



Pourquoi des glaciations au Quaternaire ?

université
de BORDEAUX

EPOC

L. LONDEIX

Master STEE - spécialité Océanographie – 4TER 802 Paléo

Le climat est variable...

Une idée vieille d'à peine 180 ans !



1837 : L. Agassiz parle d'âges glaciaires



Localisation des deux complexes morainiques sur les versants des massifs jurassien et vosgien



Front du complexe de moraines internes et chenal proglaciaire correspondant



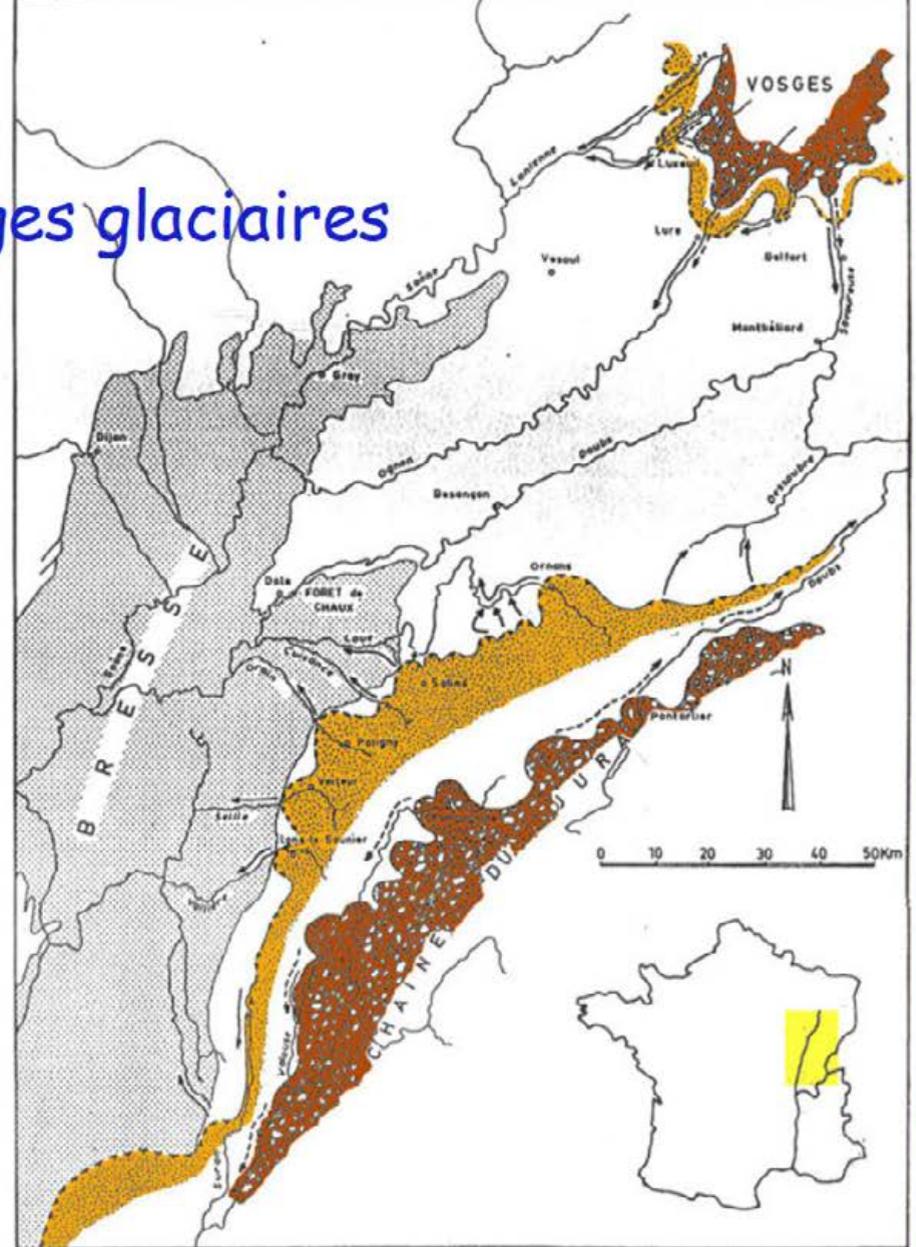
Front du complexe des moraines externes et chenal proglaciaire correspondant



Dépression bressane

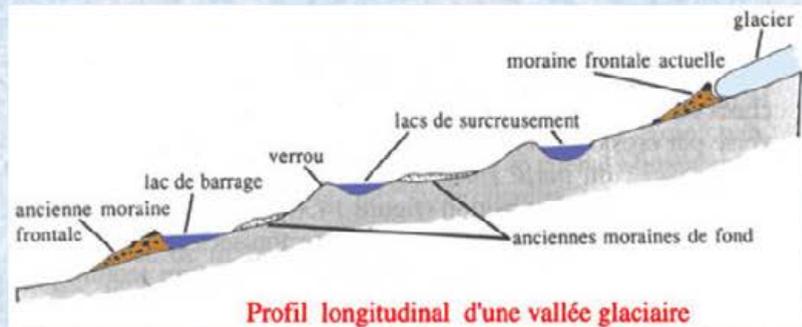


Substrat



La position de moraines anciennes indique des avancées glaciaires alors insoupçonnées

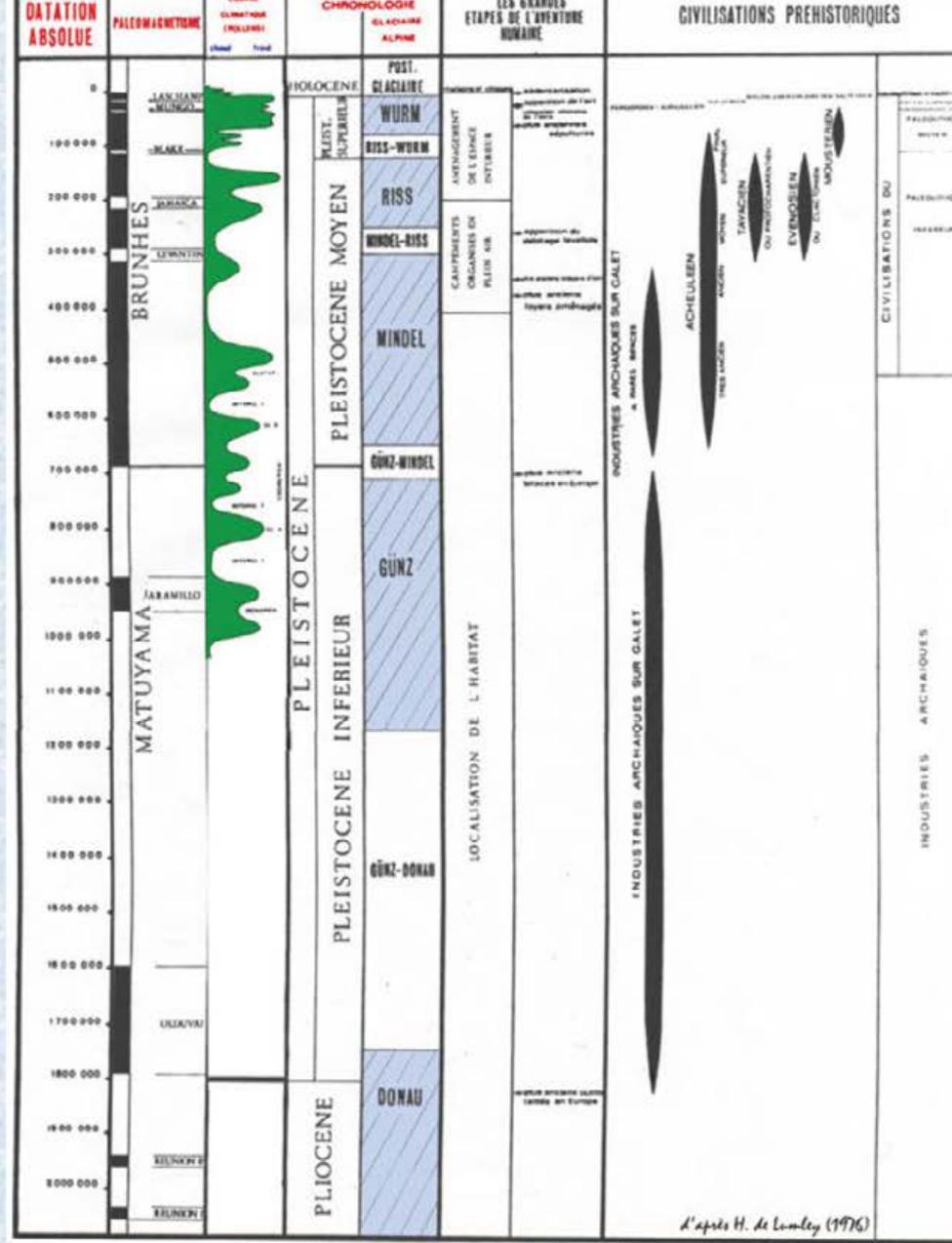
1950 : 6 grandes glaciations quaternaires



Profil longitudinal d'une vallée glaciaire

DONNEES GEOMORPHOLOGIQUES

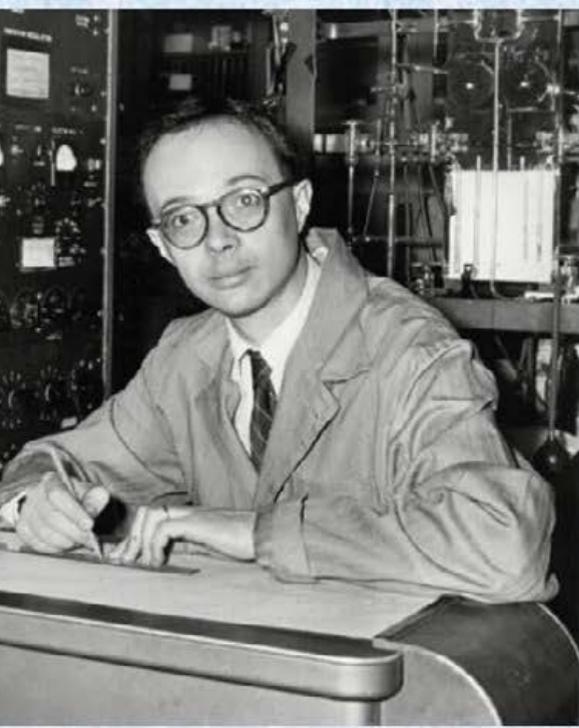
Penck & Brückner 1901	Woldstedt 1958
4 glaciations	6 glaciations
Würm Riss Mindel Günz	Würm=Weichsel Riss=Saale Mindel=Elster Günz Eburonien Brügger



d'après H. de Lumley (1976)

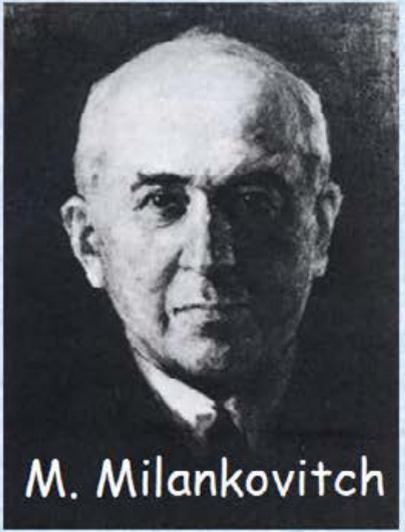
Les arguments morphologiques et palynologiques indiquent jusqu'à 6 grandes glaciations

1955 : C. Emiliani et le $\delta^{18}\text{O}$ des carottes marines

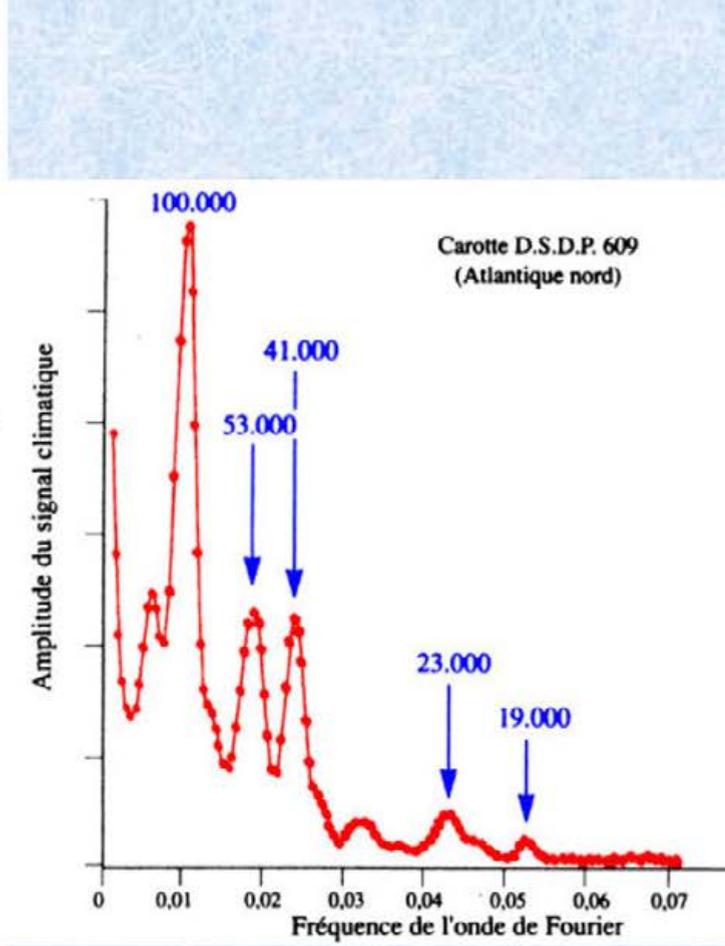
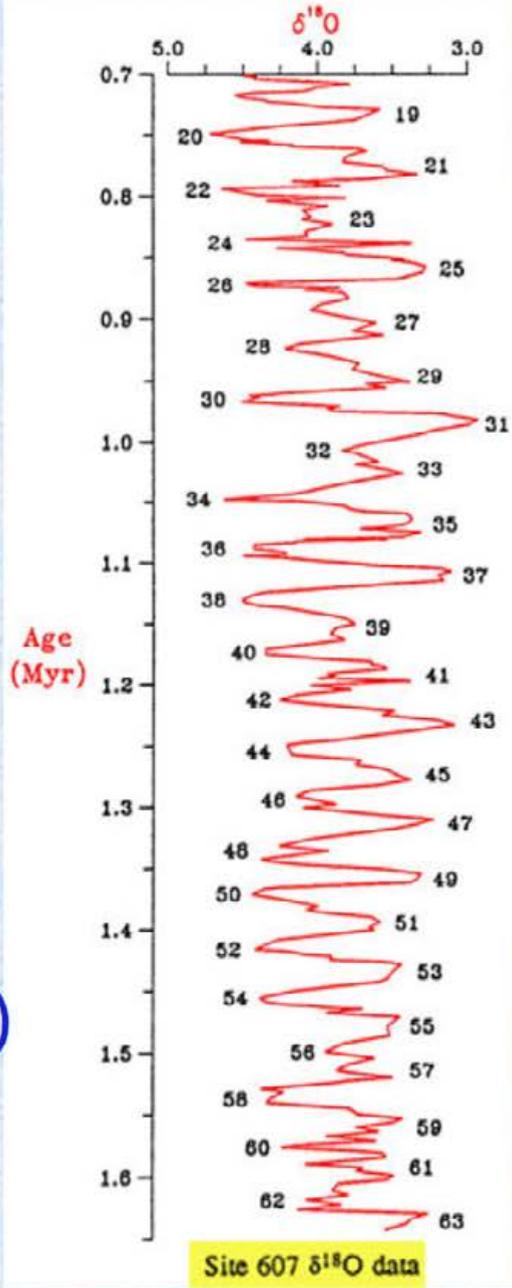


Le $\delta^{18}\text{O}$ du test des foraminifères planctoniques indique de nombreux cycles Glaciaire/Interglaciaire

Rappel historique

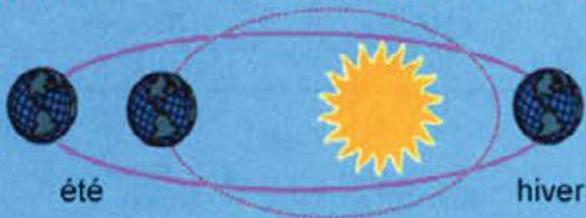
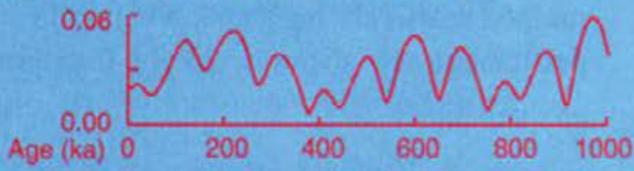


1980 : Résurrection
de la théorie
astronomique des
climats
(Milankovitch, 1941)

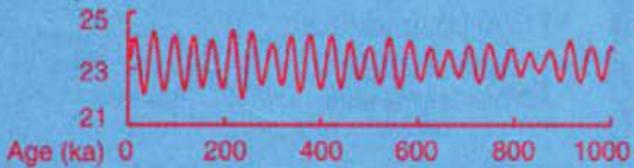


Les cycles Glaciaire/Interglaciaire présentent des fréquences particulières

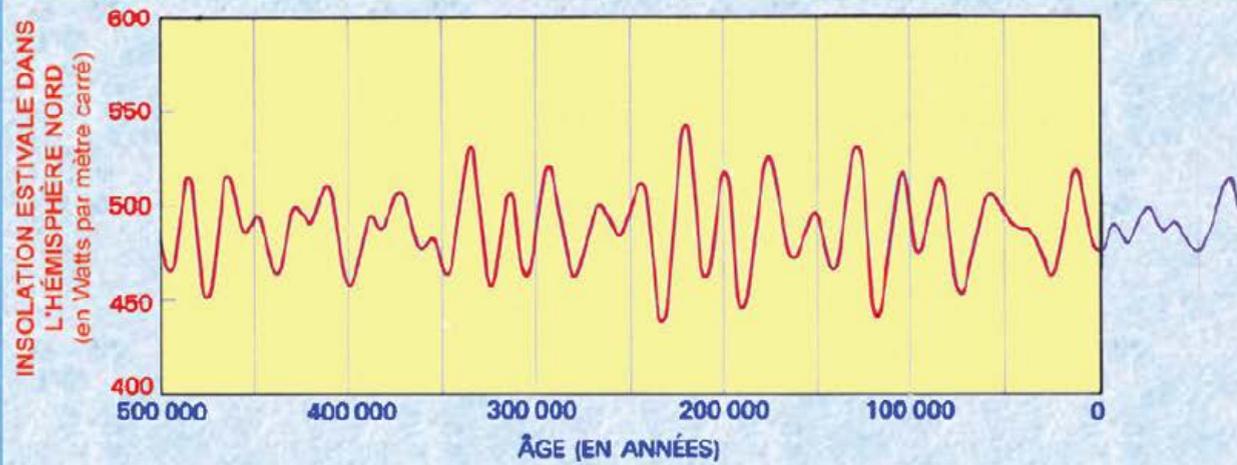
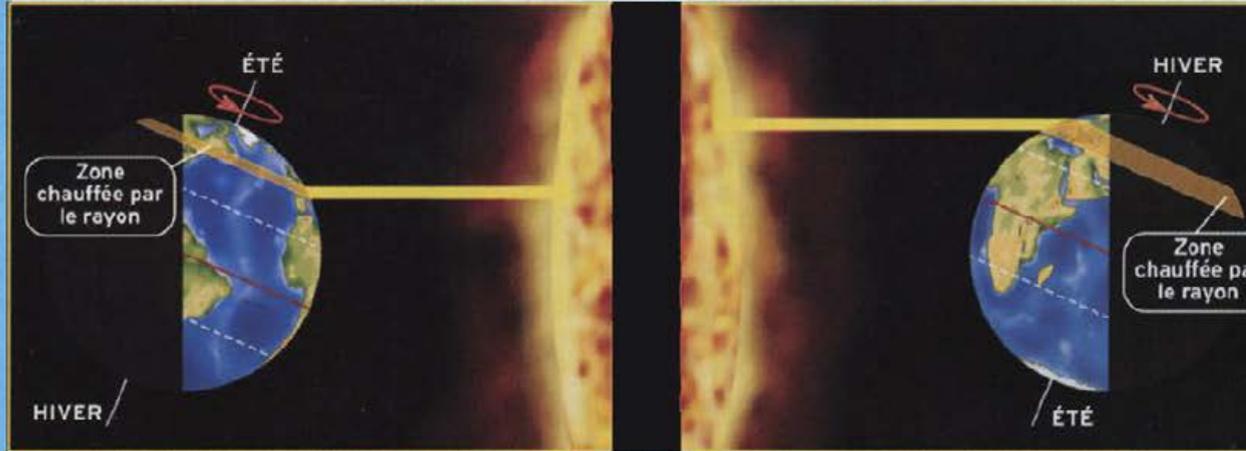
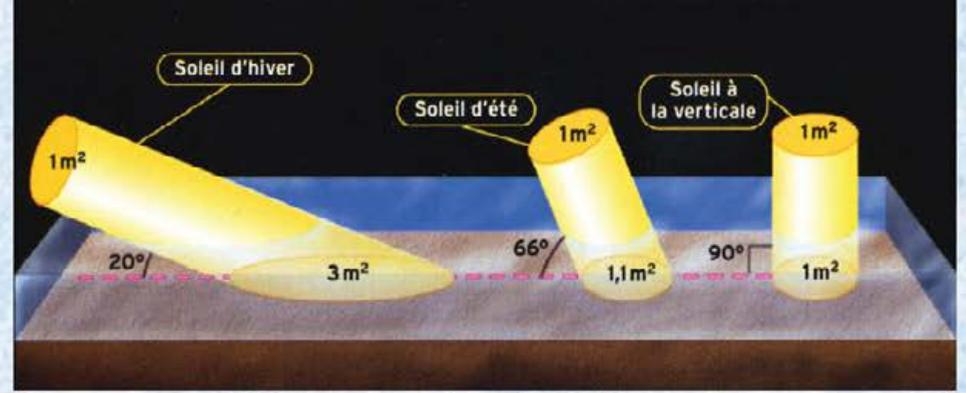
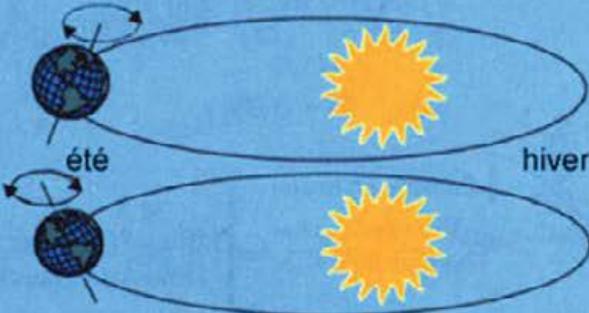
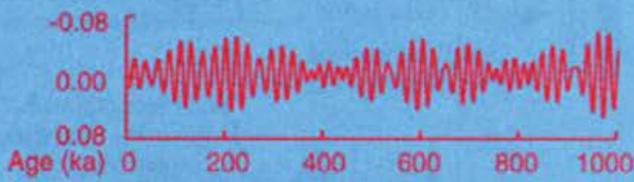
Excentricité : 400 ka et 100ka



Obliquité : 41 ka



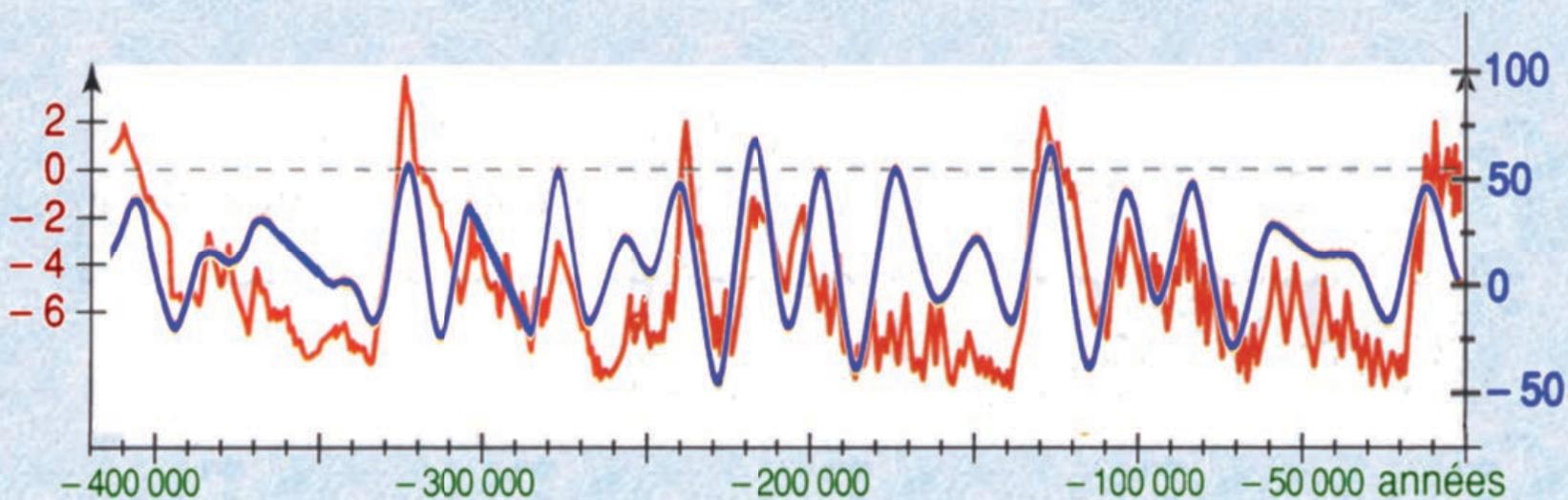
Précession : 23 ka



L'insolation au sol dépend de 3 paramètres astronomiques

Rappel historique

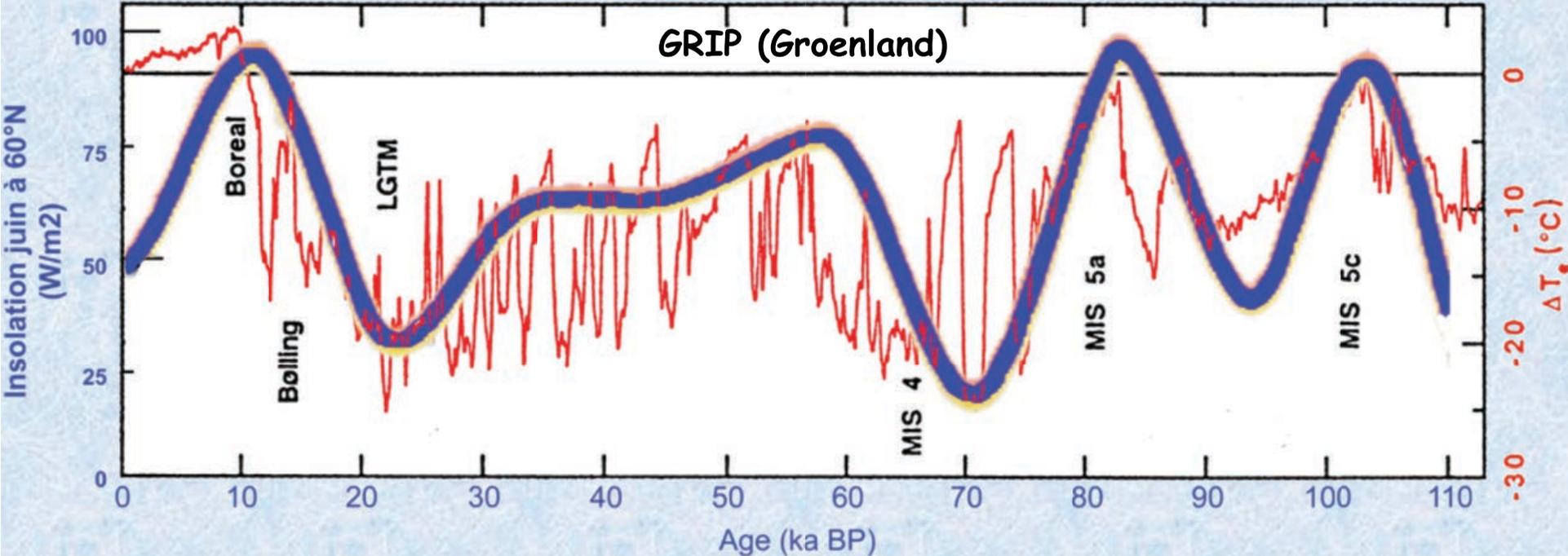
variations de la température
moyenne par rapport à l'actuelle
(en °C)



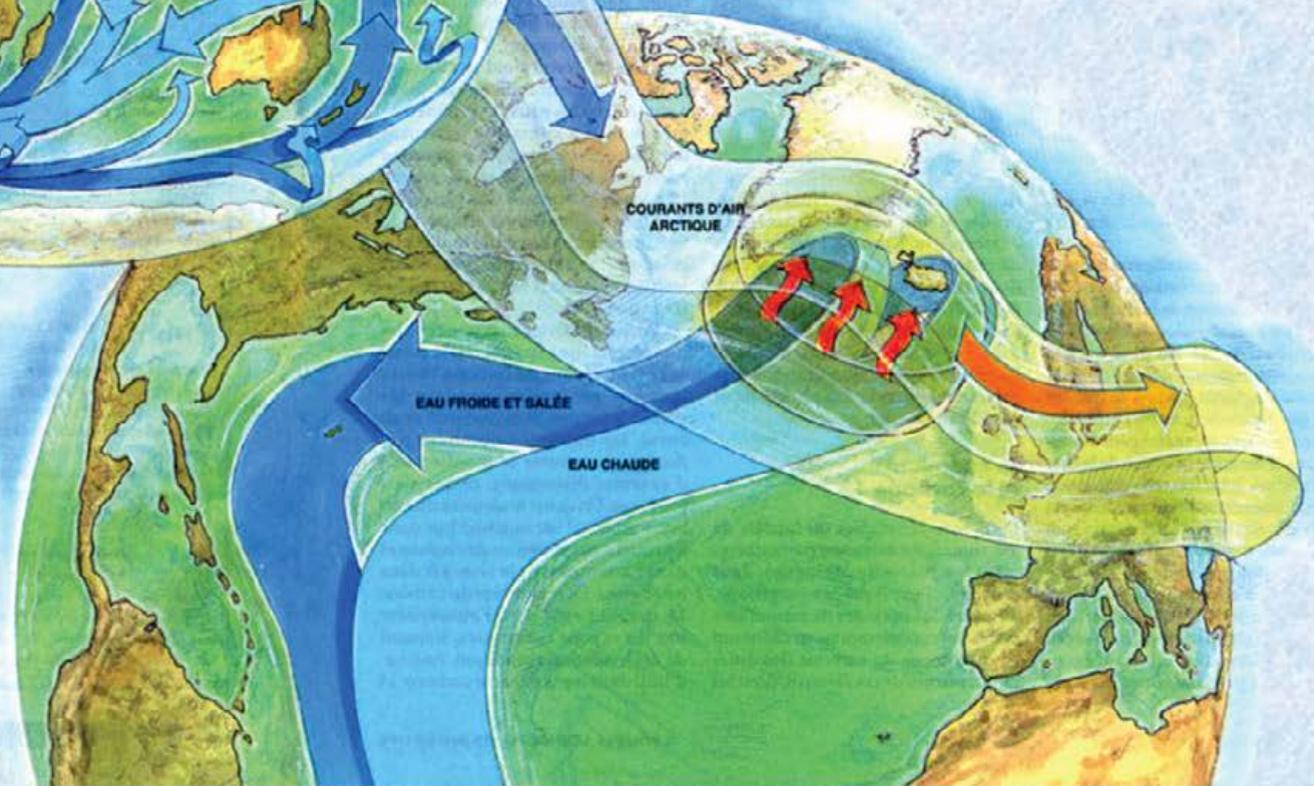
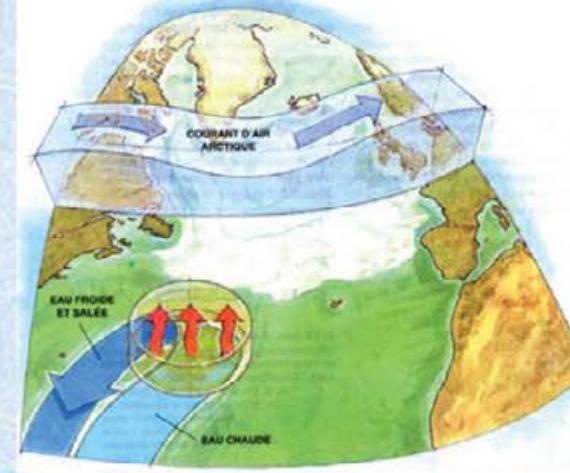
insolation en juillet par 65° N

Rappel historique

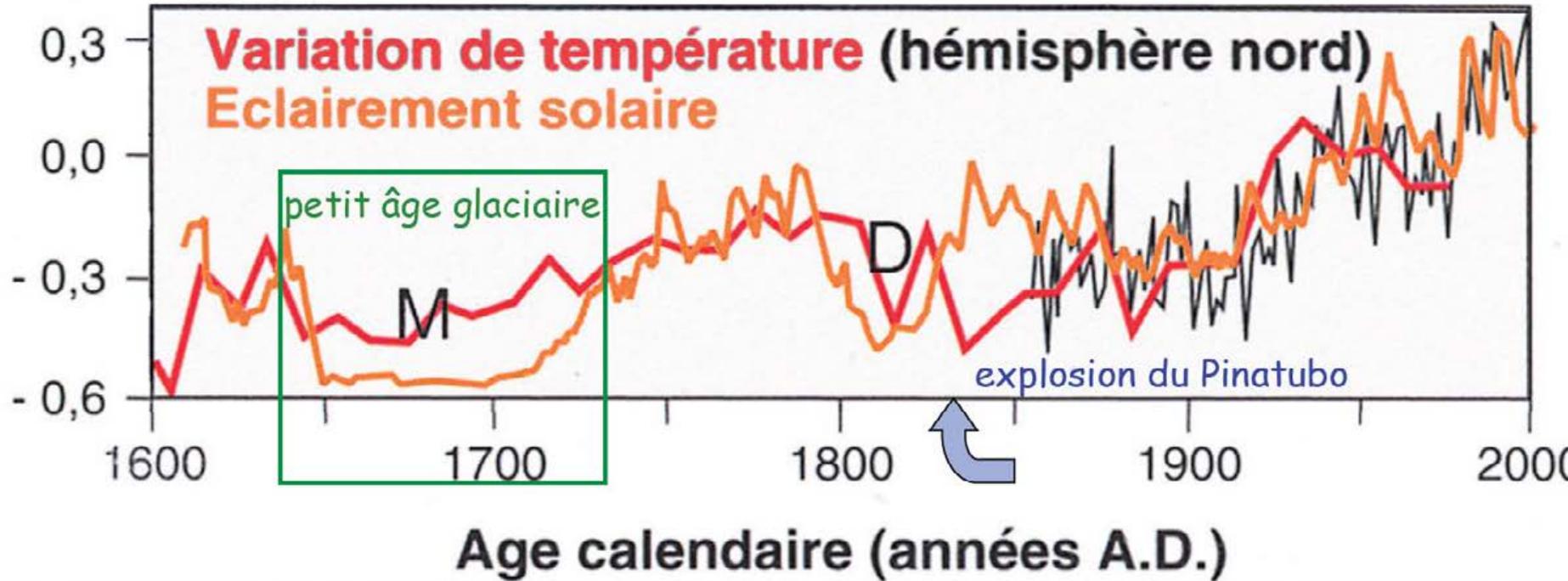
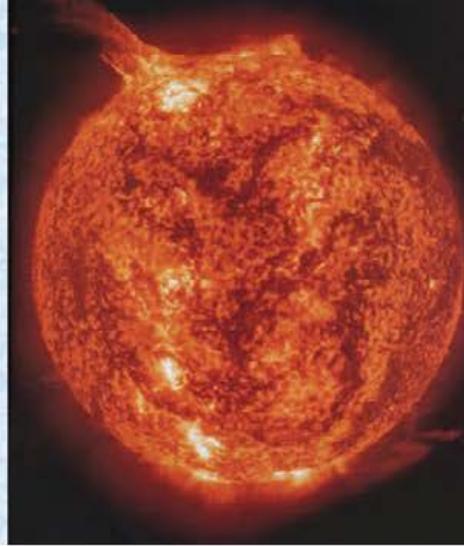
1990 : Variations rapides du climat global et interaction Atmosphère-Hydrosphère-Cryosphère



Le $\delta^{18}\text{O}$ des glaces polaires révèle une variabilité climatique haute fréquence, d'amplitude inattendue

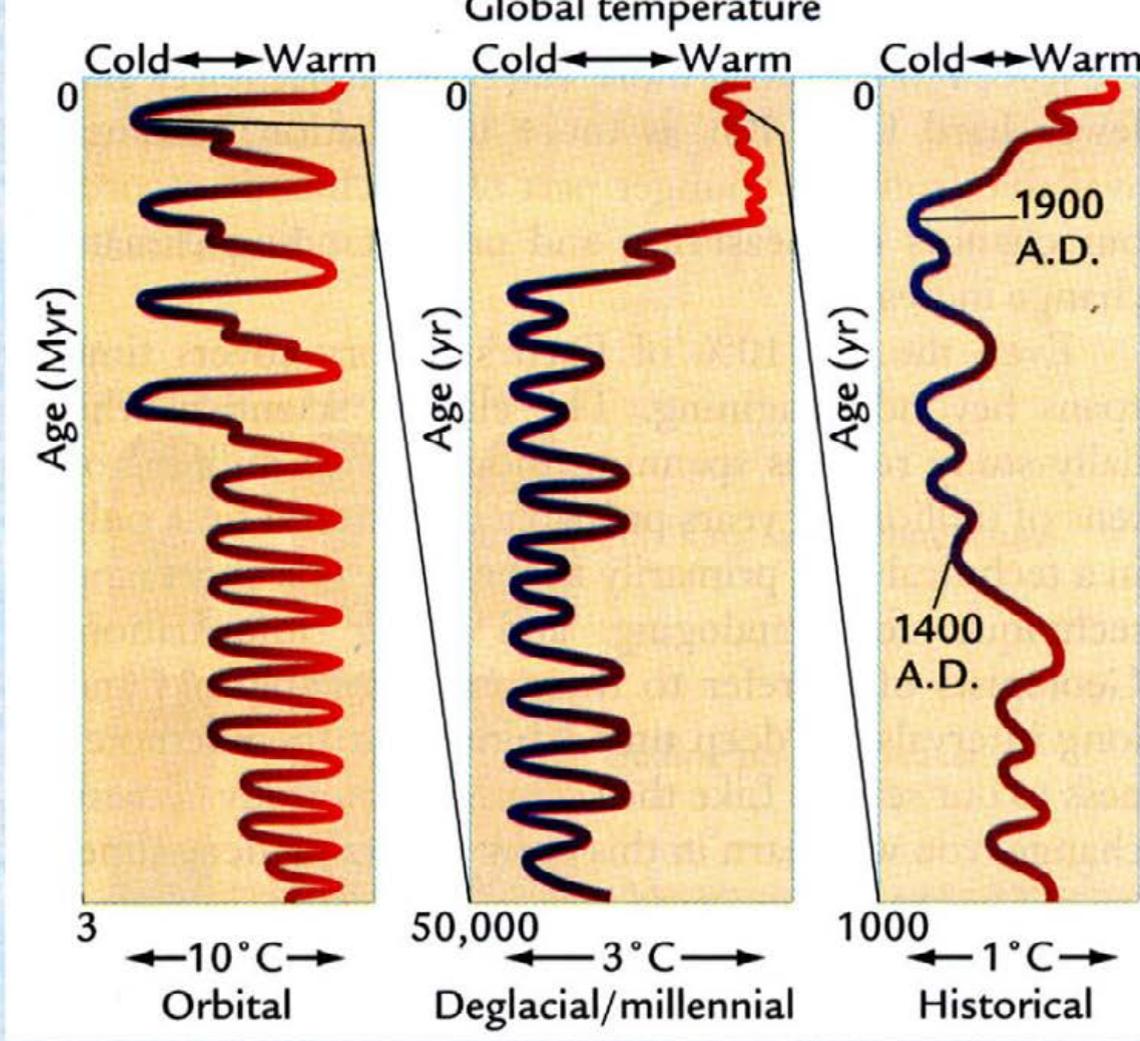


La circulation thermohaline : hypothèse de Broecker pour expliquer les variations rapides du climat global



L'activité solaire intrinsèque est variable et influence le climat terrestre

Aujourd' hui :
On cherche a mieux comprendre la variabilité haute fréquence du climat, et a distinguer la part naturelle et anthropique de son évolution



La variabilité naturelle du climat global se manifeste à plusieurs échelles de temps (qui s' emboîtent)

A photograph of a tropical city street covered in snow. Several palm trees are visible, their fronds and trunks heavily laden with white snow. In the background, there are multi-story buildings, some with balconies. The sky is a clear, bright blue. The overall scene is a stark contrast to the typical tropical climate.

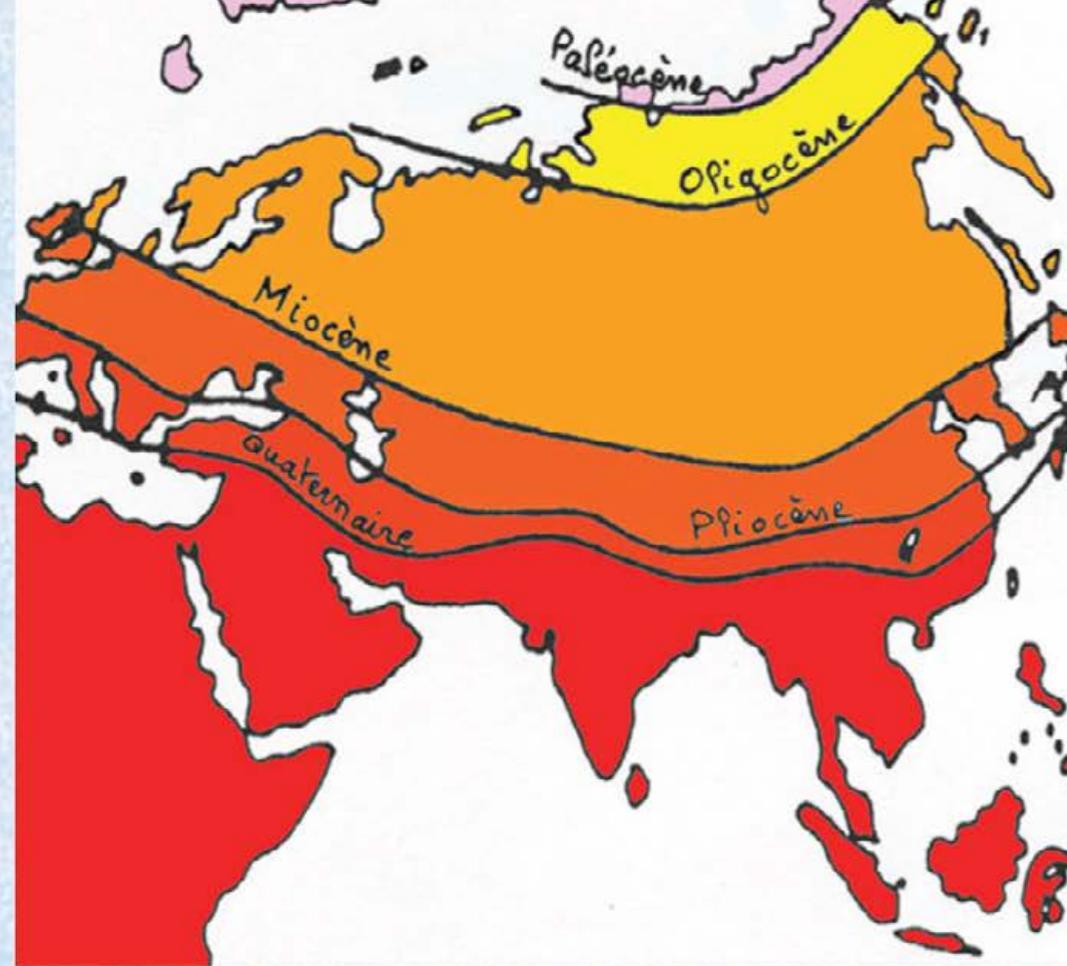
Depuis quand ce système
“Glaciaire/Interglaciaire”
fonctionne-t-il ?

Dégradation climatique globale
au cours
du Cénozoïque

Dégradation climatique globale

Tendance générale

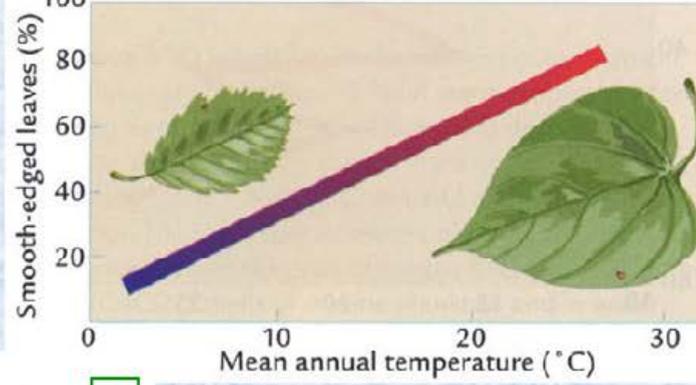
(qualitative)



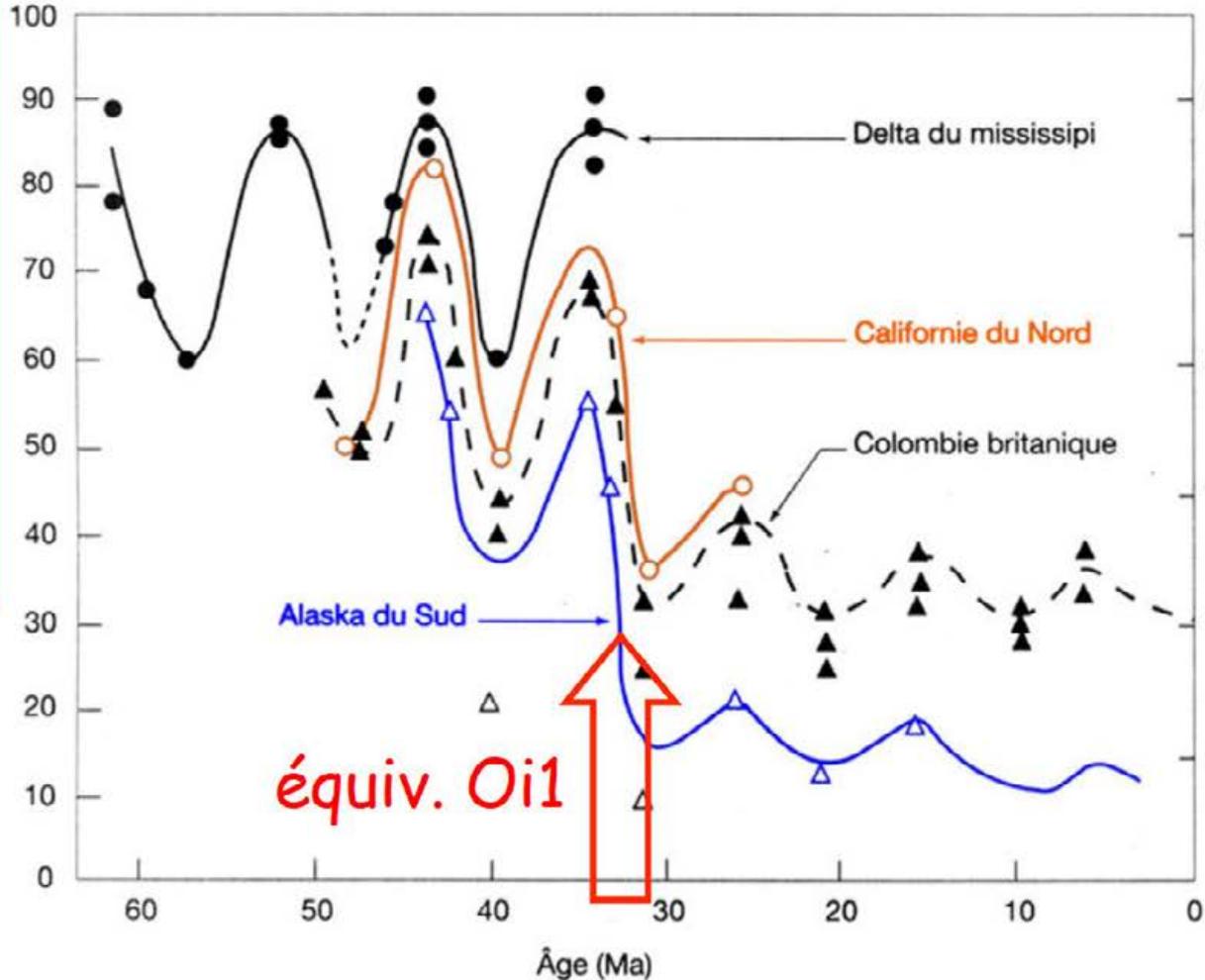
Migration de la limite septentrionale des palmiers au cours du Cénozoïque

Données paléontologiques continentales

(adaptation morphofonctionnelle)



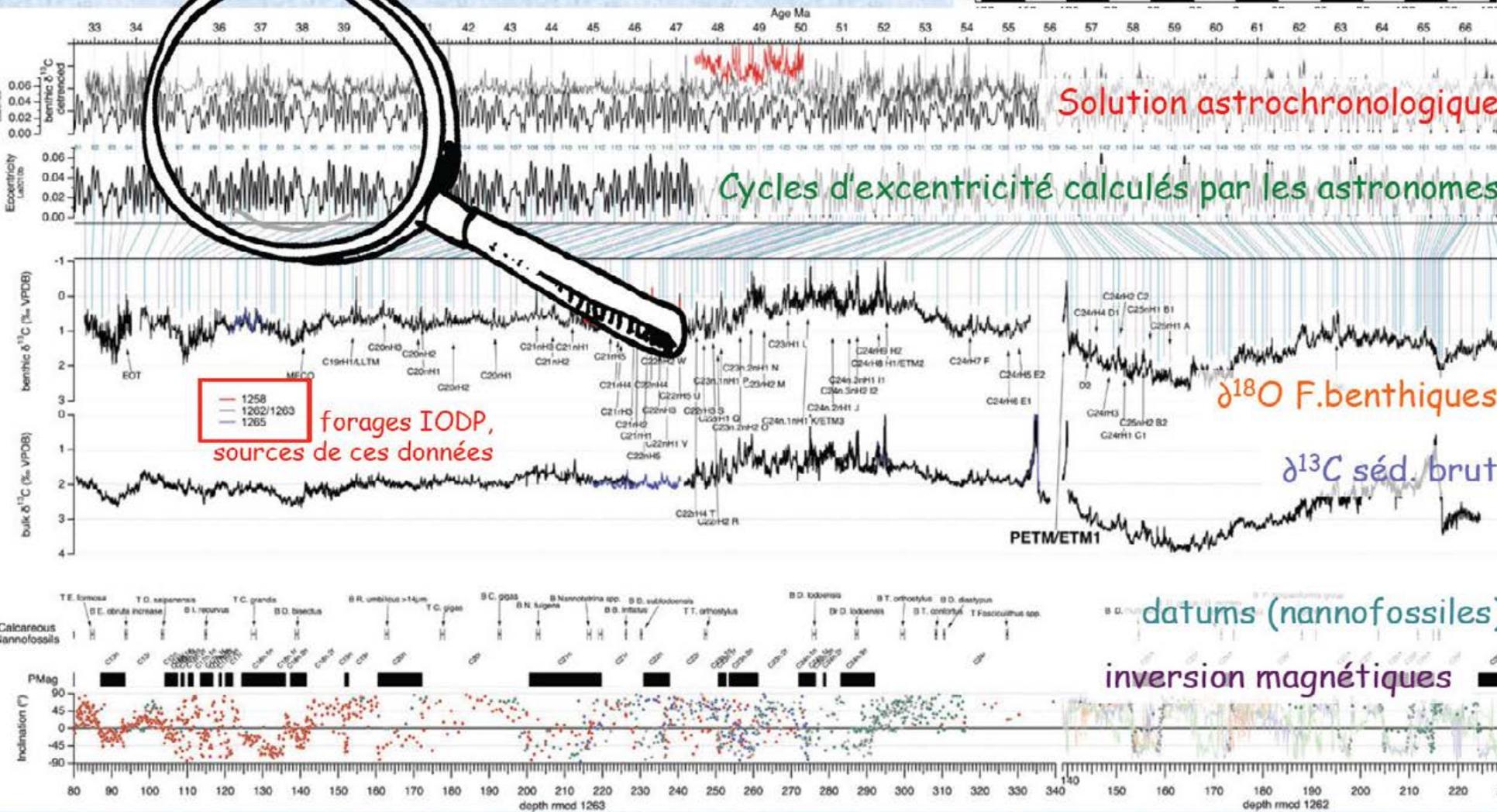
Pourcentage d'espèces à feuilles à bord lisse

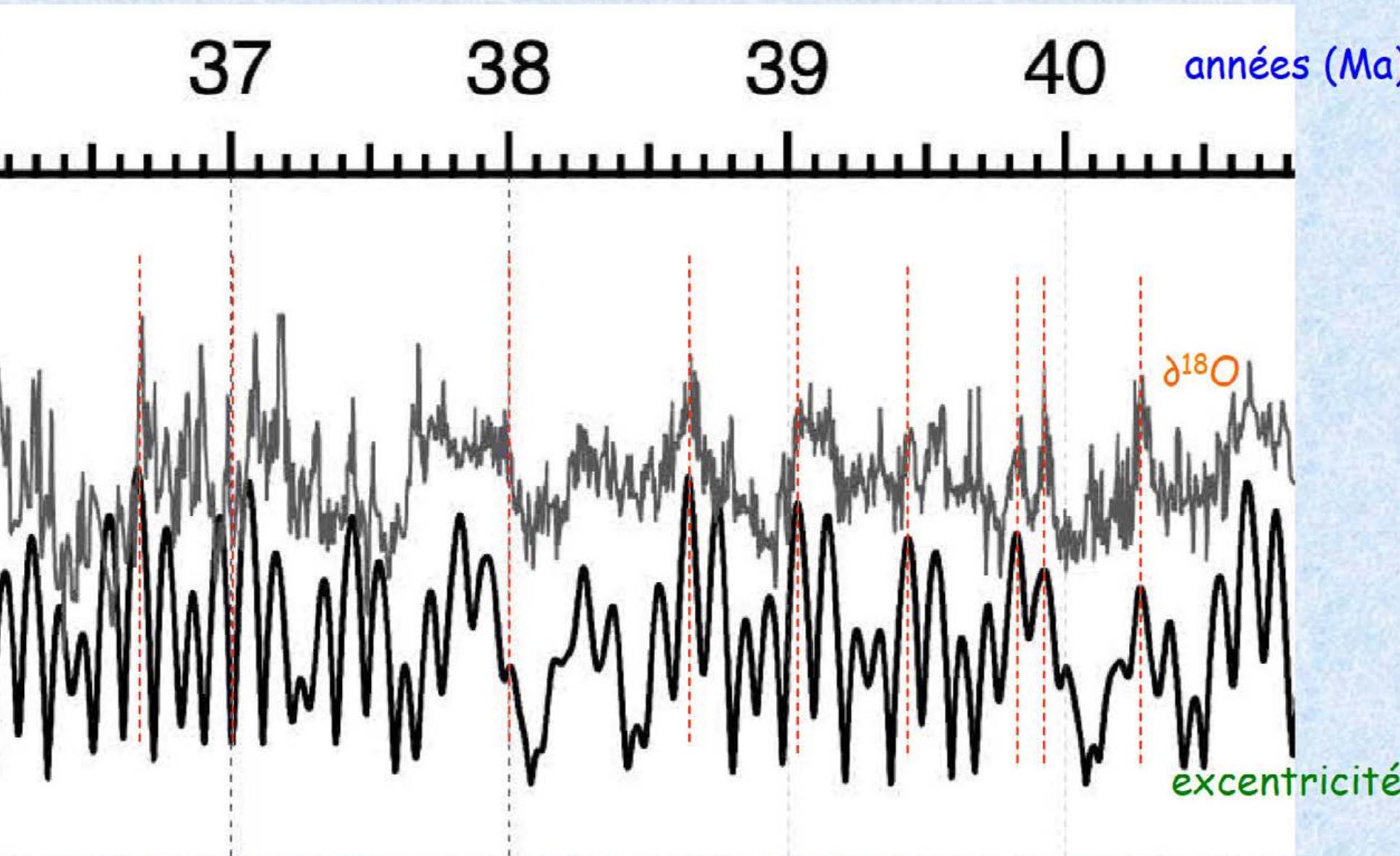


Température annuelle moyenne extrapolée

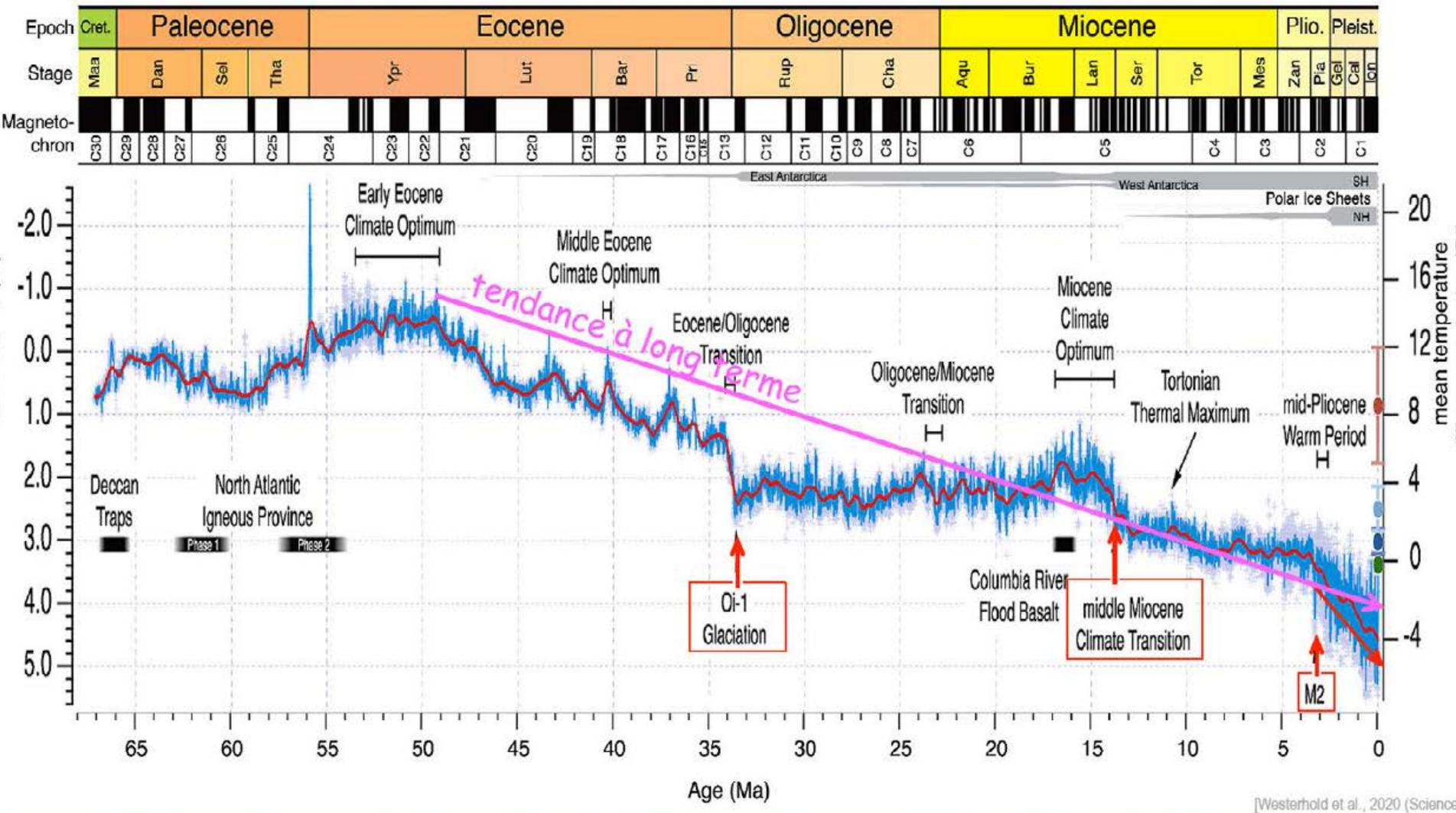
ESTIMATION DES TEMPÉRATURES SUR LE CONTINENT NORD-AMÉRICAIN À PARTIR DE LA FRÉQUENCE DES ESPÈCES DE PLANTES À FEUILLES À BORDS LISSES (indicateurs de climat chaud).

Compilation de données géochimiques marines pour le Cénozoïque





Dégradation climatique globale

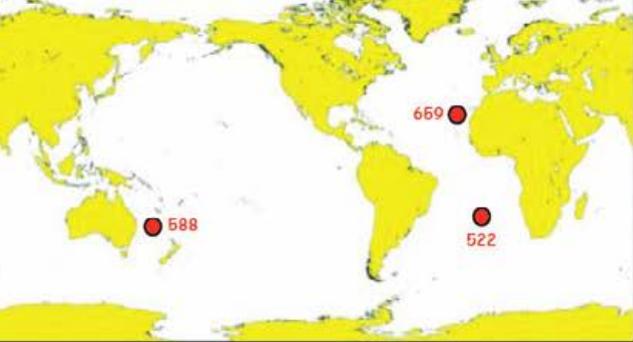


[Westerhold et al., 2020 (Science)]

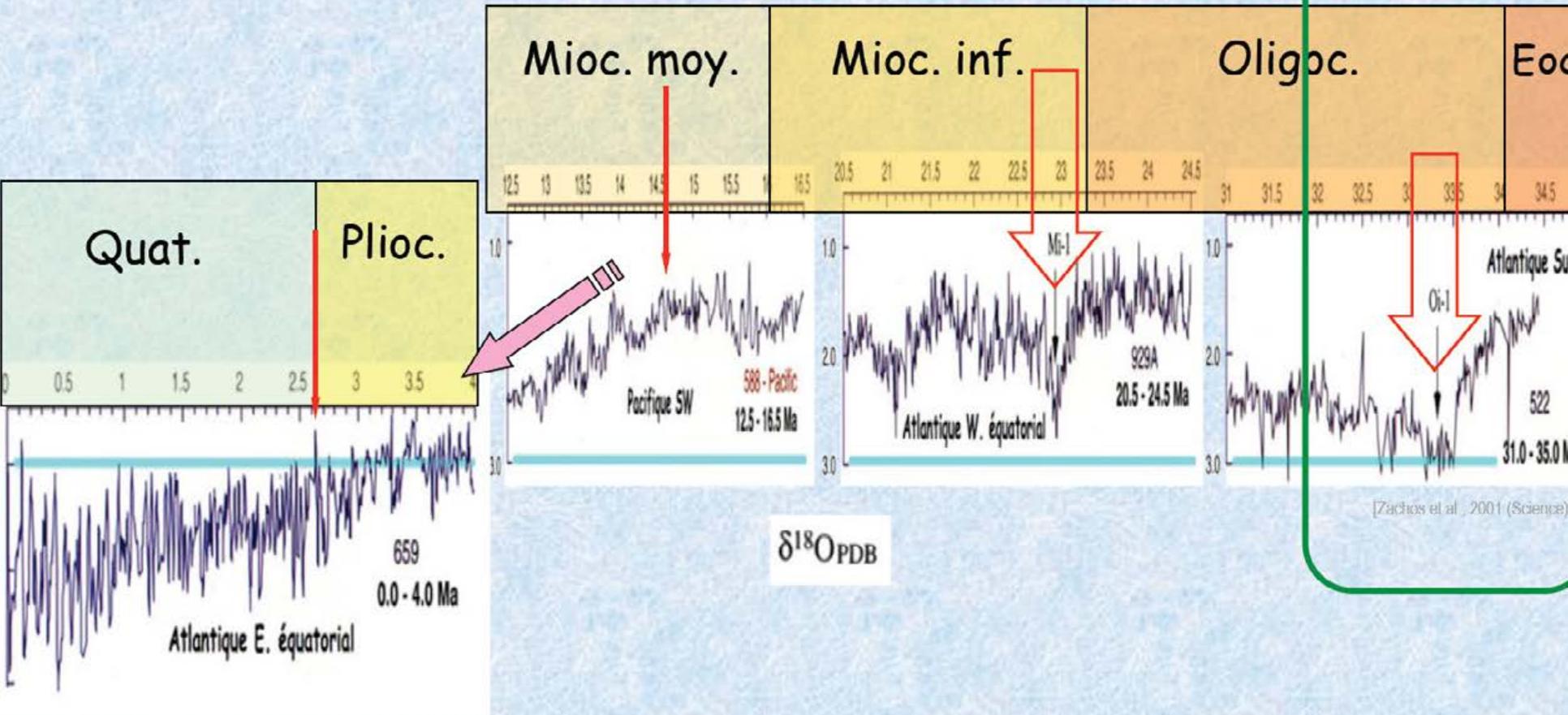
Courbe de Westerhold et al. (2020)

Actuellement la plus récente et la plus précise du genre (datation par astrochronologie)

De quand datent les premières glaciations
anté-Quaternaires ?



$\delta^{18}\text{O}$ (f. benthiques) de 0 à 35 Ma
(plusieurs séquences marines du Cénozoïque)

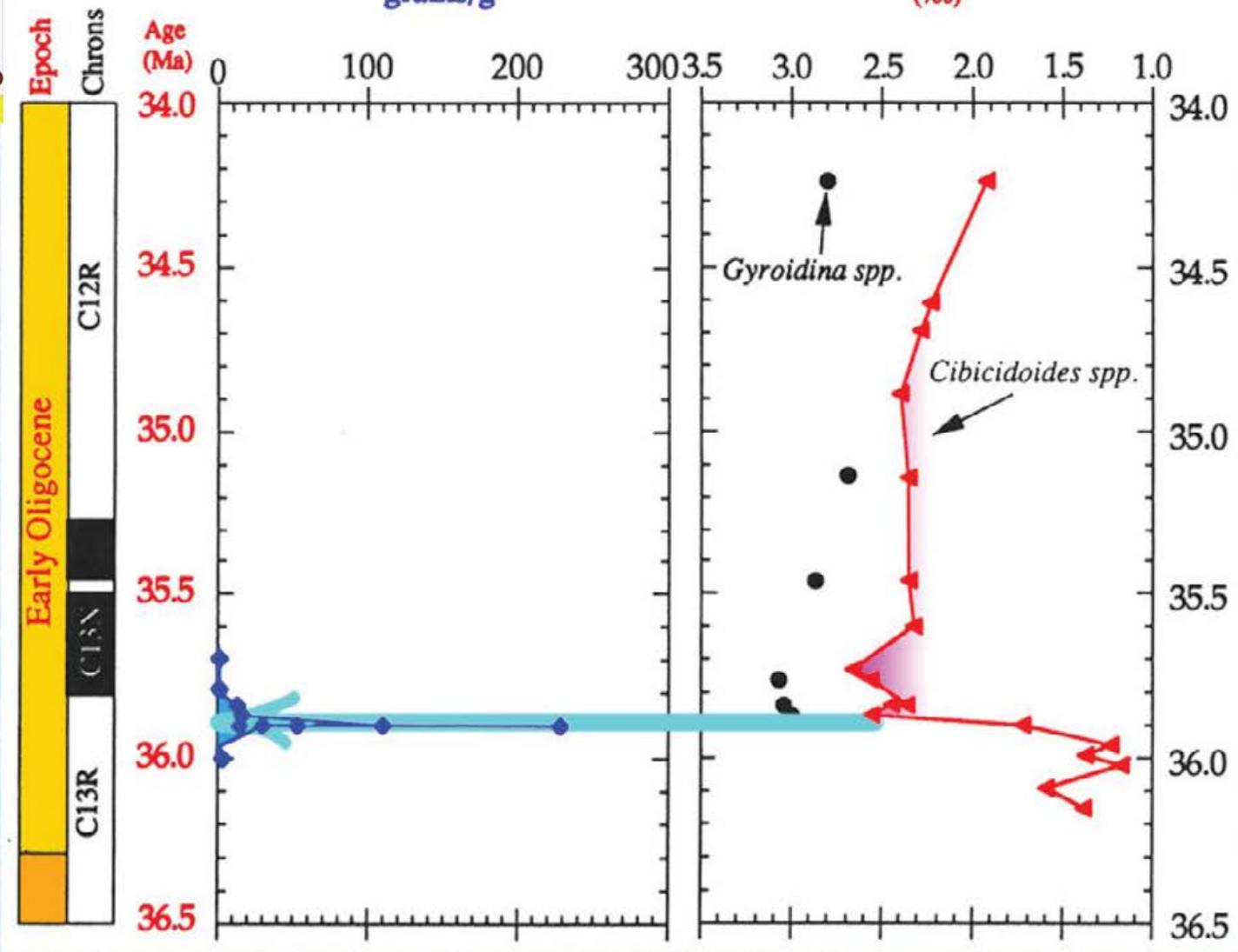


[Zachos et al., 2001 (Science)]

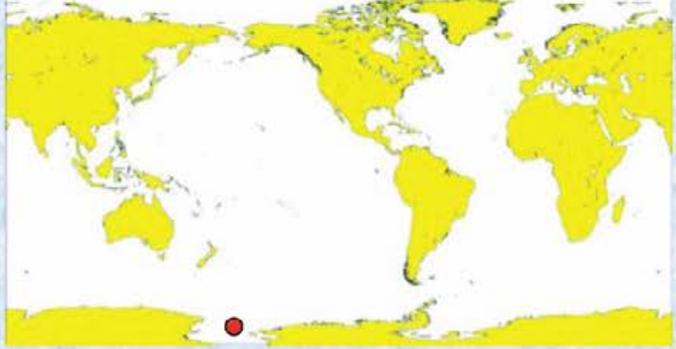
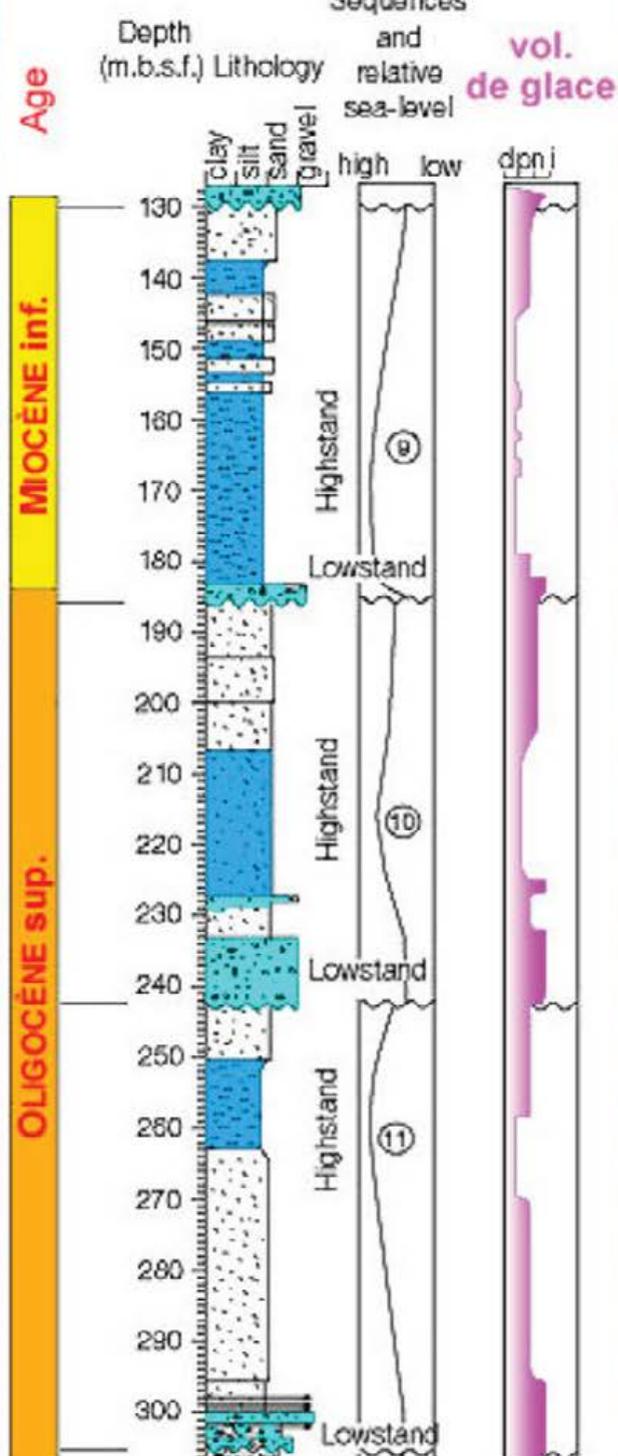


ons

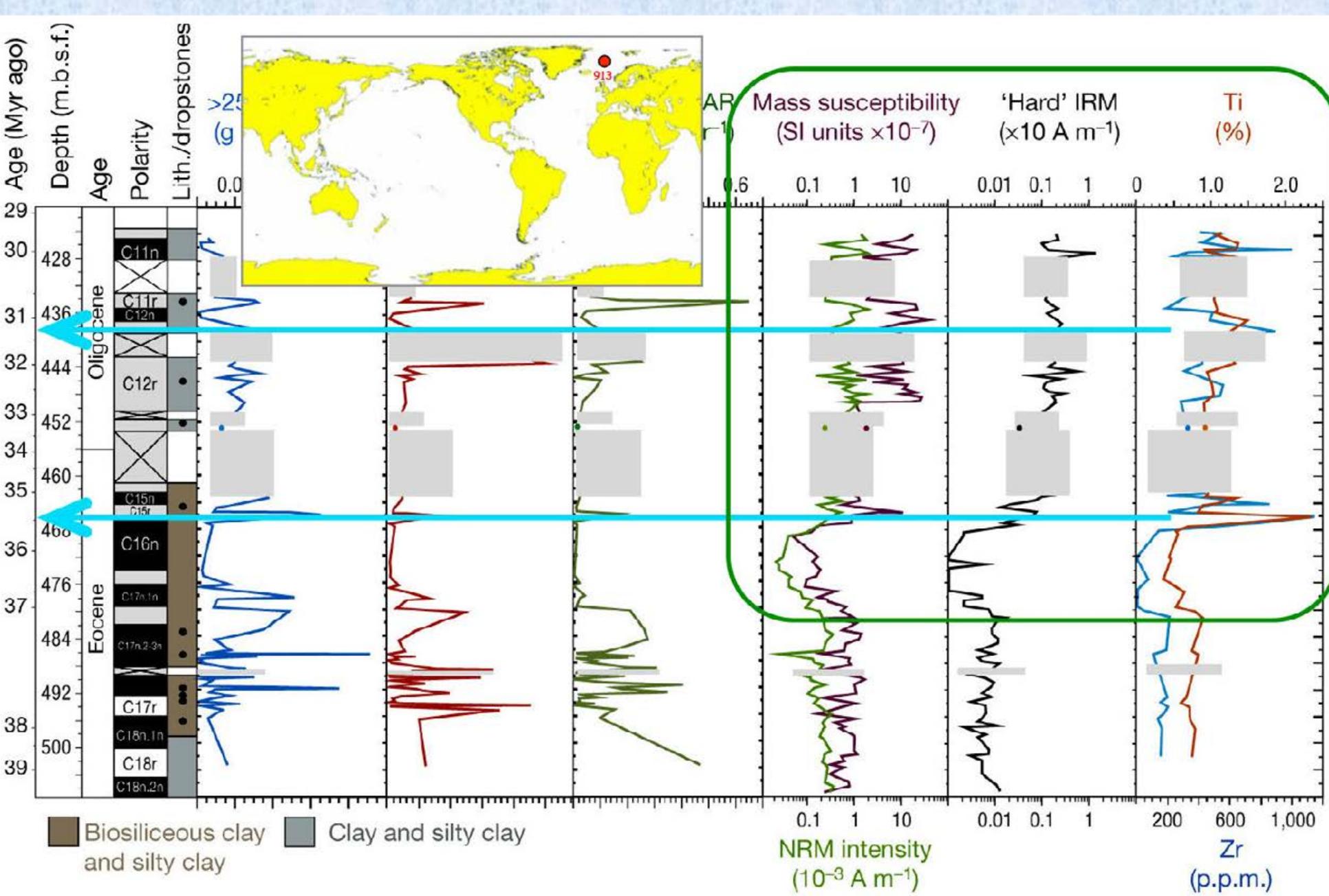
ODP Leg 120
Site 748



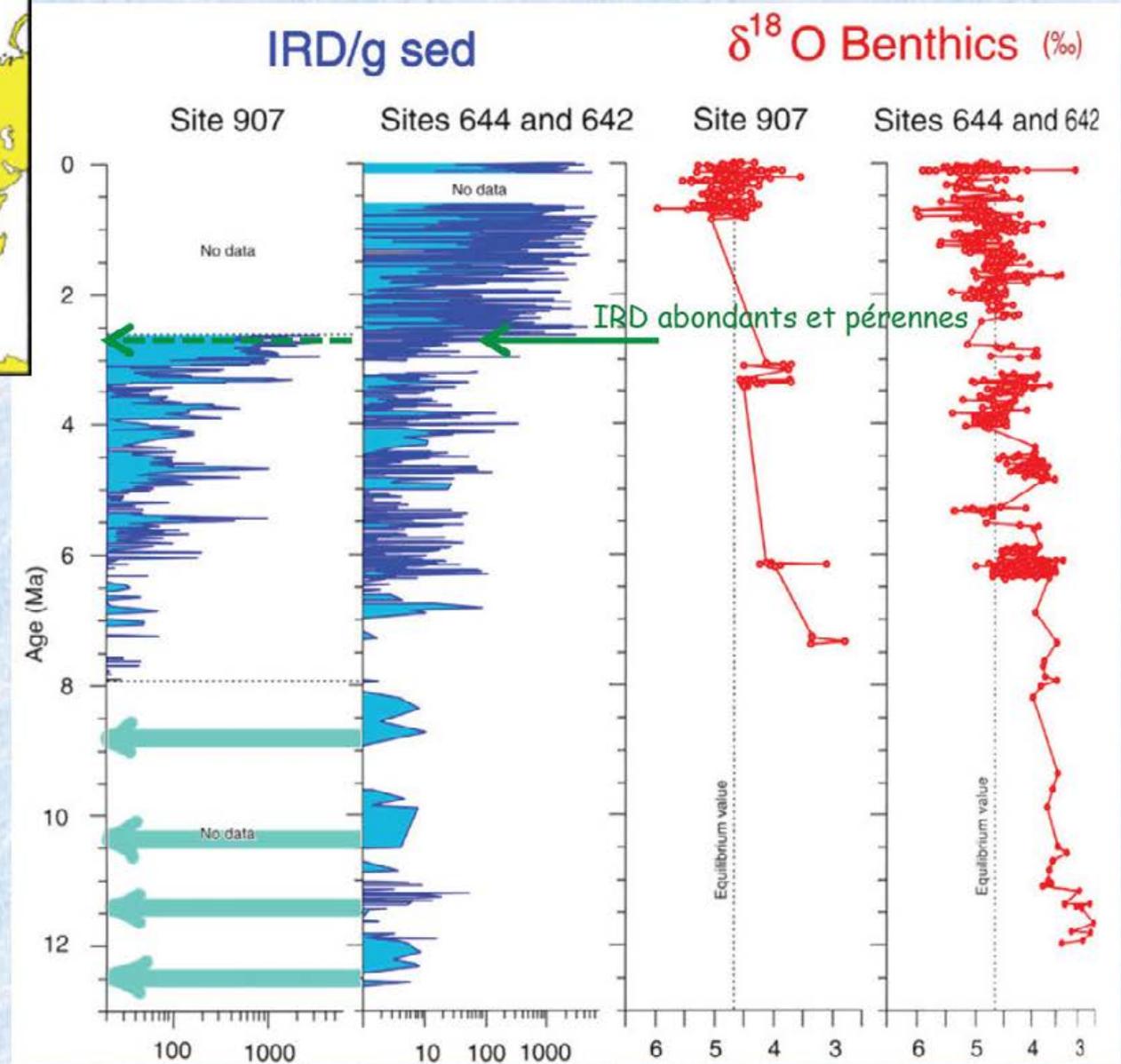
1^{er} témoignage d'une calotte polaire antarctique (éphémère)
au Cénozoïque : Plateau des Kerguelen



Tillites et IRD témoignent du développement d'une calotte polaire antarctique encore instable à l'Oligo-Miocène (Mer de Ross)

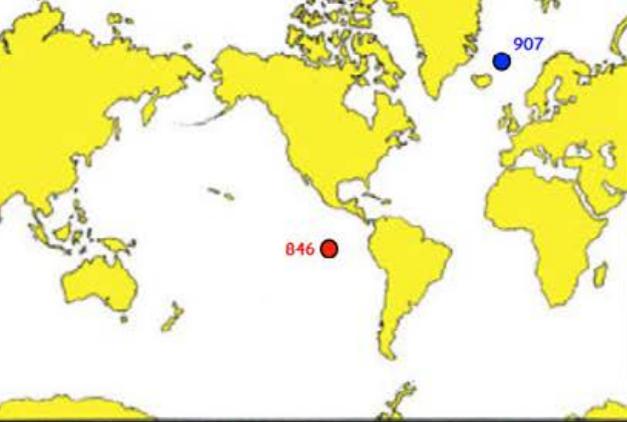


IRD témoignent du développement d'une calotte polaire arctique instable à l'Éocène-Oligocène (Mer de Ross)

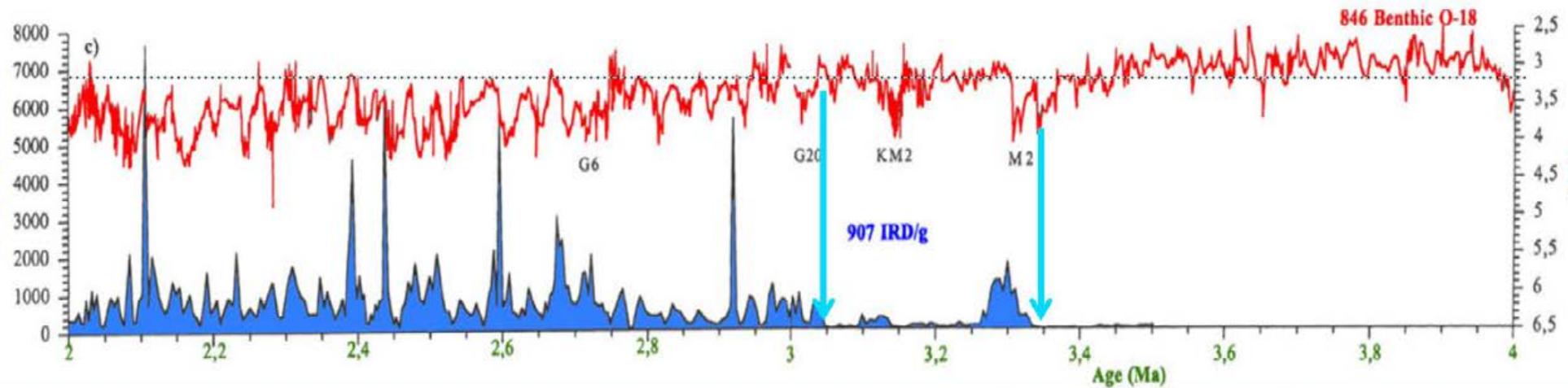


[Fronval & Jansen (1996), Proc. ODP Sci. Res.]

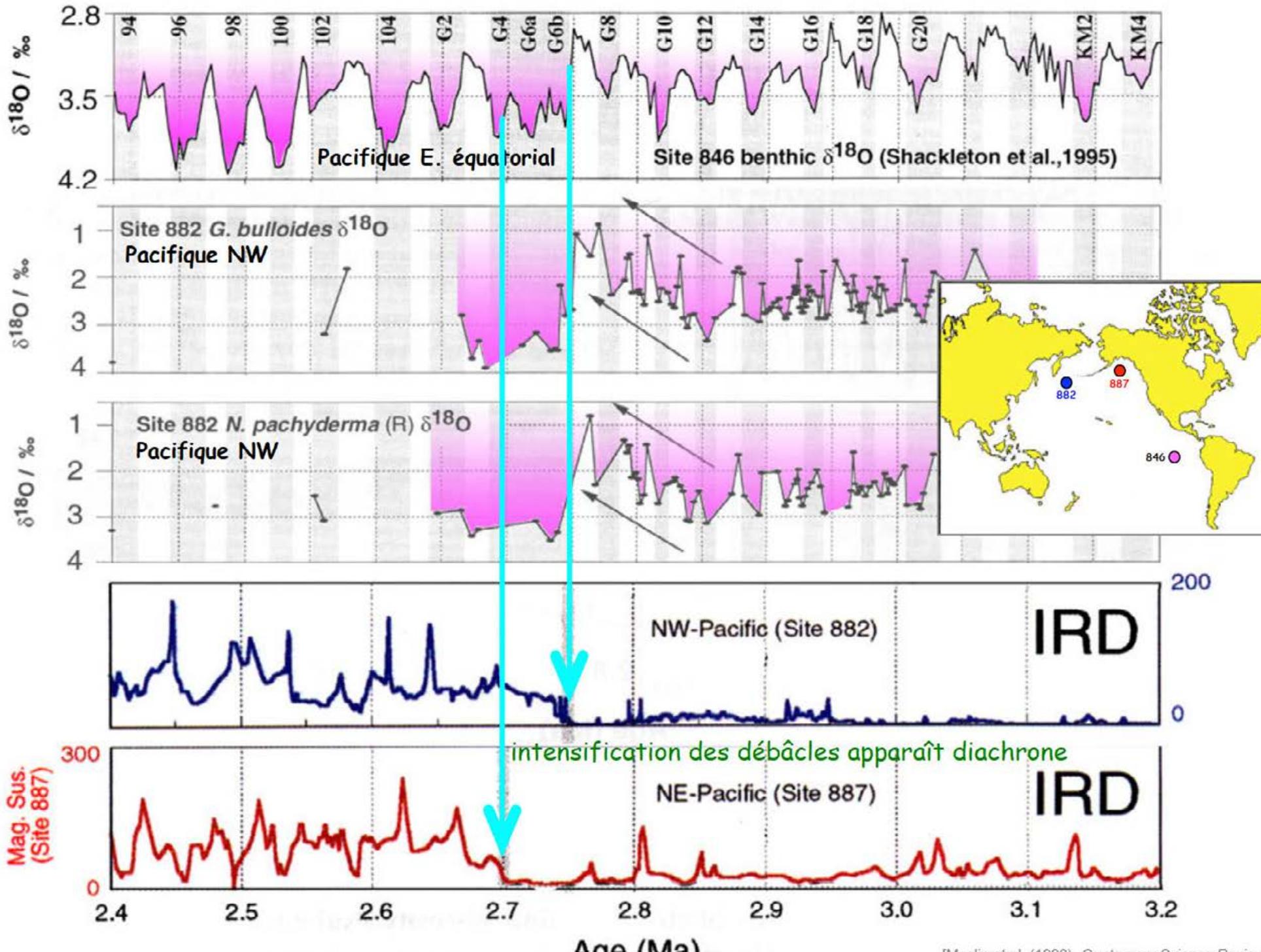
IRD de l'Atlantique Nord au Miocène moyen
en mer du Groenland et de mer d'Islande



$\delta^{18}\text{O}$ = Pacifique E. équatorial
 IRD = Atlantique NE

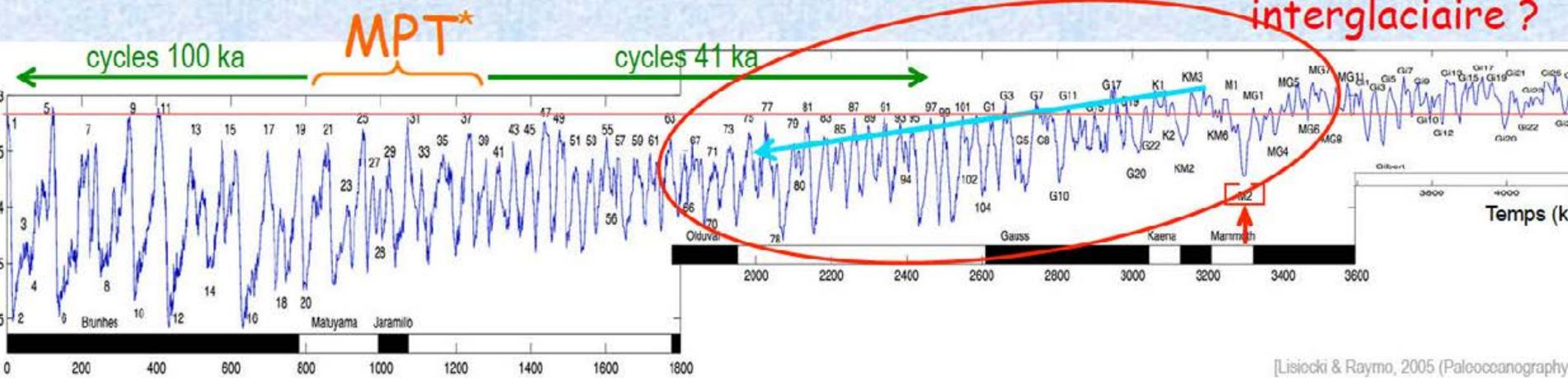


[Jansen et al., 2000 (Paleoceanography)]



Hémisphère nord, 1^{ères} glaciations

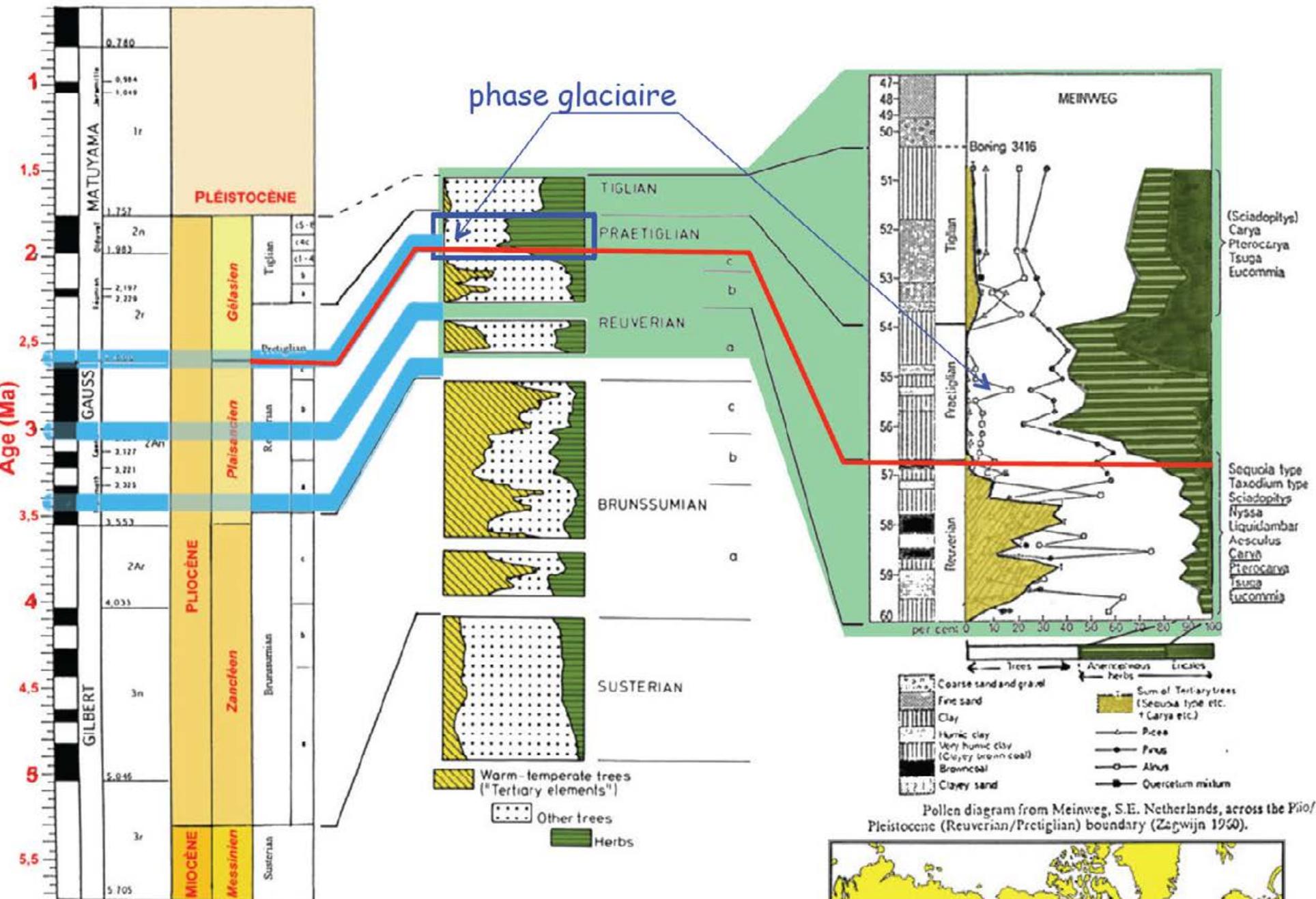
Comment déterminer quand ont commencé les 1ers cycles glaciaire/interglaciaire ?



[Lisiecki & Raymo, 2005 (Paleoceanography)]

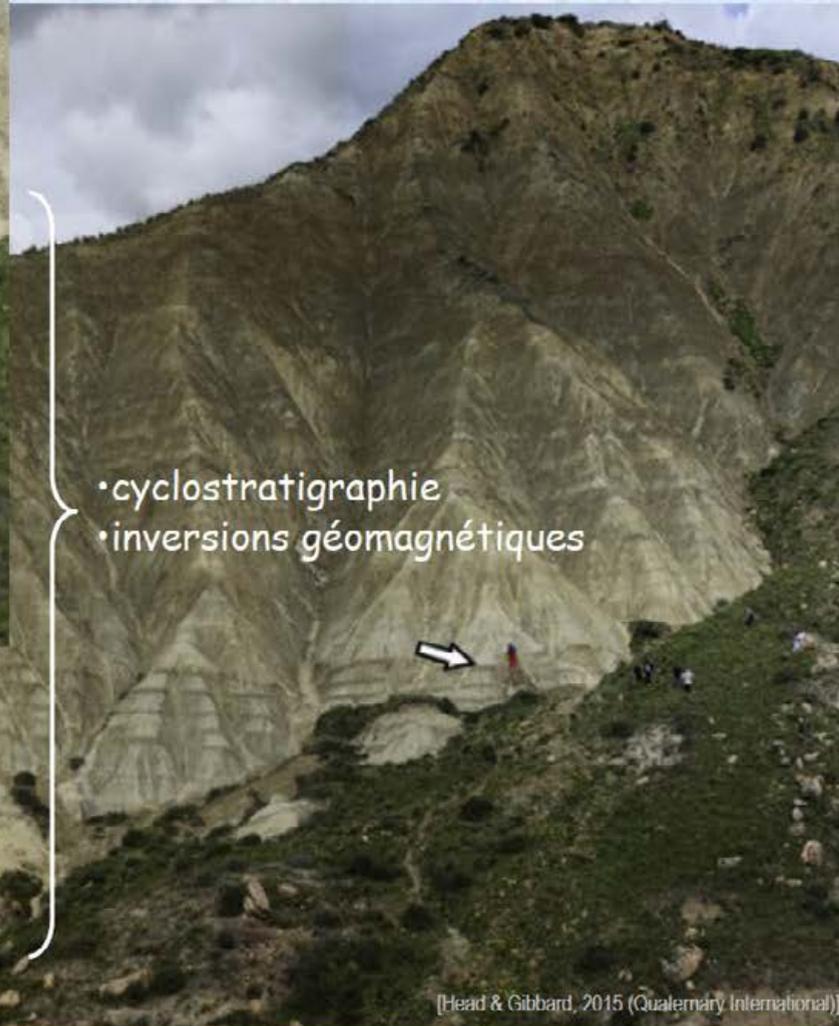
δ¹⁸O_{F.benth.} global de 0 à 4,2 Ma

*Mid-Pleistocene Transition



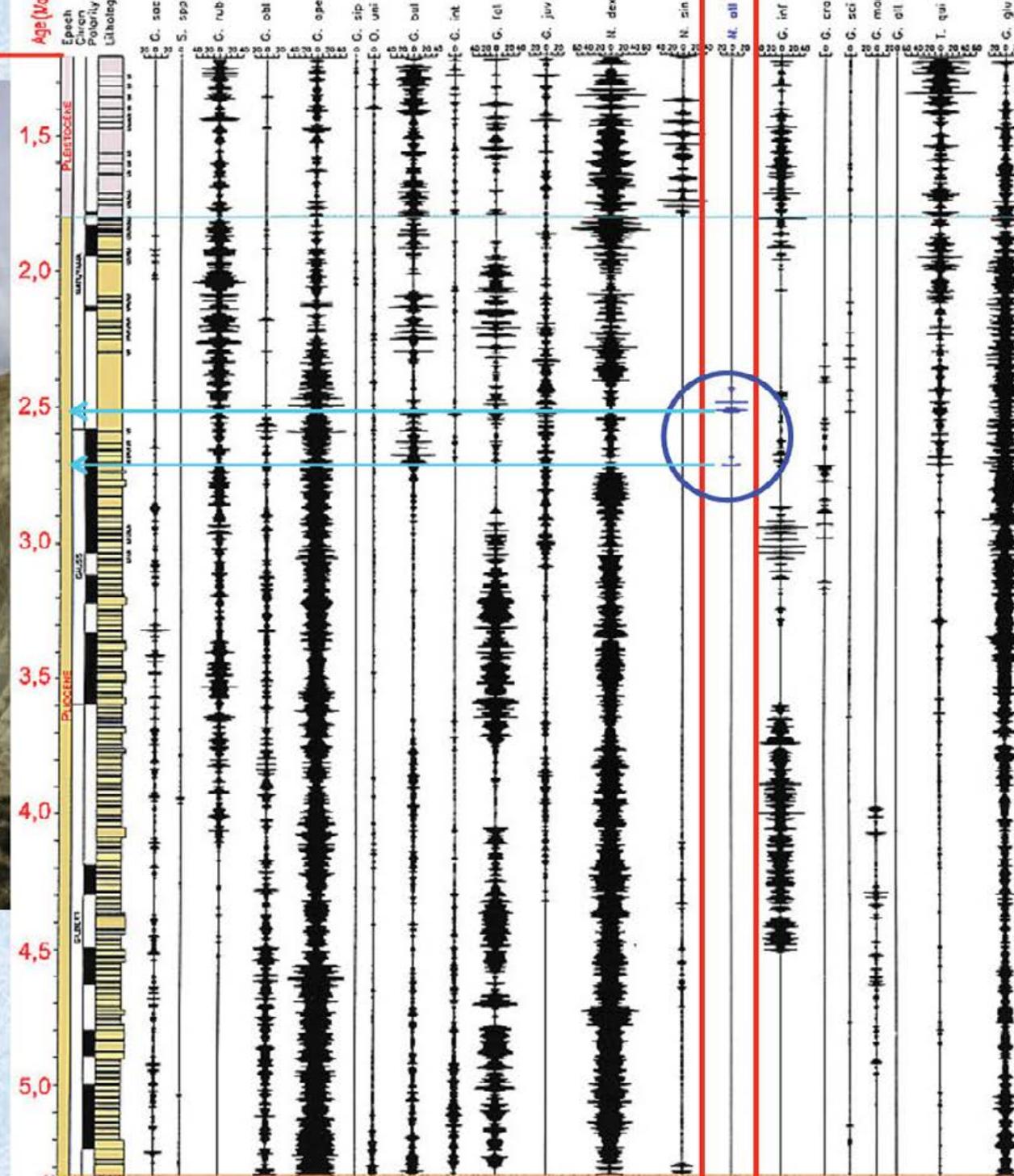
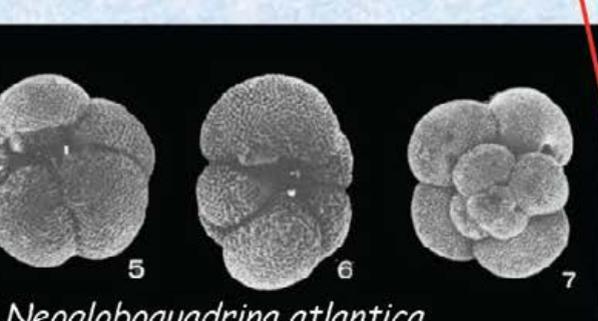
Pollen diagram from Meinweg, S.E. Netherlands, across the Pliocene/Pleistocene (Reuverian/Praetiglian) boundary (Zagwijn 1960).

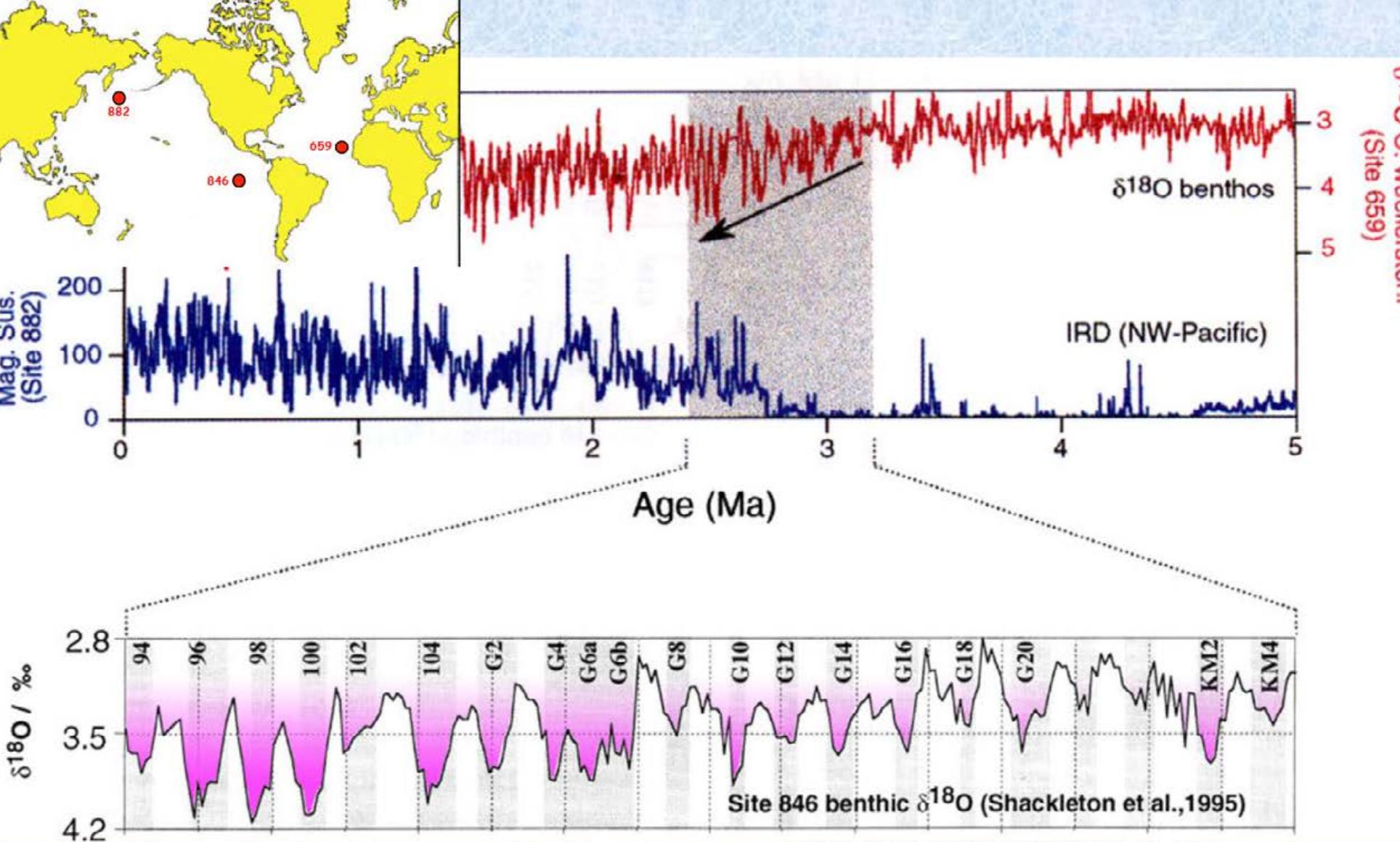




Coupe de Monte San Nicolas (Sicile)
GSSP du Gélasién (2,588-1,806 Ma)

Hémisphère nord, 1^{ères} glaciations





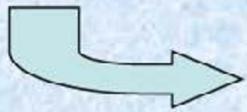
- Site 659 = Atlantique E. équatorial ($\delta^{18}\text{O}$ f. benthiques)
- Site 882 = Pacifique NW (IRD)
- Site 846 = Pacifique E. équatorial ($\delta^{18}\text{O}$ f. benthiques)

Qu'est-ce qui a déclenché la prise en glace des pôles ?



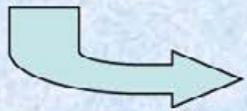
Quelles peuvent-être les causes ?

Une baisse de l'activité solaire ?



l'amplitude de ce phénomène est trop faible pour provoquer des glaciations.

Les paramètres astronomiques ?



ils existent depuis la nuit des temps et ont rythmé le climat terrestre sans forcément provoquer des glaciations,

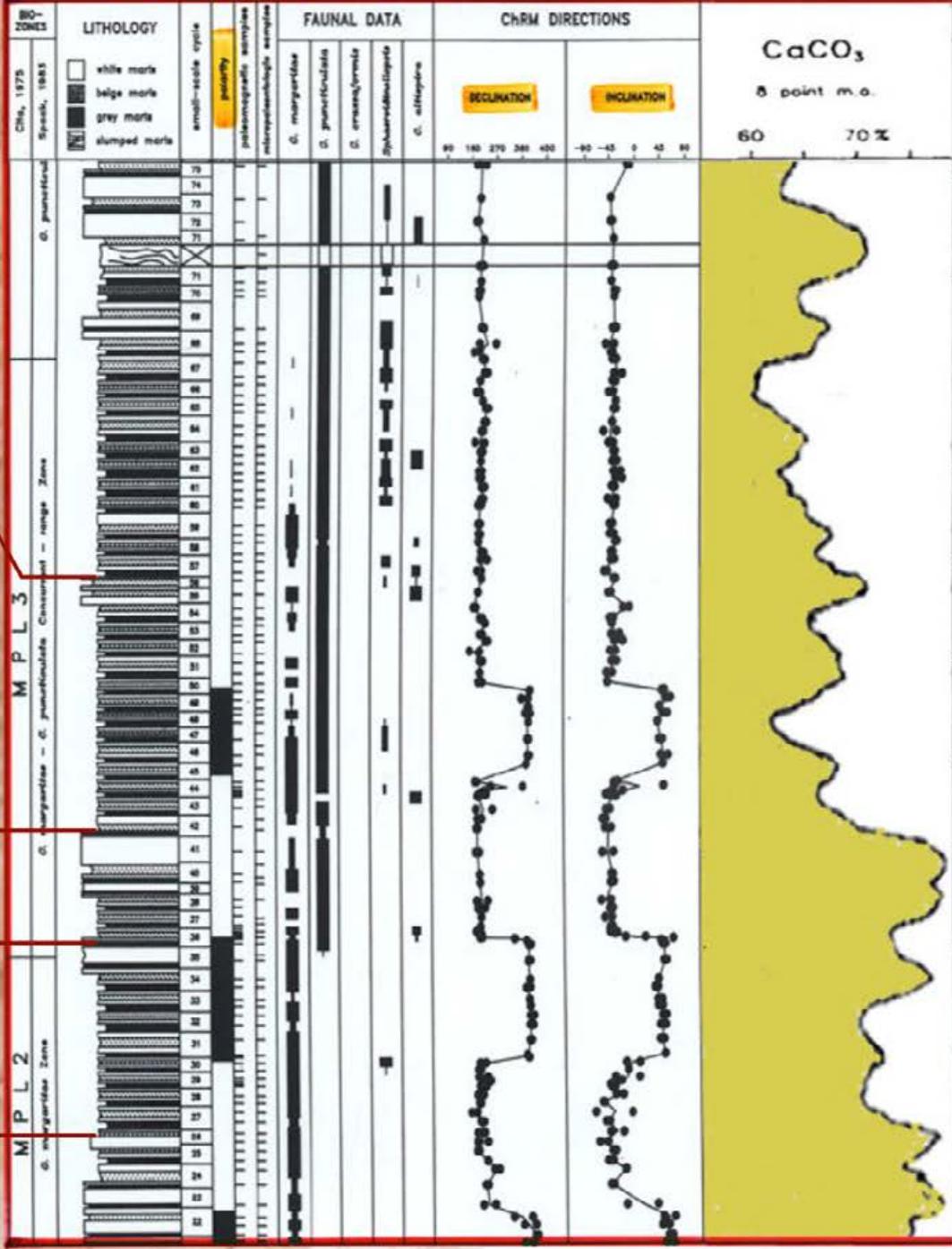


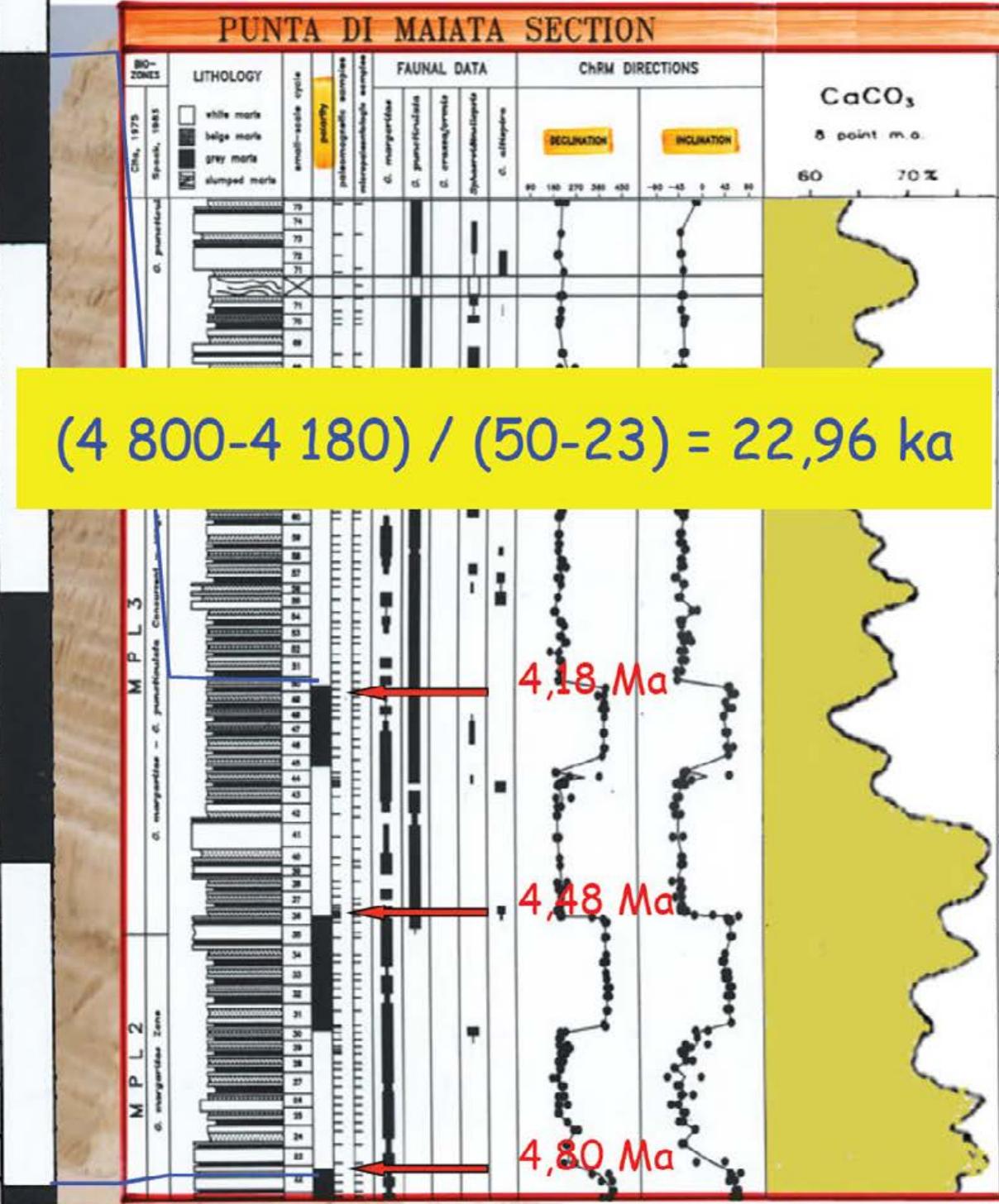
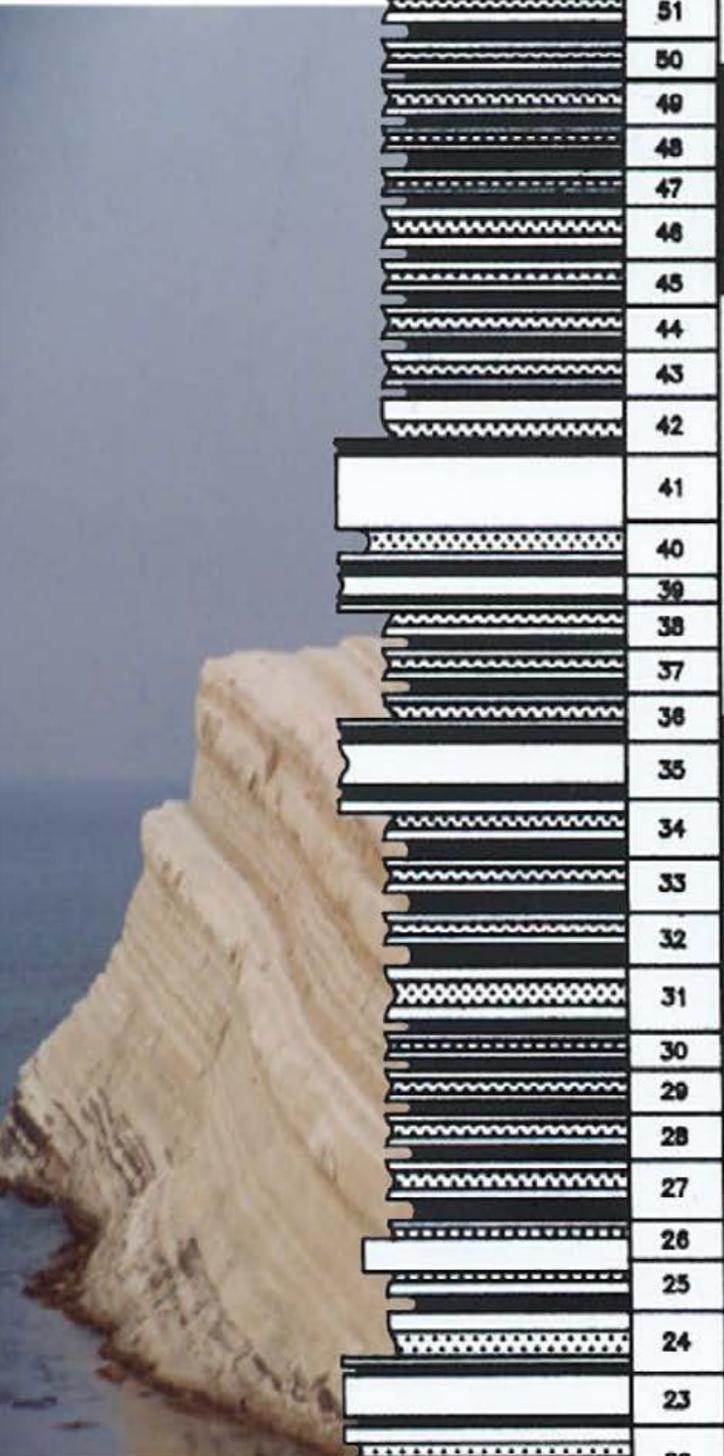
Cycles astronomiques exprimés par la lithologie
(Pliocène de Sicile, -5 à -3 Ma)

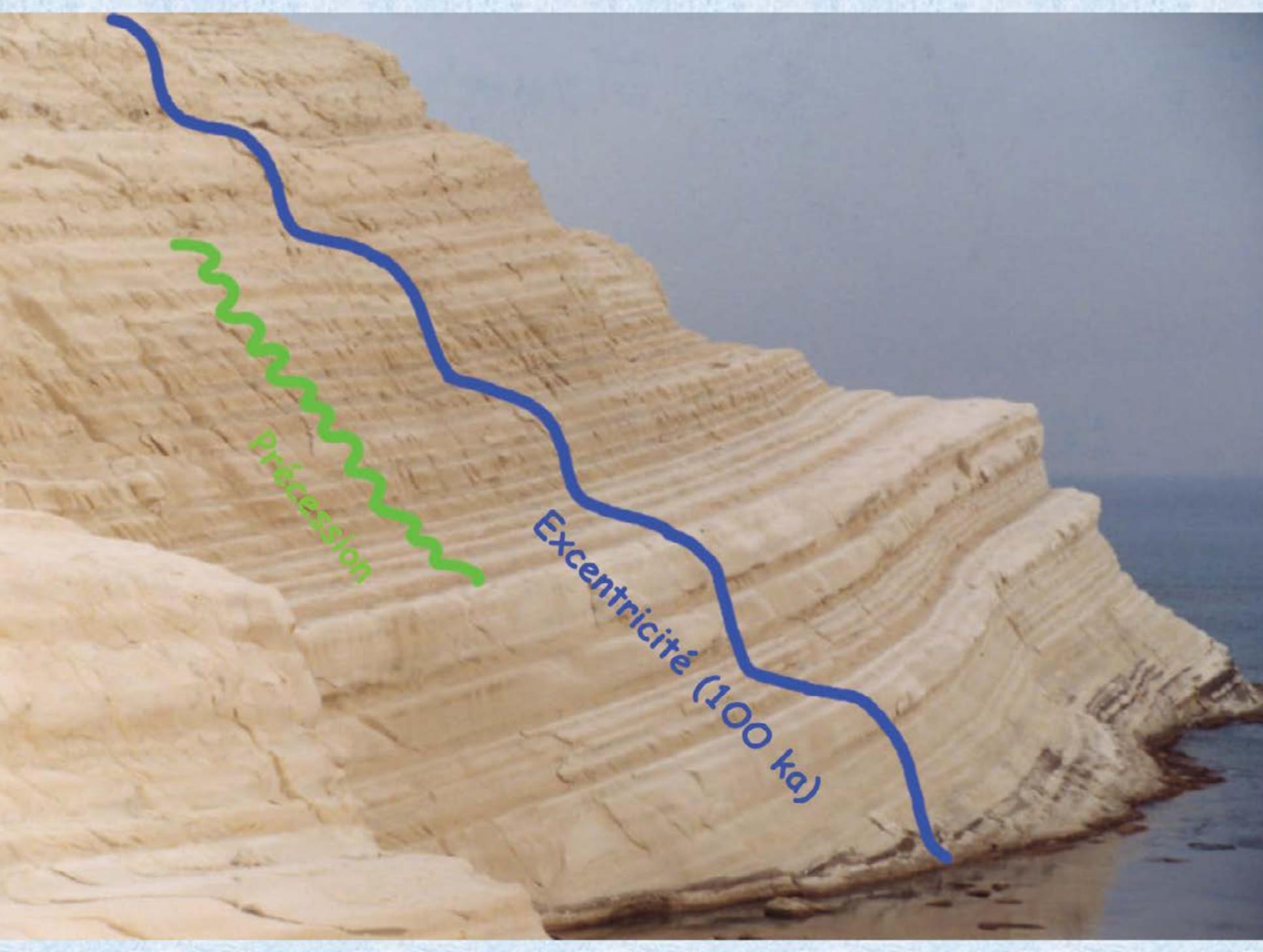


Cycles astronomiques exprimés par la lithologie
(Crétacé inf. des Alpes-de-Haute-Provence, -120 Ma)

PUNTA DI MAIATA SECTION

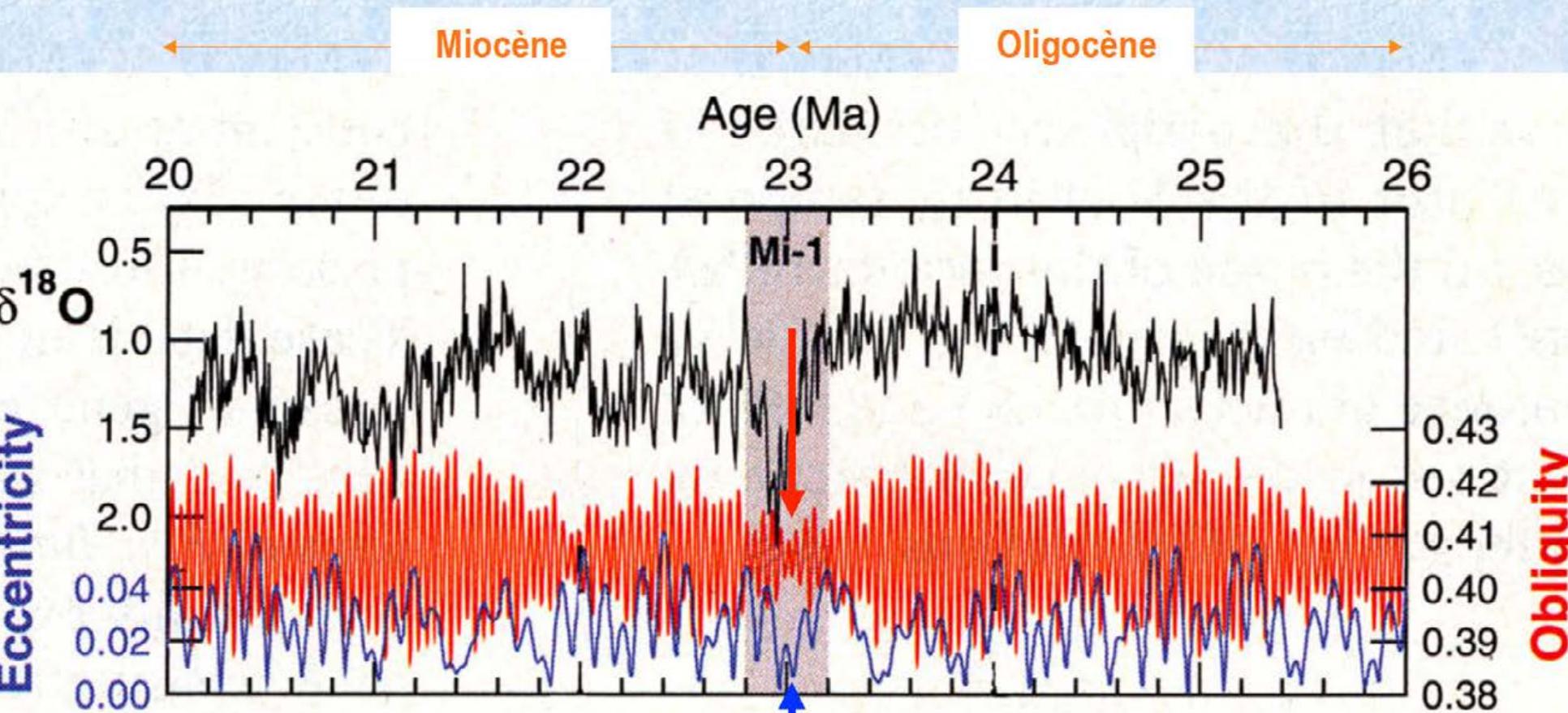




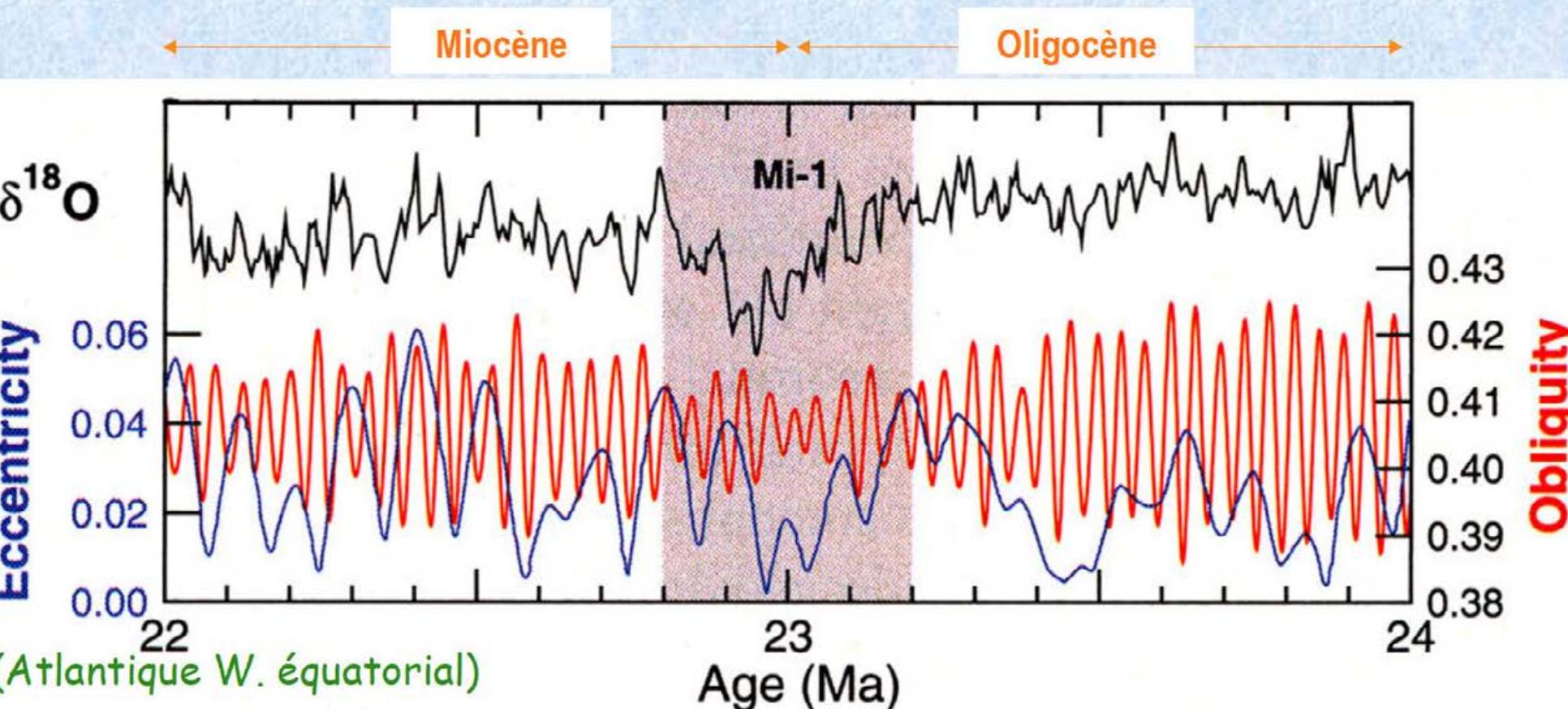


Précession

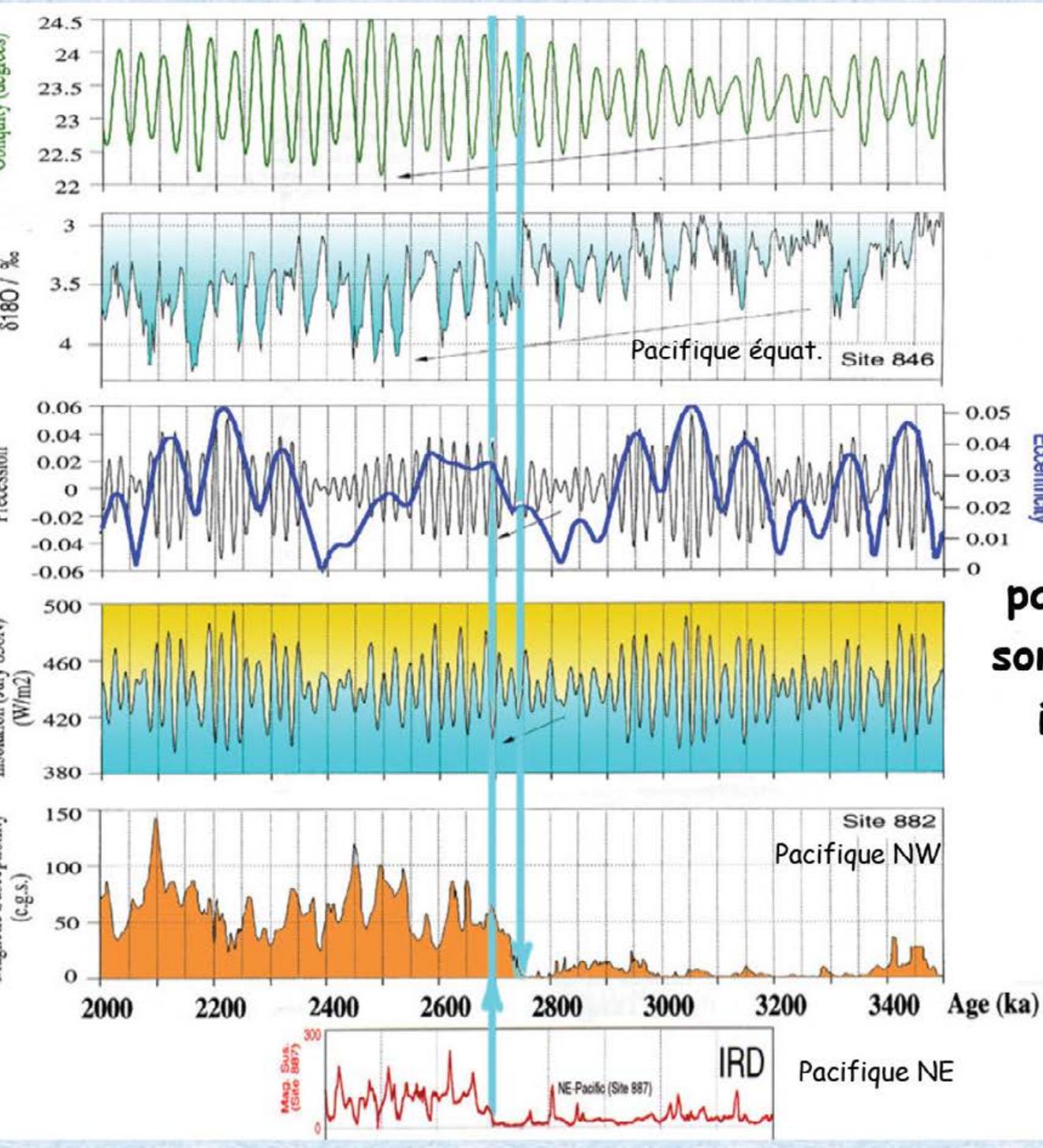
Excentricité (100 ka)



Des variations de **basse amplitude** de l'obliquité, et un **minimum** d'excentricité ont induit une période (~200 ka) de faible saisonnalité, favorable à l'expansion de glace sur le continent Antarctique...



Des variations de **basse amplitude de l'obliquité**, et un **minimum d'excentricité** ont induit une période (~200 ka) de faible saisonnalité, favorable à l'expansion de **glace** sur le continent Antarctique...
à condition d'une faible teneur en gaz à effet de serre.



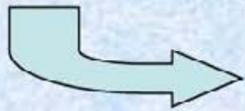
Des déphasages dans l'intensification des glaciations de l'Hémisphère Nord montrent que les paramètres orbitaux ne sont pas suffisants pour initier ces glaciations.

Quelles peuvent-être les causes ?

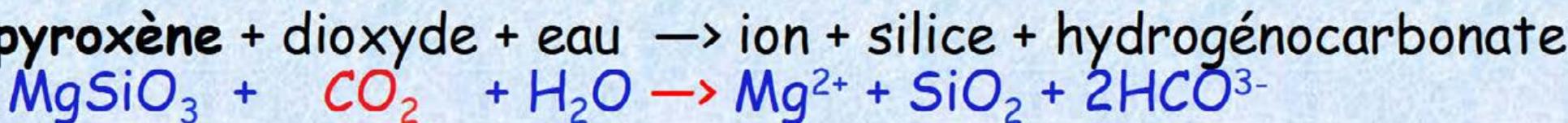
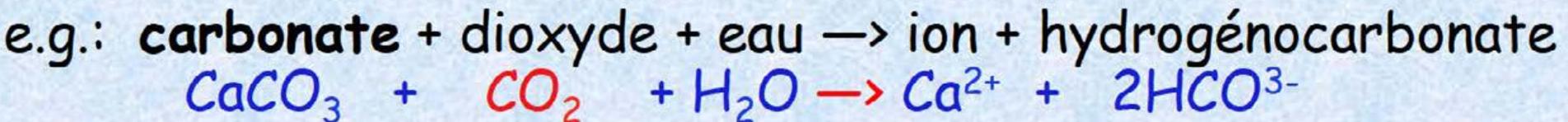
Une baisse de l'activité solaire ?

Les paramètres astronomiques ?

La diminution de gaz à effet de serre ?



à une autre échelle de temps, l'altération des roches fait varier la teneur en dioxyde de carbone atmosphérique

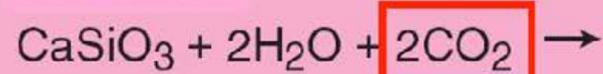


Un forçage amplificateur qui consomme du CO_2 , donc réduit l'effet de serre, donc refroidit le climat et favorise la glaciation.

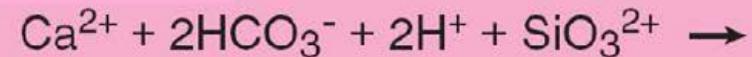
Favorisé par la position des continents aux basses latitudes où l'altération est importante.

ALTERATION DES SILICATES

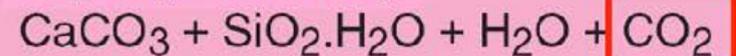
altération



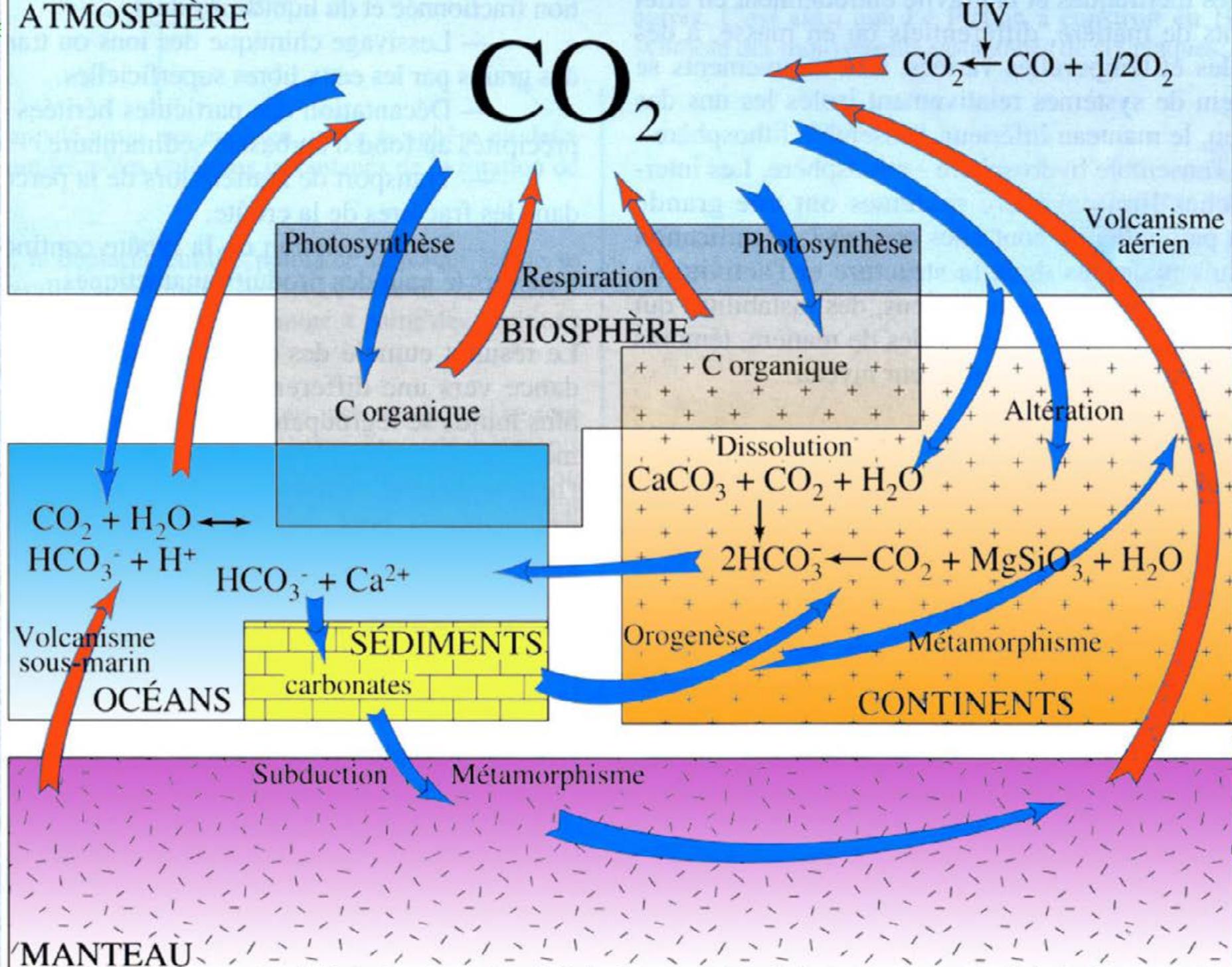
transport



dépôt (sédiments)



CO₂



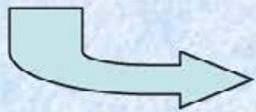
Quelles peuvent-être les causes ?

Une baisse de l'activité solaire ?

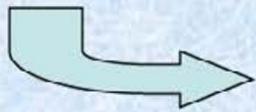
Les paramètres astronomiques ?

La diminution de gaz à effet de serre ?

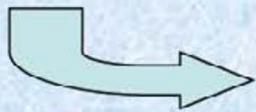
La tectonique globale ?



via les orogénèses et l'expansion océanique
(*cf.* CO_2)

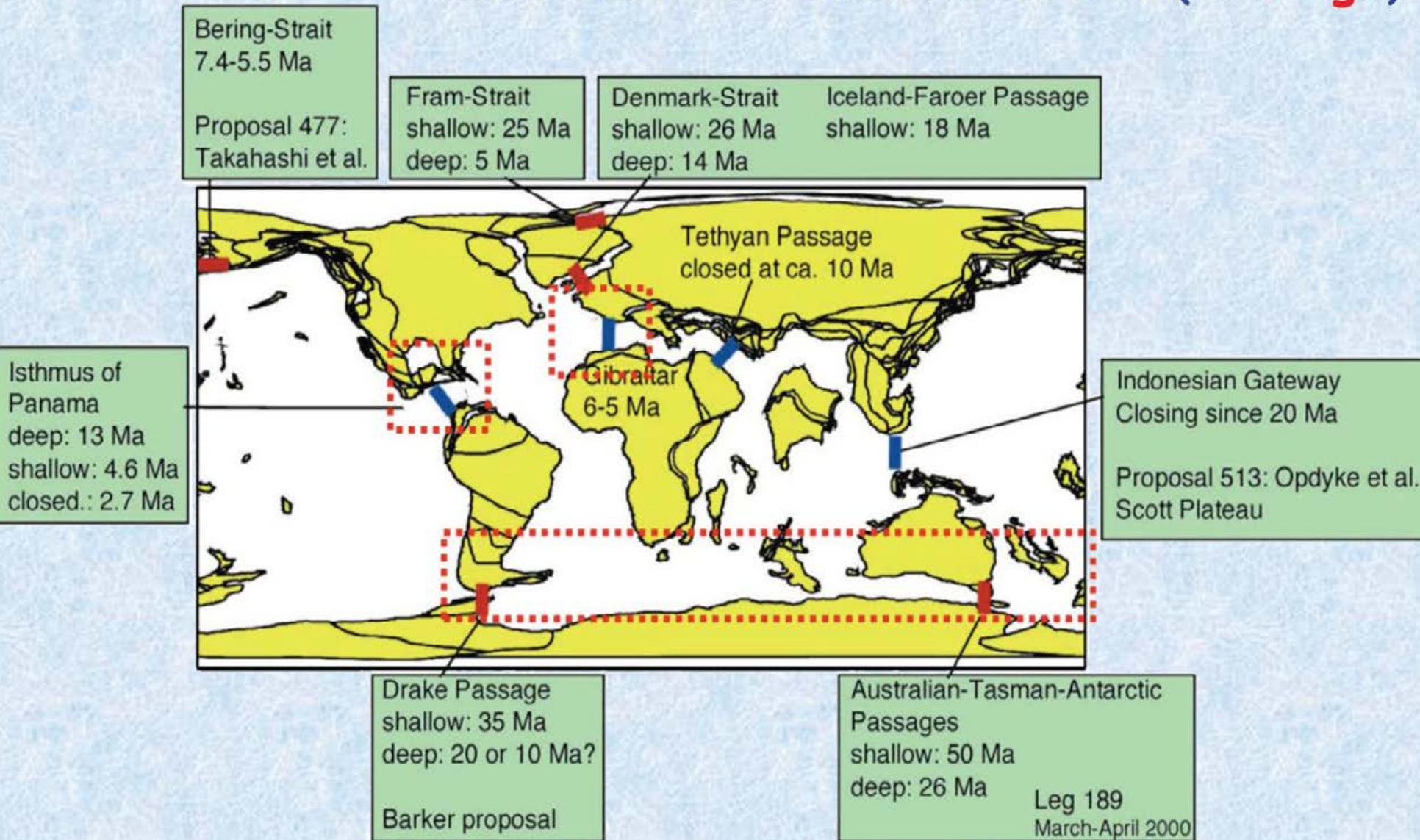


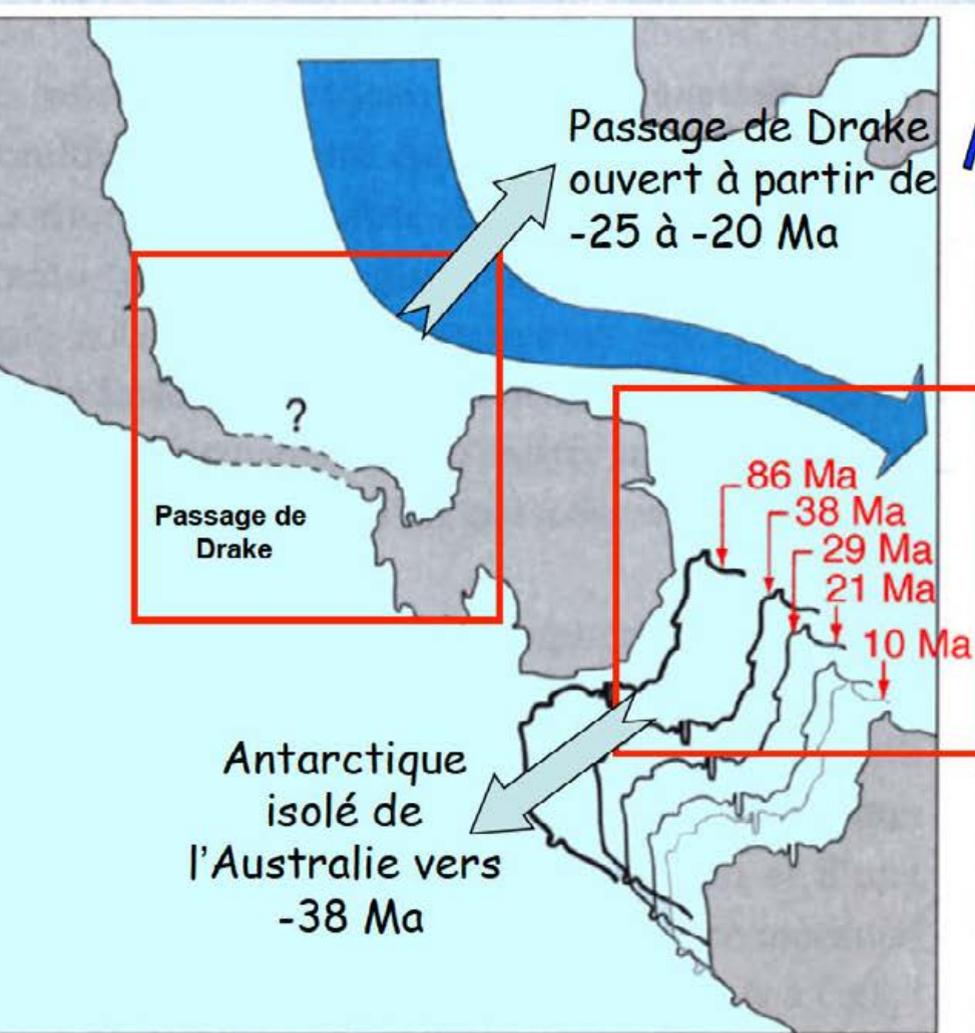
en modifiant la géométrie des océans
(contraignant les circulations océaniques)



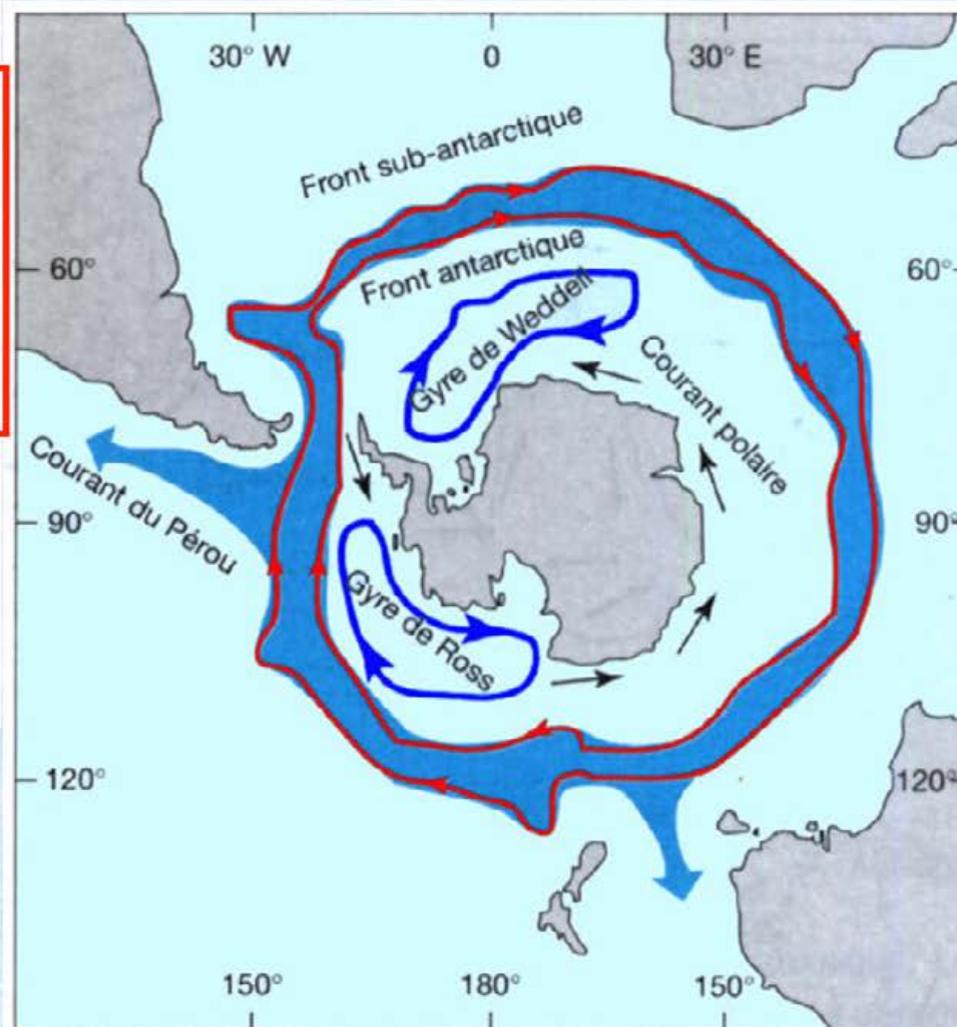
peut-être aussi un volcanisme intensif (trapps)

Durant les derniers 50 Ma, des passages subtropicaux se sont fermés (en bleu) et d'autres aux hautes latitudes se sont ouverts (en rouge)





Depuis, l'isolement thermique de l'Antarctique est favorisé par un courant circumpolaire



-1,8 Ma : fermeture complète de l'isthme de Panama

-3,1 et 2,6 Ma, puis... : conditions regroupées pour le développement d'une calotte de glace arctique au gré des variations orbitales de l'obliquité

More ocean heat released to atmosphere

-6,2 Ma : début de l'amincissement de la tranche d'eau

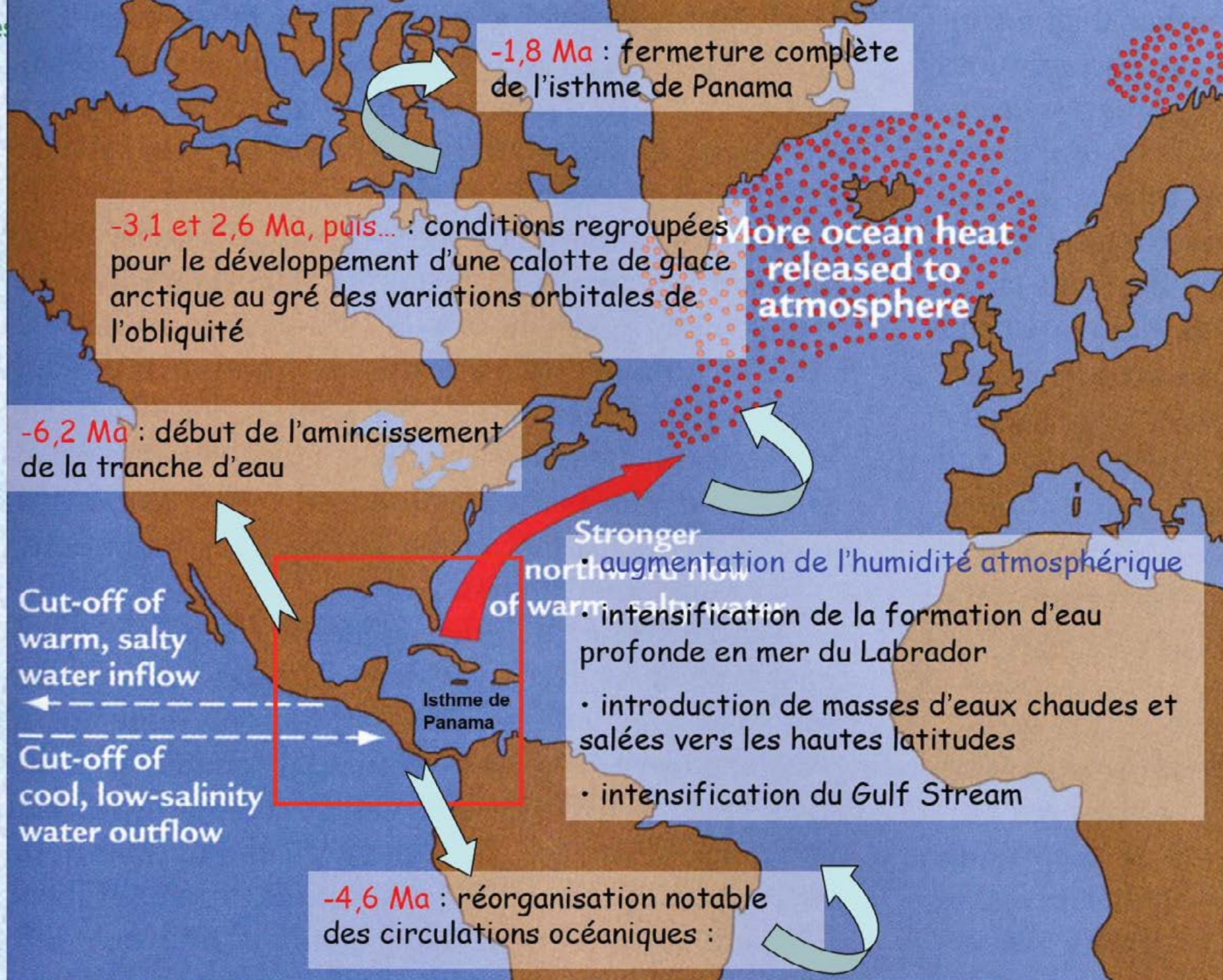
Stronger northward flow of warm, salty water

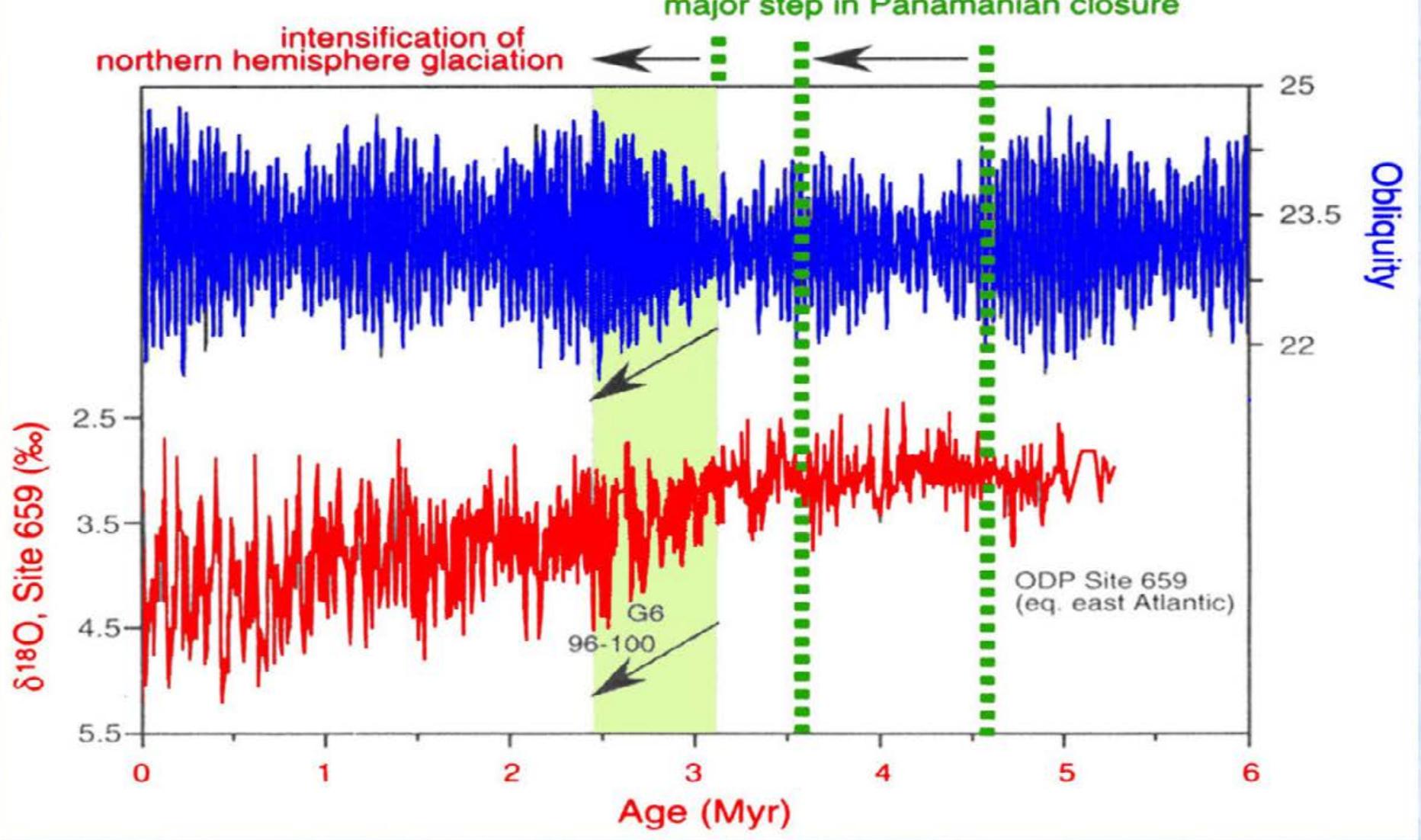
- augmentation de l'humidité atmosphérique
- intensification de la formation d'eau profonde en mer du Labrador
- introduction de masses d'eaux chaudes et salées vers les hautes latitudes
- intensification du Gulf Stream

Cut-off of warm, salty water inflow

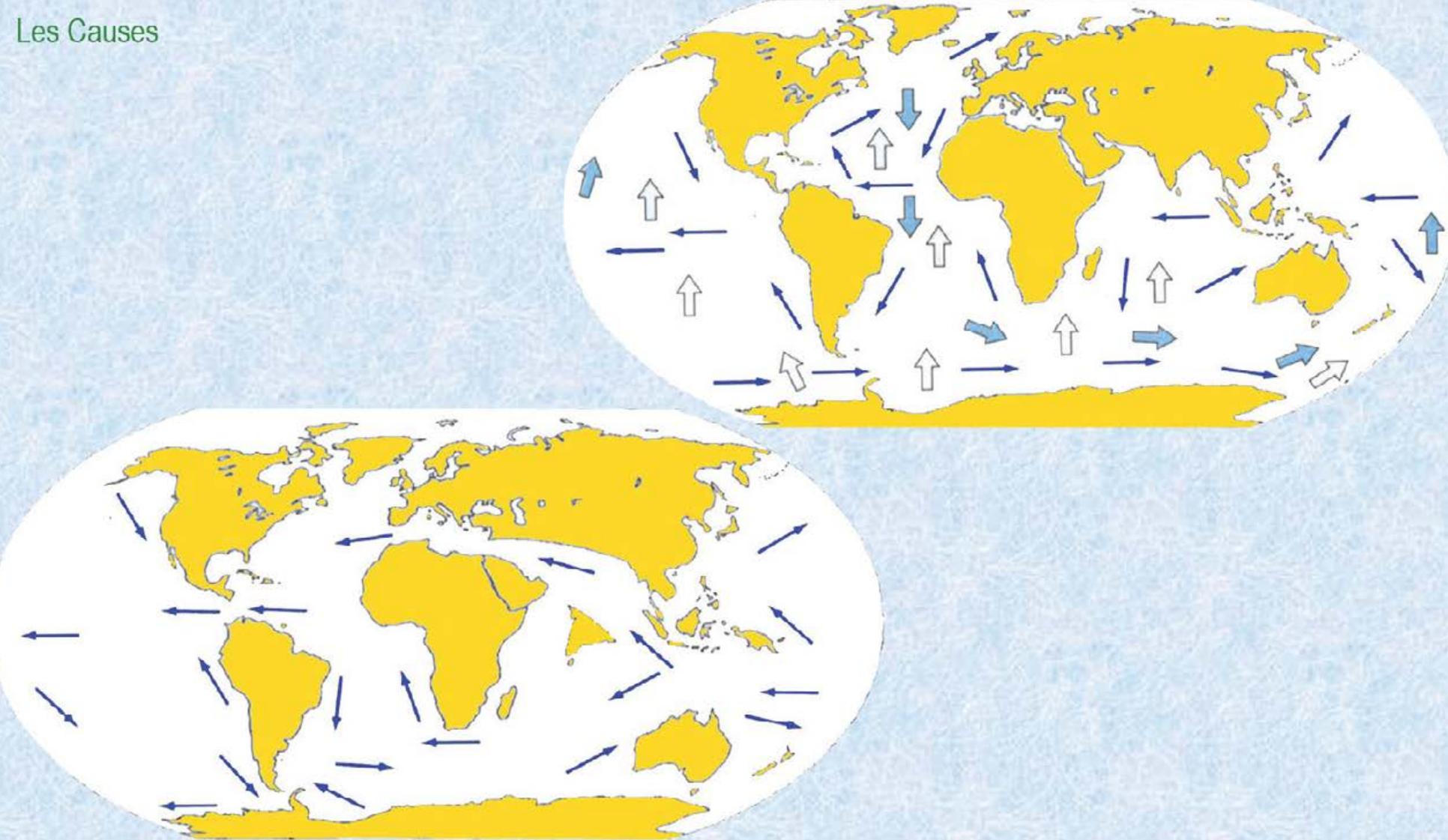
Cut-off of cool, low-salinity water outflow

-4,6 Ma : réorganisation notable des circulations océaniques :





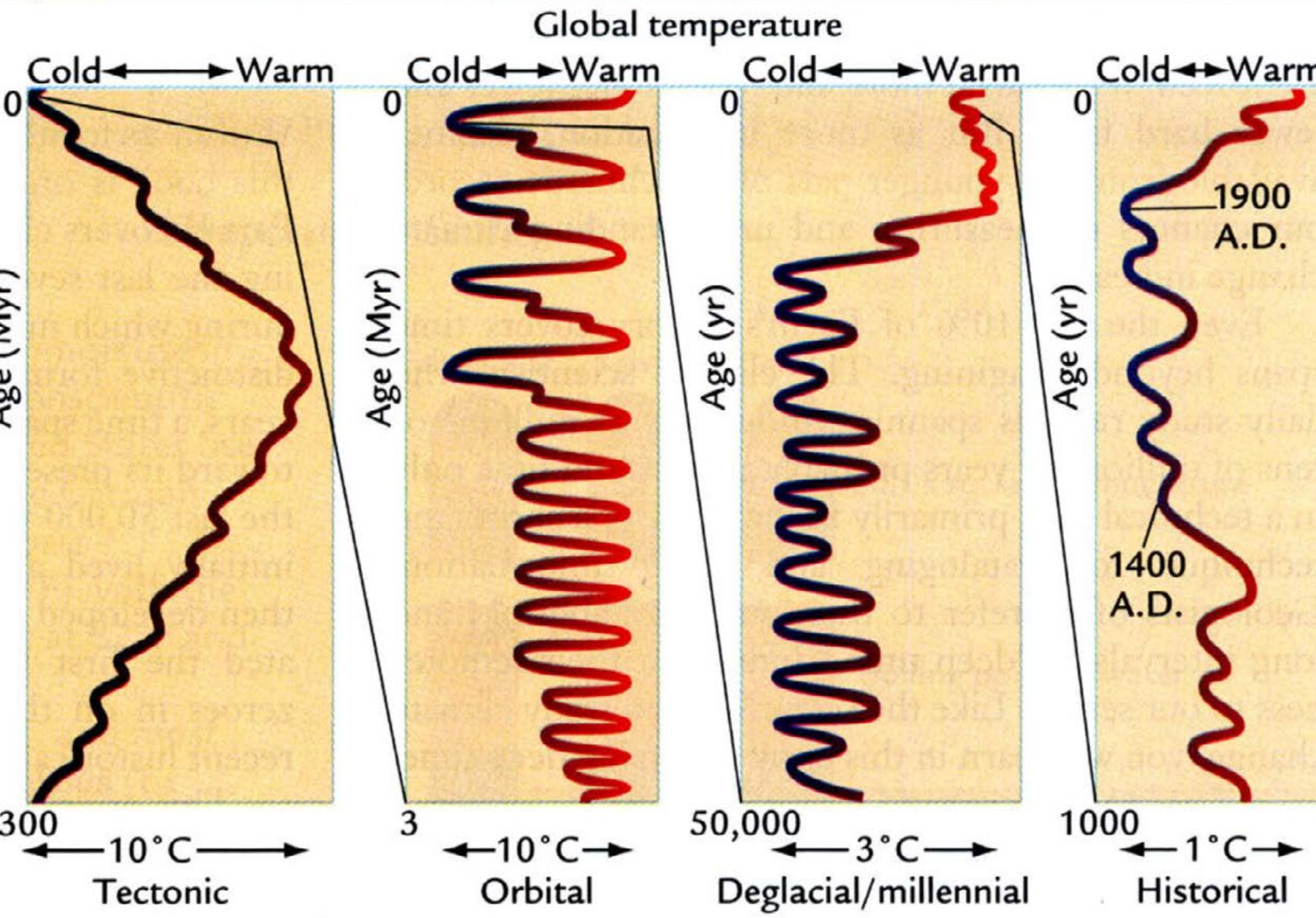
Intensification des glaciations de l'Hémisphère Nord
 consécutivement à l'amorce de la fermeture de
 l'Isthme de Panama
 ($\delta^{18}\text{O}$ d'une carotte de l'Atlantique Est équatorial)

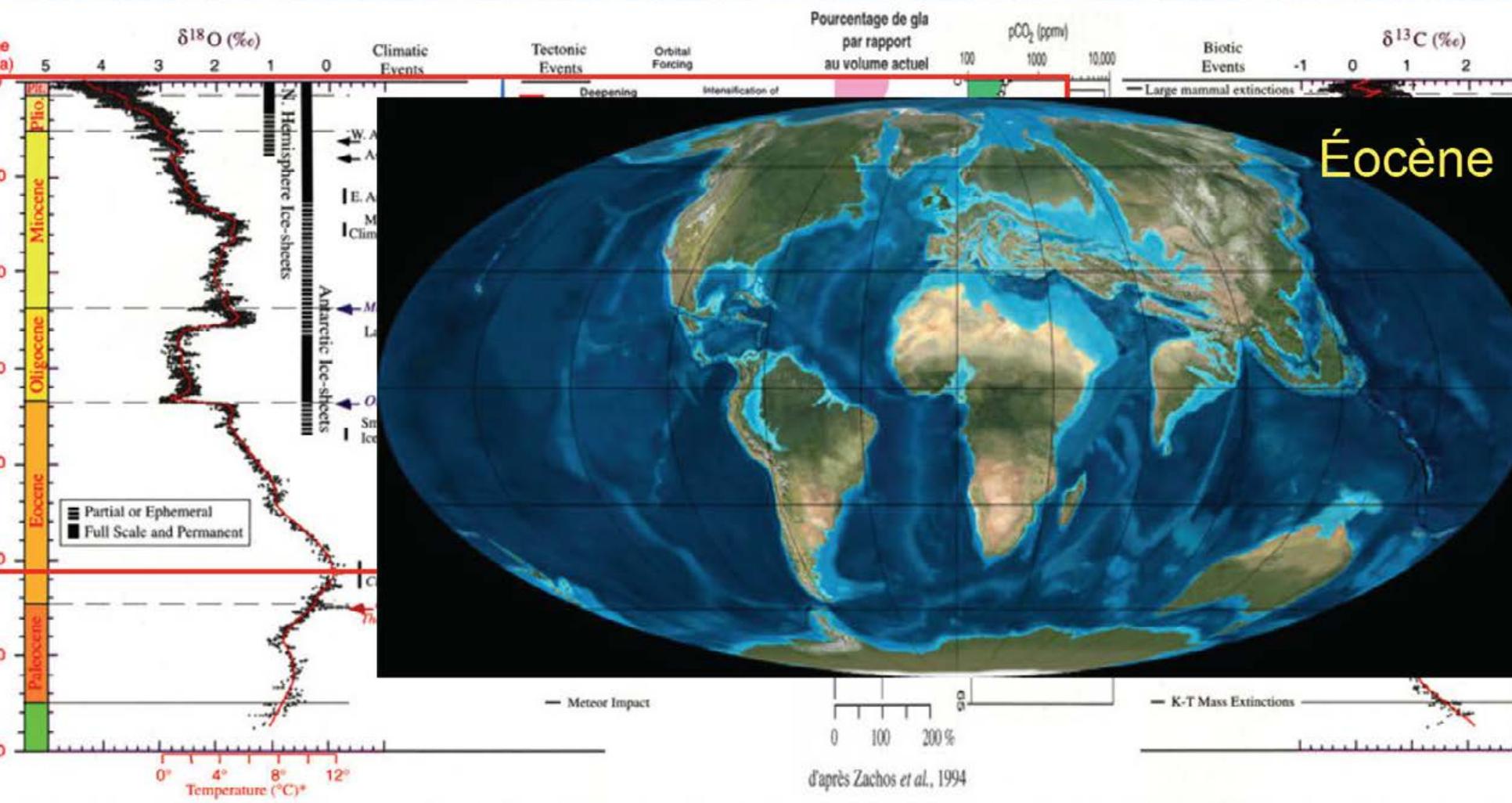


Au cours du Cénozoïque, l'océan mondial est passé d'une circulation globalement "Est—Ouest" à une circulation "Nord—Sud"

Si on récapitule...

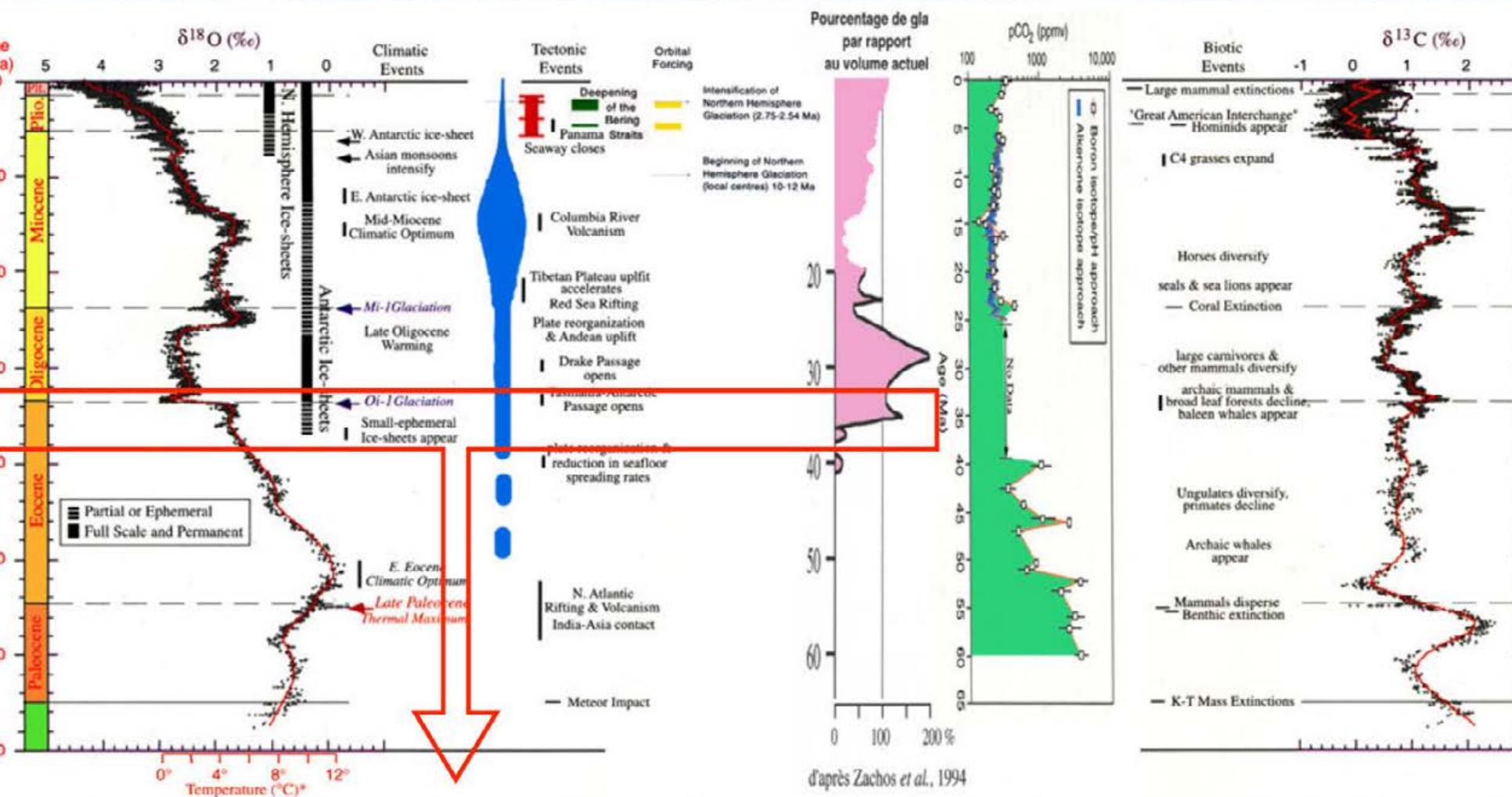
L'évolution du climat est la conséquence de forçages internes et externes présentant des fréquences très variables et qui s'emboîtent...





Éocène

- Soulèvement de l'Himalaya et des Andes
- Position intertropicale de ces orogènes
- Continent Antarctique en position polaire

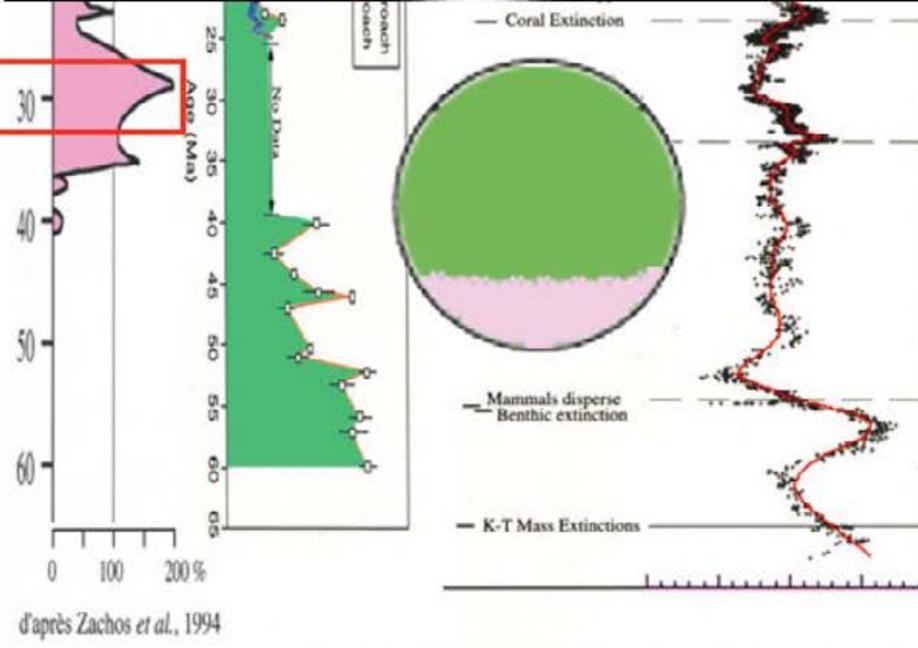
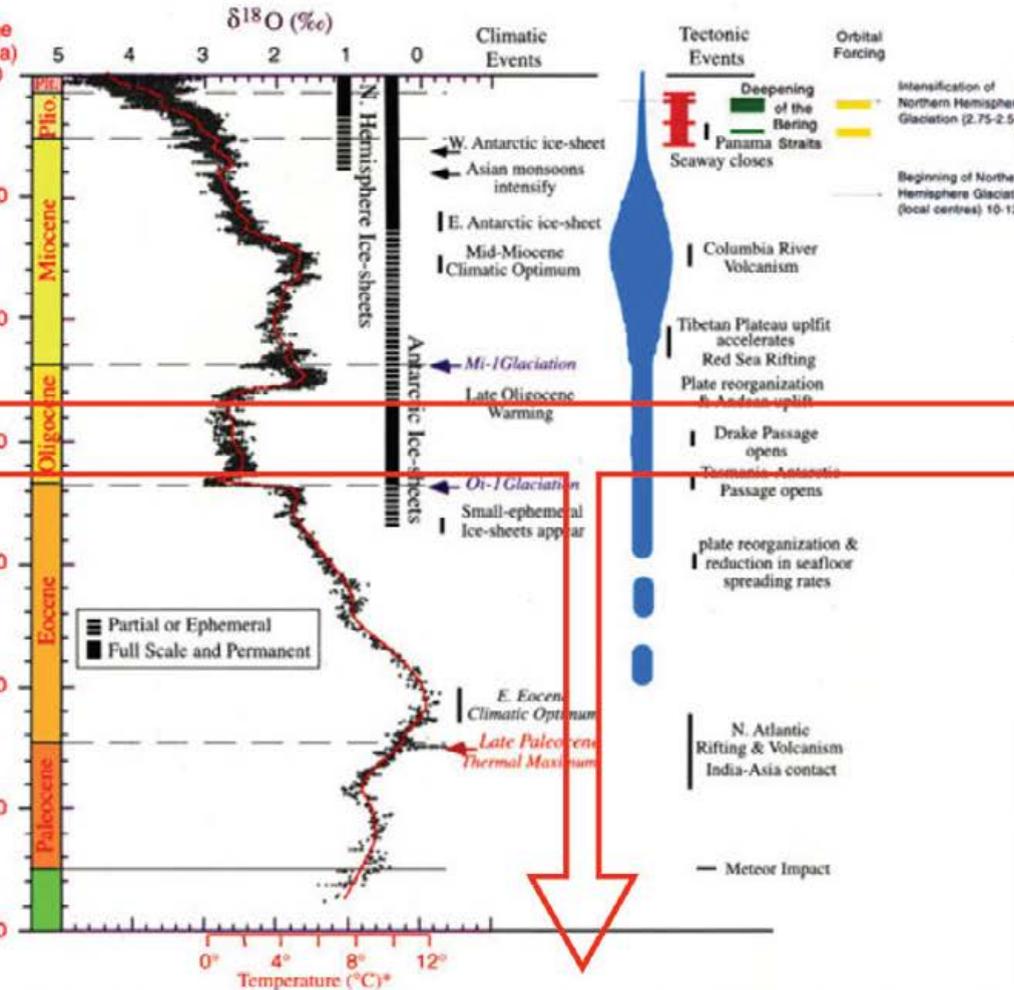


d'après Zachos et al., 1994

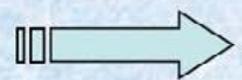
Passage ouvert entre l'Australie et l'Antarctique



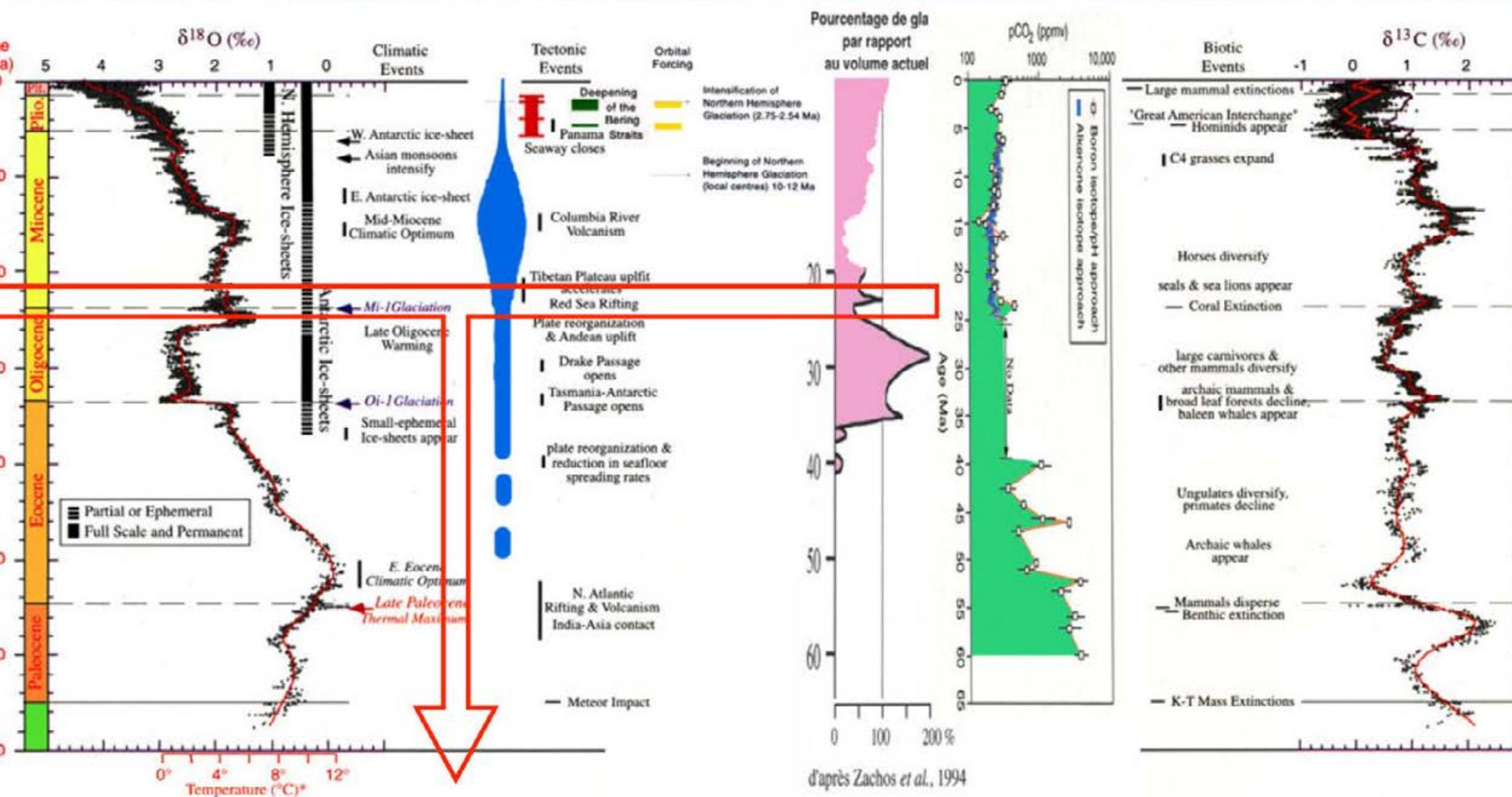
~34Ma : 1^{ères} glaces antarctiques (non pérennes)



Ouverture du passage de Drake



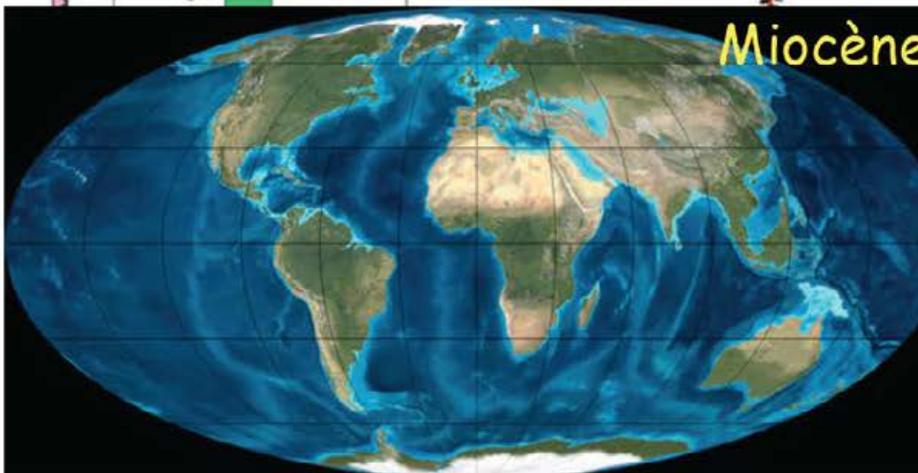
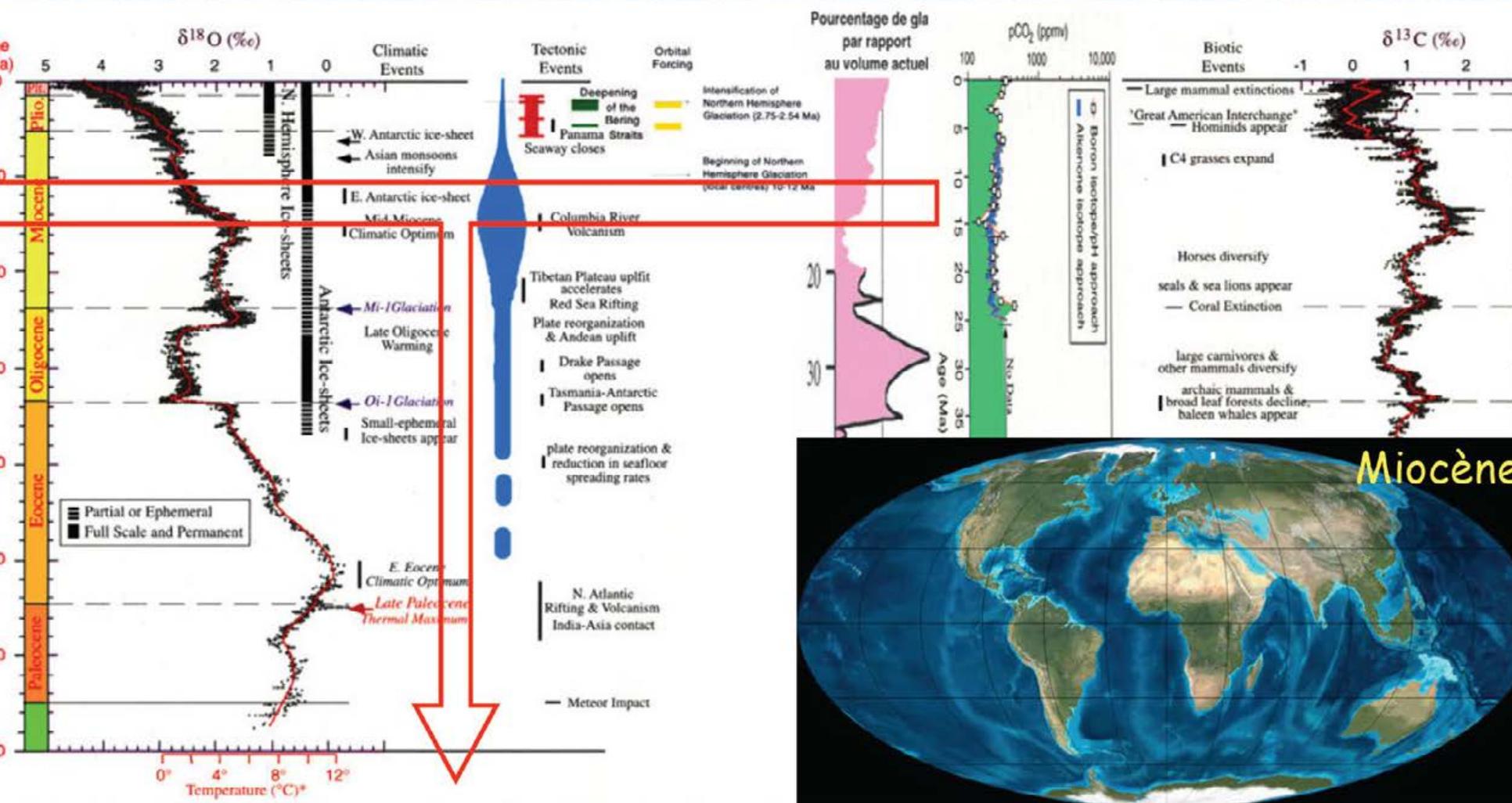
~30Ma : l'Antarctique est complètement isolé



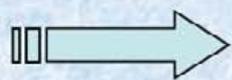
Accélération de la surrection du Plateau tibétain



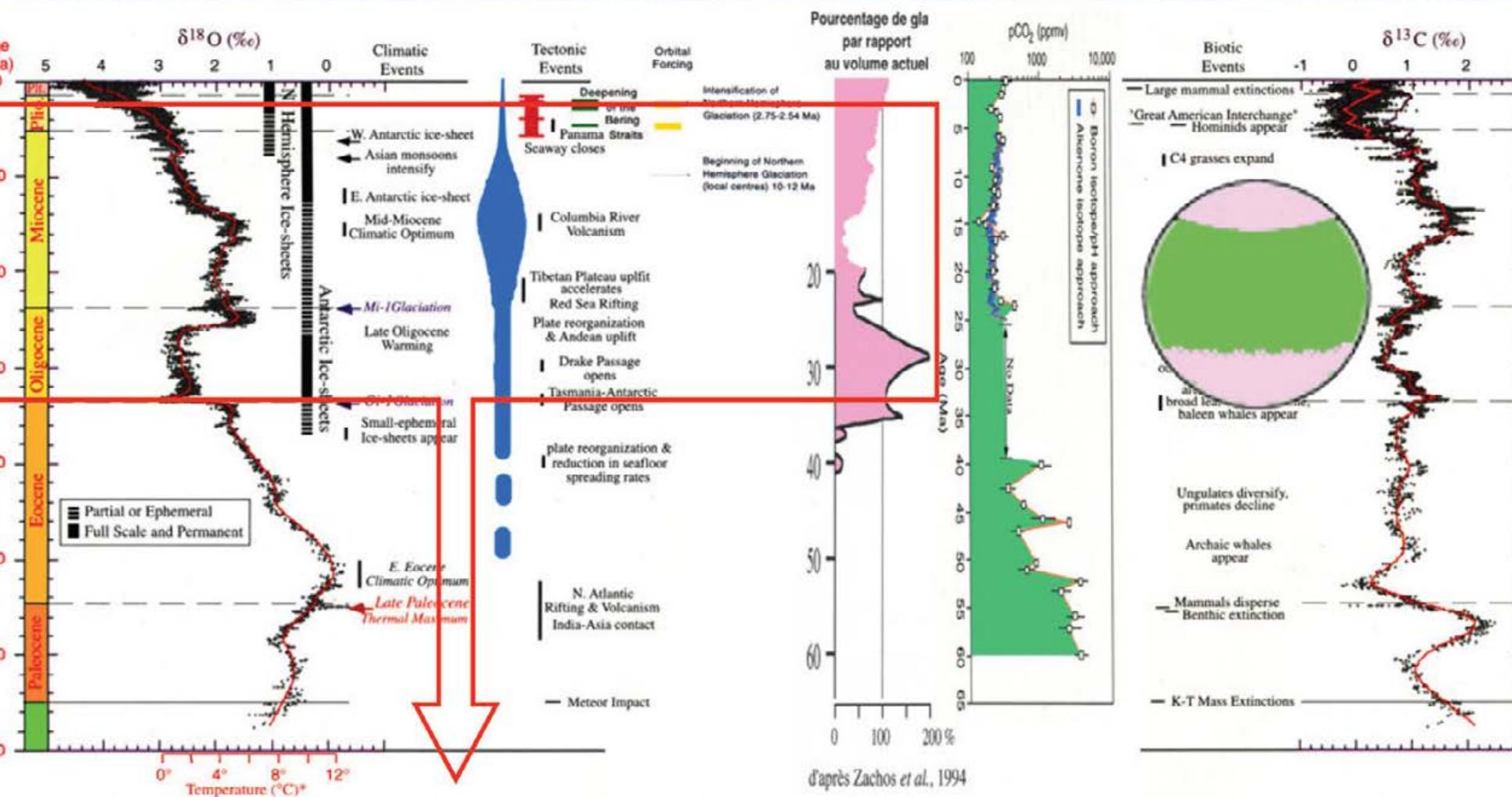
~23Ma : Glaciation "Mi-1" (passage Oligo/Miocène)



Maximum de soulèvement de l'Himalaya



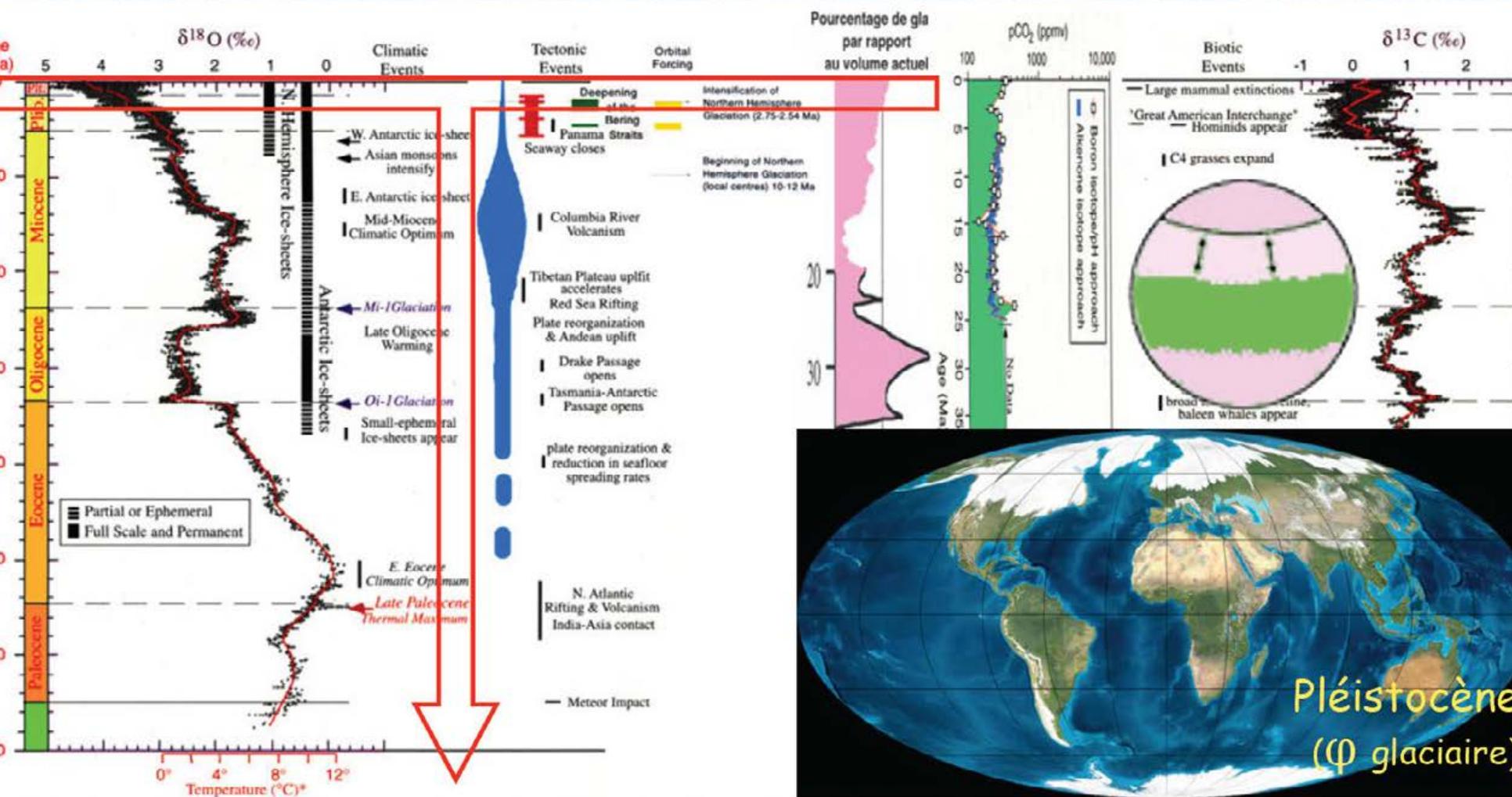
~12Ma : Les glaces antarctiques deviennent pérennes
1^{ères} glaces arctiques



Fermeture de l'isthme de Panama



~2,55Ma : Début de l'intensification des glaciations arctiques



Le forçage externe s'exprime de façon prépondérante



~1,8Ma : Les glaces polaires sont pérennes au Nord
 Les cycles astronomiques dictent les avancées glaciaires

