

"Climats passés et  
climatostratigraphie :  
quand Physique, Chimie &  
Sciences de la Vie et de la  
Terre sont indissociables"

Frédérique EYNAUD

Maître de conférences  
Laboratoire EPOC

**EPOC**

Université de Bordeaux

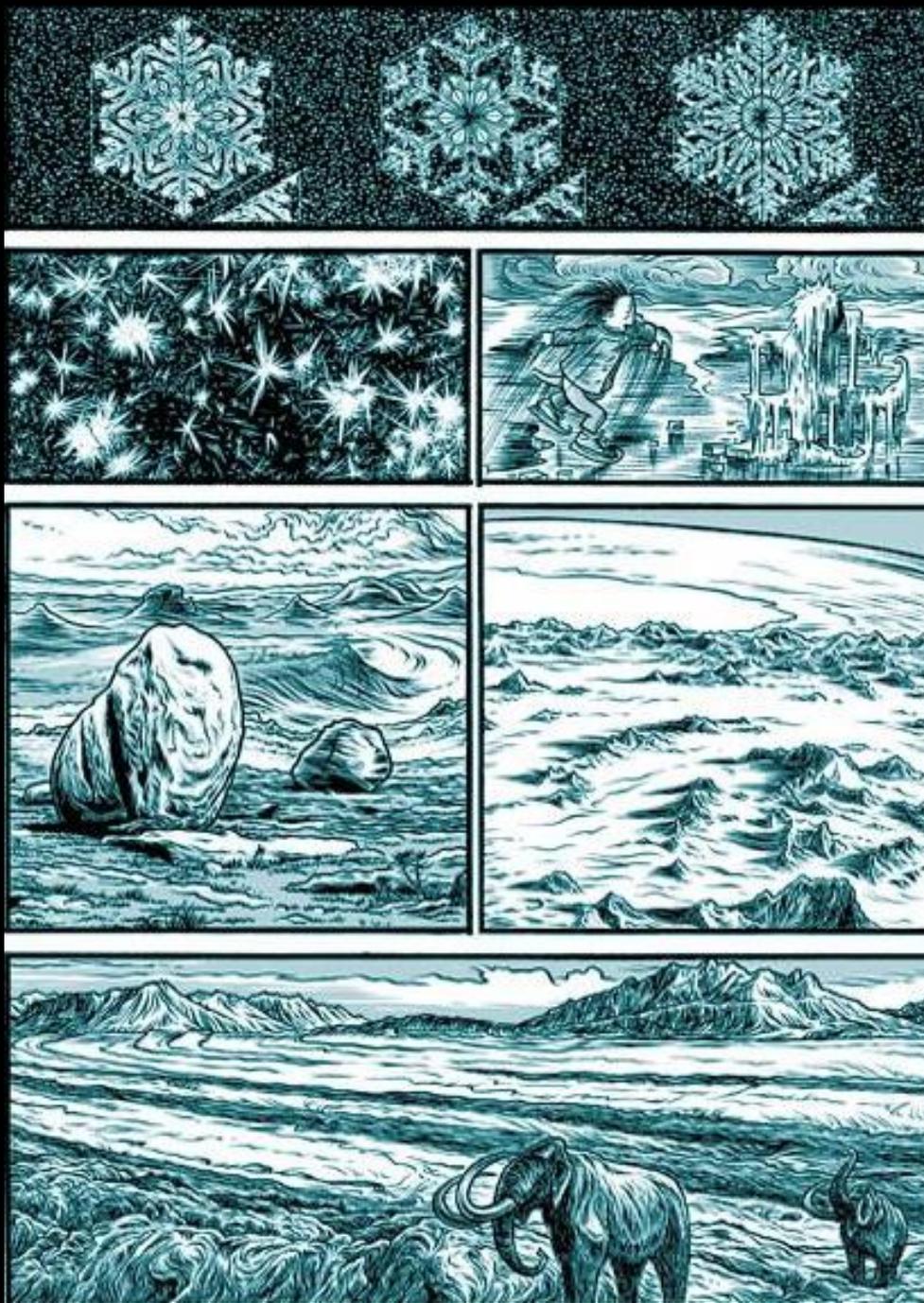
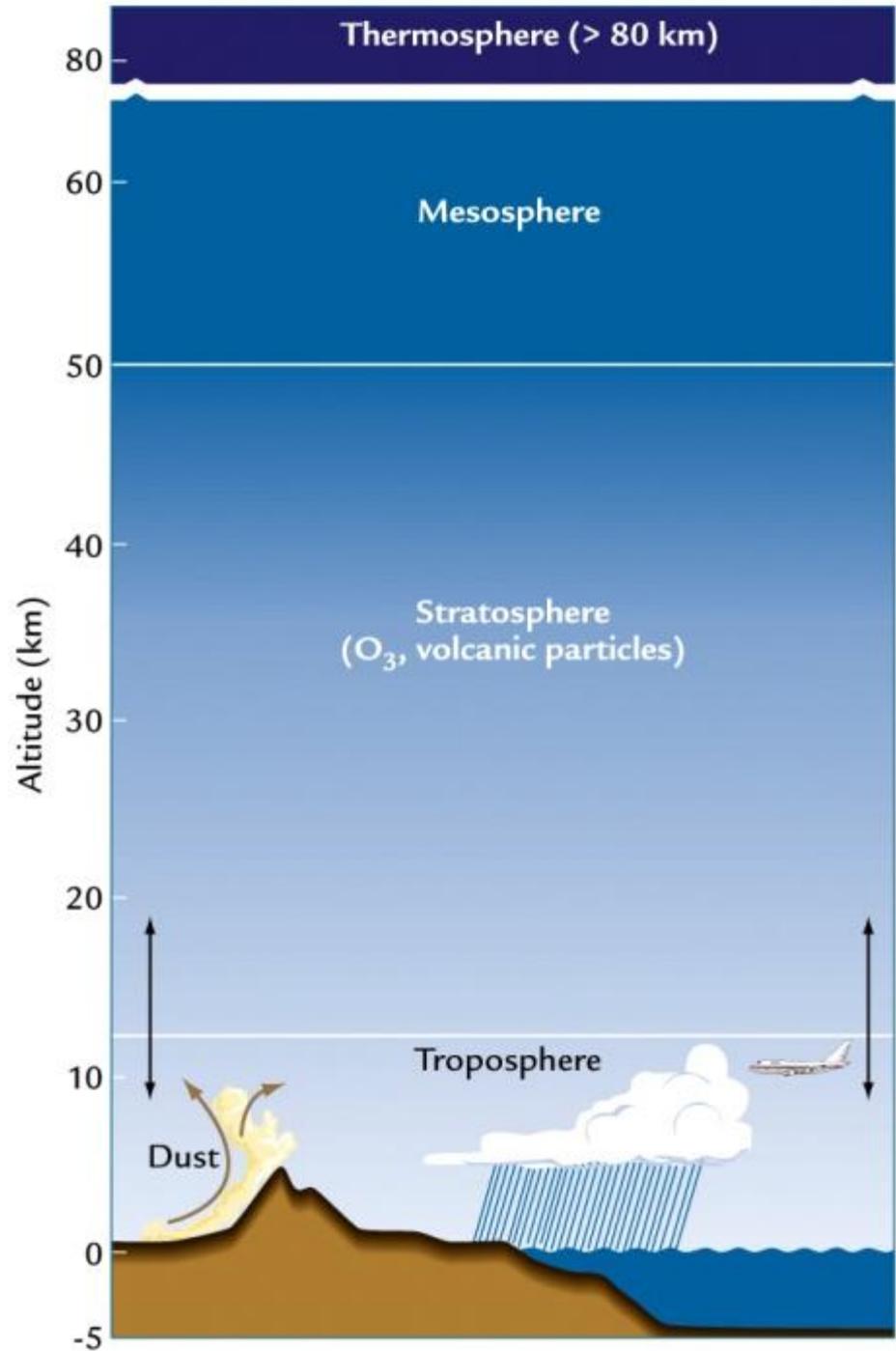


Image extraite de l'album « Alpha... Directions » de Jens Harder; ACTE SUD, L'AN 2

- 1. Du climat à la climatostratigraphie**
- 2. Les archives climatiques : quels documents pour quelles interprétations ?**
- 3. Pourquoi remonter le temps ?**

# Climat ?

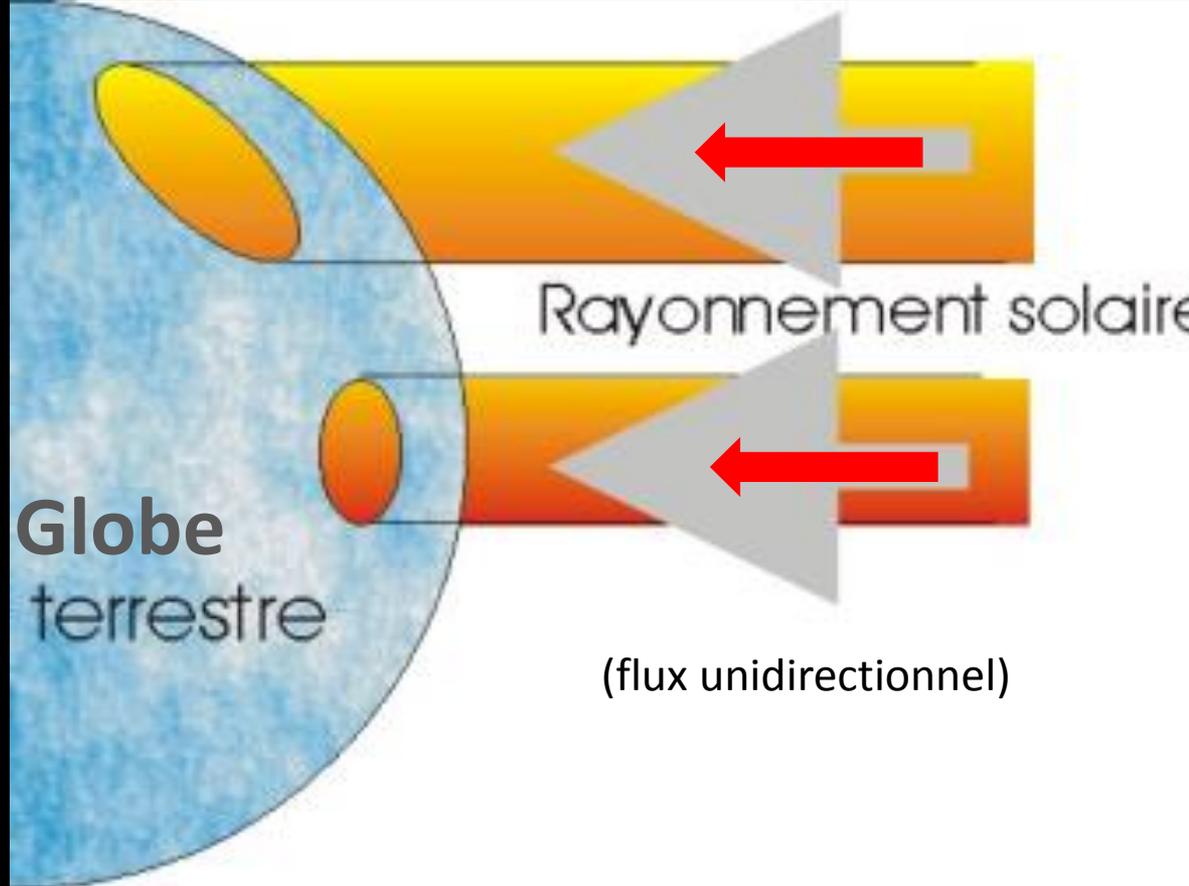
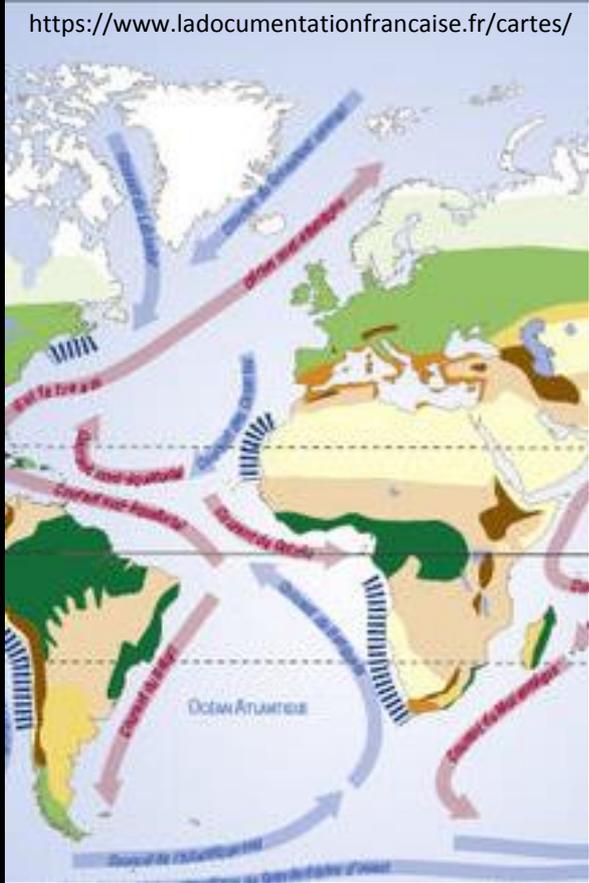
=> ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère (troposphère) en un lieu donné



# Climat ?

POLAIRE TEMPERE TROPICAL EQUATORIAL TROPICAL TEMPERE POLAIRE

<https://www.ladocumentationfrancaise.fr/cartes/>



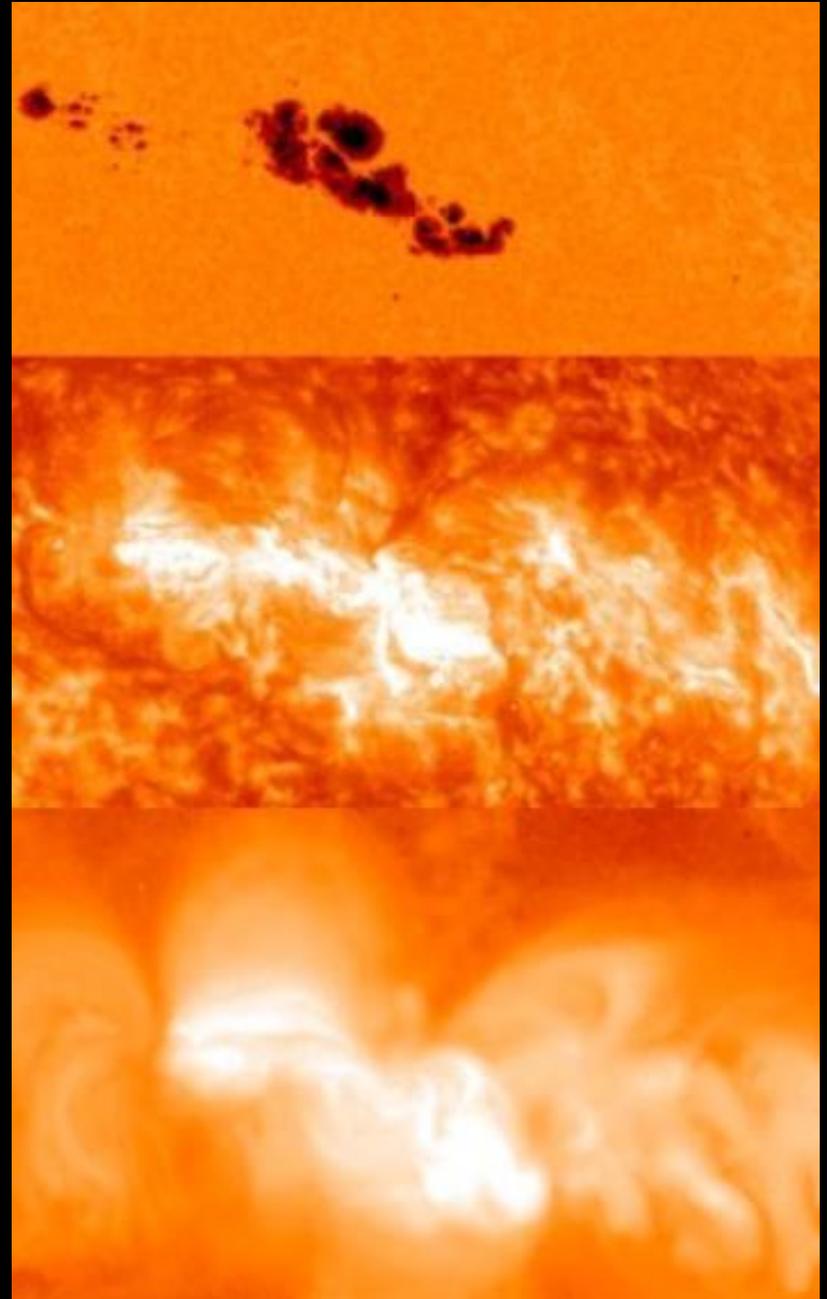
= notion géographique des climats, i.e. angle d'incidence rayons solaires => ceintures climatiques, modulées par les effets locaux (orogéniques, mers ...)

Climat ?

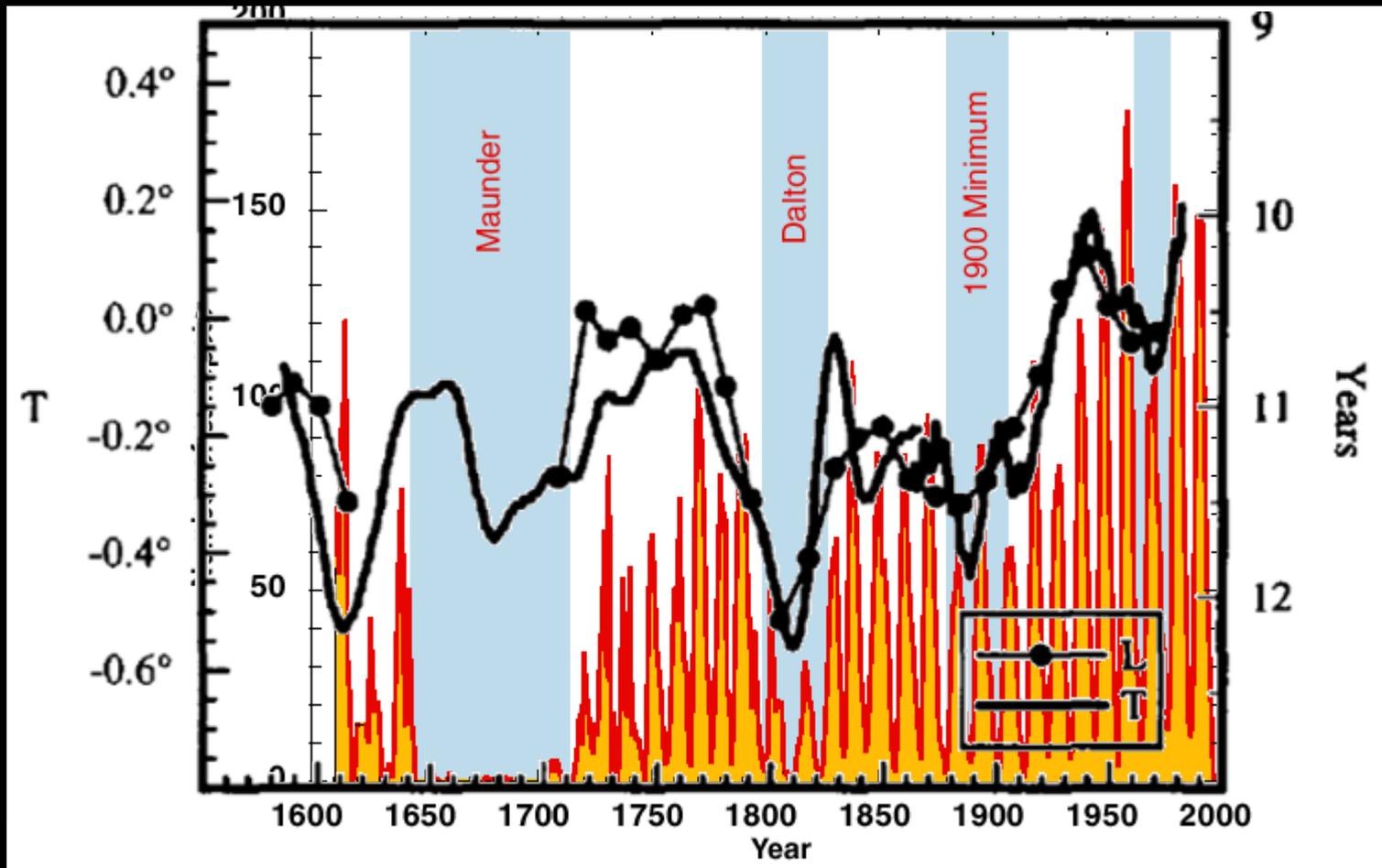
⇒ Bilan radiatif et  
rayonnement  
solaire ?

👉 ne pas  
confondre  
**ACTIVITE SOLAIRE**  
et **INSOLATION**

**CYCLES D'ACTIVITE SOLAIRES**



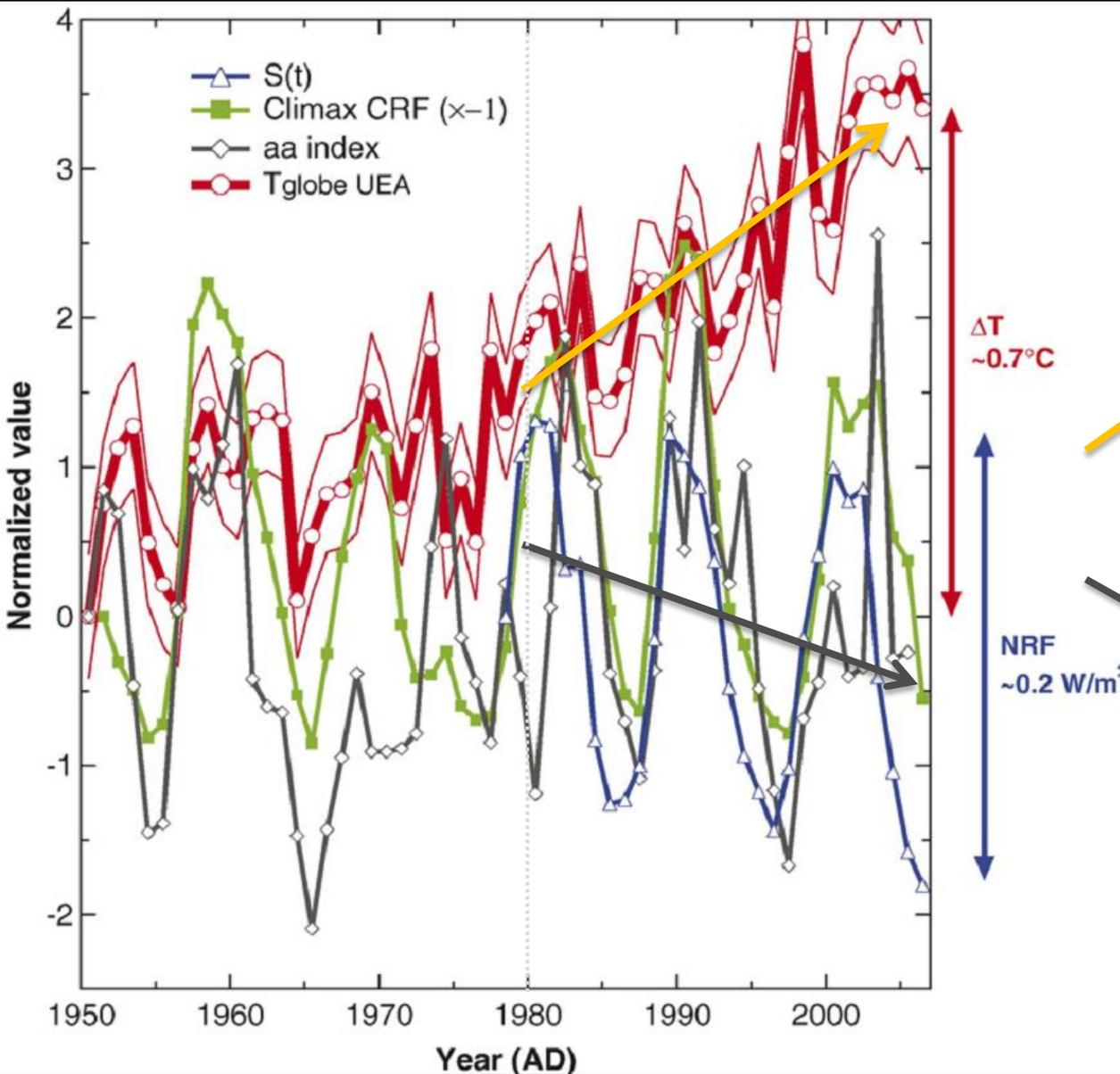
# CYCLES D'ACTIVITE SOLAIRES (depuis le 17<sup>ème</sup>)



**Corrélation des cycles d'activité solaire aux températures moyennes de l'hémisphère nord (sur 11 ans, T)**

(modifié d'après Friis-Christensen & Svensmark, 1997, Hoty & Schatten, 1998, Beer et al., 2000)

# CYCLES D'ACTIVITE SOLAIRES



**Depuis 1980 :**  
**Hausse des indicateurs des températures atmosph. terrestres :**

Tglobe UEA = global surface temperature anomalies

**Baisse des indicateurs de l'activité solaire :**

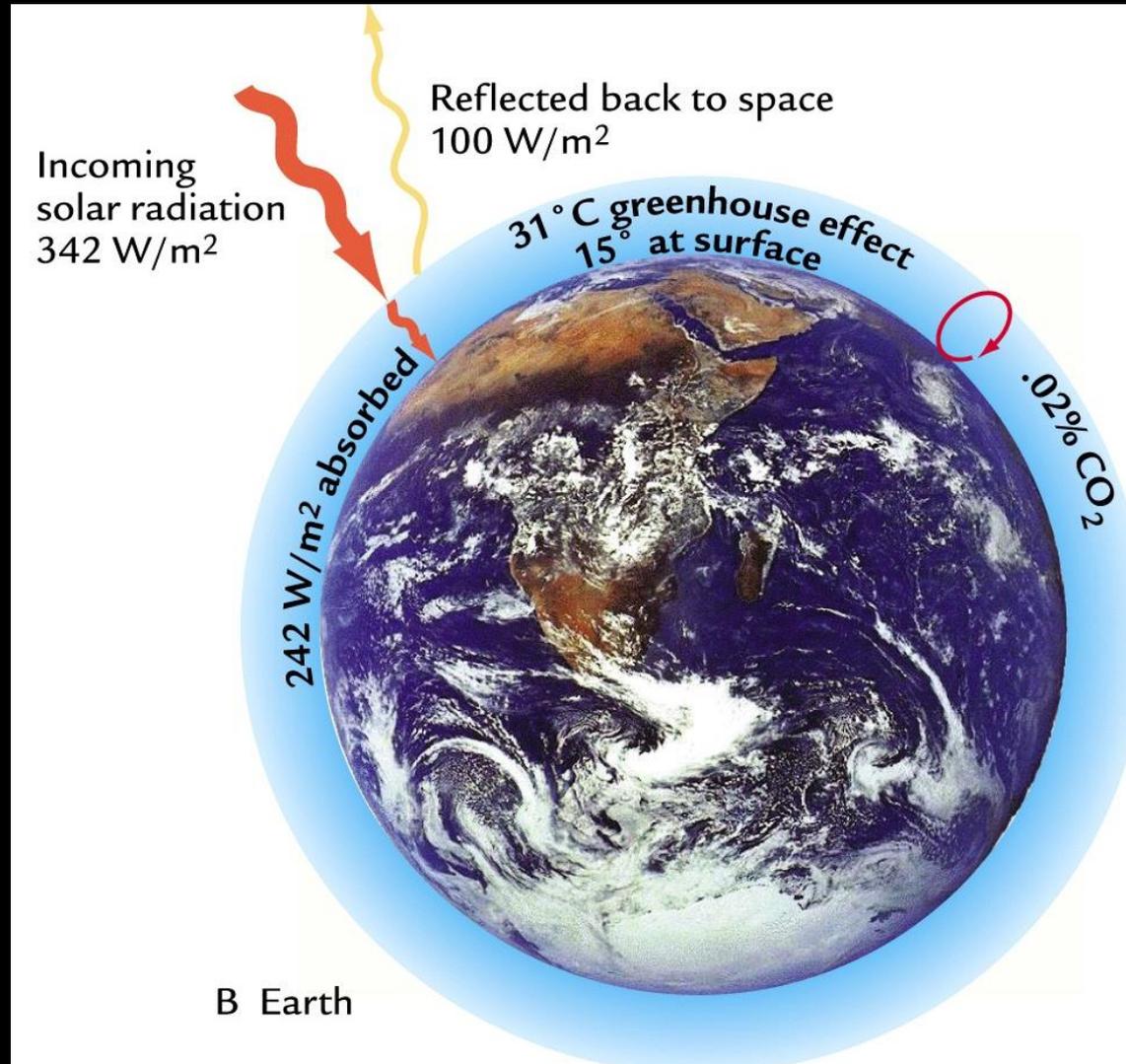
$S(t)$  = irradiance solaire totale  
Climax CRF = cosmic ray flux  
aa index = geomagnetic index

**Séries temporelles (moy. annuelle) des indices de l'activité solaire comparées aux températures globales à la surface depuis 1950. D'après Bard et Delaygue, 2007**

# CYCLES D'INSOLATION

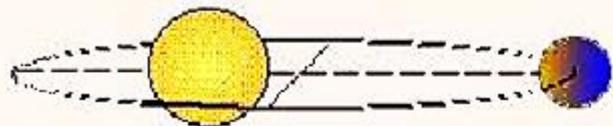
= modulés par les lois gravitationnelles (Kepler) de notre système solaire

= cycles astronomiques dits de "Milankovitch"



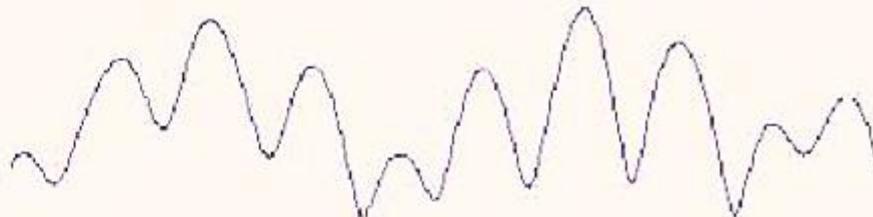
# CYCLES D'INSOLATION

Variations de l'EXCENTRICITE de l'orbite terrestre



← TEMPS (ka)

périodicités de 100 et 413 ka

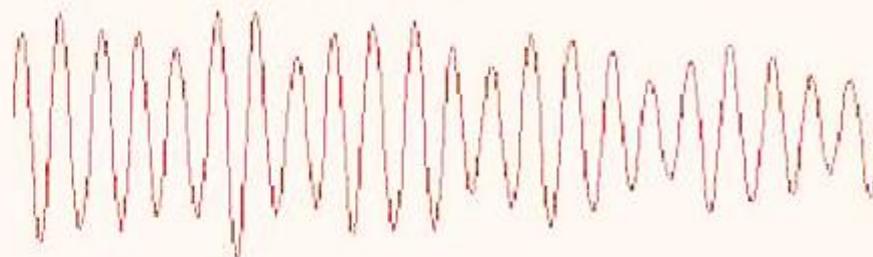


Variations de l'OBLIQUITE de l'axe de rotation

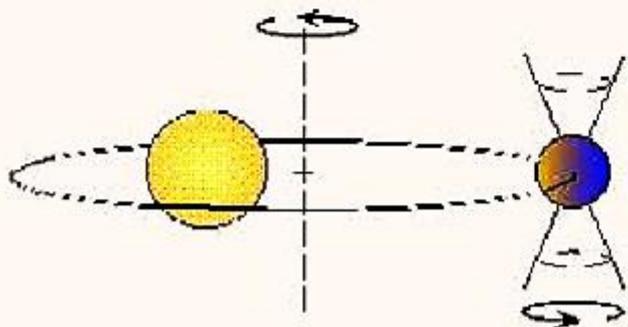


angle moyen: 23.3°

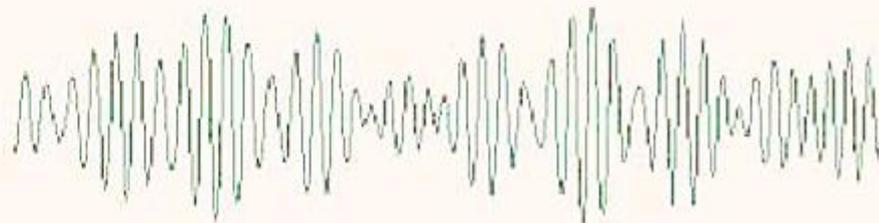
périodicité de 41 ka



PRECESSION de l'axe de rotation et ROTATION de l'orbite terrestre



périodicités de 23 et 19 ka

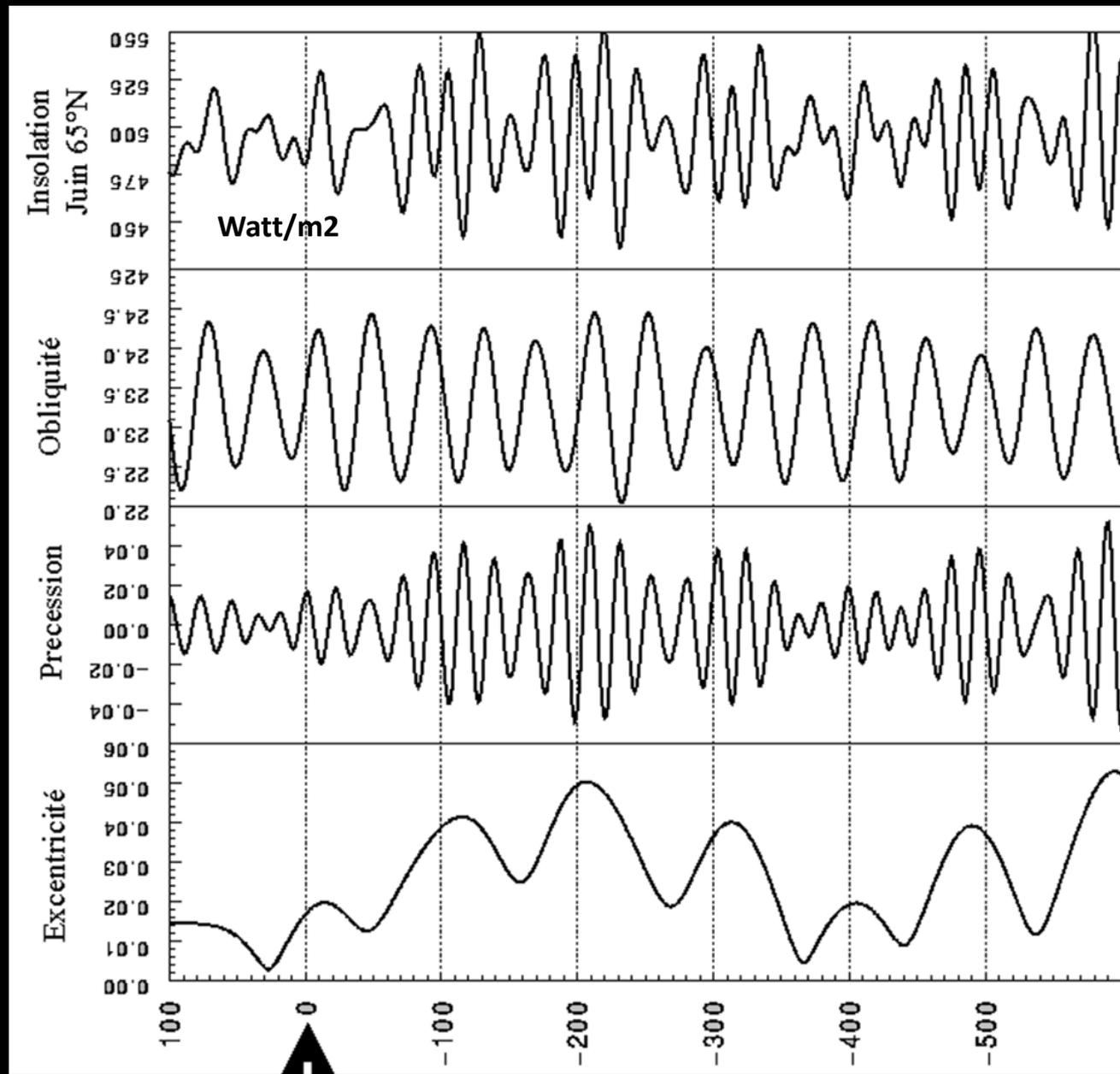


(dans Frédéric Parrenin, thèse en ligne)

# CYCLES D'INSOLATION

Les derniers  
600 000 ans  
et les futurs  
100 000 ans.

D'après  
Loutre (1996)

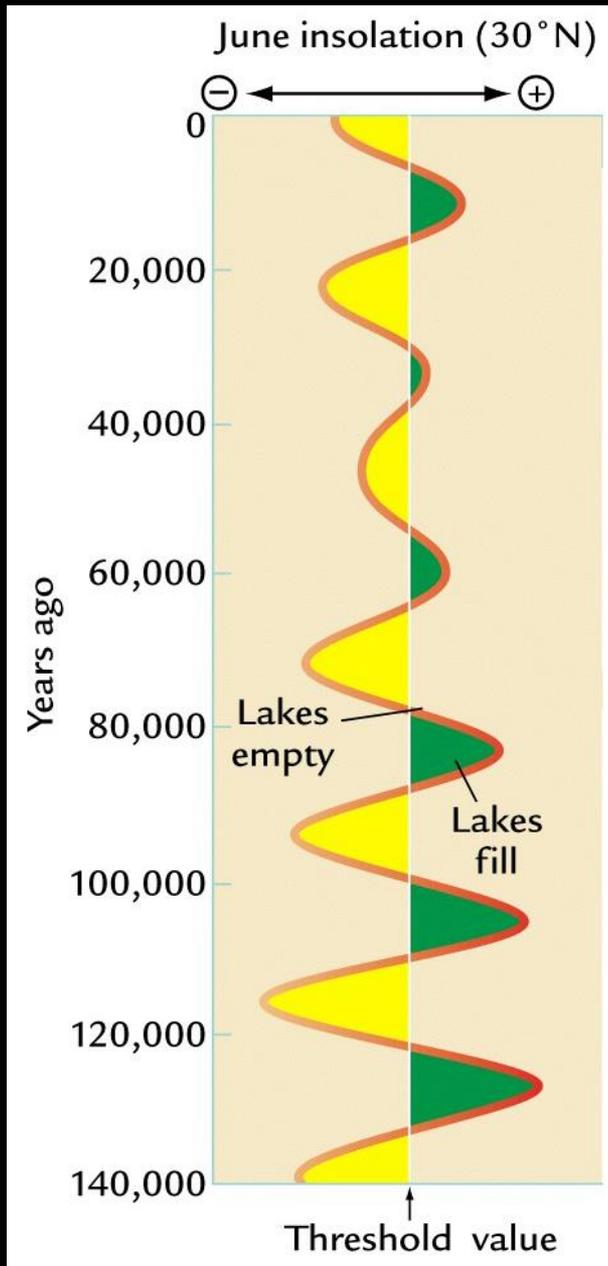


# CYCLES D'INSOLATION

⇒ base de la **climatostratigraphie** : preuve/détection de ces rythmes dans les archives terrestres



Cycles astronomiques exprimés par la lithologie  
(Pliocène de Sicile, -5 à -3 Ma)



**Exemple = sur le continent nord africain, la mousson crée des lacs tous les 23 000 ans (précession ou 1/2 obliquité)**



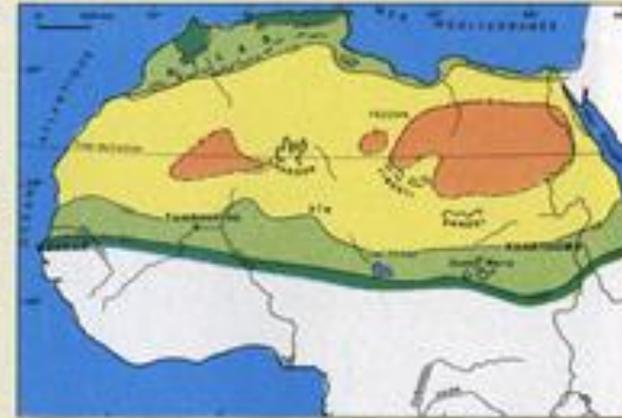
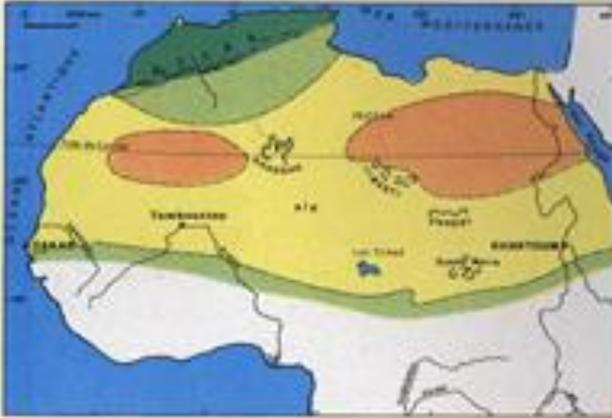
(adapté de Ruddiman, Earth's climate : past and future)

# Vie et mort des grands lacs africains

18 000 ans BP

6 000 ans BP

Aujourd'hui



■ Zone saharienne {  
    ≤ 5 mm  
    < 100 mm

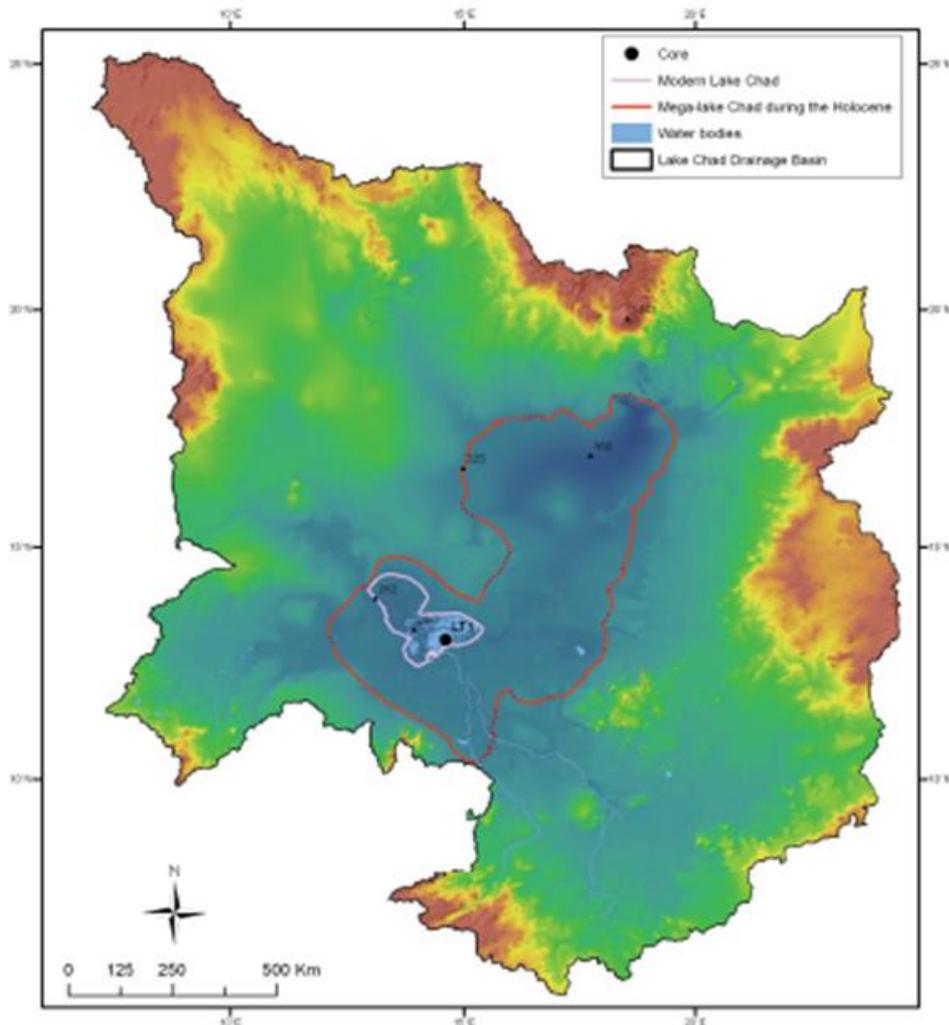
■ Zone sahélienne/méditerranéenne aride  
■ Zone soudanienne/méditerranéenne semi-aride

■ Lacs  
— Précipitations actuelles (mm)

Un cycle ?

# Vie et mort des grands lacs africains

6 000 ans BP

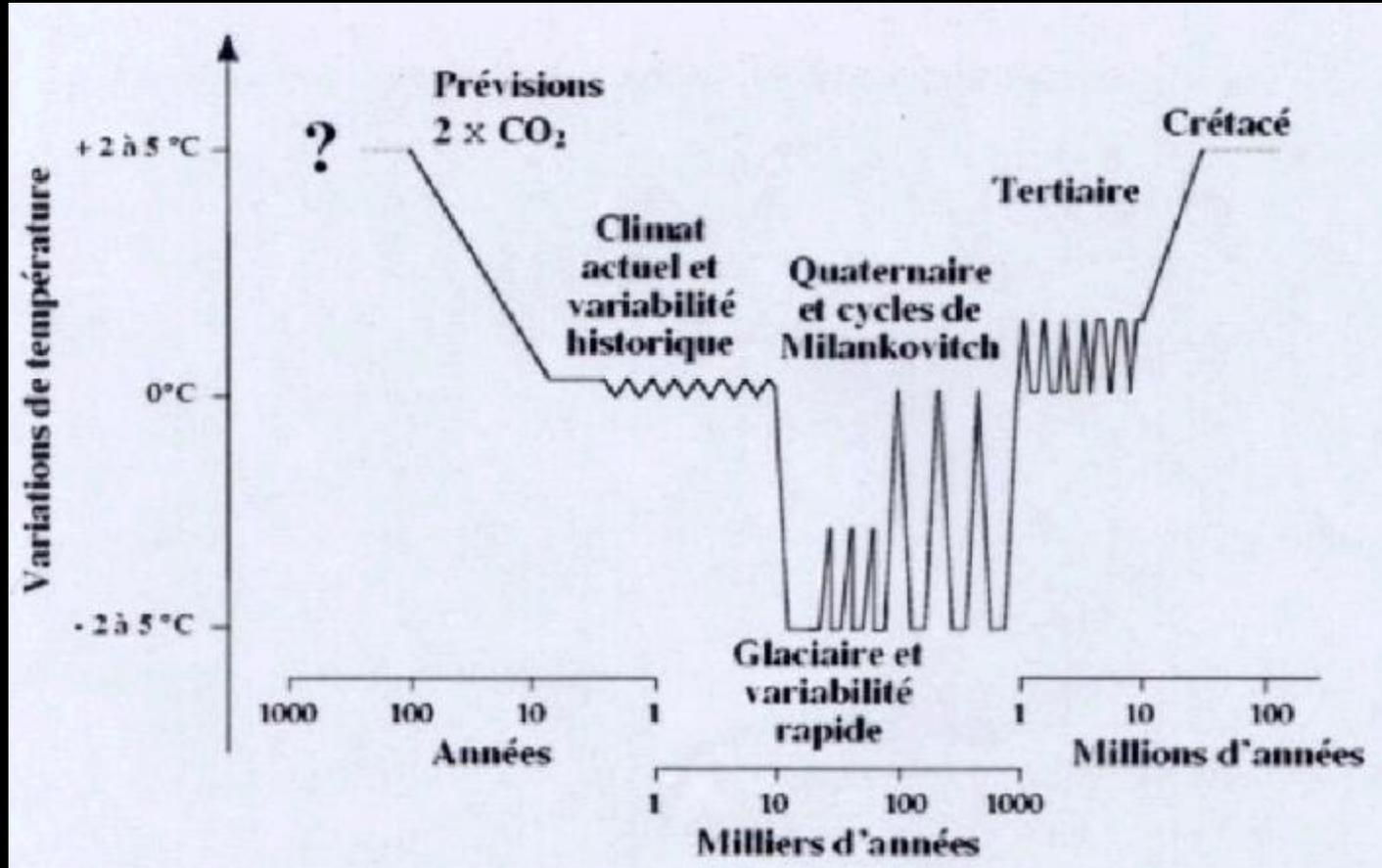


Megalac Tchad du milieu de l'Holocène

(350 000 km<sup>2</sup> contre 14 000 aujourd'hui)

Source : F. Sylvestre  
[https://www.researchgate.net/publication/295121348\\_Variabilite\\_paleo-hydrologique\\_et\\_changement\\_climatique/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/295121348_Variabilite_paleo-hydrologique_et_changement_climatique/figures?lo=1)

# Climatostratigraphie : quels modes ?



**Schéma de l'évolution du climat et de sa variabilité**

**D'après V. Masson-Delmotte, D. Paillard**

**<http://www.eduscol.education.fr/D0018/ConfClimatologie.pdf>**

**Mais où et comment  
sont enregistrés les  
indices de cette  
variabilité ?**

**1. Du climat à la climatostratigraphie**

**2. Les archives climatiques : quels documents pour quelles interprétations ?**

**3. Pourquoi remonter le temps ?**

# Les archives climatiques ?

= carottes de glaces ou de sédiments marins, cernes d'arbres, de mollusques ou de coraux ....



**Les décoder  
nécessite une  
approche  
pluridisciplinaire !**

# Les archives (stratigraphie) isotopiques

=> rattachée à la **Physique Chimie** (Chimiostratigraphie) :  
variation de ratio des isotopes stables au cours du temps

Les isotopes stables de l'oxygène

**$^{16}\text{O}$ , LEGER**

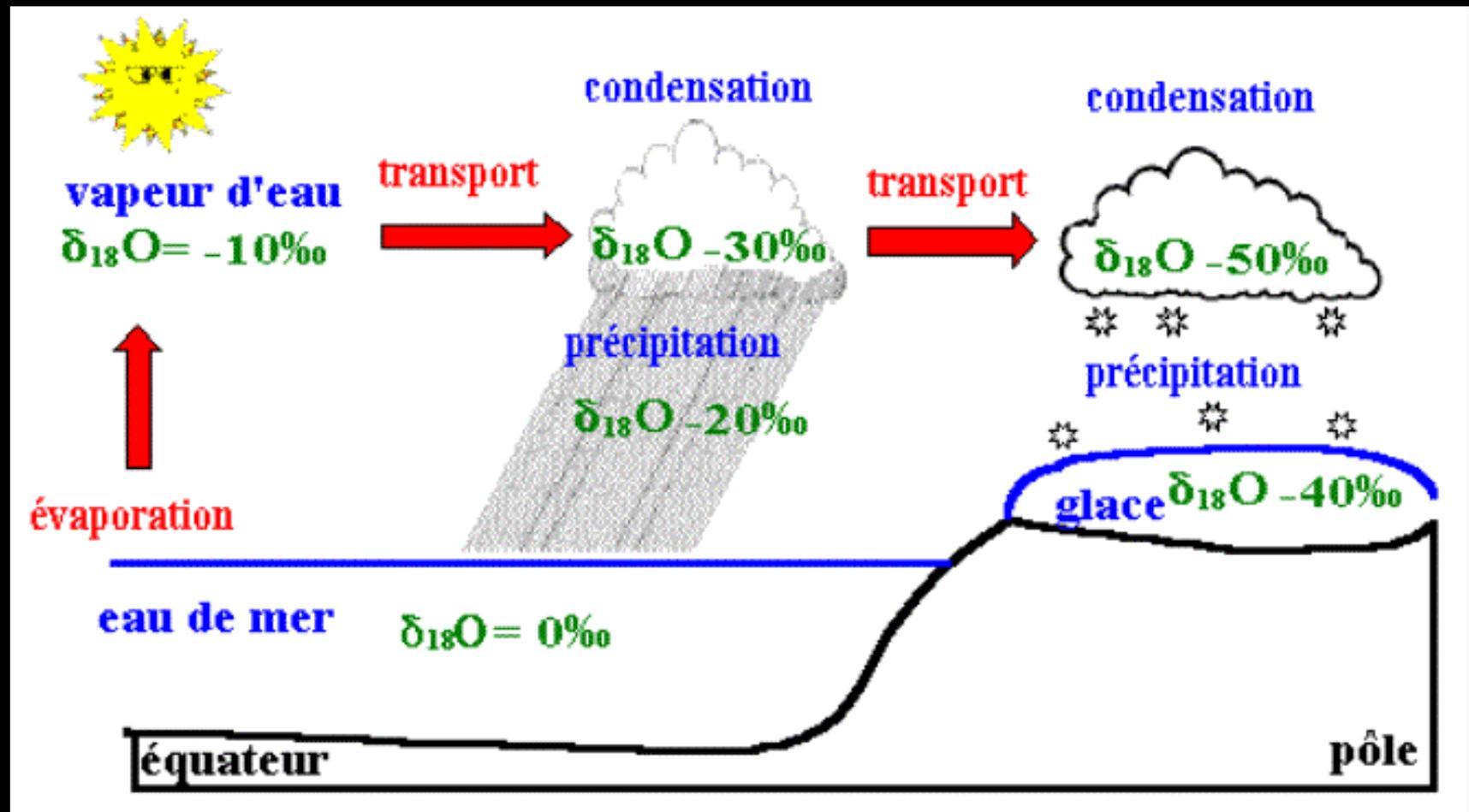
**$^{18}\text{O}$ , LOURD**

L'analyse par spectrométrie de masse des carbonates biogéniques marins permet de calculer le  $\delta^{18}\text{O}$

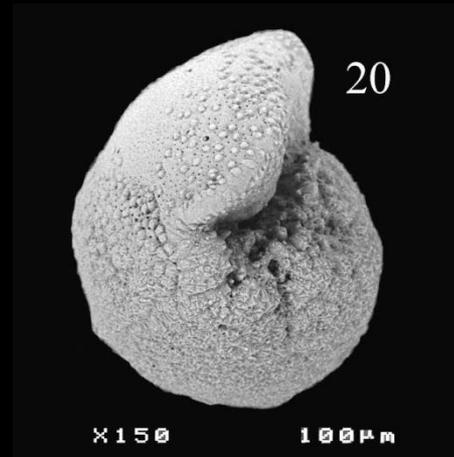
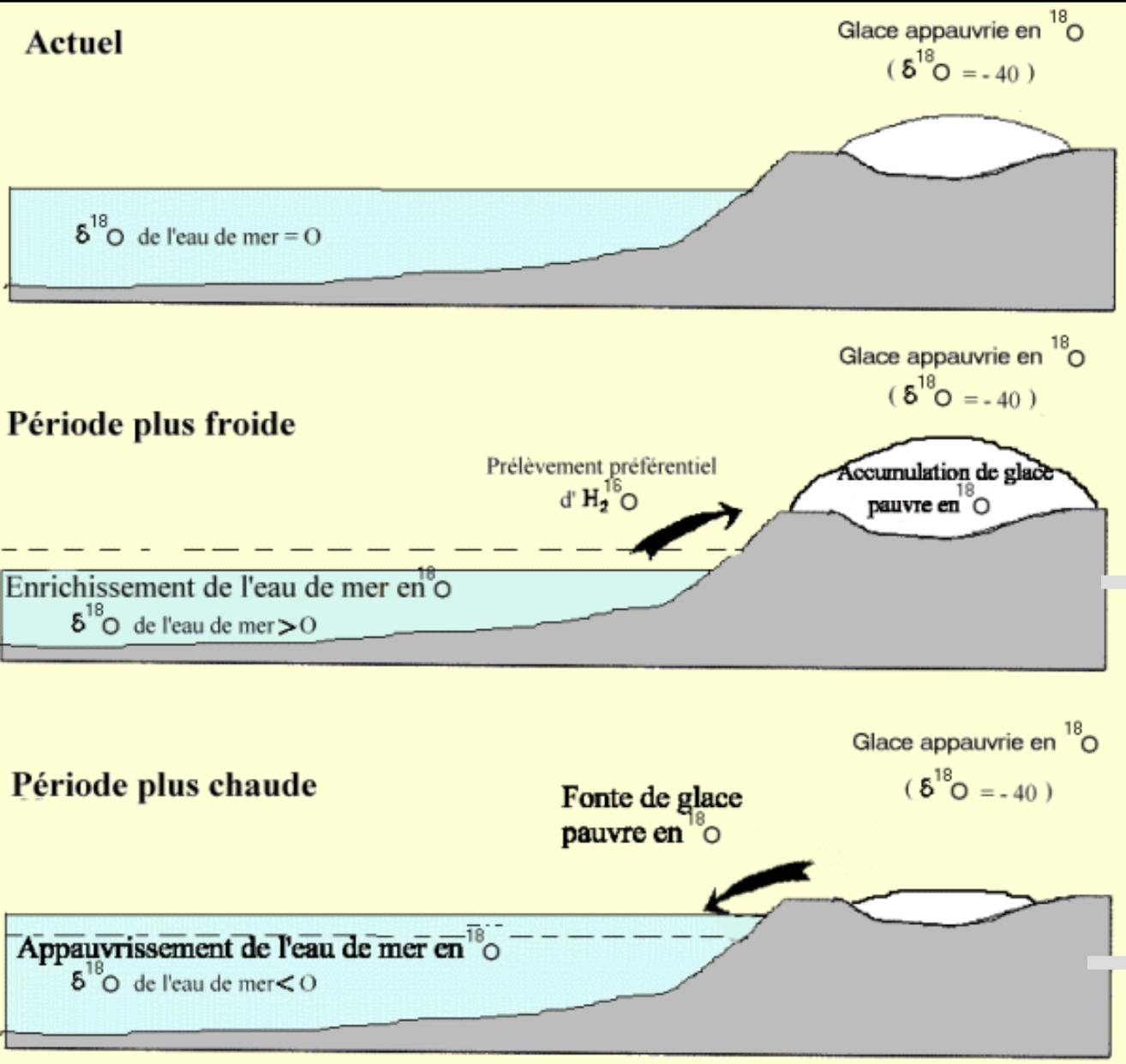
$$\delta^{18}\text{O en } \text{‰} = \left[ \frac{\left[ \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right]_{\text{échantillon}}}{\left[ \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right]_{\text{PDB}}} - 1 \right] \times 1000$$

(où le rapport  $[^{18}\text{O}/^{16}\text{O}]_{\text{PDB}}$  correspond au rapport isotopique de référence nommé "PeeDee Belemnite" : Rostre de bélemnite de la formation 'PEEDEE' aux USA ).

$^{18}\text{O}$  et  $^{16}\text{O}$  = partie intégrante du cycle de l'eau (et de la vie) => **fractionnement différencié** au cours du temps



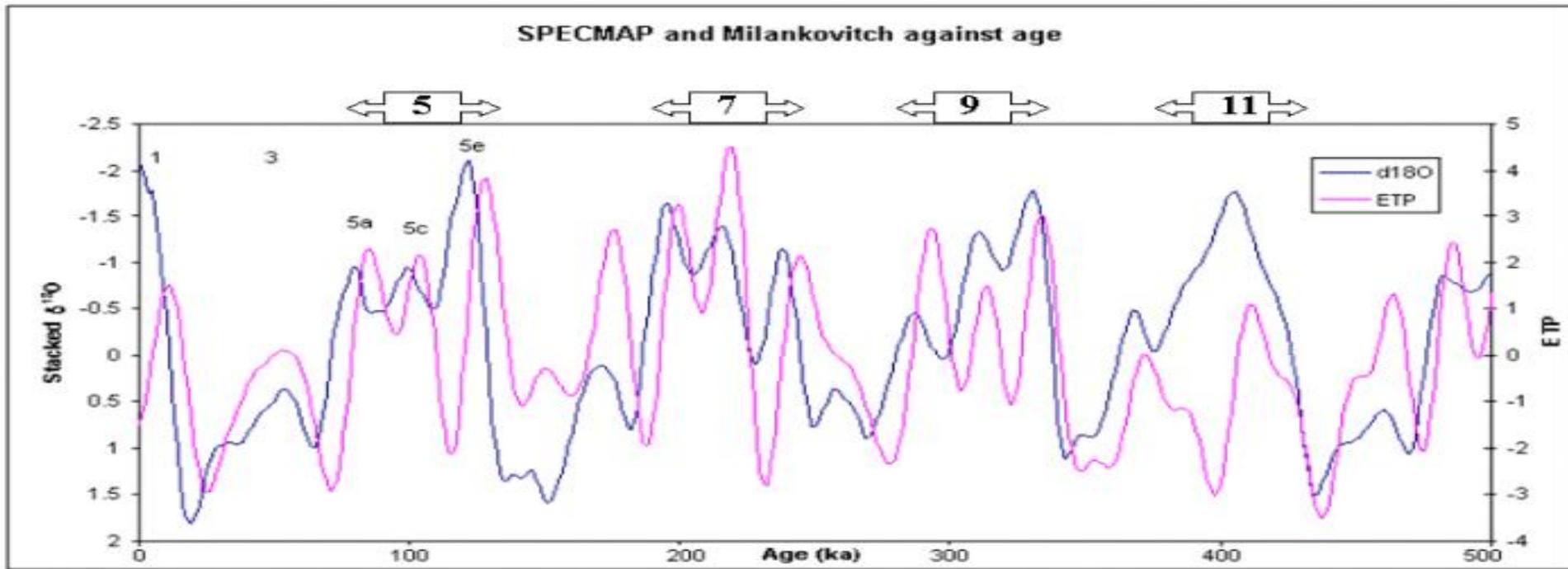
# Les archives (stratigraphie) isotopiques



La proportion de  $^{18}\text{O}$  augmente dans les tests des micro-organismes

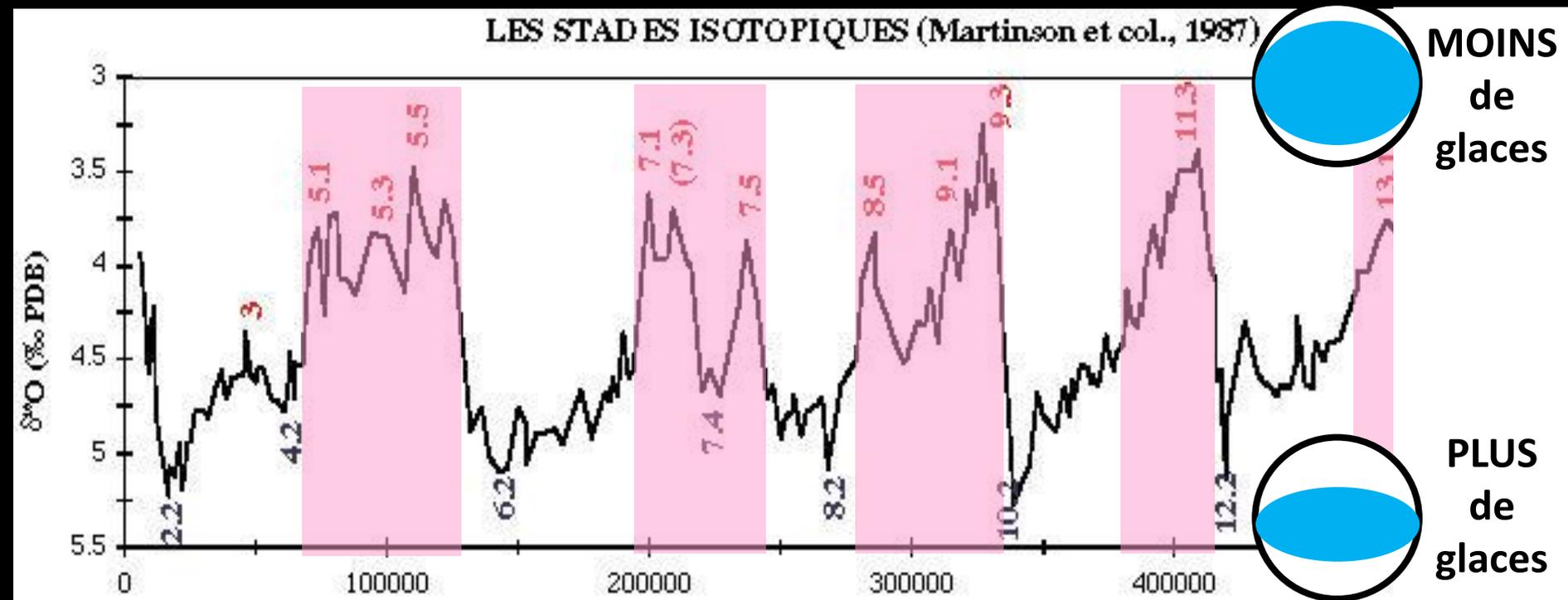
La proportion de  $^{18}\text{O}$  diminue dans les tests de micro-organismes

# Les archives (stratigraphie) isotopiques

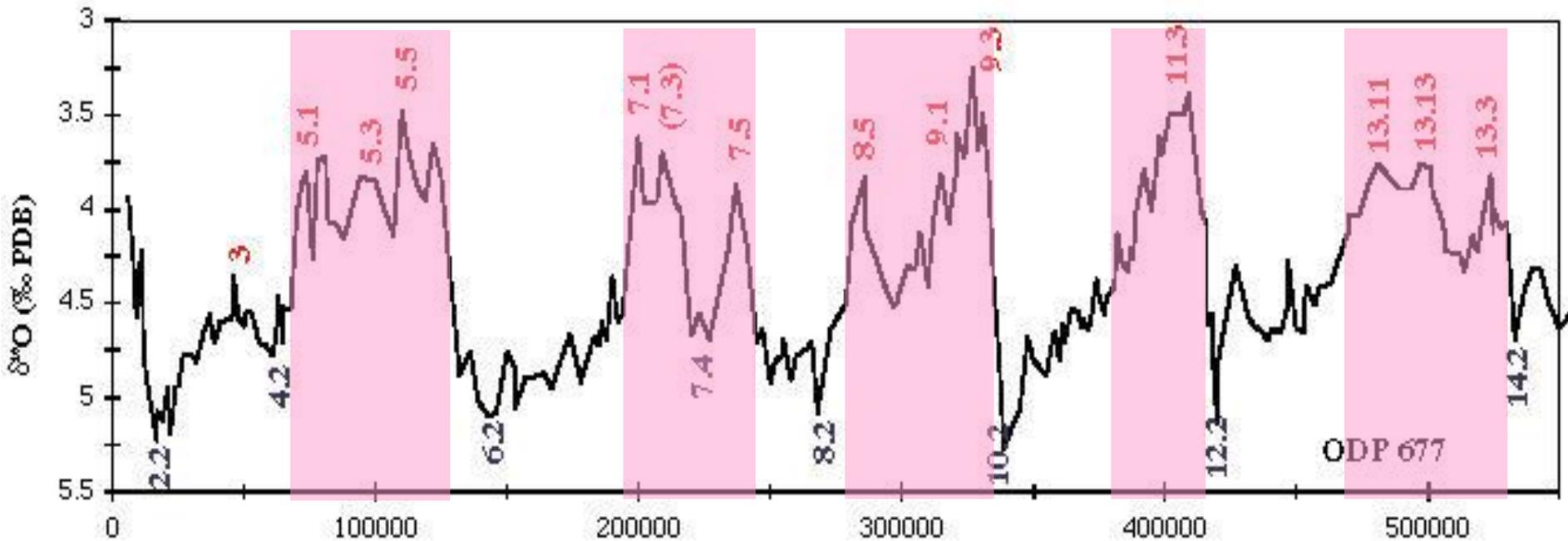


**Comparaison des enregistrements marins de  $\delta^{18}\text{O}$  et des variations de l'insolation pour les derniers 500 000 ans (travaux de Shackleton et al.)**

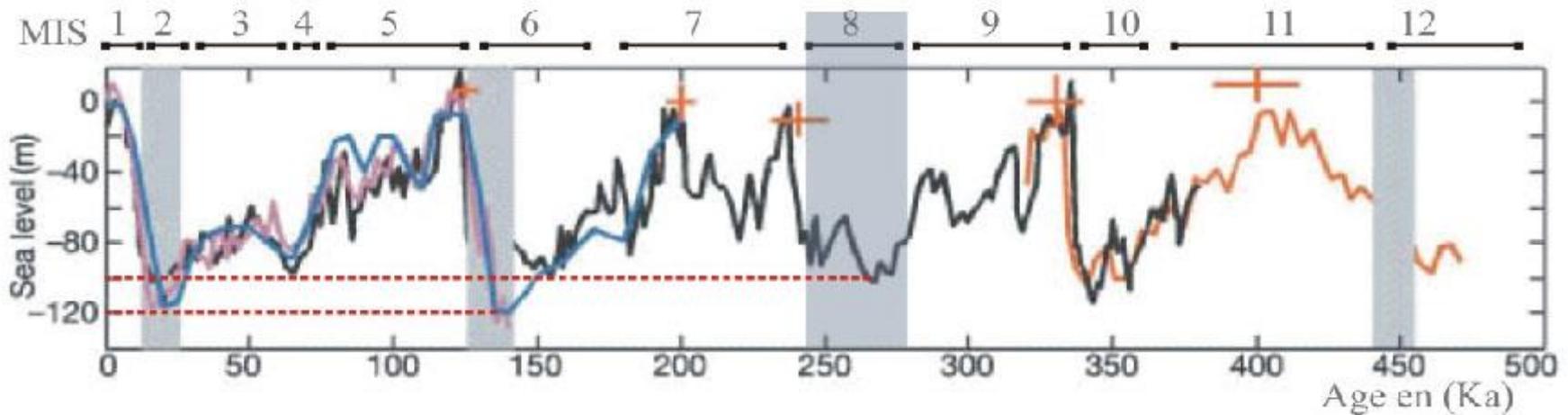
=> Le  $\delta^{18}\text{O}$  marin : reflet direct des variations du volume de glace stocké aux pôles



## LES STADES ISOTOPIQUES (Martinson et col., 1987)

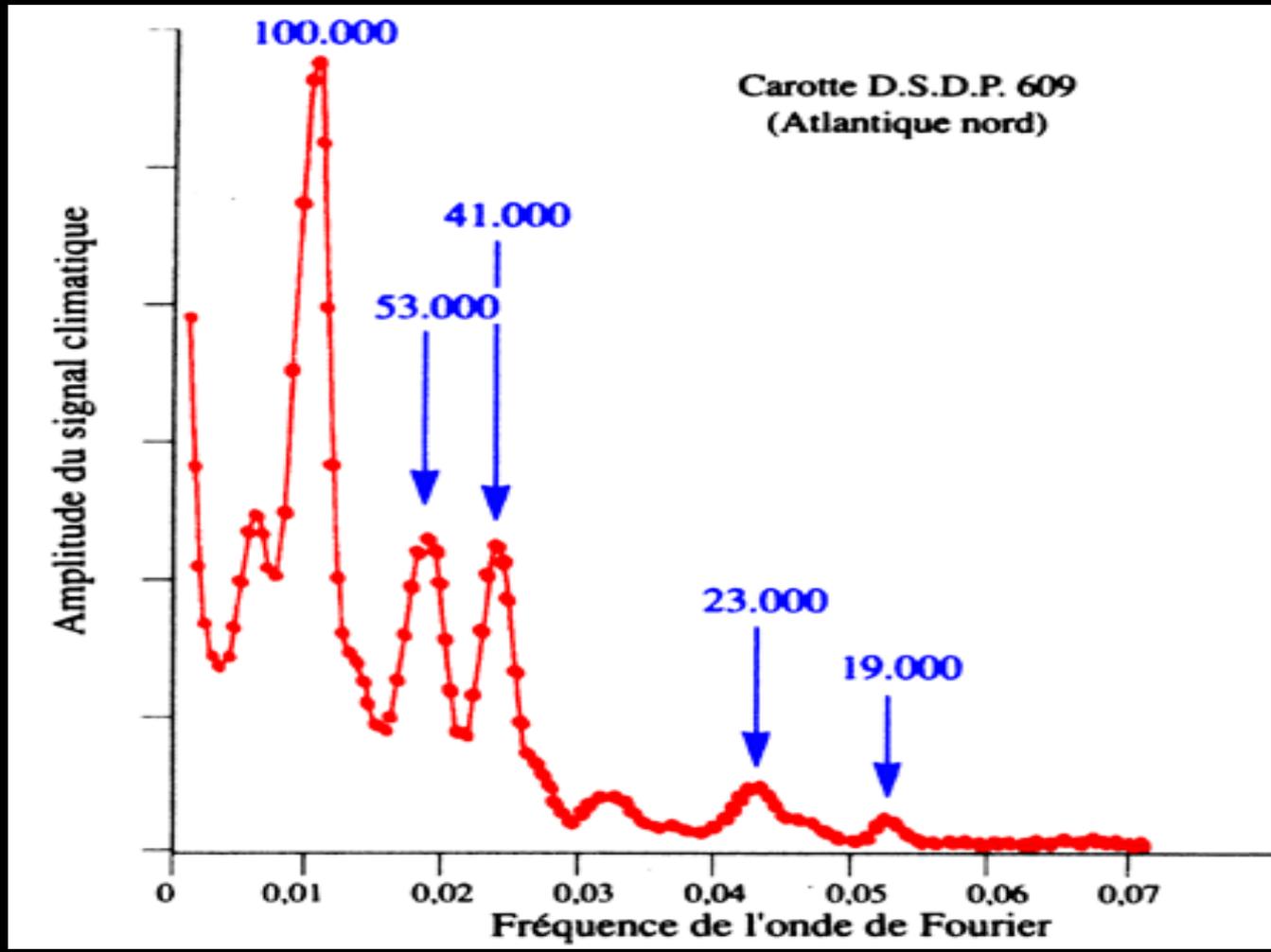
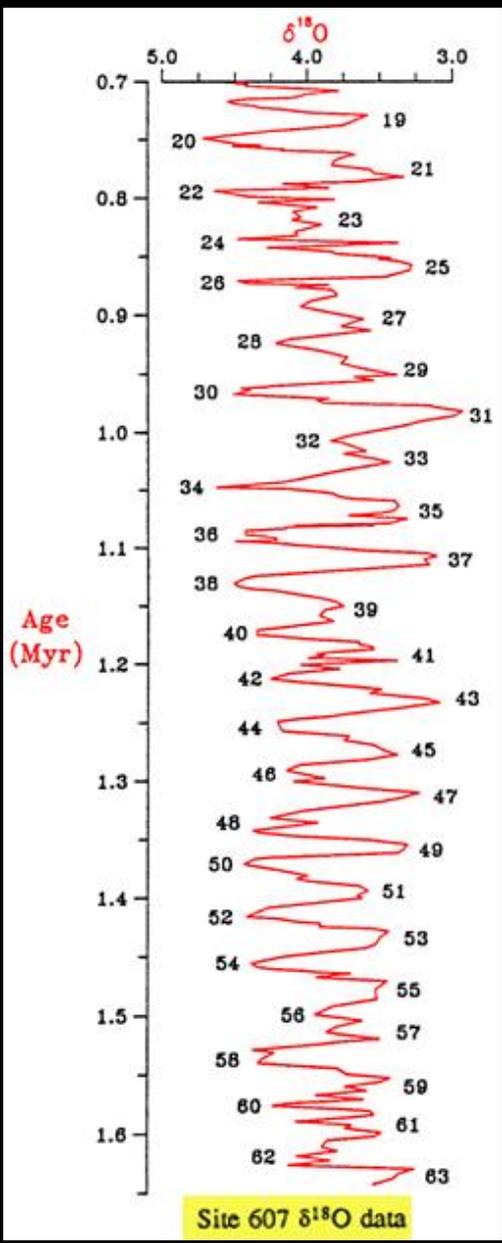


**=> Lien direct avec le niveau marin global**

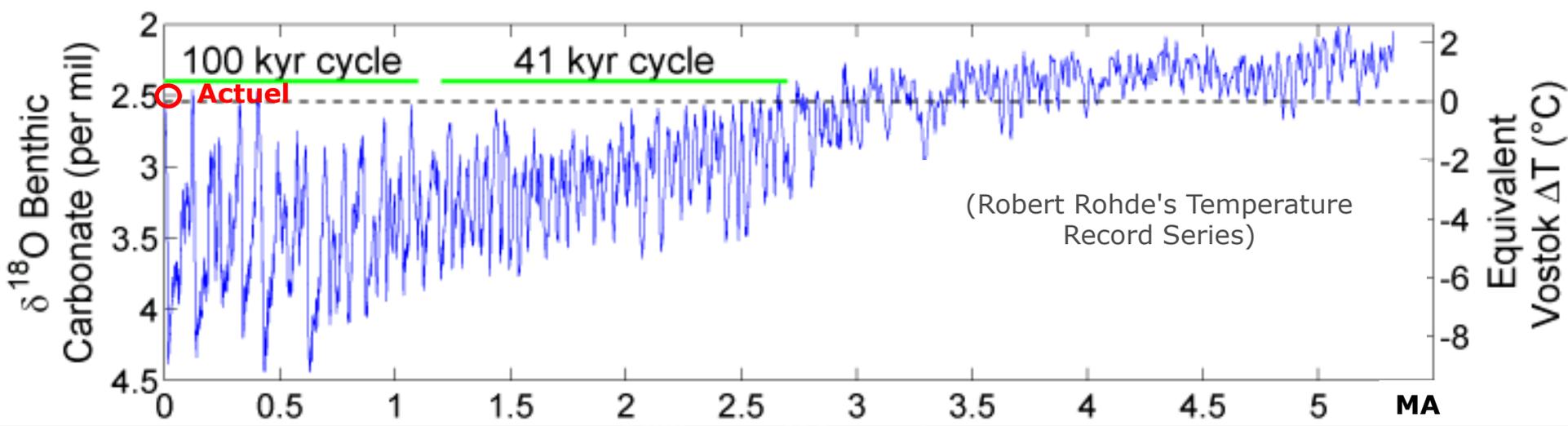


**Sea-level reconstruction for the Red Sea for the past 470 kyr (M.Sidall et.al, 2003)**

# Les archives (stratigraphie) isotopiques



# Les archives (stratigraphie) isotopiques



**GLACIAIRE (G)**

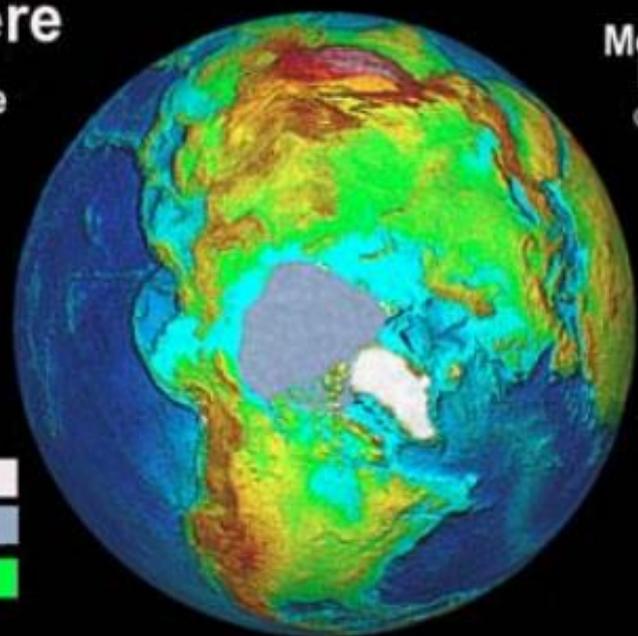
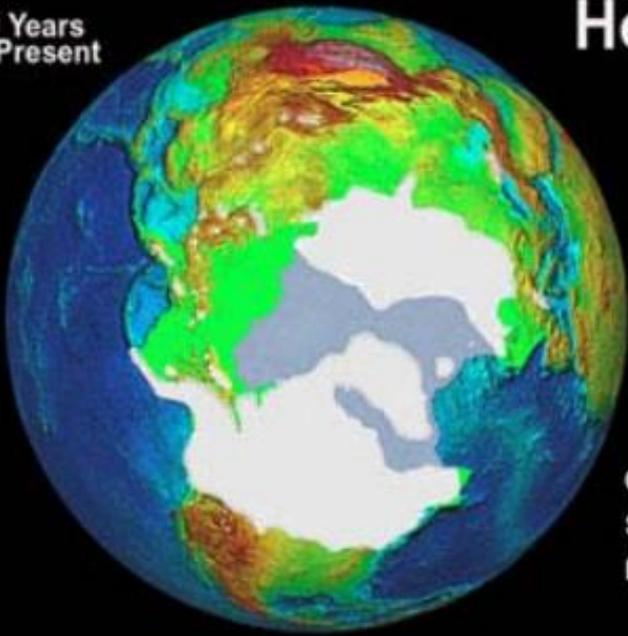
**Northern Hemisphere**

**INTERGLACIAIRE (IG)**

18,000 Years Before Present

Ice Coverage

Modern Day (August)



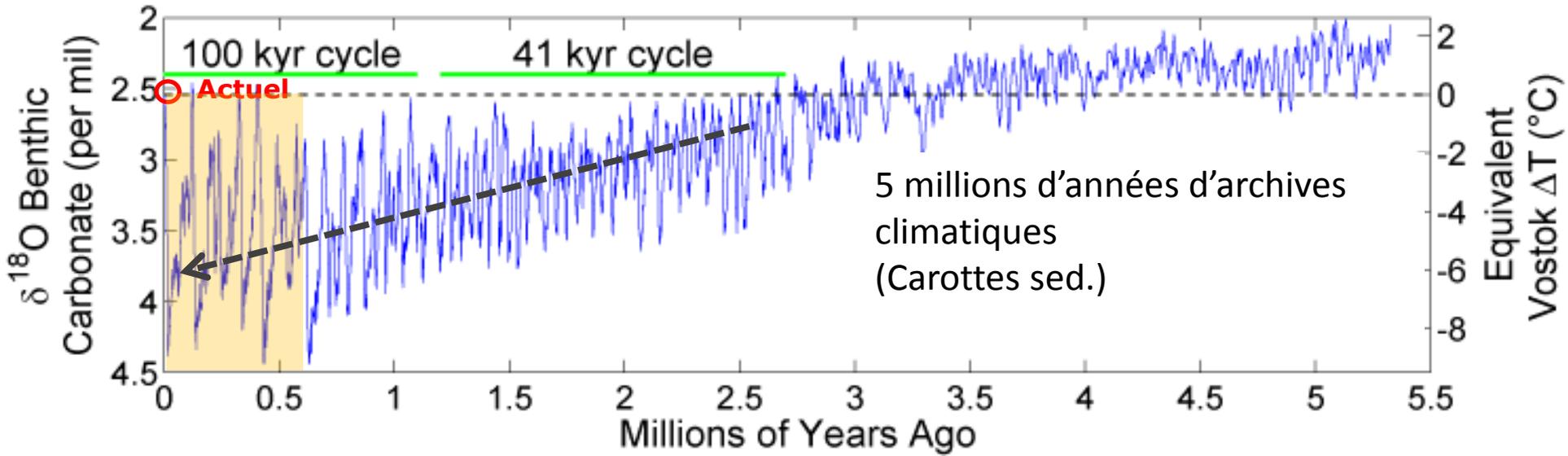
Legend

- Continental Ice
- Sea Ice
- Land Above Sea Level

Note: Modern sea ice coverage represents summer months.



# Les archives (stratigraphie) isotopiques



**= définissent la cyclicité climatique : bascules glaciaire/ interglaciaire**

⇒ base de la climatostratigraphie

⇒ depuis 600 000 ans: dominé par la cyclicité à 100 000 ans : excentricité

# Stratigraphie isotopique (LR04)

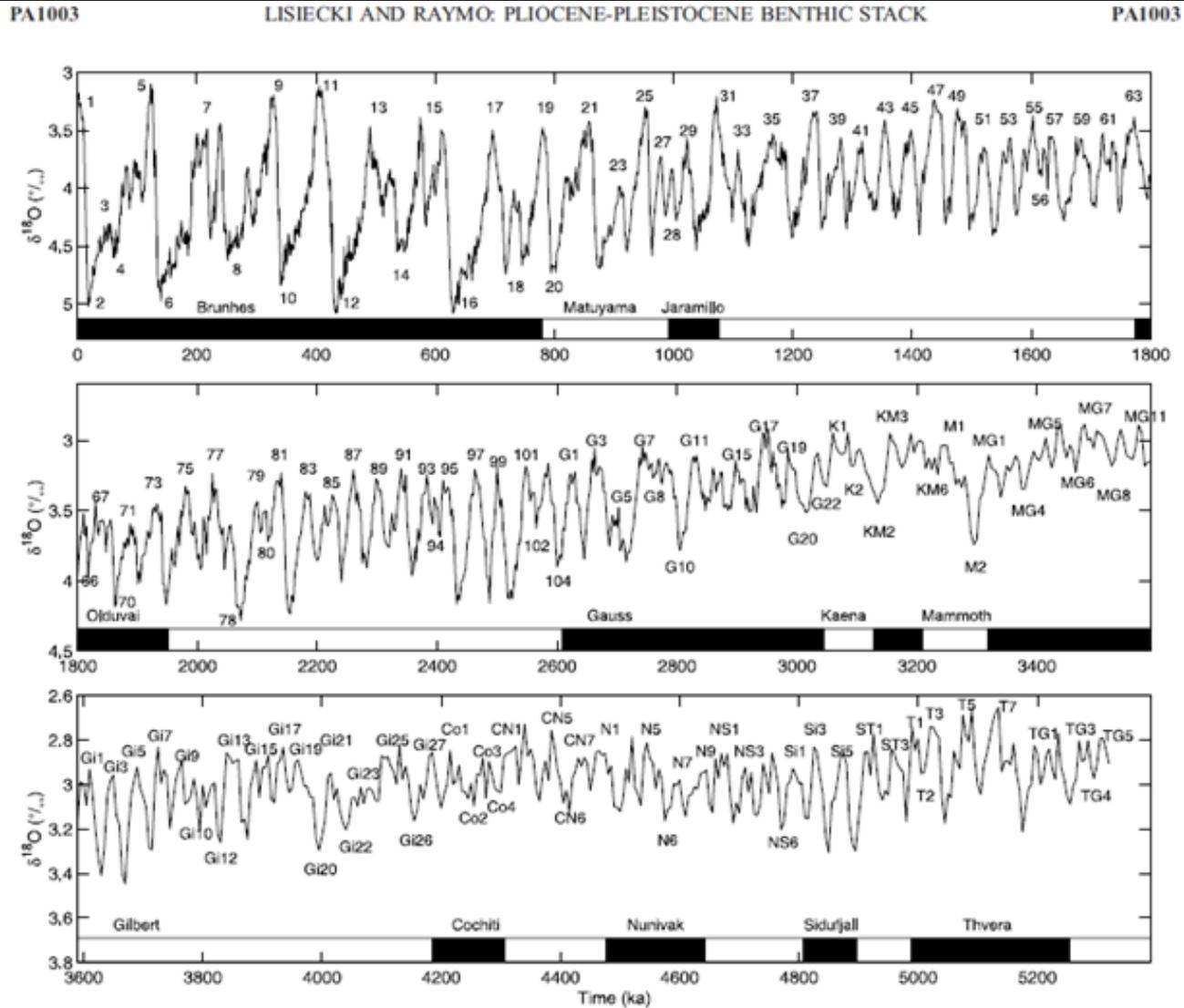
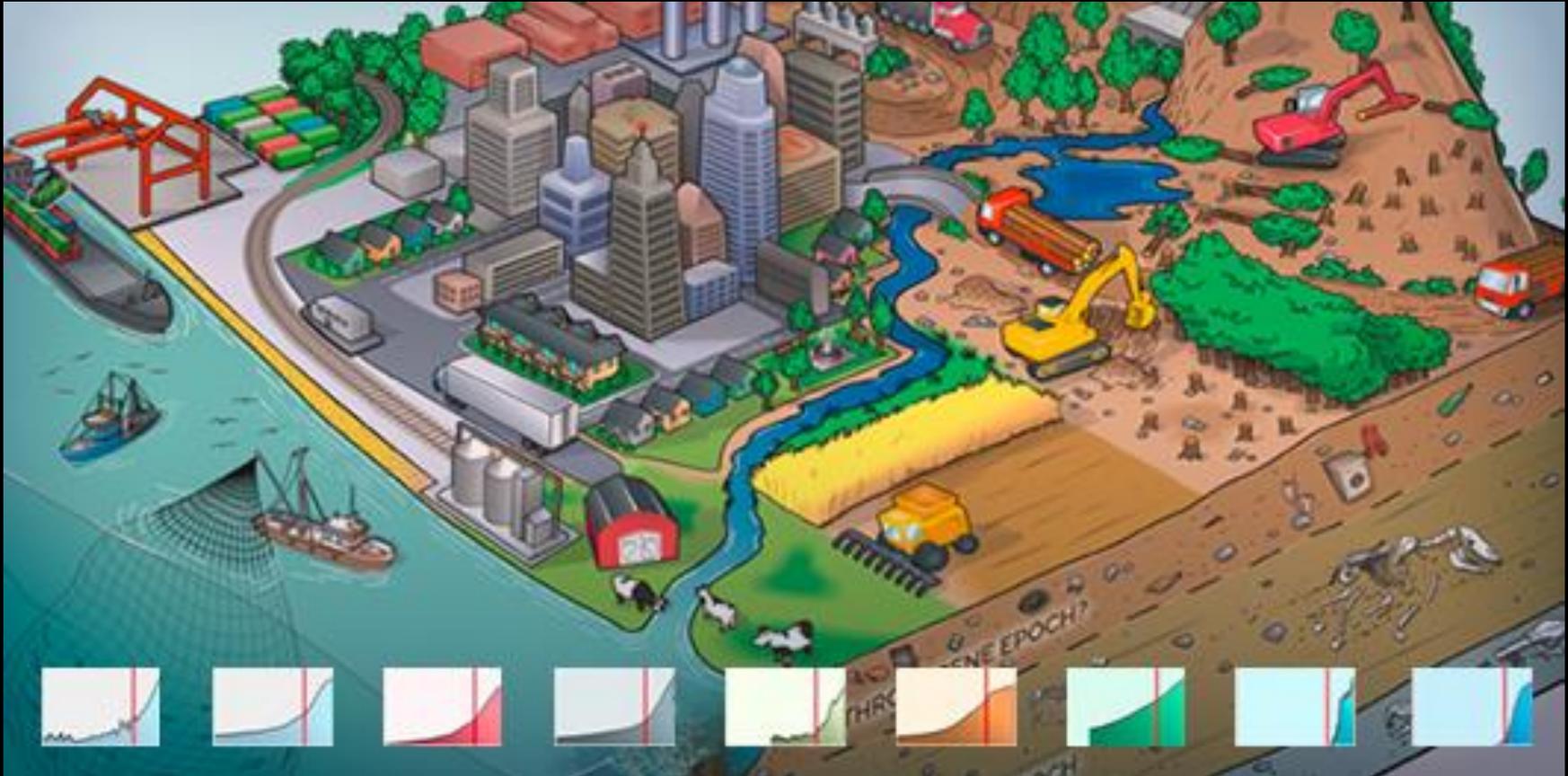


Figure 4. The LR04 benthic  $\delta^{18}\text{O}$  stack constructed by the graphic correlation of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records. The stack is plotted using the LR04 age model described in section 5 and with new MIS labels for the early Pliocene (section 6.2). Note that the scale of the vertical axis changes across panels.

- 1. Du climat à la climatostratigraphie**
- 2. Les archives climatiques : quels documents pour quelles interprétations ?**
- 3. Pourquoi remonter le temps ?**

# Comprendre dans quelle période nous vivons



<http://www.hhmi.org/biointeractive/anthropocene-human-impact-environment-0>

## ... l'Anthropocène ?

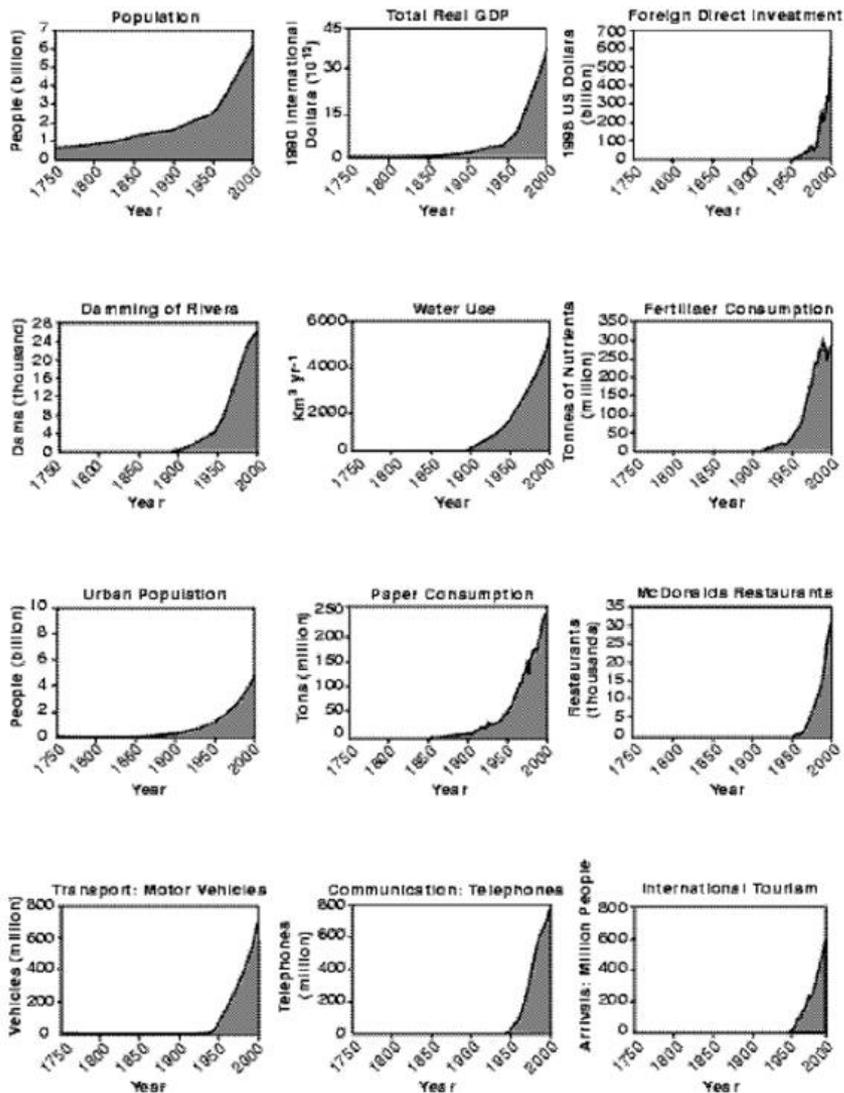


Figure 1. The increasing rates of change in human activity since the beginning of the Industrial Revolution (Steffen et al., 2003). Significant increases in the rates of change occur around the 1950s in each case and illustrate how the past 50 years have been a period of dramatic and unprecedented change in human history. (U.S. Bureau of the Census, 2000; Nordhaus, 1997; World Bank, 2002; World Commission on Dams, 2000; Shiklomanov, 1990; International Fertilizer Industry Association, 2002; UN Centre for Human Settlements, 2002; Pulp and Paper International, 1993; MacDonaldis, 2002; UNEP, 2000; Canning, 2001; World Tourism Organization, 2002).

# HOW LONG HAVE WE BEEN IN THE ANTHROPOCENE ERA?

## Climatic Change 61: 251–257, Crutzen & Steffen, 2003

**OUTLOOK SCIENCE MASTERCLASS**

### Paul J. Crutzen

## Anthropocene man

*Paul J. Crutzen shared the Nobel Prize in Chemistry 1995 with Mario J. Molina and F. Sherwood Rowland for their work on formation and decomposition of ozone.*

**PROFILE**

- Scientist Member, Max Planck Institute for Chemistry, Department for Atmospheric Chemistry since 1980
- Born in Amsterdam on 3 December 1913
- Summit on Ozone: 'organizer' of 1984-1985
- Member Berlin Academy in February, 1988. The crown has two daughters
- Member in Stockholm in July 1993 to work as computer programmer in the Department of Materials of Stockholm Institute (later Stockholm University)
- Presently director of research at the National Center for Atmospheric Research (NCAR) in Boulder, Colorado (1997-1998)

**How important is an interdisciplinary approach in addressing urgent scientific questions, and how can we better such cross-disciplinary research has always played a major role in my career. In my earlier papers I proposed that NO and NO<sub>2</sub> could act as catalysts to destroy ozone in the stratosphere or to produce ozone in the troposphere, yet I had no formal education in chemistry. In fact, I was trained as a civil engineer. I started to working in a computer specialist at the University of Stockholm to run meteorological models and, while helping to develop a program for climate chemistry, got hooked on atmospheric chemistry. I wrote the "NO<sub>x</sub> paper" when I was 30 years old.**

**Are scientists under-represented in politics? And do environmental scientists, especially Nobel laureates, have a duty to become active in politics and science policy?**

There is, in fact, a dearth of scientists and scientists who also represent others in politics, which is a worthwhile subject for analysis. I am only aware of three national leaders who have had scientific backgrounds: Margaret Thatcher, Angela Merkel and Sir Harold Krogh (founder of 'Nobel' research of water).

I don't think that Nobel laureates have a special duty to become more active in politics, except if their research could lead to problems for society. In the first place, they should remain scientists. However, the general public expects scientists to have an above average interest in social issues and the increased participation of scientists here should be applauded, as in the case under President Obama.

To establish closer contacts between politicians and scientists, the German parliament has created commissions consisting of equal numbers of politicians and scientists to study and highlight problems of general importance, such as climate change and strategic ozone depletion. The absence of these commissions has been very successful in the political process.

**How can the public be convinced of the importance of fundamental research with no apparent use?**

If you mention the examples of great scientists like Einstein, Newton, Darwin, Faraday and others, in my view, much more needed, one when I wrote the article about the potential effects of NO<sub>x</sub> on ozone, I had not the slightest idea about its relevance. Things changed in the fall of 1974 when I read a report of a major international conference in the US, which mentioned NO<sub>x</sub> emissions had destroyed their importance.

**What advice would you give all young researchers who are starting their research life as in becoming a good scientist?**

Stay away from his science in which the resulting papers have many authors. And choose a professor who gives you a lot of freedom. I was lucky to find Bert Bolin.

**Aside from a Nobel laureate, how do you want to be remembered?**

As the person who significantly increased knowledge about the ozone layer and the greenhouse effect in the atmosphere.

**And as the scientist who coined the term 'Anthropocene'?**

A new geologic epoch dominated by human activities, actually first published in Nature.

**And as one of the scientists who drew attention to the potentially devastating climate consequences of a nuclear war, the so-called 'nuclear winter'?**

More people would die of the indirect consequences of mass starvation and disease than would be killed by the nuclear bombs.

**610 • NATURE | VOL 441 | 16 OCTOBER 2008**

# L'Anthropocène ?



Le climat  
dans tous ses états

FIGARO  
B L O G

## Interview du paléoclimatologue qui dérange, William Ruddiman

Par Yves Miserey le 6 décembre 2009 22h10 | 21 Commentaires

*(Voici l'essentiel de l'interview que le chercheur américain William Ruddiman (que je présente dans la [note précédente](#)) m'a accordée le 2 octobre dernier. J'ai laissé de côté deux questions très techniques, l'une se rapportant au méthane et l'autre à une étude critiquant sa théorie, publiée dans la revue Nature.*

Yves Miserey.- A la lecture de votre ouvrage, on a l'impression que si les activités humaines par le passé ont pu tellement changer le climat alors que la population était encore très faible, les changements aujourd'hui devraient être énormes.

William Ruddiman.- Oui, c'est une conclusion qui s'impose. Si c'est vrai que la petite augmentation de gaz à effet de serre de la période pré-industrielle a eu un impact perceptible sur le climat, alors les rejets massifs actuels (et ceux dans le futur) devraient être considérables. Sur ce point, je suis d'accord avec la tendance dominante des climatologues et en désaccord avec les sceptiques.

Y. M. - Quelles leçons voudriez vous que l'on tire de votre livre et de vos études?

W.R. - Il y en a plusieurs. La plus évidente c'est que l'impact des hommes sur les gaz à effet de serre et le climat est plus ancien que ce qu'on a cru jusque là (7000 ans et non pas 200 ans). L'autre leçon à retenir, c'est que les premiers agriculteurs ne correspondent pas du tout à la vision romantique de populations vivant en harmonie avec la terre. Par tête d'habitant, ils ont eu une contribution beaucoup plus importante en termes de défrichage que celle de l'homme moderne. D'immenses étendues forestières avaient déjà été rayées de la carte avant la révolution industrielle. Le défrichage des terres pour les cultiver est de loin le seul impact humain important de la planète.



S'abonner au flux de ce blog

### A propos de ce blog

Politiques, patrons, écologistes, savants, simples citoyens ou rock stars même, n'ont jamais autant parlé du réchauffement climatique. La planète court-elle à la catastrophe? En faisons-nous trop? Quels grands choix énergétiques pour demain? Douze ans après la conférence de Kyoto et à l'approche de la conférence de Copenhague, échéance majeure dans les négociations internationales le climat, annonciatrice de grands bouleversements quel qu'en soient les résultats, quatre journalistes du Figaro vous proposent un nouveau blog. Avec leurs regards croisés et leur expérience dans les domaines scientifique, économique et politique, Marielle Court, Yves Miserey, Frédéric de Moncault et Fabrice Nodé-Langlois souhaitent vous informer par-delà l'actualité courante, vous donner à réfléchir, vous emmener sur le terrain en France et dans le monde, vous étonner sans tabou.

### Rechercher

### Nuage de tags

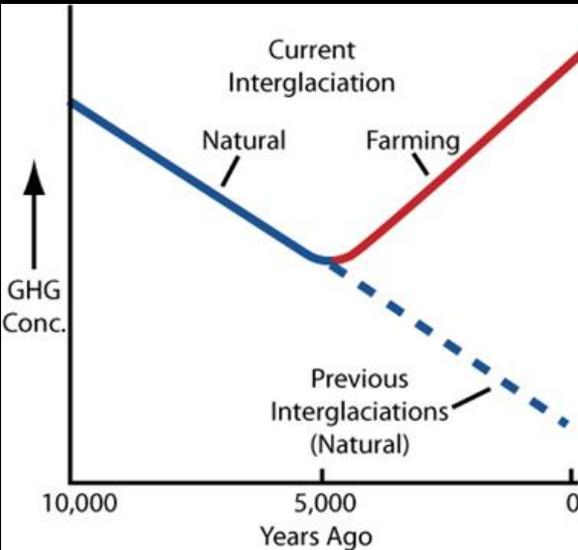
Barack Obama Benoît Rittaud climato-sceptiques climatosceptiques CO2 Copenhague Energie Gaz gaz de schiste Giec IPCC Lula Nicolas Sarkozy nucléaire négociations ONG sceptiques taxe carbone énergie énergie éolienne

### Liens

Tous les blogs du Figaro  
Le Figaro  
L'Agence internationale de l'énergie (en anglais)  
Le site de Jean-Marc Jancovici  
Le site de Robert Amsterdam, (en anglais) avocat du magnat pétrolier russe emprisonné Mikhail Khodorkovsk  
regorge d'infos sur l'énergie, le gaz, le pétrole et la Russie

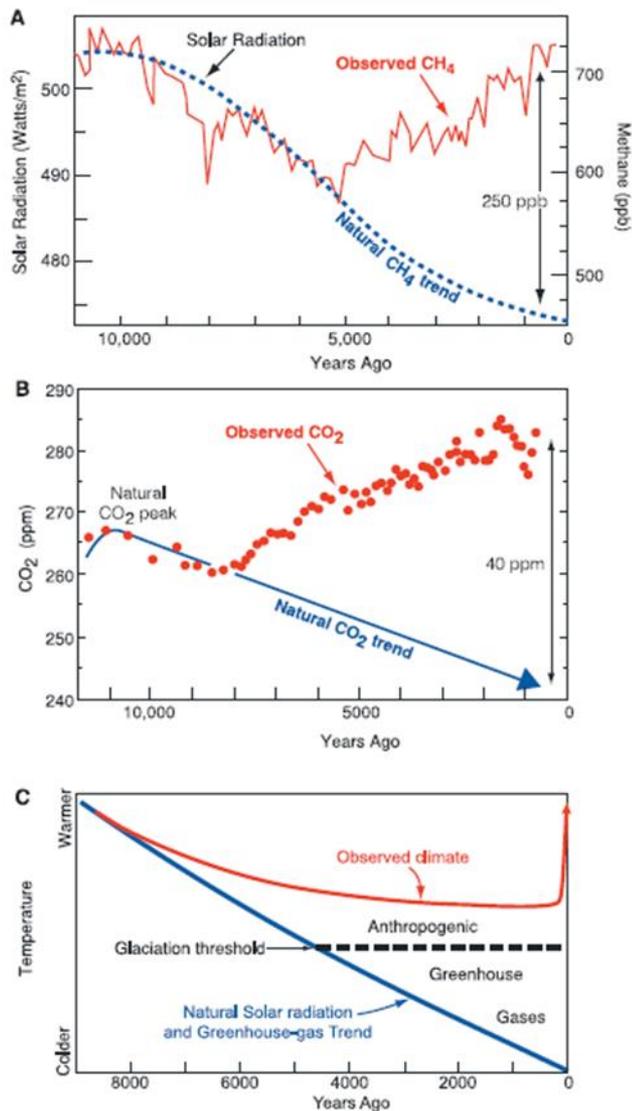
### Notes récentes

"L'Appel des pôles" sur petit écran  
Quand Allègre est en ligne de mire  
Brice Lalonde croit encore en Cancun

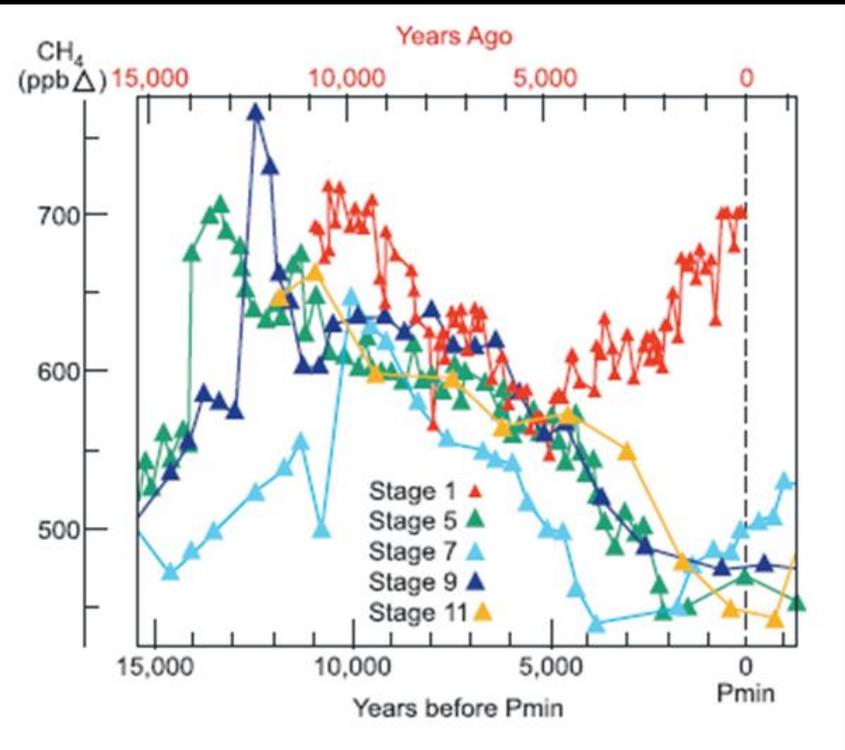


# THE EARLY ANTHROPOGENIC HYPOTHESIS: CHALLENGES AND RESPONSES

William F. Ruddiman, *Reviews of Geophysics*, 45, RG4001 / 2007



**Figure 1.** Early anthropogenic hypothesis. Human activities during the late Holocene causing increases in (a) CH<sub>4</sub> and (b) CO<sub>2</sub> in contrast to the downward trends during previous interglaciations. (c) Late Holocene greenhouse gas increases preventing much of the natural cooling that occurred in previous interglaciations.



# Définir et comprendre l'Anthropocène ?

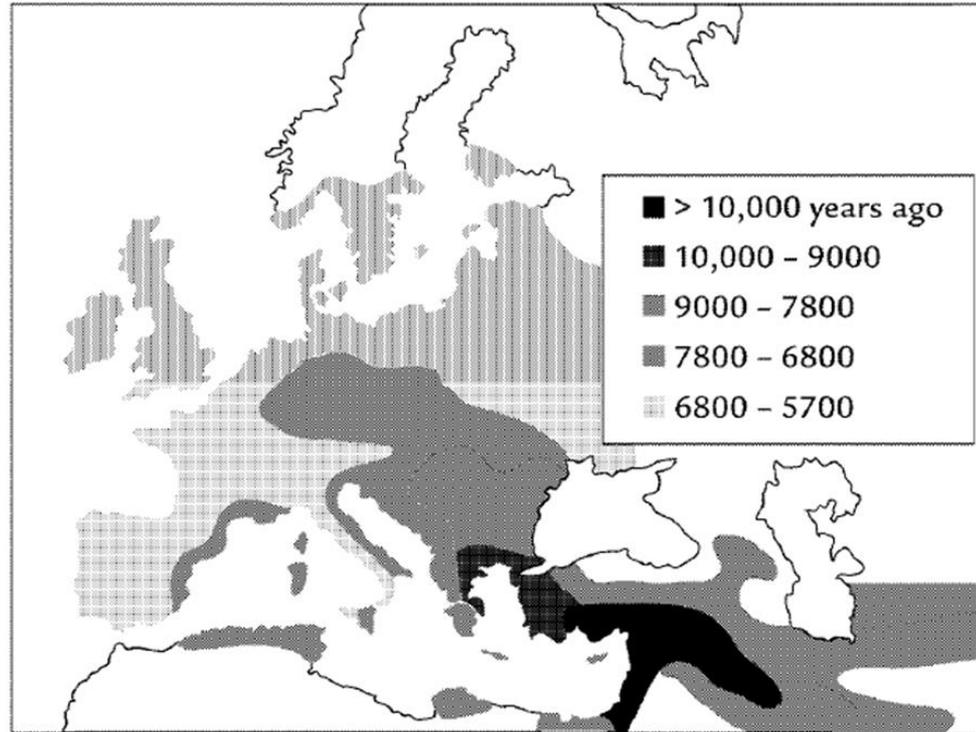
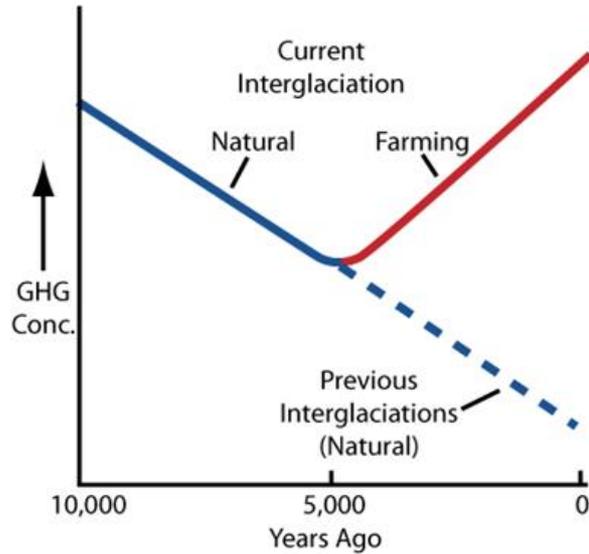


Figure 5. Spread of agriculture out of the eastern Mediterranean fertile crescent across Europe, based on the first appearance of a distinctive package of domesticated grains (after Zohary and Hopf, 1993).

W.F. Ruddiman, *Climatic Change* Vol. 61, N°3 / December 2003

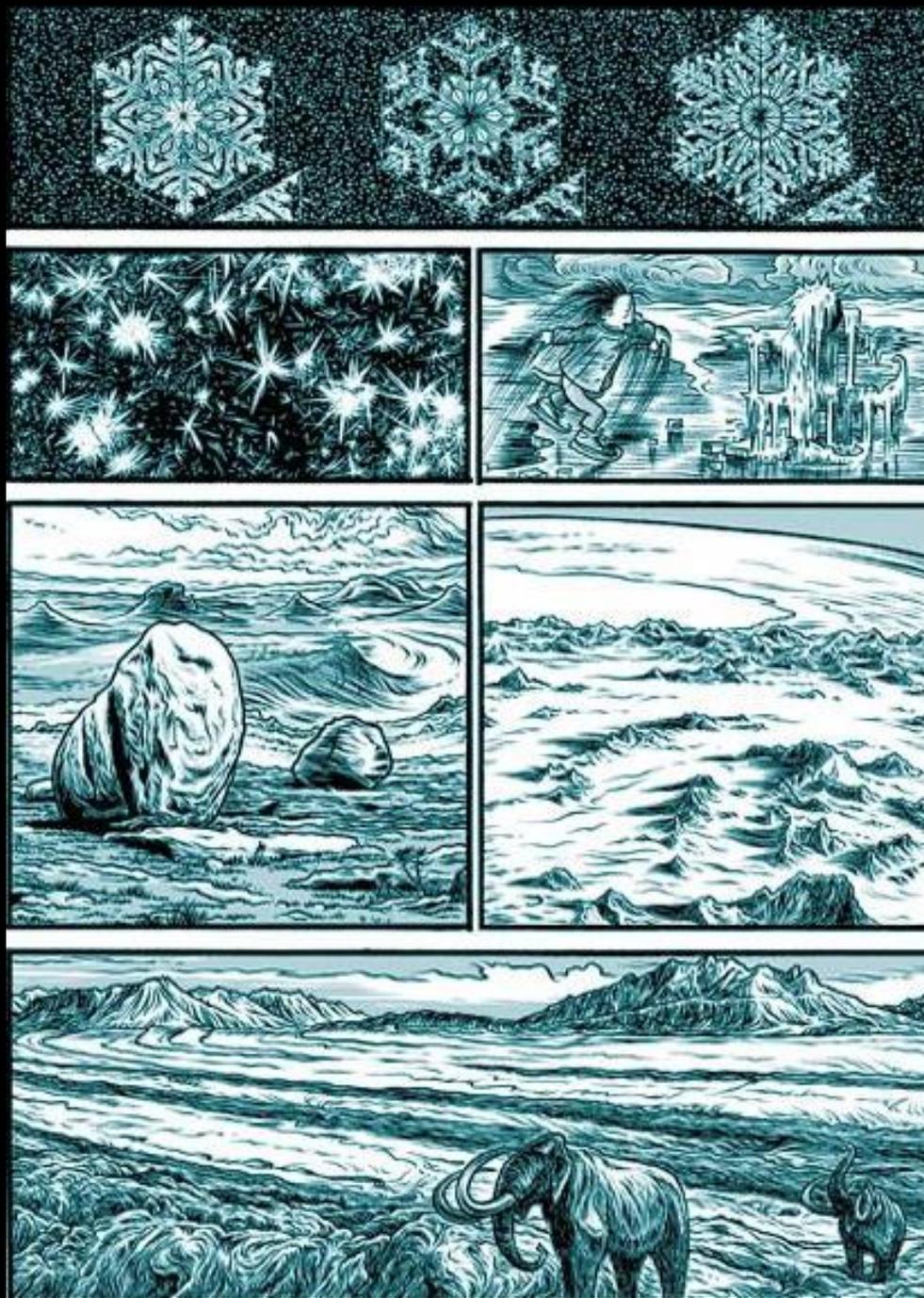
## Conclusions

=> comprendre un système naturel complexe nécessite d'appréhender l'ensemble des mécanismes et processus qui l'animent : appel aux sciences fondamentales, oui !!

**MAIS SURTOUT PAS de façon dissociée**

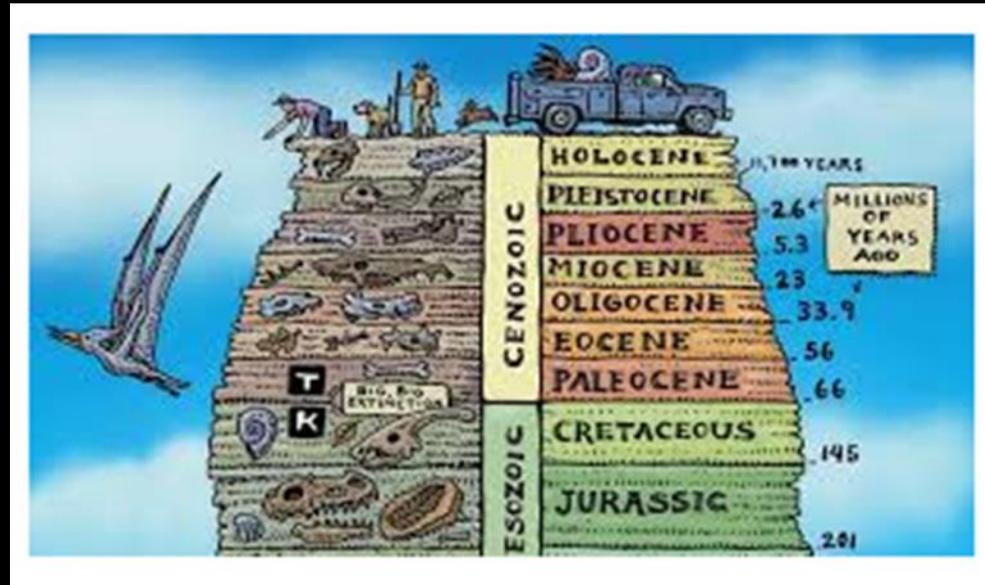
...

**Merci de votre  
attention**



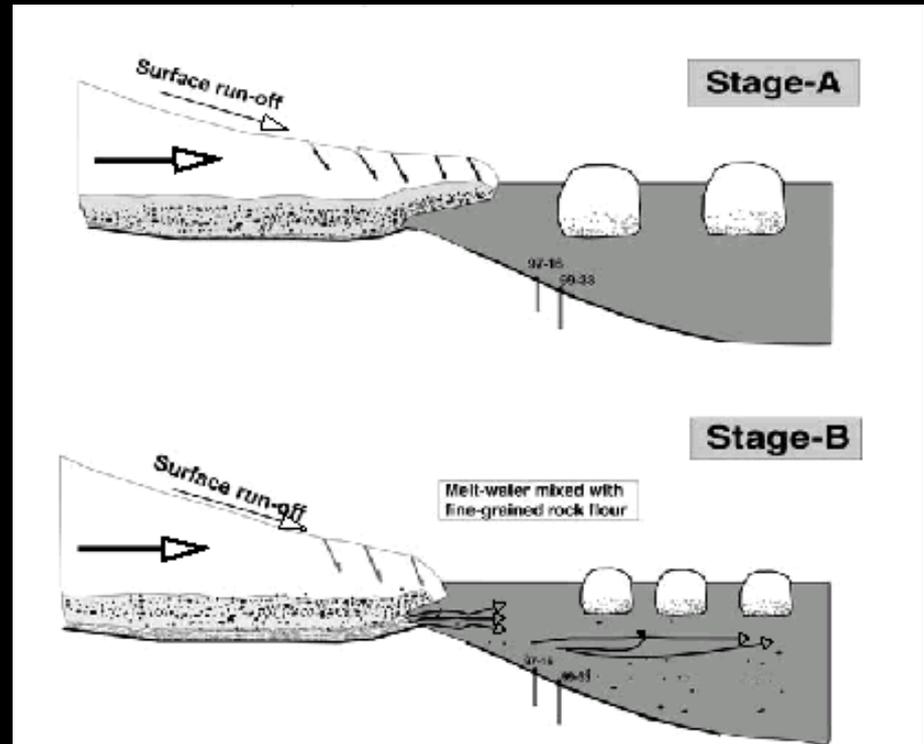
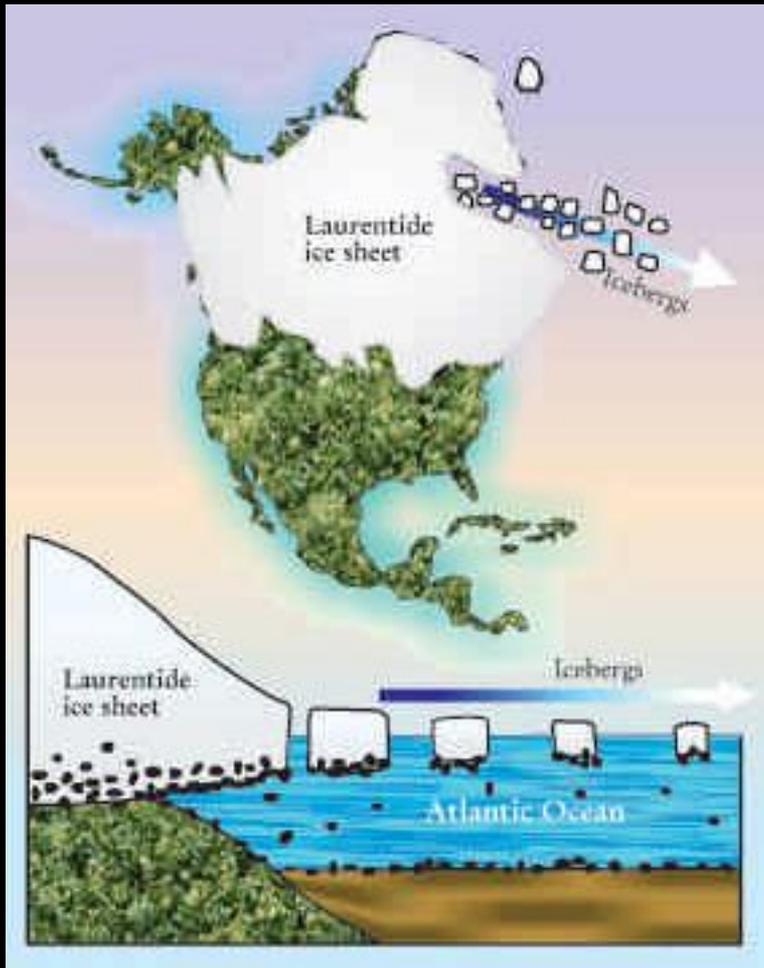


Pour ENSAVOIR PLUS :  
Comment comprendre le  $\delta^{18}\text{O}$  sans comprendre ce qu'est une archive sédimentaire ?



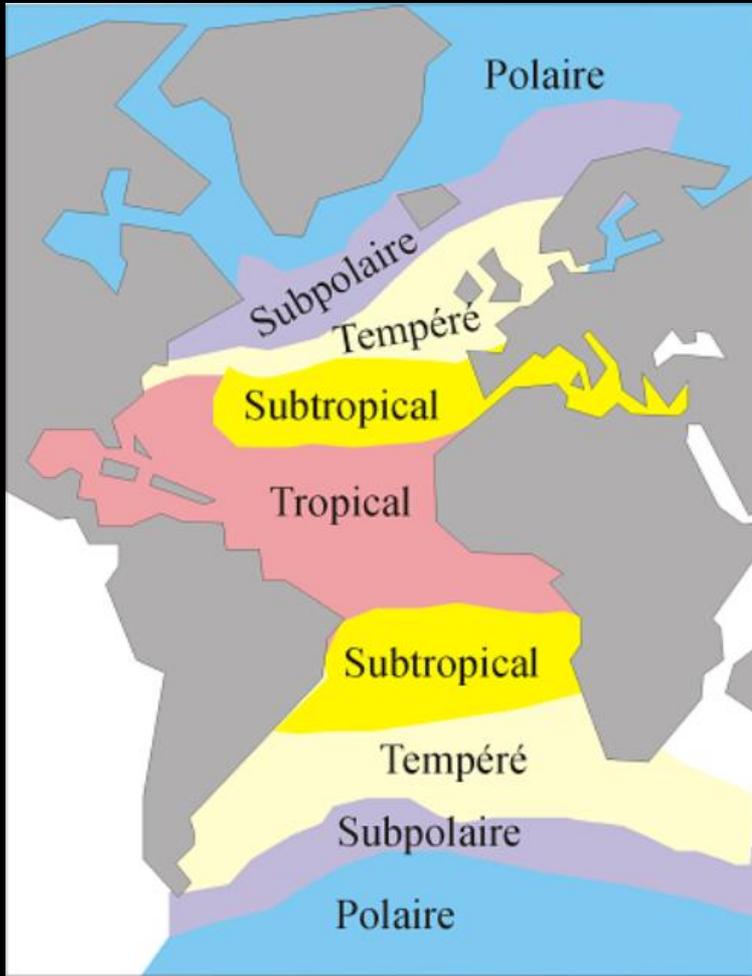
# Stratigraphie "sédimentaire" / proxies

=> Lorsque glaciers présents (G)



# Stratigraphie "sédimentaire" / proxies

=> Lorsque glaciers disparaissent (IG)



(Après tamisage : refus >150 $\mu$ m) m)

# Stratigraphie "sédimentaire" / proxies



⇒ Fractions  
lithiques ou  
biogènes  
sableuses

"faire parler le  
sable"

# Stratigraphie "sédimentaire" / proxies

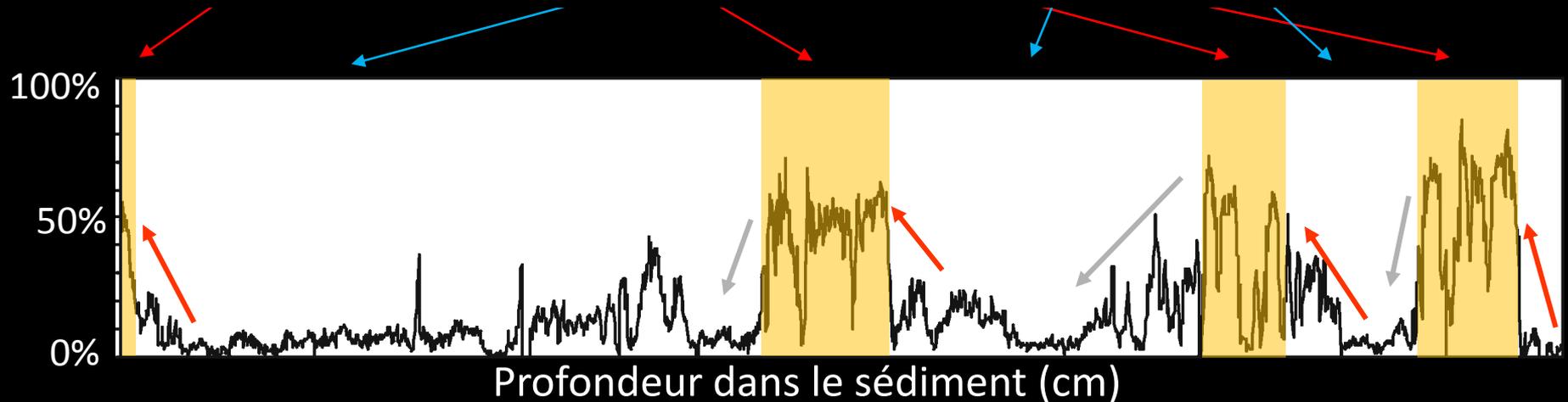
IG



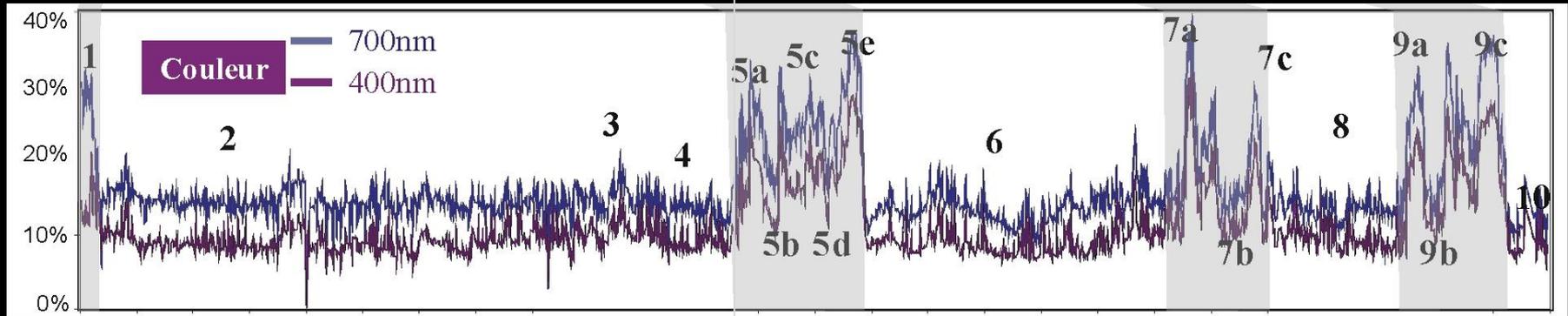
G



=> Reflet dans les **taux de carbonates** présents dans les sédiments



# Stratigraphie "sédimentaire" / proxies



=> Reflet dans la couleur du sédiment



# Stratigraphie "sédimentaire" / proxies

=> Reflet dans la biodiversité des microfossiles contenu dans le sédiment, exemples :  
... grains de pollen

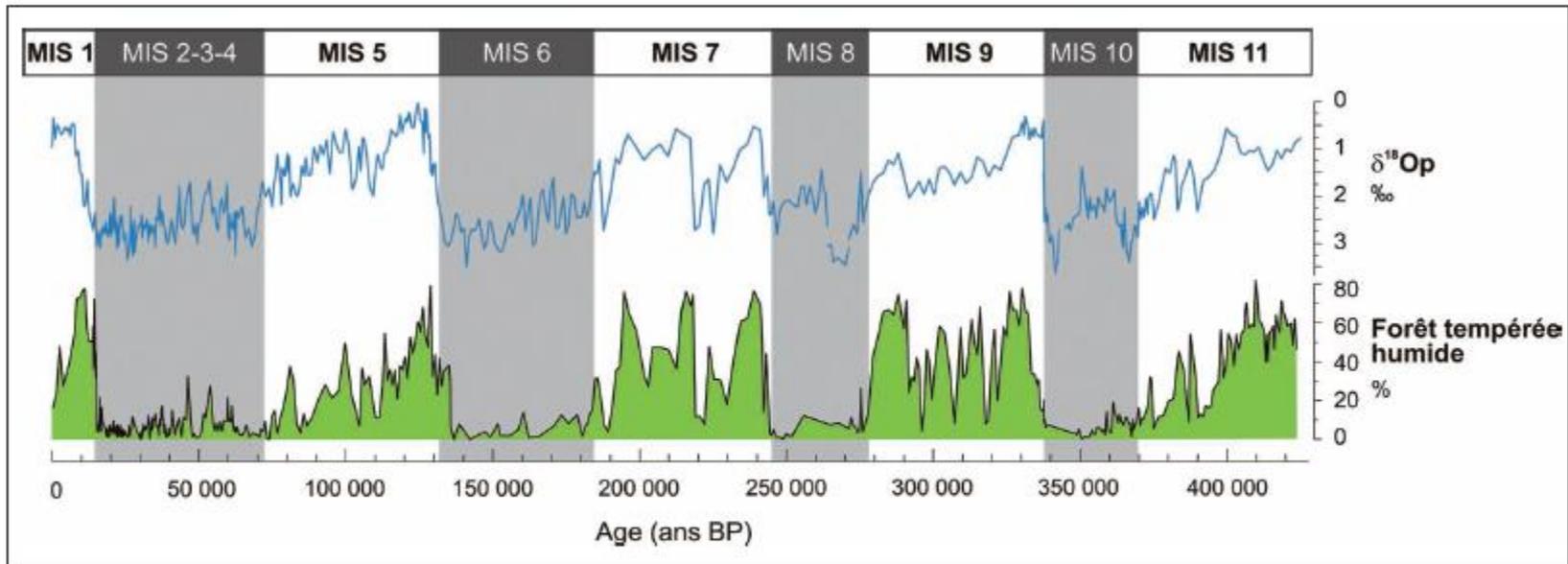
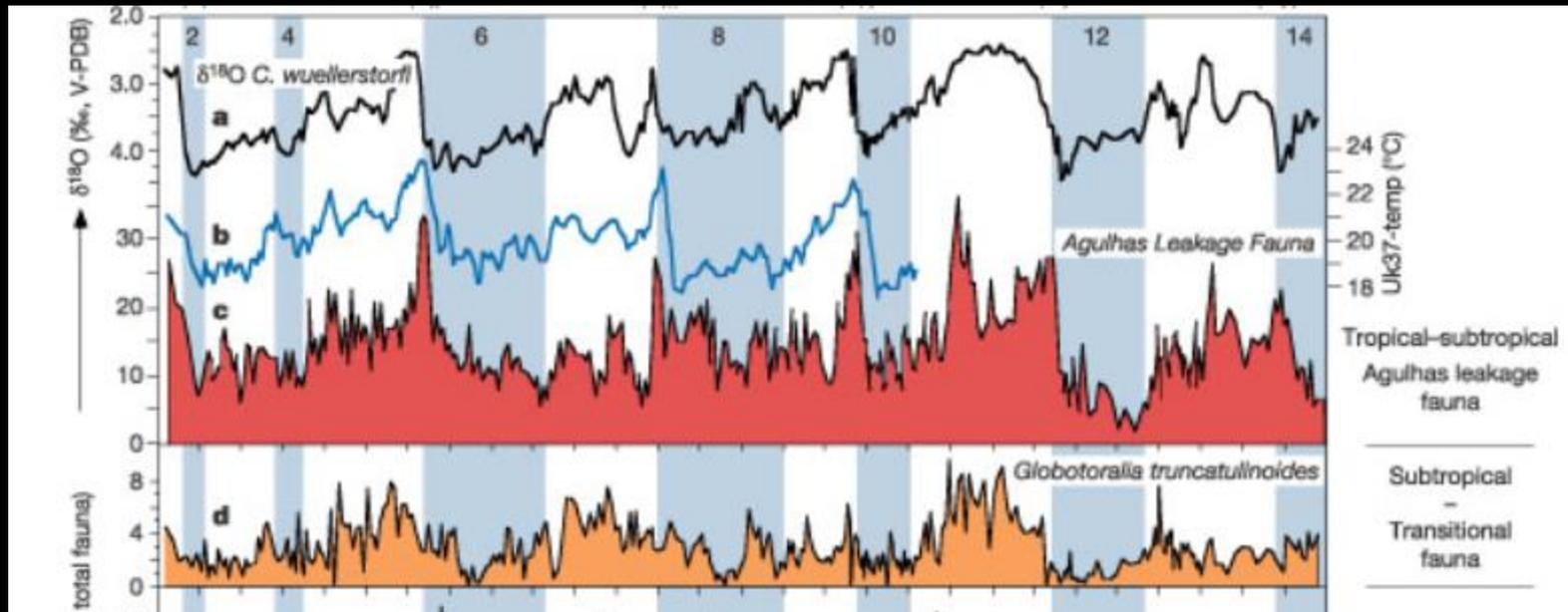
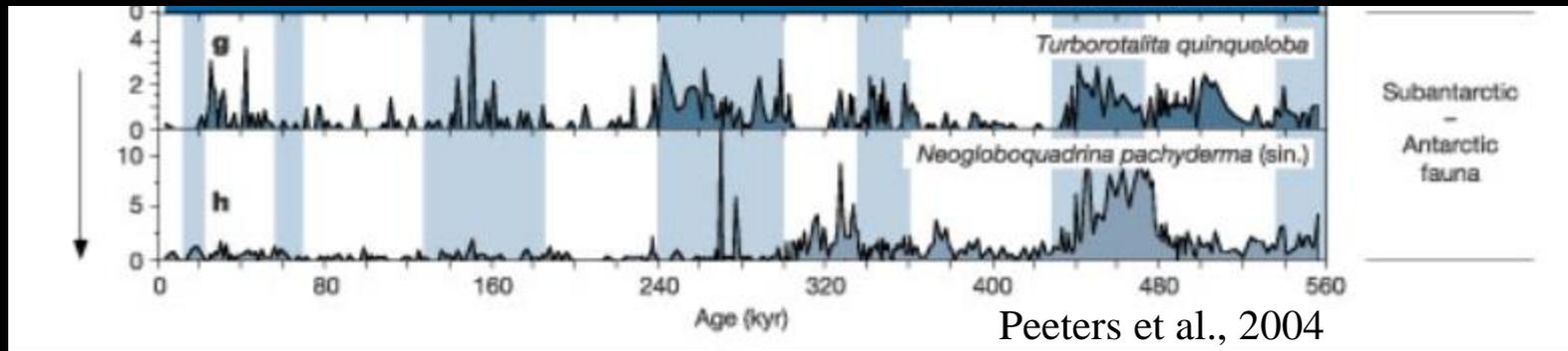


Fig. 3 : Enregistrements pollinique et isotopique ( $\delta^{18}O_p$ ) du nord-ouest de la marge ibérique (Desprat *et al.*, 2005, 2006, 2007, 2009 ; Sánchez Goñi *et al.*, 2005, 2008 ; Naughton *et al.*, 2007, 2009 ; données inédites).

# Stratigraphie "sédimentaire" / proxies



=> Reflet dans la biodiversité des microfossiles contenu dans le sédiment, exemples :  
... tests de foraminifères planctoniques

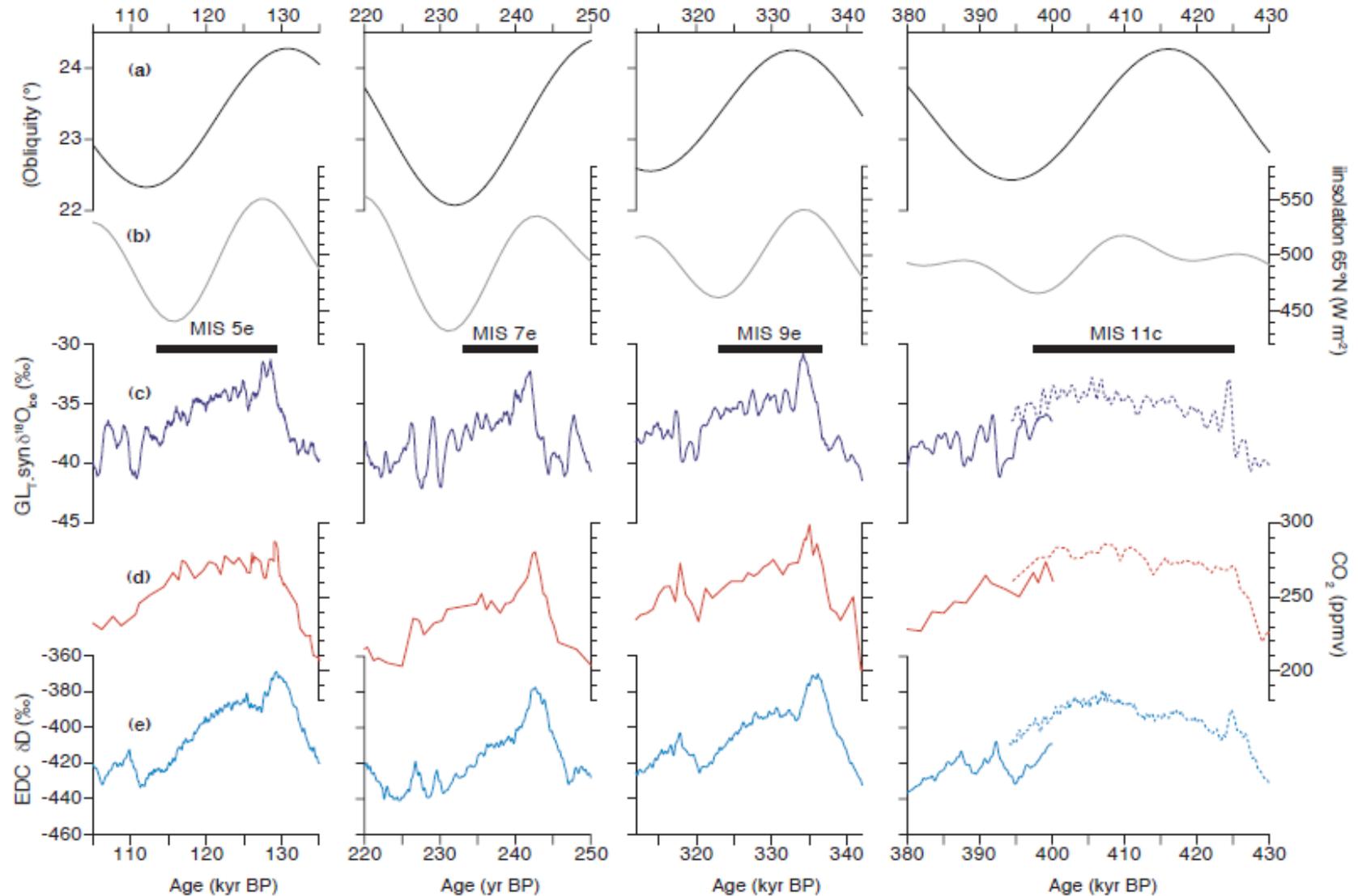


# Quel est l'intérêt de croiser ces documents ?

= étayer une interprétation ...!

= faire appréhender la globalité d'un processus qui impacte l'ensemble des réservoirs terrestres vivants ou non... et nécessite pour être compris des connaissances à l'inverse du monodisciplinaire

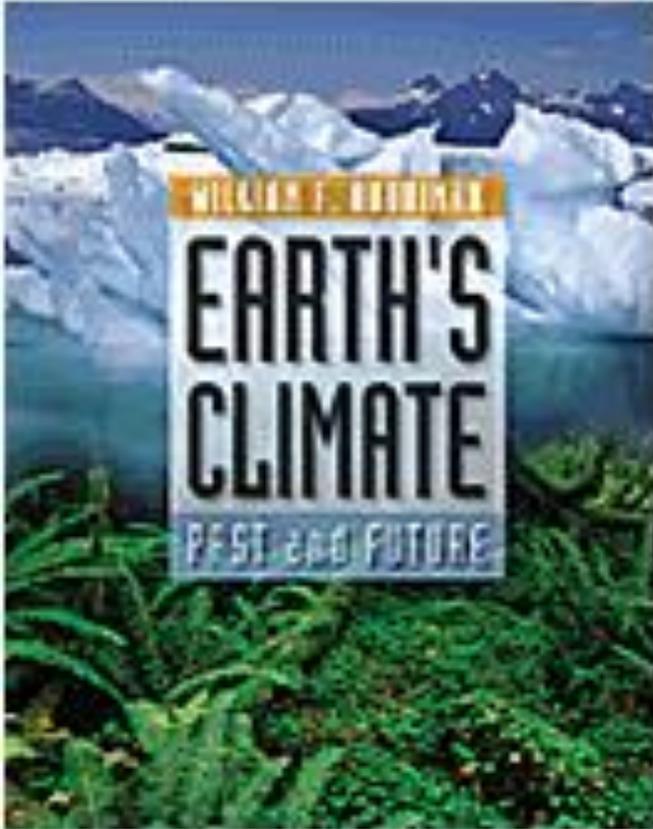
# Définir et comprendre l'Anthropocène ?



Tzedalis et al., 2012. *Clim. Past*, 8, 1473–1485

Can we predict the duration of an interglacial ?

Bibliographie essentielle :



« Earth's Climate Past and Future »

W.F. Ruddiman, 2001

Editions Freeman

([www.whfreeman.com/ruddiman](http://www.whfreeman.com/ruddiman))