

Système Climatique IENM 7/10 (2A)

## Une brève histoire des climats passés

Julien Cattiaux

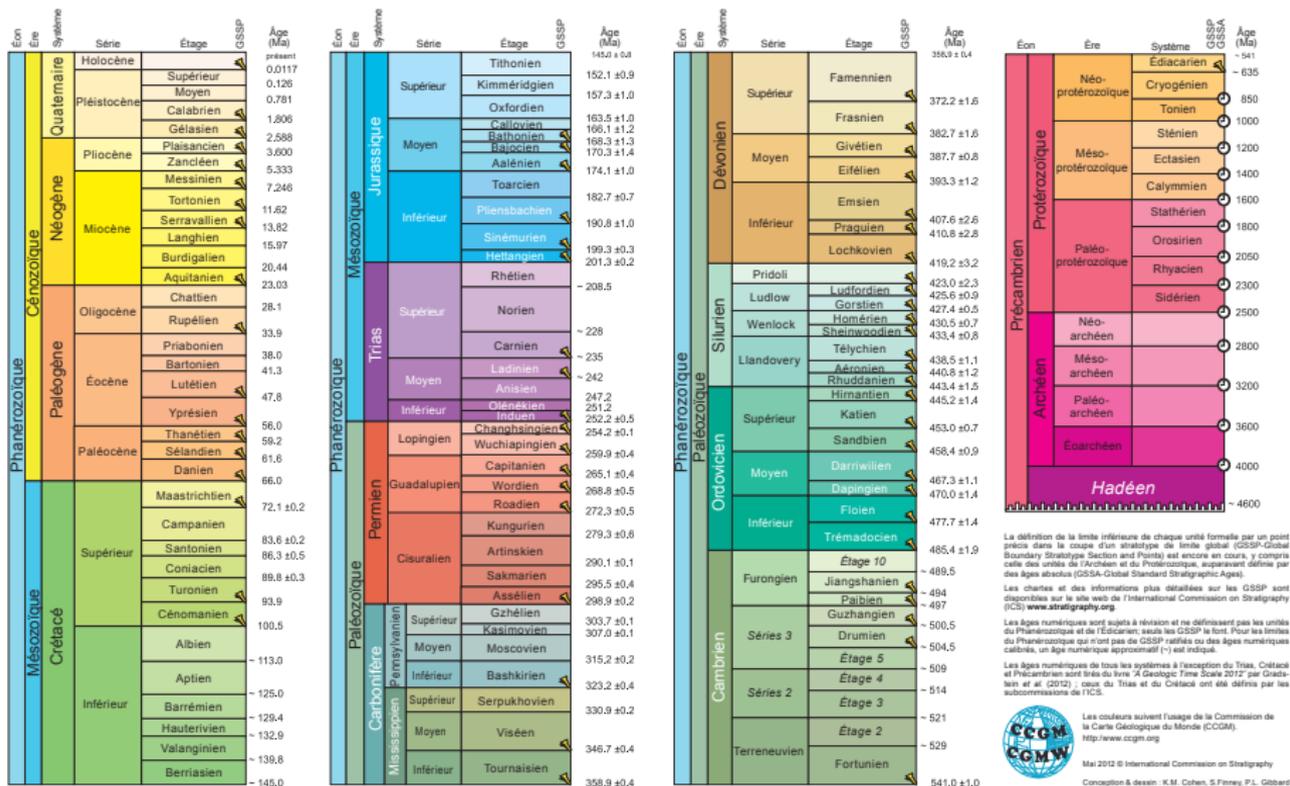
Centre National de Recherches Météorologiques  
CNRS / Météo-France

Retrouver ce cours sur ma page web : <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article629>

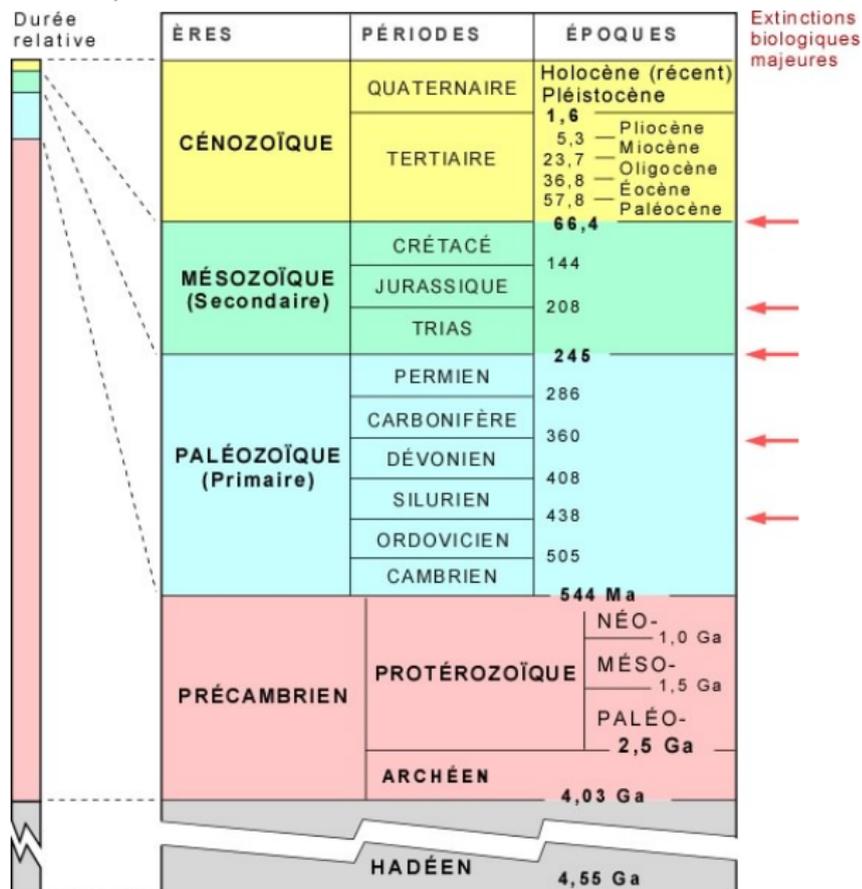
Contact : [julien.cattiaux@meteo.fr](mailto:julien.cattiaux@meteo.fr)

2021-22

# Temps géologiques - 1/2

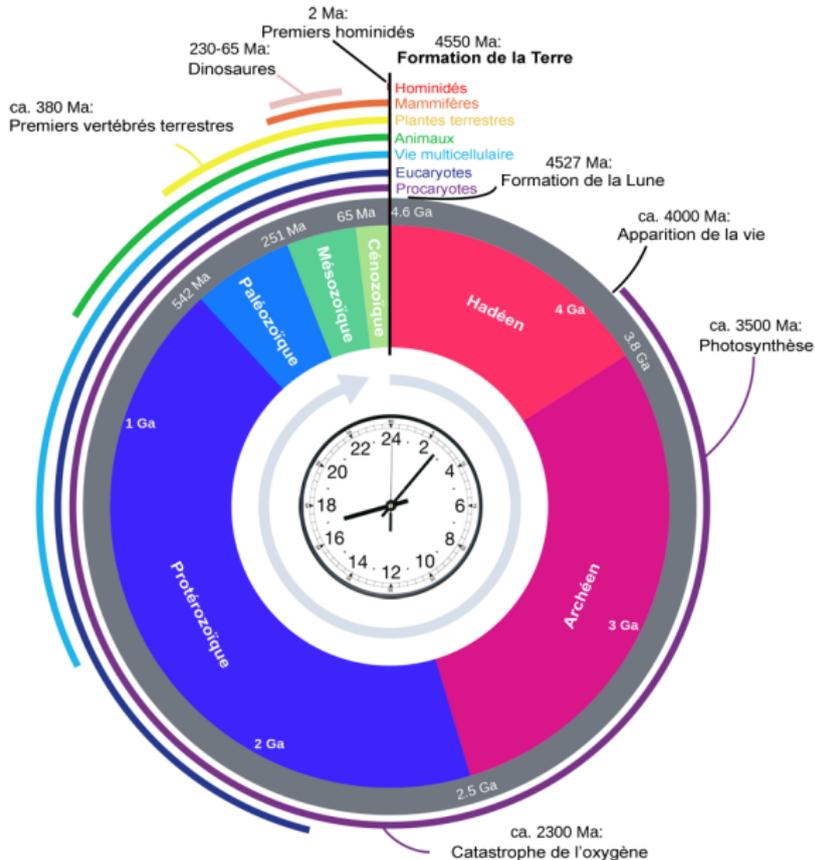


# Temps géologiques – 2/2



Source : Université de Laval (Québec).

# Horloge géologique



**0h00** (4.55 Ga)  
Formation Terre

**3h00** (4.0 Ga)  
Vie

**16h00** (1.5 Ga)  
Vie multicellulaire

**22h50–23h40** (230–65 Ma)  
Dinosaures

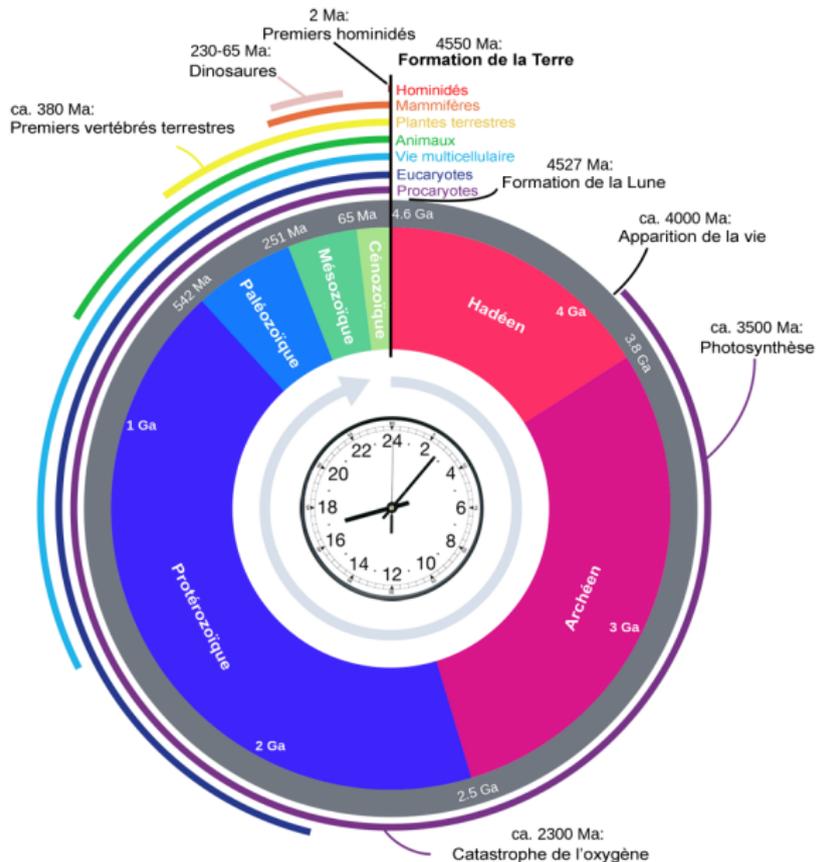
**23h59** (3.2 Ma)  
Lucy

**23h59 56"** (200 ka)  
Homo sapiens

**23h59 59.996"** (200 a)  
Industrie

Source : [Site](#) de Franck Stevens.

# Horloge géologique



## Paris

Formation Terre

## Orléans

Vie

## Brive

Vie multicellulaire

## Montauban–Grenade

Dinosaures

## 500 m du Capitole

Lucy

## 30 m du Capitole

Homo sapiens

## 3 cm du Capitole

Industrie

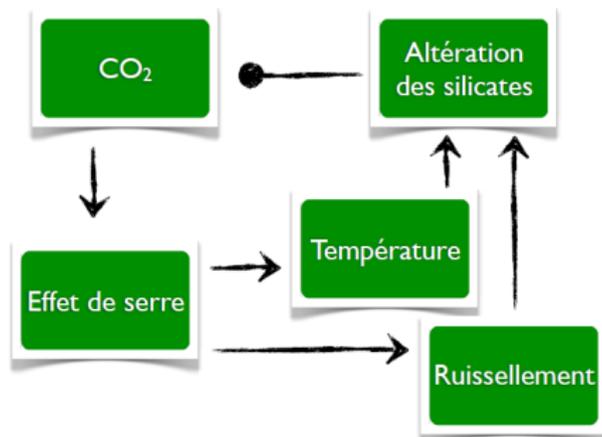
Source : [Site](#) de Franck Stevens.

# Le paléothermostat géologique – Rappel

1. Cycle du carbone géologique : **volcanisme** balancé par l'**altération** des roches silicatées et l'enfouissement de **matière organique**.

$$\frac{\partial[CO_2]}{\partial t} = \text{Volc}(t) - \text{Alt}(t) - \text{Org}(t)$$

2. Existence d'une **rétroaction négative** aux échelles du Ma au Ga qui rappelle le CO<sub>2</sub> atmosphérique (paléothermostat).



Source : Cours de Yves Goddérés (GET).

# Principaux indicateurs paléoclimatiques (*proxies*)

## Traces géologiques

Indications volcanisme, tectonique, niveau de la mer, glaciations, etc.

## Analyses isotopiques

- **Oxygène** : la calcification  $Ca + 2 HCO_3 \rightleftharpoons CaCO_3 + H_2O + CO_2$  privilégie le  $^{18}O$  à basse température et/ou en présence de calottes glaciaires (riches en  $^{16}O$ ).

On utilise le rapport isotopique de l'oxygène 18 :

$$\delta^{18}O = 1000 \times \left[ \frac{(^{18}O/^{16}O)_{sample}}{(^{18}O/^{16}O)_{ref}} - 1 \right] \quad \text{avec} \quad (^{18}O/^{16}O)_{ref} \sim 1/499$$

- **Carbone** : la photosynthèse  $6CO_2 + 6H_2O \rightleftharpoons C_6H_{12}O_6 + 6O_2$  privilégie le  $^{12}C$  ; quand elle marche bien, les sédiments de  $CaCO_3$  sont enrichis en  $^{13}C$ .

On utilise le rapport isotopique du carbone 13 :

$$\delta^{13}C = 1000 \times \left[ \frac{(^{13}C/^{12}C)_{sample}}{(^{13}C/^{12}C)_{ref}} - 1 \right] \quad \text{avec} \quad (^{13}C/^{12}C)_{ref} \sim 1/99$$

## Modélisation

EBMs/EMICs couplés à des modèles géochimiques.

Précambrien (4.55 Ga – 542 Ma)

Phanérozoïque (542 – 0 Ma)

Zoom sur le dernier million d'années

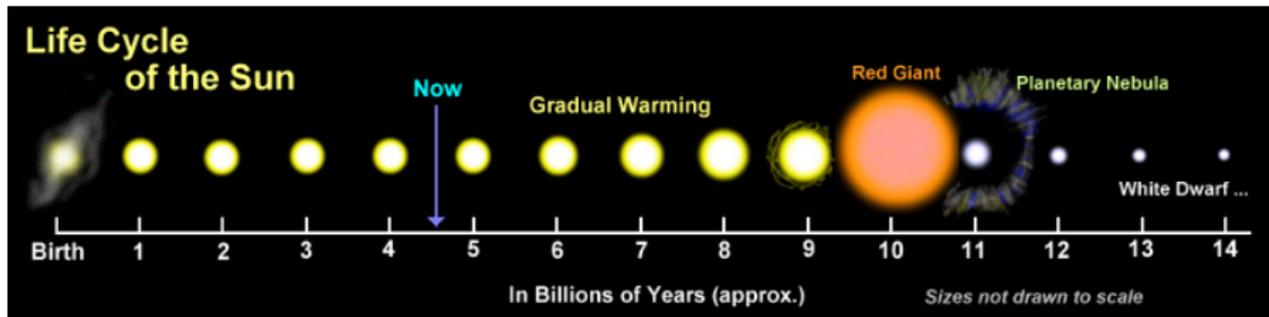
Zoom sur le dernier millénaire

# Contexte : croissance du Soleil

## Rappel

$$\Delta R = (1 - \alpha)S_0/4 - \varepsilon\sigma T_e^4$$

- ▶ Depuis 4.5 Ga, le Soleil est en phase de croissance.
- ▶ Sa température  $T_S$ , et donc  $S_0$ , augmentent.  
Car  $S_0 \sim \sigma T_S^4$ .

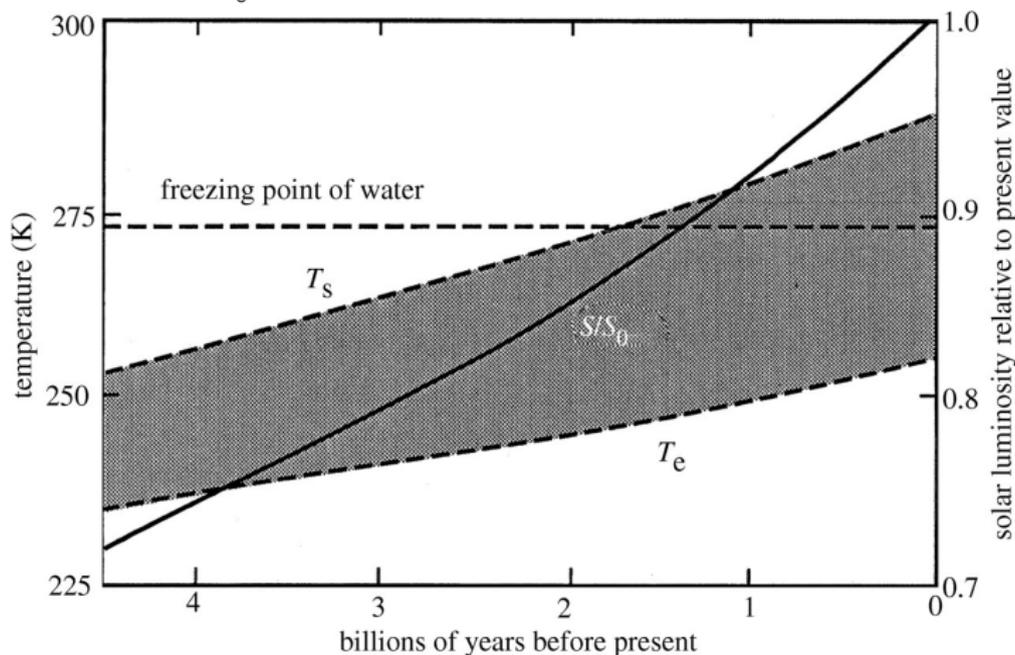


Source : [Wikipedia](#).

## Hadéen / Archéen (4.5 – 2.5 Ga) – Le jeune Soleil faible

- ▶ Avant 4 Ga,  $S_0$  à moins de 75 % de sa valeur actuelle.
- ▶ À albédo et atmosphère actuels, cela implique  $T_s < 0^\circ\text{C}$  avant 2 Ga.

$S_0$  (en fraction de  $S_0^{\text{actuel}}$ ) et  $T_e$  et  $T_s$  déduites ( $\alpha$ ,  $\varepsilon$  et  $\tau_a$  identiques à l'actuel)



Source : Kasting and Ono (2006).

Et pourtant...

# Paradoxe du jeune Soleil faible – Présence d'océans

- ▶ Avant 4 Ga (Hadéen) : Terre magmatique & bombardement météorique.

Aucun affleurement actuel de roches non métamorphisées, donc très peu d'information sur le climat...



Dessin de F. Sulehria.



J. Valley et al.  
(Geotimes, Feb 2003).

## Mais :

- ▶ Présence d'eau liquide néanmoins suggérée dès 4.4 Ga. Analyse  $\delta^{18}\text{O}$  de grains de zircon ( $\text{ZrSiO}_4$ ).
- ▶ Évidences  $T_s \sim 30\text{--}70^\circ \text{C}$  à l'Archéen (3.8 – 2.5 Ga). Analyses  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^{30}\text{Si}$  de *cherts* (sédiments  $\text{SiO}_2$ ).

# Paradoxe du jeune Soleil faible – Apparition vie

- ▶ **Stromatolithes** : premières formes de vie *photosynthétiques* (3.5 Ga).
- ▶ Plusieurs études\* suggèrent une vie avant 4.0 Ga.

Stromatolithes fossiles



Photo d'[A.-P. Drapeau](#).

Stromatolithes actuels



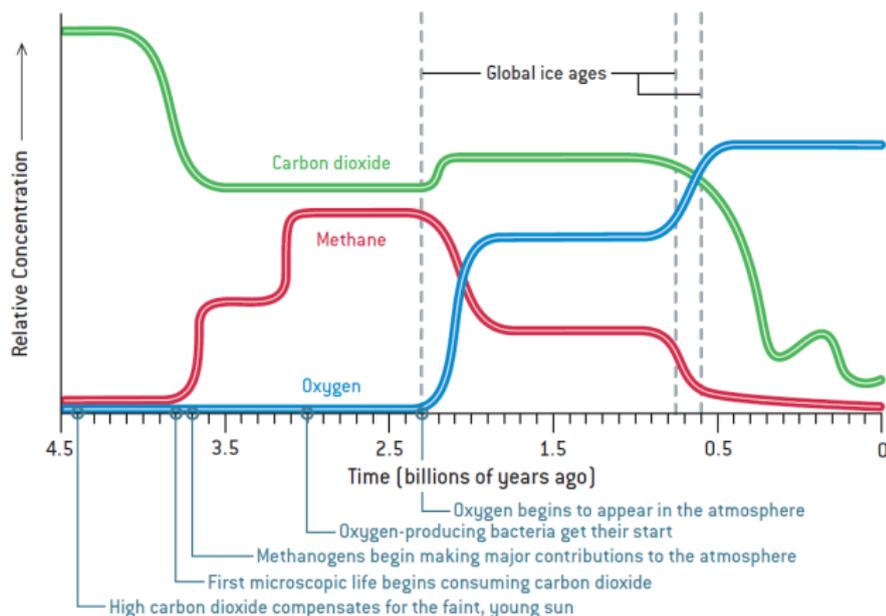
Photo de l'[Australian Coral Coast](#).

\* Par exemple [Bell et al. \(2015\)](#).

# Paradoxe du jeune Soleil faible – Un super effet de serre !

- ▶  $[CO_2]$  de l'ordre de qq % à l'Hadéen, puis qq ‰ à l'Archéen.  
Consommé par les premières espèces **méthanogènes** ( $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$ ).
- ▶  $[CH_4]$  de l'ordre du ‰ à l'Archéen, potentiellement GES dominant.  
Permis par l'absence d' $O_2$  (pas d'oxydation type  $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ ).

Évolution schématisée de  
 $[CO_2]$ ,  $[CH_4]$  &  $[O_2]$



Source : [When methane made climate](#), J.F. Kasting (2004).

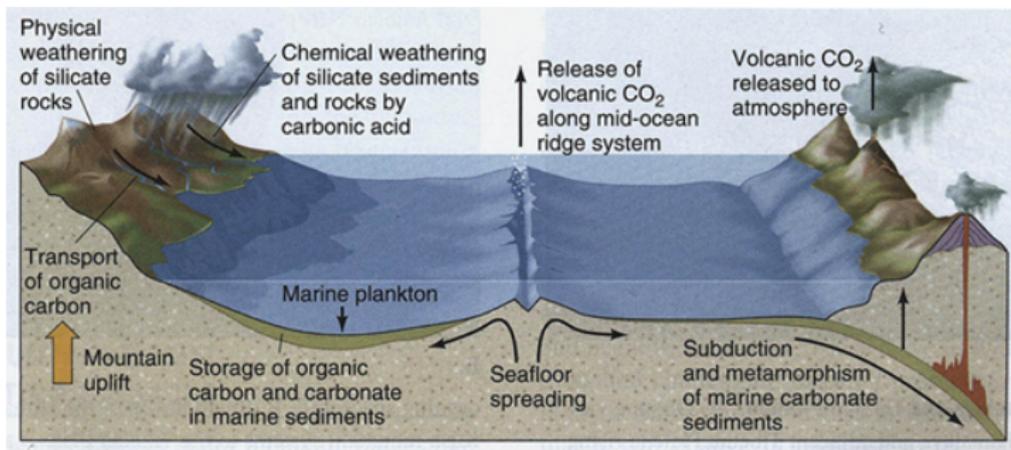
## Fin de l'Archéen (3.0 – 2.5 Ga)

- ▶ Formation des continents entre 3 et 2.7 Ga → nouveau puits de CO<sub>2</sub>.
- ▶ Refroidissement de plusieurs K, premières traces de glaciations (Afr. Sud).

### Altération des silicates



### Sédimentation des carbonates



Source : Skinner et al. (2007).

# Protérozoïque (2.5 – 0.5 Ga) – Grand Événement d'Oxydation

## Photosynthèse



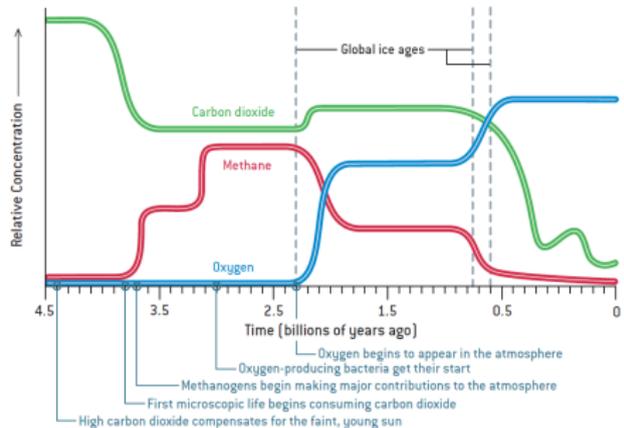
- ▶ O<sub>2</sub> émis dès 2.7 Ga, d'abord oxydé par océans et roches (e.g. fer).
  - ▶ Accumulation dans l'atmosphère à partir de 2.3 Ga (GEO).
  - ▶ Formation couche d'O<sub>3</sub> et oxydation méthane.
- Chute brutale de l'effet de serre et nouvelles glaciations.

Gisement de fer rubané daté à 2.1 Ga



Photo d'A. Karwath.

## Évolution schématisée [CO<sub>2</sub>], [CH<sub>4</sub>] & [O<sub>2</sub>]



Source : J.F. Kasting (2004).

# Glaciations du Protérozoïque

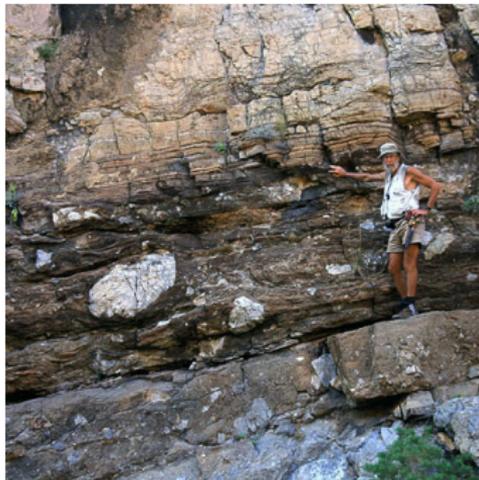
## Indices géologiques :

inclusions rocheuses, stries glaciaires (abrasion des roches par glaciers).

## Indices isotopiques :

sédiments appauvris en  $^{13}\text{C}$  suggèrent un arrêt de la photosynthèse.

Inclusions rocheuses en Namibie



Stries glaciaires en Mauritanie

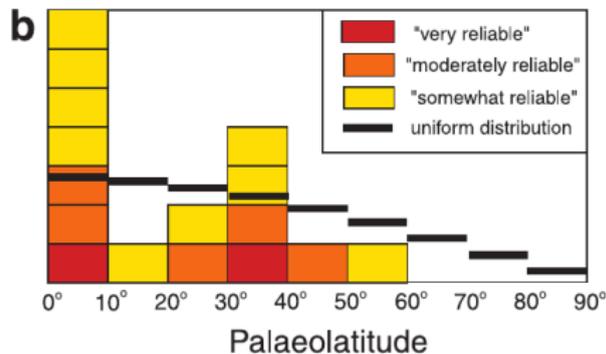
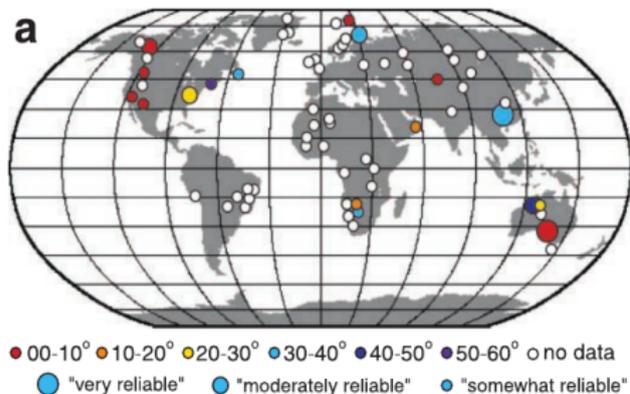


Source : Hoffman and Schrag (2002).

# Glaciations du Protérozoïque – De la glace à l'Équateur ?

► On peut connaître la paléolatitude des indices glaciaires par **paléomagnétisme\*** (pas la longitude) + dater par **radiométrie**.

→ **Dépôts glaciaires du Protérozoïque à toutes les (paléo)latitudes.**

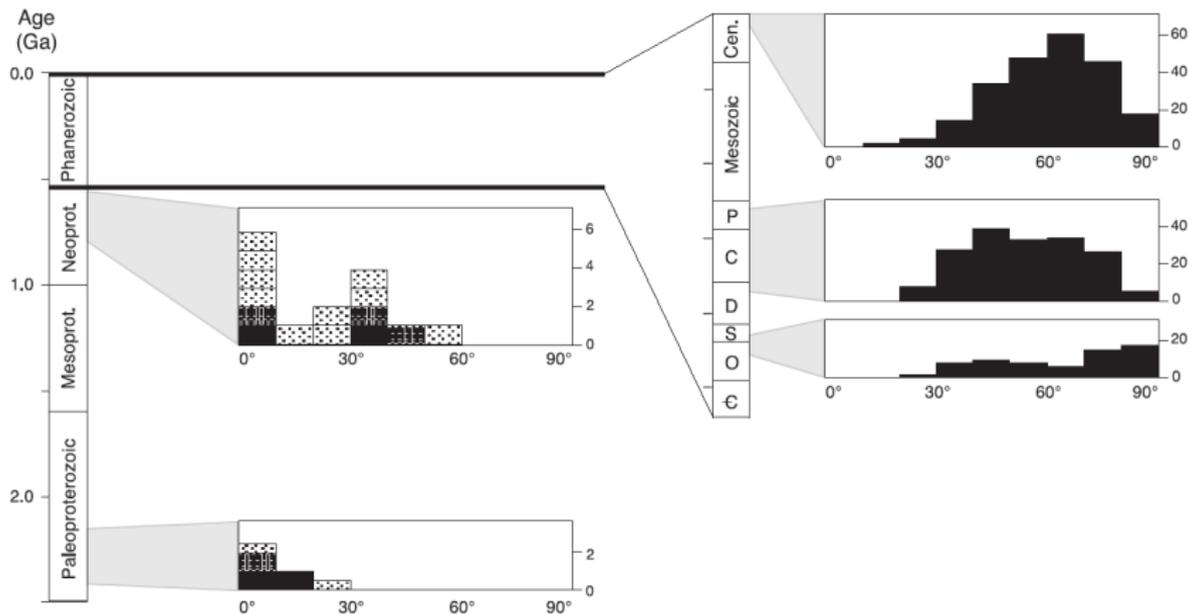


Source : Hoffman and Schrag (2002).

\* À lire : Chapitre 3 de *Paléoclimatologie, Enquête sur les climats anciens II*, F. Fluteau.

# Glaciations du Protérozoïque – Deux époques distinctes

- ▶ Paléoprotérozoïque et Néoprotérozoïque.
- ▶ Entre les deux, analyse  $\delta^{13}\text{C}$  suggère configuration plutôt chaude.
- ▶ Depuis, 3 glaciations (dont actuelle), mais aucune trace à l'Équateur.



Source : Evans (2003).

# L'hypothèse d'une Terre boule de neige

## 2.3

### Late Proterozoic Low-Latitude Global Glaciation: the Snowball Earth

JOSEPH L. KIRSCHVINK

#### 2.3.1 Introduction

A fundamental question of earth history concerns the nature of the Late Proterozoic glaciogenic sequences that are known from almost all of the major cratonic areas, including North America, the Gondwana continents, and the Baltic Platform. A major controversy involves the probable latitude of

glaciers which were within a few degrees of the equator. The data are difficult to interpret in any fashion other than that of a widespread, equatorial glaciation.

A global climatic mechanism that could lead to such a widespread, low-latitude glaciation is not yet available. Williams (1975) suggested that, if the earth's obliquity reached angles

In *The Proterozoic Biosphere: A Multidisciplinary Study* (1992).

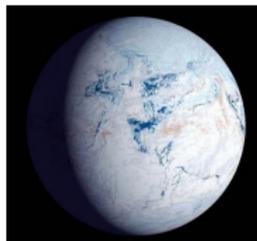
#### ► Plusieurs épisodes plausibles :

- Glaciations **Huronien** au Paléoprotérozoïque (2.3 à 2.1 Ga) ;
- Glaciations **Sturtienne** et **Marinoenne** au Néoprotérozoïque (715 et 635 Ma).

À lire : Chapitre 5 de **Paléoclimatologie, Enquête sur les climats anciens II**, Y. Goddérès, G. Ramstein et G. Le Hir.



J. Kirschvink  
(Caltech).



Dessin par C. Butler  
(SPL).

# Terre boule de neige – Mécanismes d'entrée en glaciation

## Glaciations Huroniennes :

Probablement la chute d'effet de serre suite au GEO (mal établi / débattu).

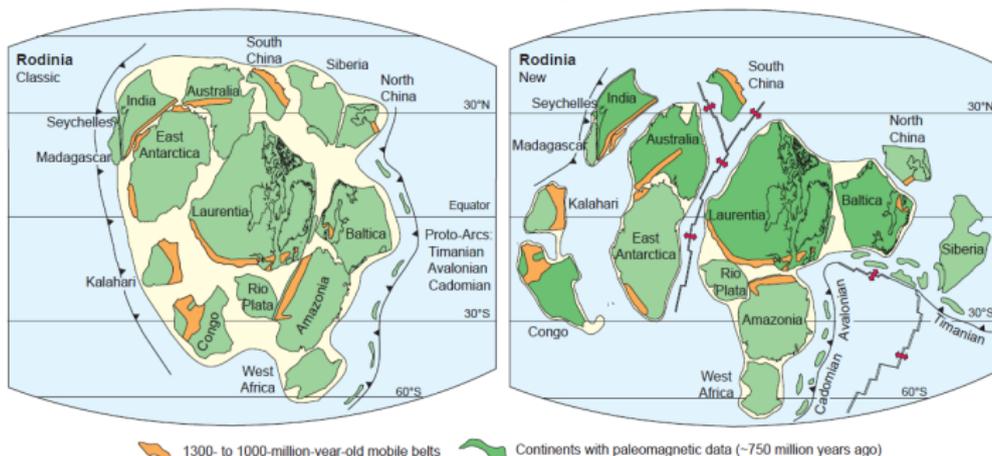
## Glaciation Sturtienne :

Probablement la dislocation du super-continent équatorial Rodinia\* (cf. suite).

## Glaciation Marinoenne :

Probablement la croissance progressive de calottes polaires (cf. suite).

\* Dislocation de Rodinia entre 800 (gauche) et 750 (droite) Ma.



Source : Torsvik (2003).

# Terre boule de neige – Glaciation Sturtienne

- ▶ La dislocation de Rodinia piège le CO<sub>2</sub> atmosphérique.
  - Augmentation des précipitations, et donc de l'altération.
  - Éruption massive de **basalte**, facile à altérer.

→ [CO<sub>2</sub>] passe de ~ 2000 ppm à moins de 250 ppm ( $F \sim -11 \text{ W.m}^{-2}$ ).

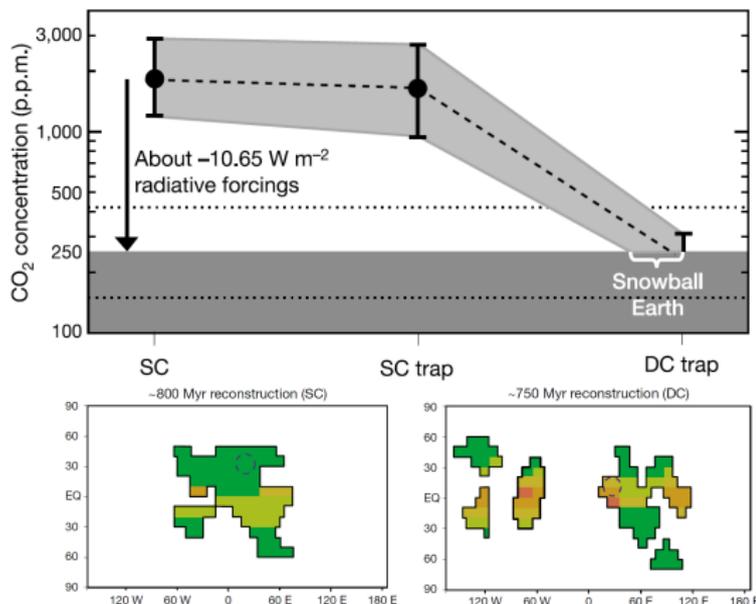
Passage d'un climat à 11 °C avec point de congélation à 60N à une *boule de neige*.

Expérience avec un EMIC<sup>1</sup> couplé à un modèle géochimique<sup>2</sup>.

Simulations de plusieurs Ma.

<sup>1</sup> CLIMBER, climat à résolution 7 × 18.

<sup>2</sup> COMBINE, cycle du carbone géologique.



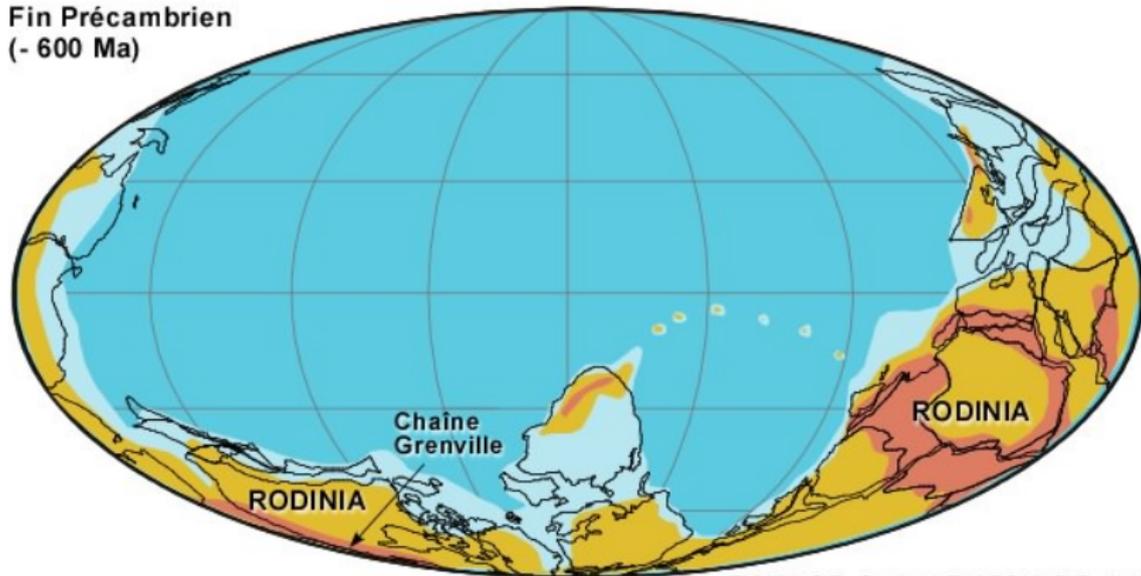
Source : Donnadieu et al. (2004).

# Terre boule de neige – Glaciation Marinoenne (moins documentée)

- ▶ **Hyp.** : Glaciation totale par croissance progressive de calottes polaires.
  - Accumulation calottes par forçage **astronomique**.
  - Vers 30° de latitude, **rétroaction albédo** très rapide (*runaway albedo feedback*).

Configuration des continents à la fin du Néoprotérozoïque

**Fin Précambrien  
(- 600 Ma)**



© 2001 C.R. Scotese PALEOMAP Project

Source : [Université de Laval \(Québec\)](#).

# Terre boule de neige – Sortie de glaciation

- ▶ En climat *snowball*, accumulation de  $\text{CO}_2$  par volcanisme et diminution albédo par retombée des poussières (neige salie, peu de précipitations).
- ▶  $[\text{CO}_2]$  nécessaire pour déglacer estimée à 20–30 % ( $\sim 1000 \times$  l'actuel) ! Estimations à partir d'EBM (cf. figure).

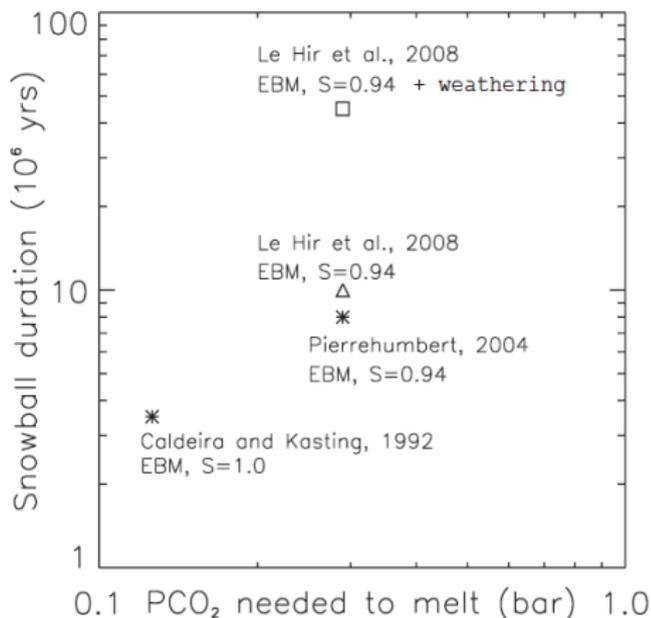
## Combien de temps ça prend ?

Dégazage volcanique actuel :  
 $\sim 6.8 \cdot 10^{12}$  mol/an.

Masse totale atmosphère :  
 $p_0/g \times 4\pi R^2 \sim 5.1 \cdot 10^{18}$  kg.

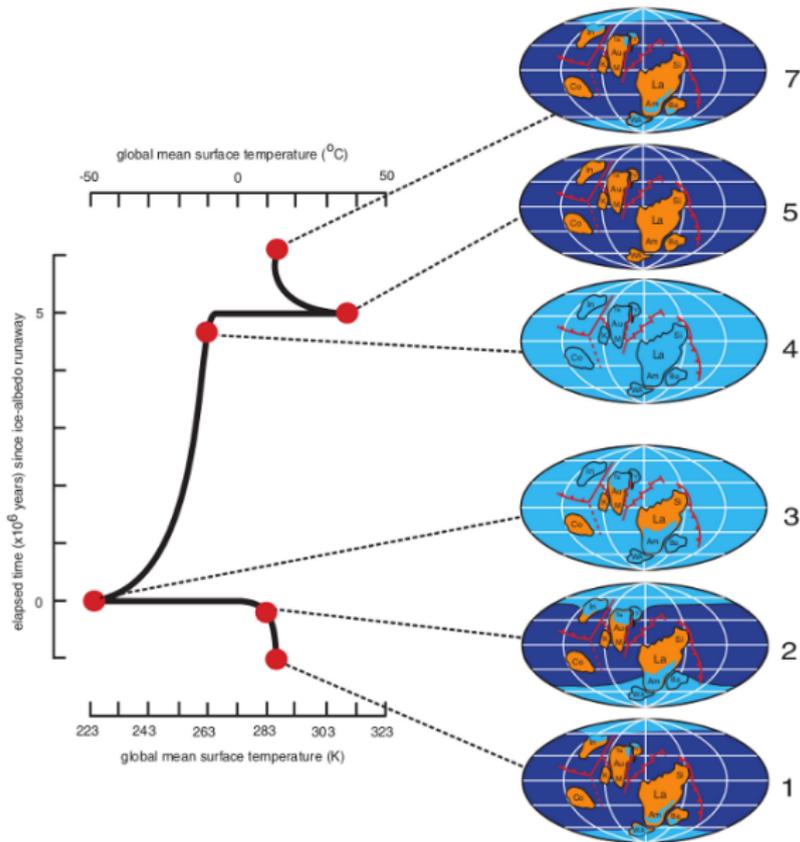
Masse molaire atmosphère :  
29 g/mol.

→ Pour atteindre 30 % de  $\text{CO}_2$ ,  
il faut émettre  $5.3 \cdot 10^{20}$  mol,  
ce qui prend  $\sim 7.8$  Ma.



Adapté de Goddérís et al. (2010).

# Terre boule de neige – Cycle complet



Source : Hoffman and Schrag (2002).

**1–3** Glaciation par effet de serre / astronomie & *runaway albedo feedback*.

**3–4** Terre gelée pendant plusieurs Ma.  
(glace  $\pm$  fine permettant le maintien d'une photosynthèse)

**4–5** Déglaciation par super effet de serre & *runaway albedo feedback*.

**5–7** Retour progressif à un effet de serre "normal".  
(via ruissellement et altération)

# Résumé Précambrien

Étude du climat Précambrien via des **données géologiques** (paléomagnétisme, analyses isotopiques) et la **modélisation** (modèles simples de climat couplés à des modèles de cycle du carbone).

Développement de la vie possible malgré le **jeune Soleil faible** grâce à un effet de serre accru.

Quelques épisodes froids (**Terre boule de neige**) dans une période globalement plus chaude qu'aujourd'hui.

Cycle du carbone géologique crucial pour réguler la température de la Terre (notion de **paléothermostat**).

**Vision encore très parcellaire** de l'histoire du climat Précambrien + pas d'information sur la variabilité climatique aux échelles inférieures au Ma !

Précambrien (4.55 Ga – 542 Ma)

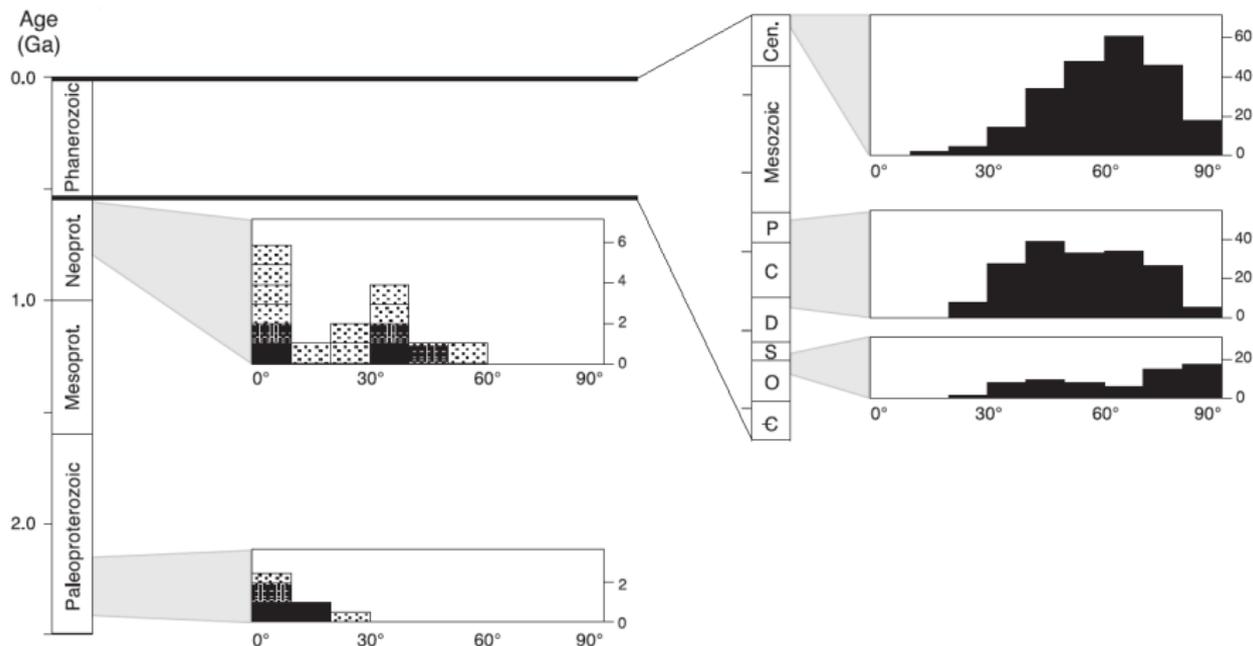
Phanérozoïque (542 – 0 Ma)

Zoom sur le dernier million d'années

Zoom sur le dernier millénaire

# Dépôts glaciaires – Rappel

- Traces de 3 glaciations non globales au Phanérozoïque :  
Ordovicien (vers 450 Ma), Carbonifère (vers 300 Ma) et Cénozoïque (actuel).

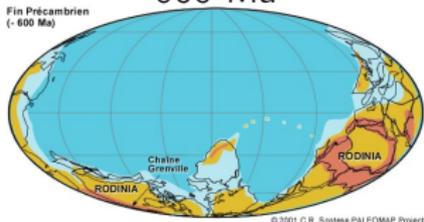


Source : Evans (2003).

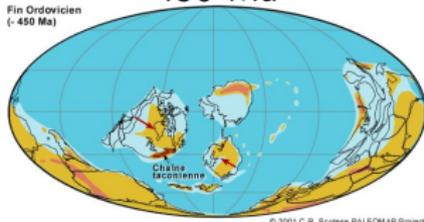
# Évolution des continents

Des vestiges de **Rodinia** (600 Ma) à la **Pangée** (250 Ma), et à aujourd'hui.  
+ Colonisation des terres émergées par la vie (incl. **végétation**) vers 380 Ma.

600 Ma



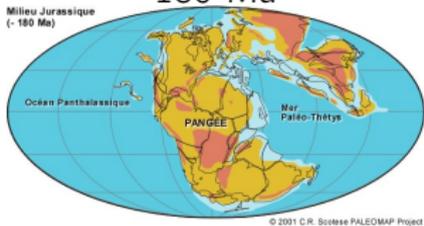
450 Ma



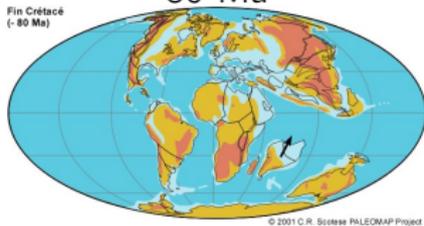
300 Ma



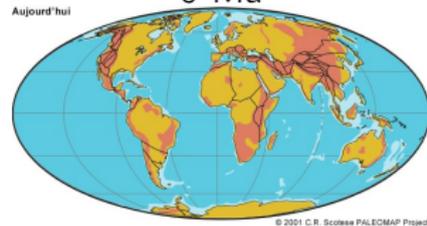
180 Ma



80 Ma



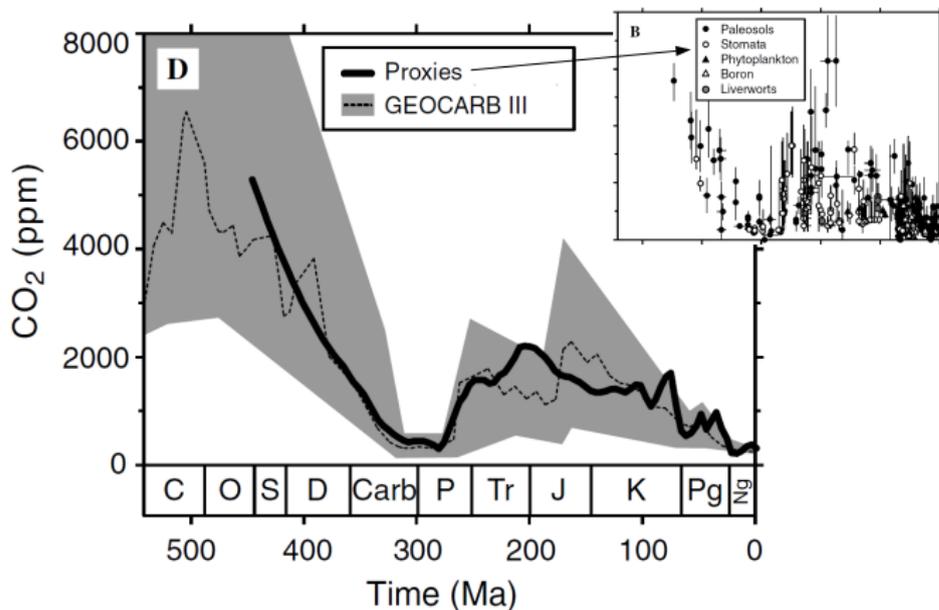
0 Ma



Source : [Université de Laval \(Québec\)](#).

# Reconstruction de [CO<sub>2</sub>]

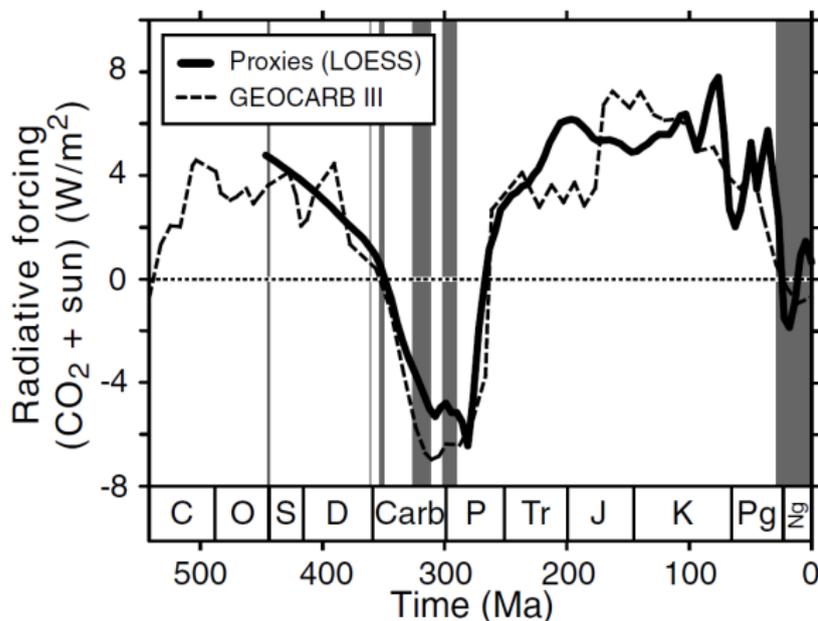
- ▶ Relatif accord entre **proxies** (stomates fossiles,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{11}\text{B}$ ) et **modélisation**, malgré de fortes incertitudes (surtout avant Dévonien).
- ▶ [CO<sub>2</sub>] entre  $\sim 4000$  et  $\sim 100$  ppm, enfouissement massif de **carbone organique** au Carbonifère via végétation + niveau bas des océans.



Source : Royer (2006).

# Reconstruction du forçage CO<sub>2</sub> (+ Soleil)

- ▶ Croissance du Soleil :  $S_0$  passe de 95 à 100 % de l'actuel.
- ▶ **Forçage reconstruit** globalement cohérent avec les évidences glaciaires. Il n'est pas exclu que [CO<sub>2</sub>] ait pu temporairement chuter à l'Ordovicien.

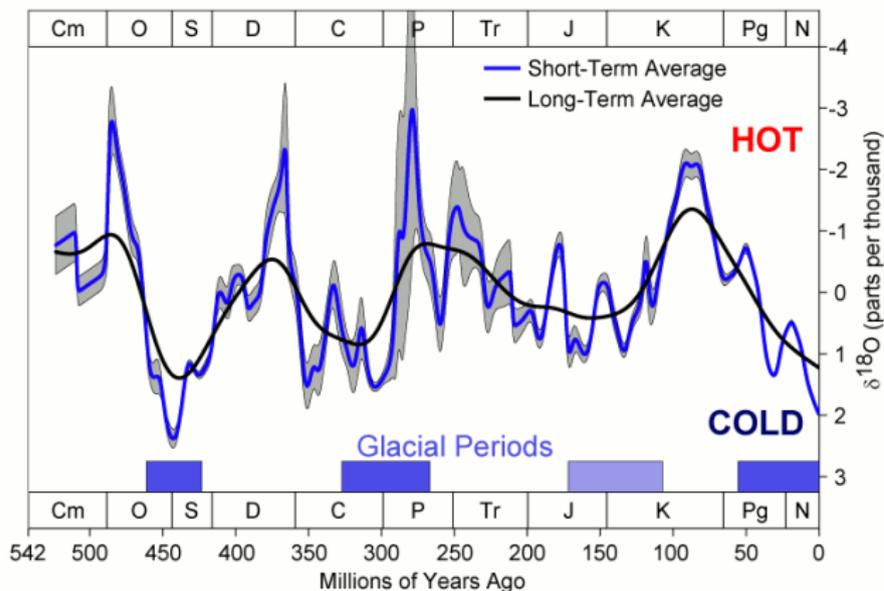


Source : Royer (2006).

\* À lire : Chapitre 6 de [Paléoclimatologie, Enquête sur les climats anciens II](#), Y. Goddérès, Y. Donnadiéu.

# Reconstruction de température via le $\delta^{18}\text{O}$

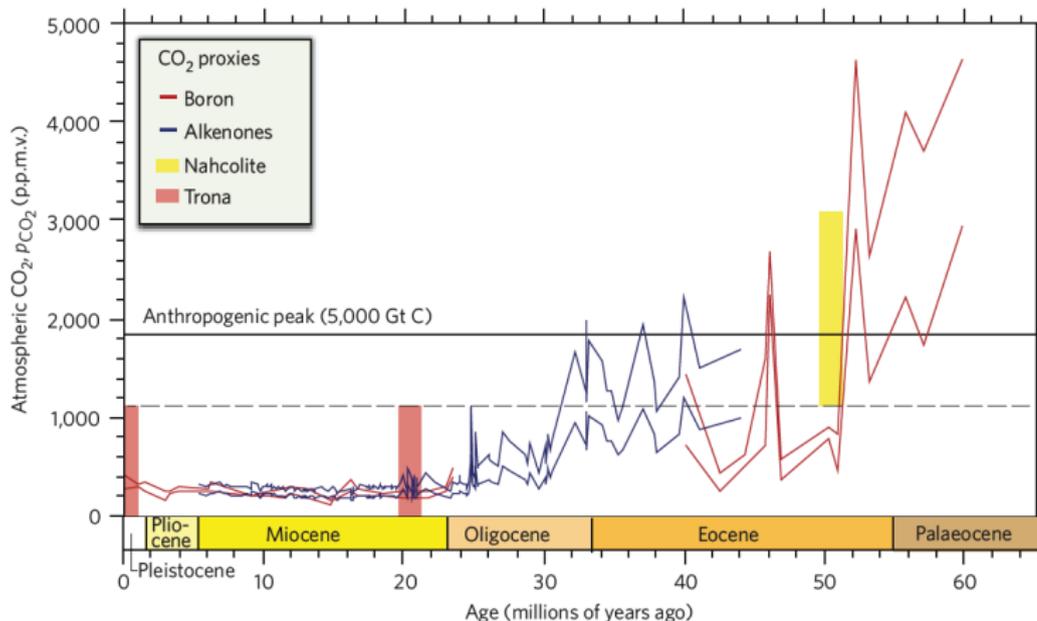
- ▶ Globalement cohérente avec le **forçage radiatif** + **paléogéographie** :
  - glaciation Ordovicien mal comprise, potentiellement baisse temporaire [ $\text{CO}_2$ ] ;
  - refroidissement Dévonien + glaciation Carbonifère par apparition végétation ;
  - ↗ ↘ Permien-Jurassique : constitution puis dislocation super-continent Pangée ;
  - refroidissement fin Crétacé par apparition plantes à fleurs (nouveau puits de C).
- ▶ **Périodicité apparente** à  $\sim 135$  Ma. Origine tectonique ? astronomique ? hasard ?



Source : Veizer et al. (1999).

# Zoom sur le Cénozoïque (65 – 0 Ma) – [CO<sub>2</sub>] via δ<sup>13</sup>C & δ<sup>11</sup>B

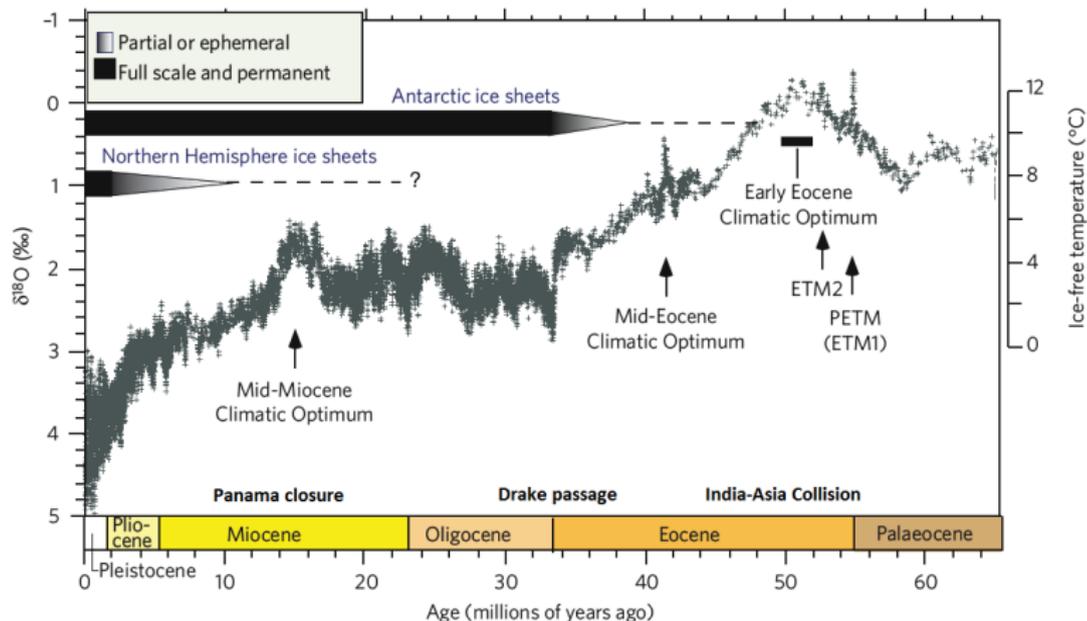
- ▶ **Diminution progressive** de + de 3000 à – de 300 ppm.  
Diminution volcanisme, orogénèse himalayenne et ouverture/fermeture passages océaniques.
- ▶ La [CO<sub>2</sub>] n'a probablement pas excédé **1000 ppm** depuis 25 Ma.



**Attention** : temps de droite à gauche. Adapté de Zachos et al. (2008).

# Zoom sur le Cénozoïque (65 – 0 Ma) – $T_s$ via $\delta^{18}O$

- ▶ Refroidissement progressif + formation calottes polaires.
- ▶ Qq épisodes chauds ponctuels, notamment le **Maximum Thermique du Paléocène-Éocène** (PETM vers 55 Ma).



**Attention :** temps de droite à gauche. Adapté de Zachos et al. (2008).

# PETM : analogue du réchauffement anthropique ?

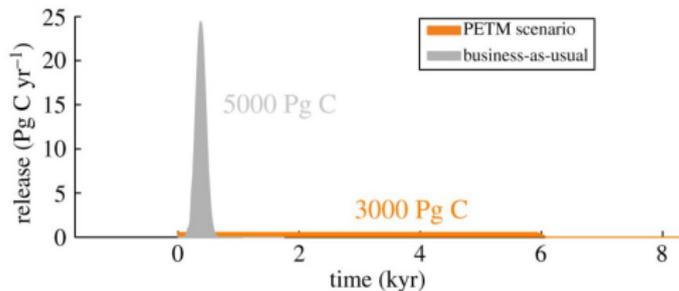
- ▶ **PETM** : épisode chaud de 200 ka initié par un **dégazage massif de  $^{13}\text{C}$** .  
Origine débattue : volcanisme ? Méthane de marges continentales ?

## Qq chiffres

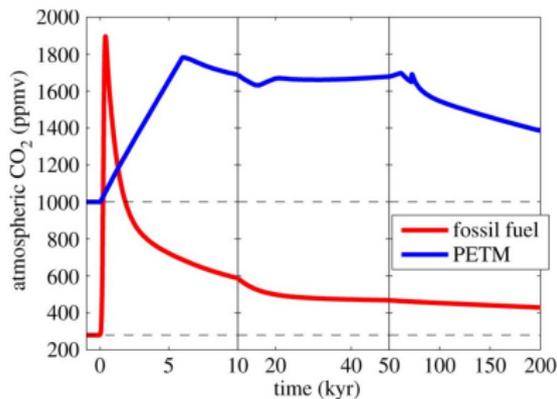
**PETM** + 5 K en 20 ka, + 3000 GtC en 6 ka.

**AGW** + 5 K en 200 a, + 5000 GtC en 500 a (scénario *business as usual*).

Émission de  $\text{CO}_2$



Concentration de  $\text{CO}_2$

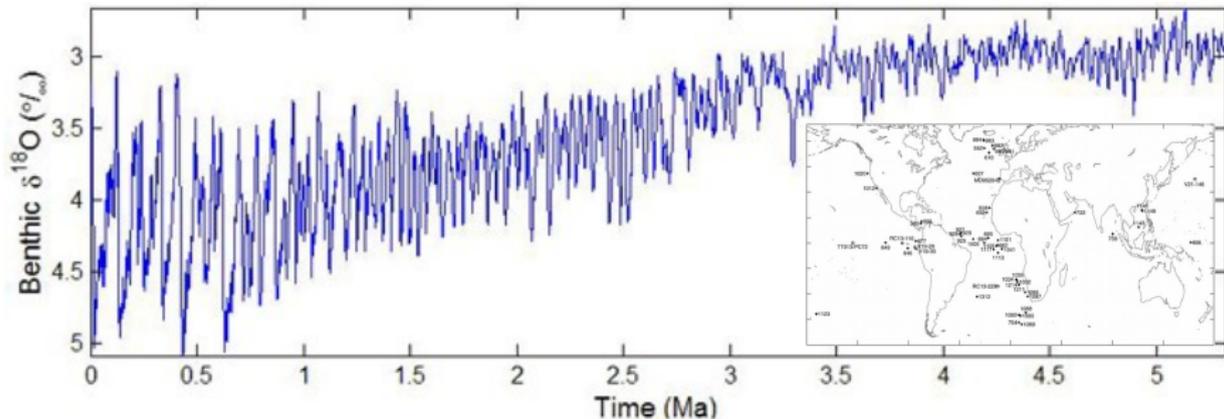


Source : Zeebe and Zachos (2013).

## Zoom sur les 5 derniers Ma – Variabilité astronomique

- ▶ Mise en évidence d'une **variabilité "rapide"** ( $\sim 10$  à  $100$  ka).
- ▶ Période dominante à **41 ka** avant 1 Ma, et à **100 ka** sur le dernier Ma.
- ▶ Variations associées aux **cycles des paramètres orbitaux** (cf. suite).

Reconstruction de  $T$  via  $\delta^{18}\text{O}$  basée sur 57 échantillons (carte)



**Attention** : temps de droite à gauche. Source : Goosse et al. [online textbook](#).  
Données de [L. Lisiecky](#) (UC Santa Barbara). Voir Lisiecky and Raymo (2005).

Précambrien (4.55 Ga – 542 Ma)

Phanérozoïque (542 – 0 Ma)

Zoom sur le dernier million d'années

Zoom sur le dernier millénaire

# La découverte des glaciations du Quaternaire

Le sol de l'Europe, orné naguère d'une végétation tropicale et habité par des troupes de grands éléphants, d'énormes hyppopotames et de gigantesques carnassiers, s'est trouvé enseveli subitement sous un vaste manteau de glace recouvrant indifféremment les plaines, les lacs, les mers et les plateaux.

Le nord de l'Amérique, avec ses blocs erratiques et ses roches polies présente une répétition du même phénomène dans cette partie du monde.

Les grandes oscillations que la température du globe a subies sont donc un phénomène général.

Études sur les glaciers, Chapitre 17 (1840).



L. Agassiz  
(1807–1873)

# Premières explications : l'astronomie

**1842** – J. Adhémar, *Révolutions de la mer*.

Importance du paramètre de précession des équinoxes.

**1864** – J. Croll, *On the physical cause of the change of climate during geological epochs*.

Importance du paramètre d'excentricité + insolation d'hiver.

[...]

**1941** – M. Milanković, *Canon of Insolation and the Ice Age Problem*.

Importance du paramètre d'obliquité + insolation d'été.



J. Adhémar  
(1797–1862)



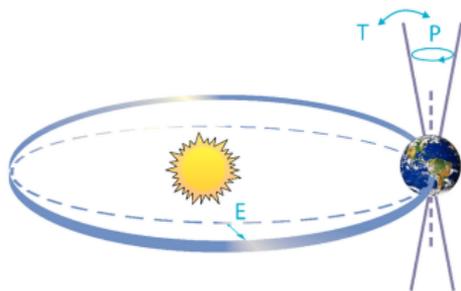
M. Milanković  
(1879–1958)

# Cycles astronomiques – Rappels et généralités

**Excentricité (E)** : forme orbite, varie de 0 à 0.06 avec cycles principaux à 95, 125 et 400 ka.

**Obliquité (T)** : inclinaison Terre, varie de 22.1 à 24.5° avec cycle principal à 41 ka.

**Précession (P)** : position de l'équinoxe de printemps par rapport au périhélie, varie de 0 à  $2\pi$  avec cycles principaux à 19, 22 et 24 ka.



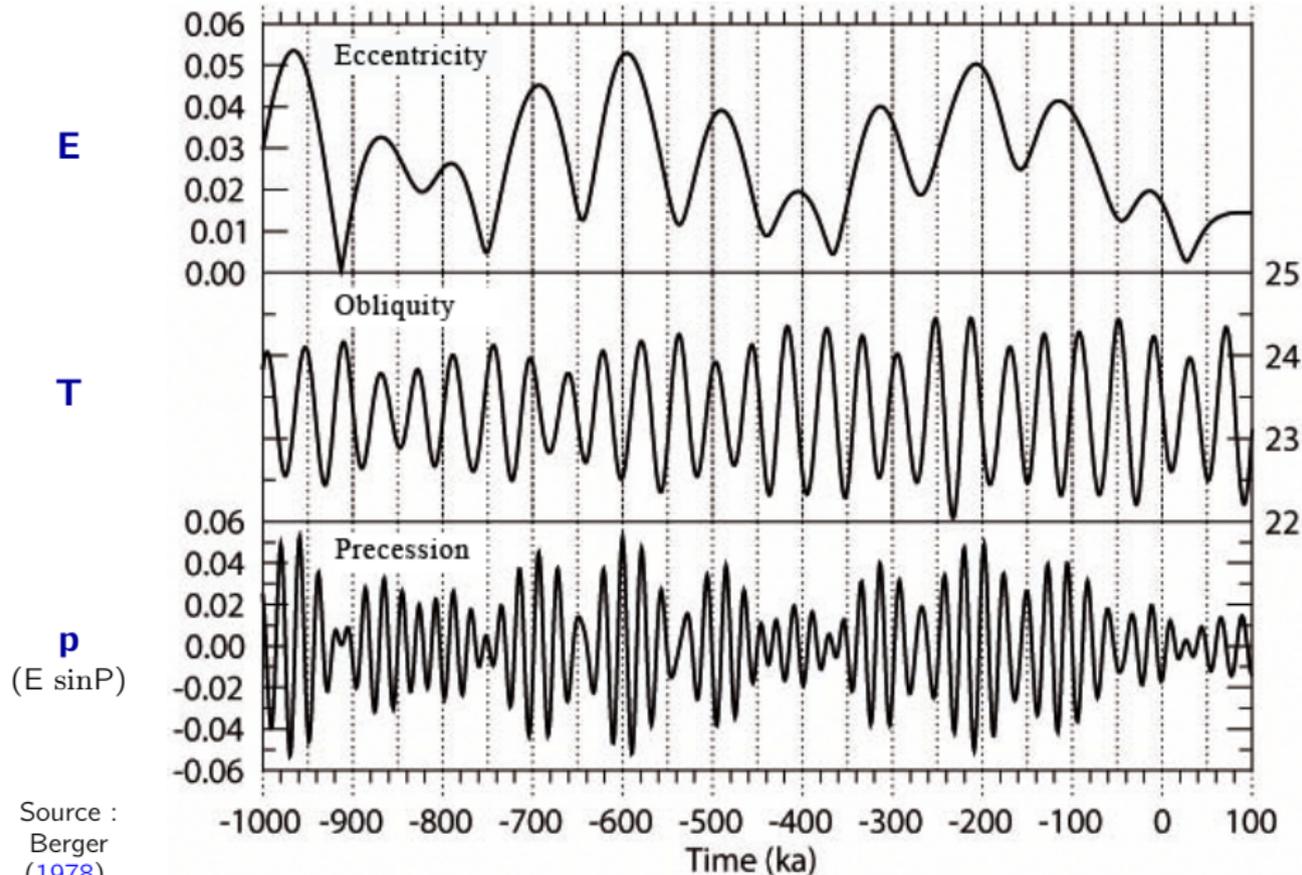
- ▶ **E** module l'énergie moyenne reçue (minimum pour un cercle).  
On peut montrer que  $S_0 \propto 1/\sqrt{1 - E^2}$ , soit une modulation maximale de  $0.5 \text{ W.m}^{-2}$ .
- ▶ **T** et **P** modulent sa répartition en latitude et dans l'année.
- ▶ L'évolution d'**E**, **T** et **P** est connue (gravitation) :

$$E = E_0 + \sum_i E_i \cos(\lambda_i t + \varphi_i)$$

$$T = T_0 + \sum_i T_i \cos(\gamma_i t + \xi_i)$$

$$p = E \sin P = \sum_i P_i \cos(\alpha_i t + \eta_i)$$

# Variations des paramètres orbitaux au dernier Ma



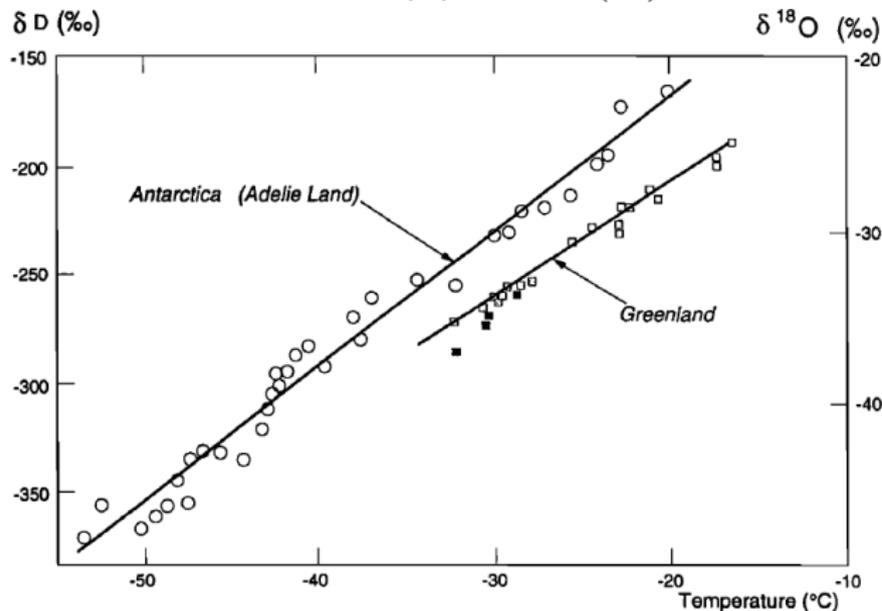
# De nouvelles sources de données

**Carottages glaciaires** – Antarctique jsq 800 ka et Groenlandais jsq 125 ka.

→ Mesures **directes** de la concentration de GES (bulles d'air).

→ Mesures **indirectes** de la température via l'analyse isotopique.

Paléothermomètres isotopiques du  $\delta D$  ( $^2H$ ) et du  $\delta^{18}O$



Source : Jouzel et al. (1997).



Source : Photothèque du CNRS.



J. Jouzel (LSCE).

# Cycles glaciaires - inter-glaciaires - Derniers 800 ka

Cycles  $[CO_2]$  &  $T$   
à  $\sim 100$  ka.

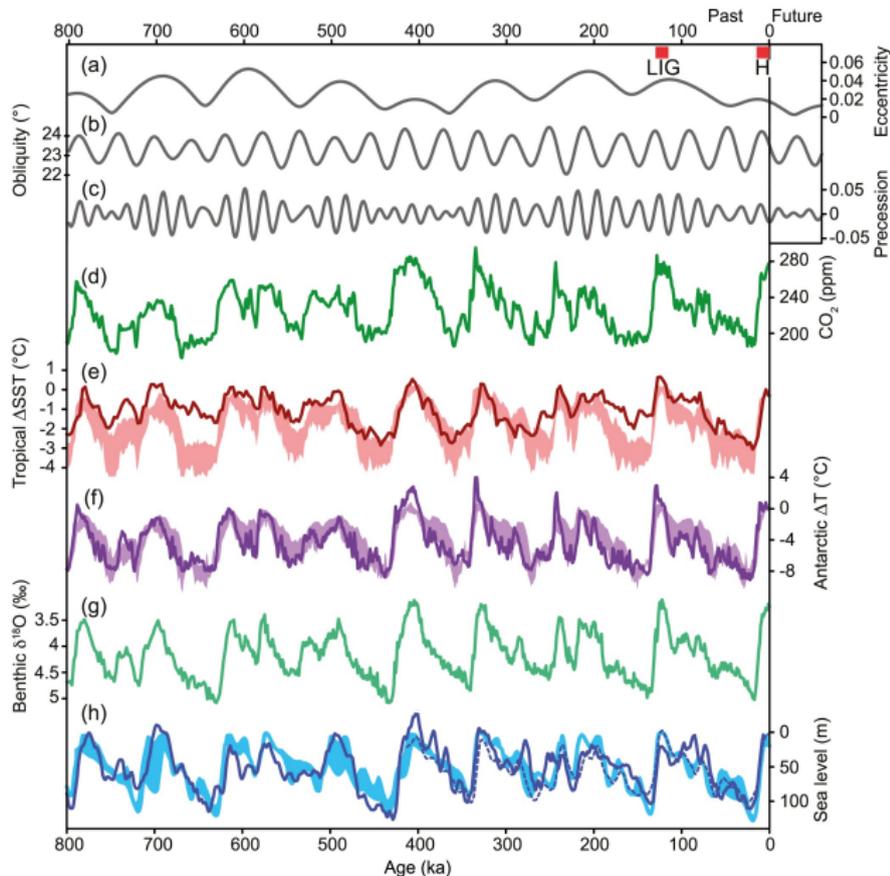
Glaciation + lente que  
déglaciation.

LIG à l'Éémien.  
+ chaud qu'actuel.

LGM à 21ka.  
Puis +5 K en 10 ka.

Holocène dep. 11ka.

Lien avec cycles  
astronomiques pas  
immédiat ! (cf. suite).

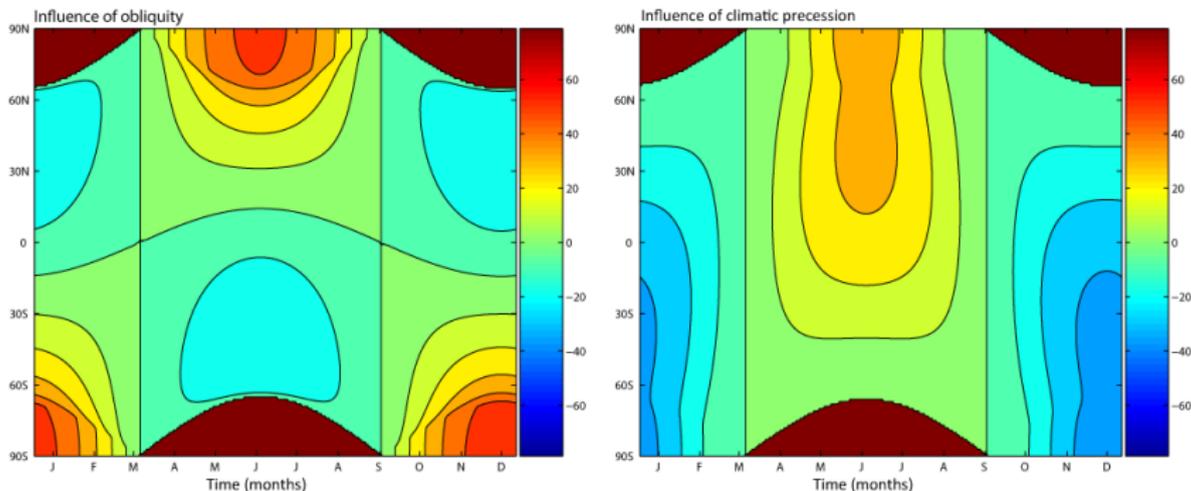


Source : IPCC AR5 (2013)  
Fig. 5.3.

# Importance de la répartition d'insolation

- ▶ Dans la configuration actuelle, les continents sont principalement situés aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord.
- ▶ L'insolation estivale vers 65 °N contrôle la présence de calottes.
  - Si faible, la neige tombée en hiver ne fond pas complètement → accumulation calotte.
  - Si forte, la fonte estivale peut excéder l'accumulation hivernale → fonte calotte.

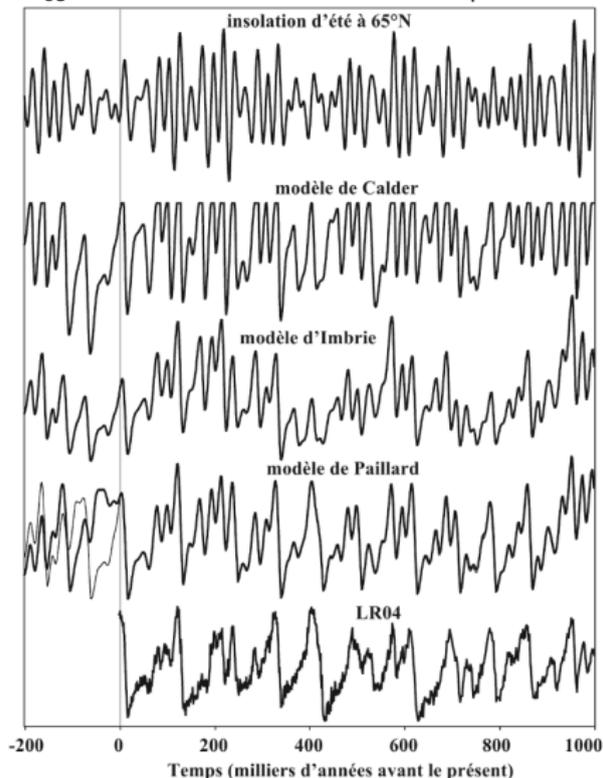
Exemple : changement d'insolation dû à un changement d'obliquité ou de précession



Source : Goose et al. [online](#) textbook. Unités : W.m<sup>-2</sup>. Obliquité : passage de 22 ° à 24.5 °.  
Précession : passage du min (hiver boréal au périhélie) au max (été boréal au périhélie).

# Importance de la répartition d'insolation – Modèles à seuils

$I_{65}$  et  $V$  modélisé + reconstruit par  $\delta^{18}\text{O}$



**Attention :** temps de droite à gauche.

Le lien entre  $I_{65}$  et le  $V$  de calottes peut être reproduit par des modèles simples à seuils.

Ex. modèle de Calder (1974) :

$$\frac{dV}{dt} = \begin{cases} -k_A(I - I_0) & \text{si } I < I_0 \text{ (accum.)} \\ -k_F(I - I_0) & \text{si } I > I_0 \text{ (fonte)} \end{cases}$$

Ex. modèle de Paillard (1998) :

$$\frac{dV}{dt} = \begin{cases} F_g(I) + \frac{1}{\tau_g}(V_G - V) & \text{si } V > V_g \text{ (glacial)} \\ F_i(I) - \frac{1}{\tau_i}V & \text{si } V < V_g \text{ (inter-g.)} \end{cases}$$

—

Source : Chapitre 7 de [Paléoclimatologie, Enquête sur les climats anciens II](#), D. Paillard.

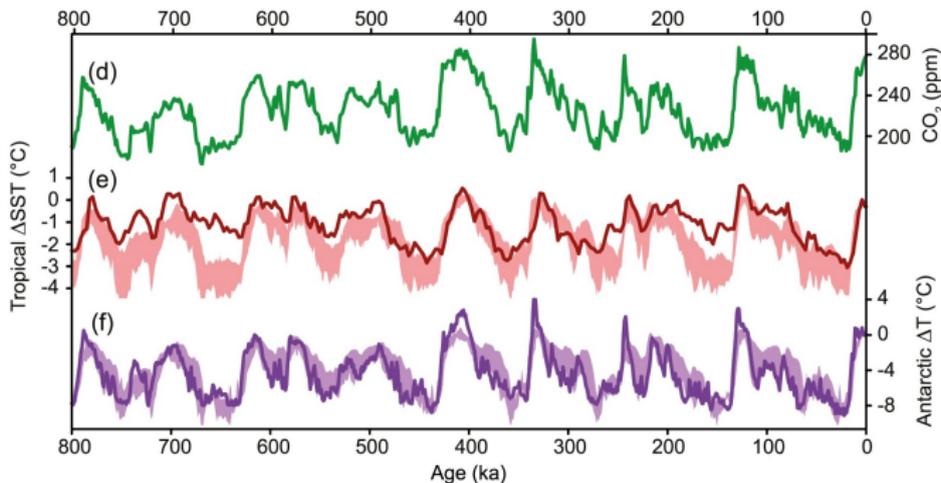
# Importance du cycle du carbone

- Variations  $\text{CO}_2$  et  $T$  globalement synchrones.

[ $\text{CO}_2$ ] entre 180 ppm aux périodes glaciaires et 280 ppm aux inter-glaciaires.

- Co-variabilité\* en partie liée à la solubilité du  $\text{CO}_2$  ( $\partial_T s < 0$ ) et à la photosynthèse (transport nutriments continentaux accru en période froide).

→ **Cycles g-ig = cycles astronomiques + cycle du carbone océanique.**



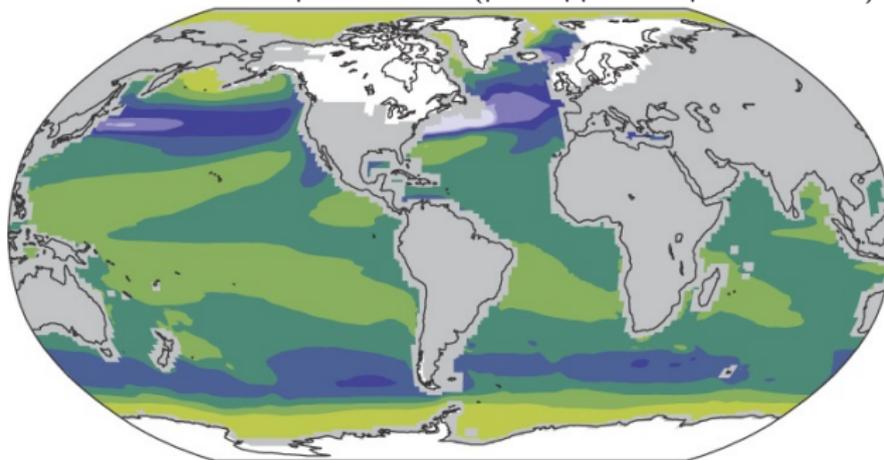
Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Fig. 5.3.

\* Mécanismes géologiques trop lents pour expliquer cette co-variabilité.

# Zoom sur le Dernier Maximum Glaciaire (LGM, 21 ka)

- ▶ Calottes Laurentide & Fennoscandienne.
- ▶  $\sim -120$  m de niveau marin (Bering ou Manche à pied).
- ▶  $\sim -4$  à  $-7$  K de  $\Delta T$  global (plus fort aux hautes latitudes).

$\Delta T$  à 21 ka simulé par 5 GCMs (par rapport au pré-industriel)

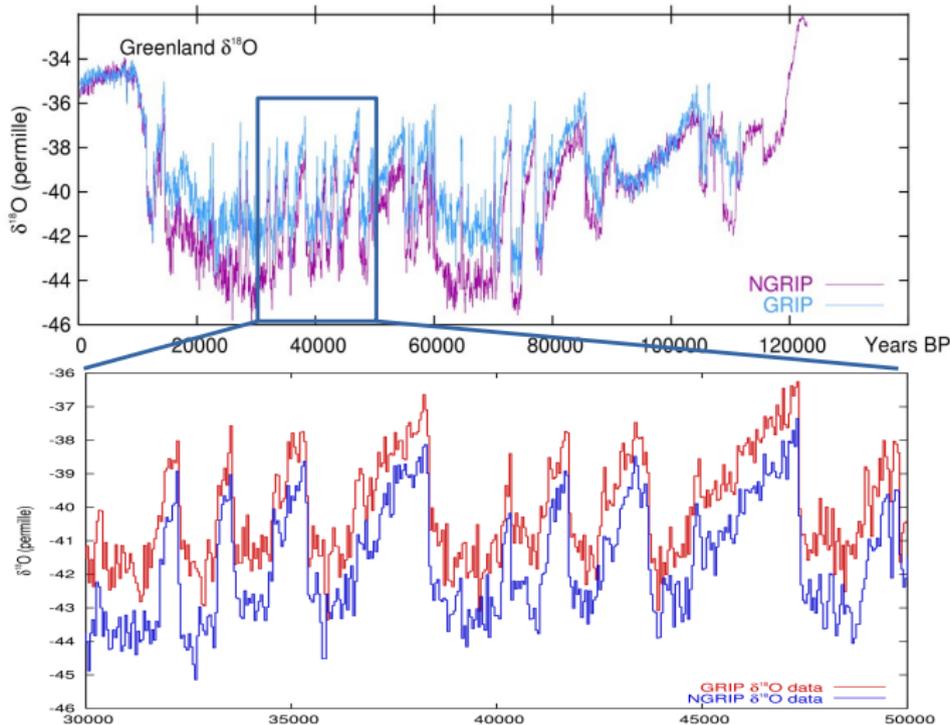


Sea Surface Temperature Change ( $^{\circ}\text{C}$ )

Adapté de l'IPCC AR4 (2007) Fig. 6.5.

# Variabilité rapide en période glaciaire - 1/2

- ▶ Présence de **variabilité rapide** (<1 ka) dans les carottes groenlandaises.



Source : [Wikipédia](#) à partir des données [GRIP](#) et [NGRIP](#).

**Attention** : temps de droite à gauche.

## Variabilité rapide en période glaciaire – 2/2

- ▶ Dominée par les événements de **Dansgaard-Oeschger**.
  - Réchauffement abrupt (qq K en qq 10 a au Groenland) suivi d'un refroidissement plus lent (qq 100 a).
  - 25 événements DO répertoriés sur la dernière période glaciaire ( $\delta^{18}\text{O}$ ).
  - Origine dynamique océanique (intensification / ralentissement THC en Atlantique Nord), mais contributions interne vs. forcée encore débattues.
  
- ▶ Les événements DO peuvent intégrer des événements de **Heinrich**.
  - Débâcles massives d'icebergs (*binge purges*) dans l'Atlantique Nord.
  - Associés à un ralentissement de la THC et un refroidissement global.
  - 6 événements H répertoriés sur la dernière période glaciaire (sédiments).
  - Possiblement à l'origine du **Dryas Récent**, refroidissement global de 13 à 12 ka pendant la dernière déglaciation.

—  
À lire : Chapitre 8 de [Paléoclimatologie, Enquête sur les climats anciens II](#), M. Kageyama, D. Roche.

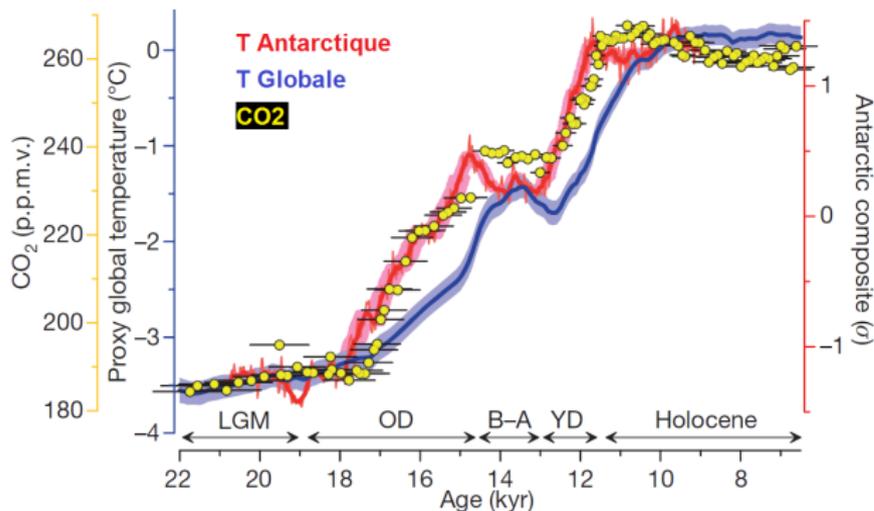
# Zoom sur la dernière déglaciation

Question : le CO<sub>2</sub> précède-t-il ou suit-il la température ?

Réponse : les deux !

Mécanisme proposé pour la dernière déglaciation :

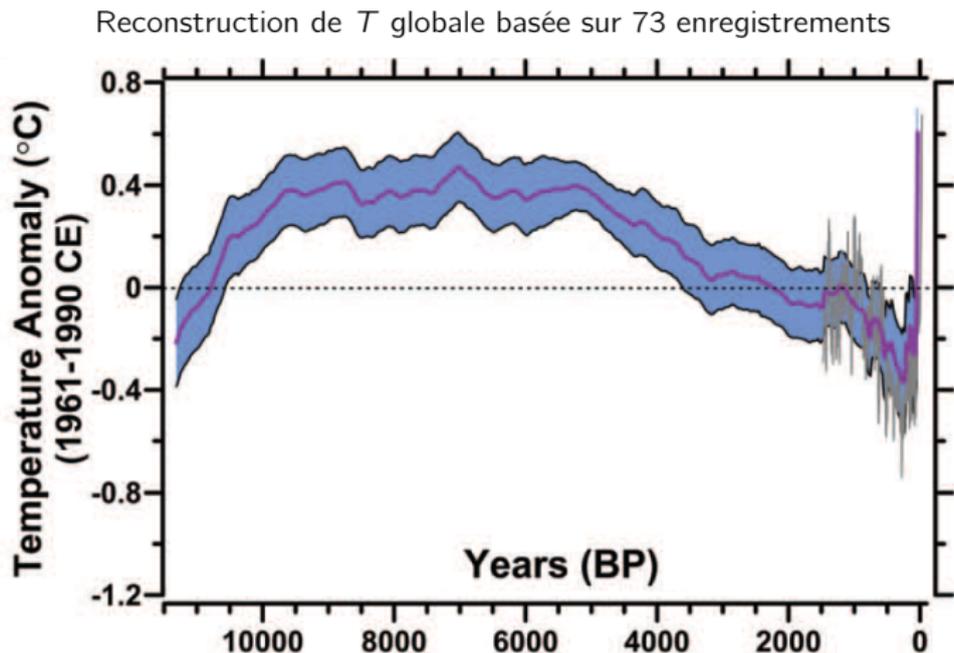
1. Initiation réchauffement NH par insolation, fonte calotte.
2. Ralentissement de la THC dans l'Atlantique Nord et arrêt réchauffement NH.
3. Réchauffement poursuivi au SH et augmentation [CO<sub>2</sub>] (solubilité).
4. Reprise du réchauffement NH en réponse au CO<sub>2</sub>



Adapté de  
Shakun et al. (2012).

## Zoom sur l'Holocène (11 – 0 ka)

- ▶ **Maximum thermique** entre 9 et 6 ka (forte insolation été NH) puis **refroidissement** (0.7 K en 6 ka) et affaiblissement **moussons** (Sahara à 4 ka) .
- ▶ Peu de **variabilité** rapide relativement aux époques glaciaires.



Source : Marcott et al. (2013).

Précambrien (4.55 Ga – 542 Ma)

Phanérozoïque (542 – 0 Ma)

Zoom sur le dernier million d'années

Zoom sur le dernier millénaire

# Encore de nouvelles sources de données

**Données biologiques** : composition isotopique de troncs d'arbres ou largeur de leurs cernes (*dendrochronologie*), pollens (info. végétation).

**Données historiques** : relevés météorologiques dans les *livres de raison*, archives administratives, dates de vendange, de moisson etc.

**Mesures directes** : invention du thermomètre (Galilée 1624, Fahrenheit 1717, Celsius 1741), et du baromètre (Torricelli 1644).

Cernes d'arbre



Photo de l'UPMC.

Relevé météo

Day	hour.	Thermom.	day	A. m.	°
1.	9-0 A.M.	84½	9	5-30 A.M.	75
	7- P.M.	82.		9	77½
2.	6. A.M.	78.		6-30 P.M.	81½
	9-40 A.M.	78		9-45	78.
	9. P.M.	74	10.	8. A.M.	75.
3.	5-30 A.M.	71½		9-15.	76½
	1-30 P.M.	76		2-8 P.M.	80.
	8-10	74.		4-45	82.

Photo du NCDC.

Ban de vendange

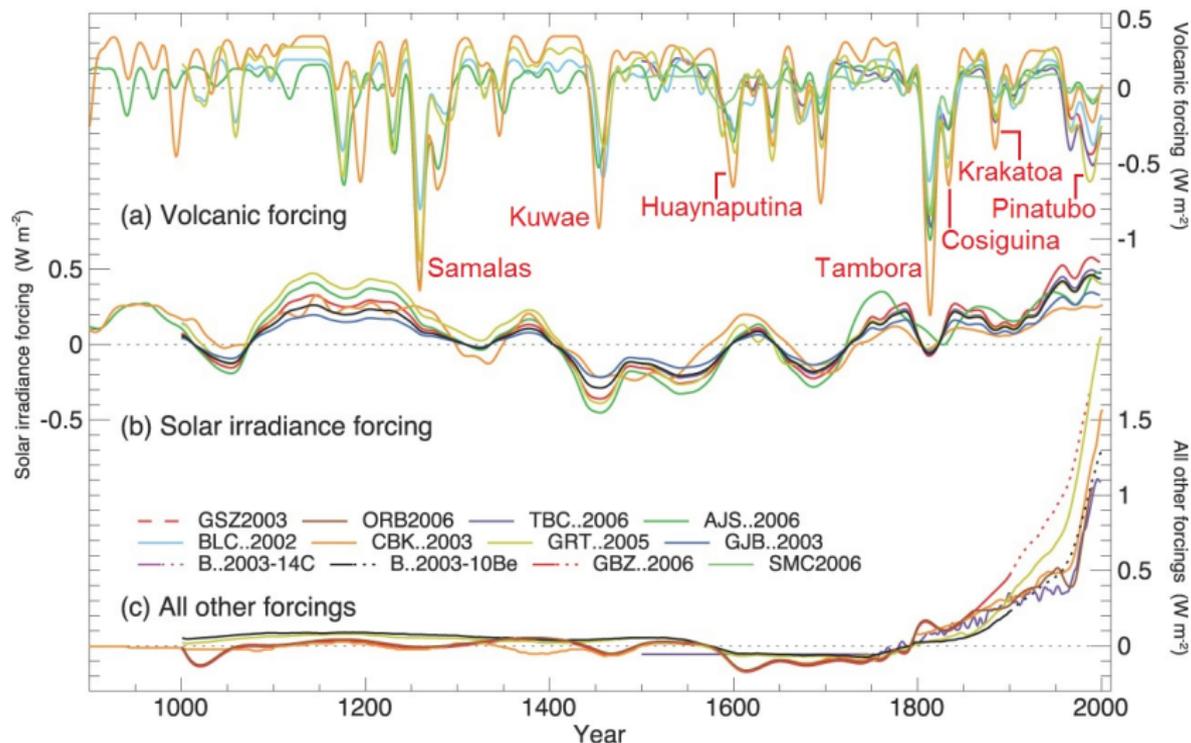


Source : [Wikipédia](#).

# Reconstruction des forçages

► A cette échelle : **irradiance solaire** et **aérosols volcaniques**.

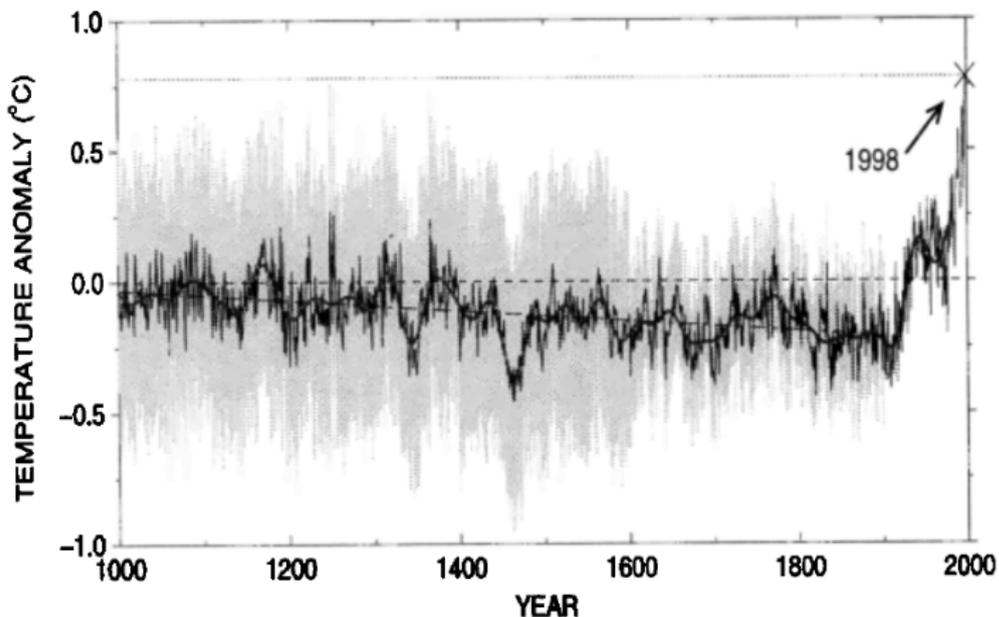
Analyse isotopique et mesure de poussières dans les carottes de glace.



Adapté de l'IPCC AR4 (2007) Fig. 6.13.

# Température : la fameuse crosse de hockey

Une des premières reconstructions de  $T$  NH



Source : Mann et al. (1999).



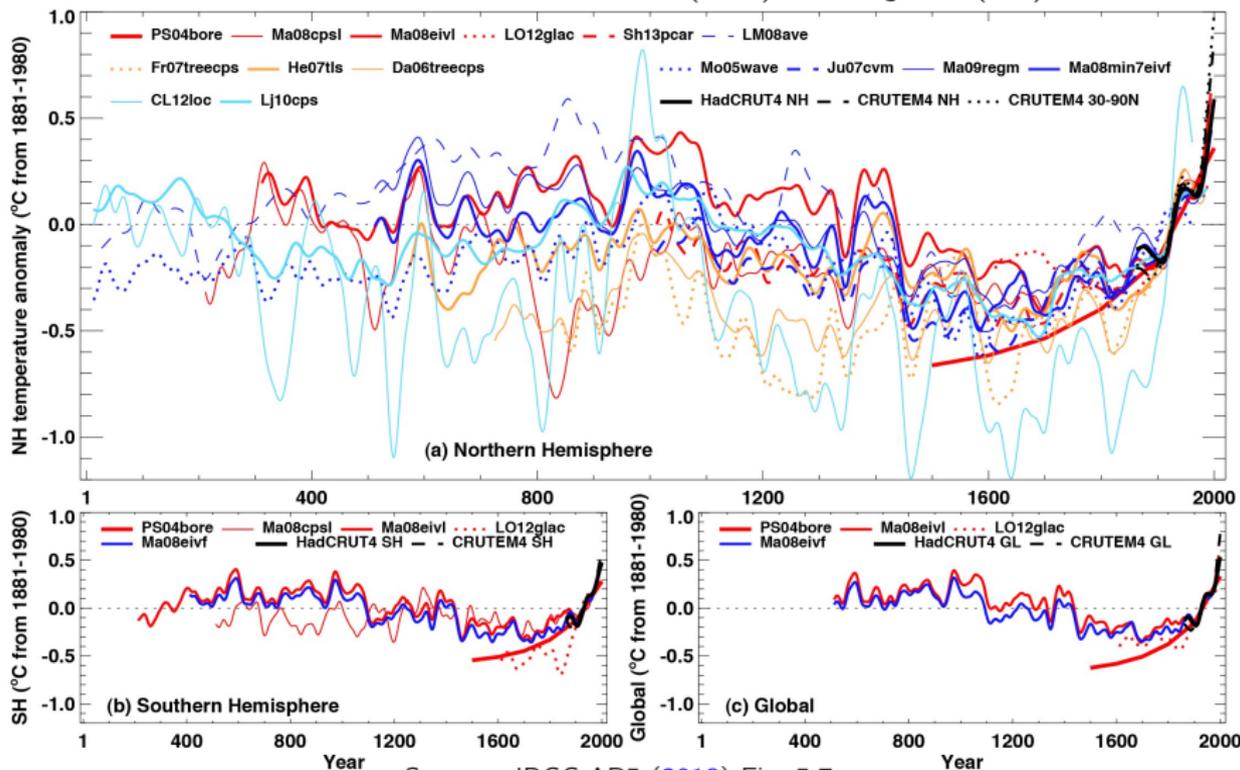
M. Mann  
(Penn State U).

À lire (si vous n'avez rien d'autre à faire) : [The Hockey Stick Controversy](#), sur Wikipédia.

# La crose de hockey revisitée

- ▶ Optimum Médiéval (vers l'an Mil) et Petit Âge Glaciaire (vers 1700).

Reconstructions récentes de  $T$  NH (haut), SH et global (bas)



Source : IPCC AR5 (2013) Fig. 5.7.

# Résumé Phanérozoïque

Selon l'échelle de temps, étude du climat Phanérozoïque via des données géologiques, isotopiques, glaciaires, biologiques, voire historiques.

+ Apport de la modélisation à toutes les échelles.

Depuis 542 Ma, 3 périodes de glaciation, dont l'actuelle (depuis 40 Ma).

Dernier Ma : cycles glaciaires (90 ka) - inter-glaciaires (10 ka, actuel).

Dernier 10 ka : refroidissement progressif de l'Holocène.

Dernier 1000 a : Optimum Médiéval & Petit Âge Glaciaire (surtout NH).

Dernier 100 a : réchauffement global anthropique (cf. suite du cours).

—

À retenir : les forçages climatiques dépendent de l'échelle de temps !

- qq Ma : cycle du carbone géologique et tectonique ;
- qq ka : cycles astronomiques et cycle du carbone océanique ;
- qq 10 a : éruptions volcaniques et activité solaire.

# Références I

- ▶ A. Berger, *Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes*, J. Atmos. Sci. **35** (1978), no. 12, 2362–2367.
- ▶ Y. Donnadieu, Y. Goddérès, G. Ramstein, A. Nédélec, and J. Meert, *A snowball Earth climate triggered by continental break-up through changes in runoff*, Nature **428** (2004), no. 6980, 303–306.
- ▶ D.A.D. Evans, *A fundamental Precambrian–Phanerozoic shift in earth's glacial style?*, Tectonophysics **375** (2003), no. 1, 353–385.
- ▶ P.F. Hoffman and D.P. Schrag, *The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change*, Terra nova **14** (2002), no. 3, 129–155.
- ▶ J. Jouzel, R.B. Alley, K.M. Cuffey, W. Dansgaard, P. Grootes, G. Hoffmann, S.J. Johnsen, R.D. Koster, D. Peel, C.A. Shuman, M. Stievenard, M. Stuiver, and J. White, *Validity of the temperature reconstruction from water isotopes in ice cores*, J. Geophys. Res. **102** (1997), no. C12, 26471–26487.
- ▶ J.L. Kirschvink, *Late Proterozoic low-latitude global glaciation: the snowball Earth*.
- ▶ J.F. Kasting and S. Ono, *Palaeoclimates: the first two billion years*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences **361** (2006), no. 1470, 917–929.
- ▶ M.E. Mann, R.S. Bradley, and M.K. Hughes, *Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations*, Geophys. Res. Lett. **26** (1999), no. 6, 759–762.
- ▶ S.A. Marcott, J.D. Shakun, P.U. Clark, and A.C. Mix, *A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years*, Science **339** (2013), no. 6124, 1198–1201.
- ▶ D.L. Royer, *CO<sub>2</sub>-forced climate thresholds during the Phanerozoic*, Geochimica et Cosmochimica Acta **70** (2006), no. 23, 5665 – 5675, A Special Issue Dedicated to Robert A. Berner.

## Références II

- ▶ J.D. Shakun, P.U. Clark, F. He, S.A. Marcott, A.C. Mix, Z. Liu, B. Otto-Bliesner, A. Schmittner, and E. Bard, *Global warming preceded by increasing carbon dioxide concentrations during the last deglaciation*, *Nature* **484** (2012), no. 7392, 49–54.
- ▶ T.H. Torsvik, *The Rodinia jigsaw puzzle*, *Science* **300** (2003), no. 5624, 1379–1381.
- ▶ J. Veizer, D. Ala, K. Azmy, P. Bruckschen, D. Buhl, F. Bruhn, G.A.F. Carden, A. Diener, S. Ebner, Y. Godderis, et al.,  *$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  evolution of Phanerozoic seawater*, *Chemical geology* **161** (1999), no. 1, 59–88.
- ▶ J.C. Zachos, G.R. Dickens, and R.E. Zeebe, *An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics*, *Nature* **451** (2008), no. 7176, 279–283.
- ▶ R.E. Zeebe and J.C. Zachos, *Long-term legacy of massive carbon input to the Earth system: Anthropocene versus Eocene*, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **371** (2013), no. 2001.