

Séminaire ECOCLIM2018

LES CLIMATS DE LA TERRE

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

Lundi 11 juin 2018

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 :

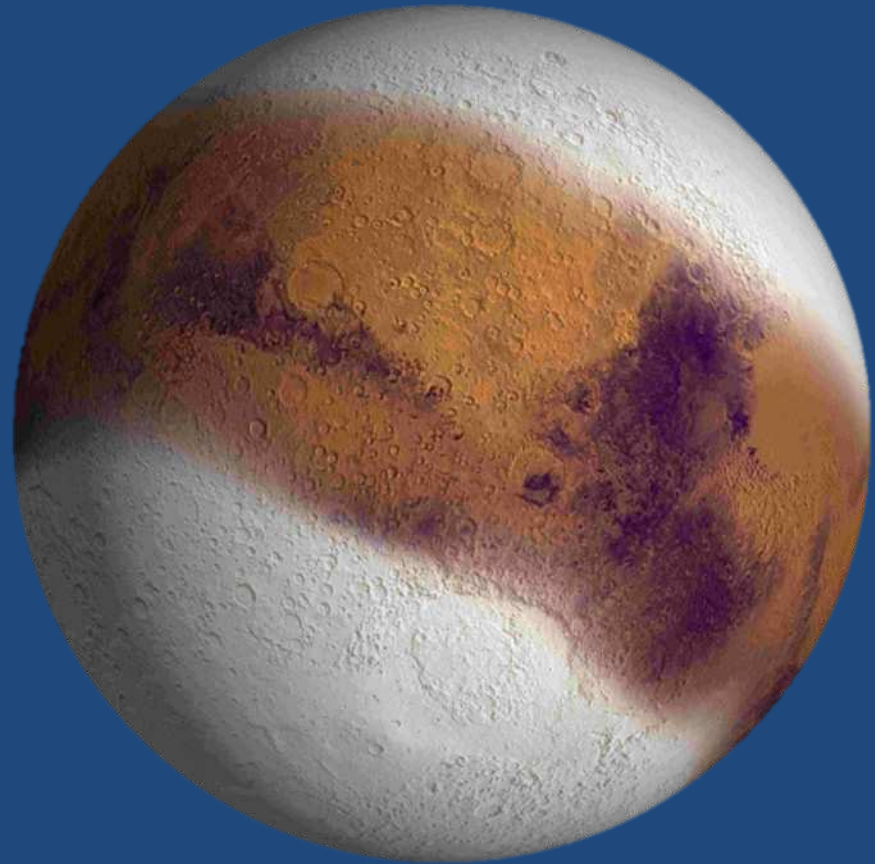
Jour +20°C

Nuit -140°C

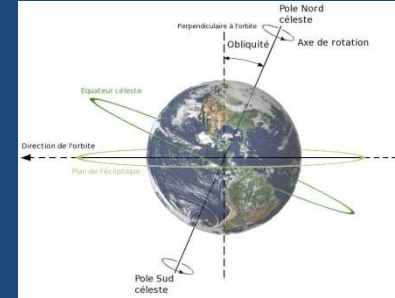
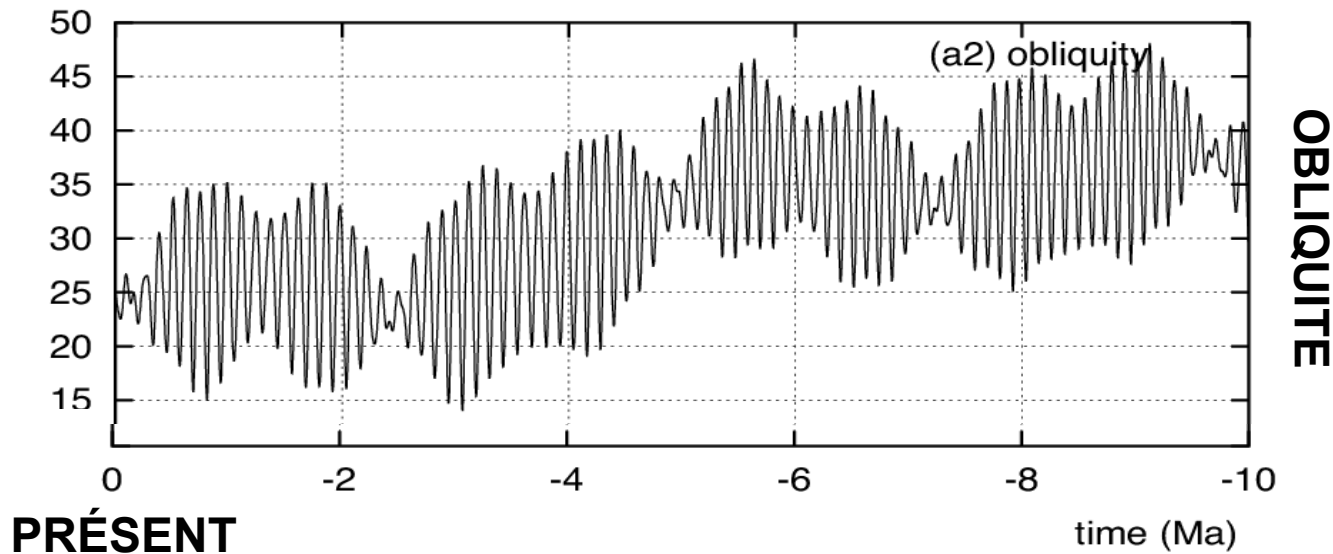
Pression au sol :

6 à 8 *mbar*

150 fois plus faible
que sur la TERRE



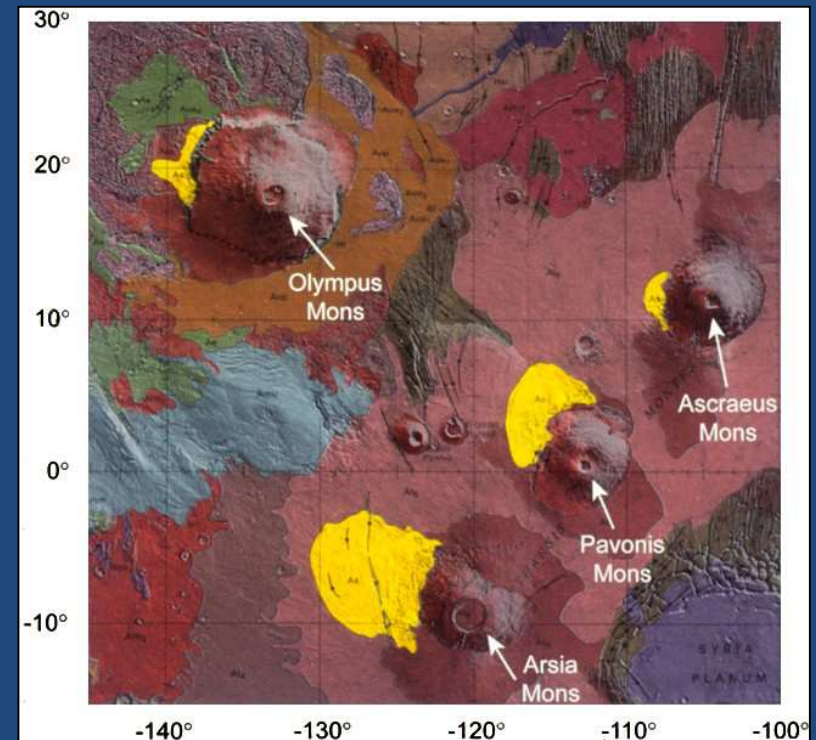
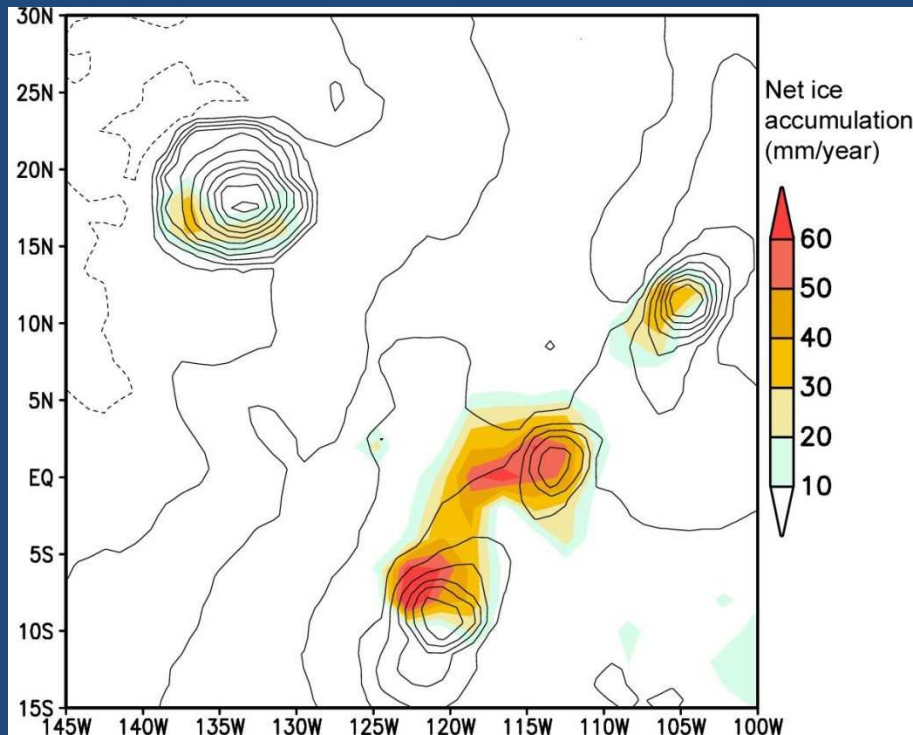
Les variations climatiques dans le passé récent de **Mars** sont liées aux modifications de son obliquité et de son orbite.



*Pendant l'histoire de Mars, l'obliquité était d'environ
41.8°
(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° , Excentricité = 0, Opacité des poussières = 0.2

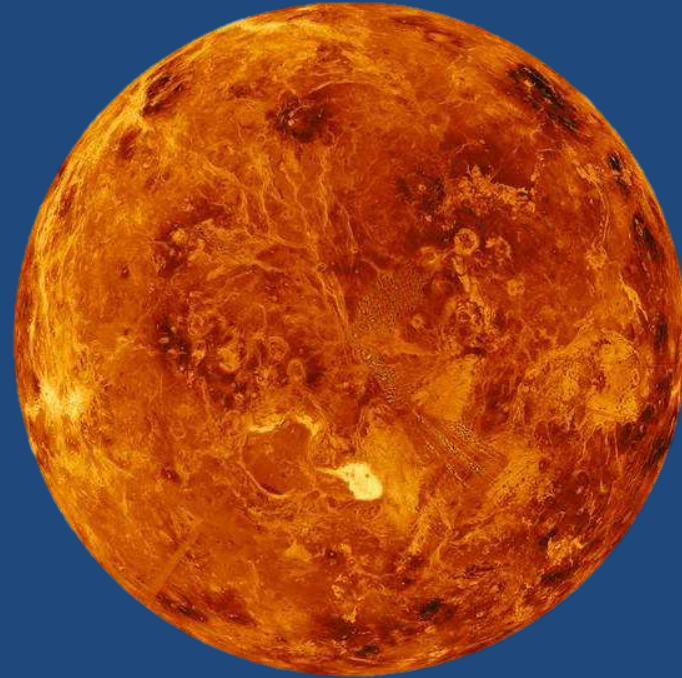


Dépôts et moraines caractéristiques de glacier à base froide

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)



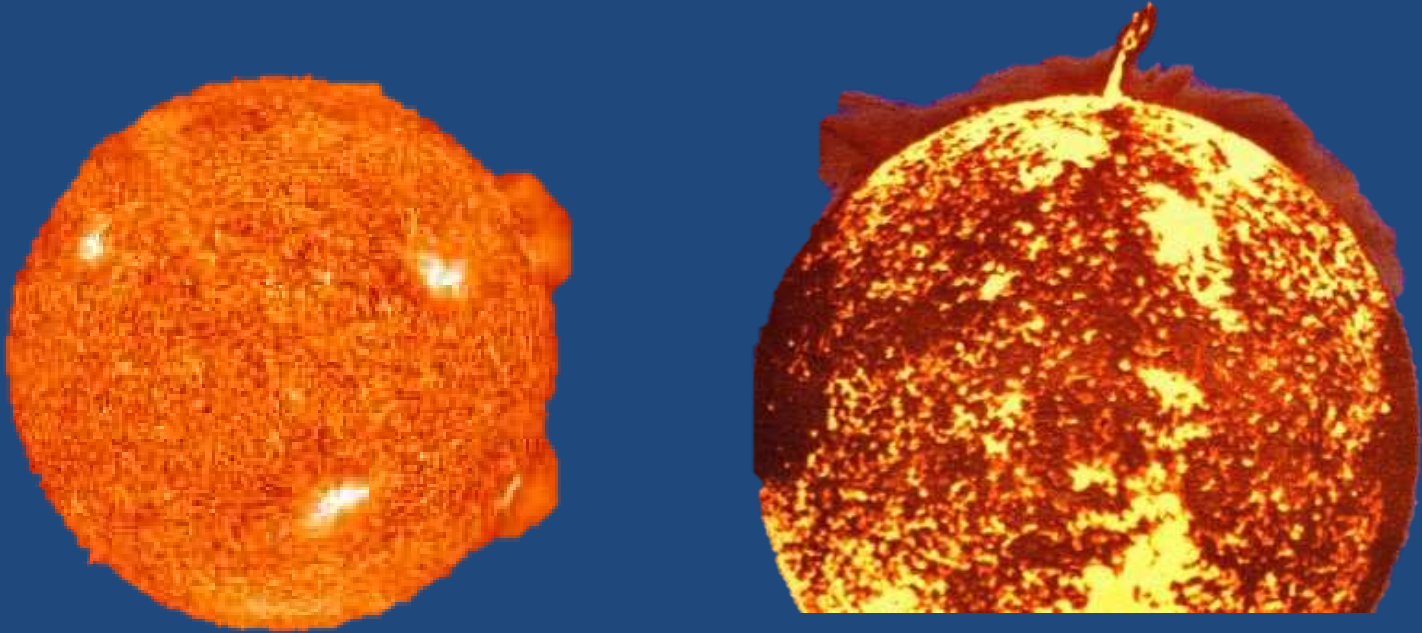
LE TEMPS DU MILLIARD D'ANNÉES

Le temps de l'évolution du soleil

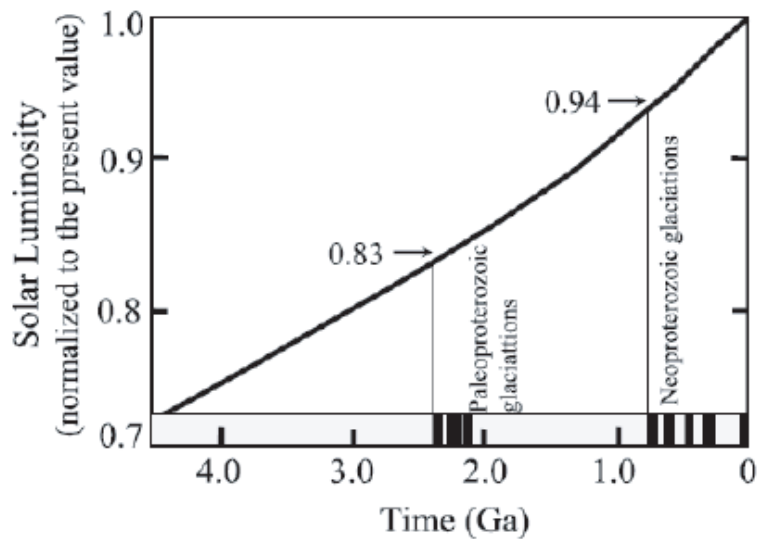
LE SOLEIL JEUNE AVAIT À SES DÉBUTS UNE PLUS **FAIBLE LUMINOSITÉ**

-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),

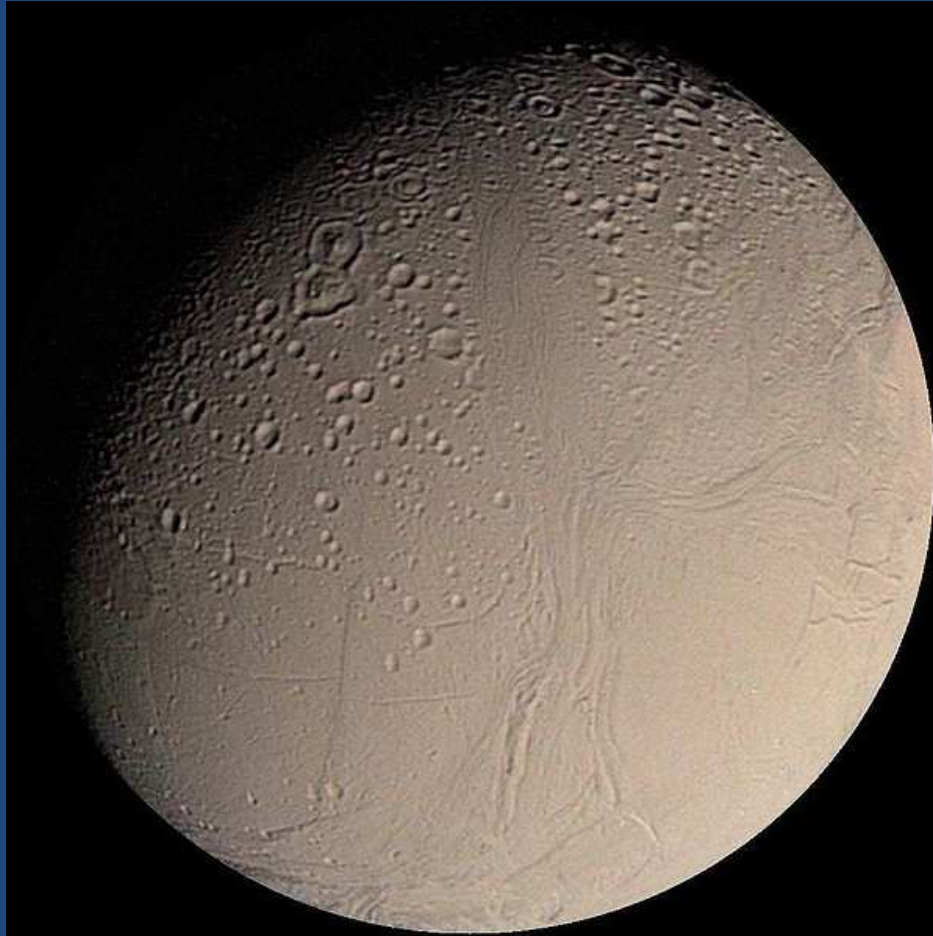
$$S = S_0 / (1 + 0.4t/t_0)$$

S_0 représente la constante solaire actuelle (1368 W/m²)

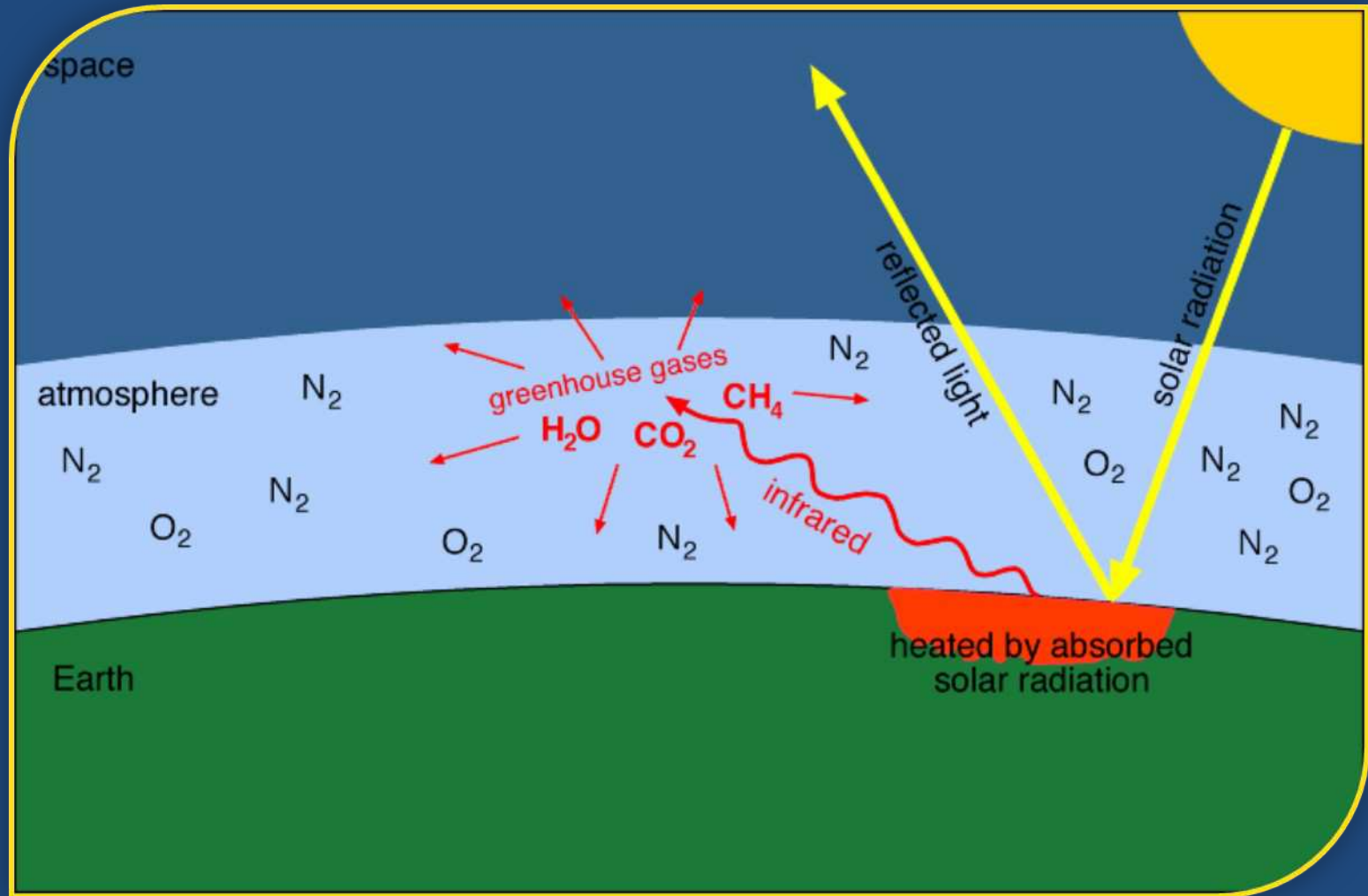
$t_0 = 4.6$ Ga, et t = temps (en Ga) avant l'époque présente.

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

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

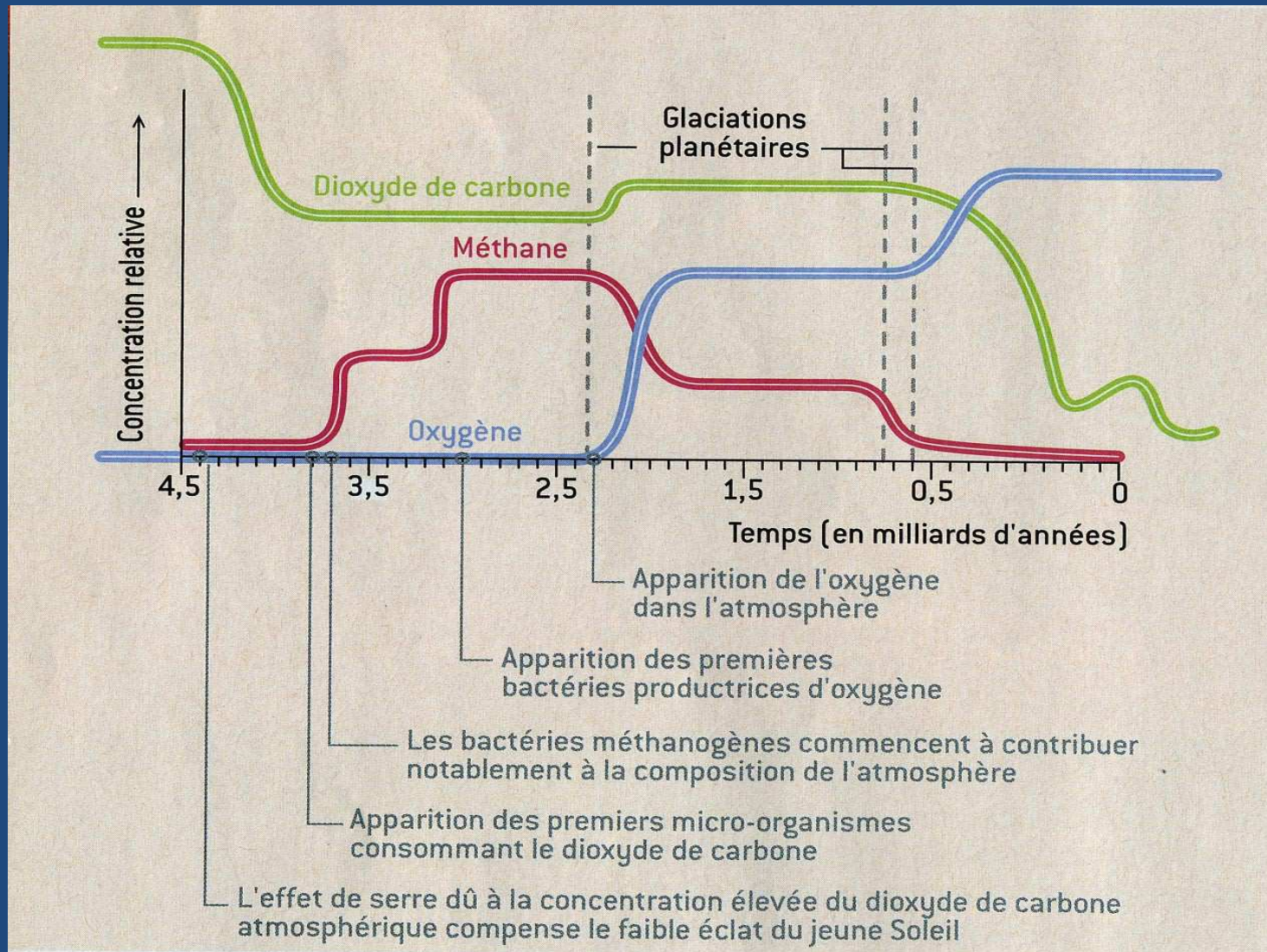
- 🌍 **Glaciation Huronienne (2.4 / 2.6 Ga)**

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 CO₂ (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

LE TEMPS DE LA DIZAINE DE MILLIONS D'ANNÉES

Le temps de la tectonique

1. La dérive des continents et son impact sur le CO2 atmosphérique: un exemple dramatique, la Terre « Boule de Neige »

2. Tectonique et dispersion des ancêtres de l'homme

2.1 Une mer disparaît (retrait de la Téthys entre 40 et 7Ma)

2.2 La surrection du rift africain (30 - 3Ma) et l'assèchement de l'Afrique de l'Est

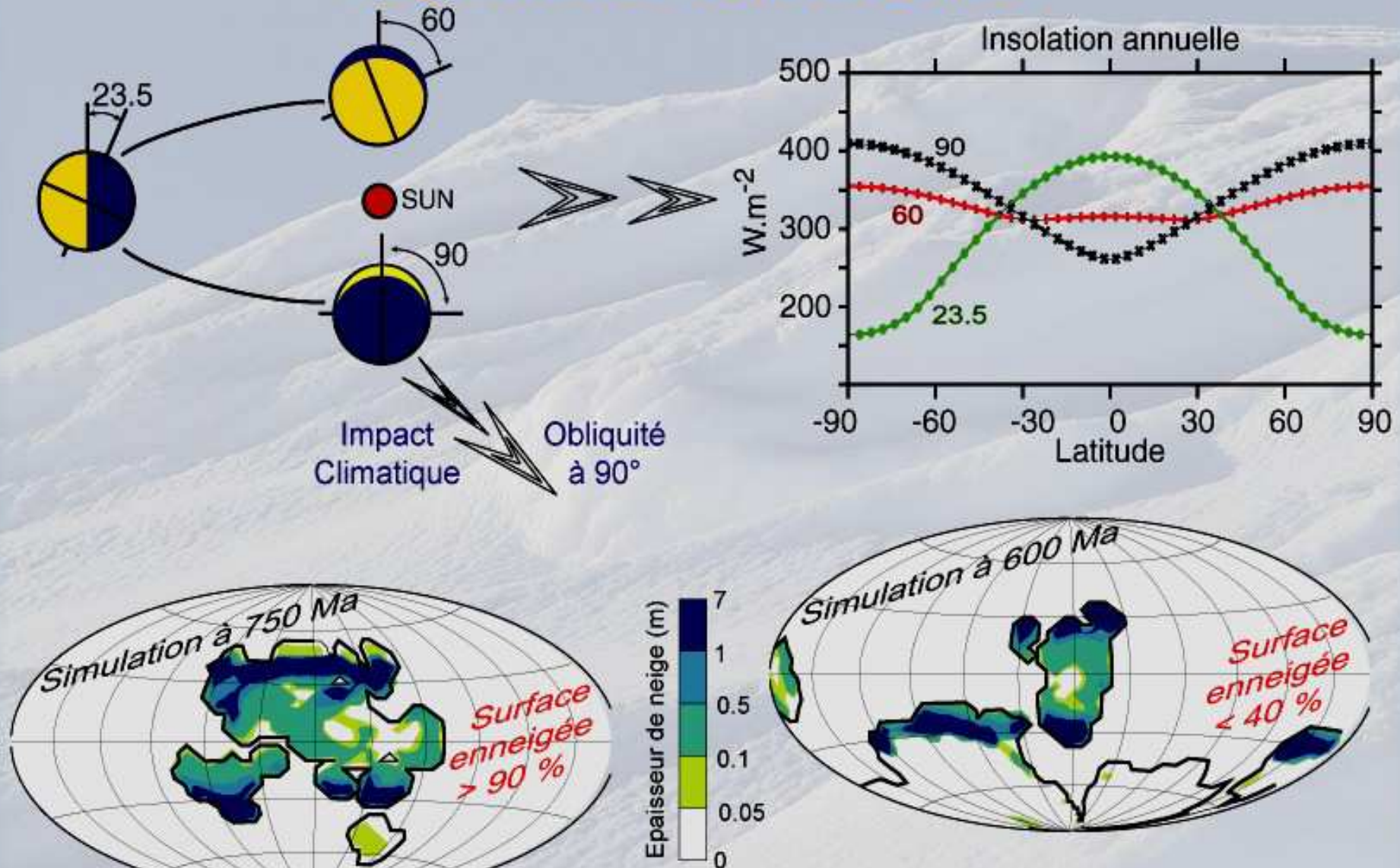
2.3 Le basculement vers les oscillations glaciaires/interglaciaire du Quaternaire (2.7 Ma)

UNE TERRE
TOTALEMENT GELEE,

***EST-CE
POSSIBLE?***



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



* Donnadieu et al., GRL, 2002

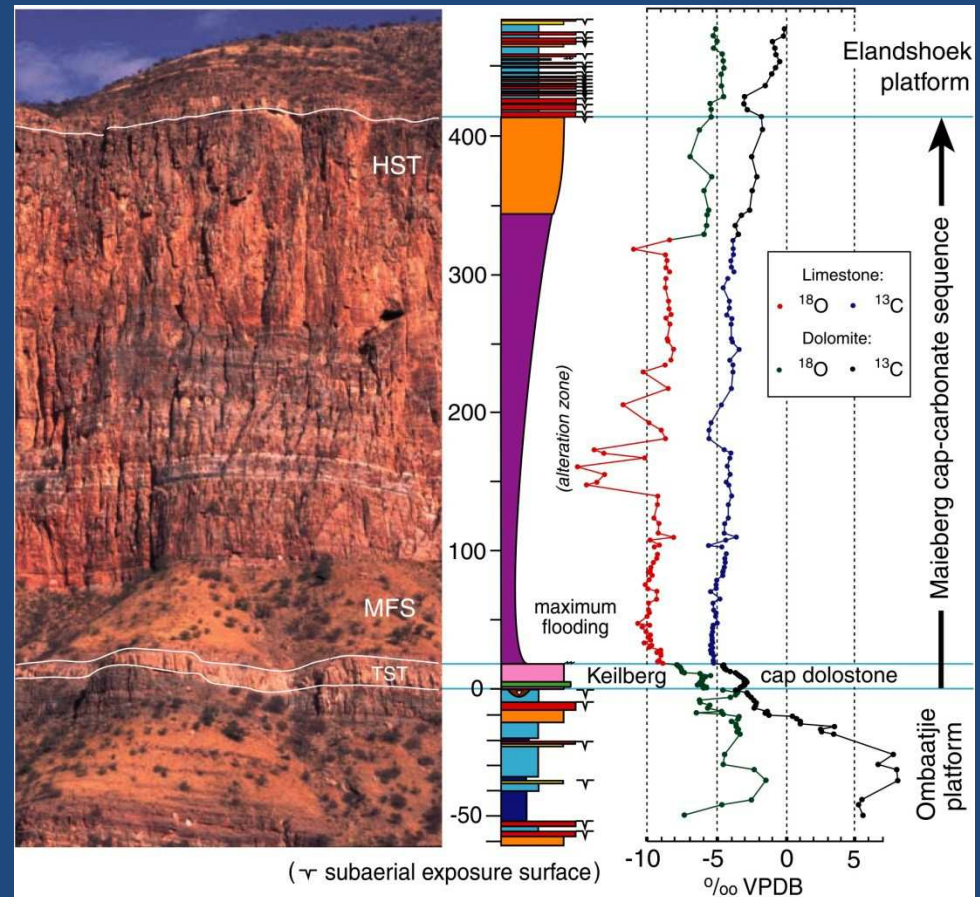
Nature Particulière Des Sédiments Associés Aux Glaciations Néoprotérozoïques



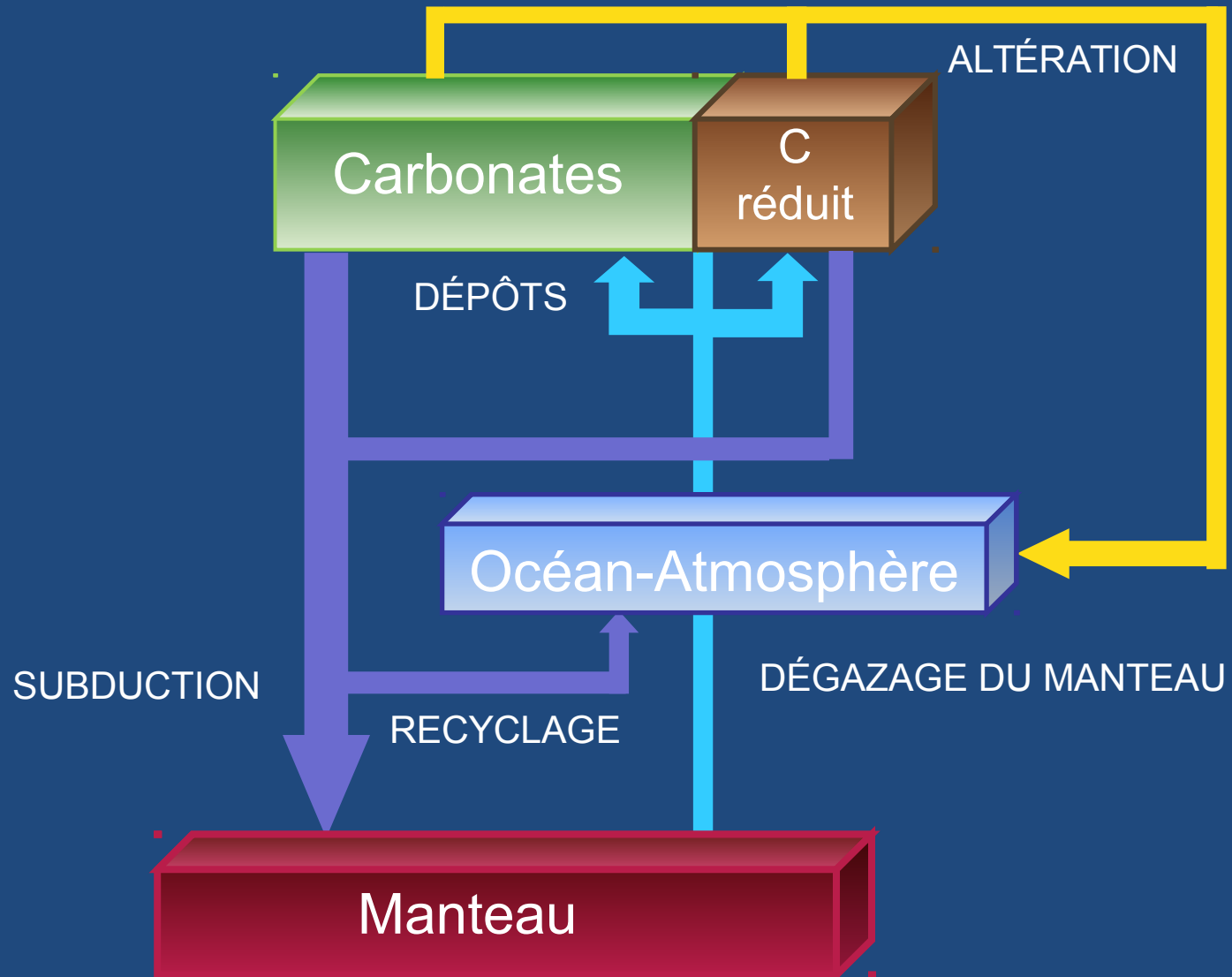
>> Formation de fer rubané

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

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



CYCLE DU CARBONE ...

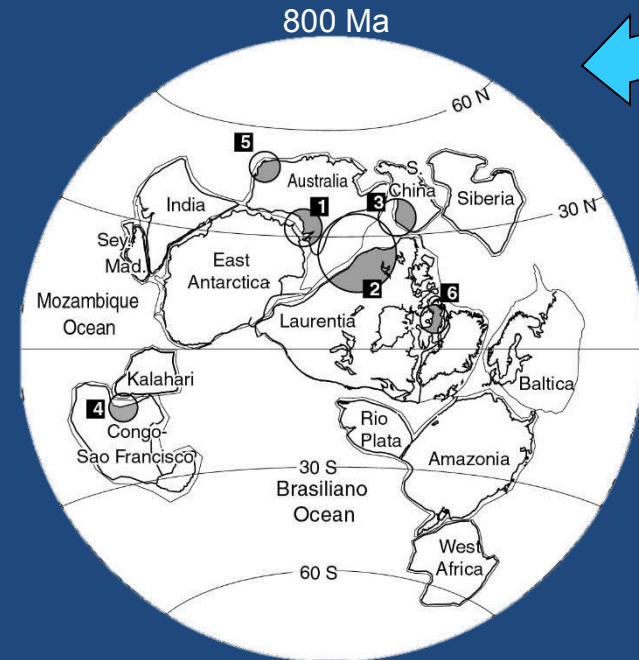
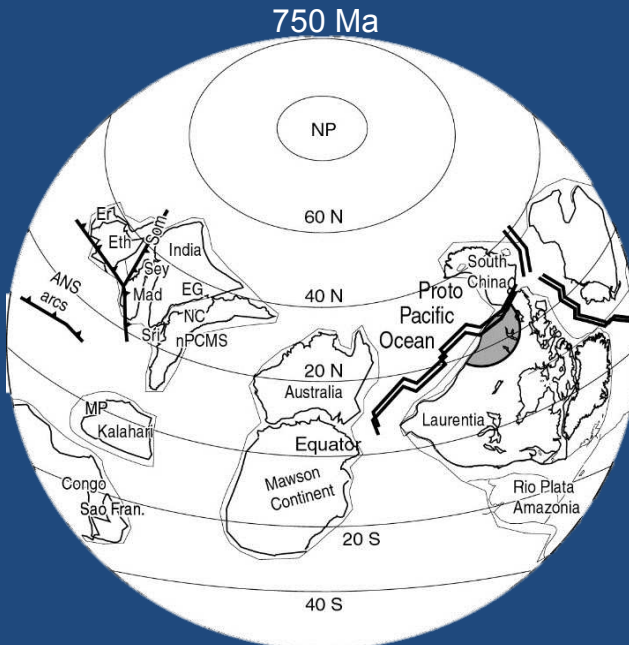


MÉCANISMES DE REFROIDISSEMENT GLOBAL À LONG TERME

1 - Apparition de traps successives

2 - Position à basses et moyennes latitude des continents

3 - Fragmentation du supercontinent Rodinia

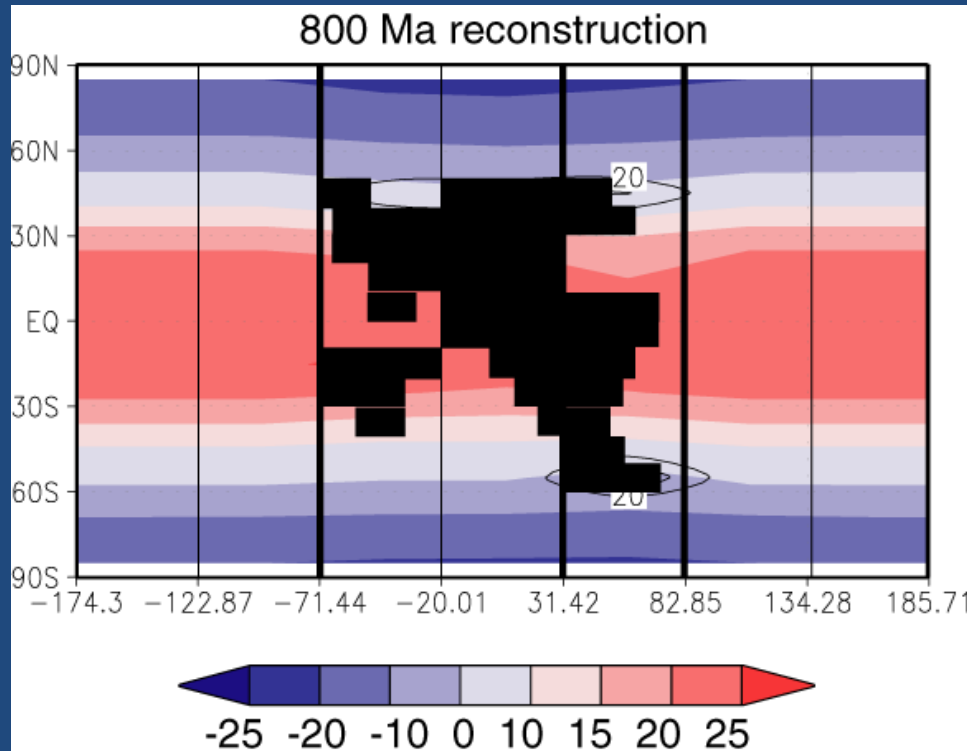


LES PREMIERS RÉSULTATS ...

1 – A 800 Ma

Le modèle s'équilibre à un $p\text{CO}_2$ 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 continentales mais le climat est quand même relativement froid

Donnadieu et al, Nature 2004

LES PREMIERS RÉSULTATS ...

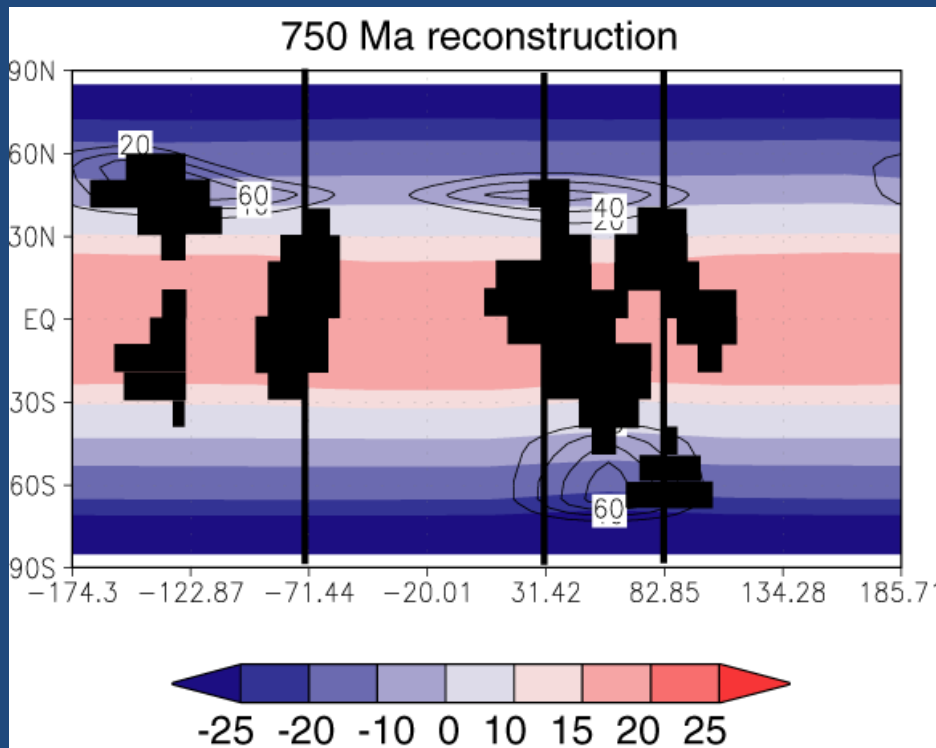
1 – A 750 Ma

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

Réduction de 1300 ppm

Soit une température
globale moyenne de 2°C

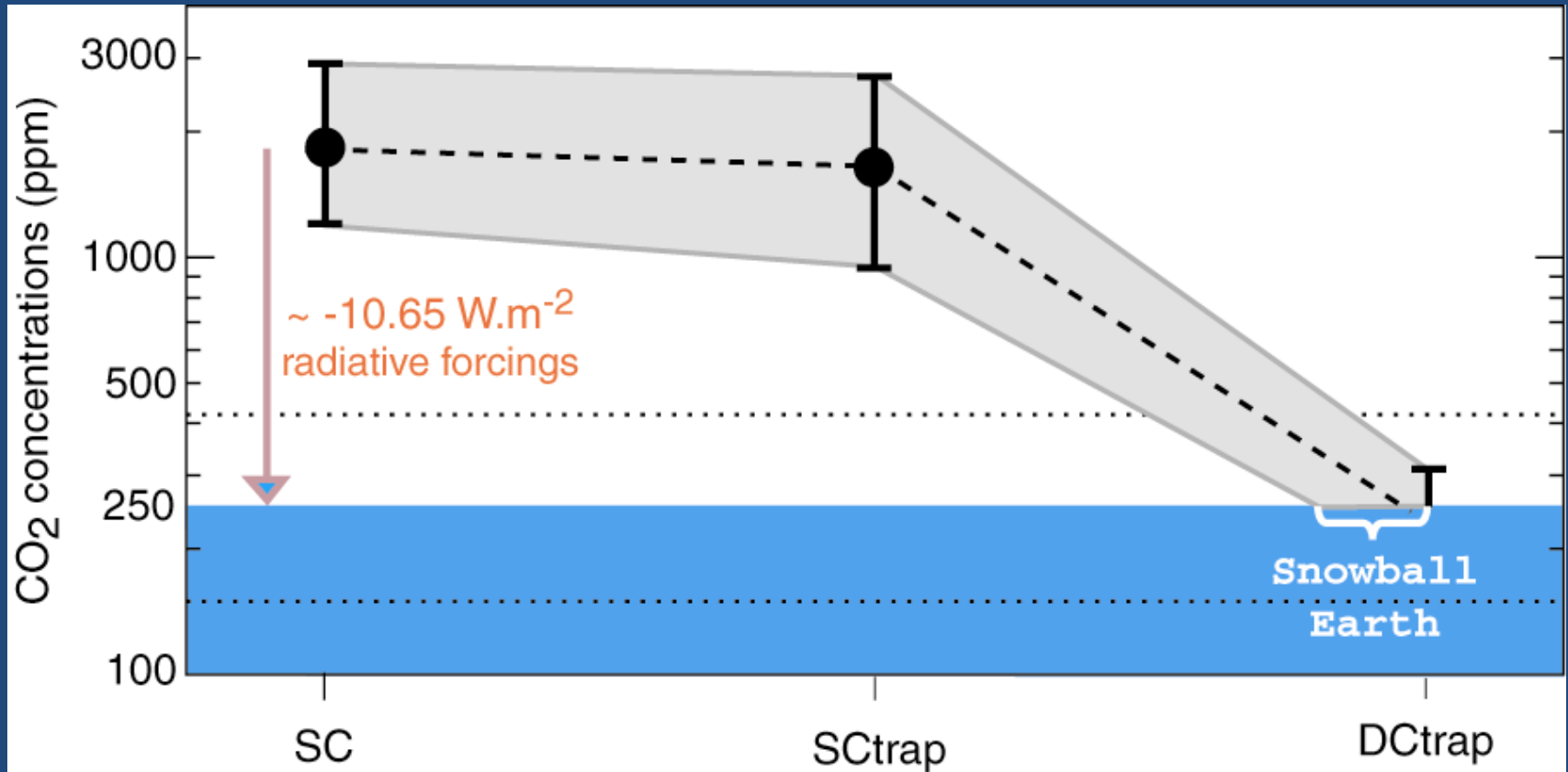
Réduction de 8.2°C



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

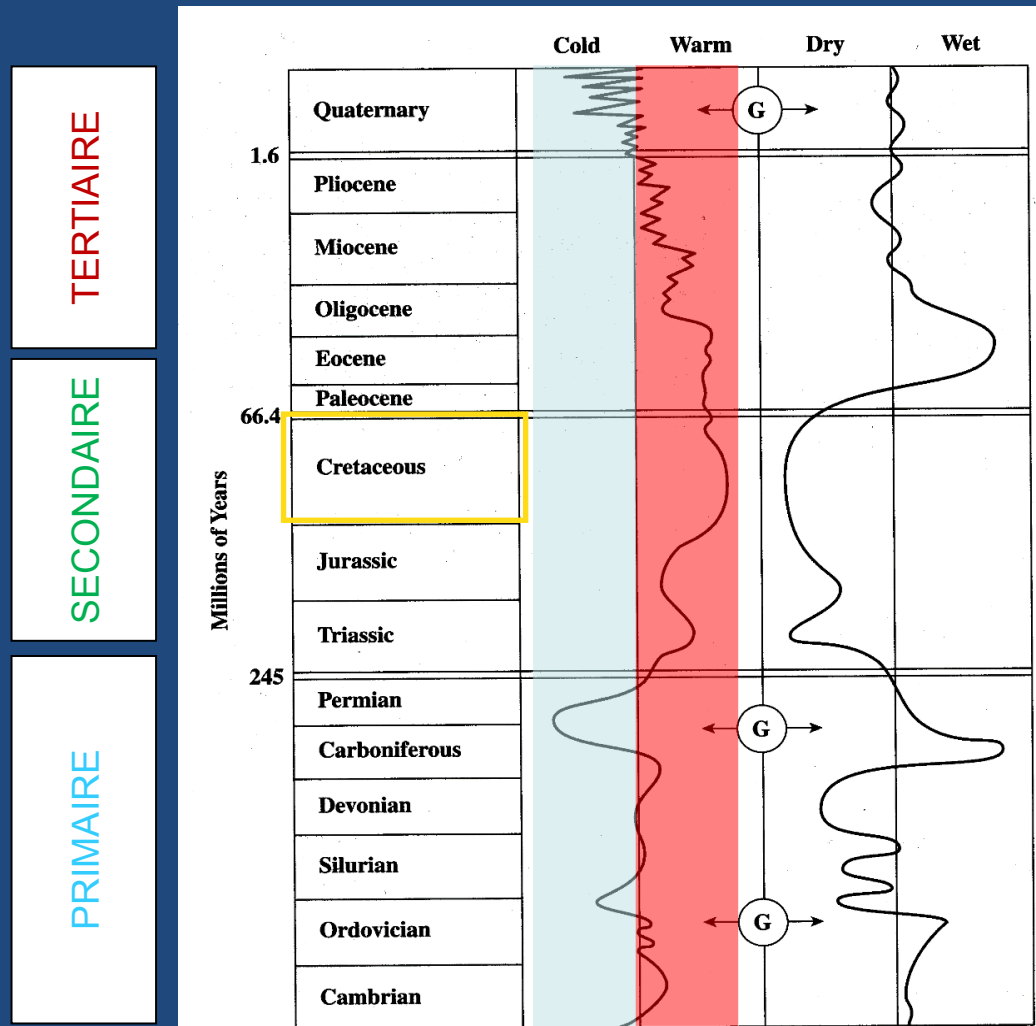


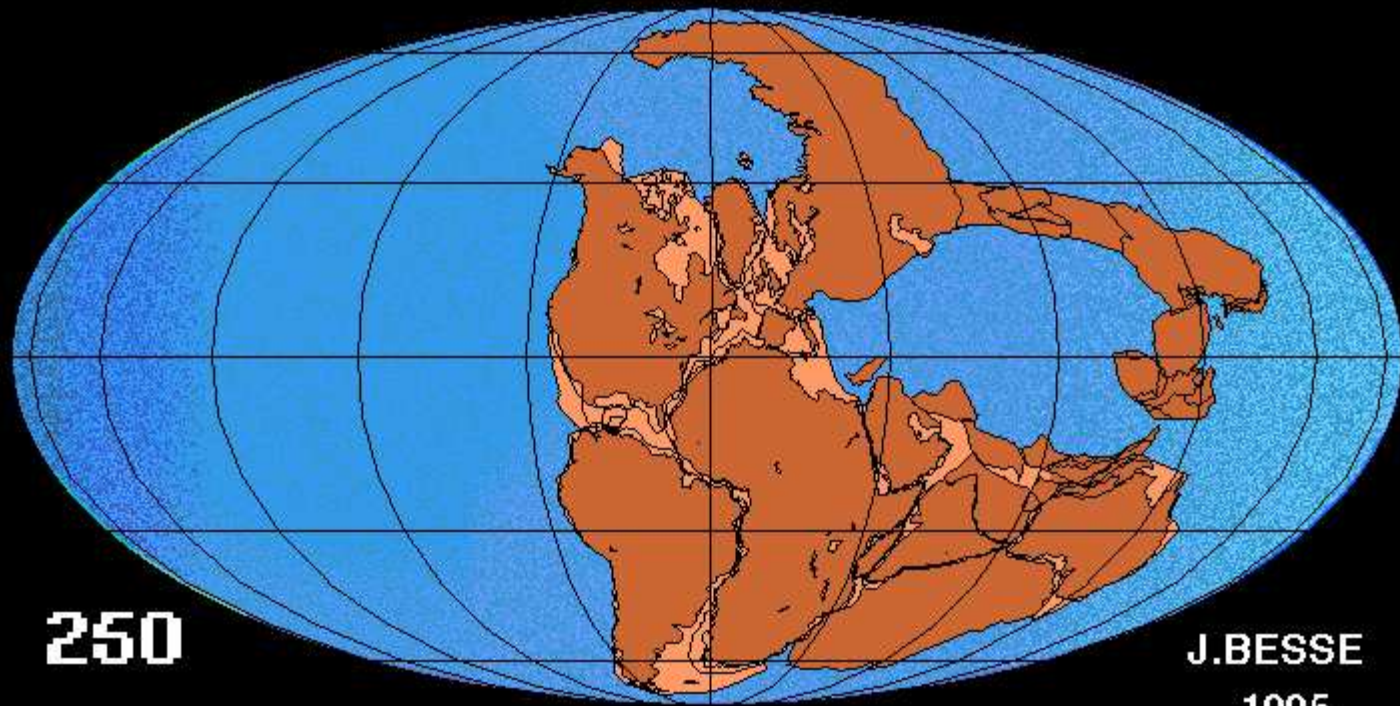
IMPACT SUR LE CO₂



LES PÉRIODES CLIMATIQUES CHAUDES

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





250

**J.BESSE
1995**

CONTEXTE : MÉCANISMES D'ENGLACEMENT POSSIBLES

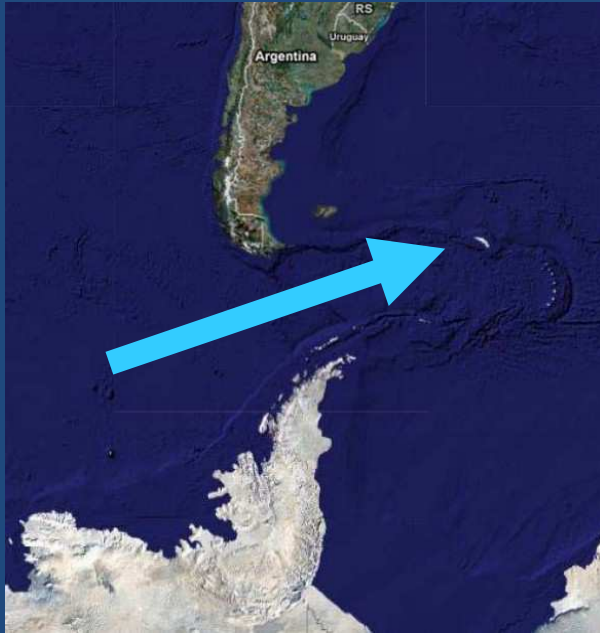
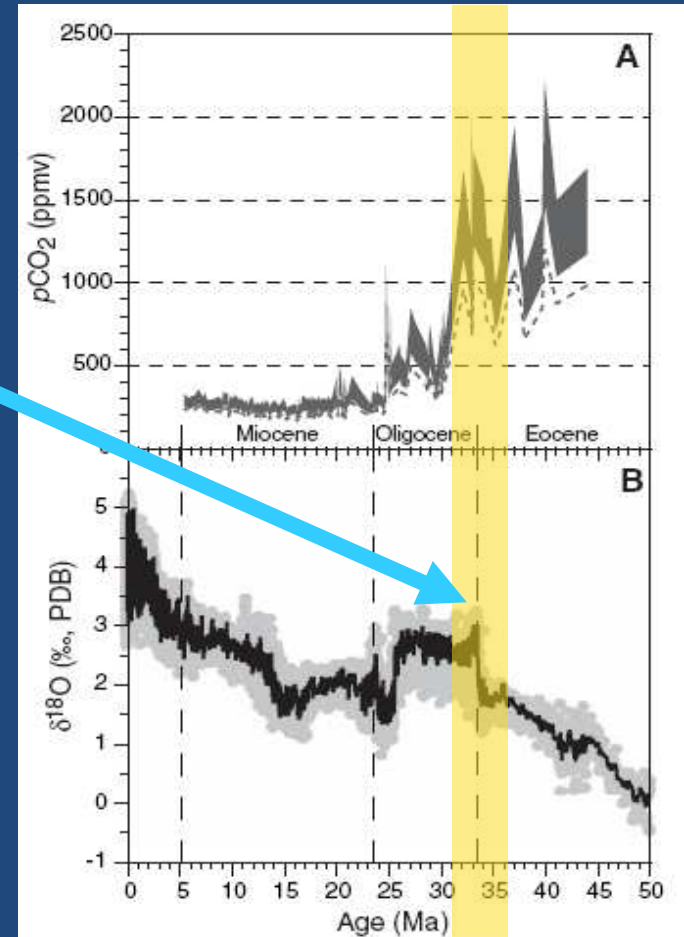


Image from google maps

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 CO₂ à long terme

Pagani et al., 2005



Chimpanzé

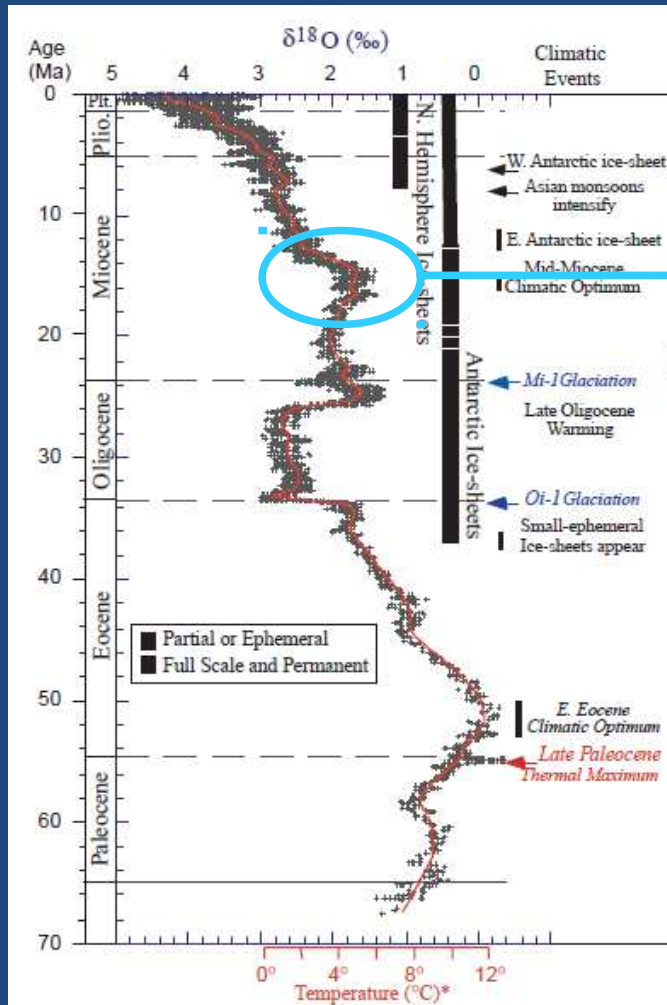


Gorille



Orang-Outan

©primates.com



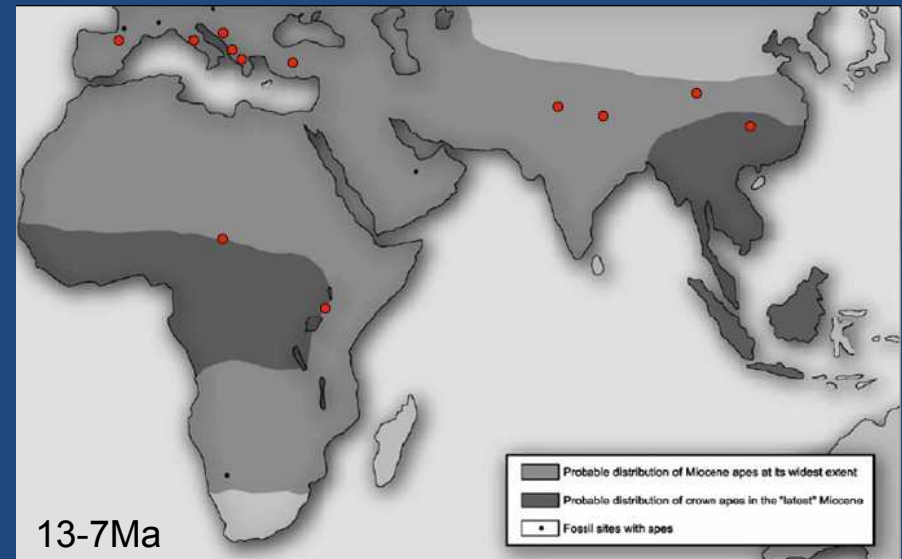
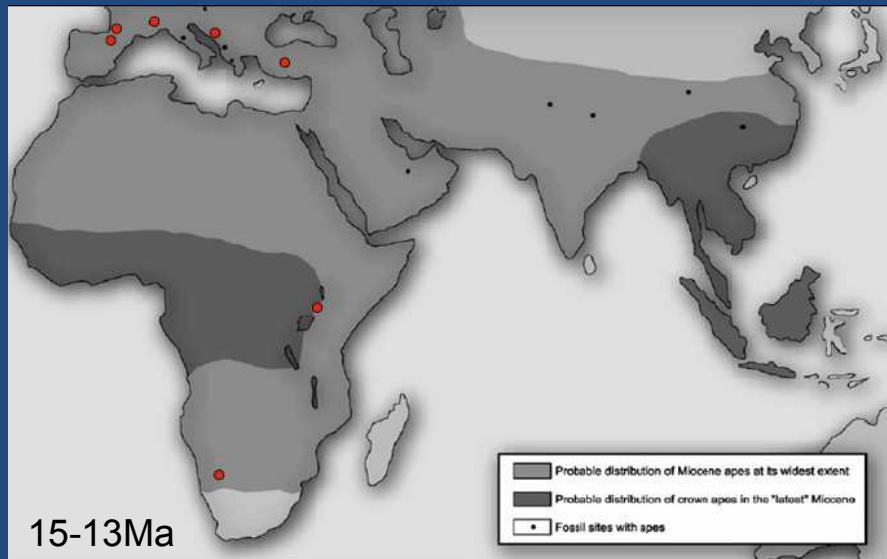
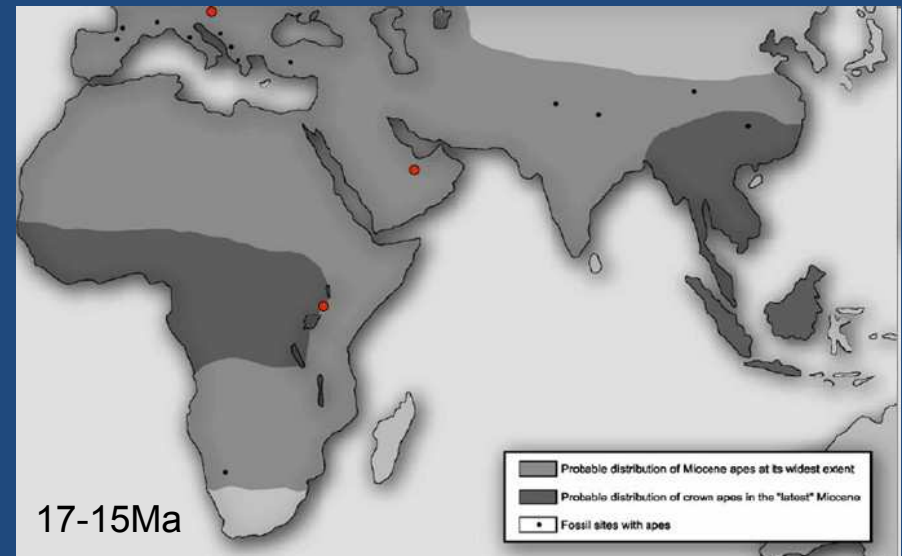
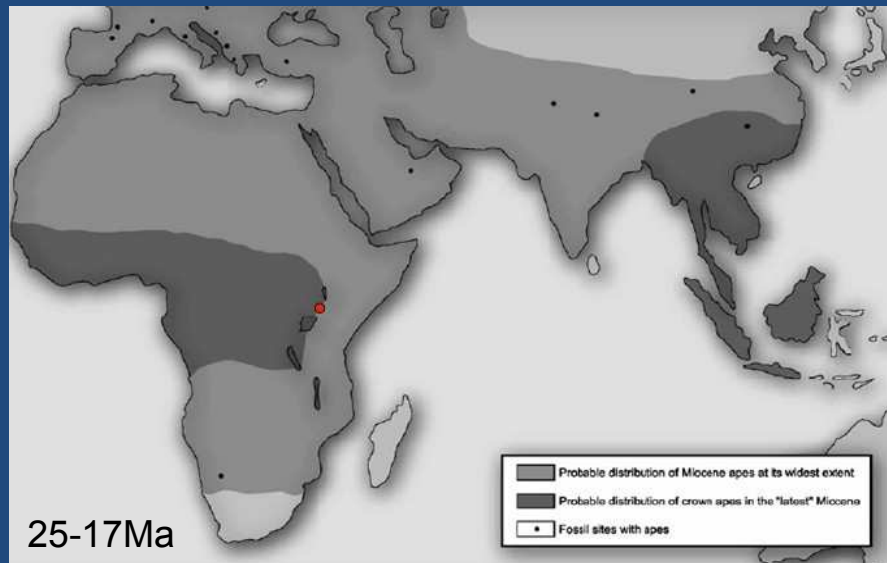
Zachos et al., 2001

- 🌍 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

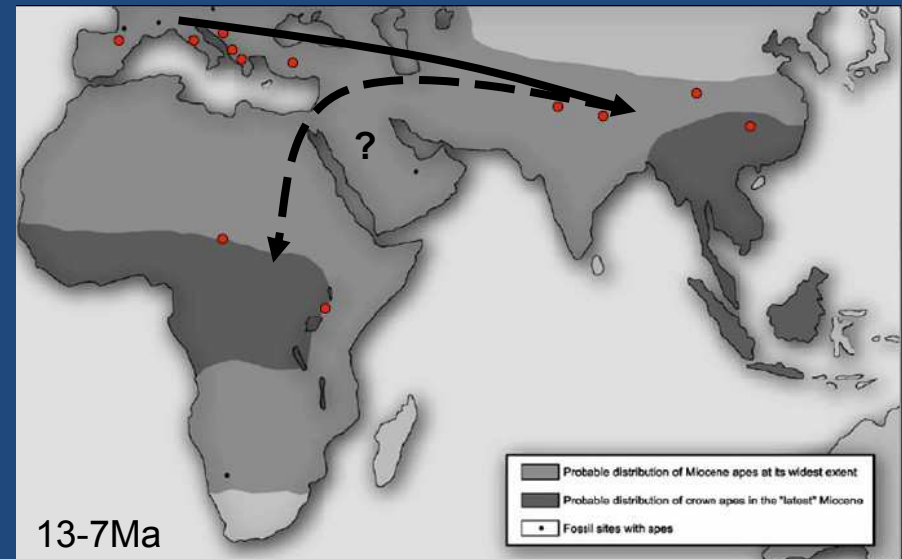
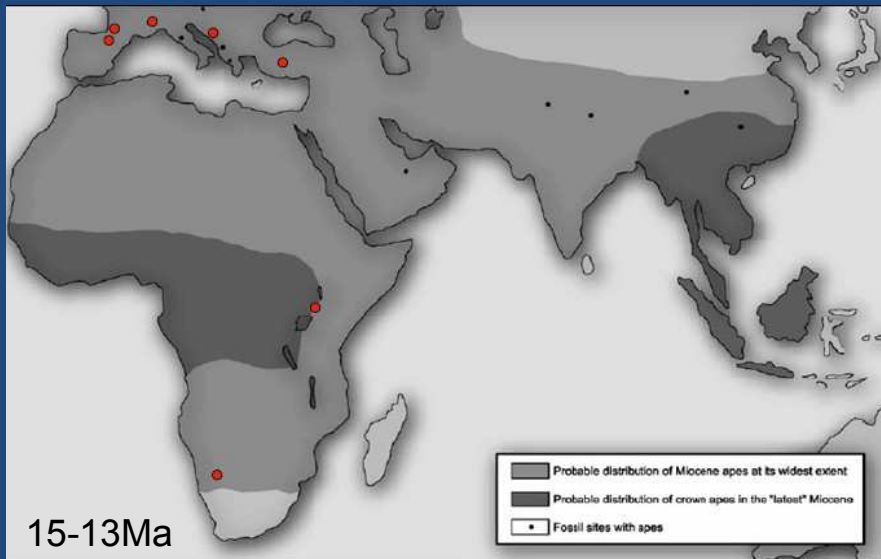
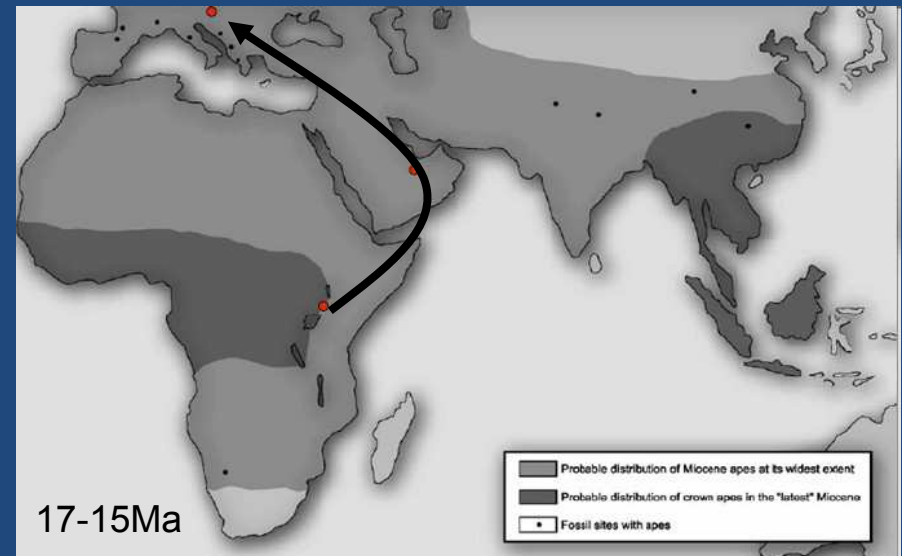
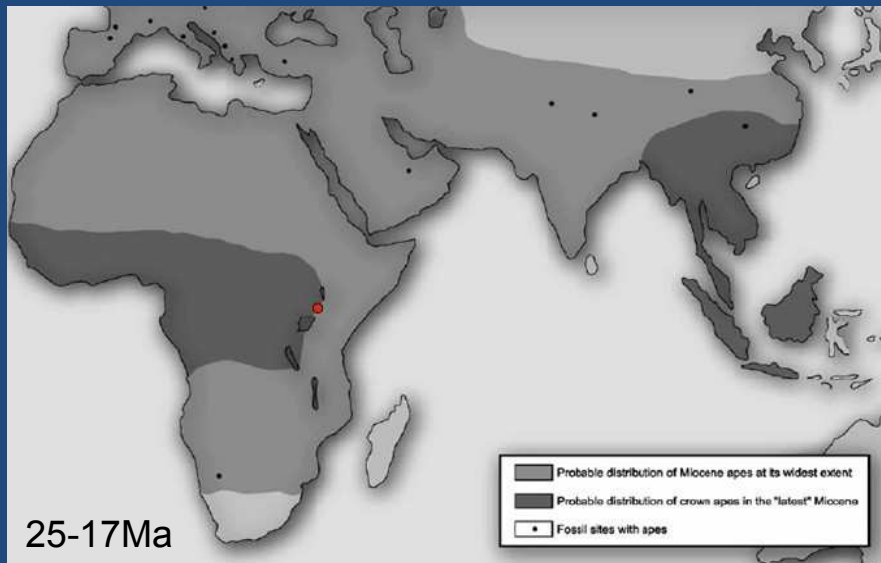
Pilbeam & Young, 2004



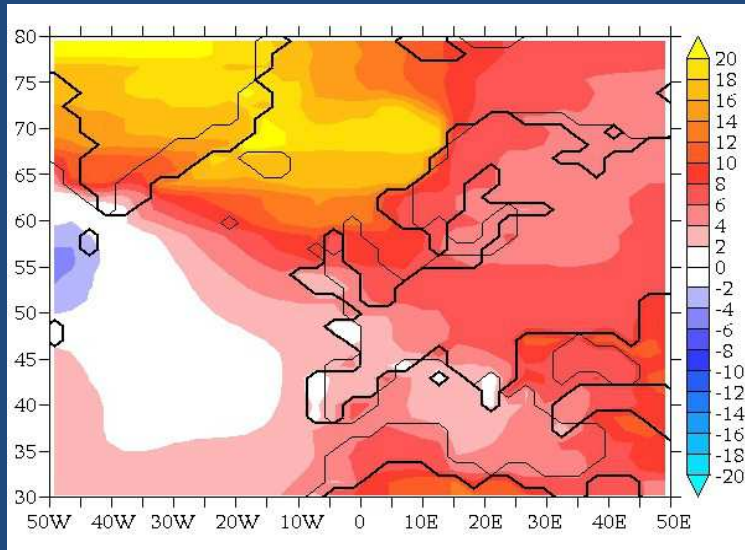
REGISTRE DES FOSSILES

Fossil Hominoids

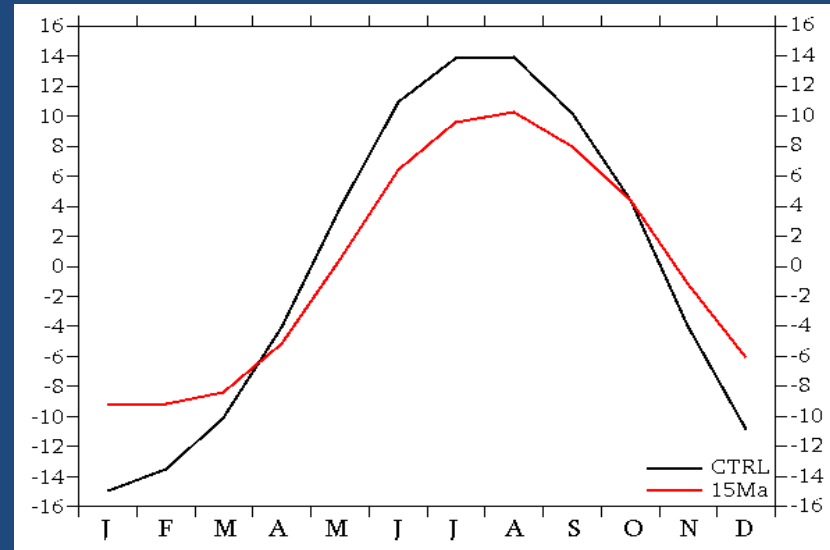
Pilbeam & Young, 2004



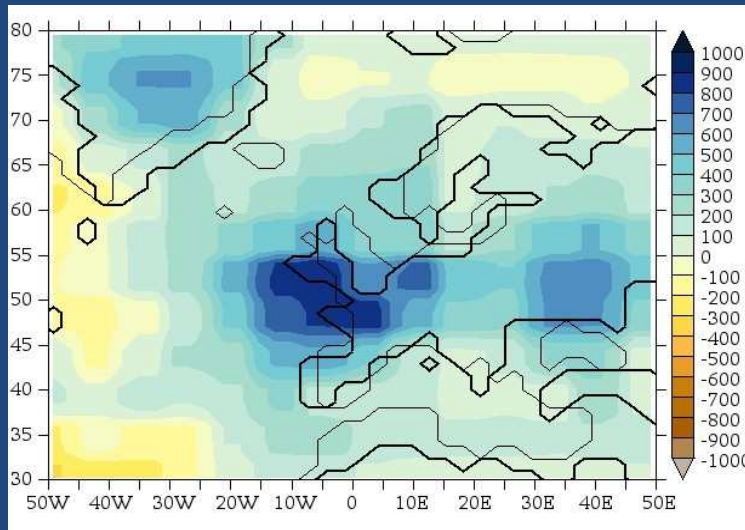
CHANGEMENT CLIMATIQUE



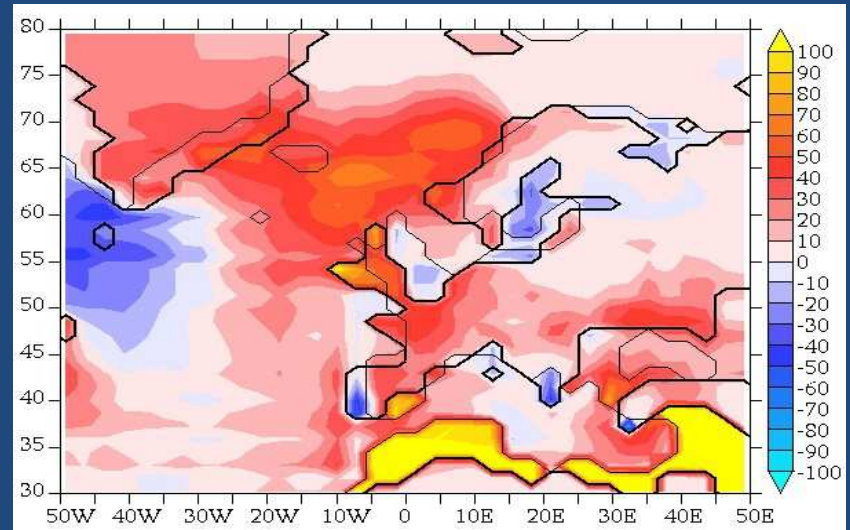
Mean Annual Temperature Anomaly (°C) : 15Ma-CTRL



Monthly Temperature – Mean Annual Temperature (°C)



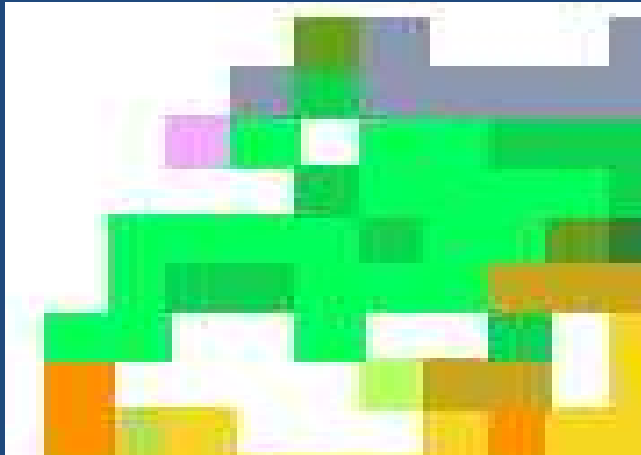
Mean Annual Precipitation Anomaly (mm) : 15Ma-CTRL



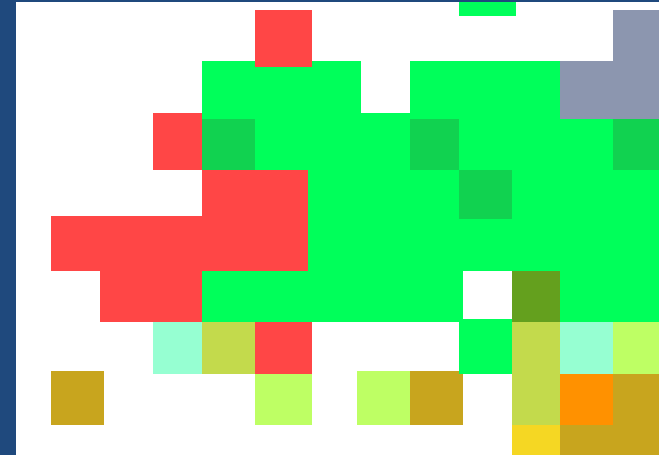
Mean Annual Evaporation Anomaly (mm/mth) : 15Ma-CTRL

CHANGEMENT DE LA VÉGÉTATION

CTRL



15Ma

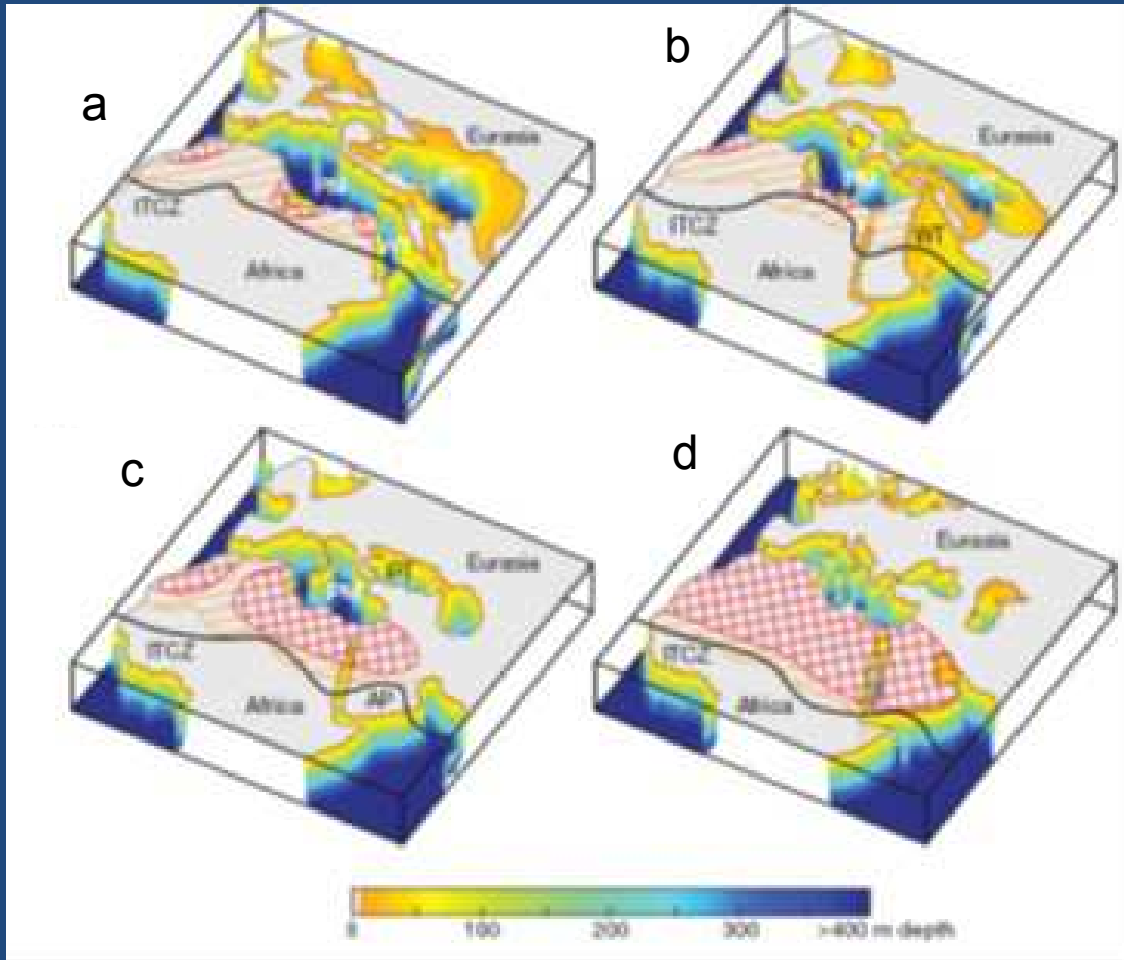


Développement de la forêt subtropicale en raison de conditions plus chaudes et plus humides, avec un contraste saisonnier réduit.

- Compatible avec les données en Europe
- Permet aux grands-singes de se disperser en Europe



DISPARITION DE LA MER ÉPICONTINENTALE TÉTHYS



a. Fin de l'Oligocène
[33- 28 Ma]

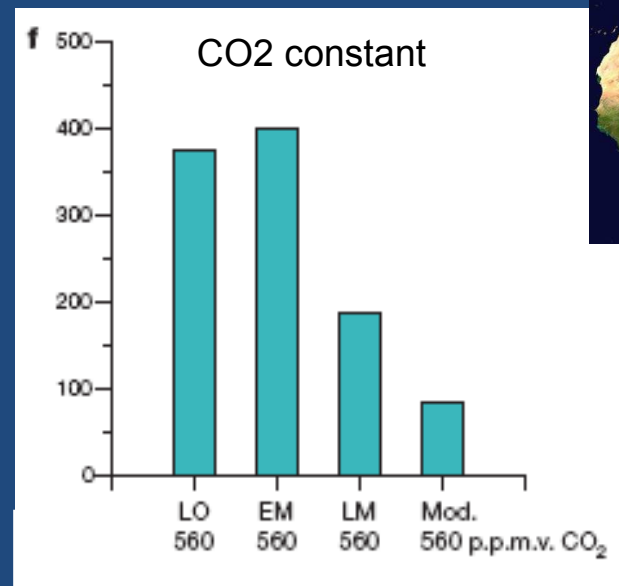
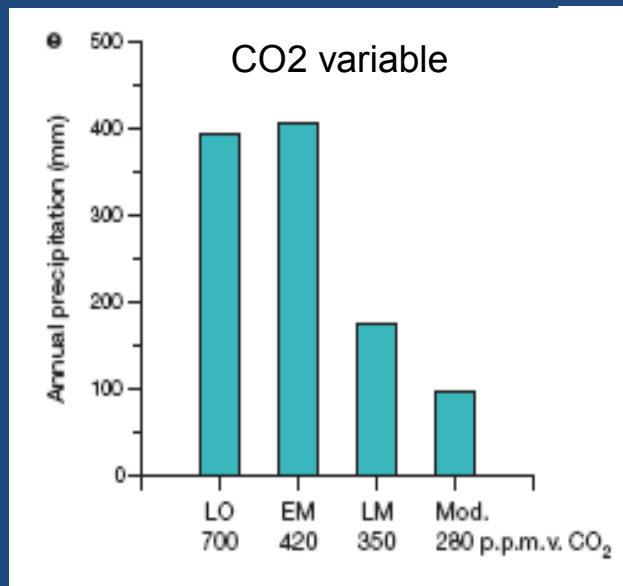
b. Début du Miocène
[20-17]

c. Fin du Miocene
[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



Sahara

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

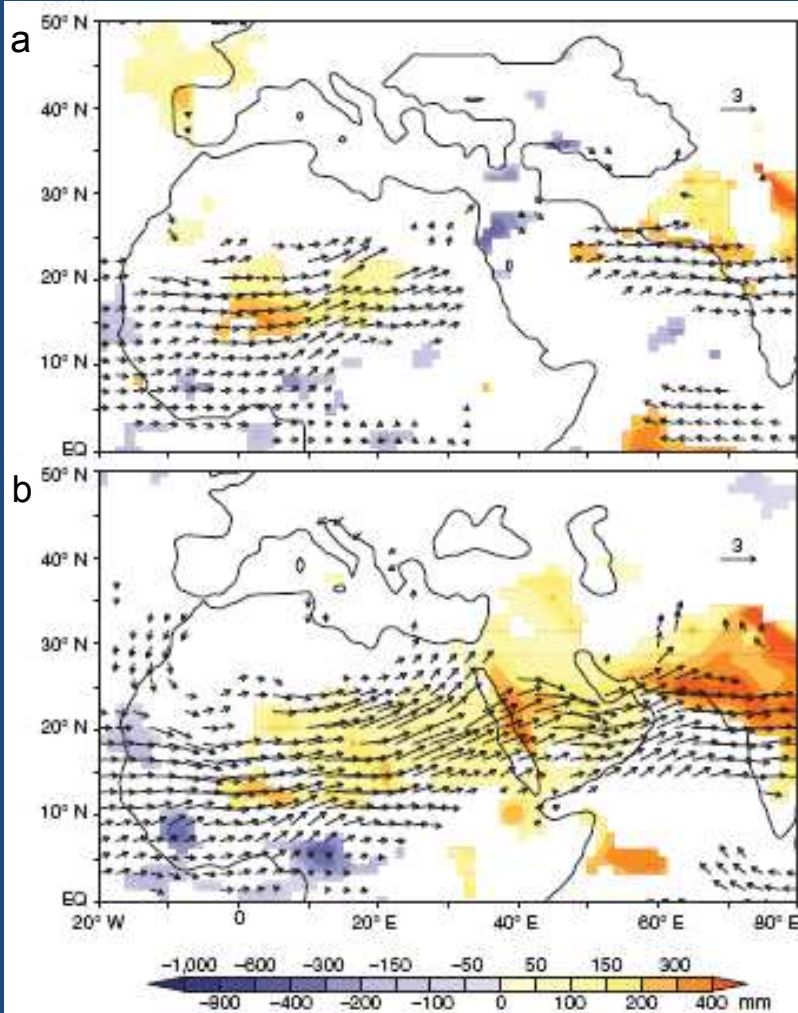
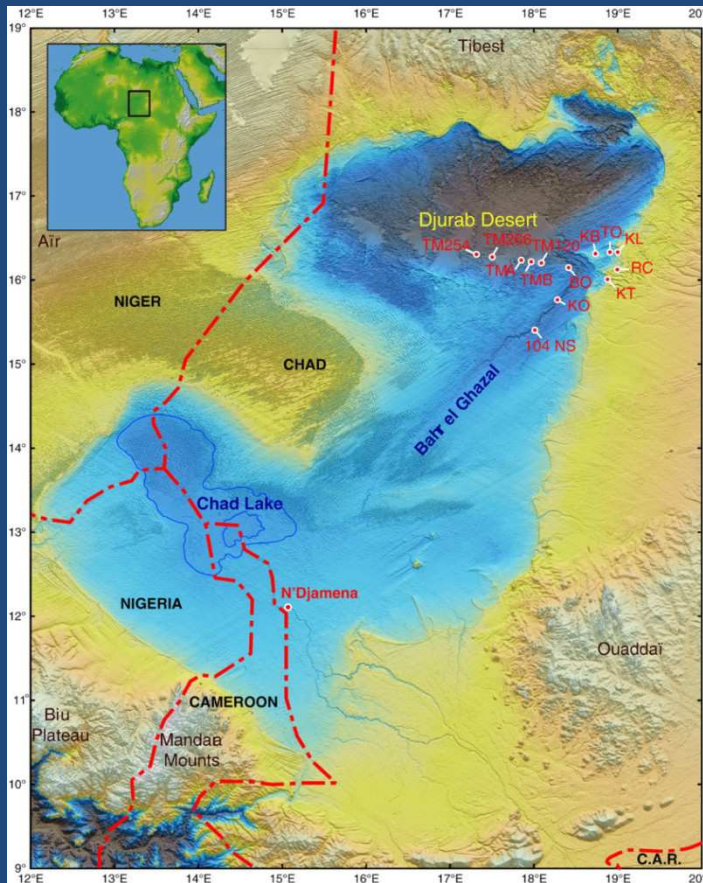


Figure 4 | Climate response to increased summer insolation in the Northern Hemisphere before and after Tethys shrinkage. Response in annual precipitation (mm, shading) and 850-hPa summer winds (ms^{-1} , arrows) to a change in orbital parameters from today to 6 kyr ago (higher minus lower Northern Hemisphere 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 km²



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



Toumaï, 7 Ma (*Brunet et al., 2002*)



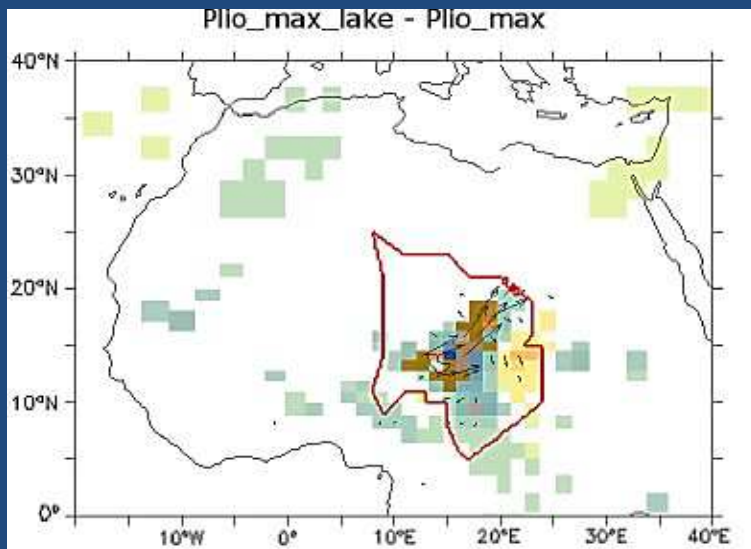
Le Pliocène et l'environnement de nos ancêtres

(Abel, *Australopithecus bahrelghazali*, 3.6 Ma)

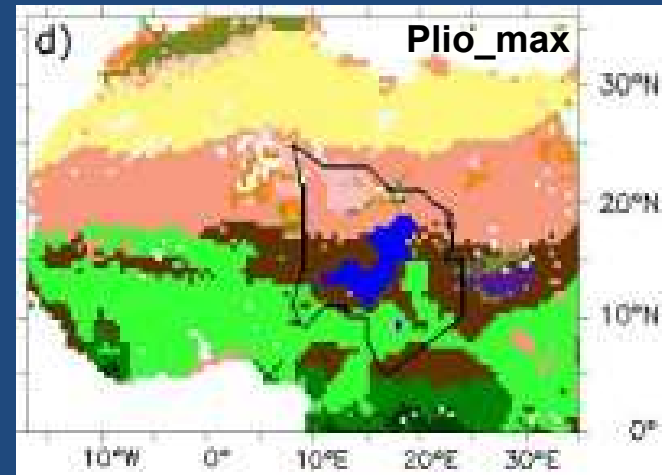
Contributions originales du LSCE :

L'impact du Mégalac Tchad sur le climat et l'environnement au Pliocène

(Contoux et al., *Clim. Past*, 9, 1417–1430, 2013)



Plus encore qu'à l'Holocène, le Pliocène est le siège de fréquentes occurrences du Mégalac Tchad (350 000 à 400 000 km² de superficie)



Si on tient compte de l'existence de ce lac avec un modèle zoomé sur cette région, on peut simuler climat et végétation. Cette végétation est compatible avec l'existence d'Abel

Abel, 3.6 Ma premier hominidé à avoir été découvert à l'ouest du rift africain sur les rives de Mégalac Tchad

(Brunet et al., 1995)

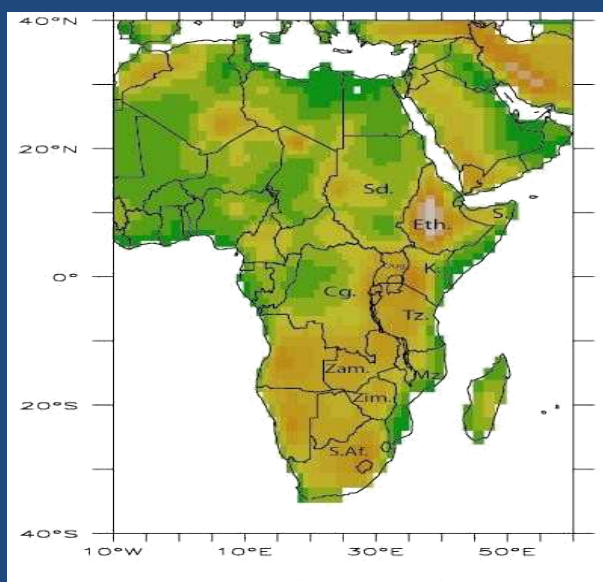


Quel est l'impact de la tectonique ?

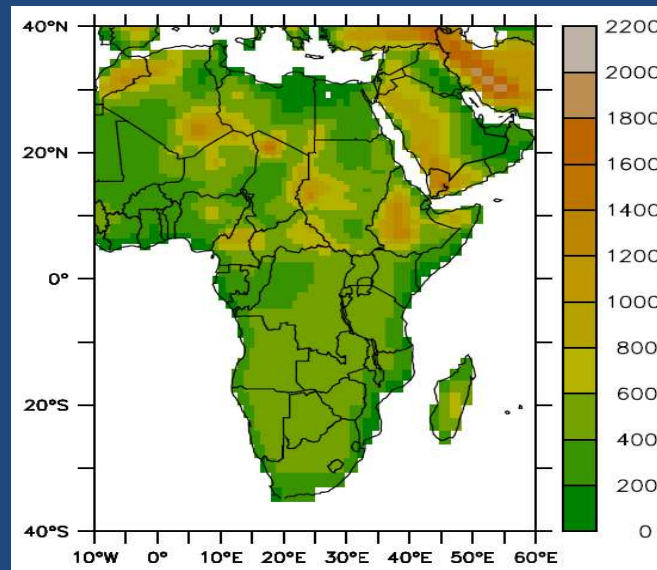


Différents scénarios topographiques

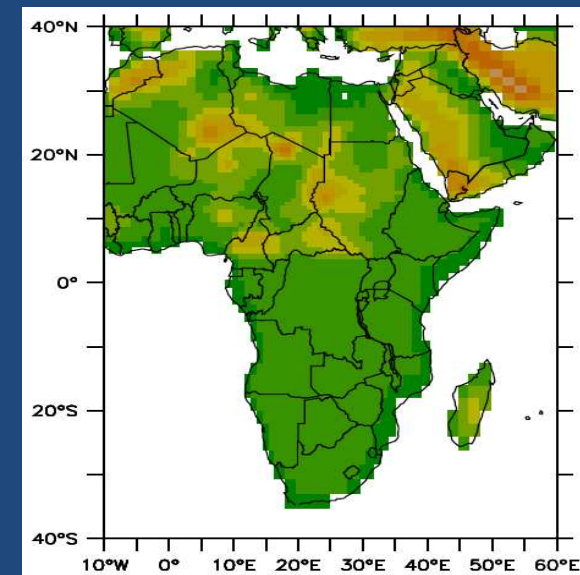
Present



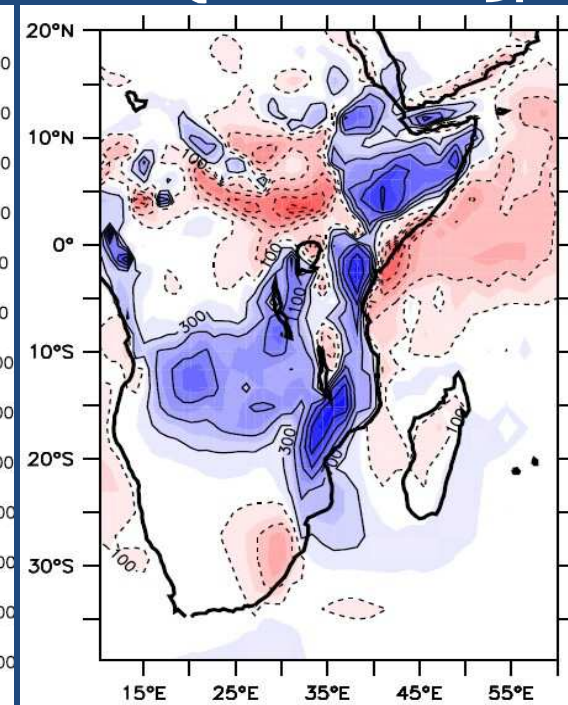
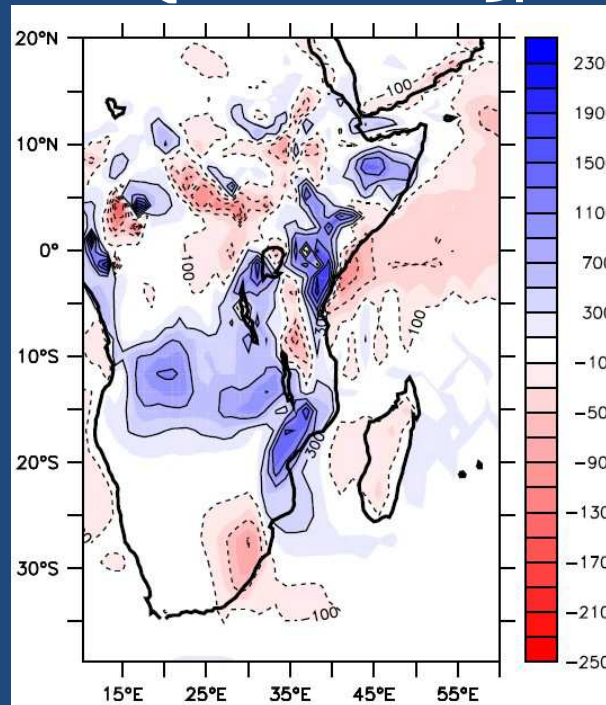
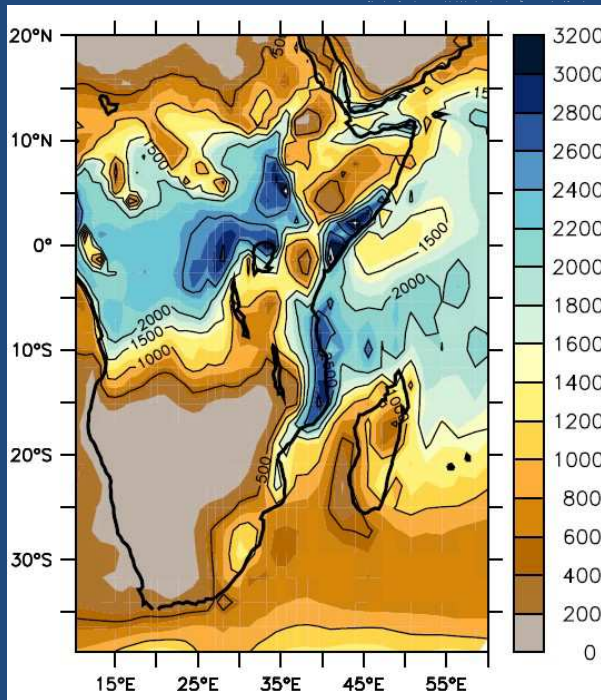
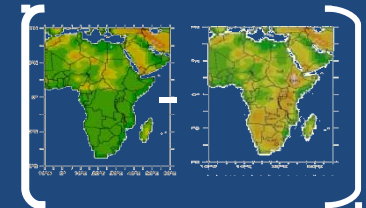
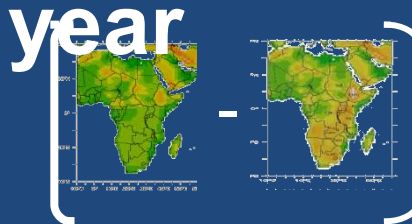
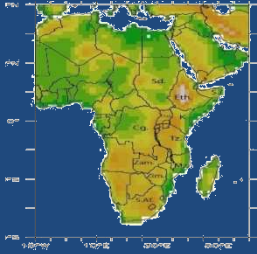
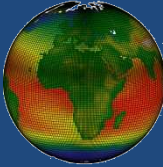
Traps



NoRel



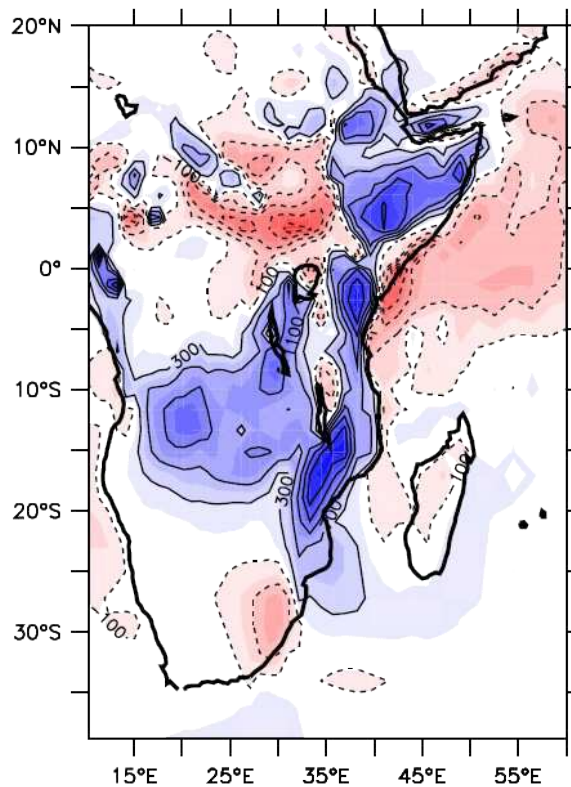
Rainfall patterns : mm / year



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

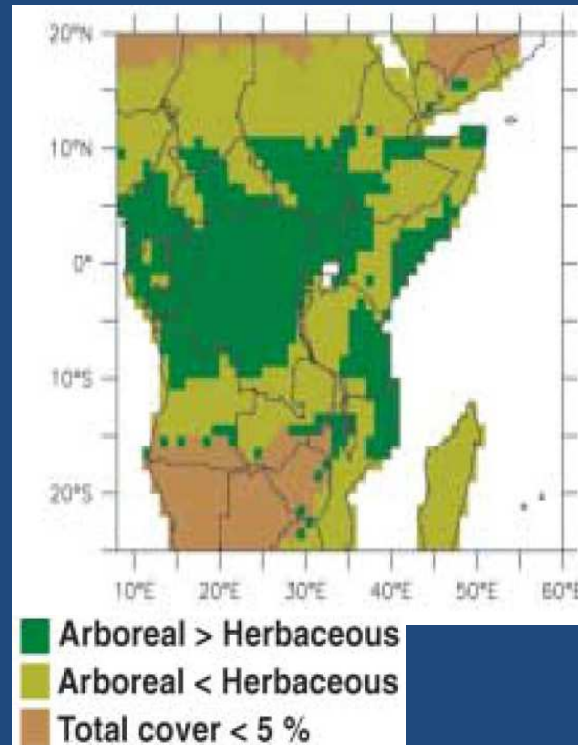
Uplift led to eastern Africa aridification...

NoRel - Present



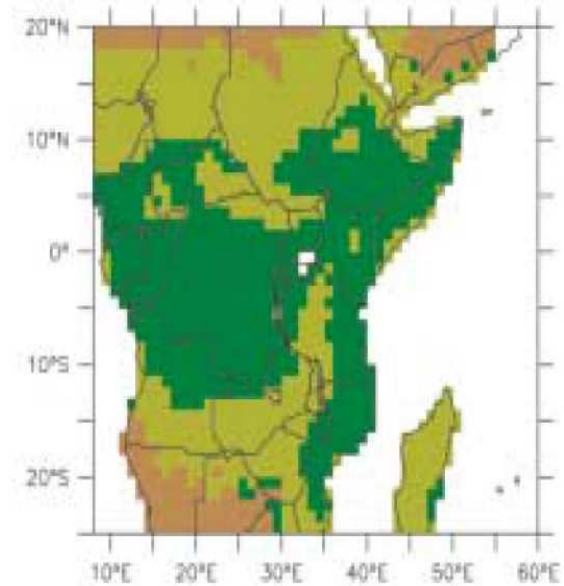
Rainfall anomaly
(mm/year)

Present



Arboreal > Herbaceous
Arboreal < Herbaceous
Total cover < 5 %

NoRel



Simulated vegetation cover

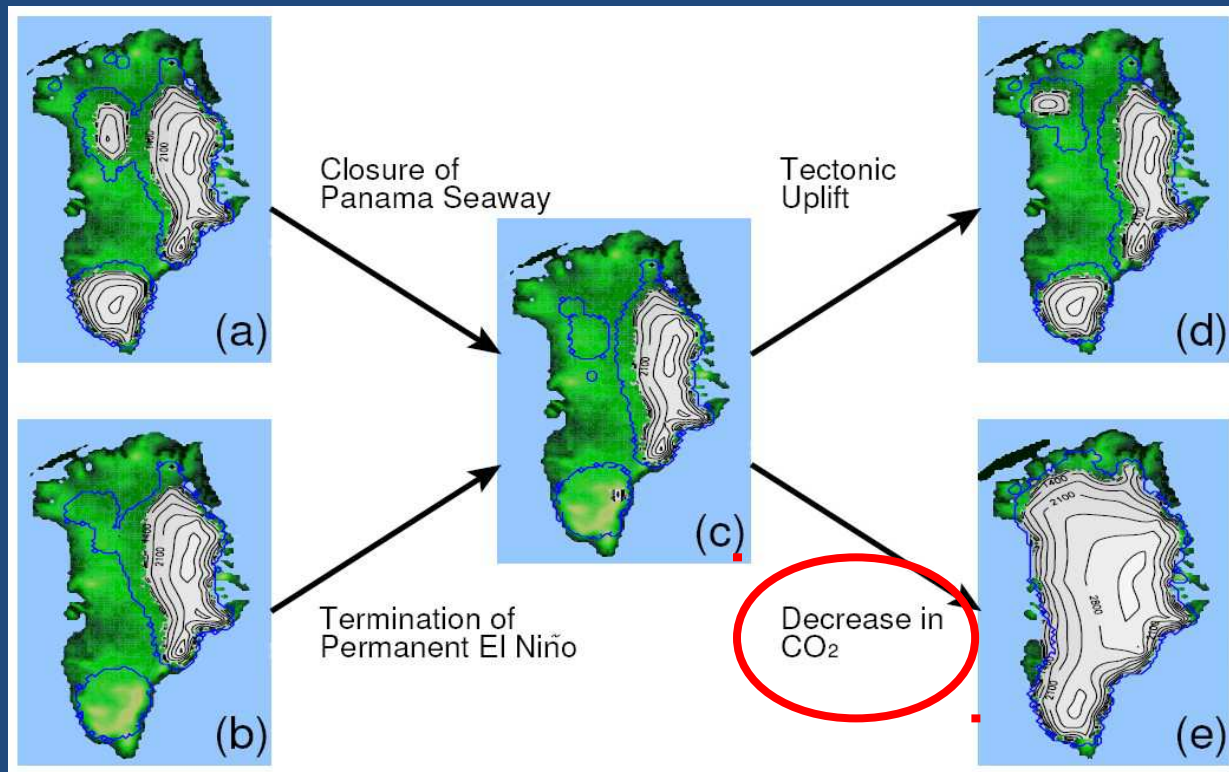
Sepulchre et al., *Science*, 2006

LA GLACIATION DU GROENLAND À LA FIN DU PLIOCÈNE

Pagani et al., 2005

Motivation

Une étude récente de D. Lunt a montré le rôle predominant de la diminution progressive en $p\text{CO}_2$ de 400 à 280ppm par rapport à tous les autres forçages

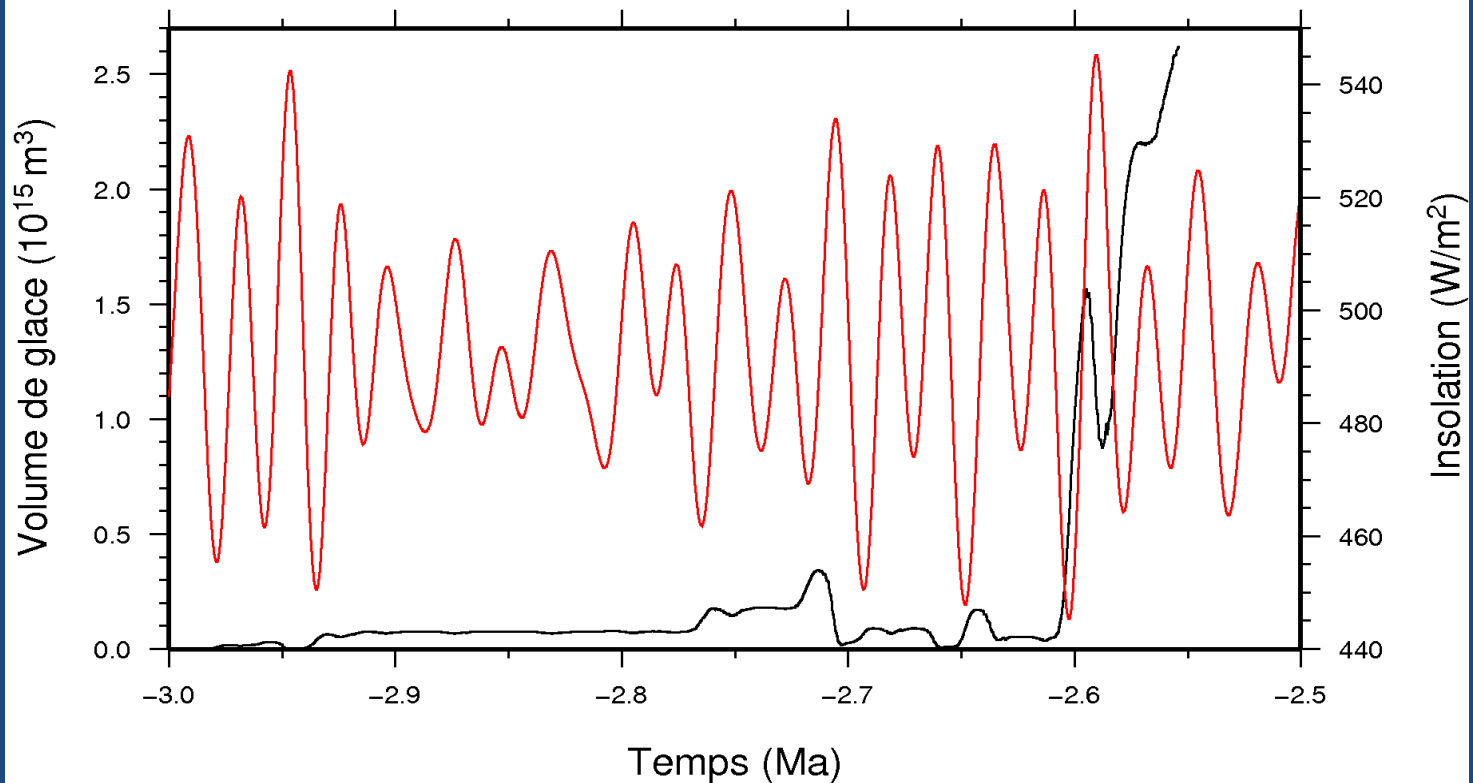


Qu'en est-il de l'influence de l'évolution de la contrainte radiative pendant le Pliocène tardif :

une insolation calculée lors d'une simulation transitoire de 500ka

VOLUME DE GLACE DU GROENLAND ET INSOLATION ENTRE 3MA ET 2.5 MA

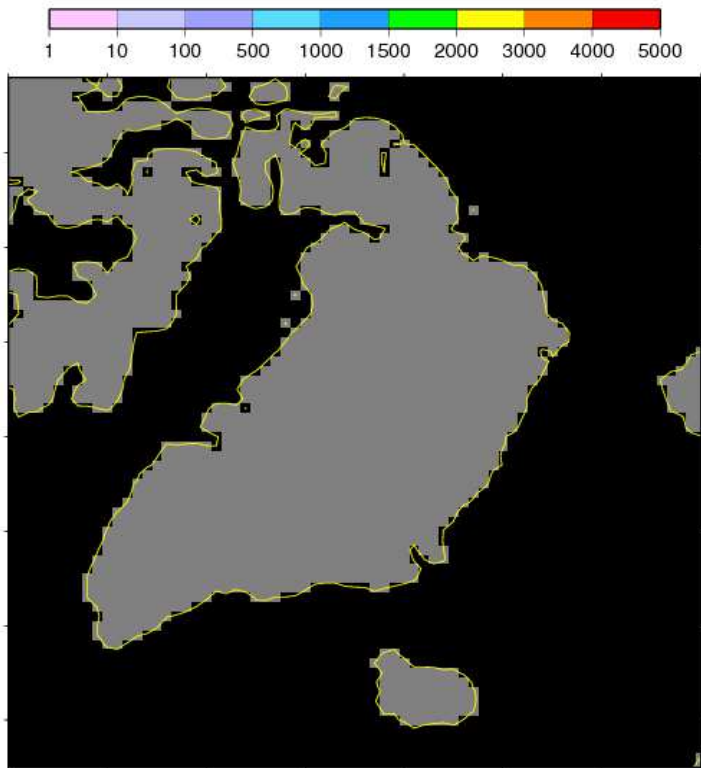
Englacement du Groenland 1PAL



GREENLAND : 150 KY SIMULATION AT 3.88 MA

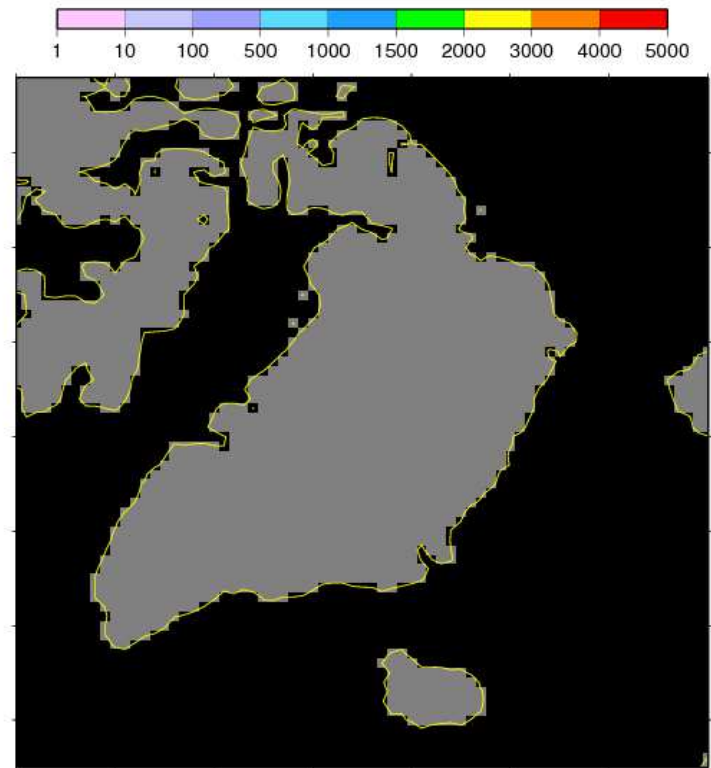
$\text{CO}_2 = 280 \text{ ppm}$

Greenland
 $t = -3880 \text{ ky BP}$



$\text{CO}_2 = 320 \text{ ppm}$

Greenland
 $t = -3880 \text{ ky BP}$

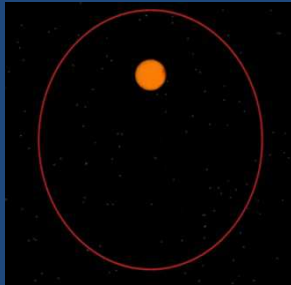


Sortie imminente dans *Nature Communication* d'une étude modélisant le basculement monde chaud / froid et l'établissement d'une calotte pérenne au Groenland.

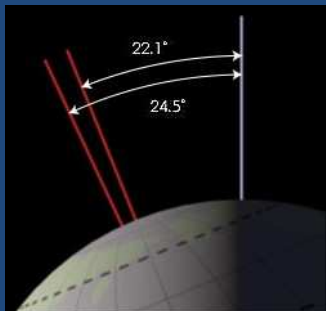
LE TEMPS DE LA DIZAINE DE MILLIERS D'ANNÉES

Le temps des paramètres orbitaux

Le temps des variations orbitales : de 10 000 à 100 000 ans



L'excentricité de la Terre varie entre des valeurs très proches de 0 et une valeur maximum de 0.06, avec des fréquences de 400 000 et 100 000 ans

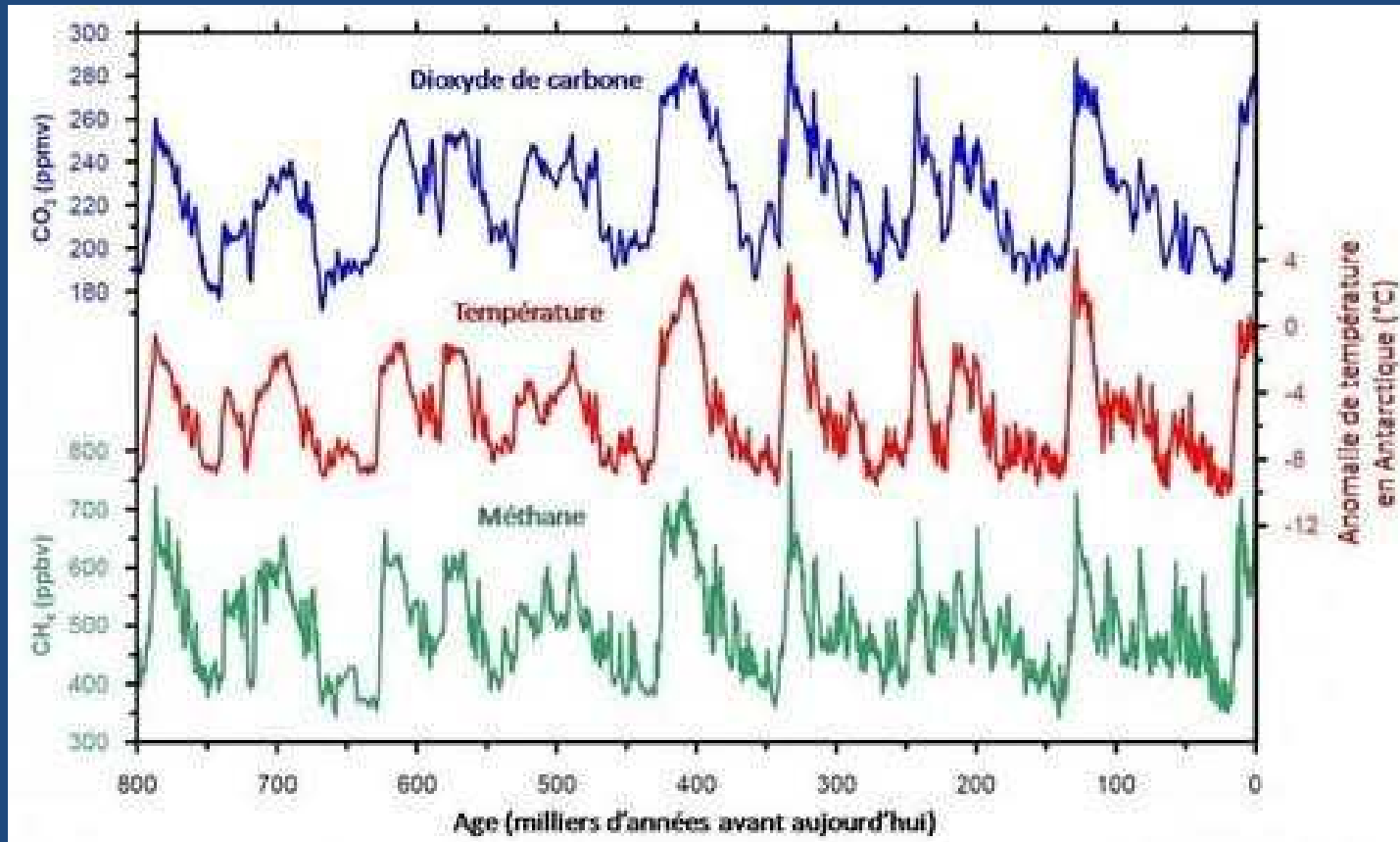


Les équinoxes et les solstices se déplacent sur la trajectoire elliptique avec une période d'environ 20 000 ans

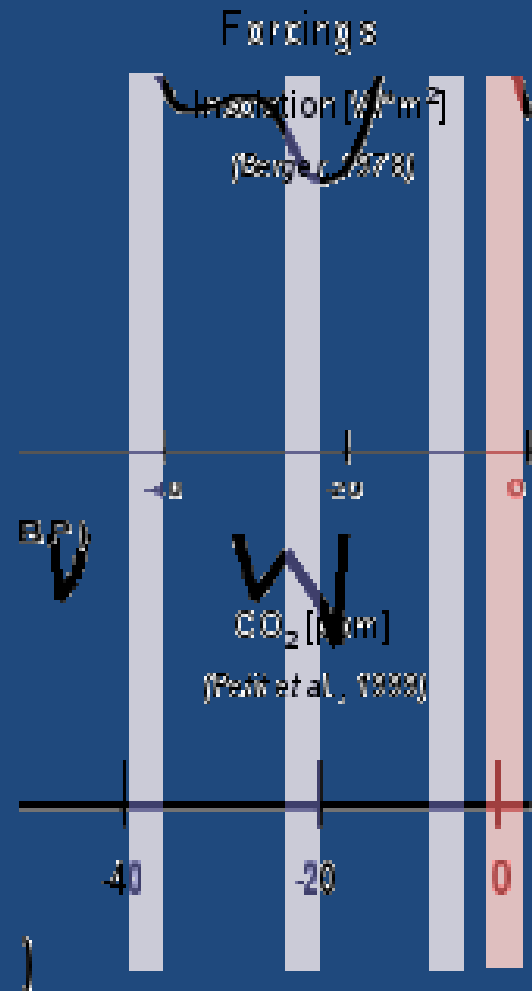


L'obliquité varie entre 22.1° et 24.5° avec une fréquence de 41 000 ans

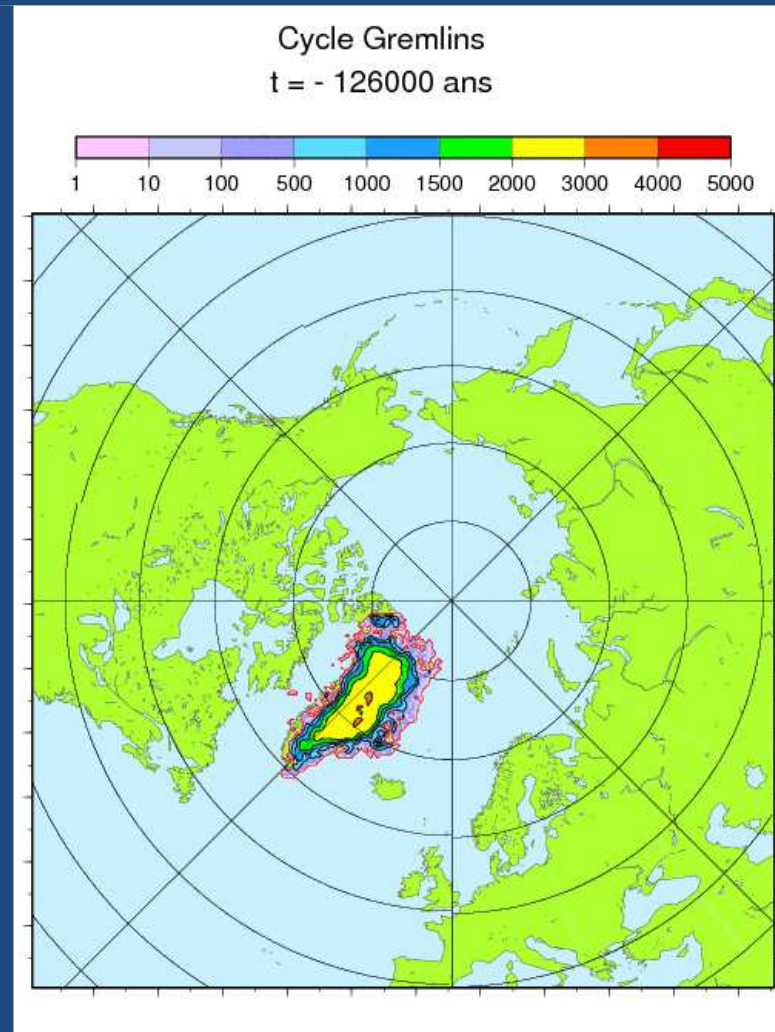
Reconstructions des températures et de la teneur en gaz à effet de serre issues des forages en **Antarctique**



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



NOUVEAU CYCLE: MIS5 À PRÉSENT

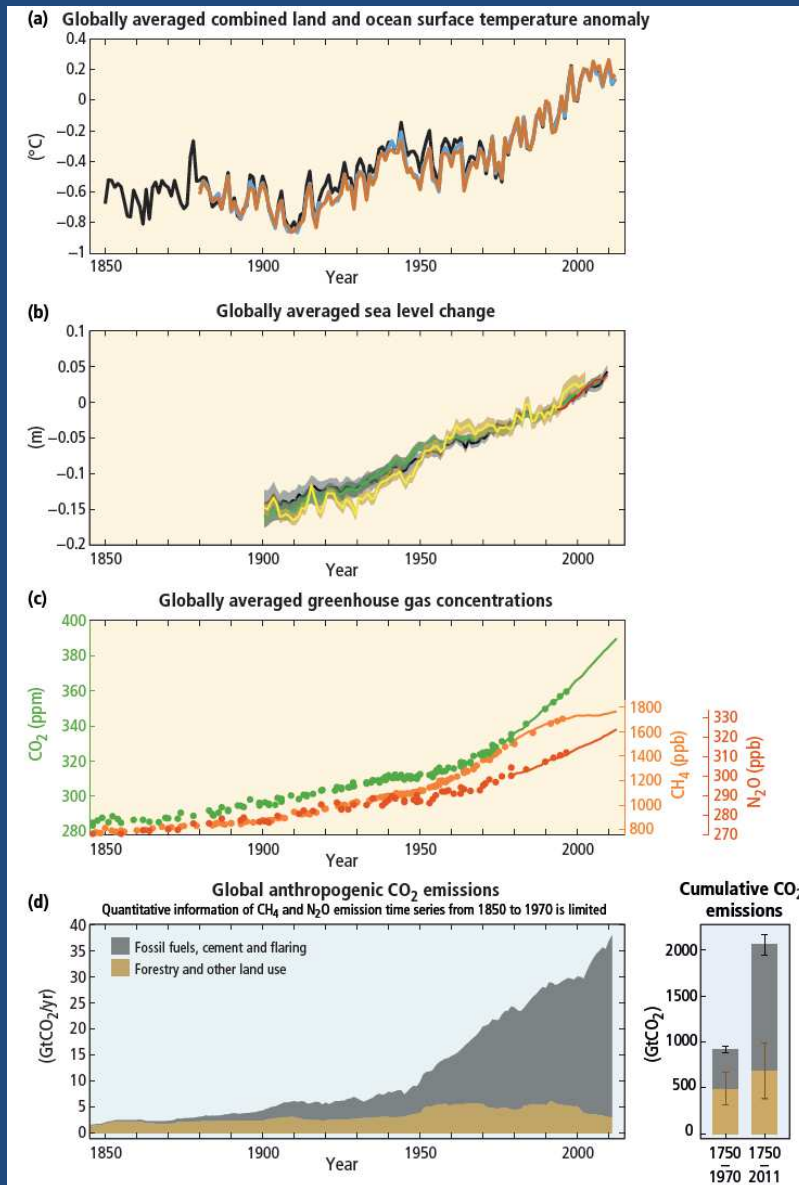


Bonnelli et al, Clim past 2009

LE TEMPS DE LA CENTAINE D'ANNÉES

Le temps de l'Homme

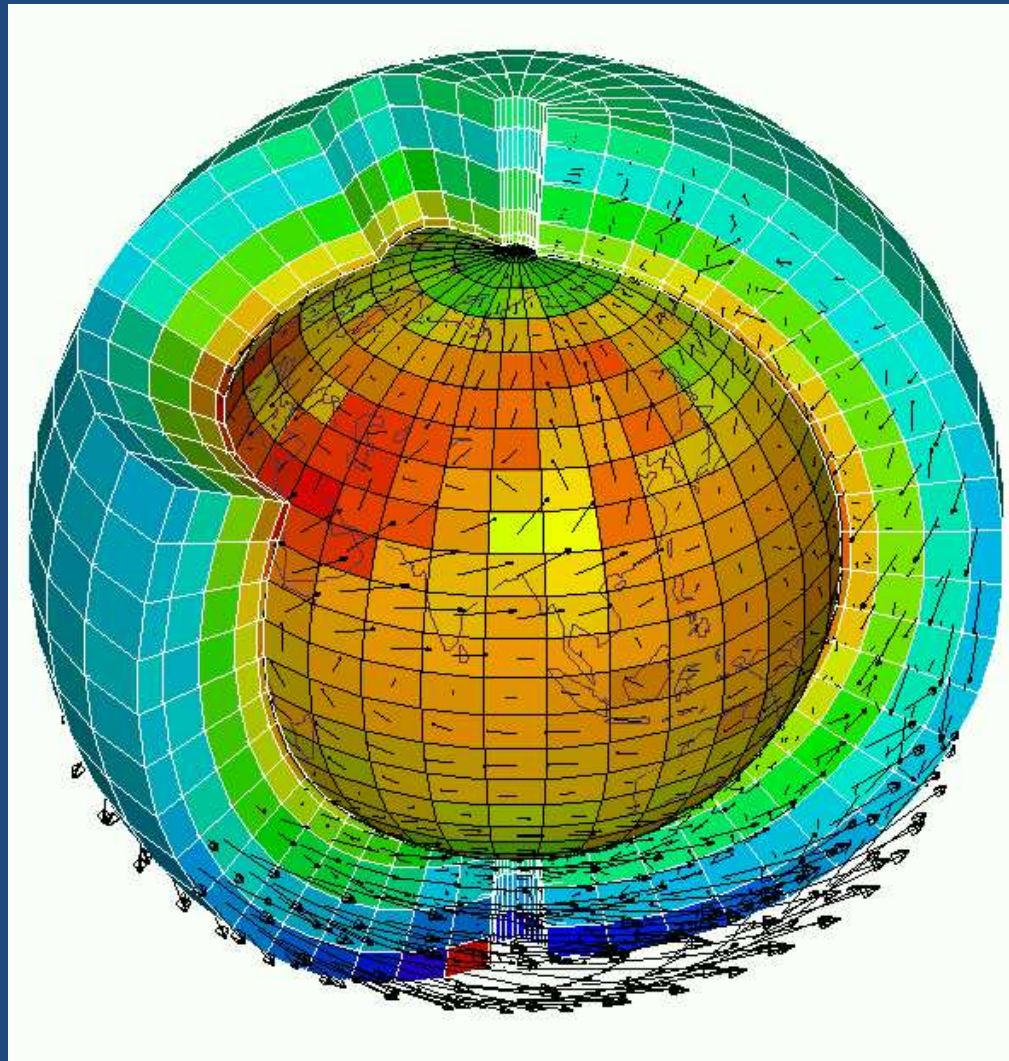
Cette valse climatique à trois temps s'achève dans un monde froid avec deux calottes de glace pérennes. Le quatrième temps de la valse va donc s'exercer dans ce contexte froid qui sera responsable de nombreuses ruptures...



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

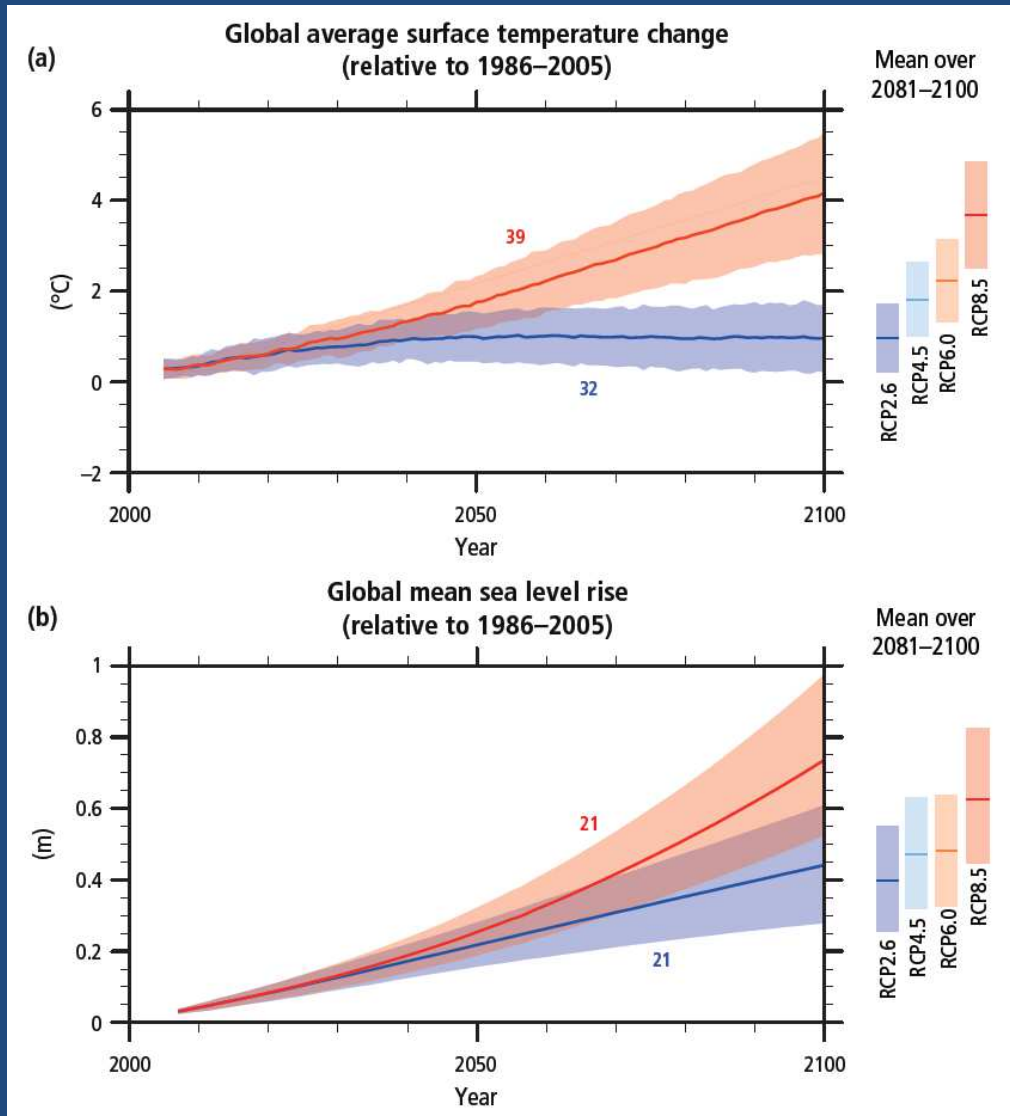


Figure 6 du résumé à l'intention des décideurs 5ème rapport du GIEC

SCÉNARIOS DE VARIATION DE TEMPÉRATURE ET DES PRÉCIPITATIONS

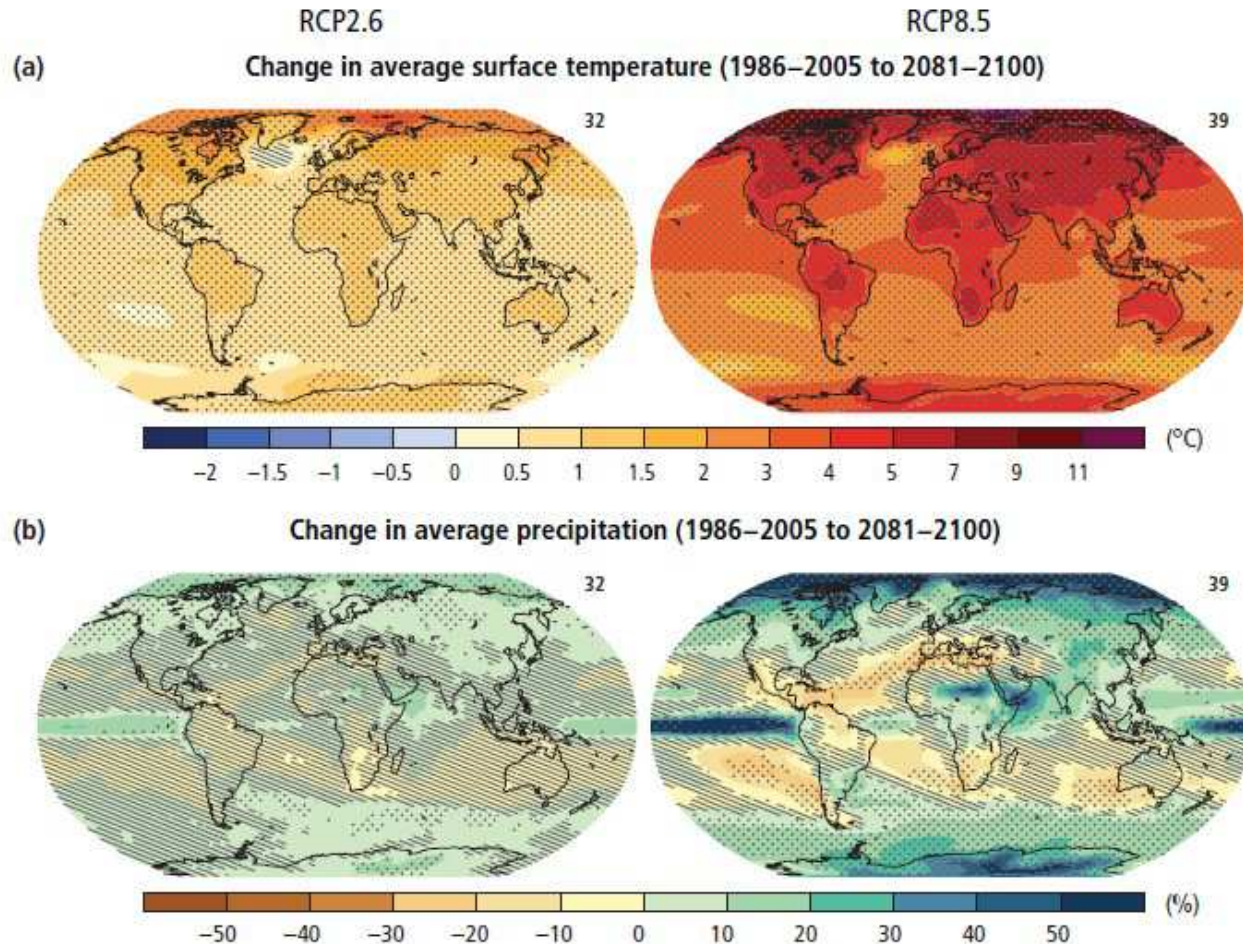


Figure 7 du résumé à l'intention des décideurs 5ème rapport du GIEC

Contexte de l'expérience anthropocène : I

À l'échelle géologique, l'utilisation massive des combustibles fossiles : un grand feu d'artifice



De plus, le contexte est celui d'un monde froid, avec des calottes de glace dans chaque hémisphère



Contexte de l'expérience anthropocène: II

Depuis 10 000 ans, la population s'est sédentarisée et a colonisé le monde pendant la période stable de l'holocène.

La population est environ de 7,3 milliards en 2015 et atteindra environ 9,3 milliards en 2050.

Une partie importante de la population mondiale vit près des côtes,

Population mondiale en 2000



Population mondiale en 2050



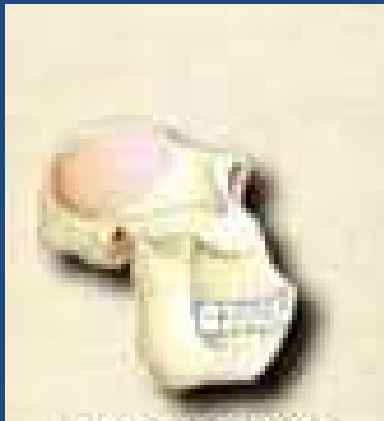
CONCLUSIONS

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.

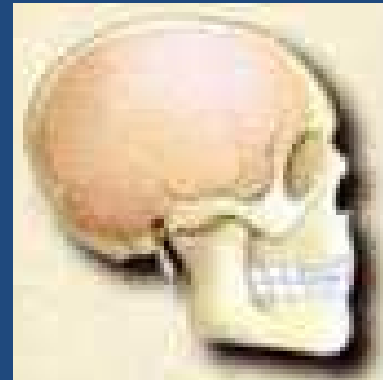
- 🌍 Au Cénozoïque [65-2,5 Ma], le climat se refroidit, le taux de CO₂ baisse, les calottes Antarctique (34 Ma) et Groenlandaise (2,6Ma) se mettent en place.
- 🌍 Au Quaternaire, des oscillations pilotées par les variations orbitales font basculer le climat de la phase glaciaire (80%) à des phases interglaciaires.
- 🌍 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 CO₂ émises seule une va rester dans l'atmosphère

« L'explosion de la précarité nuit gravement au bon fonctionnement de la Recherche scientifique »

Merci !



AUSTRALOPITHECUS
(plus de 3 millions
d'années)
Volume cérébral : ~ 400
cm³



HOMO SAPIENS
L'Homme moderne
Volume cérébral :
de 1230 à 2 000
cm³