



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—



CHANTIER ARCTIQUE
FRANÇAIS

Le climat arctique dans un contexte global et temporel

Edouard BARD

*Chaire de l'évolution du climat et de l'océan
du Collège de France*

CEREGE (AMU, CNRS, IRD, CdF) Aix-en-Provence



Georges Cuvier (1769-1832)

Discours sur les révolutions de la surface du Globe, 1812

Théorie des grandes catastrophes environnementales

la dernière « a laissé encore, dans les pays du Nord, des cadavres de grands quadrupèdes que la glace a saisis, et qui se sont conservés jusqu'à nos jours avec leur peau, leur poil, et leur chair. S'ils n'eussent été gelés aussitôt que tués, la putréfaction les aurait décomposés ... C'est donc le même instant qui a fait périr les animaux, et qui a rendu glacial le pays qu'ils habitaient »

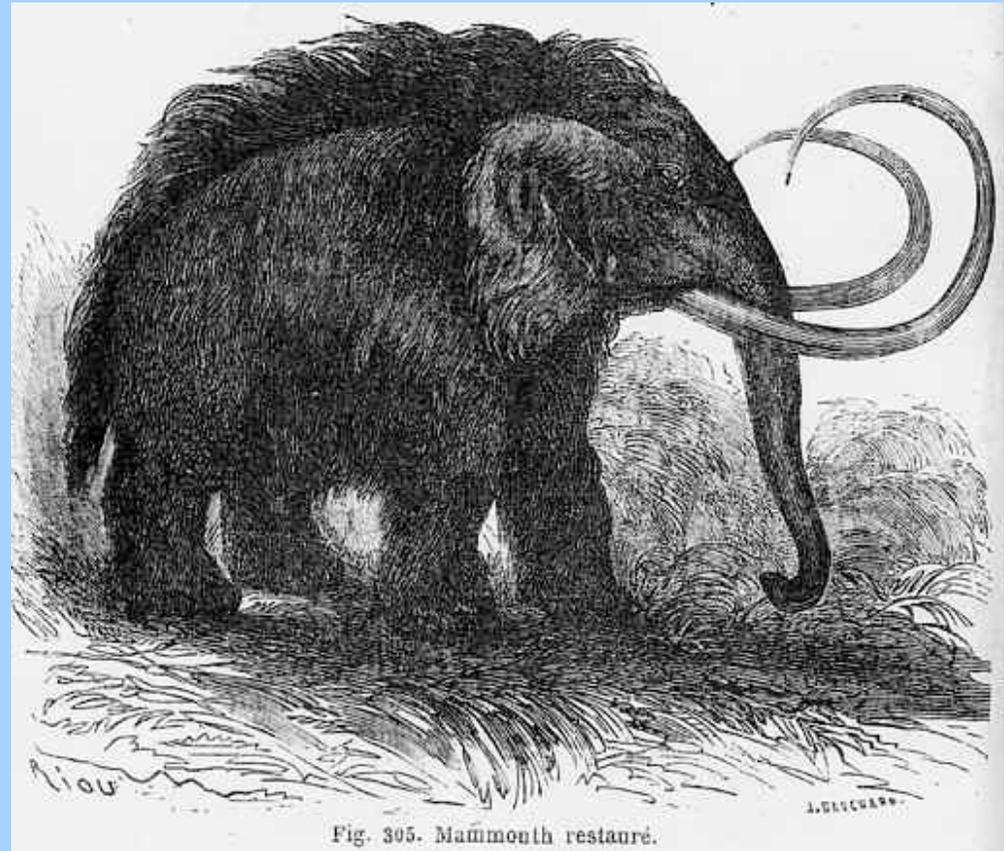
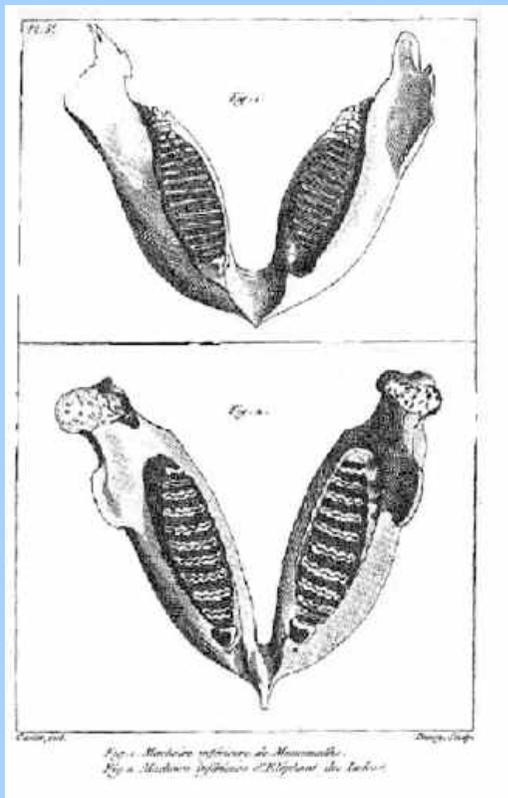
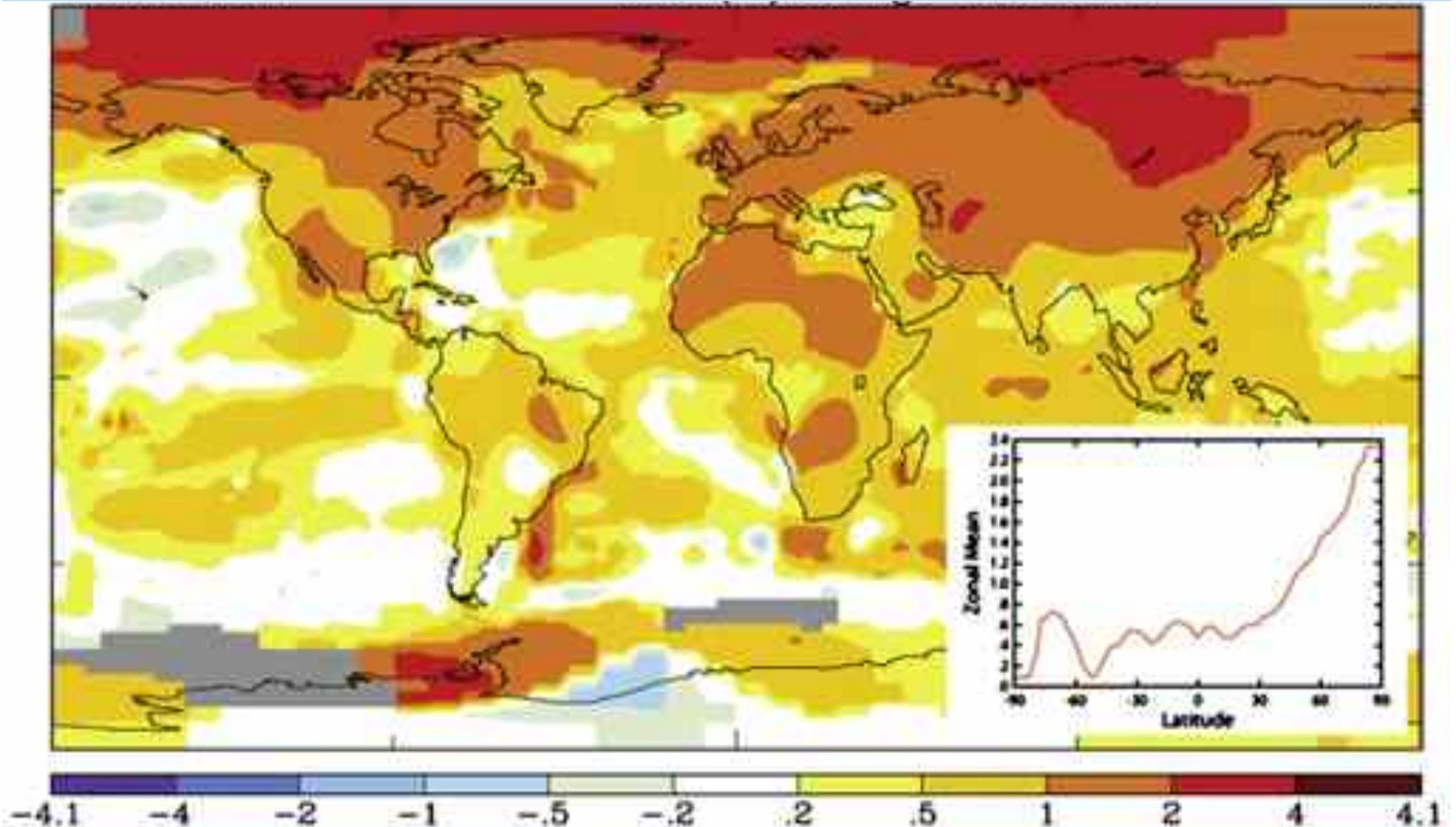


Fig. 305. Mammoth restauré.

in Figuier, La Terre avant le Déluge, 1863

Un réchauffement amplifié en zone polaire

Tendance moyenne sur 50 ans (1960-2009):



Source: NASA-GISS

La région Arctique et ses définitions climatiques:

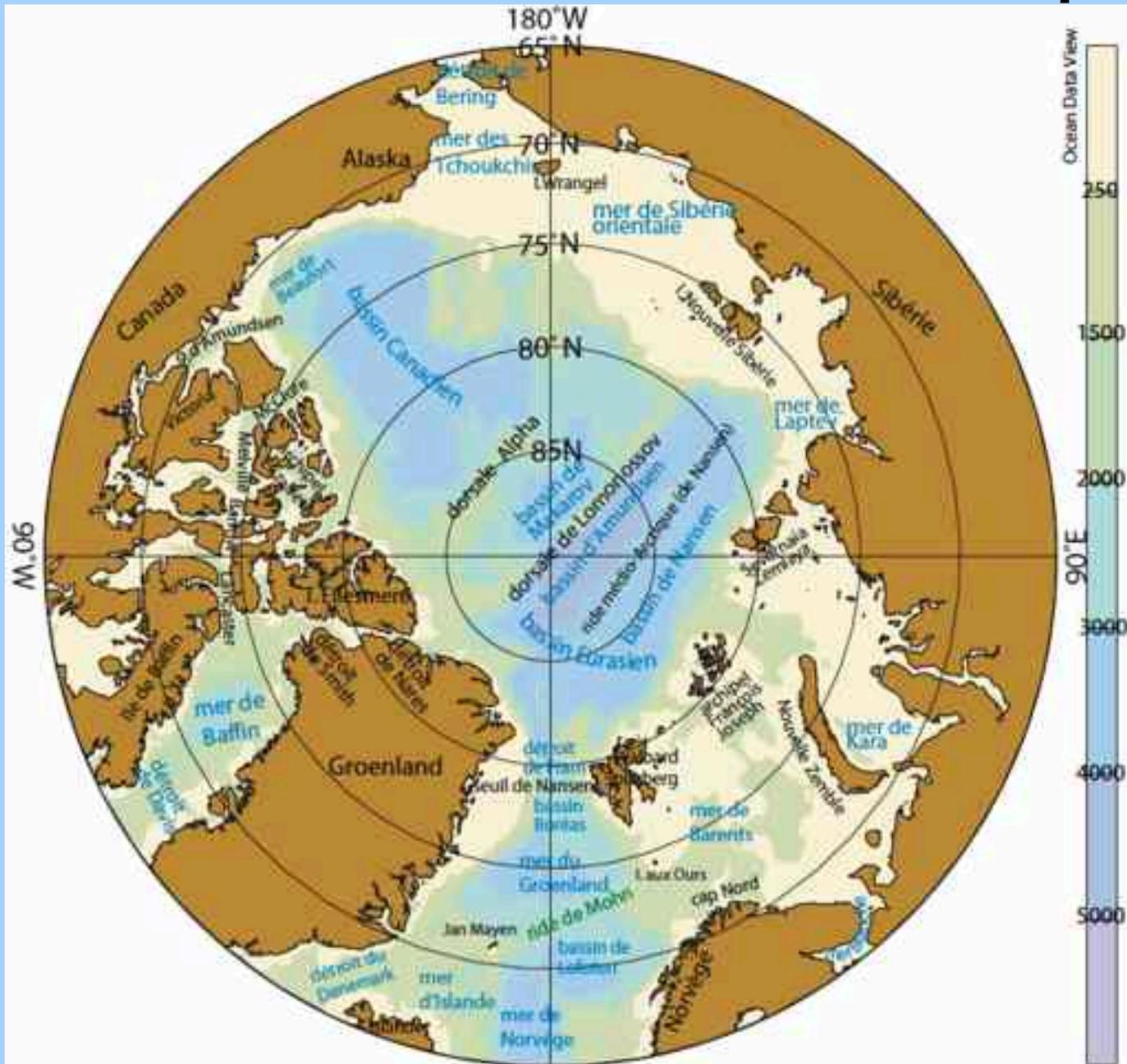
Cercle polaire (66°33'44"N), insolation et obliquité de la Terre ($\pm 1^\circ$ @41 ka)

Isotherme 10°C en été,

Proximité de l'Océan Arctique.

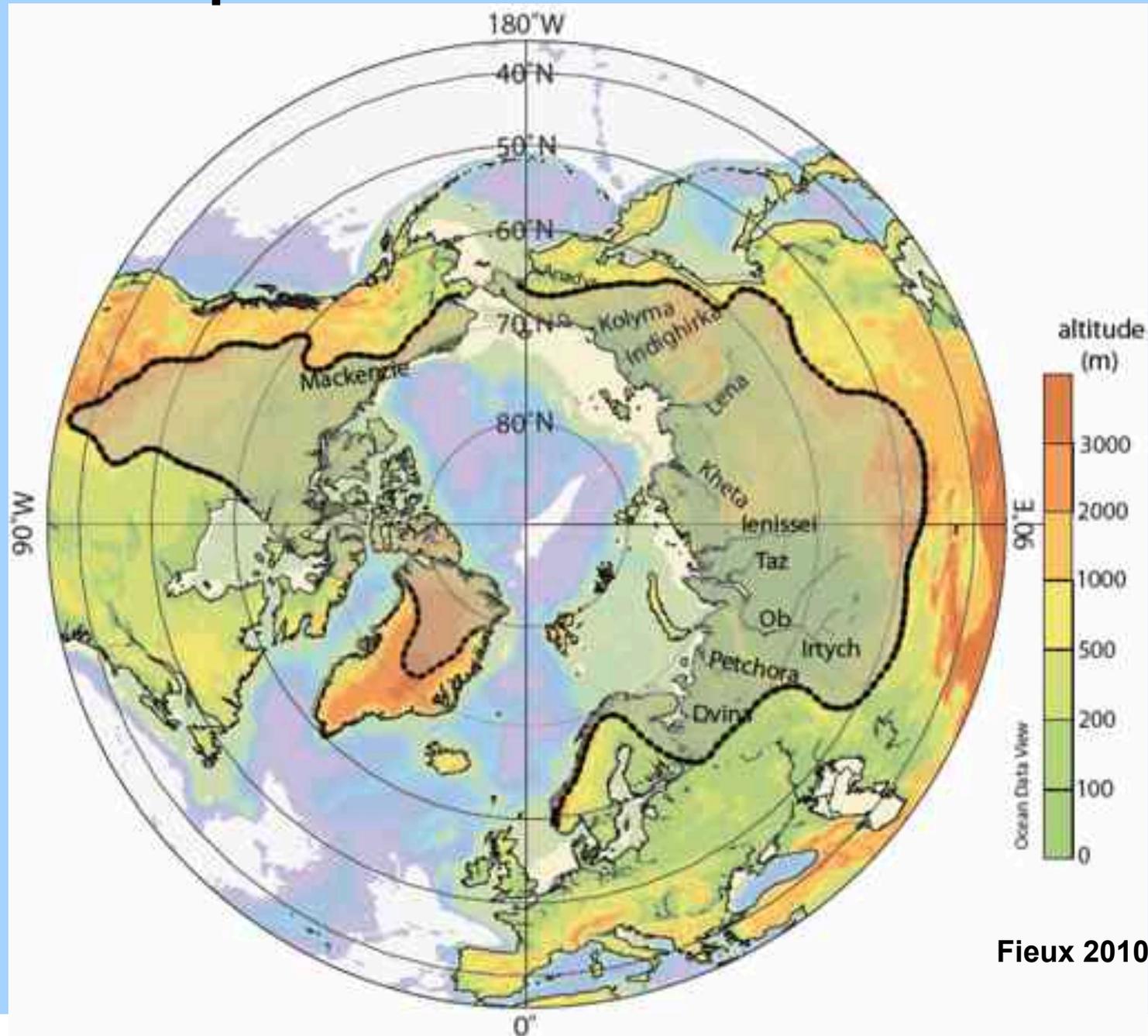


La zone Arctique au delà de 67°N entourant le bassin polaire Nord ou « méditerranée » arctique

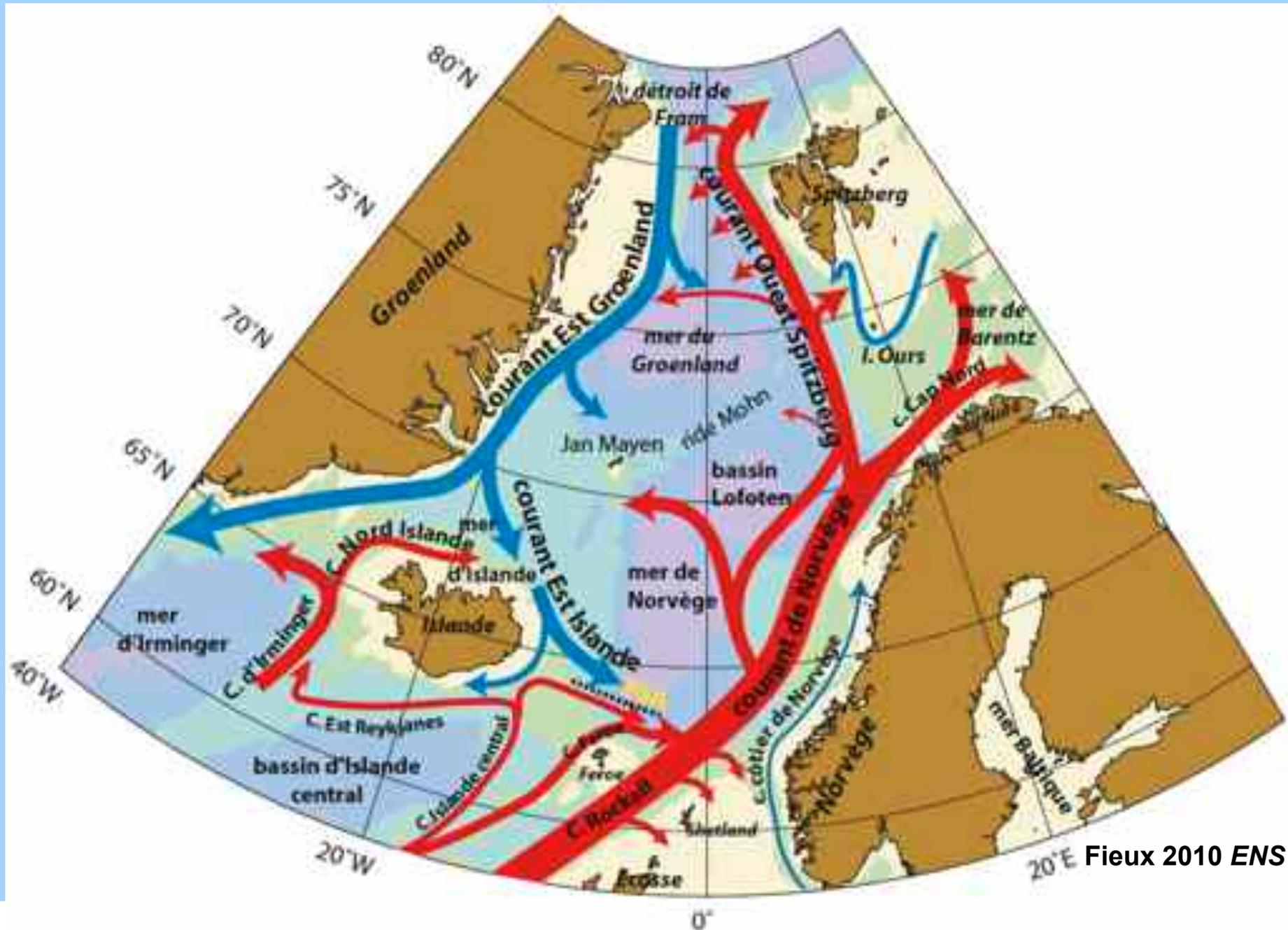


Fioux 2010
ENSTA

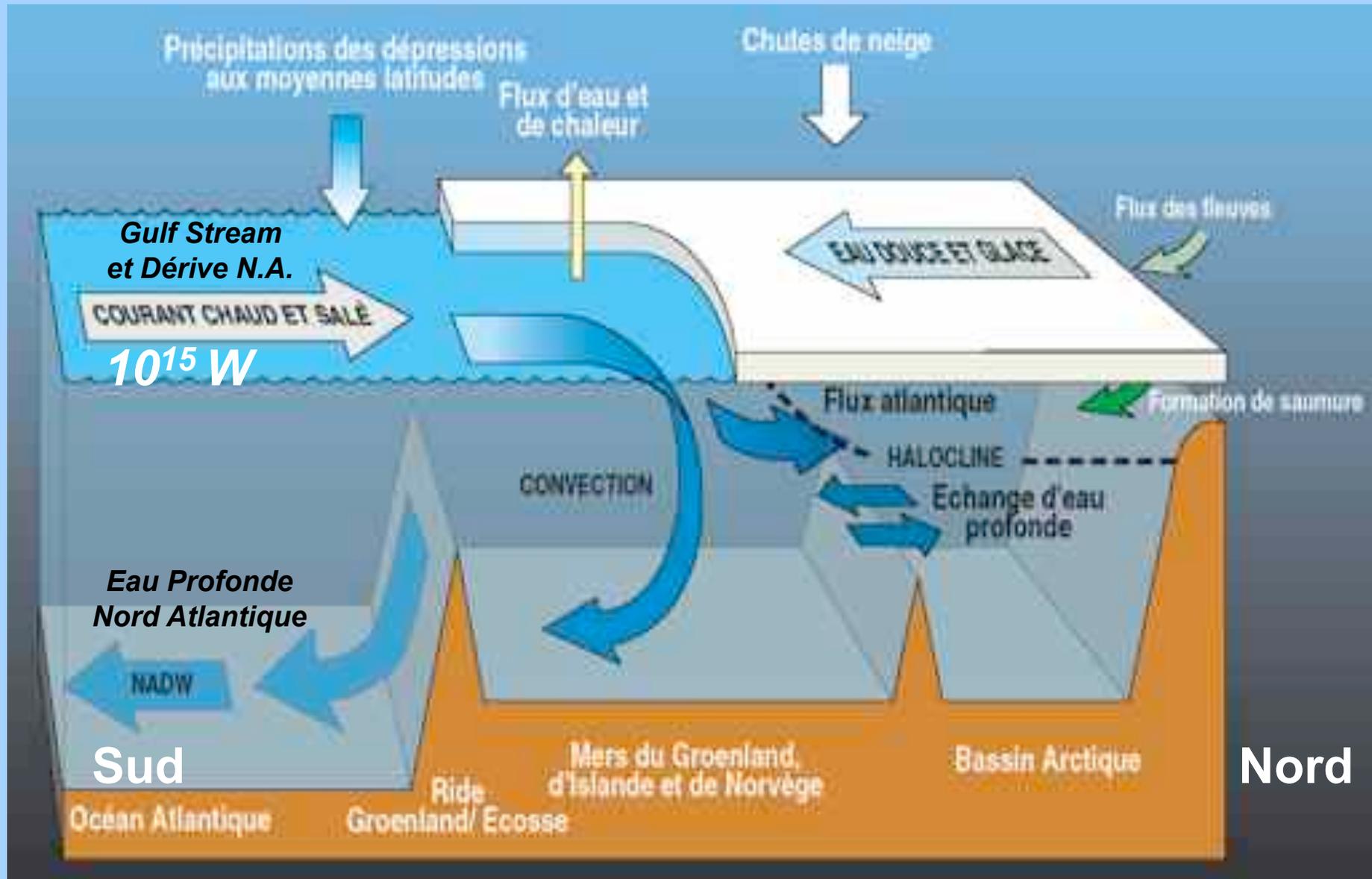
Un bassin de drainage allant bien au delà de la zone arctique au Canada et en Russie



Echanges d'eau en surface et en profondeur au niveau du détroit de Fram

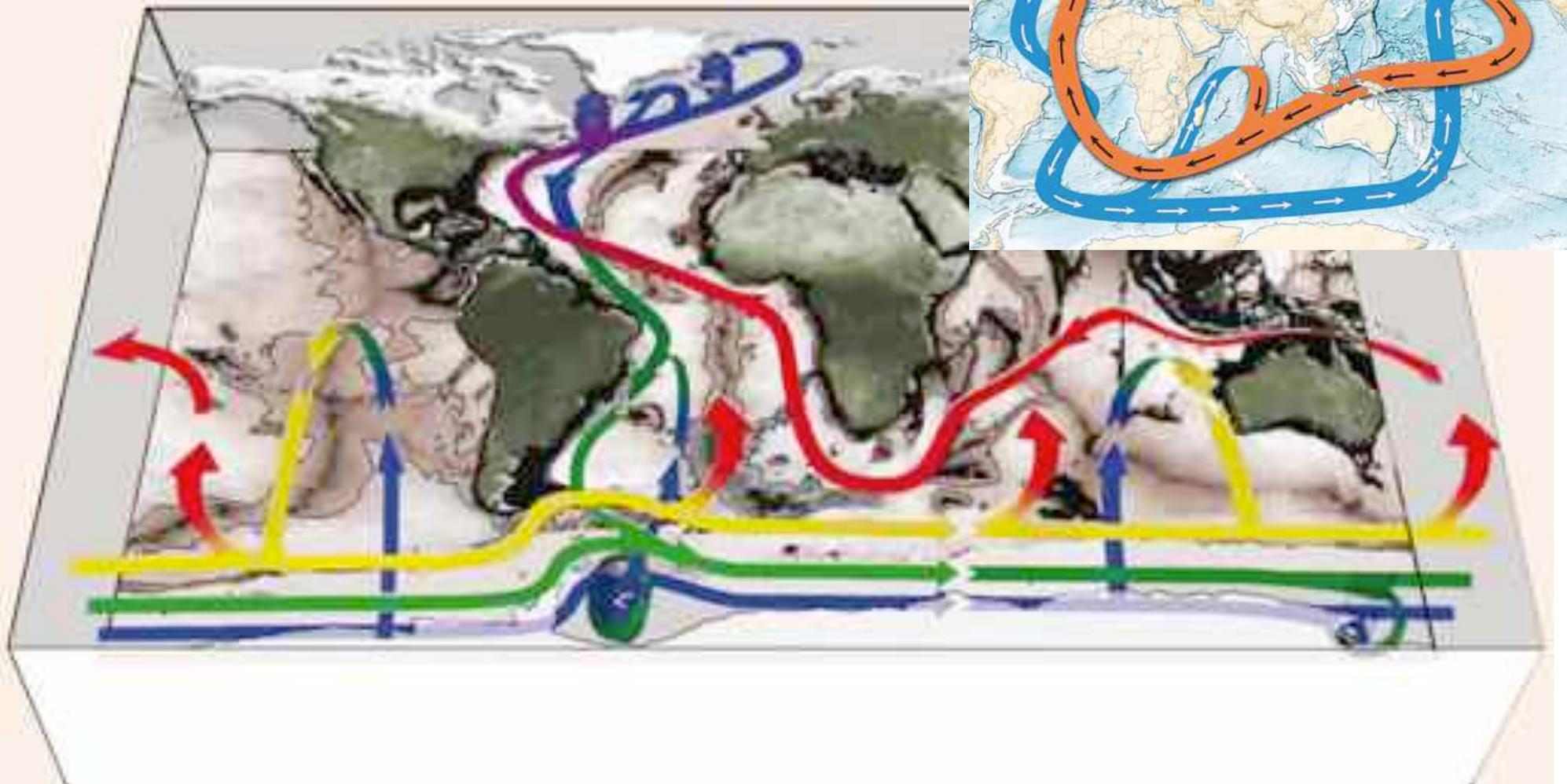


Influence des échanges d'eau profonde sur la densité (T,S) des eaux plongeant dans les mers nordiques

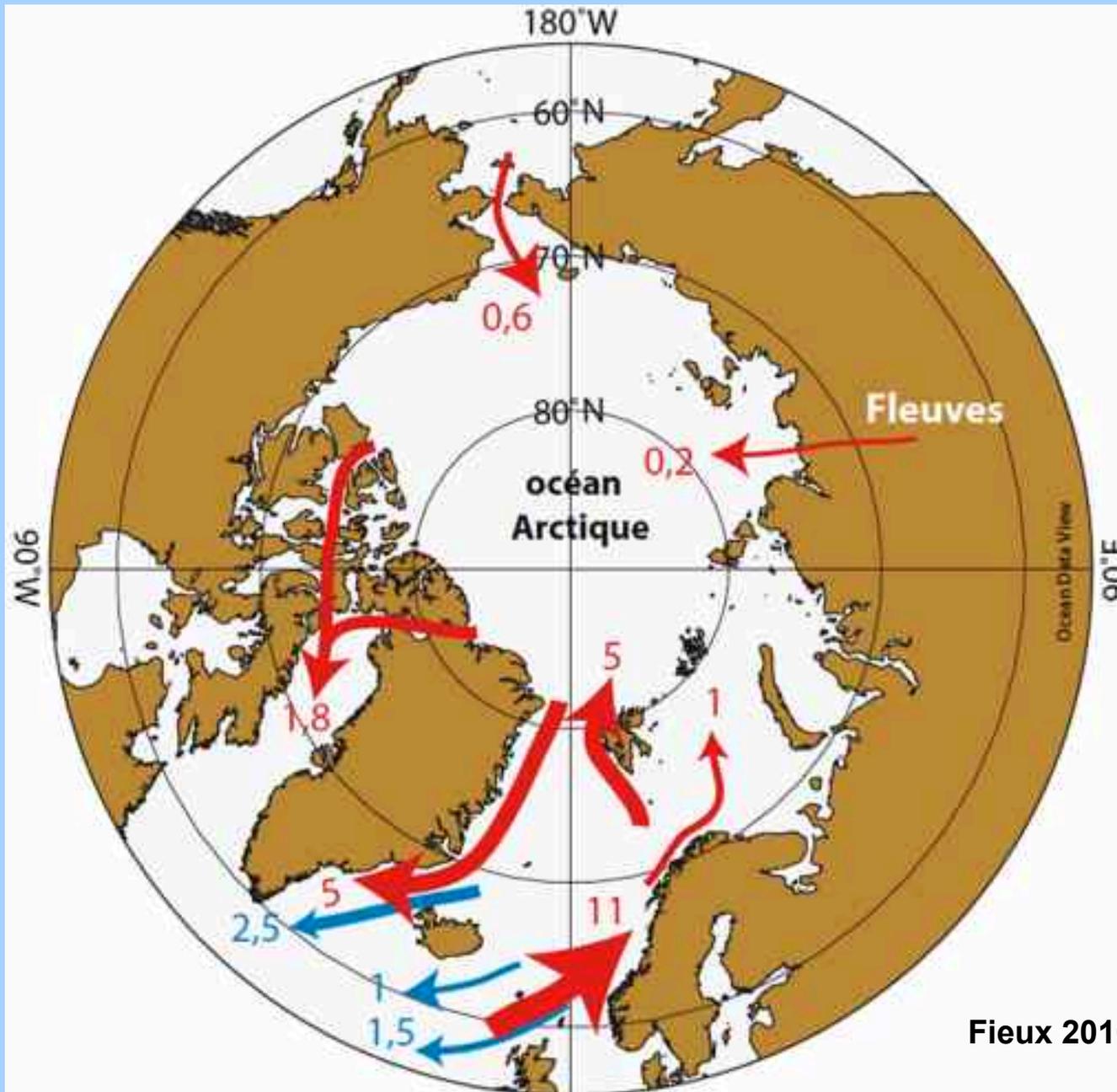


d'après Tomczak & Godfrey, 2003

La « méditerranée » Arctique est connectée à la circulation « thermohaline » globale

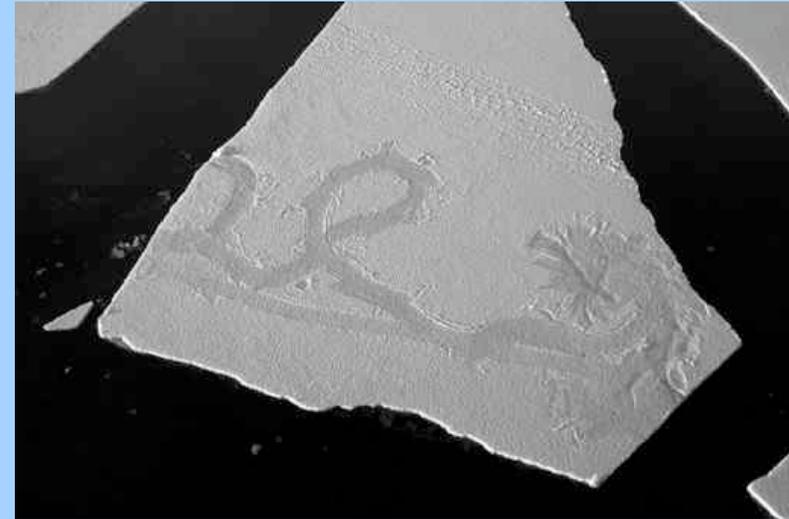


Bilan des transports d'eau (en Sv : $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) de la Méditerranée Arctique



Congélation de l'eau de mer lorsque la température descend en dessous de $-1,8^{\circ}\text{C}$

Glace en crêpes



Différents aspects depuis des cristaux disséminés dans l'eau de mer (*frazil*) jusqu'à la formation de la banquise de plusieurs mètres d'épaisseurs

Banquise pluriannuelle



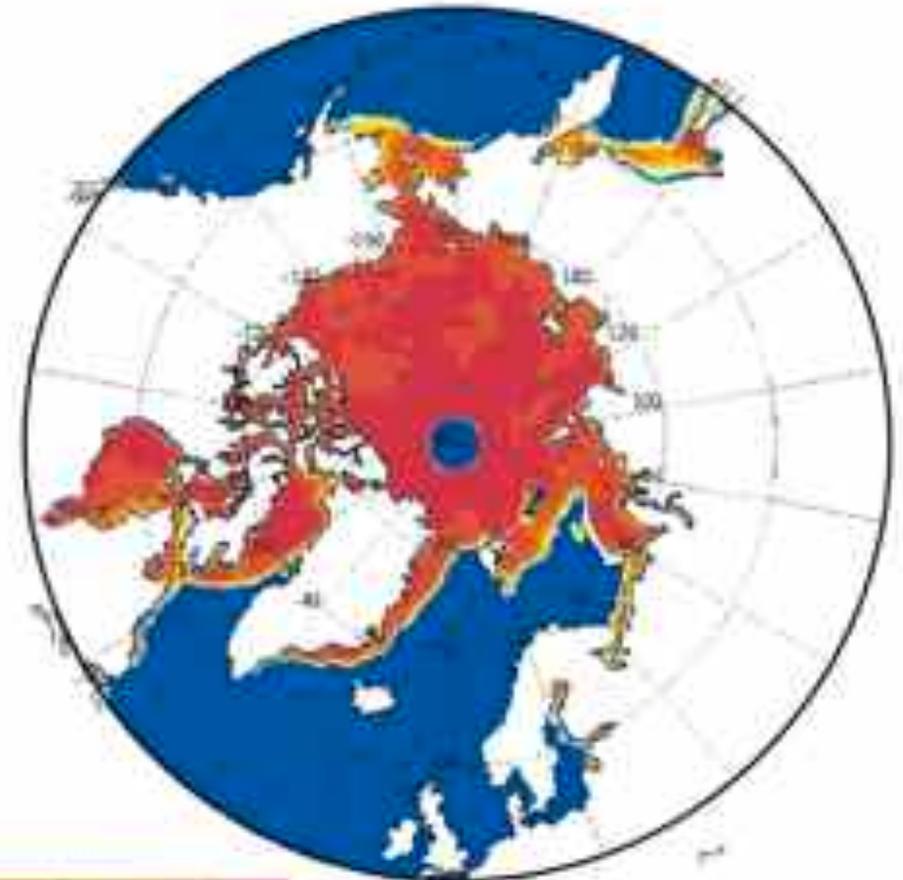
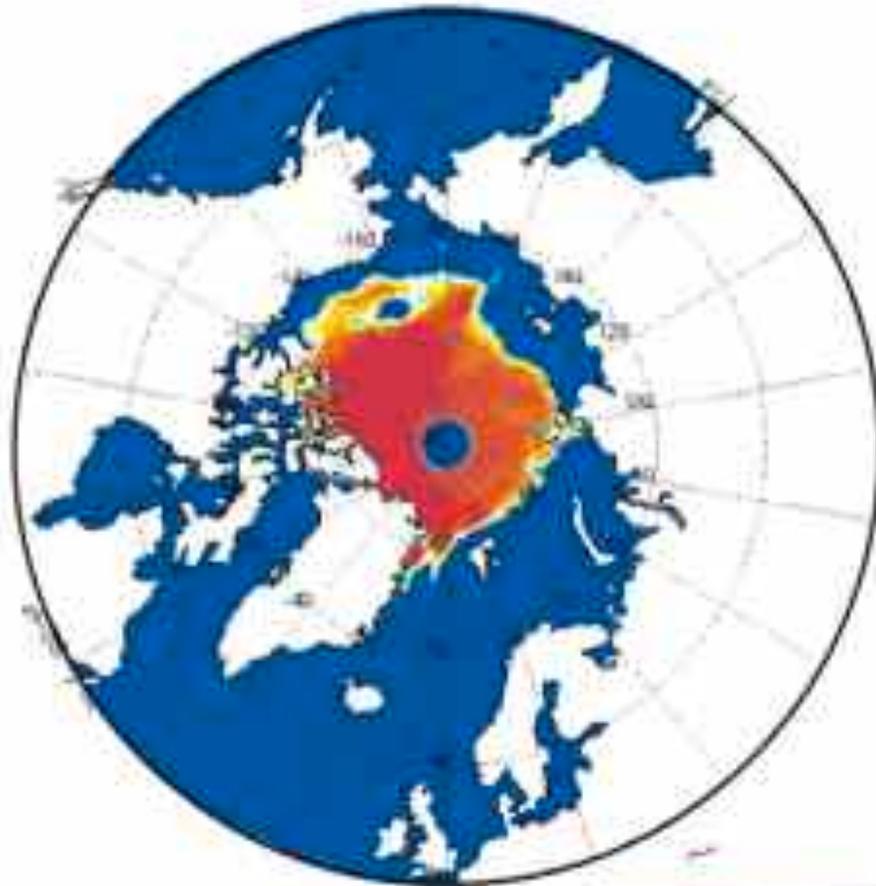
Banquise fracturée (action du vent)



Variations saisonnières de la banquise (2006)

Septembre
6 millions de km²

Mars
16 millions de km²



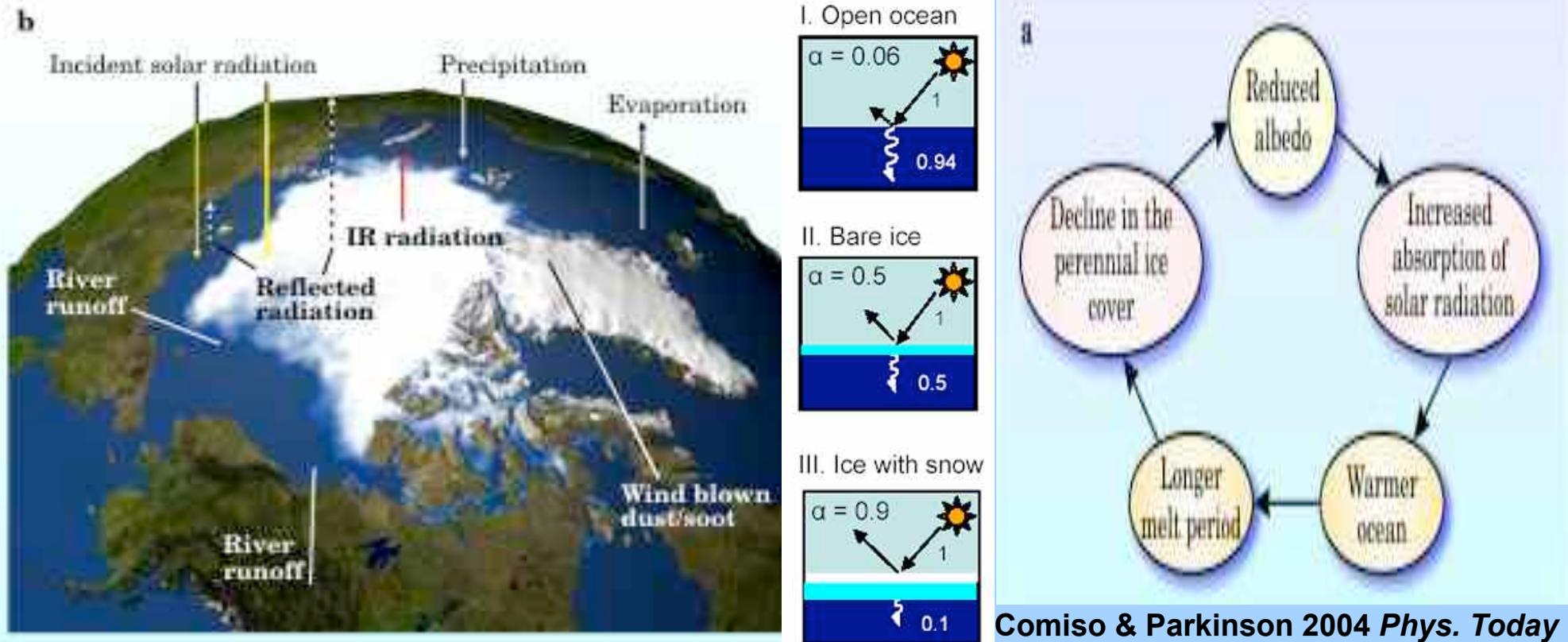
0 20 40 60 80 100 %

Pourcentage de couverture de la banquise

Source: G. Garric MERCATOR OCEAN

La banquise isole l'océan en réfléchissant le rayonnement solaire et en limitant les échanges de chaleur entre l'atmosphère et l'océan

=> rétroaction positive du recul de la glace de mer

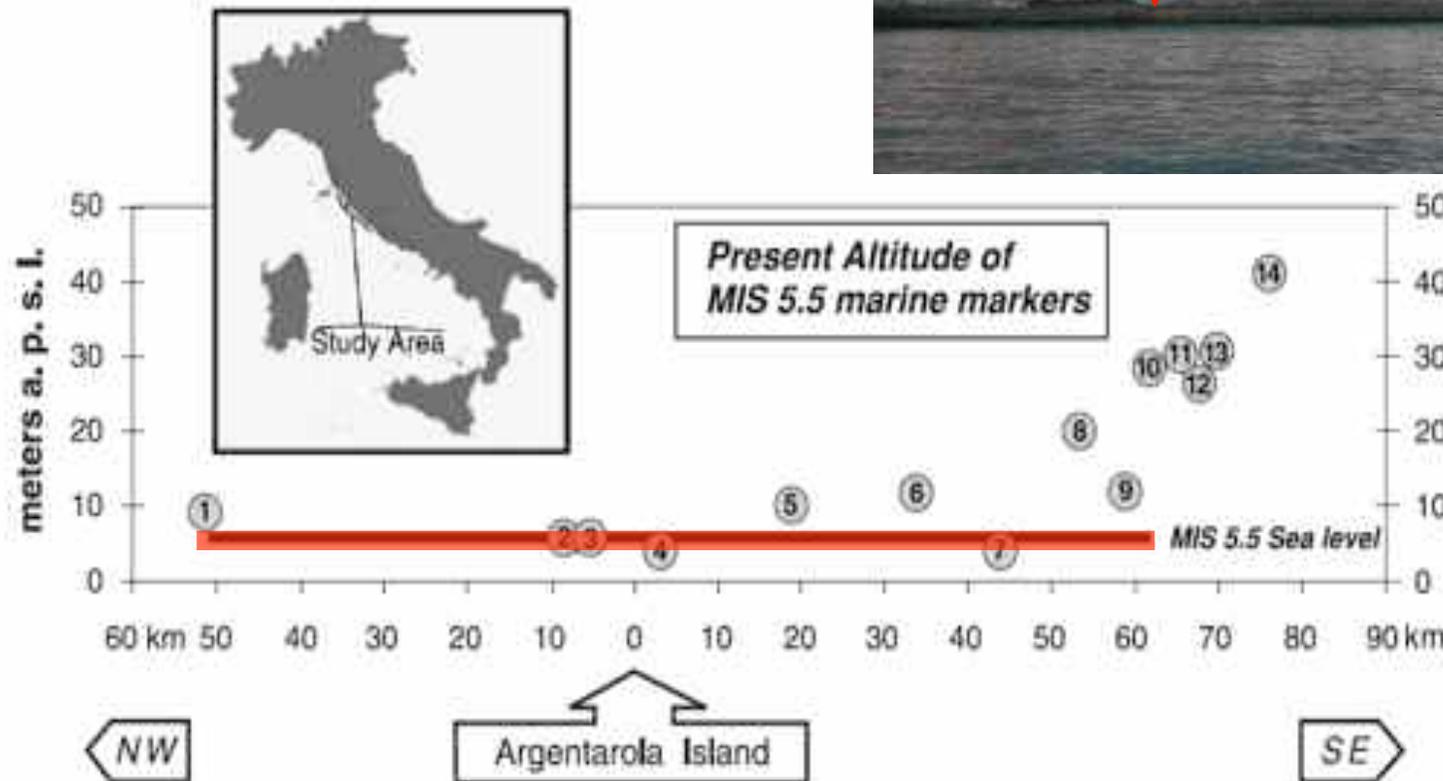
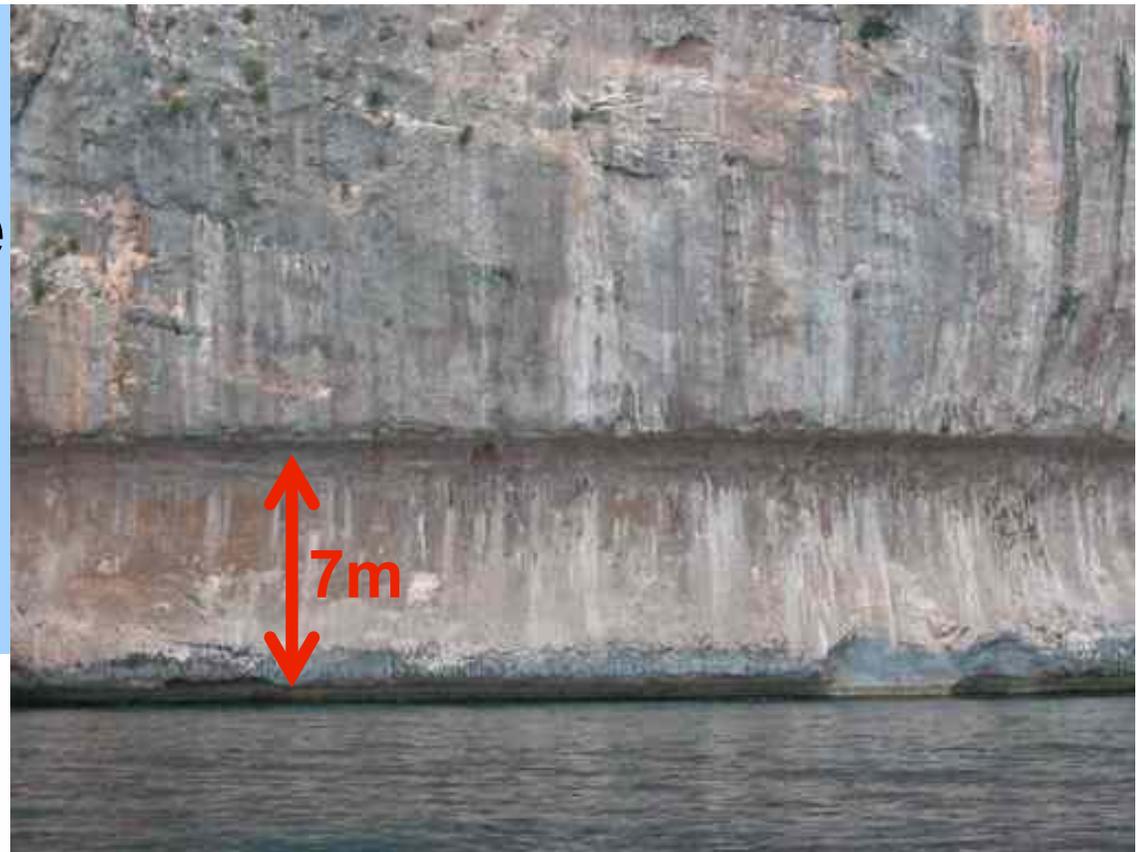


Effet de la calotte groenlandaise avec $1.7 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ et stockant l'équivalent de 6-7 m de niveau marin

**Les fluctuations
climatiques du passé
illustrent la sensibilité
de l'Arctique**

Haut niveau marin Dernier Interglaciaire (125.000 ans BP)

exemple de l'encoche
côtière italienne

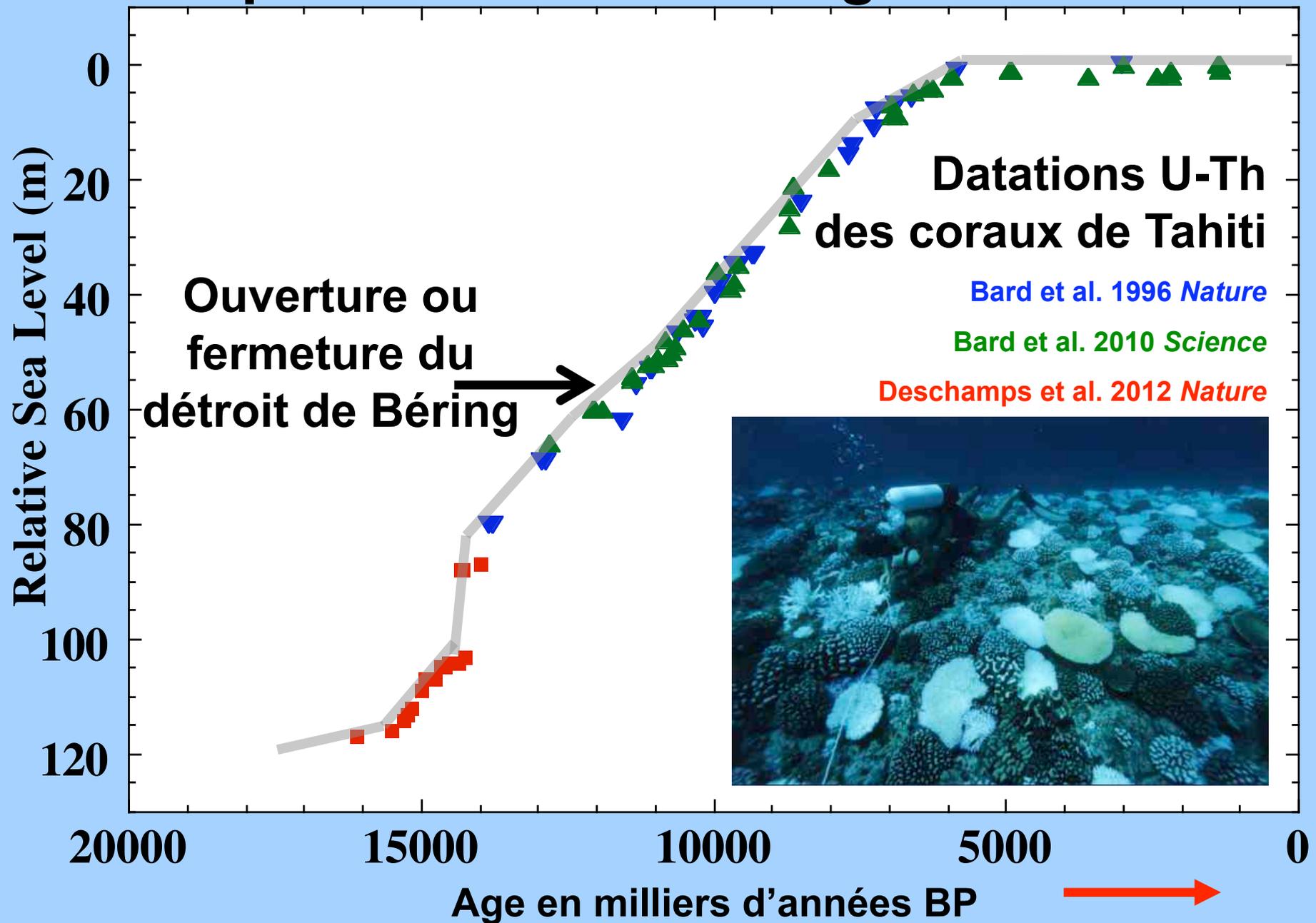


Strombus bubonius

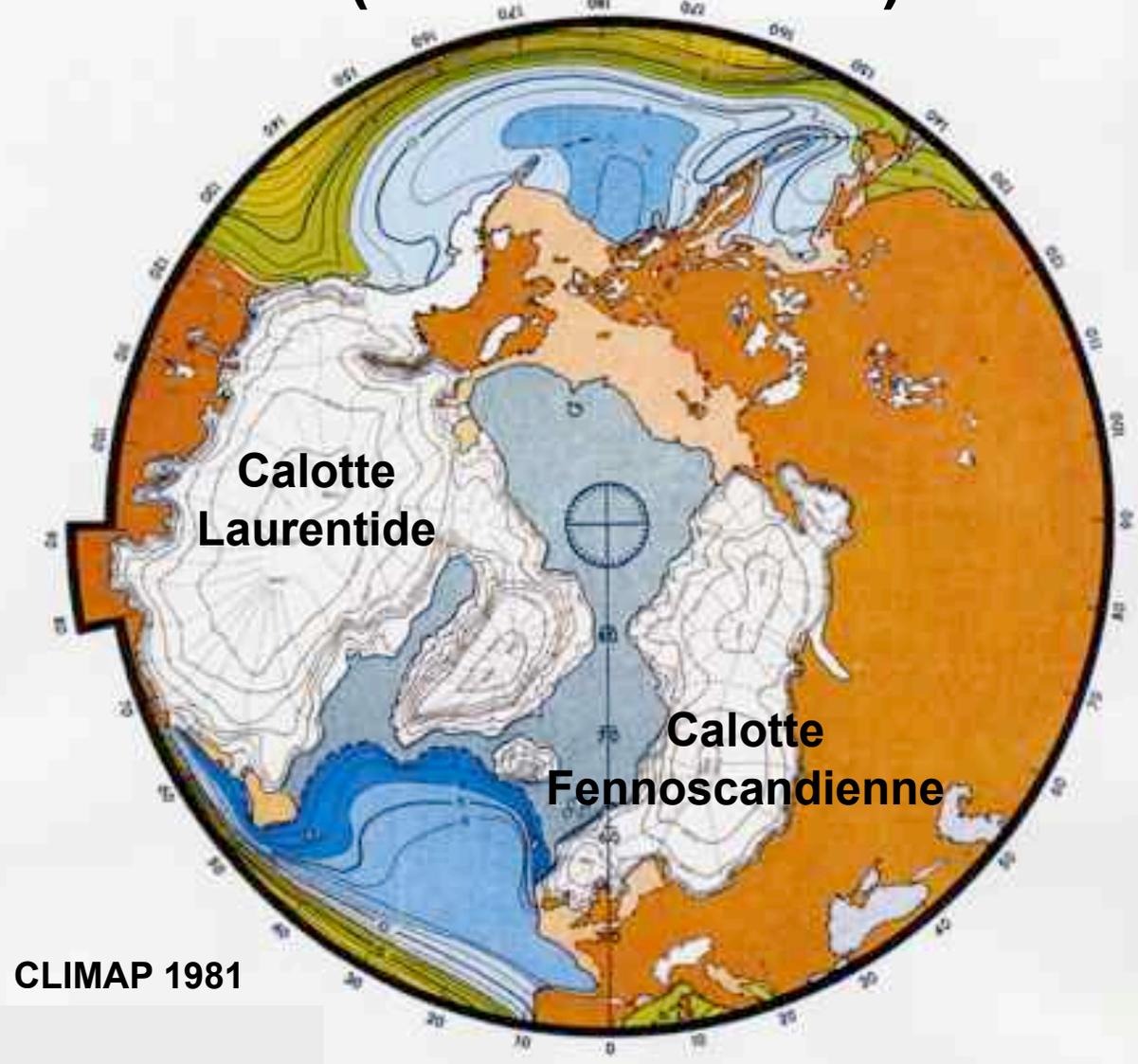
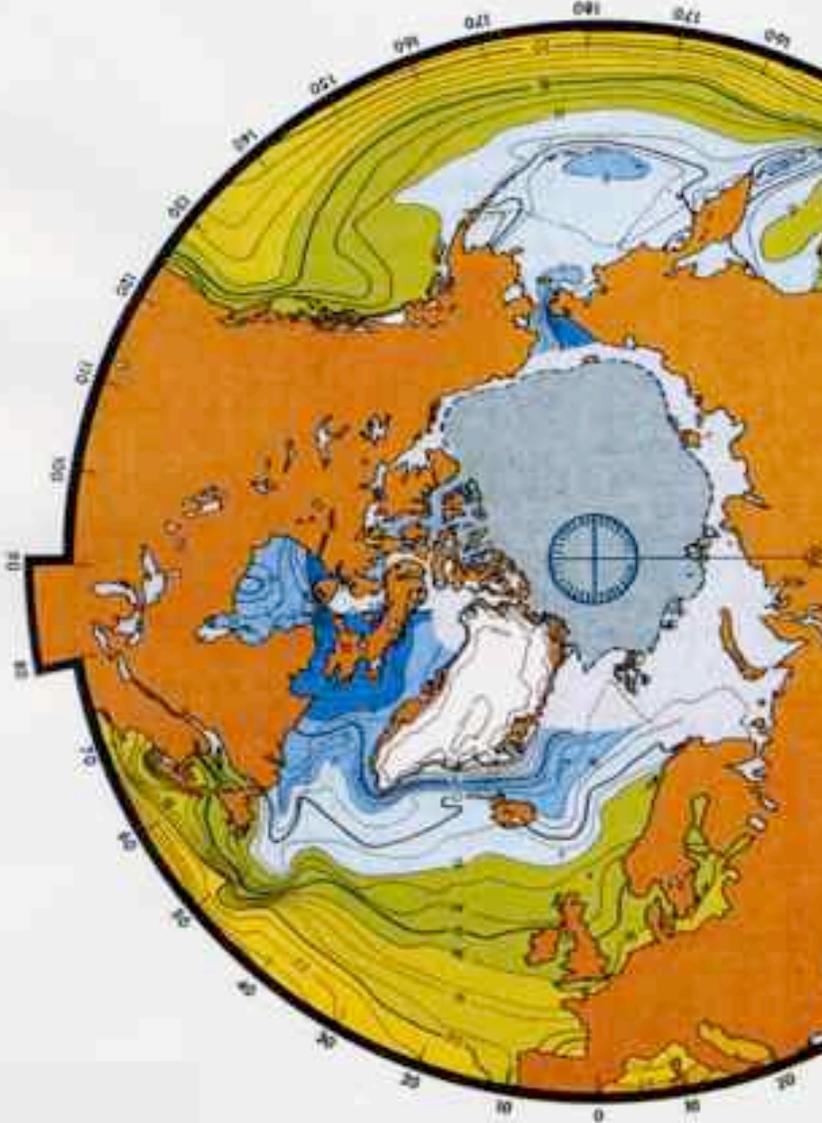


Bard et al. 2002 *EPSL*
Antonioli et al. 2004 *GPC*

Baisse du niveau marin (> 120m) pendant la dernière glaciation



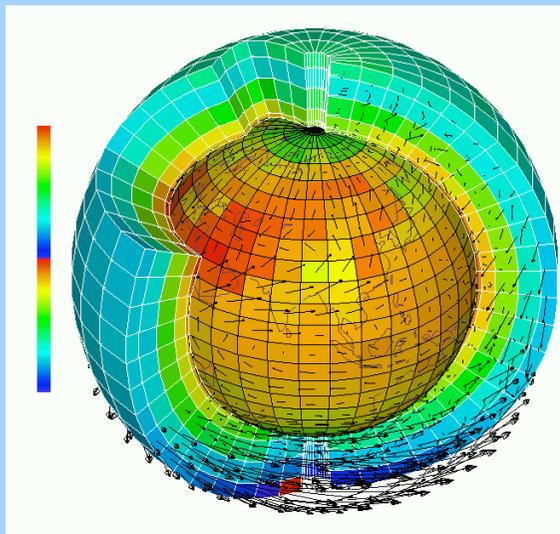
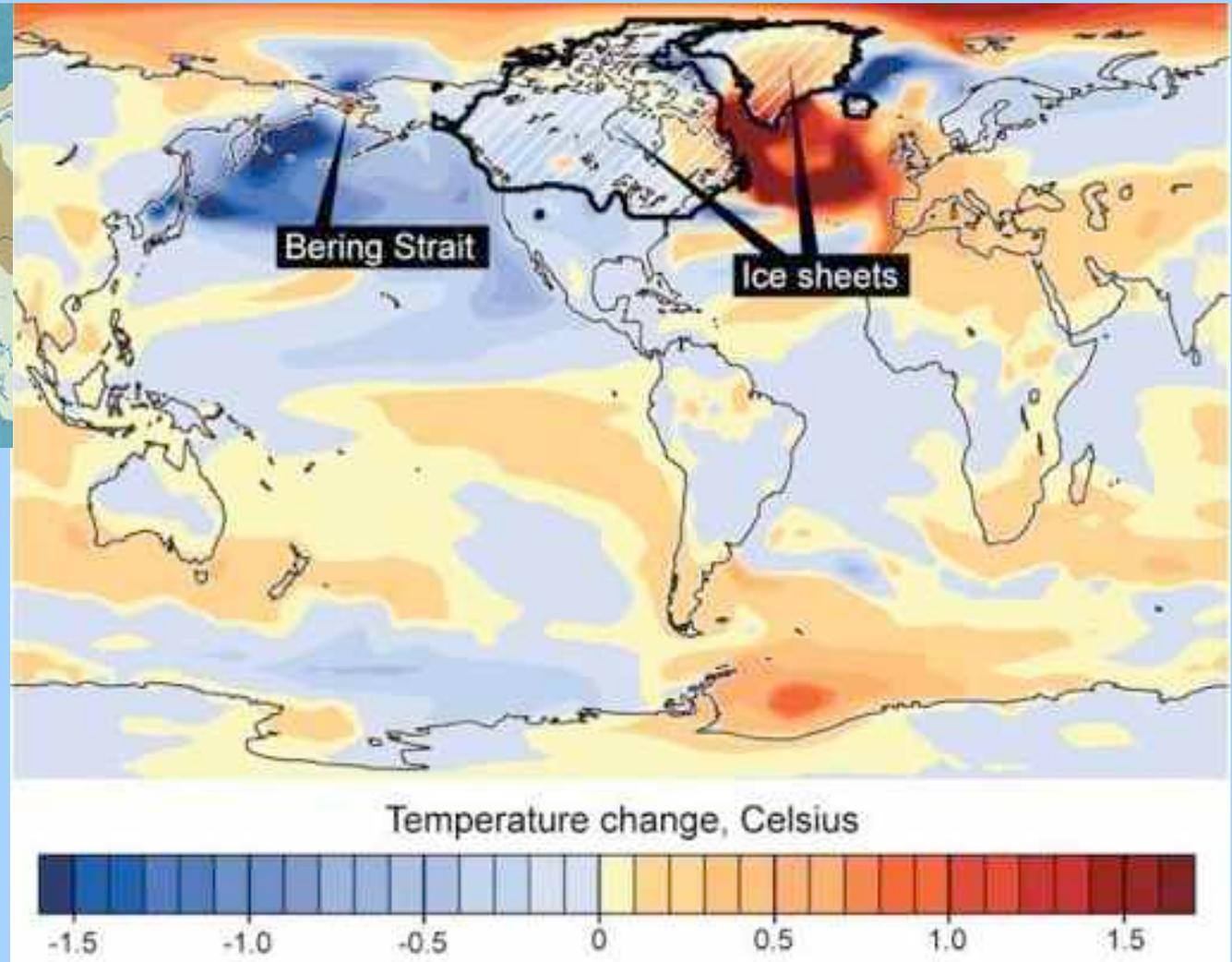
La zone Arctique aujourd'hui et au Dernier Maximum Glaciaire (21.000 ans B.P)



CLIMAP 1981

Changements majeurs des températures, de la géométrie du bassin, de la banquise et des courants

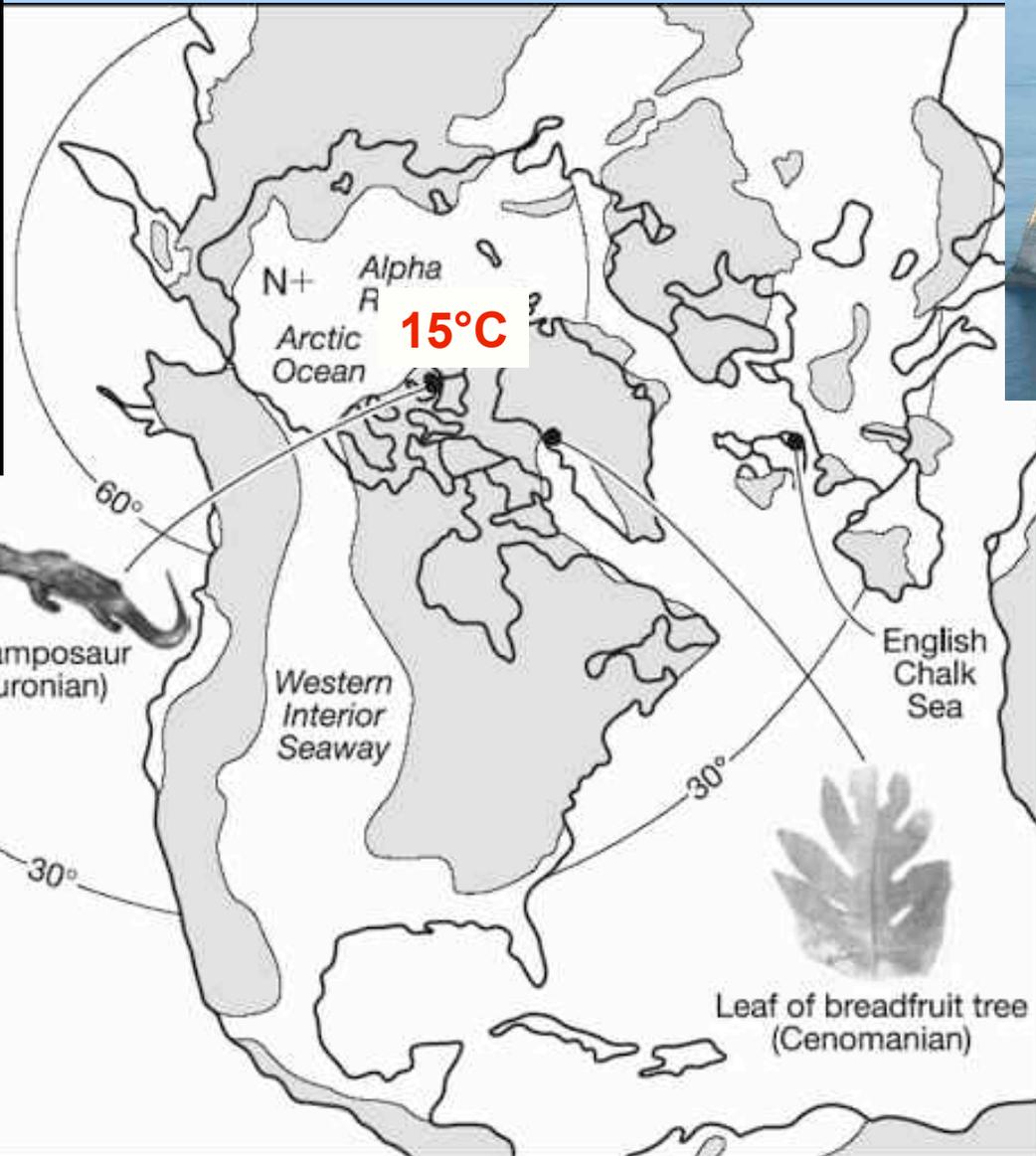
Estimation par modélisation numérique de la contribution climatique de la fermeture du détroit de Béring



Tendances climatiques en Arctique depuis la période chaude du Crétacé

pCO₂ ≈ 1000 à 2000 ppm
niveau marin ≈ + 200 à 400 m

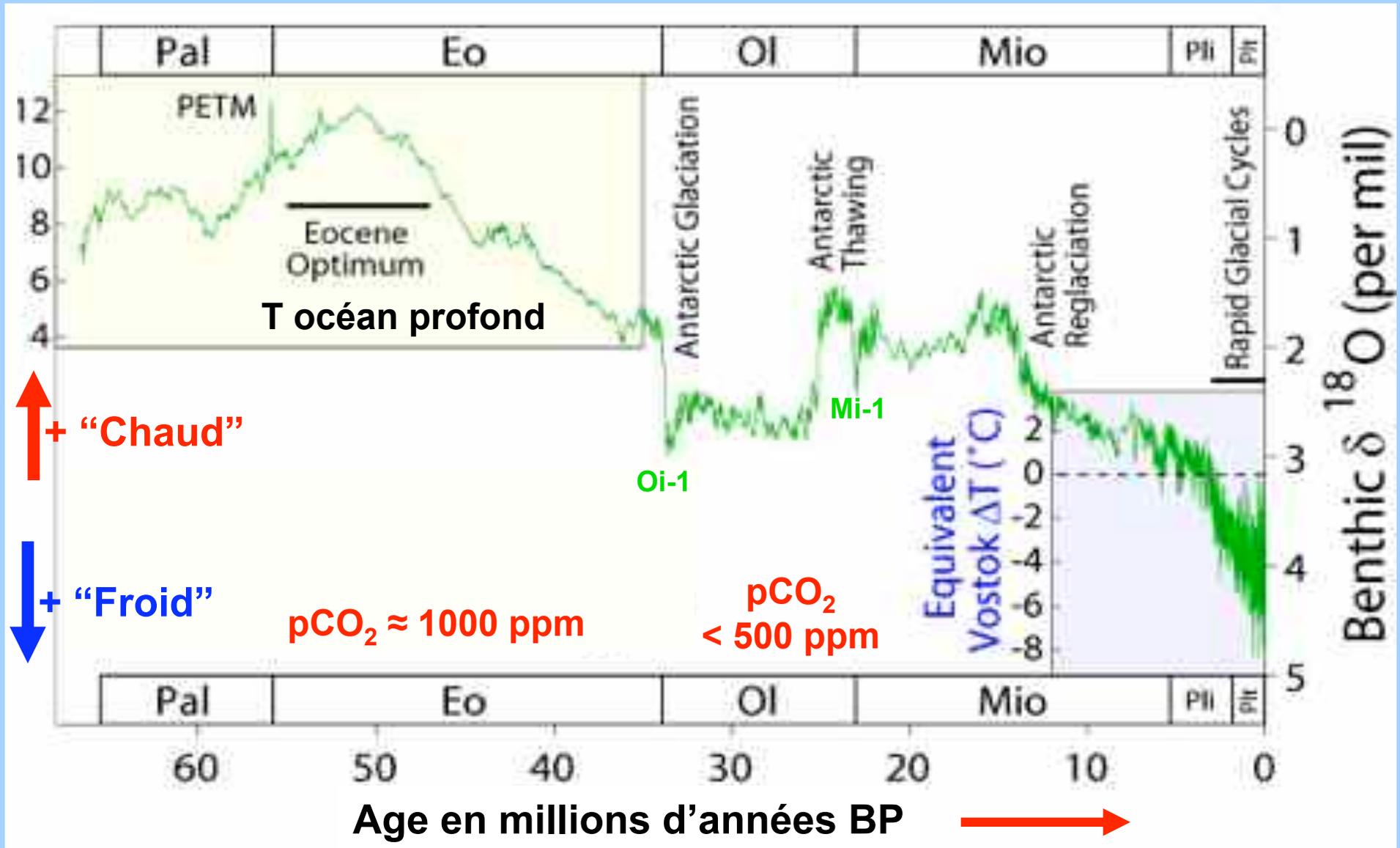
Températures chaudes au delà du cercle polaire (70-100 Ma): SST TEX86 du Maastrichtien, 'crocodile' (*Champsosaure* du Turonien) 'arbre à pain' (*Artocarpus* du Cénomaniens)



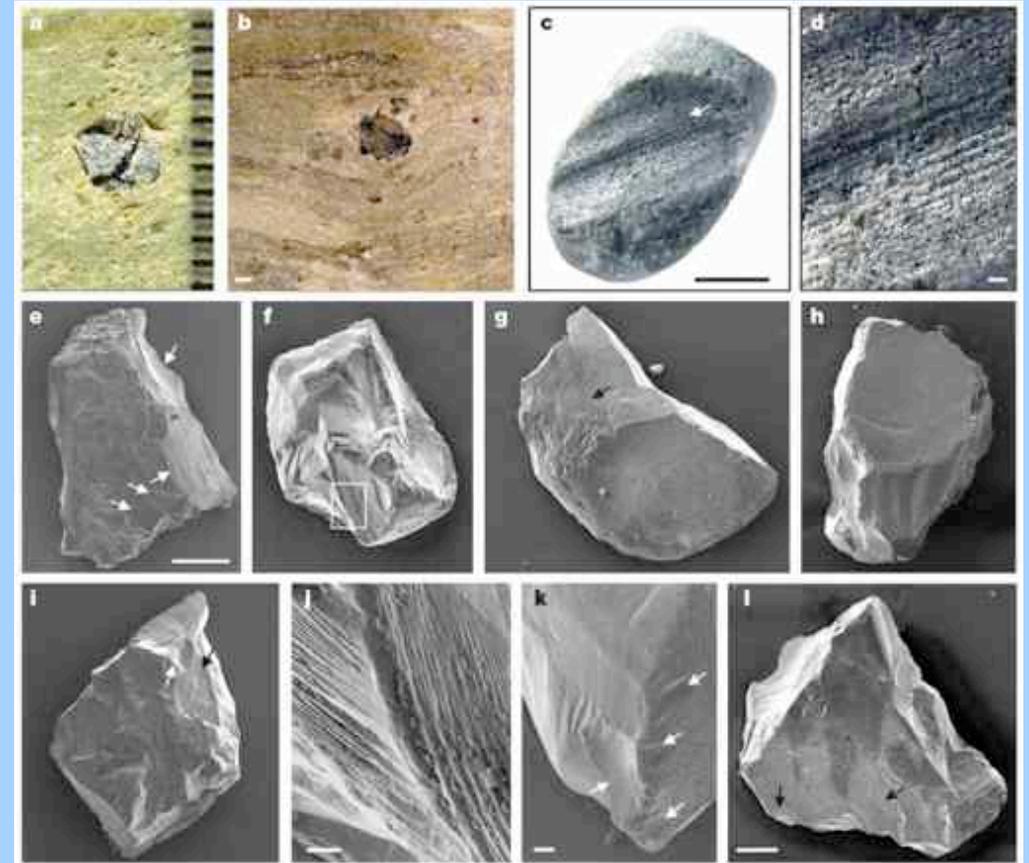
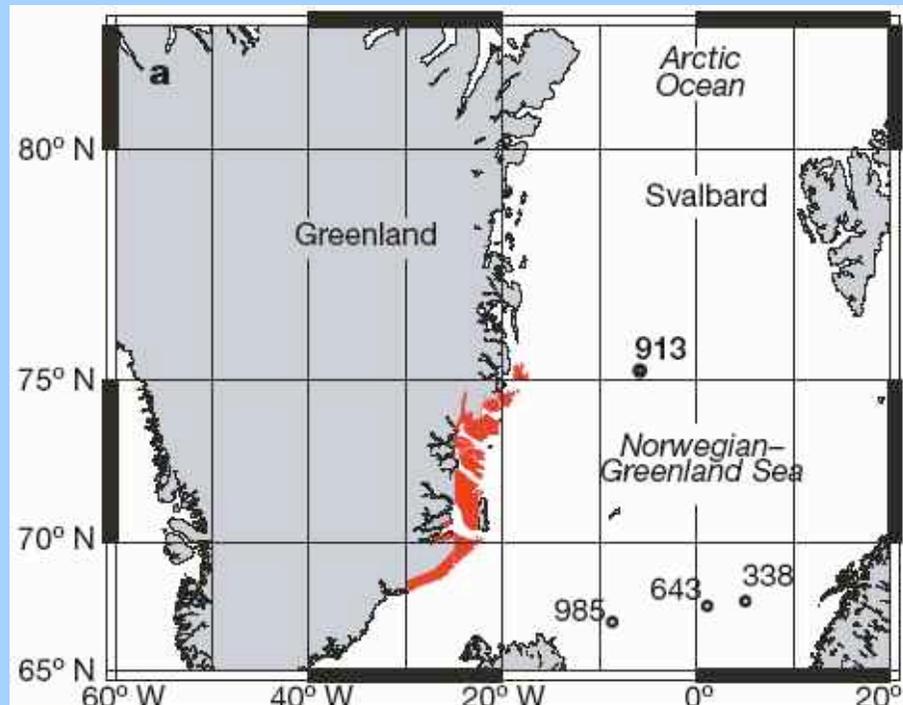
Tarduno et al. 1998 *Science*

Jenkyns et al. 2004 *Nature*

Reconstitution paléoclimatique globale avec le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ des foraminifères benthiques ($\delta^{18}\text{O}$)



Les débris détritiques glaciaires dans les sédiments de l'Atlantique Nord indiquent un englacement synchrone (30-45 Ma) des pôles nord et sud



Tripati et al. 2008 *EPSL*

Eldrett et al. 2007 *Nature*

Premier forage long en Arctique en 2004 Arctic Coring Expedition (IODP 302)

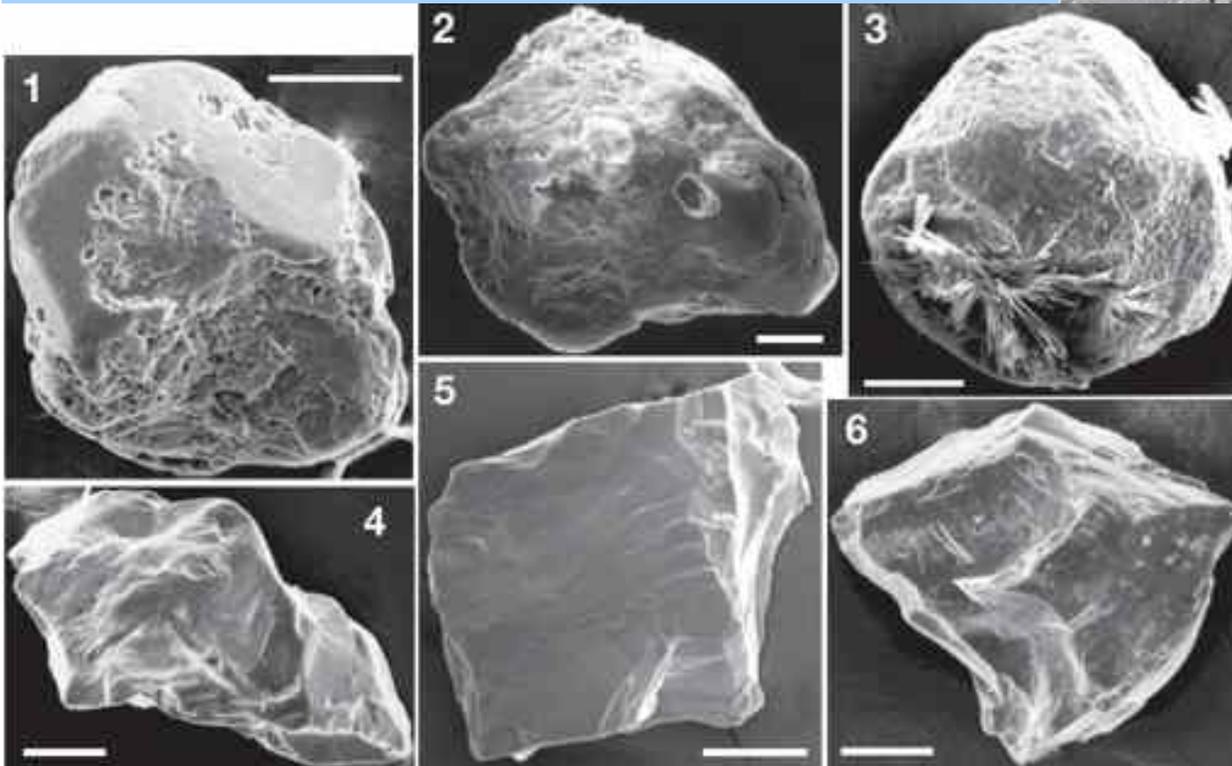
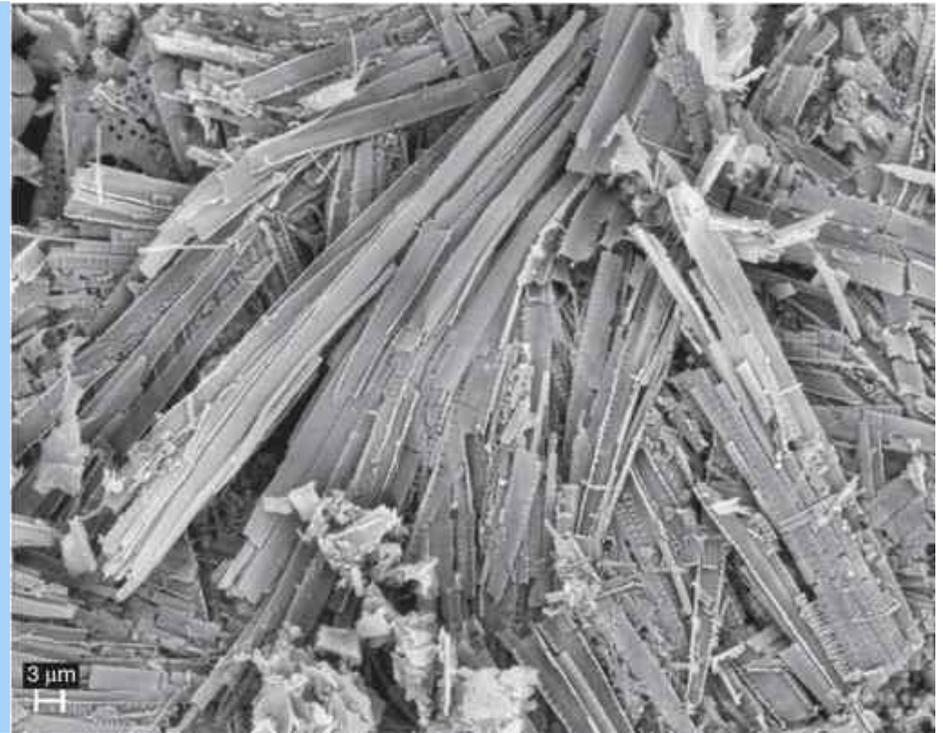


**Paléogéographie
de l'Eocène Moyen
(47 Ma) Lutétien**

Stickley et al. 2009 *Nature*

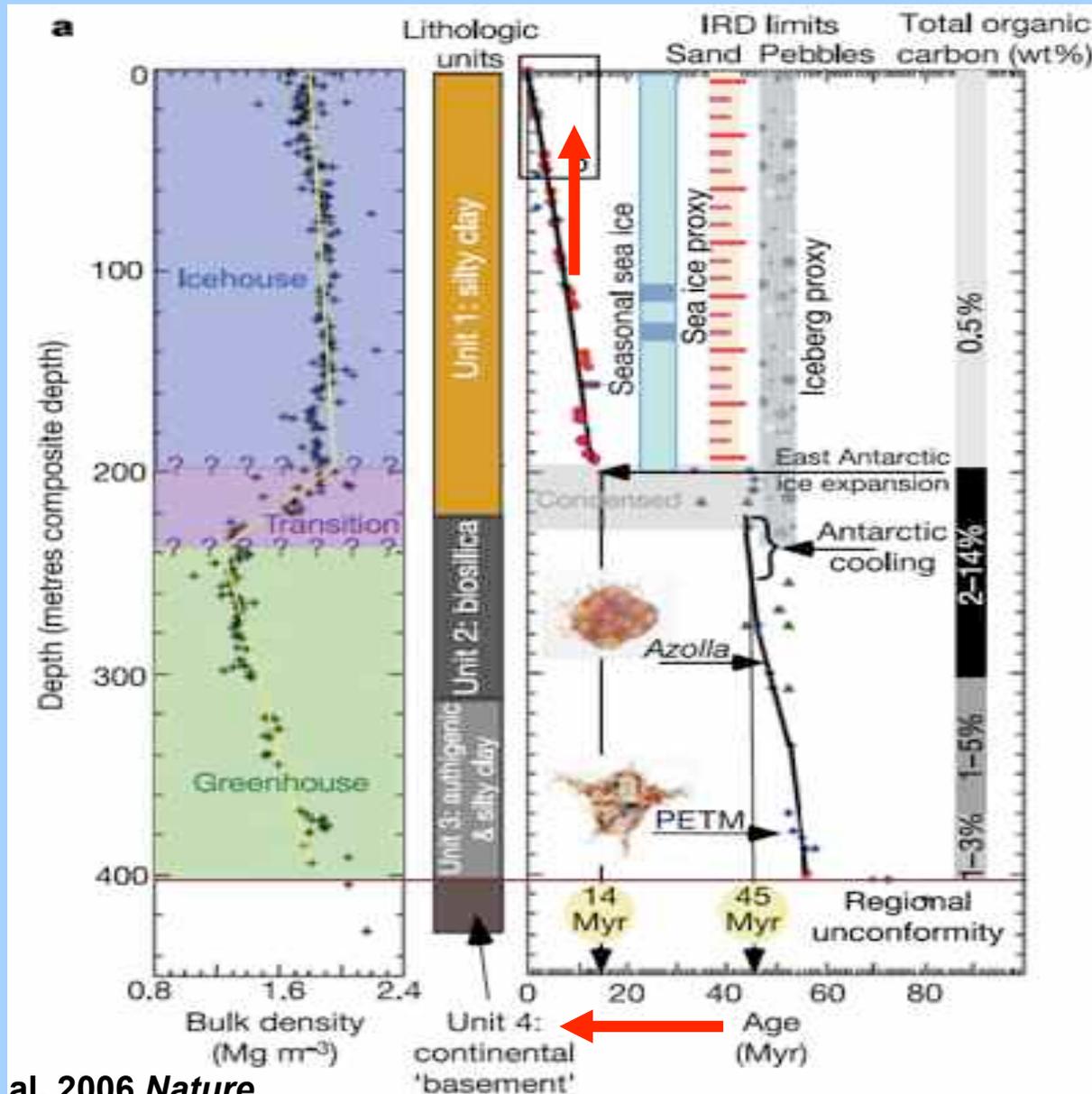
Abondance des diatomées adaptées à la glace de mer (*Synedropsis*)

Stickley et al. 2009 *Nature*

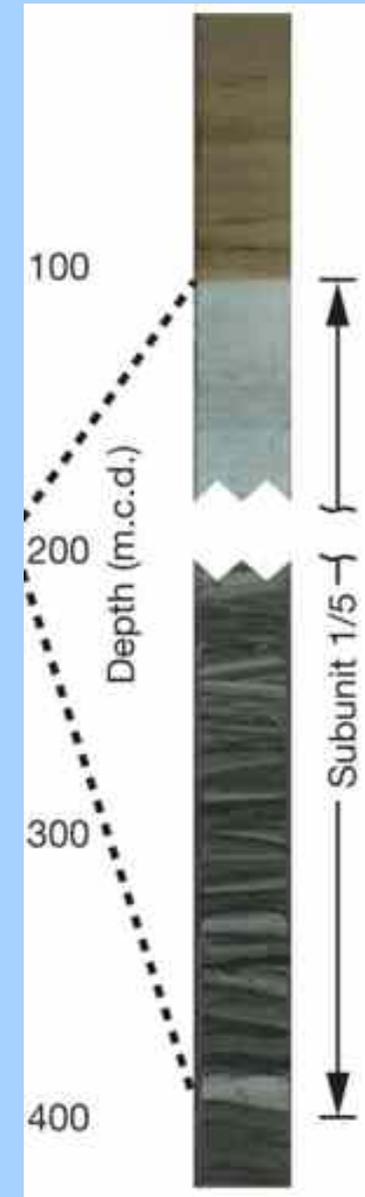


**Textures
typiques d'IRD
transportés par
la glace de mer
ou par les
icebergs**

Transition graduelle de conditions anoxiques à une colonne d'eau bien ventilée

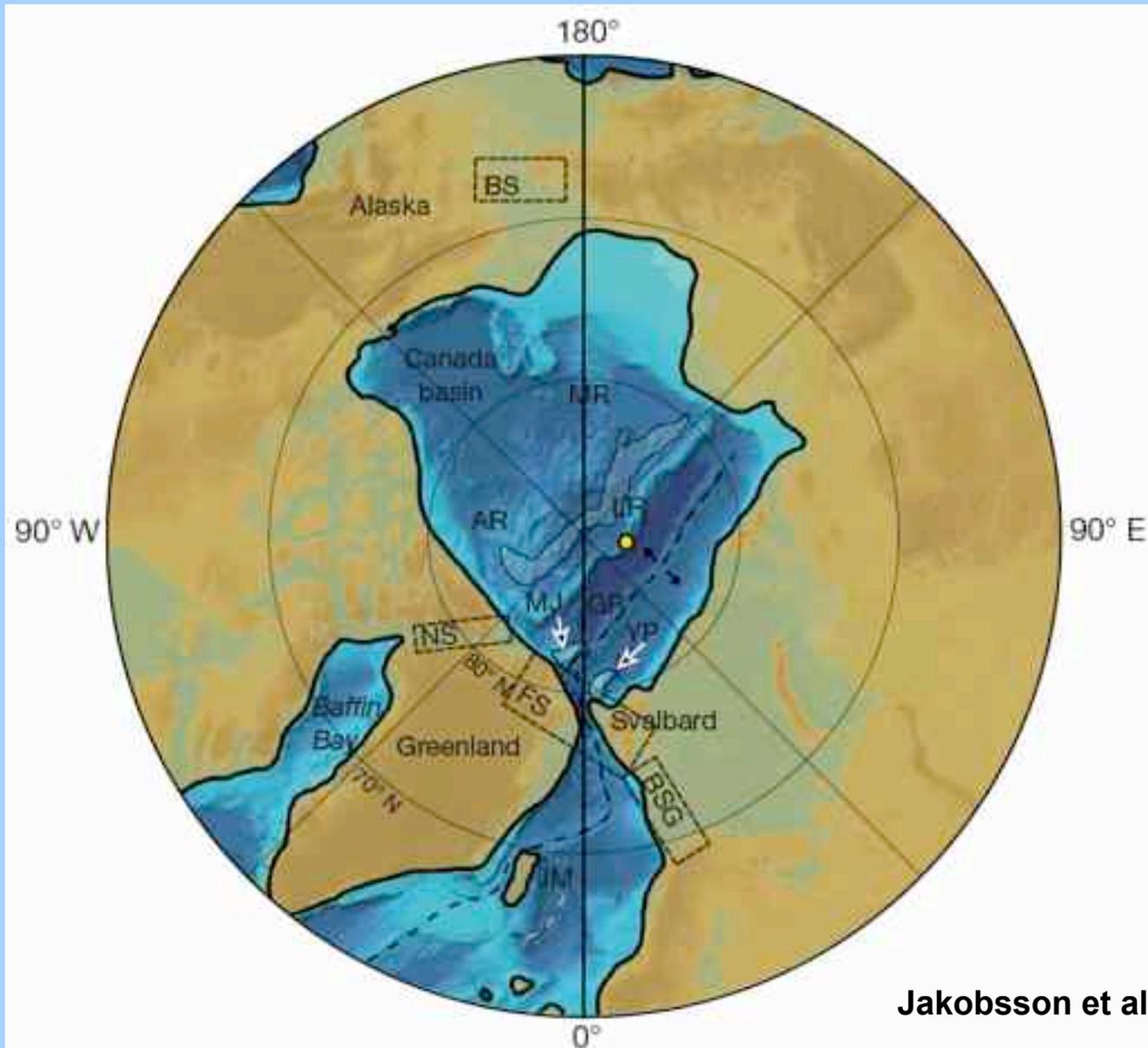


Moran et al. 2006 *Nature*



Jakobsson et al. 2007 *Nature*

Ouverture du détroit de Fram au Miocène (18-14 Ma BP) avec échanges d'eau profonde



Jakobsson et al. 2007 *Nature*

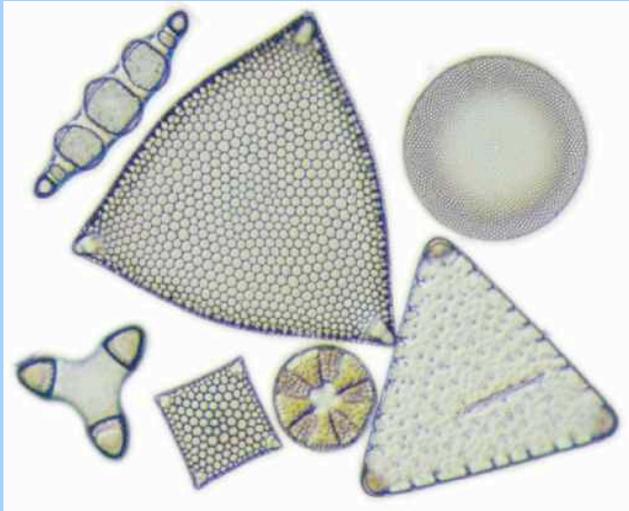
Les isotopes de l'oxygène ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) comme indicateur du niveau marin



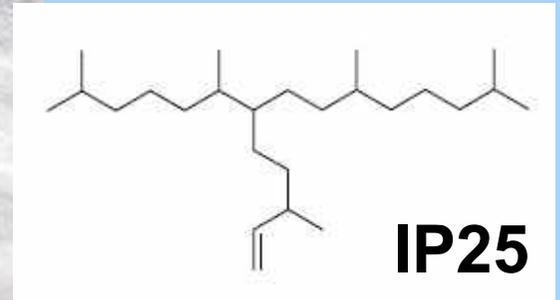
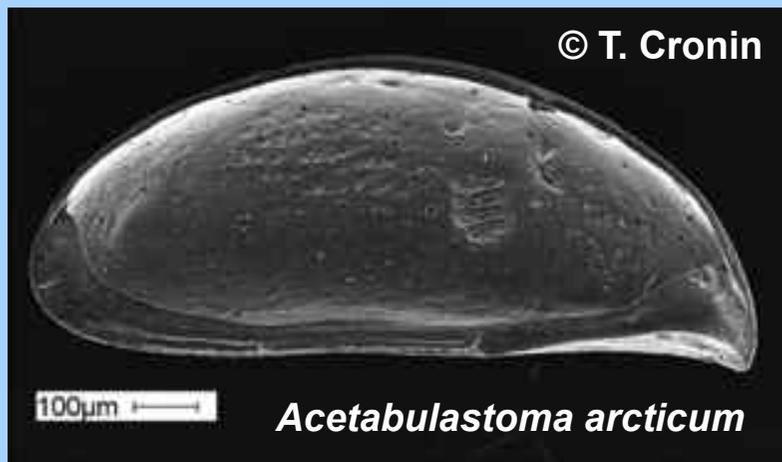
**Le $\delta^{18}\text{O}$ océanique est
une fonction du volume
de glace continentales**

d'après Shackleton 1966 *Nature*

Quelques bio-indicateurs de la banquise



Squelettes de microorganismes marins adaptés à la glace de mer : diatomées, dinokystes, ostracodes...



Belt et al. 2007 *Organic Geochem.*

Cycles glaciaires des 3 derniers Ma

Polyak et al. 2013 QSR

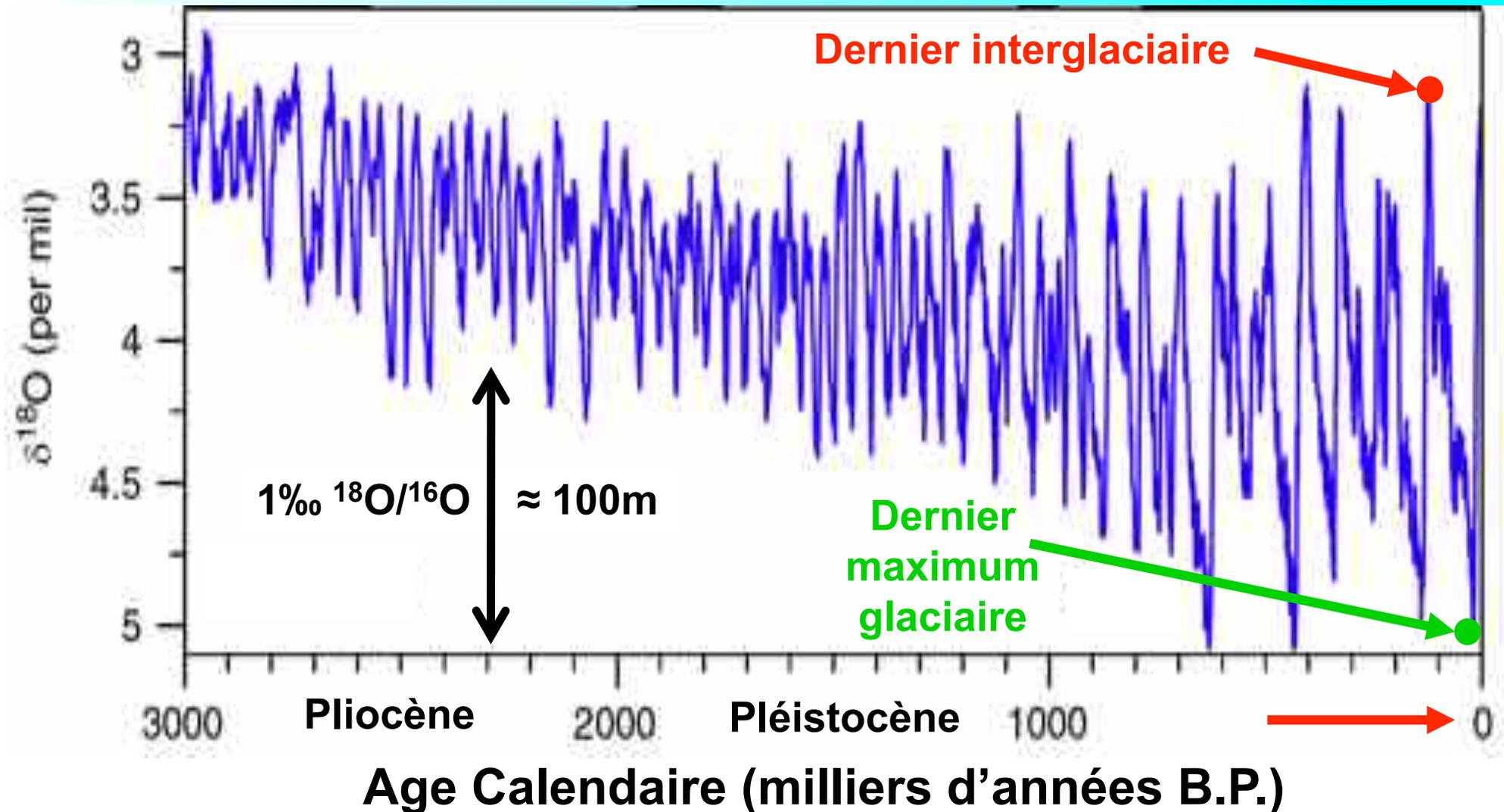
Glace de mer

Saisonnière

Pérenne

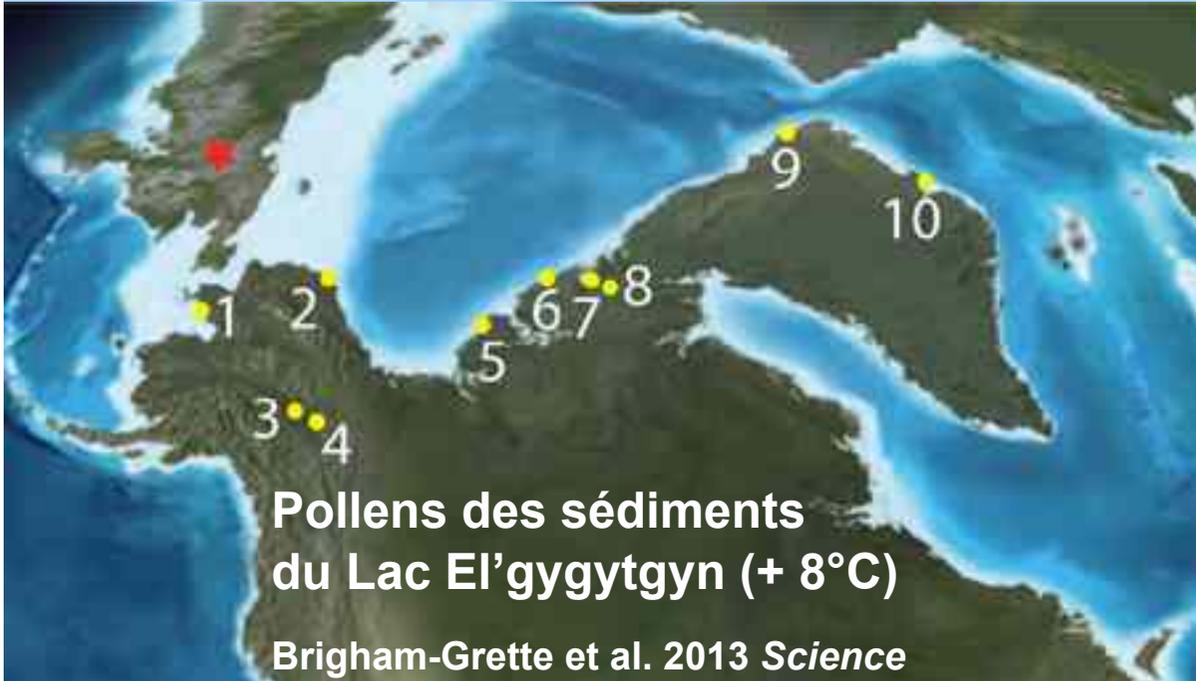
Dernier interglaciaire

Dernier maximum glaciaire



Lisiecki & Raymo 2005 *Paleoceanography*

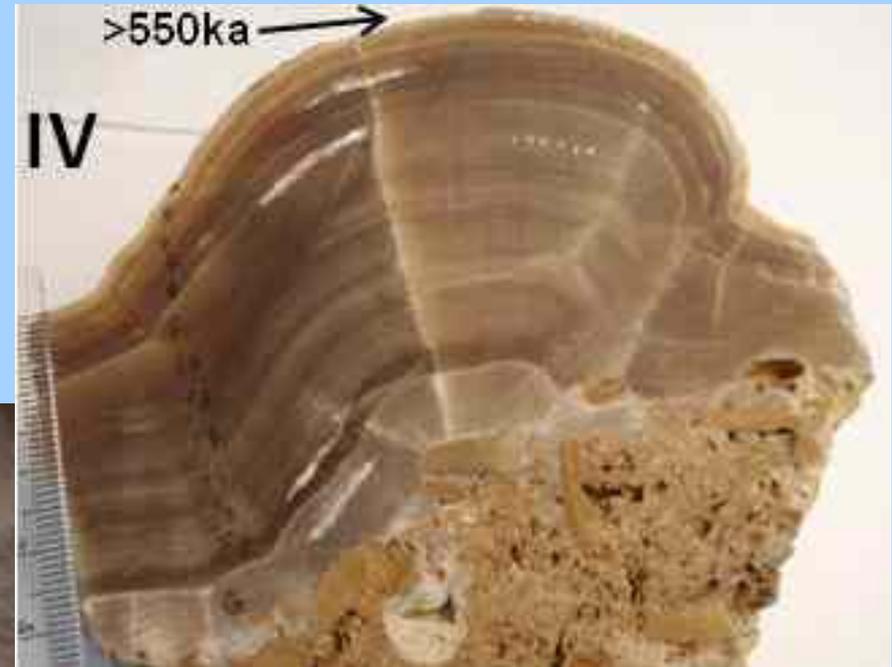
Plusieurs évidences de températures interglaciaires chaudes pendant le Pliocène



**Forêts de
Mélèzes des îles
d'Ellesmere et
Bylot (+18°C ?)**

Csank et al. 2011, 2013
Palaeo-3

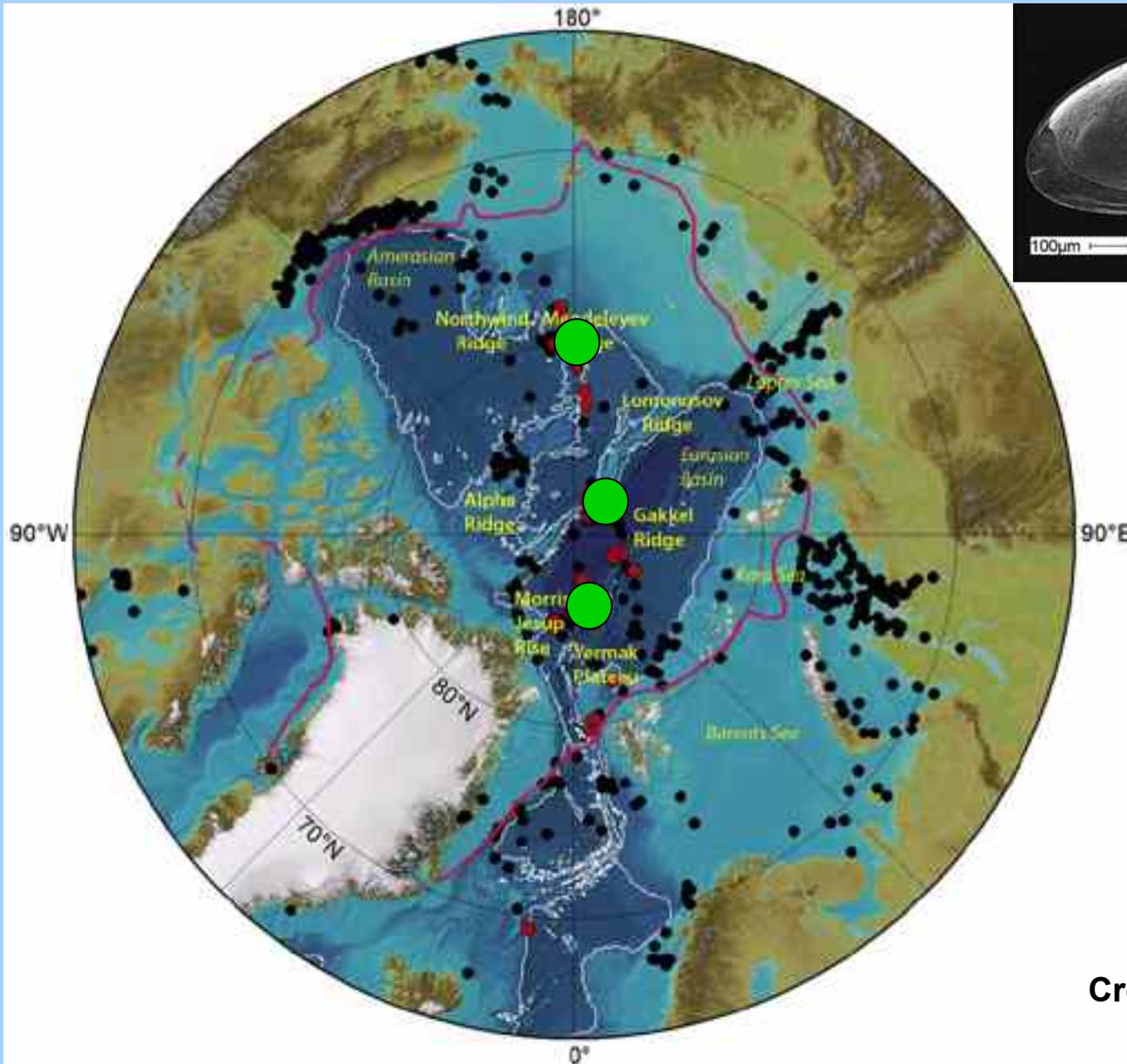
Fonte partielle du pergélisol sibérien à 60°N avec croissance de stalagmites pendant l'interglaciaire MIS 11 du Pléistocène



**Grotte englacée
de Ledyanaya
Lenskaya**

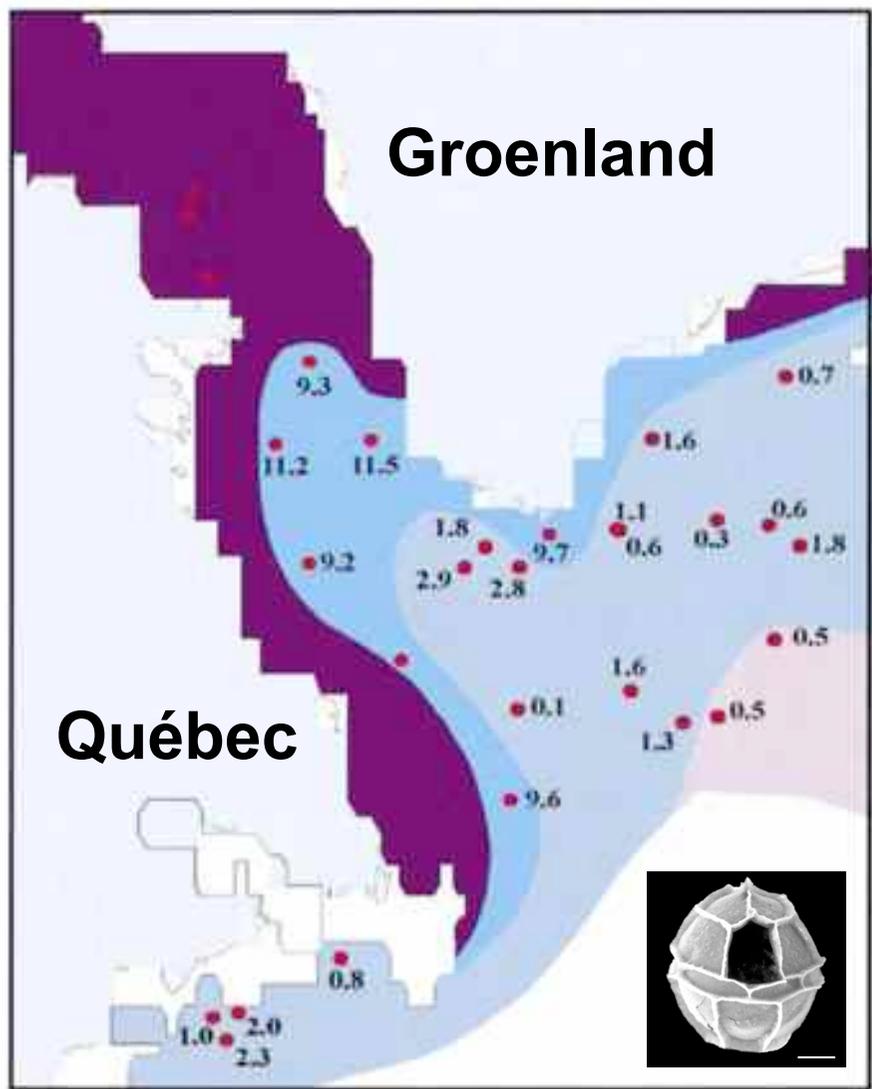
Vaks et al. 2013 *Science*

Présence de banquise pérenne pendant le dernier interglaciaire (125.000 ans BP)



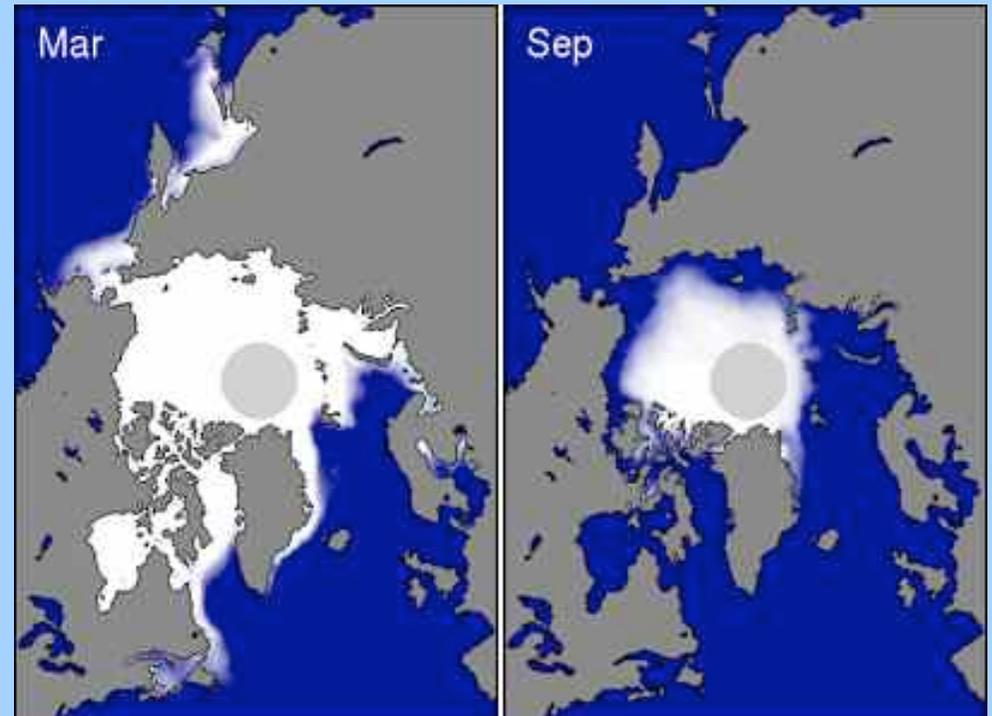
Acetabulastoma arcticum

Reconstitution de la banquise (FT dinokystes) du dernier maximum glaciaire (21.000 ans BP)



(a)

De Vernal & Hillaire-Marcel 2000 QSR



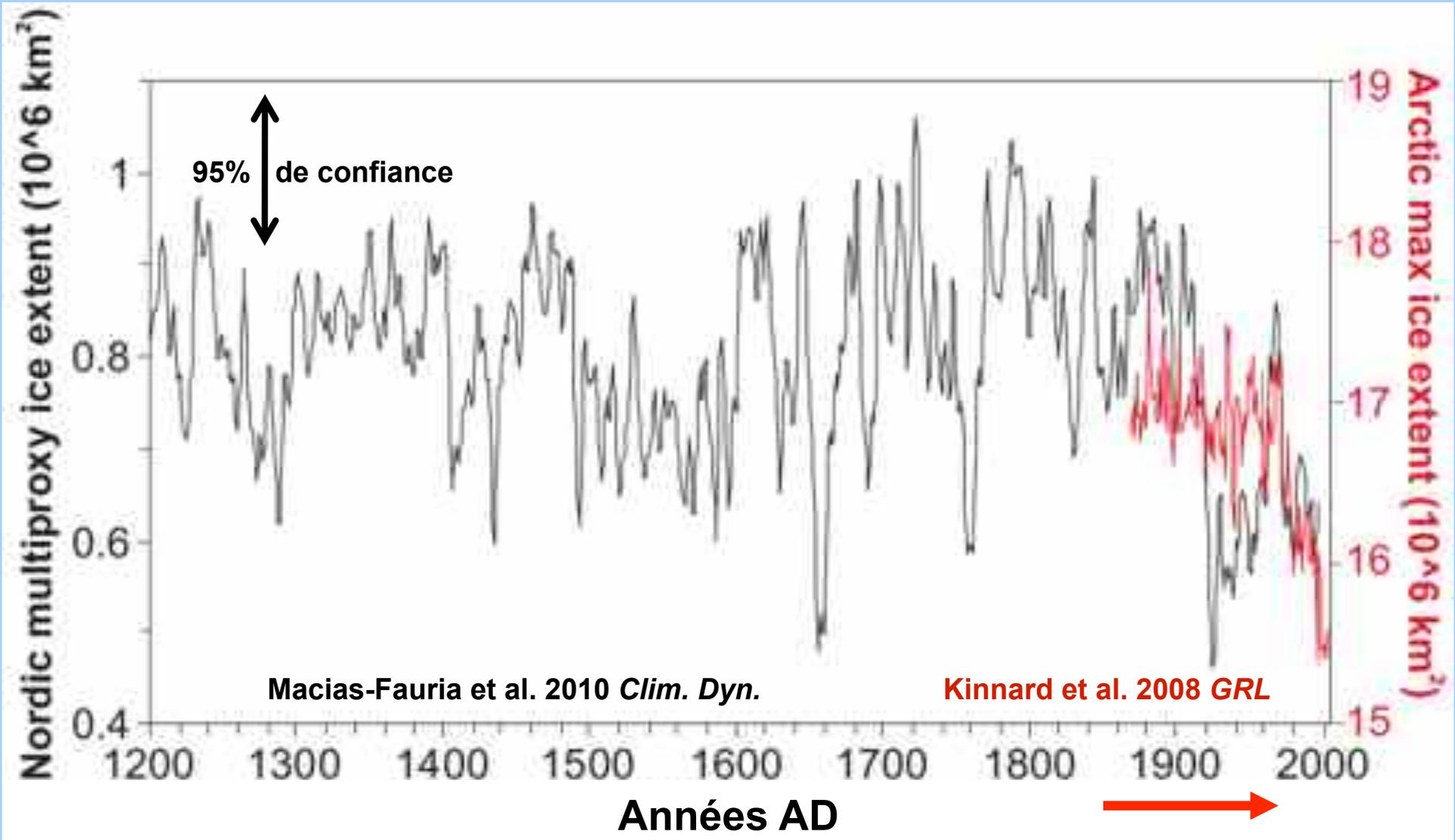
LETTER

doi:10.1038/nature12145

Persistent export of ^{231}Pa from the deep central Arctic Ocean over the past 35,000 years

Sharon S. Hoffmann¹, Jerry F. McManus¹, William B. Curry^{2,3} & L. Susan Brown-Leger²

Variations du dernier millénaire de l'extension maximale de la banquise: proxies paléo et **observations directes**



Polyak et al. 2010 *QSR*

Merci de votre attention

