

Séminaire au Département de Physique des Particules CEA Saclay

LES CLIMATS DE LA TERRE
Dans quels contextes l'Homme va-t-il changer le climat ?

Gilles Ramstein

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

Lundi 06 juin 2018

VALESE 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 :

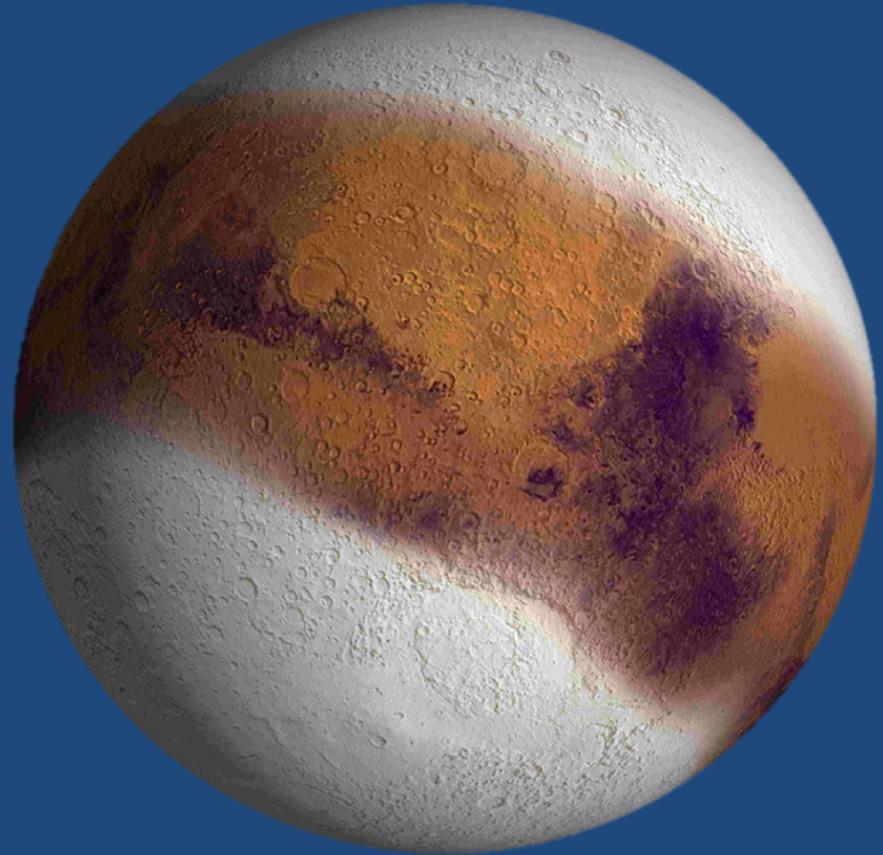
Jour +20°C

Nuit -140°C

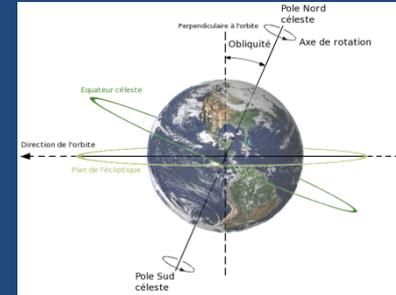
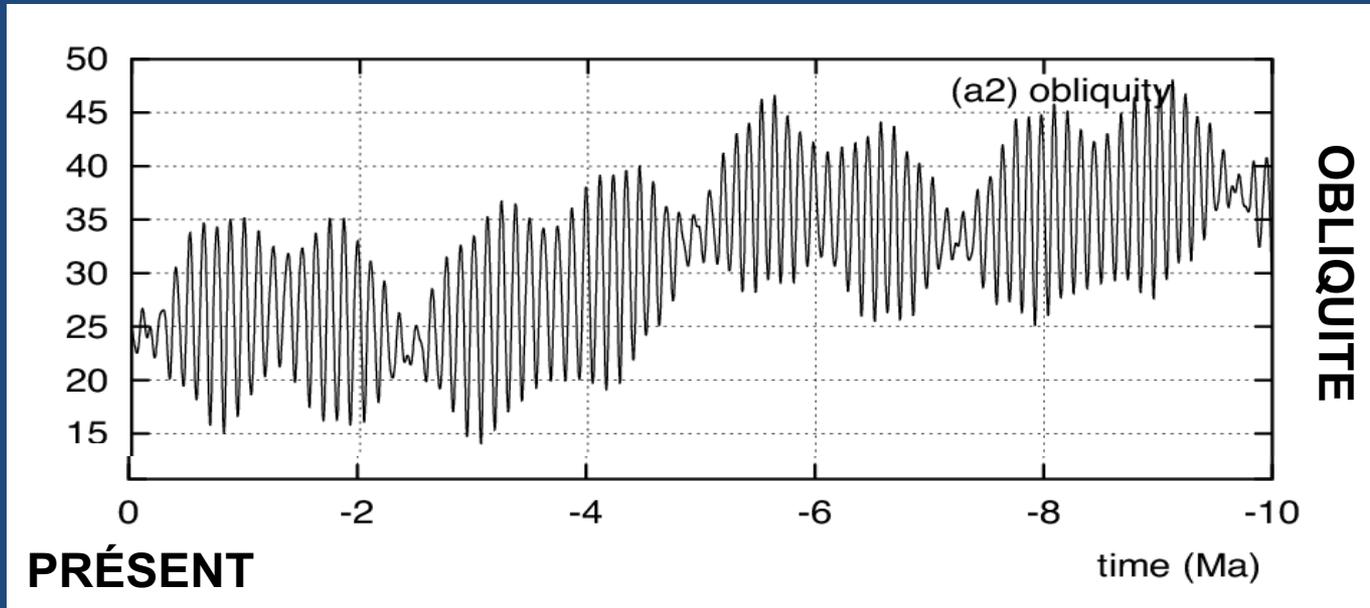
Pression au sol :

6 à 8 mbar

150 fois plus faible
que sur la TERRE



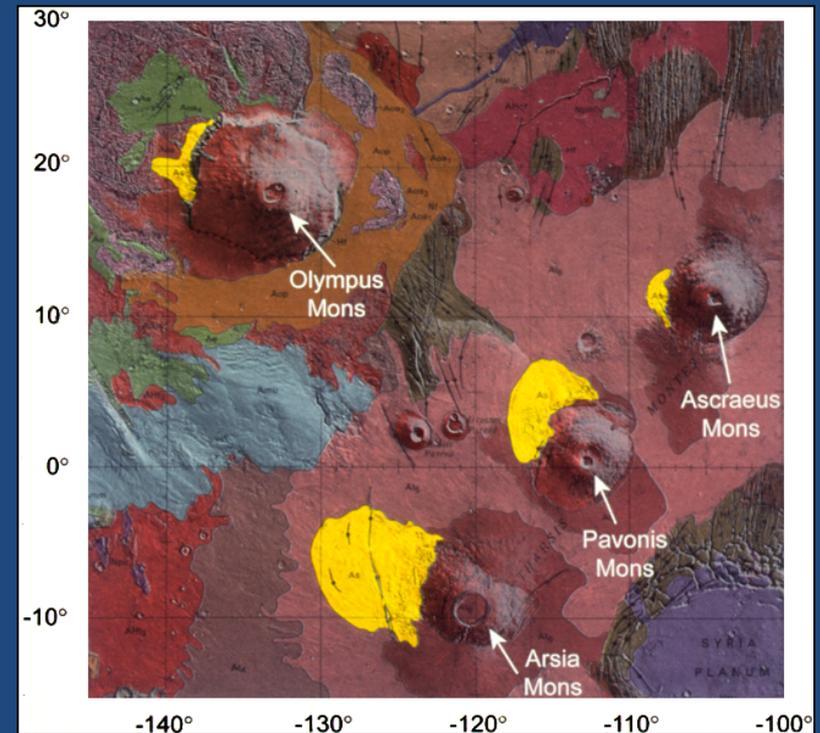
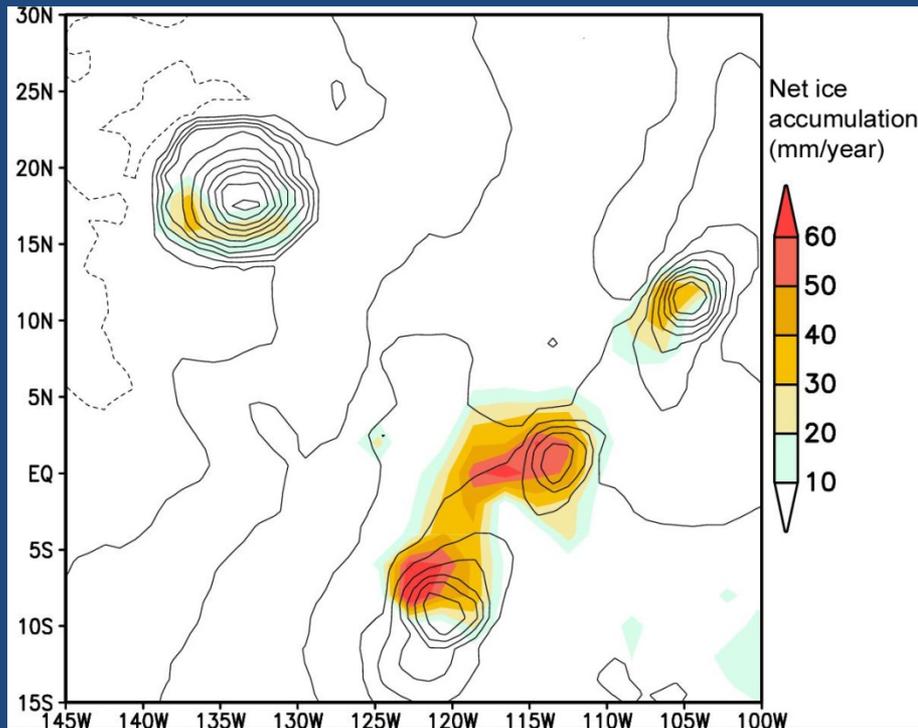
Les variations climatiques dans le passé récent de **Mars** sont liées aux modifications de son obliquité et de son orbite.



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

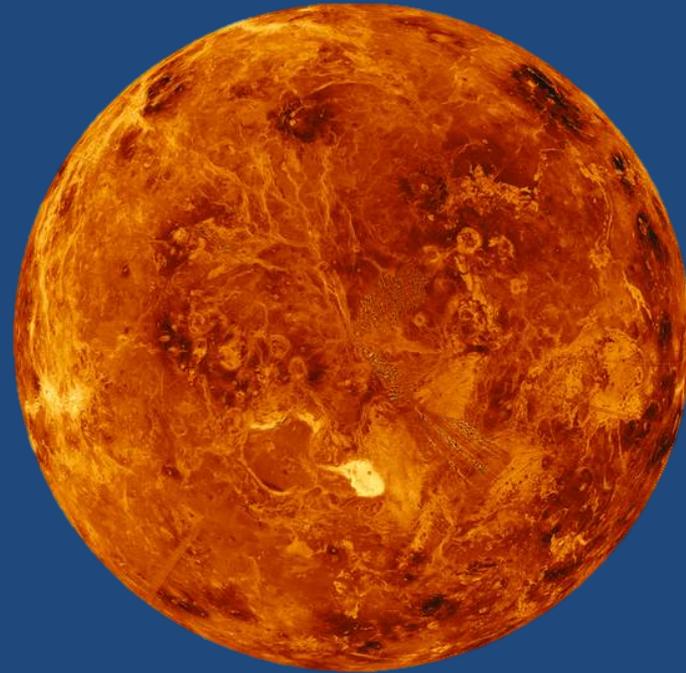


Dépôts et moraines caractéristiques de glacier à base froide

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)



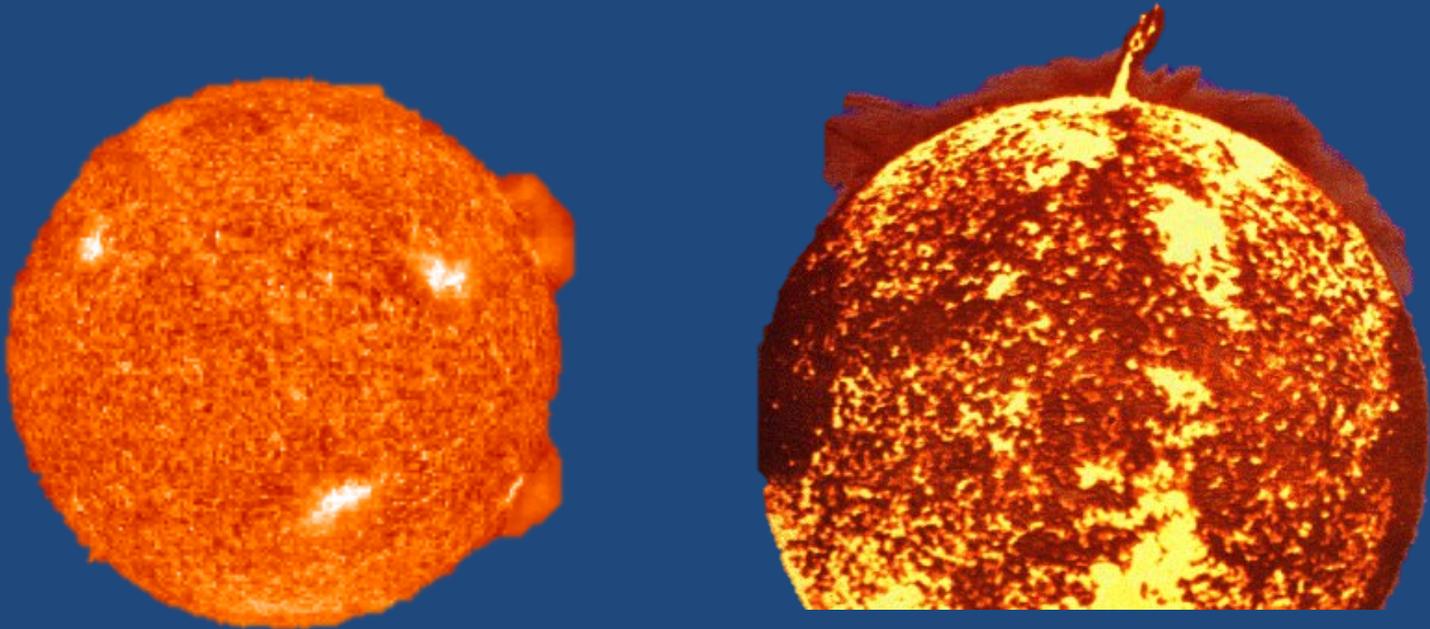
LE TEMPS DU **MILLIARD** D'ANNÉES

Le temps de l'évolution du soleil

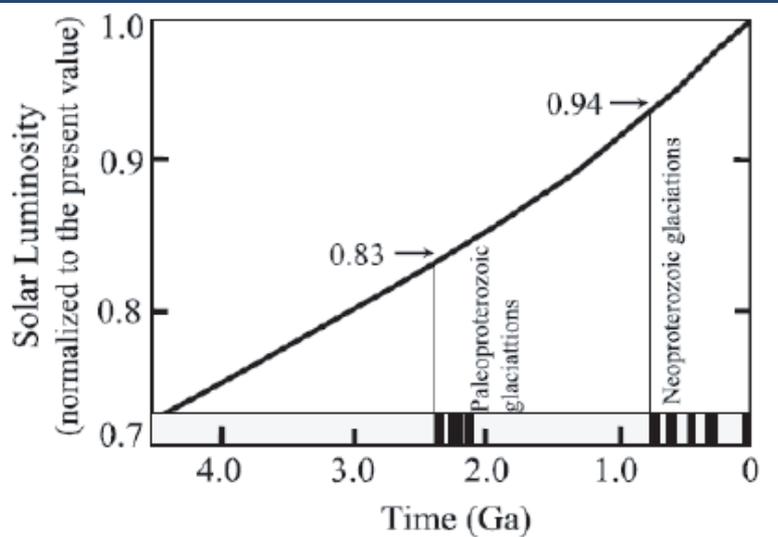
LE SOLEIL JEUNE AVAIT À SES DÉBUTS UNE PLUS **FAIBLE** LUMINOSITÉ

-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),

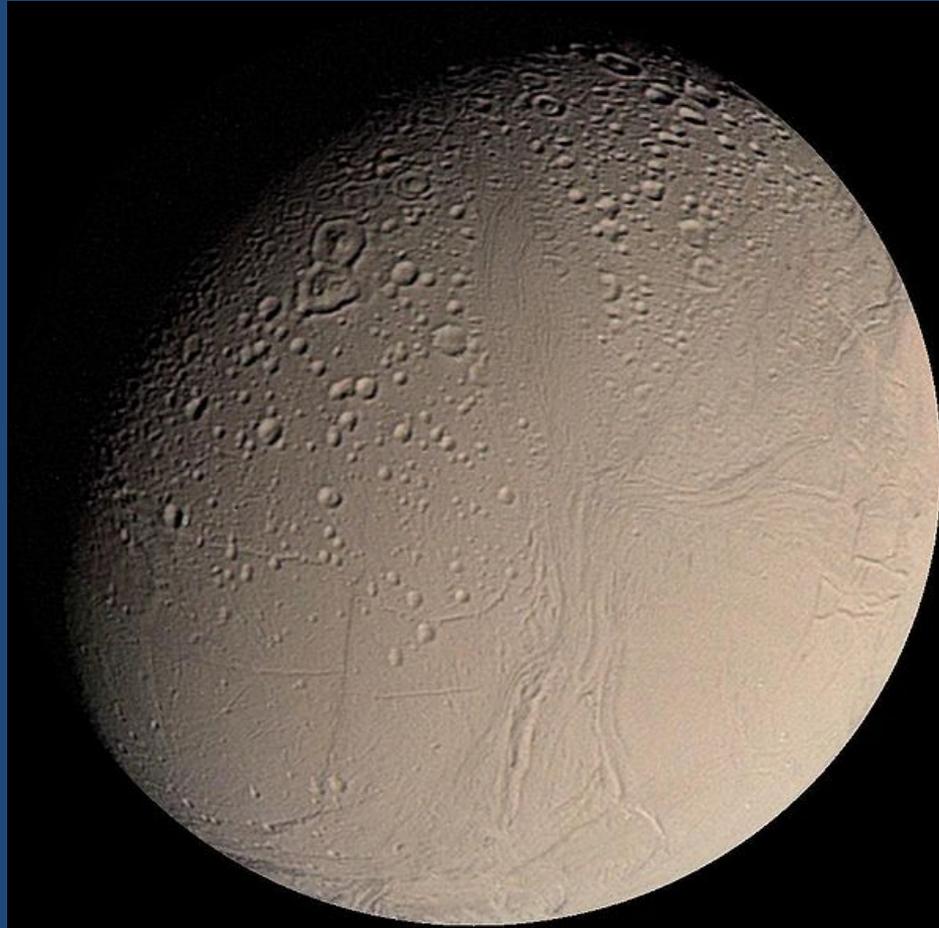
$$S = S_0 / (1 + 0.4t/t_0)$$

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

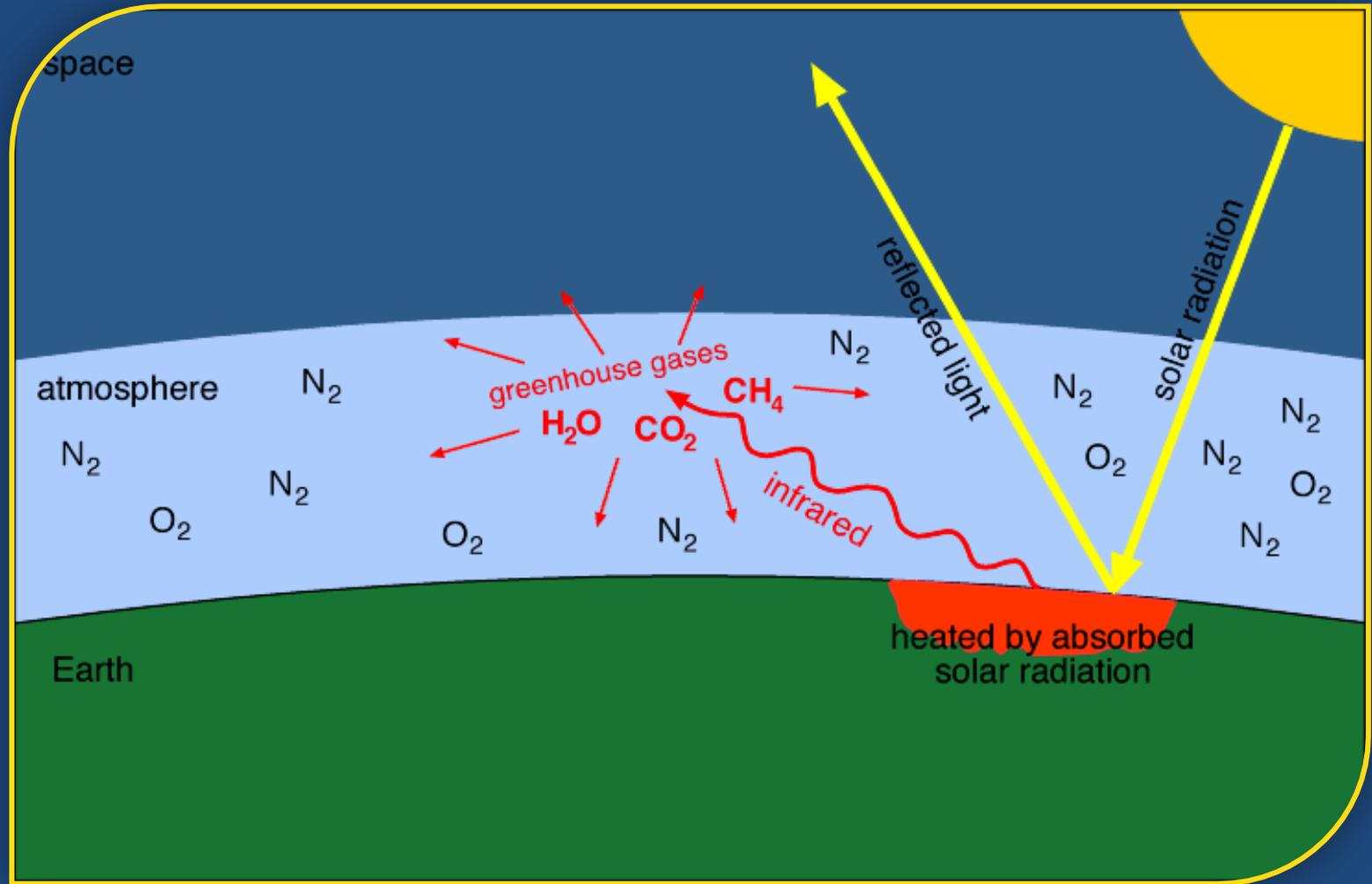
$t_0 = 4.6$ Ga, et $t =$ temps (en Ga) avant l'époque présente.

Il y a 0.7 Ga, notre Soleil était 6% moins intense qu'aujourd'hui
constante solaire Néoproterozoïque = 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

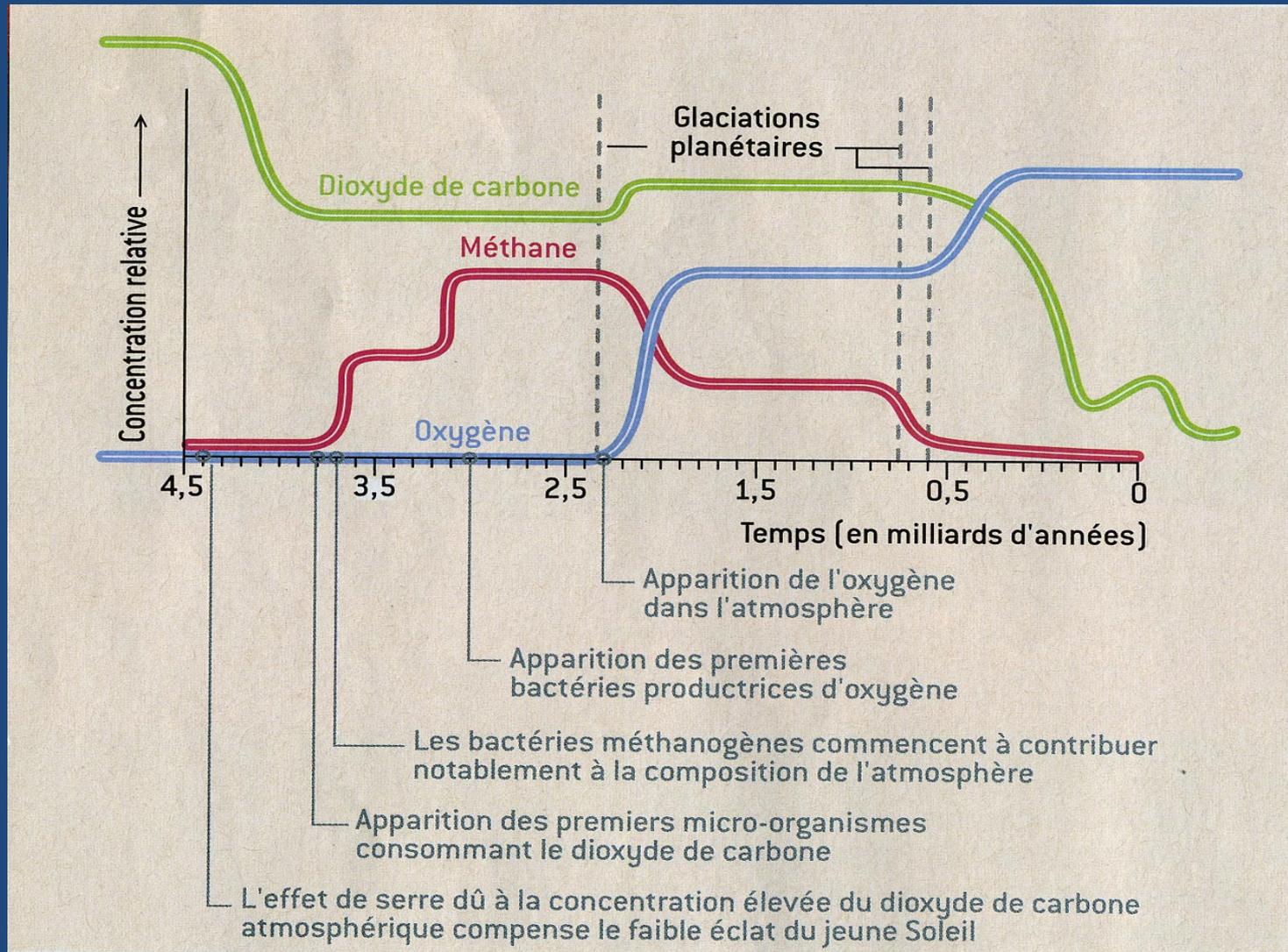
- 🌍 **Glaciation Huronienne (2.4 / 2.6 Ga)**

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

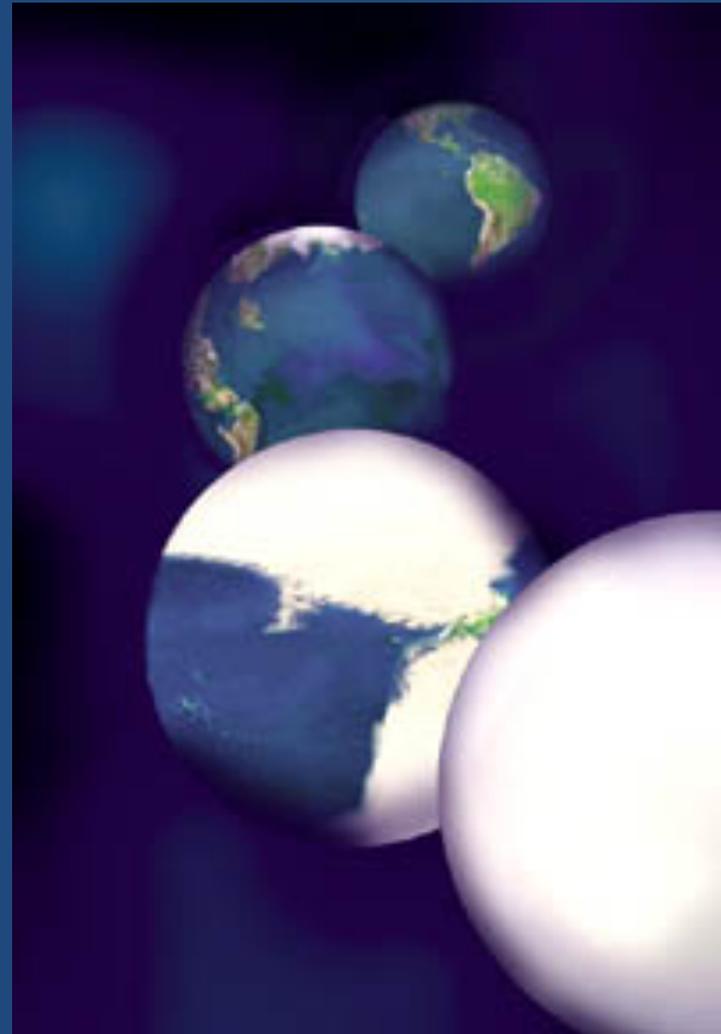


LE TEMPS DE LA DIZAINE DE MILLIONS D'ANNÉES

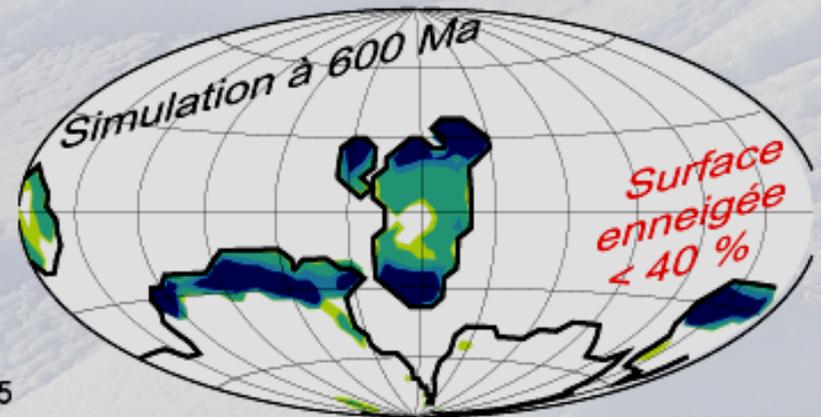
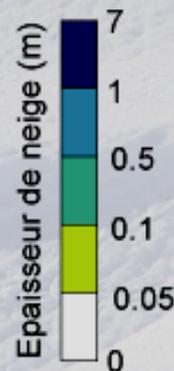
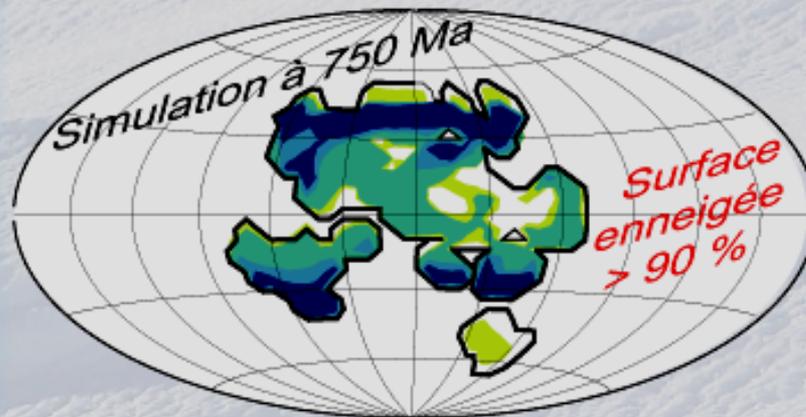
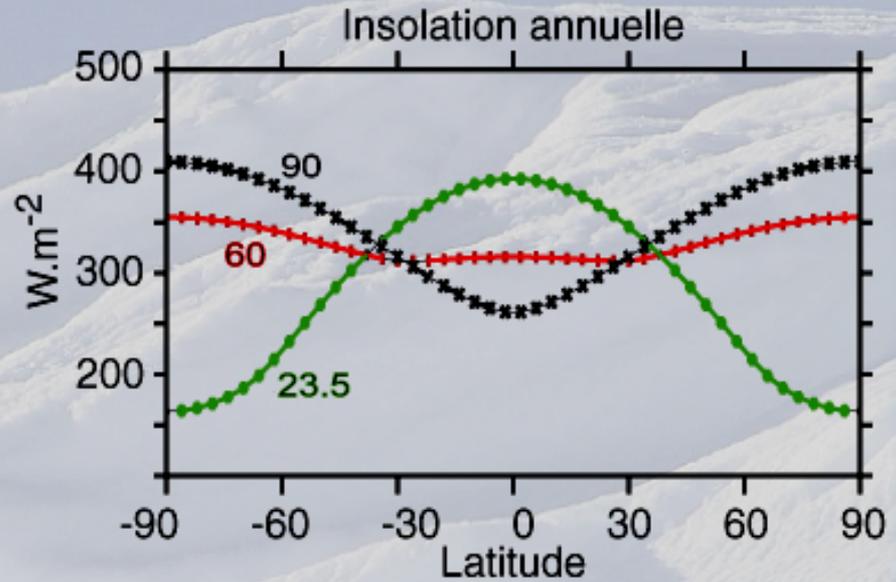
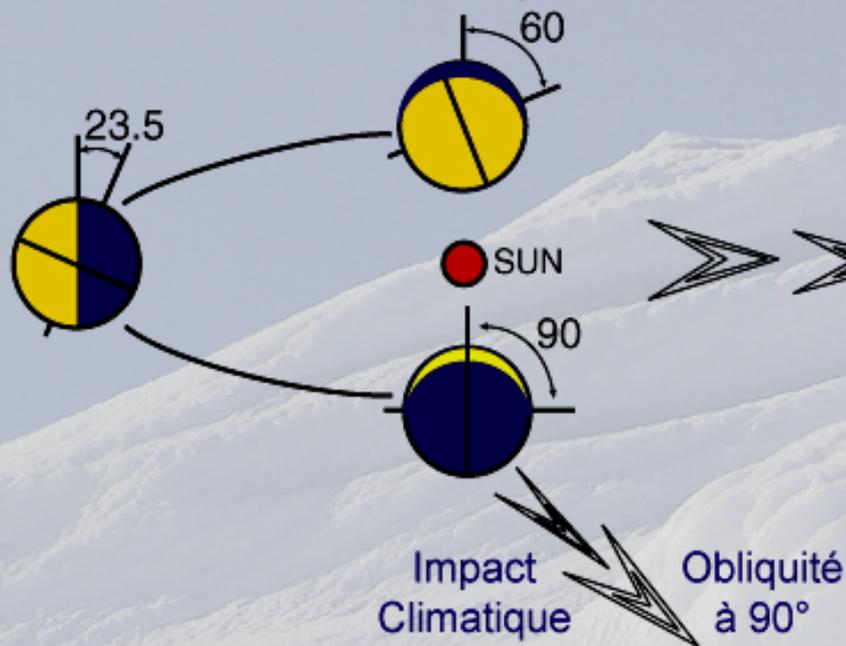
*Le temps de la tectonique,
de la Dérive des continents*

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

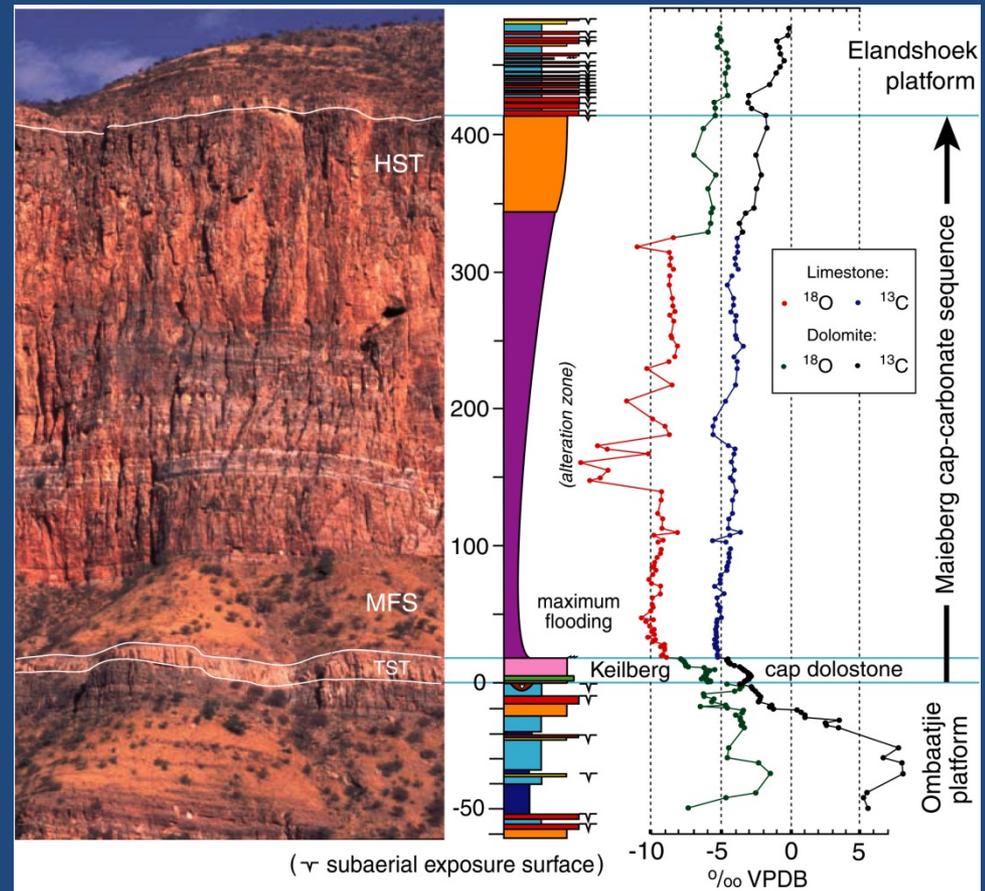
Nature Particulière Des Sédiments Associés Aux Glaciations Néoprotérozoïques



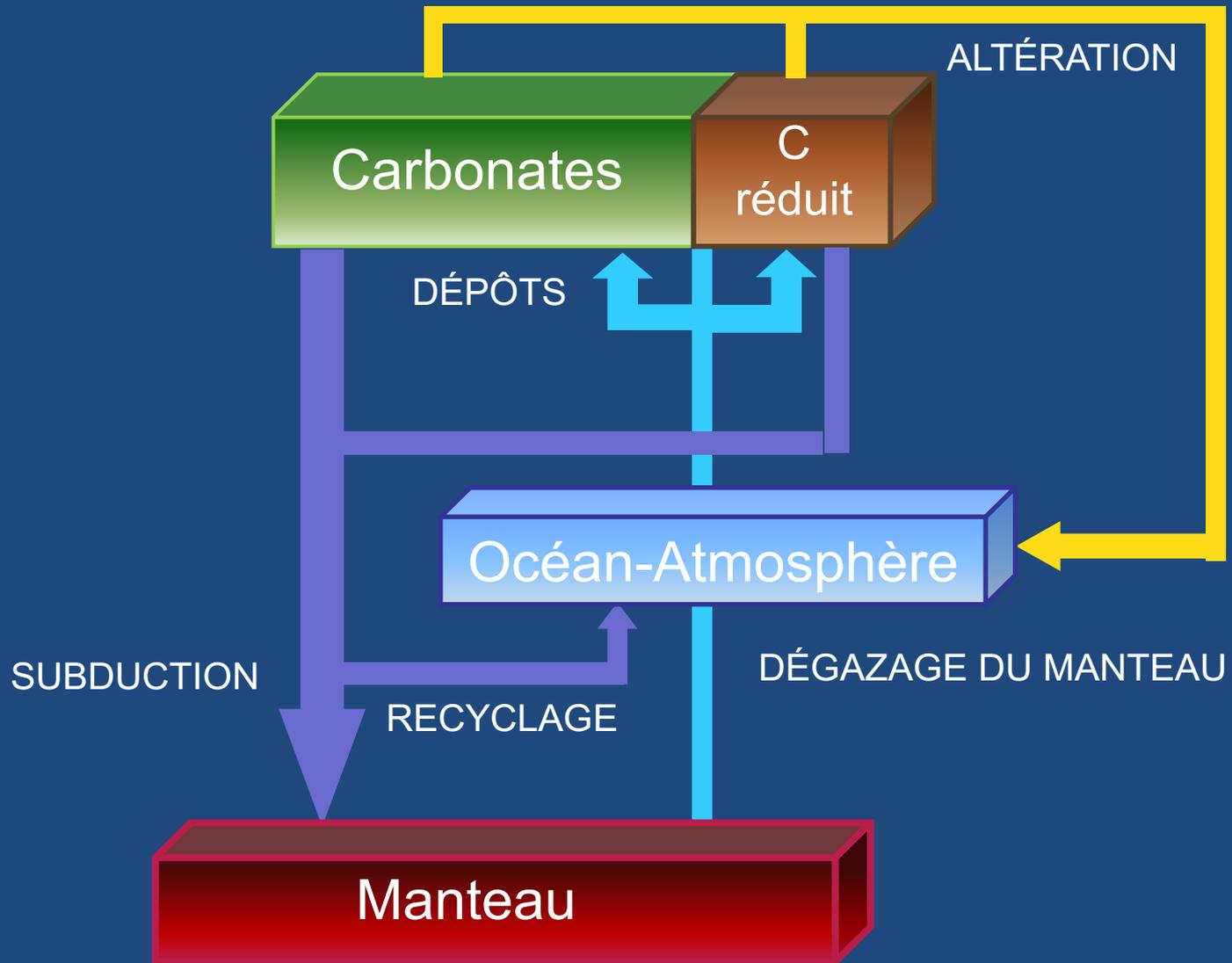
» Formation de fer rubané

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 ...

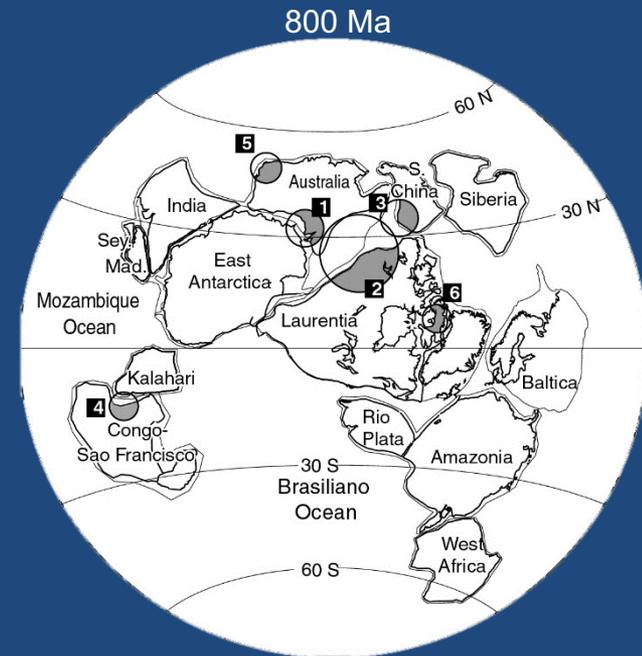
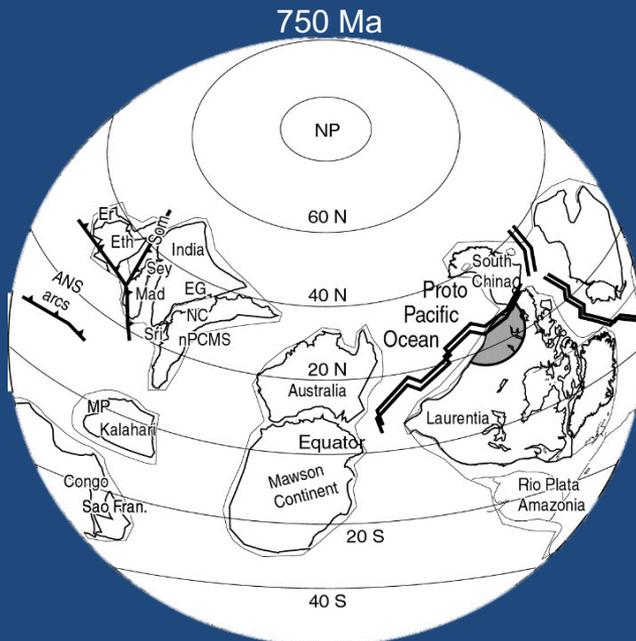


MÉCANISMES DE REFROIDISSEMENT GLOBAL À LONG TERME

1 - Apparition de traps successives

2 - Position à basses et moyennes latitude des continents

3 - Fragmentation du supercontinent Rodinia



LES PREMIERS RÉSULTATS ...

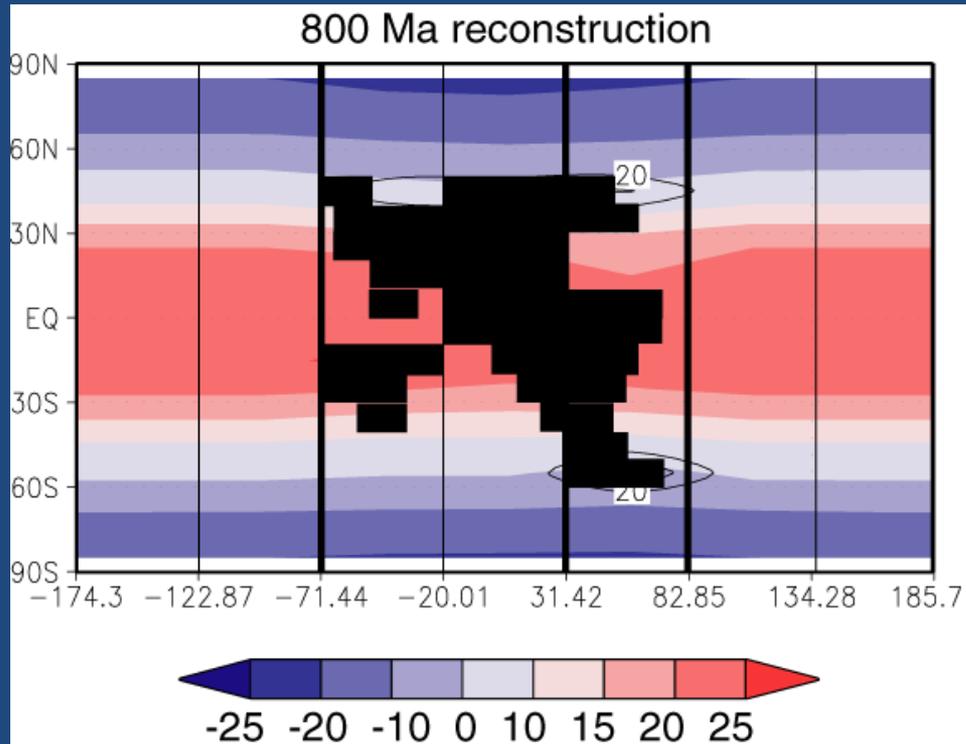
1 – A 800 Ma



Le modèle s'équilibre à un 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 continentales mais le climat est quand même relativement froid

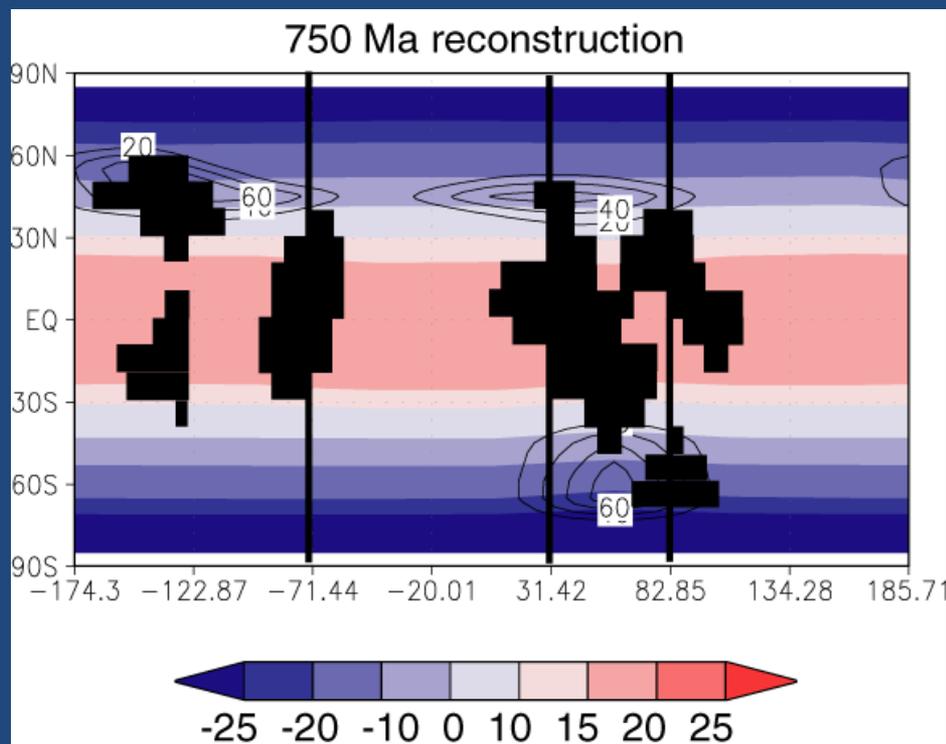
Donnadieu et al, Nature 2004

LES PREMIERS RÉSULTATS ...

1 – A 750 Ma

Le modèle s'équilibre à un pCO₂ d'environ 500 ppm
Réduction de 1300 ppm

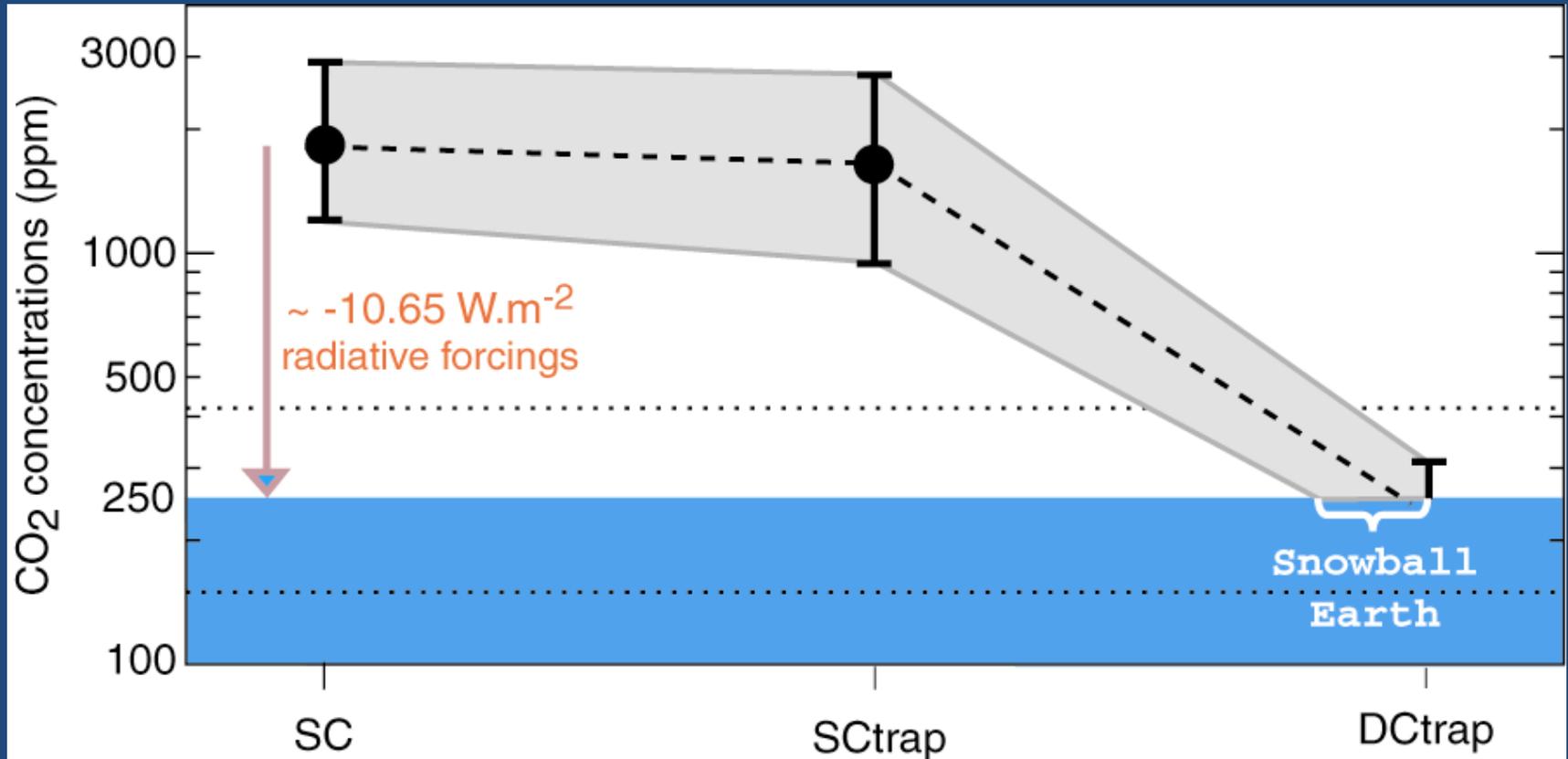
Soit une température globale moyenne de 2°C
Réduction de 8.2°C



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

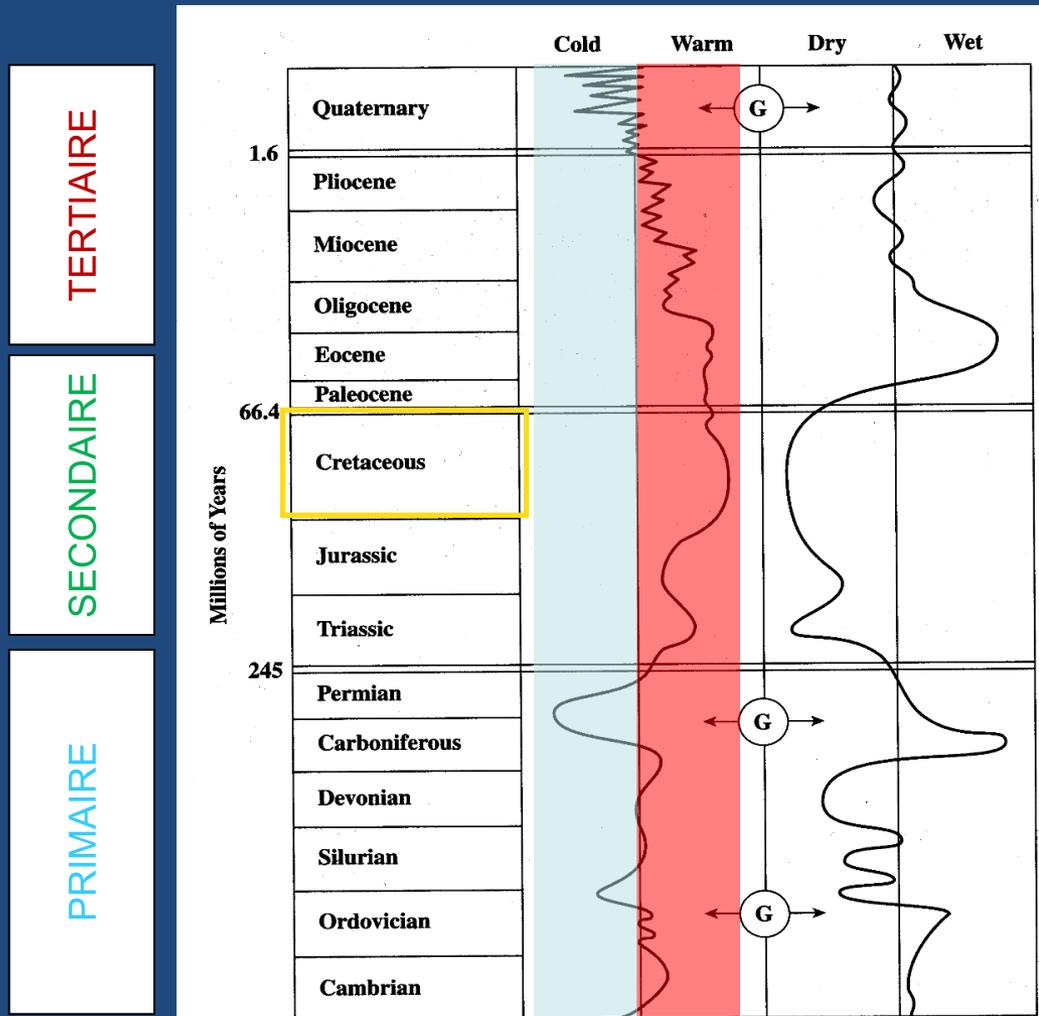


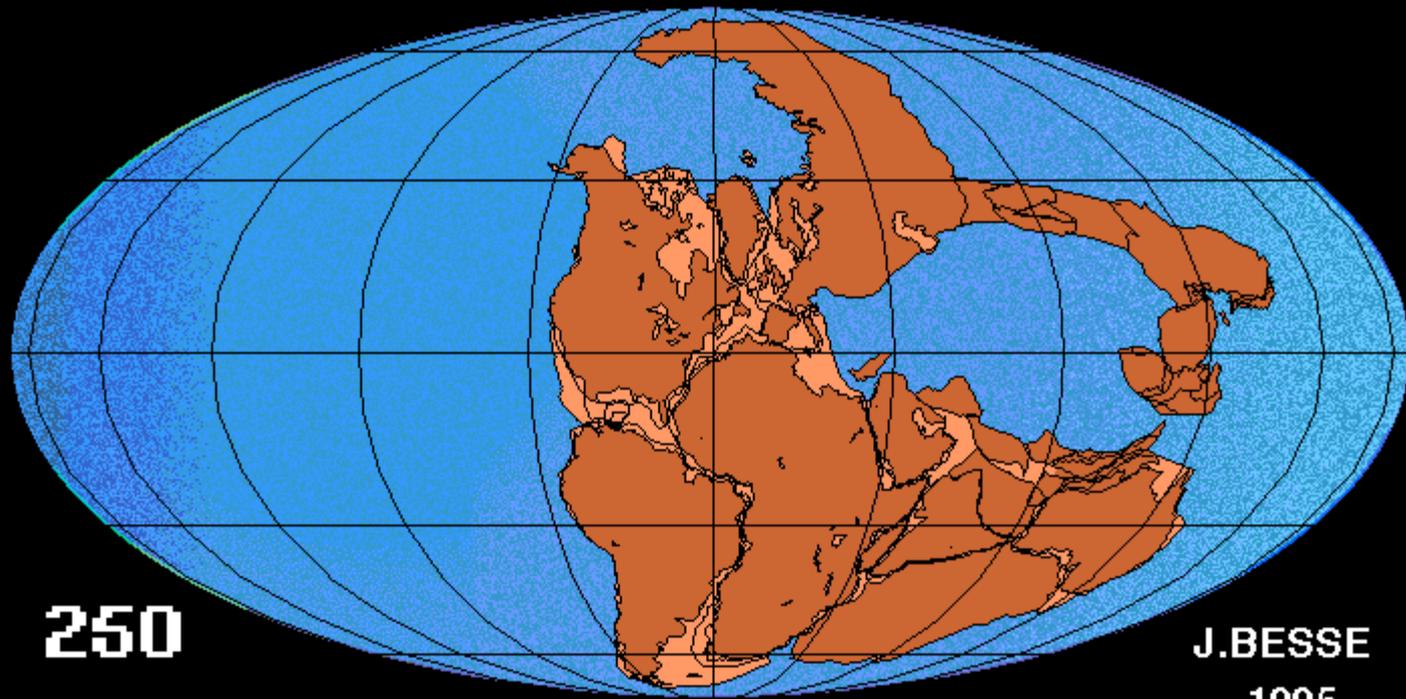
IMPACT SUR LE CO₂



LES PÉRIODES CLIMATIQUES CHAUDES

représentent 75% des 540 derniers millions d'années





250

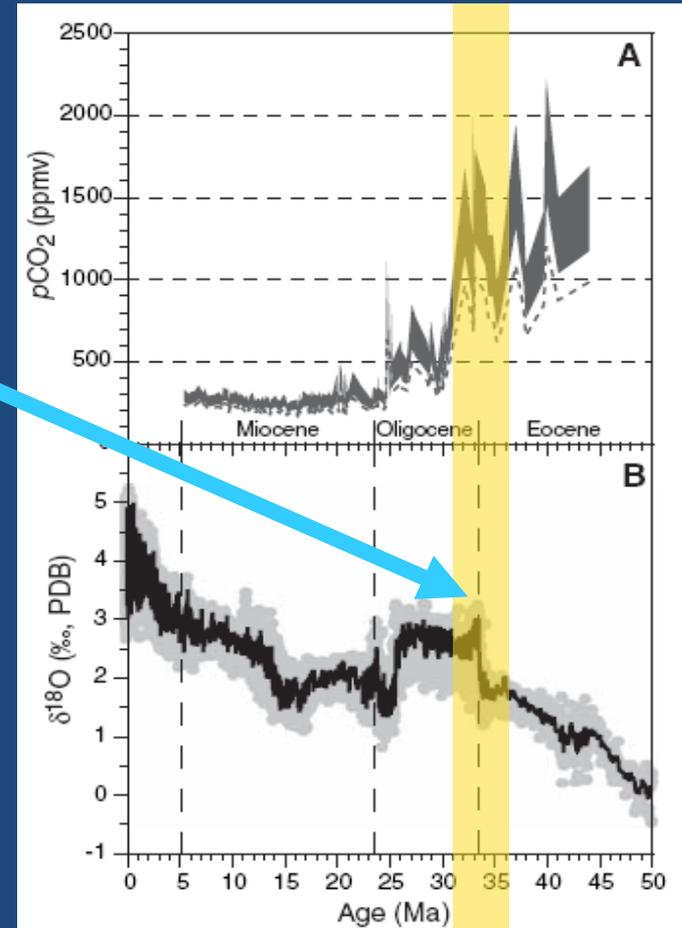
**J.BESSE
1995**

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

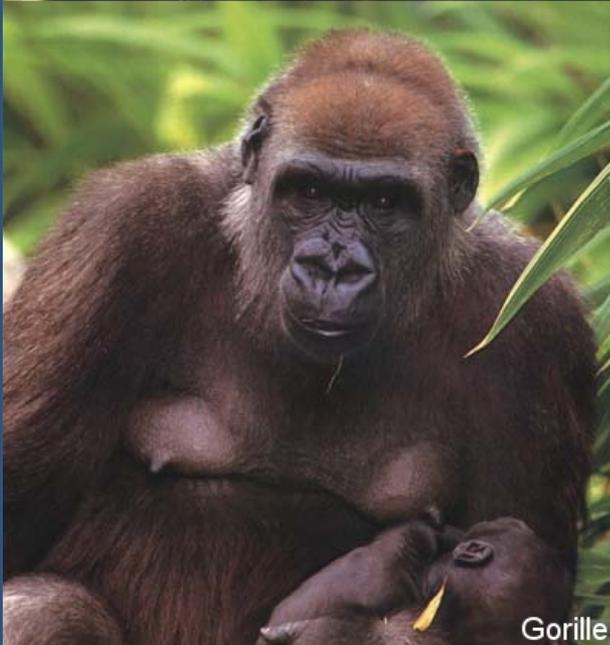
Pagani et al., 2005



Chimpanzé

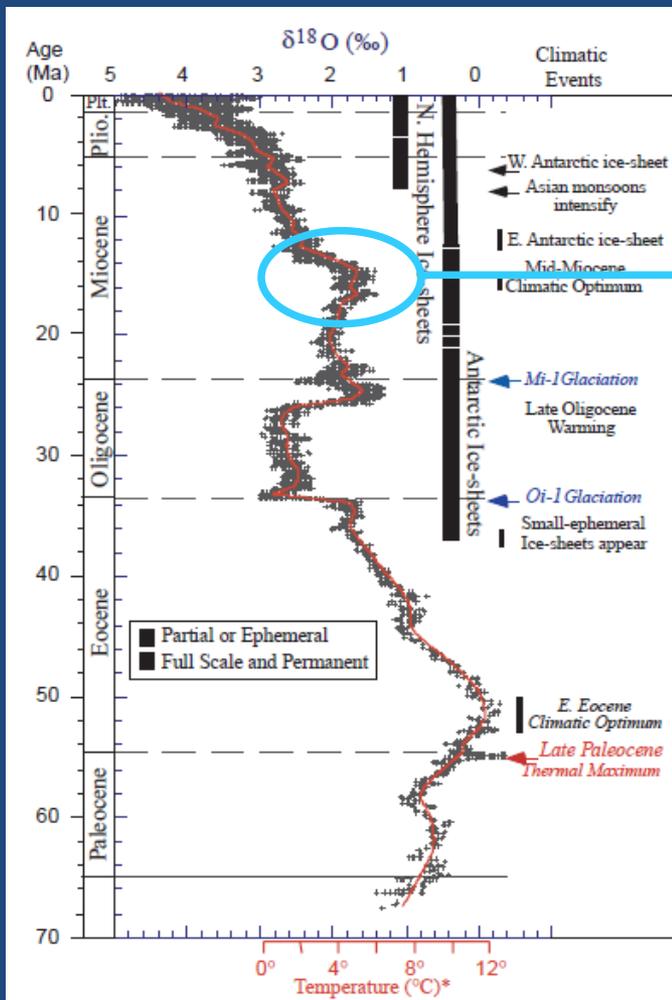


Orang-Outan



Gorille

©primates.com



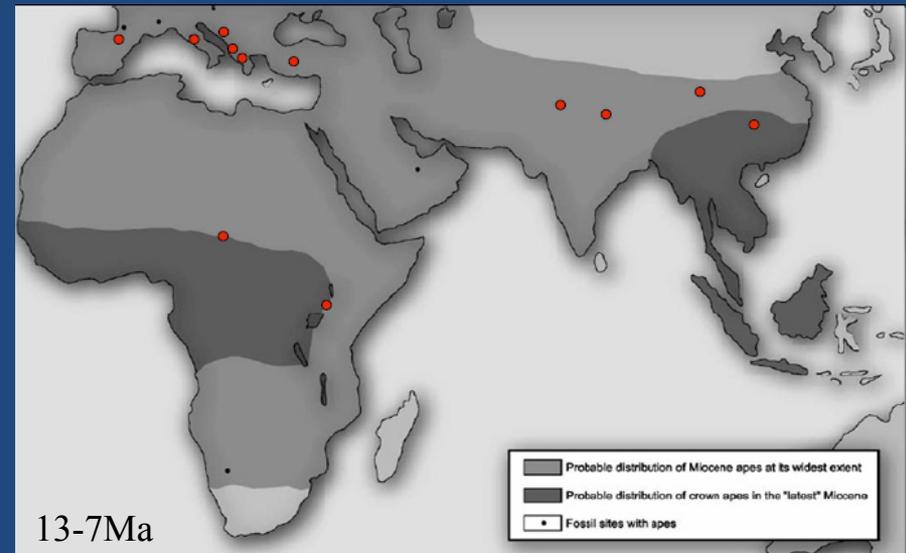
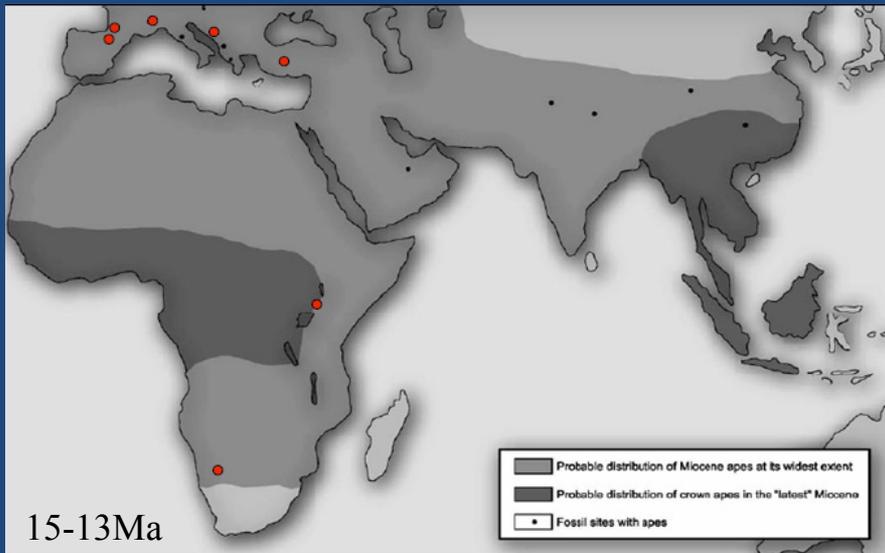
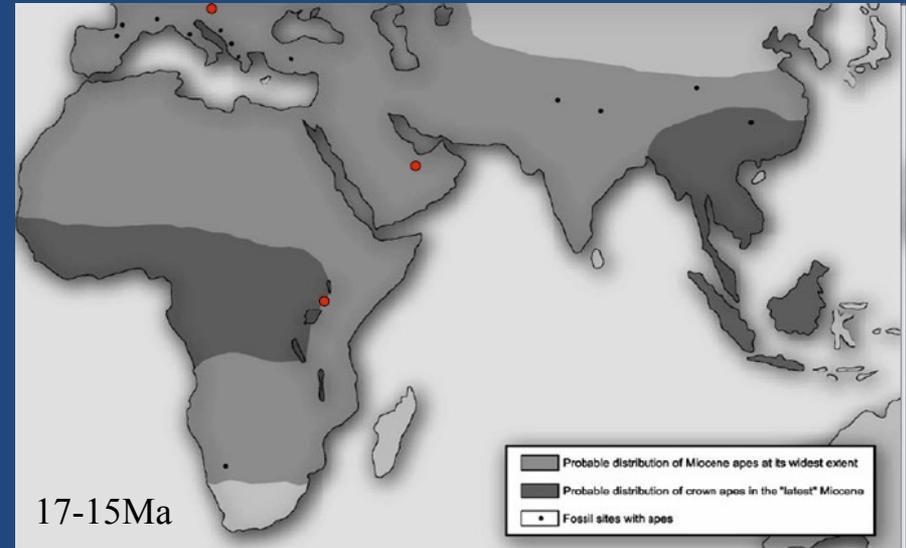
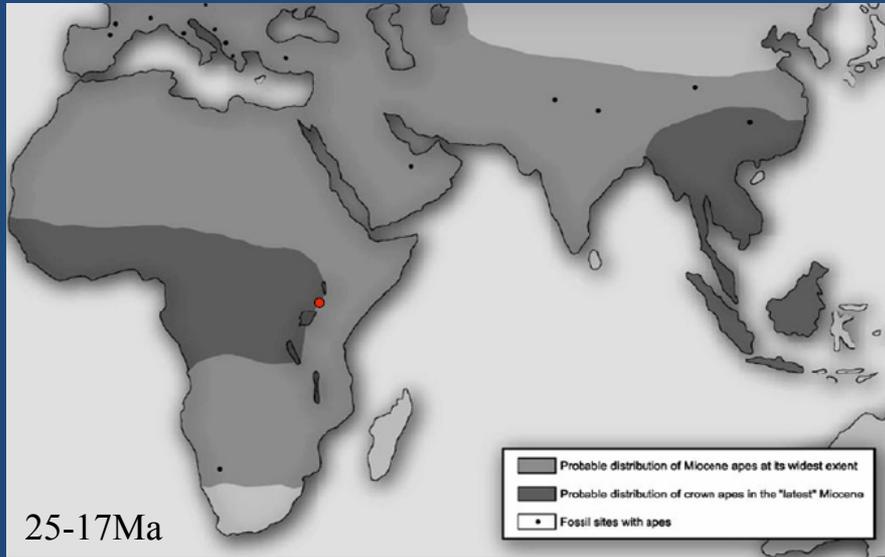
Zachos et al., 2001

- 🌍 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

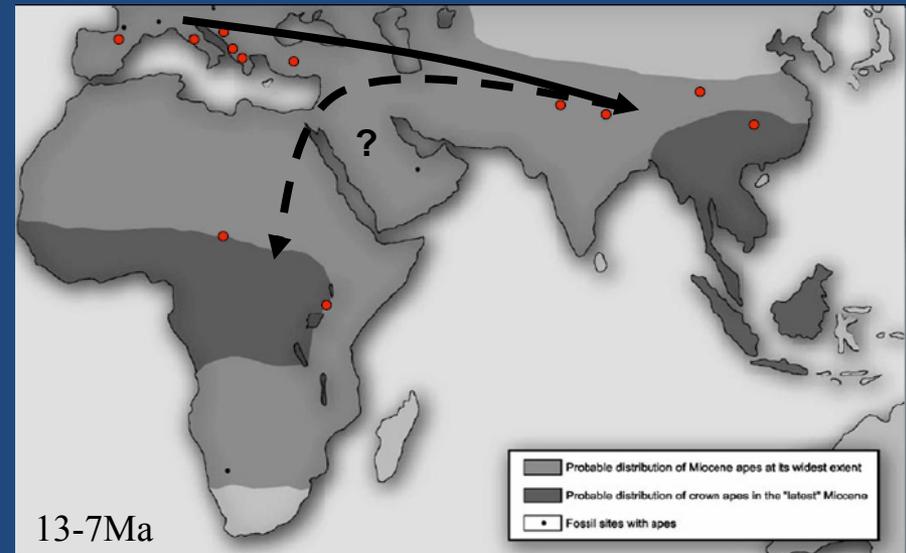
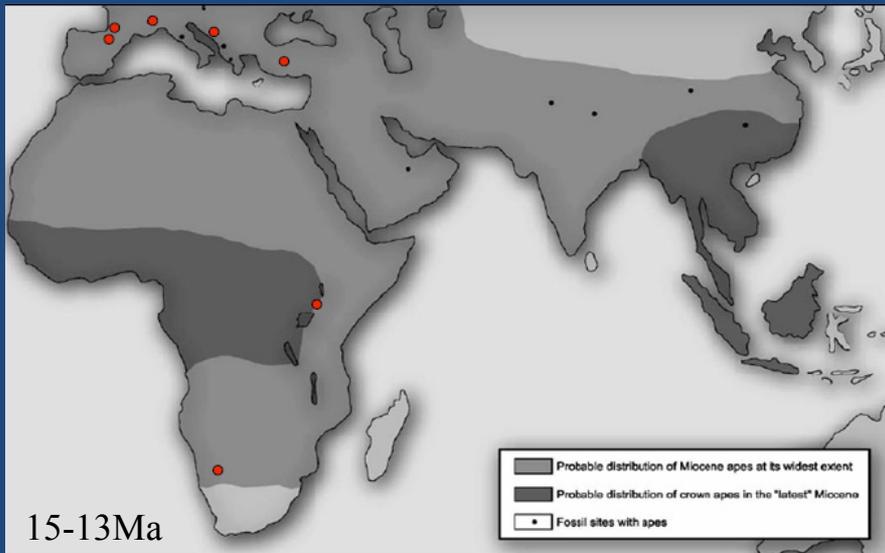
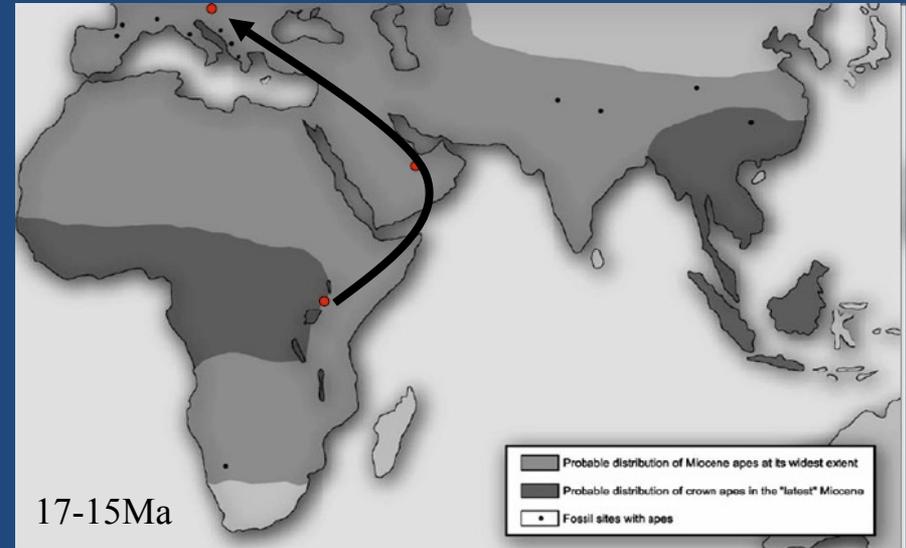
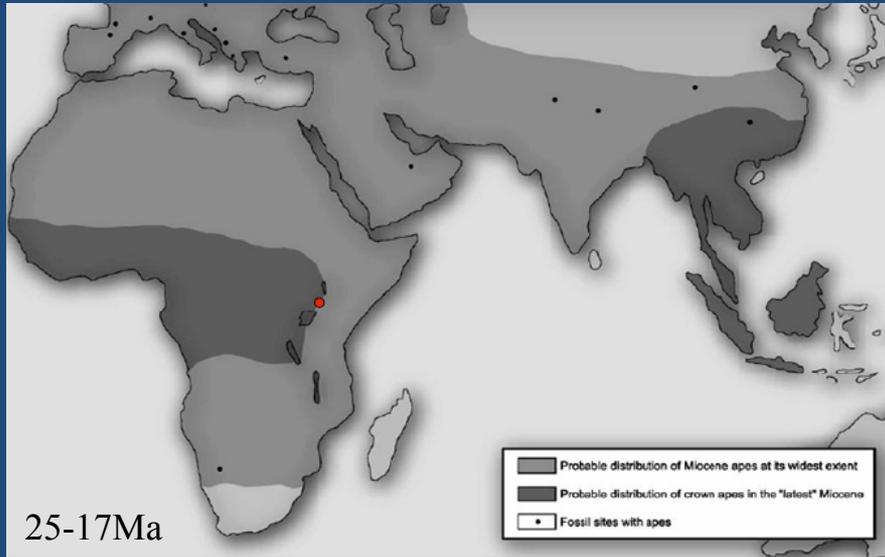
Pilbeam & Young, 2004



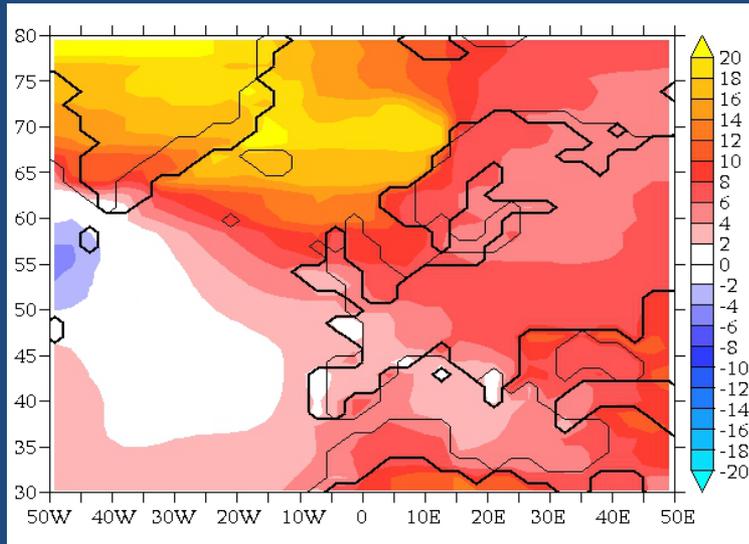
REGISTRE DES FOSSILES

Fossil Hominoids

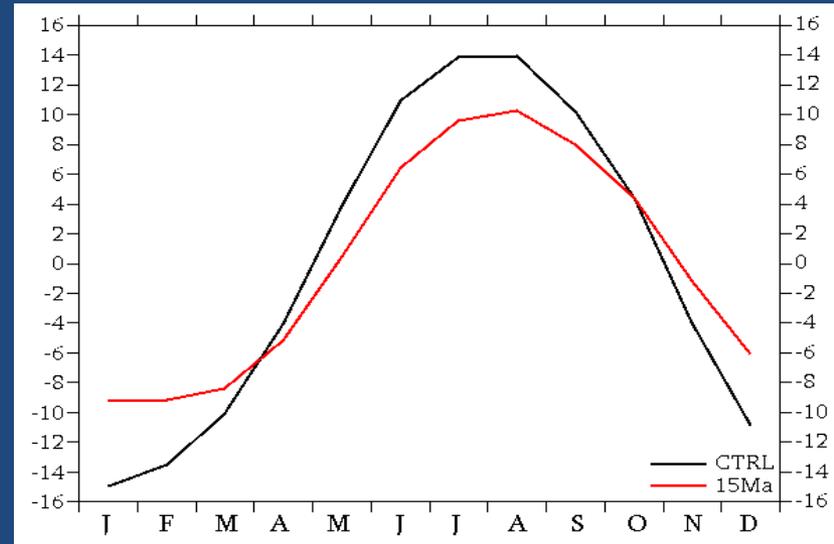
Pilbeam & Young, 2004



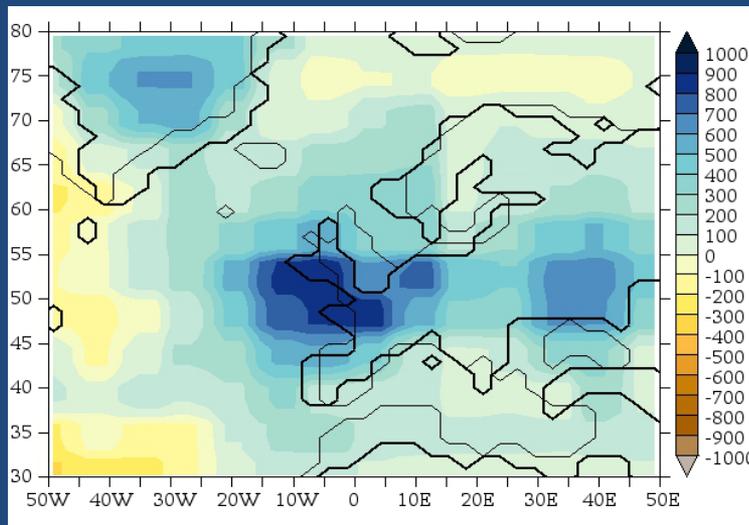
CHANGEMENT CLIMATIQUE



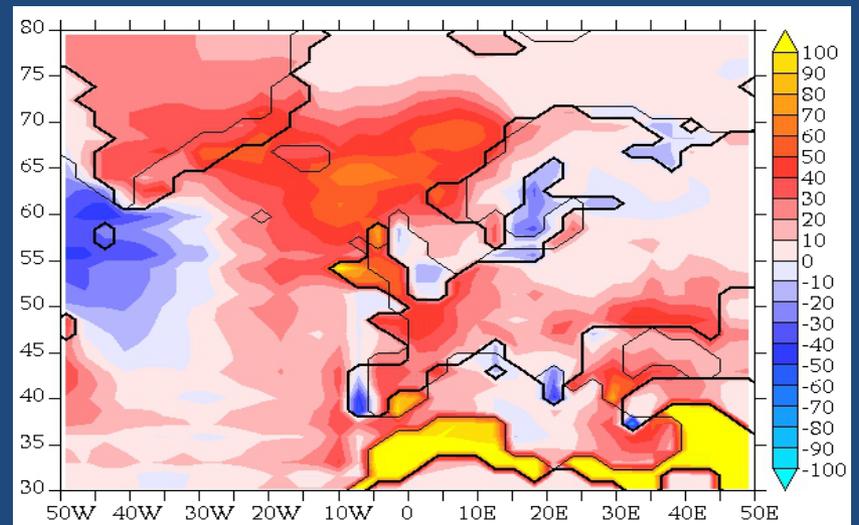
Mean Annual Temperature Anomaly (°C) : 15Ma-CTRL



Monthly Temperature - Mean Annual Temperature (°C)

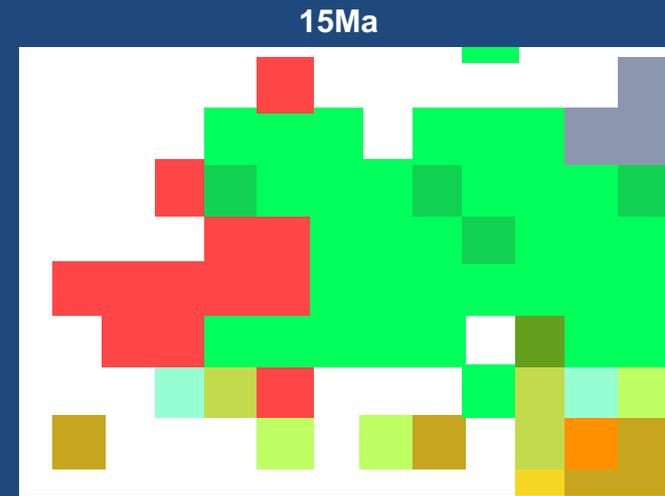
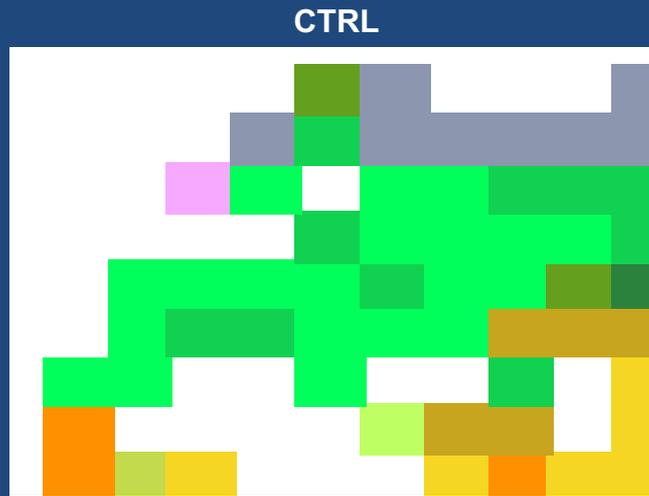


Mean Annual Precipitation Anomaly (mm) : 15Ma-CTRL



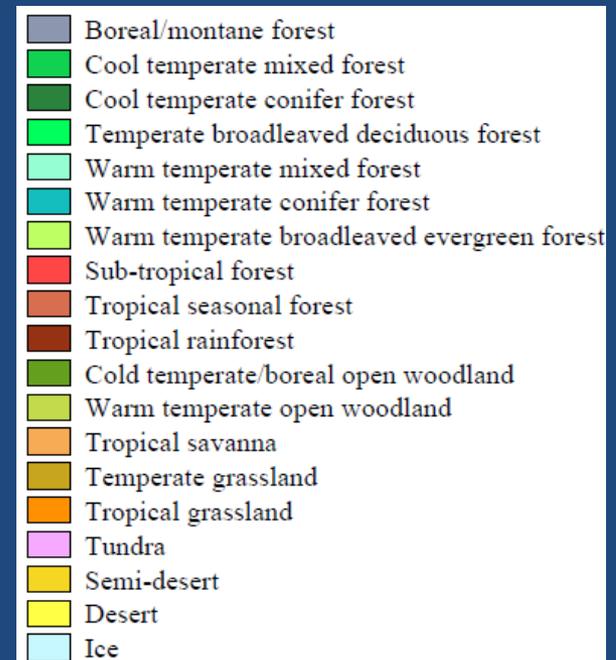
Mean Annual Evaporation Anomaly (mm/mth) : 15Ma-CTRL

CHANGEMENT DE LA VÉGÉTATION

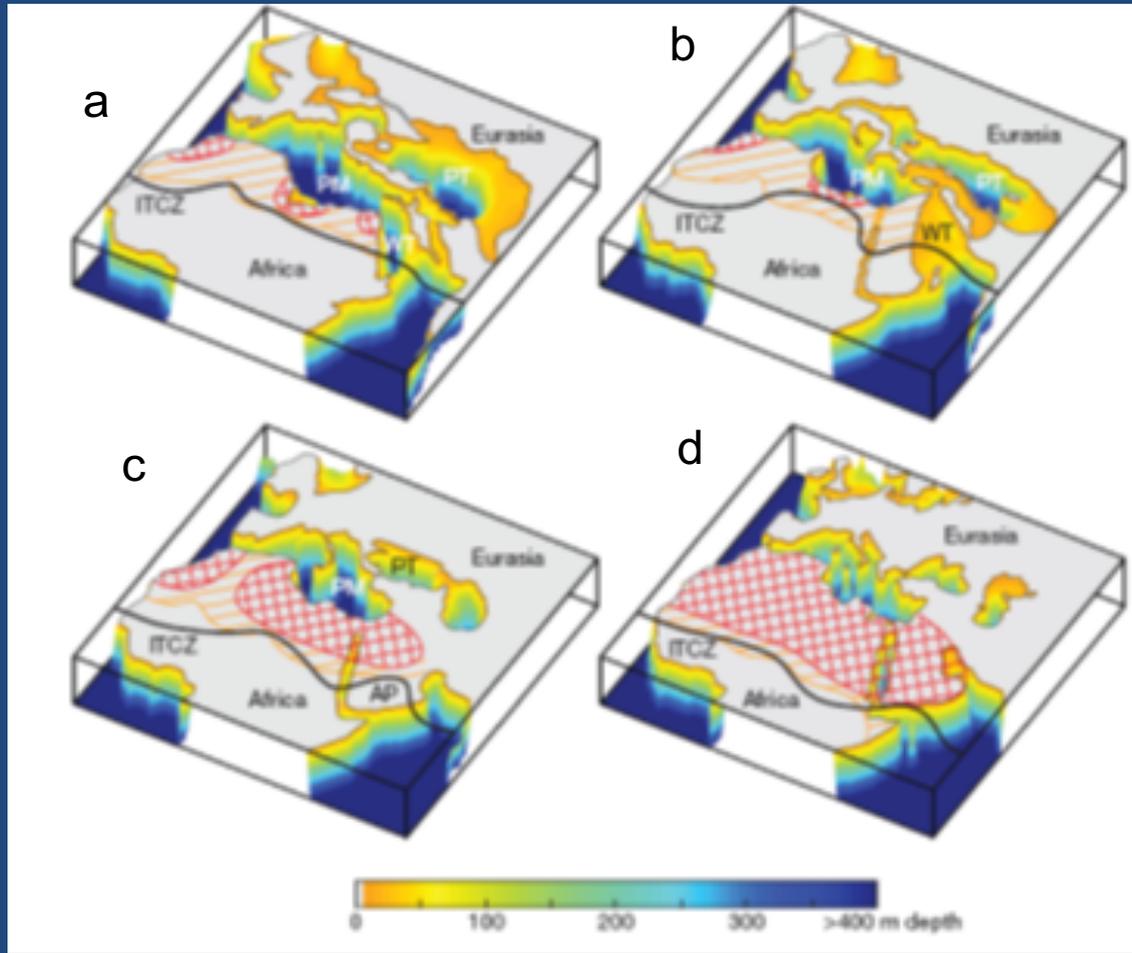


Développement de la forêt subtropicale en raison de conditions plus chaudes et plus humides, avec un contraste saisonnier réduit.

- 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]

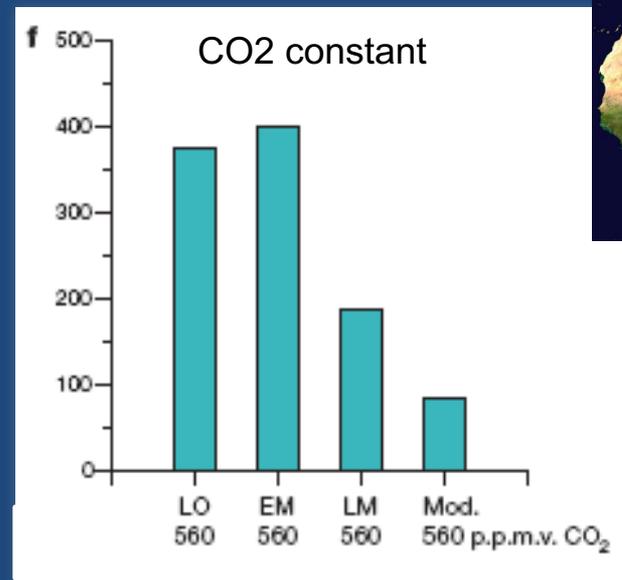
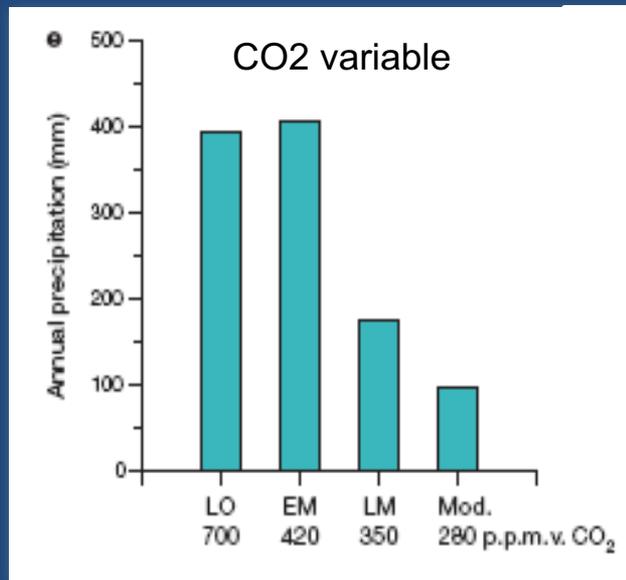
b. Début du Miocène
[20-17]

c. Fin du 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

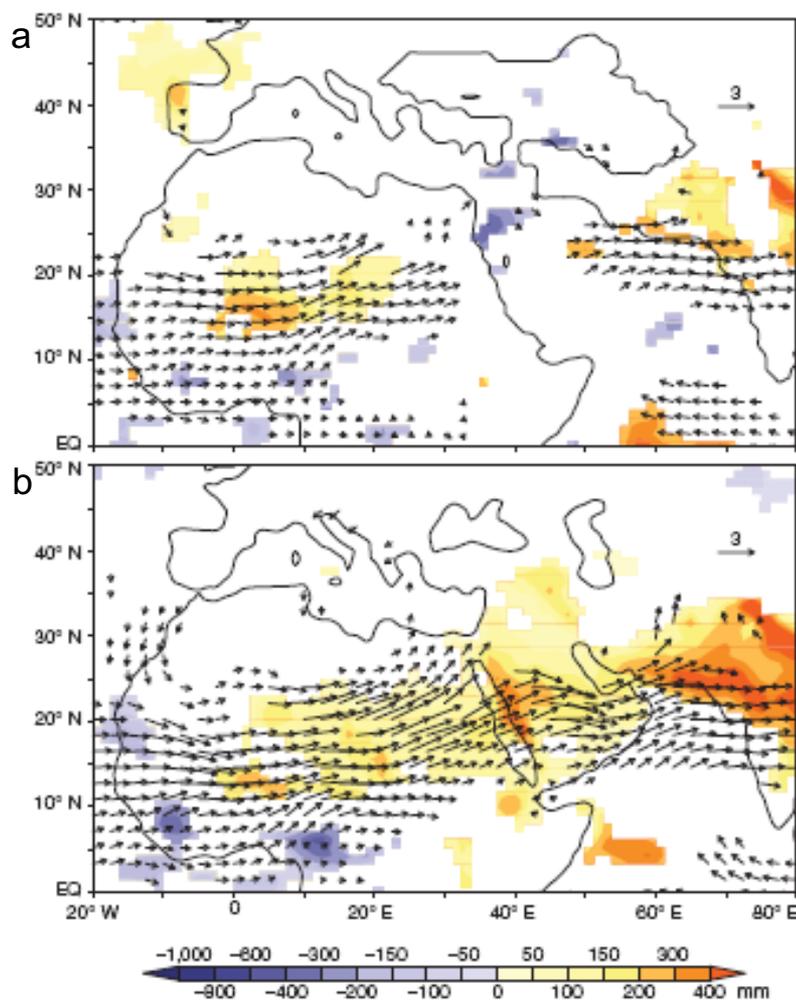
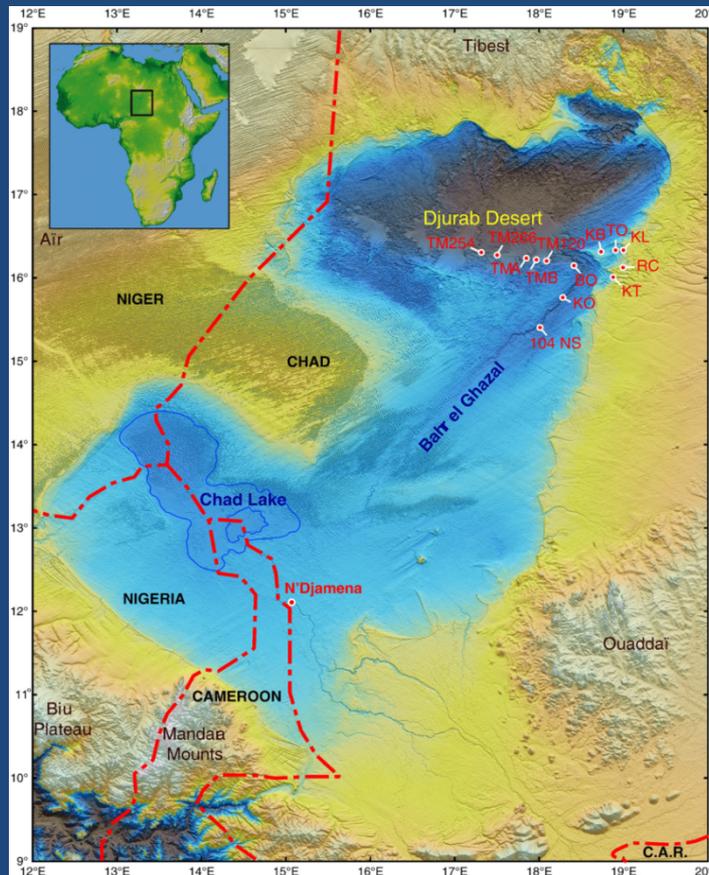


Figure 4 | Climate response to increased summer insolation in the Northern Hemisphere before and after Tethys shrinkage. Response in annual precipitation (mm, shading) and 850-hPa summer winds (ms^{-1} , arrows) to a change in orbital parameters from today to 6 kyr ago (higher minus lower Northern Hemisphere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



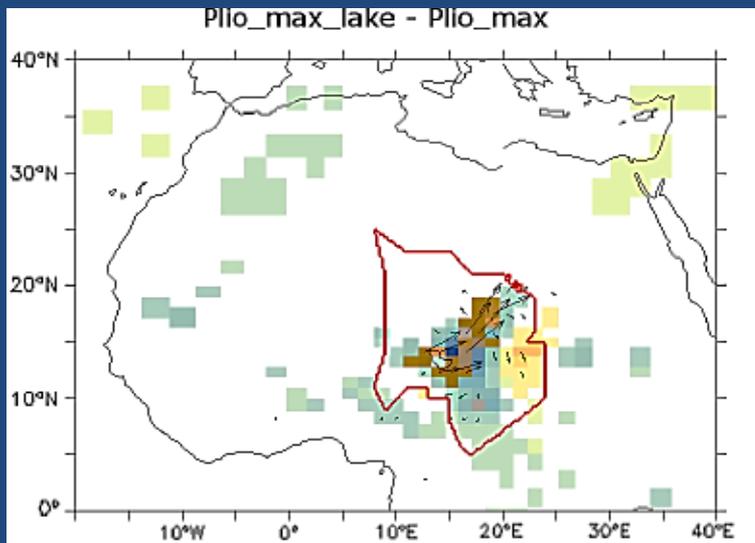
Le Pliocène et l'environnement de nos ancêtres

(Abel, Australopithecus bahrelghazali, 3.6 Ma)

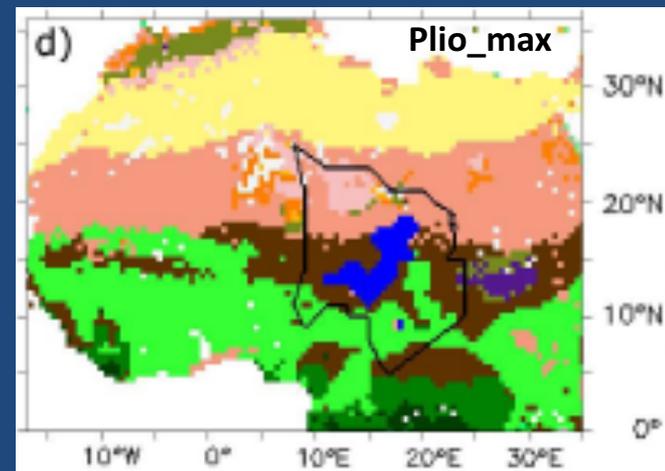
Contributions originales du LSCE :

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)



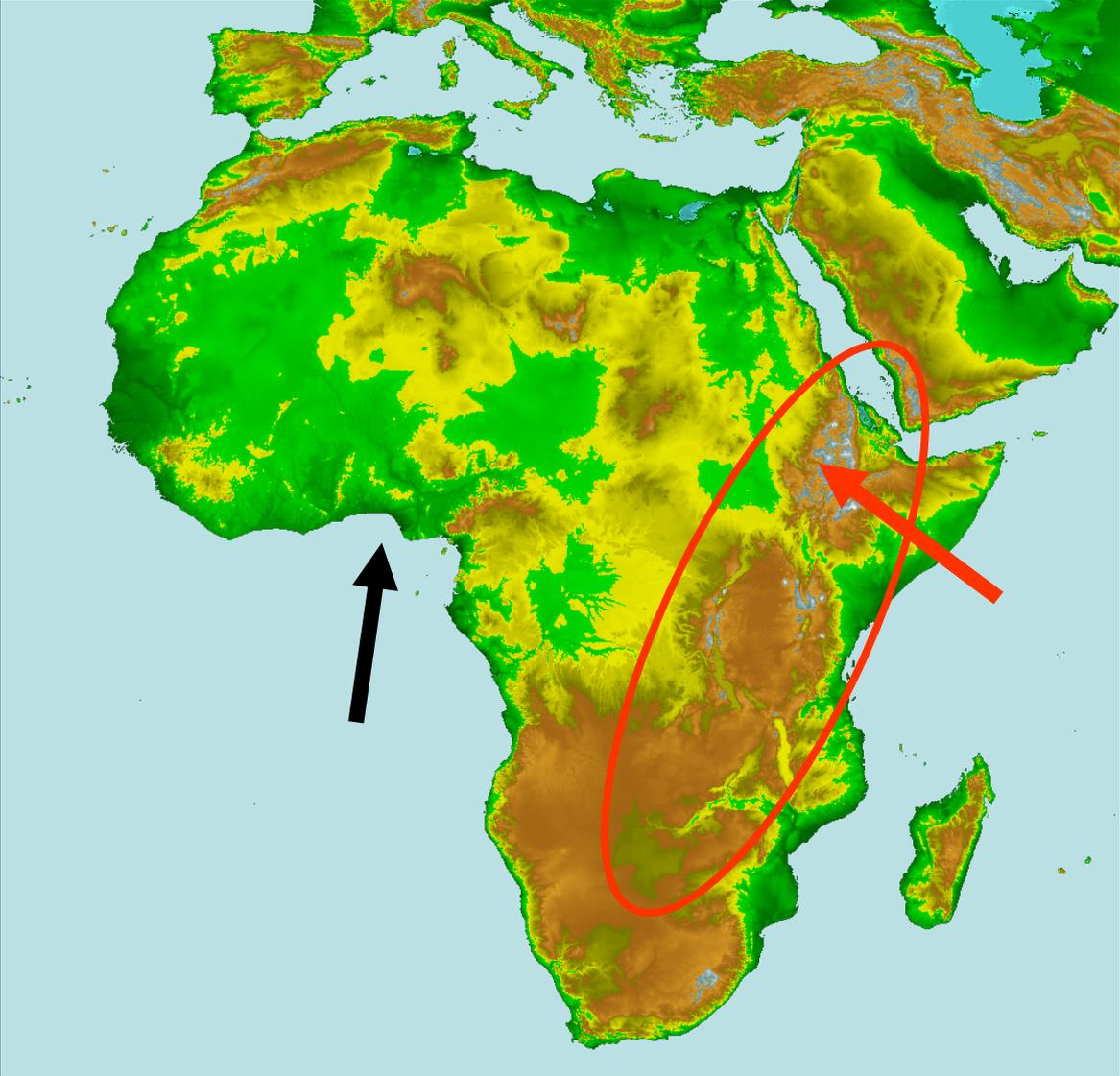
Si on tient compte de l'existence de ce lac avec un modèle zoomé sur cette région, on peut simuler climat et végétation.

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)

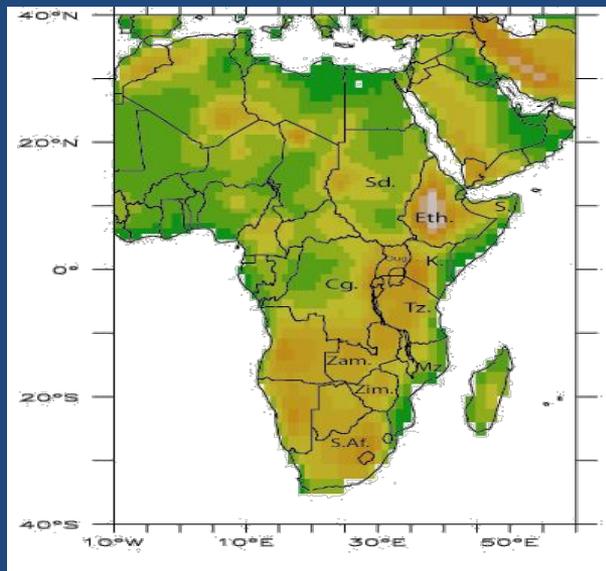


Quel est l'impact de la tectonique ?

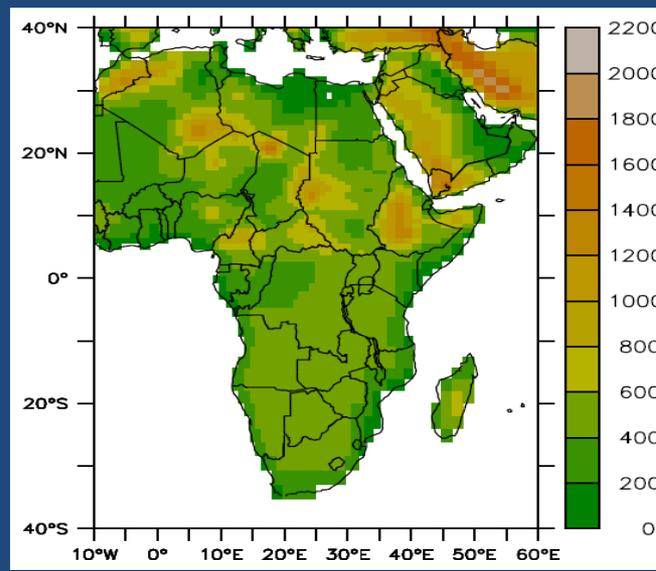


Différents scénarios topographiques

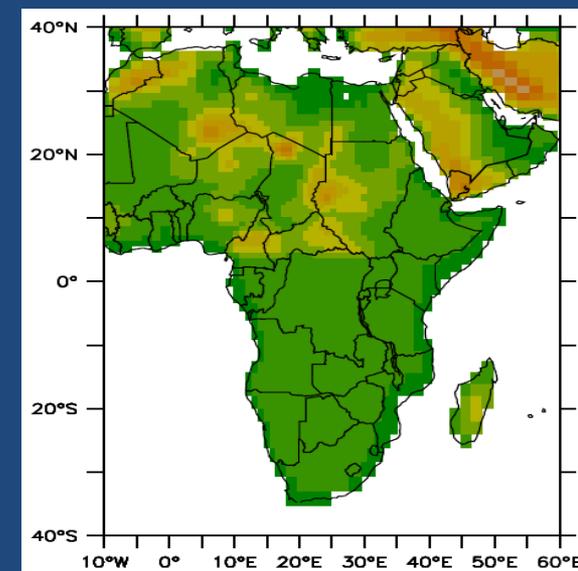
Present



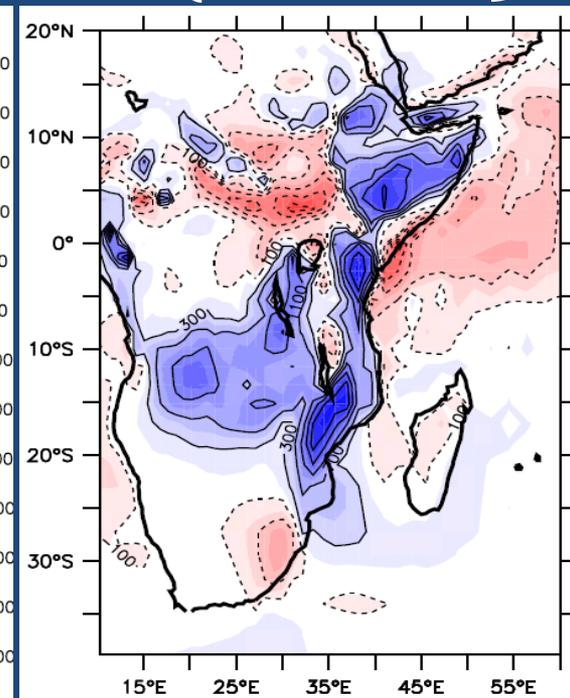
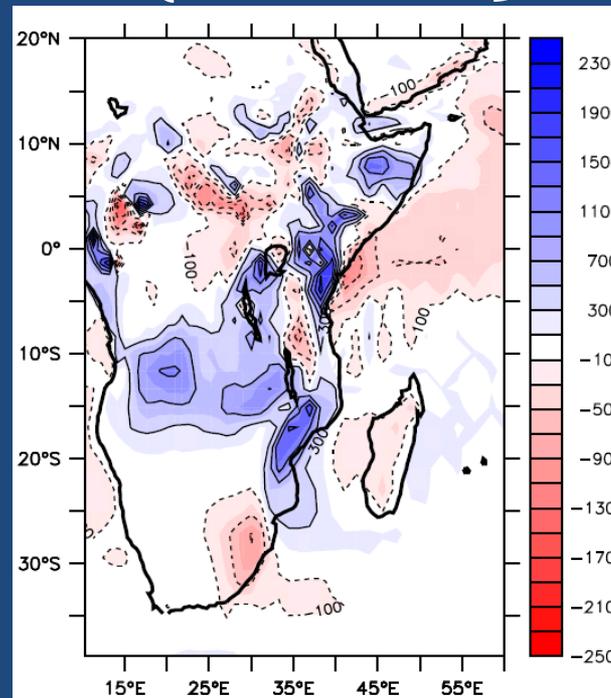
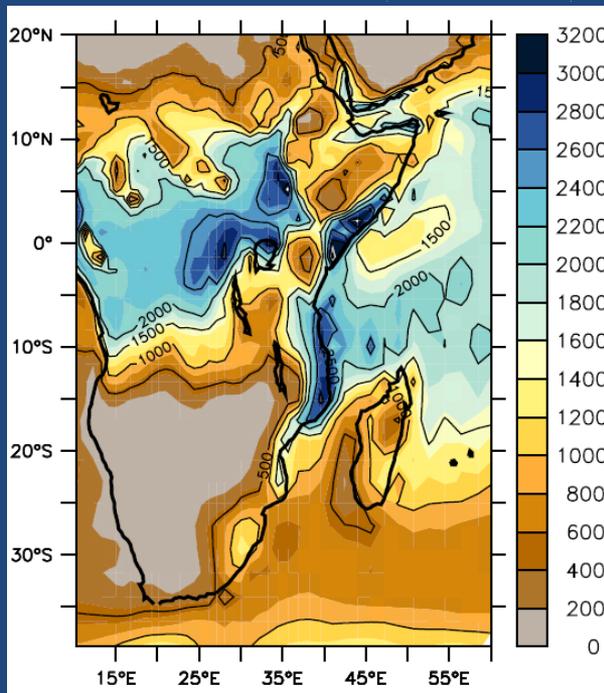
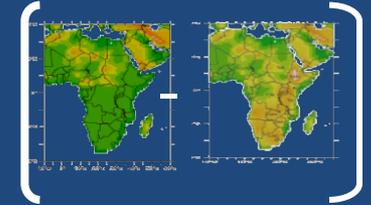
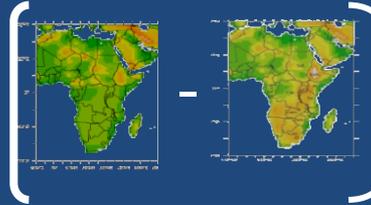
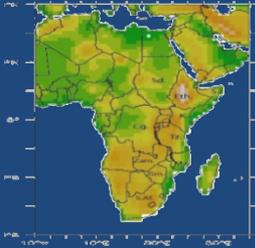
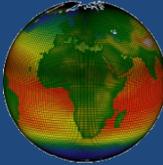
Traps



NoRel



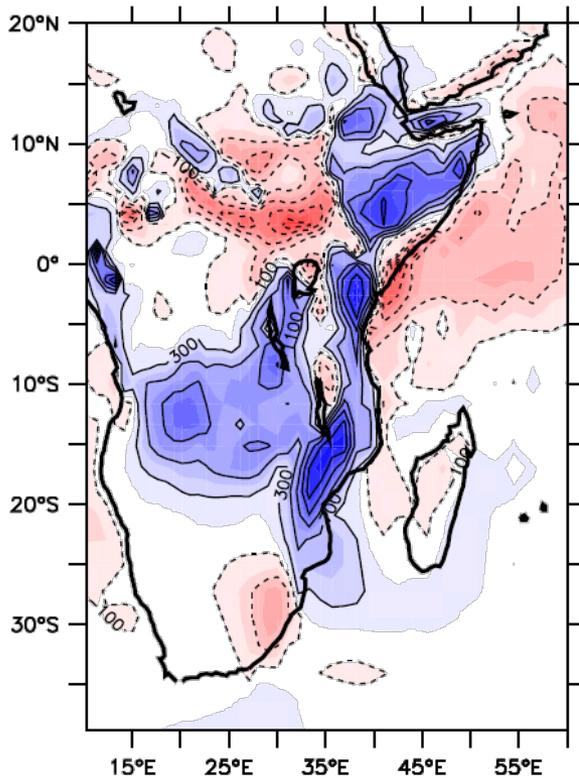
Rainfall patterns : mm / year



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

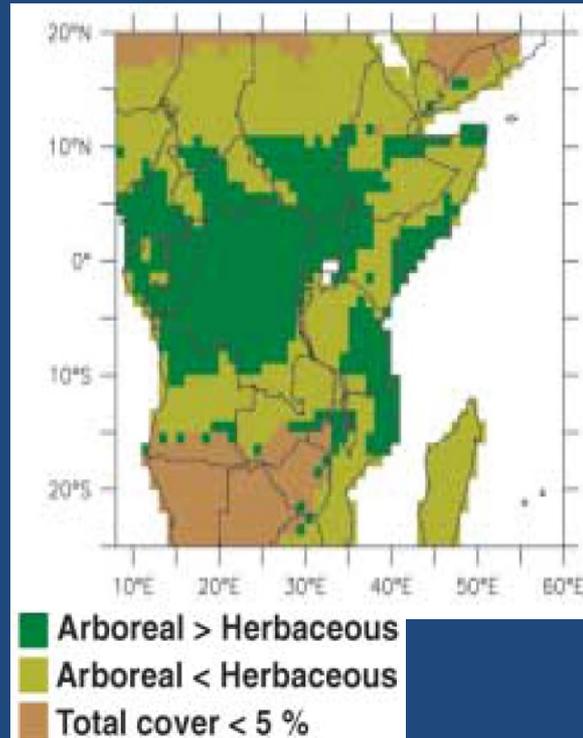
Uplift led to eastern Africa aridification...

NoRel - Present



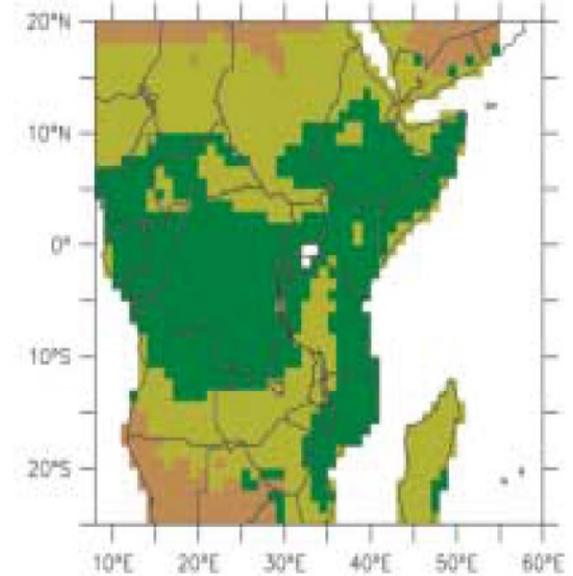
Rainfall anomaly
(mm/year)

Present



Simulated vegetation cover

NoRel



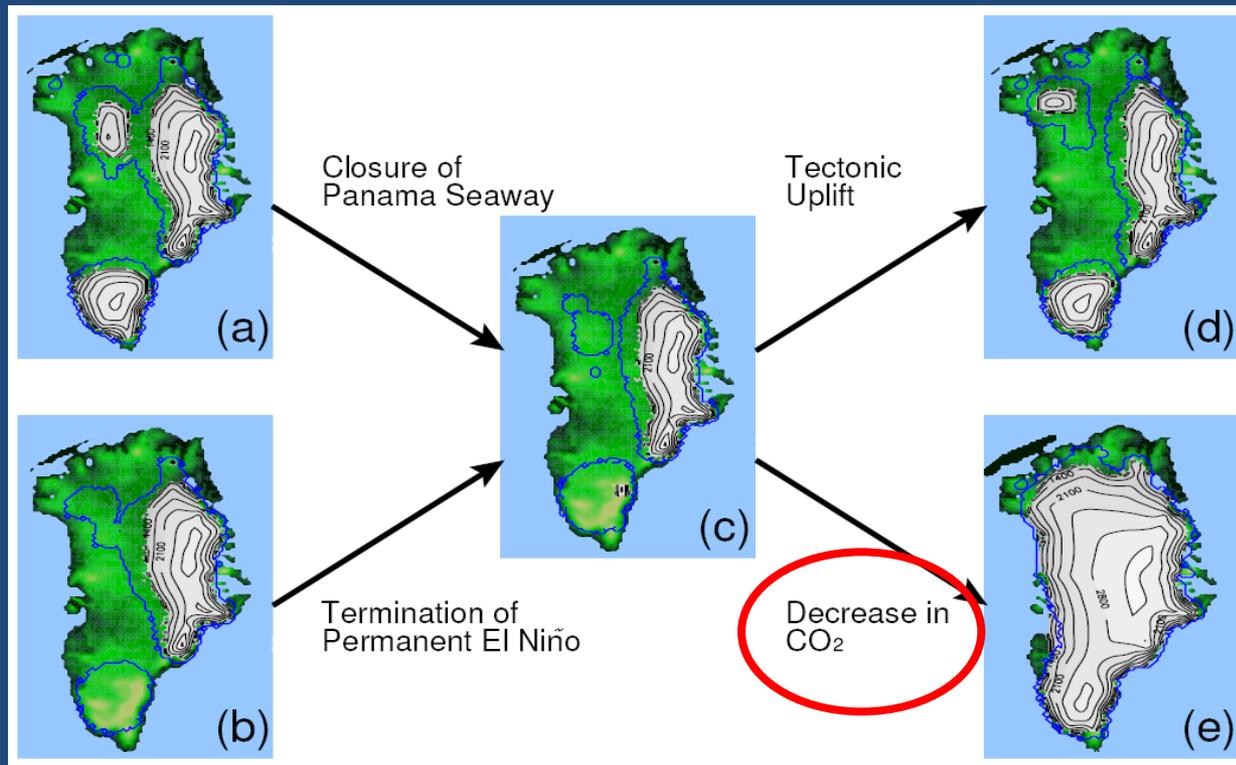
Sepulchre et al., *Science*, 2006

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 pCO₂ de 400 à 280ppm par rapport à tous les autres forçages

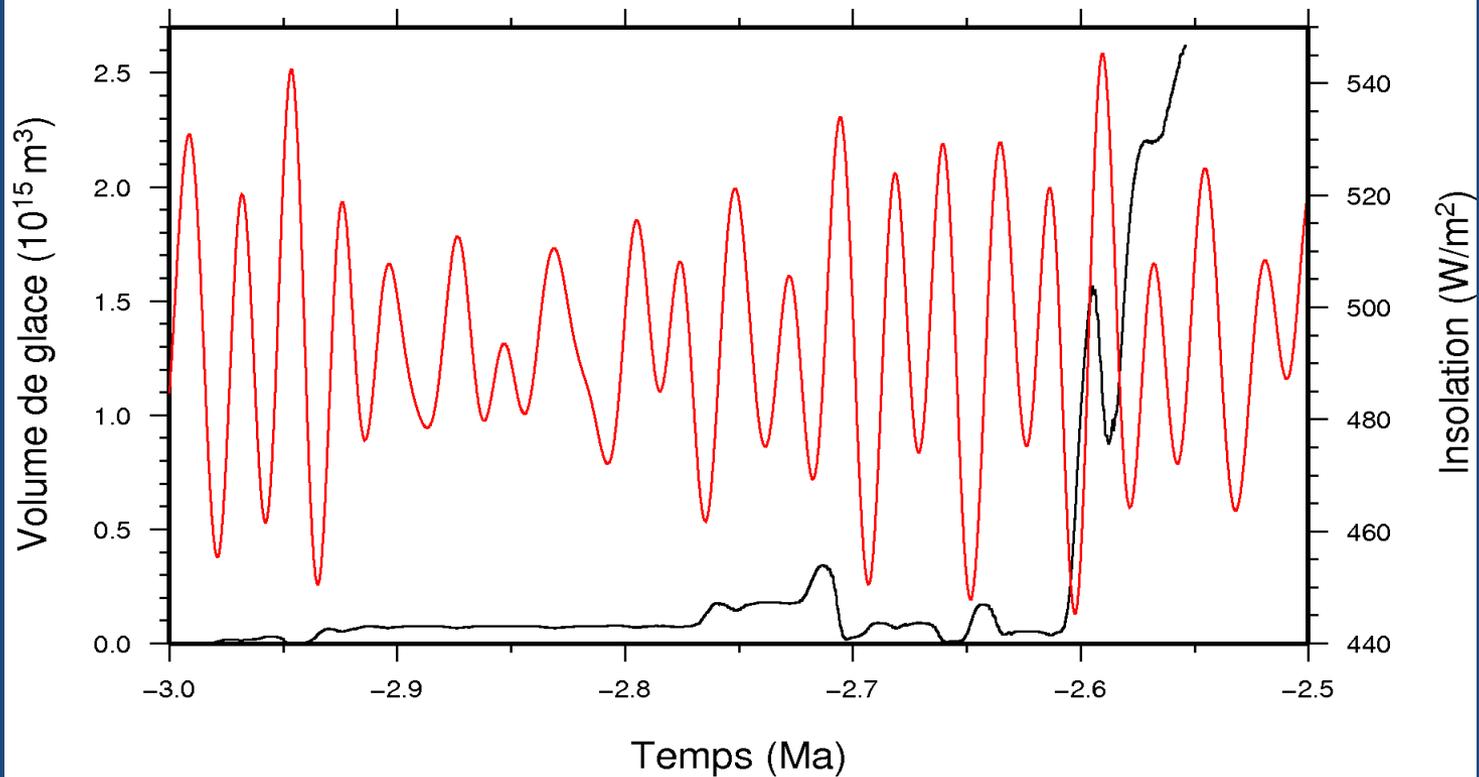


Qu'en est-il de l'influence de l'évolution de la contrainte radiative pendant le Pliocène tardif :

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

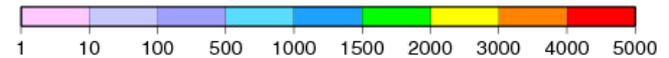
CO₂=280 ppm

Greenland
t = -3880 ky BP



CO₂=320 ppm

Greenland
t = -3880 ky BP

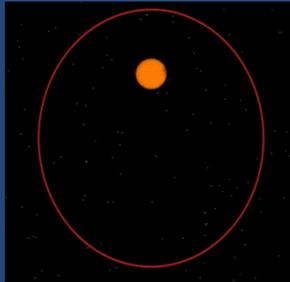


Sortie imminente dans *Nature Communication* d'une étude modélisant le basculement monde chaud / froid et l'établissement d'une calotte pérenne au Groenland.

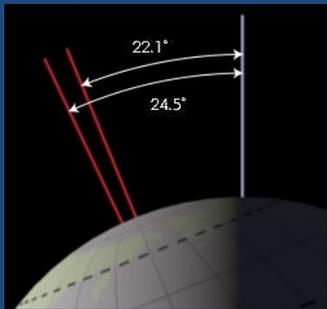
LE TEMPS DE LA DIZAINE DE MILLIERS D'ANNÉES

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

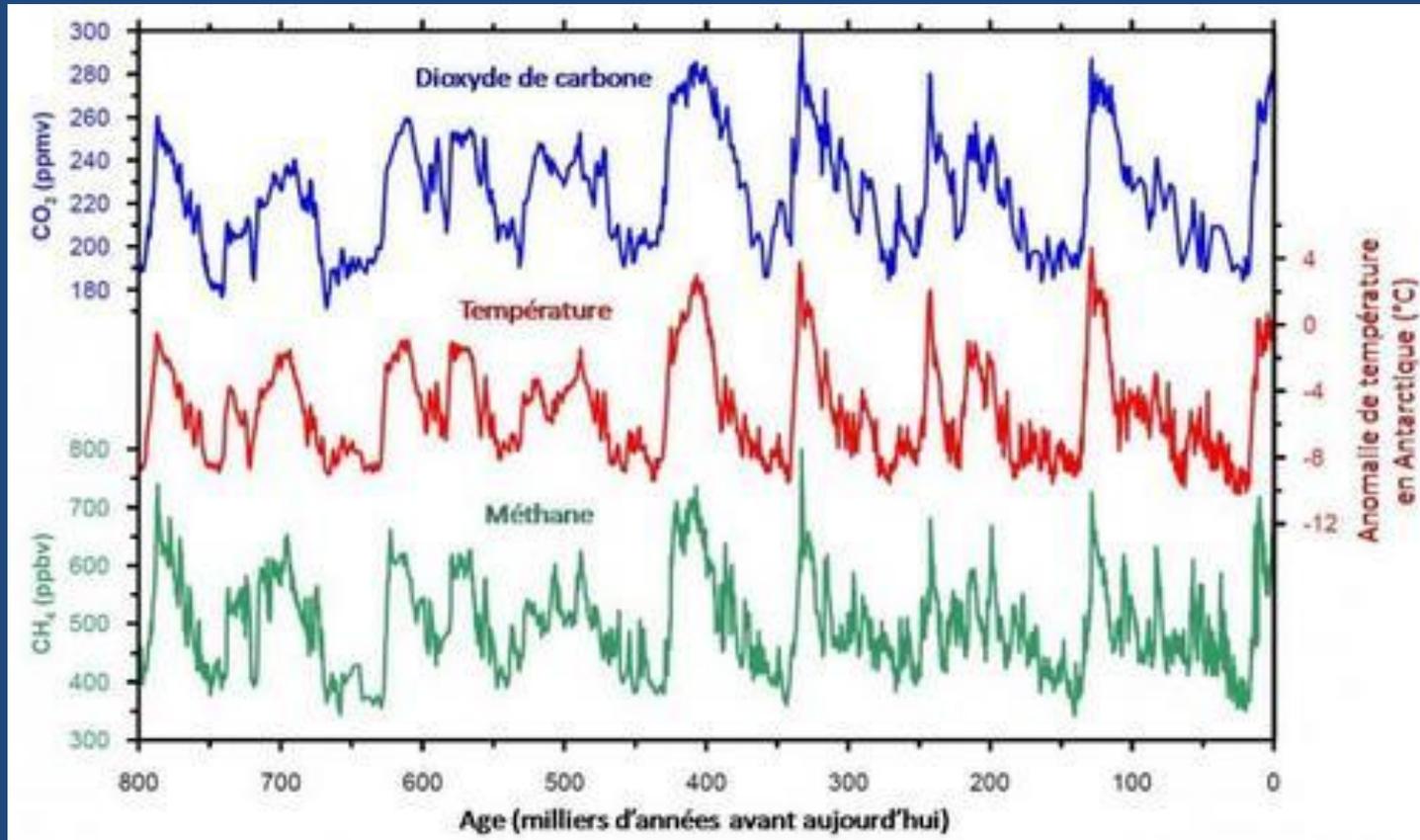


Les équinoxes et les solstices se déplacent sur la trajectoire elliptique avec une période d'environ 20 000 ans

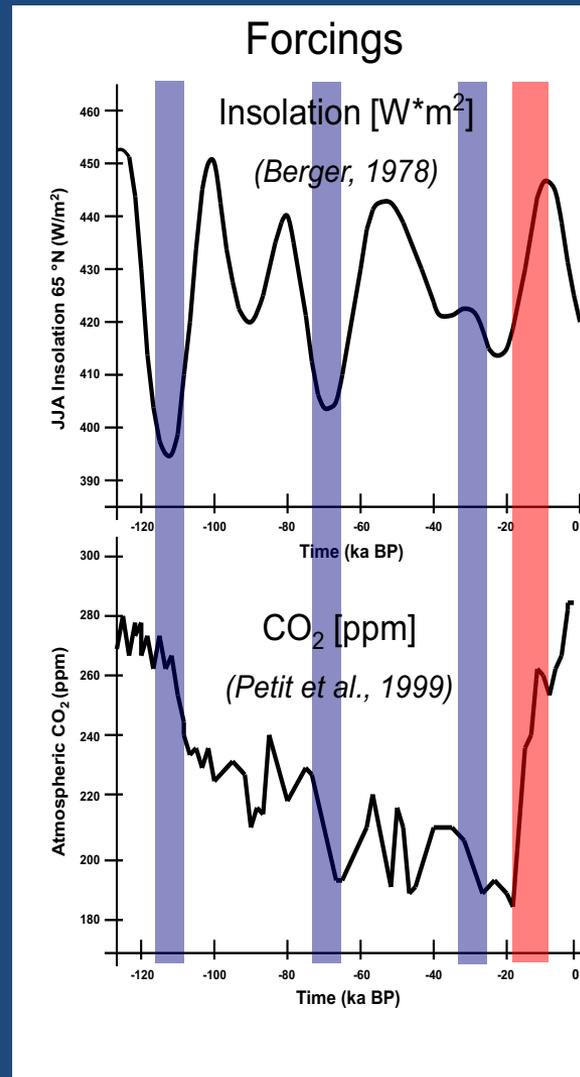


L'obliquité varie entre 22.1° et 24.5° avec une fréquence de 41 000 ans

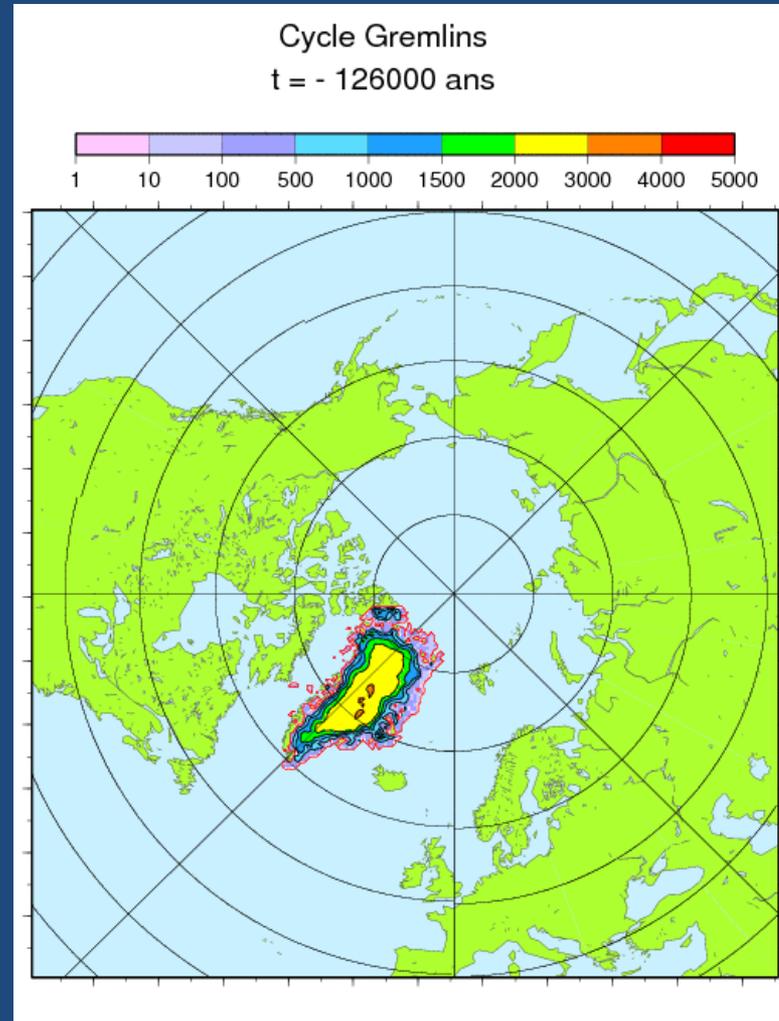
Reconstructions des températures et de la teneur en gaz à effet de serre issues des forages en **Antarctique**



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



NOUVEAU CYCLE: MIS5 À PRÉSENT

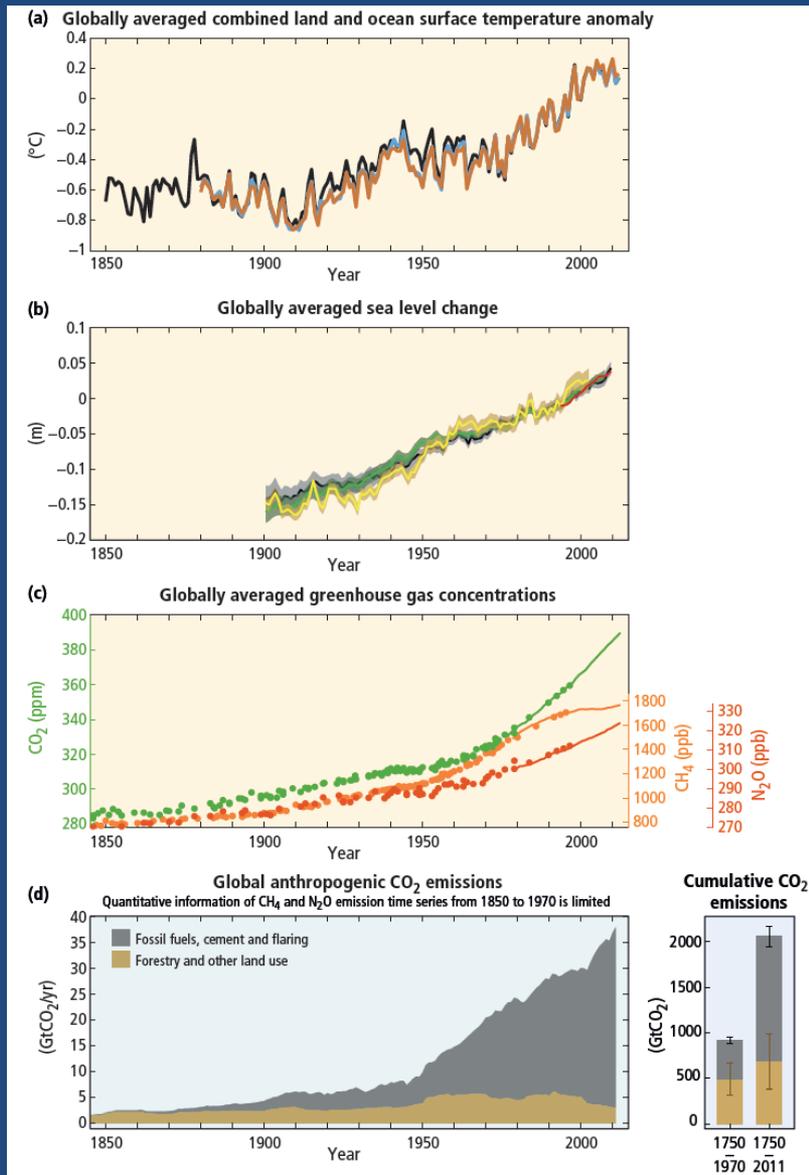


Bonnelli et al, Clim past 2009

LE TEMPS DE LA CENTAINE D'ANNÉES

Le temps de l'Homme

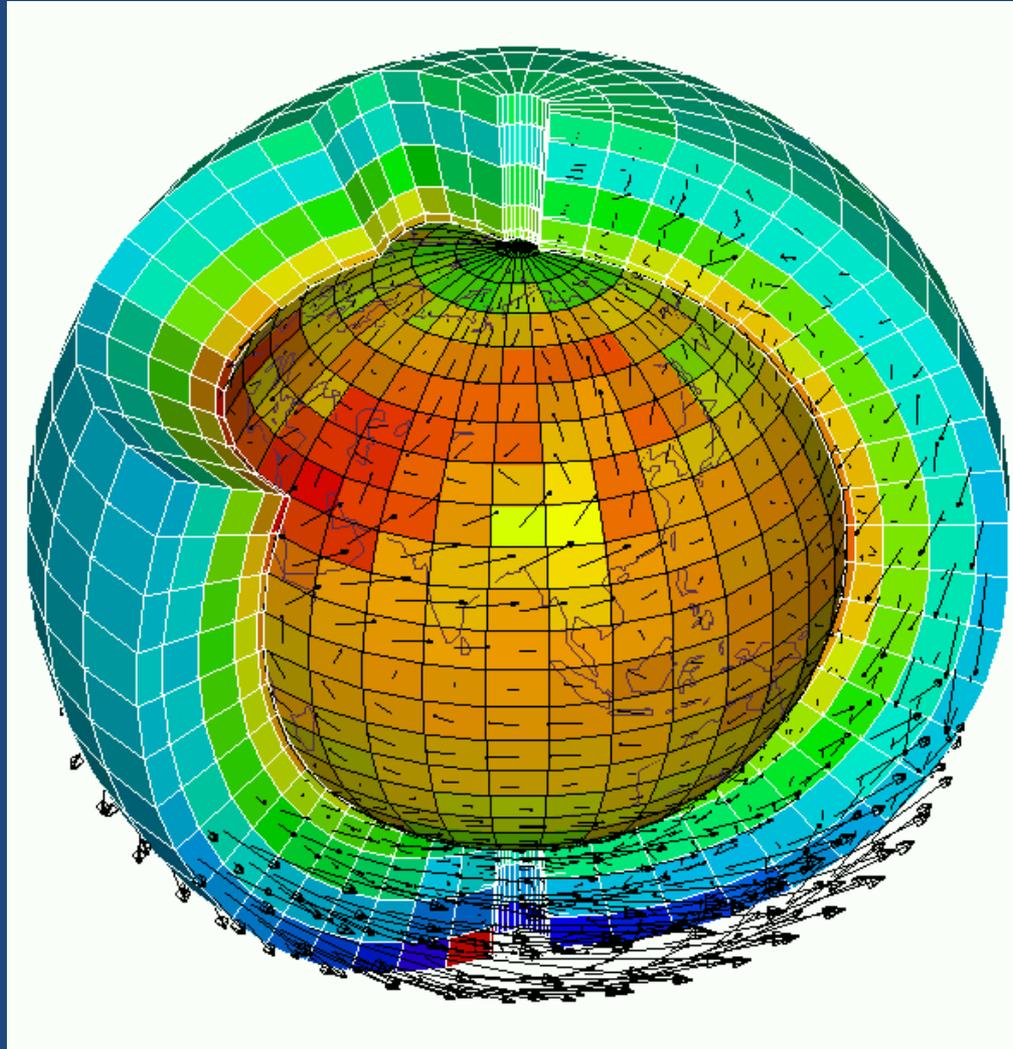
Cette valse climatique à trois temps s'achève dans un monde froid avec deux calottes de glace pérennes. Le quatrième temps de la valse va donc s'exercer dans ce contexte froid qui sera responsable de nombreuses ruptures...



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

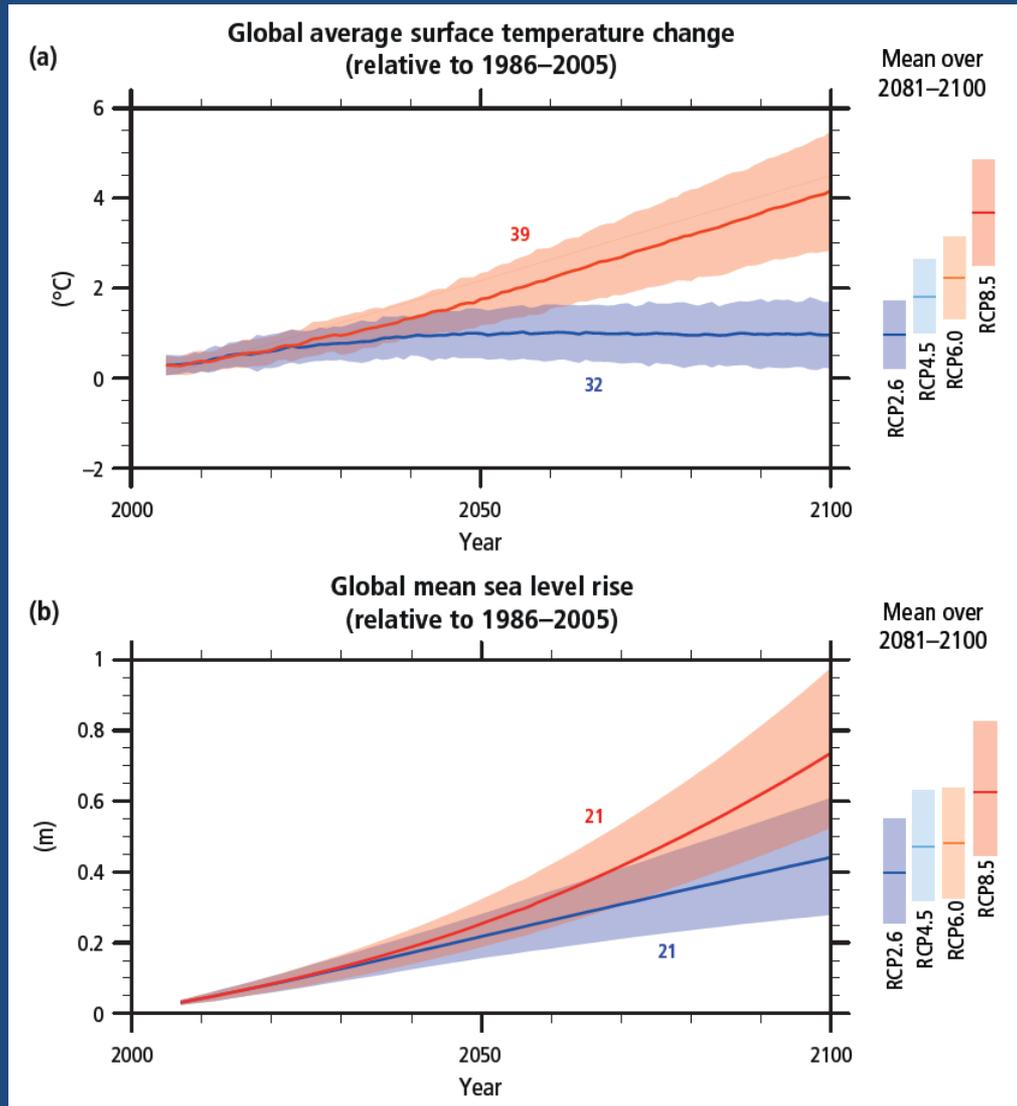


Figure 6 du résumé à l'intention des décideurs 5ème rapport du GIEC

SCÉNARIOS DE VARIATION DE TEMPÉRATURE ET DES PRÉCIPITATIONS

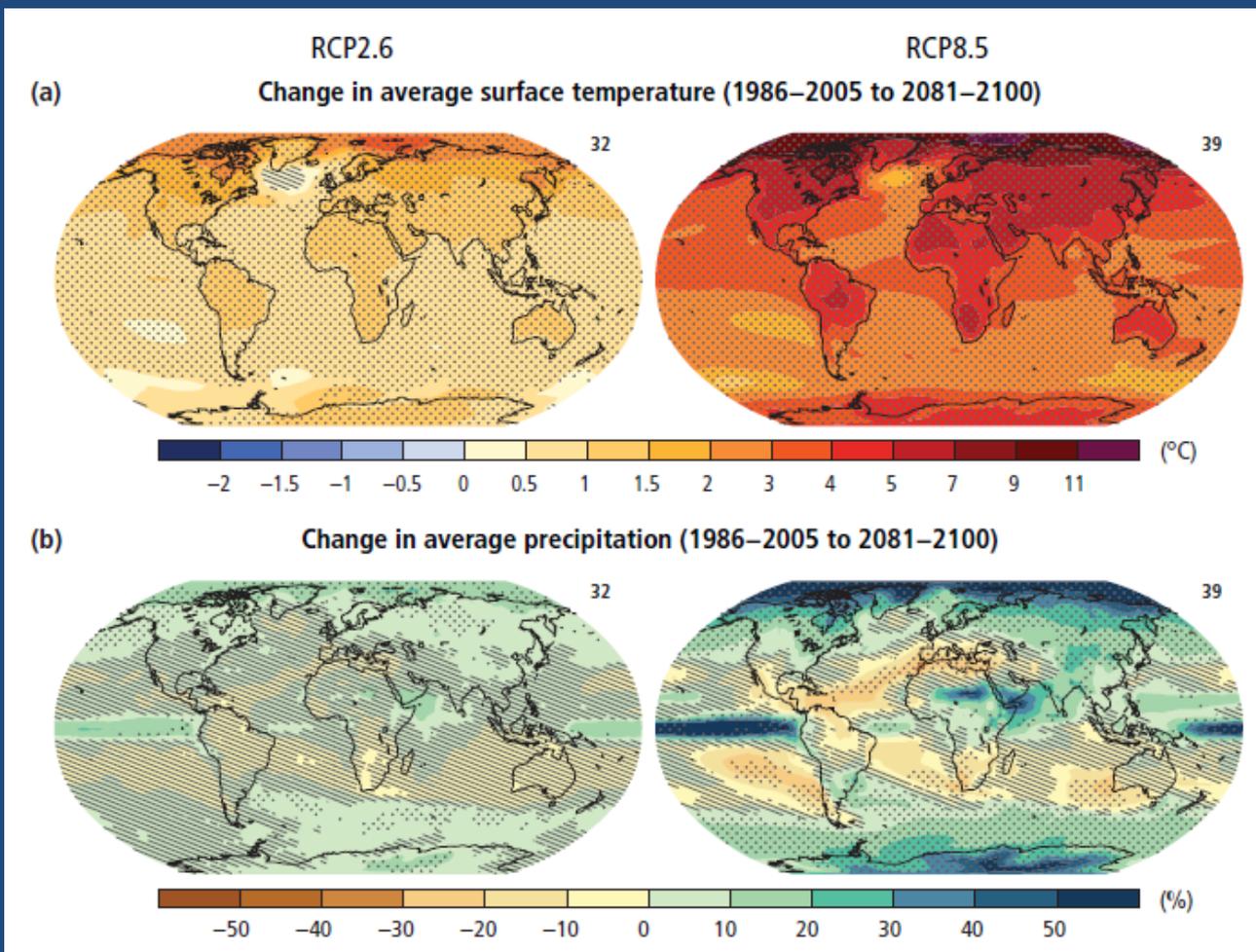


Figure 7 du résumé à l'intention des décideurs 5ème rapport du GIEC

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.

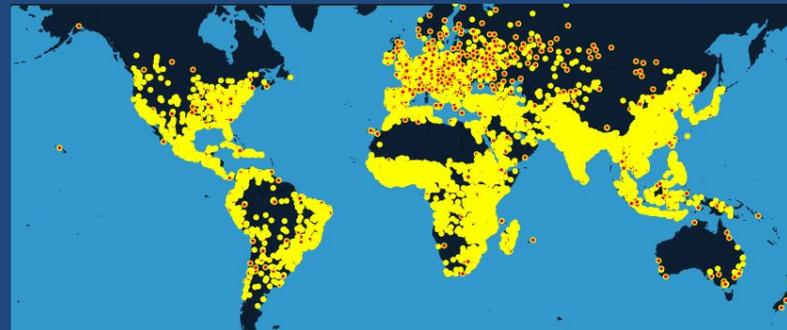
La population est environ de 7,3 milliards en 2015 et atteindra environ 9,3 milliards en 2050.

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

Population mondiale en 2000



Population mondiale en 2050



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 CO₂

- 🌍 Aujourd'hui, pour deux molécules de CO₂ 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 CO₂ et température de l'océan

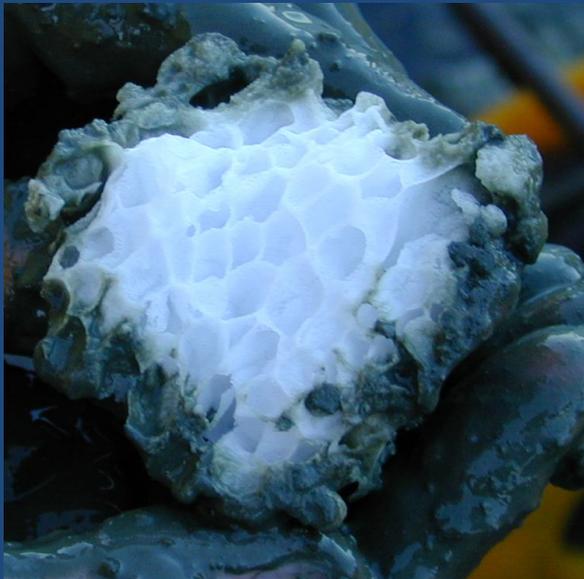
PERMAFROST ...

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



CLATHRATES ...

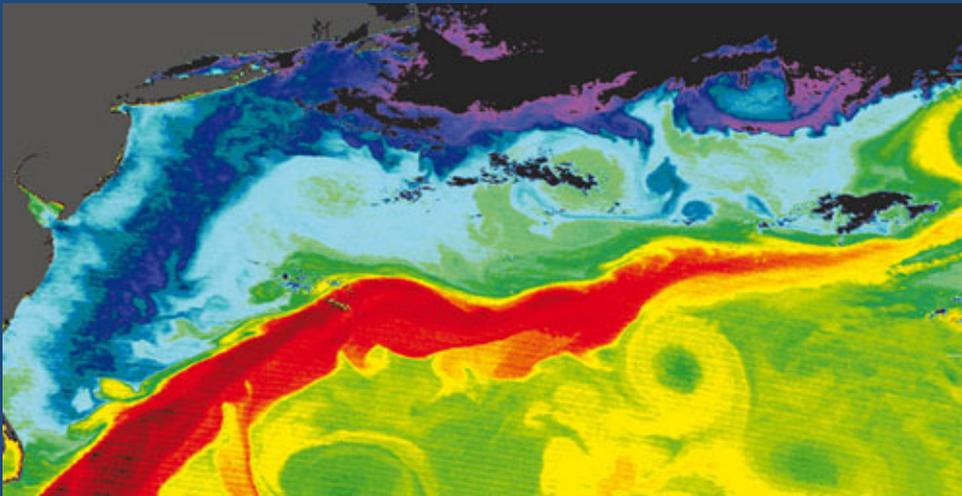
De très gros réservoirs de méthane situés aux marges continentales, vers 600-800 m de profondeur, peuvent se déstabiliser sous l'effet de réchauffement de température ou de baisse de pression et libérer d'importantes quantités de méthane



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

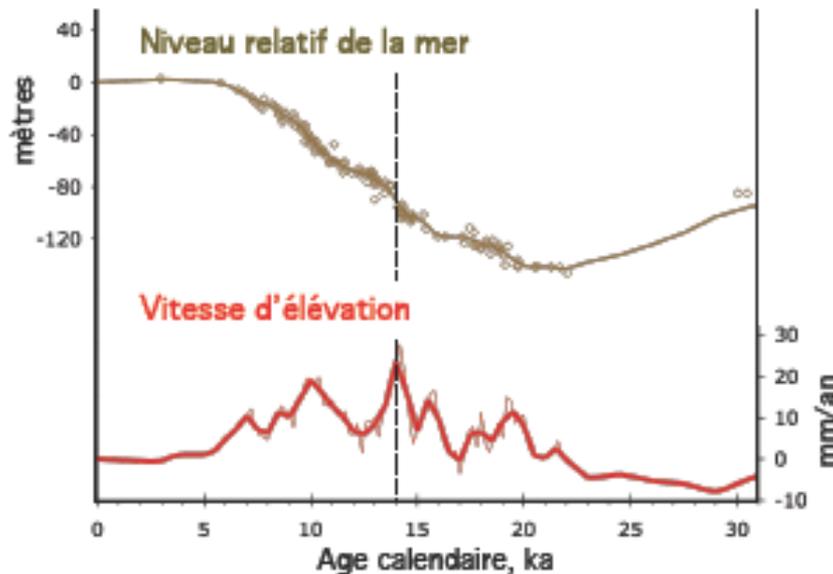
Reconstruction du niveau marin depuis 30 000 ans

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

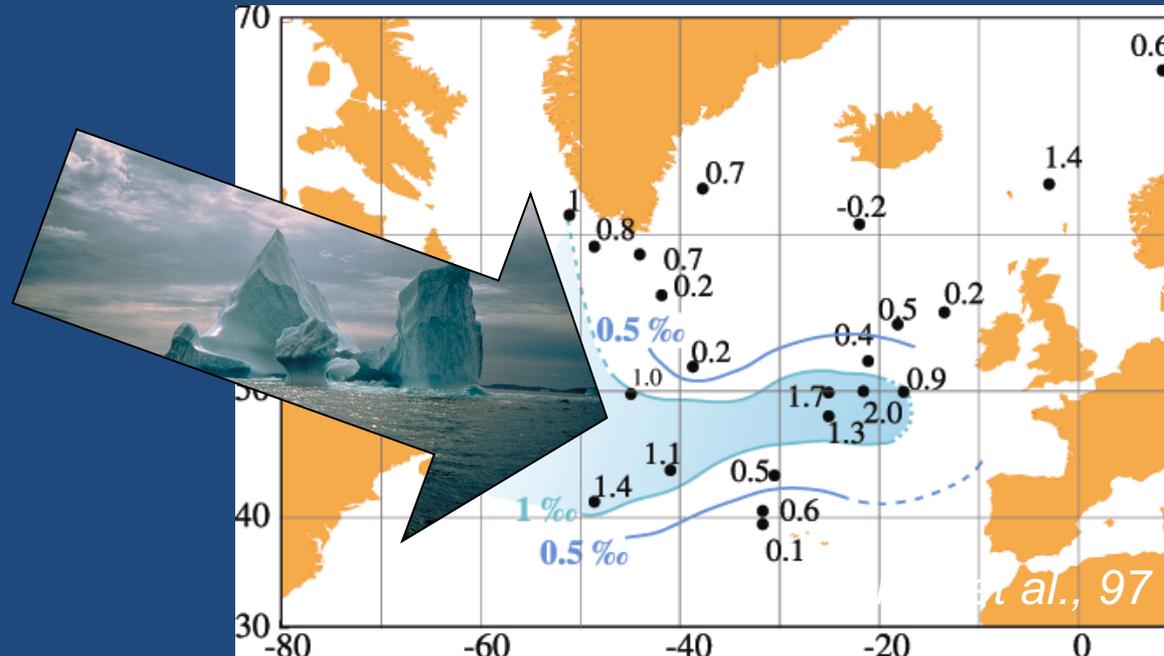


Dernière déglaciation

- 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 :

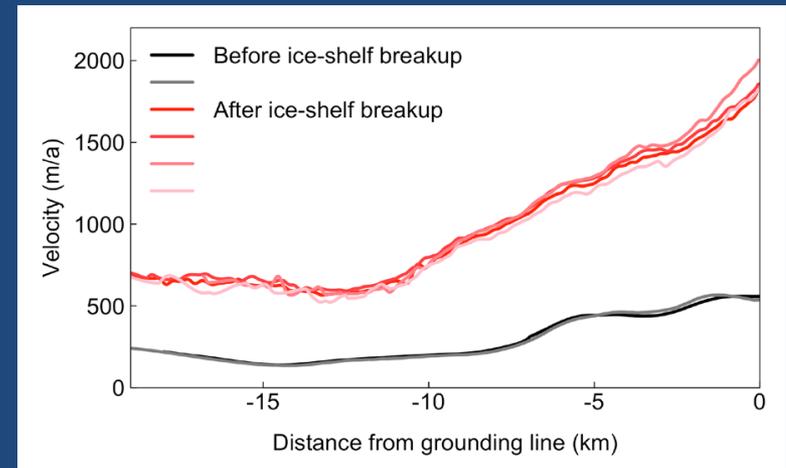
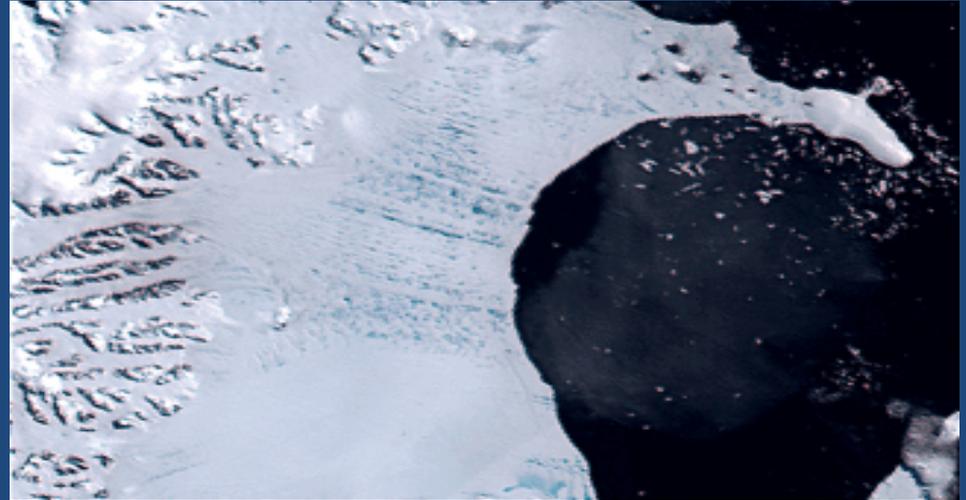
Durée de l'événement ?

Volume d'icebergs émis ?

Cassure d'une plate-forme de glace

-Durant l'été 2002, on observe une fonte complète de la plate-forme de glace Larsen B. Tandis qu'en juillet 2017 la Larsen C perdait 10% de sa surface.

- Aucune conséquence sur l'élévation du niveau de la mer
- Conséquences majeures sur la dynamique de la calotte glaciaire
- Grande accélération des cours d'eau et des icebergs qui, au contraire, augmentent le niveau de la mer.



Alvarez-Solas et al, 2011. The Cryosphere Discuss

Modèle utilisé/Description des expériences

Modèle utilisé : IPSL AOGCM version 5A. Les simulations sont effectuées pendant le 21^e siècle.

Cette perturbation est appliquée sur la période 2020-2070

Superposé au scénario le plus réaliste du GIEC: RCP8.5 qui est aussi le plus pessimiste, nous ajoutons une quantité d'eau douce allant de 0.5 m à 3 m associé à 3 scénarios différents :

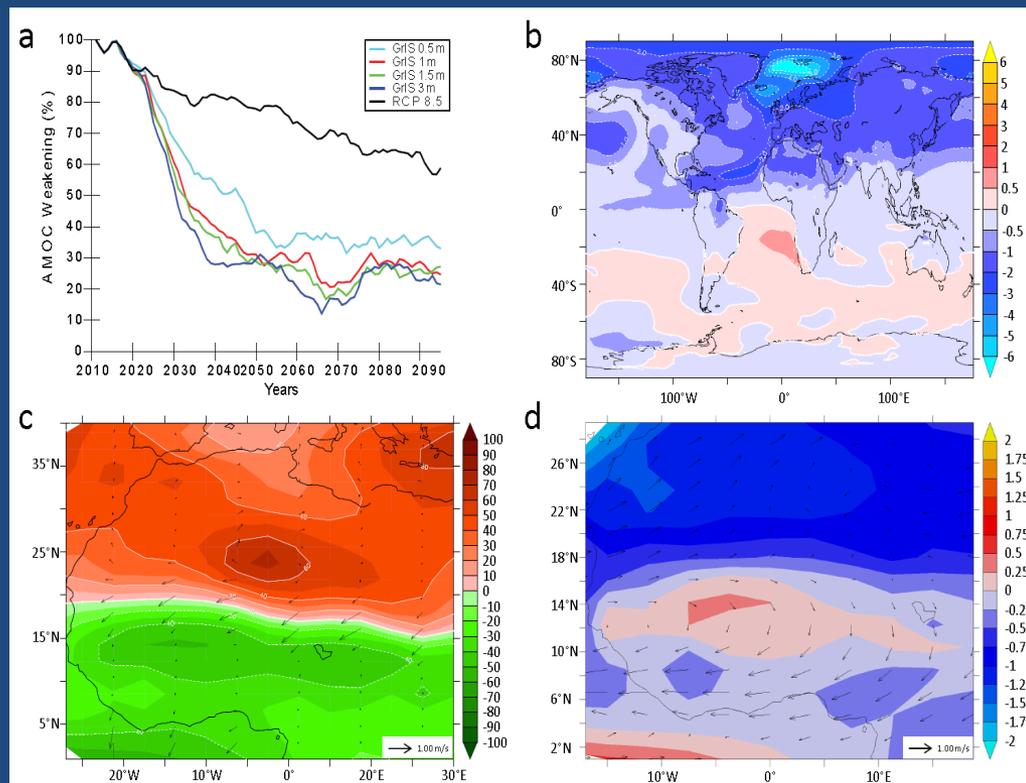
1. Une fonte partielle du Groenland
2. Une fonte partielle de l'Antarctique de l'Ouest
3. Un mélange à parts égales (1,5m) de ces deux calottes

→ Nous nous focalisons ici sur le scénario 1: le scénario du Groenland

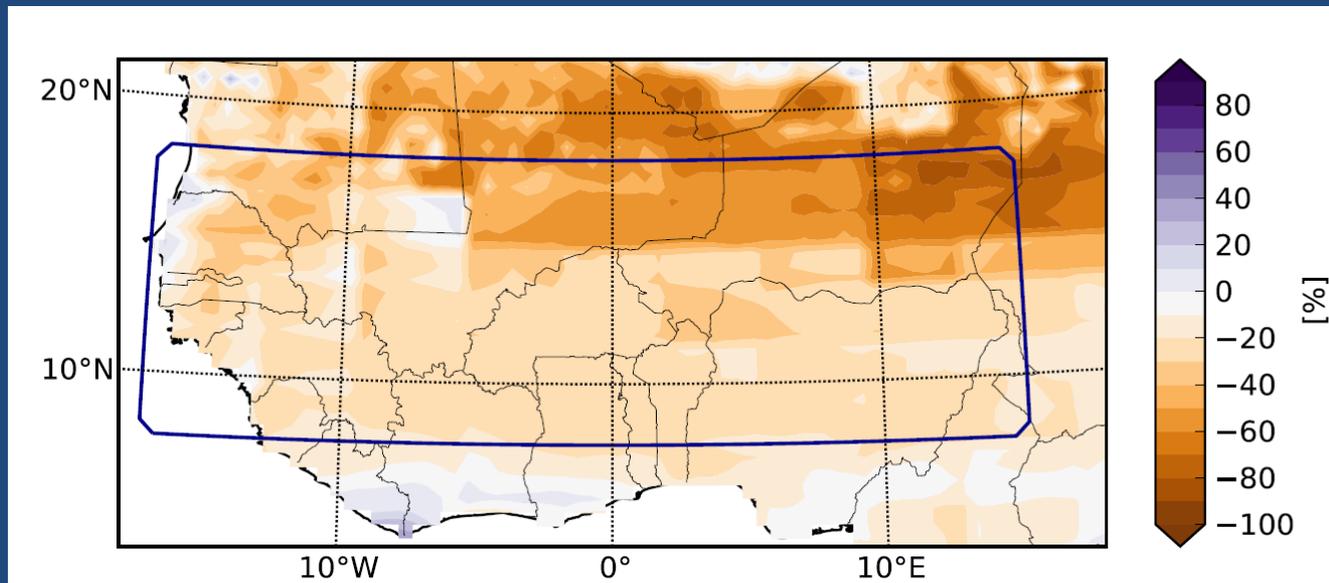
La perturbation superposée au RCP 8.5 correspond à une expérience transitoire avec une arrivée d'eau douce correspondant à 0.11 Sv (0.5 m), 0.22 Sv (1 m), 0.34 (1.50) et 0,68 Sv (3 m).

Relation entre l'apport d'eau douce lié à la fonte de la calotte et les modifications de dynamiques océaniques et atmosphériques : cas de la fonte de 1, 5 m du Groenland

Mécanisme de téléconnexion reliant la fonte du Groenland et la forte diminution des précipitations au Sahel. A) Evolution de l'AMOC en % par rapport à la valeur actuelle); B) Différence de température annuelle sur la période 2030-2060; C) Similaire à B) pour la différence de pression au niveau de la mer; et le vent à 10m (flèches noires); D) similaire à B) pour la différence de température estivale (JJAS) et le vent à 850 hPa (flèches noires). *Defrance et al., PNAS, May 11, 2017*



Les changements de précipitations sur la région du Sahel pour une expérience de 1,5 m



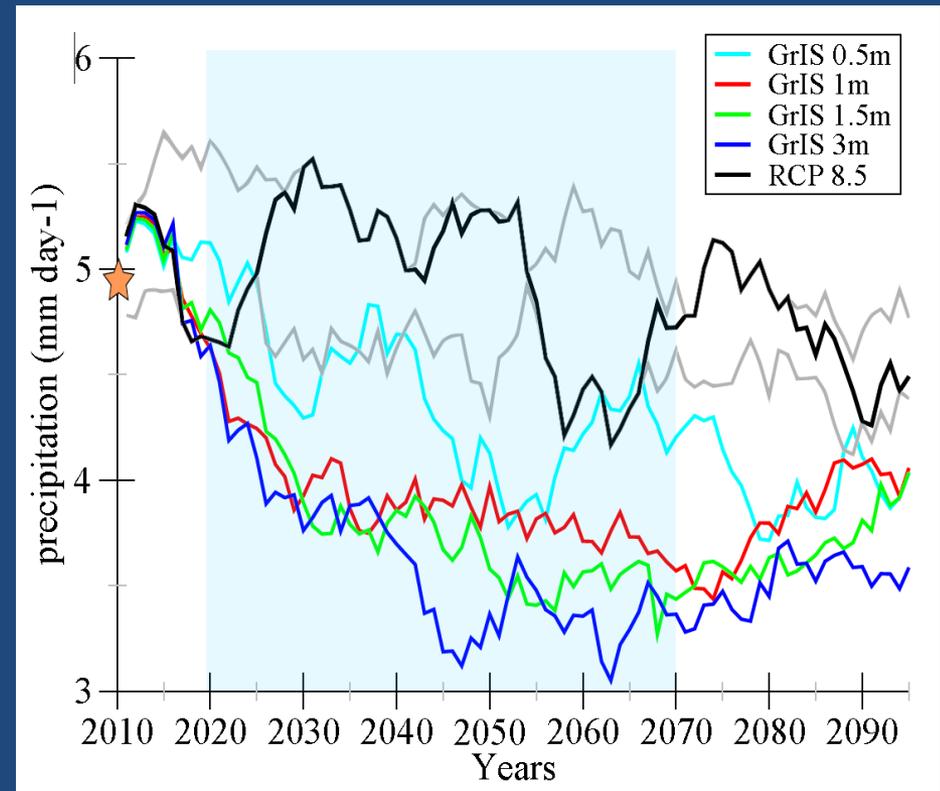
Anomalie de précipitation JJAS entre le scénario GrIS 1.5 m et l'expérience de référence RCP 8.5 baseline normalisée aux valeurs de RCP 8.5 et moyennée sur 2030-2060.

Les valeurs de précipitation sont obtenues après application de la méthode statistique. L'encadré bleu (8 ° N-18 ° N, 17 ° W-15 ° E) représente la zone étudiée. *Defrance et al., PNAS, May 11, 2017*

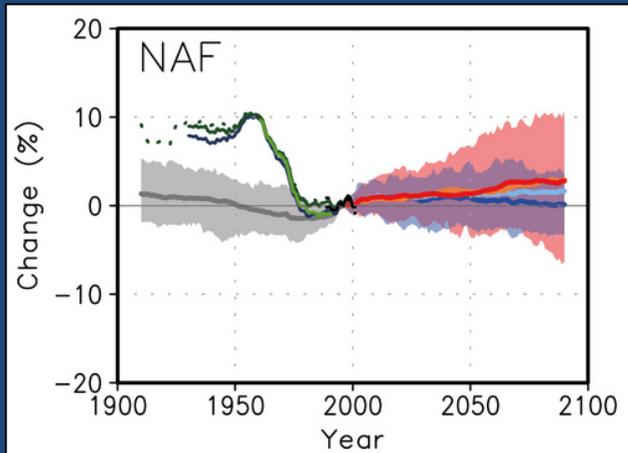
L'évolution des précipitations sur la zone du Sahel pour toutes les expériences et le scénario de référence : le RCP8.5

L'évolution des précipitations moyennes JJAS au cours du 21ème siècle sur la zone sahélienne (8 ° N-18 ° N, 17 ° W-15 ° E) pour les scénarios RCP8.5 et GrIS.

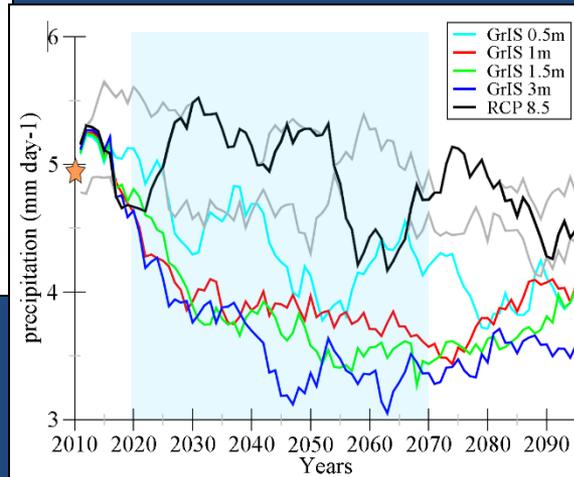
Defrance et al., PNAS, May 11, 2017



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

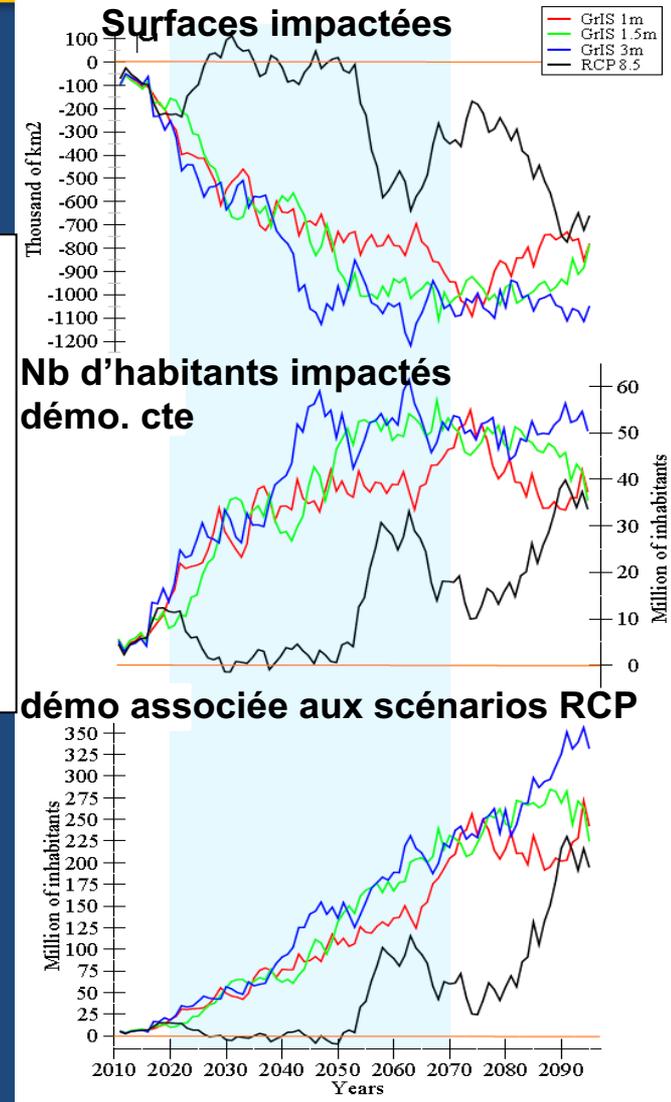


Simulation du GIEC
Observations des variations de moussons africaines passées et présentes (1900-2100) pour les différents scénarios:



Avec une fonte accélérée du Groenland, la mousson africaine est fortement diminuée

Impacts des changements de pluie sur la culture du sorgho et sur la population. *Defrance et al., PNAS, May 11, 2017.*
vol. 114 no. 25. doi:10.1073/pnas.1619358114



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

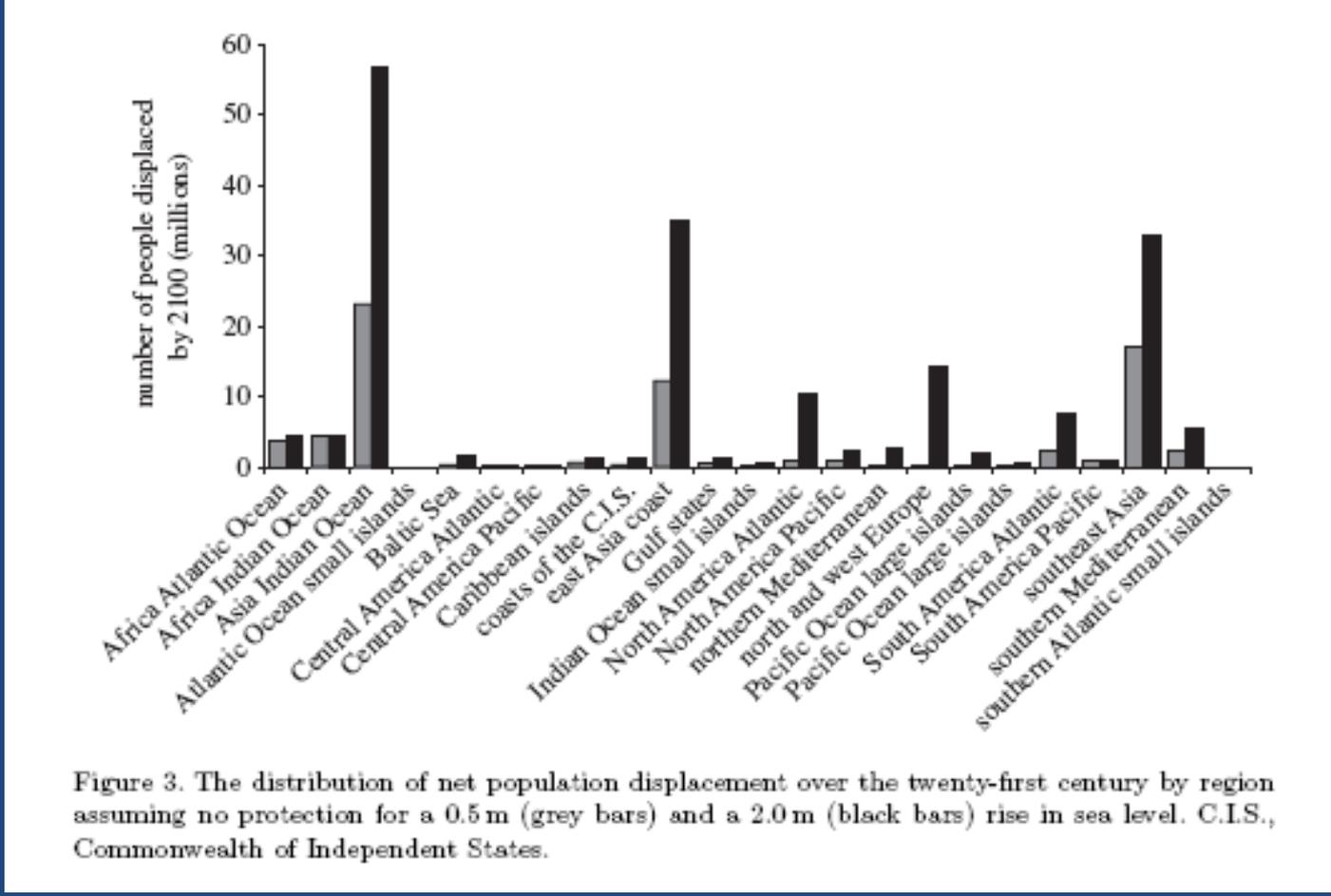


Figure 3. The distribution of net population displacement over the twenty-first century by region assuming no protection for a 0.5 m (grey bars) and a 2.0 m (black bars) rise in sea level. C.I.S., Commonwealth of Independent States.

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.

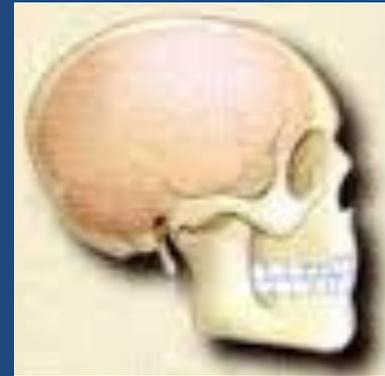
- 🌍 Au Cénozoïque [65-2,5 Ma], le climat se refroidit, le taux de CO₂ baisse, les calottes Antarctique (34 Ma) et Groenlandaise (2,6Ma) se mettent en place.
- 🌍 Au Quaternaire, des oscillations pilotées par les variations orbitales font basculer le climat de la phase glaciaire (80%) à des phases interglaciaires.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