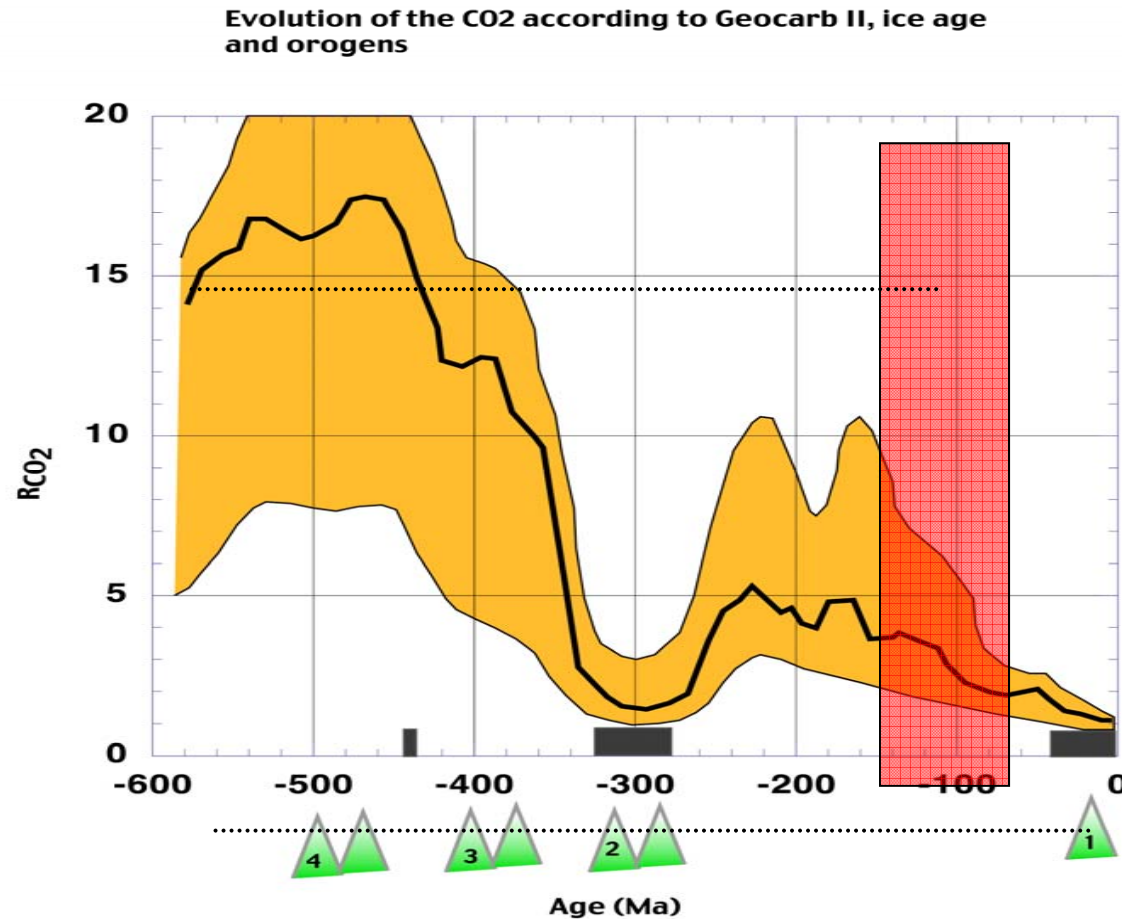
**Feuille fossile découvert dans  
la région Arctique Canadienne**

⇒ 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 (CO<sub>2</sub>) à l'échelle des temps géologiques



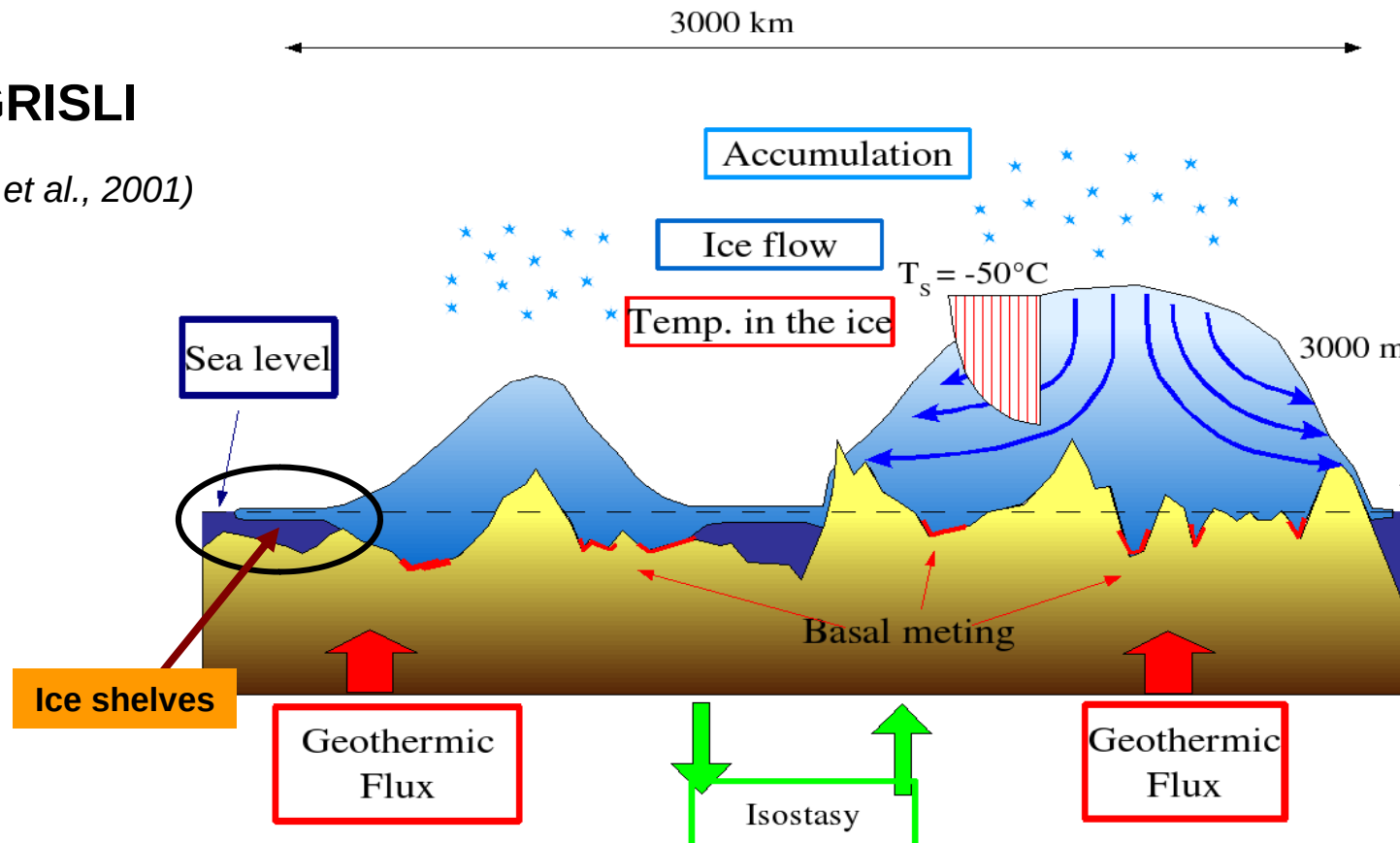


# The coupled CLIMBER-GRISLI model

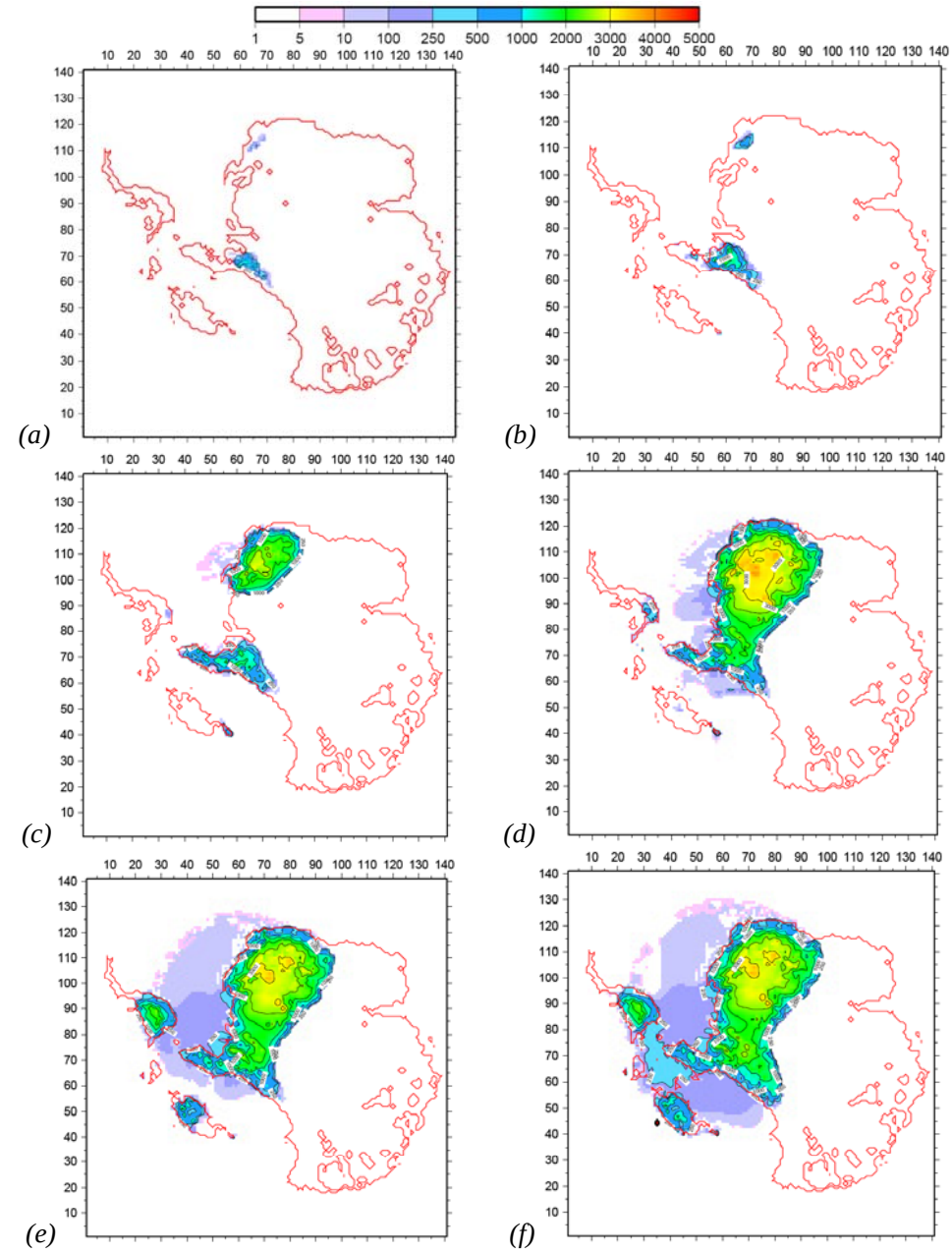
A climate model of intermediate complexity (CLIMBER 2.3) coupled with a 3D thermo-mechanical ISM for the SH (GRISLI)

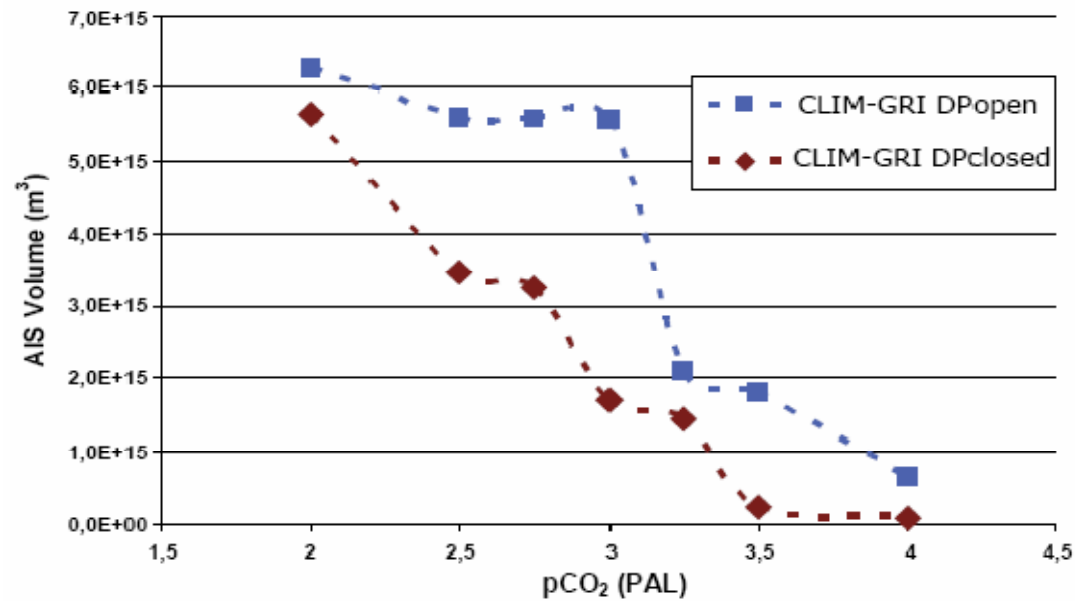
## GRISLI

(Ritz et al., 2001)



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



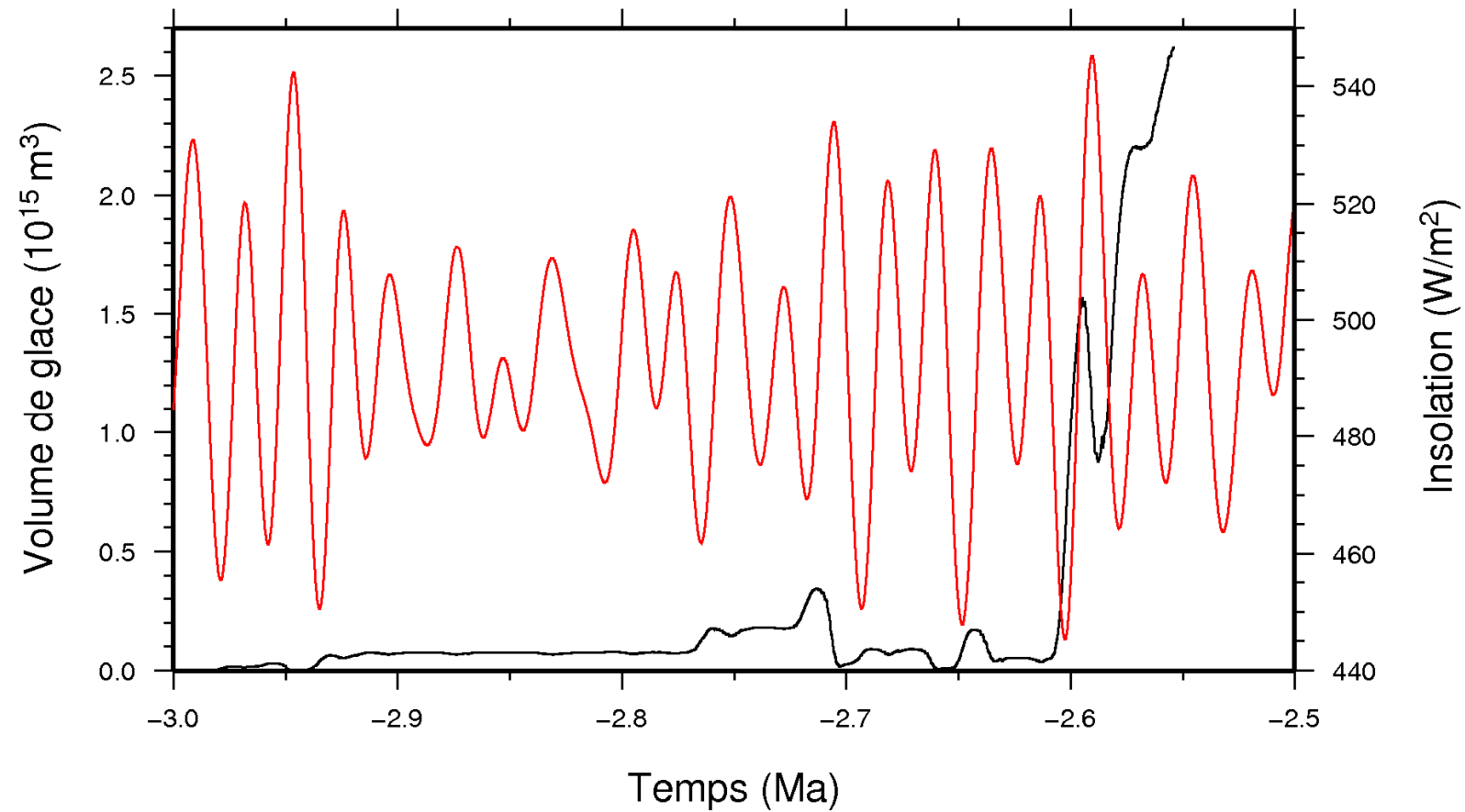


**AIS volume vs pCO<sub>2</sub>. The red curve refers to the coupled CLIMBER-GRISLI experiments performed with closed DP, whereas the blue curve refers to the open DP simulations. The AIS volume is expressed in [m<sup>3</sup>], the pCO<sub>2</sub> in PAL (1 PAL equals to 280 ppm).**

# Simulation de l'englacement du Groenland

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

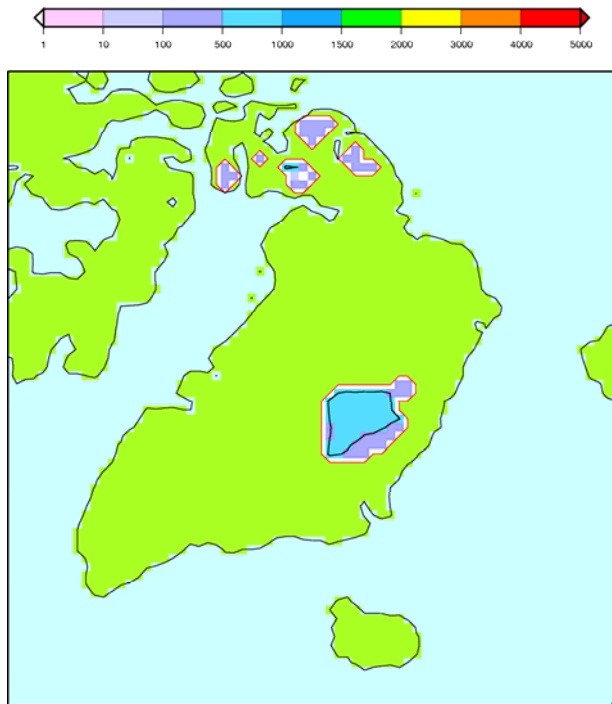
## Volume de glace du Groenland et Insolation entre 3Ma et 2.5 Ma



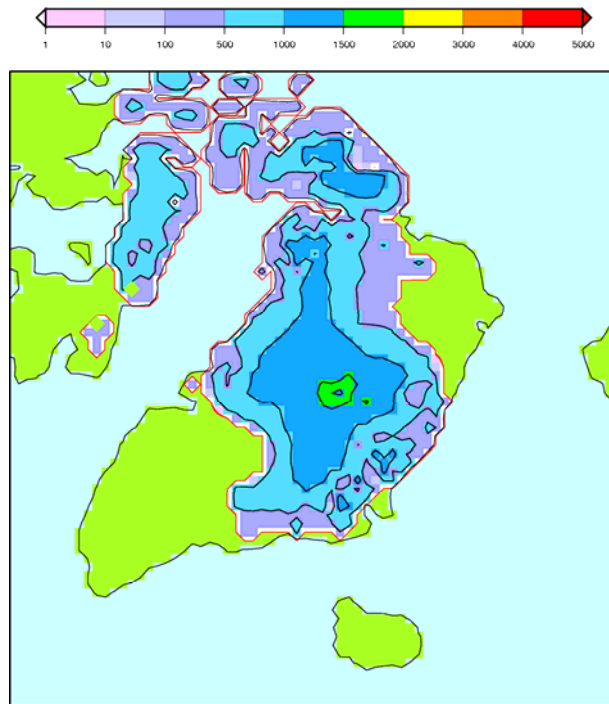


# Epaisseur de glace

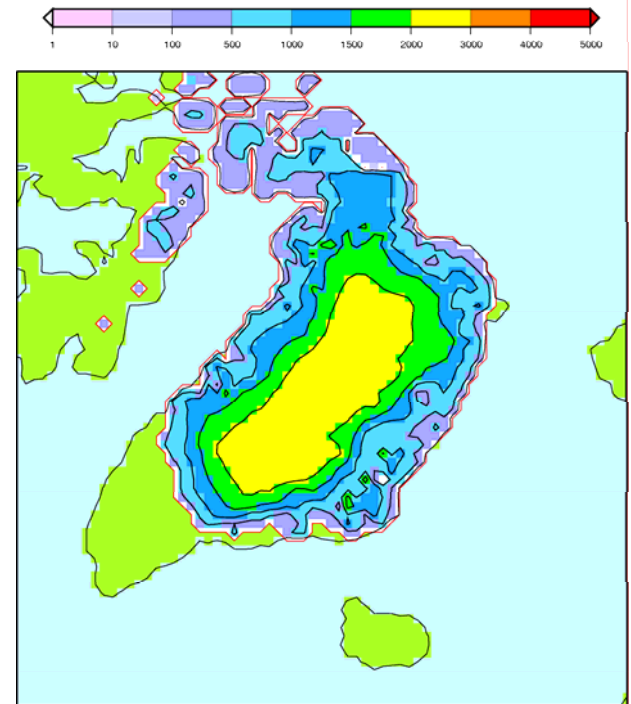
2.8 Ma



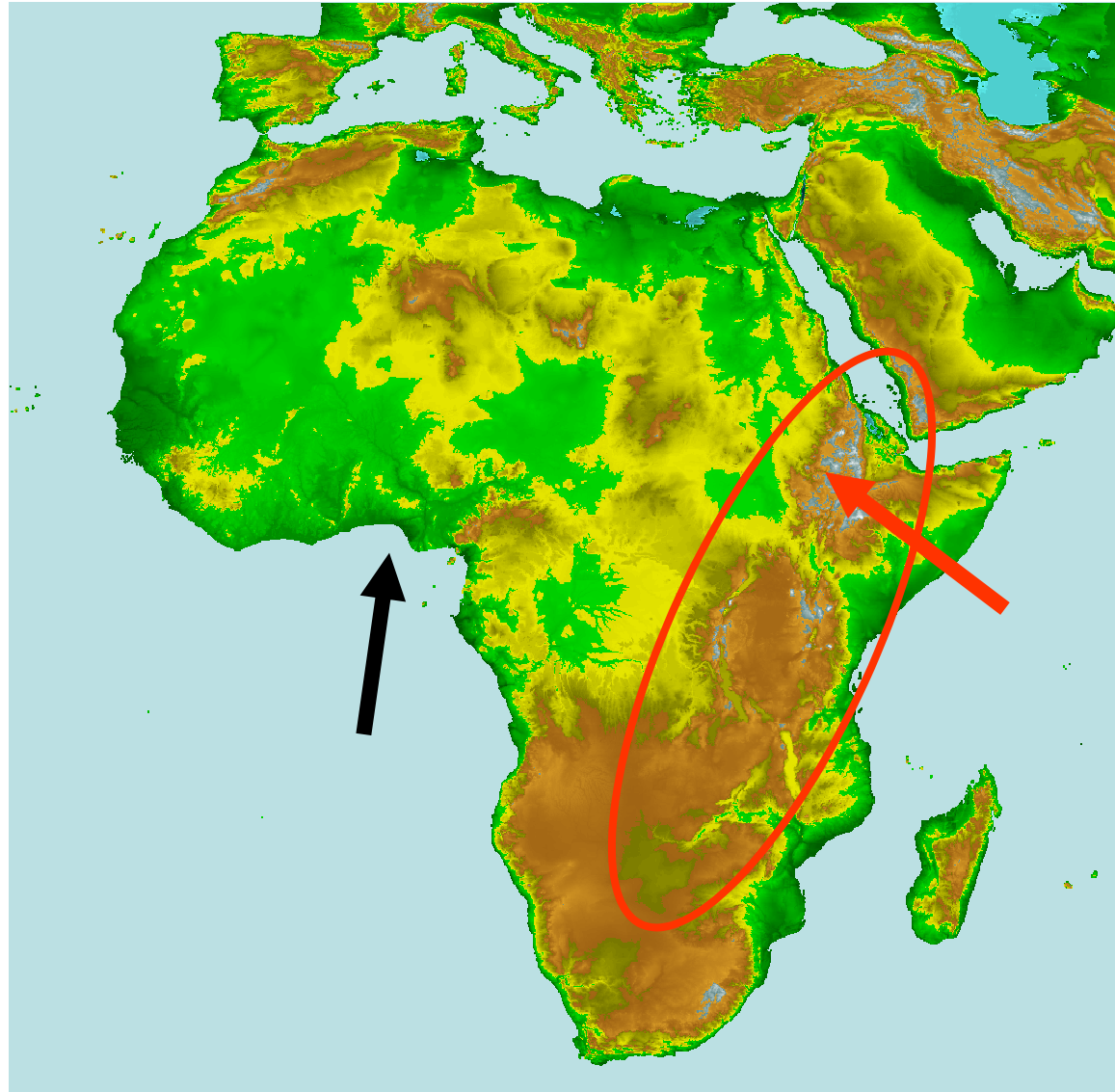
2.6 Ma



2.54 Ma

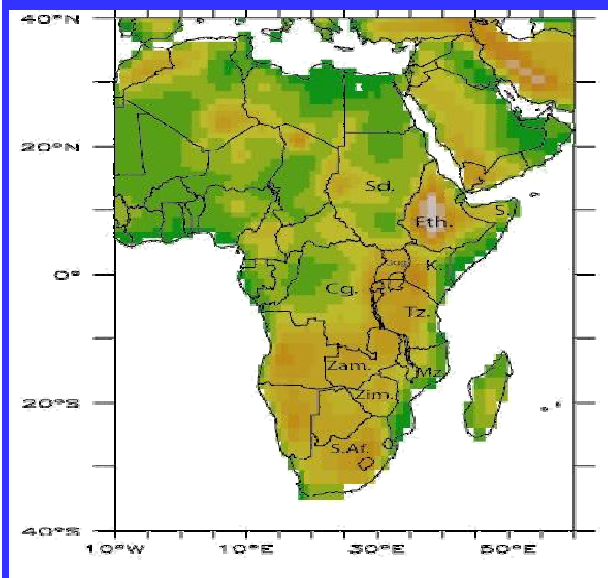


Quel est l'impact de la tectonique ?

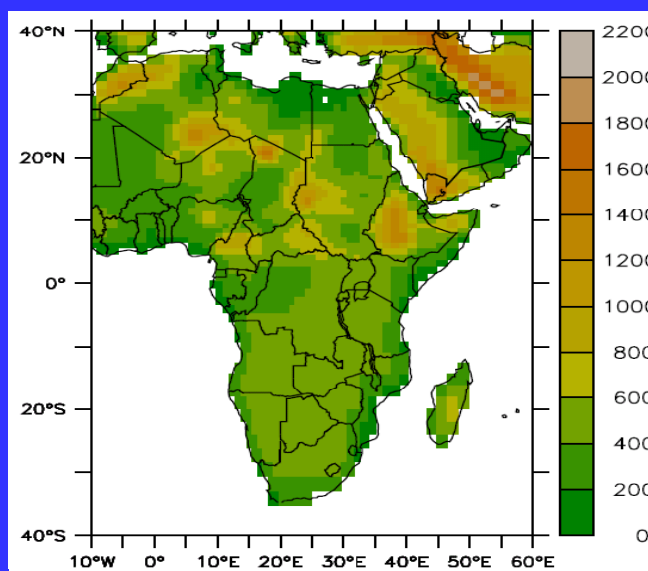


# Différents scénarios topographiques

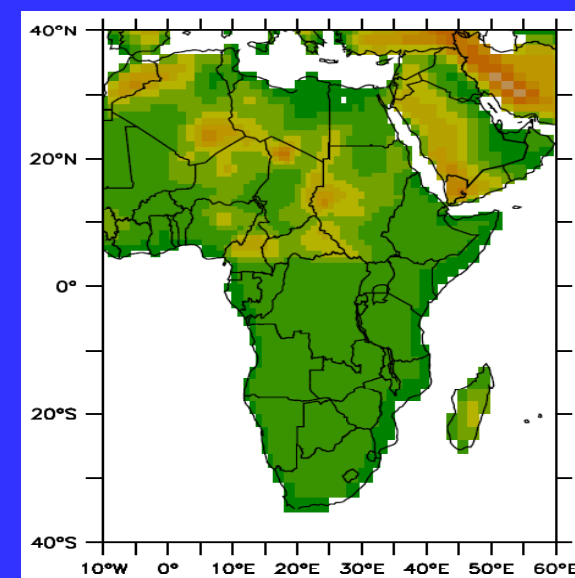
Present



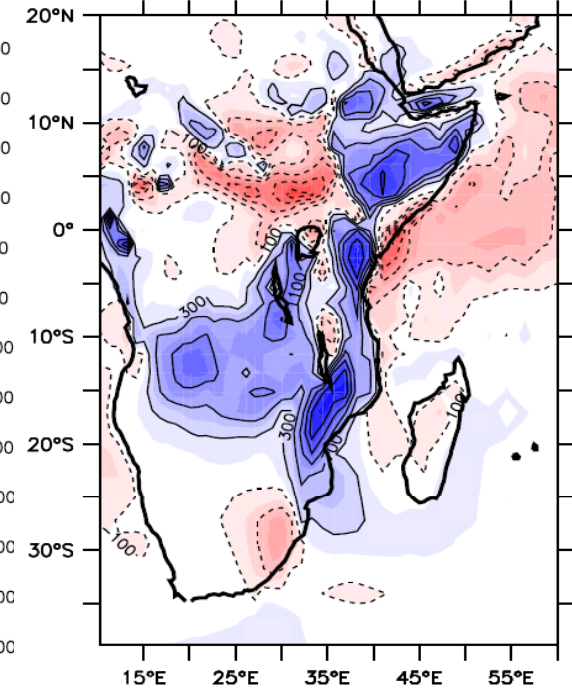
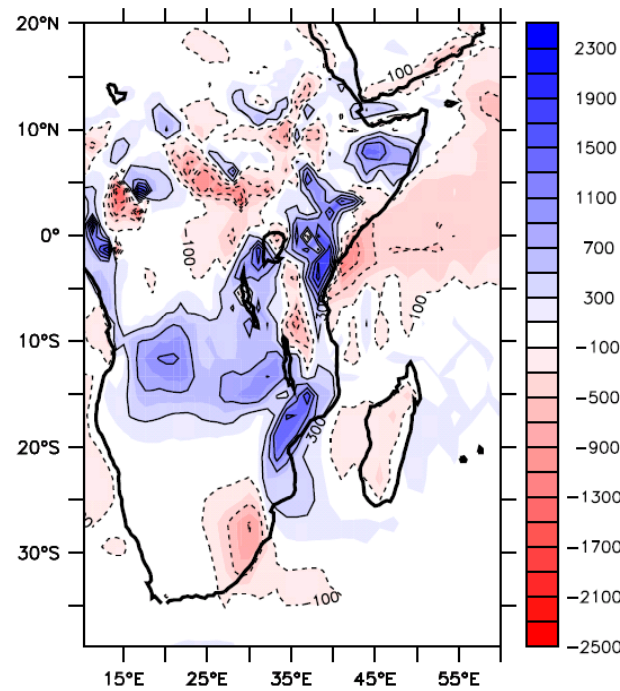
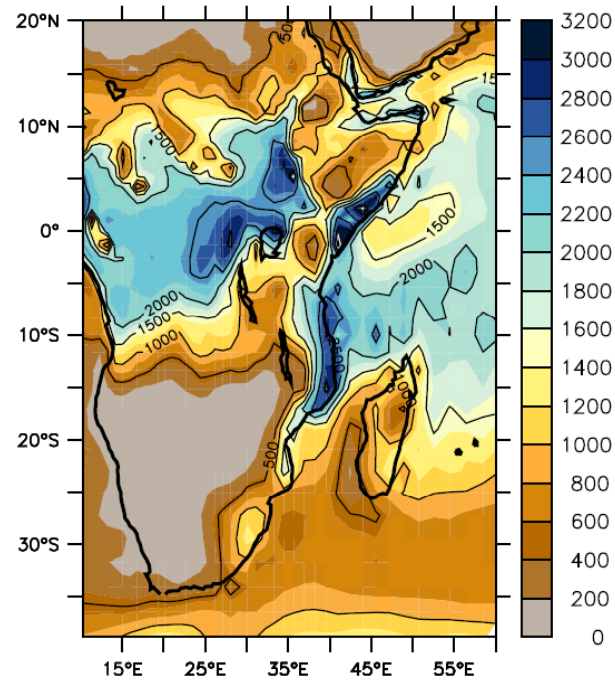
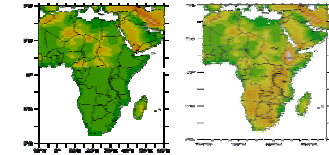
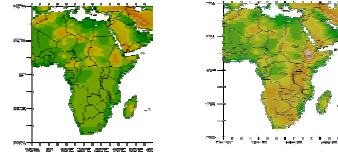
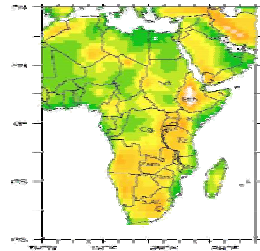
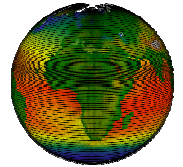
Traps



NoRel

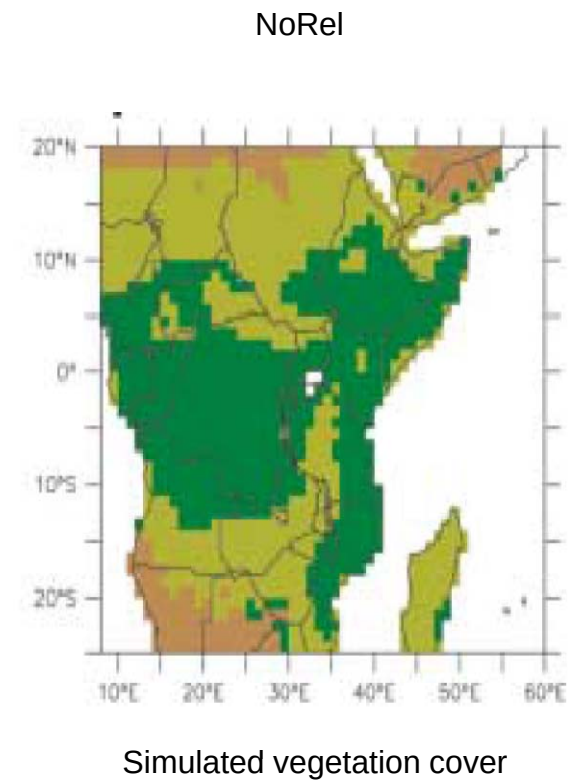
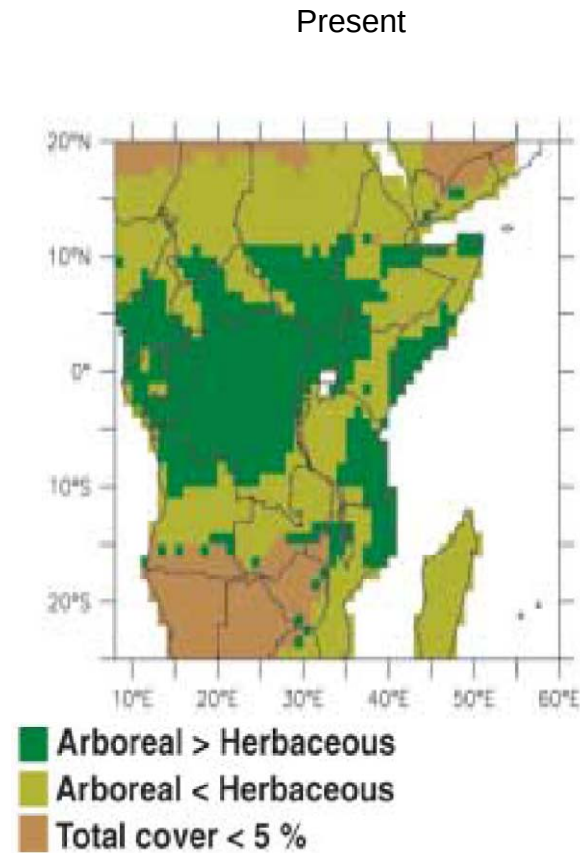
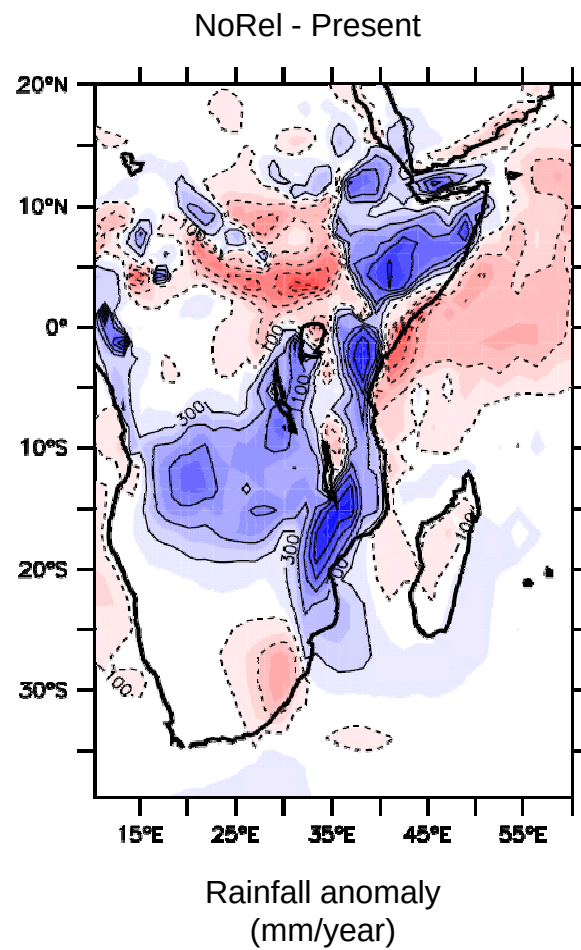


## Rainfall patterns : mm / year



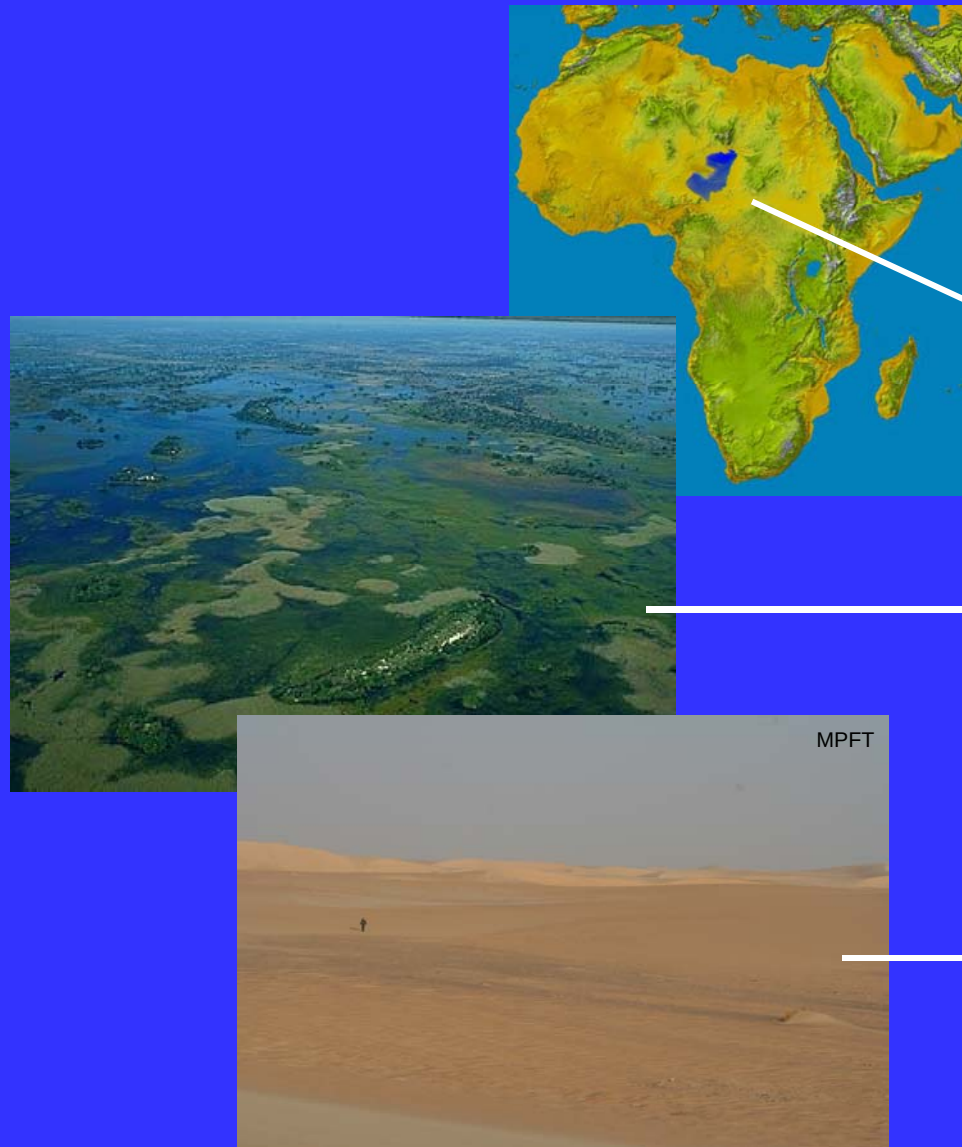
- Convection is also enhanced due to increased continental temperatures.
- Rainfall is increased.

## Uplift led to eastern Africa aridification...

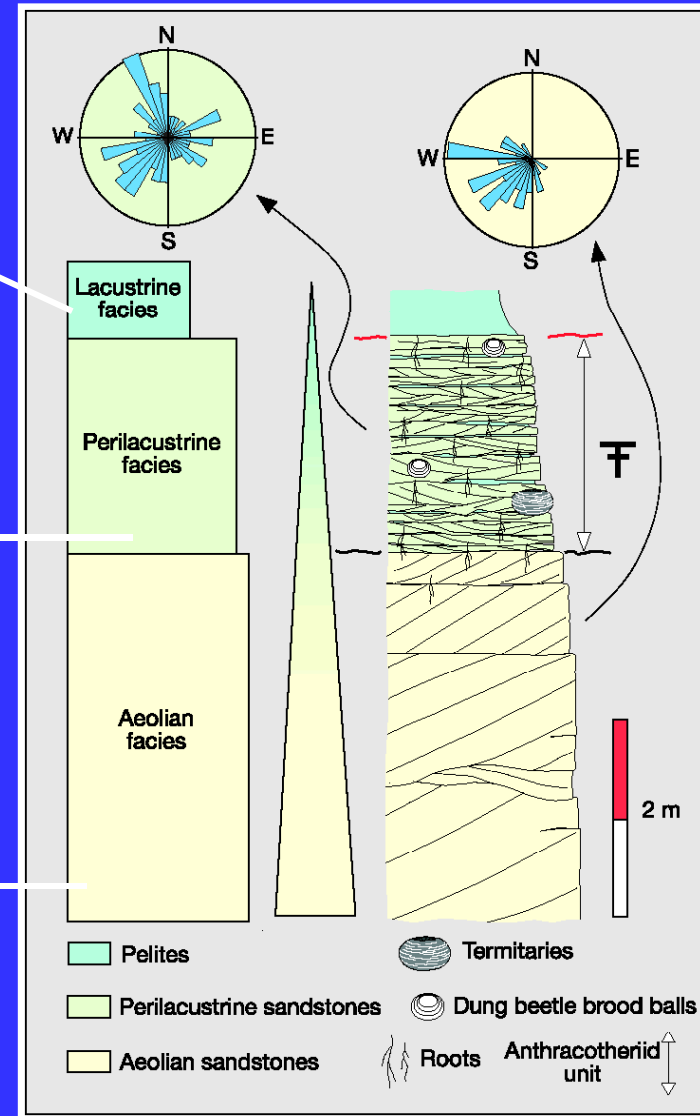




# Le bassin du Tchad au Miocène supérieur



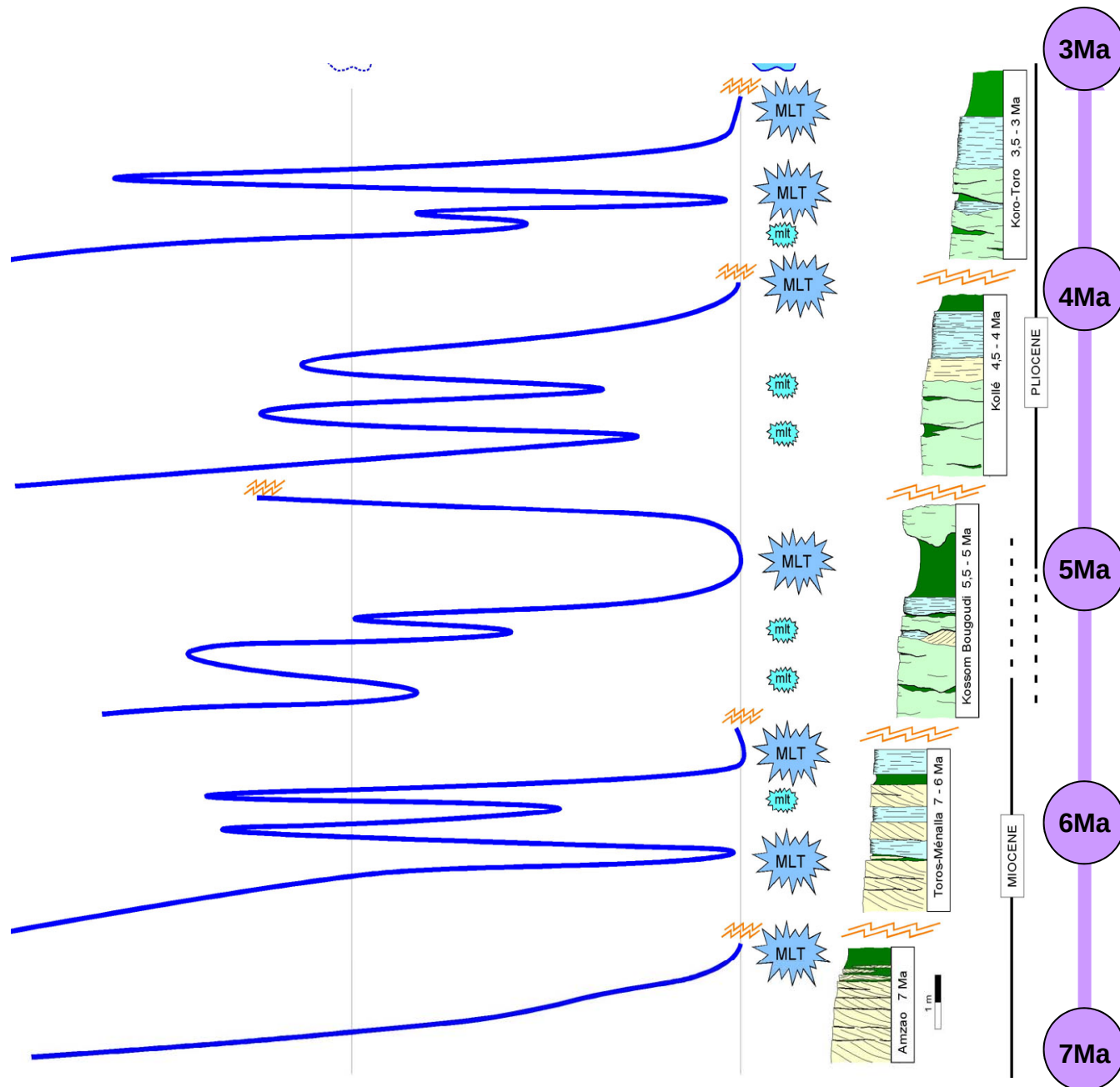
## Contexte sédimentologique :



Vignaud et al.

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

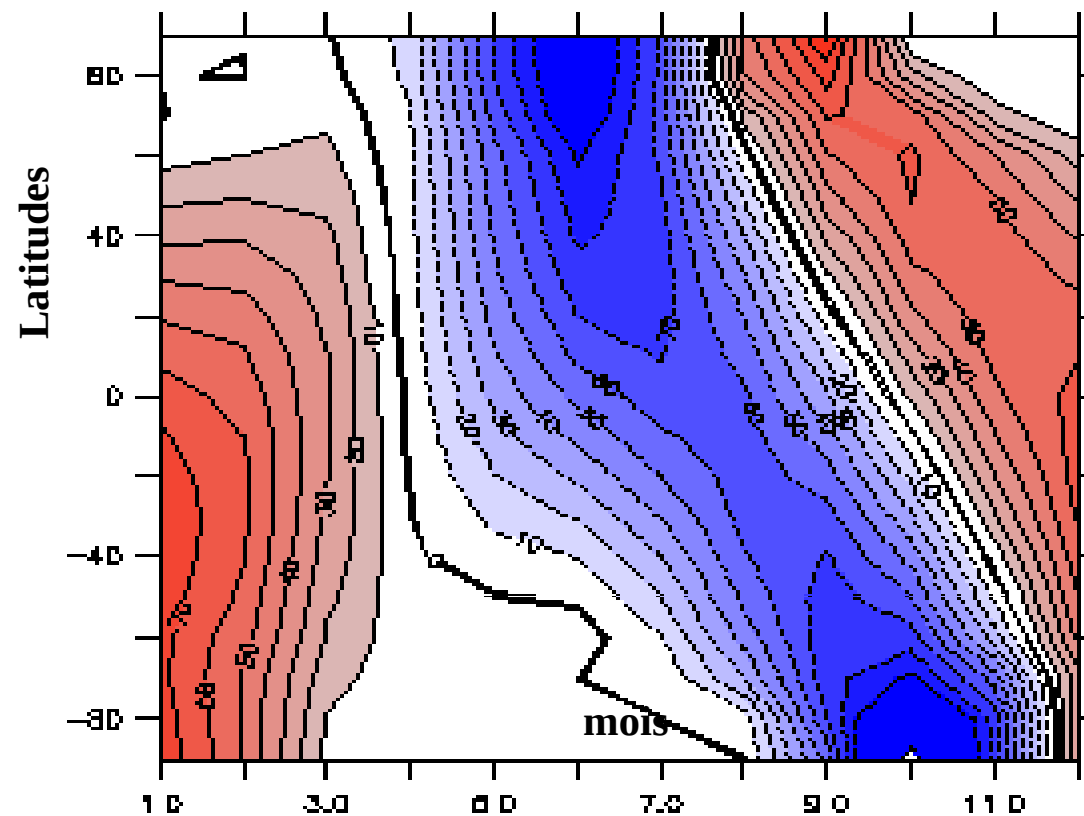
# Des oscillations répétitives



# Hypothèses: L'insolation

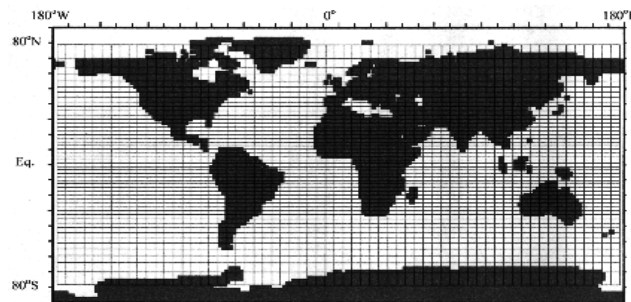
Test de la théorie de Milankovitch

115 000 ans - 126 000 ans



# Le rôle de l'océan

## ↓ Le modèle couplé de l'IPSL



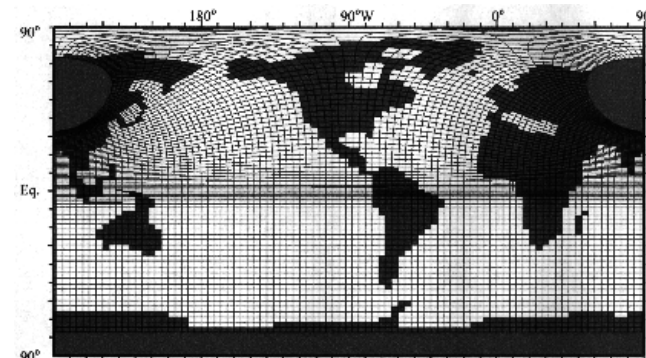
**LMD 5.3**  
**Modèle d'Atmosphère**  
( 64 x 50 x 11 )

Le Clainche (2000)

**IPSL Basse Résolution**  
**Modèle Couple Global**

- ☒ - Température Océanique de Surface
- ☒ - Couverture de Glace de mer
- ☒ - Température de Surface de la Glace
- ☒ - Albedo de Surface de la Glace

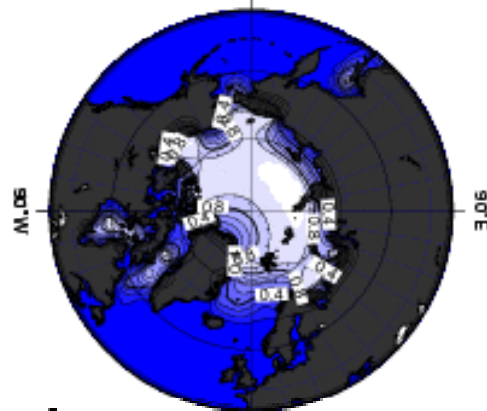
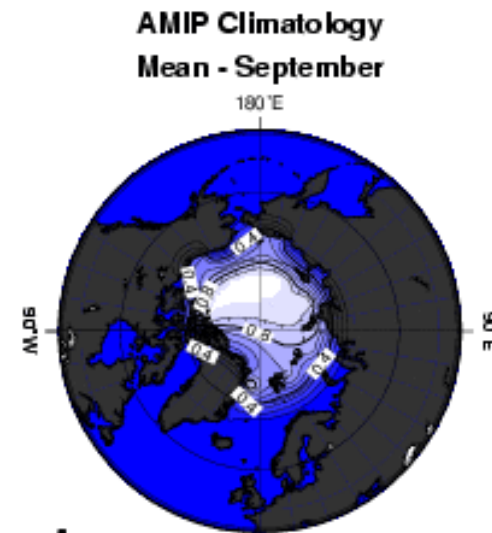
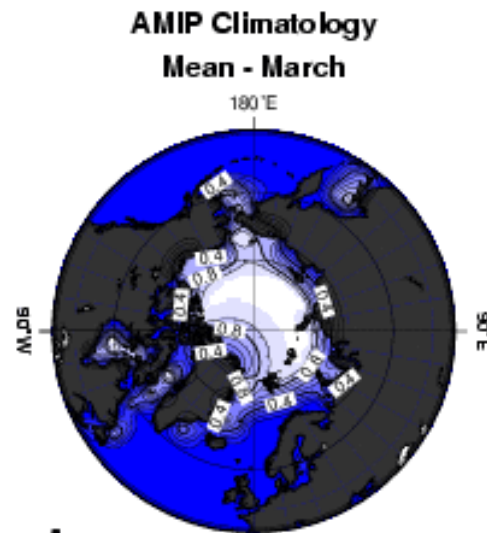
**OPA-ICE7**  
**Modèle Océan-Glace**  
( 92 x 76 x 30 )



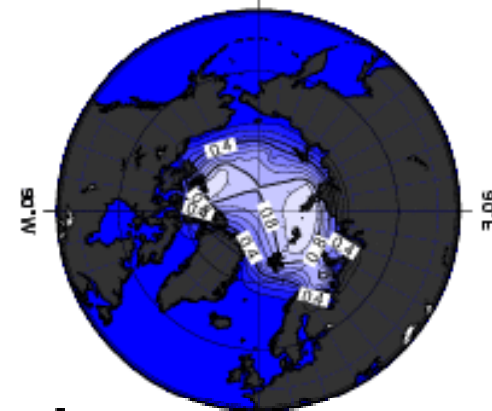
# Le rôle de l'océan Le modèle couplé de l'IPSL

Couverture de la glace de mer

Le Clainche (2000)



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

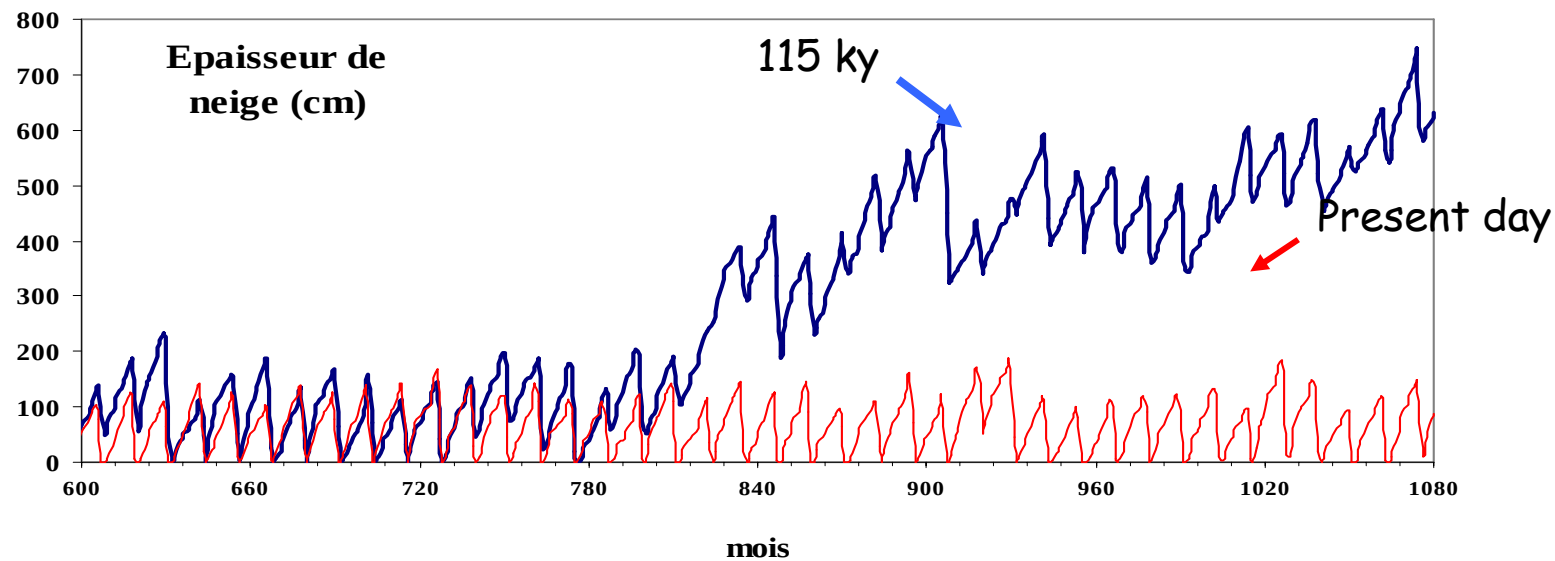
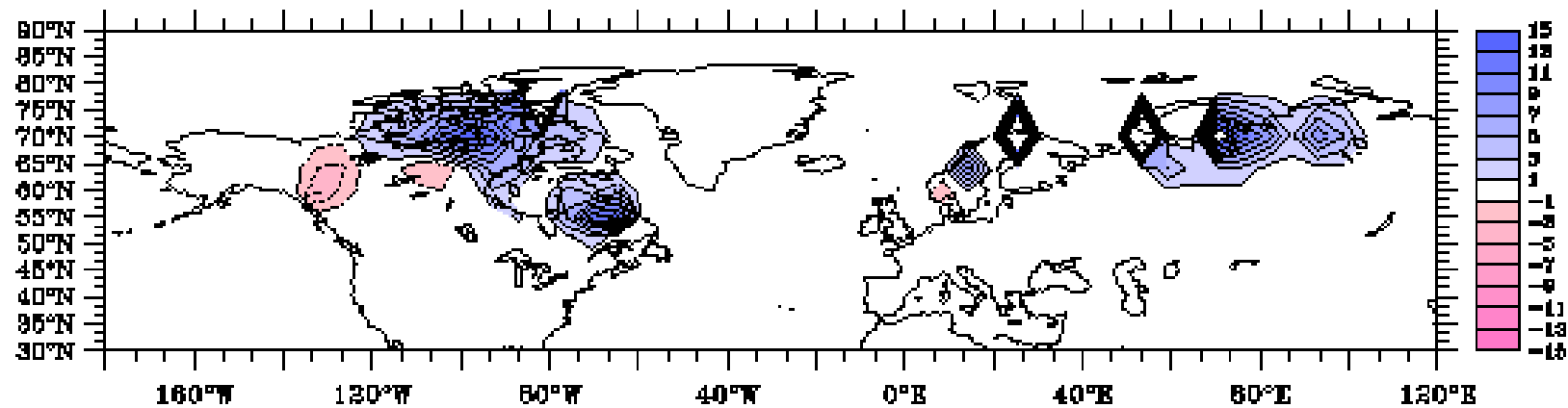


**Min:  $7,5 \times 10^6 \text{ km}^2$**   
(6, Gloersen et Campbell, 1991)

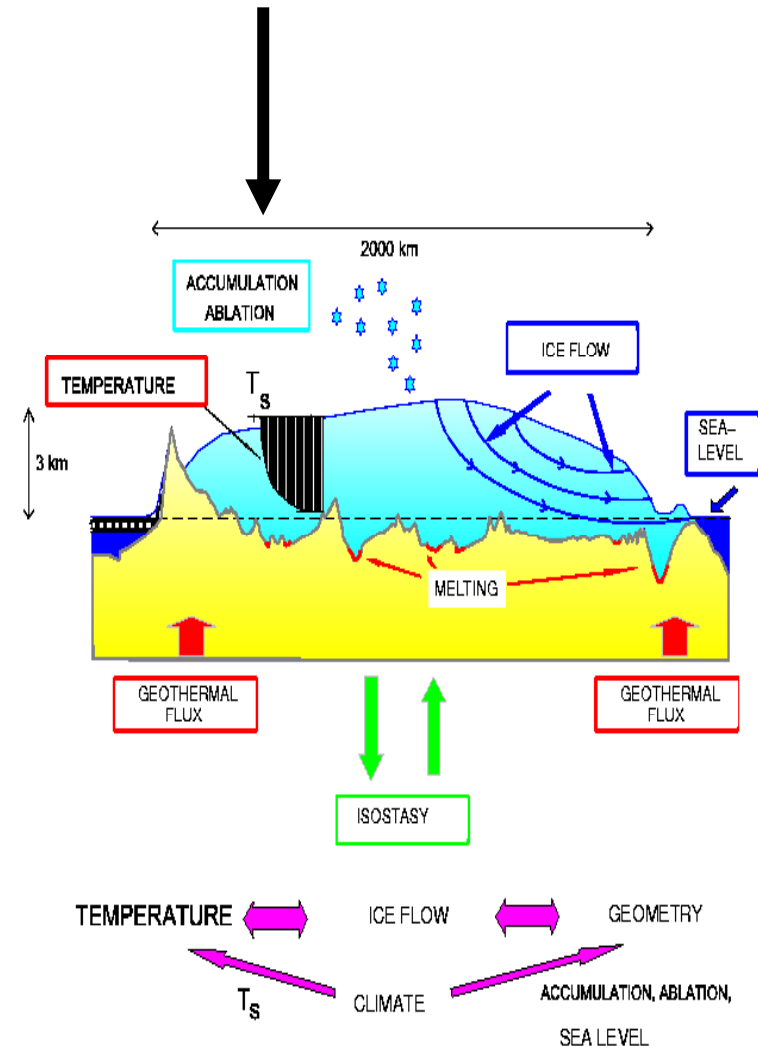
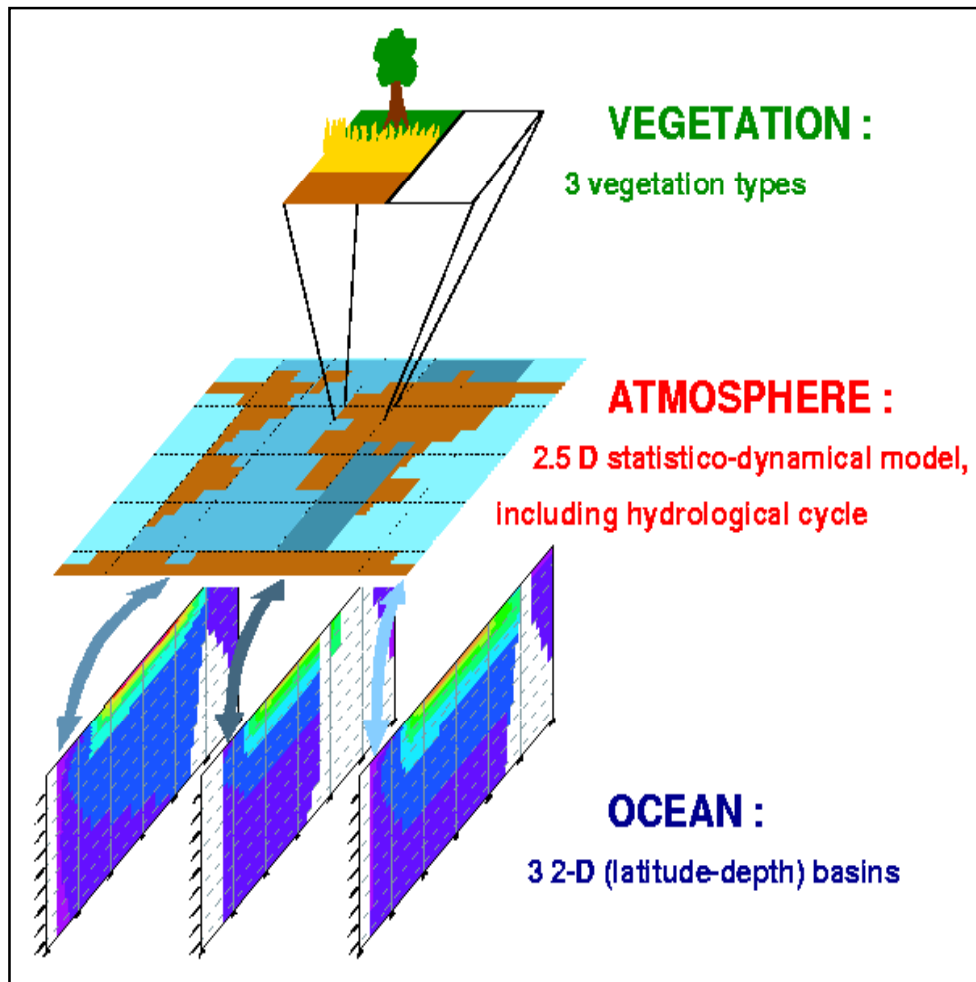


# Le rôle de l'océan Dernière entrée en glaciation

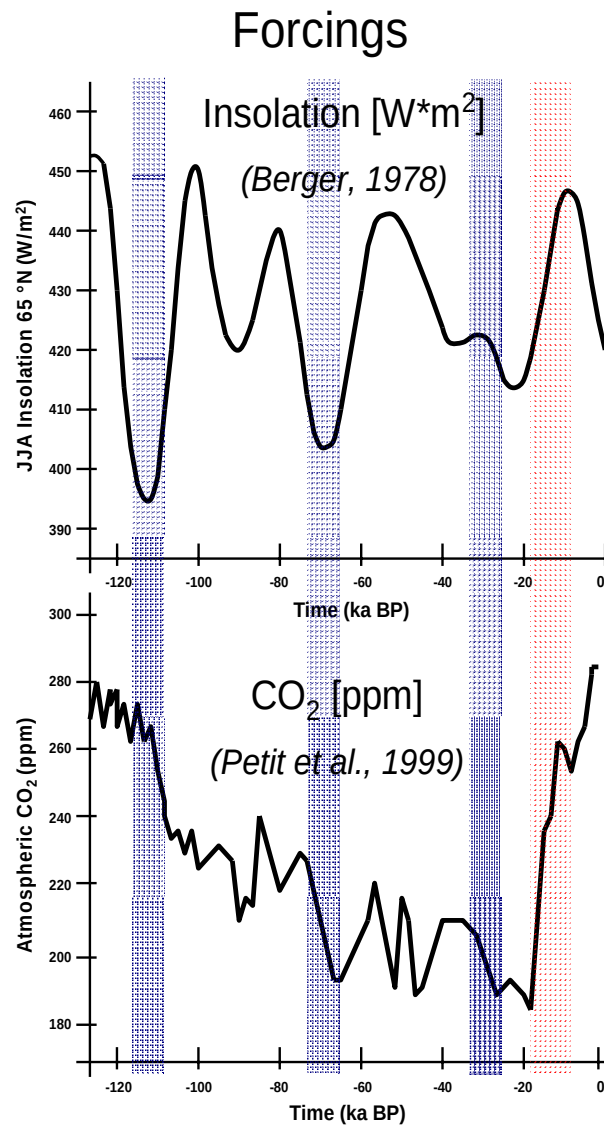
Changement de l'épaisseur de neige en été (cm)



# Rencontre CLIMBER-GREMLINS



## Driver of Climate – Ice sheet model

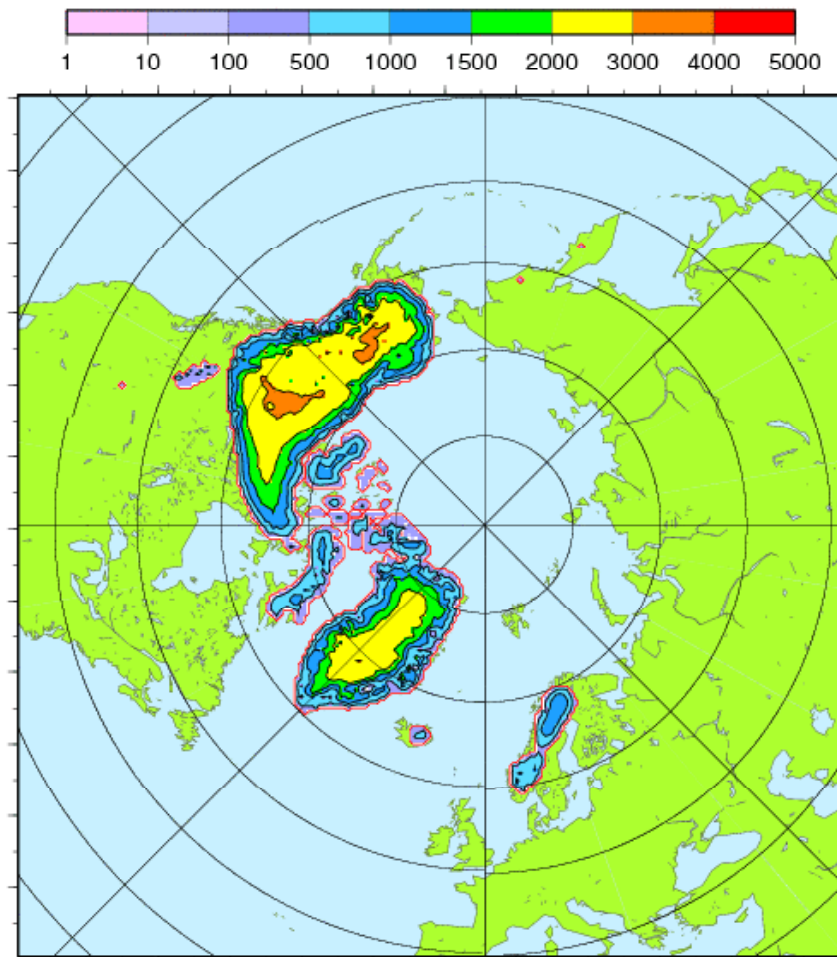


(Bonelli et al., *CI of the Past*, accepted.)

## Nouveau Cycle: MIS5 à présent

Cycle Gremlins

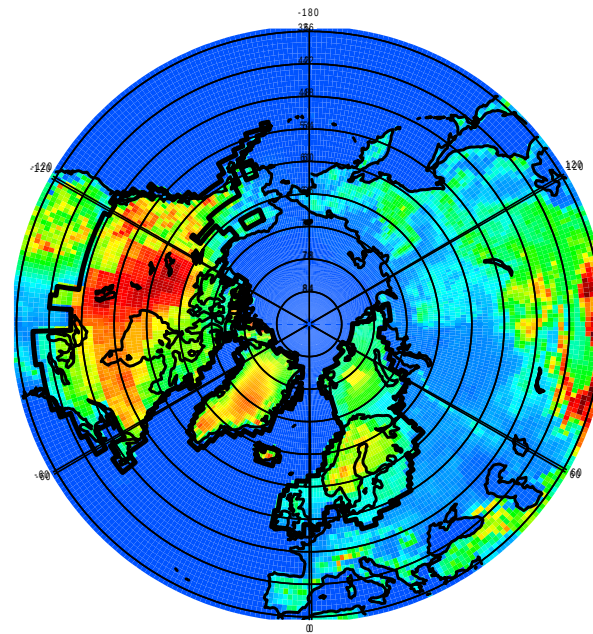
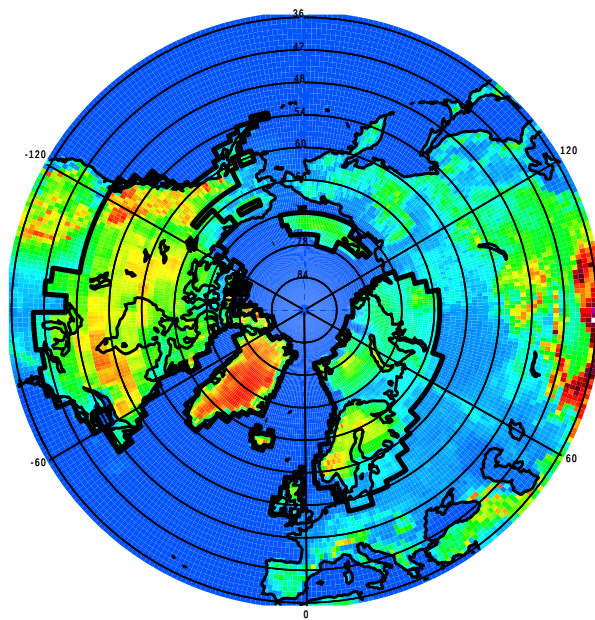
$t = -106000$  ans



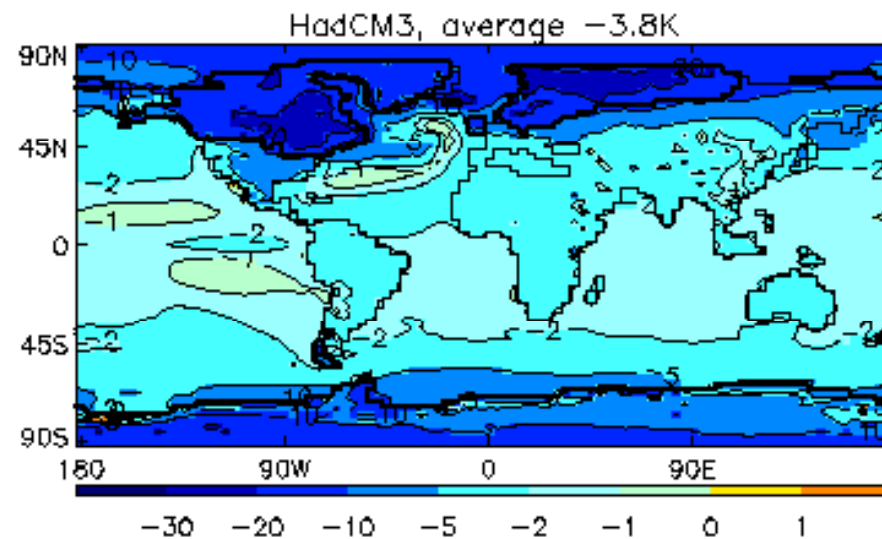
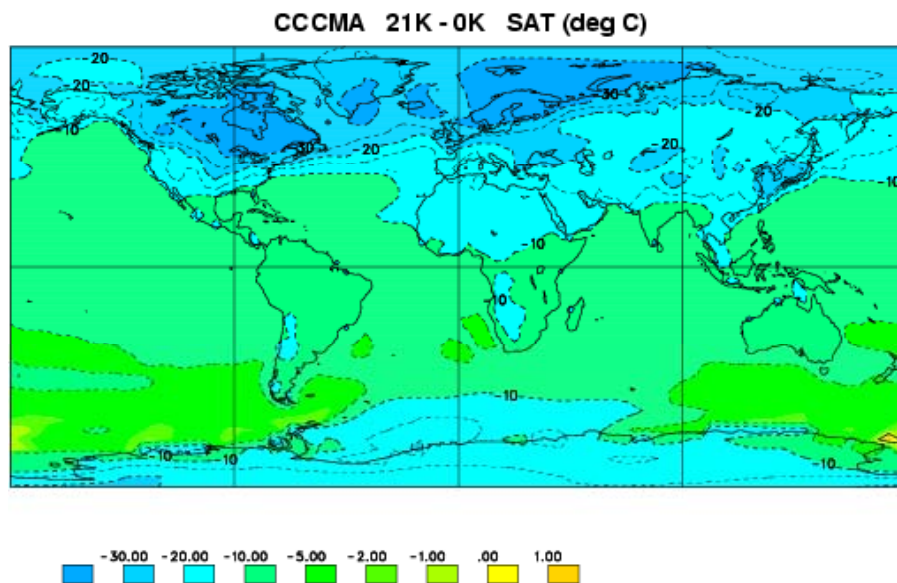
## New ice5G reconstruction (Peltier, 2004)

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

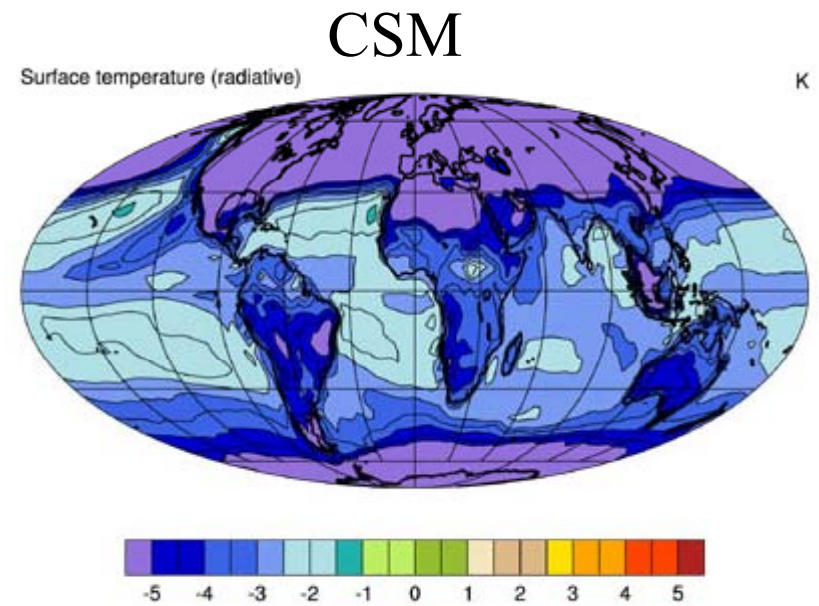
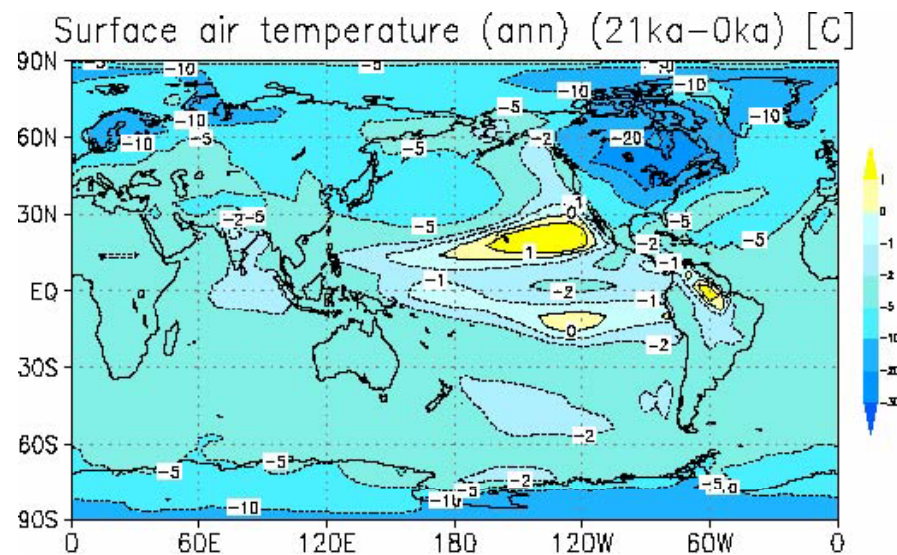
Peltier's ICE4G vs ICE5G ice-sheets



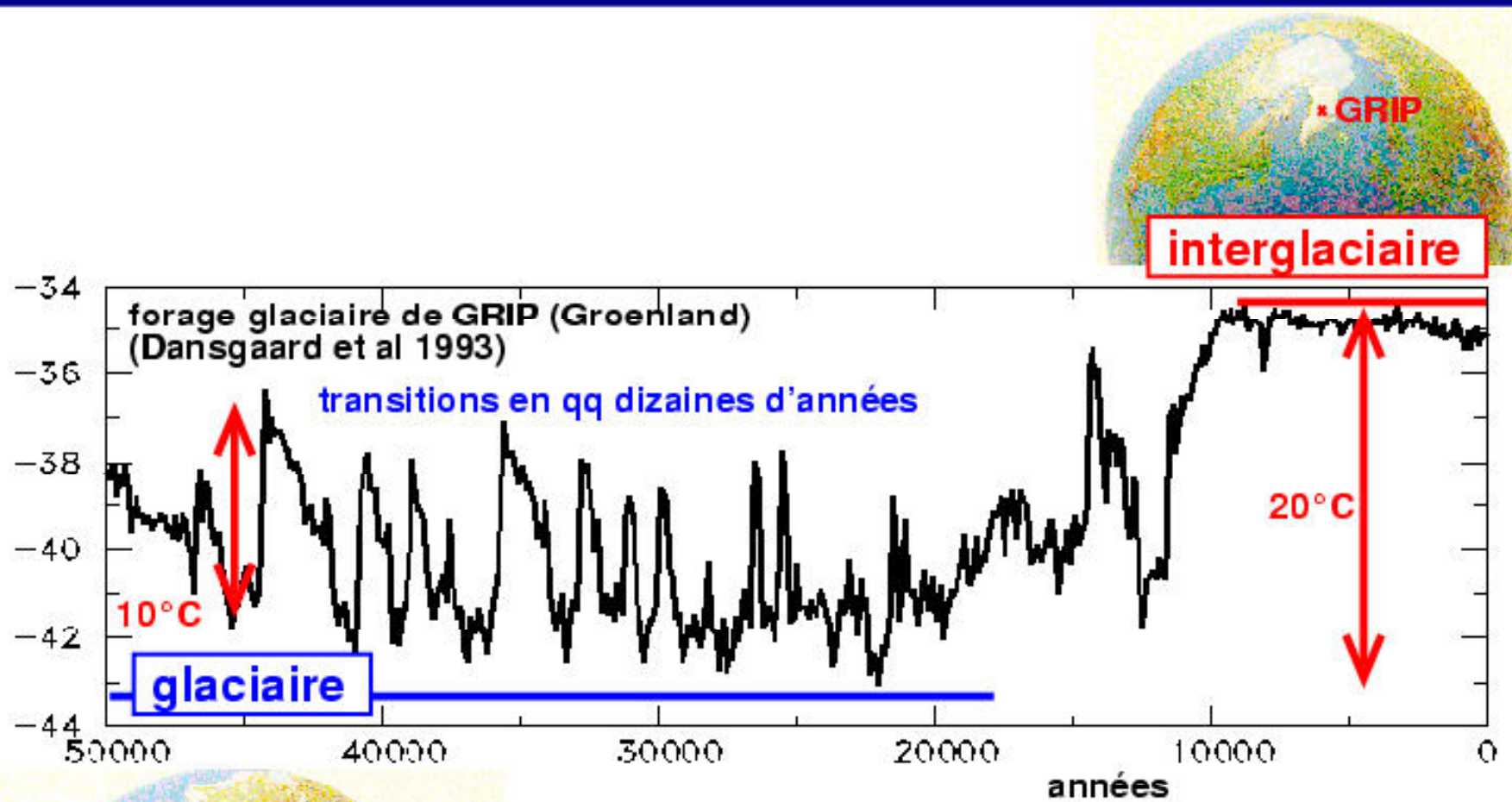




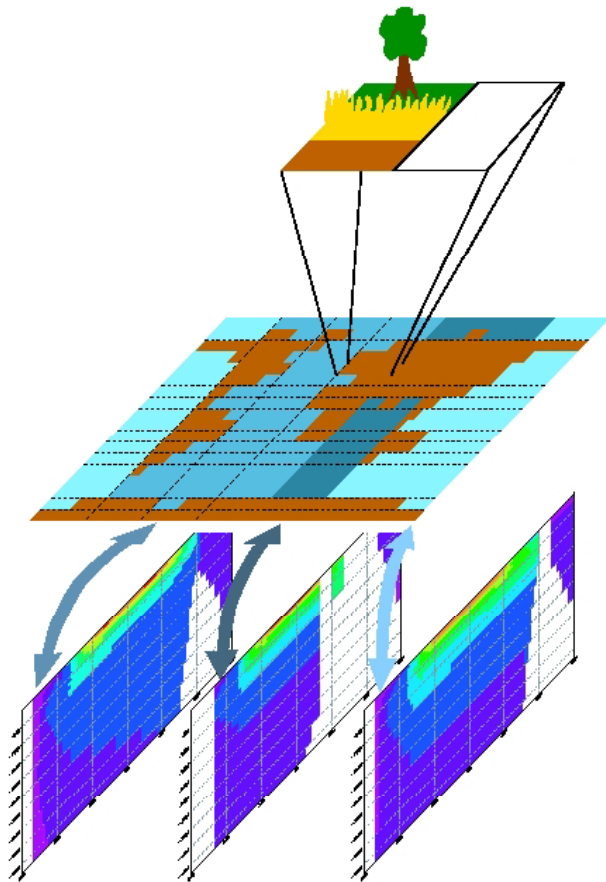
## Annual mean surface air temperature 21ka-0ka



## Variabilité millénaire

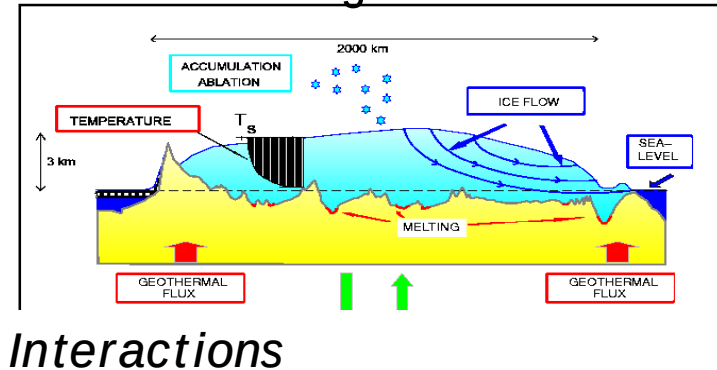


## Le modèle CLIMBER



Développé initialement au PIK, Potsdam

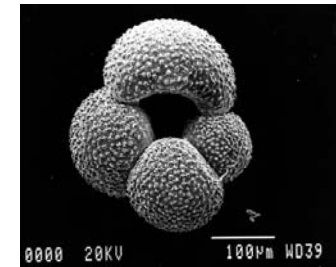
## GREMLINS : modèle de calottes de glace



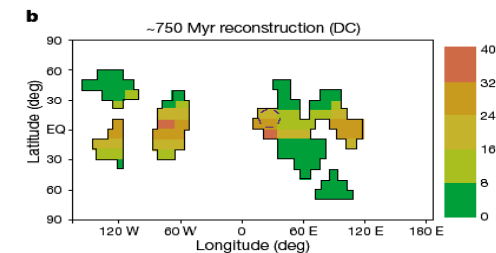
*Interactions  
cryosphère - climat*

## Modélisation des traceurs isotopiques : $^{18}\text{O}$ , $^{13}\text{C}$

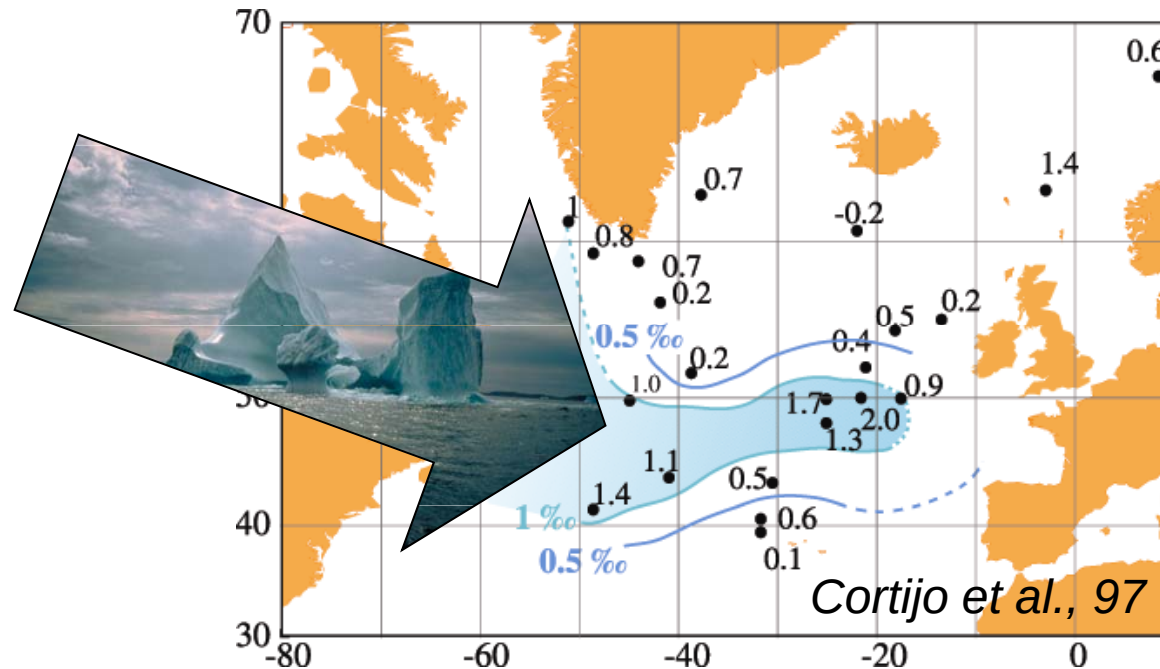
*Comparaison  
modèle - données*



## GEOCLIM : le $\text{CO}_2$ 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

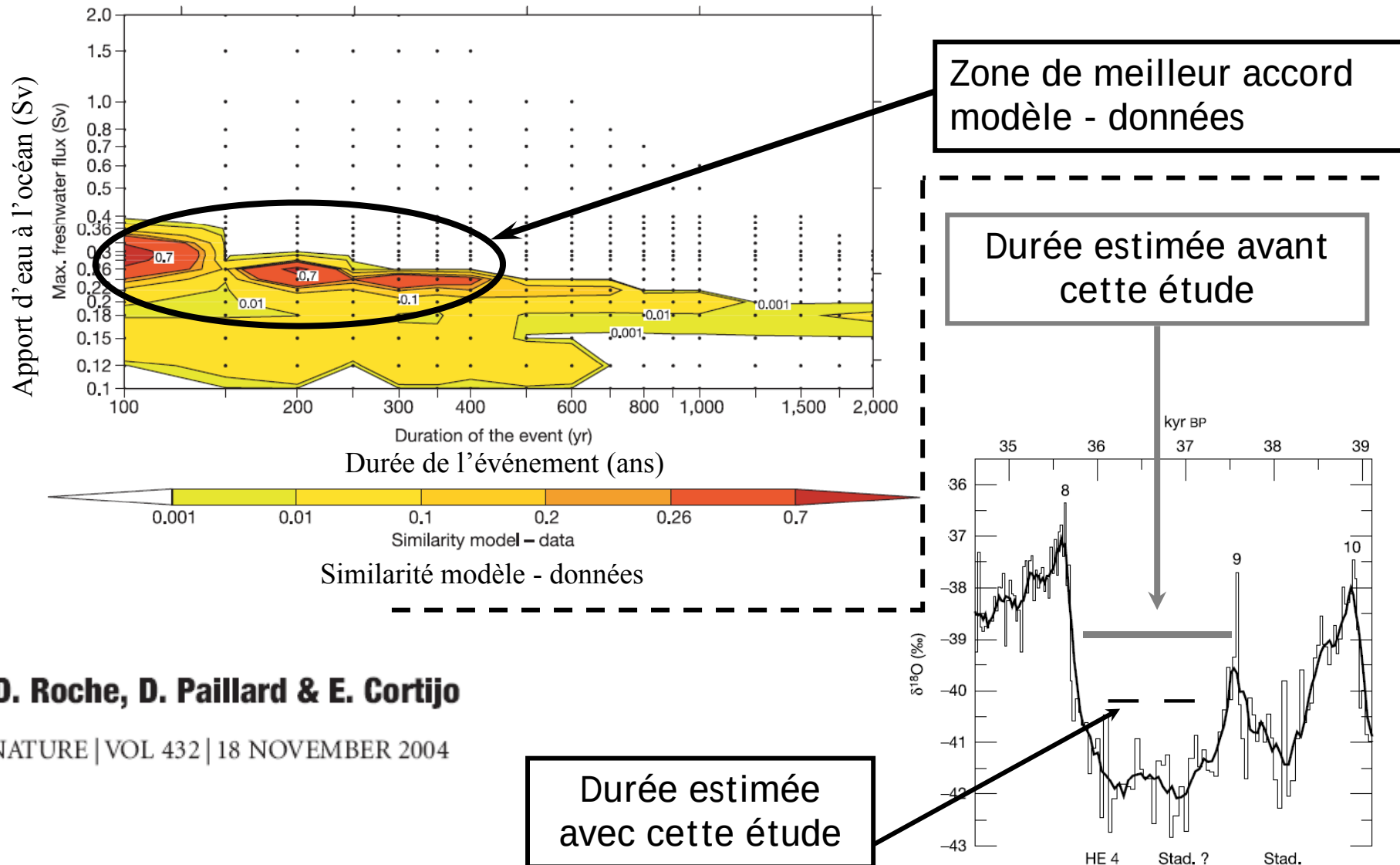
## Questions posées :

Durée de l'événement ?

Volume d'icebergs émis ?



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

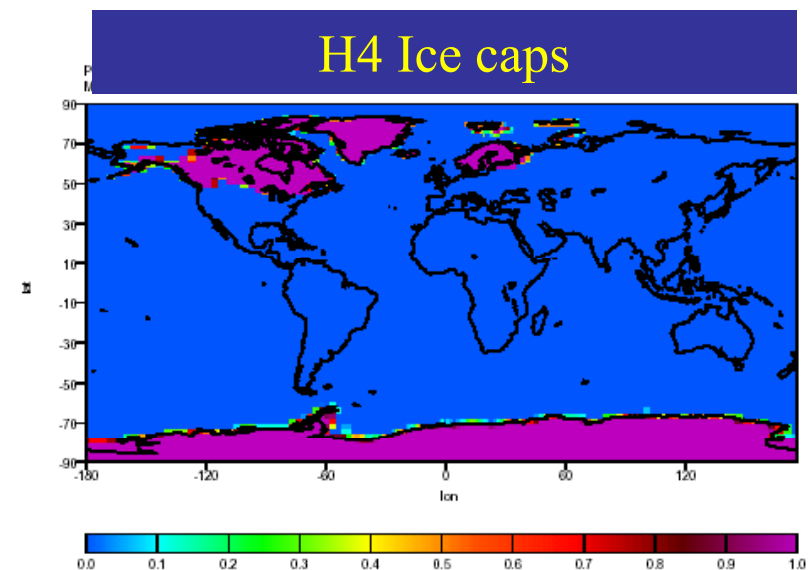
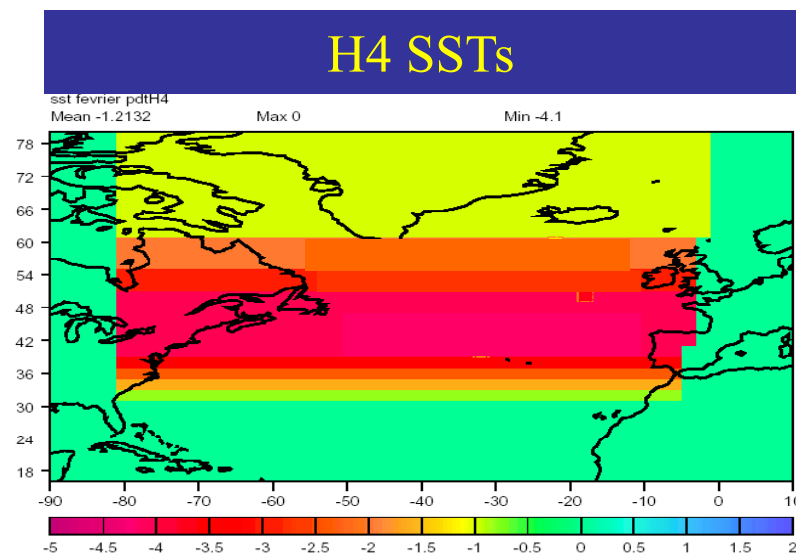




# Impact de l'événement de Heinrich 4 sur la péninsule ibérique

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

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

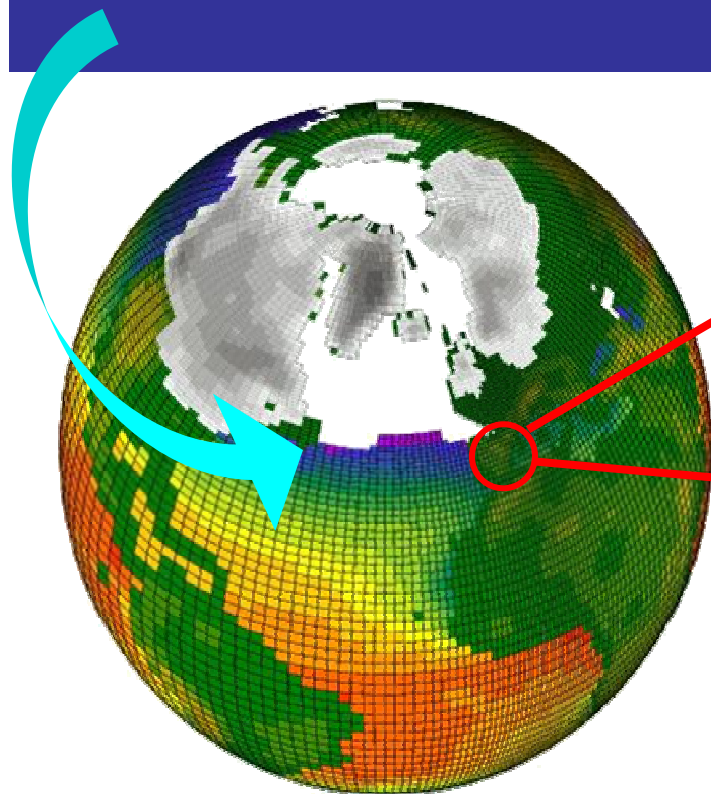


# Impact de l'événement de Heinrich 4 sur la péninsule ibérique (Résultats clim.)

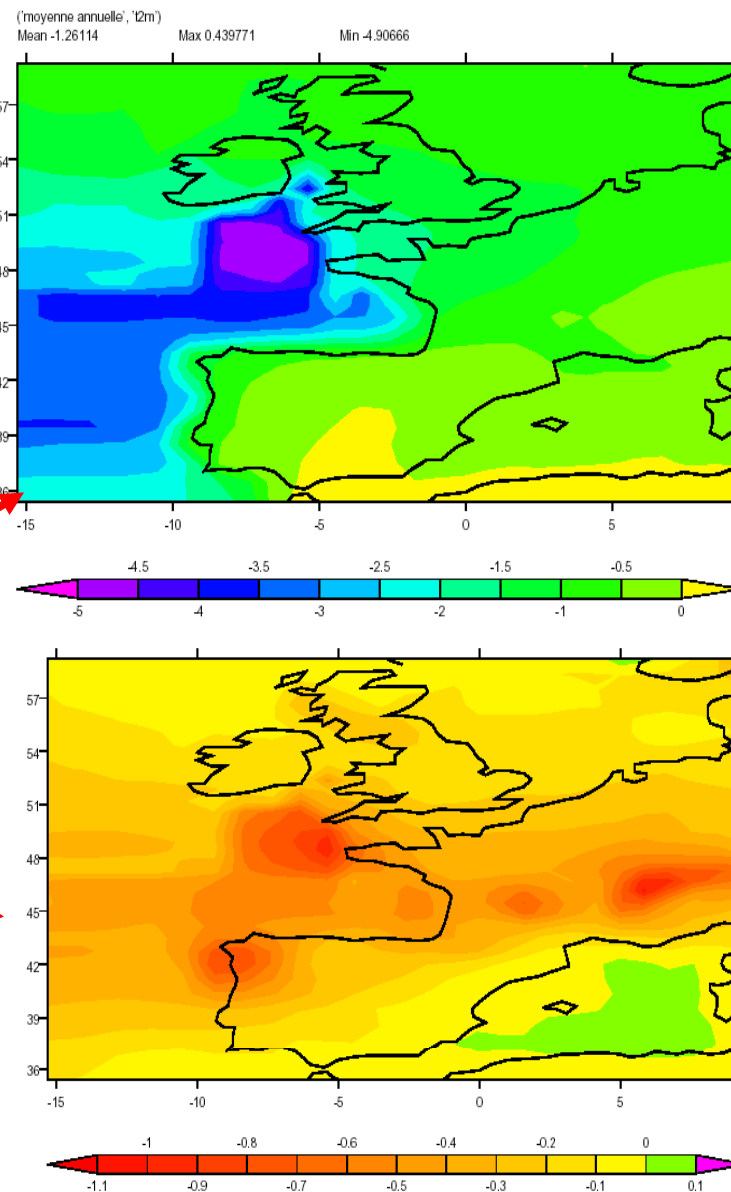
2 simulations autour de 39kyBP:

BH4 : SST LGM, param. Orb. à 39ky,  
CO<sub>2</sub> à 209 ppmV, calottes réduites

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



**H4 – BH4**



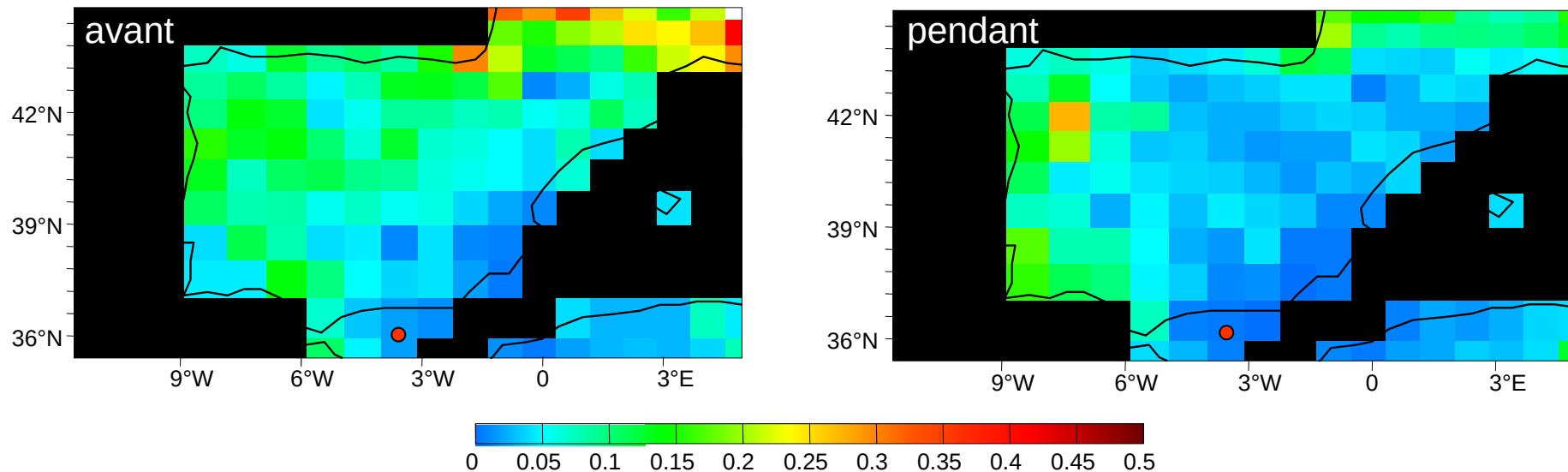
# Impact de l'événement de Heinrich 4 sur la péninsule ibérique (Résultats bio.)

Sorties LMDZ



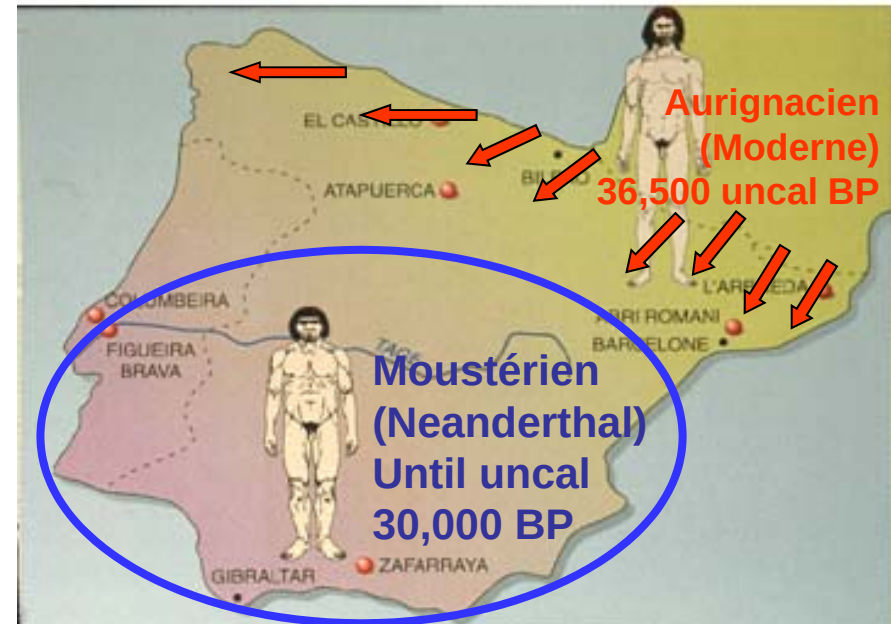
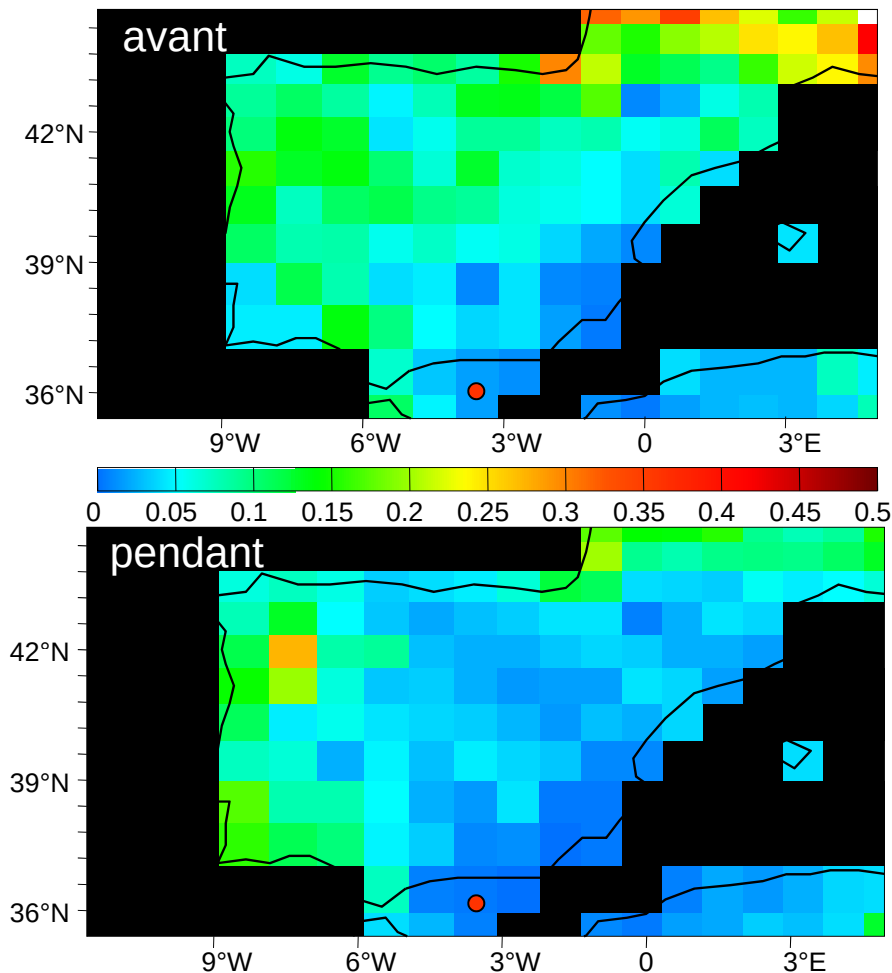
Forçage off-line d'ORCHIDEE

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



# Environnement des derniers hommes de Neanderthal

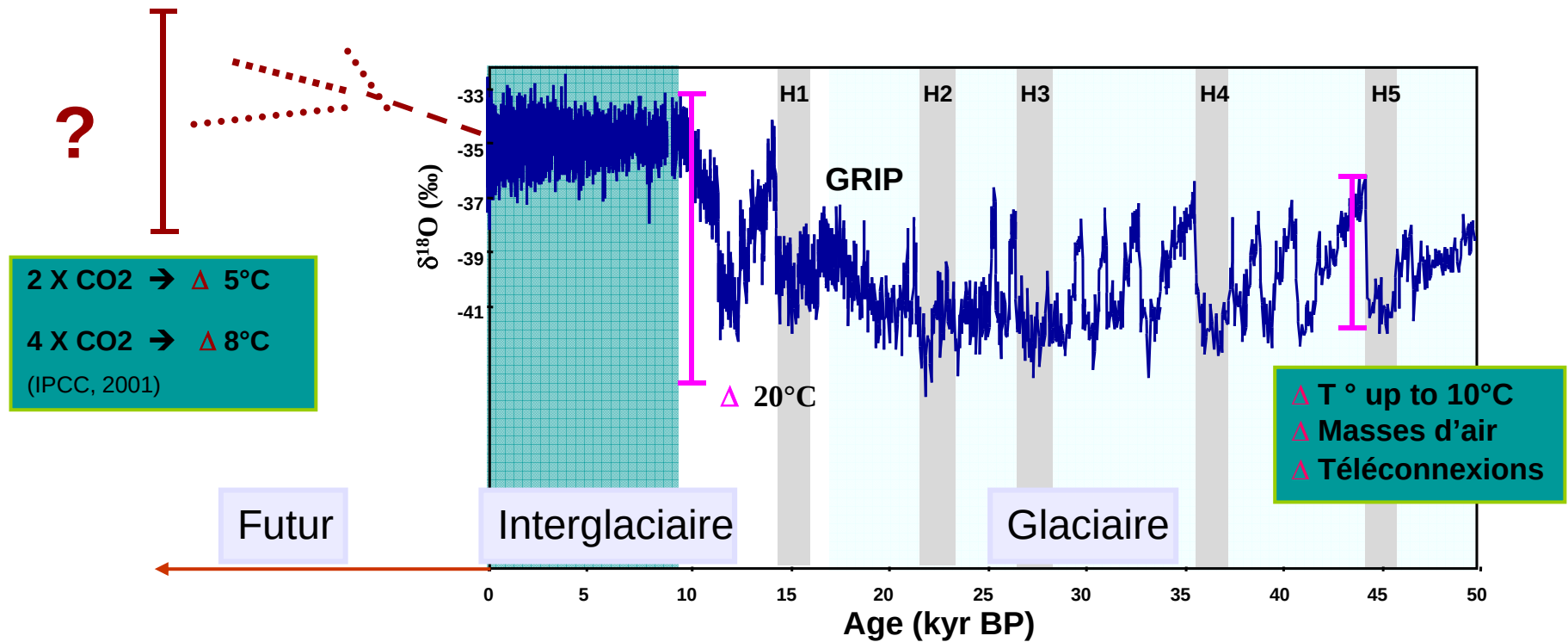
Couvert arboré simulé  
avant et pendant H4



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

Oscillations de  
faible amplitude

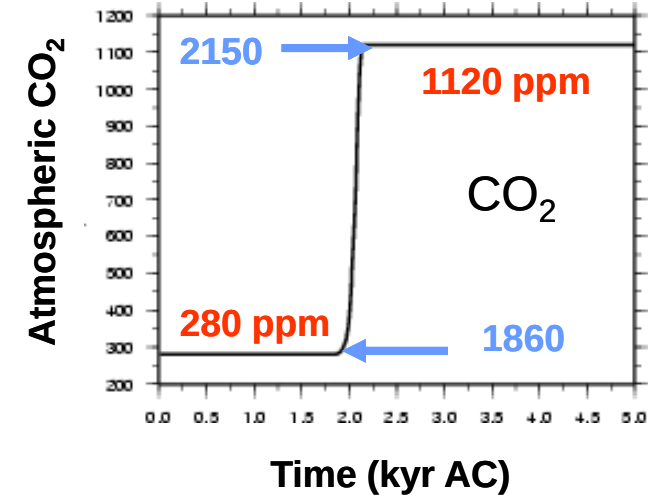
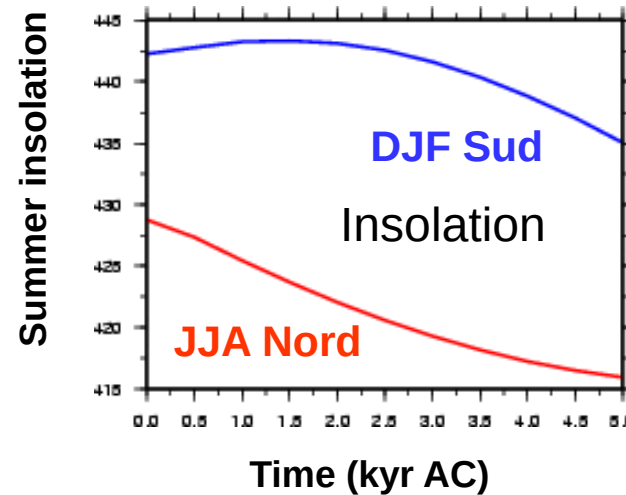
Calottes Laurentide et  
Fennoscandienne instables

Changements climatiques  
rapides



# Les conditions expérimentales : 0 – 5 kyr

Forçages  
Externes



Forçages  
Climatiques

→ *Perturbation des températures*  
(seulement pour GRISLI)

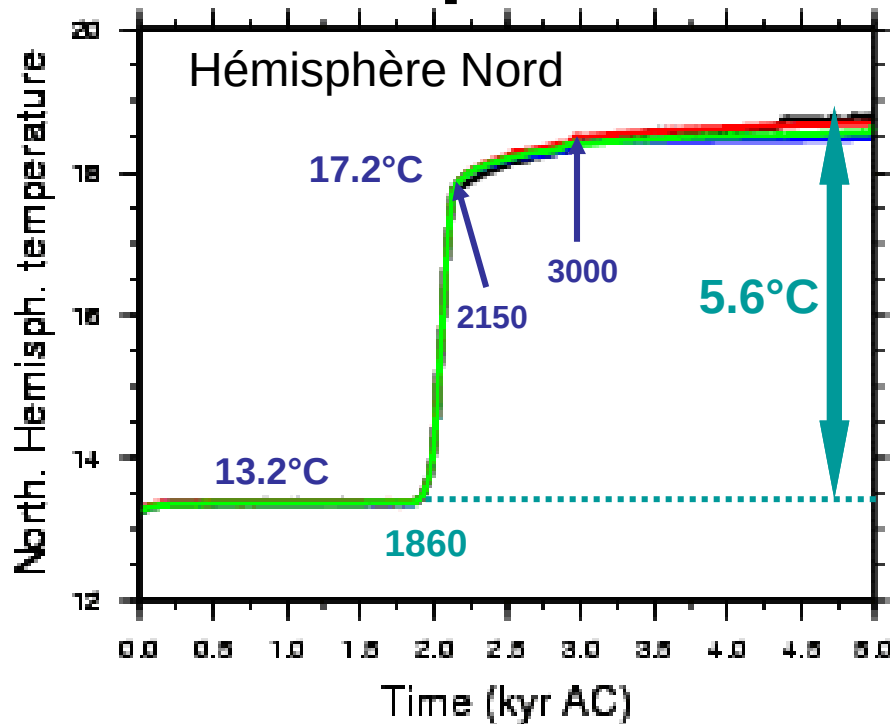
$$\text{Temp (t)} = T_{\text{obs}} + T_{\text{c}}(t) - T_{\text{c}_{0k}}$$

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

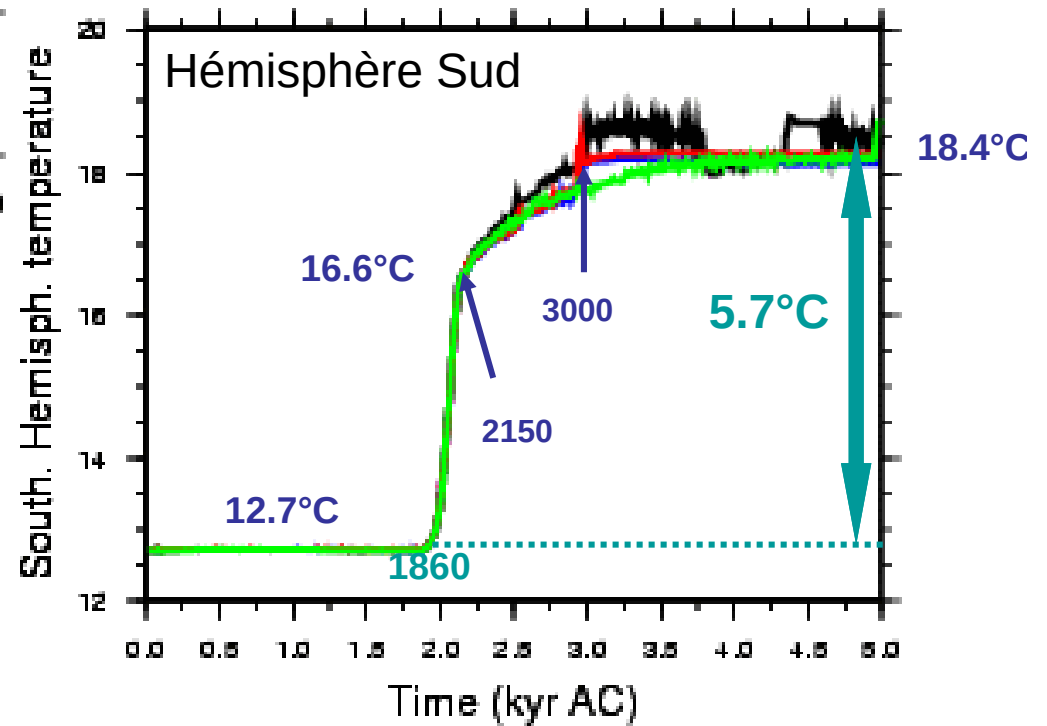
Condition  
Initiale

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 ...

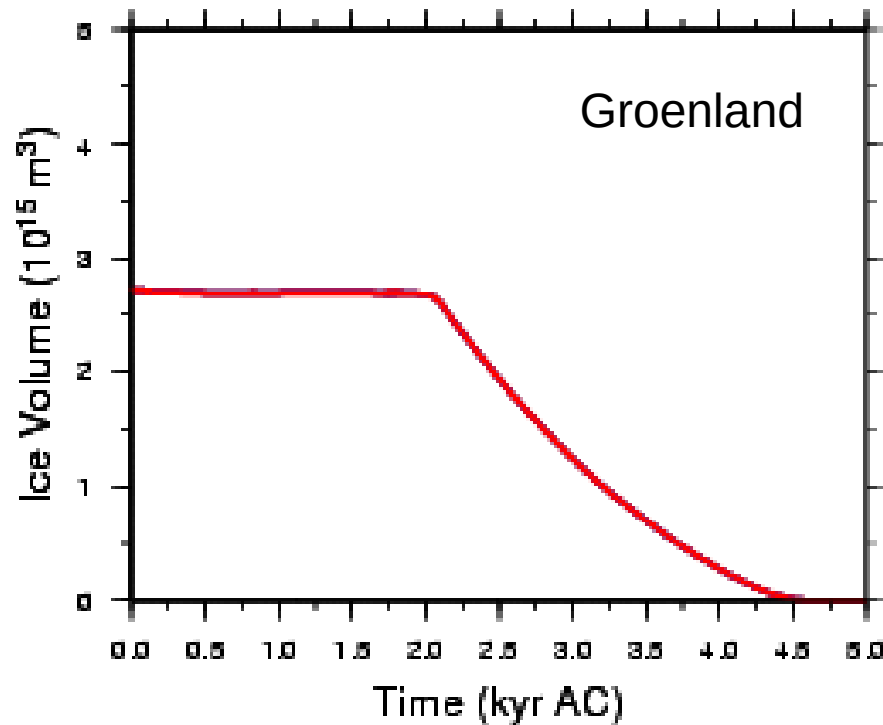


*Effet du couplage clairement visible pour l'Hémisphère Sud*



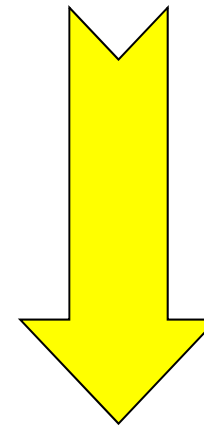
- **Totalement couplé**
- **CLIMBER-GRISLI**
- **CLIMBER-GREMLINS**
- **CLIMBER seulement**

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



$$\Delta V = 2.7 \cdot 10^{15} \text{ m}^3$$

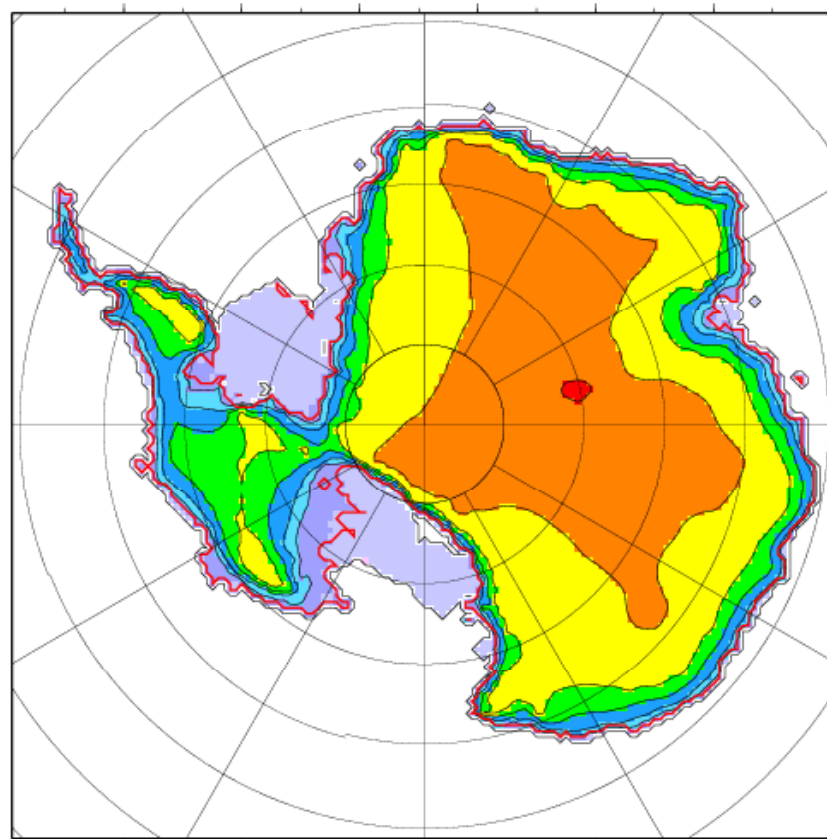
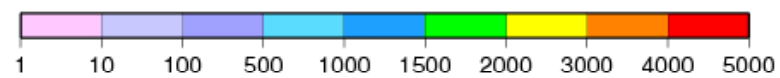
$$\text{Surface Océanique} : 3.6 \cdot 10^{14} \text{ m}^3$$



**Montée du niveau marin = 7.5 m**

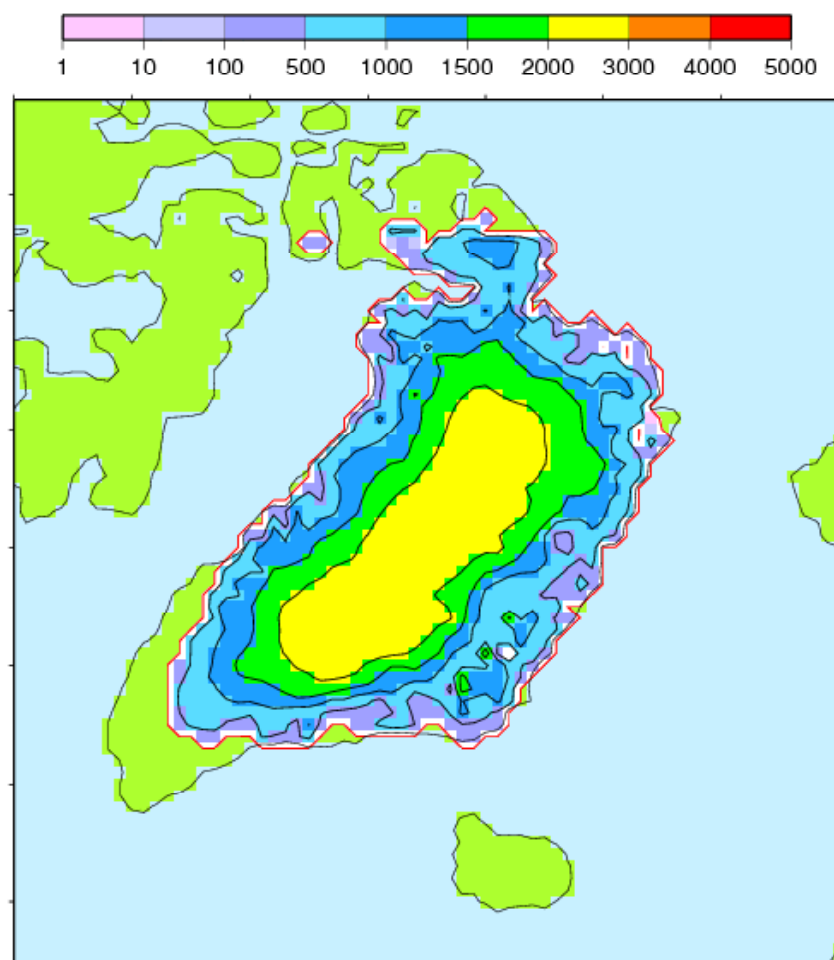
Simulation Futur

t = 00000



Simulation Futur

t = 00100

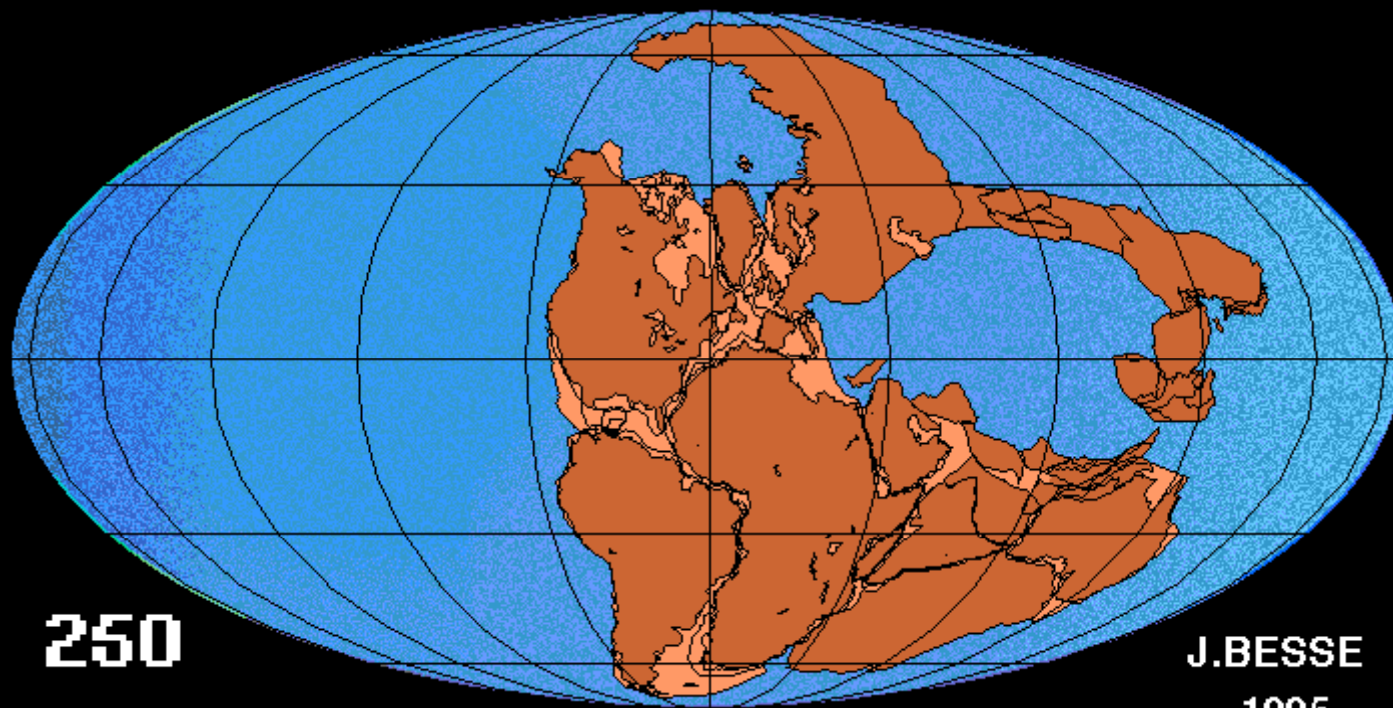




# *Conclusions*

- ➔ 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