



COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —



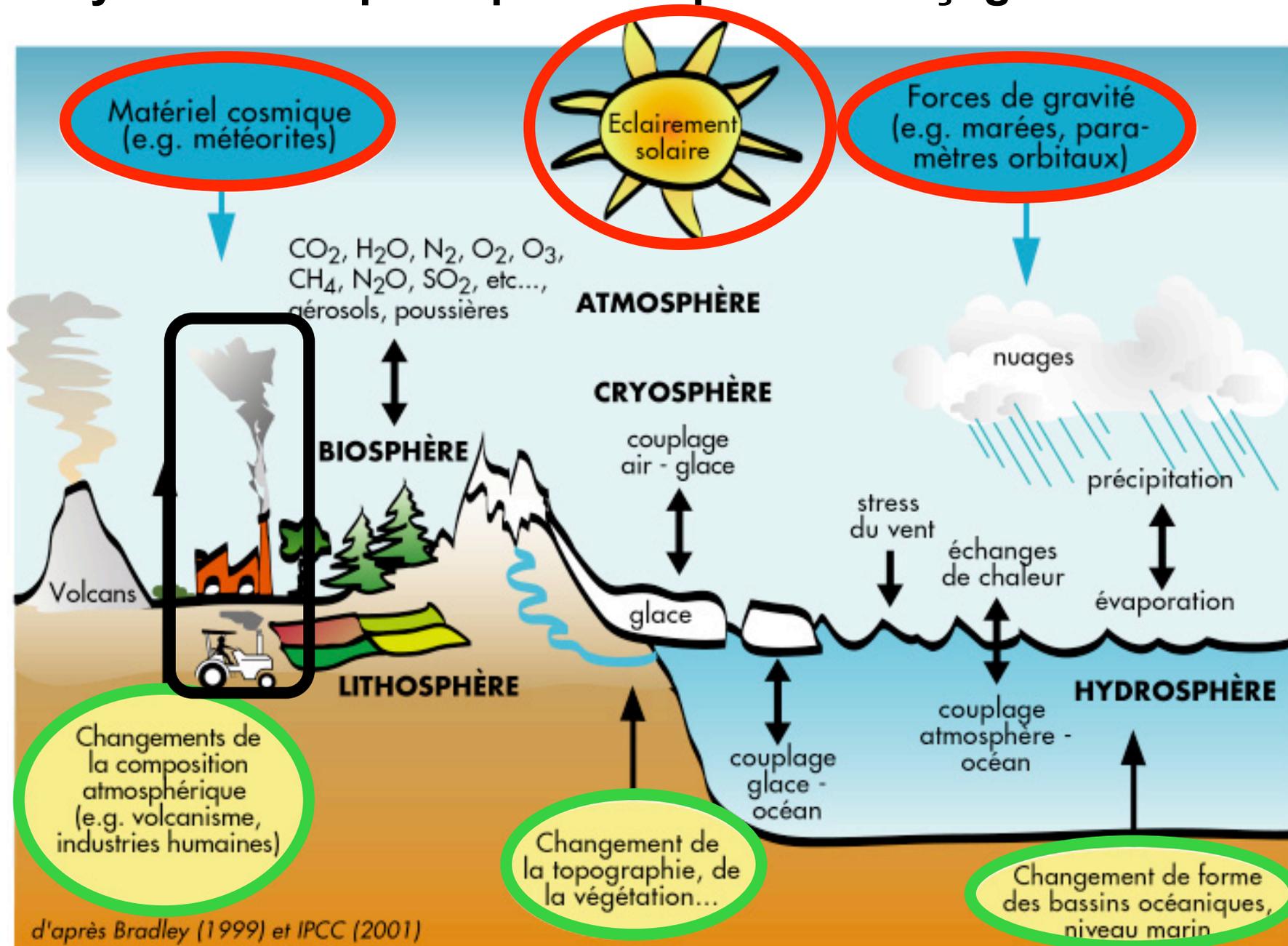
## Rôle du CO<sub>2</sub> et des facteurs d'origine terrestre

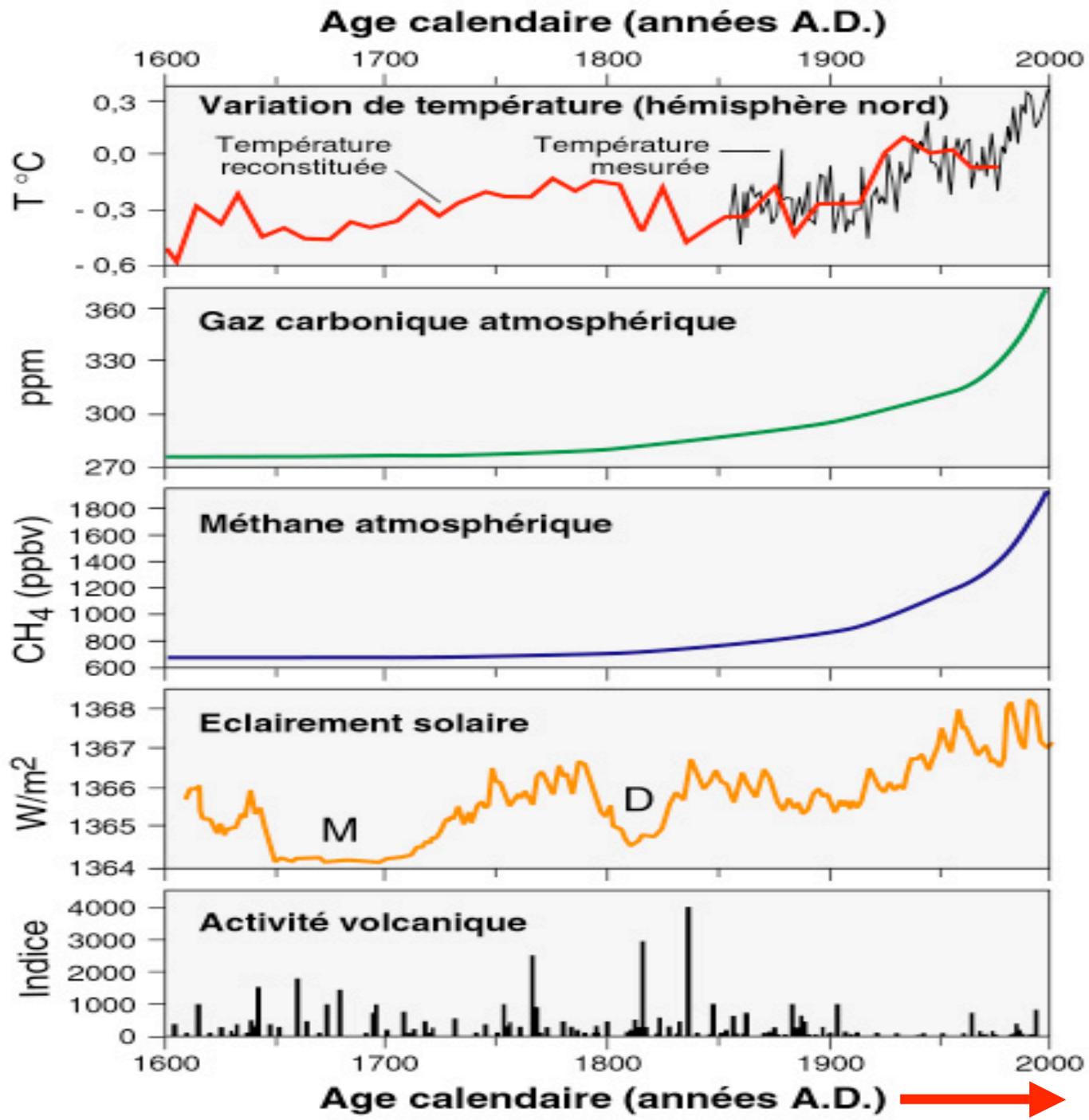
**Edouard BARD**

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

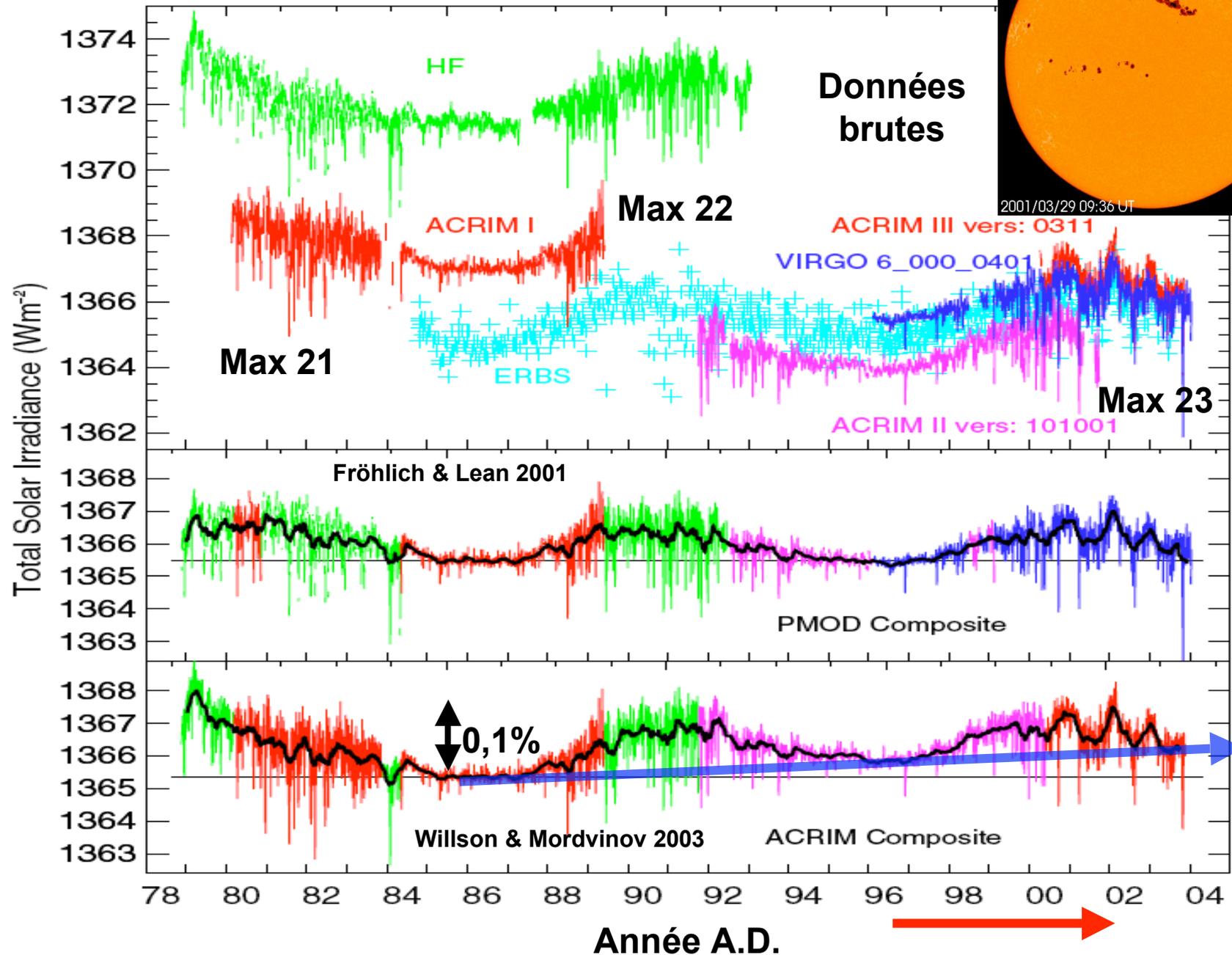
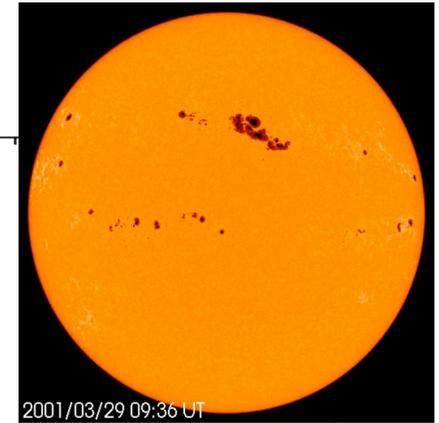
*CEREGE, Aix-en-Provence*

# Un système complexe perturbé par des forçages variables

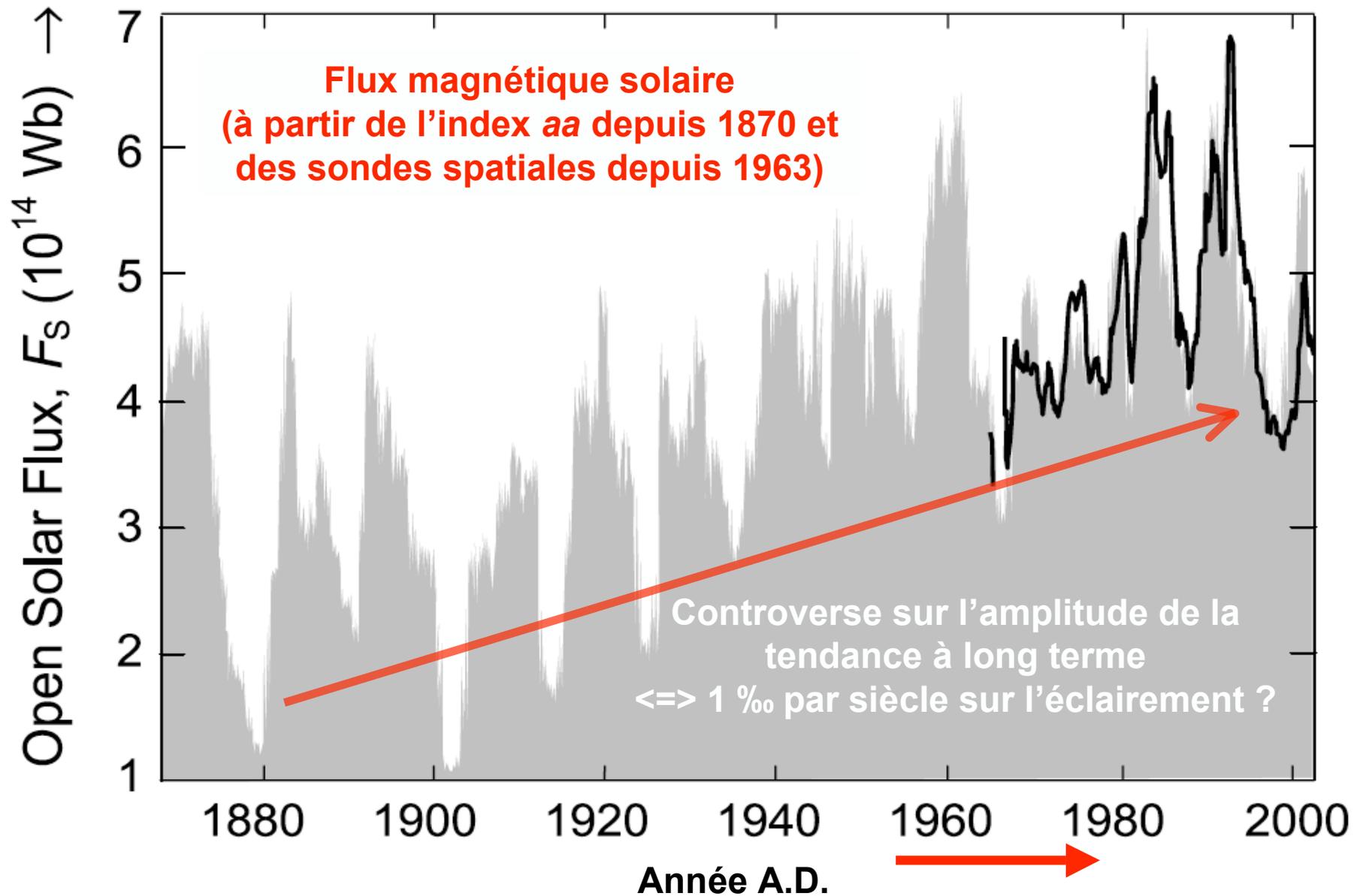




# Eclairement solaire enregistré par les satellites



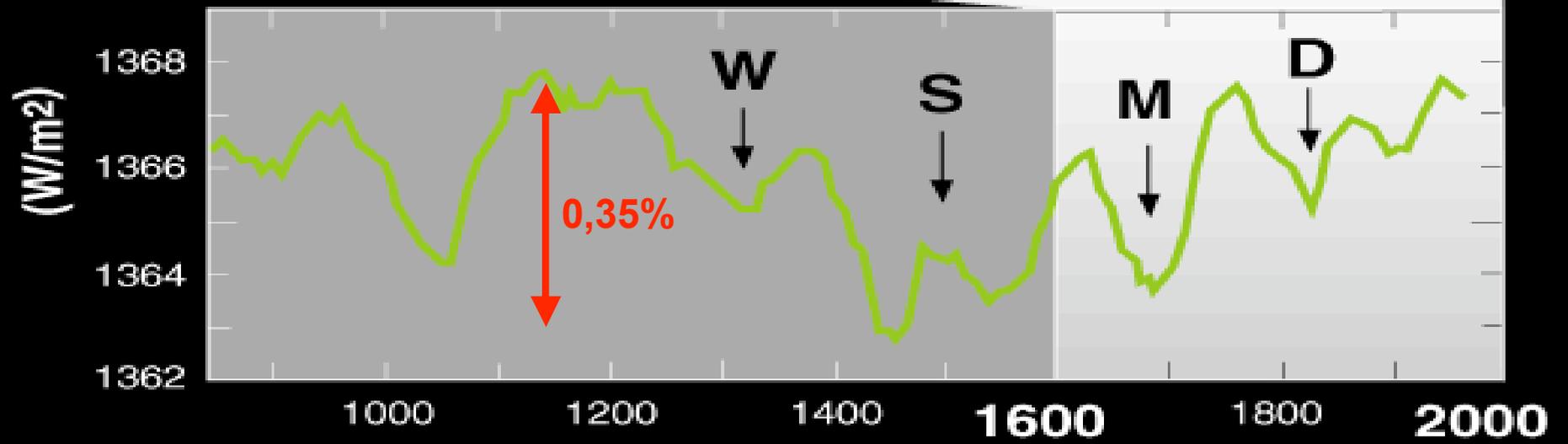
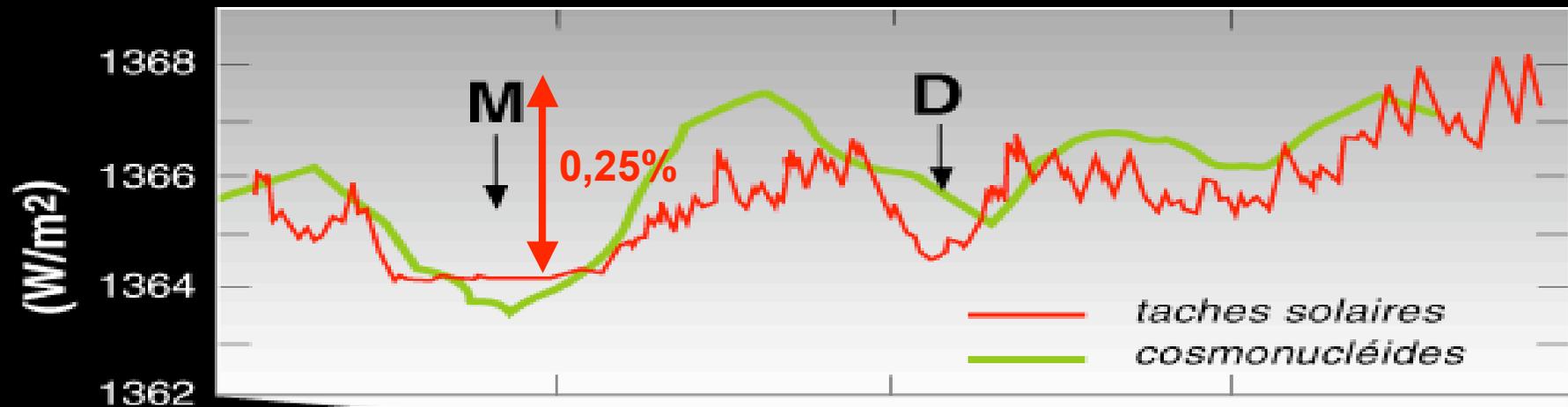
# Certains indicateurs montrent une tendance à long terme



# IRRADIANCE SOLAIRE

Années A.D. →

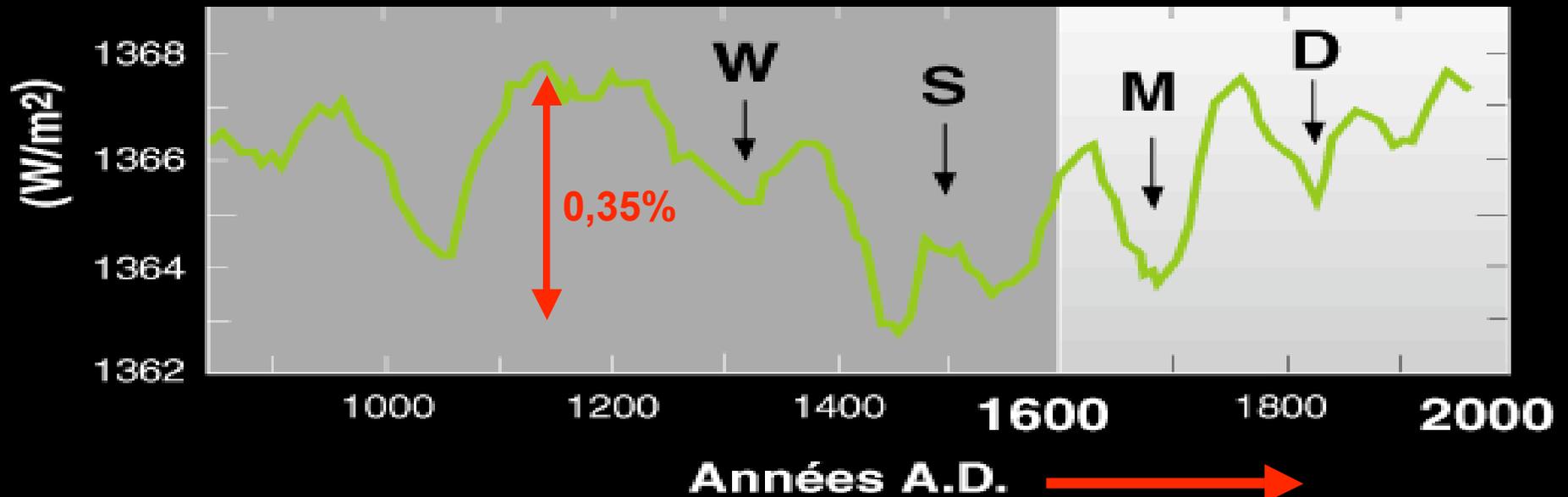
1600 1700 1800 1900 2000



Années A.D. →

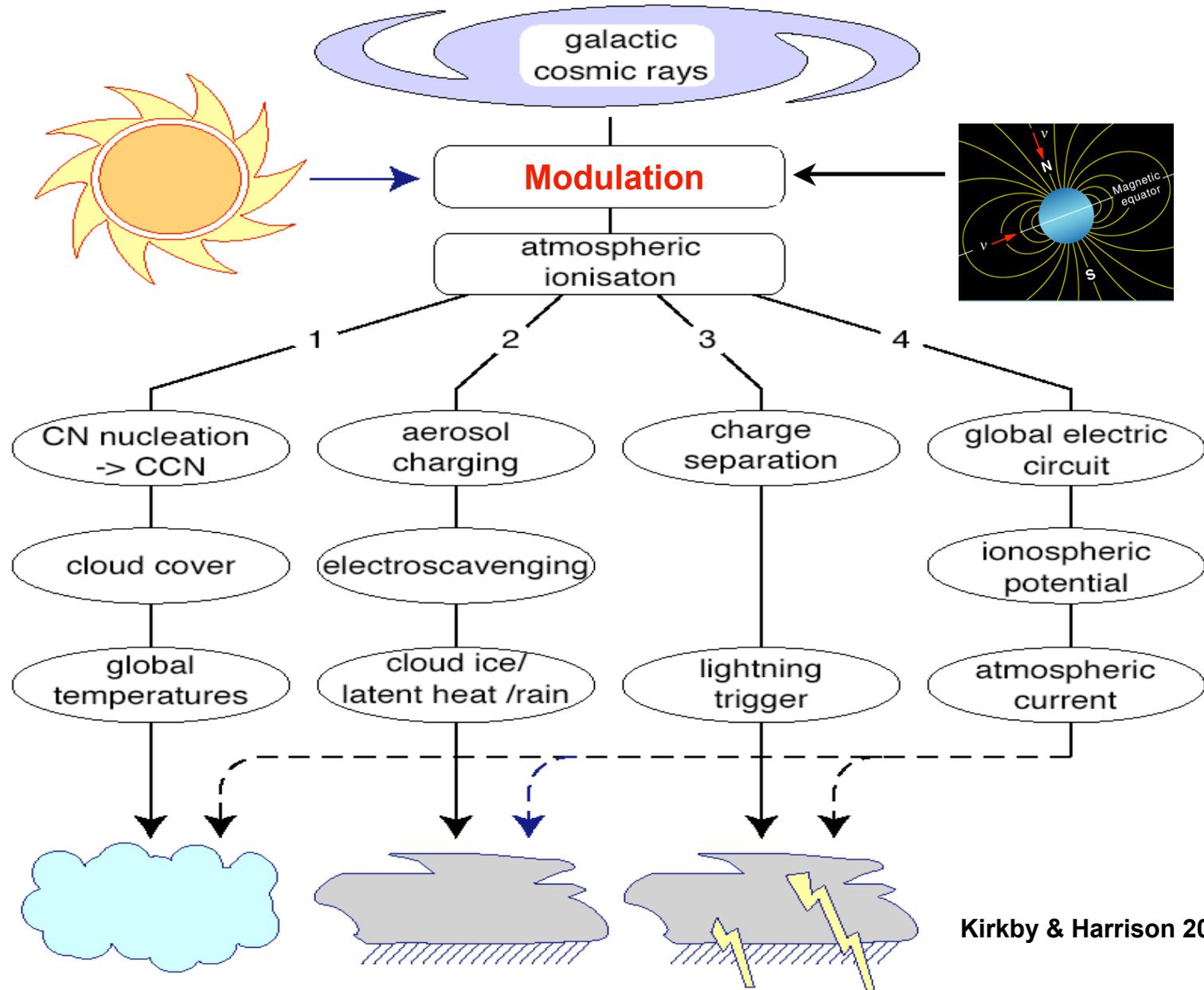
d'après Lean et al., 1995, Bard et al., 2000

# Spectromètre ASTER à Aix-en-Provence



d'après Lean et al., 1995, Bard et al., 2000

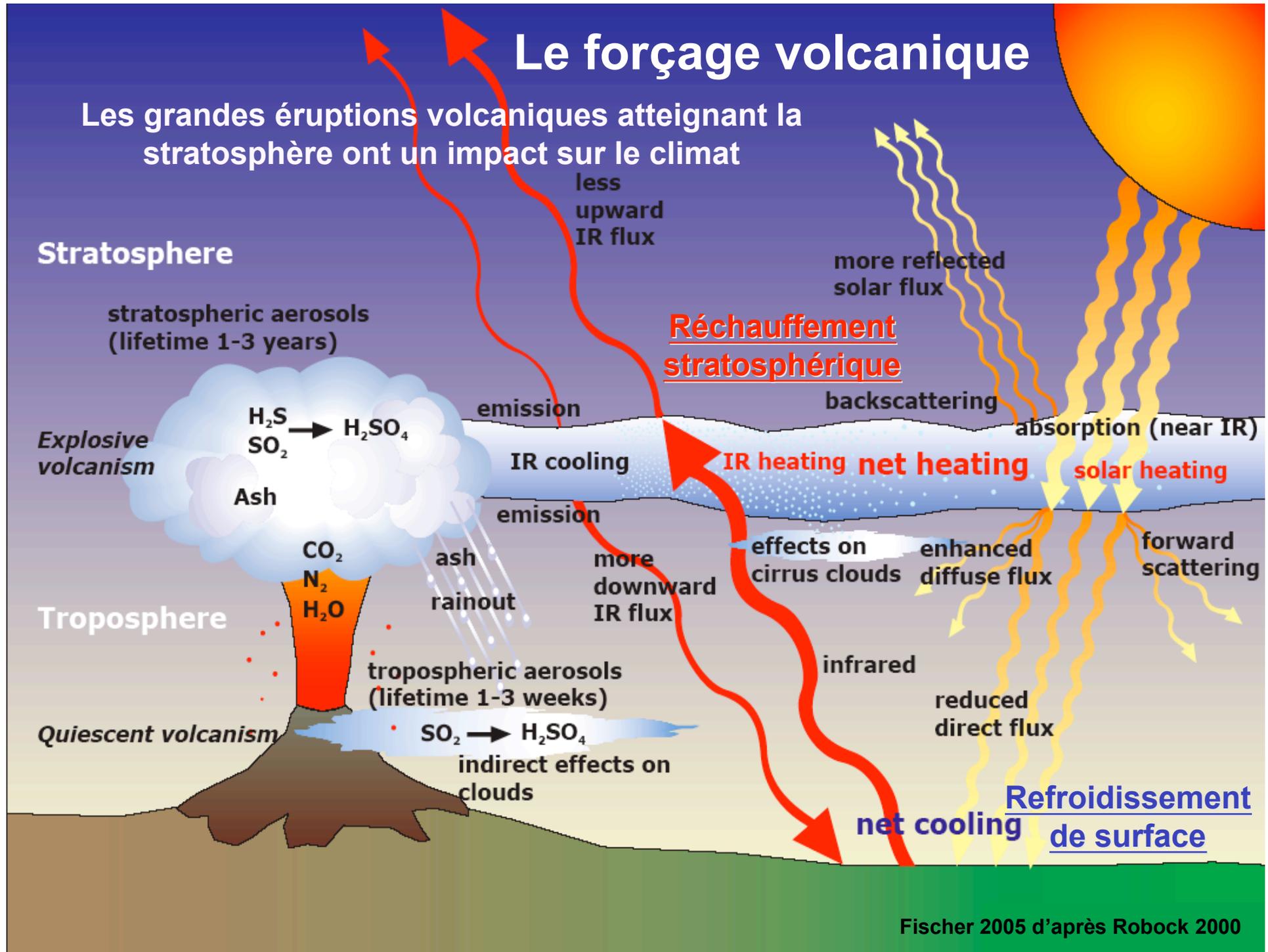
# Des mécanismes hypothétiques encore mal quantifiés



Kirkby & Harrison 2003

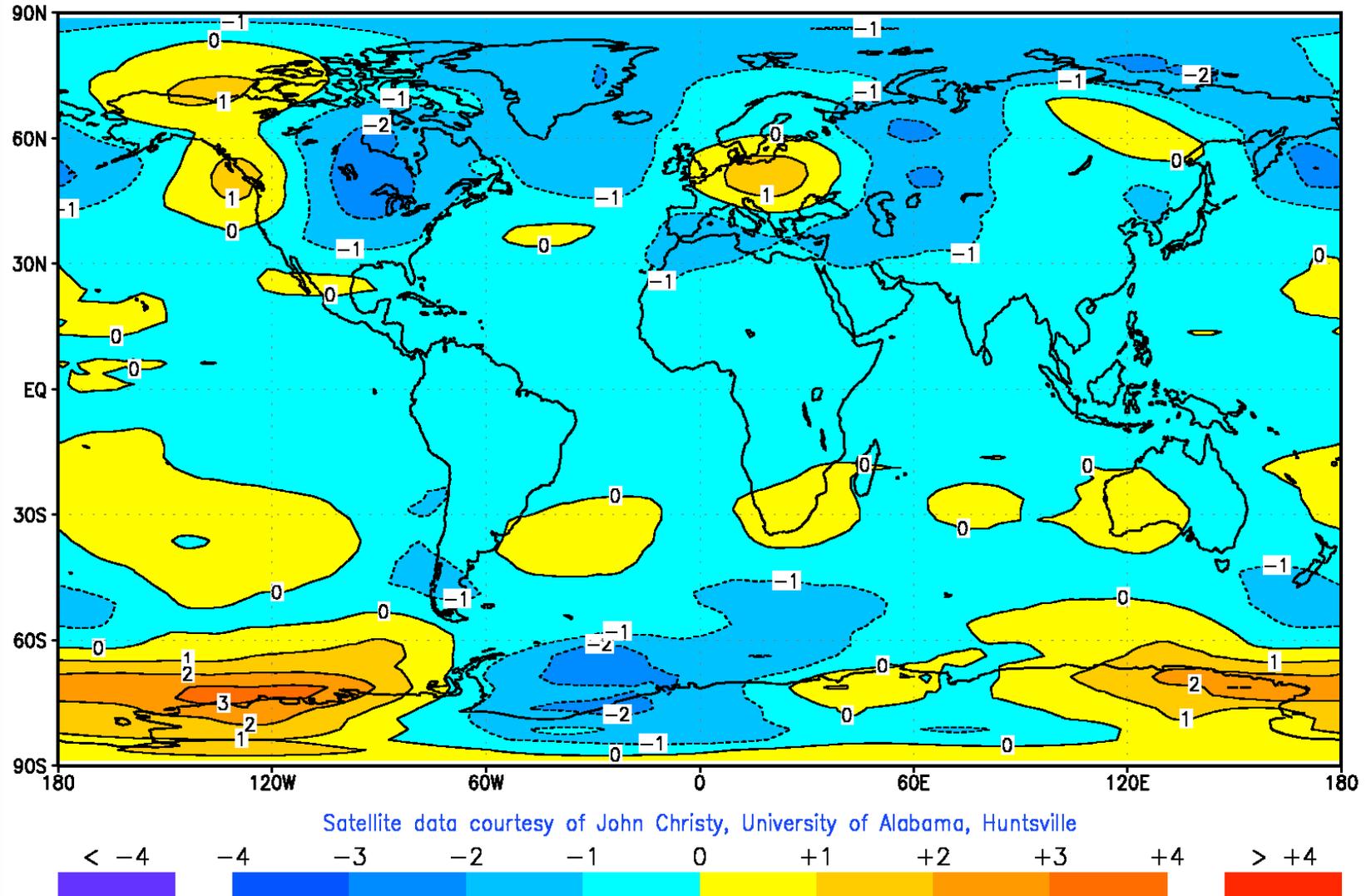
# Le forçage volcanique

Les grandes éruptions volcaniques atteignant la stratosphère ont un impact sur le climat

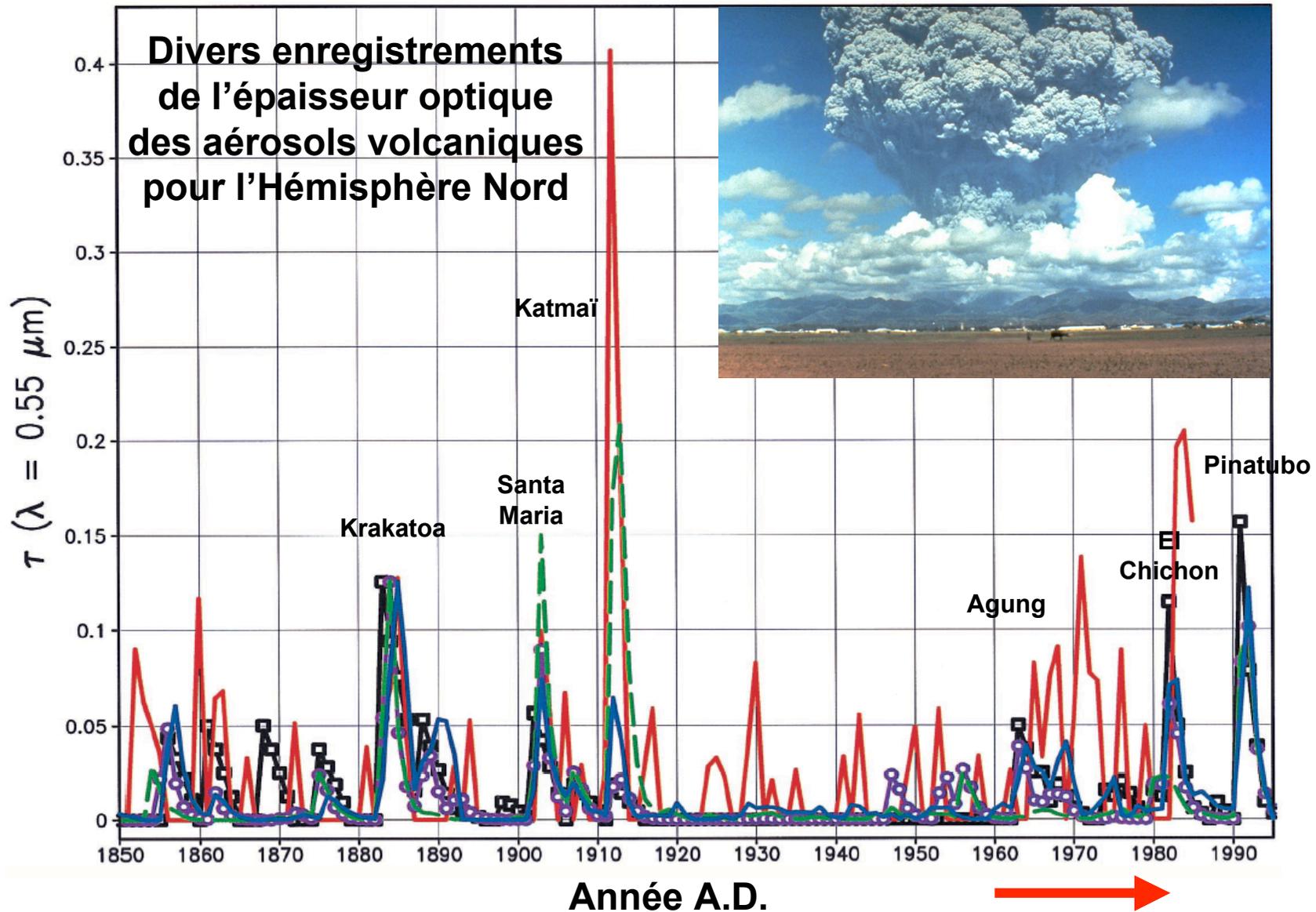


# Pinatubo: un refroidissement marqué en été 1992

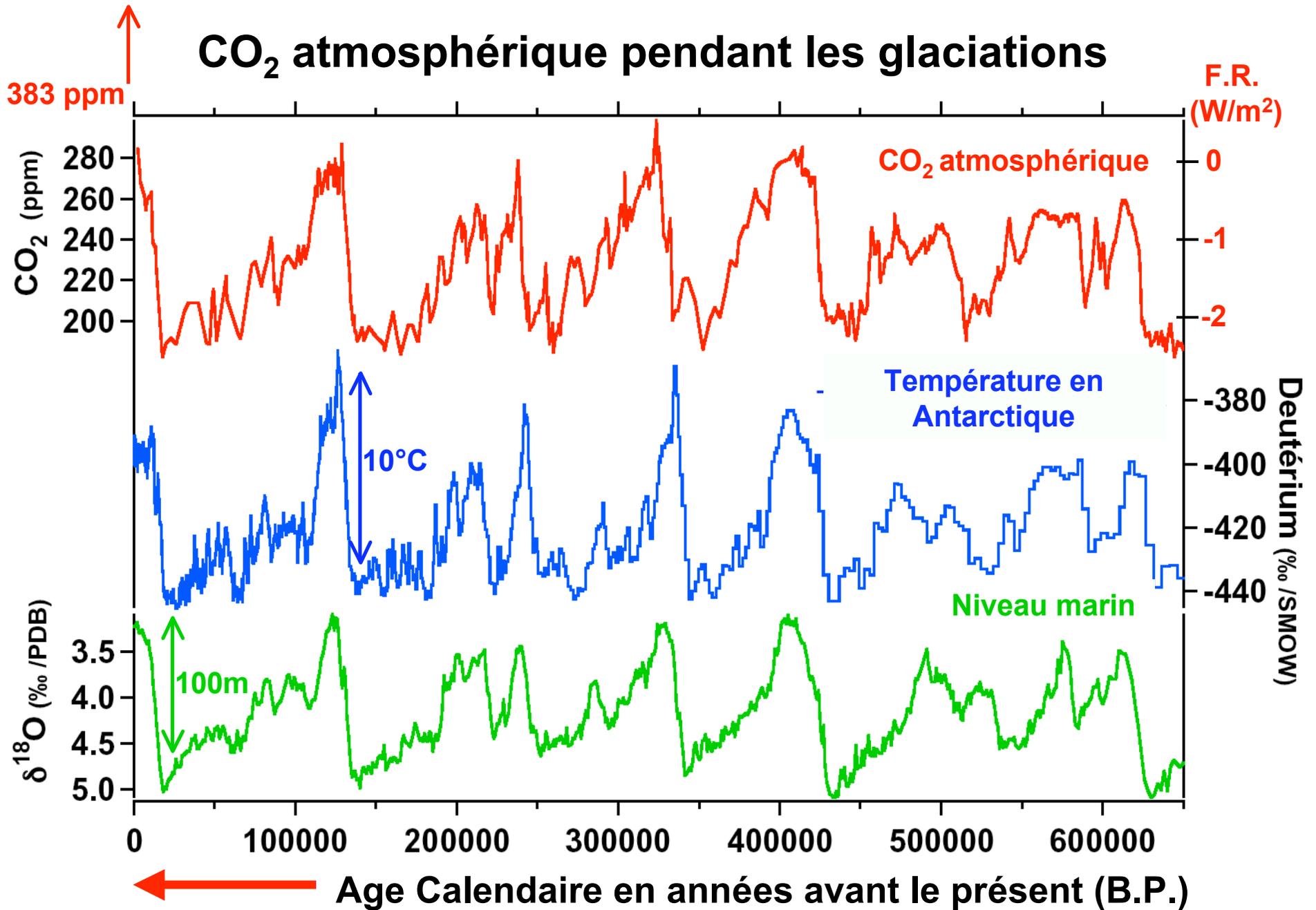
Average Lower Troposphere Temperature Anomalies (°C)



# La fréquence des éruptions évolue dans le temps

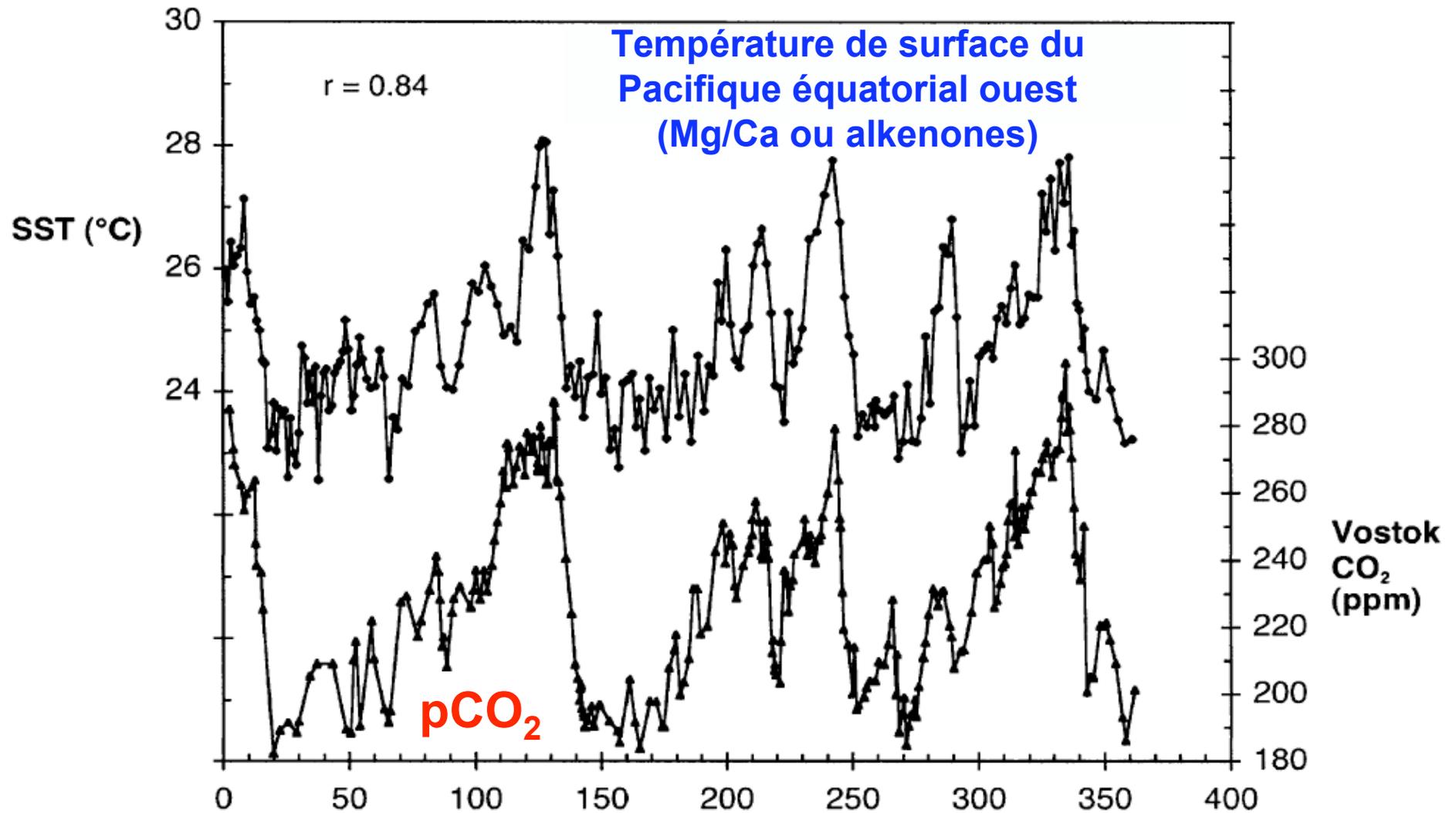


# CO<sub>2</sub> atmosphérique pendant les glaciations



Siegenthaler et al. 2005, Lisiecki & Raymo 2005

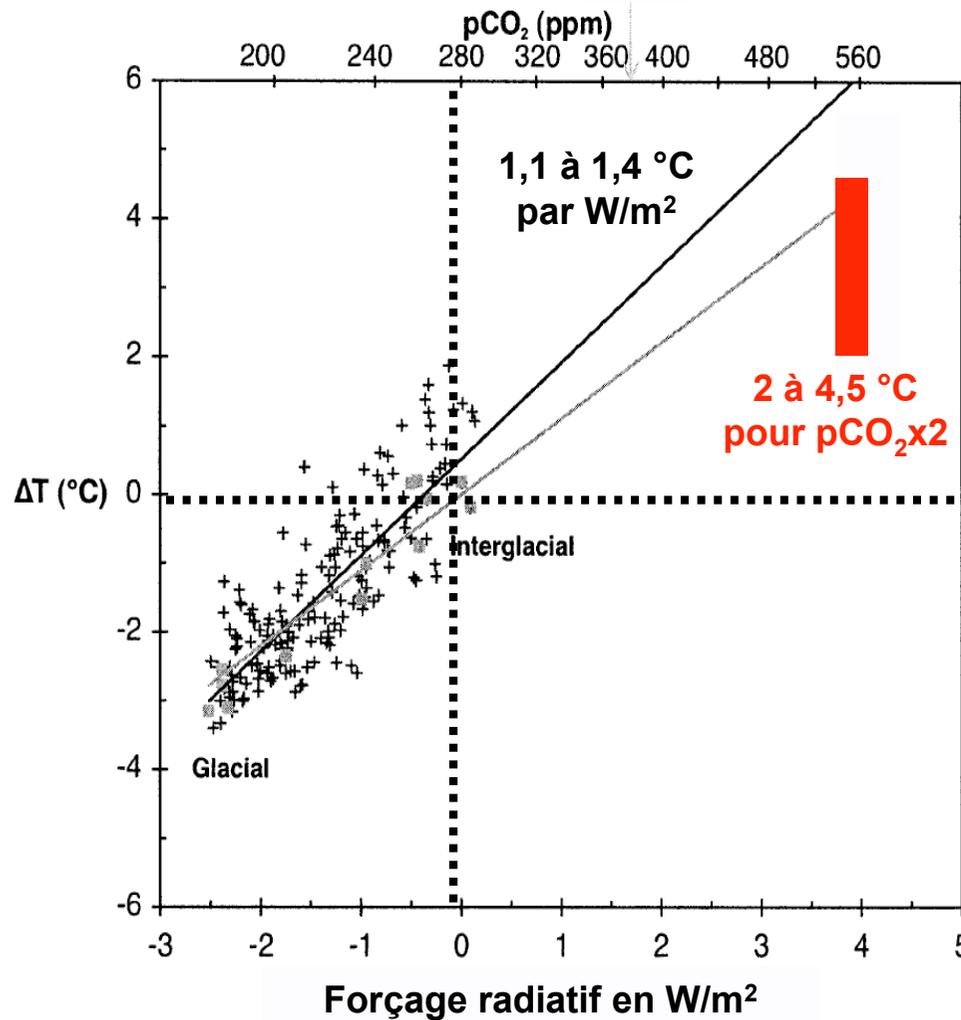
# CO<sub>2</sub> et température de surface de l'océan tropical



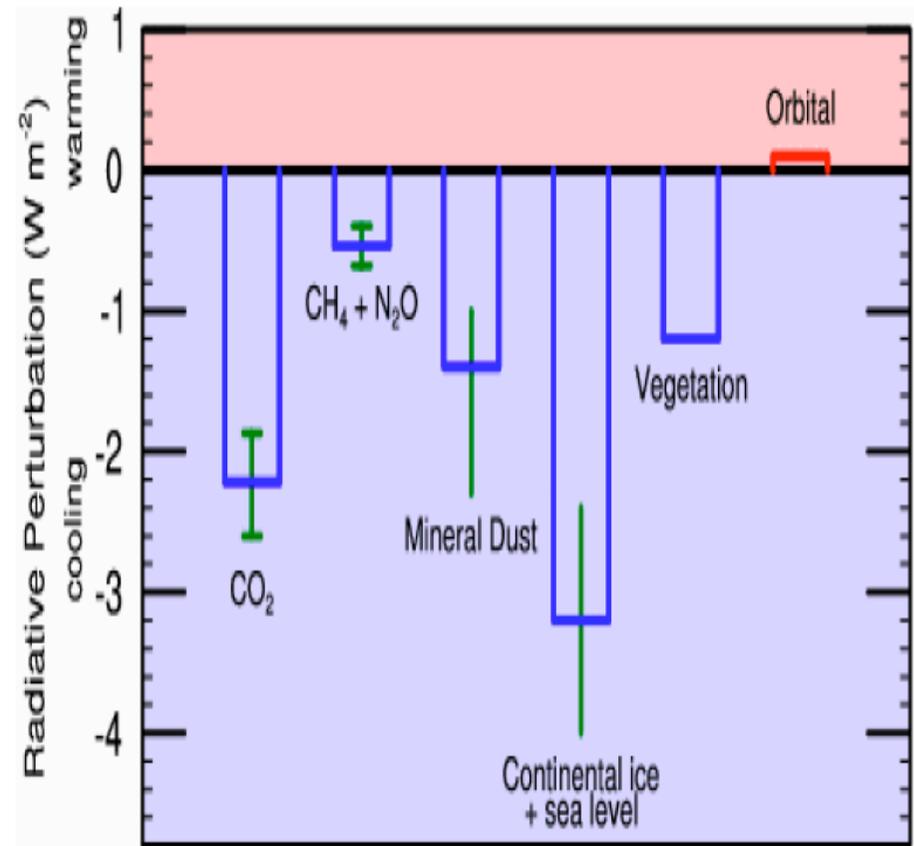
Age Calendaire en années B.P.

Lea 2004

# Calcul de la sensibilité du climat en supposant que le refroidissement tropical est dû aux variations de la pCO<sub>2</sub>

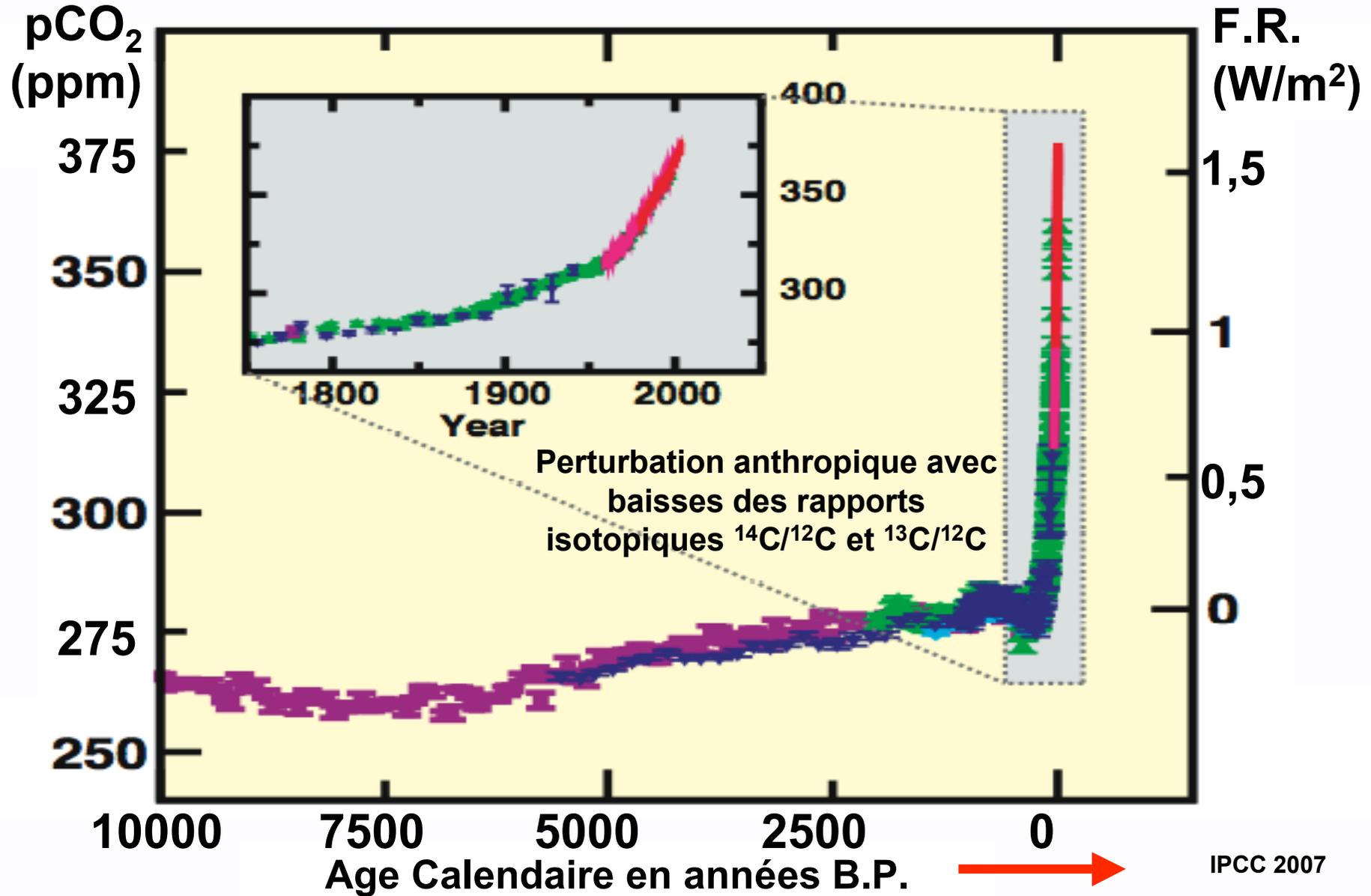


Lea 2004

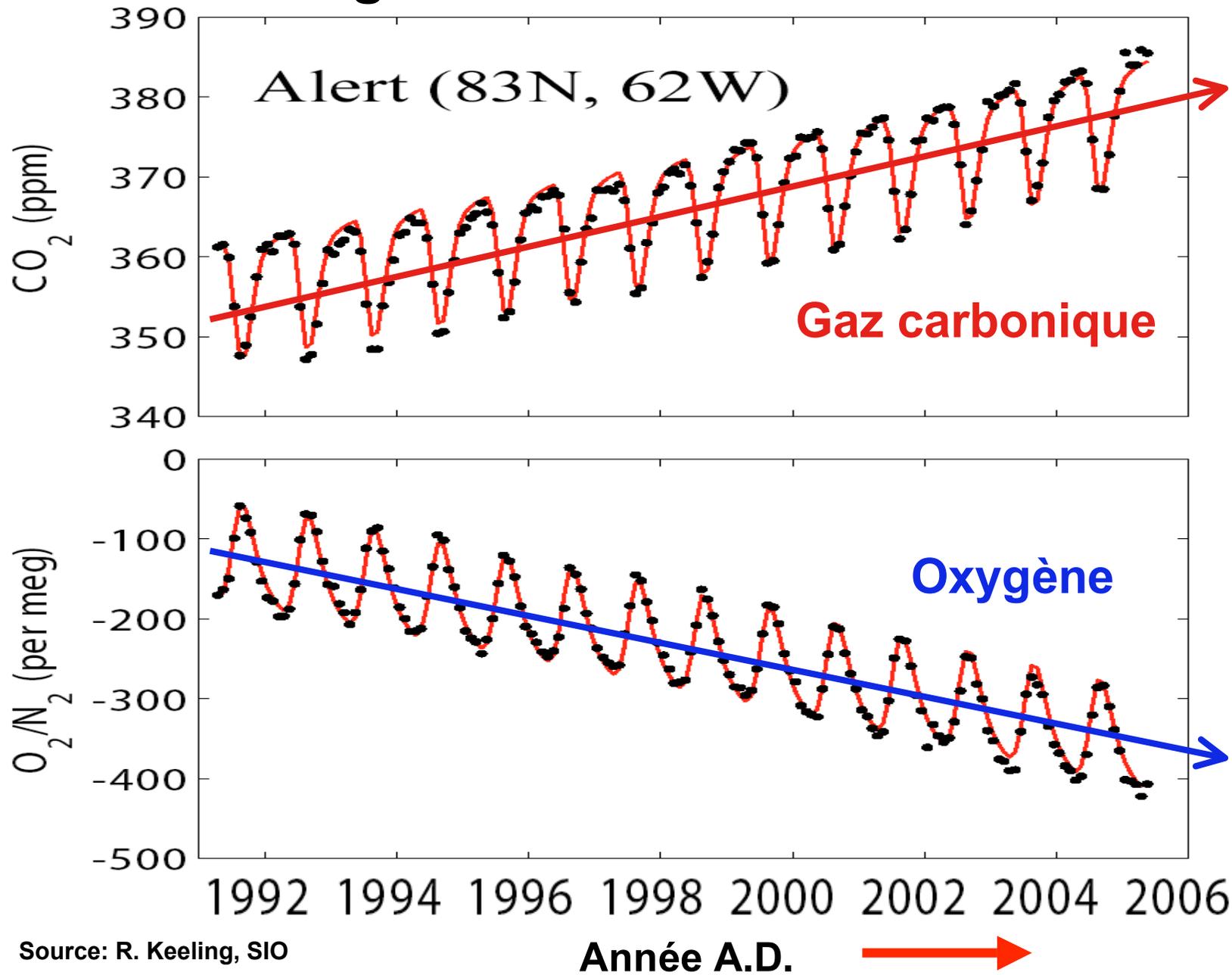


Approximation car d'autres forçages existaient pendant la période glaciaire (mais surtout aux hautes latitudes)

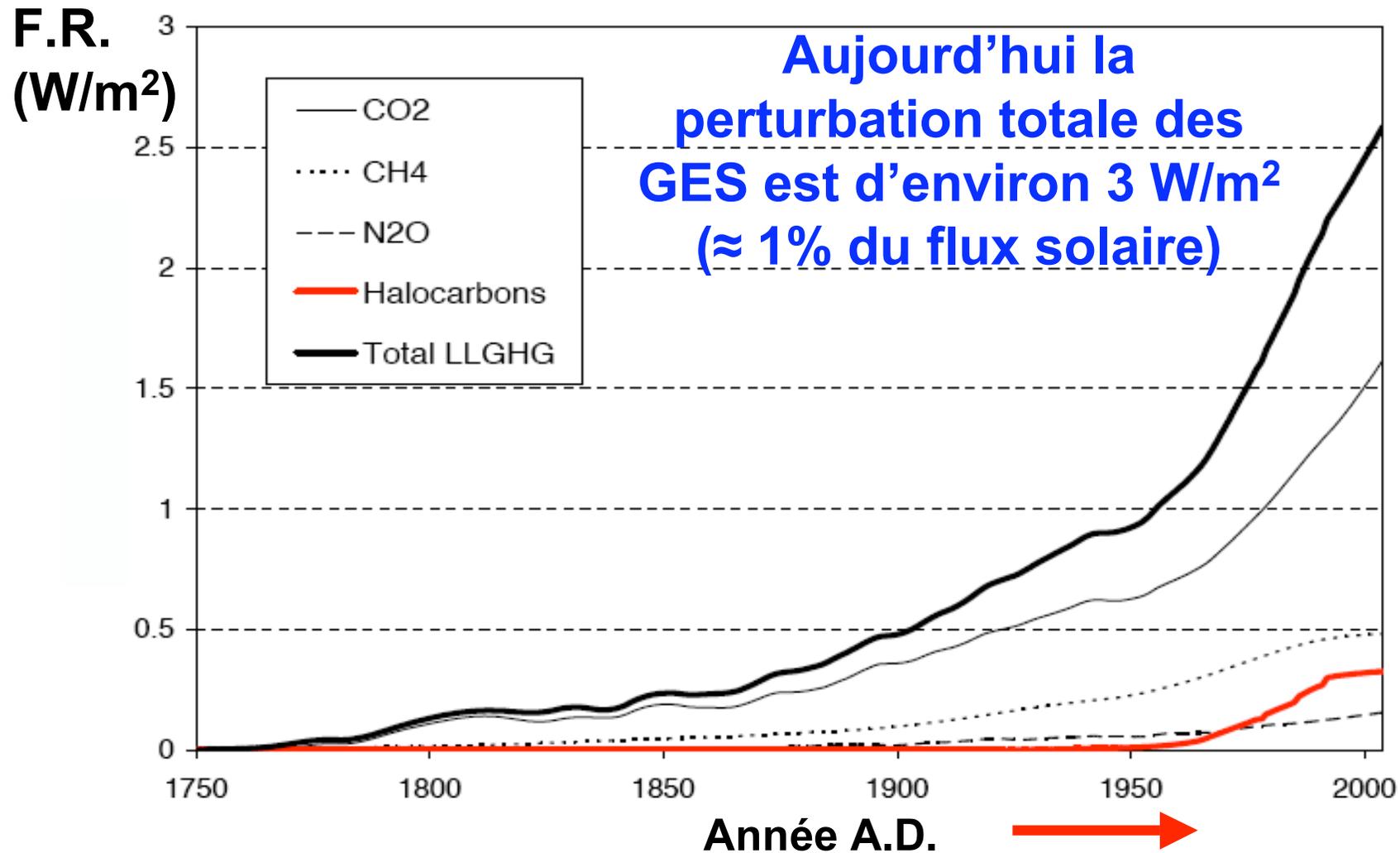
# Perturbation radiative du CO<sub>2</sub> pendant les derniers siècles



# Il s'agit bien d'une combustion !

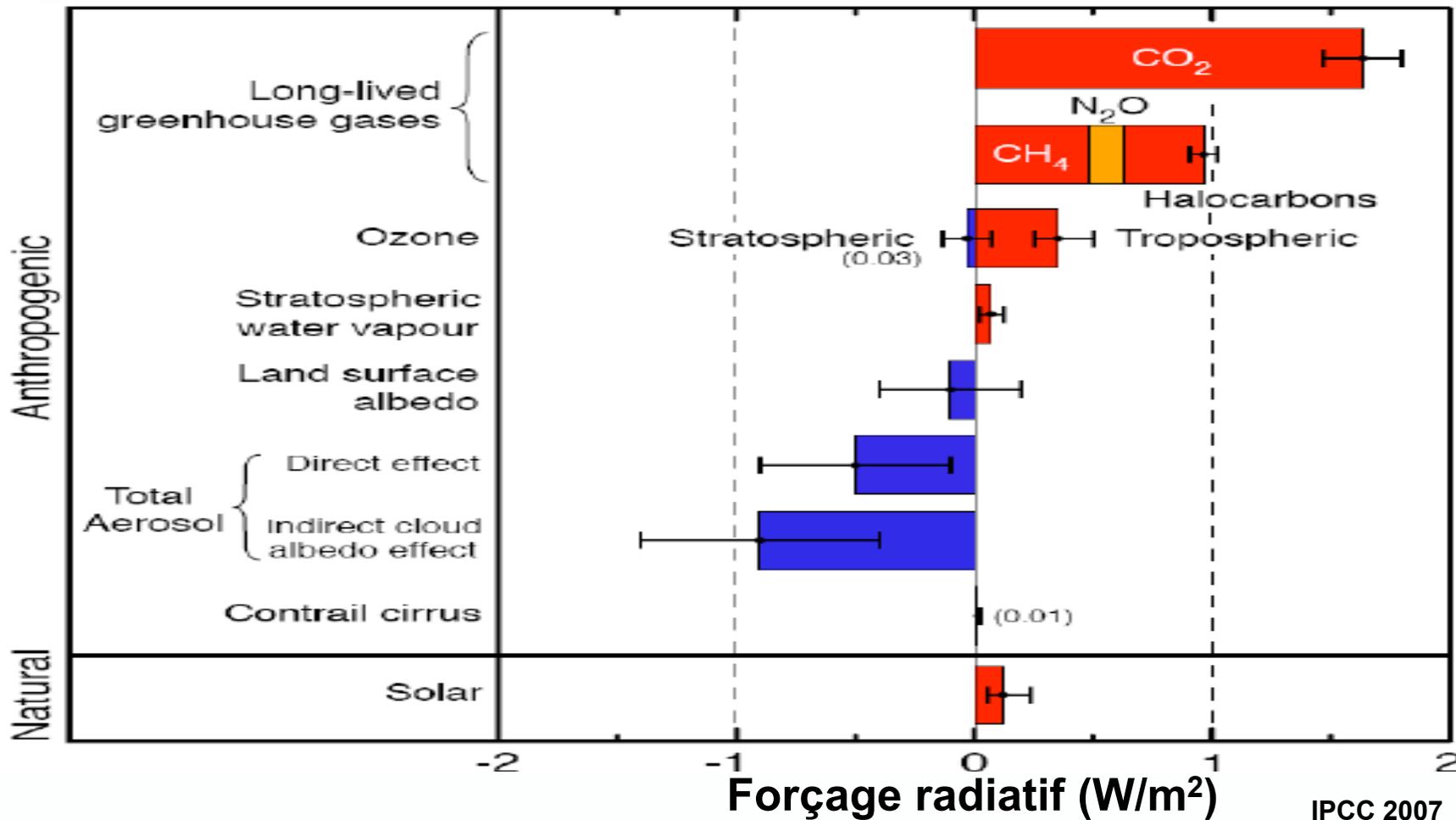


**Il faut tenir compte des autres gaz à effet de serre liés aux activités humaines: méthane, protoxyde d'azote, chlorofluorocarbures, (ozone)**

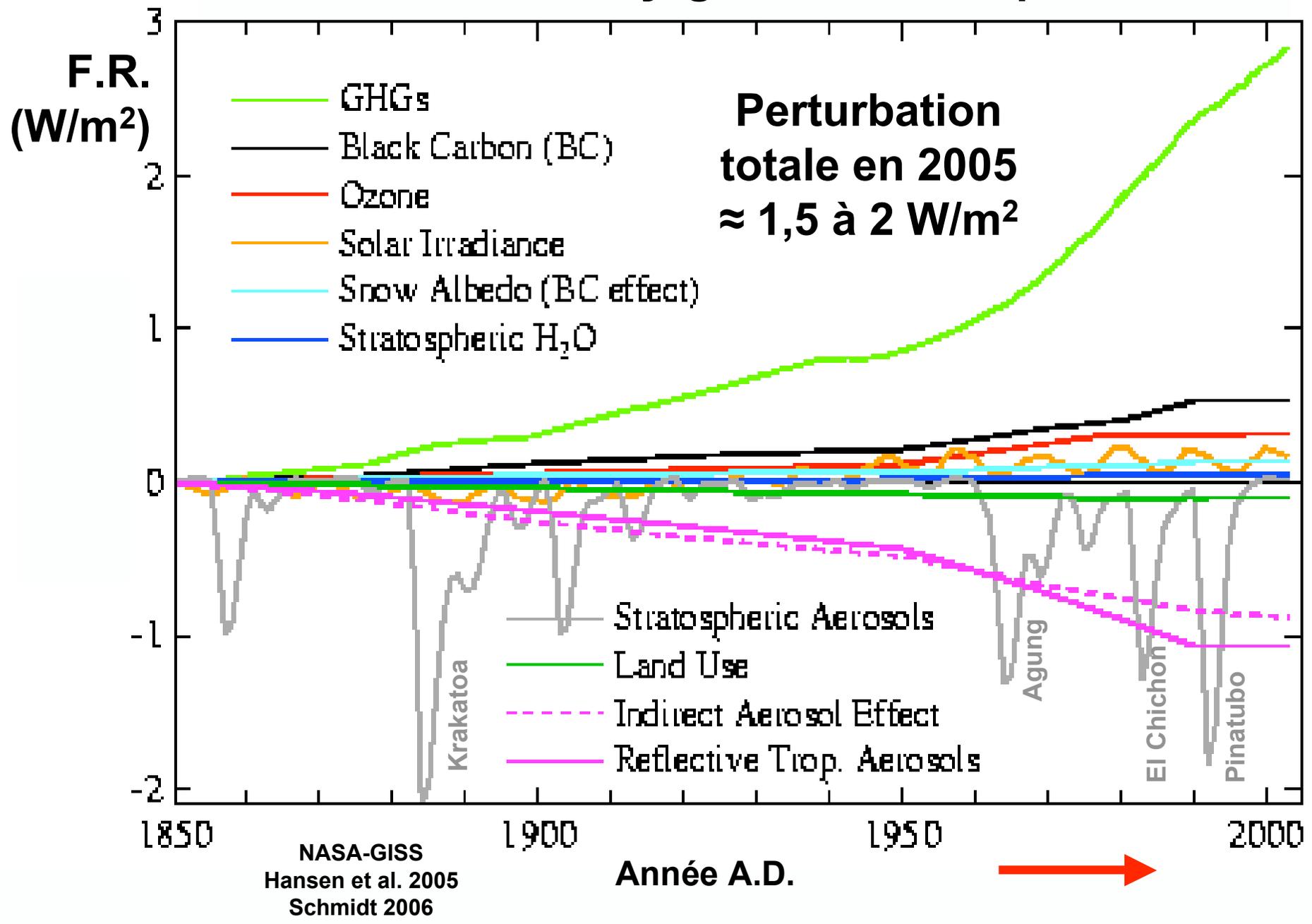


Les activités humaines sont aussi à l'origine de forçages radiatifs négatifs ( $\approx -1,5$  à  $-2 \text{ W/m}^2$ ):

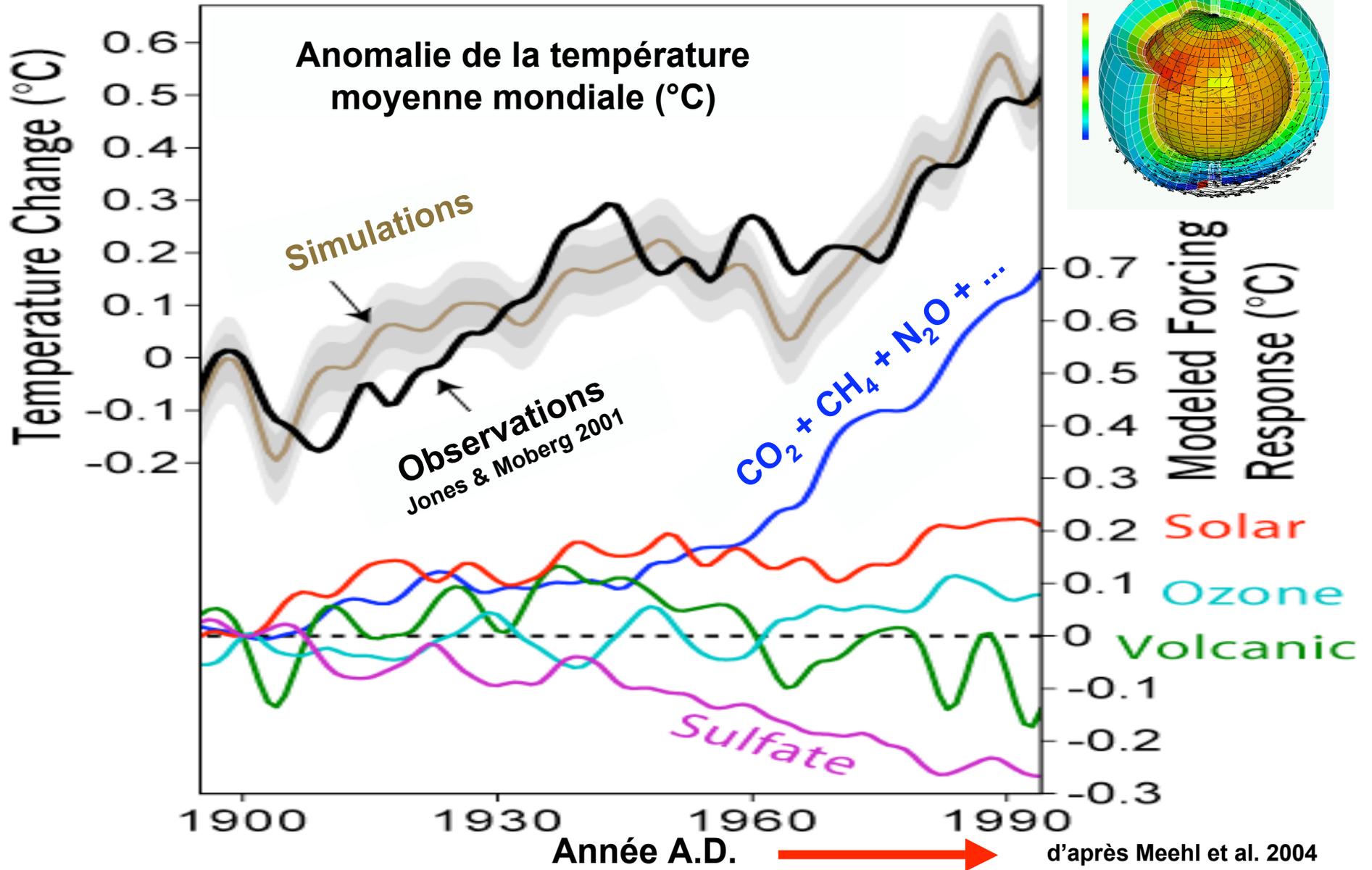
Les aérosols sulfatés avec leurs effets directs (réflexion) et indirects (nuages) refroidissent le climat



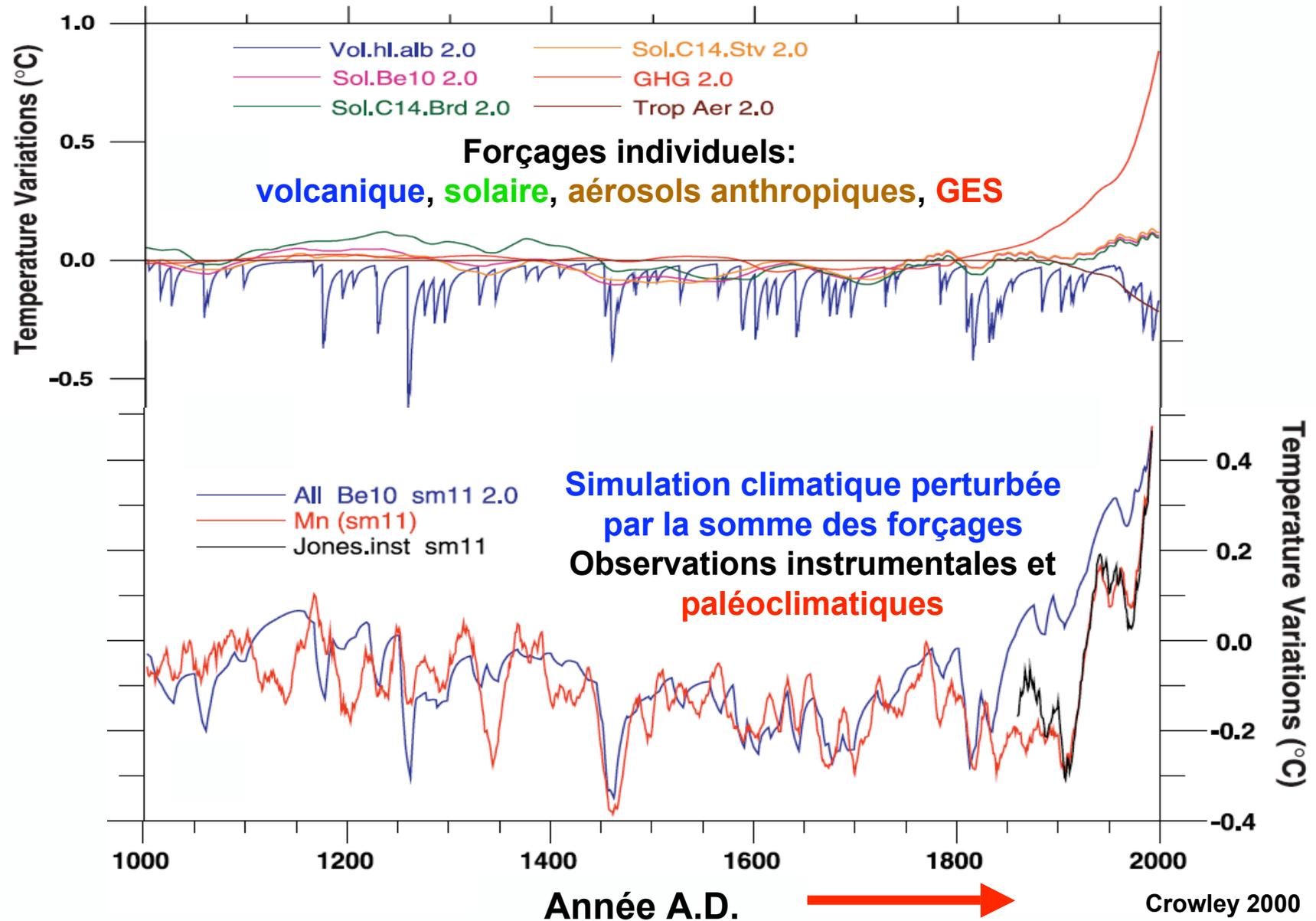
# Evolution des forçages radiatifs depuis 1850



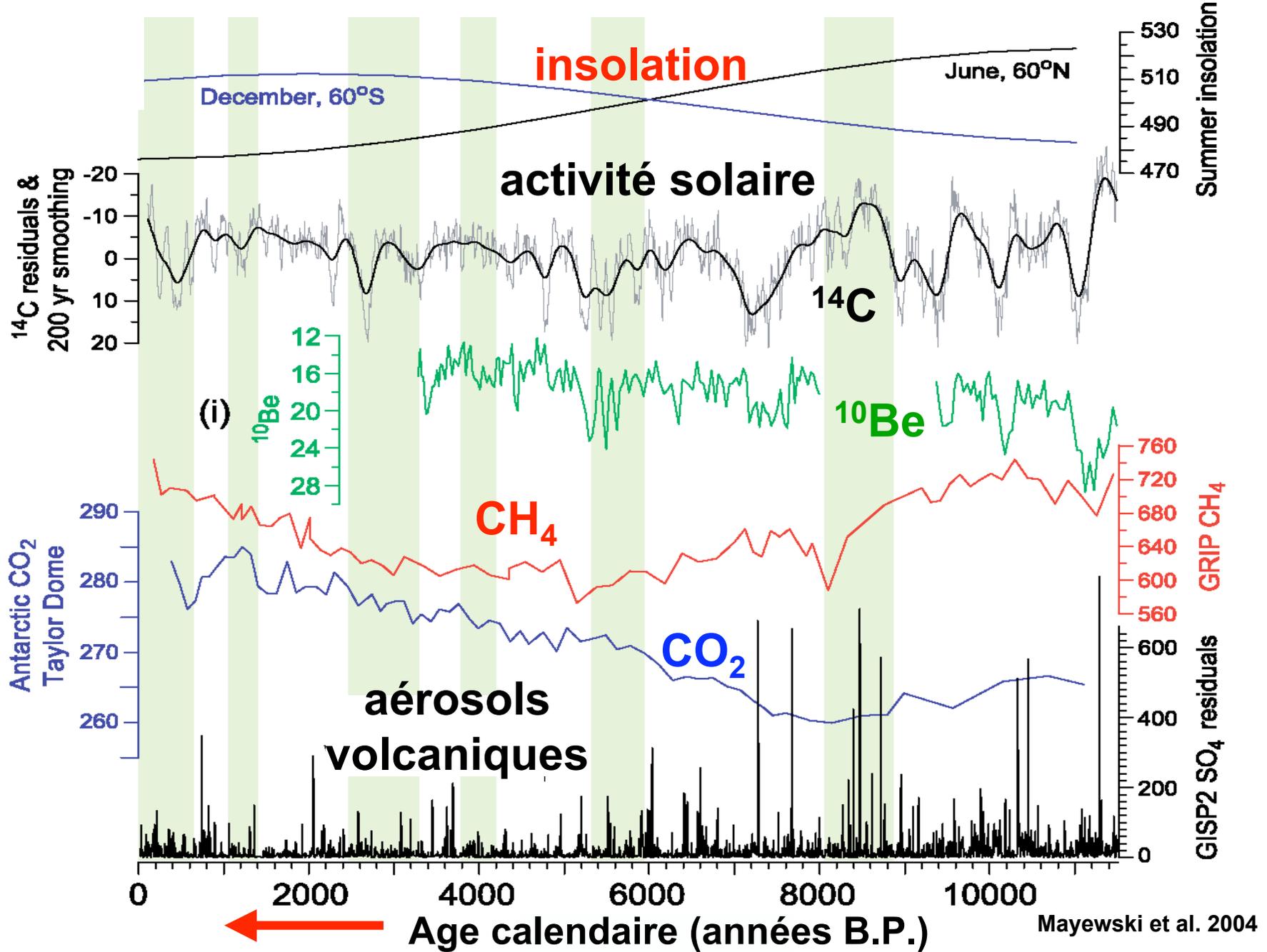
La modélisation numérique permet de vérifier la compatibilité des forçages avec l'évolution de la température moyenne et d'évaluer les différentes contributions



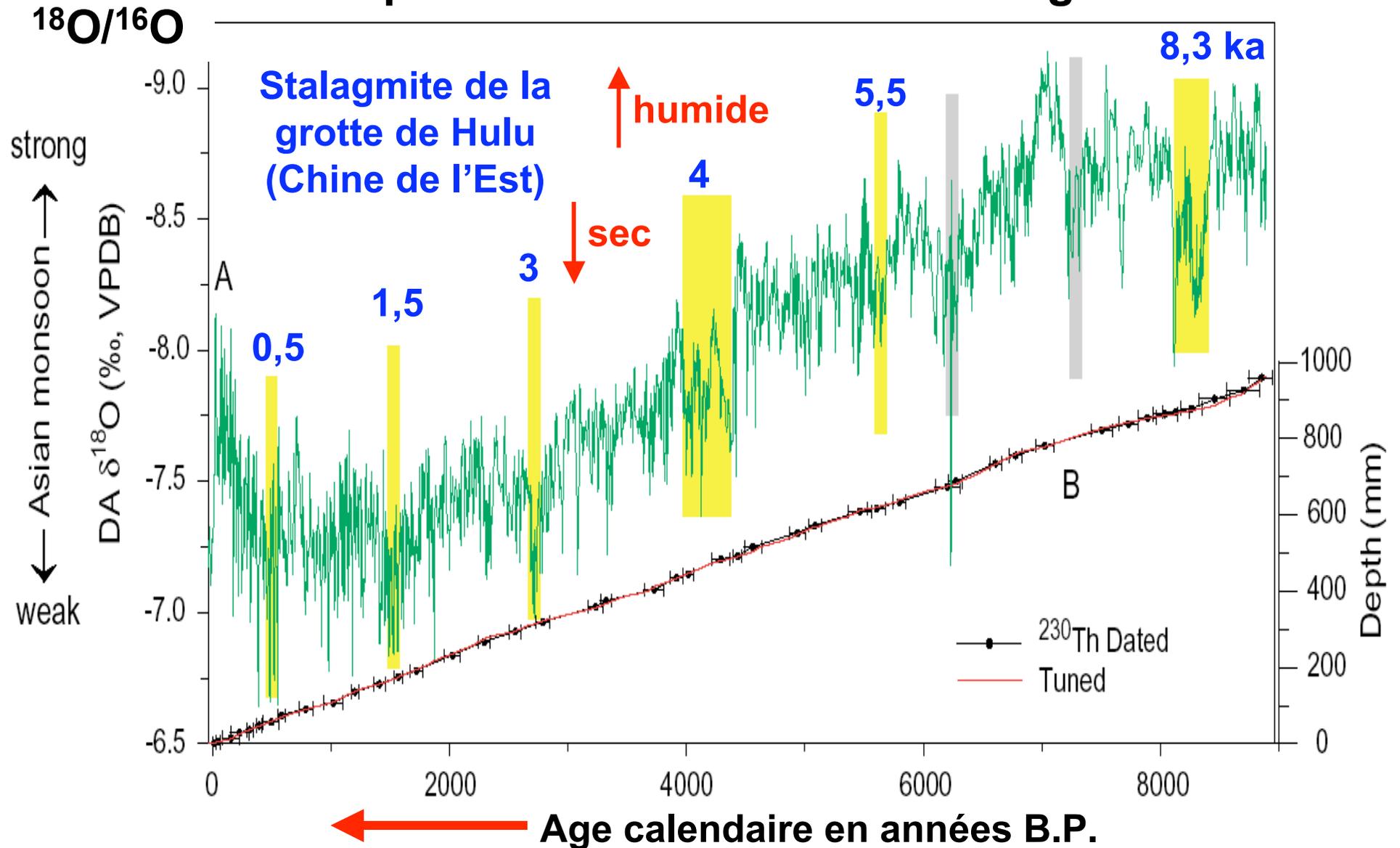
# Même type d'attribution pour le dernier millénaire



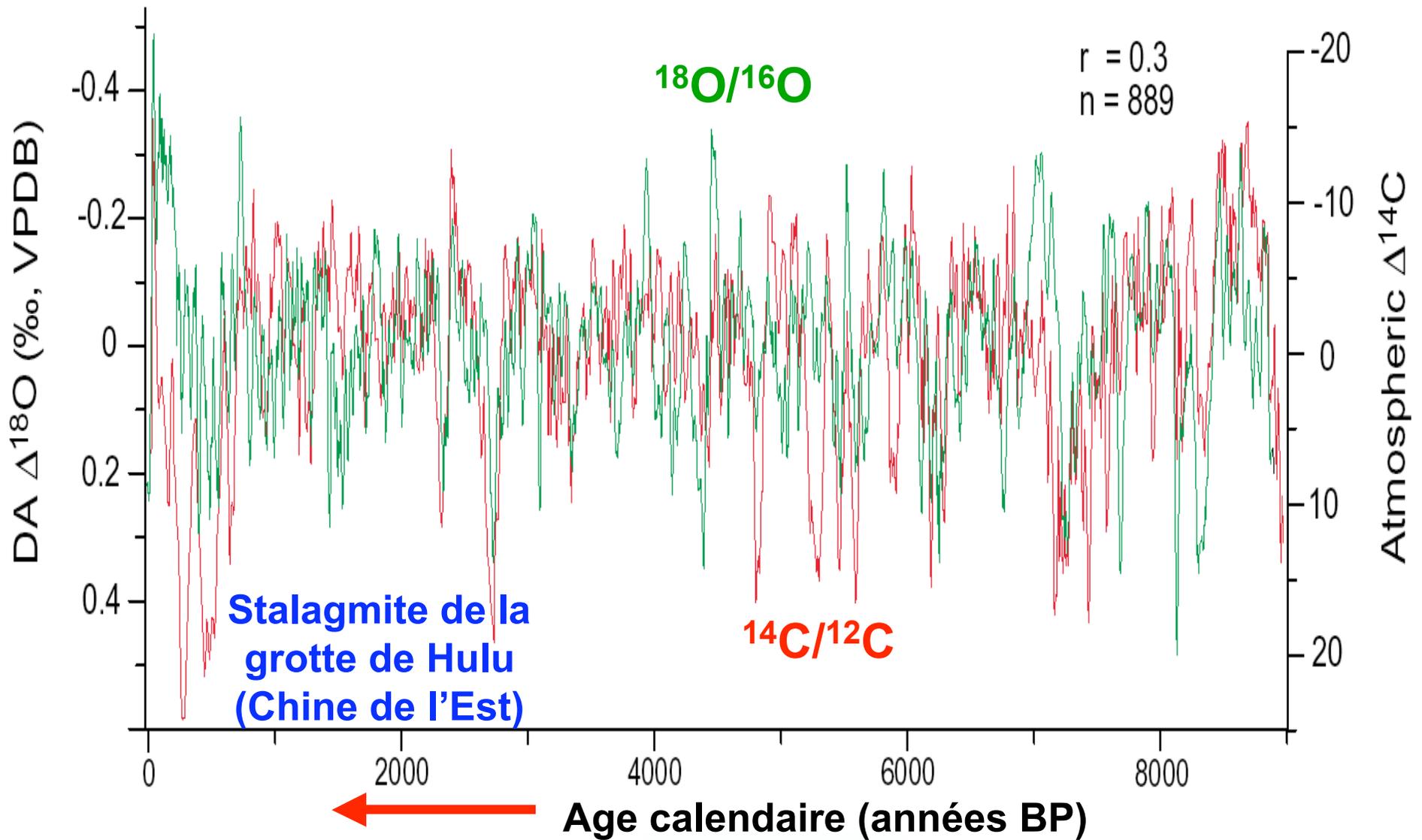
# Les forçages climatiques sur 10 millénaires (Holocène)



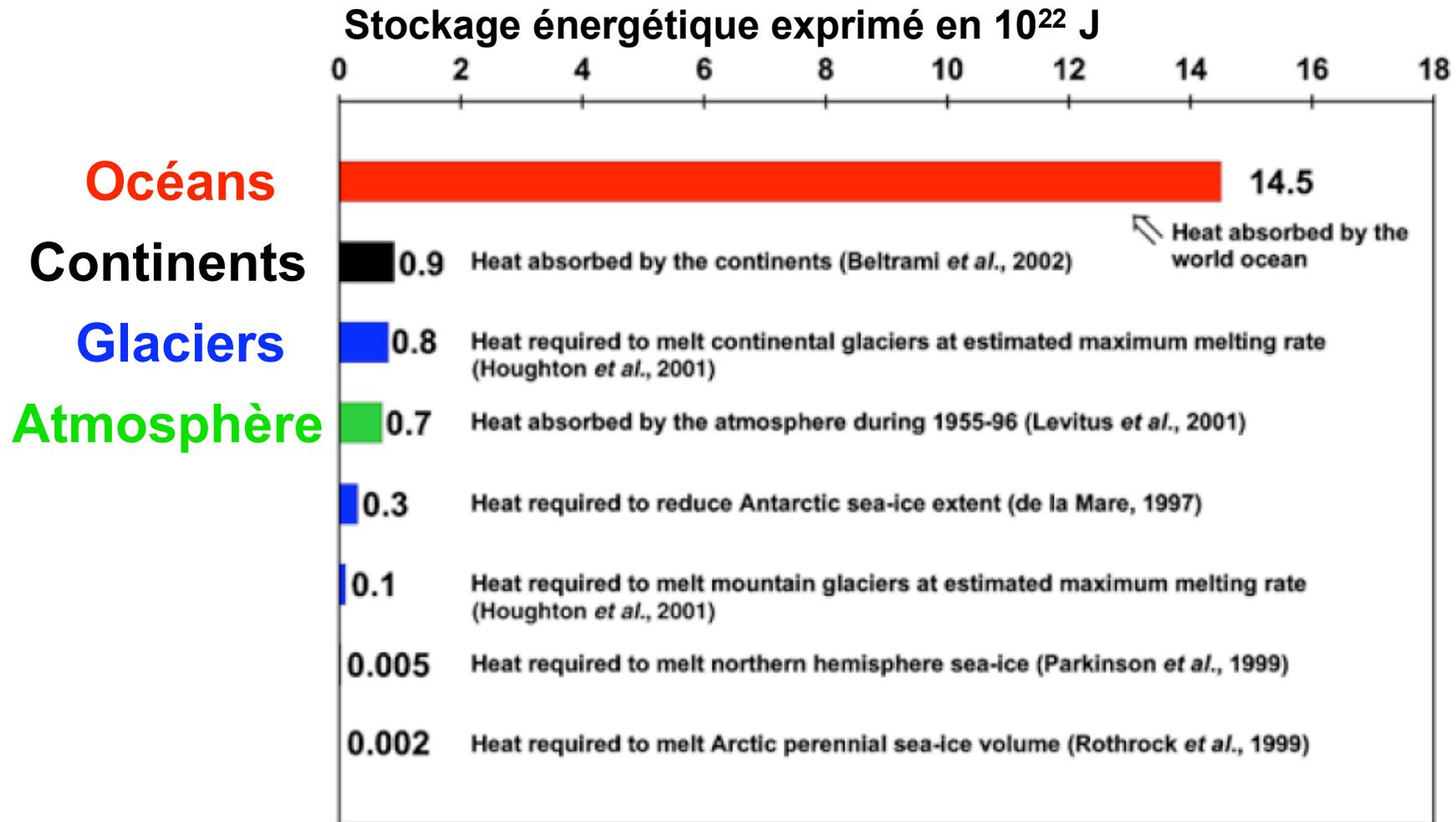
# Brèves périodes de mousson asiatique faible surimposées à une diminution à long terme



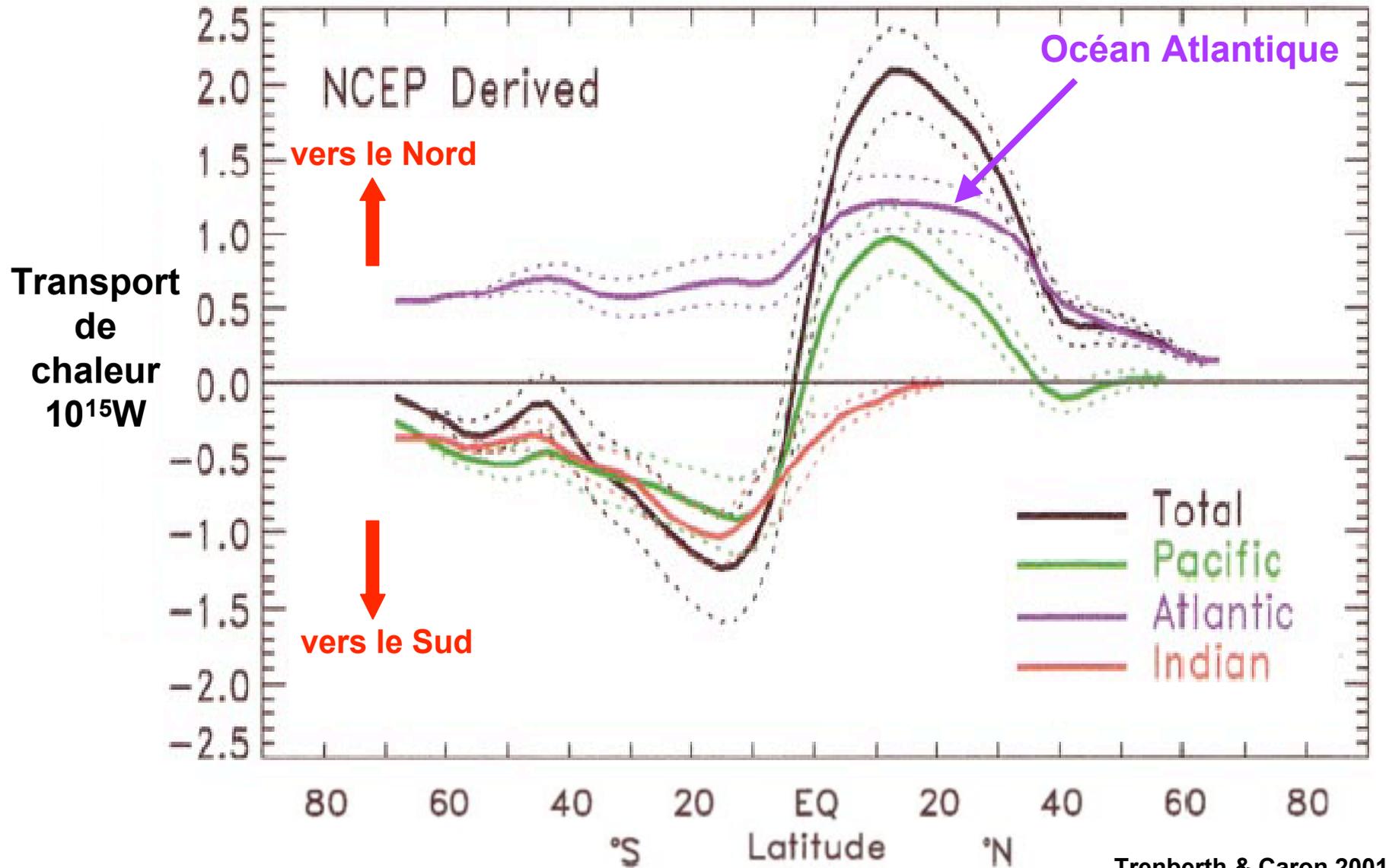
# Une partie des « hautes fréquences » pourrait être liée aux variations de l'activité solaire



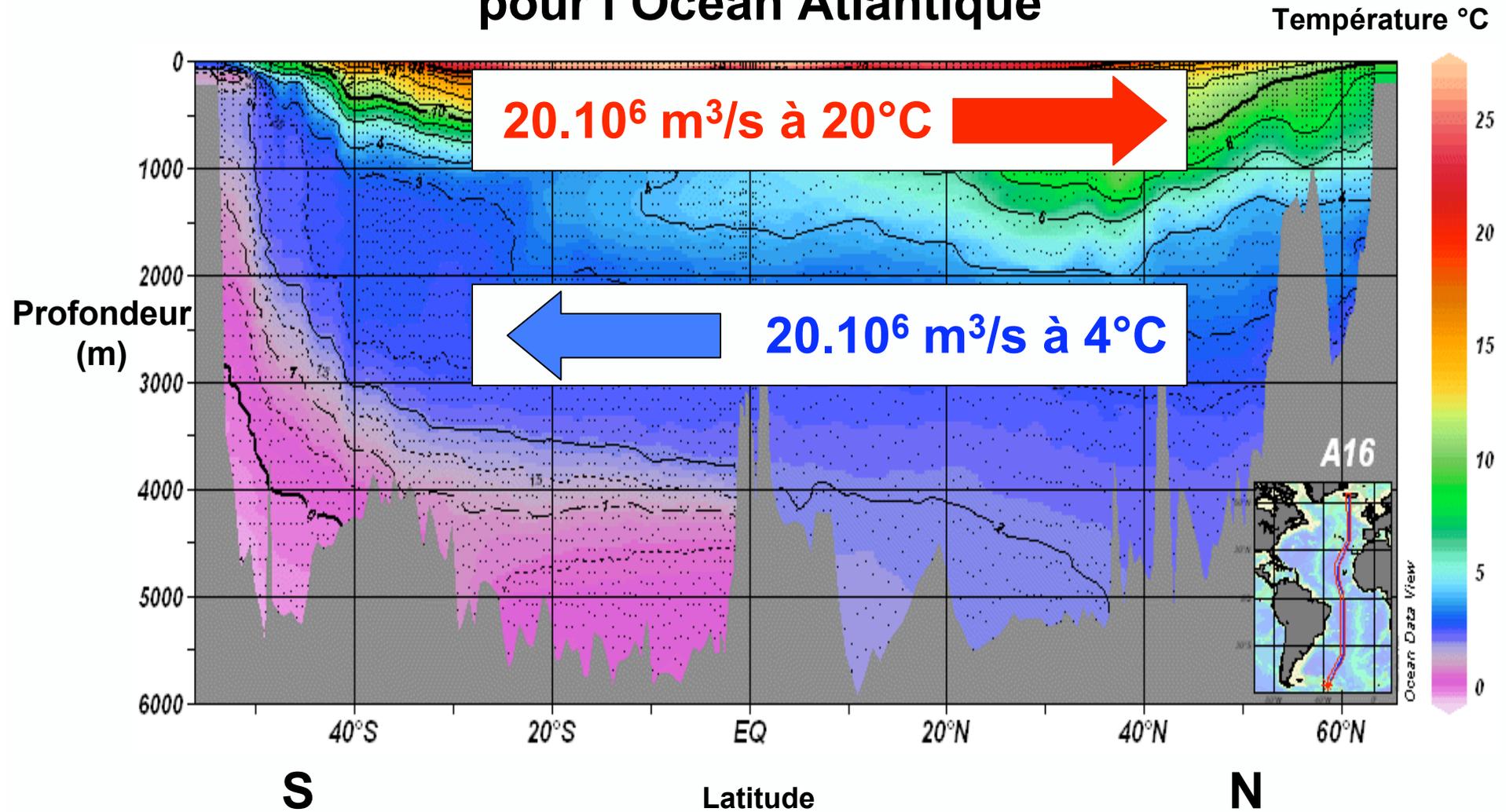
# L'océan se réchauffe et stocke l'essentiel de l'excès de chaleur (1955-1998)



# Echanges méridiens de la chaleur

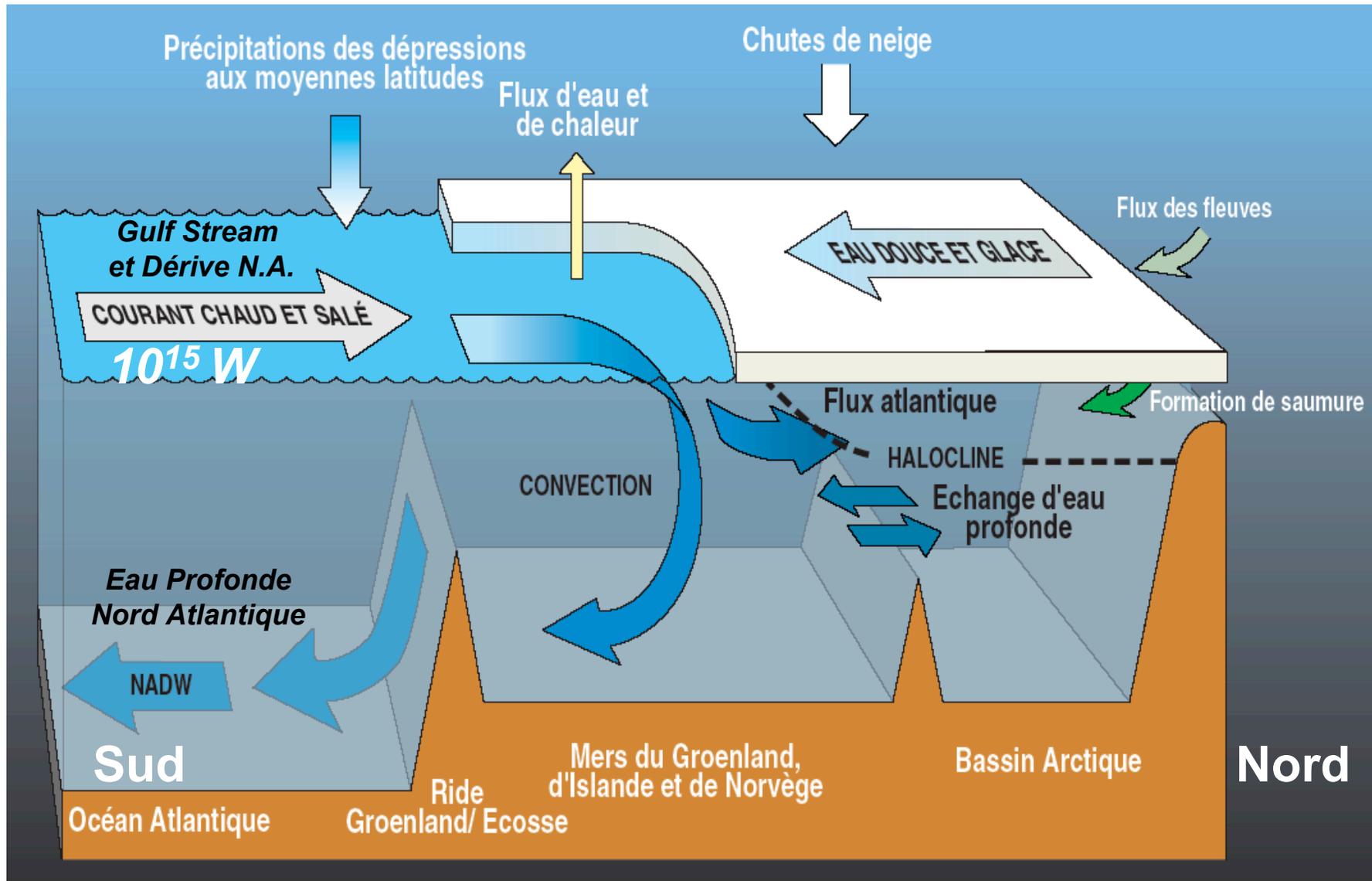


# Estimation du flux de chaleur méridien pour l'Océan Atlantique



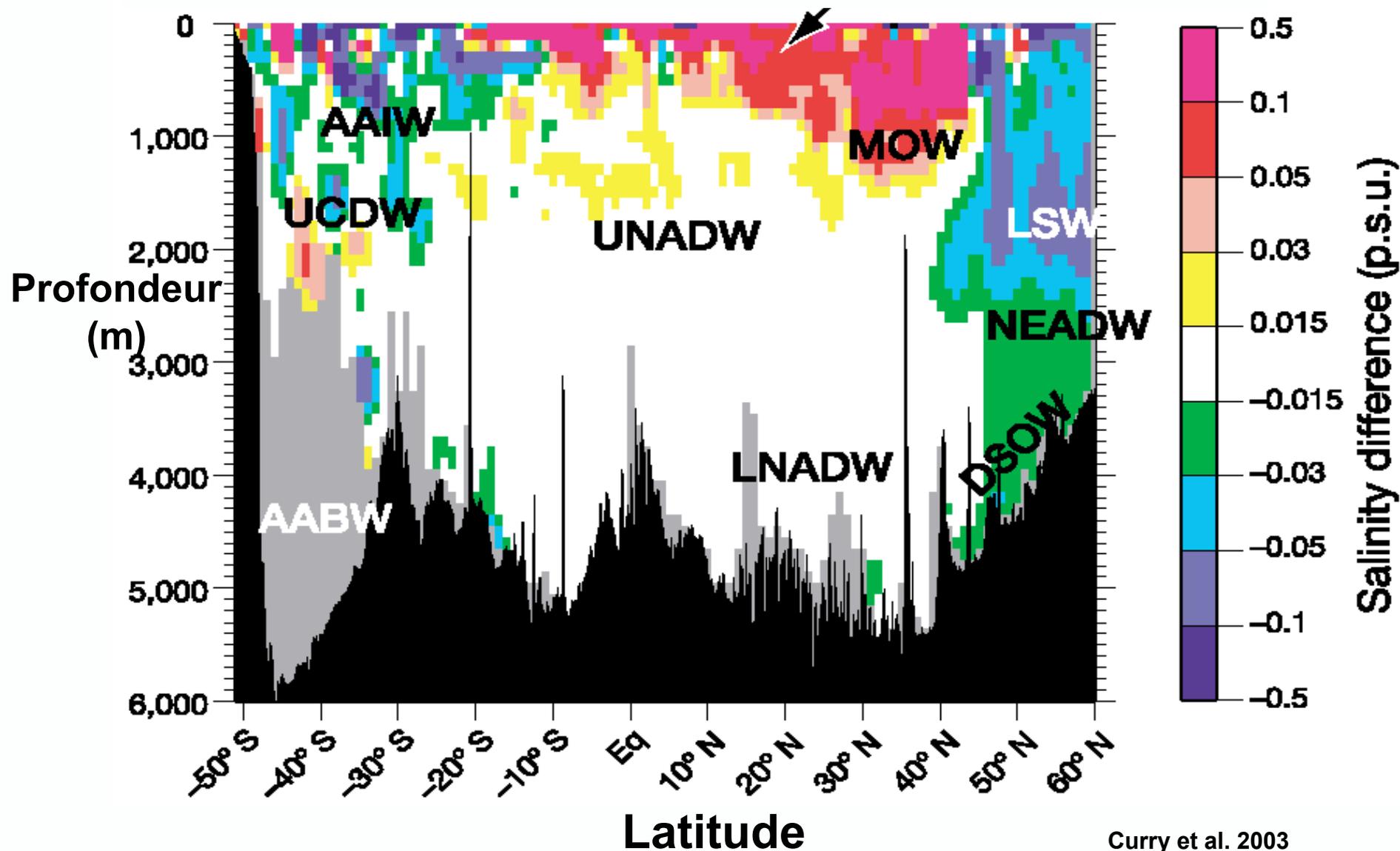
$$F_{chaleur} = c \cdot \rho \cdot \frac{dV}{dt} \cdot (T_N - T_S) \approx 1,2 \cdot 10^{15} \text{ W}$$

# La plongée d'eau profonde est sensible aux variations de densité de l'eau de mer (T et S)

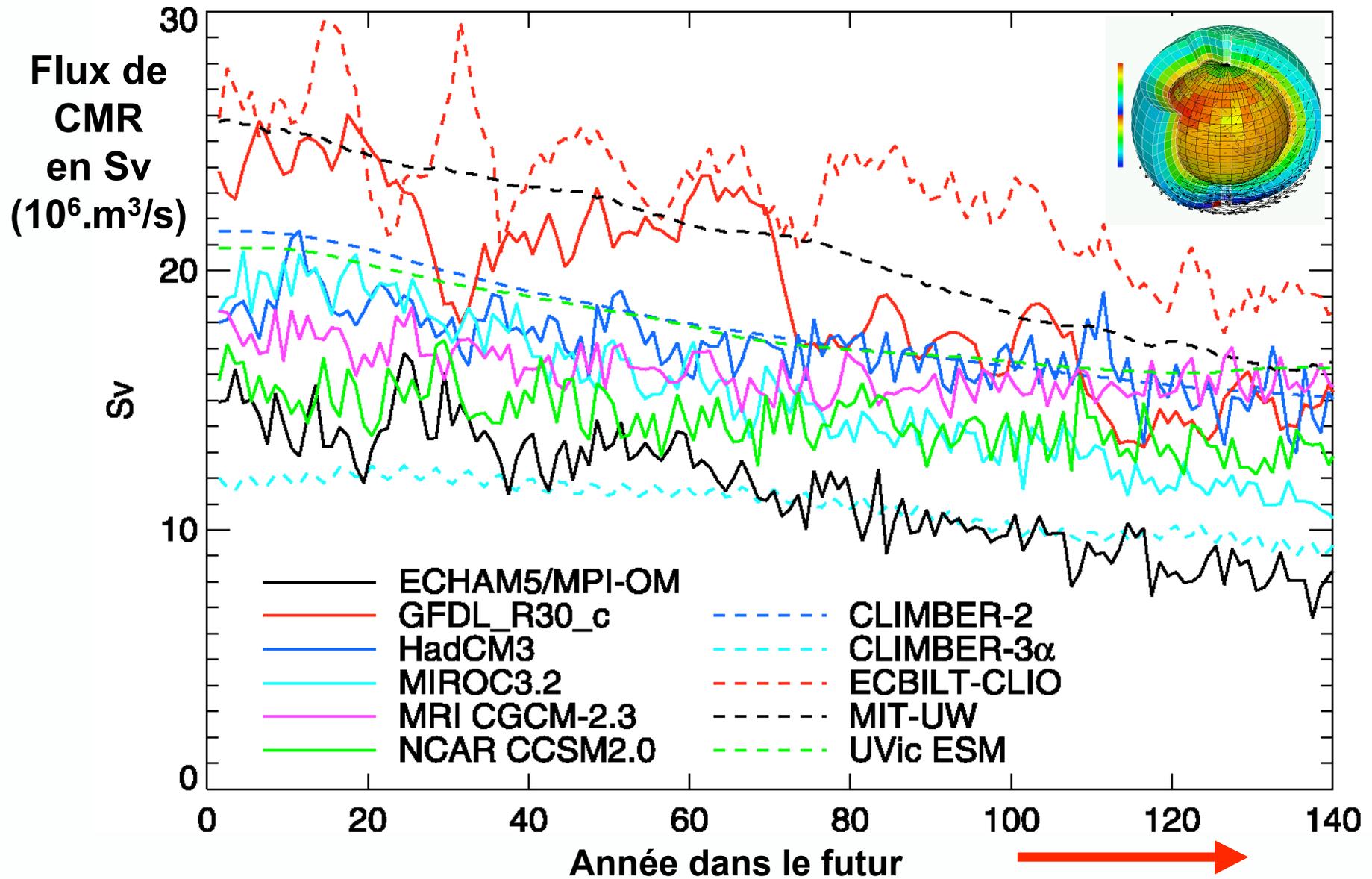


d'après Tomczak & Godfrey, 2003

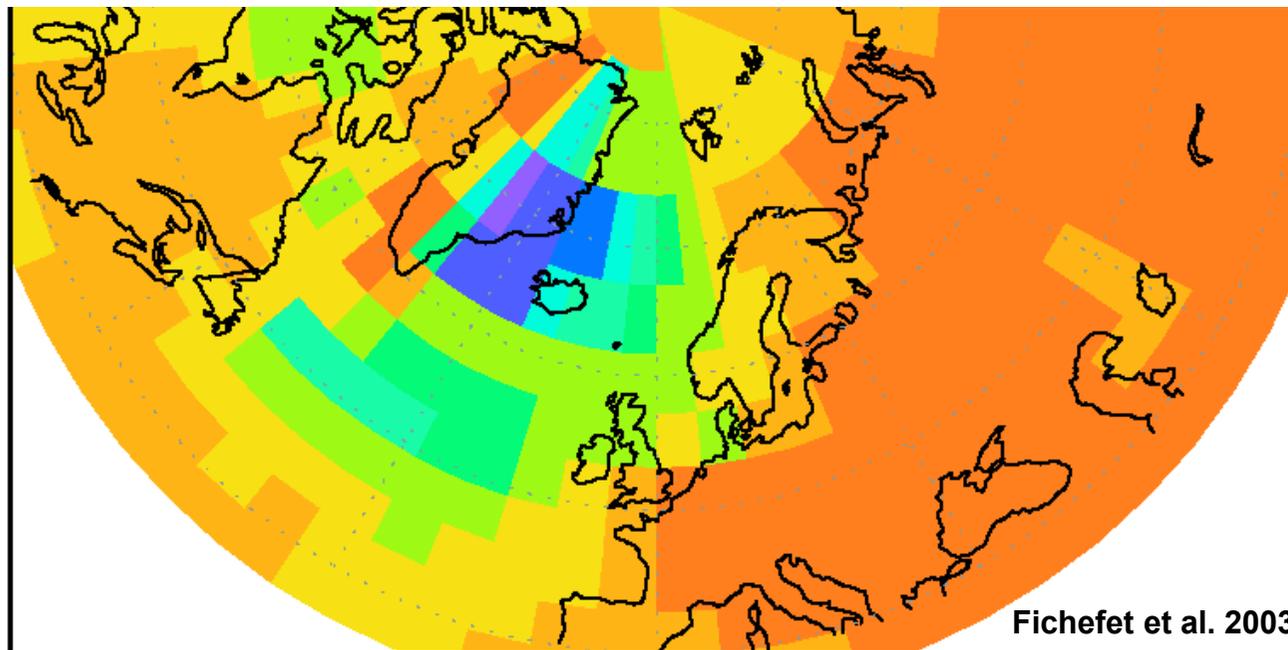
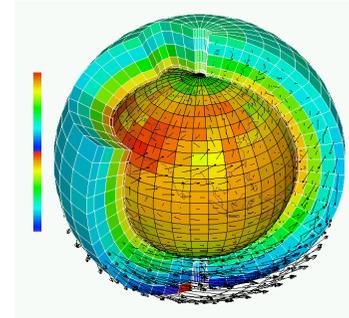
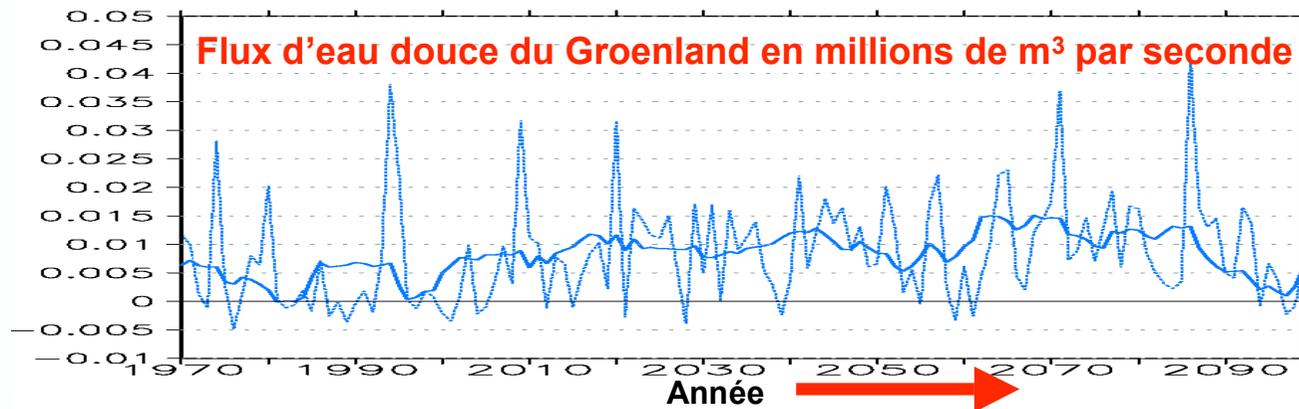
# En 40 ans des variations systématiques de la salinité de l'Océan Atlantique



# Les modèles couplés O-A simulent une chute de l'intensité de la circulation méridienne de renversement (MOC)



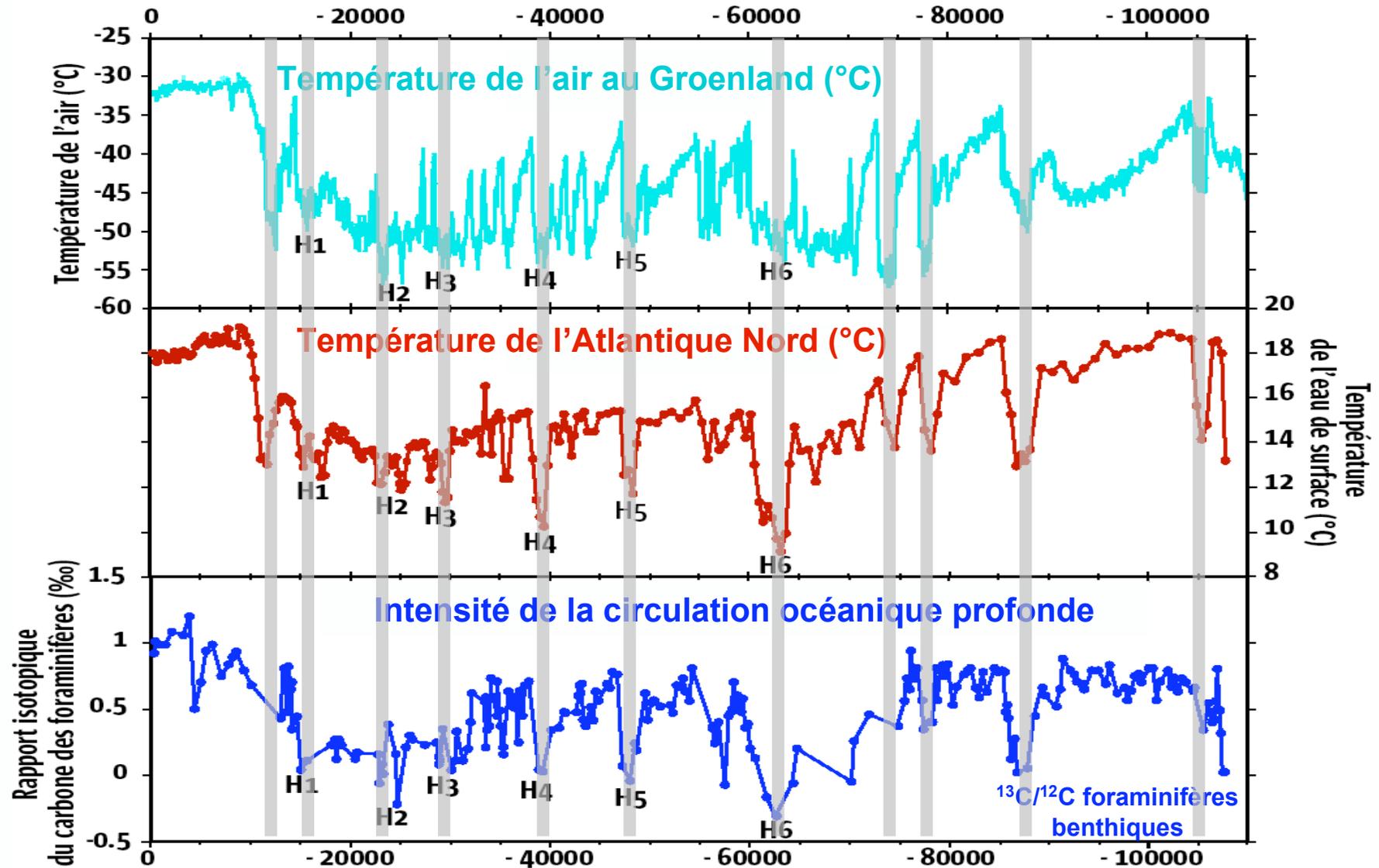
# La fonte des glaces du Groenland pourrait même conduire à une anomalie thermique régionale



Anomalie de température (°C) atmosphérique à la fin du 21ème siècle

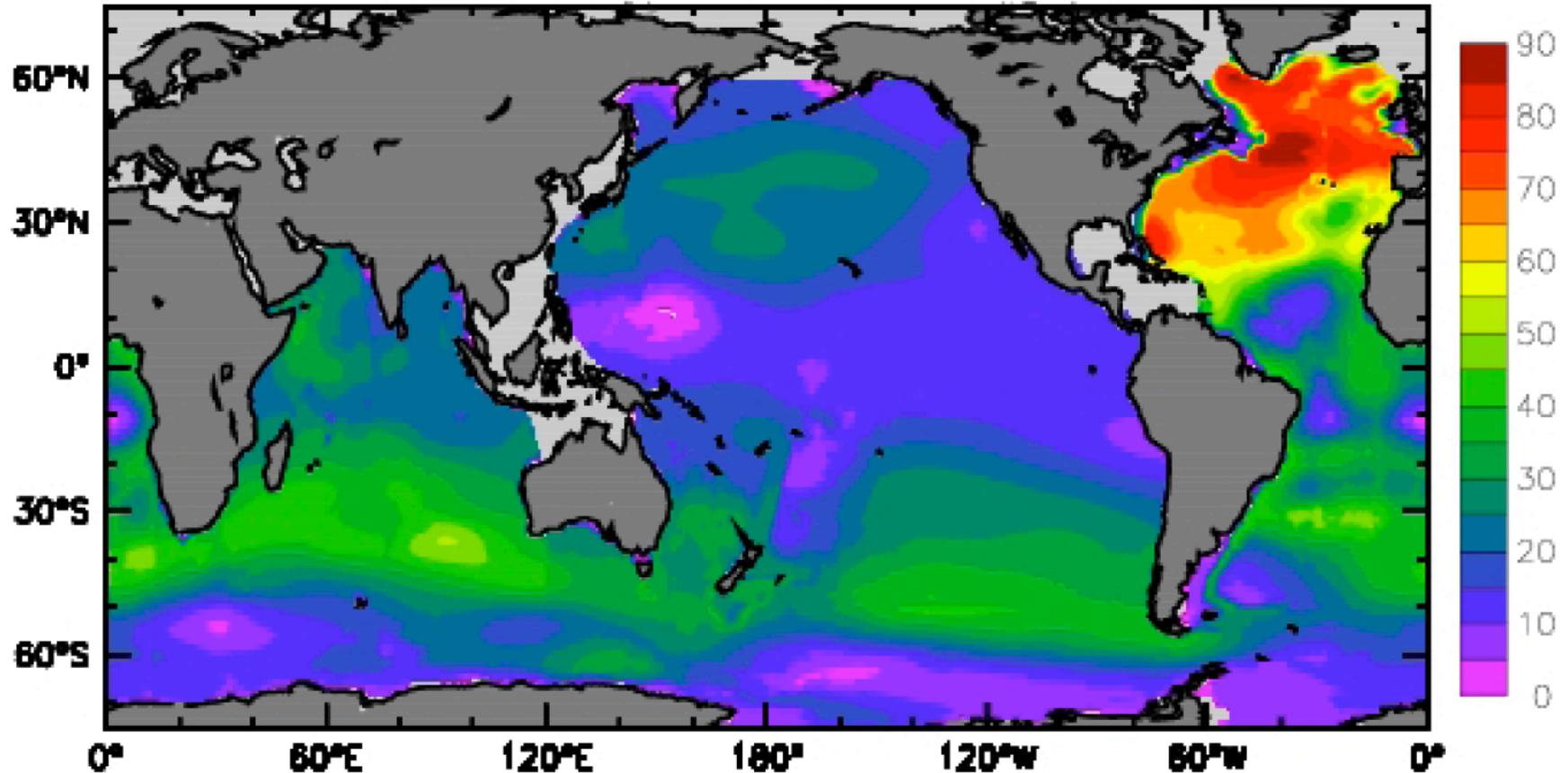


# Le climat est sensible aux instabilités du flux d'eau douce vers l'océan (ex. des événements de Heinrich)



← Age Calendaire (années B.P.)

## L'océan stocke aussi une grande partie du CO<sub>2</sub> anthropique (inventaire en mol/m<sup>2</sup> pour 1994)



Sabine et al. 2004

Plusieurs effets sont de nature à faire décroître la capacité de l'océan à pomper le CO<sub>2</sub>: le réchauffement et l'acidification des eaux de surface, ainsi que la diminution de la circulation profonde

## Quelques conclusions

- Les variations naturelles de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre, des flux volcaniques et de l'activité solaire sont à l'origine de nombreux types de variations climatiques à différentes échelles de temps et avec des amplitudes variables,
- Une partie importante du refroidissement observé pendant les glaciations ( $\approx 5-6^{\circ}\text{C}$ ), en particulier sous les tropiques et dans l'Hémisphère Sud ( $\approx 2-3^{\circ}\text{C}$ ), peut s'expliquer par la baisse des teneurs en gaz à effet de serre, notamment le  $\text{CO}_2$  (baisse de 100 ppm),
- A l'échelle du dernier millénaire les forçages du Soleil et des volcans sont probablement à l'origine de petites variations ( $< 1^{\circ}\text{C}$ ) de la température moyenne (par ex. l'oscillation « Petit Age Glaciaire - Optimum Médiéval »)
- Depuis le 19e siècle les activités humaines ont considérablement augmenté la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$  ...) conduisant à un forçage radiatif de l'ordre de  $3 \text{ W/m}^2$ , réduit à environ  $1,5 \text{ W/m}^2$  en tenant compte des forçages négatifs associés,
- La combinaison des différentes causes naturelles et anthropiques permet d'expliquer le réchauffement mondial observé depuis un siècle:
  - L'augmentation de l'éclairement solaire et la diminution de la fréquence des injections de poussières et aérosols d'origine volcanique ont probablement contribué à la première phase du réchauffement jusqu'en 1940,
  - La deuxième phase du réchauffement observée depuis 1980 dépasse la variabilité naturelle du Soleil et des volcans, mais peut s'expliquer facilement par le forçage des gaz à effet de serre,
- Des observations variées (T,S, courants, pH ...) indiquent que l'océan est affecté par les changements actuels. Le recul manque encore pour distinguer la dynamique intrinsèque naturelle des effets possibles des forçages anthropiques.

## Pour en savoir plus :

*La Recherche*

Dossiers n° 17

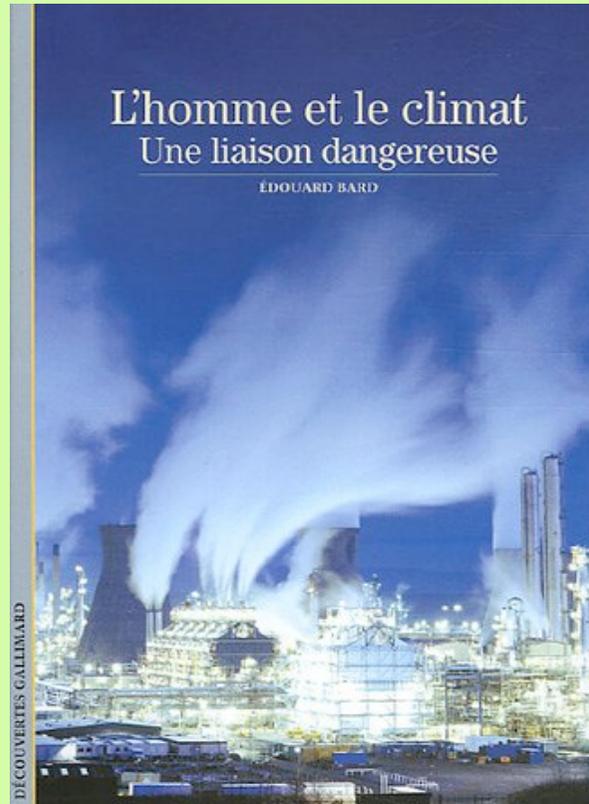
nov. - dec. 2004, jan. 2005



*Découvertes Gallimard*

(128 pages)

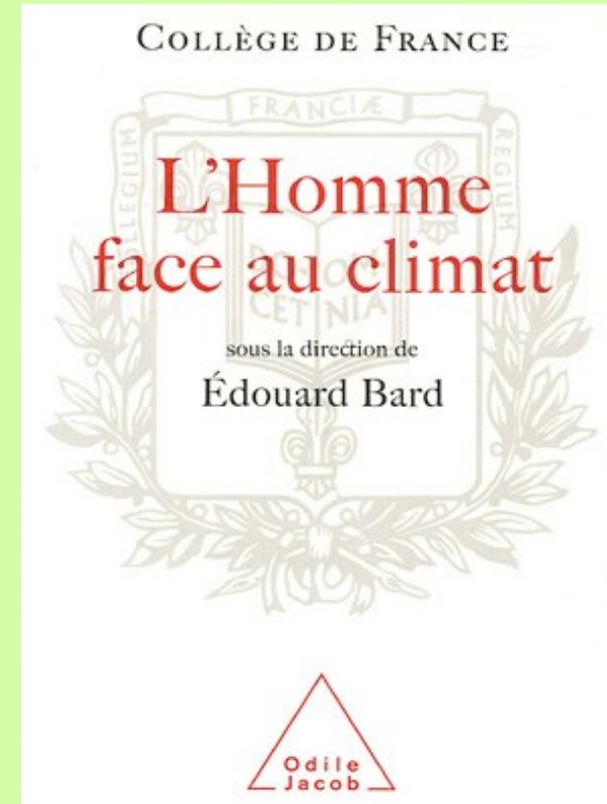
N°482, novembre 2005



*Odile Jacob*

(448 pages)

février 2006



Articles disponibles au téléchargement sur le site web:

<http://www.college-de-france.fr/>