

# LES CLIMATS DE LA TERRE

## *Dans quels contextes l'Homme va-t-il changer le climat ?*

Conférence proposée par  
l' Université de Strasbourg  
Mardi 23 mai 2017

**Gilles RAMSTEIN**

Directeur de recherche au  
Laboratoire des Sciences du  
Climat et de l'Environnement



# VALE À 4 TEMPS

- 🌍 « Le temps du milliard d'années »  
*Le temps de l'évolution du soleil*
- 🌍 « Le temps de la dizaine de millions d'années »  
*Le temps de la tectonique, de la Dérive des continents*
- 🌍 « Le temps de la dizaine de milliers d'années »  
*Le temps des paramètres orbitaux*
- 🌍 « Le temps de la centaine d'années »  
*Le temps de l'Homme*

# LA PLANÈTE MARS

## Température au sol :

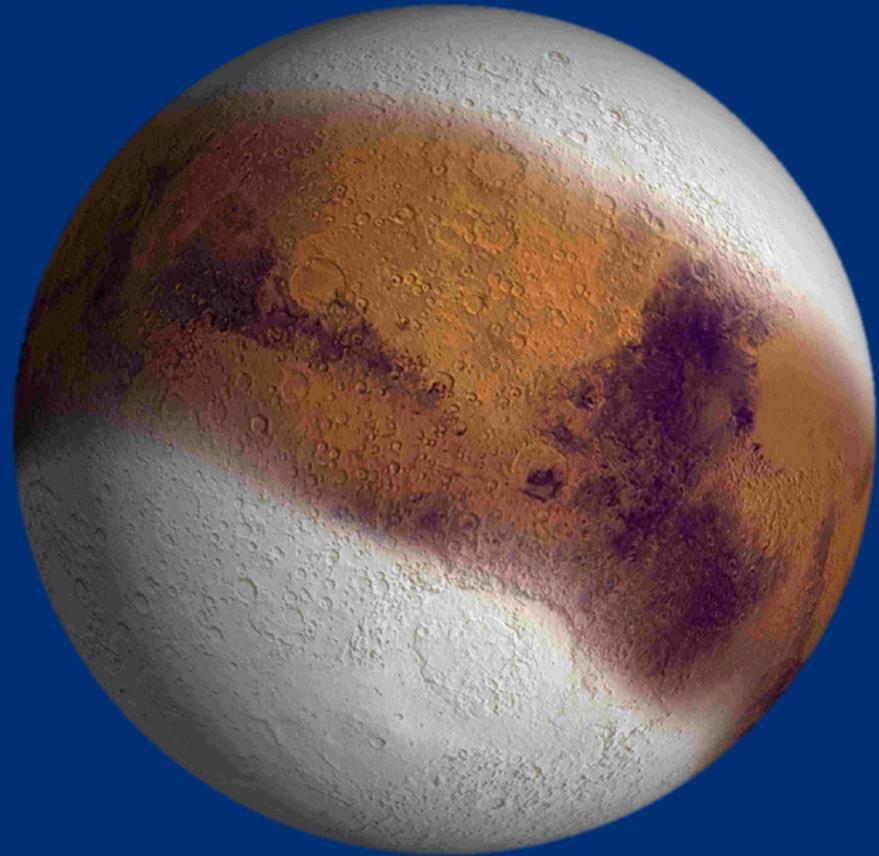
Jour +20°C

Nuit -140°C

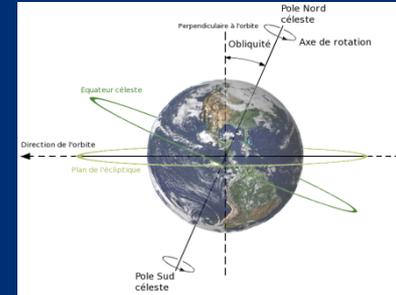
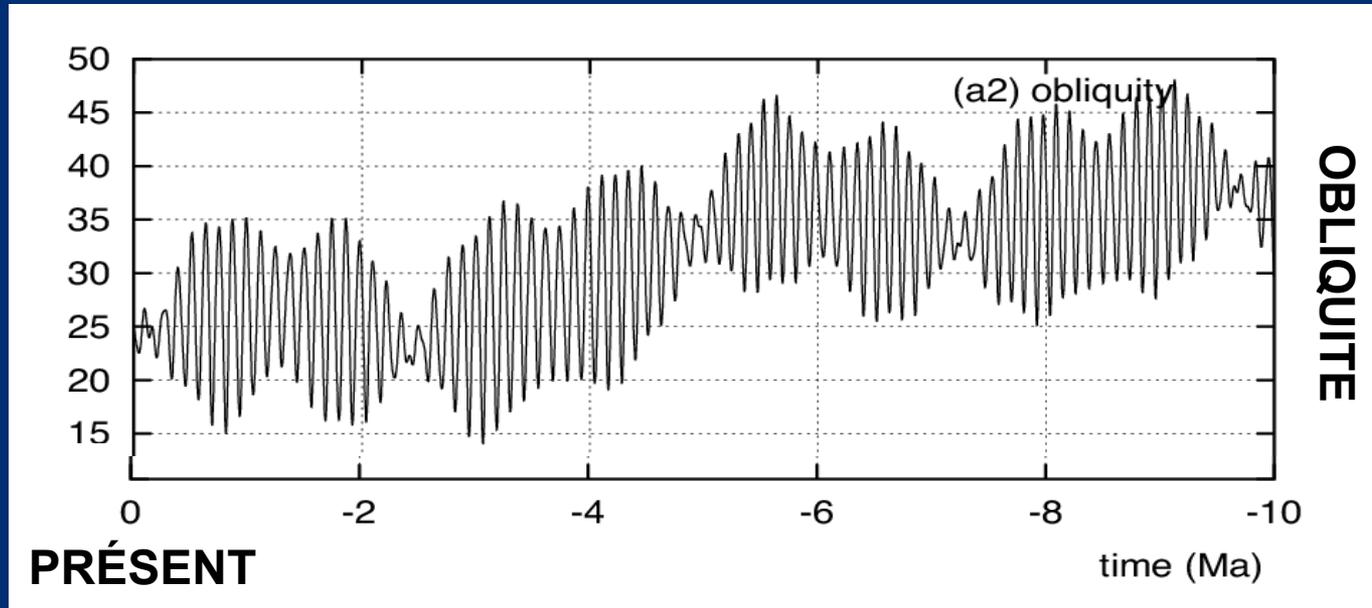
## Pression au sol :

6 à 8 mbar

150 fois plus faible  
que sur la TERRE



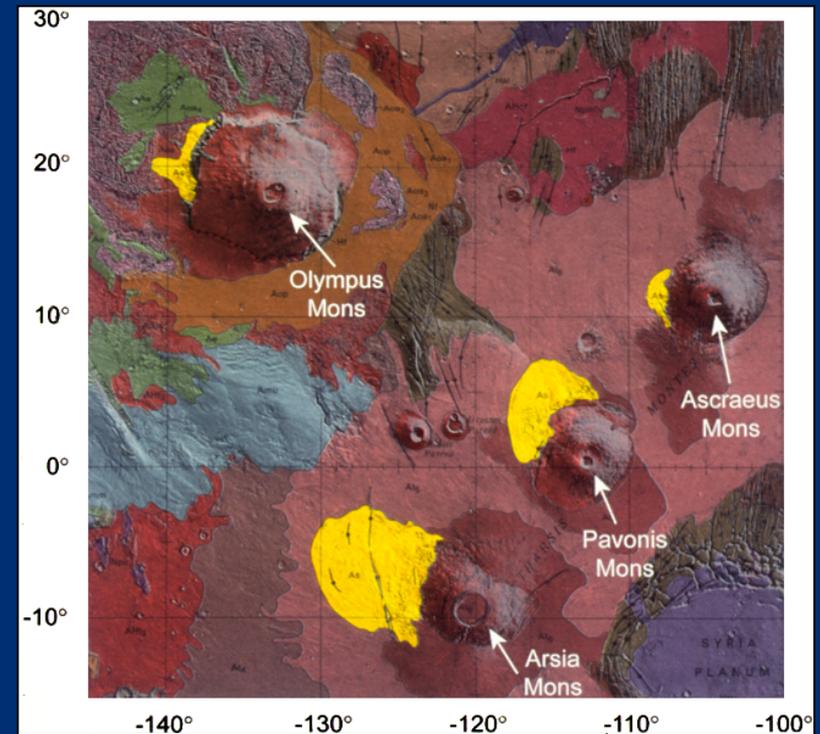
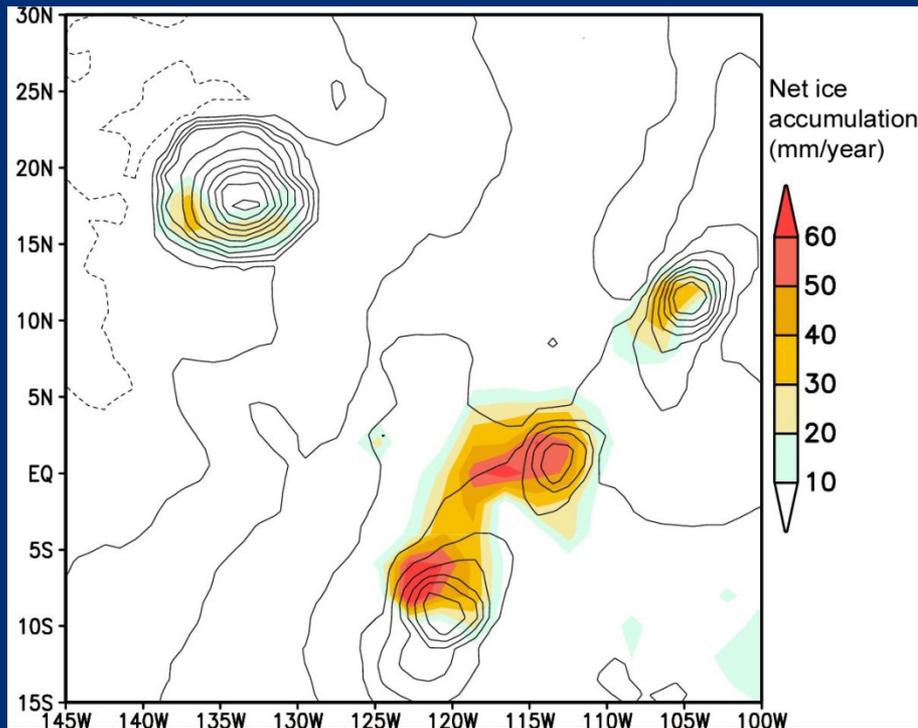
Les variations climatiques dans le passé récent de **Mars** sont liées aux modifications de son obliquité et de son orbite.



Pendant l'histoire de Mars, l'obliquité était d'environ  $41.8^\circ$   
(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

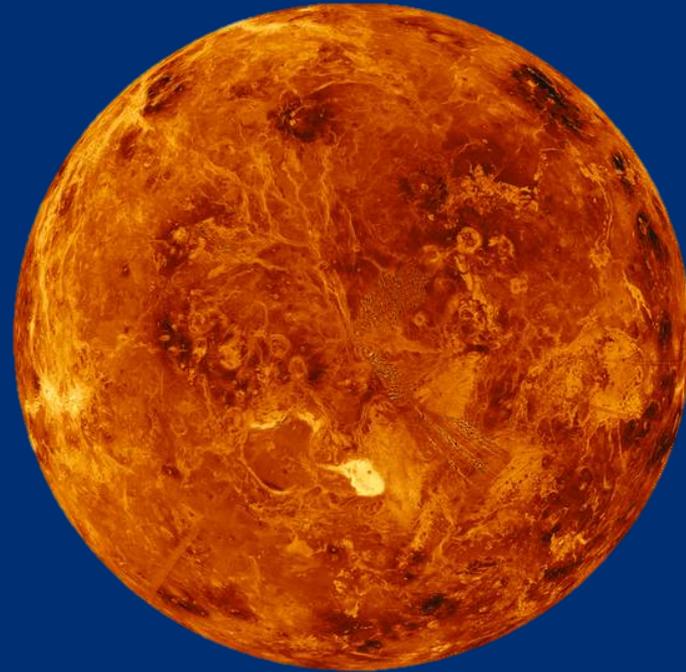


Dépôts et moraines caractéristiques de glacier à base froide

# LA PLANÈTE VENUS

**Température au sol :**  
470°C

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



# LA PLANÈTE TERRE

**Température au sol :**  
15°C

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

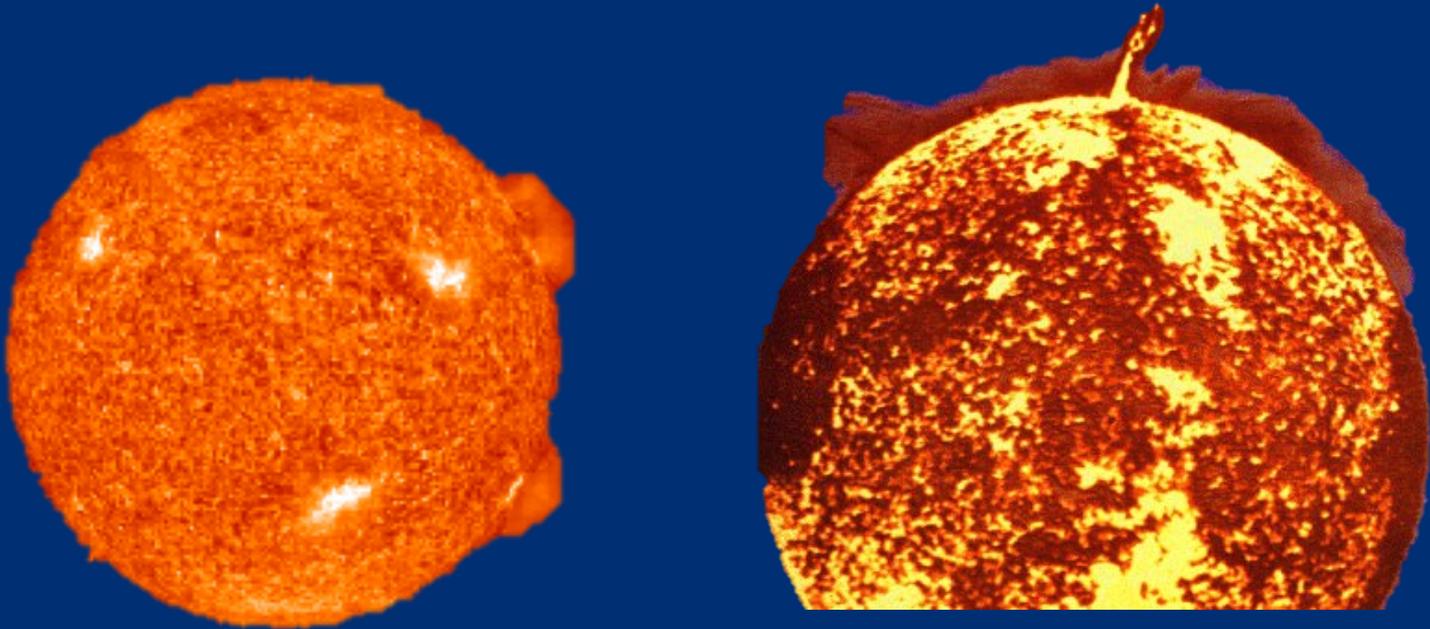


# LE TEMPS DU **MILLIARD** D'ANNÉES

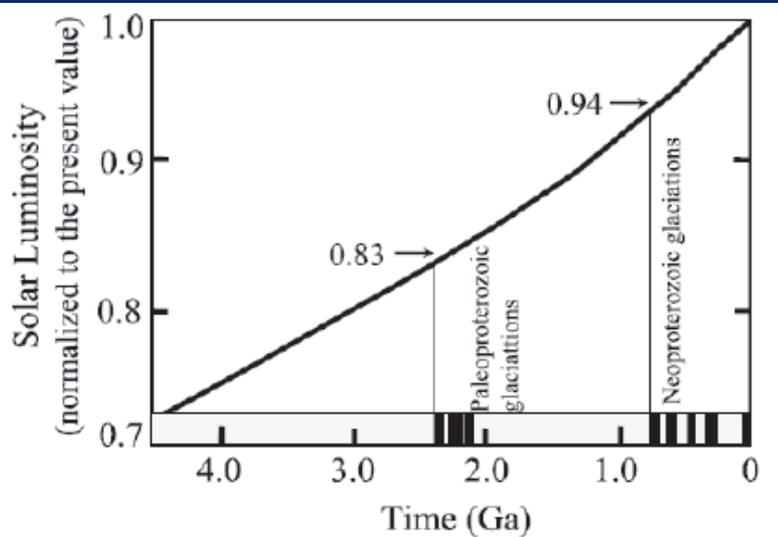
*Le temps de l'évolution du soleil*

# 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



# EVOLUTION DE L'INTENSITÉ LUMINEUSE DU SOLEIL



Formule de Gough (1981),

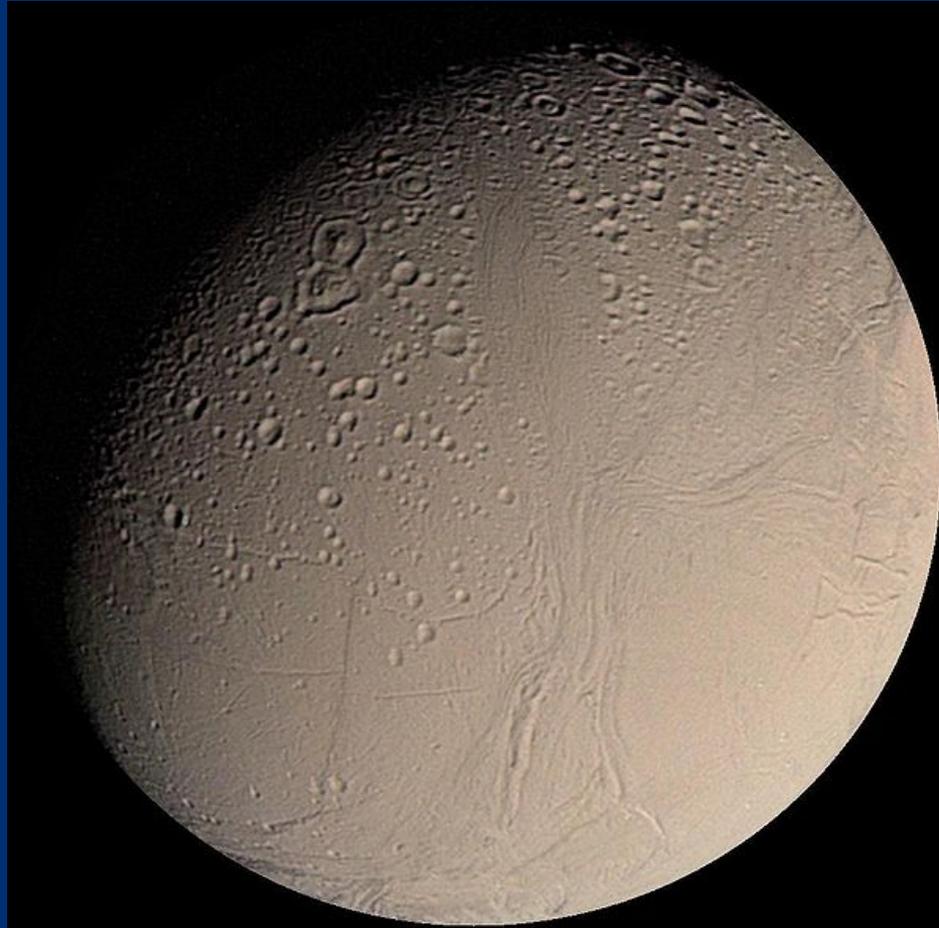
$$S = S_0 / (1 + 0.4t/t_0)$$

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

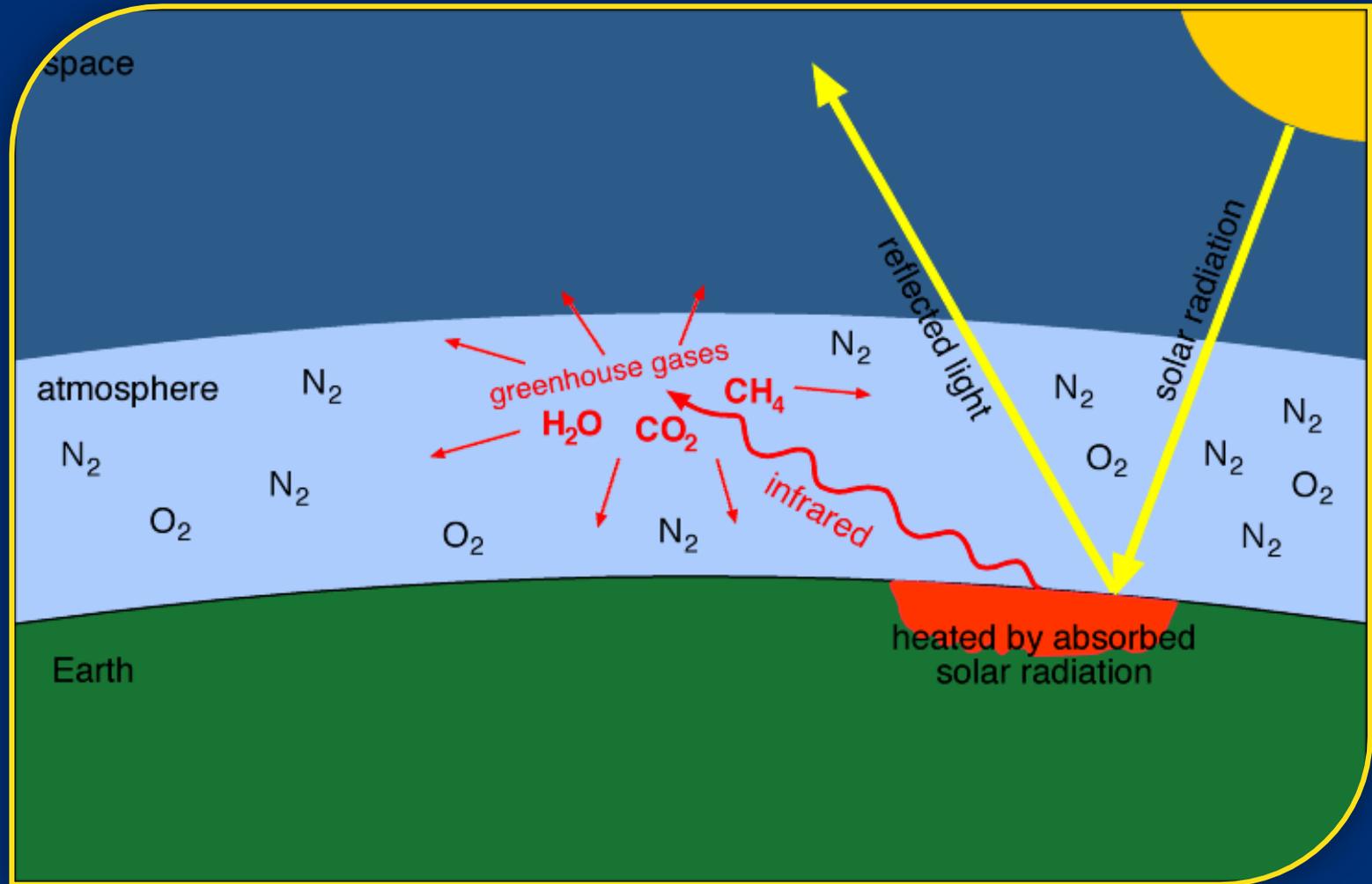
$t_0 = 4.6$  Ga, et  $t =$  temps (en Ga) avant l'époque présente.

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

# ENCELADE, SATELLITE NATUREL DE LA PLANÈTE SATURNE



# LES GAZ À EFFET DE SERRE ...



# **DEUX CRISES** GÉOLOGIQUES MAJEURES dans un paysage globalement chaud pendant 4 milliards d'années

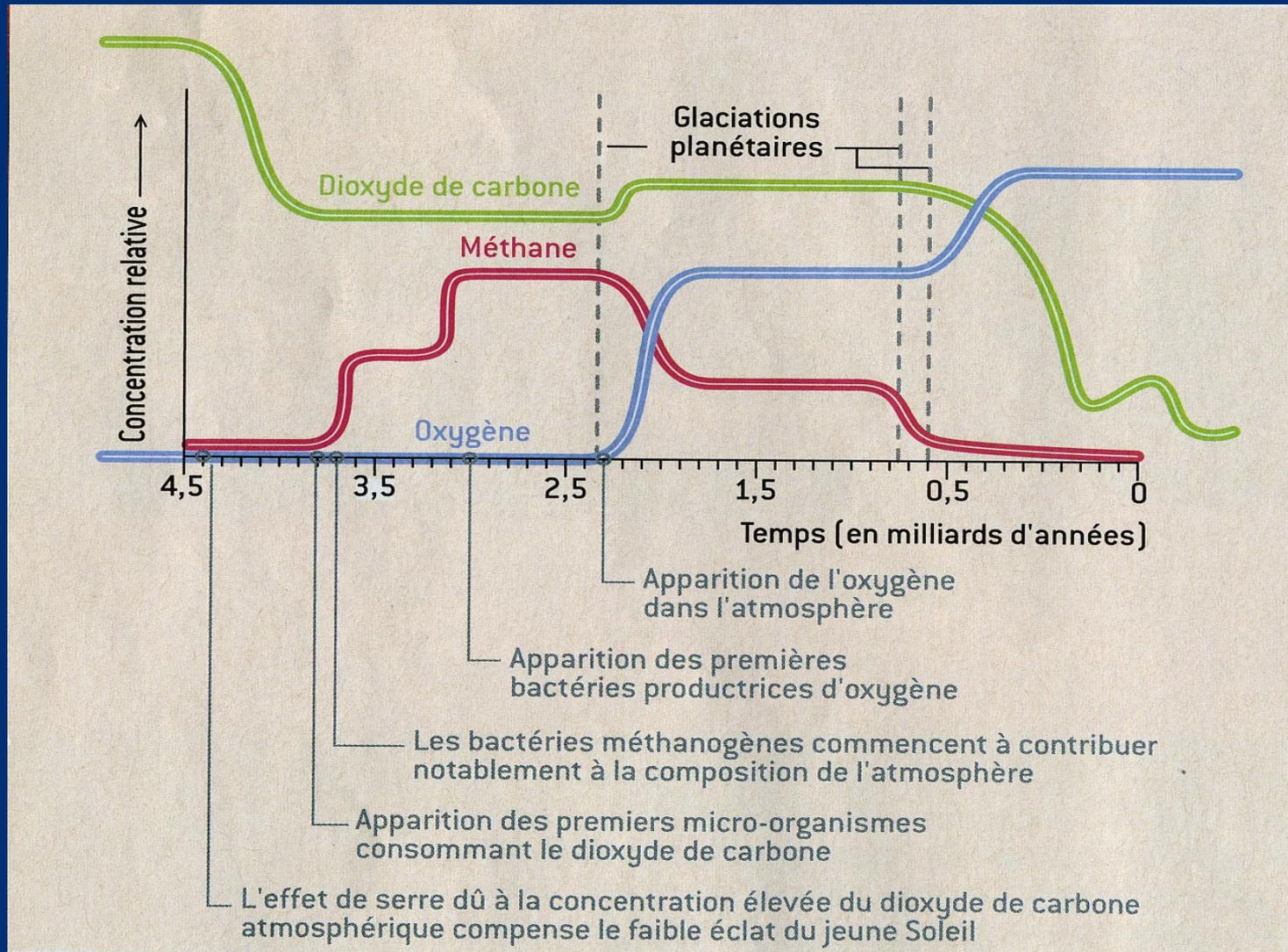
- 🌍 **Glaciation Huronienne ( 2.4 / 2.6 Ga)**

**Synchrone d'un effondrement du méthane lié à l'oxygénation de l'atmosphère**

- 🌍 **Glaciations Néoprotérozoïques (720 – 635 Ma)**

**Pour 750 Ma lié à l'effondrement du CO<sub>2</sub> (Tectonique et Volcanisme)**

# DEUX ACCIDENTS MAJEURS

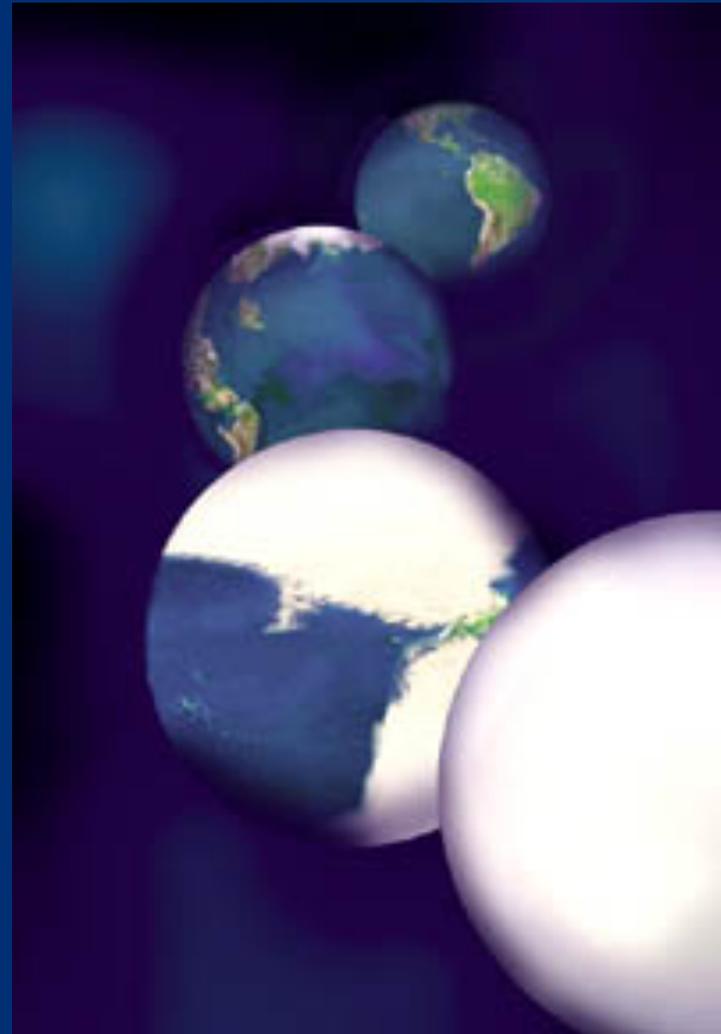


# LE TEMPS DE LA DIZAINE DE MILLIONS D'ANNÉES

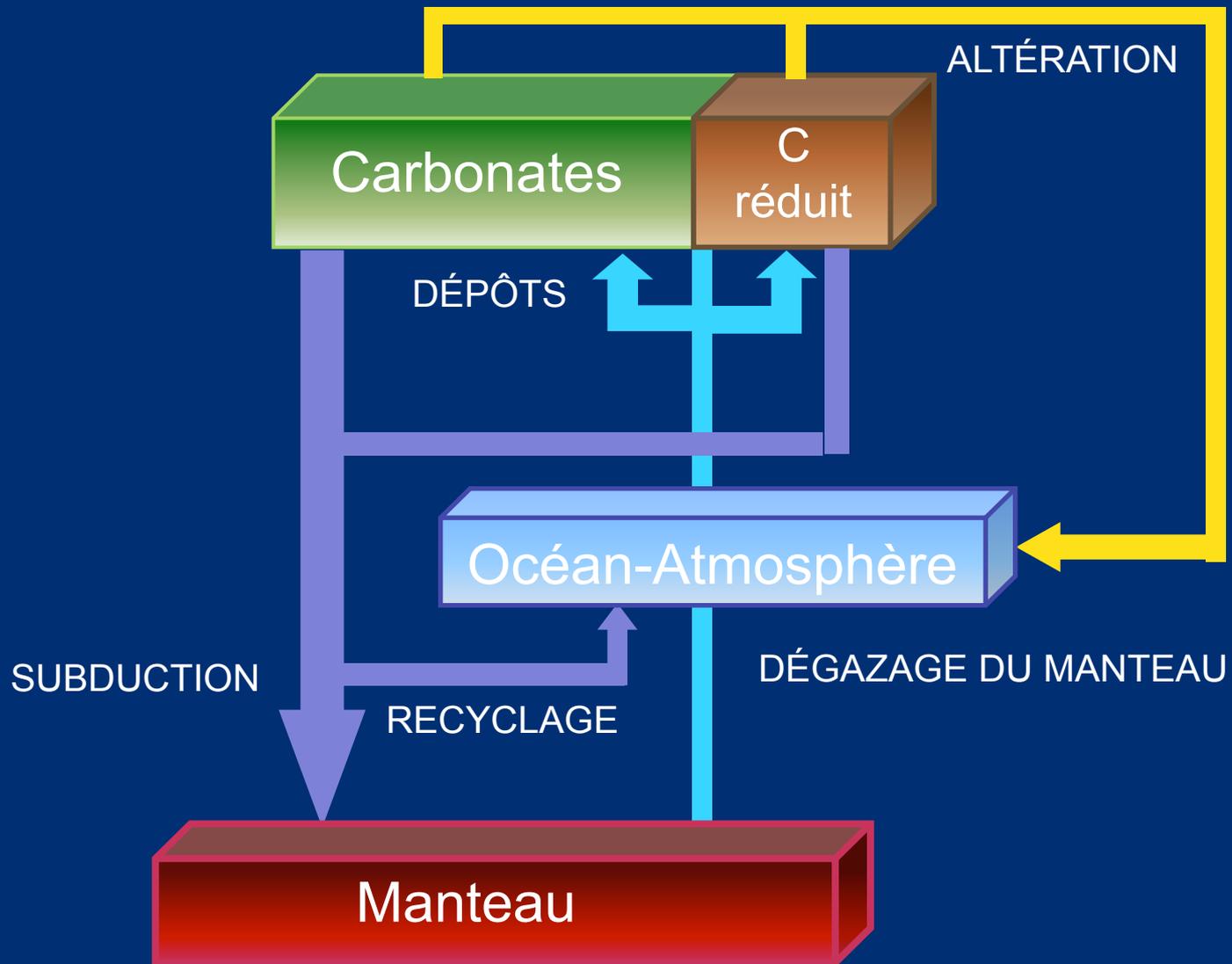
*Le temps de la tectonique,  
de la Dérive des continents*

UNE TERRE  
TOTALEMENT GELEE,

***EST-CE  
POSSIBLE?***



# CYCLE DU CARBONE ...

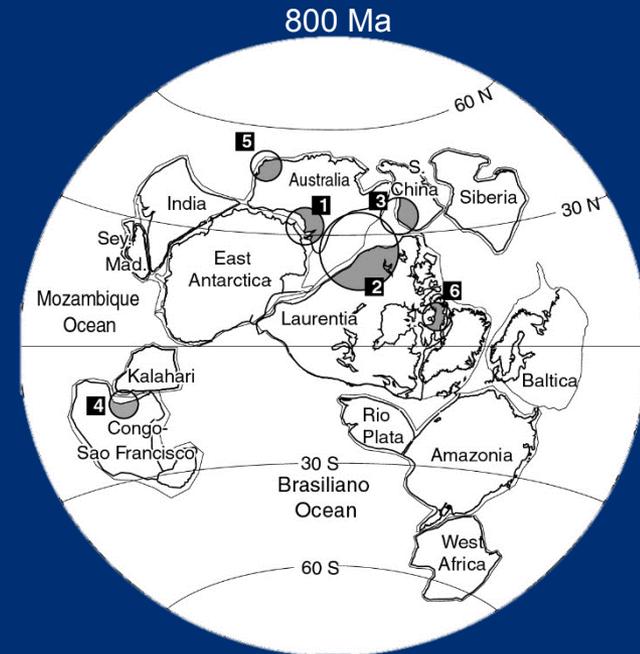
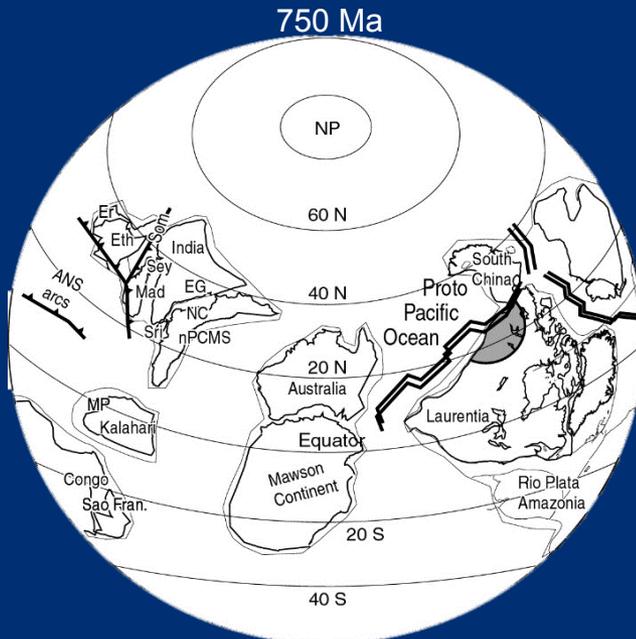


# MÉCANISMES DE REFROIDISSEMENT GLOBAL À LONG TERME

**1** - Apparition de traps successives

**2** - Position à basses et moyennes latitude des continents

**3** - Fragmentation du supercontinent Rodinia

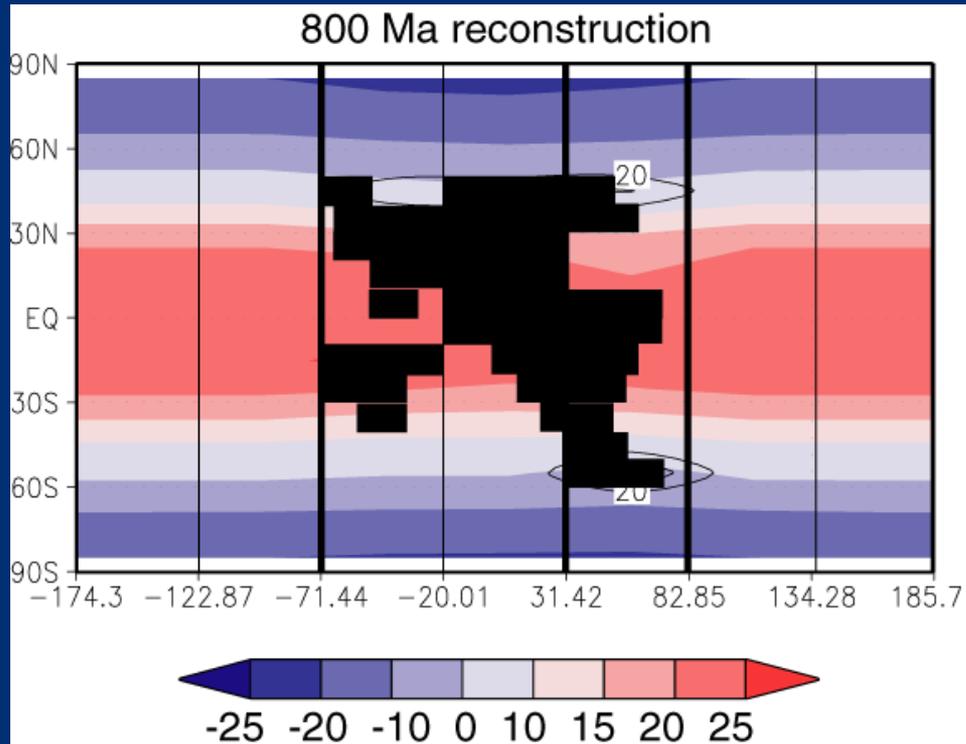


# LES PREMIERS RÉSULTATS ...

1 – A 800 Ma

Le modèle s'équilibre à un pCO<sub>2</sub> 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

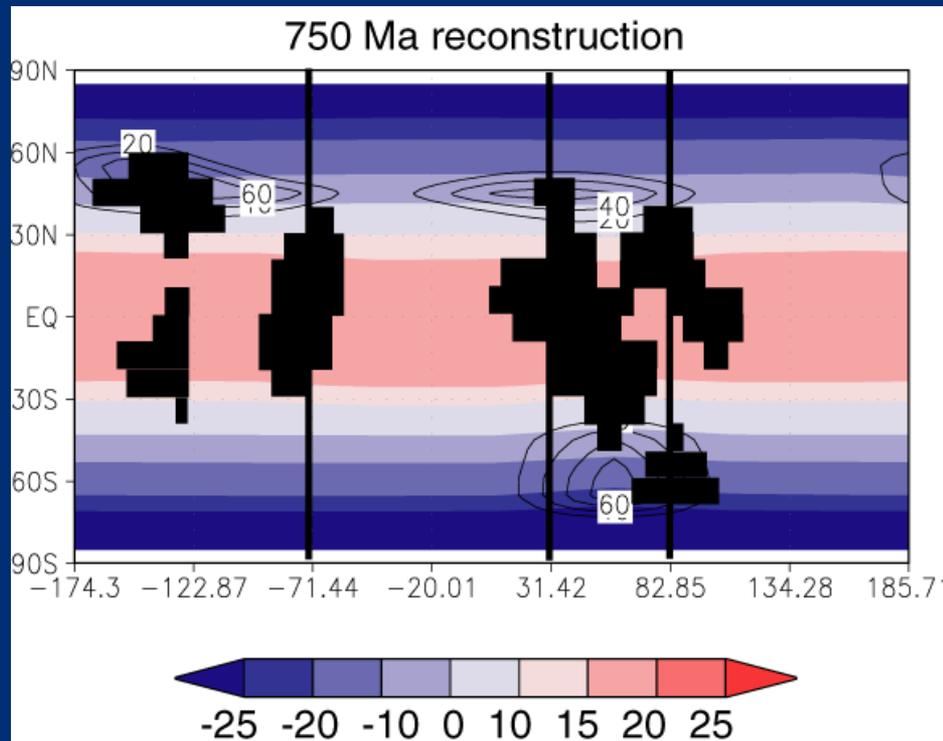
*Donnadieu et al, Nature 2004*

# LES PREMIERS RÉSULTATS ...

1 – A 750 Ma

Le modèle s'équilibre à un pCO<sub>2</sub> d'environ 500 ppm  
Réduction de 1300 ppm

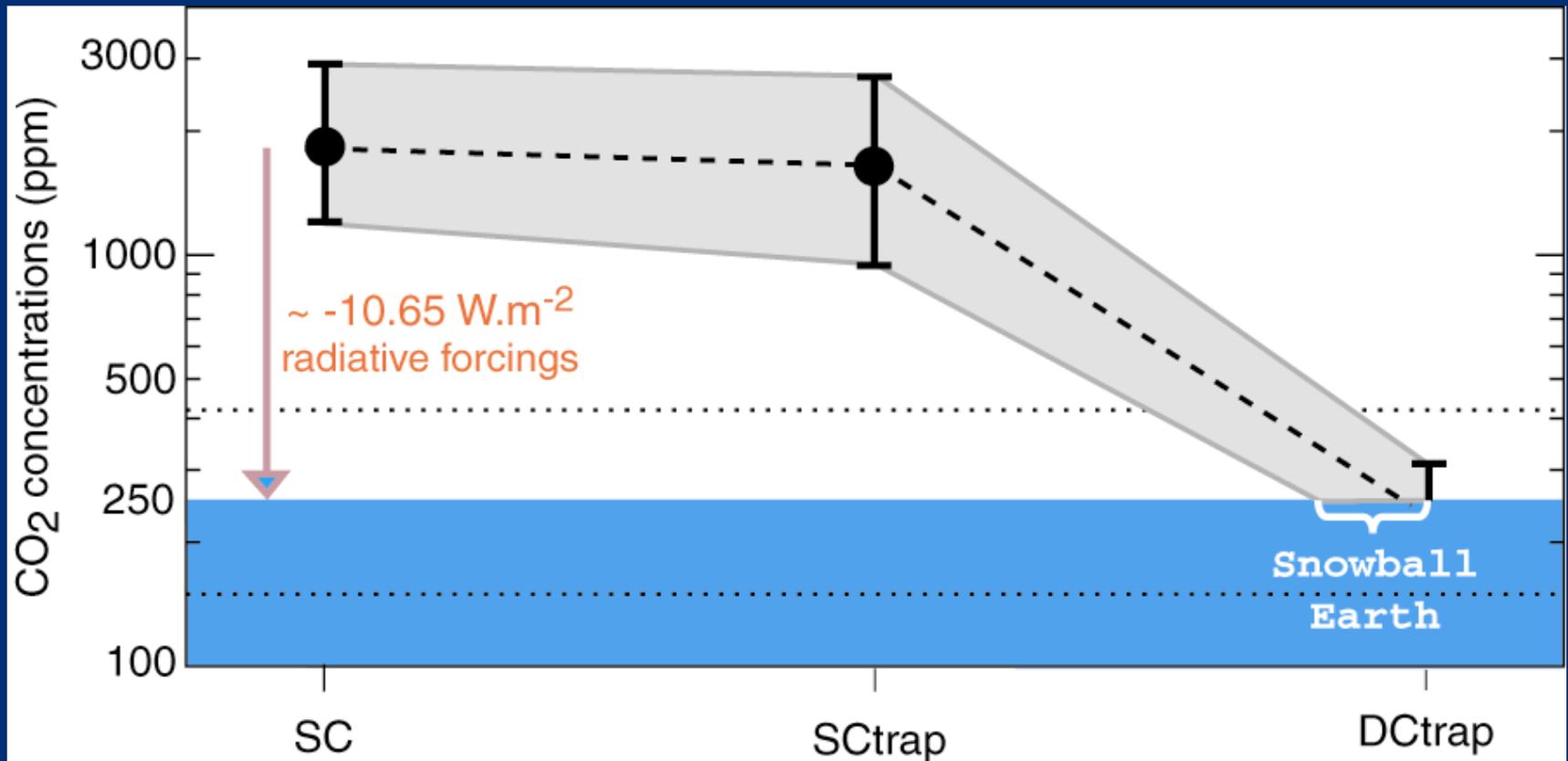
Soit une température globale moyenne de 2°C  
Réduction de 8.2°C



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

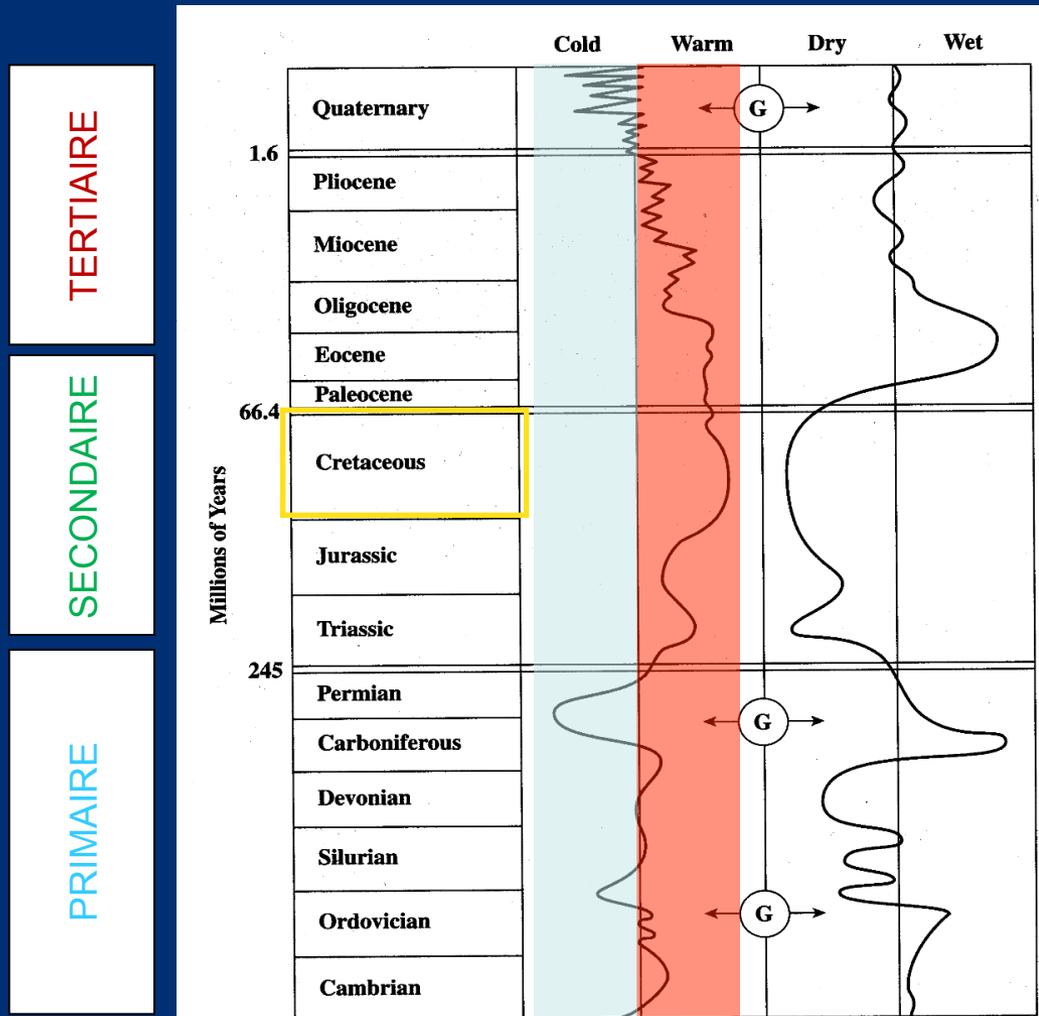


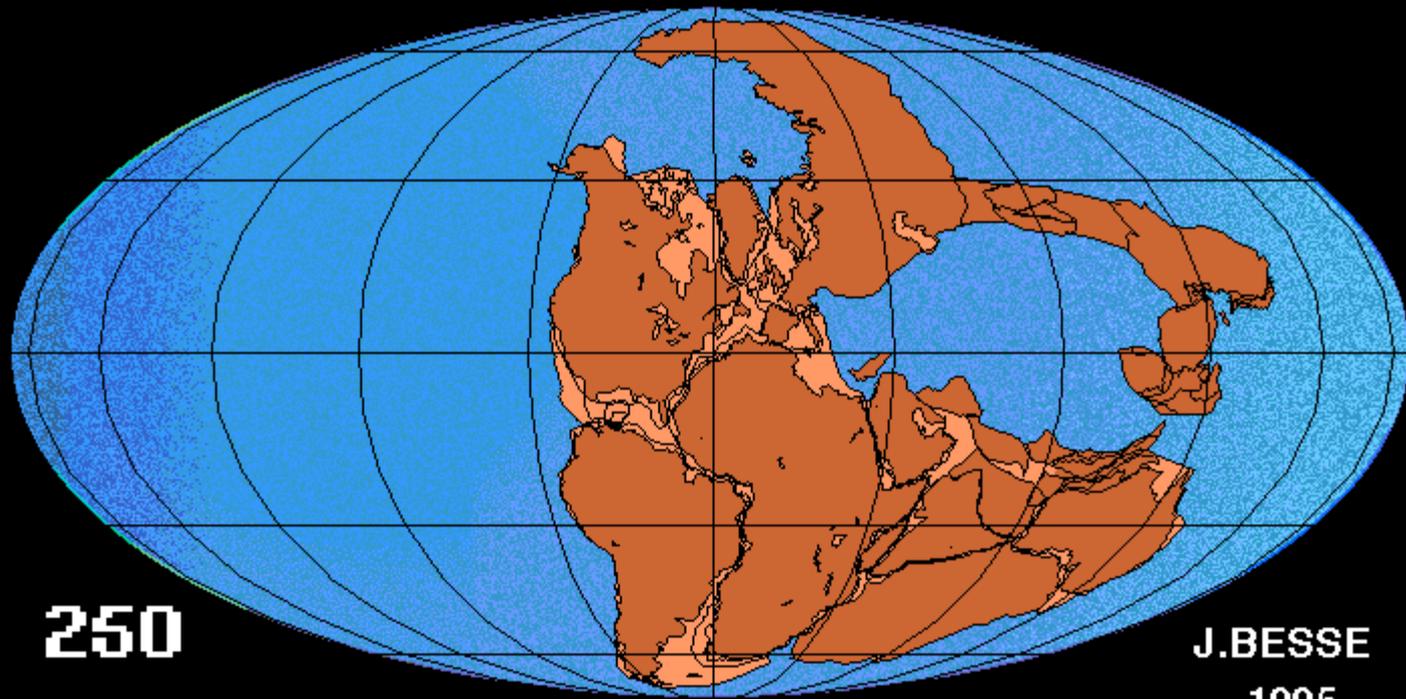
# IMPACT SUR LE CO<sub>2</sub>



# LES PÉRIODES CLIMATIQUES CHAUDES

représentent **75%** des 540 derniers millions d'années





**250**

**J.BESSE  
1995**

# LE CRÉTACÉ

la référence en matière de climat globalement chaud



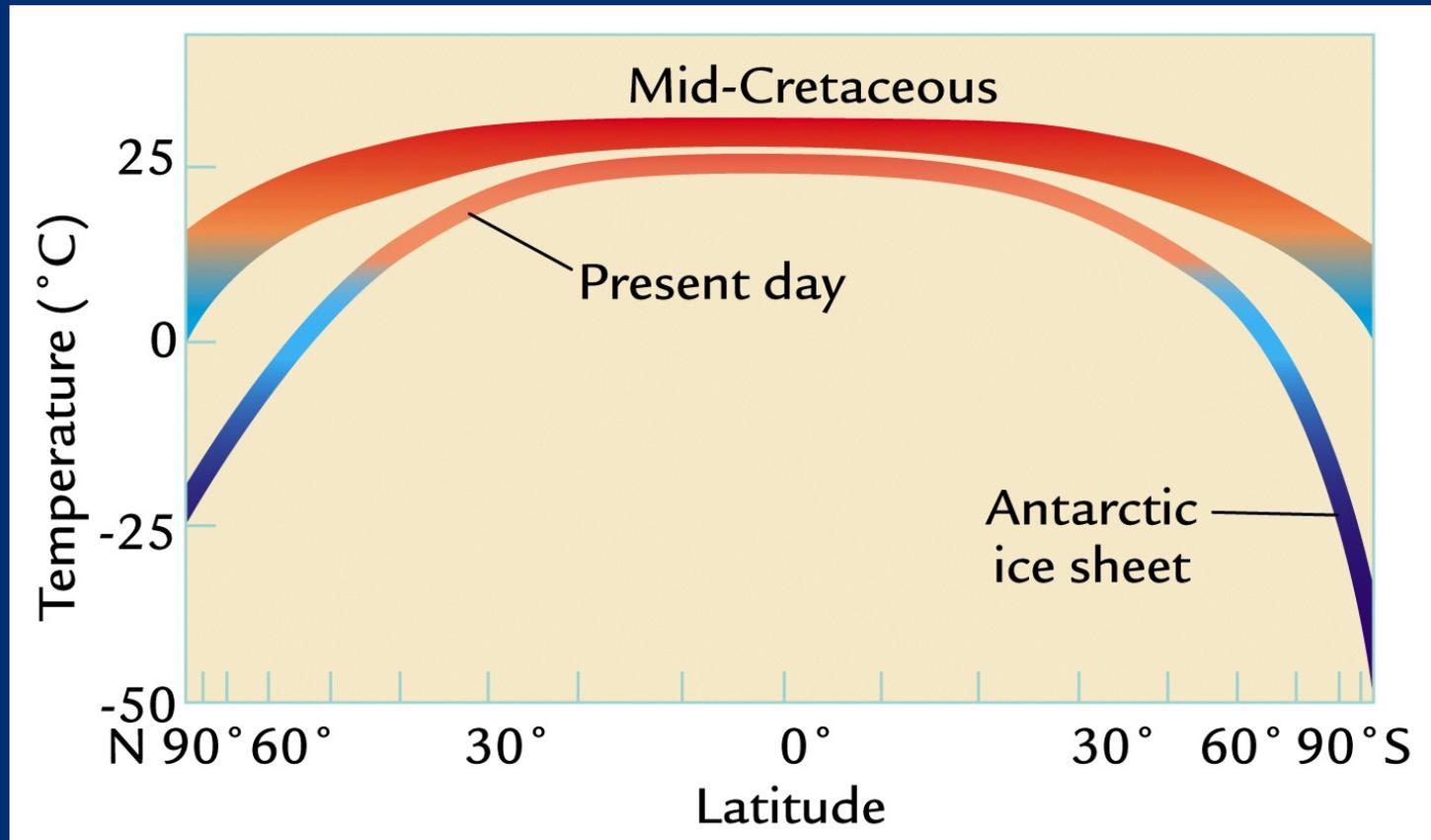
*Dinosaures sur l'île d'Axel Heiberg (72°N)*



*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 $6^{\circ}\text{C}$ supérieur à l'actuel



# CONTEXTE : MÉCANISMES D'ENGLACEMENT POSSIBLES

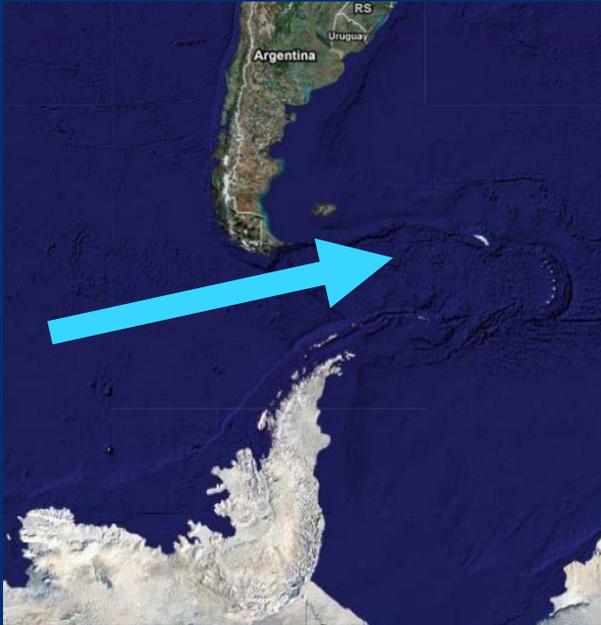
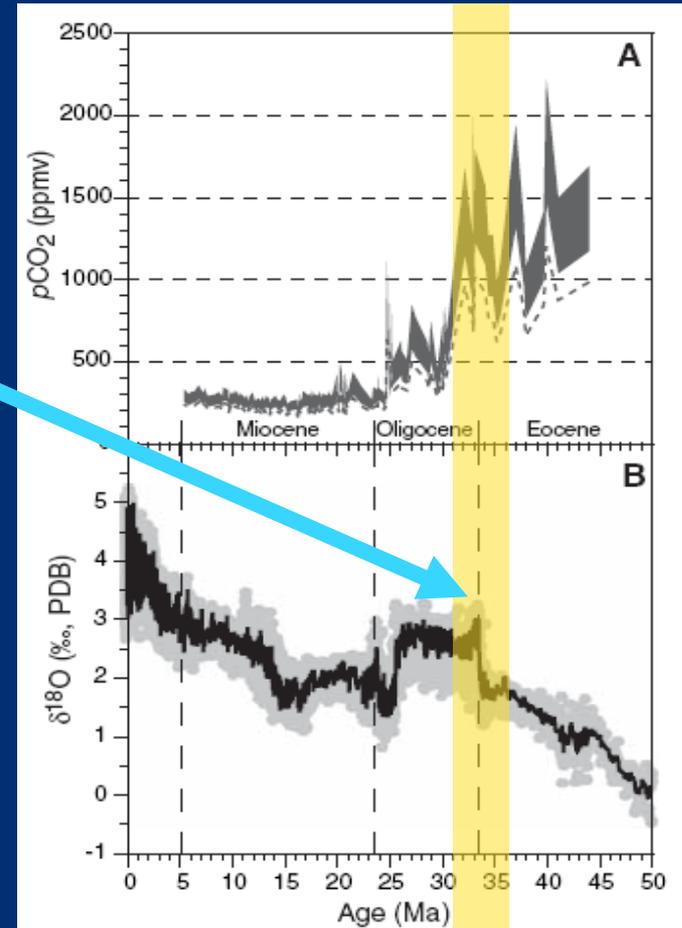


Image from google maps

La limite  
Eocene -  
Oligocène



1. Ouverture et approfondissement du passage de Drake (PD). Formation du courant circum polaire antarctique et isolement thermique du continent antarctique

*Livermore et al., 2005; Livermore et al., 2007*

2. Accélération de la baisse du CO<sub>2</sub> à long terme

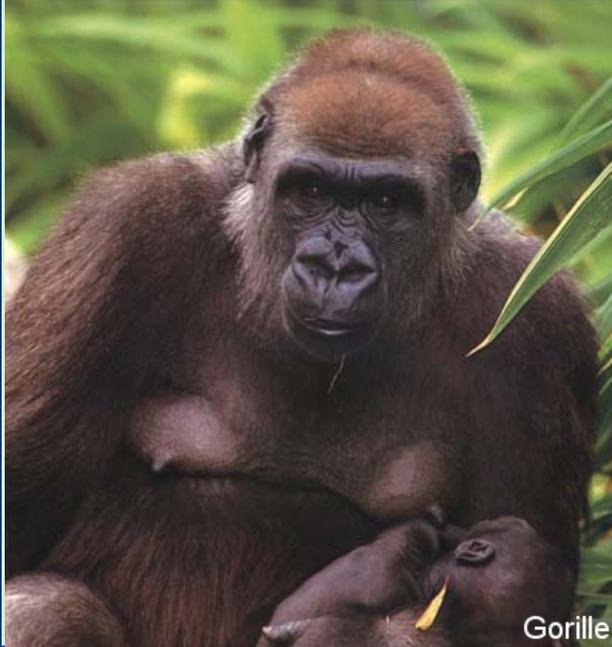
*Pagani et al., 2005*



Chimpanzé



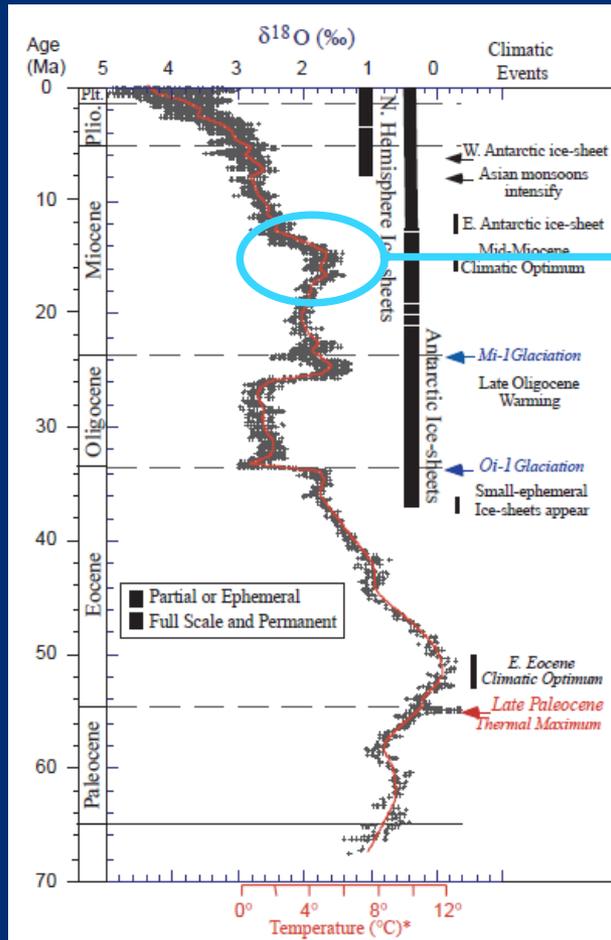
Orang-Outan



Gorille

©primates.com

# INTRODUCTION DONNÉES MÉTHODE RÉSULTATS CONCLUSIONS/PERSPECTIVES



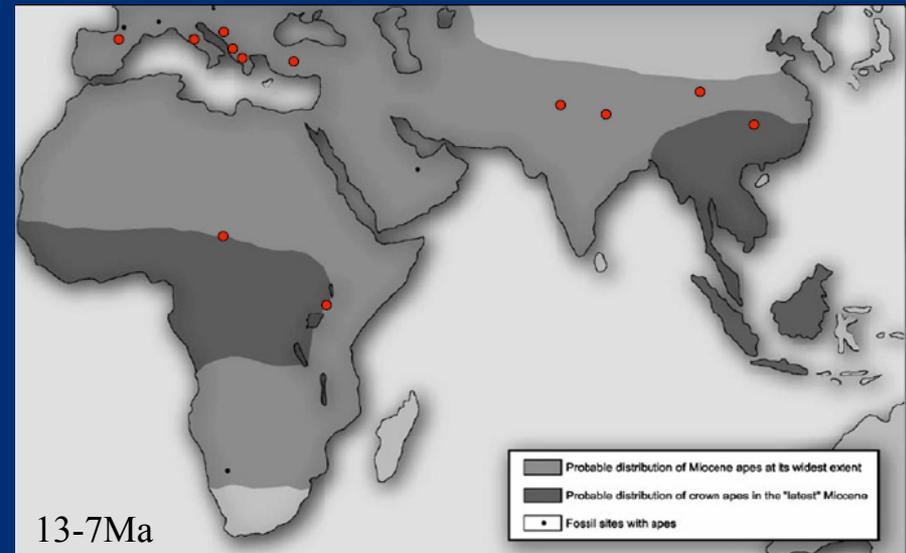
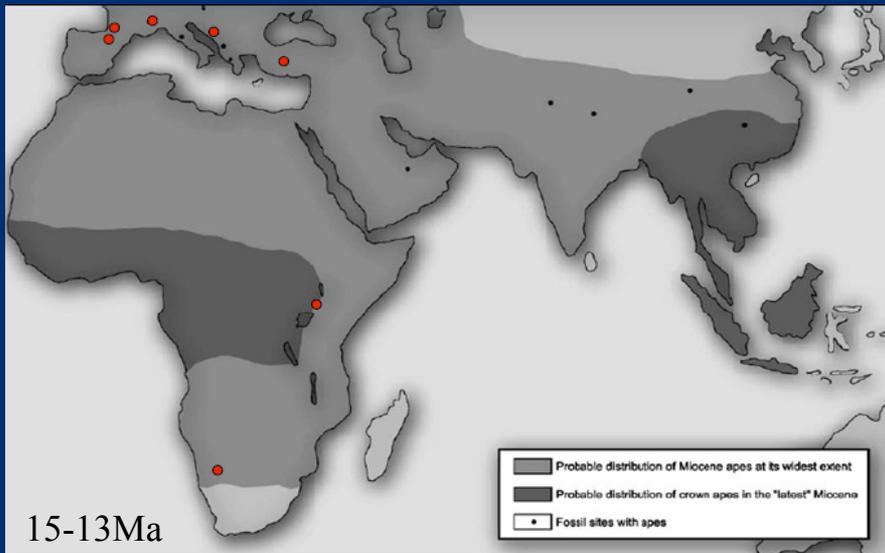
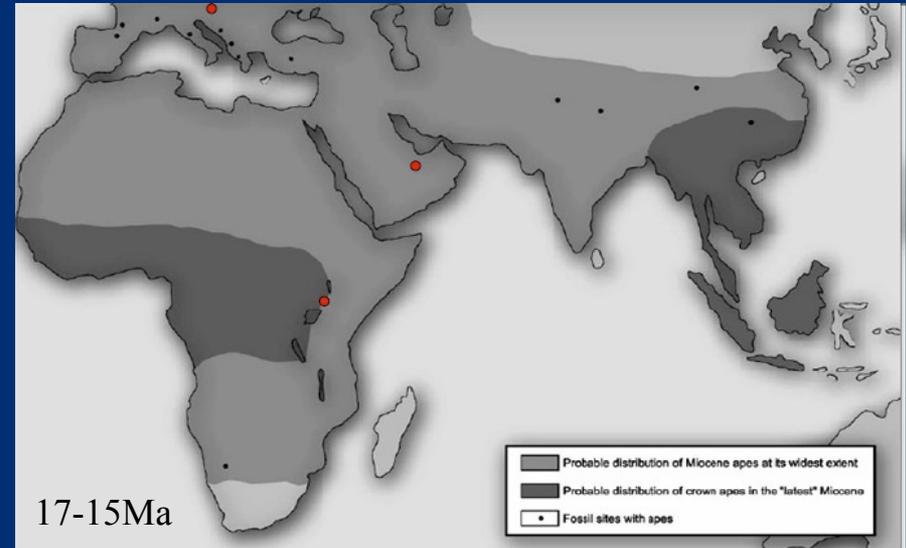
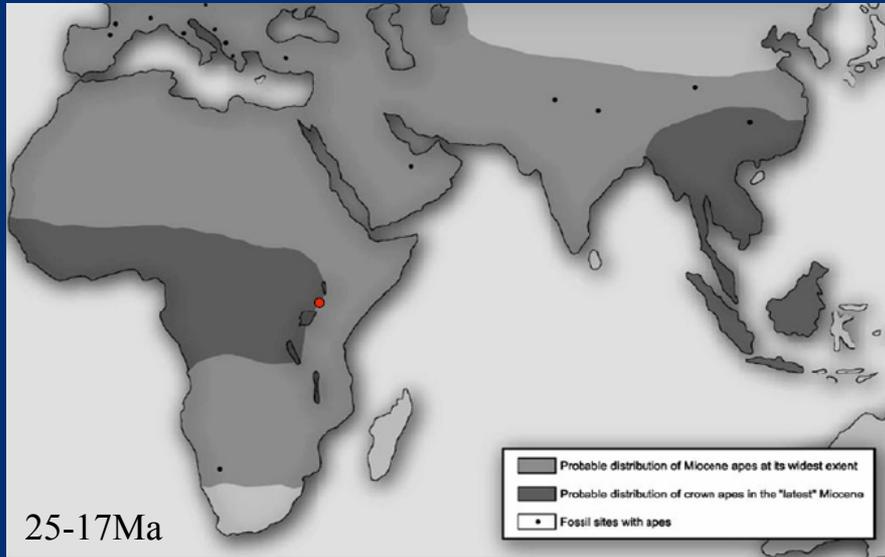
Zachos et al., 2001

- 🌍 Dernière période chaude du Cénozoïque
- 🌍 Réchauffement de quelques millions d'années dans une tendance au refroidissement
- 🌍 Causes du réchauffement encore débattues

# REGISTRE DES FOSSILES

## Fossil Hominoids

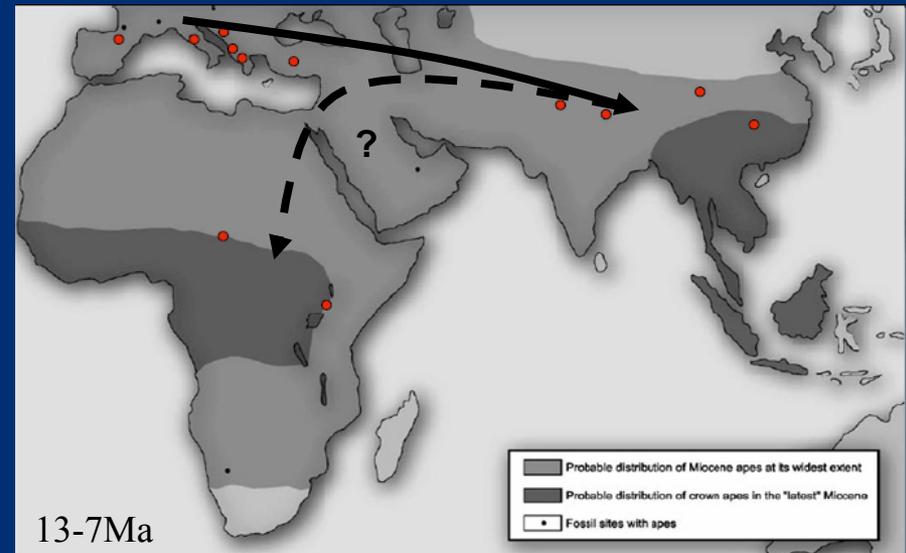
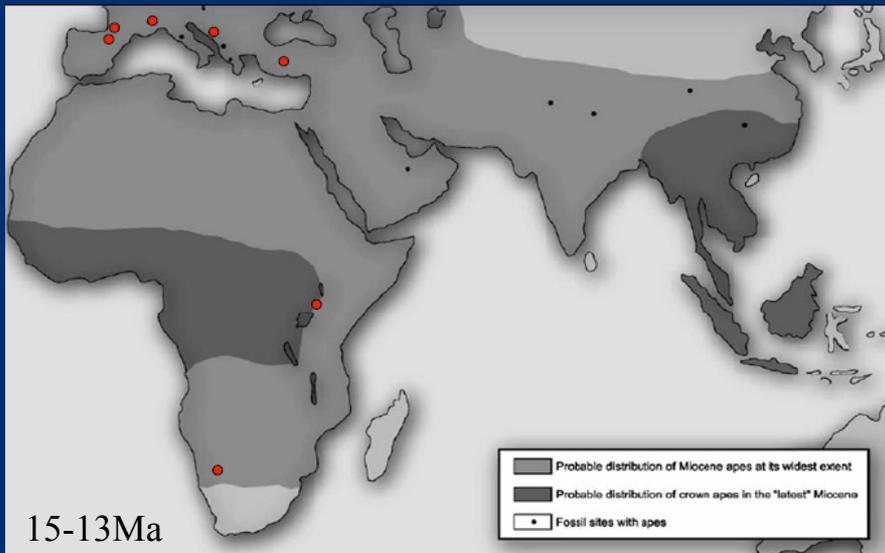
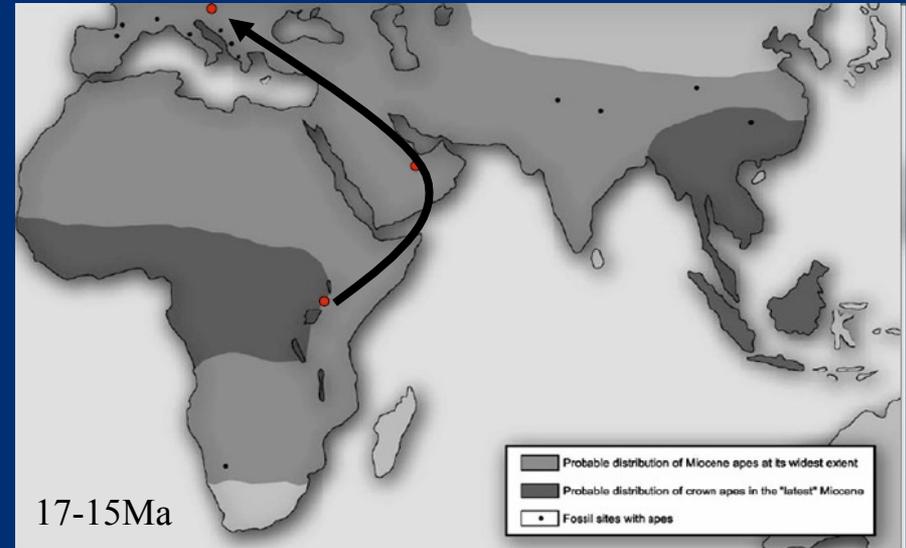
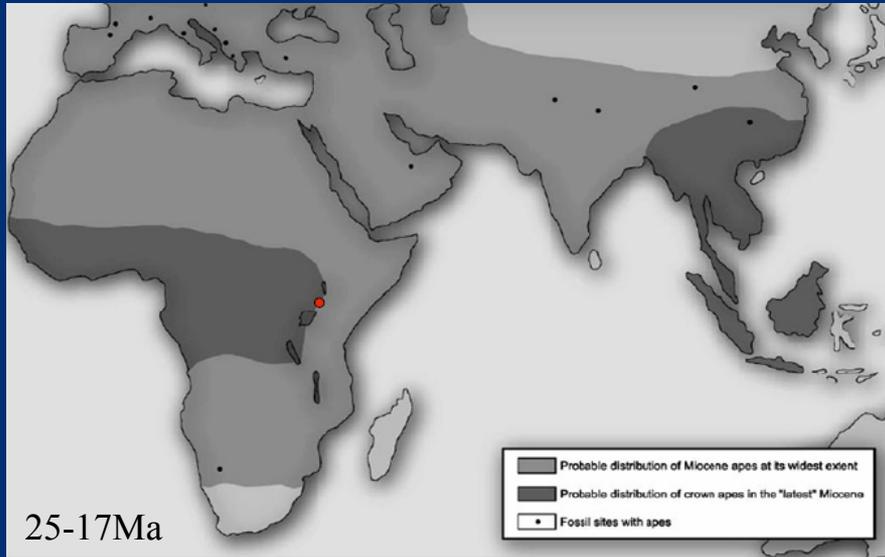
*Pilbeam & Young, 2004*



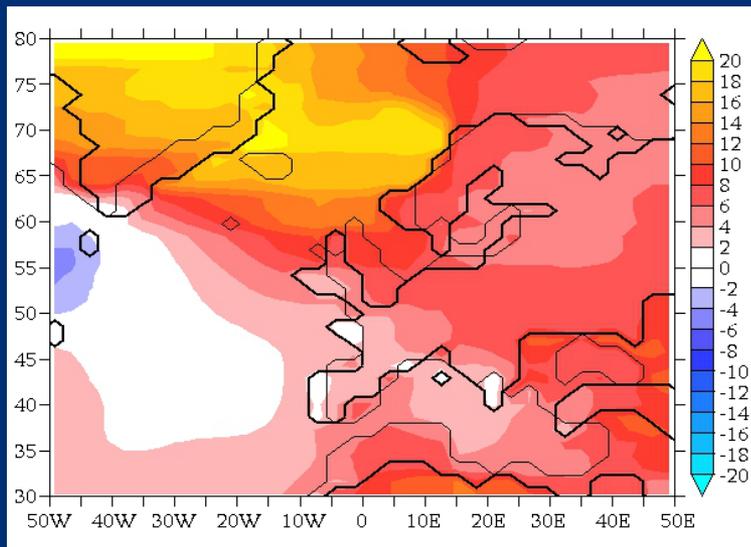
# REGISTRE DES FOSSILES

## Fossil Hominoids

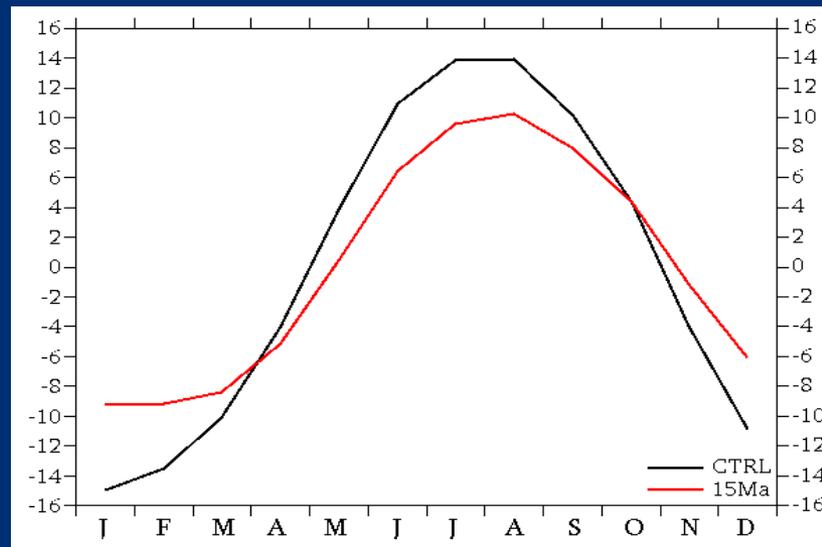
*Pilbeam & Young, 2004*



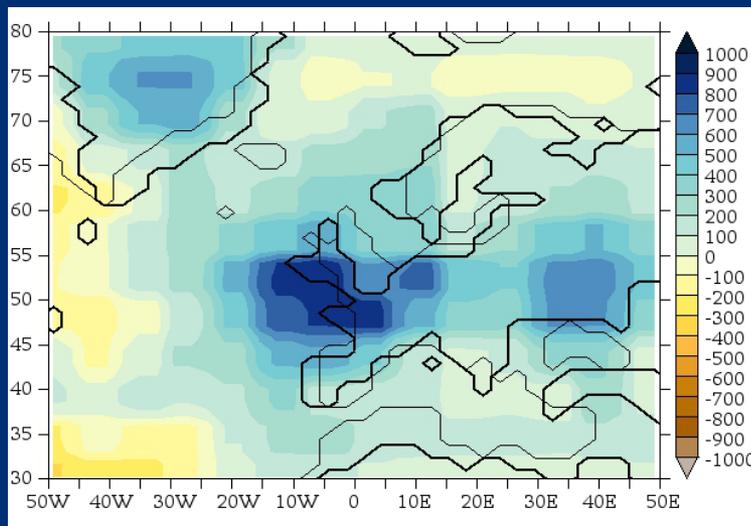
# CHANGEMENT CLIMATIQUE



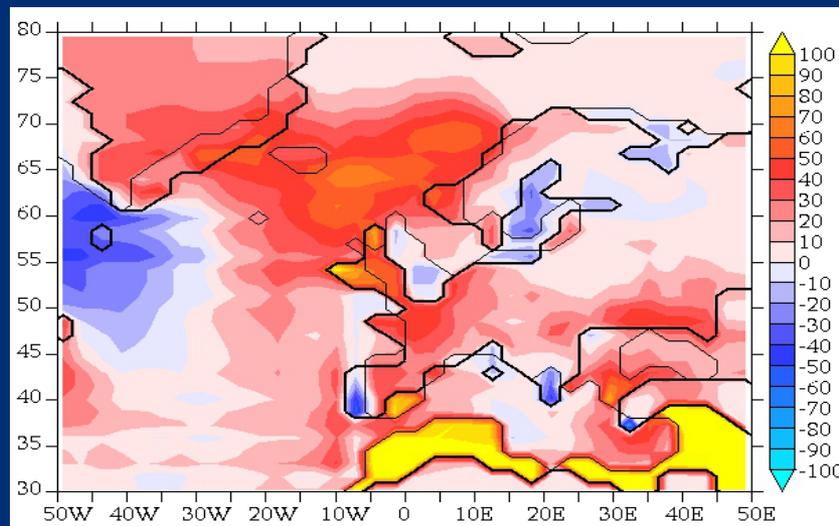
Mean Annual Temperature Anomaly (°C) : 15Ma-CTRL



Monthly Temperature - Mean Annual Temperature (°C)

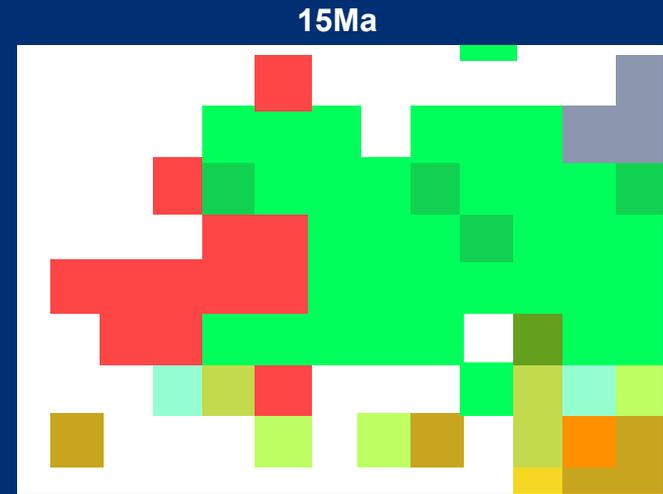
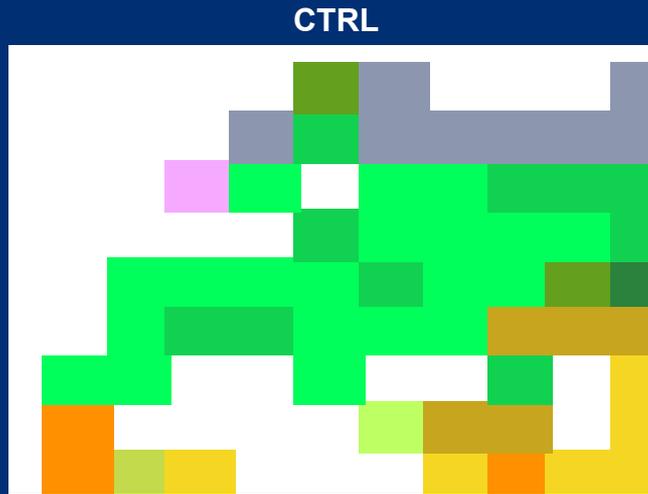


Mean Annual Precipitation Anomaly (mm) : 15Ma-CTRL



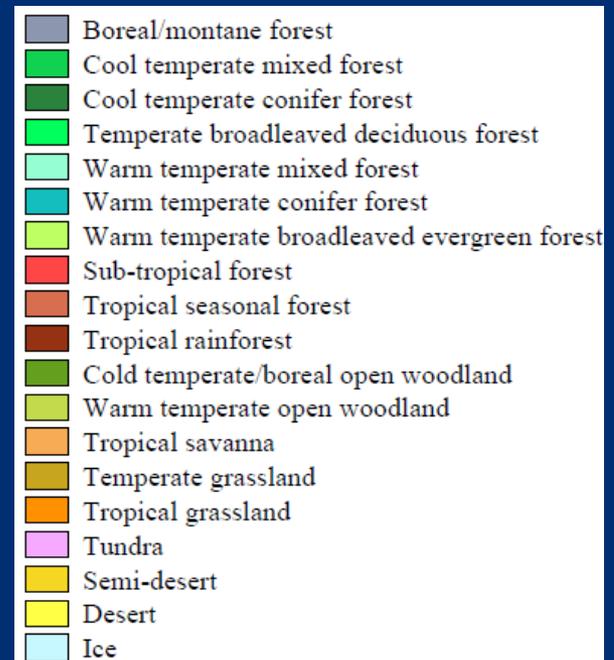
Mean Annual Evaporation Anomaly (mm/mth) : 15Ma-CTRL

# CHANGEMENT DE LA VÉGÉTATION

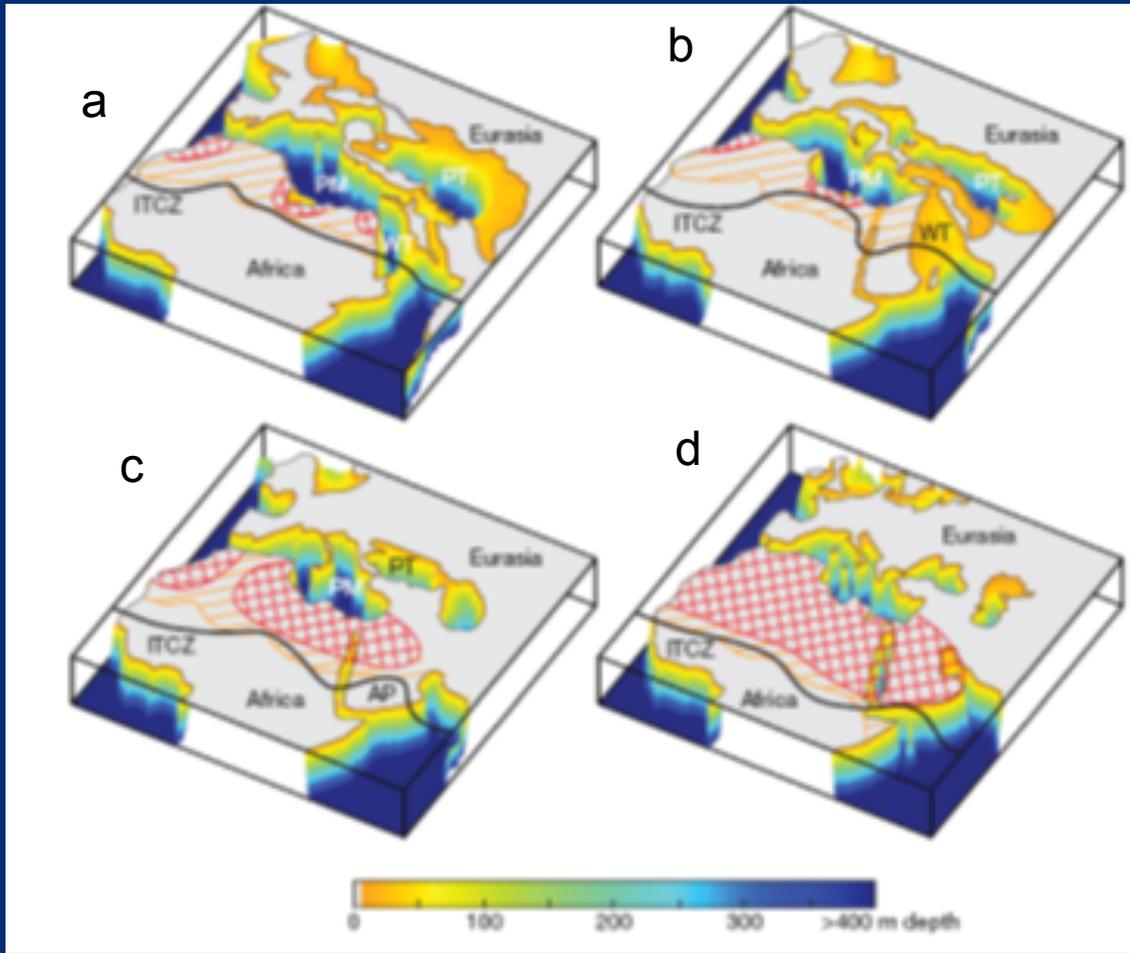


Development of Subtropical forest due to warmer and more humid conditions, with reduced seasonal contrast.

- 🌐 Consistent with data in Europe
- 🌐 Allows apes to disperse in Europe



# DISPARITION DE LA MER ÉPICONTINENTALE TÉTHYS



a. Fin de l'Oligocène  
[33- 28 Ma]

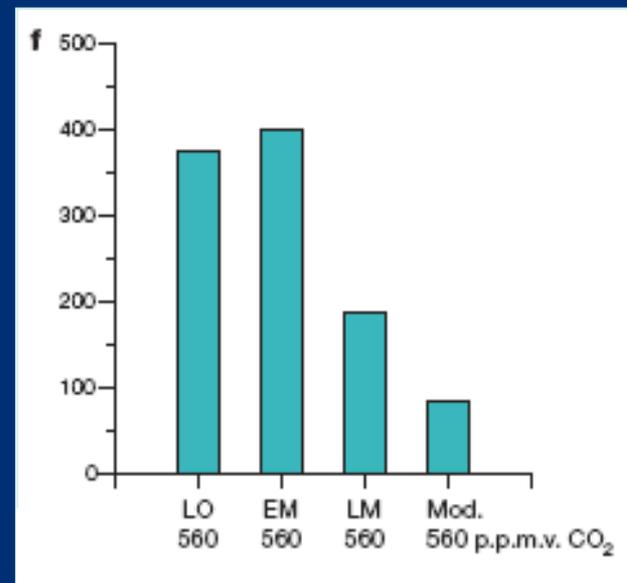
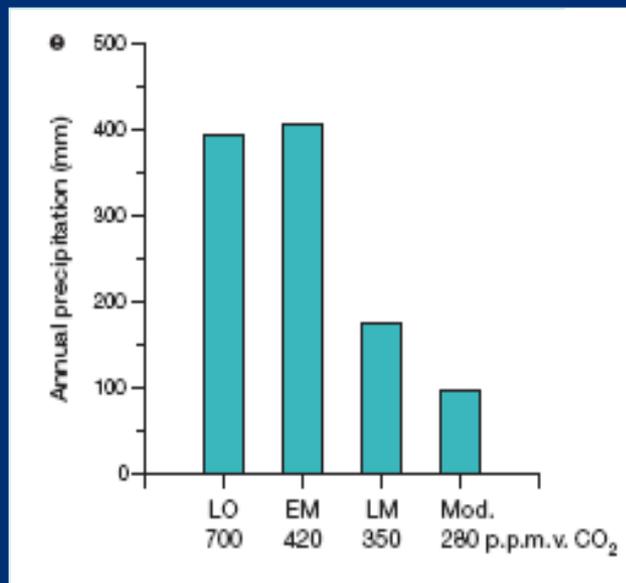
b. Début du Miocène  
[20-17]

c. Fin du Miocène  
[11-7 Ma]

d. Présent

# EVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS SUR L'AFRIQUE DU NORD

Precipitation annuelle moyenne sur la zone entre 25°N et 35°N, 12°O et 38° E



**LO.** Fin de l'Oligocène [33- 28 Ma]  
**EM.** Début du Miocène [20-17]  
**LM.** Fin du Miocene [11-7 Ma]  
**Mod.** Présent

*Zhang et al; Nature 2014*

# AMPLIFICATION DE LA RÉPONSE CLIMATIQUE AUX VARIATIONS ORBITALES

Réponse climatique pendant la saison d'été dans l'hémisphère Nord avant et après le retrait de la mer Thétys.

Sont illustrées : les précipitations en mm (dégradé de couleurs) et le vent à 850hPa pendant la saison estivale (JJA) (flèches)

a. Une grande Mer Thétys  
b. Conditions actuelles

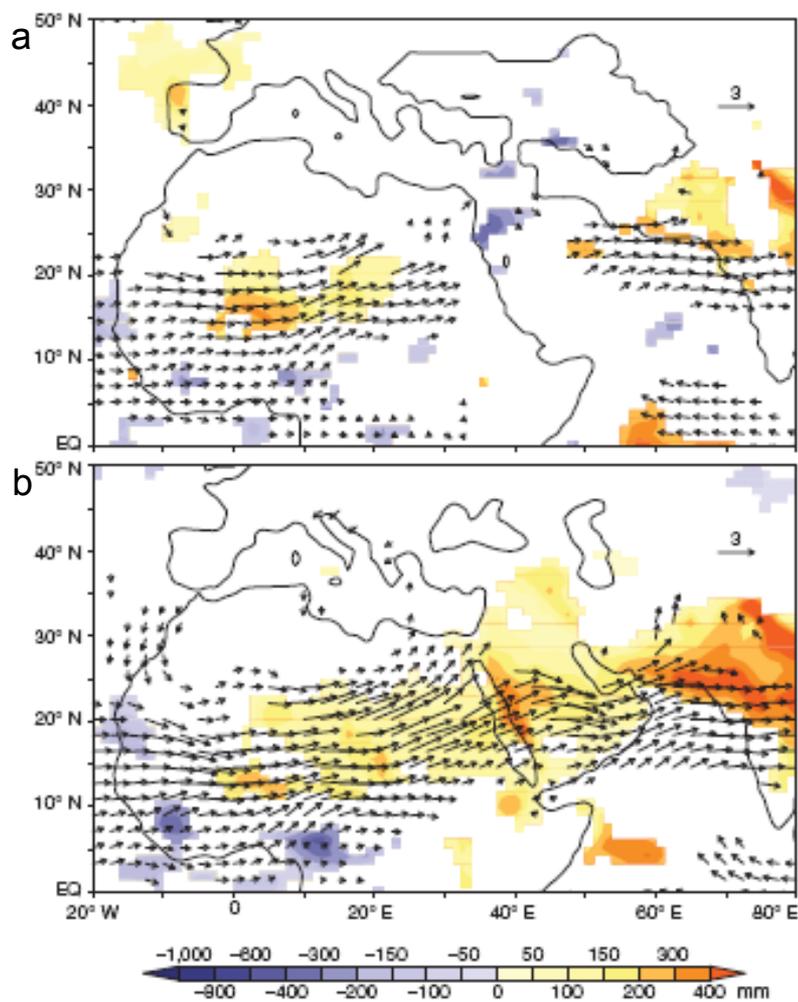
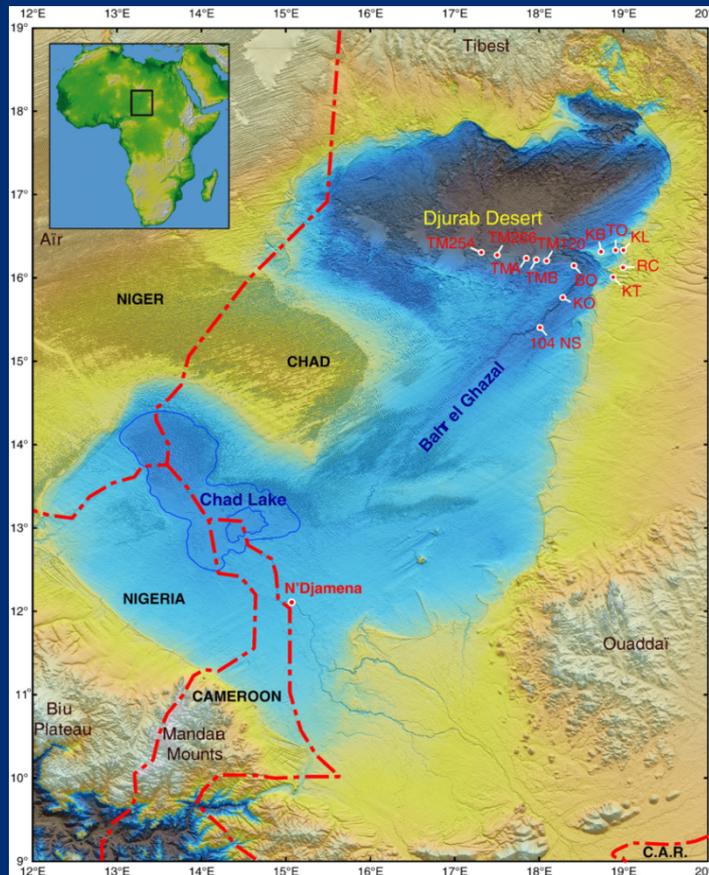


Figure 4 | Climate response to increased summer insolation in the Northern Hemisphere before and after Tethys shrinkage. Response in annual precipitation (mm, shading) and 850-hPa summer winds ( $\text{ms}^{-1}$ , arrows) to a change in orbital parameters from today to 6 kyr ago (higher minus lower Northern Hemisphere summer insolation) for continental configuration with a large Tethys (a) and a modern land-sea distribution (b). Only changes that are significant at the 95% confidence level (two-tailed unequal  $t$ -test) are shown.

# MEGALAKE CHAD AND HOMINIDS



Surface ~ 300 000 km<sup>2</sup>



Abel, 3.6 Ma (Brunet et al., 1995)



Toumaï, 7 Ma (Brunet et al., 2002)

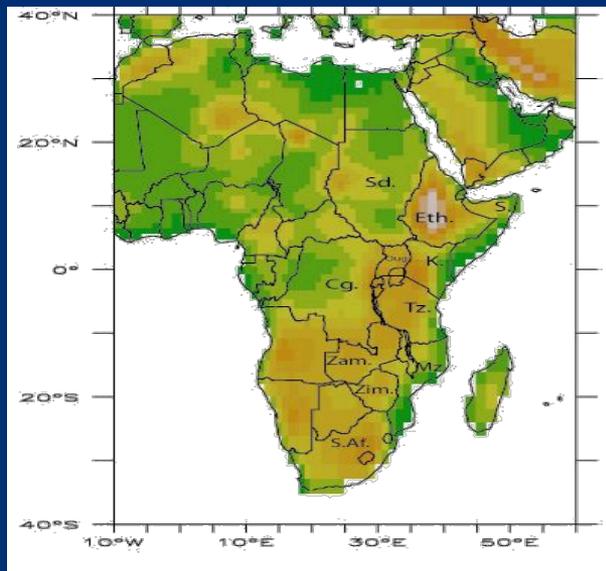


# Quel est l'impact de la tectonique ?

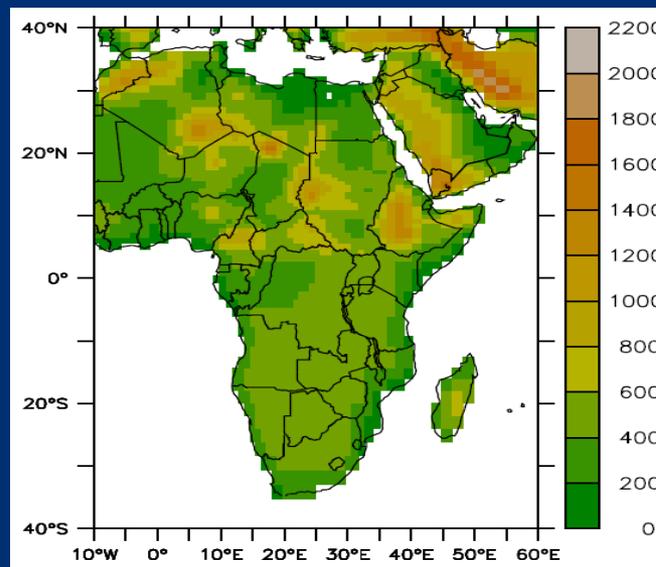


# Différents scénarios topographiques

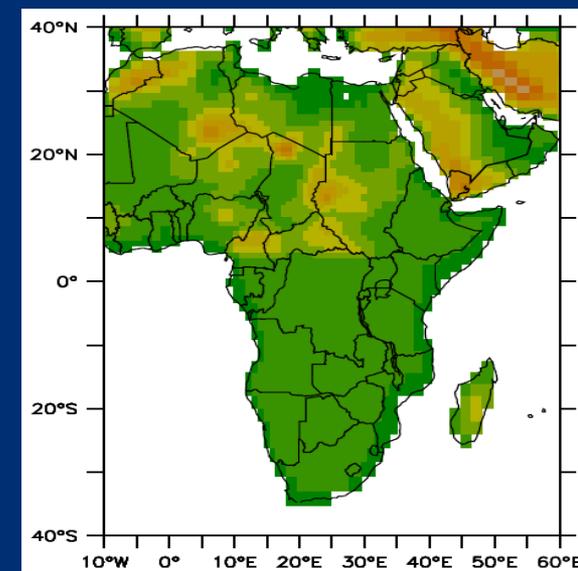
Present



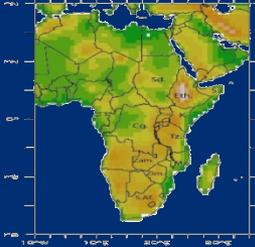
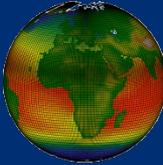
Traps



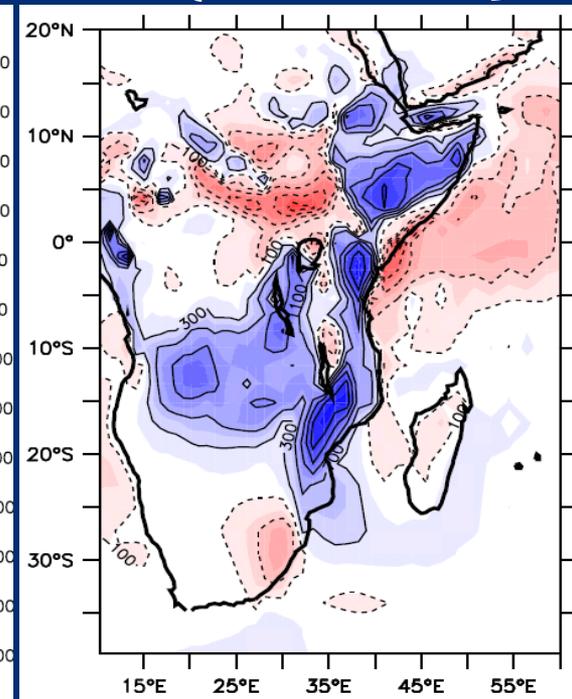
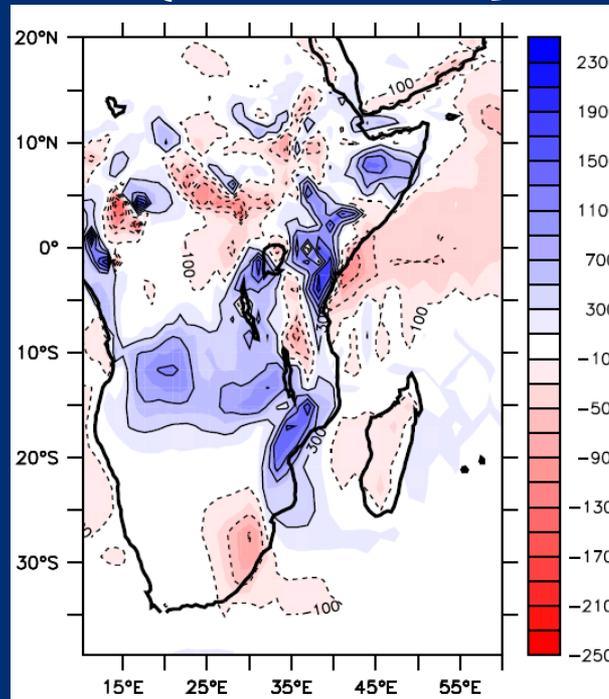
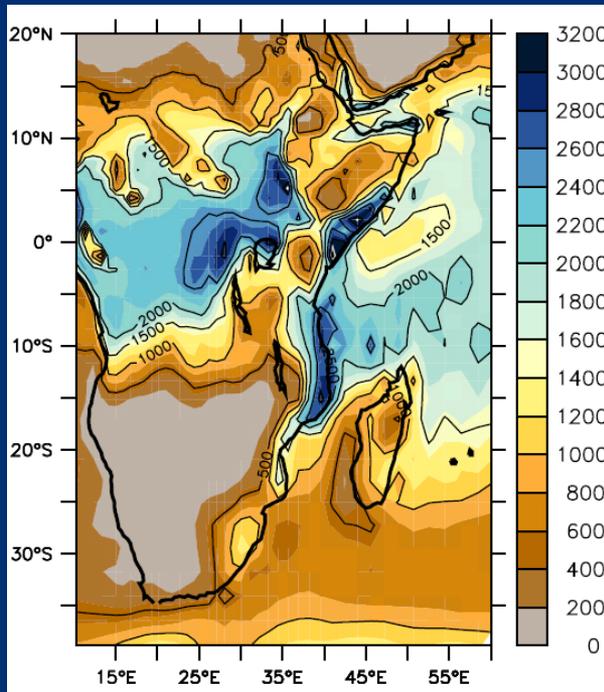
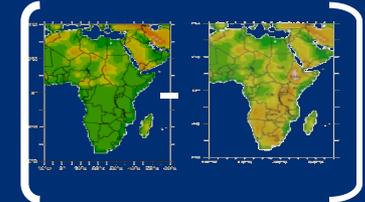
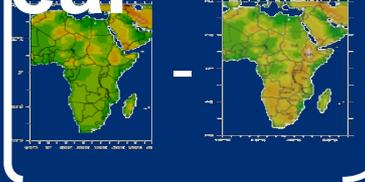
NoRel



# Rainfall patterns : mm / year



year

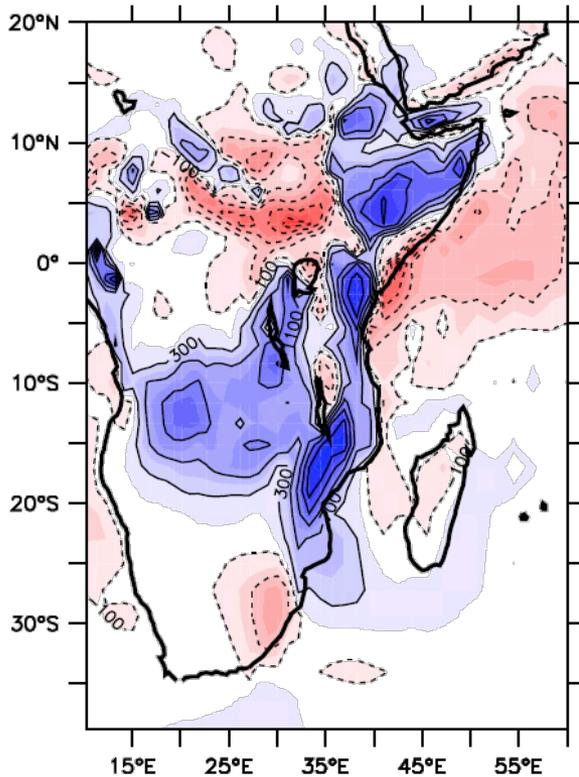


•Convection is also enhanced due to increased continental temperatures.

•Rainfall is increased.

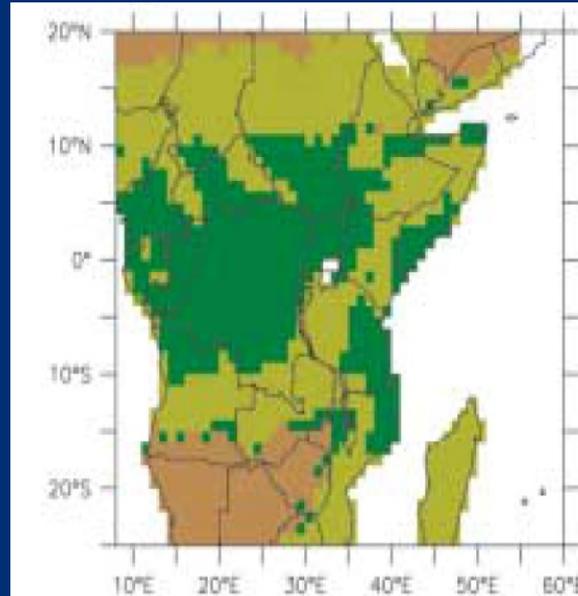
# Uplift led to eastern Africa aridification...

NoRel - Present



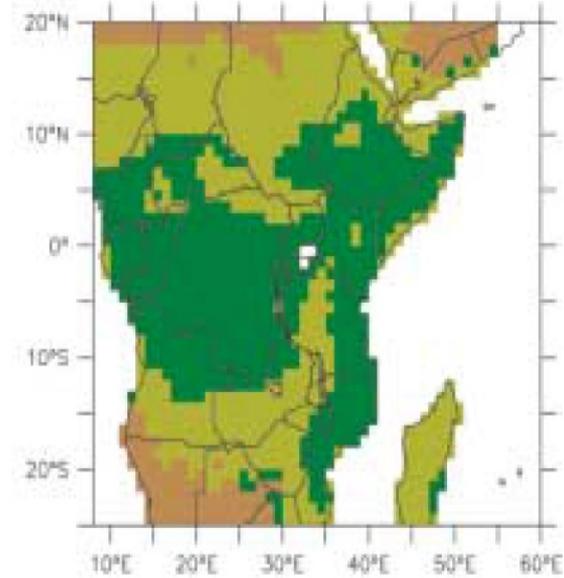
Rainfall anomaly (mm/year)

Present



- Arboreal > Herbaceous
- Arboreal < Herbaceous
- Total cover < 5 %

NoRel



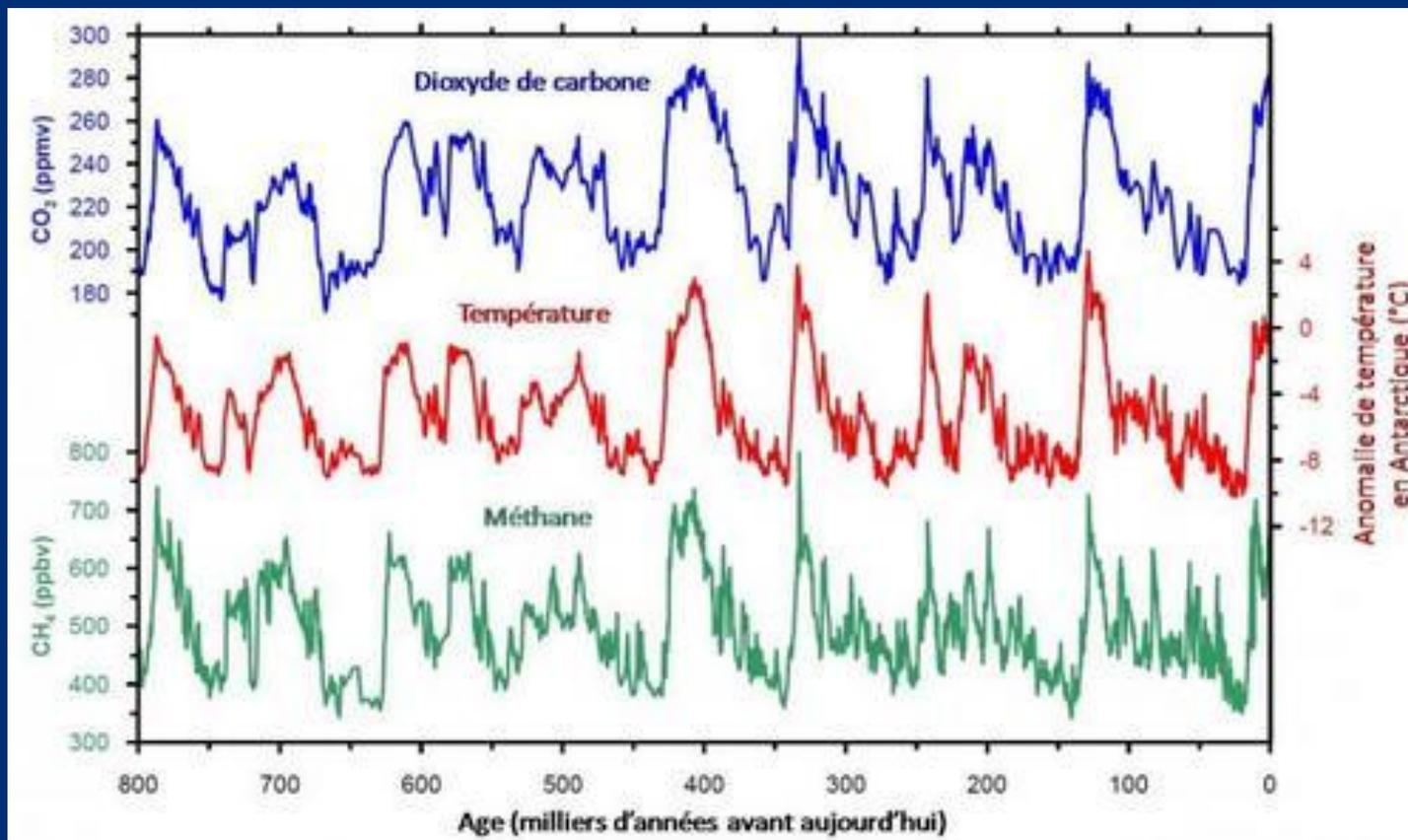
Simulated vegetation cover

Sepulchre et al., *Science*, 2006

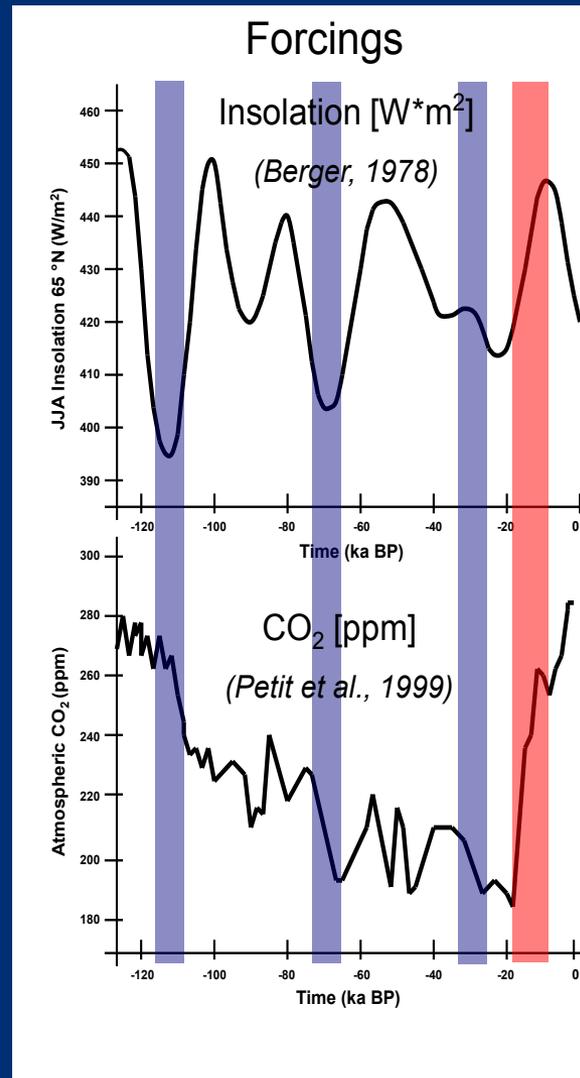
# LE TEMPS DE LA DIZAINE DE MILLIERS D'ANNÉES

*Le temps des paramètres orbitaux*

# Reconstructions des températures et de la teneur en gaz à effet de serre issues des forages en **Antarctique**

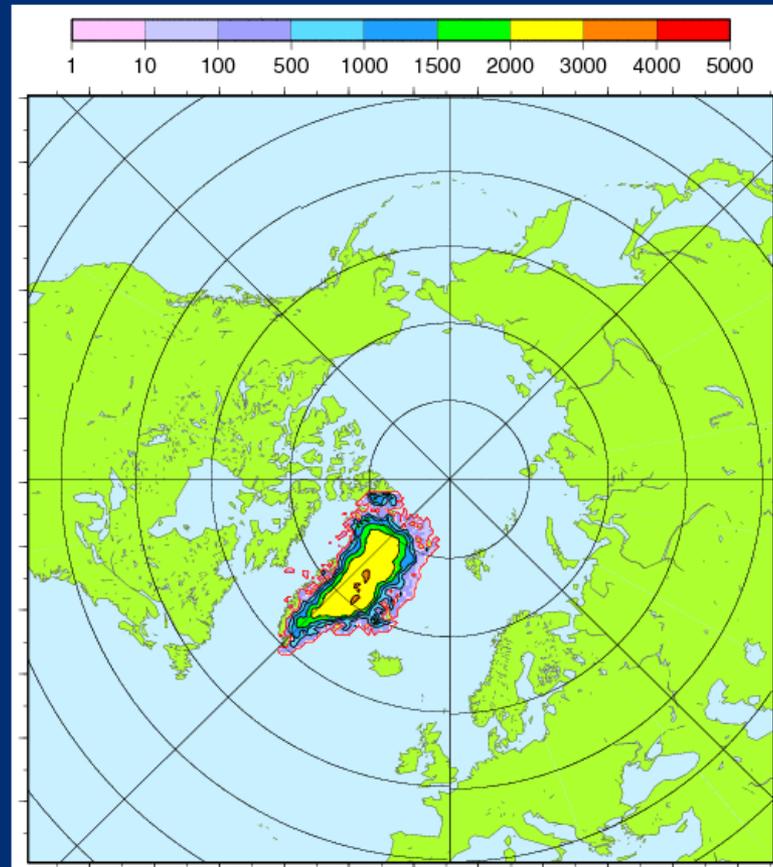


# LES DEUX PARAMÈTRES QUI PILOTENT L'ÉVOLUTION DE LA CALOTTE DE GLACE



# NOUVEAU CYCLE: MIS5 À PRÉSENT

Cycle Gremlins  
 $t = -126000$  ans

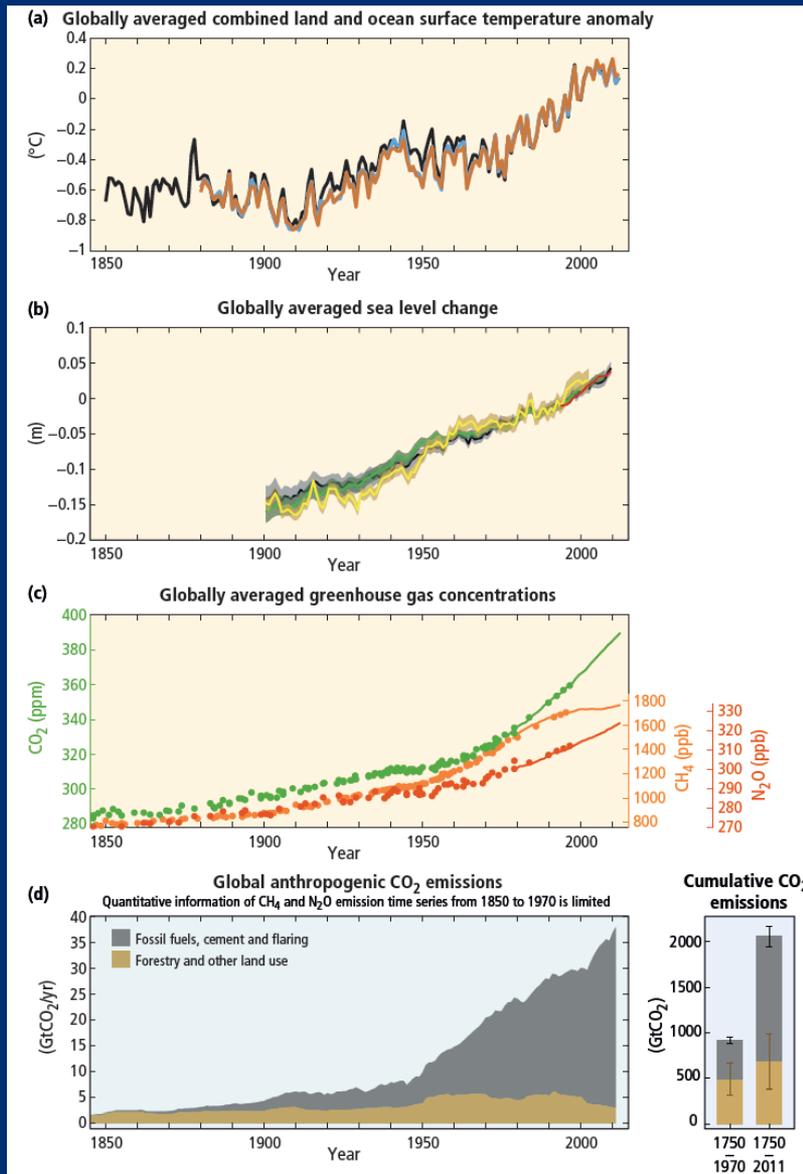


*Bonnelli et al, Clim past 2009*

# LE TEMPS DE LA CENTAINE D'ANNÉES

## *Le temps de l'Homme*

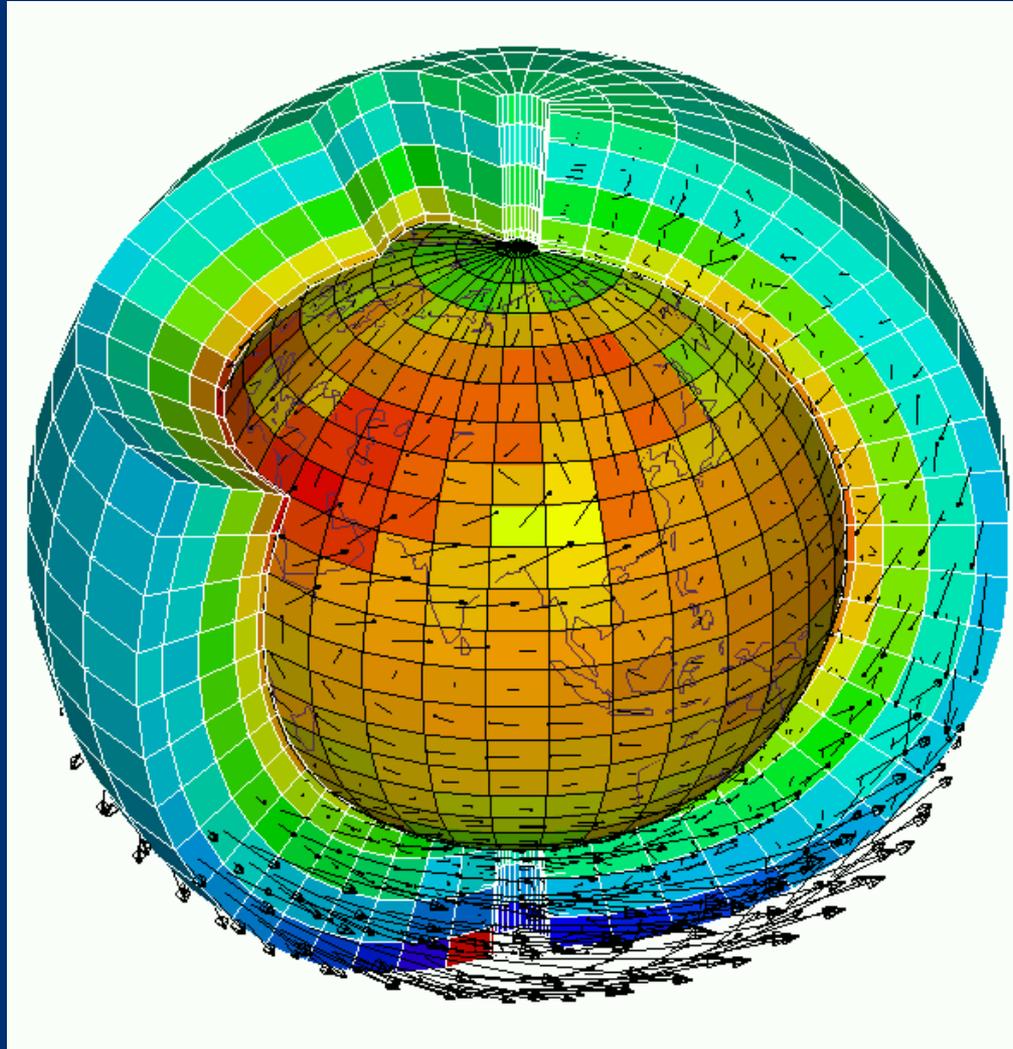
*Cette valse climatique à trois temps s'achève dans un monde froid avec deux calottes de glace pérennes. Le quatrième temps de la valse va donc s'exercer dans ce contexte froid qui sera responsable de nombreuses ruptures...*



Observations **Figure 1** du « résumé à l'intention des décideurs » du 5ème rapport du GIEC

Ruptures dans le système climatique et le cycle du carbone

# MODÉLISATION NUMÉRIQUE 3D DU CLIMAT



Source: L. Fairhead, LMD/IPSL

# SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION DE TEMPÉRATURE ET DU NIVEAU MARIN

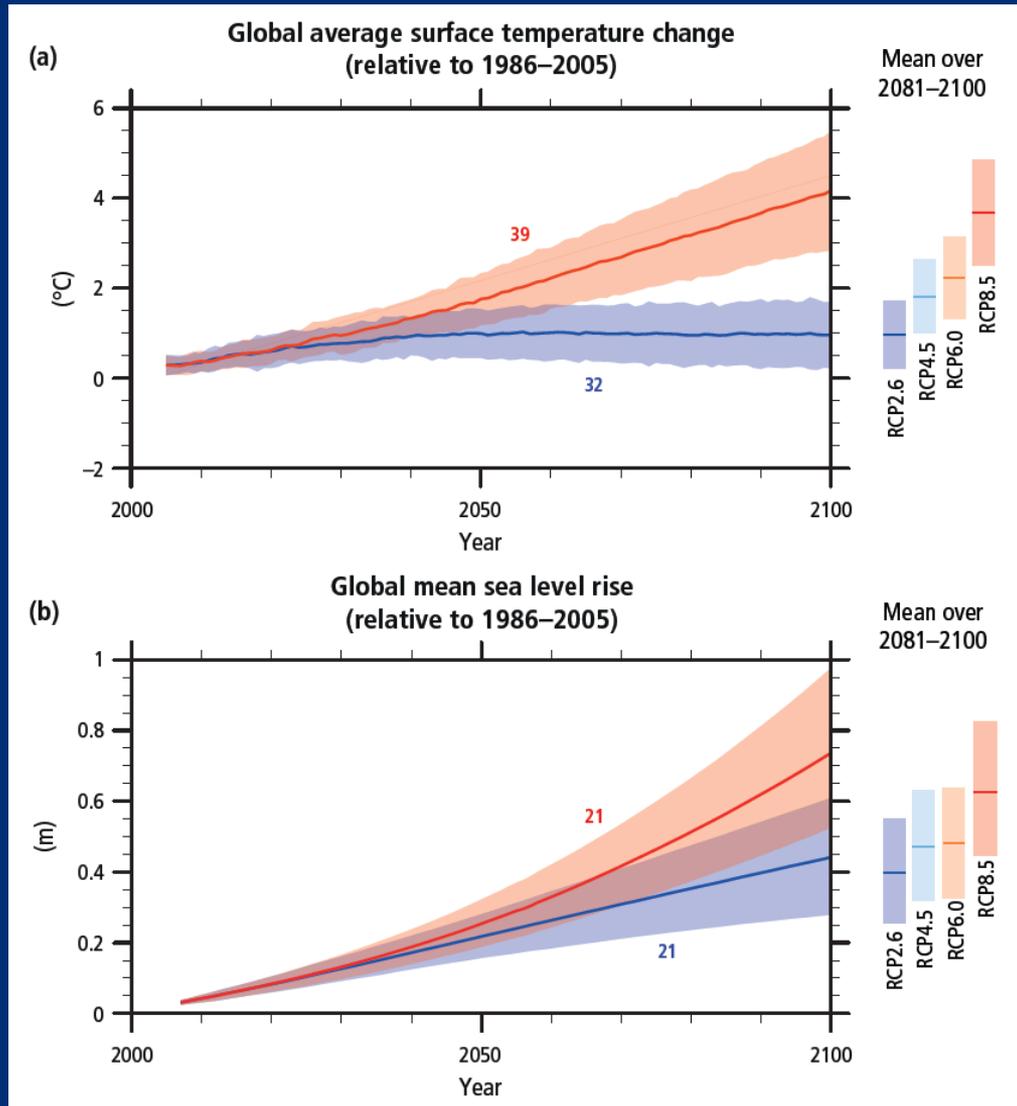


Figure 6 du résumé à l'intention des décideurs 5ème rapport du GIEC

# SCÉNARIOS DE VARIATION DE TEMPÉRATURE ET DES PRÉCIPITATIONS

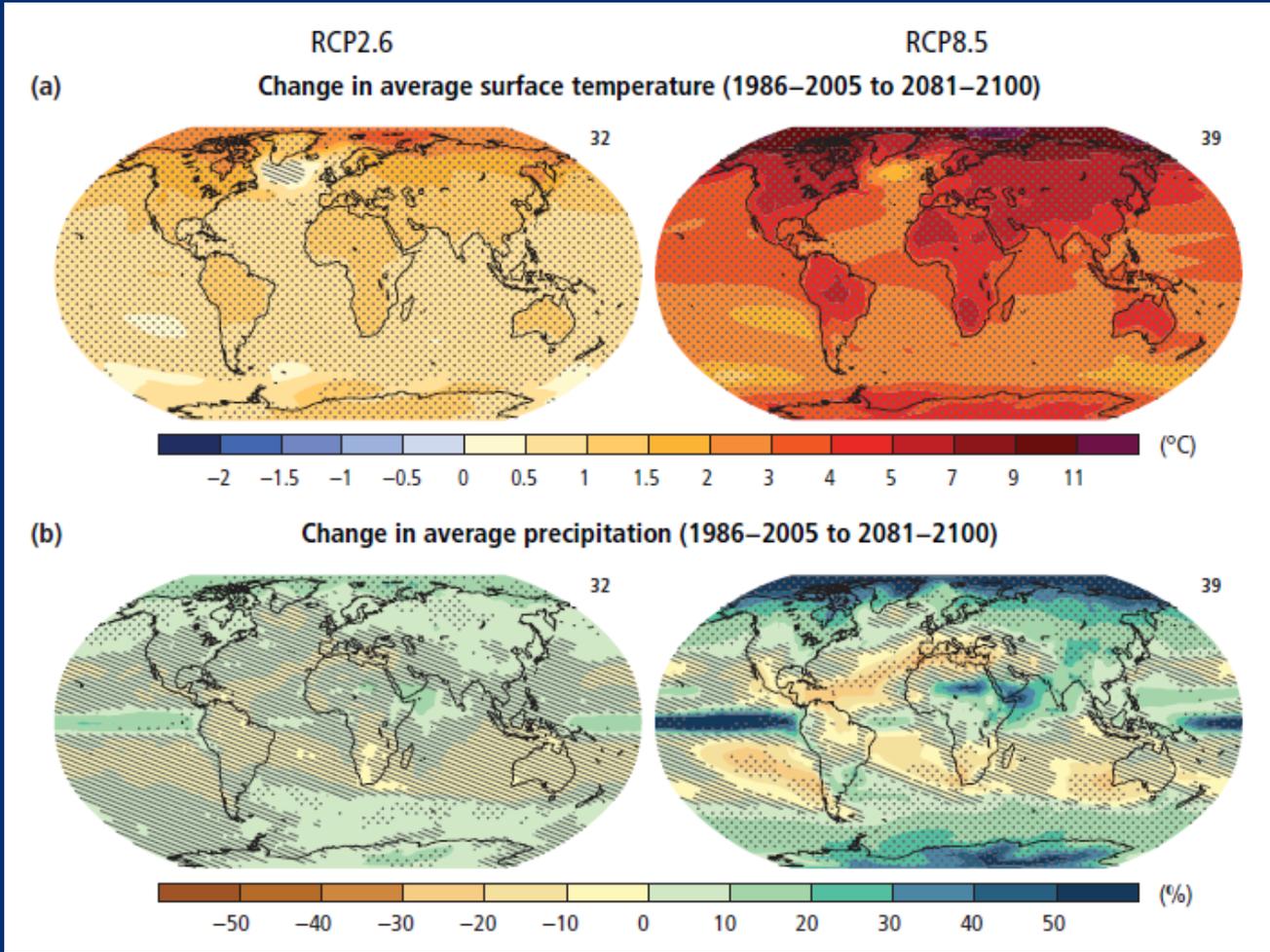


Figure 7 du résumé à l'intention des décideurs 5ème rapport du GIEC

# RUPTURES DANS LE SYSTÈME CLIMATIQUE ET LE CYCLE DU CARBONE

## CYCLE DU CARBONE

- Redistribution des sources et des puits
- Permafrost
- Hydrate de méthane

## CIRCULATION OCÉANIQUE

- Fonte des calottes / Flux d' eaux douce / Stratification ou *Arrêt du Gulf Stream*

## CRYOSPHERE

- Fonte des calottes / Remontée du niveau marin
- Fonte des calottes / Variations des moussons

# RÉORGANISATION DES SOURCES ET DES PUITTS DE CO<sub>2</sub>

- Aujourd' hui, pour deux molécules de CO<sub>2</sub> émises seule une va rester dans l' atmosphère
- Et demain ?
- Quelle capacité de stockage dans la biosphère et les sols anthropisés
- De même pour la biosphère marine (acidification)
- Capacité de stockage du CO<sub>2</sub> et température de l' océan

# PERMAFROST ...

Un réchauffement des sols gelés de Sibérie et du Canada pourrait conduire à une émission supplémentaire d'au moins 100 ppm



# CLATHRATES ...

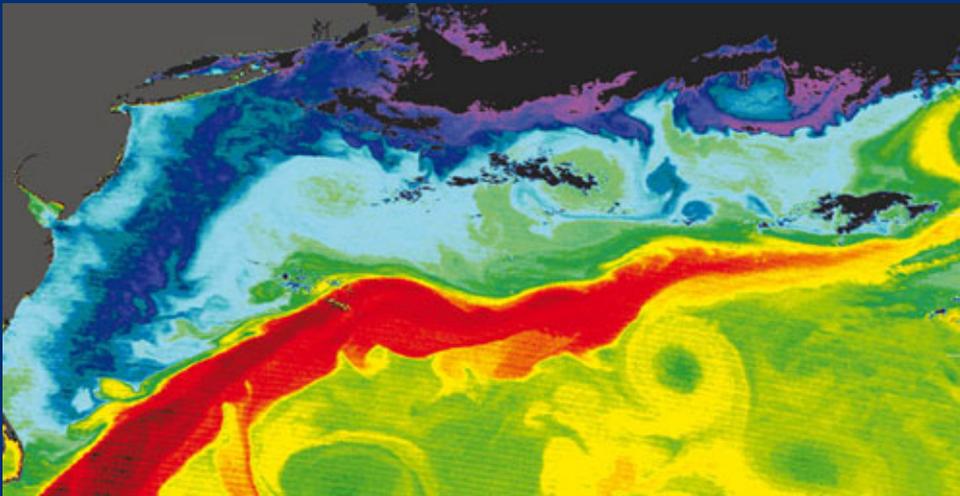
De très gros réservoirs de méthane situés aux marges continentales, vers 600-800 m de profondeur, peuvent se déstabiliser sous l'effet de réchauffement de température ou de baisse de pression et libérer d'importantes quantités de méthane



*Bloc d'hydrate de gaz (clathrate)*

# GULF STREAM ...

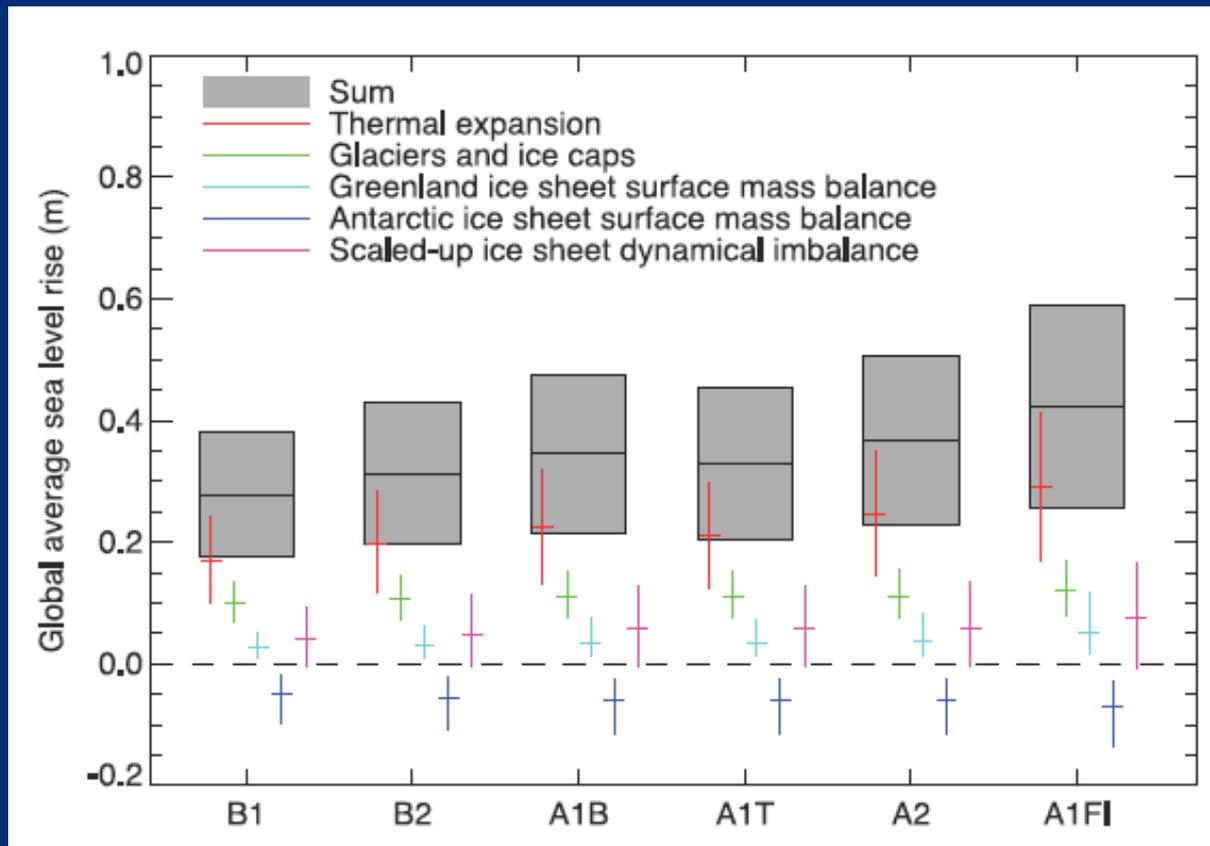
Une fonte rapide du Groenland et donc un apport massif d'eau douce, dans les zones de plongées d'eau profonde, pourrait inhiber la circulation thermohaline



*Les eaux du Gulf Stream (en rouge) sont les plus chaudes de l'océan Atlantique Nord. La température décroît progressivement dans les zones jaunes, vertes et bleues.*

*P. Minette et B. Evans, Université de Miami/  
MODIS/NASA*

# ESTIMATION DE LA HAUSSE MOYENNE DU NIVEAU MARIN SELON 6 SCÉNARIOS (AR4 IPCC 2007)



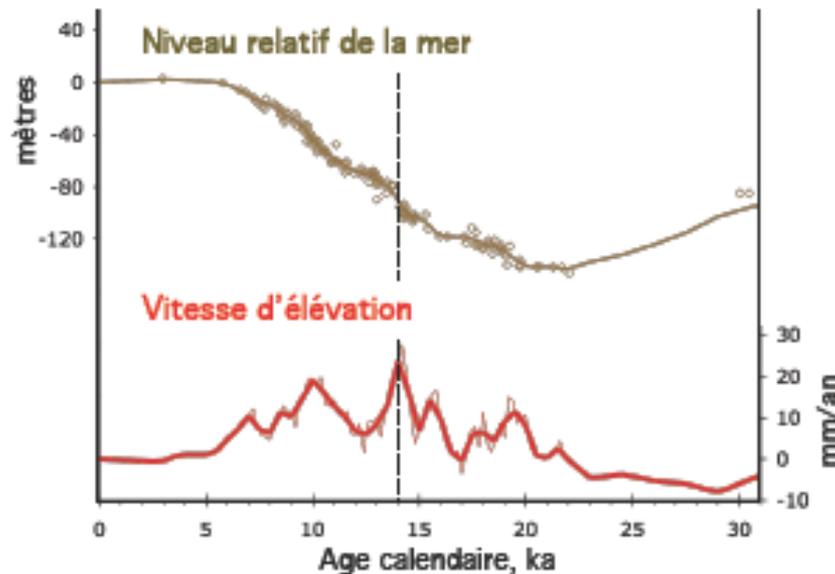
# Reconstruction du niveau marin depuis 30 000 ans

## Variations du volume de l'océan

Les variations passées du niveau marin:

- donnent accès à la vitesse de fonte des glaces,
- permettent de calibrer les modèles de déformation de la croûte terrestre.

⇒ Nouvelles bases de données internationales

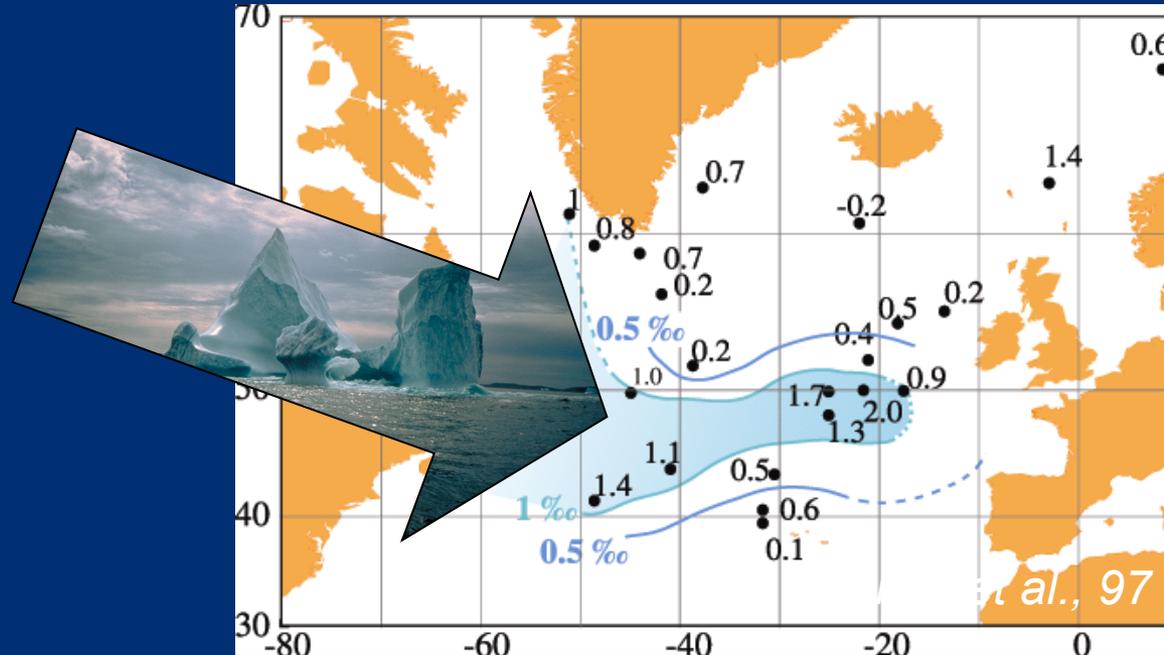


## Dernière déglaciation

- Vitesse d'élévation moyenne du niveau de la mer: + 10 mm/an
- Vitesse d'élévation maximale du niveau de la mer  $\sim$  + 37 mm/an durant quelques siècles

[Bard et al., 1990; Lambeck&Chappell, 2001; Waelbroeck et al., 2002]

# 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 ?

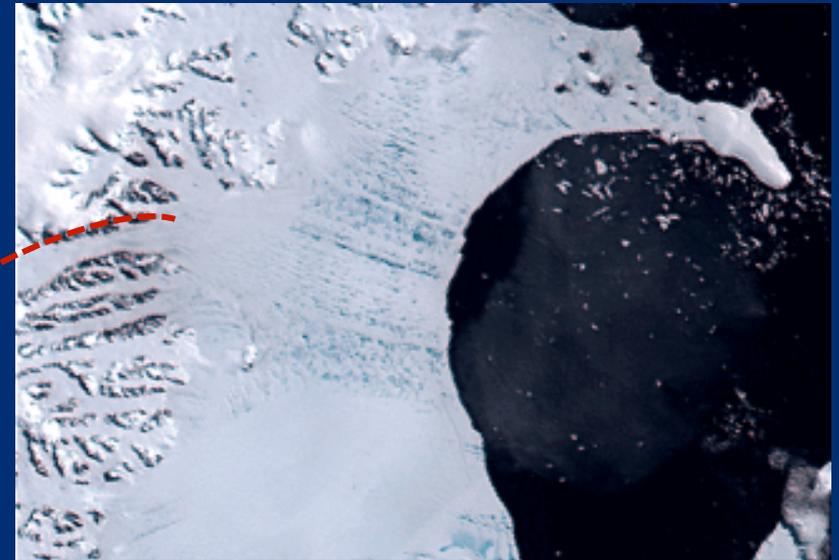
Volume d'icebergs émis ?

# LA CASSURE DE LA PLATE-FORME DU LARSEN B

## ENJEU

Quels effets sur la calotte posée?

- Cassure liée à la hausse des températures de surface et à l'amincissement par fonte basale  
  
Rignot 2004; Scambos et al, 2004
- Forte accélération des fleuves de glace liée à la disparition de l'effet d'arc boutant

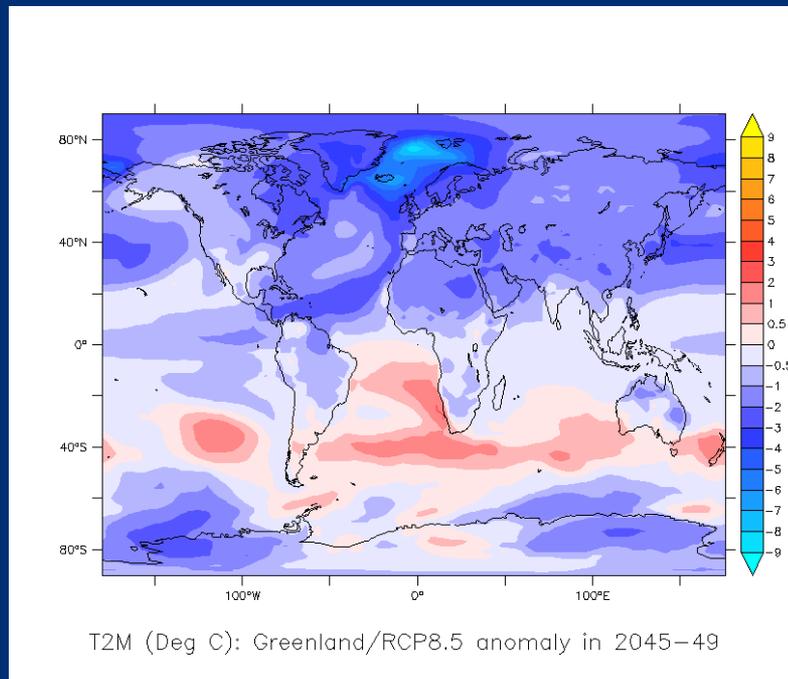


# Méthode

Superposé aux scénarios les plus réalistes du GIEC: RCP8.5 , nous ajoutons une fonte de la calotte groenlandaise de 0.5m, 1 m, 1.5m, 3m pendant 50 ans de 2020 à 2070 avec un flux d'eau douce constant.

# Impact sur les températures

Différence de température de l'air à 2m entre le scénario avec fonte partielle du Groenland et le scénario du GIEC (RCP 8.5)

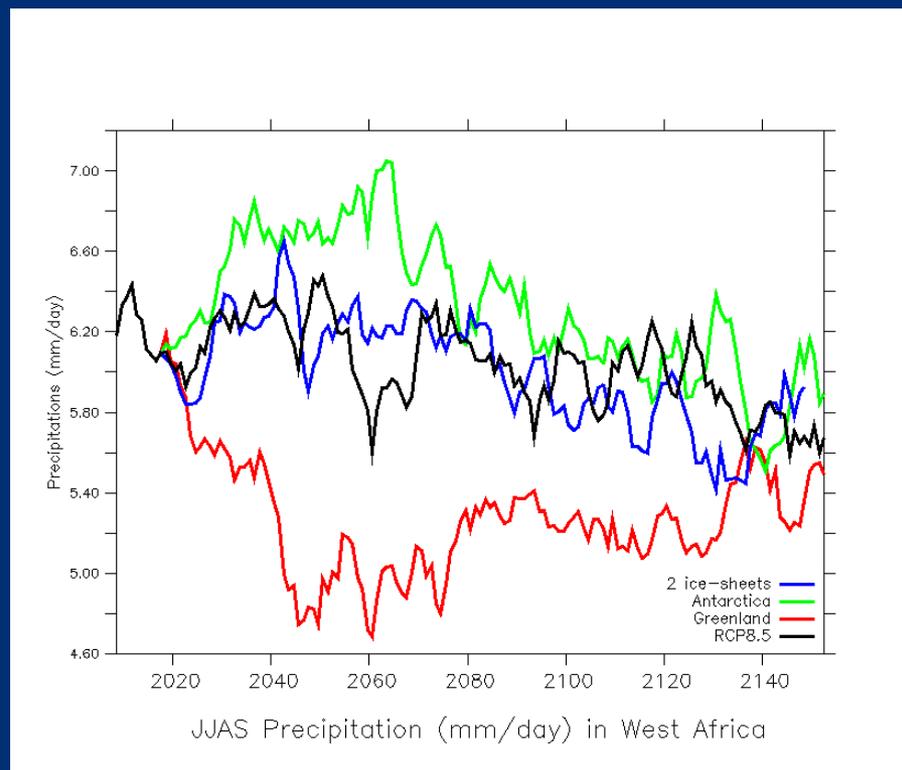


L'effet maximum de la perturbation intervient entre 2045-2049

# Impact sur les précipitations ouest-africaines pour l'été

Changement de moussons et déplacement de la zone de convergence intertropicale.

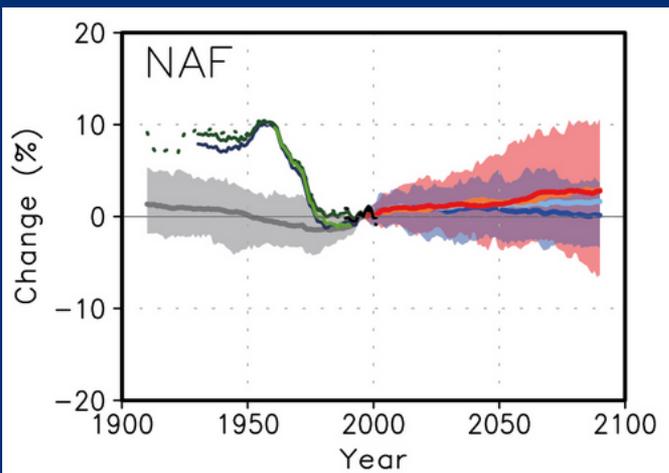
A cause de la grande densité de population dans les zones de moussons, ces changements vont conduire à des migrations importantes.



Précipitations (JJAS) sur l'Afrique de l'Ouest

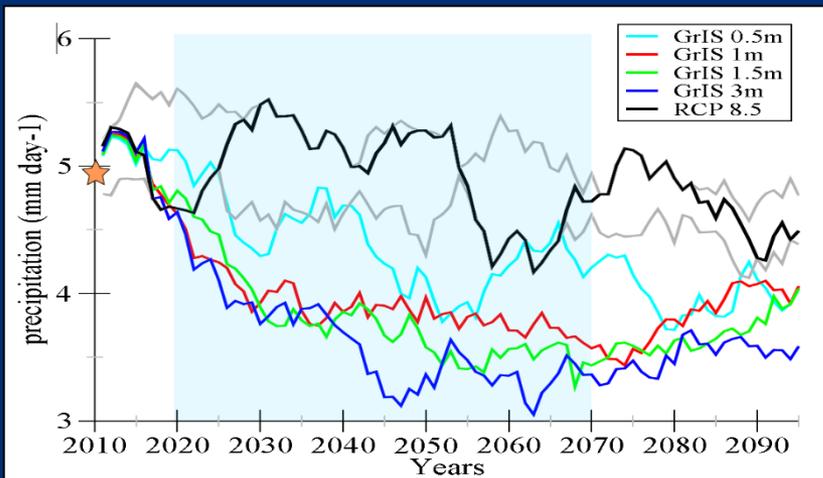
# IMPACTS SUR LES MOUSSONS ET LES MIGRATIONS EN AFRIQUE DE L'OUEST

## SIMULATION DU GIEC

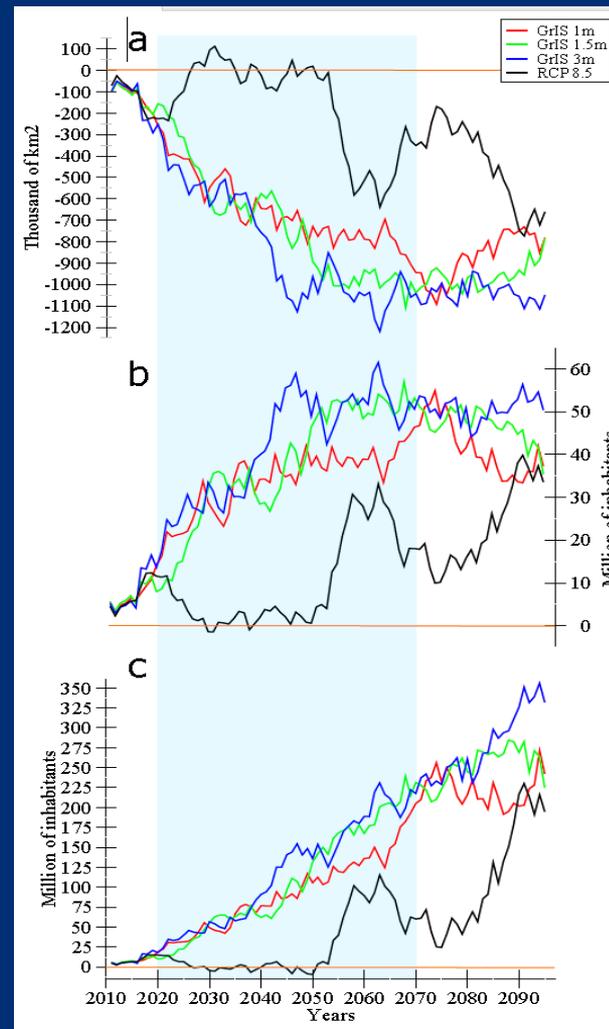


Observations des variations de moussons africaines passées et présentes (1900-2100) pour les différents scénarios: Historique (gris; 40 modèles), RCP2.6 (bleu foncé; 24 modèles), RCP4.5 (bleu clair; 34 modèles), RCP6.0 (orange; 20 modèles), et **RCP8.5 (rouge; 32 modèles)**.  
GIEC WP1 chap, 14 figure 14.7.

## NOTRE SIMULATION



## IMPACTS ET MIGRATIONS



- A. Évolution des surfaces cultivables
  - B. Évolution du nombre d'habitants affectés par la disparition des surfaces cultivables avec la population de 2011
  - C. Évolution du nombre d'habitants affectés par la disparition des surfaces cultivables en tenant compte de l'évolution de la démographie
- D. Defrance et al., 2017

# PROJECTIONS POUR 2100 POUR LES SCÉNARIOS À 0.5 ET 2 MÈTRES D'ÉLEVATION DU NIVEAU MARIN

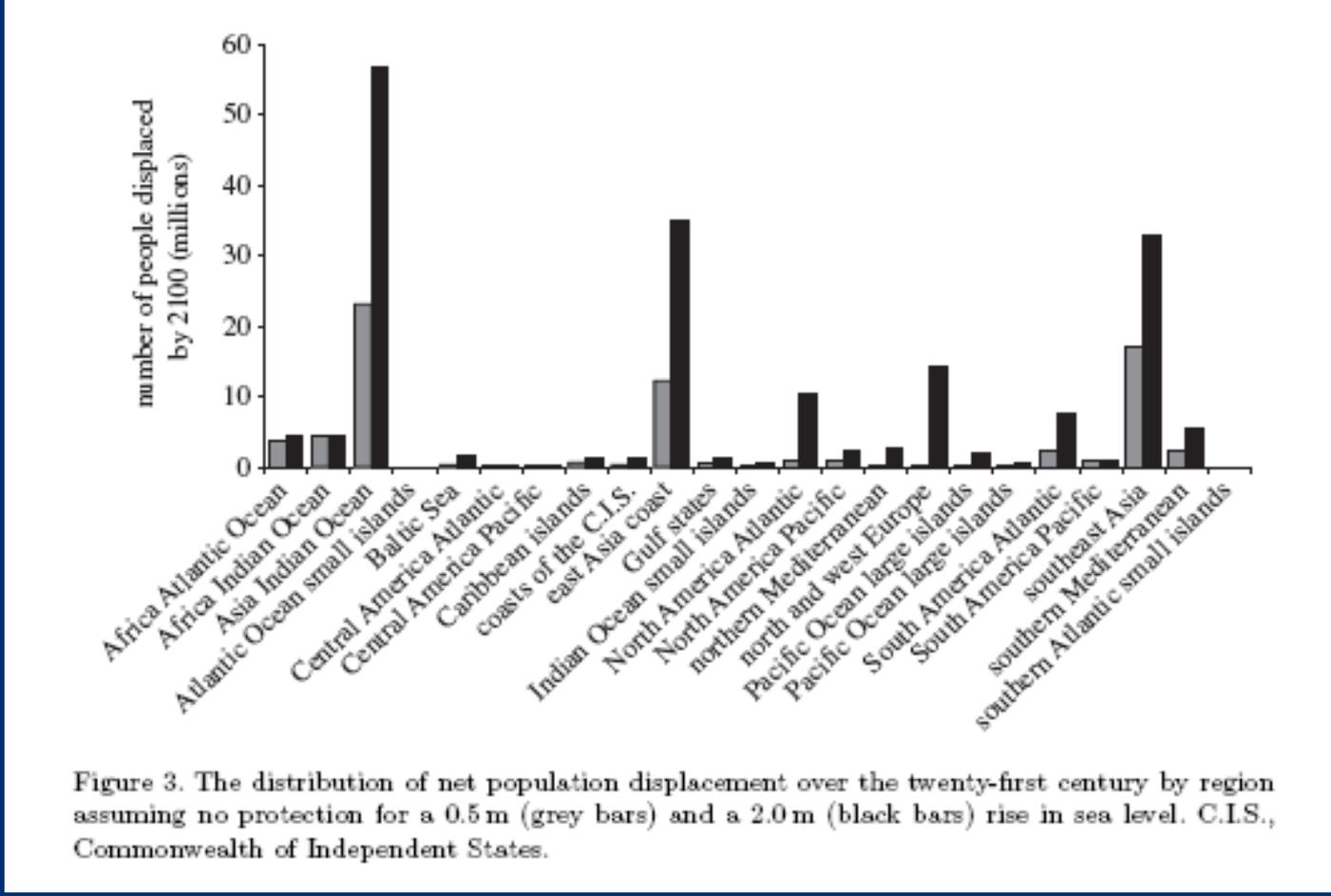


Figure 3. The distribution of net population displacement over the twenty-first century by region assuming no protection for a 0.5 m (grey bars) and a 2.0 m (black bars) rise in sea level. C.I.S., Commonwealth of Independent States.

Nicholls R J et al. *Phil. Trans. R. Soc. A* 2011; 369:161-181

# CONCLUSIONS

**Dans la longue marche des climats de la Terre, la régulation thermique permet l'établissement de climats chauds... la plupart du temps et donc la présence de calottes de glace est très rare dans l'histoire de la Terre.**

- 🌍 Au Cénozoïque [65-2,5 Ma], le climat se refroidit, le taux de CO<sub>2</sub> baisse, les calottes Antarctique (34 Ma) et Groenlandaise (2,6Ma) se mettent en place.
- 🌍 Au Quaternaire, des oscillations pilotées par les variations orbitales font basculer le climat de la phase glaciaire (80%) à des phases interglaciaires.
- 🌍 Les prévisions du GIEC pour le prochain siècle n'excluent pas un certain nombre de ruptures qu'il faudrait également anticiper. Par exemple, les calottes de glace très stables pendant l'Holocène soumises à la perturbation anthropique pourraient devenir instables. Aujourd'hui, pour deux molécules de CO<sub>2</sub> émises seule une va rester dans l'atmosphère