



Conférence au Collège de France
*Le climat sur Terre a toujours changé,
mais pourquoi l'Anthropocène
est-il un changement inédit ?*
Jeudi 9 janvier 2025
Gilles Ramstein
Dans le cadre de la Chaire
« Avenir Commun Durable » de François-Marie Bréon

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 :

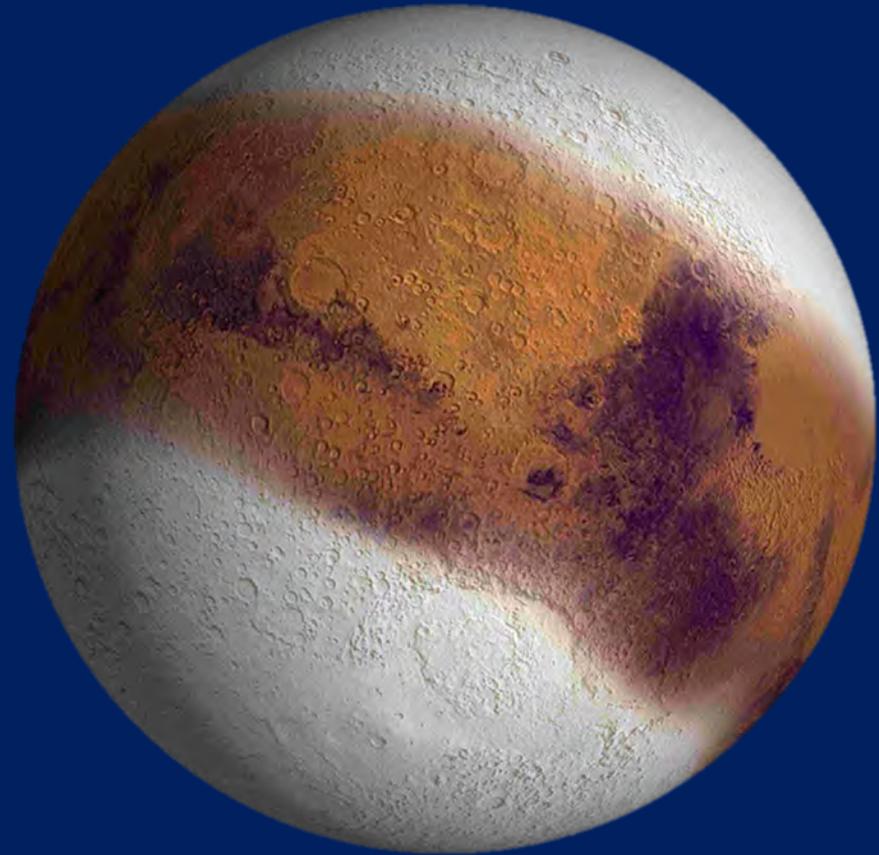
Jour +20°C

Nuit -140°C

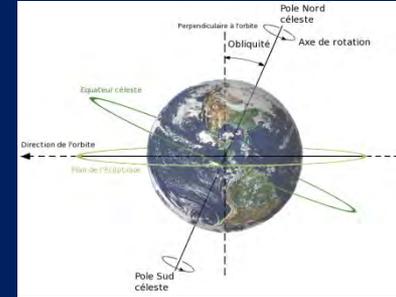
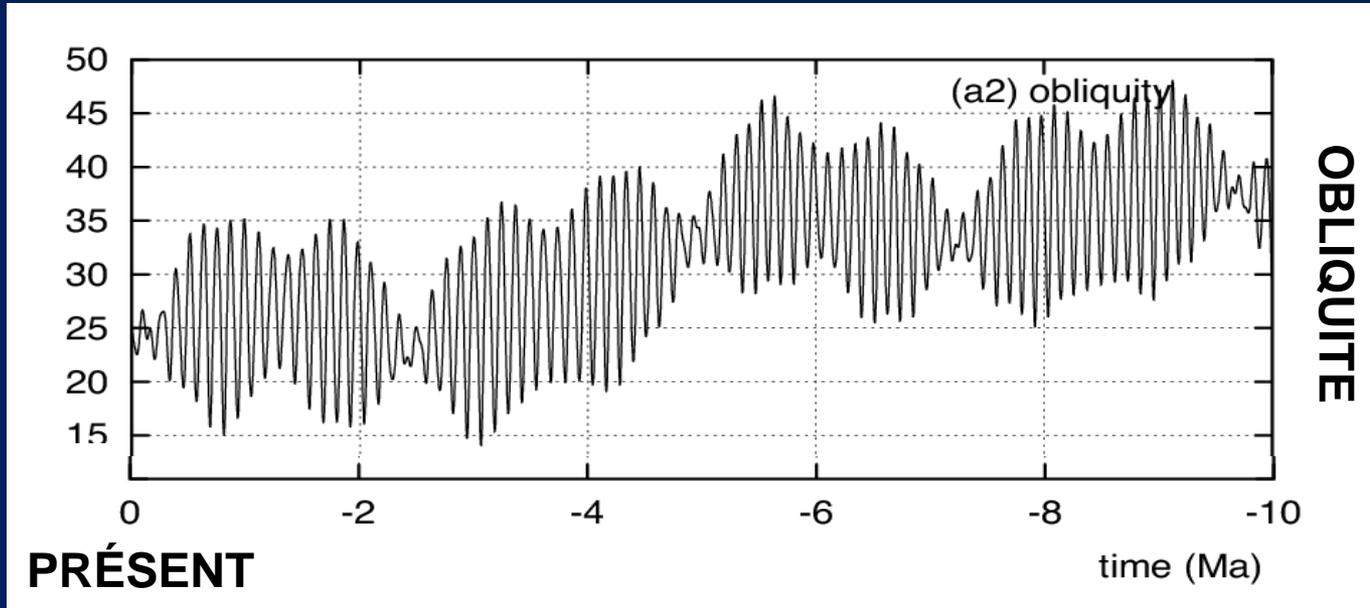
Pression au sol :

6 à 8 mbar

150 fois plus faible
que sur la TERRE



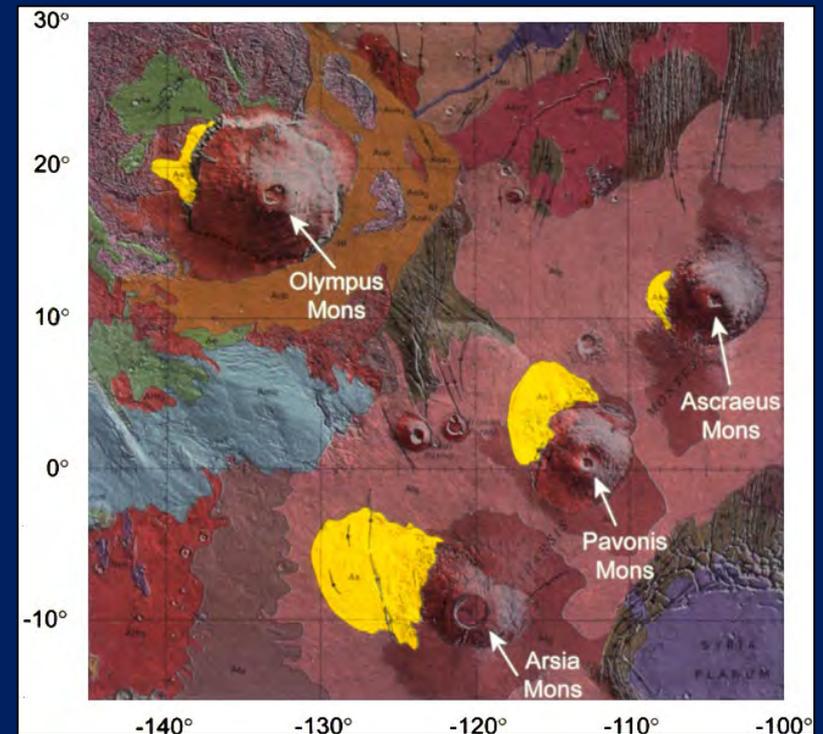
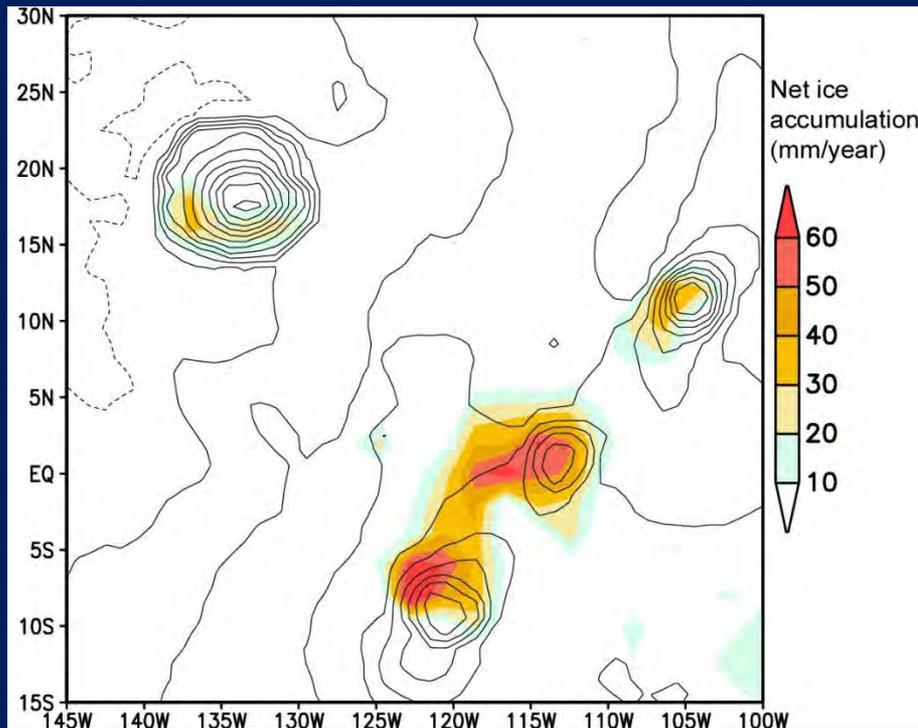
Les variations climatiques dans le passé récent de **Mars** sont liées aux modifications de son obliquité et de son orbite.



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

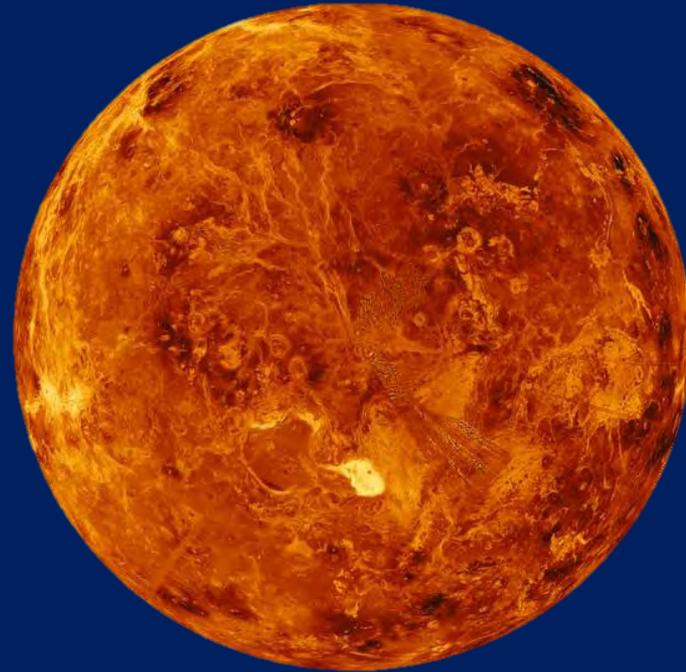


Dépôts et moraines caractéristiques de glacier à base froide

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)



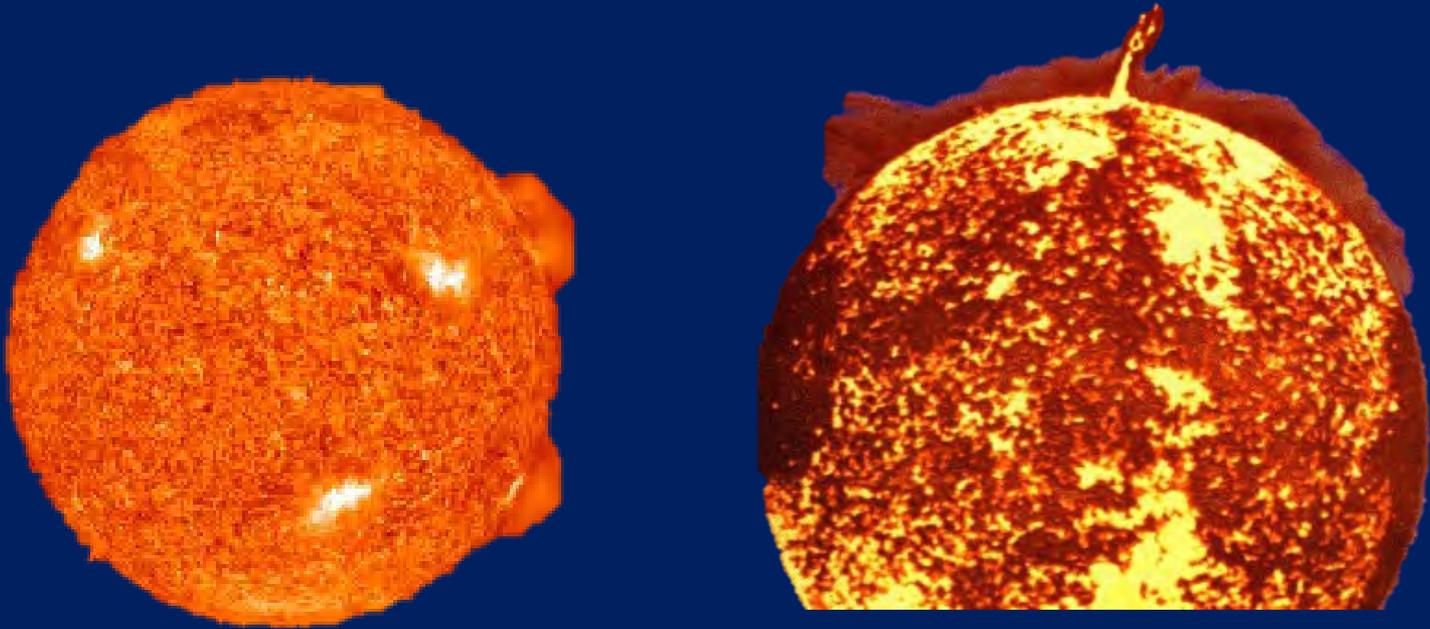
LE TEMPS DU **MILLIARD** D'ANNÉES

Le temps de l'évolution du soleil

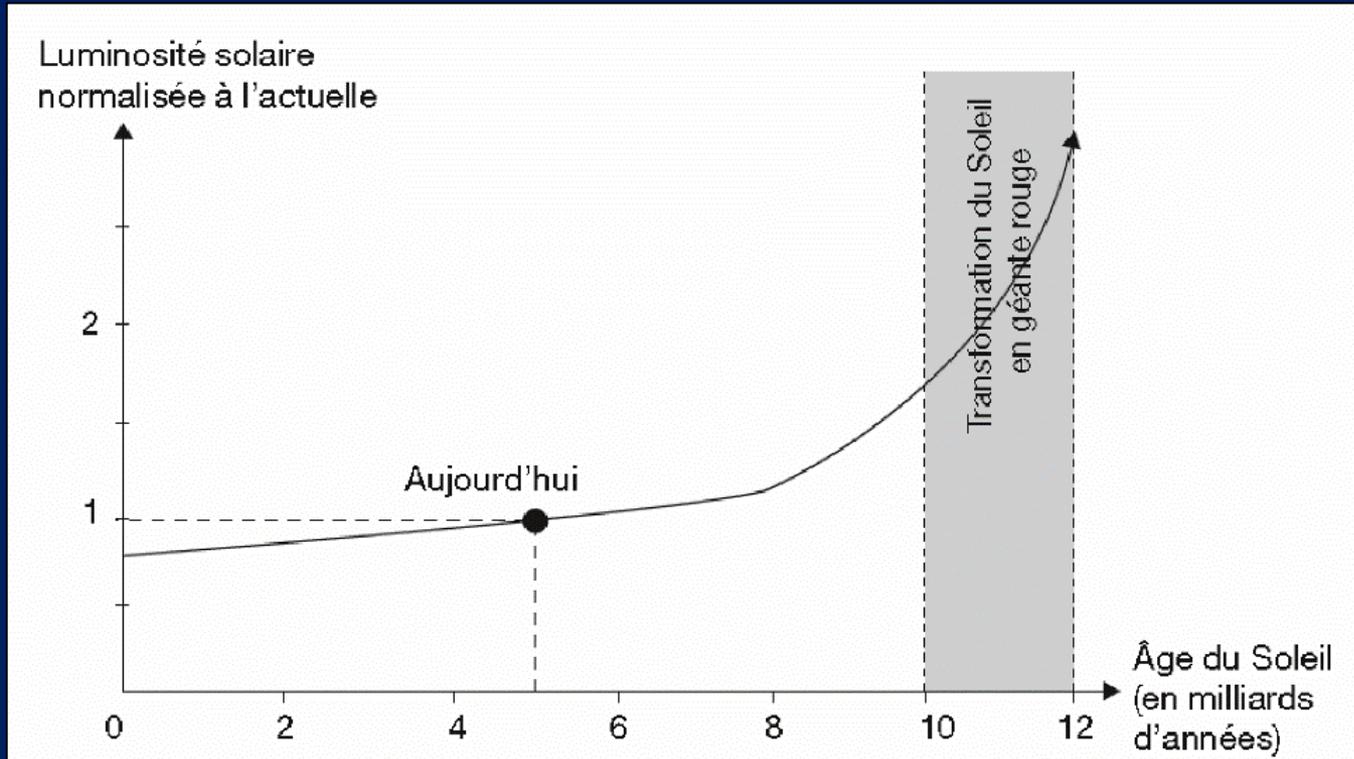
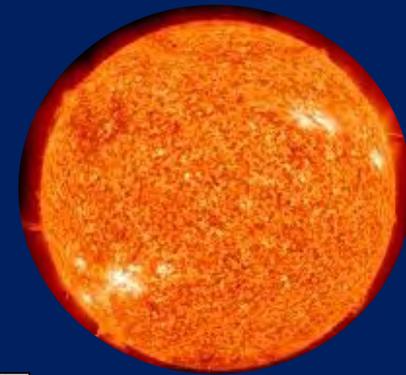
*LE SOLEIL JEUNE AVAIT À SES DÉBUTS UNE PLUS **FAIBLE** LUMINOSITÉ*

-30% il y a 4.6 Milliards d'années

-6% il y a 750 Millions d'années

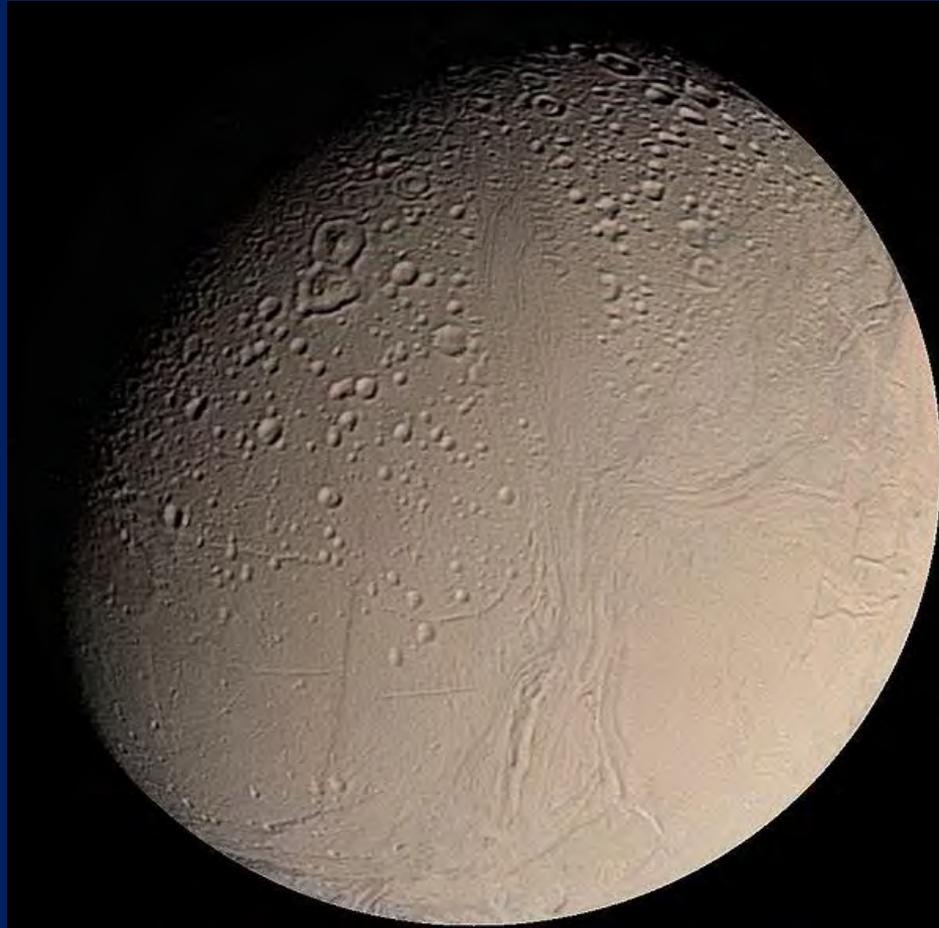


EVOLUTION DE L'INTENSITÉ LUMINEUSE DU SOLEIL

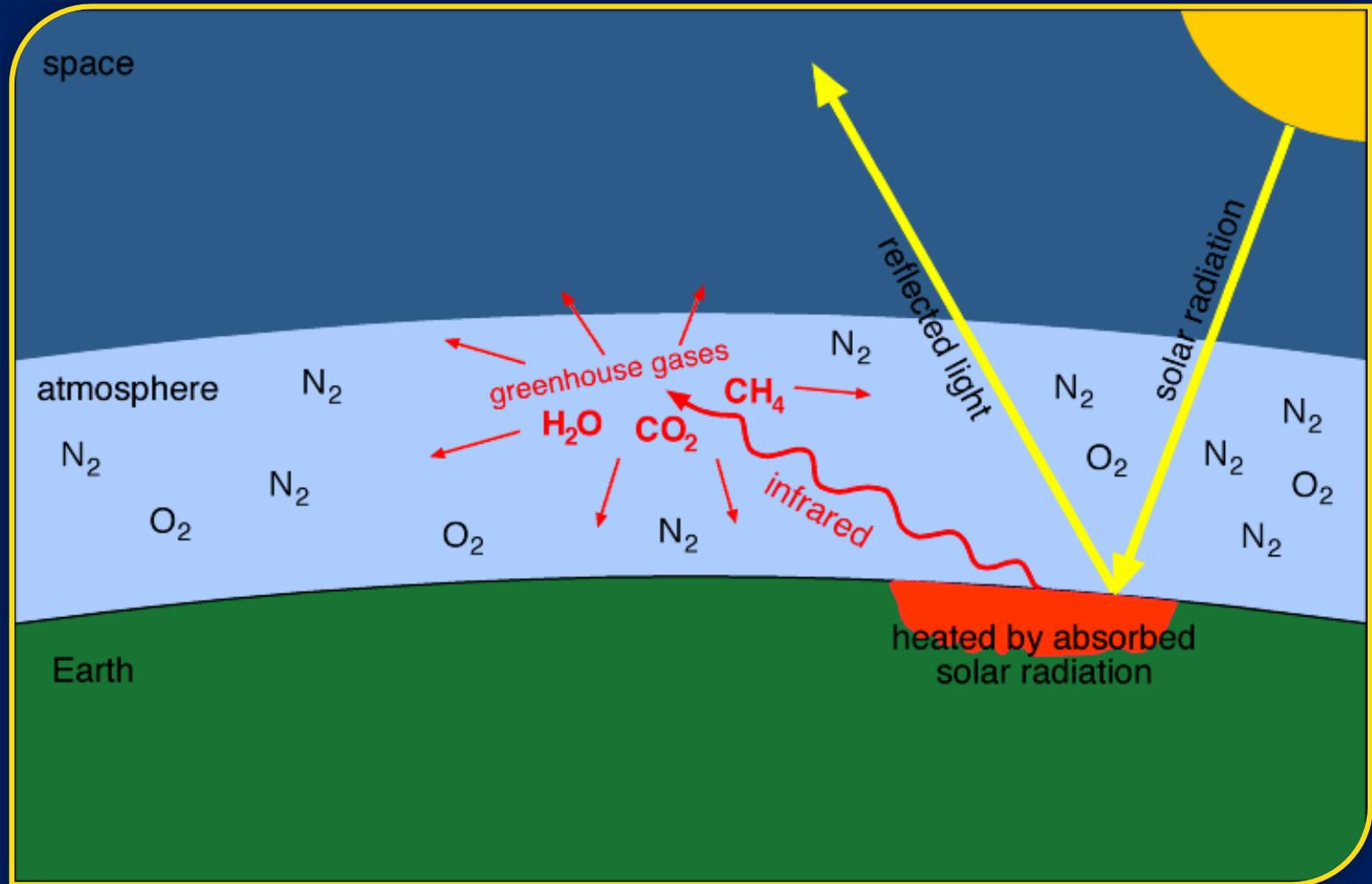


D'après Gough D. O.

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

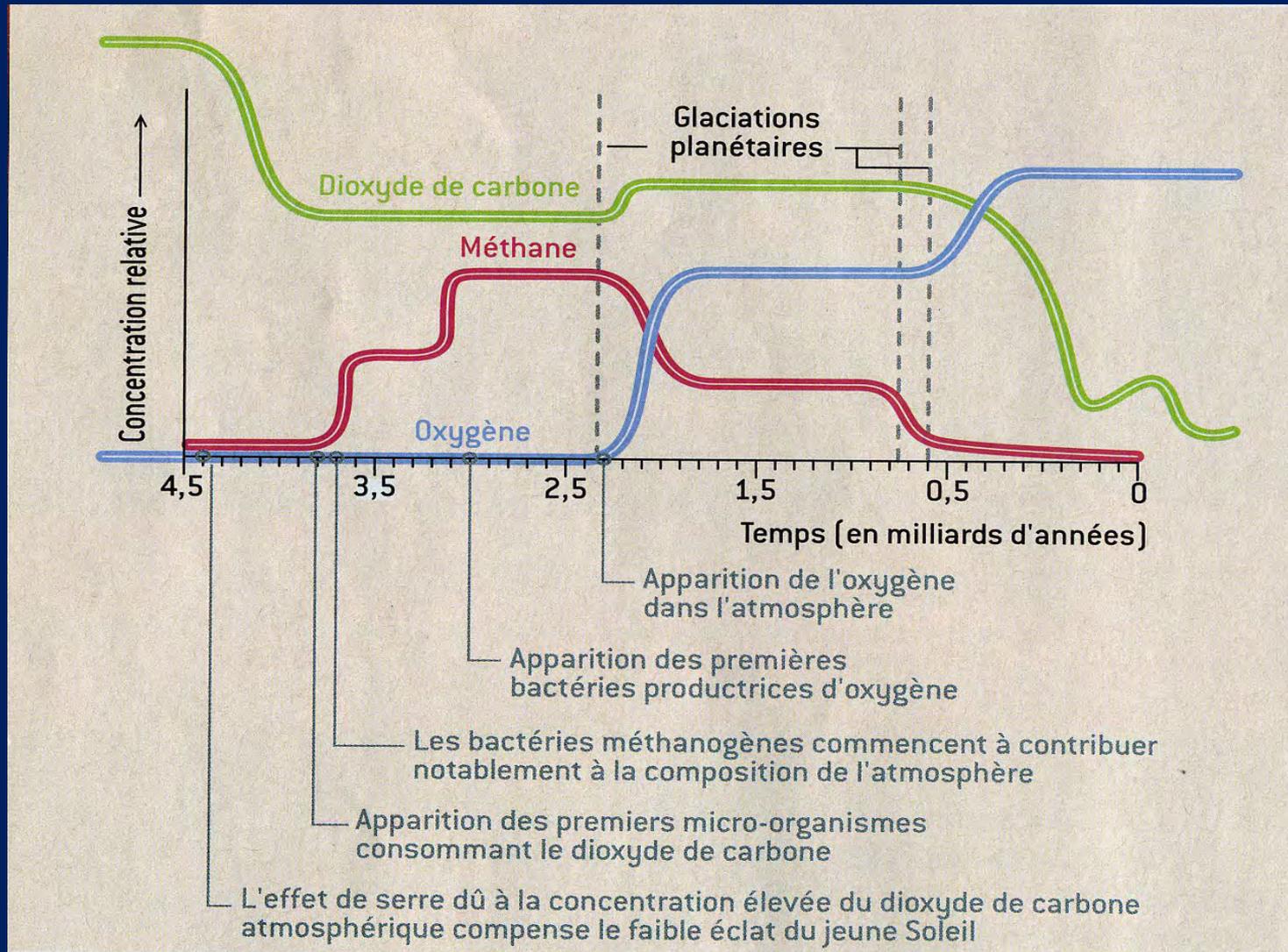
- 🌍 **Glaciation Huronienne (2.4 / 2.6 Ga)**

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

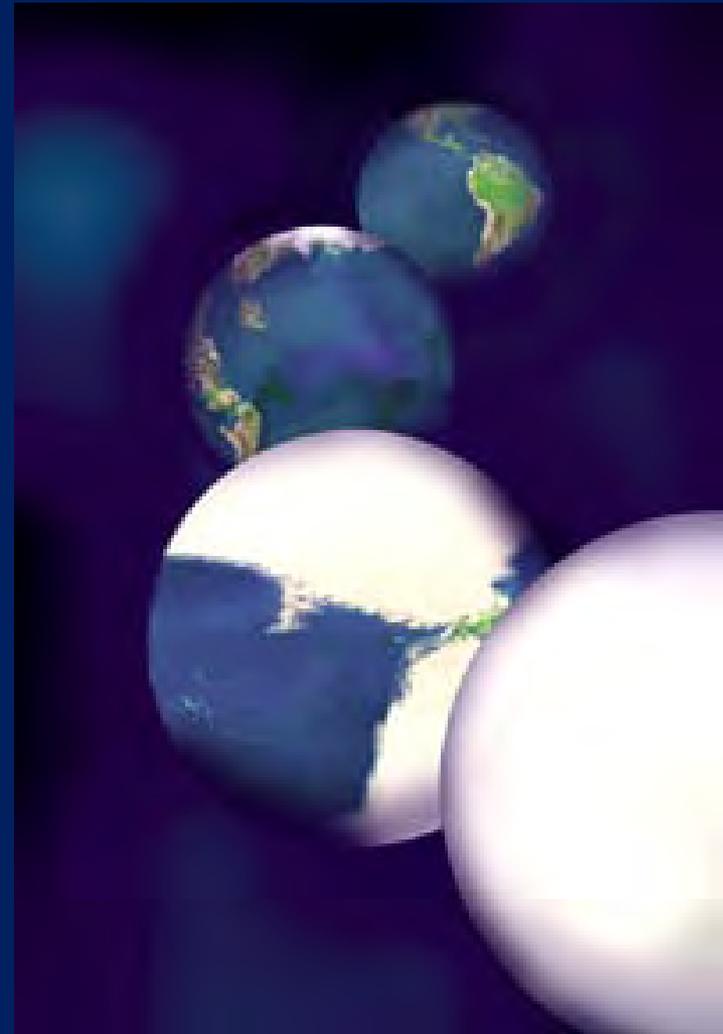


LE TEMPS DE LA DIZAINE DE MILLIONS D'ANNÉES

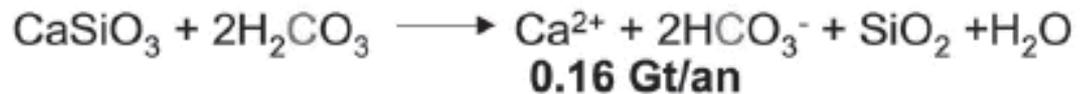
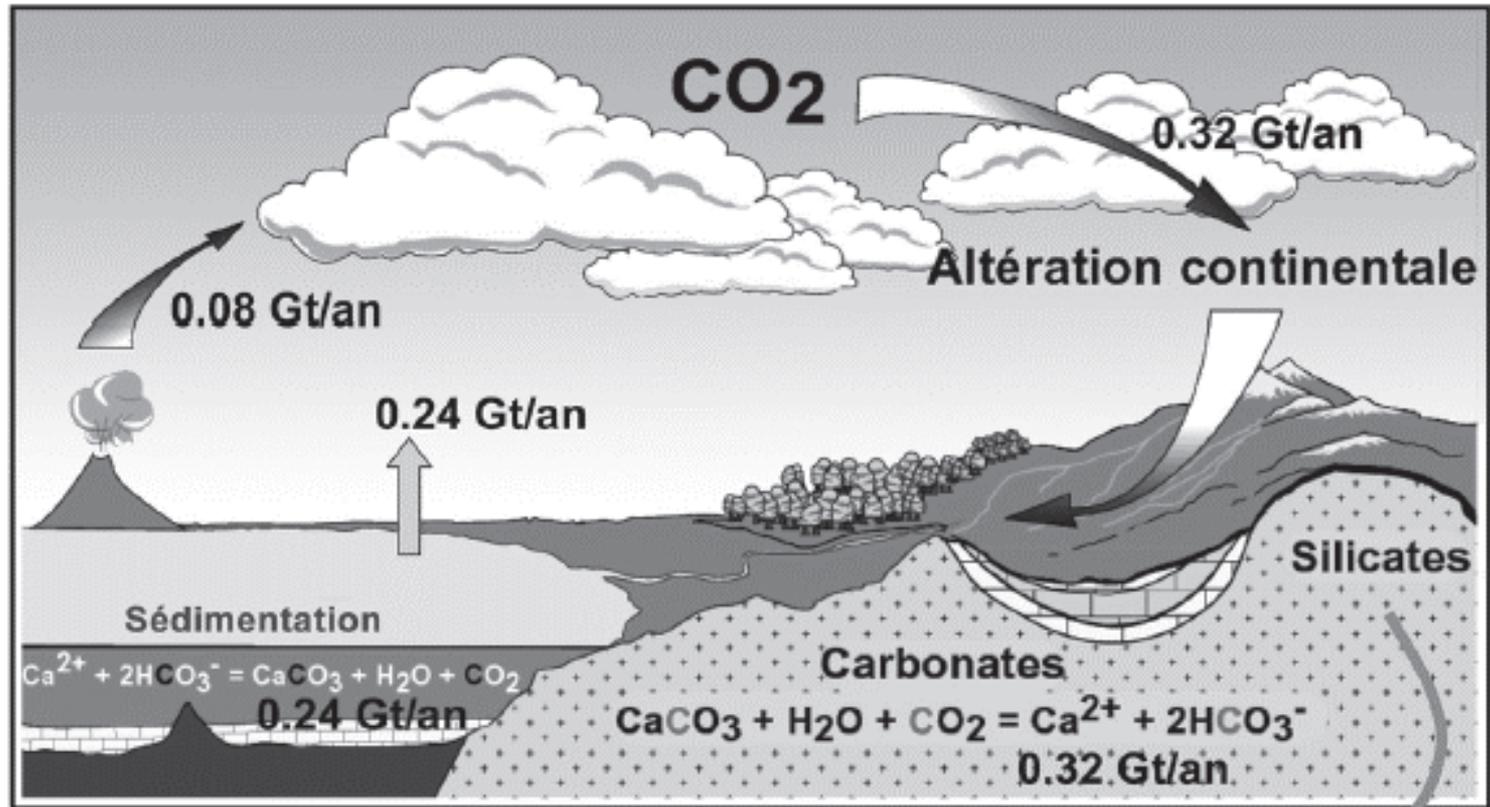
*Le temps de la tectonique,
de la Dérive des continents*

UNE TERRE
TOTALEMENT GELEE,

***EST-CE
POSSIBLE?***



CYCLE DU CARBONE

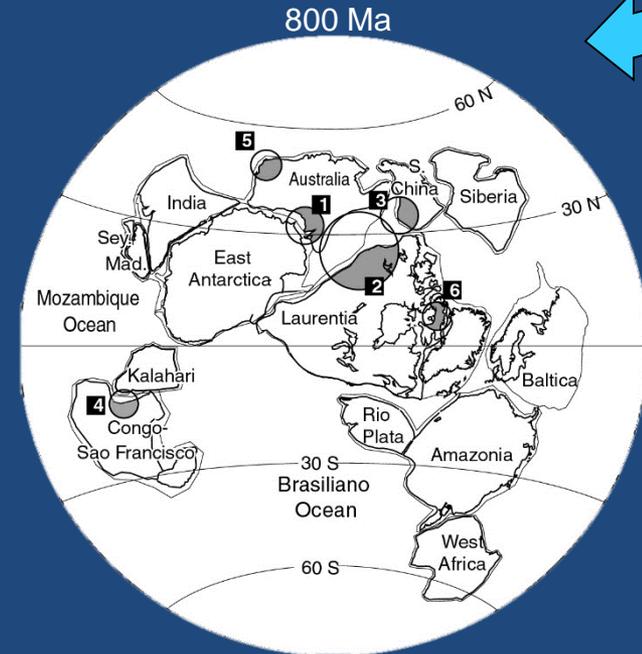
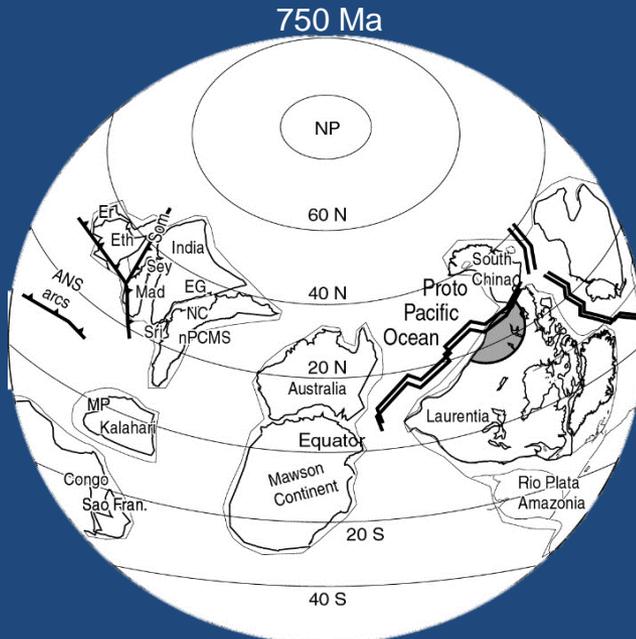


MÉCANISMES DE REFROIDISSEMENT GLOBAL À LONG TERME

1 - Apparition de traps successives

2 - Position à basses et moyennes latitude des continents

3 - Fragmentation du supercontinent Rodinia



LES PREMIERS RÉSULTATS

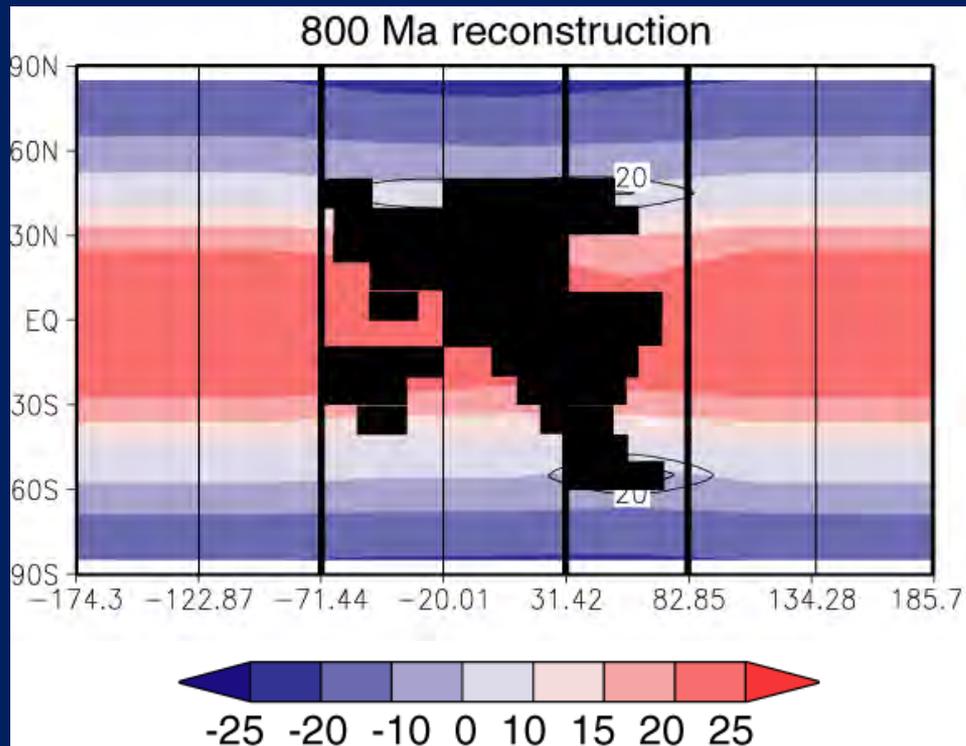
800 Ma



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

Donnadieu et al, Nature 2004

LES PREMIERS RÉSULTATS

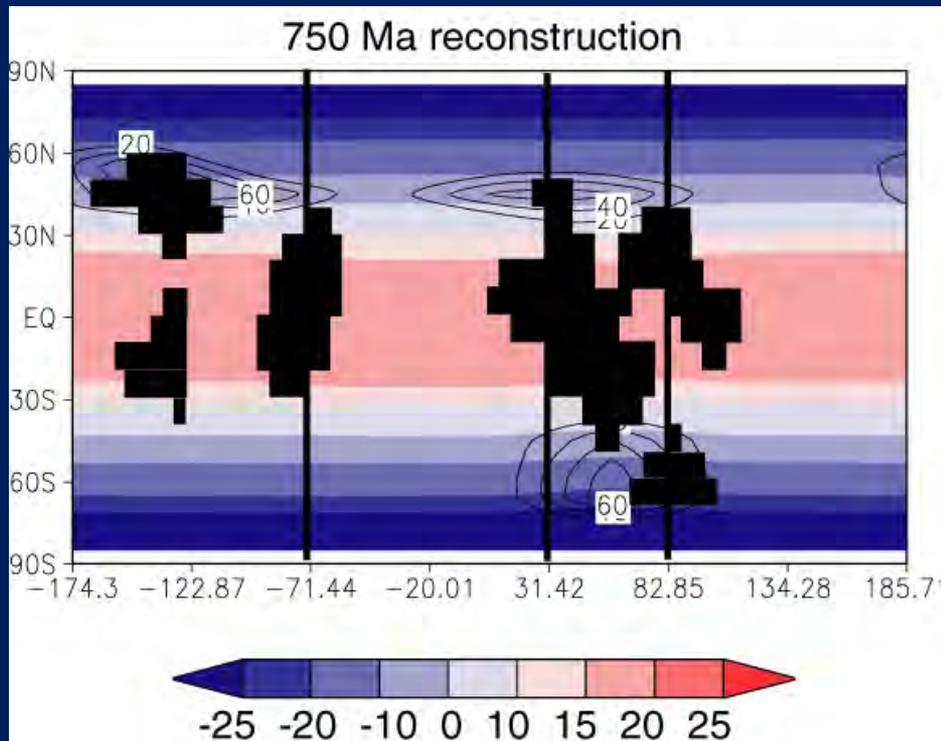
750 Ma

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

Réduction de 1300 ppm

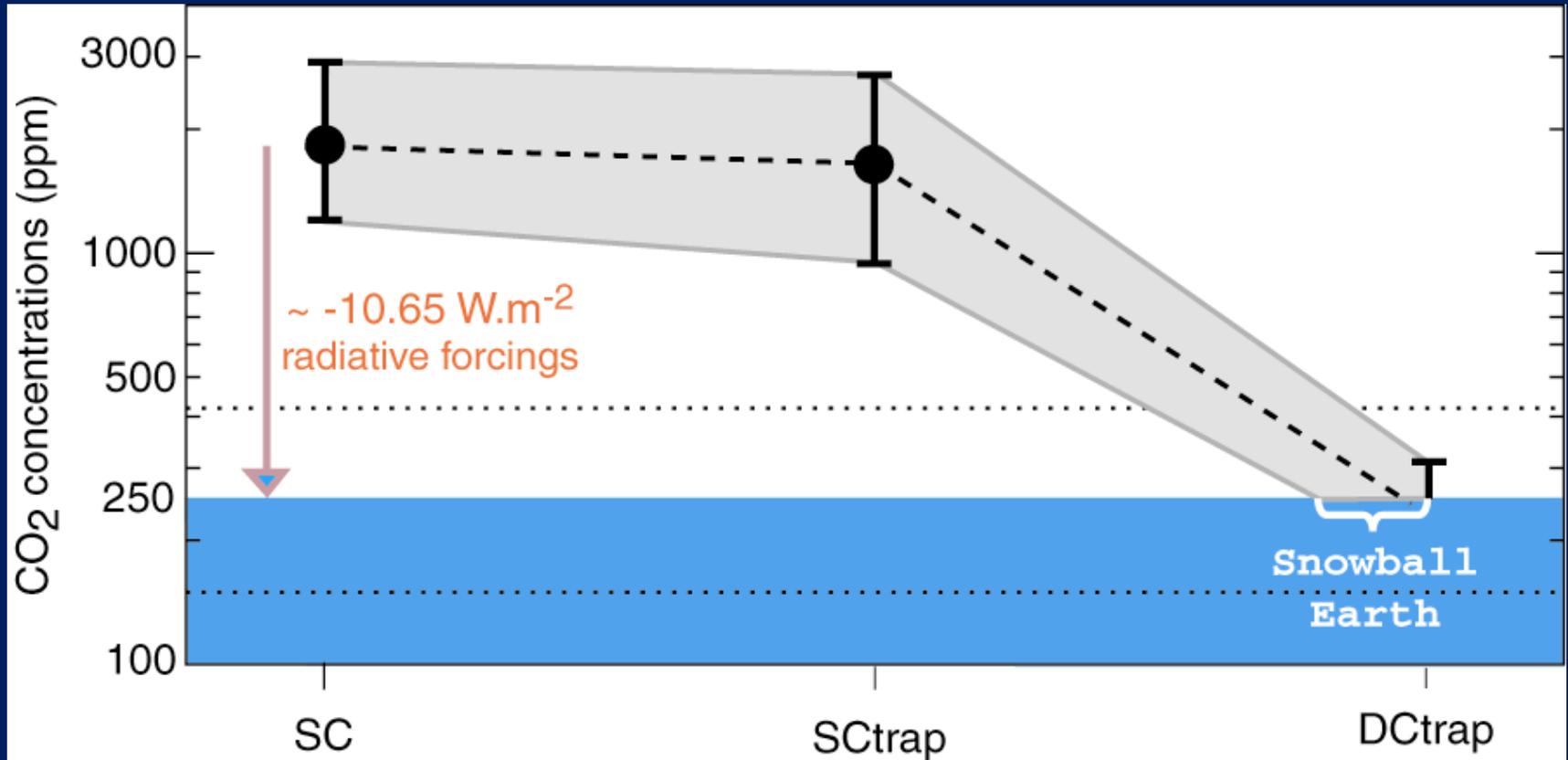
Soit une température globale moyenne de 2°C

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



Sortir de là...



La vision « OA » Boudyko – Sellers

Un soleil 1.5 fois plus puissant

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



La vision « ST »

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

Revivre grâce au CO₂

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

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

Très chaud  pluies diluviennes  altération  érosion

 Enfouissement d'une quantité énorme de CO₂ dans les océans

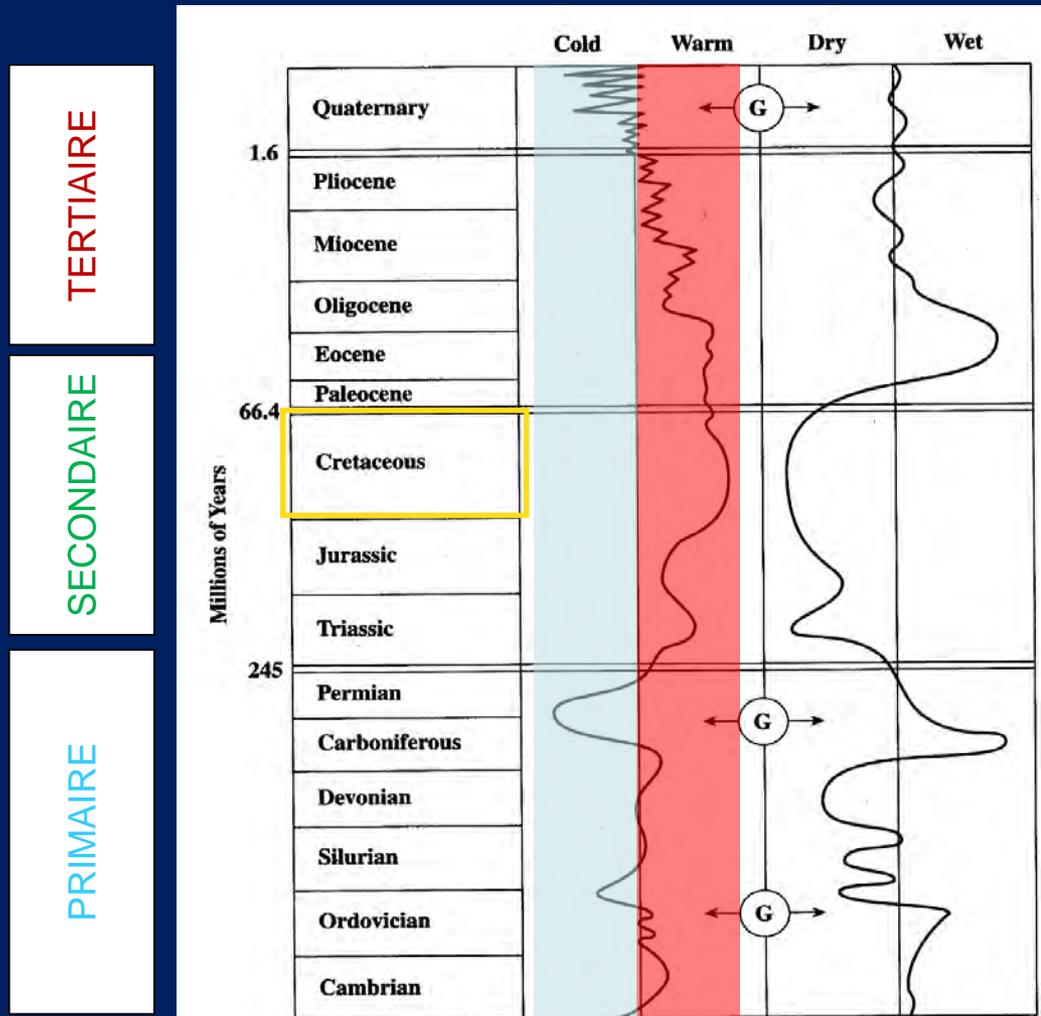
Quelle variation du Ph et de l'alcalinité ?

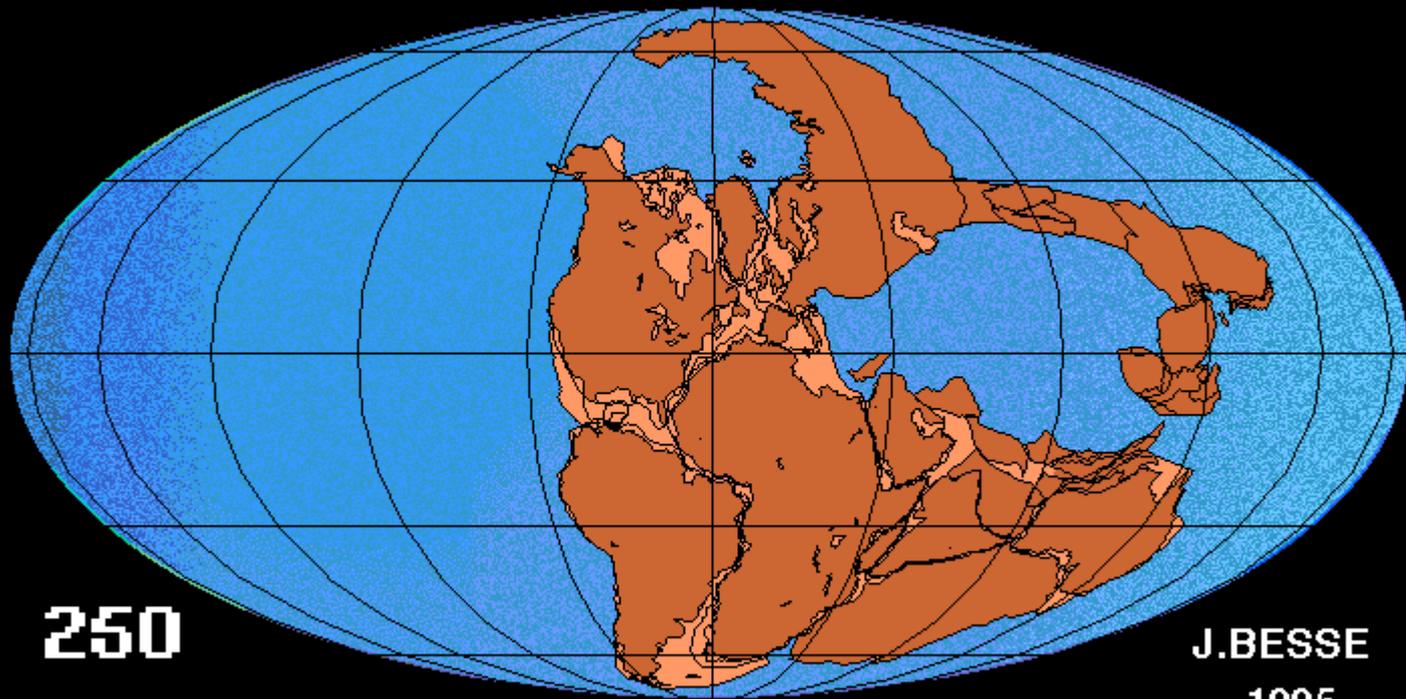
Quel impact sur la vie dans les océans ?

Calcification etc...

LES PÉRIODES CLIMATIQUES CHAUDES

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





250

J.BESSE
1995

LE CRÉTACÉ

la référence en matière de climat globalement chaud



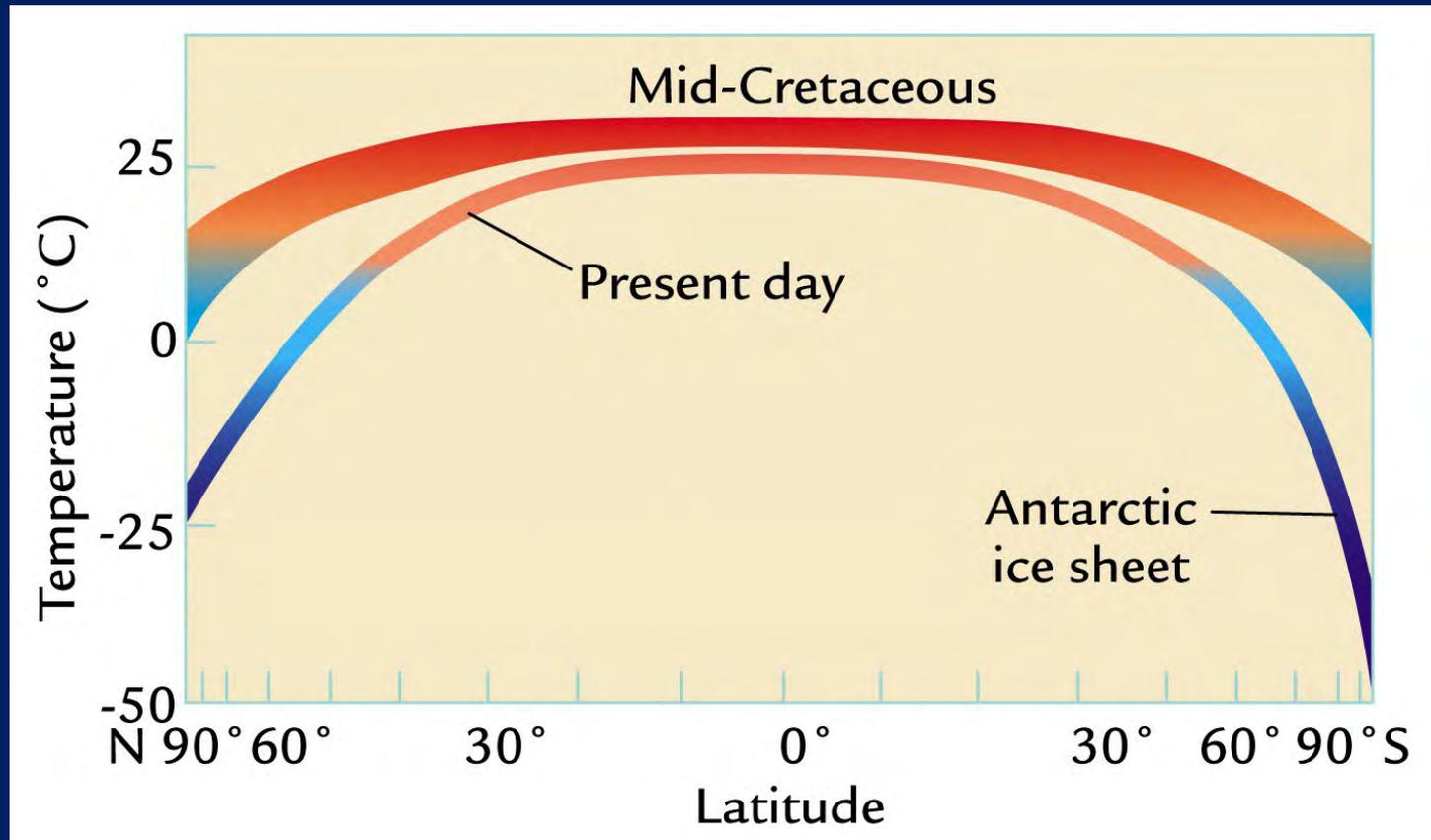
Dinosaures sur l'île d'Axel Heiberg (72° N)



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

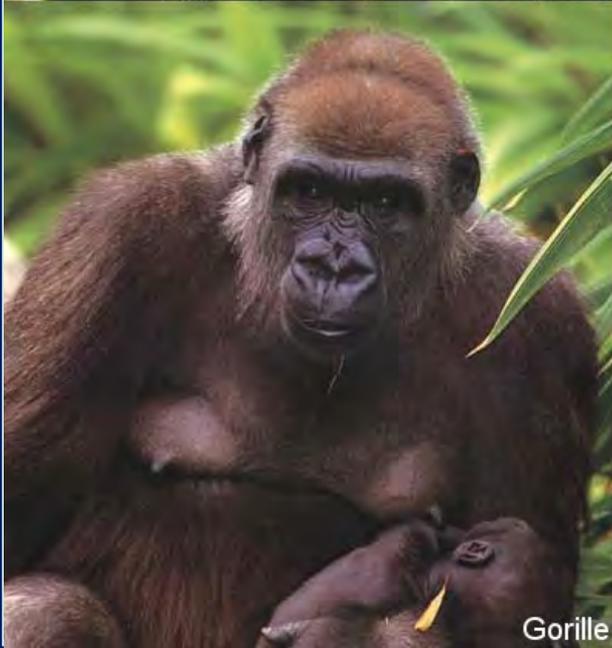




Chimpanzé

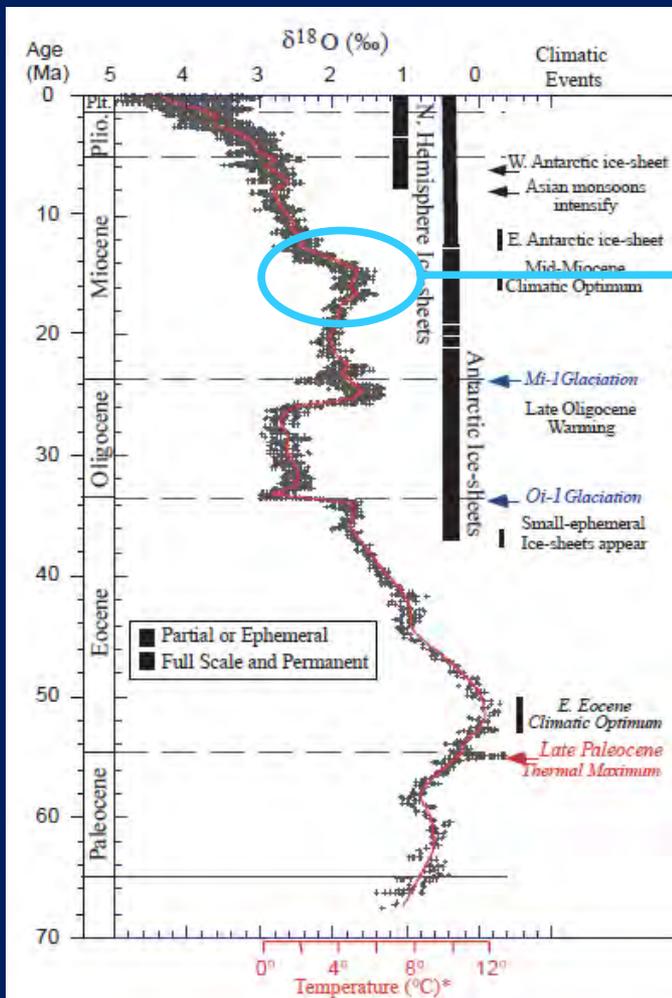


Orang-Outan



Gorille

©primates.com



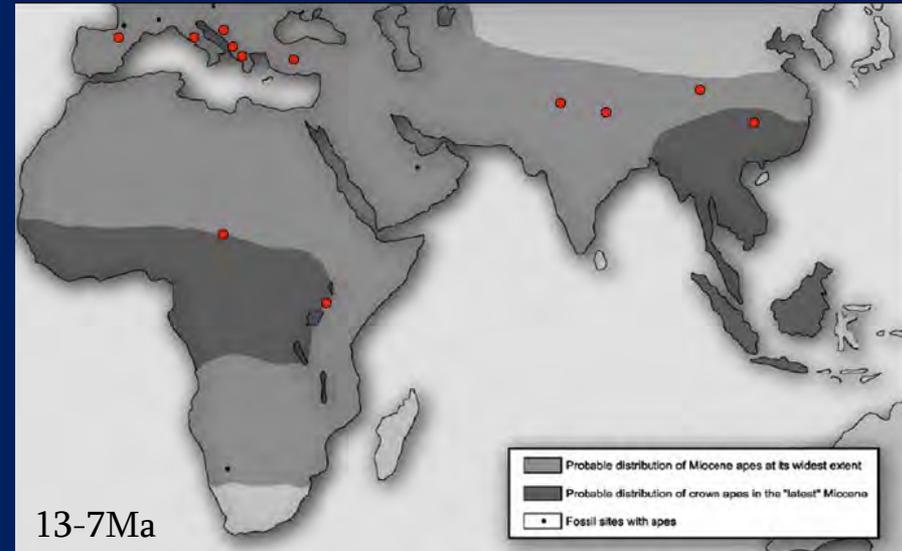
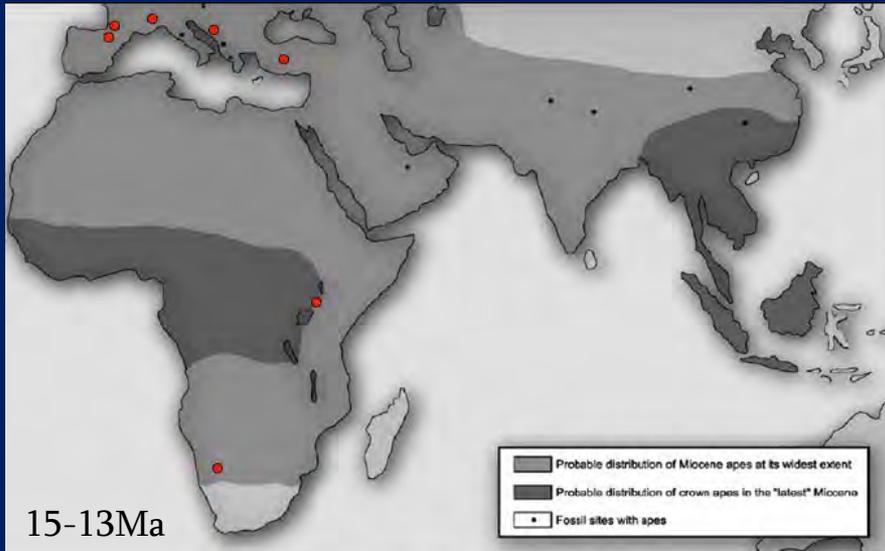
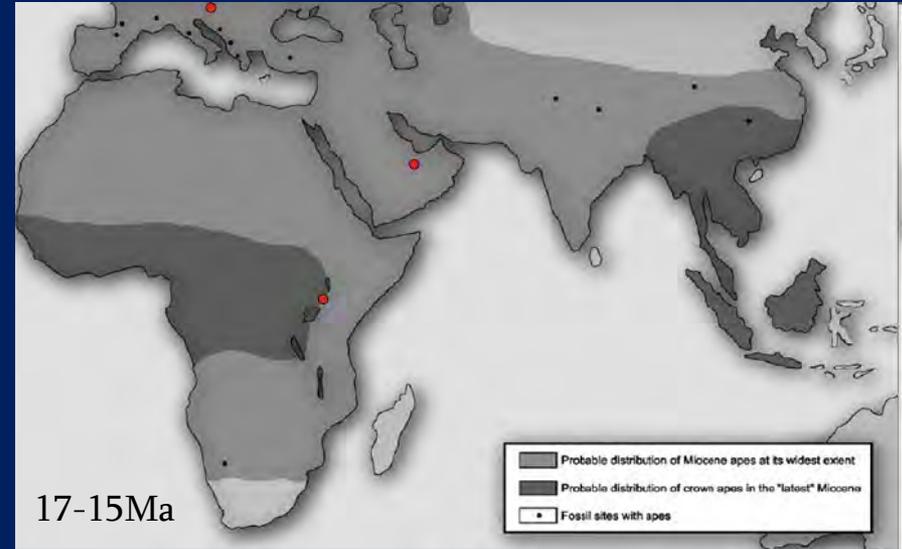
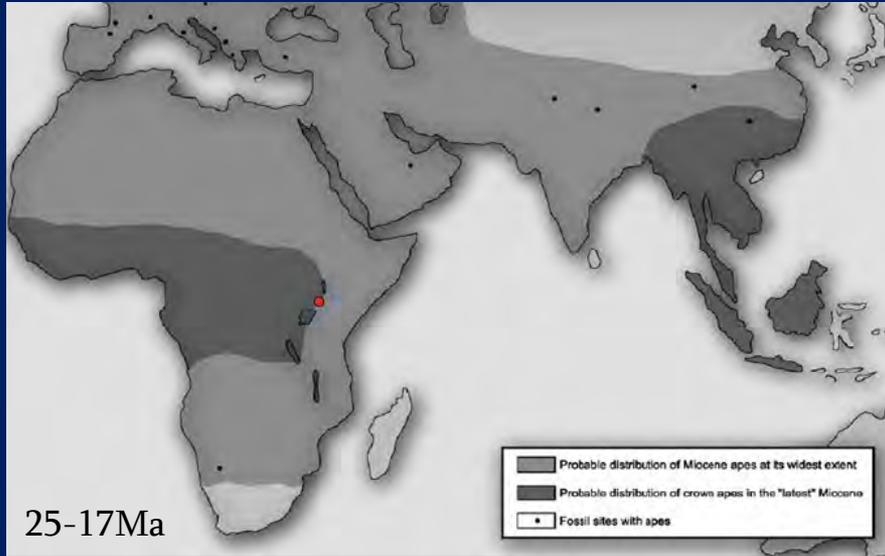
Zachos et al., 2001

- 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

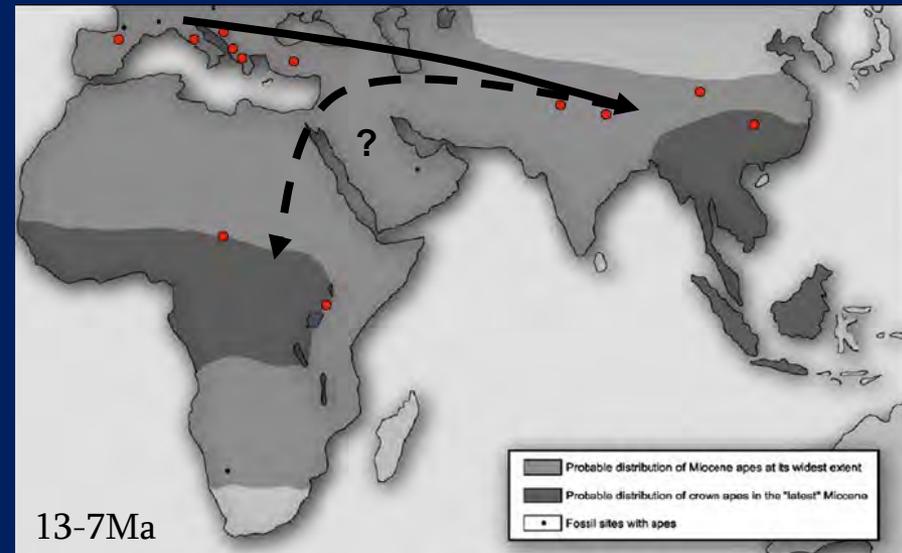
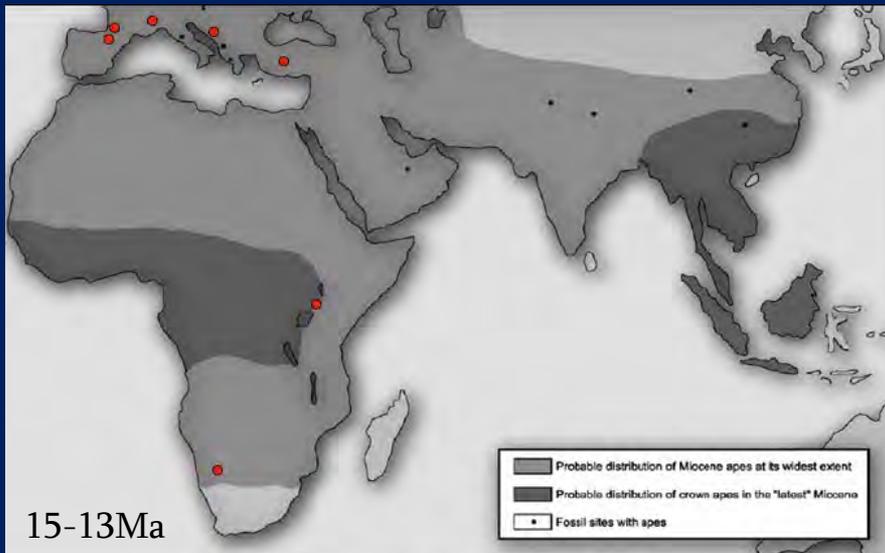
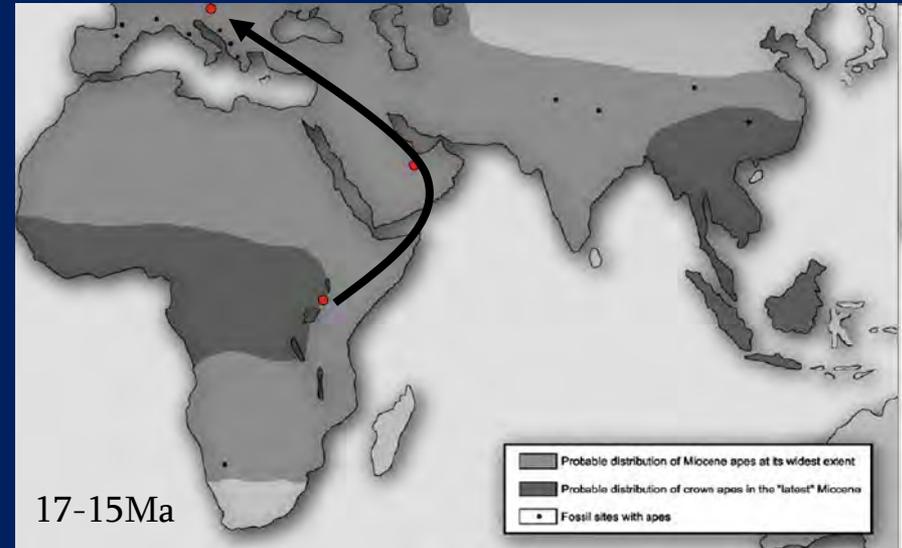
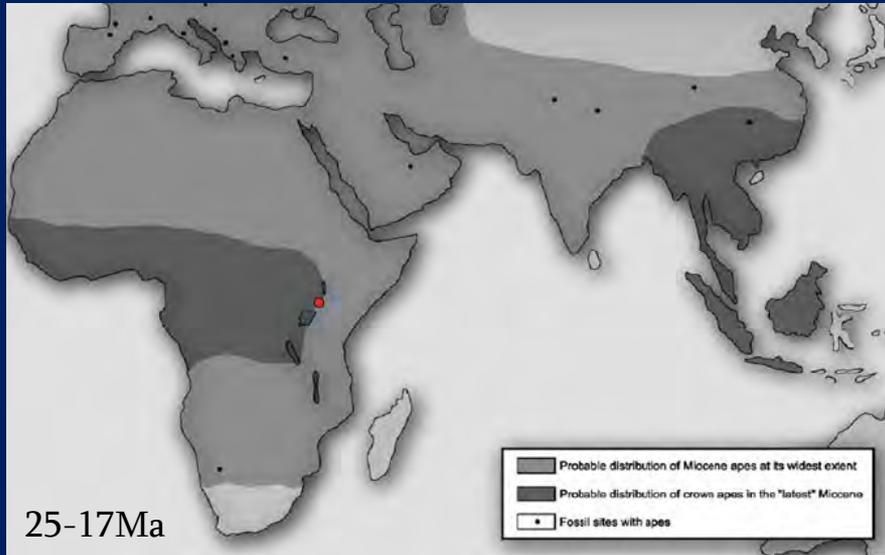
Pilbeam & Young, 2004



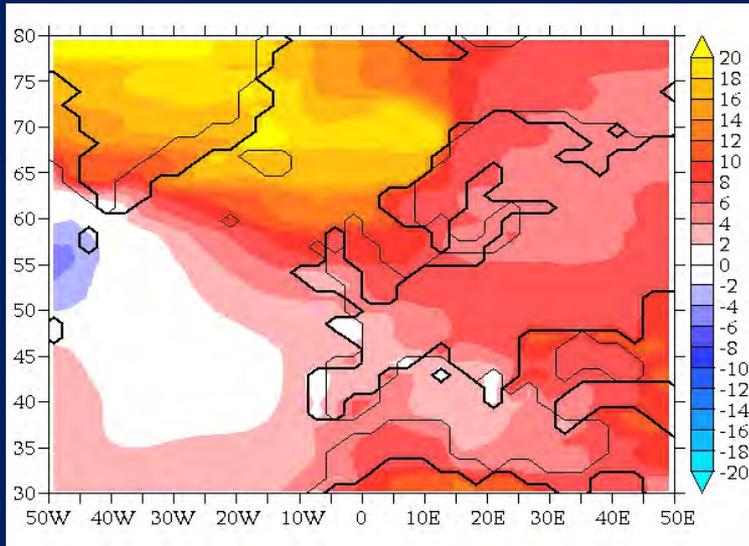
REGISTRE DES FOSSILES

Fossil Hominoids

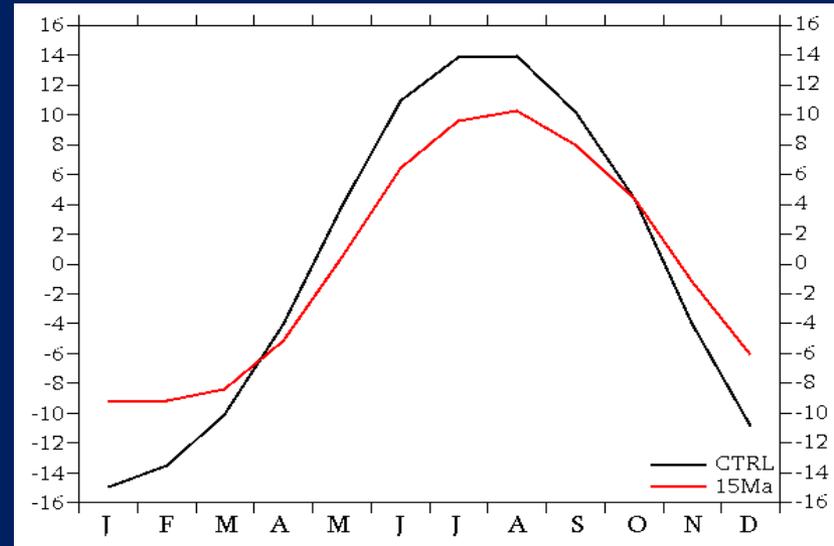
Pilbeam & Young, 2004



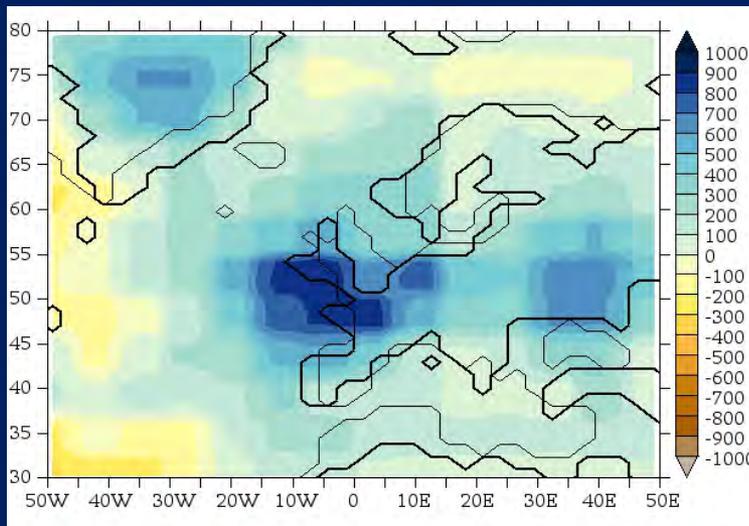
CHANGEMENT CLIMATIQUE



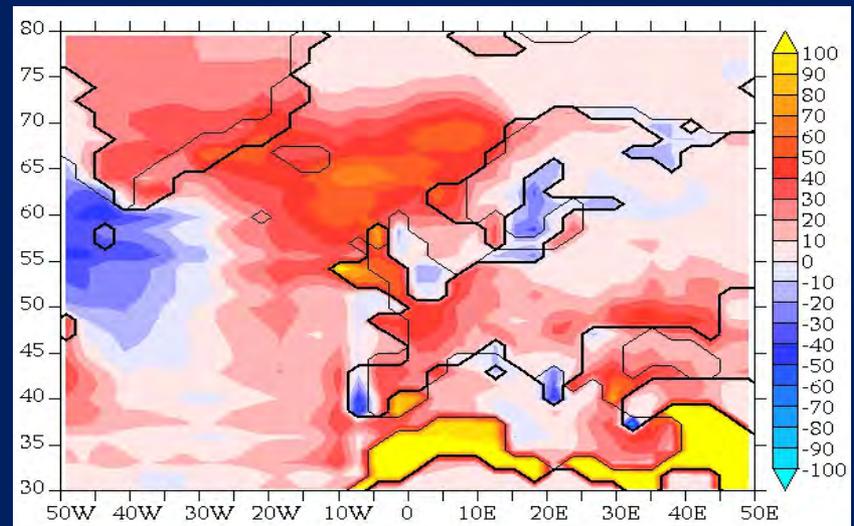
Mean Annual Temperature Anomaly (°C) : 15Ma-CTRL



Monthly Temperature - Mean Annual Temperature (°C)



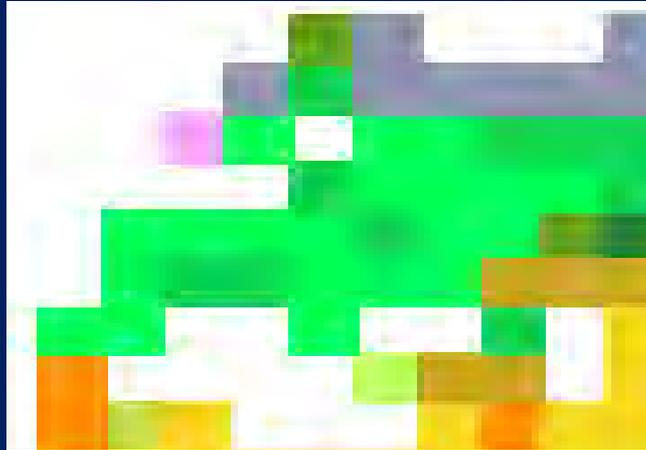
Mean Annual Precipitation Anomaly (mm) : 15Ma-CTRL



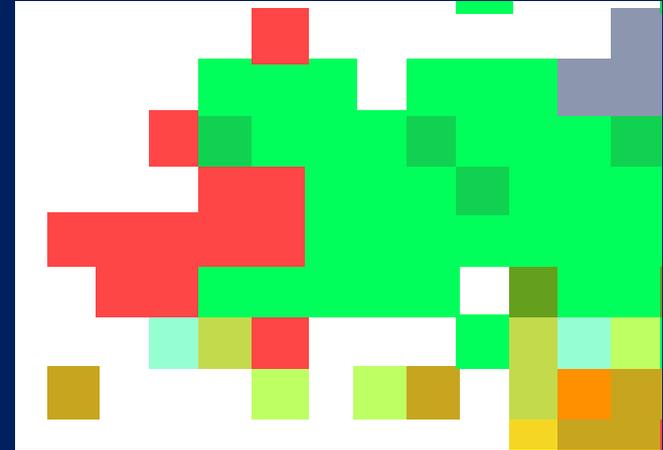
Mean Annual Evaporation Anomaly (mm/mth) : 15Ma-CTRL

CHANGEMENT DE LA VÉGÉTATION

CTRL

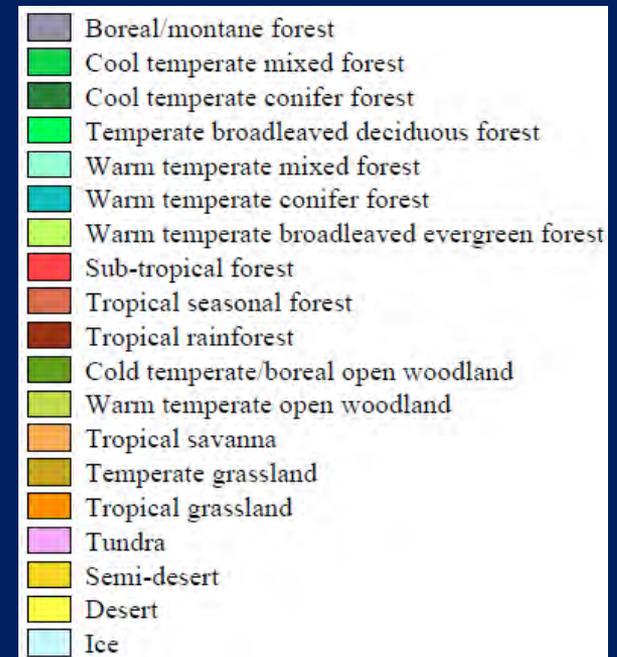


15Ma

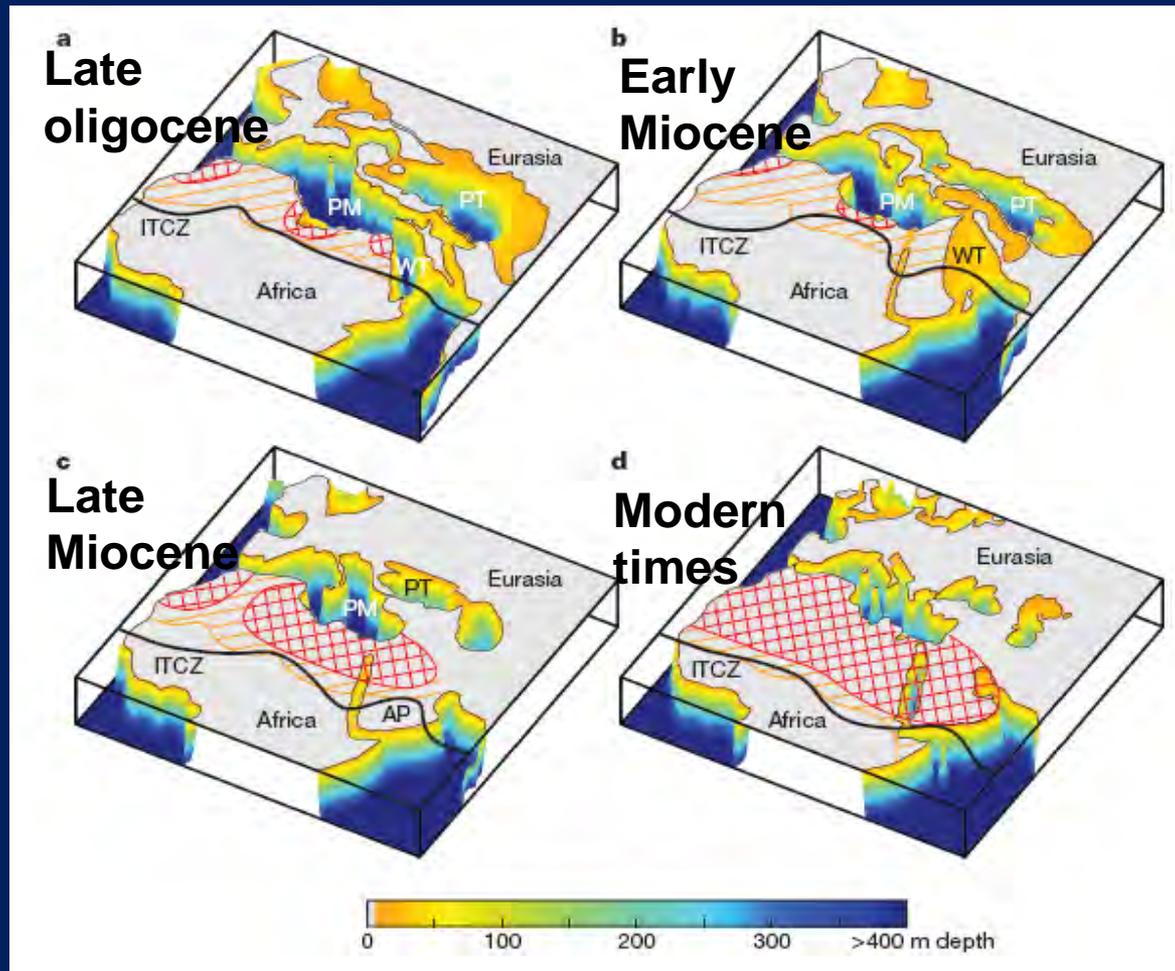


Développement de la forêt subtropicale en raison de conditions plus chaudes et plus humides, avec un contraste saisonnier réduit.

- 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]

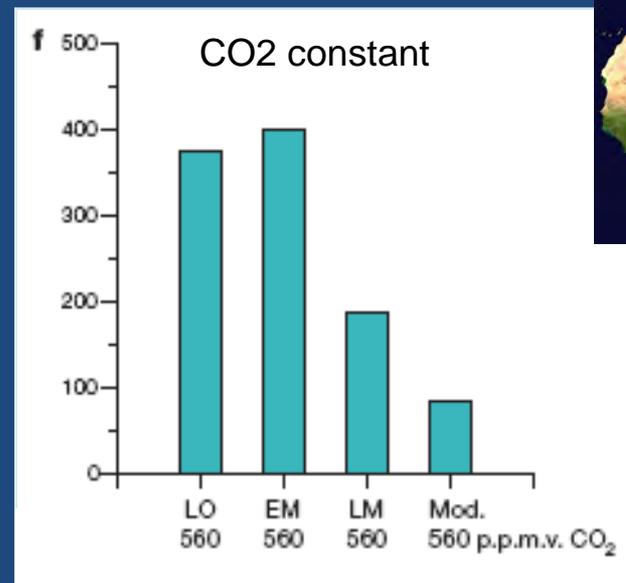
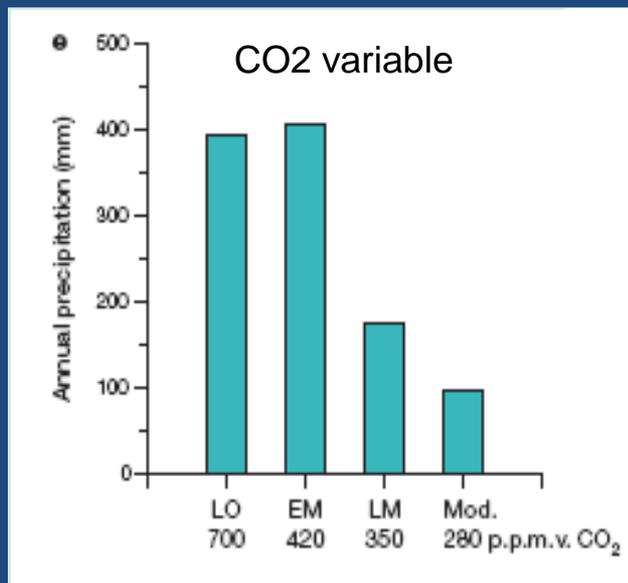
b. Début du Miocène
[20-17]

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



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

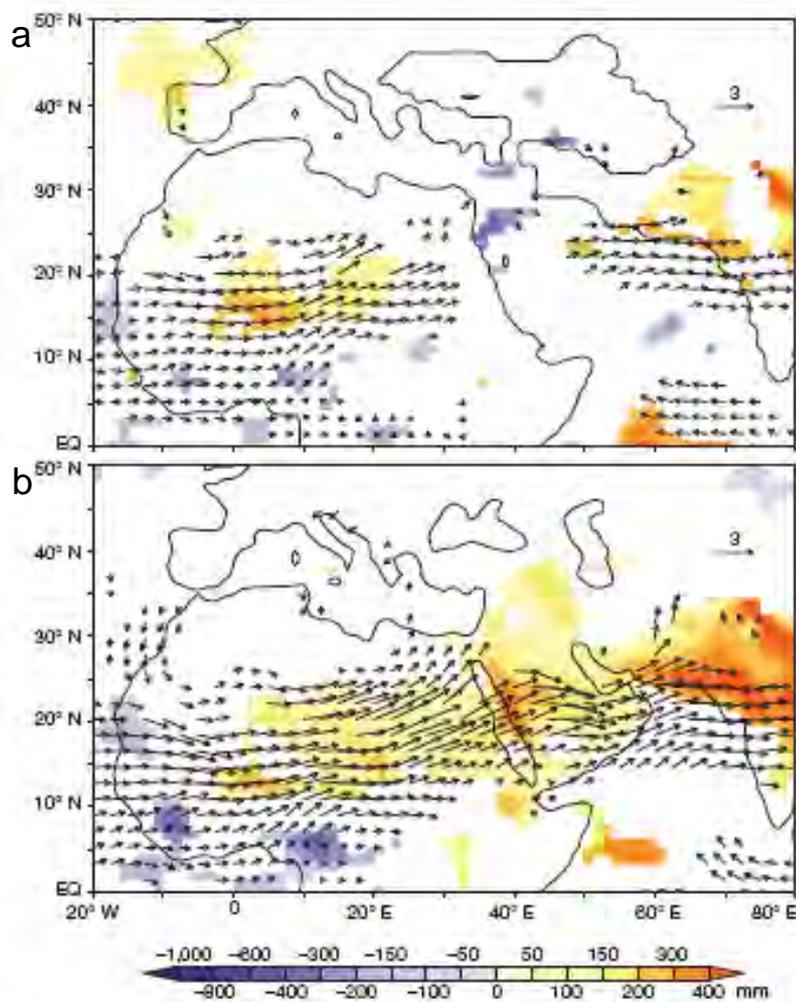
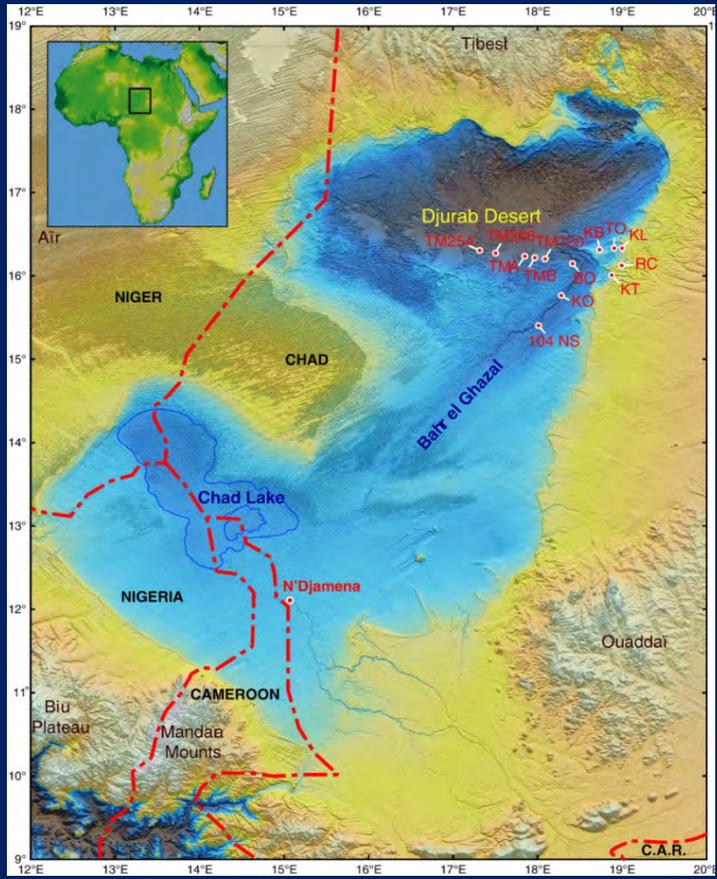


Figure 4 | Climate response to increased summer insolation in the Northern Hemisphere before and after Tethys shrinkage. Response in annual precipitation (mm, shading) and 850-hPa summer winds (ms^{-1} , arrows) to a change in orbital parameters from today to 6 kyr ago (higher minus lower Northern Hemisphere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

Lac TCHAD et HOMININES



Surface ~ 300 000 km²



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



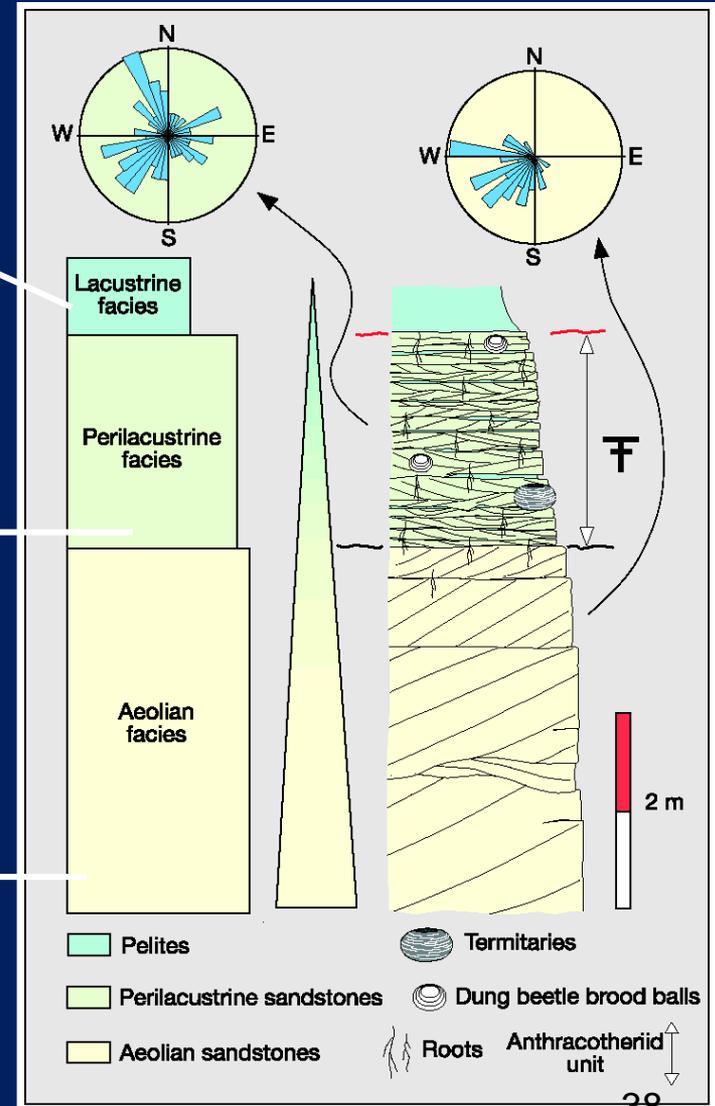
Toumaï, 7 Ma (Brunet et al., 2002)



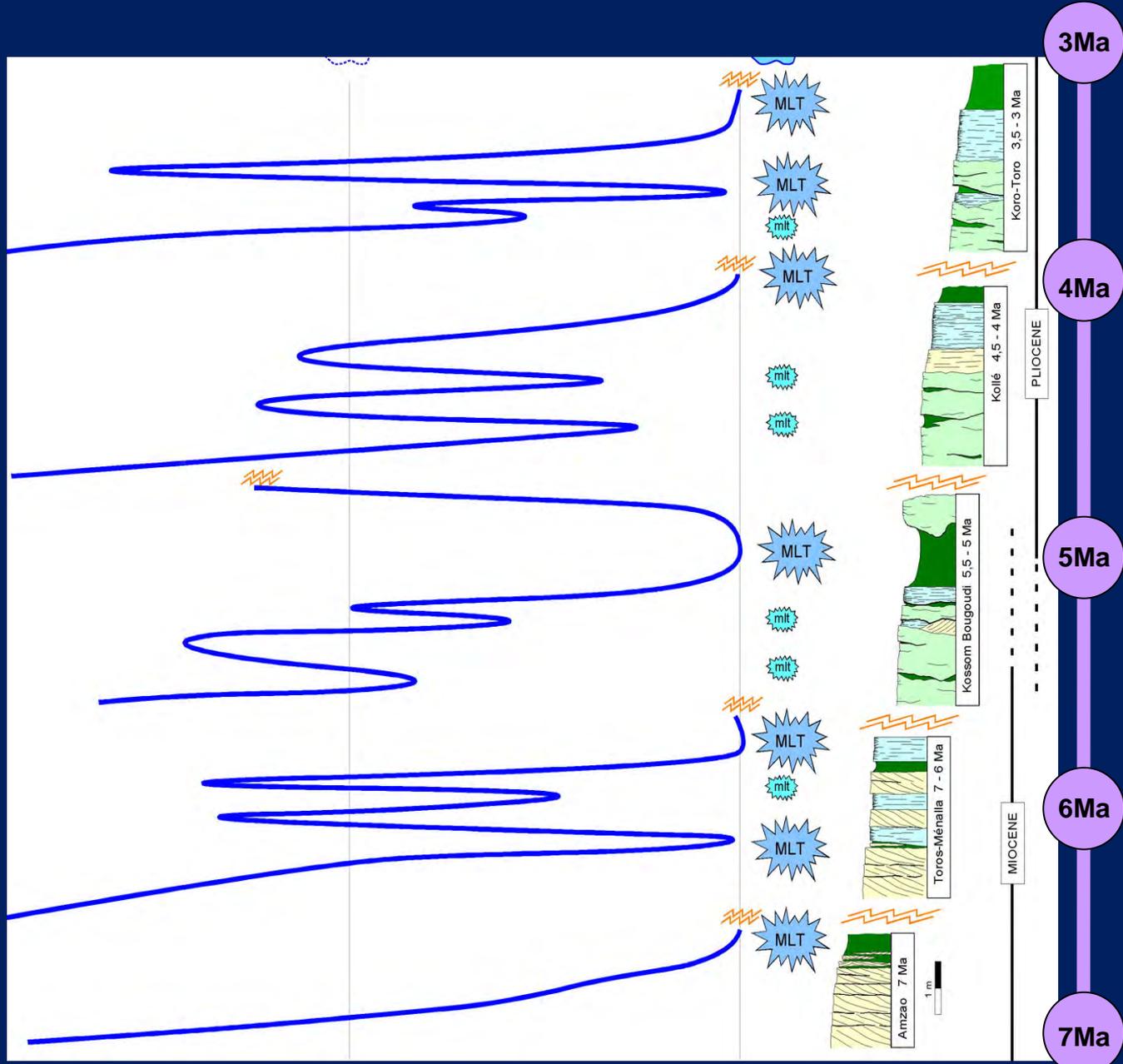
Le bassin du Tchad au Miocène supérieur



Contexte sédimentologique :



Des oscillations répétitives : de la fin du Miocène au Pliocène



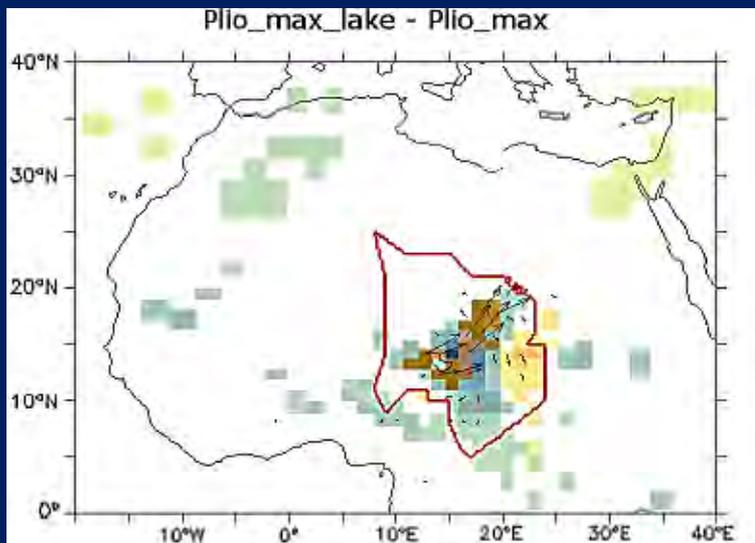
Le Pliocène et l'environnement de nos ancêtres

(Abel, Australopithecus bahrelghazali, 3.6 Ma)

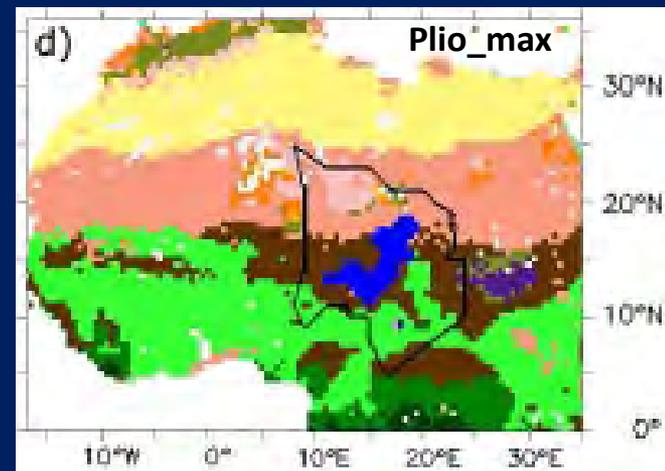
Contributions originales du LSCE :

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

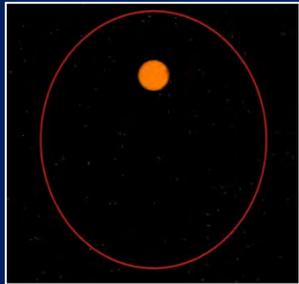
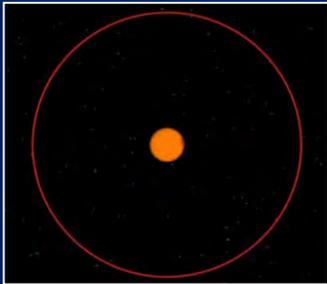
(Brunet et al., 1995)



LE TEMPS DE LA DIZAINE DE MILLIERS D'ANNÉES

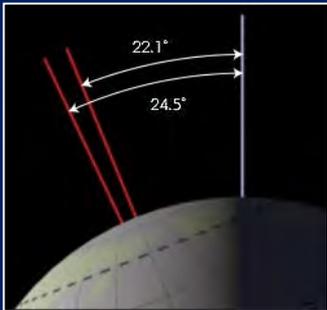
Le temps des paramètres orbitaux

Les paramètres orbitaux



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 41000 ans

Le forage de Vostok : une découverte majeure

Claude Lorius, chercheur au LGGE



Jean Jouzel, chercheur au LSCE

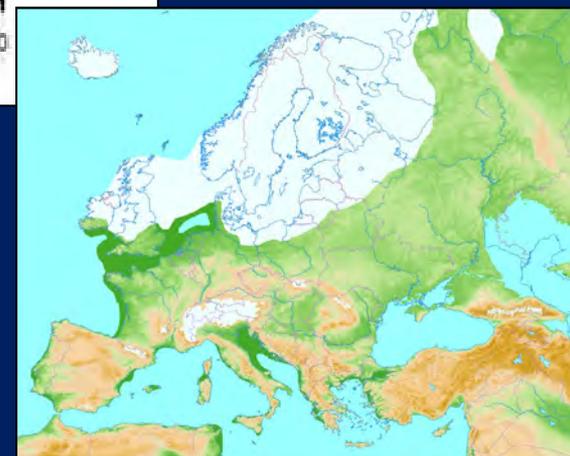
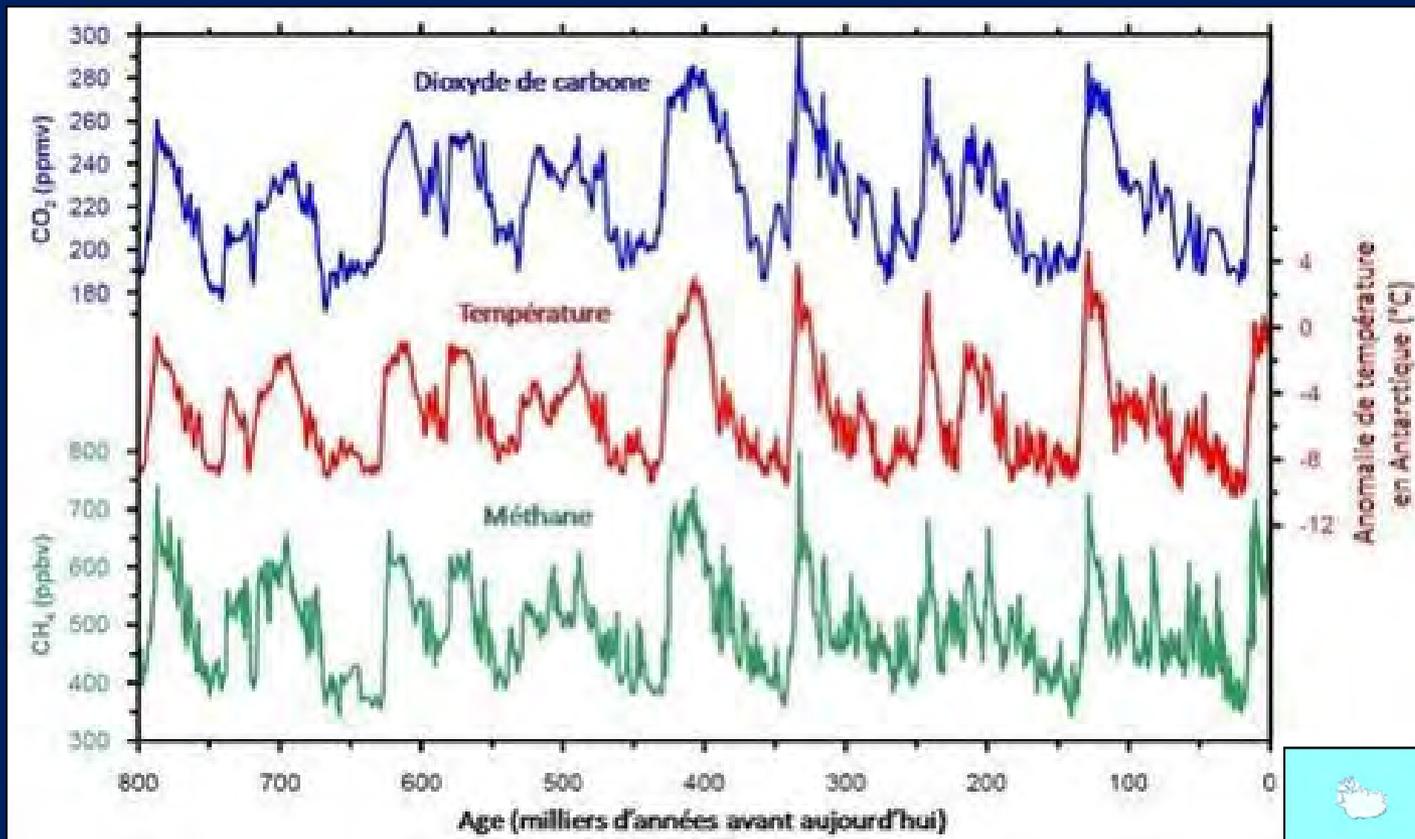


*Installation de Vostok en 1957
<http://blog.editionspaulsen.com>*



En 1987, les forages antarctiques révèlent l'évolution du CO₂ atmosphérique sur un cycle glaciaire-interglaciaire (160 000 ans)

Enregistrement EPICA à DÔME C en Antarctique ; 800 000 ans de contenu atmosphérique en gaz à effet de serre



*L'Europe au dernier maximum glaciaire,
il y a environ 20 000 ans.*

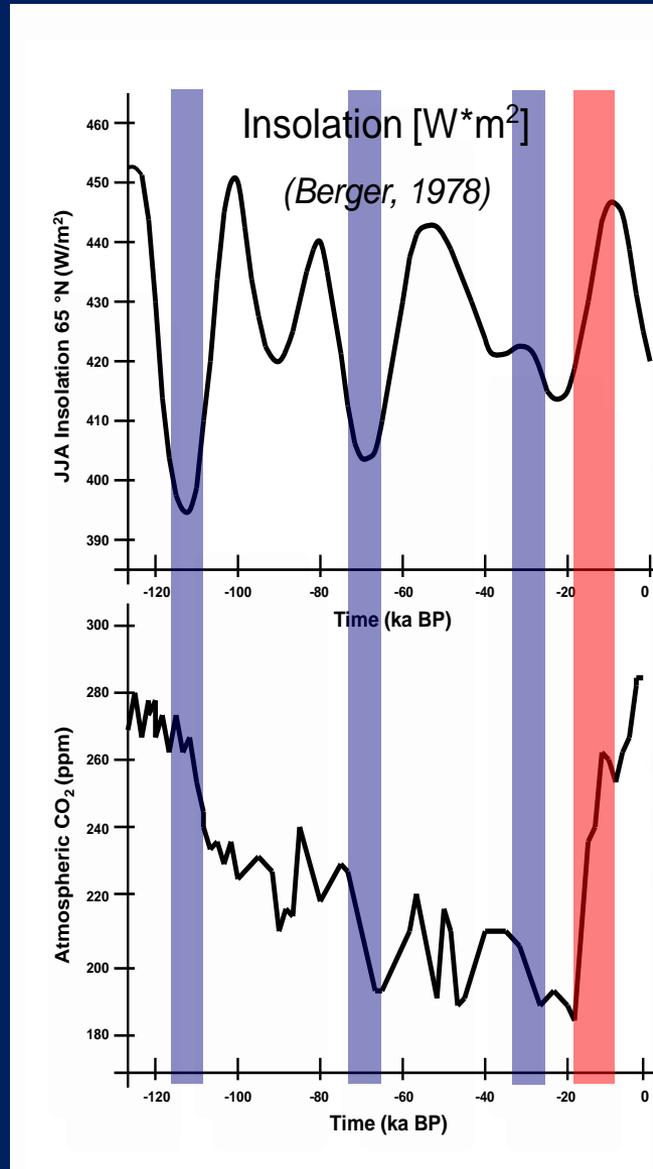


Le navire français « Marion-Dufresne »

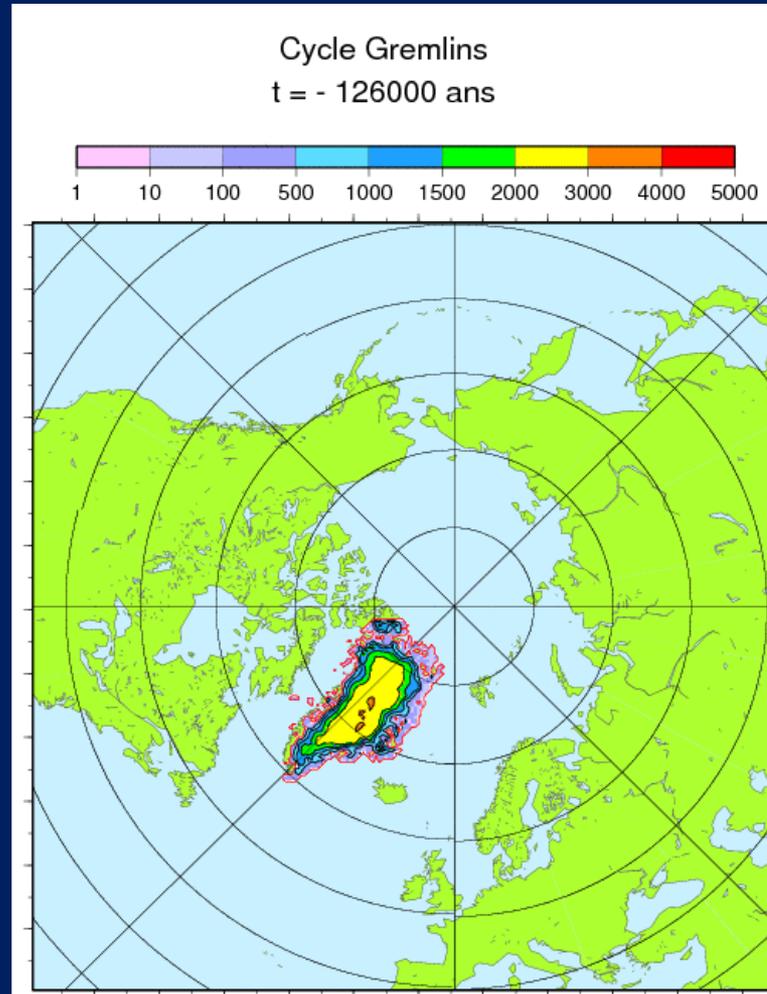


Carottes de sédiments marins

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



NOUVEAU CYCLE: MIS5 À PRÉSENT



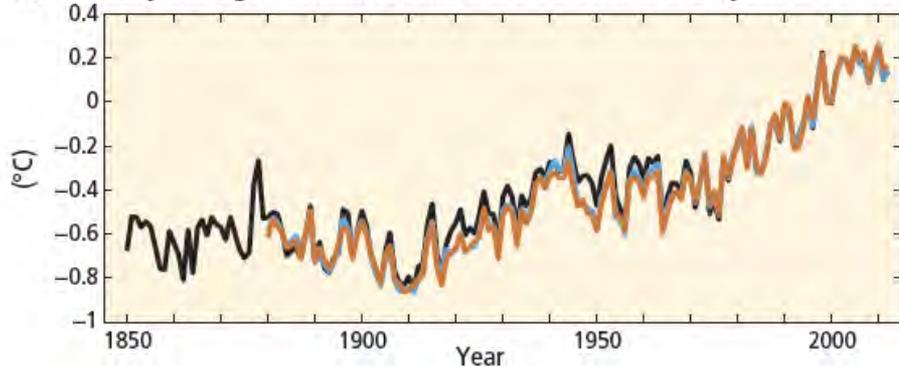
Bonnelli et al, Clim past 2009

LE TEMPS DE LA CENTAINE D'ANNÉES

Le temps de l'Homme

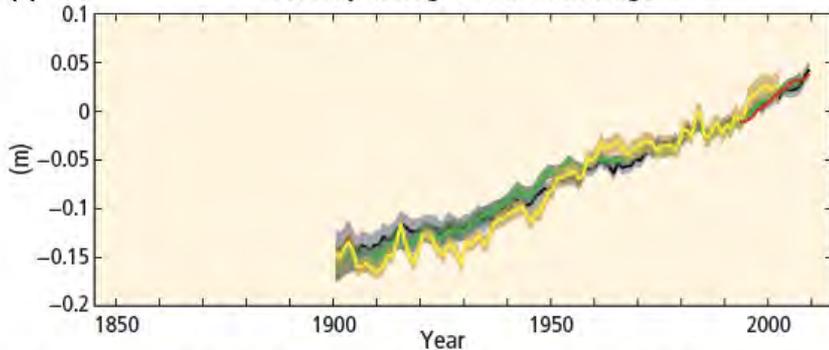
Cette valse climatique à trois temps s'achève dans un monde froid avec deux calottes de glace pérennes. Le quatrième temps de la valse va donc s'exercer dans ce contexte froid qui sera responsable de nombreuses ruptures...

(a) Globally averaged combined land and ocean surface temperature anomaly

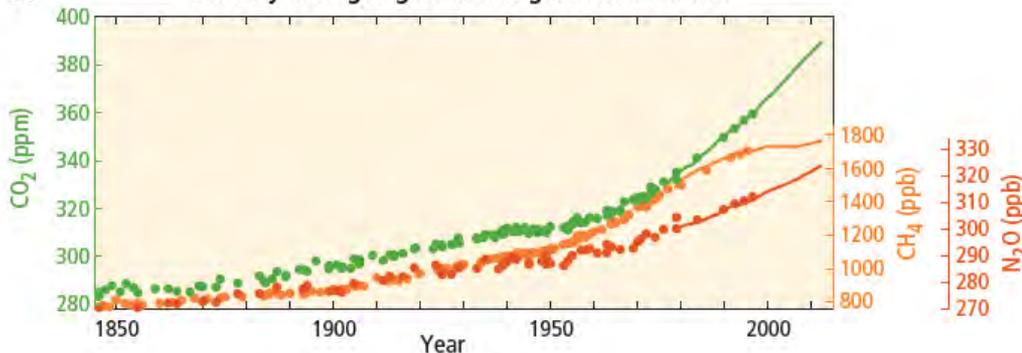


Observations **Figure 1** du « résumé à l'intention des décideurs » du 5ème rapport du GIEC

(b) Globally averaged sea level change



(c) Globally averaged greenhouse gas concentrations



MODÉLISATION NUMÉRIQUE 3D DU CLIMAT



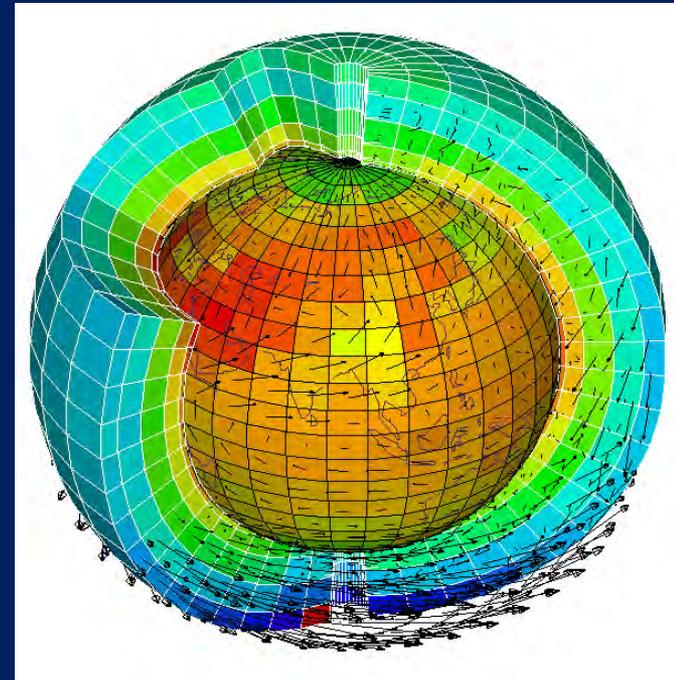
CDC 6400

Mise en Service : 09/1970

Date d'arrêt : 08/1975



**Airain Bull,
mise en Service :
09/2012**



Source: L. Fairhead, LMD/IPSL

SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION DE TEMPÉRATURE ET DU NIVEAU MARIN

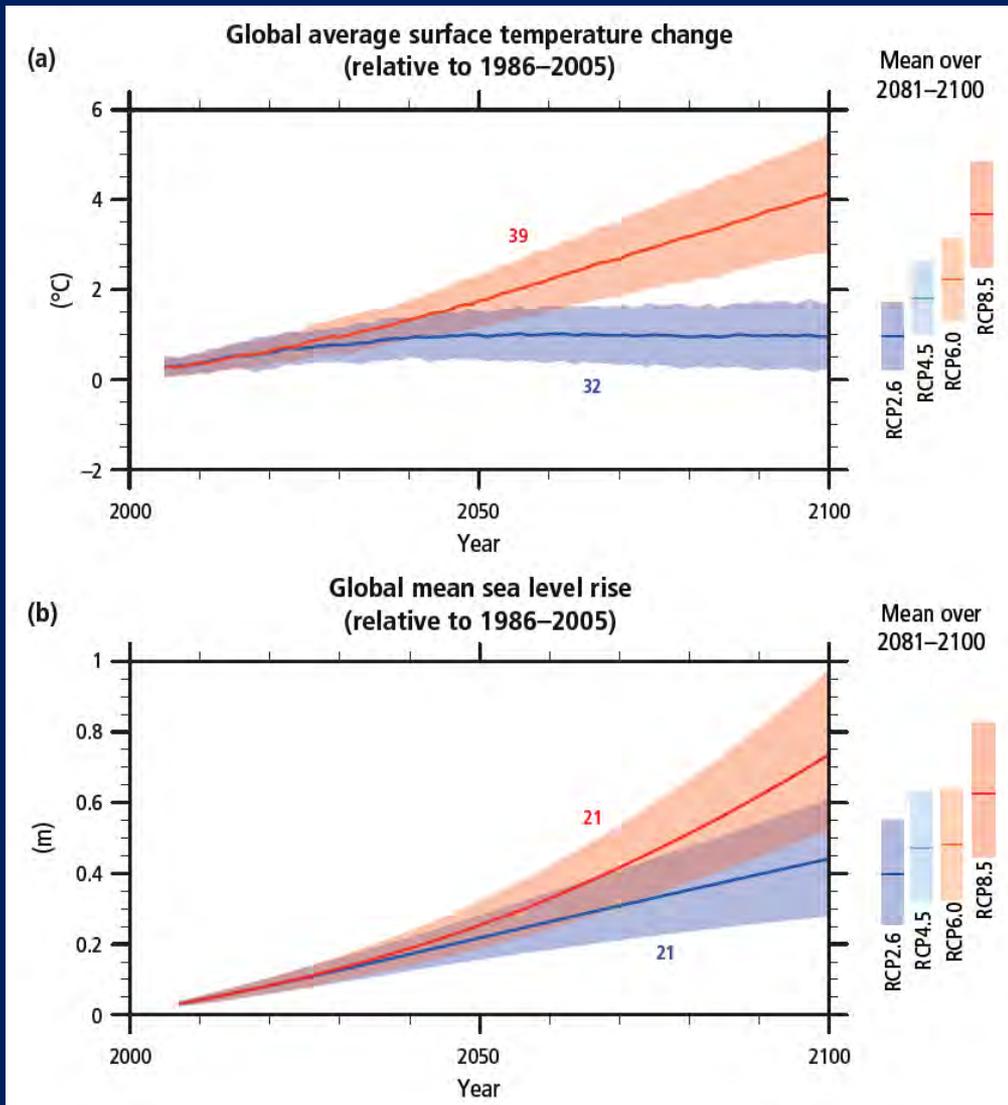


Figure 6 du résumé à l'intention des décideurs 5ème rapport du GIEC

Températures et précipitations

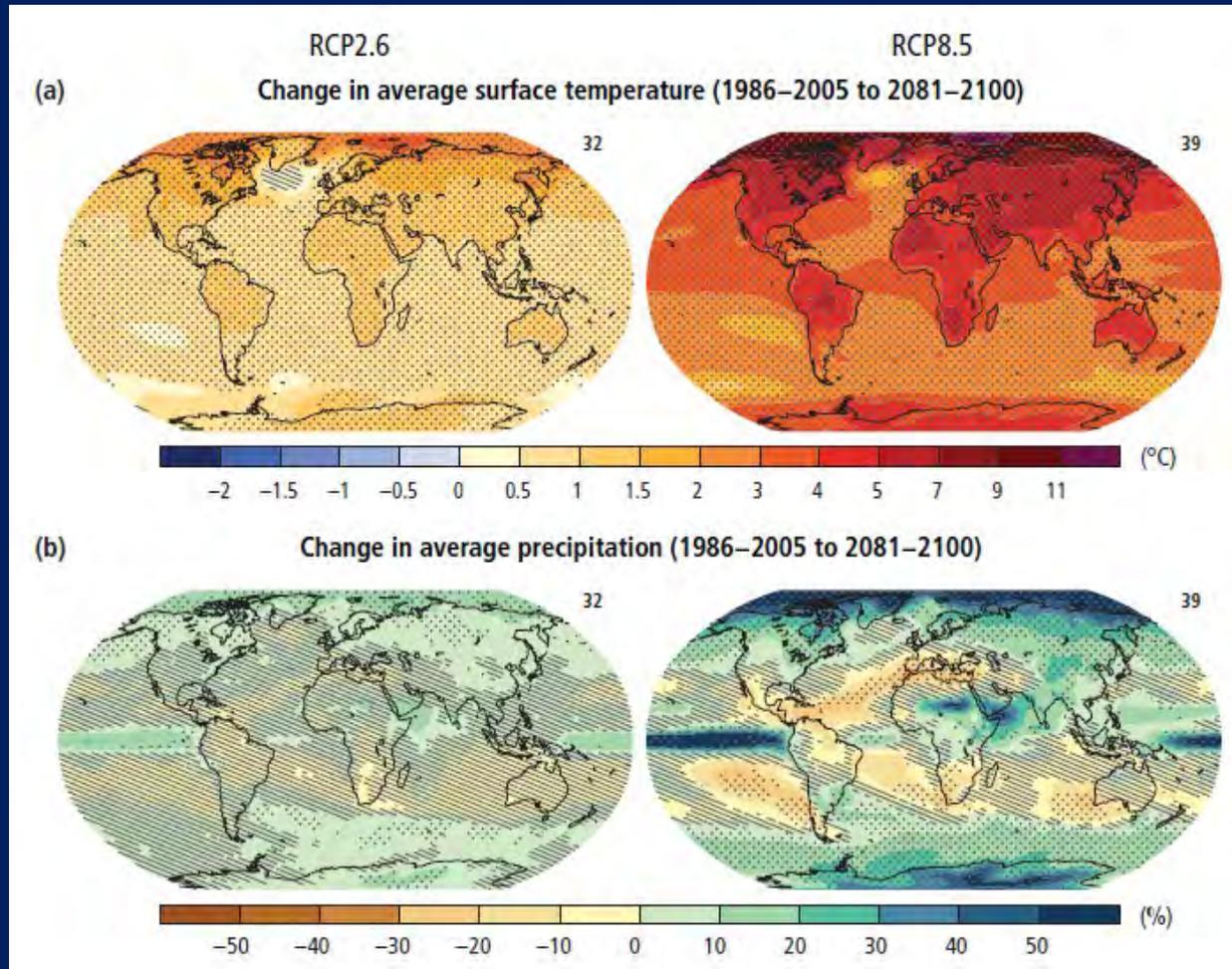


Fig.7 Résumé à l'intention des décideurs, 5ème rapport du GIEC

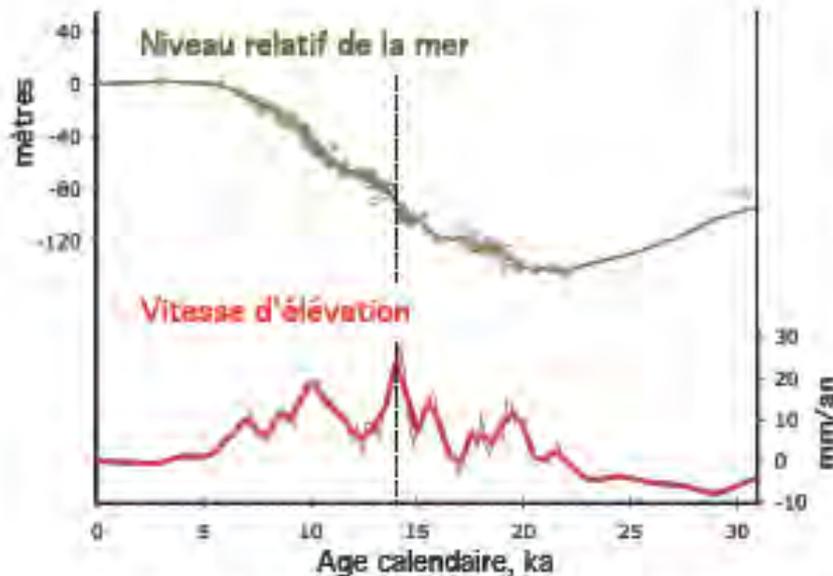
Reconstruction du niveau marin depuis 30 000 ans

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

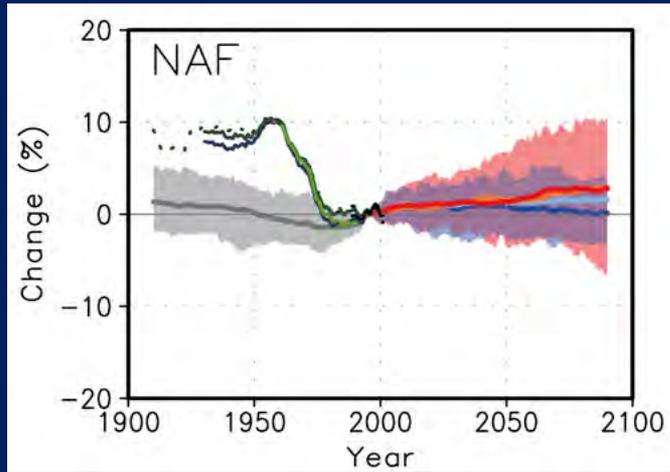
[Bard et al., 1990; Lambeck&Chappell, 2001;
Waelbroeck et al., 2002]

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.

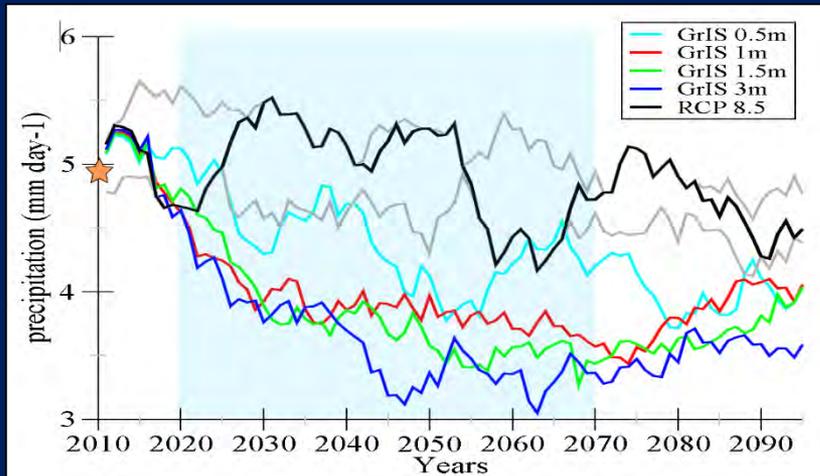
IMPACTS SUR LES MOUSSONS ET LES MIGRATIONS EN AFRIQUE DE L'OUEST

SIMULATION DU GIEC

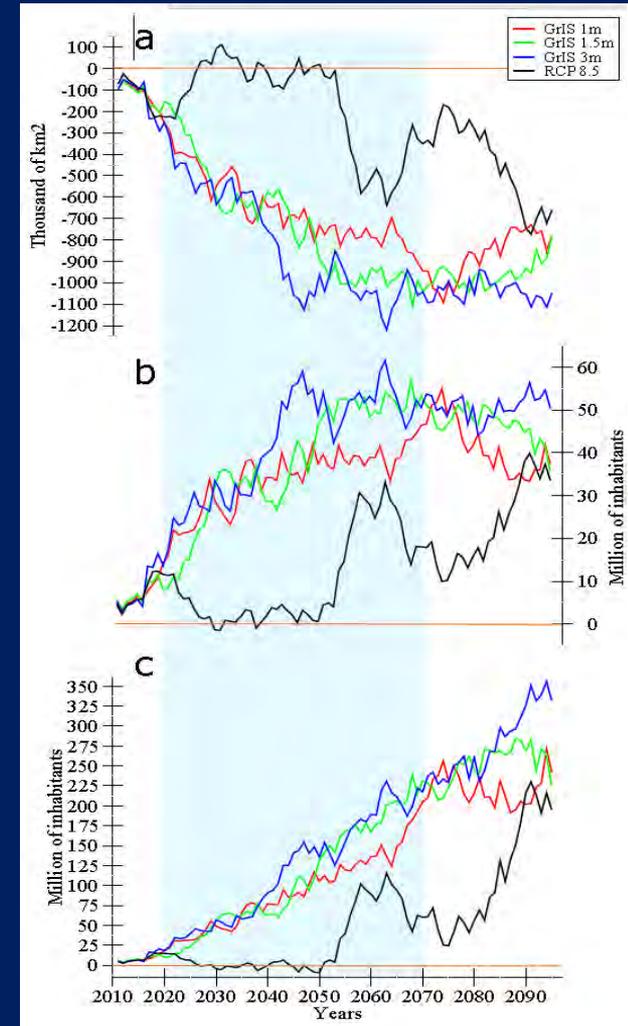


Observations des variations de moussons africaines passées et présentes (1900-2100) pour les différents scénarios: Historique (gris; 40 modèles), RCP2.6 (bleu foncé; 24 modèles), RCP4.5 (bleu clair; 34 modèles), RCP6.0 (orange; 20 modèles), et RCP8.5 (rouge; 32 modèles). GIEC WP1 chap, 14 figure 14.7.

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

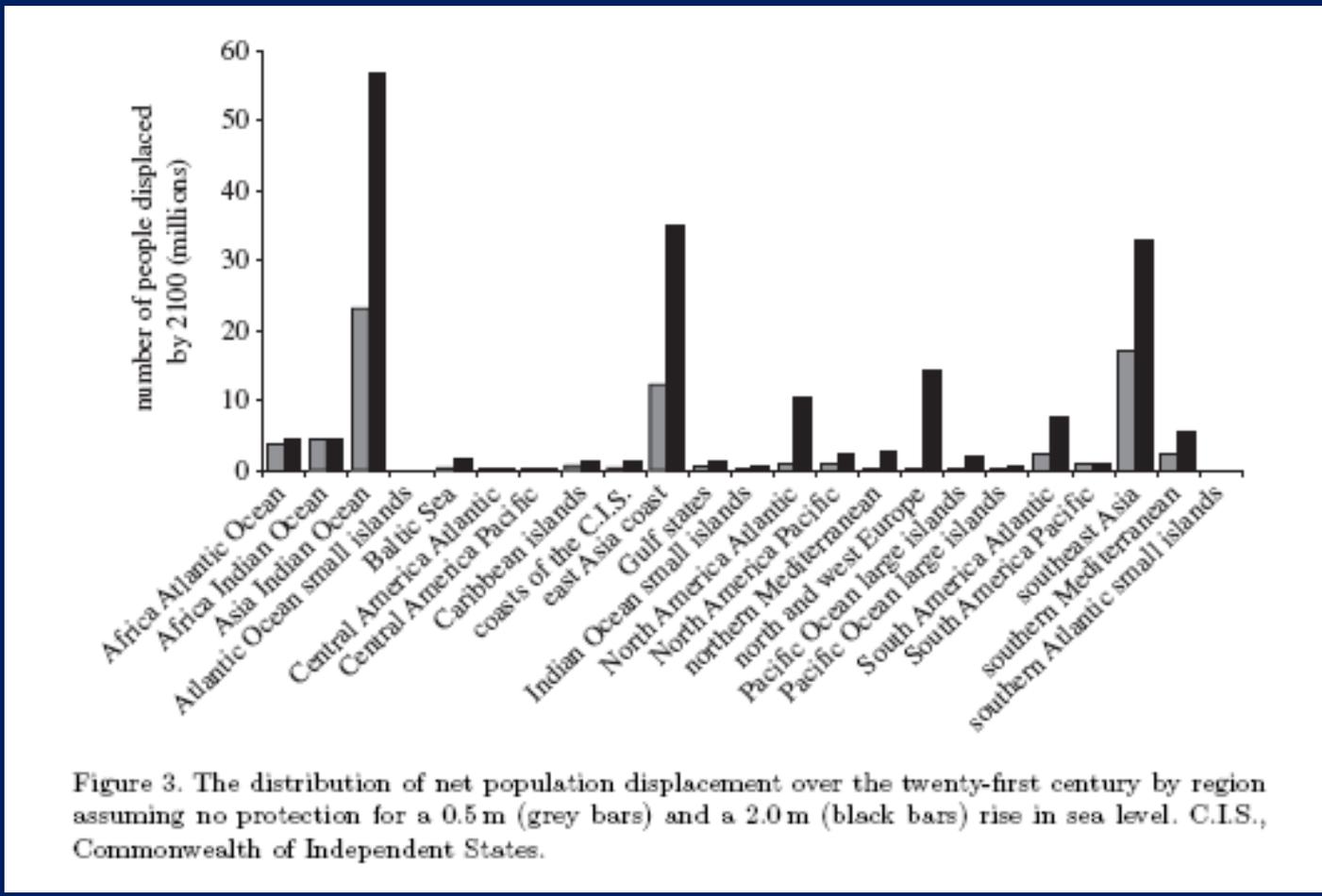


Figure 3. The distribution of net population displacement over the twenty-first century by region assuming no protection for a 0.5 m (grey bars) and a 2.0 m (black bars) rise in sea level. C.I.S., Commonwealth of Independent States.

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

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





Maldives, 17 octobre 2009

CONCLUSION

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.

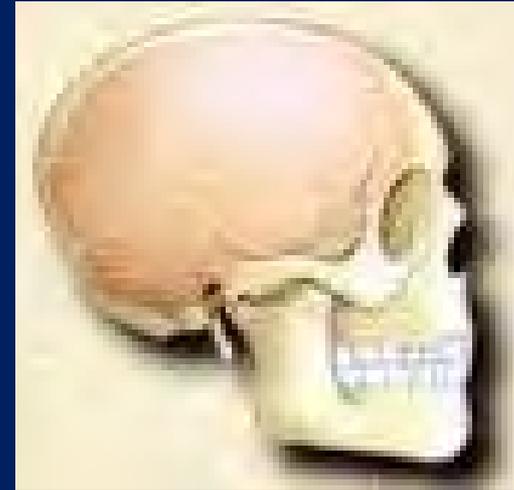
- 🌍 Au Cénozoïque [65-2,5 Ma], le climat se refroidit, le taux de CO₂ baisse, les calottes Antarctique (34 Ma) et Groenlandaise (2,6Ma) se mettent en place.
- 🌍 Au Quaternaire, des oscillations pilotées par les variations orbitales font basculer le climat de la phase glaciaire (80%) à des phases interglaciaires.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

Merci !

Je remercie le Collège de France de m'avoir invité pour ce séminaire, en particulier François-Marie Bréon dans le cadre de la Chaire « Avenir Commun Durable »
J'ai accepté avec grand plaisir cette invitation sans savoir que Total Energies en était un mécène

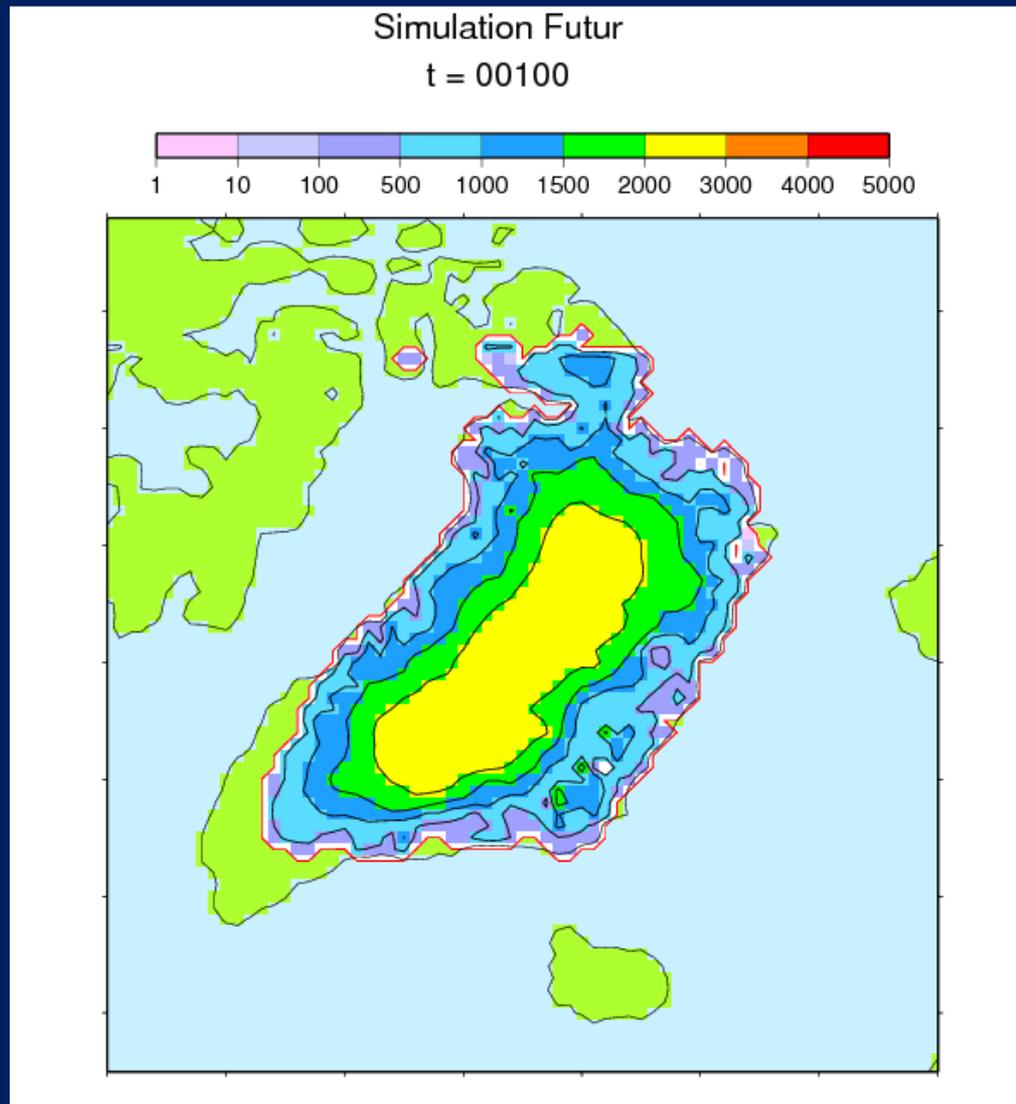


AUSTRALOPITHECUS
(plus de 3 millions d'années)
Volume cérébral : ~ 400 cm³

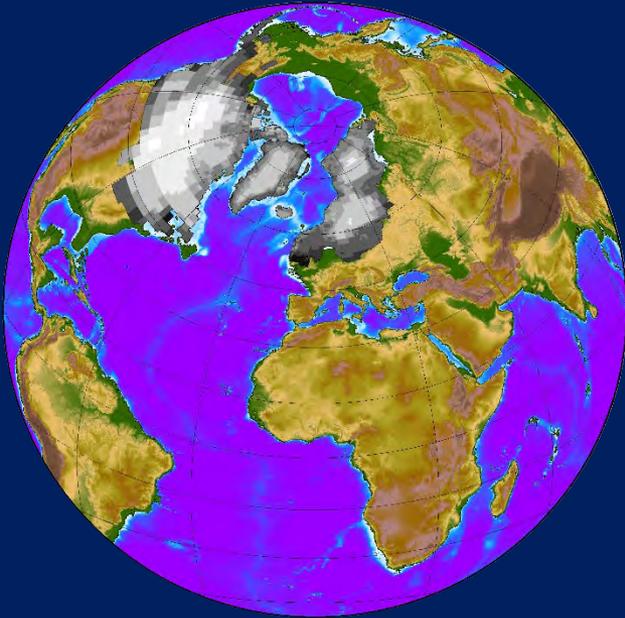


HOMO SAPIENS
L'Homme moderne
Volume cérébral :
de 1230 à 2 000 cm³

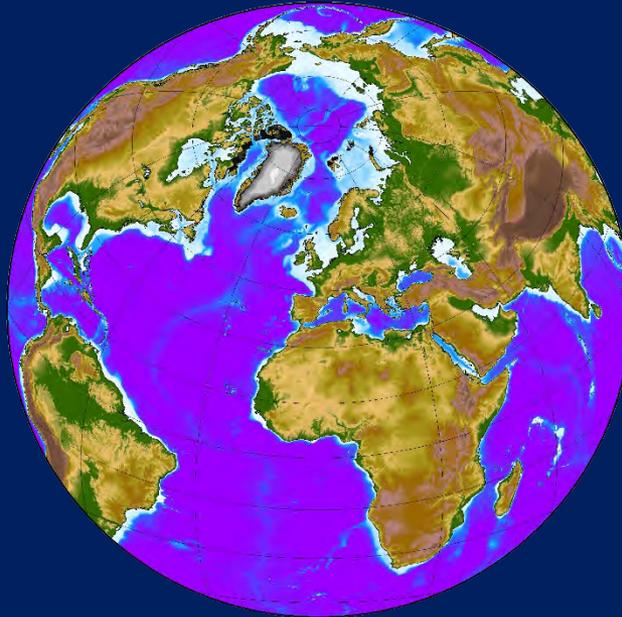
Simulation possible de l'évolution du Groenland sur plusieurs siècles à venir



Dernier Maximum
Glaciaire



L'actuel



La Terre si toute la
glace fondait

