



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —



Introduction et perspective longue sur le cycle du carbone dans le système climatique

Edouard BARD

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

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

« Recherches sur la proportion d'acide carbonique dans l'air », 1880 *CRAS*

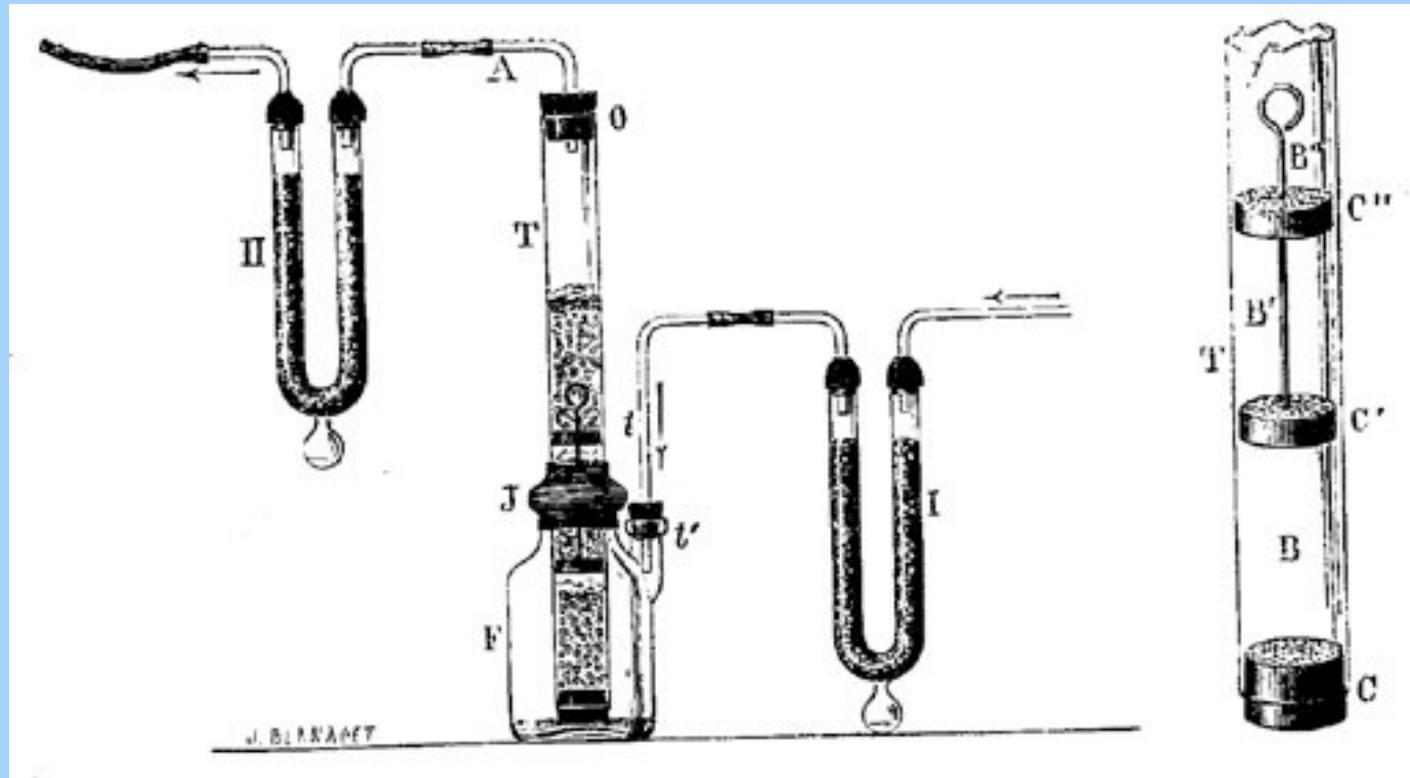
$p\text{CO}_2 = 294 \text{ ppm en } 1872$

« 29,4 pour 100 000 en volume »

Barboteur à eau de baryte, solution de $\text{Ba}(\text{OH})_2$



Jules Reiset



« Expériences sur les moyens eudiométriques et sur la proportion des principes constituants de l'atmosphère » 1805

Alexander von Humboldt



« d'après toutes nos expériences, il n'y a pas de variations de plus d'un millième dans la quantité d'oxygène que contient l'air »

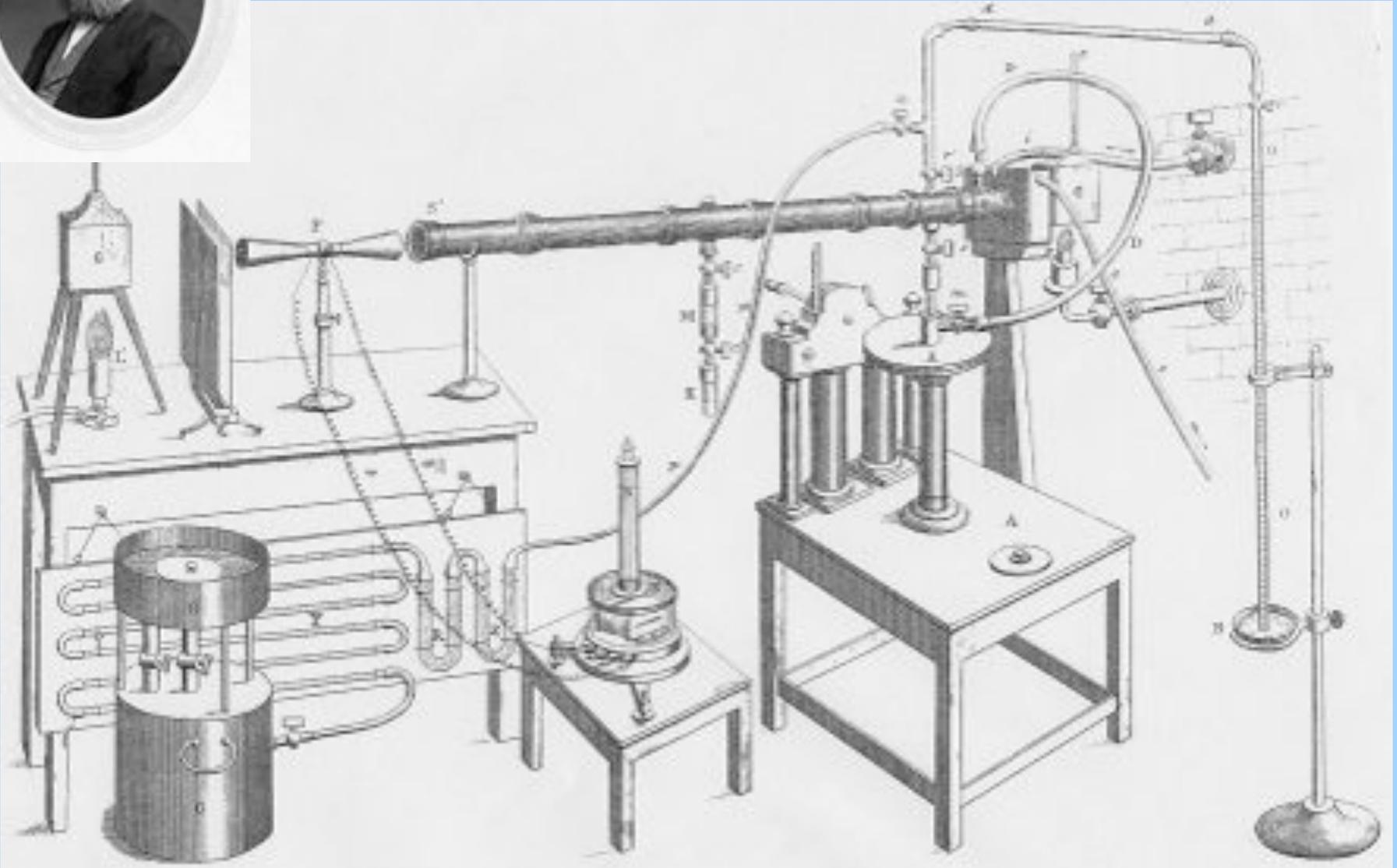
Jours auxquels l'air a été analysé.	Température exprimée en degrés du Thermomètre centigrade.	ÉTAT DE L'ATMOSPHÈRE.	Absorption provenant de l'acidification de 100 d'air et 500 d'hydrogène.	Quantité d'oxygène contenue dans 100 d'air.
17 nov.	7,3	Ciel couvert; vent d'est	126,0	21,0
18 —	4,5	Ciel couvert; vent est-sud-est.	126,0	21,0
19 —	4,7	Pluie fine; vent sud-ouest très-fort.	126,0	21,0
20 —	10,0	Pluie fine; vent sud.	126,0	21,0
21 —	12,5	Ciel couvert; vent sud-ouest.	126,5	21,1
22 —	6,7	Ciel nuageux, petite pluie; vent sud-ouest.	126,8	21,2
23 —	1,5	Ciel nuageux; vent ouest.	126,0	21,0
24 —	8,5	Pluie; vent sud	126,0	21,0
25 —	10,0	Ciel couvert; vent sud-ouest.	126,3	21,0
26 —	3,3	Ciel nuageux; vent est.	126,5	21,1
27 —	— 1,6	Gelée blanche; vent nord.	126,0	21,0
28 —	— 1,3	Neige; vent nord.	126,0	21,0
1 déc.	— 4,1	Brouillard; vent nord-nord-est.	126,5	21,1
3 —	— 2,8	Ciel nuageux; vapeurs; vent est	126,0	21,0
5 —	4,2	Pluie; vent sud.	125,5	20,9
7 —	3,1	Brouillard épais.	126,0	21,0
19 —	9,6	Pluie; vent sud-sud-ouest.	126,0	21,0
13 —	— 2,2	Ciel couvert; vent nord-est.	126,0	21,0
23 —	1,0	Verglas, brouillard épais; vent sud-est.	126,0	21,0

Louis-Joseph Gay-Lussac



« au milieu du parterre du Théâtre français [Comédie française], ... après la fin du spectacle, à peine troublé l'eau de chaux; ... l'air du parterre en a indiqué 20,2 »

Spectrophotomètre de John Tyndall dont le tube est rempli de différents mélanges de gaz à des pressions variables.



in J. Tyndall, Heat a mode of motion, 1863



On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground, *Phil. Mag.* 1896

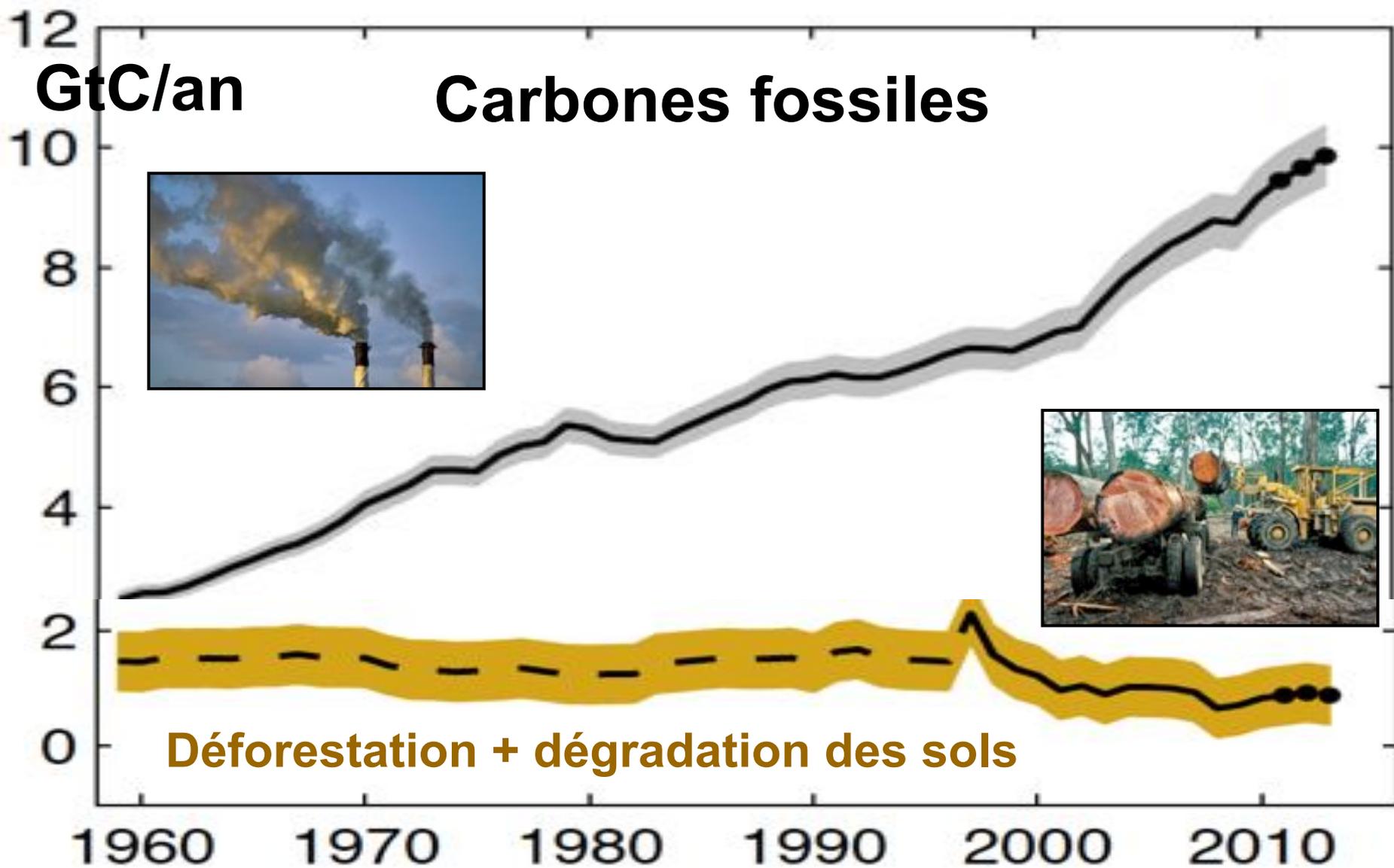
Premier à envisager une augmentation de la température due à l'utilisation des combustibles fossiles par l'homme.

Svante Arrhenius

Arrhenius calcule qu'un doublement du CO₂ atmosphérique se traduirait par un réchauffement climatique d'environ 5 à 6°C (encore compatible avec les compilations du GIEC)

« our descendants, albeit after many generations, might live under a milder sky and in less barren natural surroundings than is our lot at present »

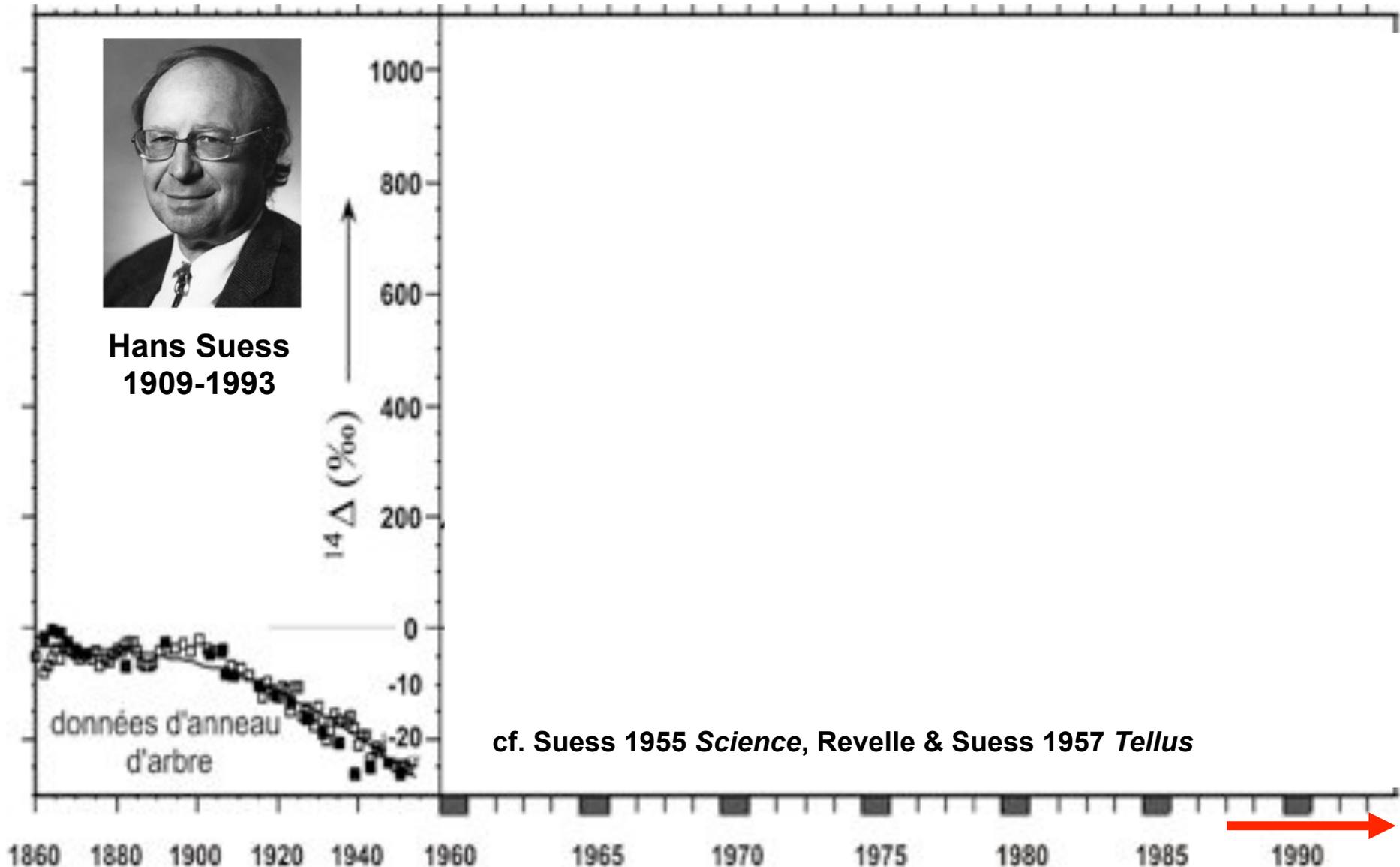
Emissions globales de CO₂ anthropique



Perturbations anthropiques de l'équilibre naturel du rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ du CO_2 atmosphérique



Hans Suess
1909-1993



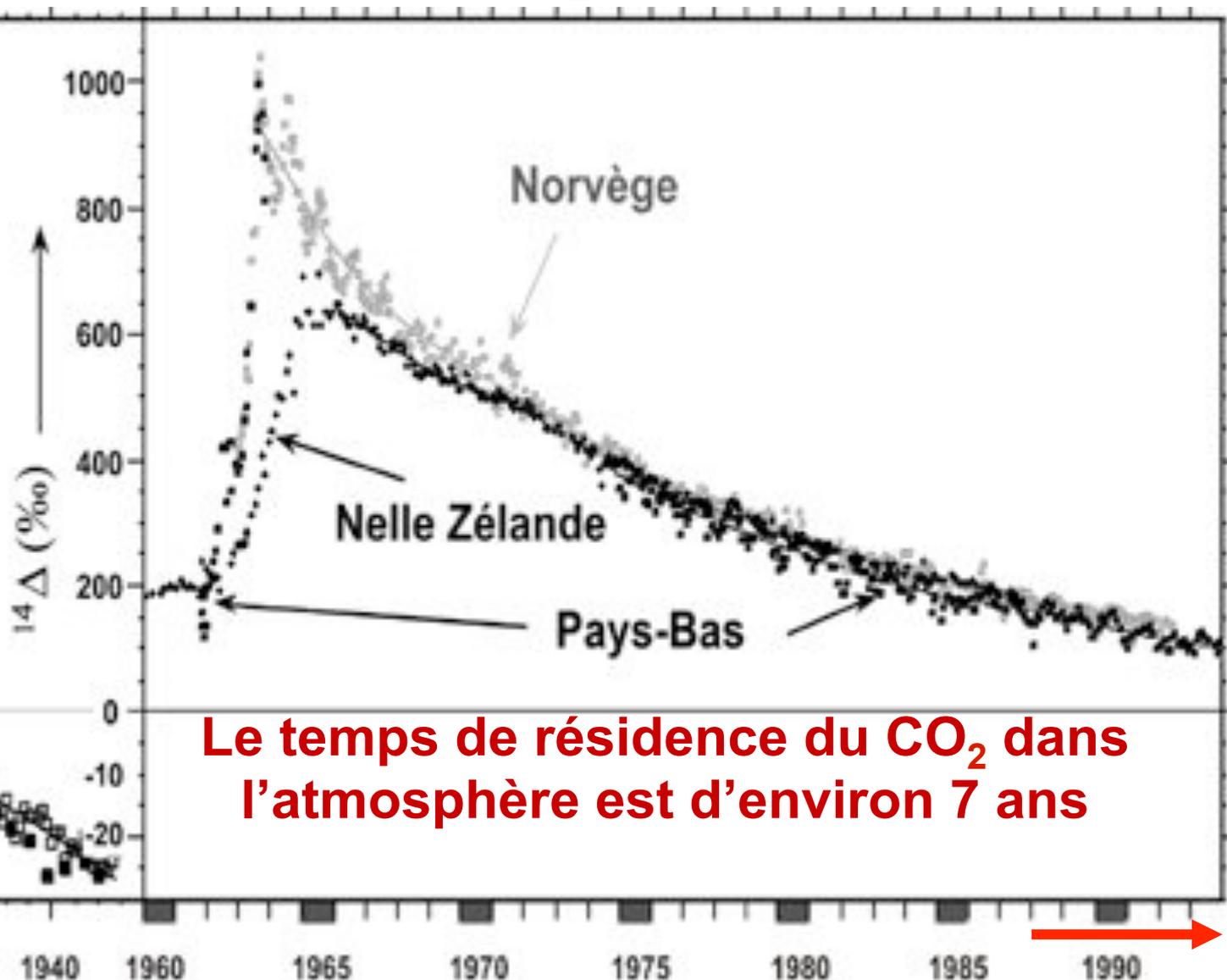
données d'anneau
d'arbre

cf. Suess 1955 *Science*, Revelle & Suess 1957 *Tellus*

Perturbations anthropiques de l'équilibre naturel du rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ du CO_2 atmosphérique

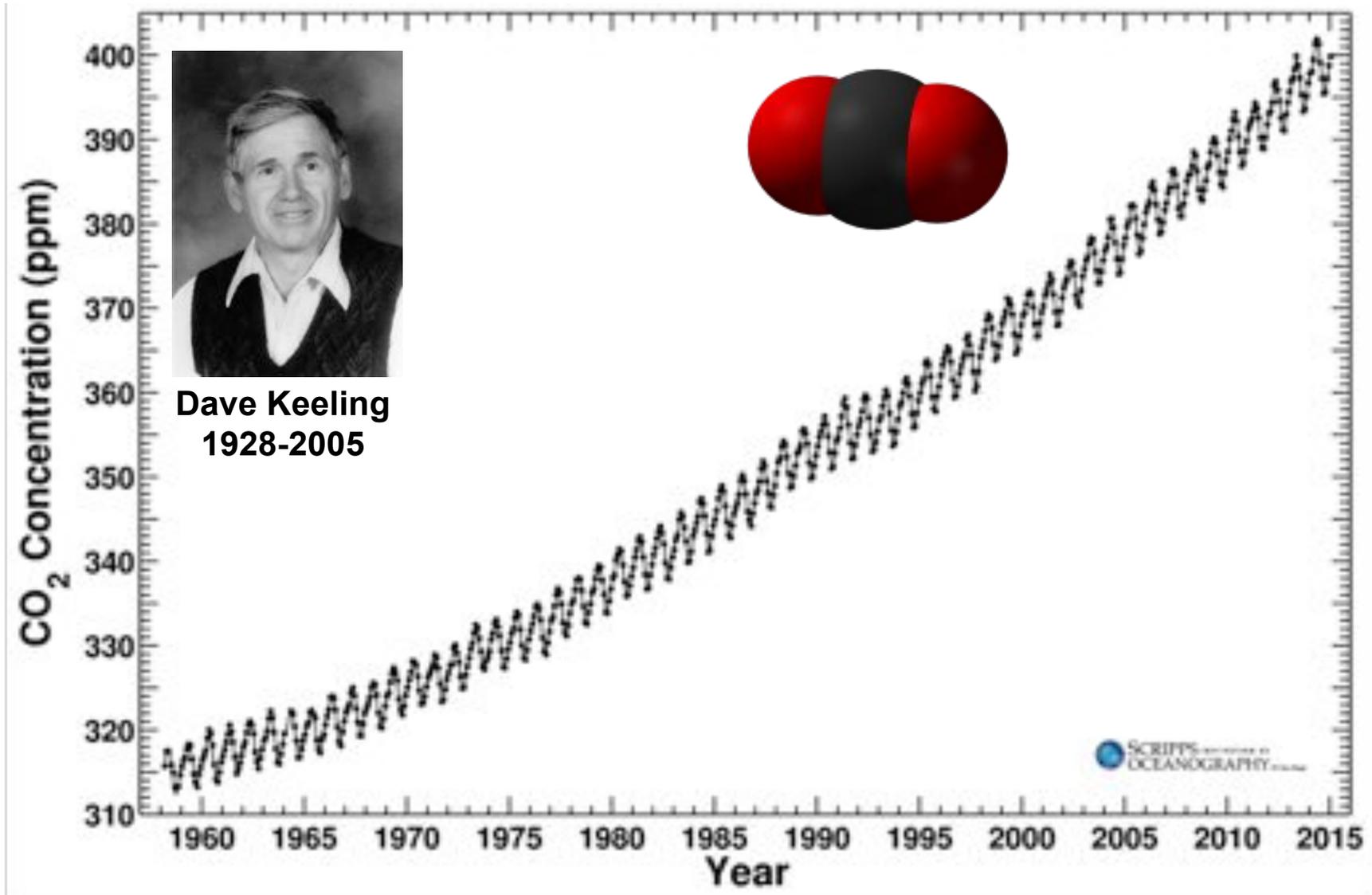


Hans Suess
1909-1993



Le temps de résidence du CO_2 dans l'atmosphère est d'environ 7 ans

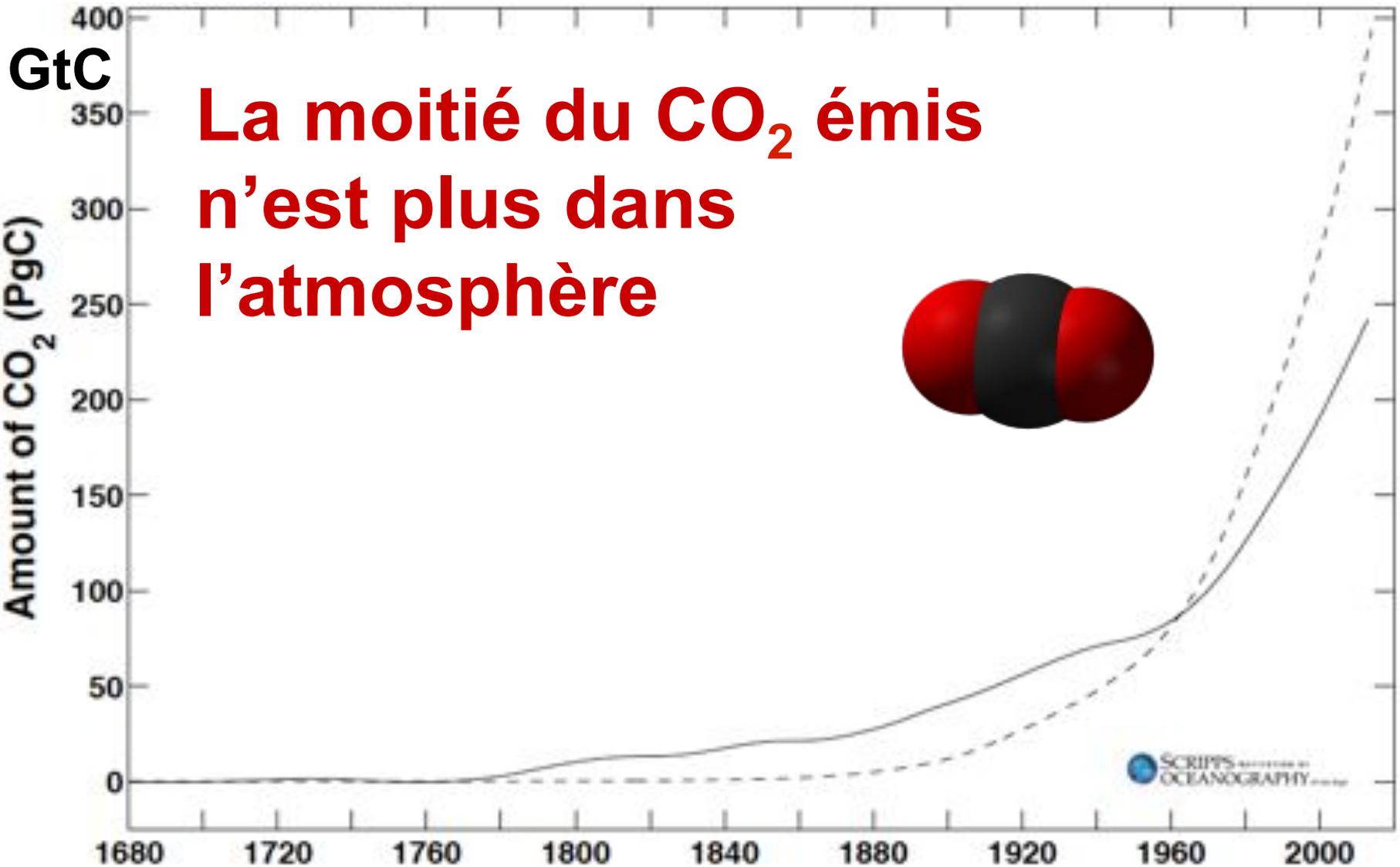
La pression partielle de CO₂ atmosphérique à Mauna Loa (Hawaï), ≈ 90 ppm en 60 ans



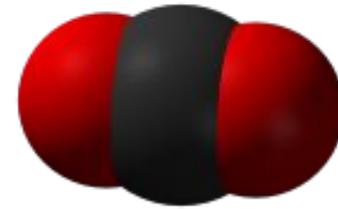
cf. Keeling 1960 *Tellus*, Pales & Keeling 1965 *JGR*



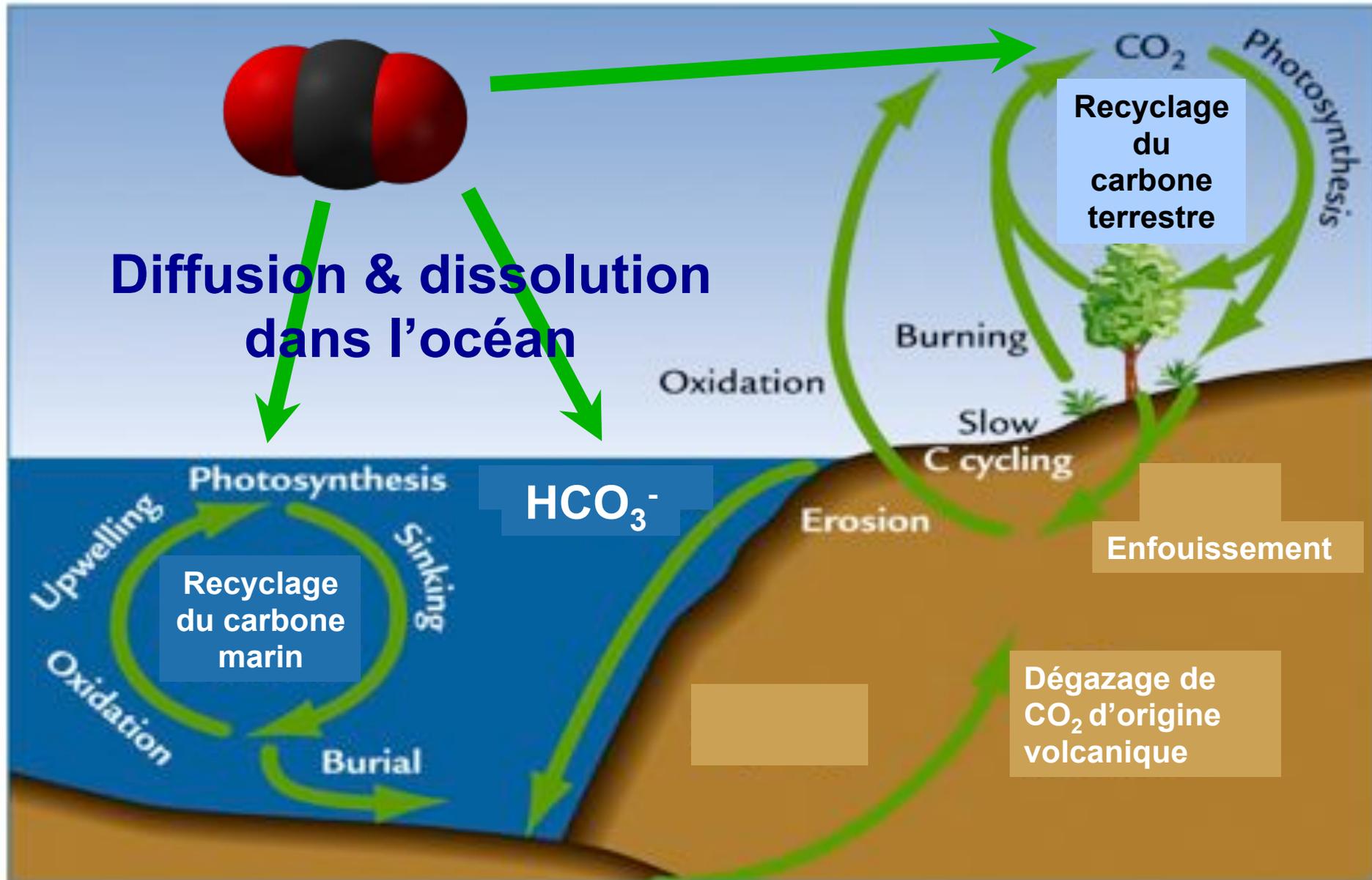
Cumul des émissions de combustibles fossiles comparé à la pCO₂ atmosphérique



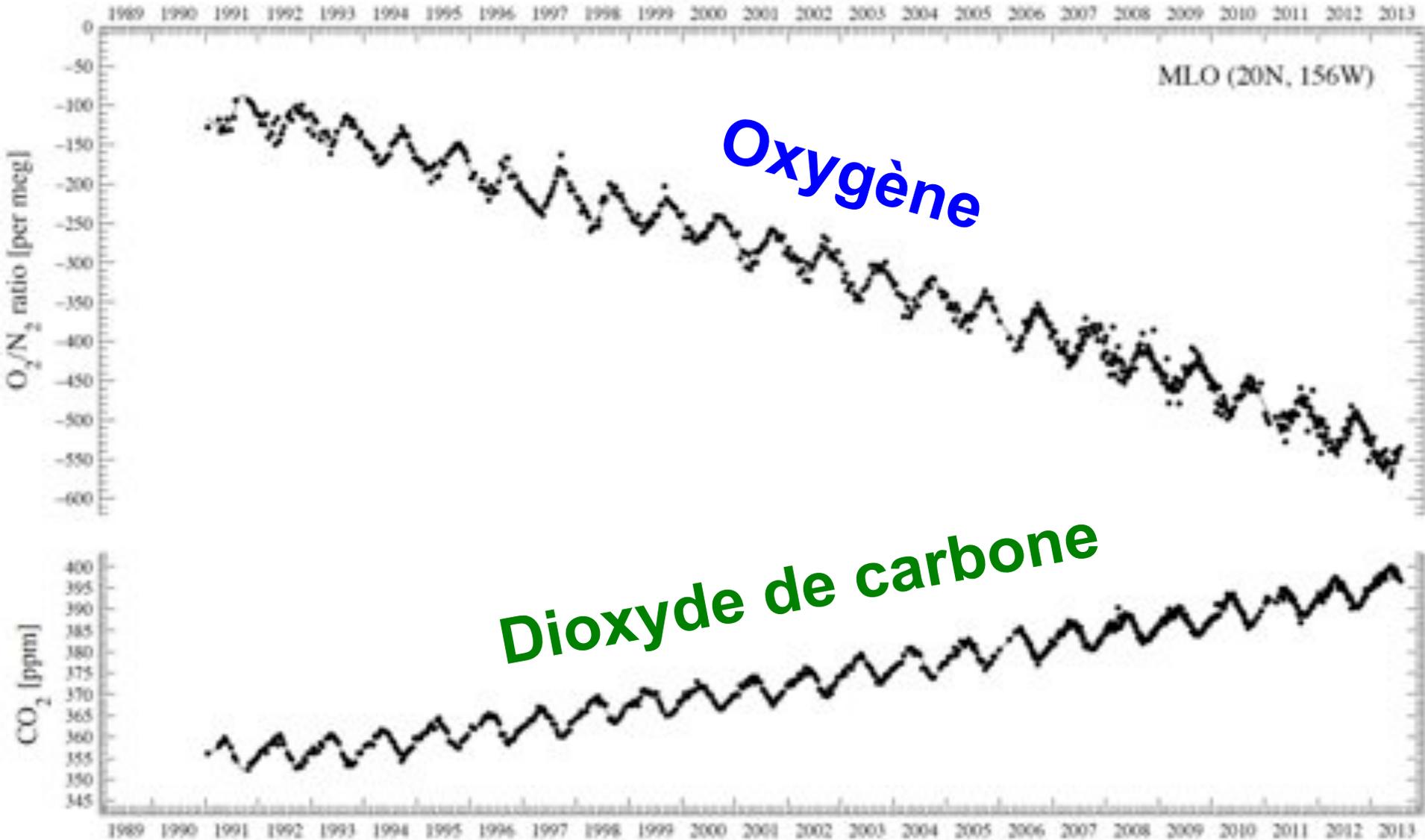
**La moitié du CO₂ émis
n'est plus dans
l'atmosphère**



Les molécules de gaz carbonique en excès diffusent vers les autres réservoirs du cycle du carbone

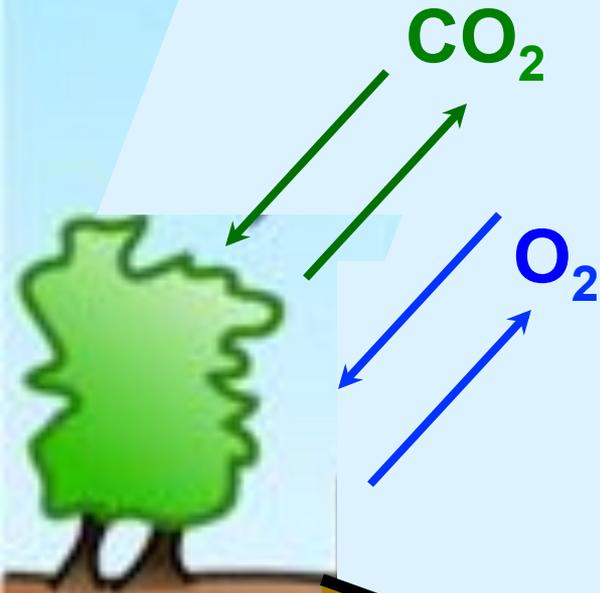


Estimation des pompes de carbone à partir des teneurs O_2 et CO_2



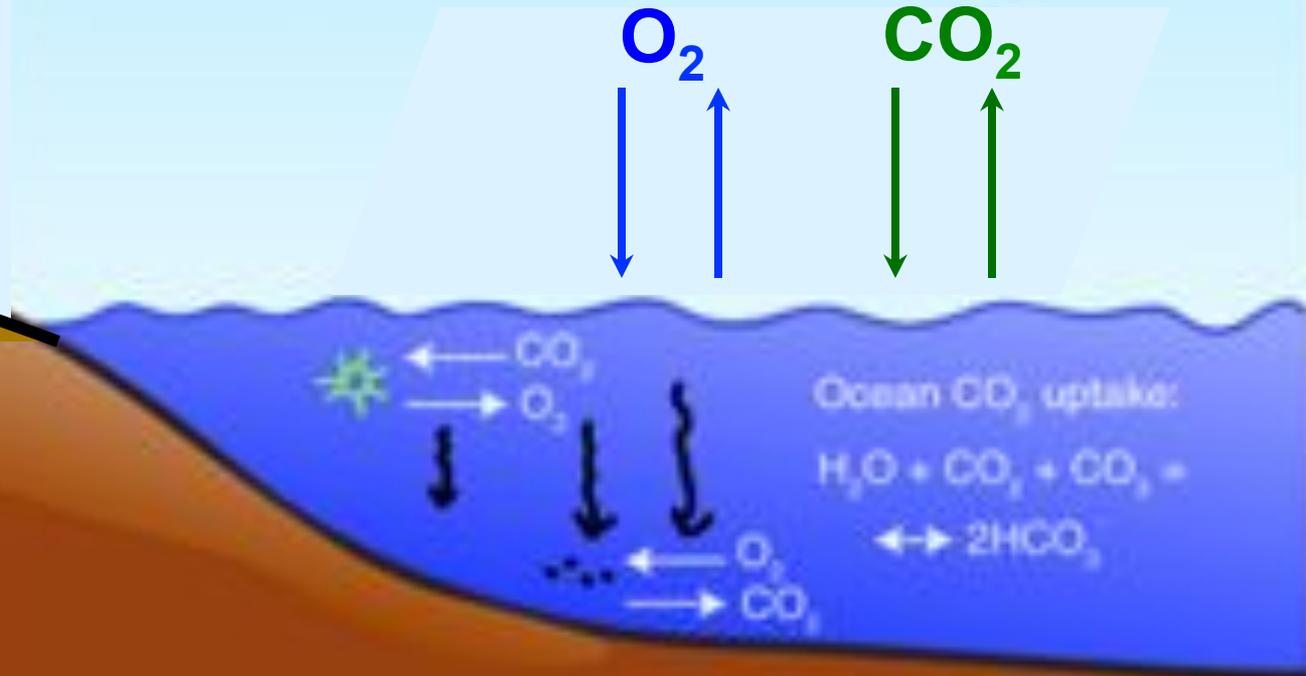
Source: Scripps CO_2 et O_2 programs

Etat stationnaire Préanthropique

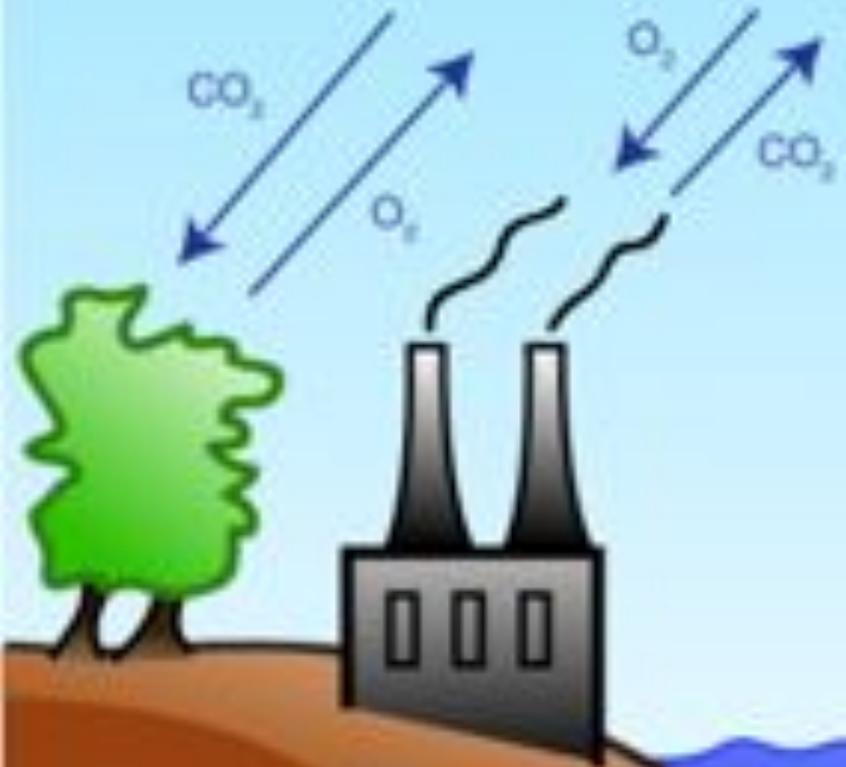


Biosphère + Sols

Les flux bruts
s'équilibrent à long
terme conduisant à des
concentrations stables
en CO_2 et O_2

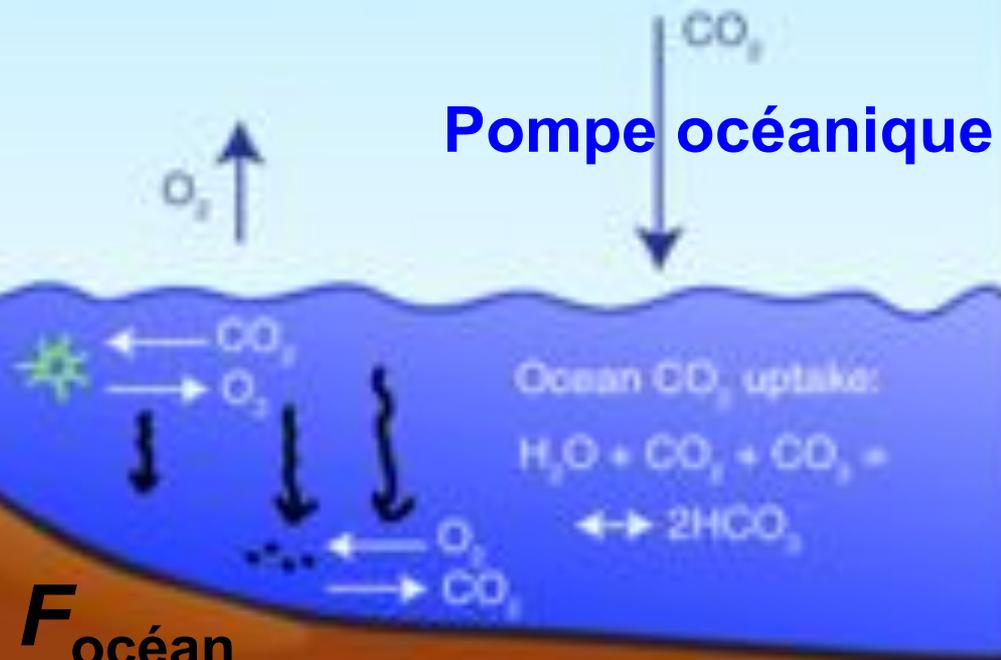


Pompe biosphérique



Les deux pompes diffèrent par leurs influences sur CO_2 et O_2
=> système de deux équations à 2 inconnues

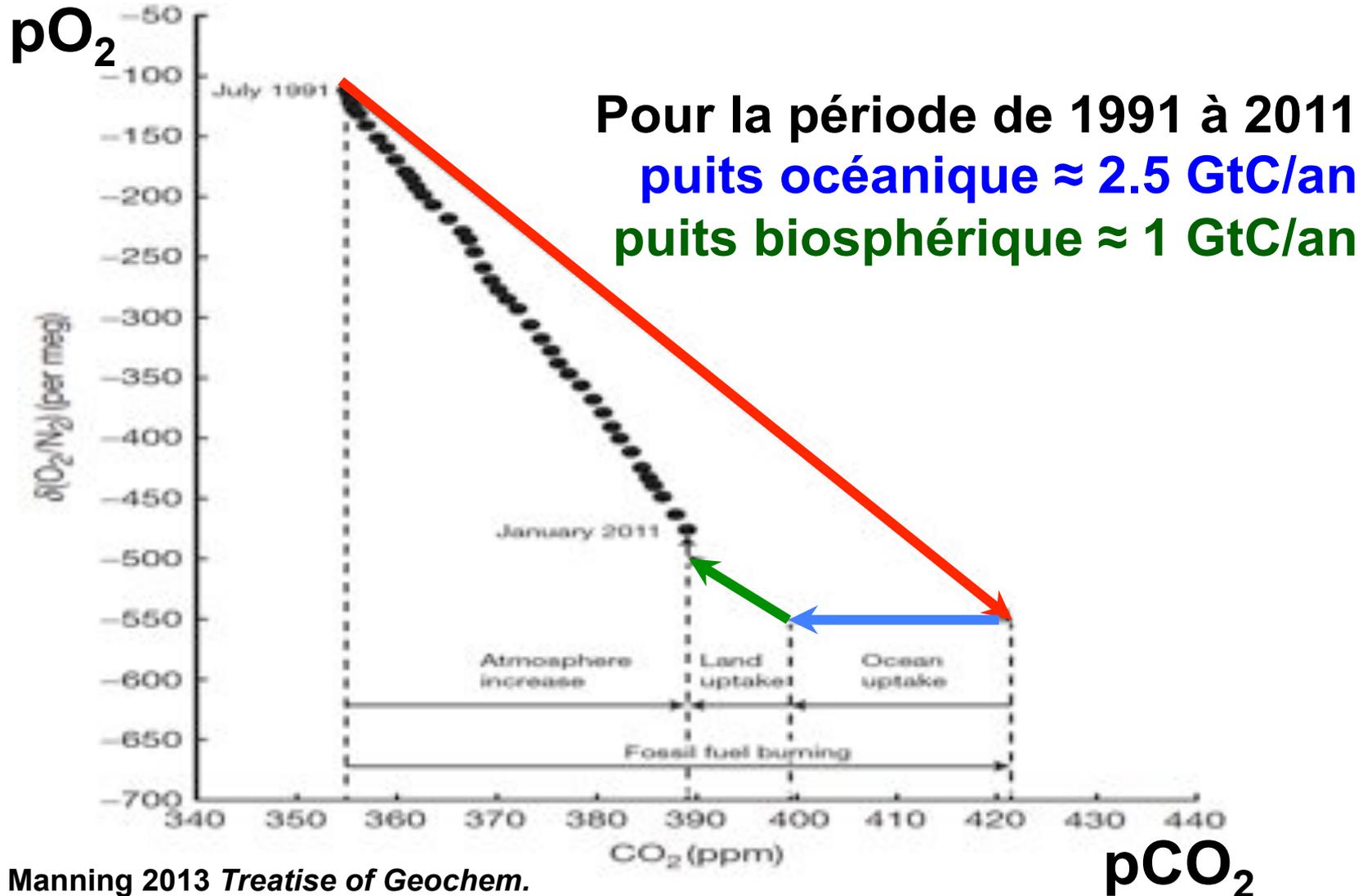
Pompe océanique



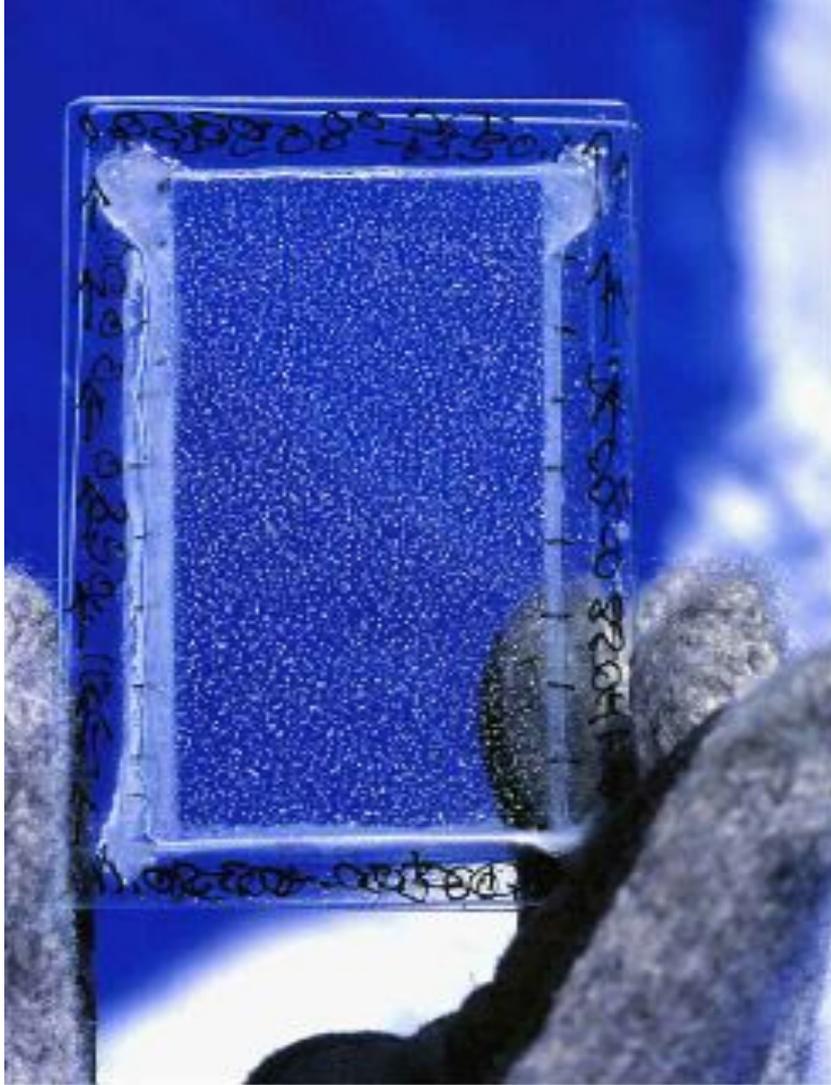
$$d\text{O}_2/dt = -F_{\text{fuel}} + F_{\text{bio}}$$

$$d\text{CO}_2/dt = F_{\text{fuel}} - F_{\text{bio}} - F_{\text{océan}}$$

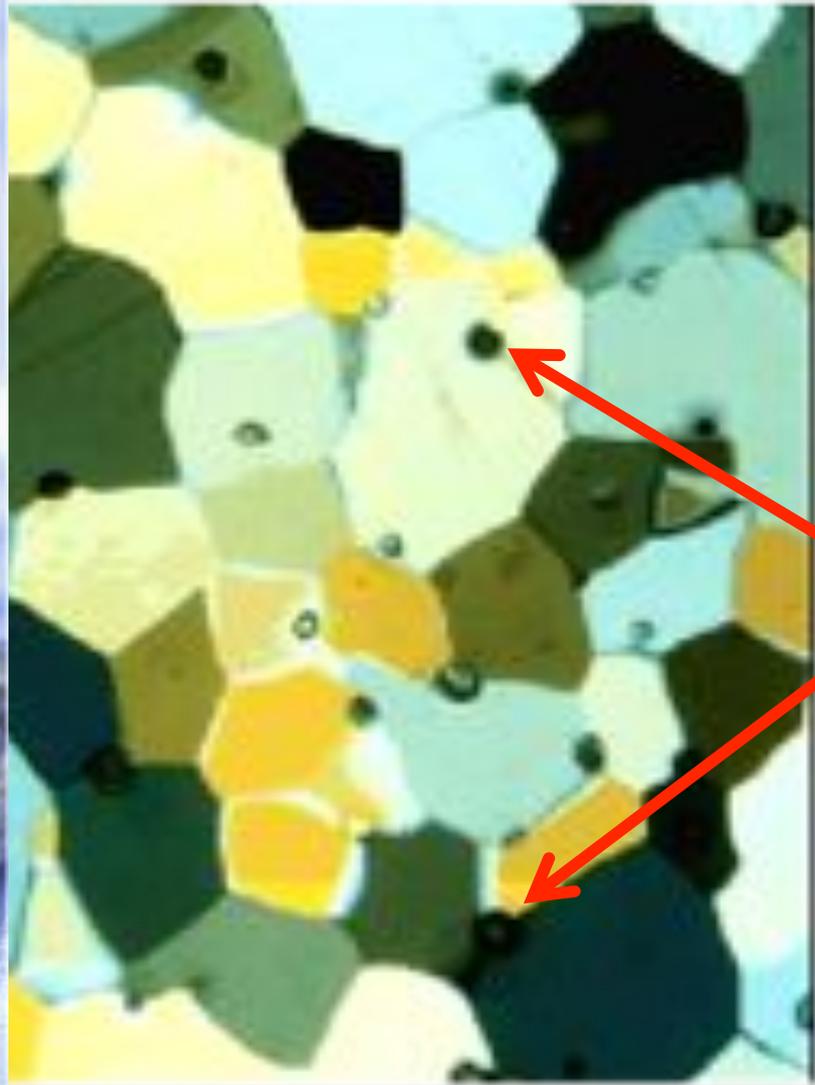
Représentation et résolution graphique du système de deux équations à deux inconnues: pompes océanique et biosphérique



Remonter dans le temps pour mettre en perspective l'augmentation récente de la $p\text{CO}_2$



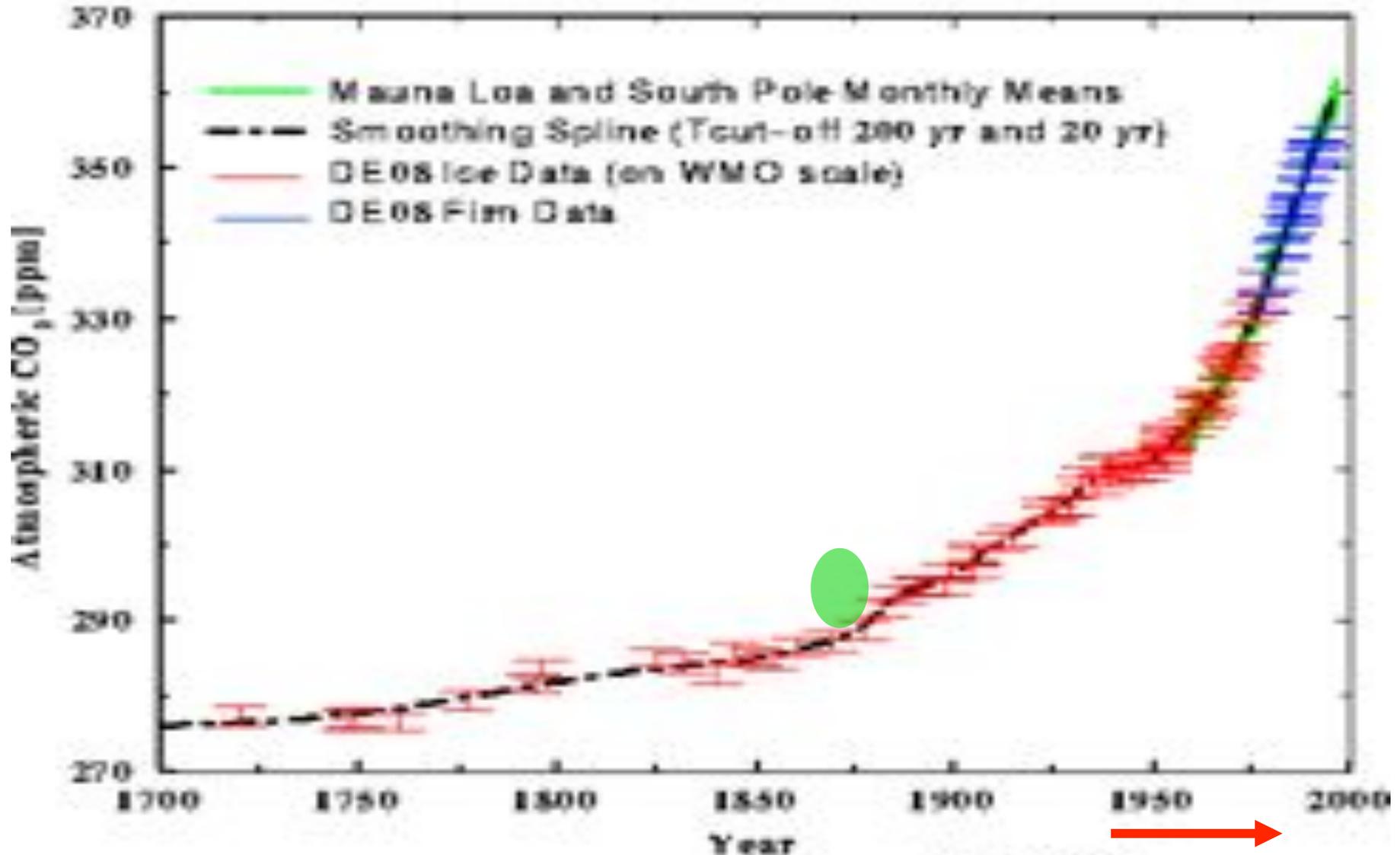
Source: LGGE-CNRS



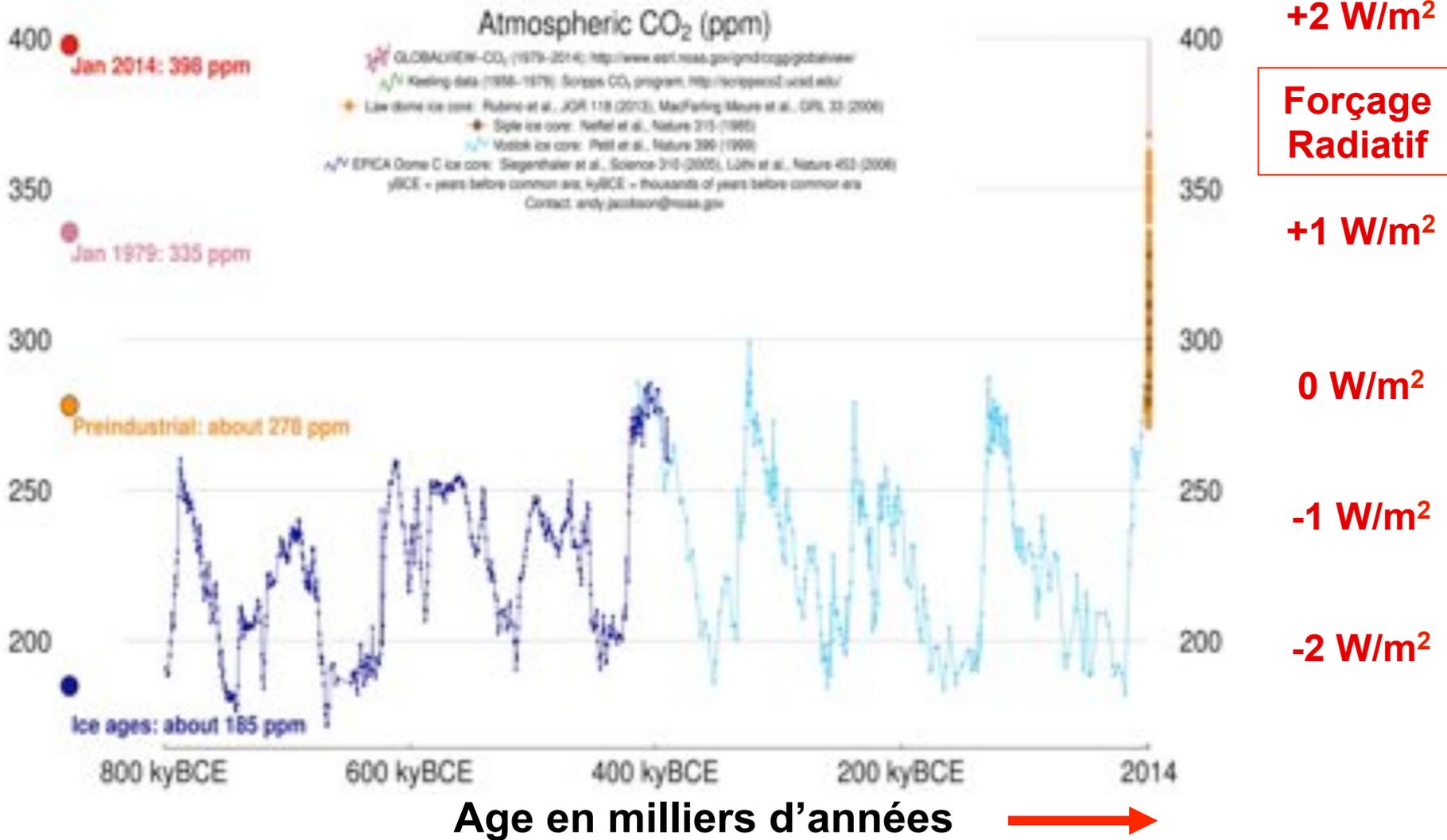
Bulles d'air

Glace en lumière polarisée (~2 x 3,5 cm)

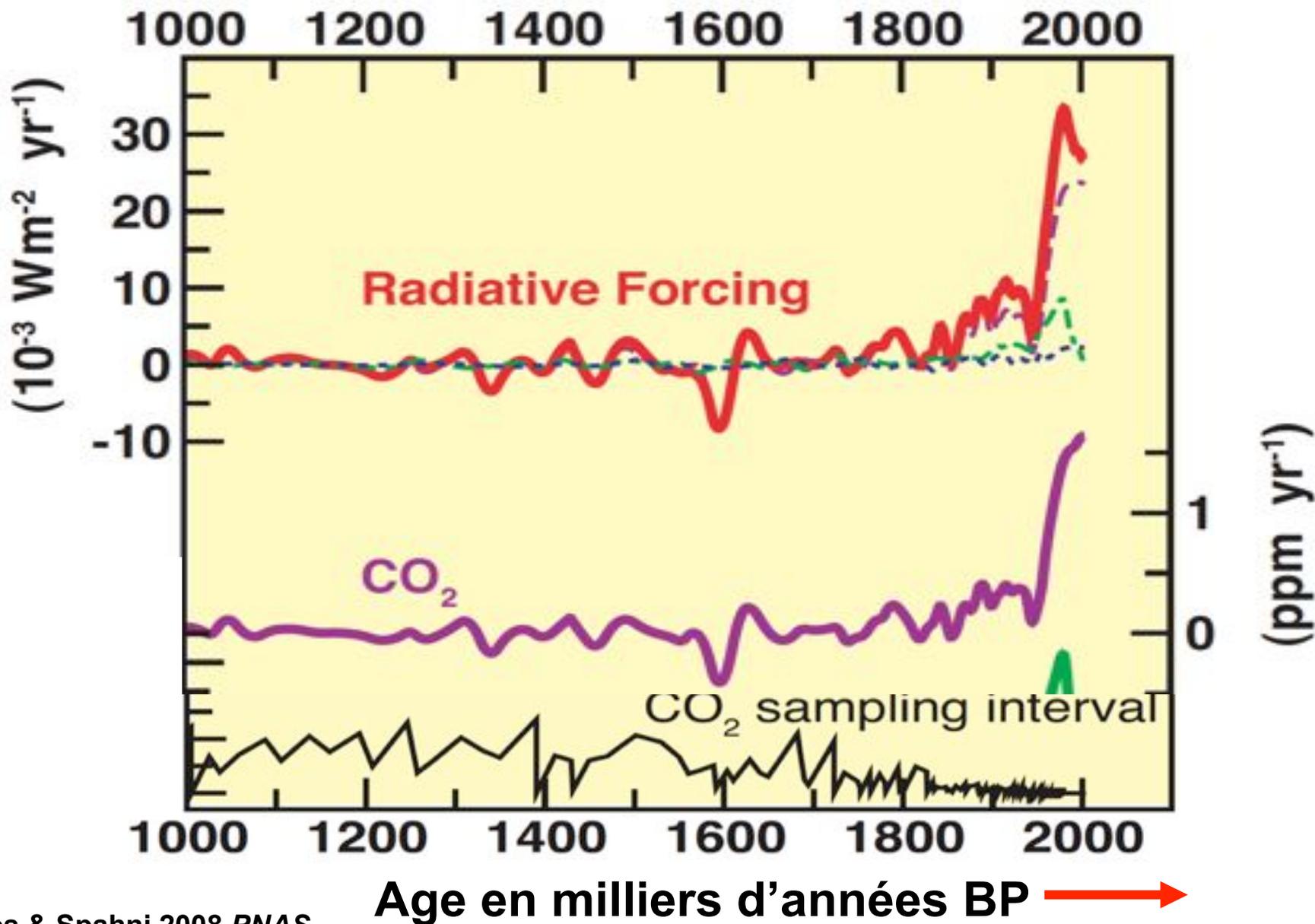
Enregistrement du CO₂ à Law Dome en Antarctique (névé et glace)



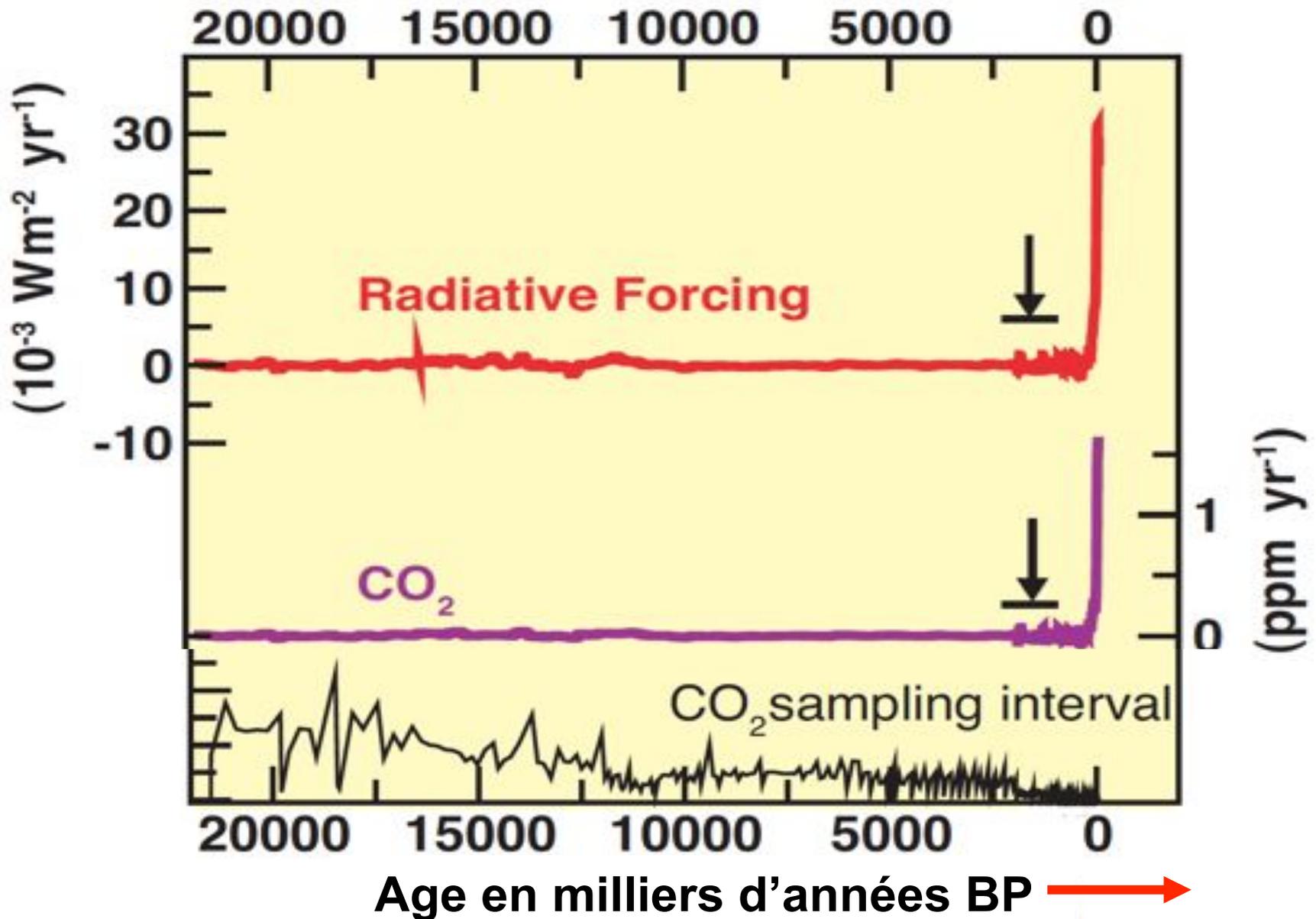
Perspective longue sur la pCO₂ atmosphérique reconstituée avec les bulles d'air occlus dans les glaces de l'Antarctique



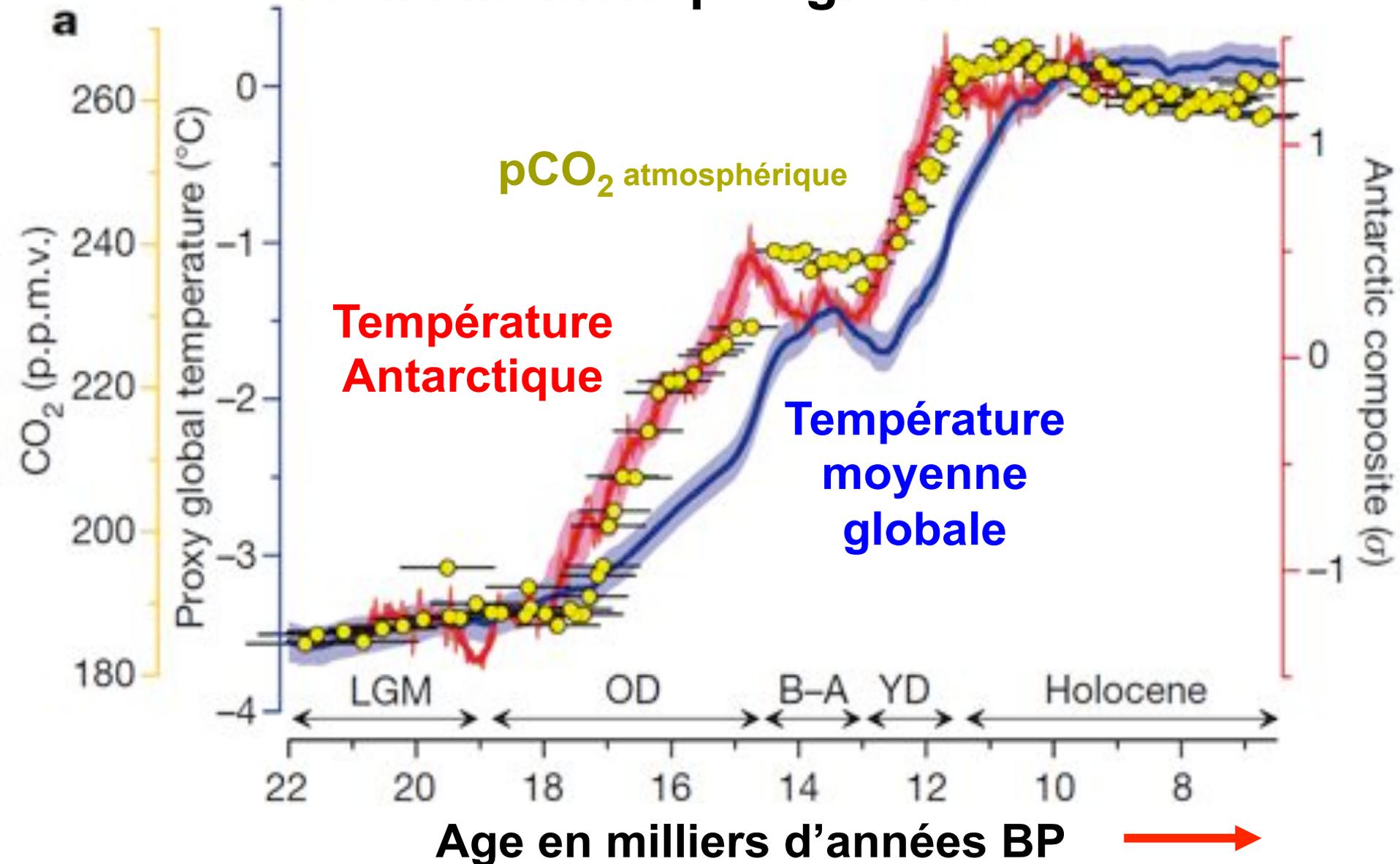
Taux de variation du forçage du CO₂



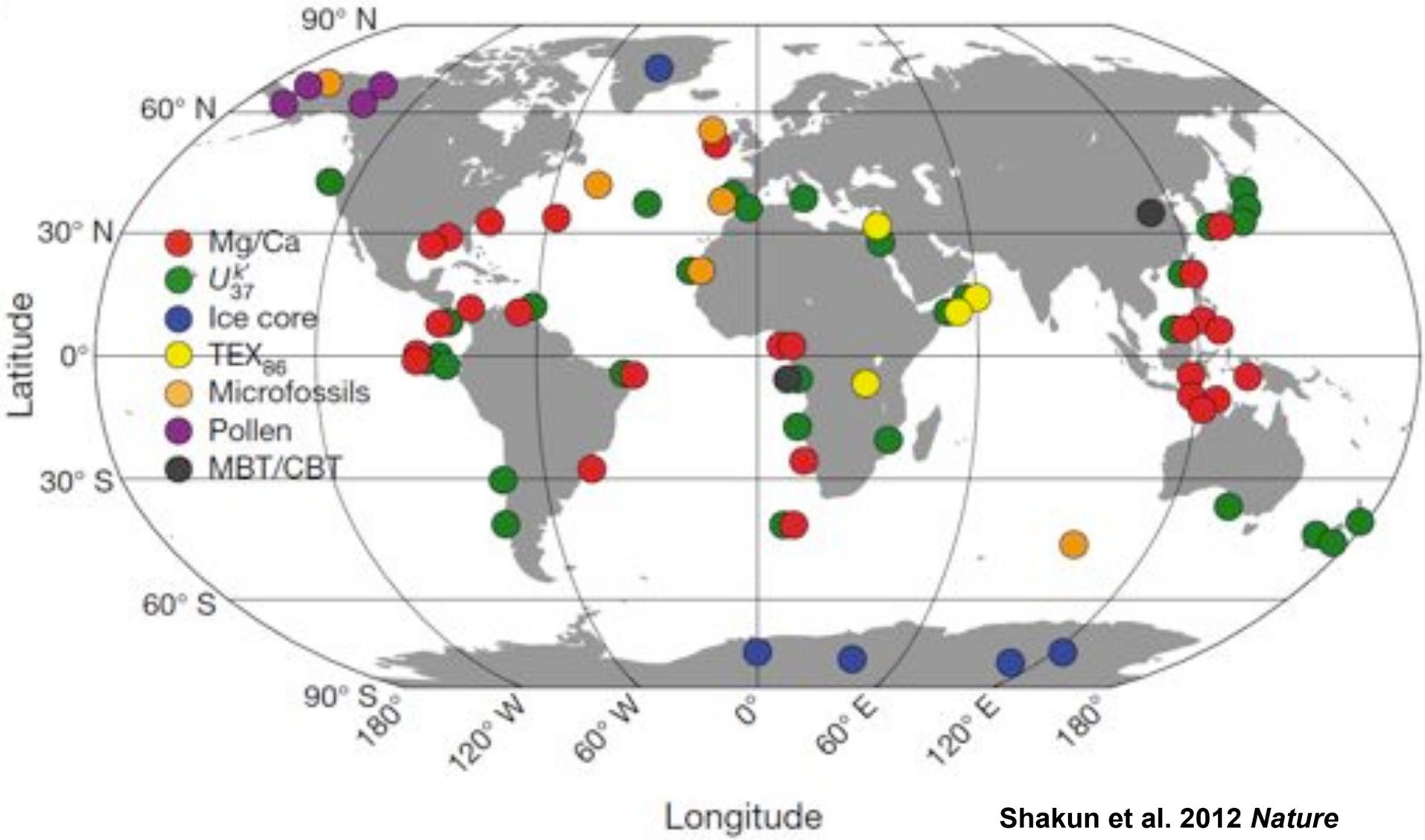
Taux de variation du forçage du CO₂



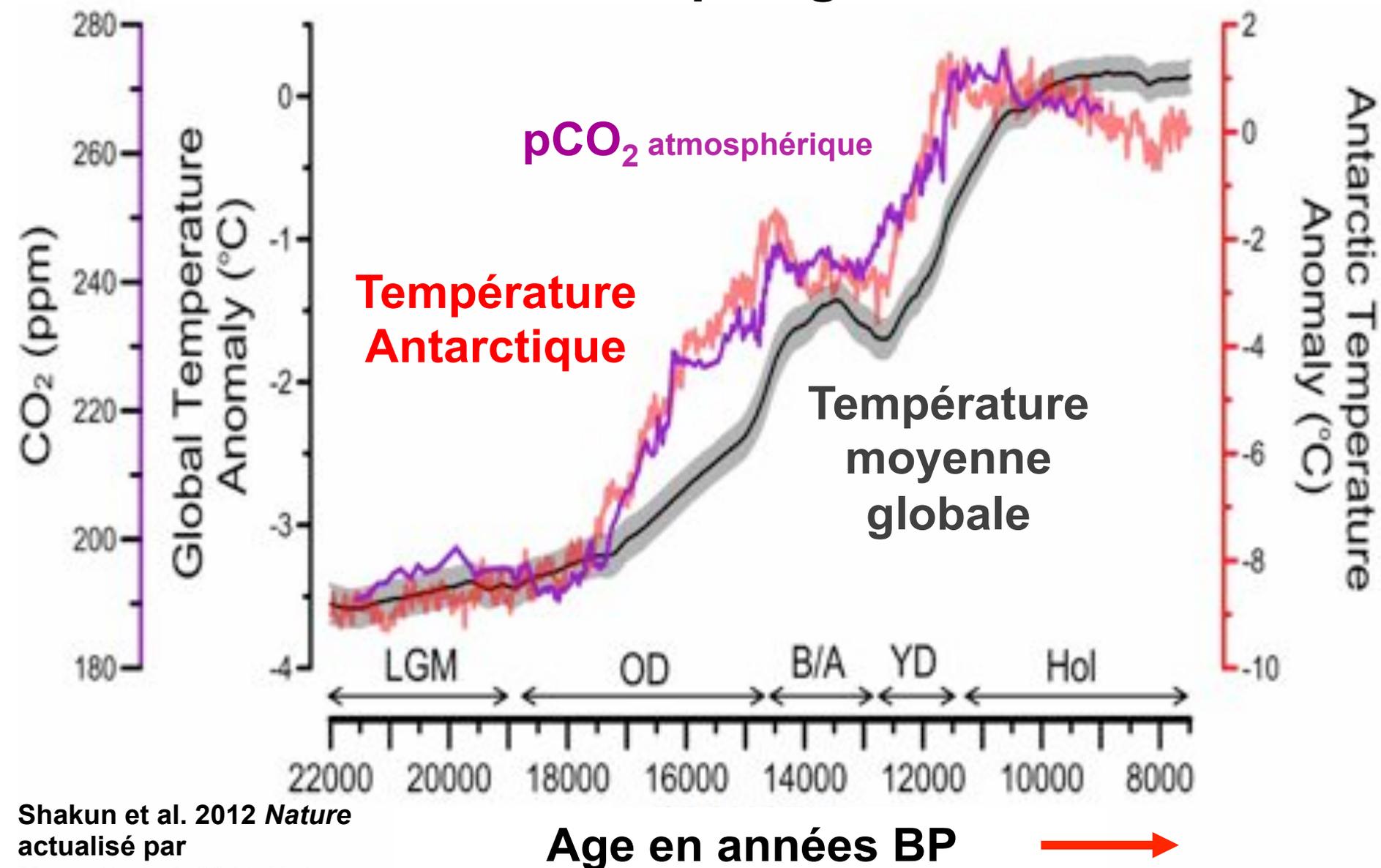
Augmentation de la pCO₂ atmosphérique et réchauffement postglaciaire



Compilation de 80 séries de paléotempérature pour la dernière déglaciation (21-6 ka BP)

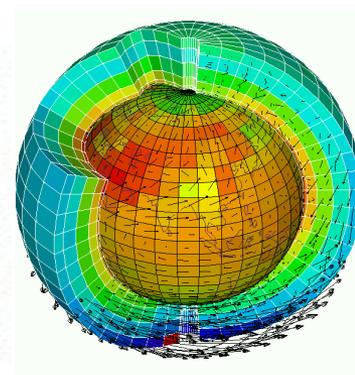
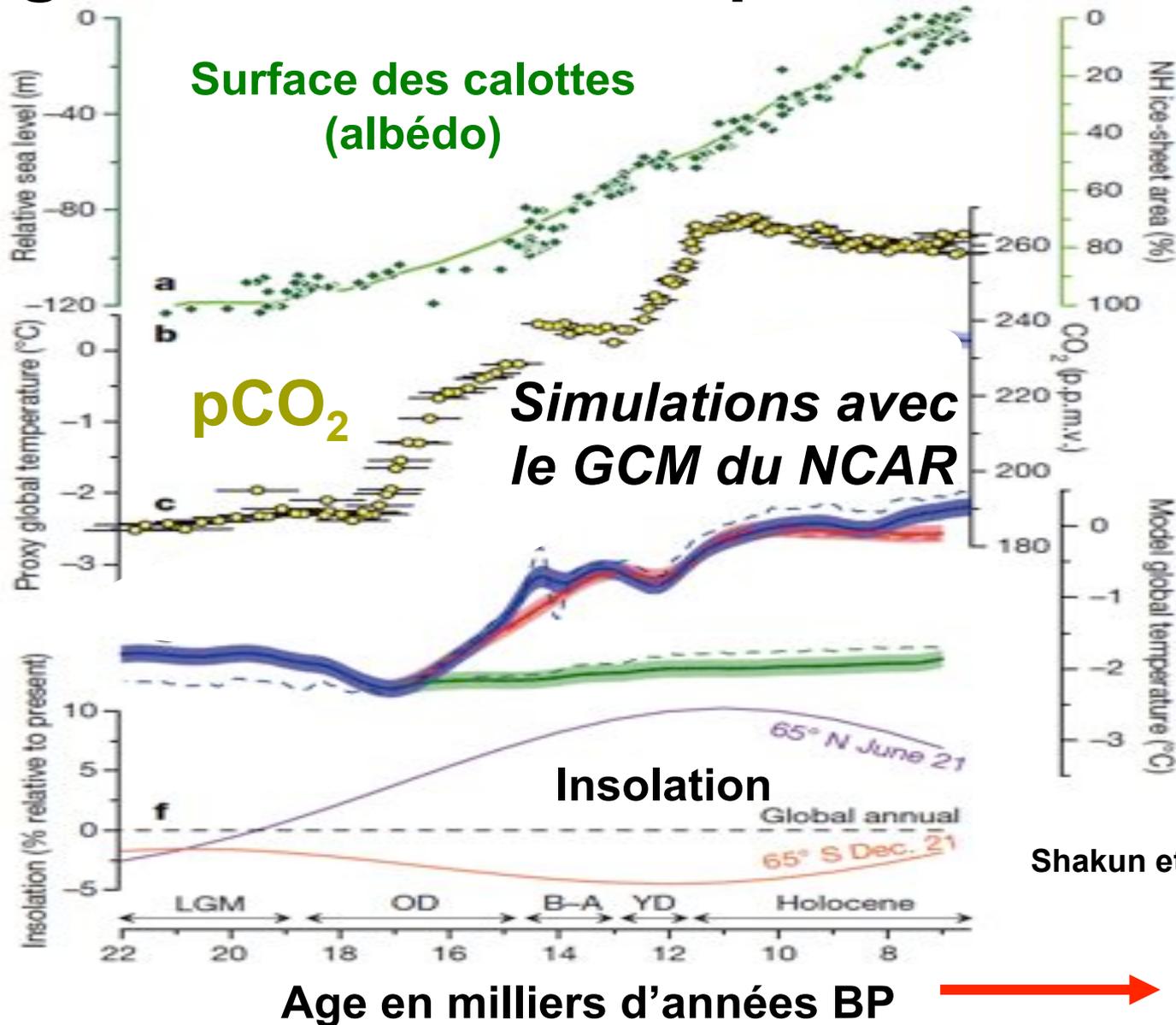


Augmentation de la pCO₂ atmosphérique et réchauffement postglaciaire



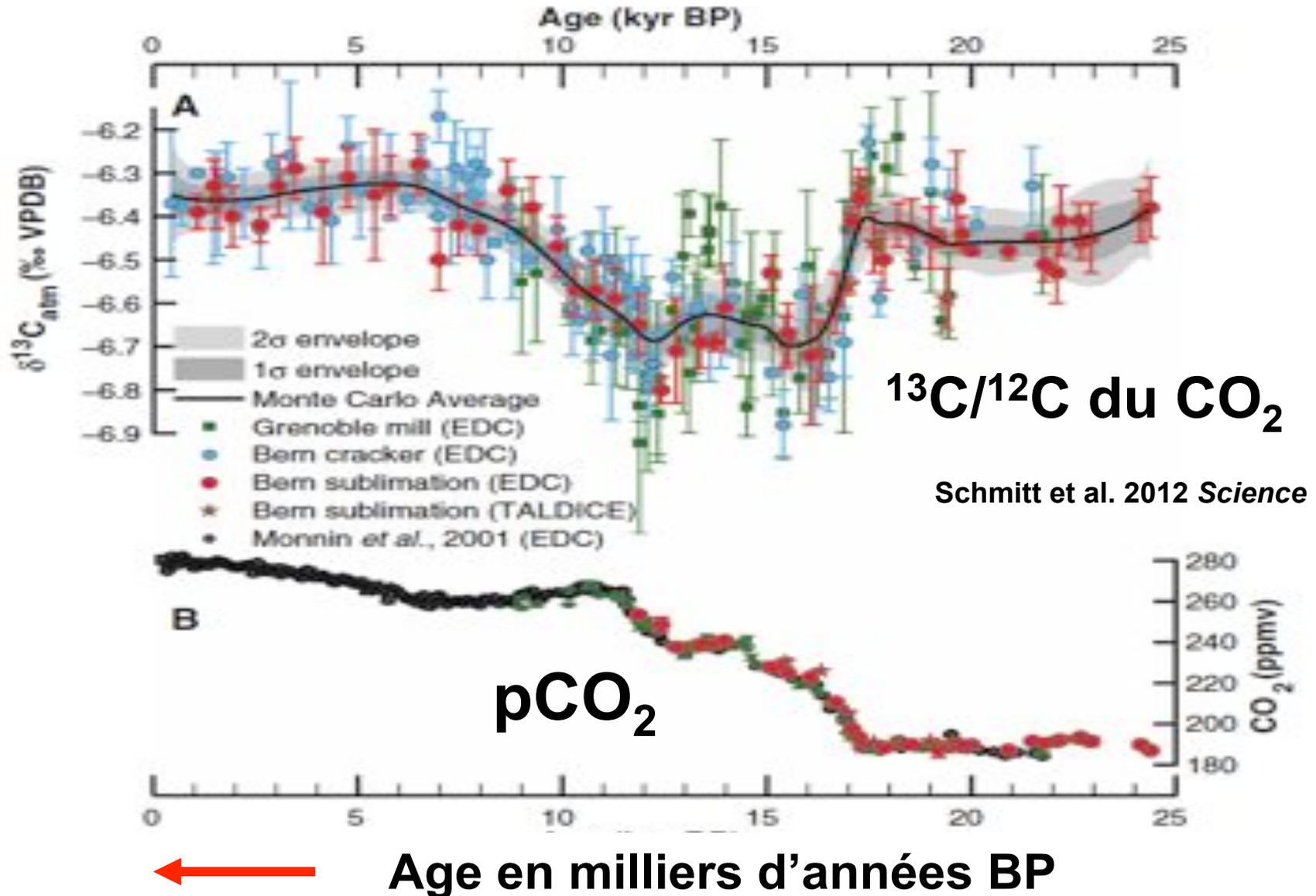
Shakun et al. 2012 *Nature*
actualisé par
Marcott et al. 2014 *Nature*

Modélisation numérique (AO-GCM) de la déglaciation comme réponse aux forçages

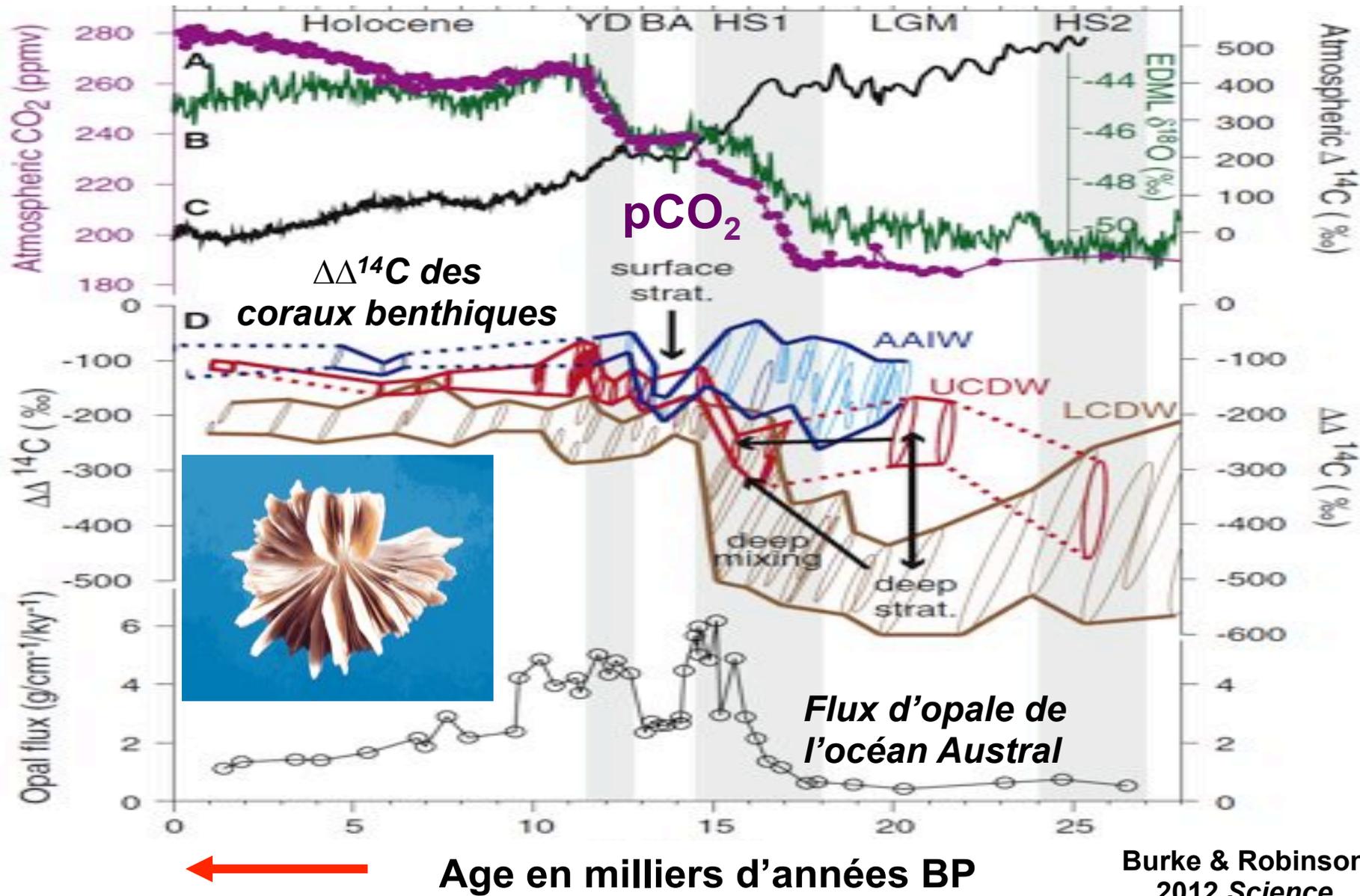


Shakun et al. 2012 *Nature*

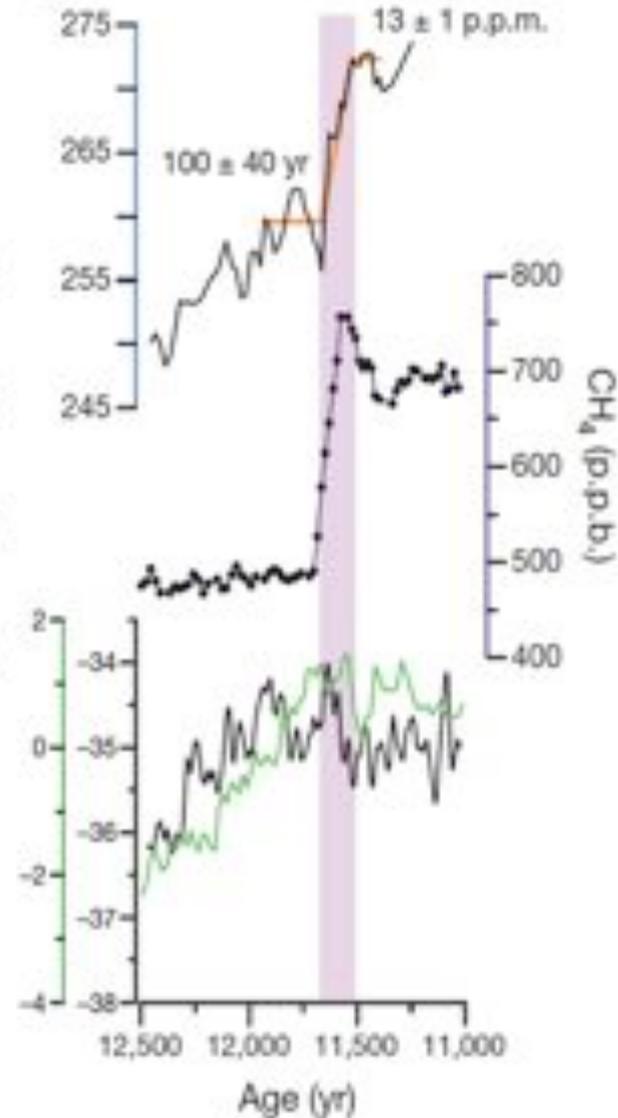
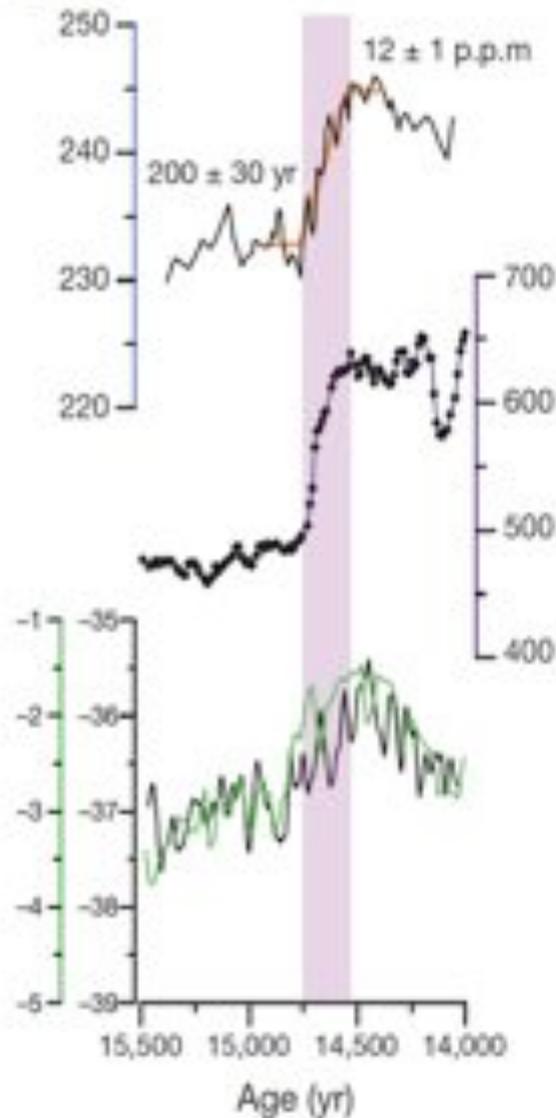
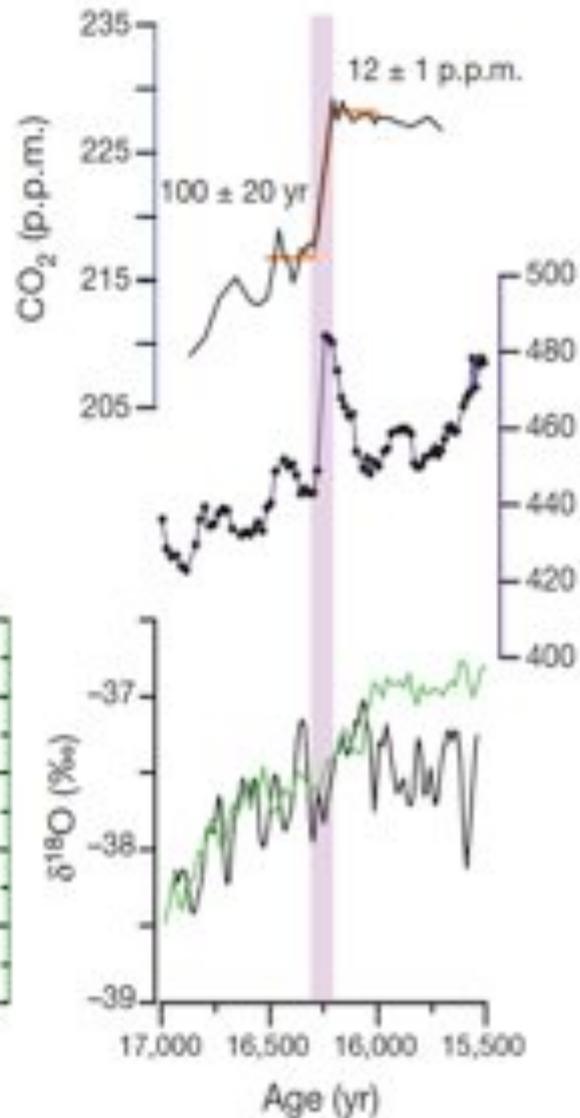
La signature isotopique du CO₂ (¹³C/¹²C & ¹⁴C/¹²C) est compatible avec un dégazage océanique



L'Océan Austral est la source principale de CO₂ au début de la déglaciation



Trois variations abruptes de la pCO₂ (≈ 0,1 ppm/an) superposées à l'augmentation postglaciaire

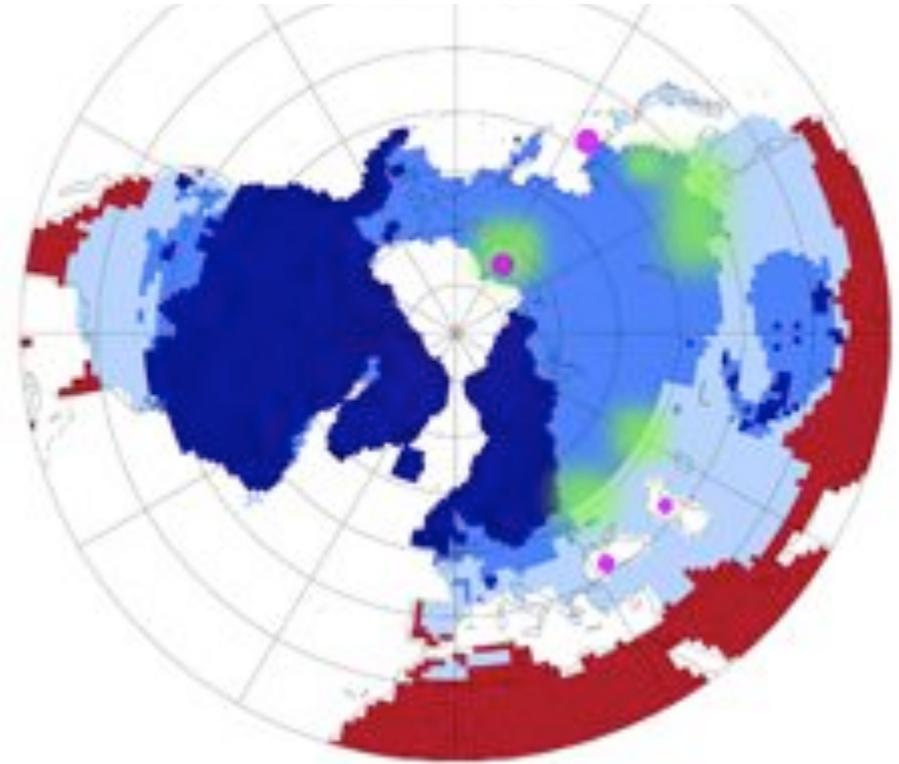


Les rapports $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ et $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ atmosphériques seraient compatibles avec une fonte du pergélisol

© M. Allard U Laval



© E. Pike

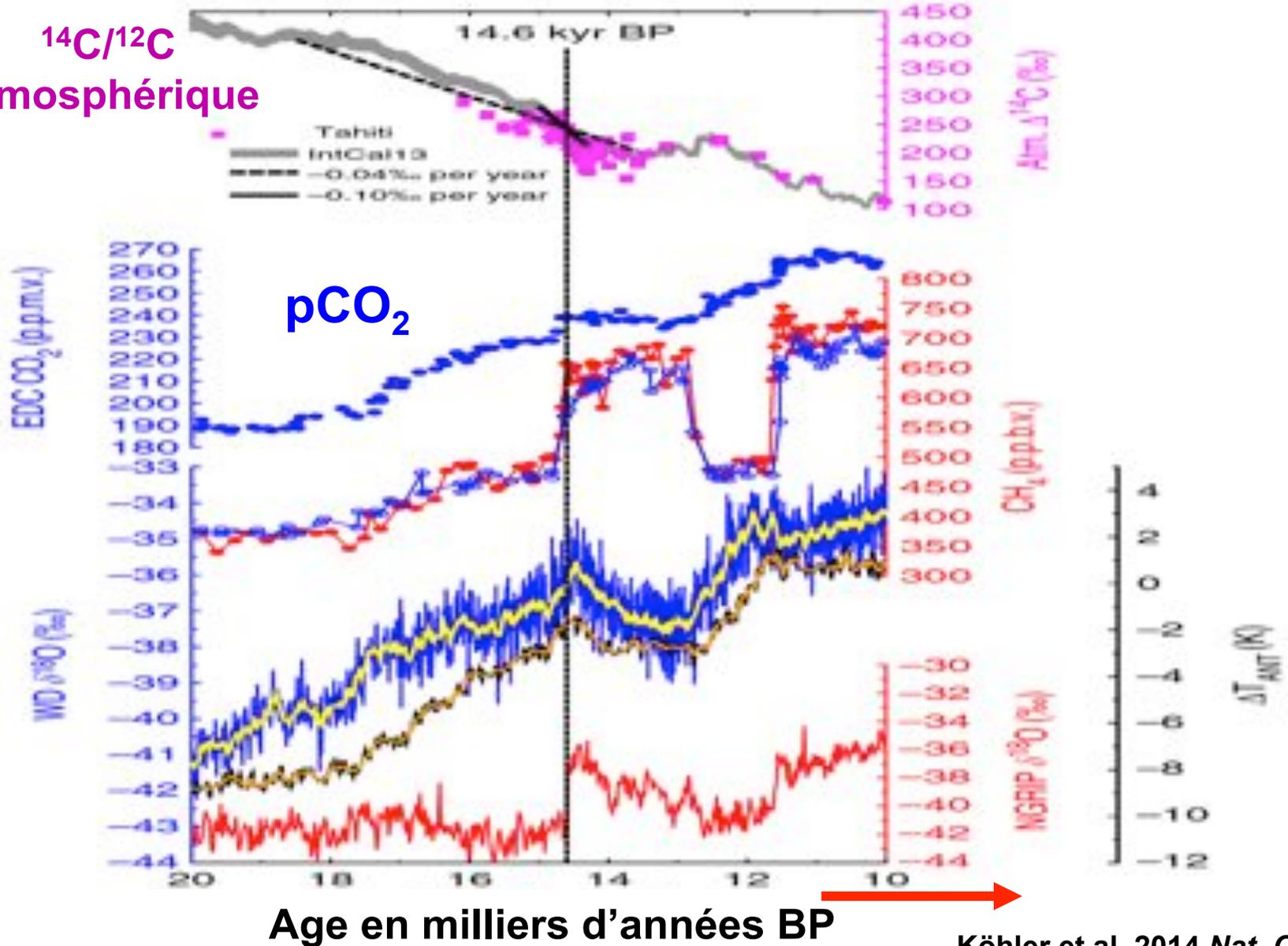


Calotte de glace, pergélisol et sols gelés saisonnièrement pendant la dernière glaciation (simulations GCMs PMIP3)

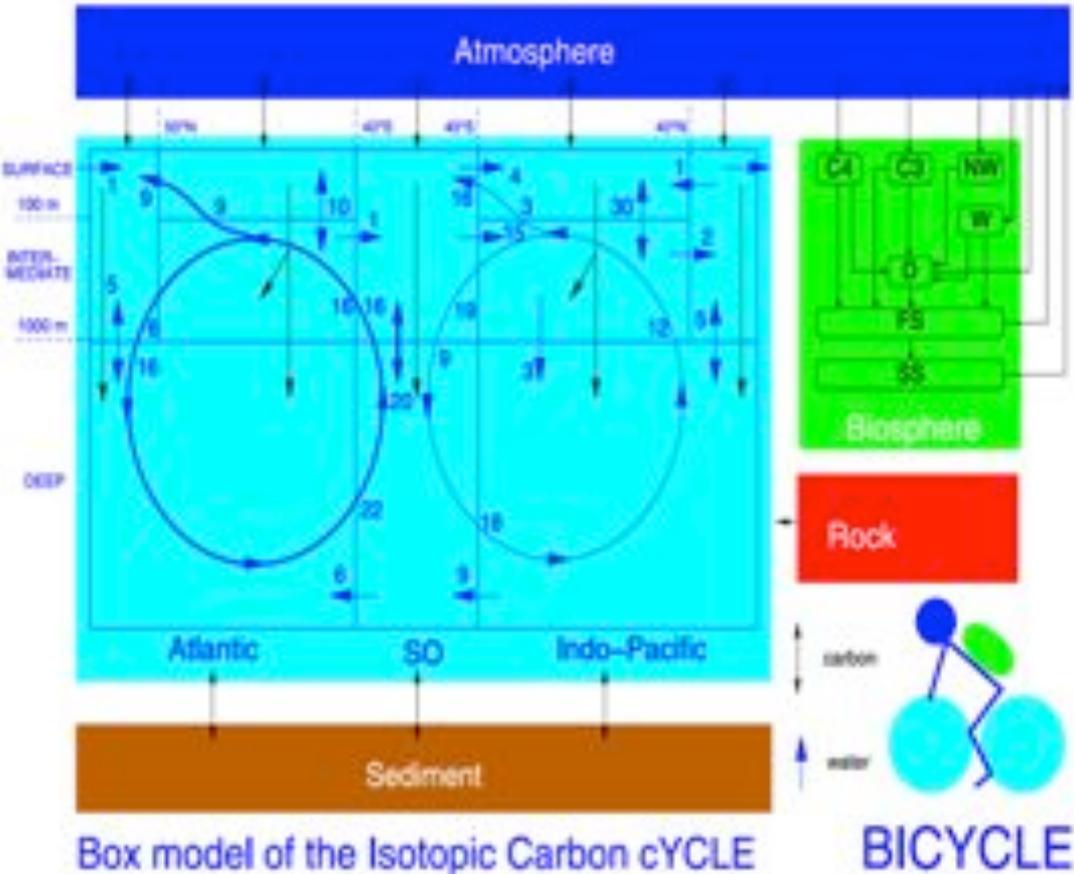
Köhler et al. 2014 *Nat. Comm.*

L'augmentation de $p\text{CO}_2$ à 14.7 ka correspond à une diminution transitoire du $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ atmosphérique

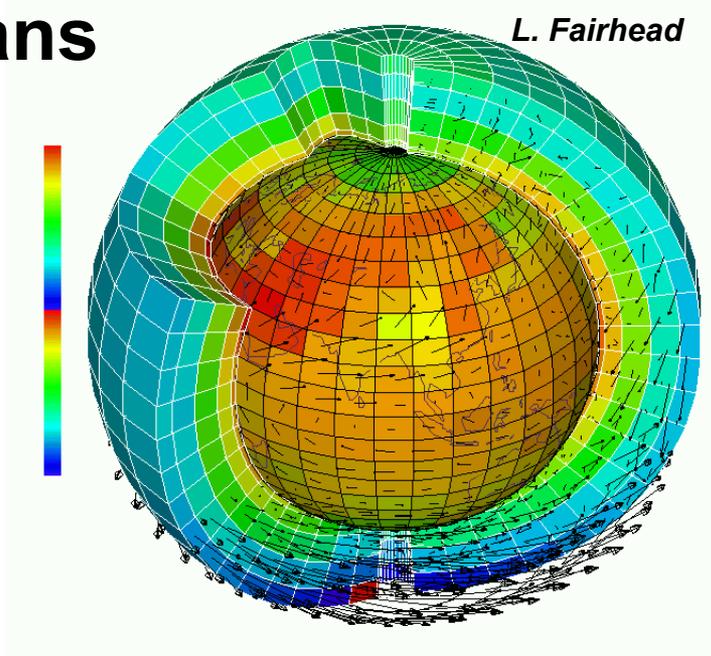
$^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$
atmosphérique



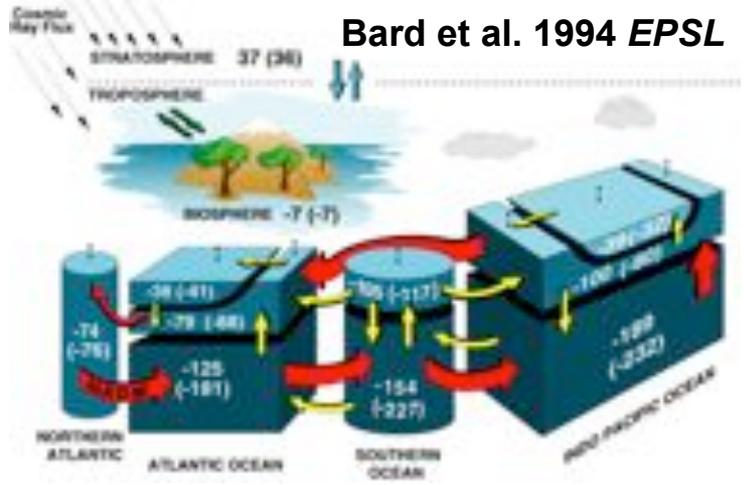
Des modèles numériques pour simuler l'impact sur le cycle du carbone et sur le climat global de l'injection de ≈ 100 GtC en 200 ans de carbone du pergélisol



Köhler et al. 2006 G3

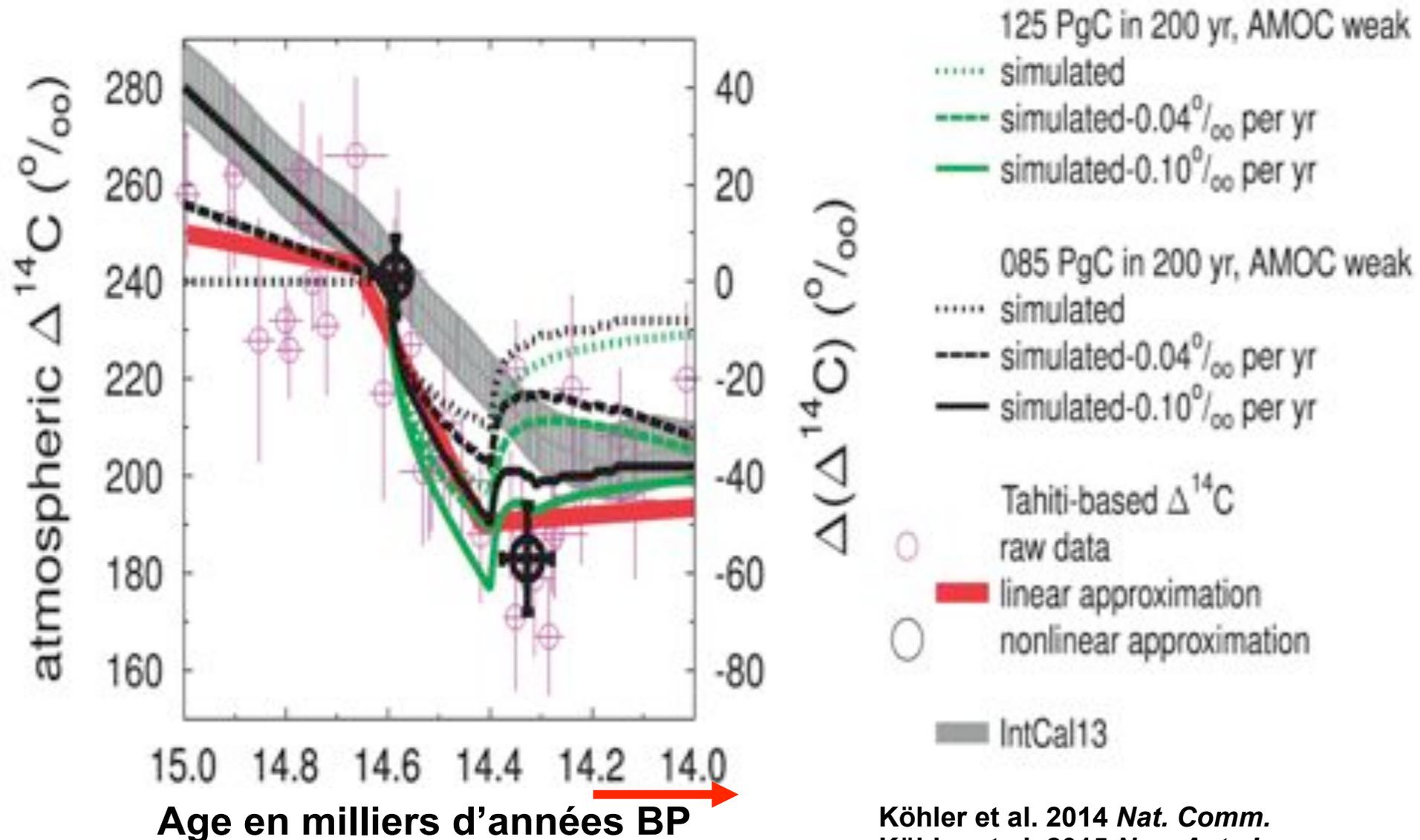


COSMOS GCM, G. Knorr AWI



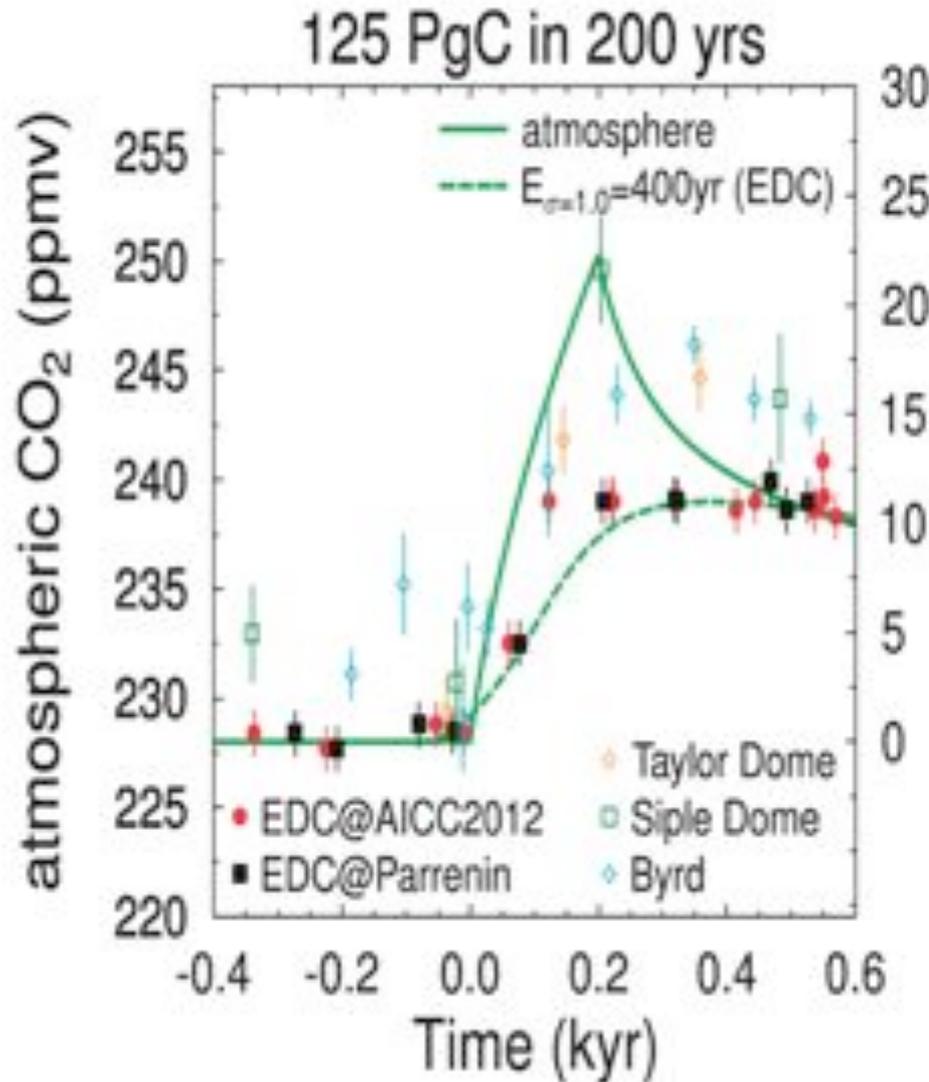
Bard et al. 1994 EPSL

Comparaison données-modèle de la variation transitoire du $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ atmosphérique

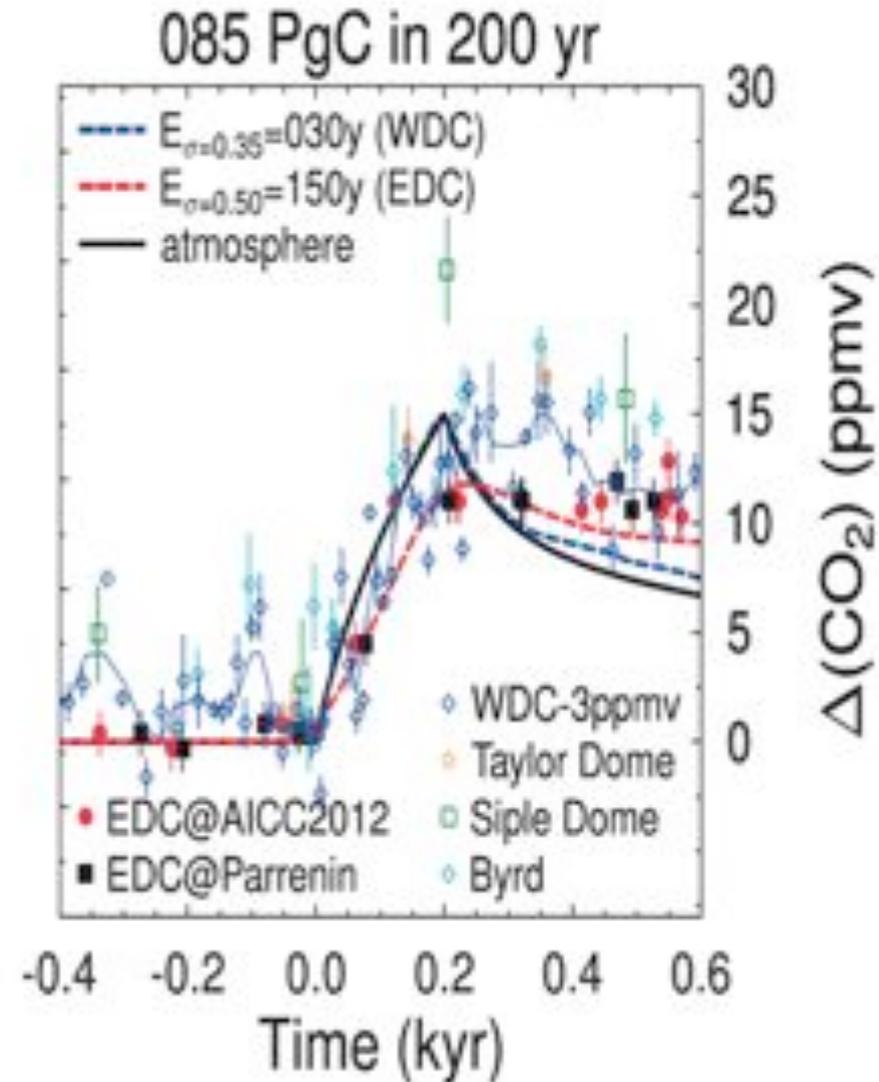


Köhler et al. 2014 *Nat. Comm.*
 Köhler et al. 2015 *Nov. Acta Leo.*

Comparaison données-modèle de la variation transitoire de pCO₂ atmosphérique

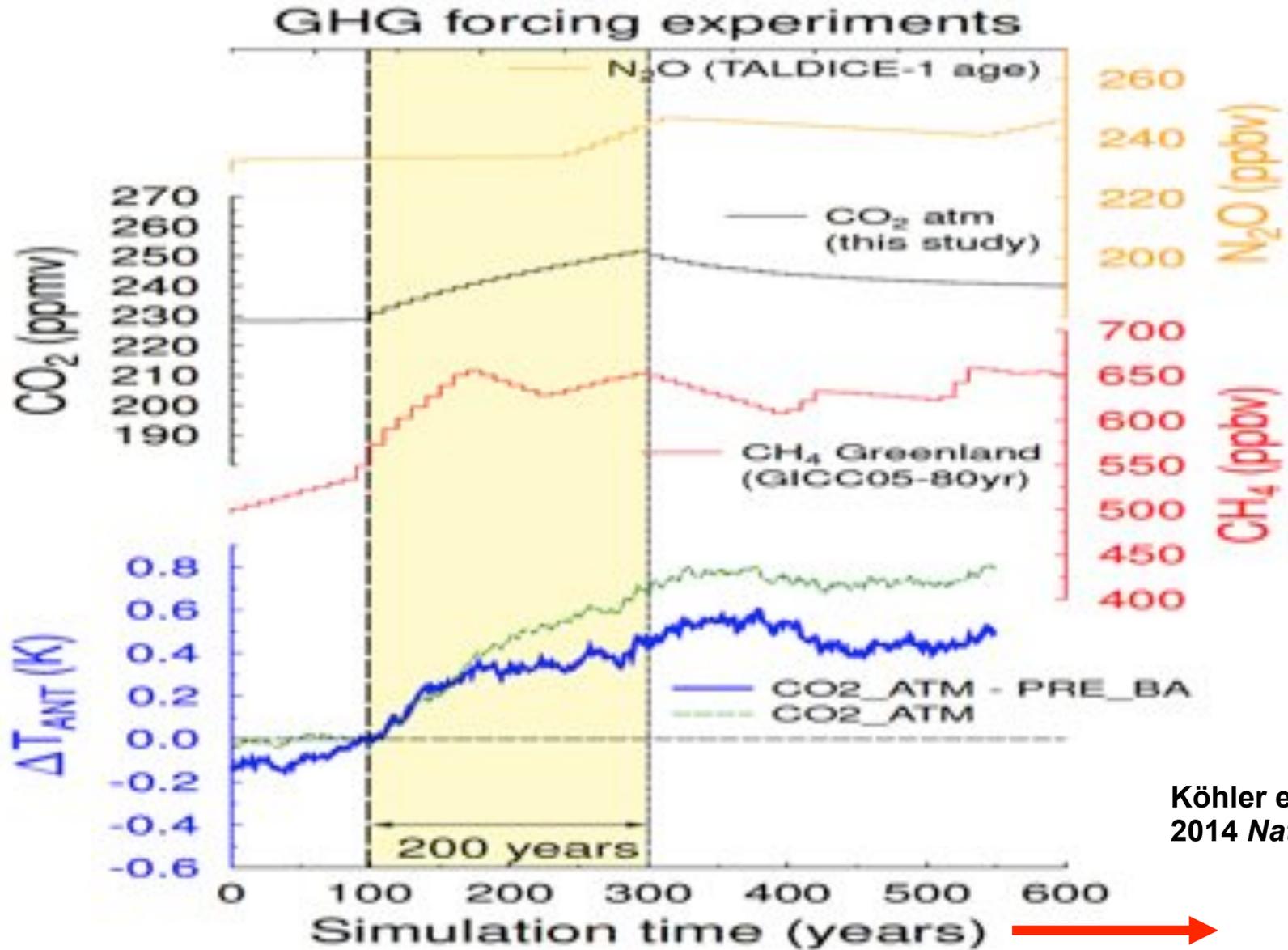


Köhler et al. 2014 *Nat. Comm.*



Köhler et al. 2015 Nov. *Acta Leo.*

La température en Antarctique simulée par le GCM COSMOS forcé par les variations de CO₂



Köhler et al.
2014 Nat. Comm.

Complexité du cycle du carbone et petite taille du réservoir atmosphérique (600 GtC)

