



**UCL**

Université  
catholique  
de Louvain

**Institut d'Astronomie et de Géophysique G. Lemaître**  
**Chemin du Cyclotron, 2**  
**1348 Louvain-la-Neuve**

# **De la THÉORIE ASTRONOMIQUE au DÉVELOPPEMENT DURABLE**

**A. Berger**

Université d'été, Sauvons le climat,  
Cabourg le 27 septembre 2008

EST-IL POSSIBLE QUE LES  
ACTIVITES HUMAINES  
INFLUENCENT  
L'EVOLUTION NATURELLE  
DU CLIMAT AUSSI A  
L'ECHELLE GEOLOGIQUE ?

Berger, 1990's

2007

CHANGEMENTS CLIMATIQUES 2007 - LES ÉLÉMENTS SCIENTIFIQUES



CHANGEMENTS CLIMATIQUES 2007  
LES ÉLÉMENTS SCIENTIFIQUES



Contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport d'évaluation  
du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

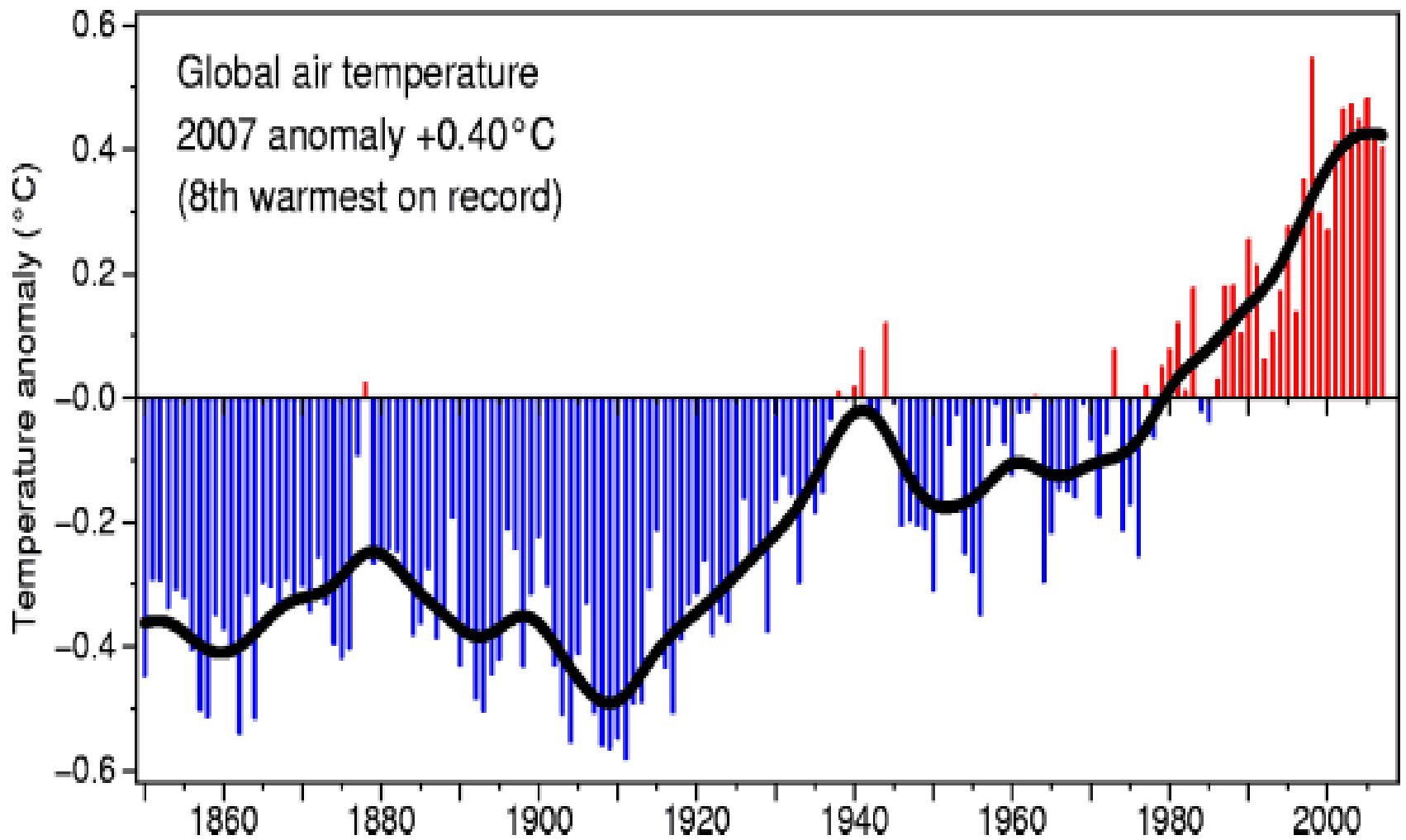


Résumé à l'intention des décideurs, Résumé technique et Questions fréquentes

**GROUPE D'EXPERTS  
INTERGOUVERNEMENTAL SUR  
L'ÉVOLUTION DU CLIMAT**

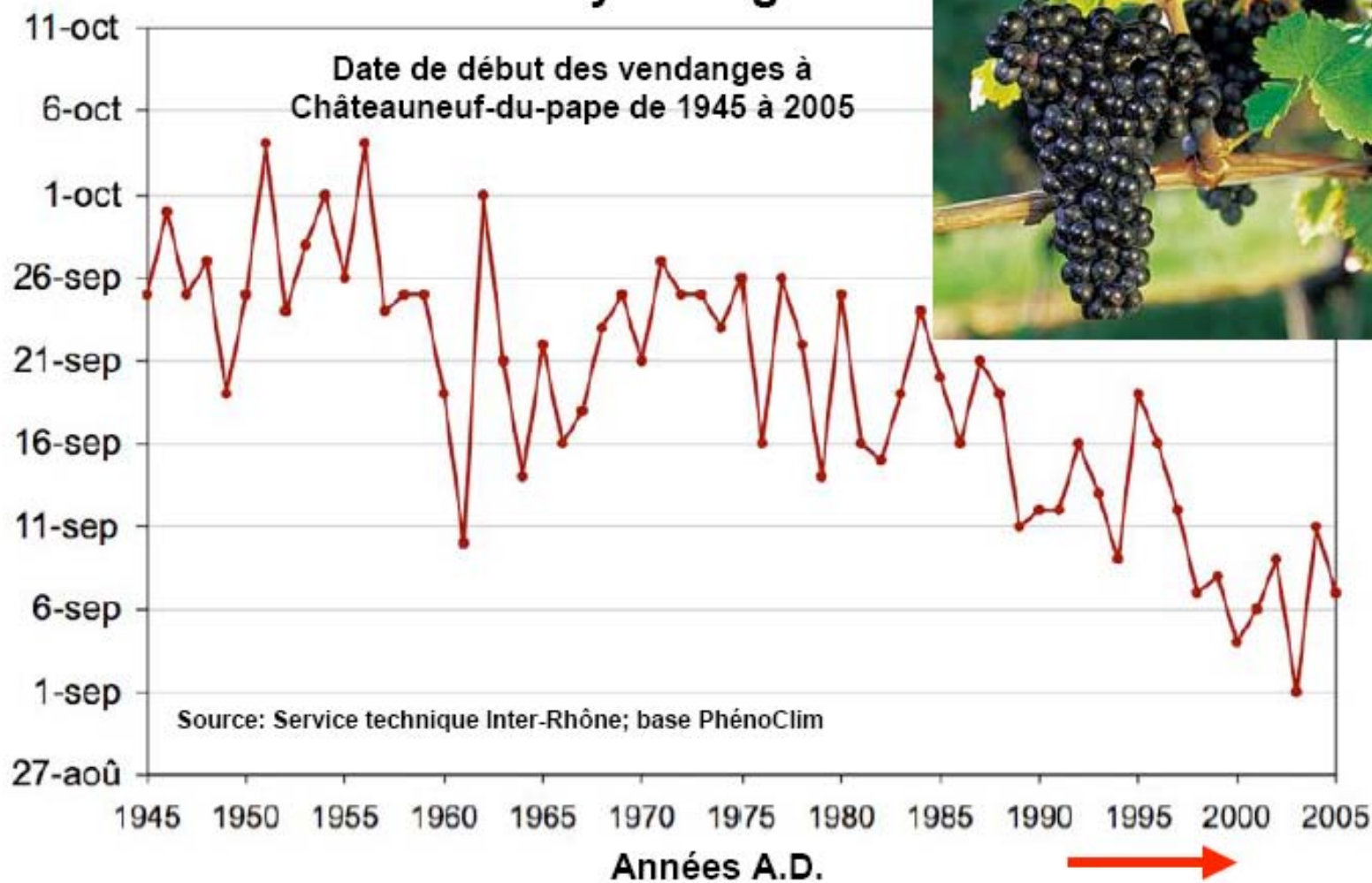
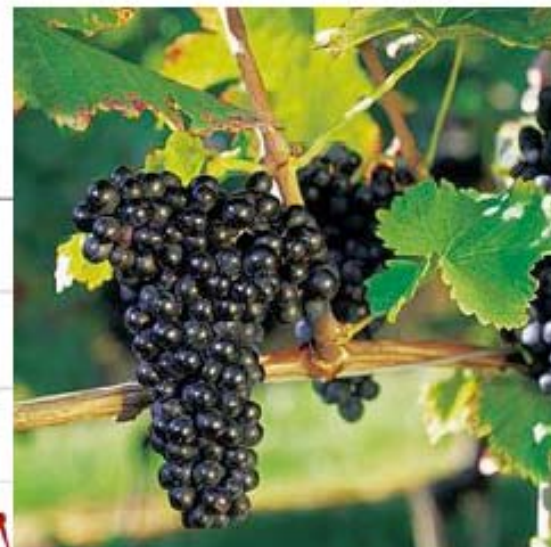
**Prix Nobel de la Paix 2007.**

- 1. LE RÉCHAUFFEMENT GLOBAL EST RÉEL  
(ENVIRON 1°C SUR LES DERNIÈRES CENT ANNÉES).**
- 2. UNE GRANDE PARTIE DE CE RÉCHAUFFEMENT EST  
DUE AUX ACTIVITÉS HUMAINES.**



Climatic Research Unit, University of East Anglia, Jones et al., 2008

## Changements écologiques : avancement du cycle végétatif



## Northern Hemisphere Sea-Ice Extent Anomaly ( $10^6 \text{ km}^2$ ) for 1973–10/2006

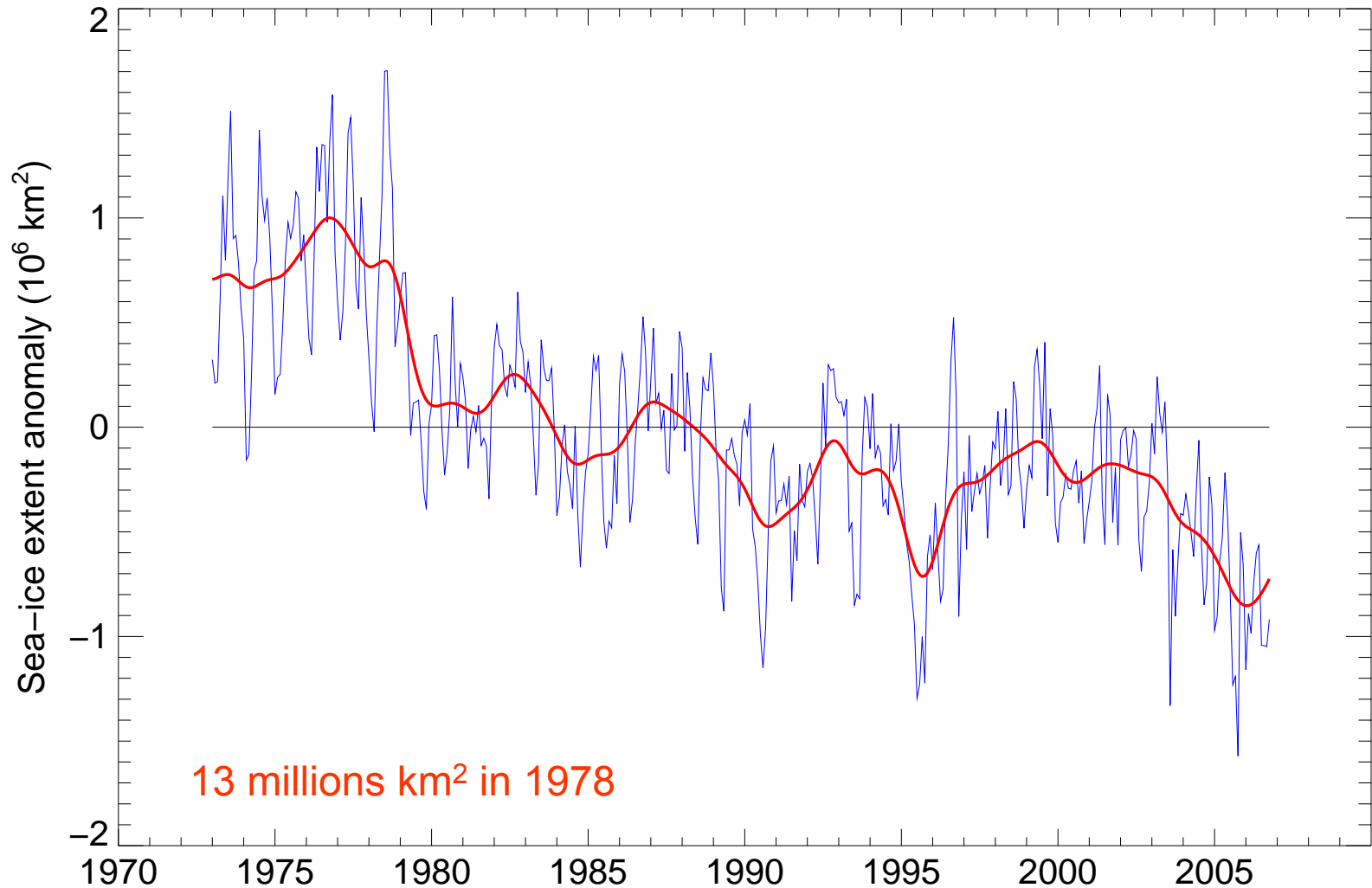
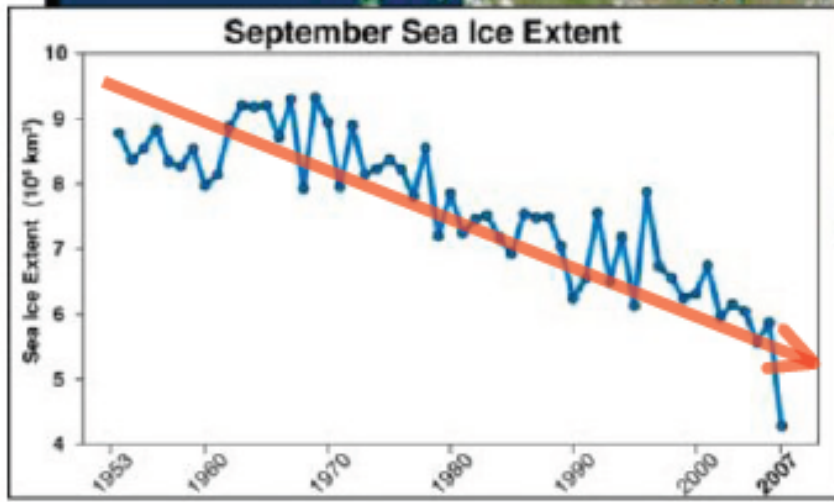
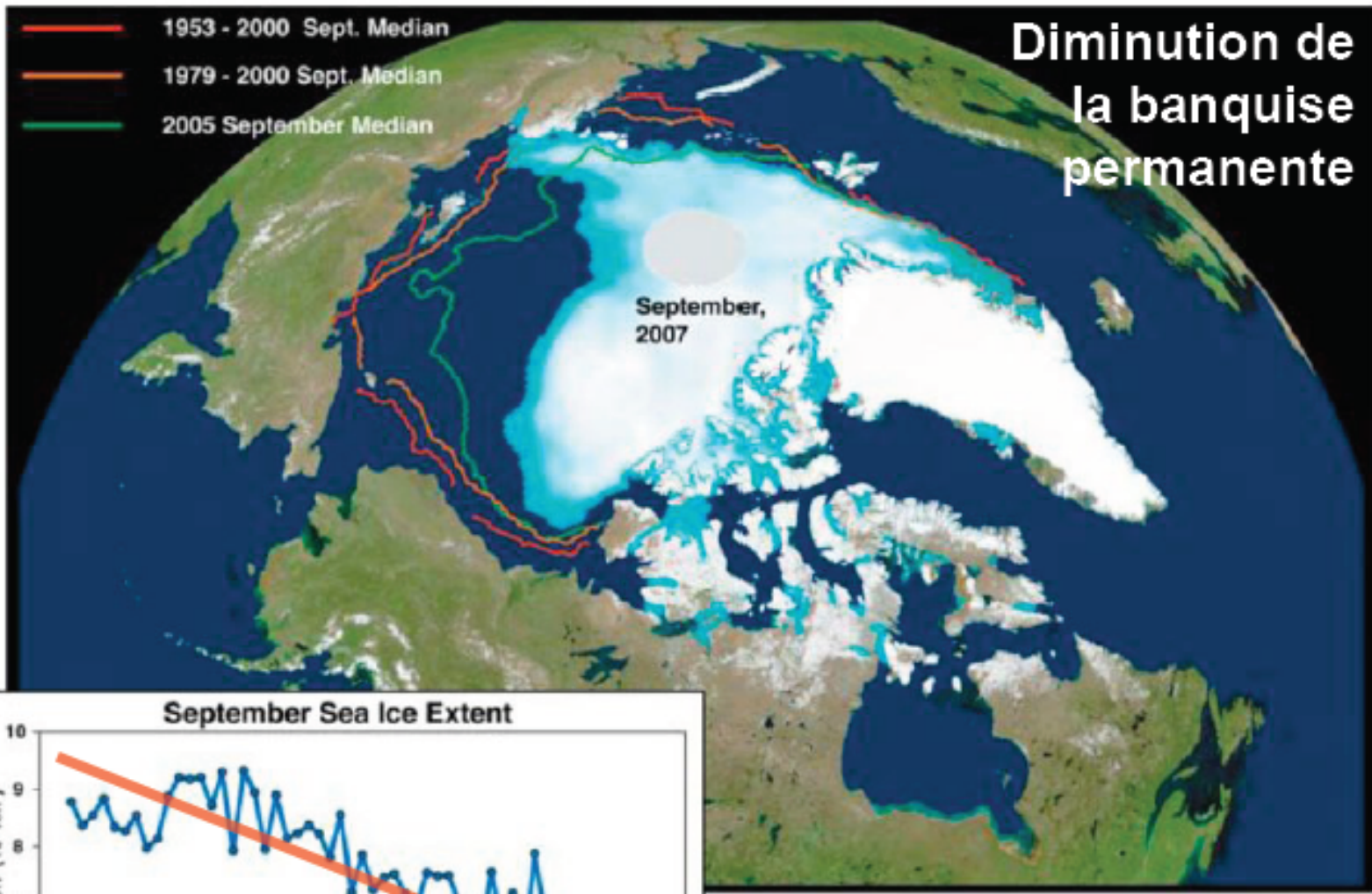


Figure 5.a: Monthly Northern hemisphere sea ice extent anomalies to October 2006 relative to the 1973-2006 average. Jones Ph., CRU, 2007

**The character of 2007's sea ice melt is unique covering the entire Arctic sector.**

# Diminution de la banquise permanente



Stroeve et al. 2008



**Inquiétudes pour plusieurs espèces,  
dont certains grands mammifères**



**MORSE**



**OURS BLANC**





1864

## glacier d'Argentière



1896



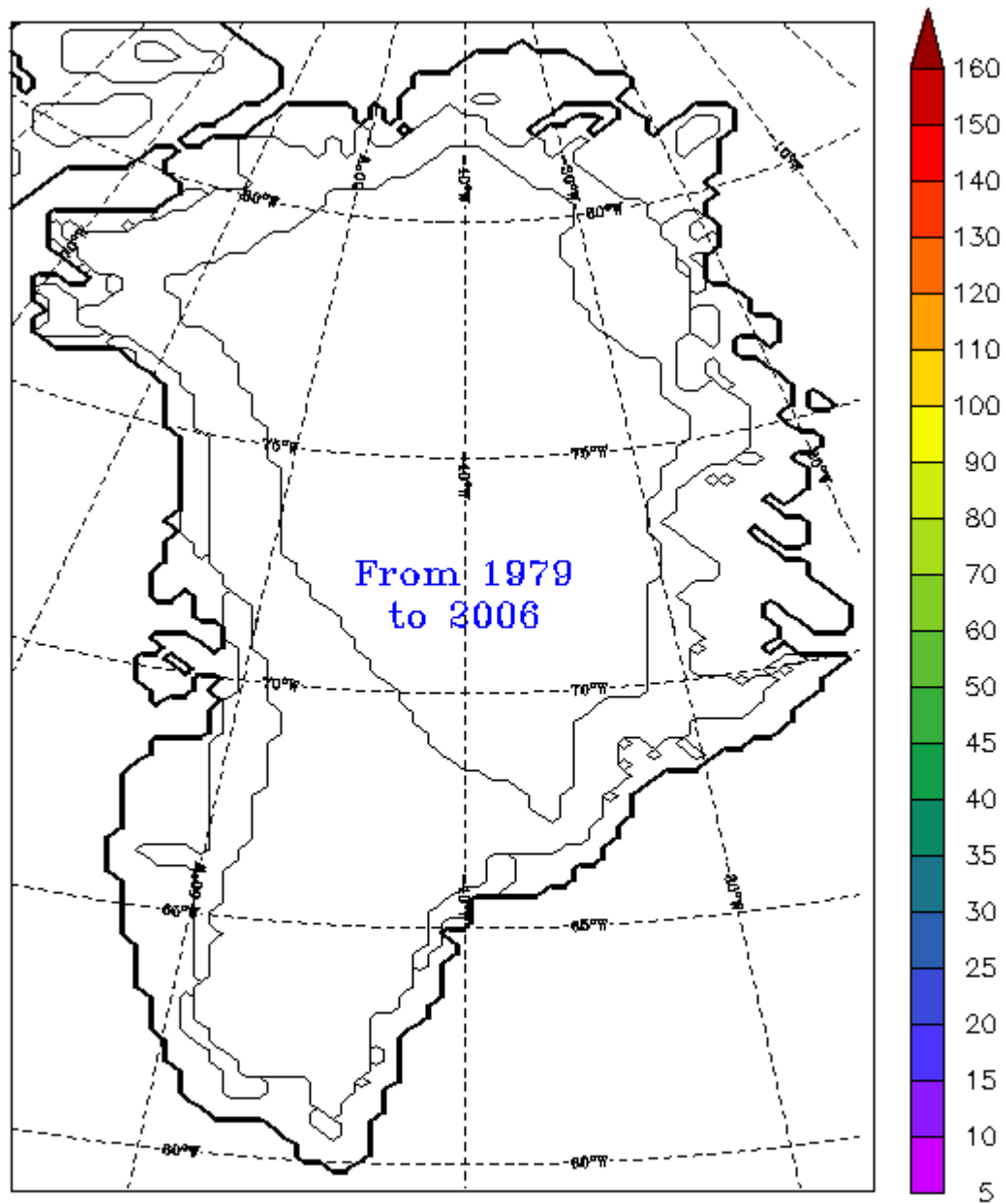
1995

Fily, 2006-ERCA



On the left is a photograph of Muir Glacier (Alaska) taken on August 13, 1941, by glaciologist William O. Field; on the right, a photograph taken from the same vantage on August 31, 2004, by geologist Bruce F. Molnia of the United States Geological Survey (USGS).

According to Molnia, between 1941 and 2004 the glacier retreated more than twelve kilometers (seven miles) and thinned by more than 800 meters.



Number of melt days [1979–2006]

Fettweis, 2007

## **Hausse du niveau de la mer**

**-au cours du 20ème siècle : 1.5- 2 mm/an**

**- au cours des années 1990 : ~3 mm/an**

Cazenave A., LEGOS-Toulouse, Oct 2004

# Expansion thermique des océans +2 mm/an

Autres Contributions à la hausse du niveau de la mer au  
cours des années 1990

## Résultats récents

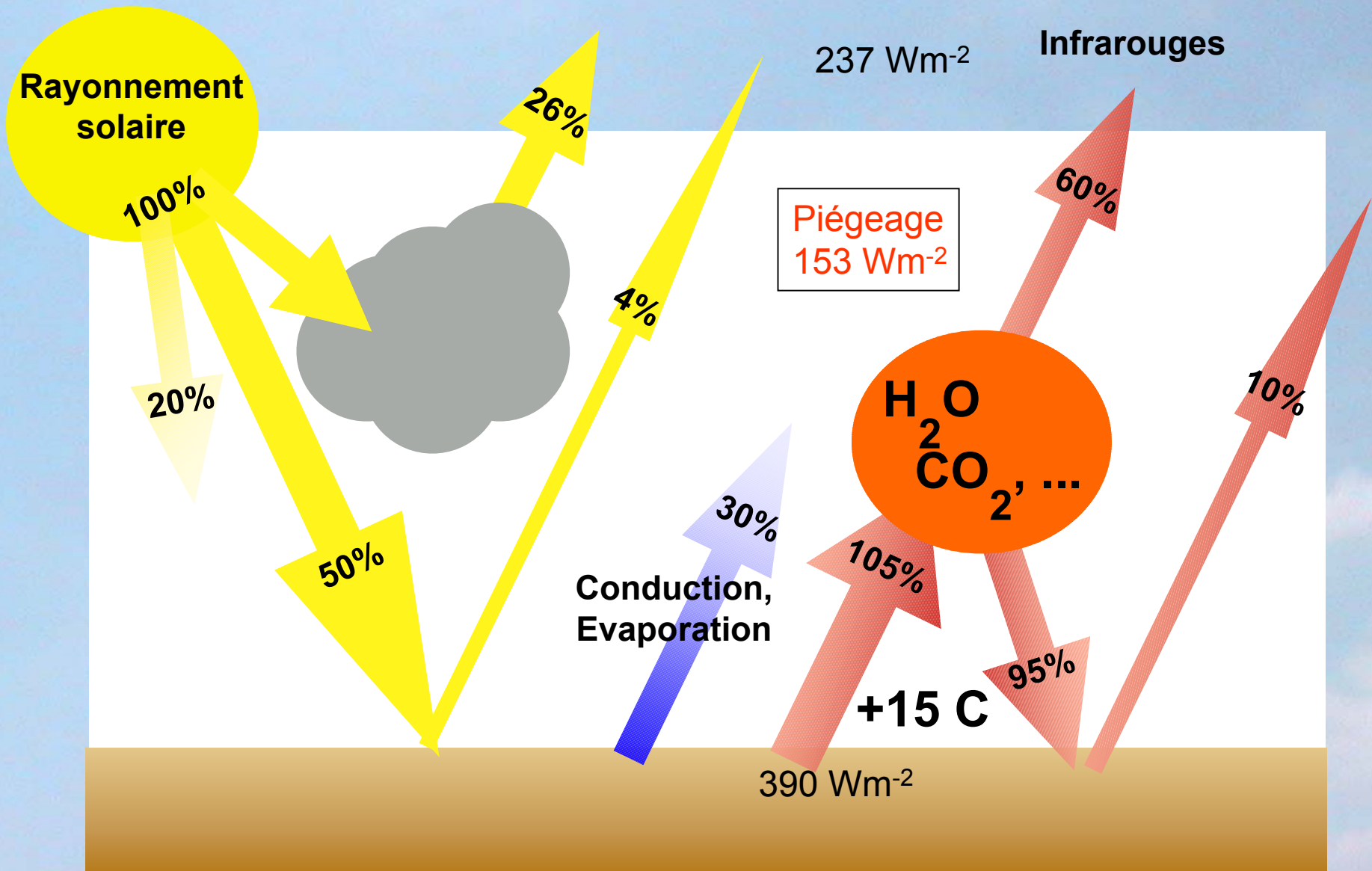
- GLACIERS de montagne : +0.5 mm/an
- CALOTTES POLAIRES :  
Groenland : +0.15 mm/an  
Antarctique : +0.20 +/- 0.05 mm/an (WA)  
total = + 0.35 mm/an
- EAUX CONTINENTALES : ~ 0.15 mm/an

TOTAL : ~1 mm/yr

Groupe d'Experts Intergouvernemental sur  
l'Évolution du Climat,  
Prix Nobel de la Paix 2007.

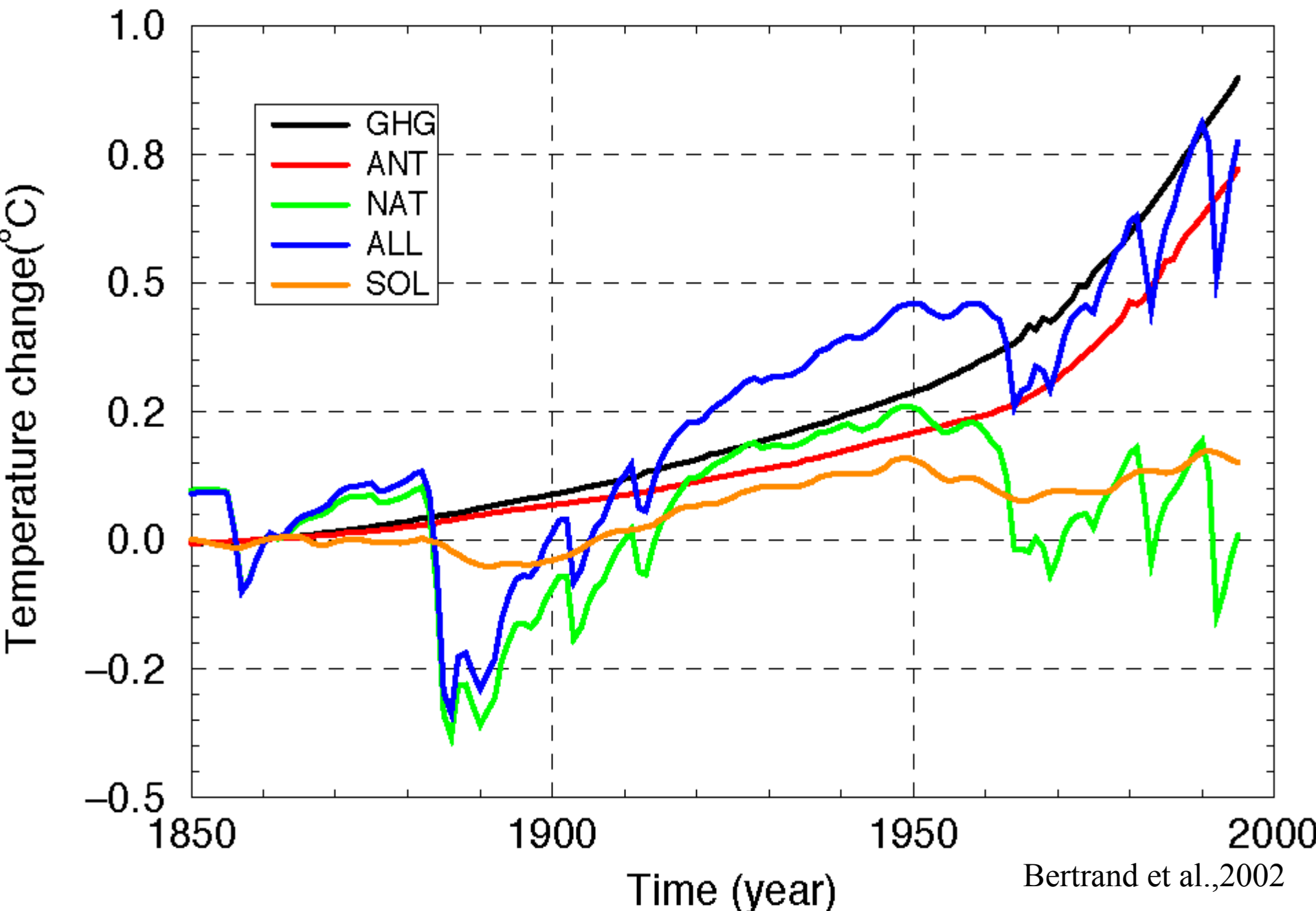
1. LE RÉCHAUFFEMENT GLOBAL EST RÉEL  
(ENVIRON 1°C SUR LES DERNIÈRES CENT ANNÉES).
2. **UNE GRANDE PARTIE DE CE RÉCHAUFFEMENT  
EST DUE AUX ACTIVITÉS HUMAINES.**

# Cycle de l'énergie et effet de serre



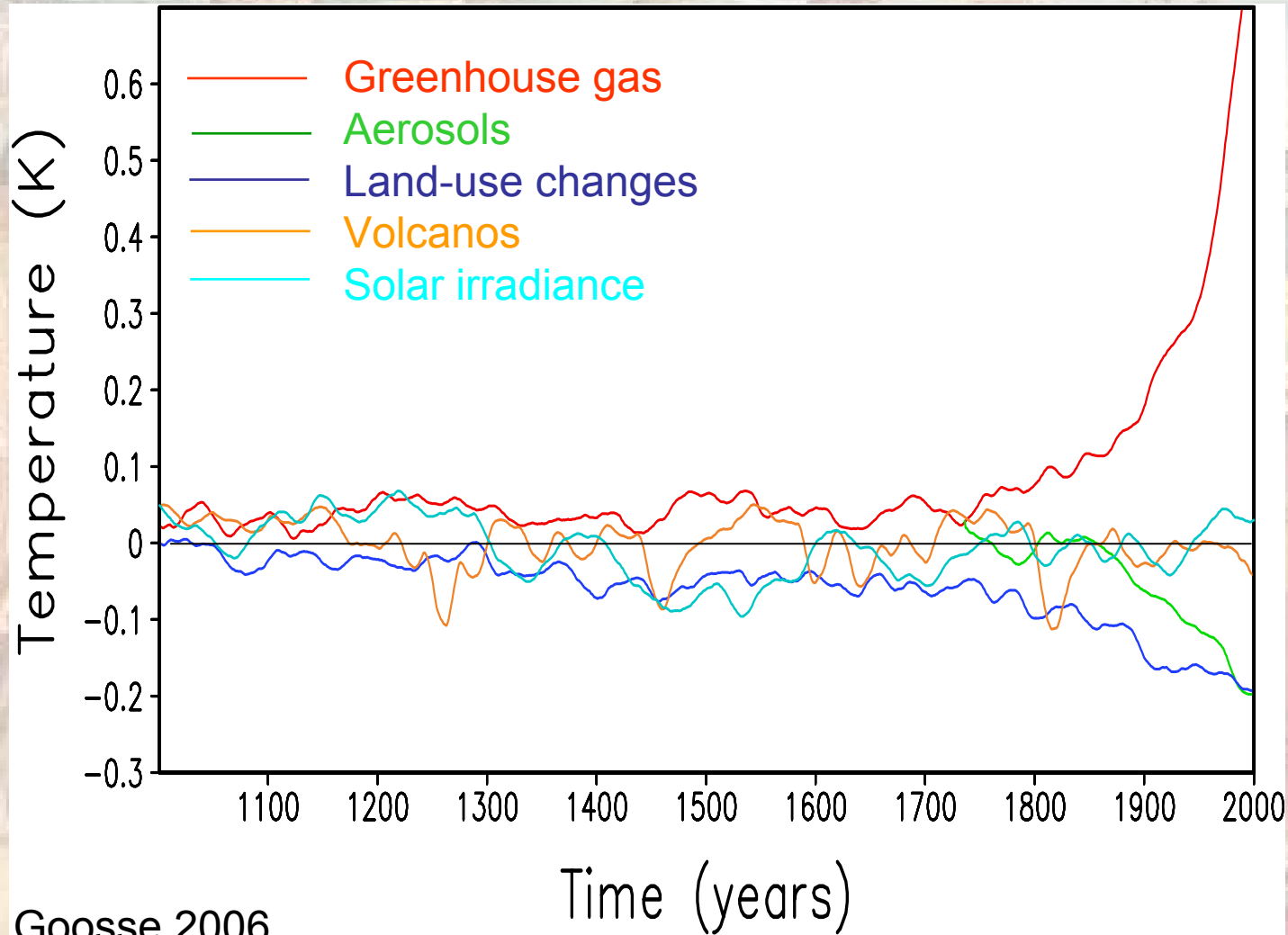


# Global air temperature change



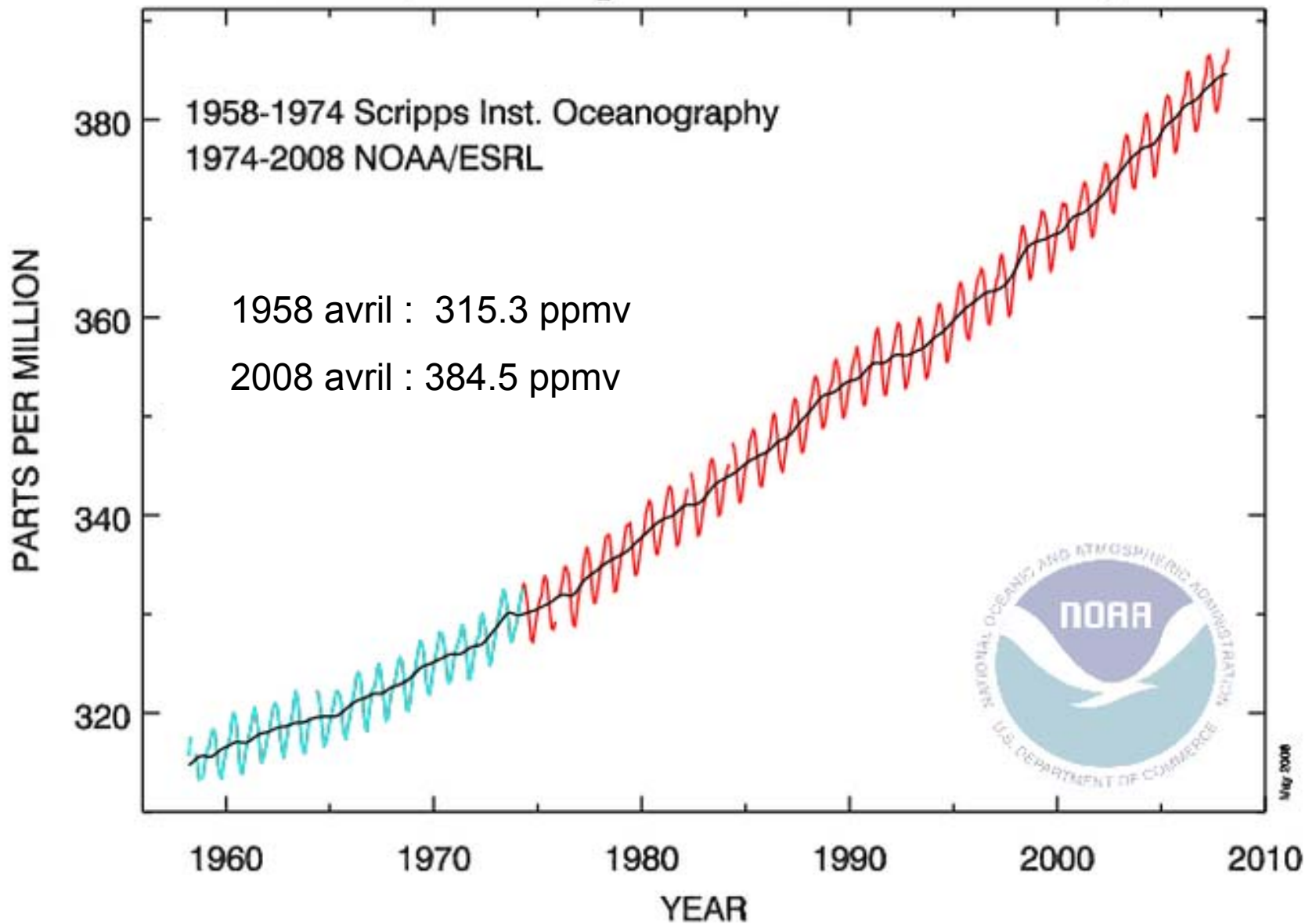
# Role of the various forcings

Annual mean temperature in the Northern Hemisphere simulated by ECBILT-CLIO-VECODE using only one forcing at a time

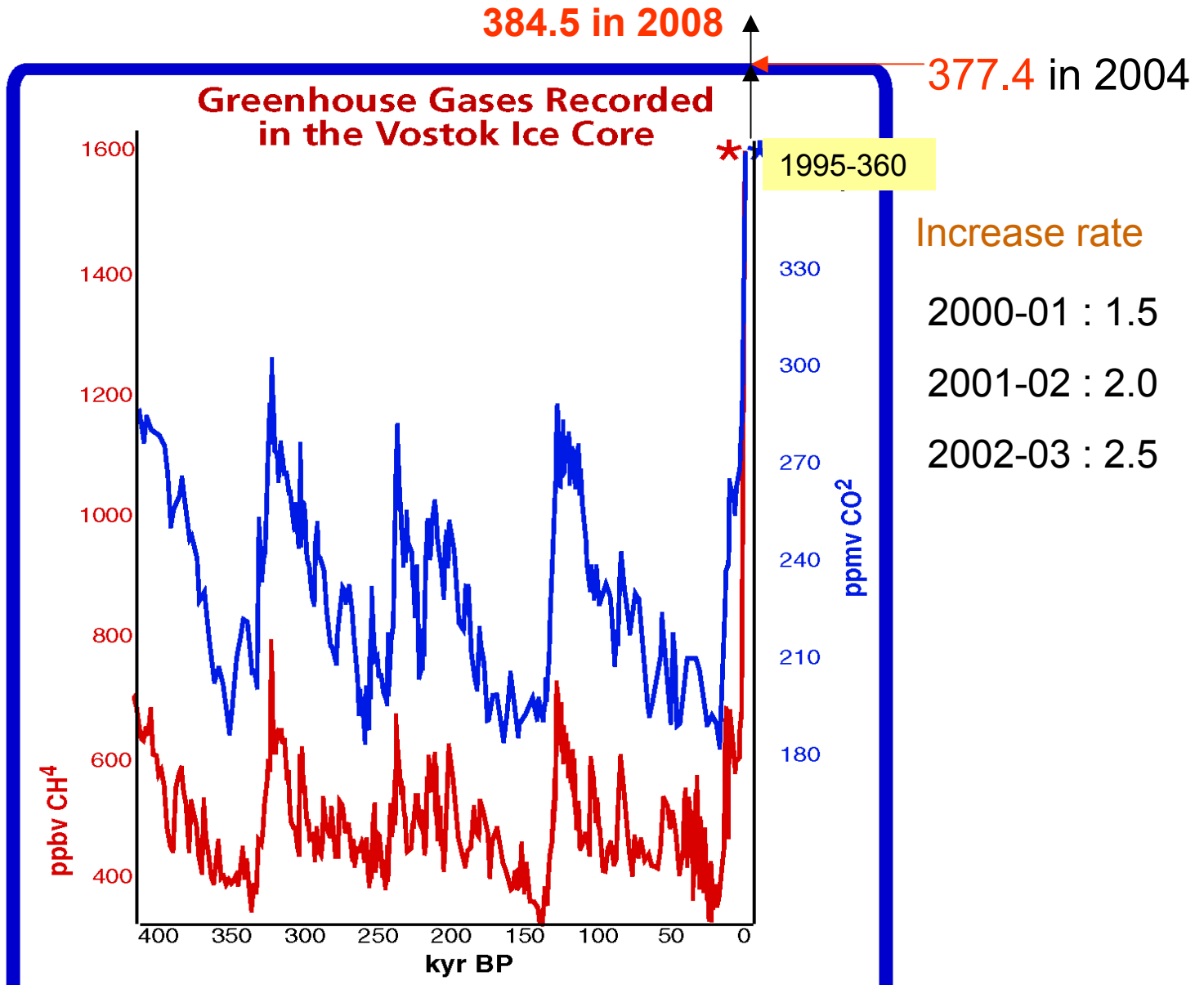


A 25-year running mean has been applied to the time series

# Atmospheric CO<sub>2</sub> at Mauna Loa Observatory



In 2003 :  
 465 ppmv CO<sub>2eq</sub>  
 375 ppmv CO<sub>2</sub>



Increase rate

2000-01 : 1.5

2001-02 : 2.0

2002-03 : 2.5

Past Global Changes and Their Significance for the Future  
 Alverson, Oldfield and Bradley eds.



Raynaud et al. (2000) QSR, 19, 9-17  
 After Petit et al. (1999) Nature, 399, 429-436

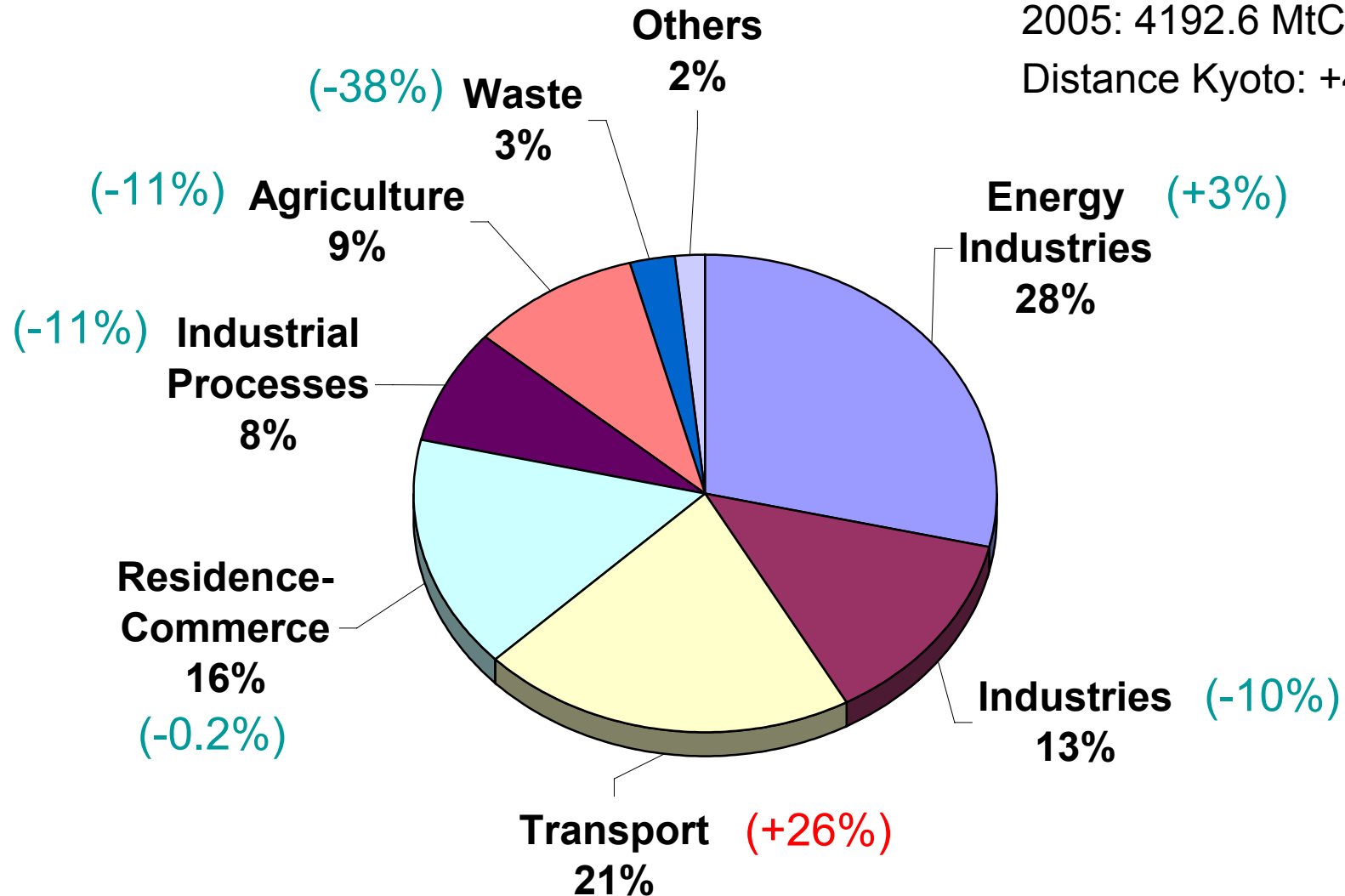


# European Community GHG Emissions 2005\*

1990: 4257.8 MtCO<sub>2eq</sub>

2005: 4192.6 MtCO<sub>2eq</sub>

Distance Kyoto: +4.5



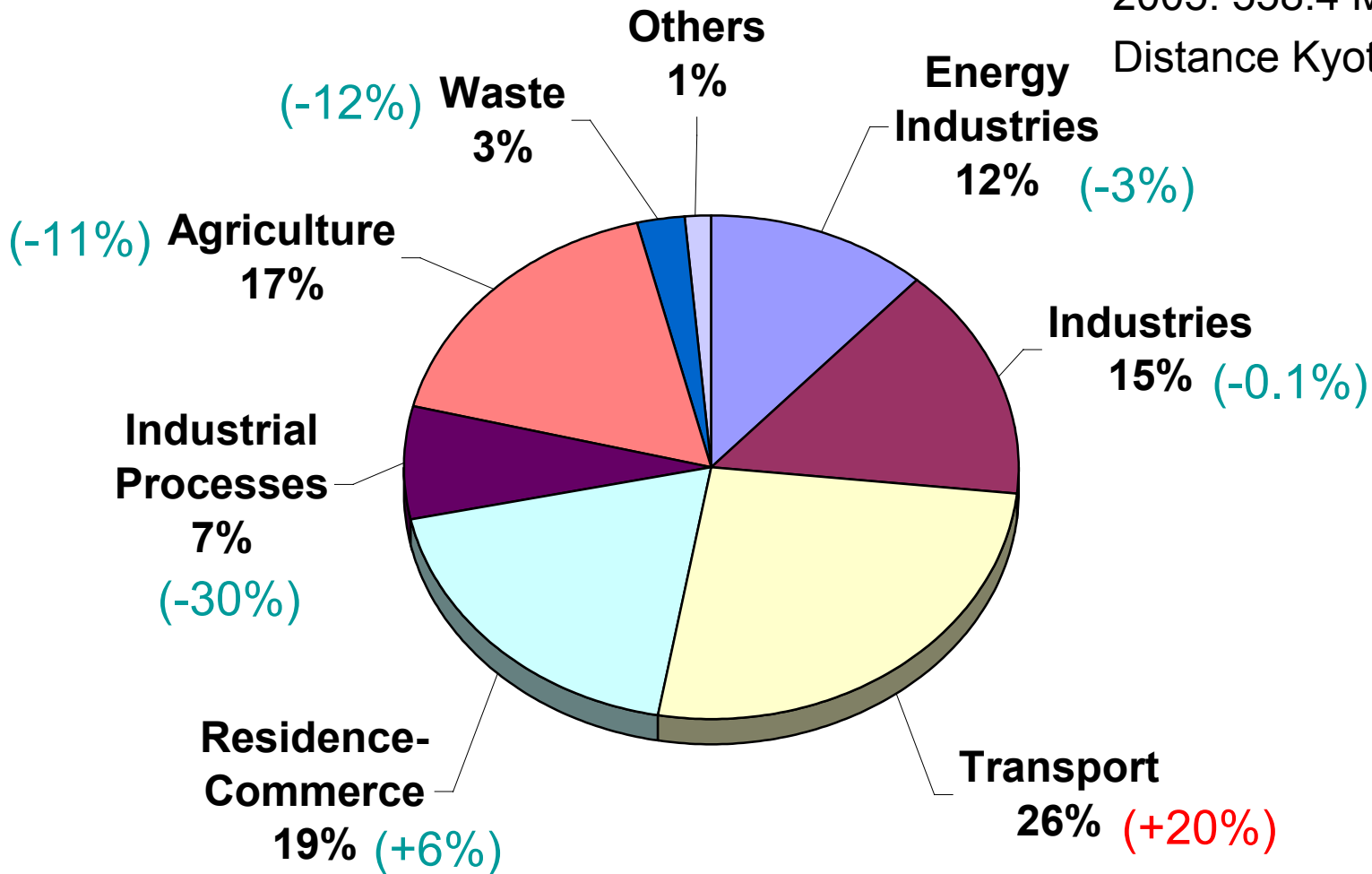
\* Without land use, land change and forestry (-217.4 MtCO<sub>2eq</sub>).

# France GHG Emissions 2005\*

1990: 567.3 MtCO<sub>2eq</sub>

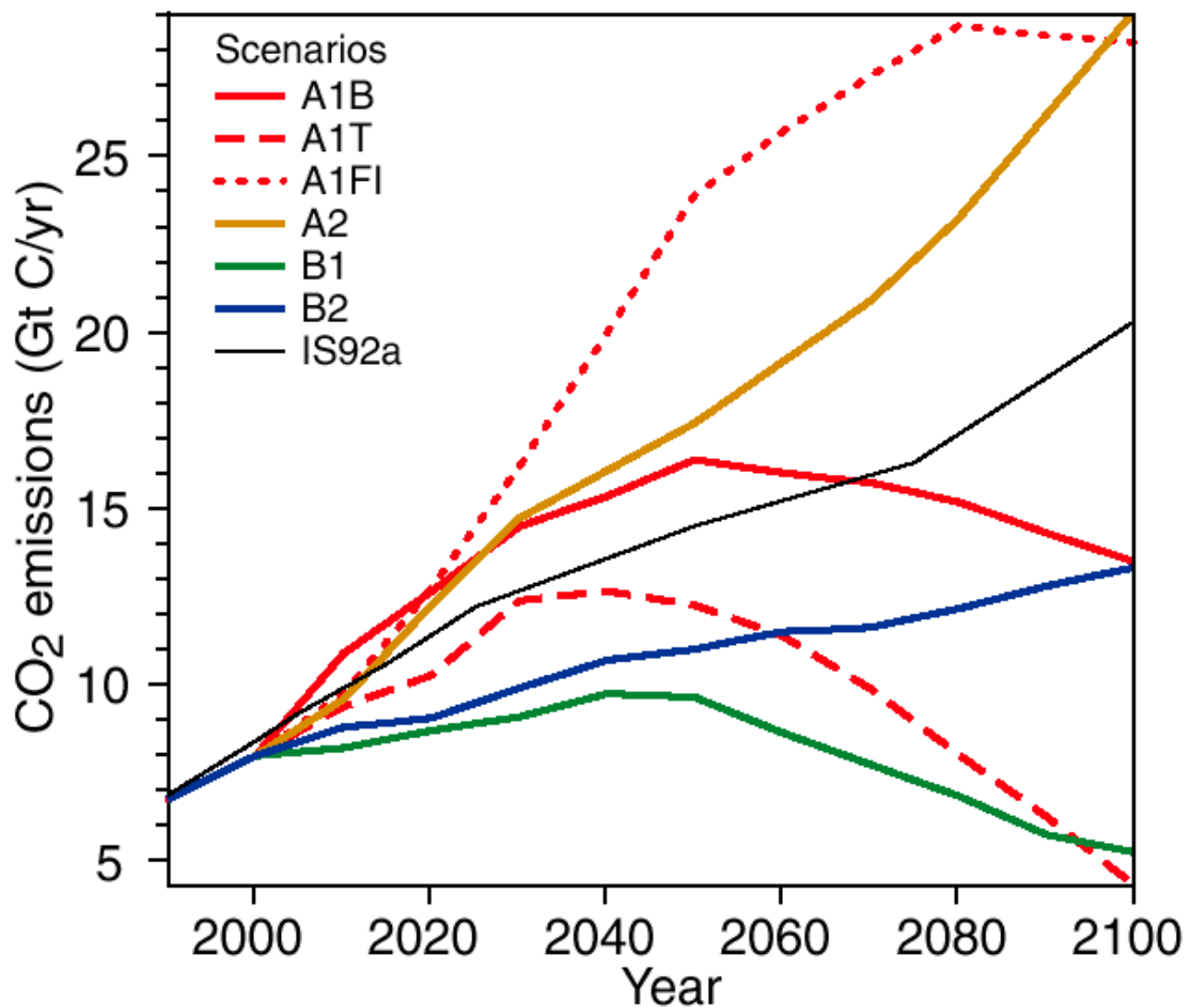
2005: 558.4 MtCO<sub>2eq</sub>

Distance Kyoto : -1.6

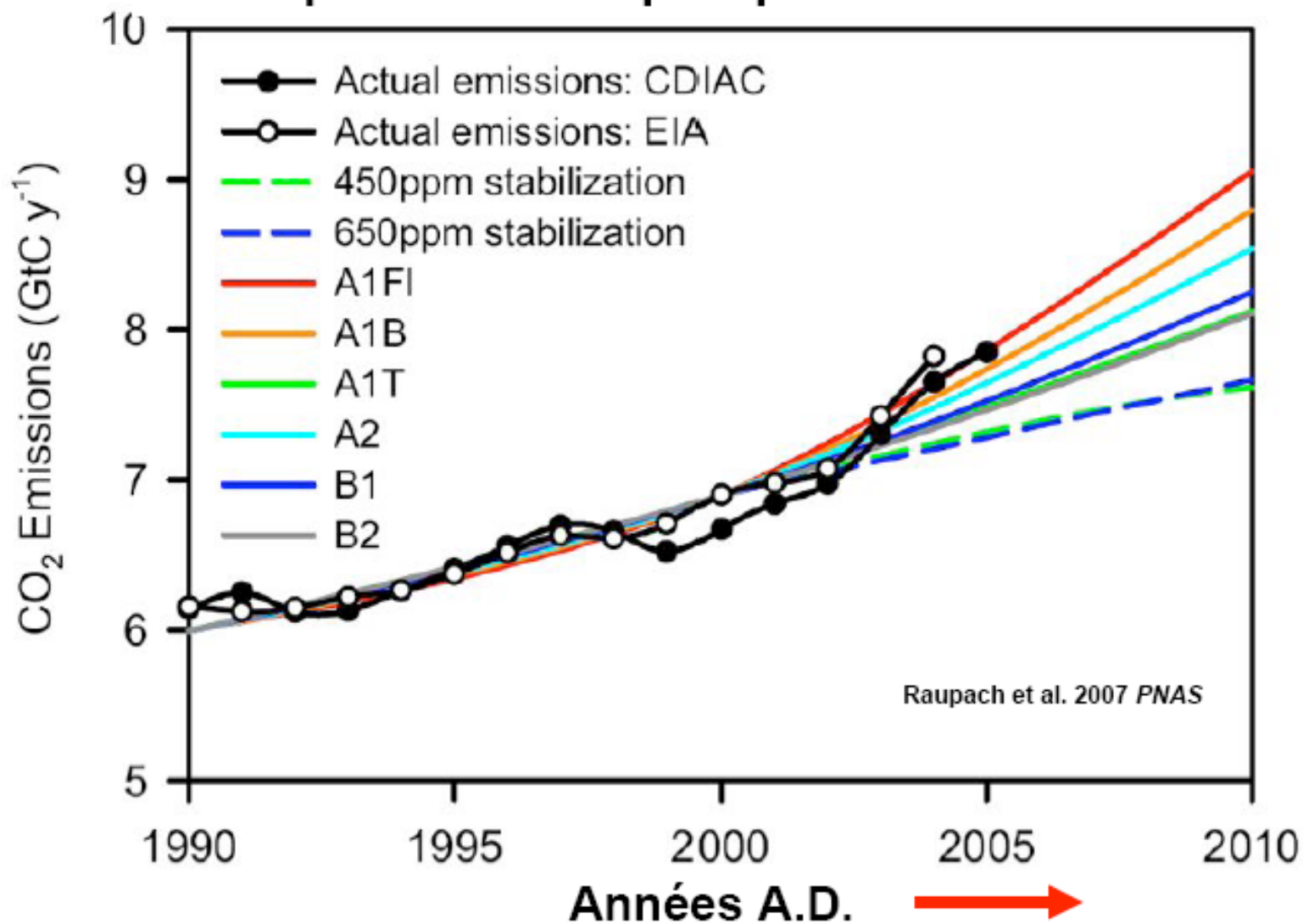


\* Without land use, land change and forestry (-34.0 MtCO<sub>2eq</sub>).

# CO<sub>2</sub> emissions



## Les émissions récentes dépassent les prévisions les plus pessimistes ...





# CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> Concentrations Past, Present and Future

MIOCENE....EOCENE



IPCC 2000  
Scenarios  
for 2100 AD

3700

1100

2005

450

1995 Today

379

360

1600

1200  
800  
400

ppbv CH<sub>4</sub>

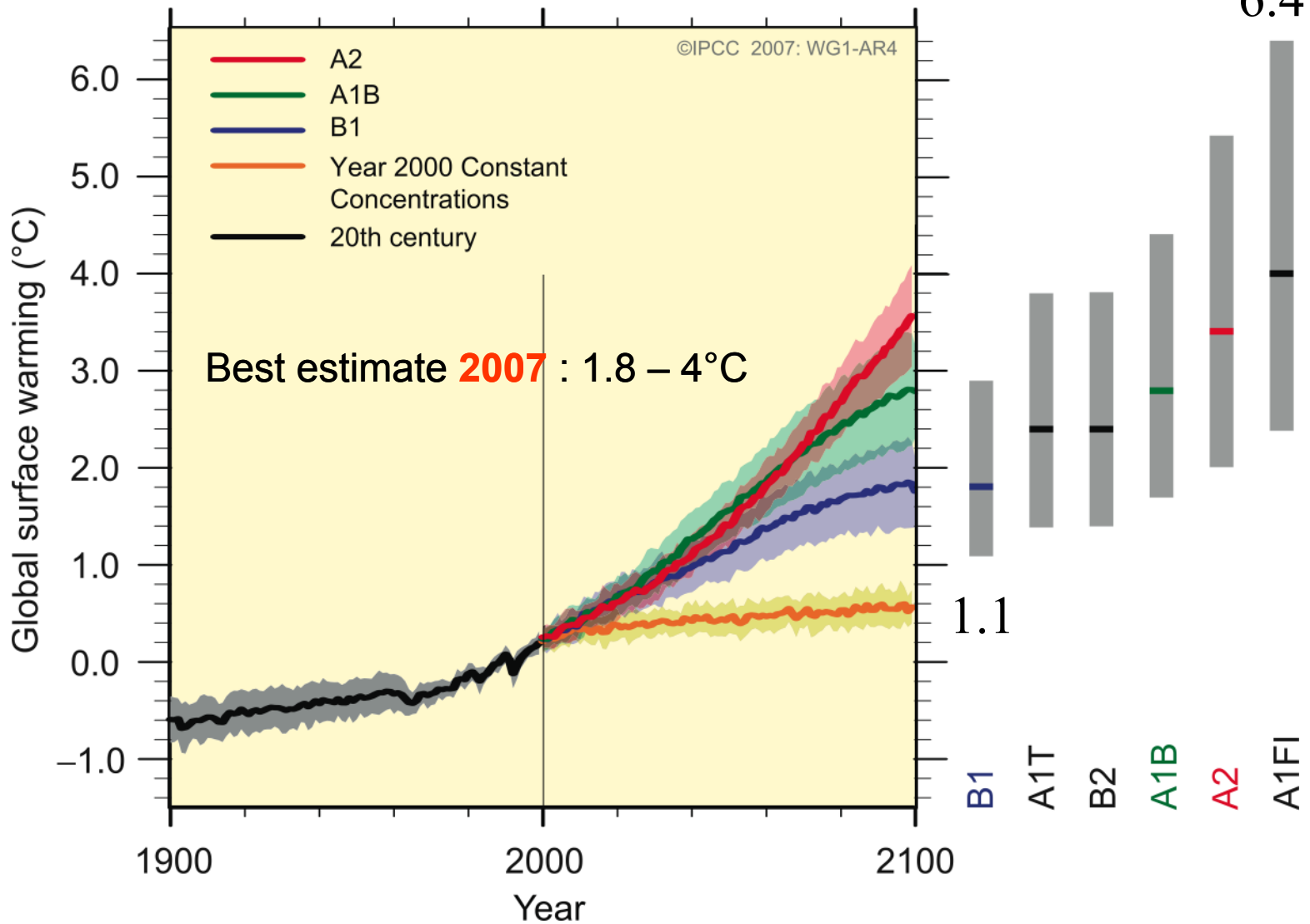
Vostok Ice Core

300  
240  
180

ppmv CO<sub>2</sub>

400 350 300 250 200 150 100 50 0

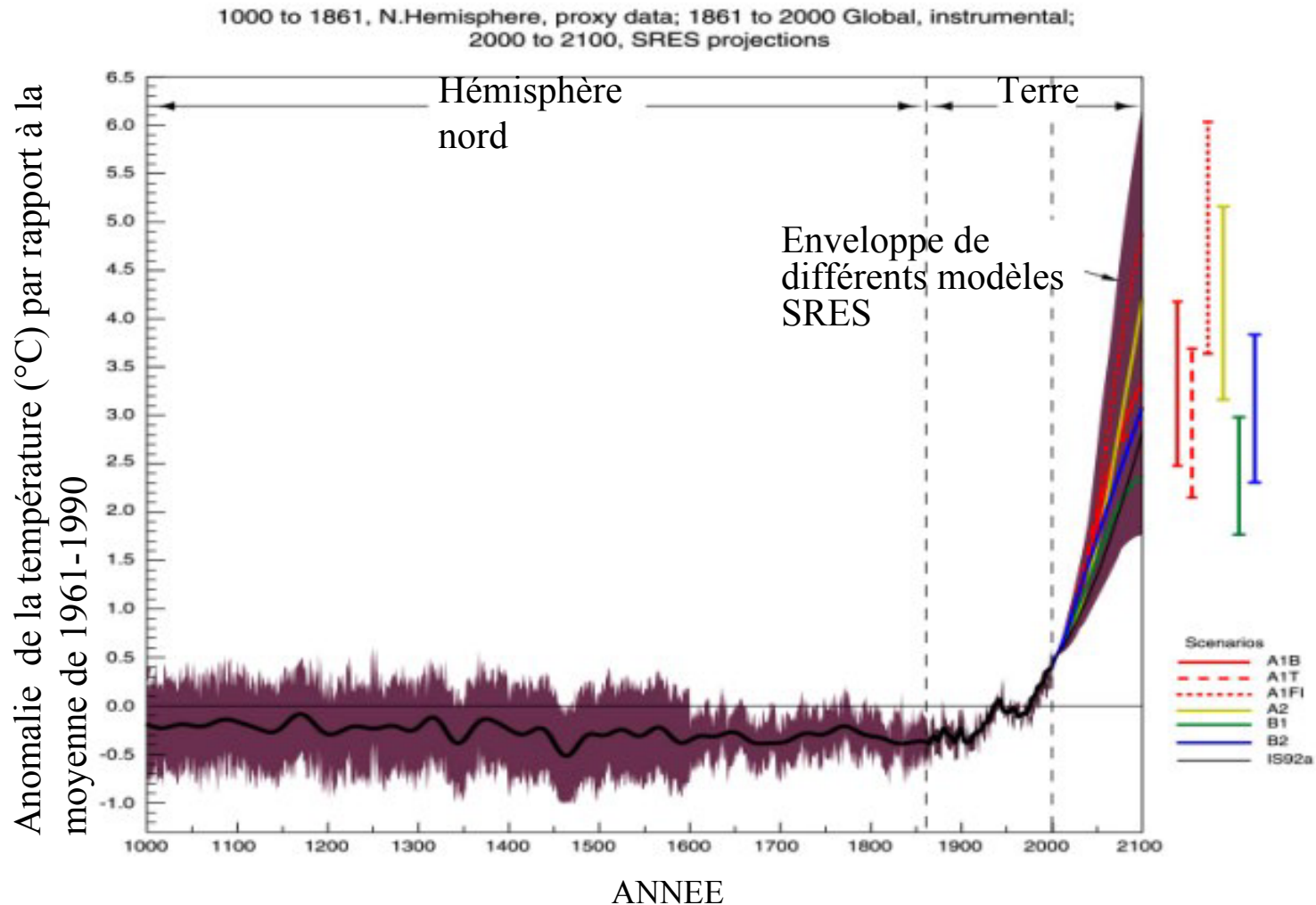
kyr BP



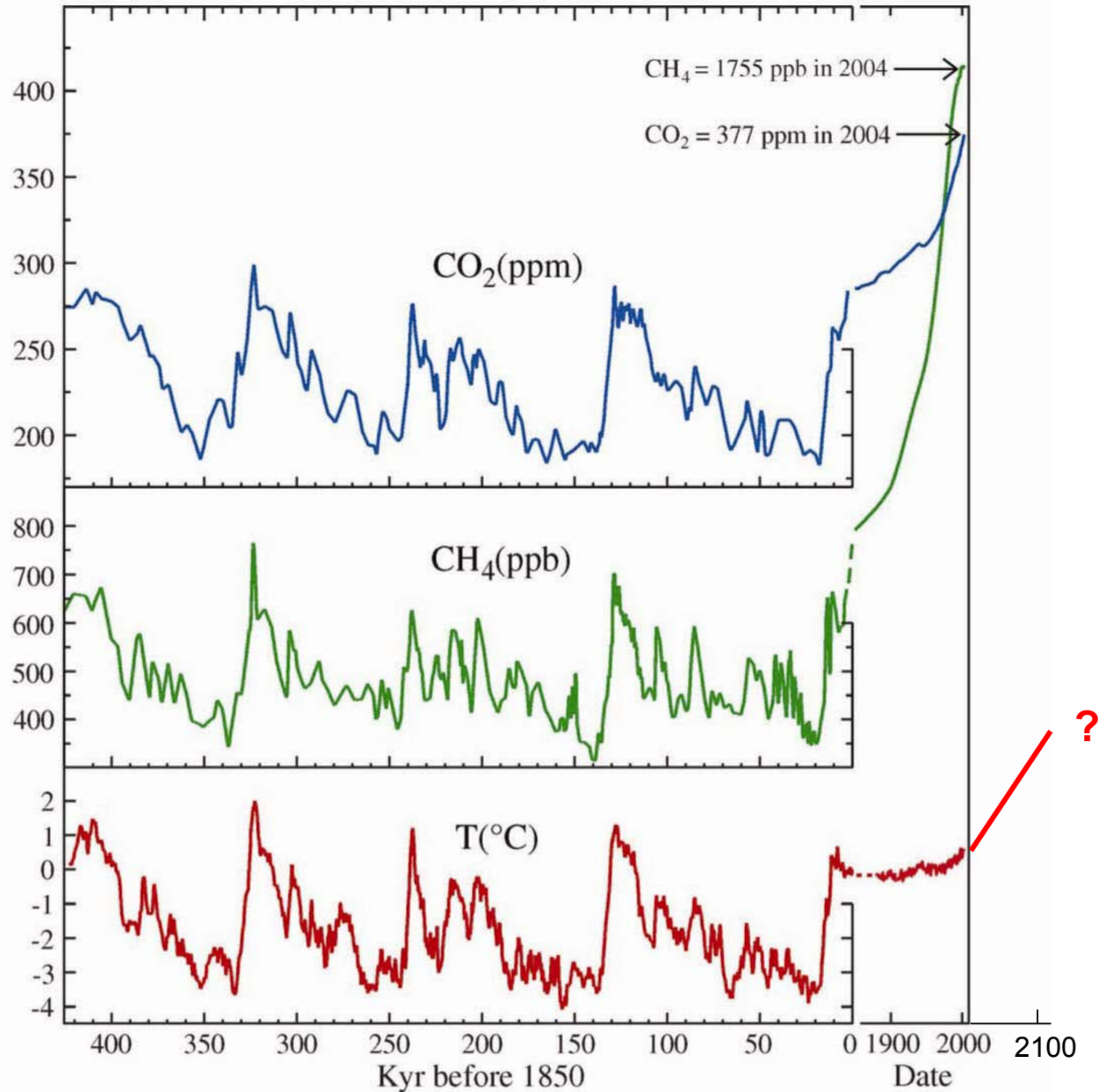
GLOBAL WARMING PREDICTION (IPCC, 2007)

# La température de surface estimée pour le 21<sup>ème</sup> siècle n'a jamais été observée au cours des 1000 dernières années

Variation de la température à la surface de la Terre : 1000 à 2100



CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and estimated  
global temperature  
(Antarctic  $\Delta T/2$   
in ice core era)  
0 = 1880-1899 mean.



Source: Hansen, *Clim. Change*, **68**, 269, 2005.

Source extrapolation: Berger and Loutre, *Science*, 2002

EN CONSÉQUENCE, NOUS  
DEVONS ANALYSER LE  
**PASSÉ** POUR ÉLARGIR LE  
**SPECTRE** DES SITUATIONS  
CLIMATIQUES QUI SONT  
DISPONIBLES EN **GRAND**  
**DÉTAIL** POUR LE **DERNIER**  
**SIÈCLE**, MAIS AVEC UNE  
**PAUVRE DIVERSITÉ**

# Last Glacial Maximum 21kyr BP



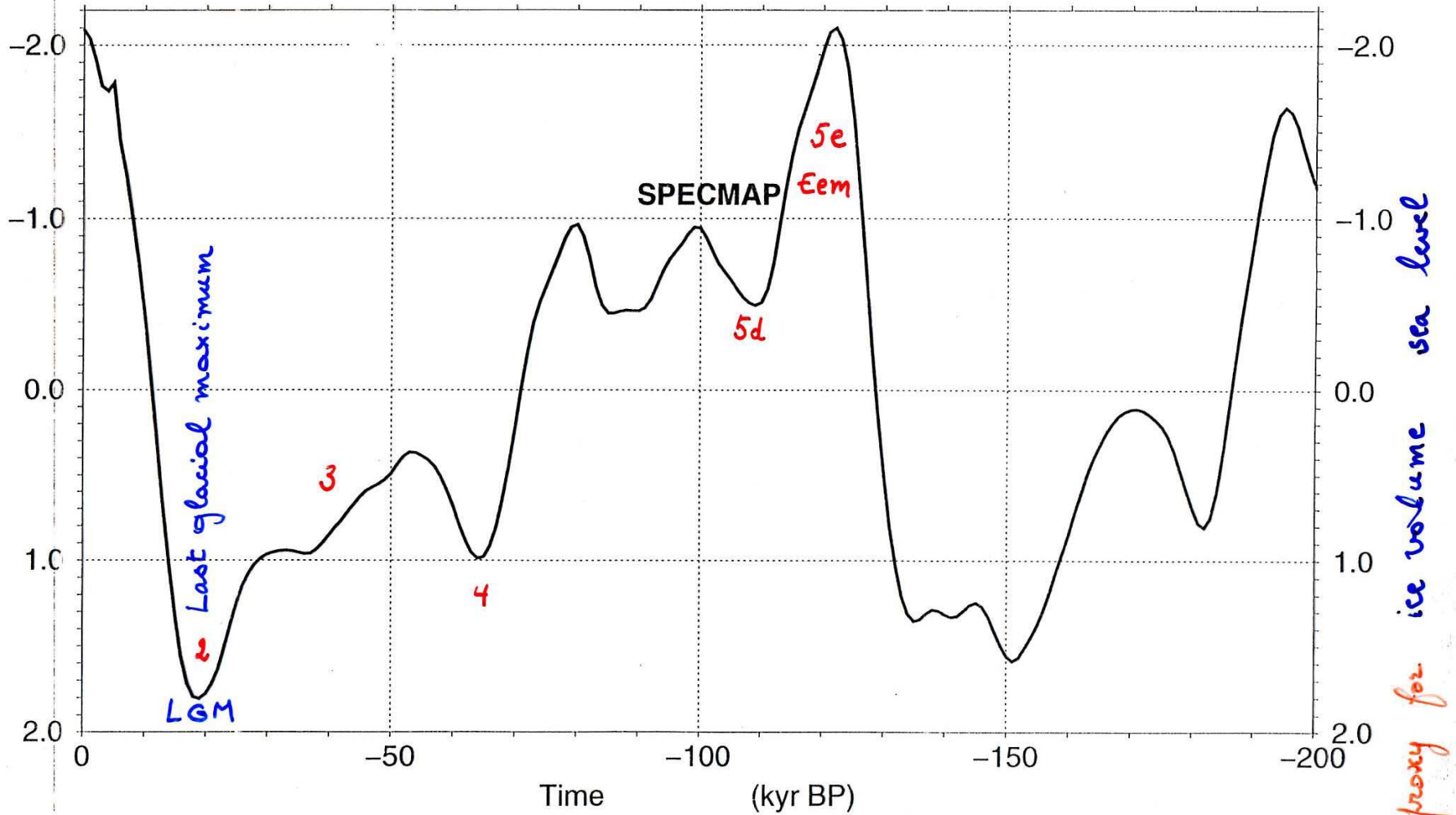
Pre-industrial CO<sub>2</sub> = 280 ppmv  
2000 AD CO<sub>2</sub> = 370 ppmv



$\Delta T = -5^{\circ}\text{C}$   
 $\Delta \text{sea level} = -130\text{m}$   
 $\Delta \text{ice volume} = +52 \cdot 10^6 \text{km}^3$   
CO<sub>2</sub> = 200 ppmv

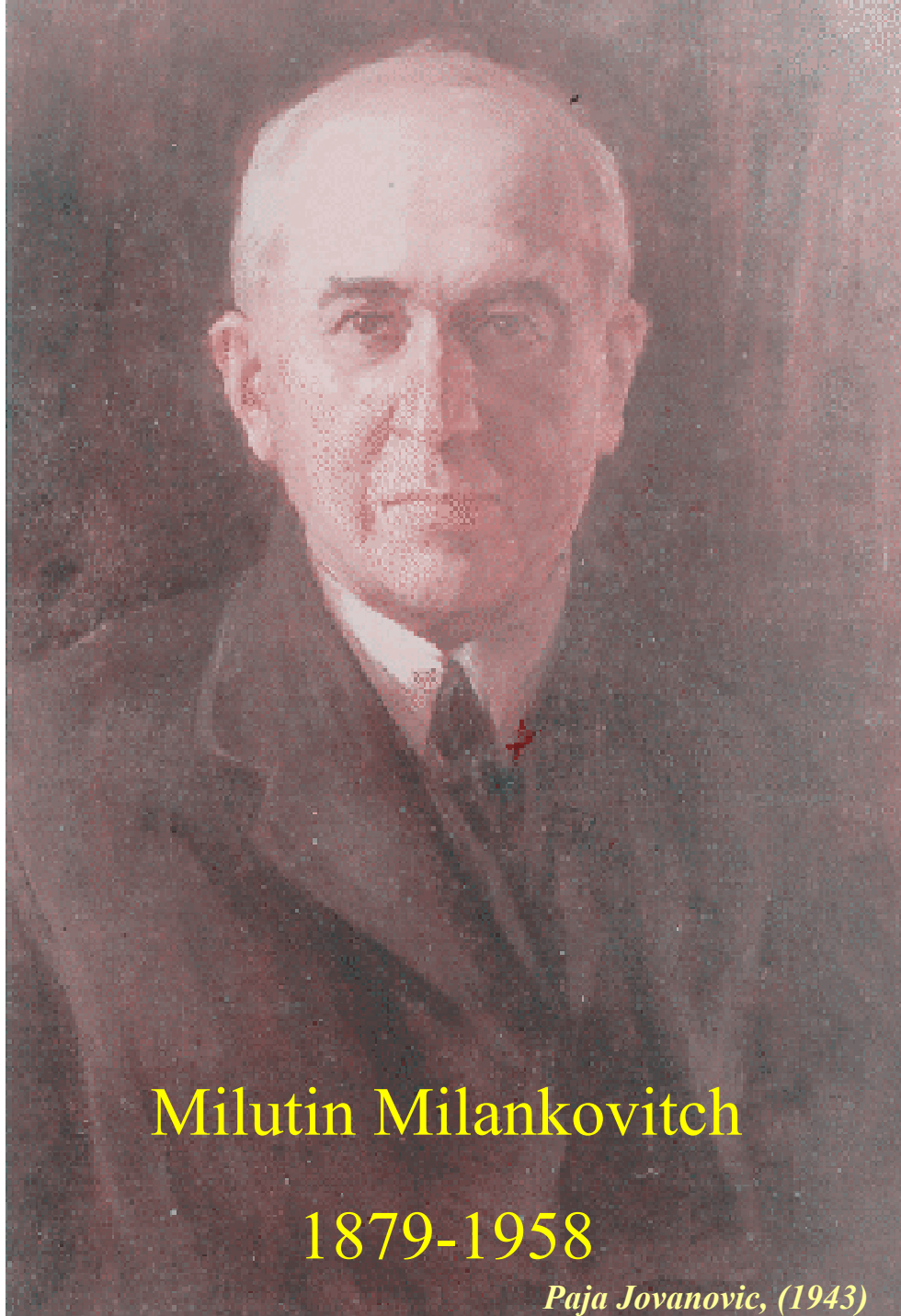
Holocene

$\delta^{18}O$



Last Glacial Maximum  
relative to present day

$\Delta$  ice volume = + 40 - 50  $10^6$  km<sup>3</sup>  
 $\Delta$  sea level = - 100 - 120 m  
 $\Delta$  temperature = - 5°C



Milutin Milankovitch

1879-1958

*Paja Jovanovic, (1943)*





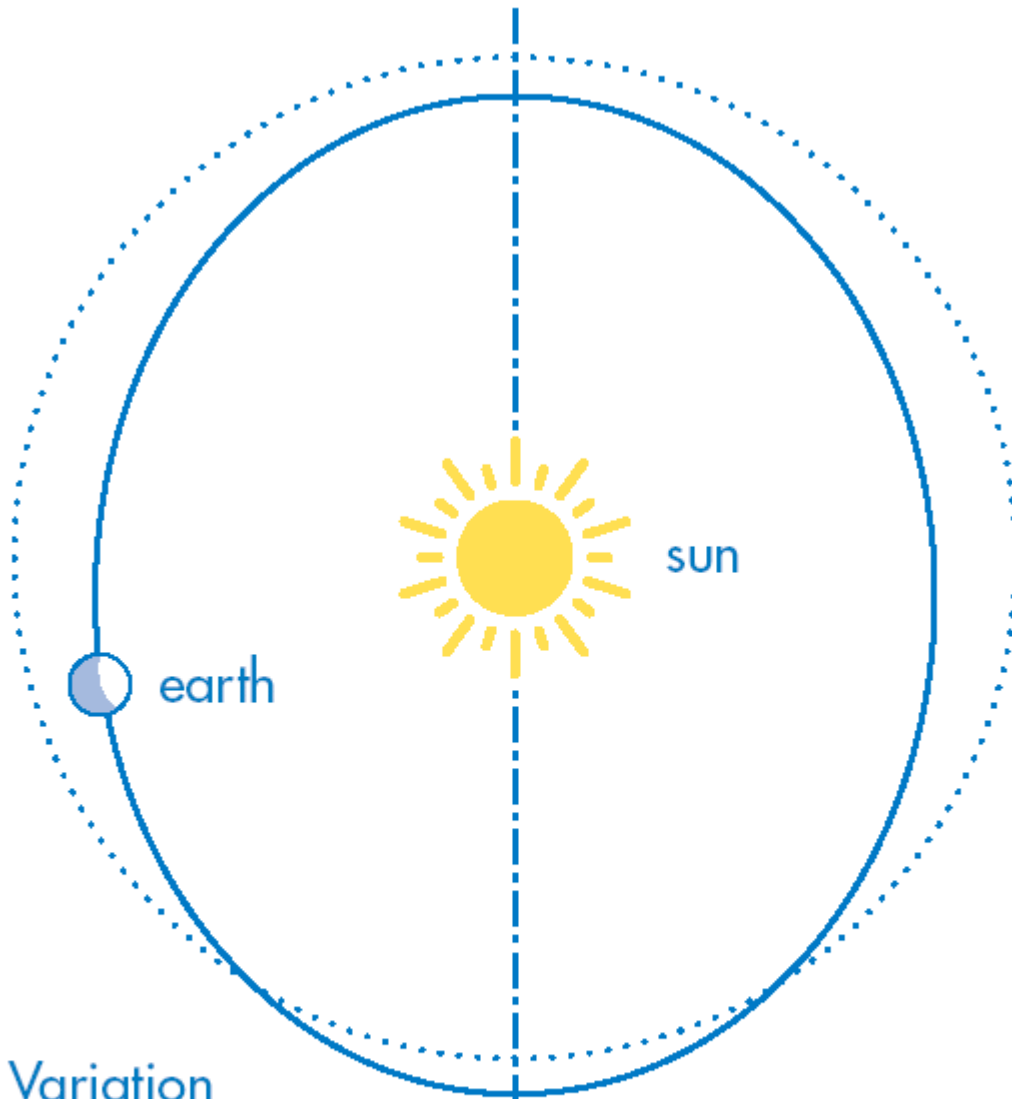
**1. SOLUTION ASTRONOMIQUE**

**2. MATHEMATIQUE INSOLATION**

**3. MODELISER LE PASSE**

**4. MODELISER LE FUTUR**

**5. L'IMPACT DE L'HOMME A  
L'ECHELLE ASTRONOMIQUE**



Variation  
of the "eccentricity"

ORBIT-ECC-LATSIS,2001

Today

summer solstice  
22 June

spring equinox  
21 March

92.8

89.0

sun

93.6

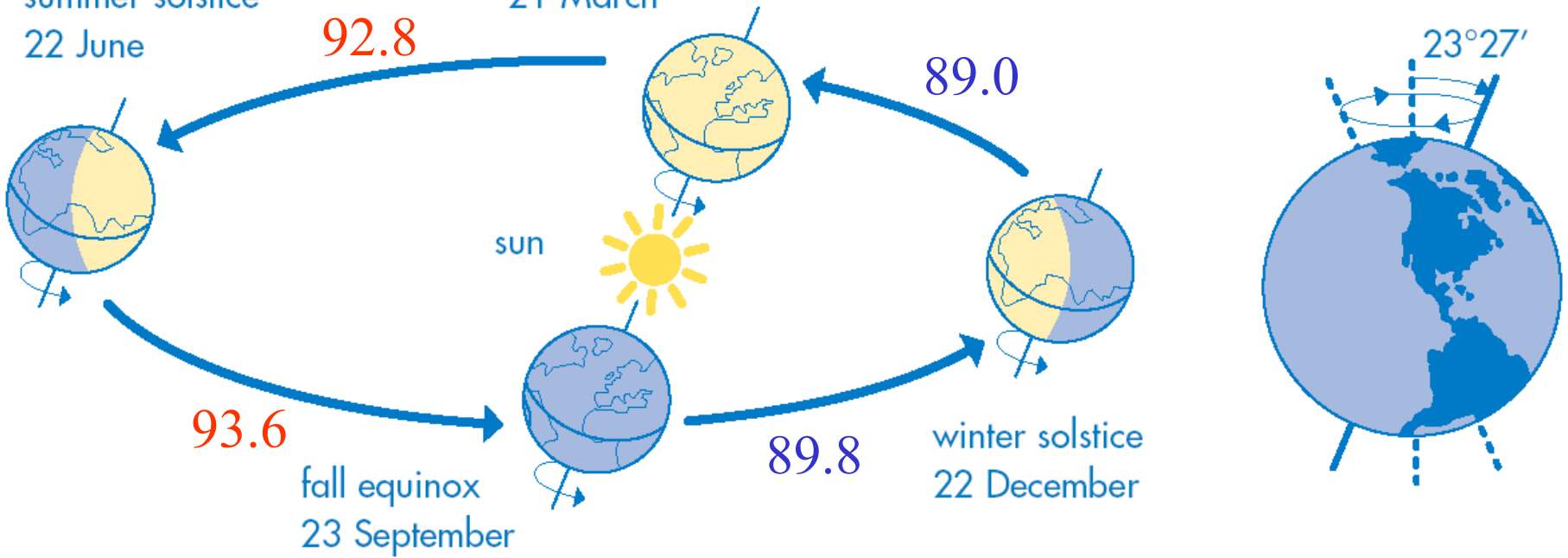
fall equinox  
23 September

89.8

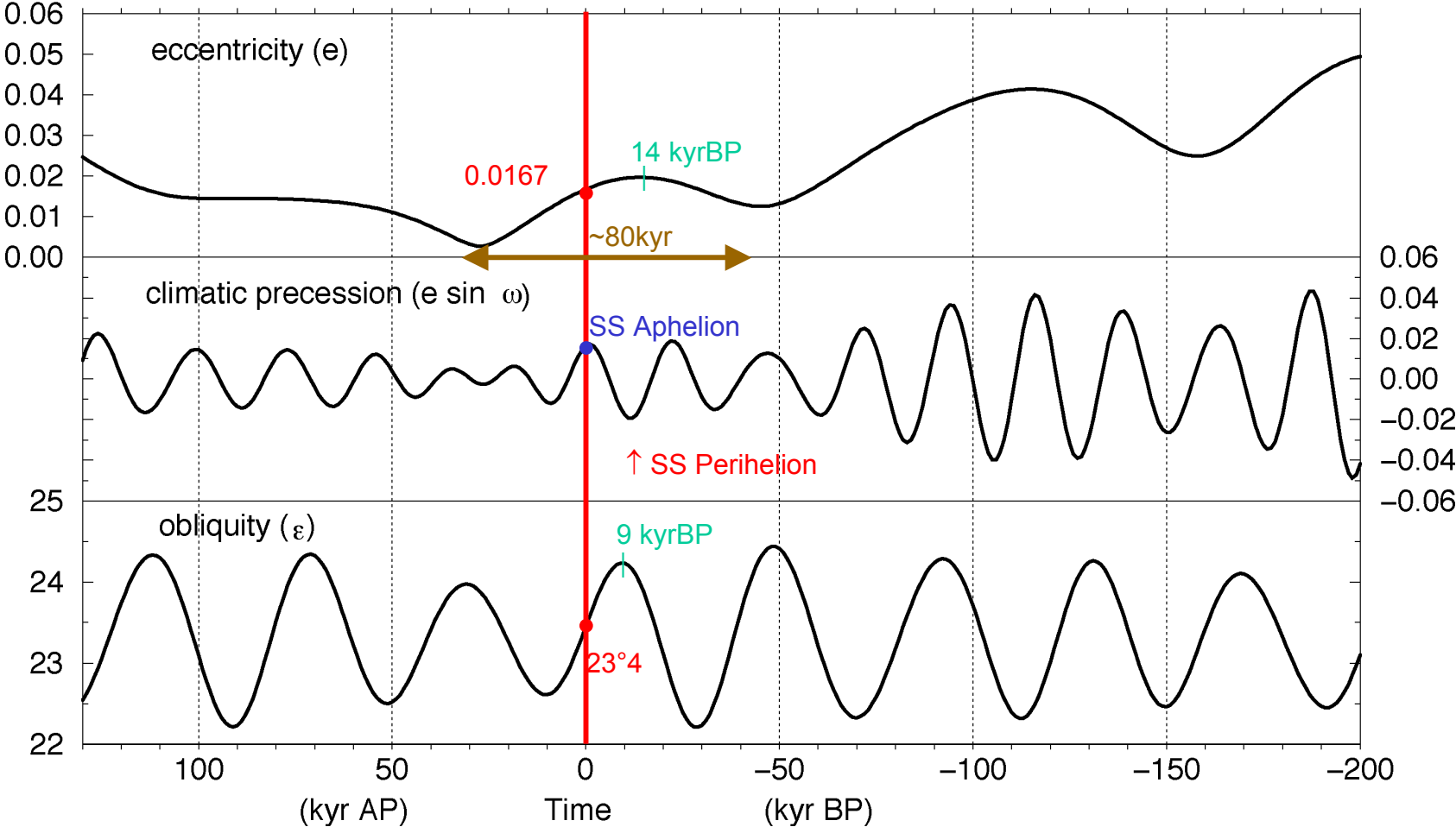
winter solstice  
22 December

23°27'

ORBIT-O-LATSIIS,2001



# BER78



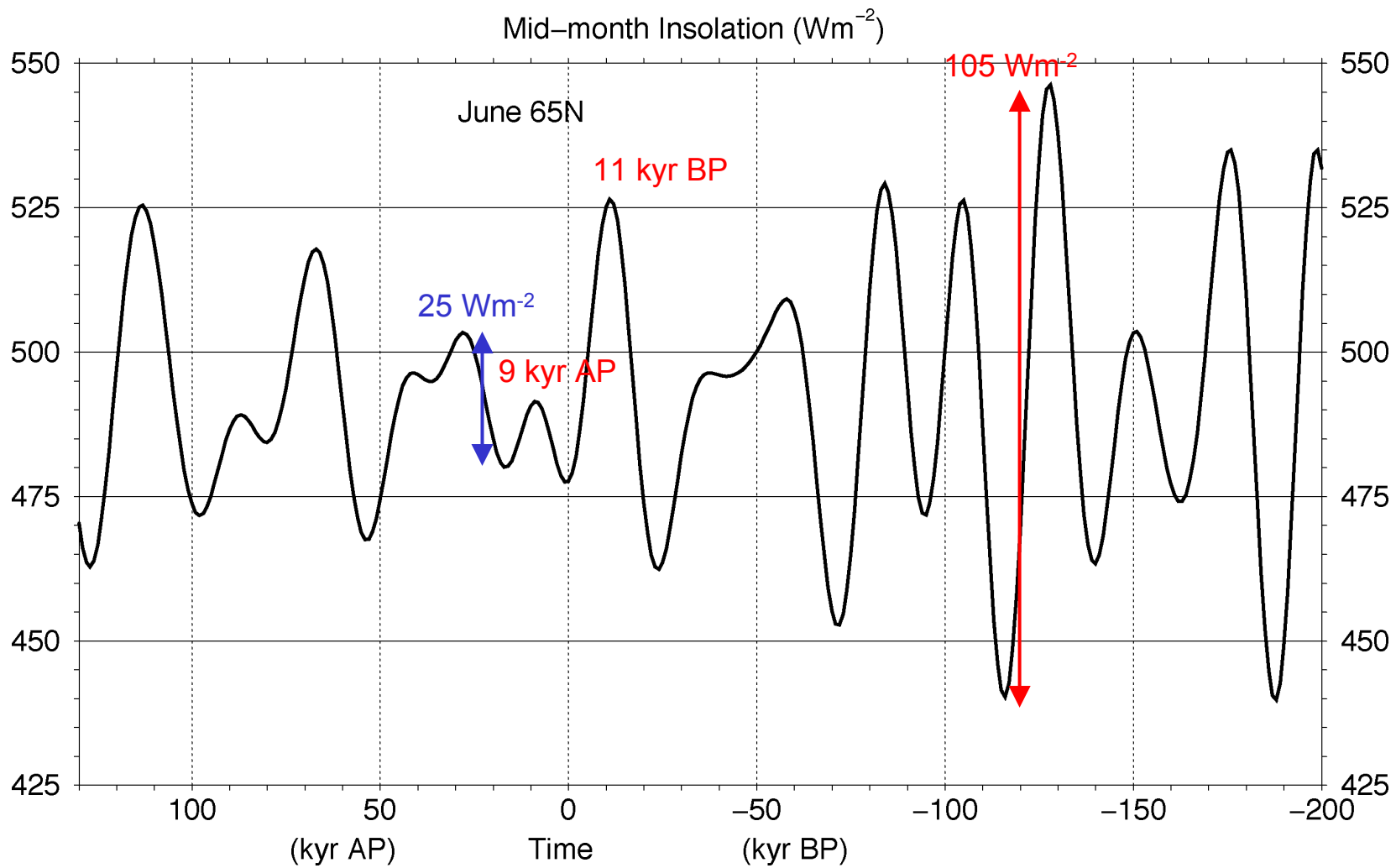
**1. SOLUTION ASTRONOMIQUE**

**2. MATHEMATIQUE INSOLATION**

**3. MODELISER LE PASSE**

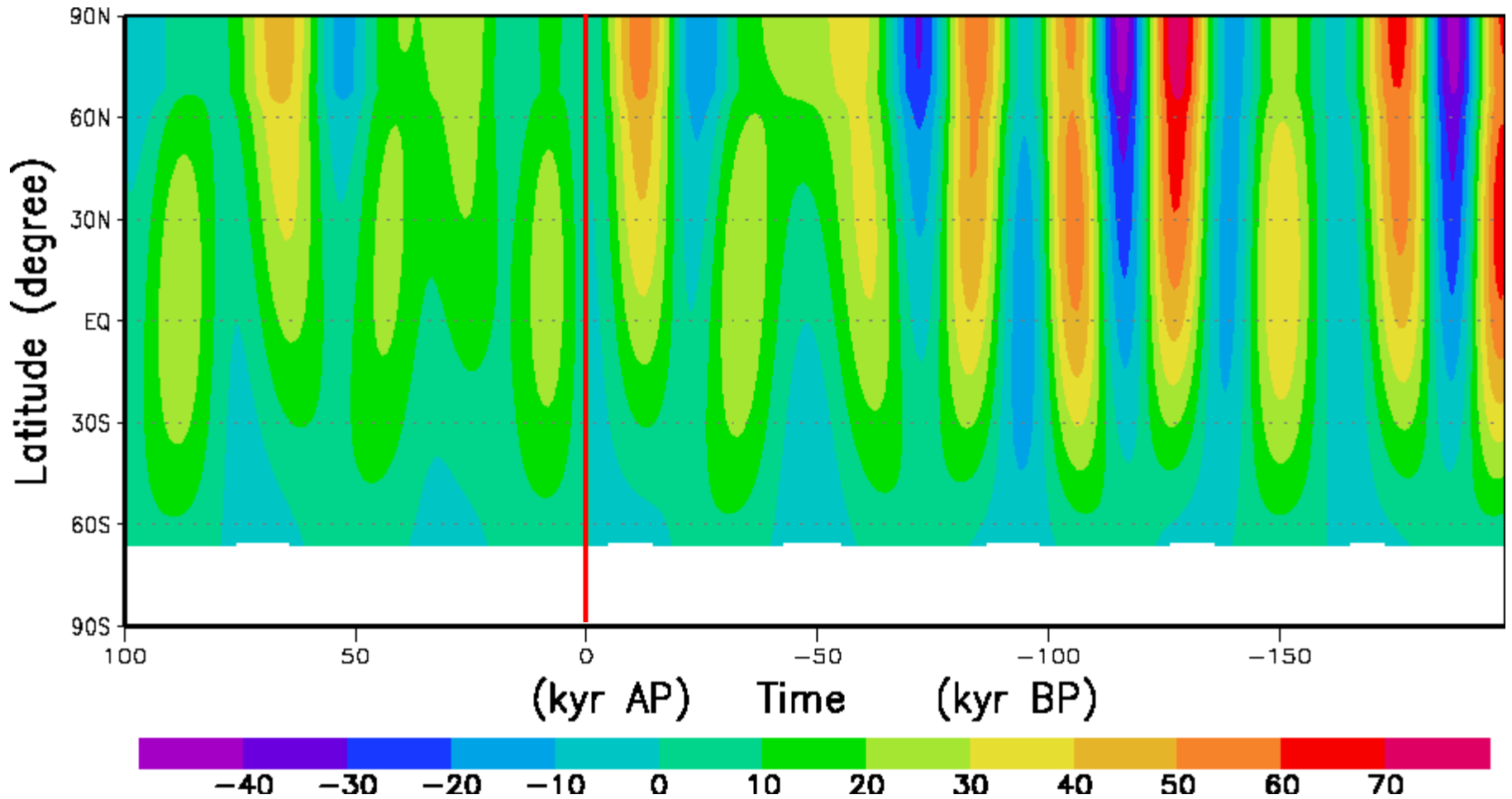
**4. MODELISER LE FUTUR**

**5. L'IMPACT DE L'HOMME A  
L'ECHELLE ASTRONOMIQUE**



# 24h mean irradiance ( $\text{Wm}^{-2}$ )

## Mid-month June



**1. SOLUTION ASTRONOMIQUE**

**2. MATHEMATIQUE INSOLATION**

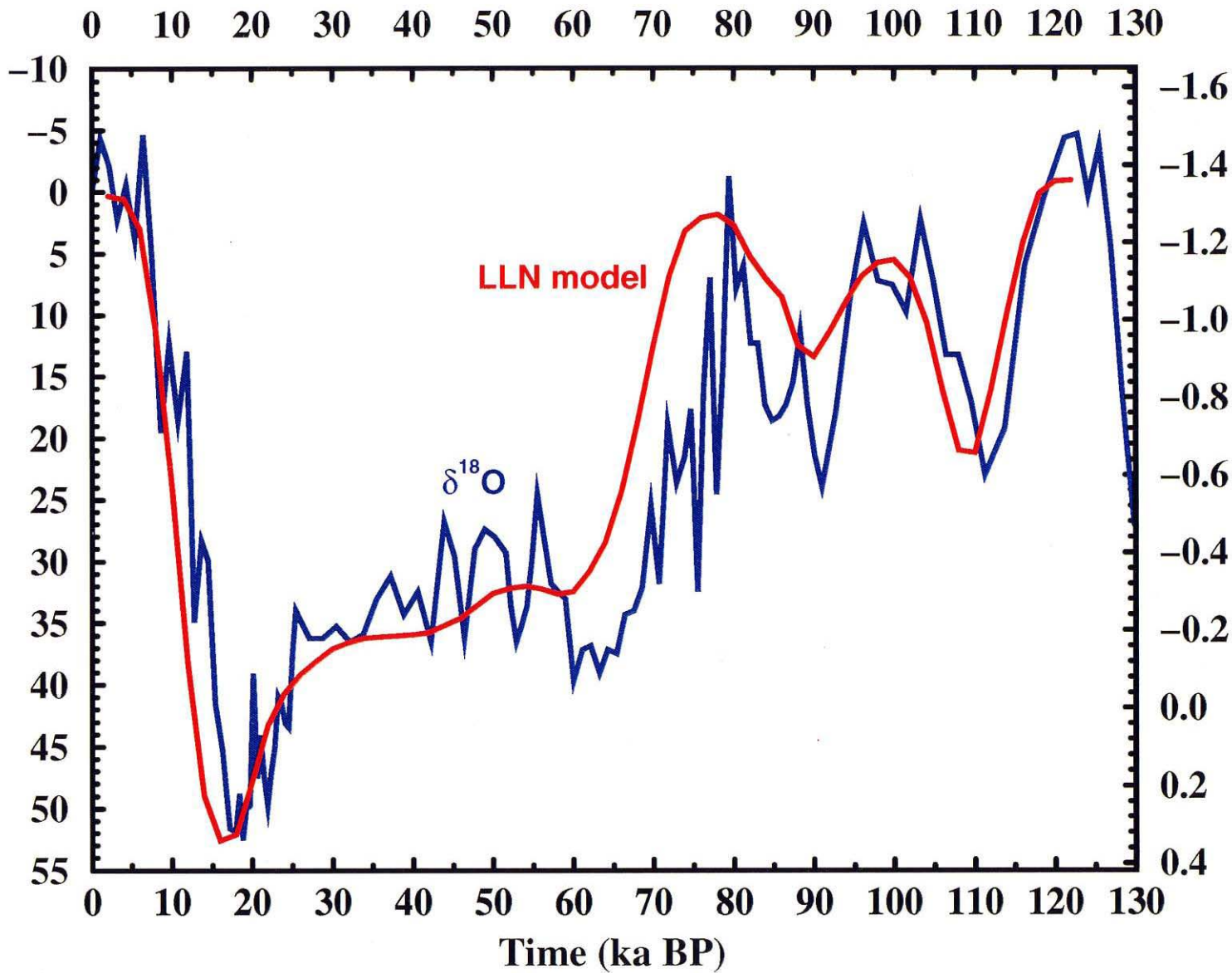
**3. MODELISER LE PASSE**

**4. MODELISER LE FUTUR**

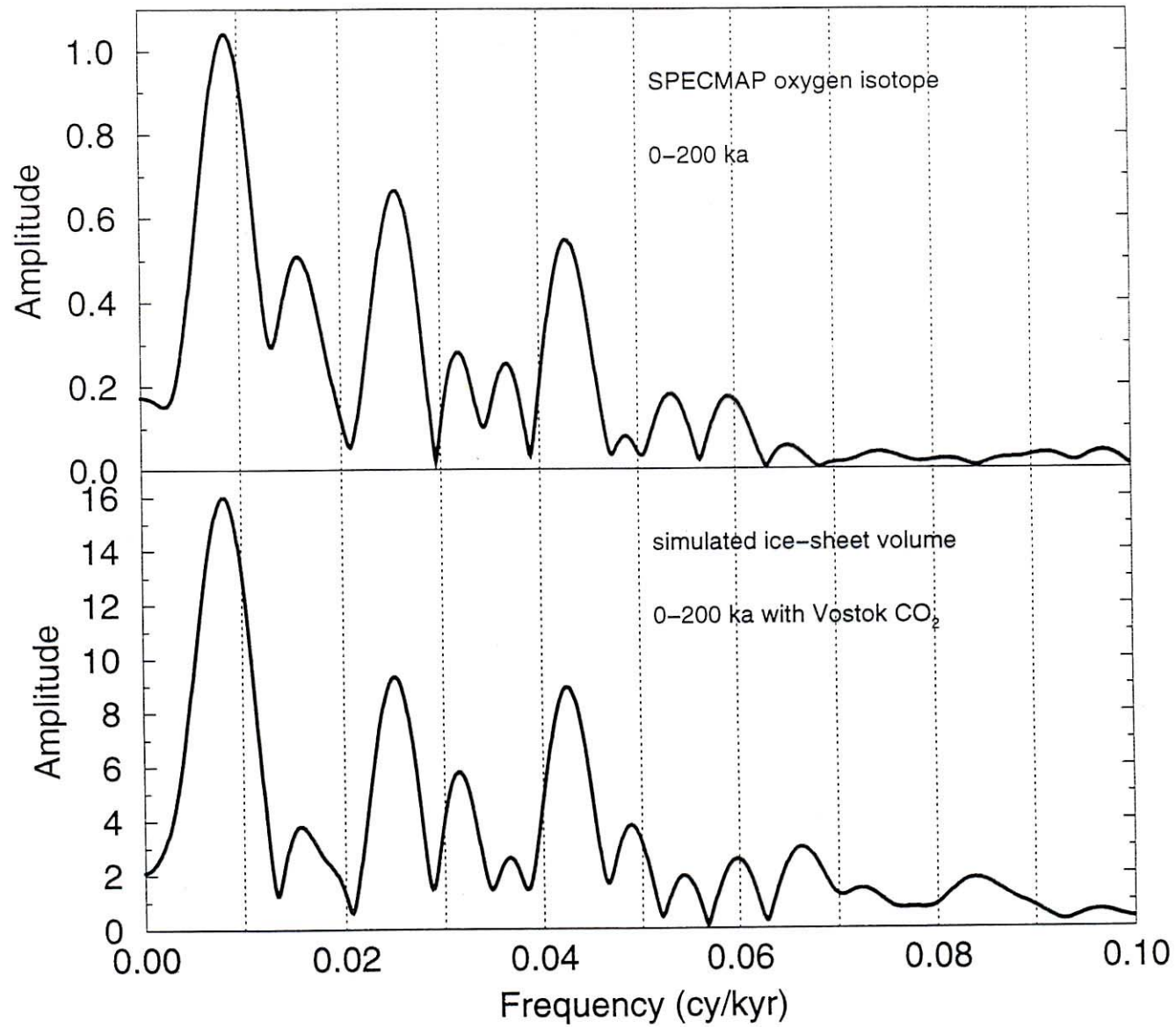
**5. L'IMPACT DE L'HOMME A  
L'ECHELLE ASTRONOMIQUE**



Deviation from present day  
continental ice volume ( $10^6 \text{ km}^3$ )  
(Gallee *et al.*, 1991; 1992)



Core MD85-668  $\delta^{18}\text{O}$  (per mil) to PDB  
(Shackleton *et al.*, 1993)



**1. SOLUTION ASTRONOMIQUE**

**2. MATHEMATIQUE INSOLATION**

**3. MODELISER LE PASSE**

**4. MODELISER LE FUTUR**

**5. L'IMPACT DE L'HOMME A  
L'ECHELLE ASTRONOMIQUE**

QUEL POURRAIT ÊTRE  
NOTRE CLIMAT A  
L'ÉCHELLE  
GÉOLOGIQUE SANS  
INTERVENTION  
HUMAINE ?

**Forçage astronomique  
exceptionnel au cours  
des 50.000 prochaines  
années**

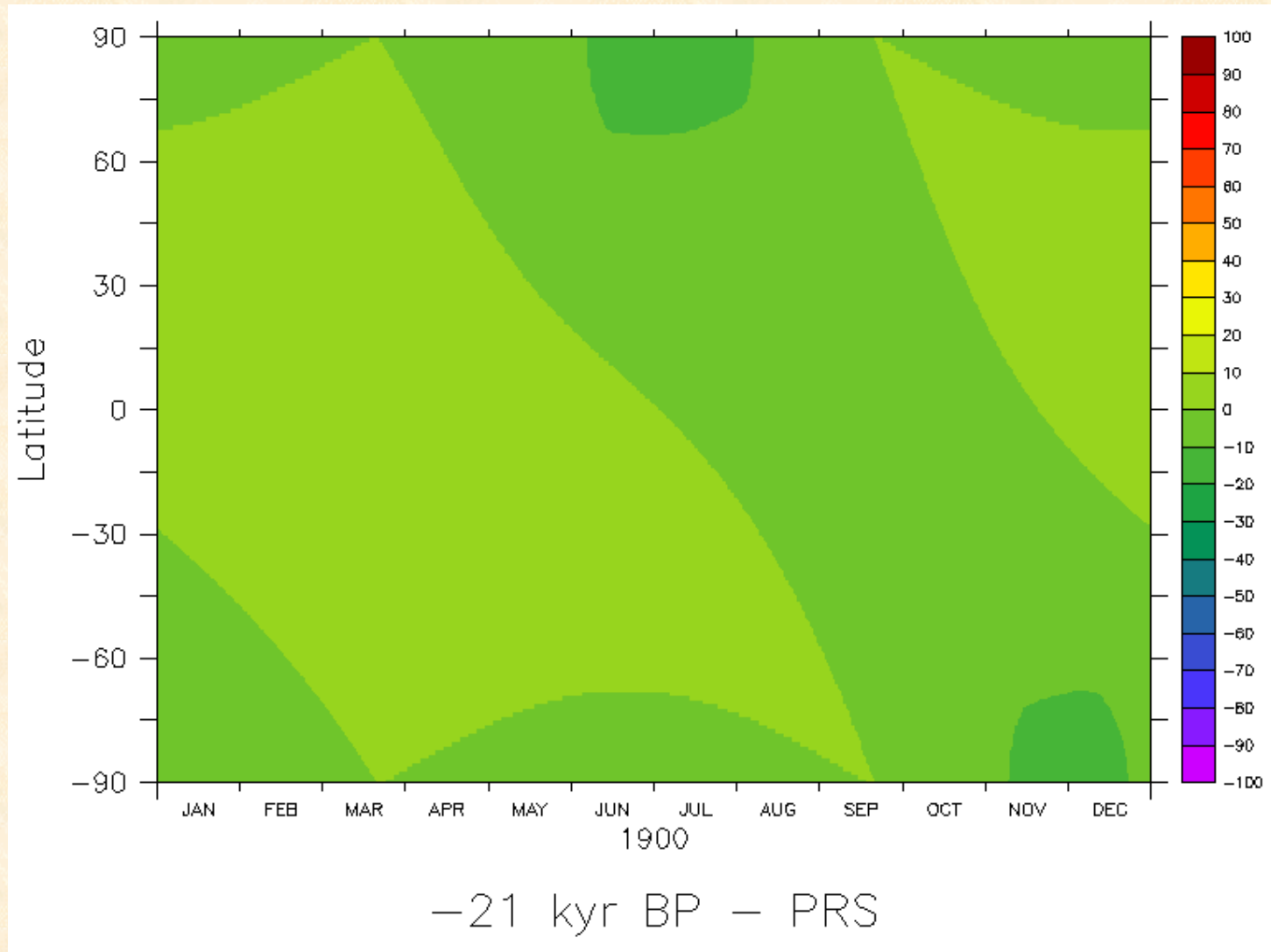
# MIS1

9 AP

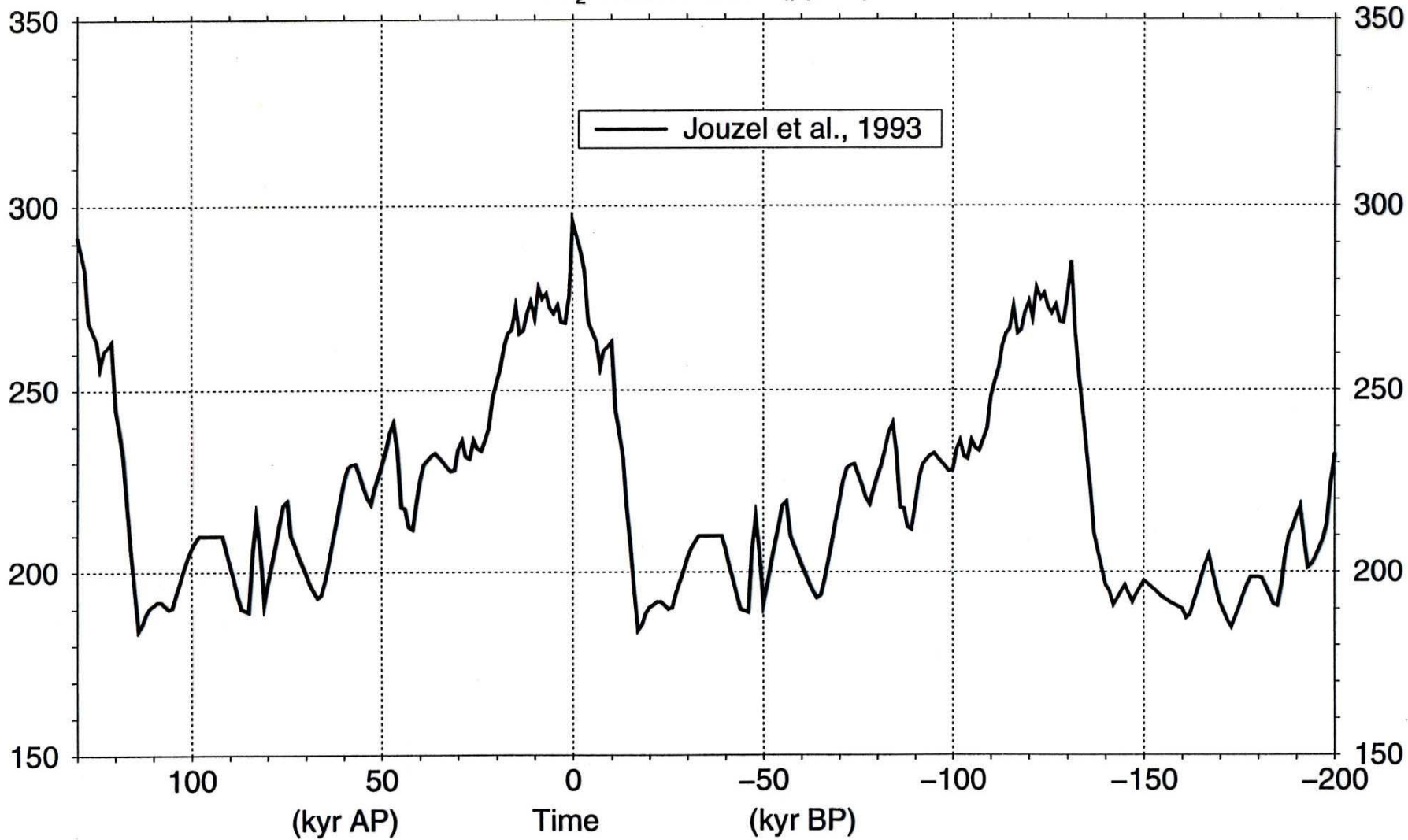
6 BP

12 BP

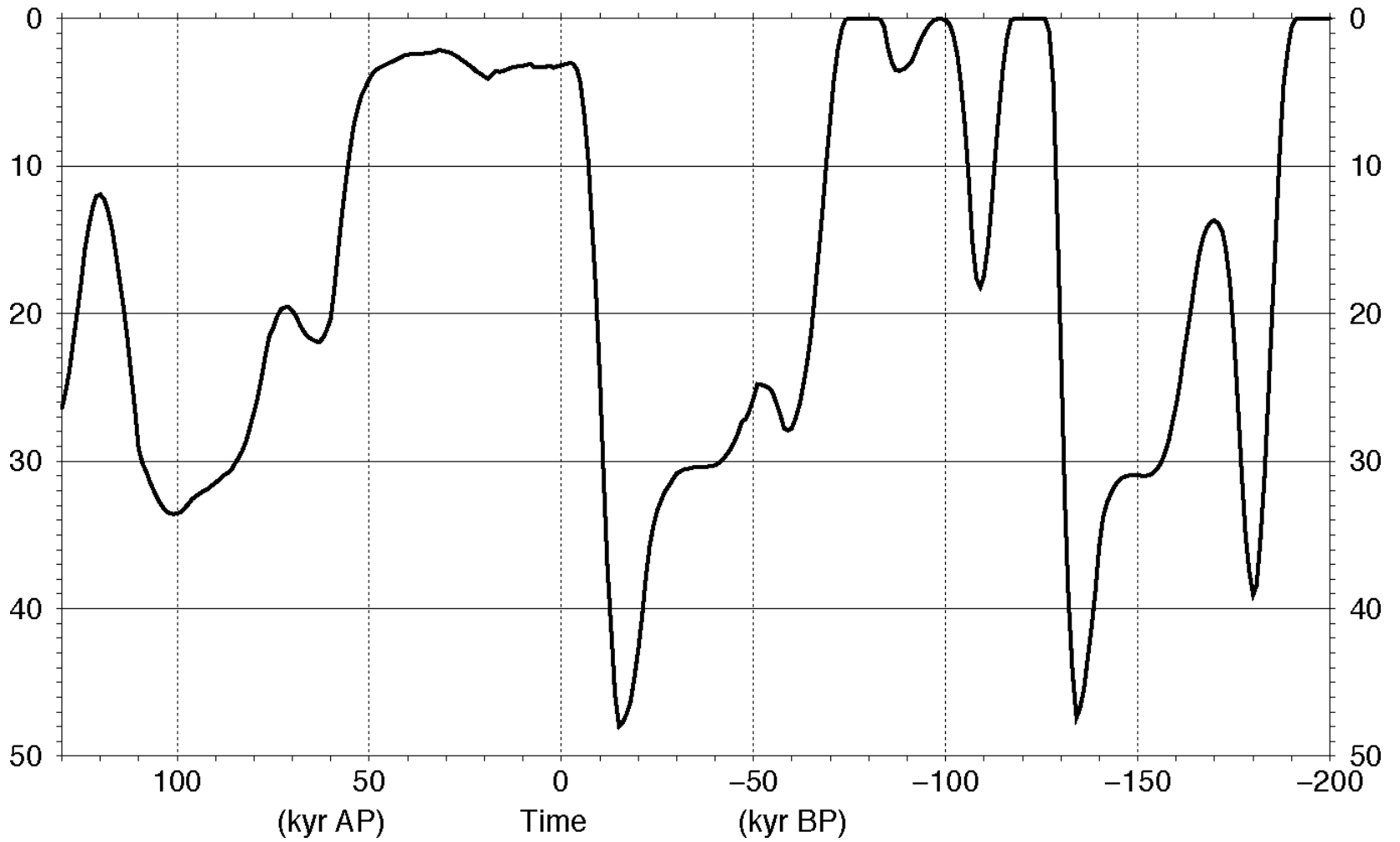
21 BP



# CO<sub>2</sub> concentration (ppmv)



Northern hemisphere ice volume ( $10^6 \text{ km}^3$ )





# A long interglacial ahead?

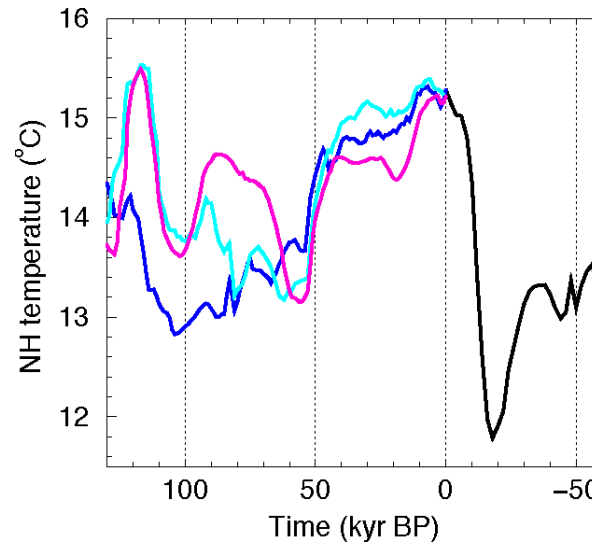
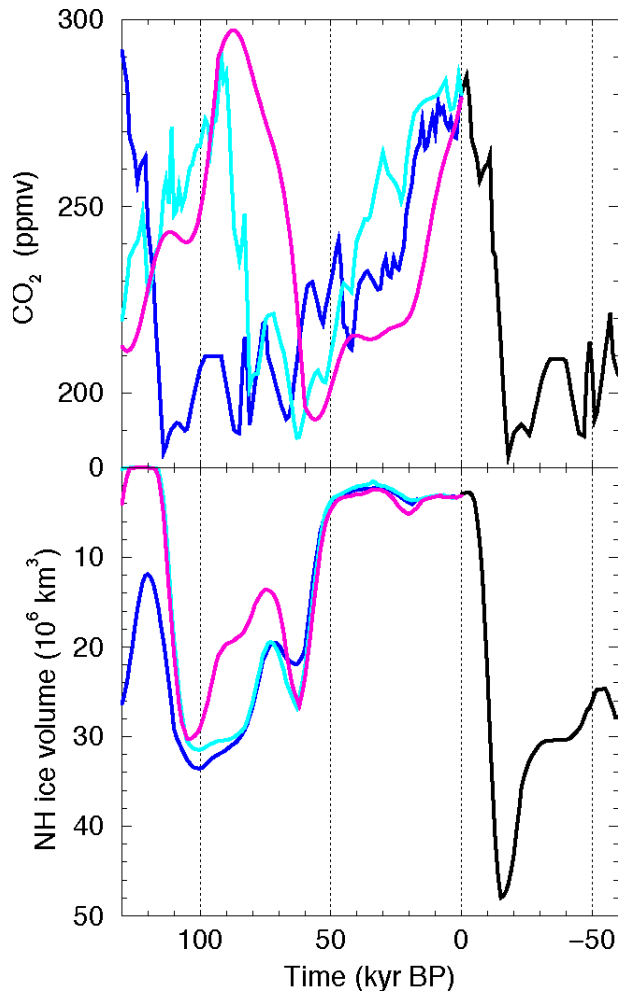
## Different natural CO<sub>2</sub> scenarios for the future

Berger and Loutre, Science, 2002.

**Long interglacial : ~50kyr**

Small NH ice sheets

Warm temperature



Results confirmed by  
Vettoretti and Peltier

# The present interglacial, how and when will it end?

Department of Geological Sciences, Brown University,  
Providence, Rhode Island

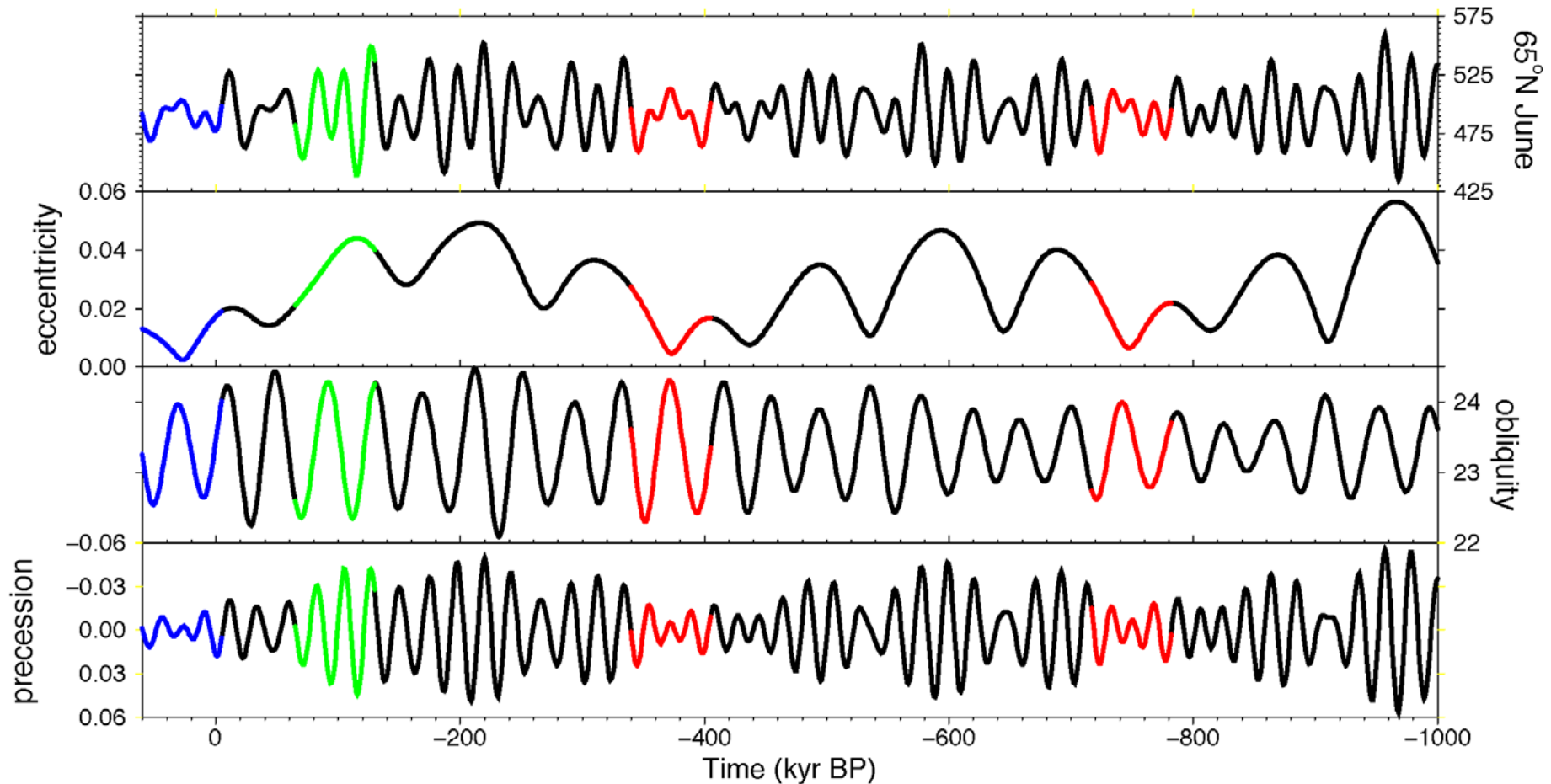
**January 26-27, 1972.**

**Previous warm intervals** resembling the present one have all been sufficiently **short live**. It seems therefore likely that the present-day warm epoch will terminate relatively soon if man does not intervene.

**STAGE 11 / STAGE 1**

**and its Future**

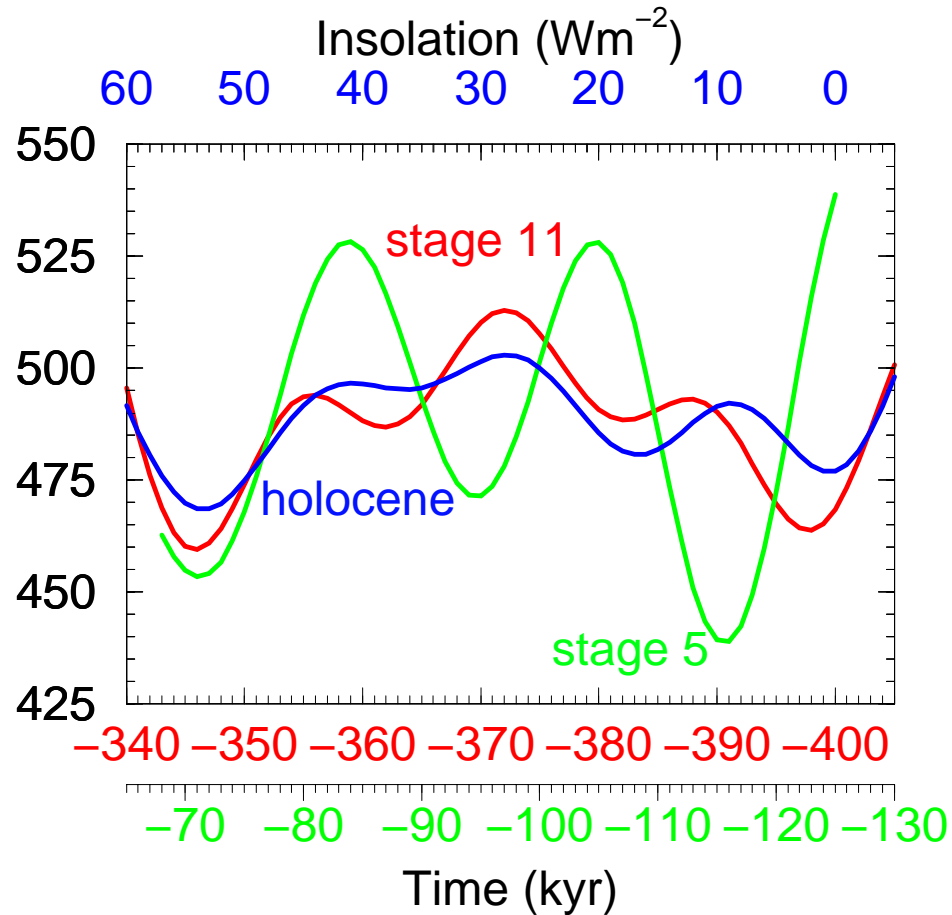
# Orbital parameters : an analogue for the future



# MIS11 :

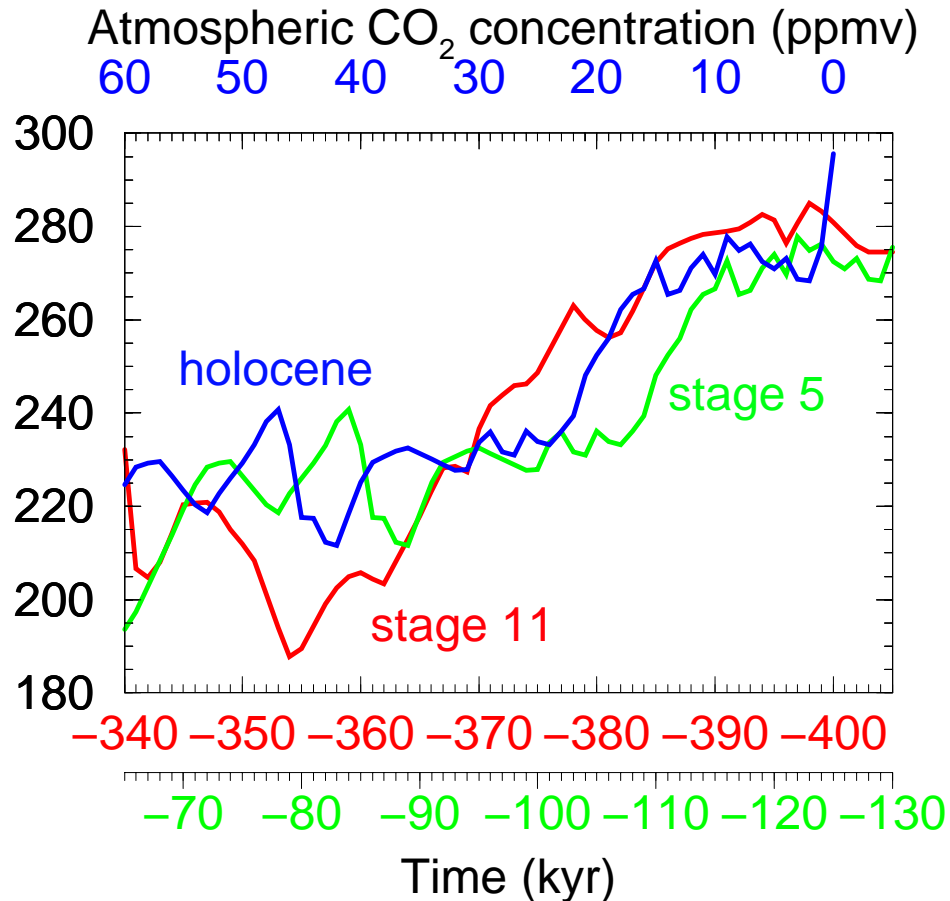
## an analogue for the future

---



# MIS11 :

## an analogue for the future

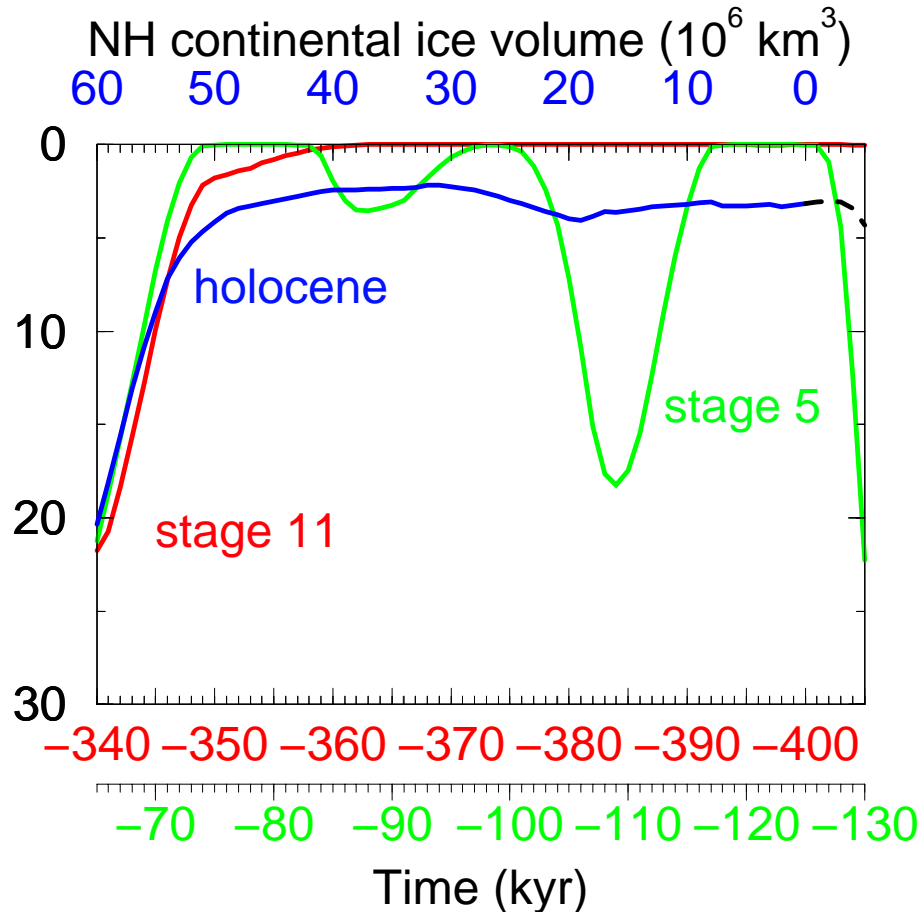


Ref :

Petit et al., 1999

# MIS11 :

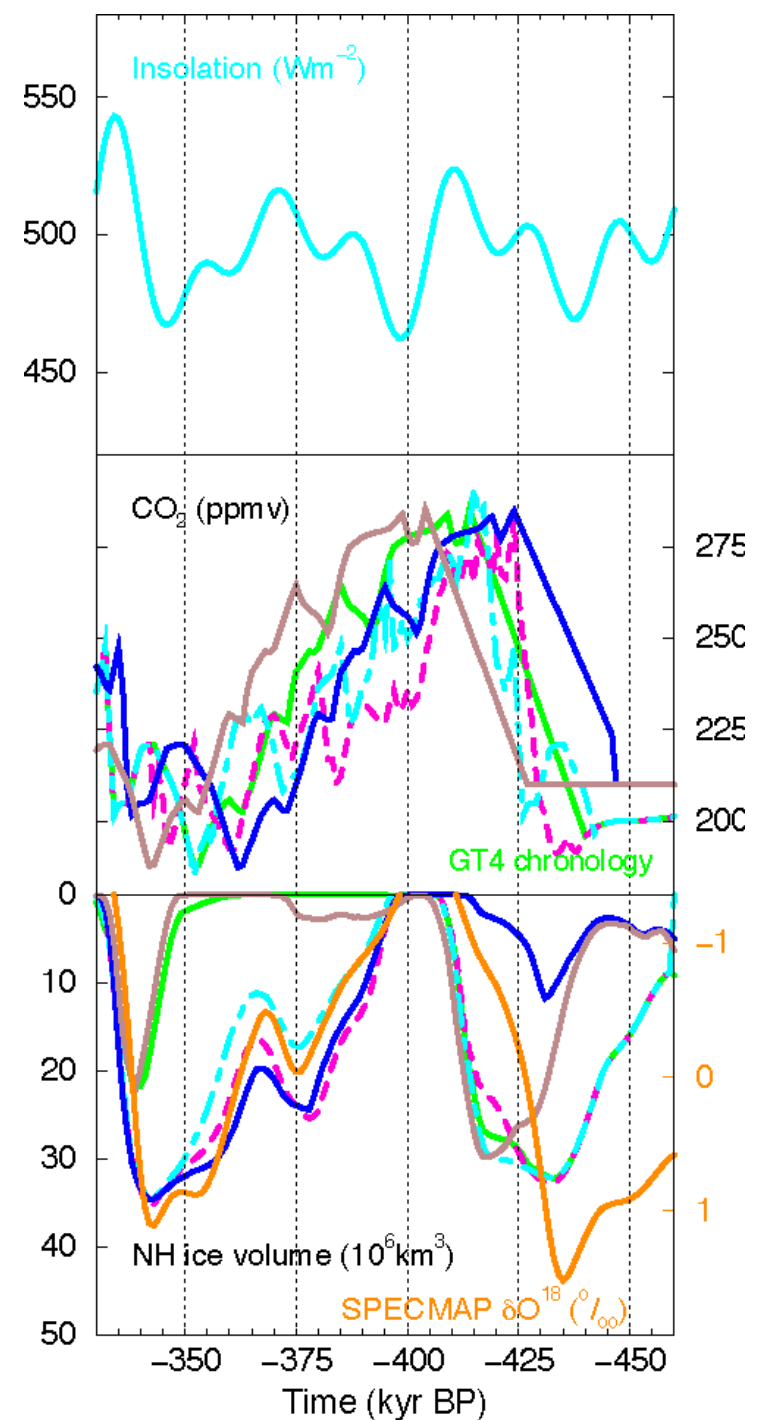
## an analogue for the future



CO<sub>2</sub> = Vostok

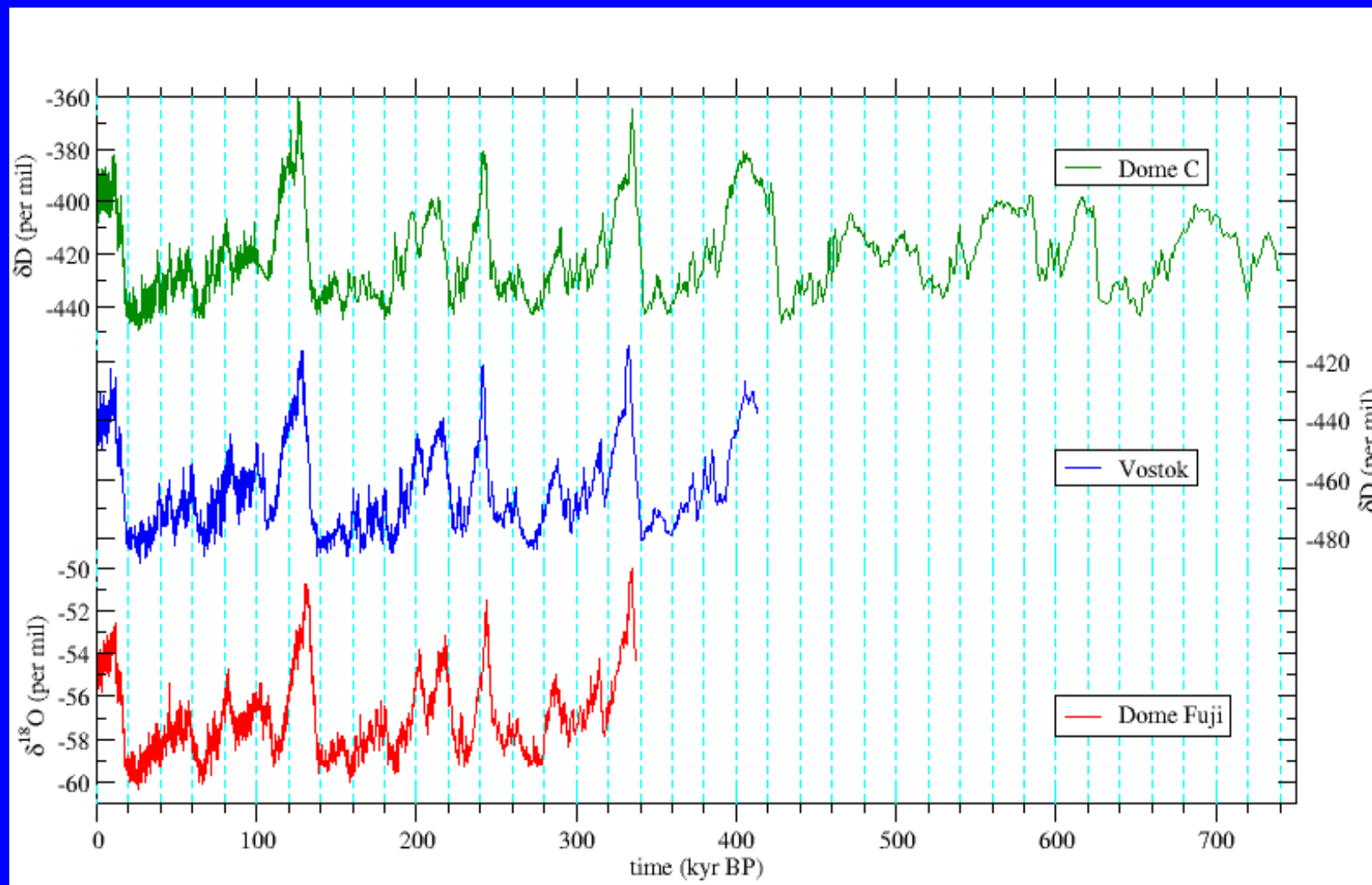
# Sensitivity test on the CO<sub>2</sub> scenario

- Reference
- MIS9
- MIS5
- 10kyr older
- 10kyr younger





# Archives of climate in Antarctica



**1. SOLUTION ASTRONOMIQUE**

**2. MATHEMATIQUE INSOLATION**

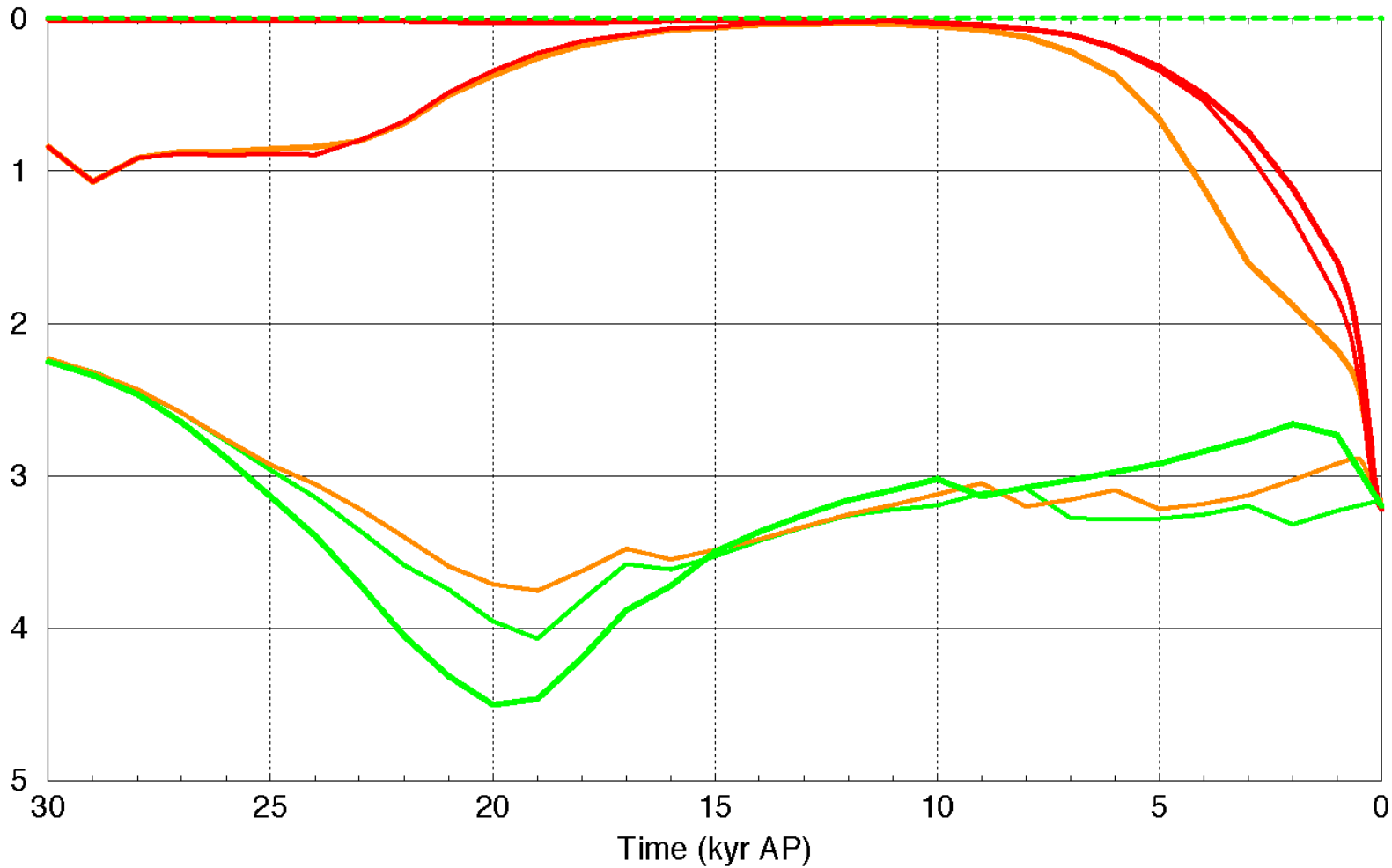
**3. MODELISER LE PASSE**

**4. MODELISER LE FUTUR**

**5. L'IMPACT DE L'HOMME A  
L'ECHELLE ASTRONOMIQUE**

QUEL POURRAIT ÊTRE  
NOTRE CLIMAT A  
L'ÉCHELLE  
GÉOLOGIQUE SOUS  
L'EMPRISE DES  
ACTIVITÉS HUMAINES

# Northern Hemisphere ice volume ( $10^6 \text{ km}^3$ )

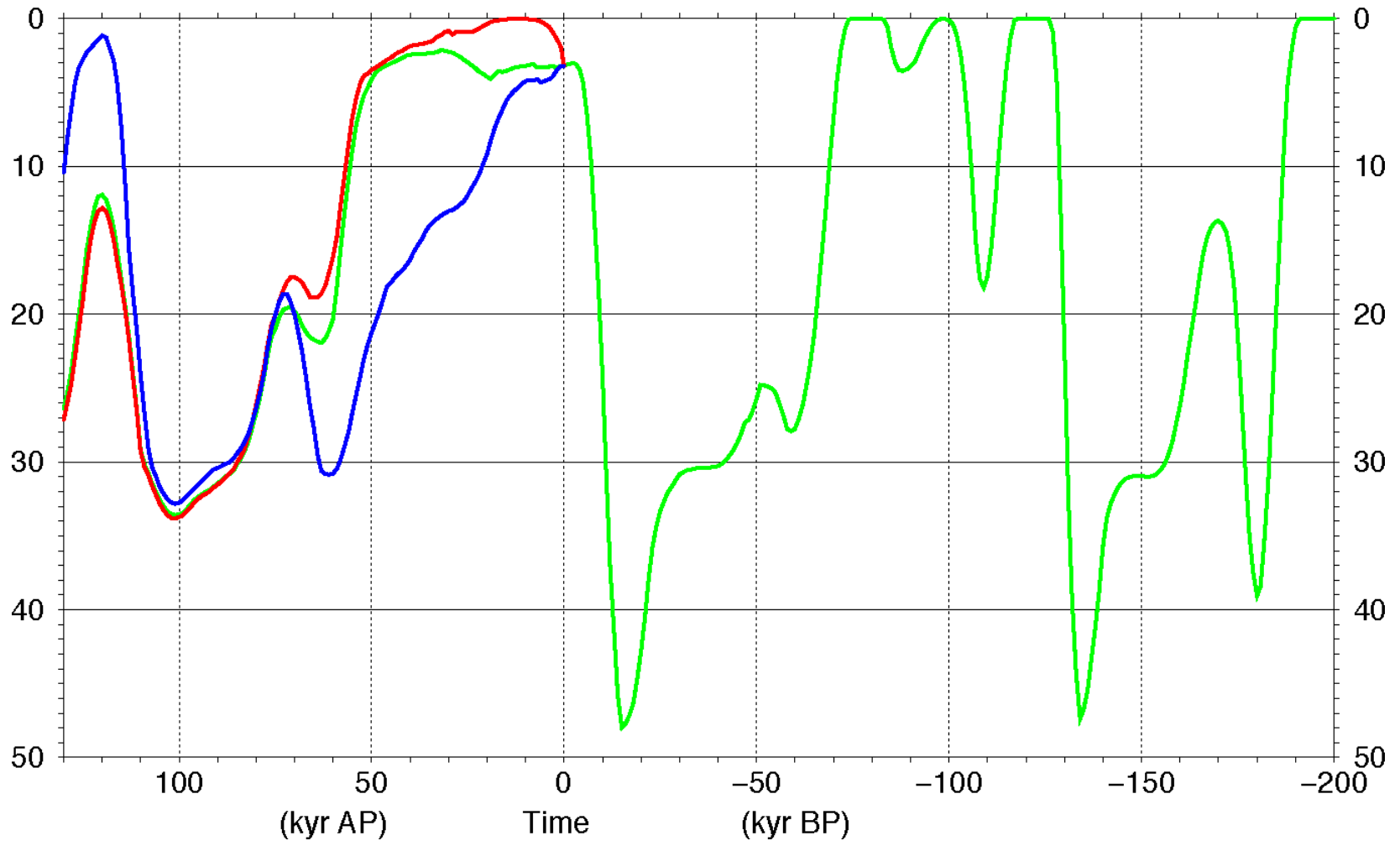


tin line - initial conditions from run -200 - 0

thick line - initial conditions from run -122 - 0

- 550 (M06)
- 750 (M07)
- Jouzel et al., 1983 (B52)
- Jouzel et al., 1983 - initial volume = 0 (B43)
- 550 (M10)
- 750 (M11)
- Jouzel et al., 1983 (B40)

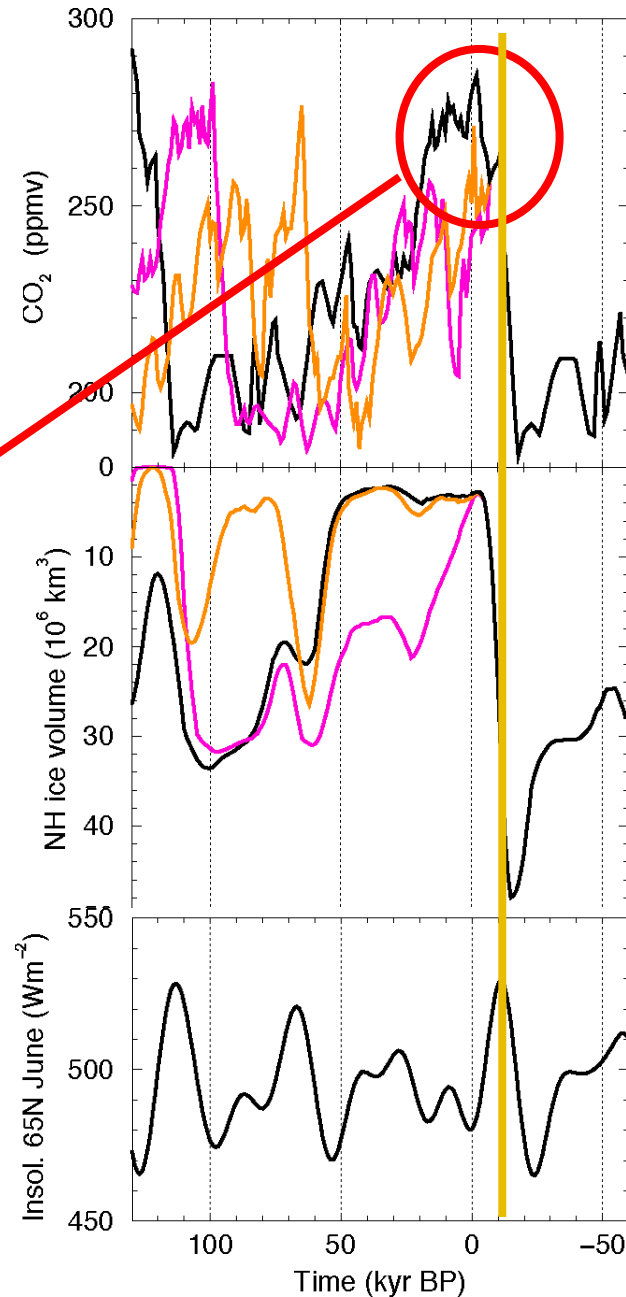
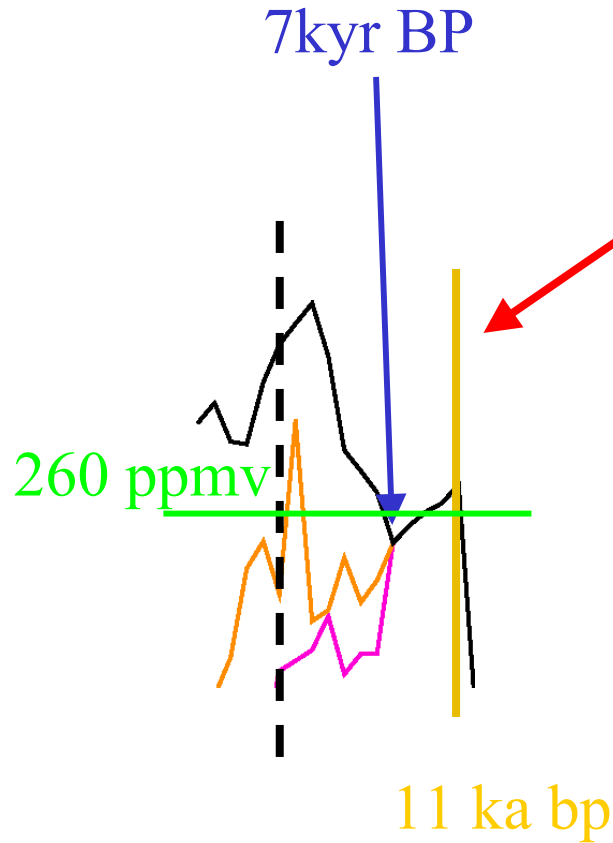
Northern hemisphere ice volume ( $10^6 \text{ km}^3$ )



# The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago

W.F. Ruddiman, climatic changes, 2004.

# Human impact in the past



# **LE FUTUR A L'ECHELLE GEOLOGIQUE**

**Une prévision à base d'astronomie et de  
gaz à effet de serre**



**Période Glaciaire**

**QUATERNAIRE**



**HOLOCENE**



**ANTHROPOCENE (P. Crutzen)**



**Période chaude**

**QUINTERNAIRE**

# CONCLUSIONS

**NOUS VIVONS UNE  
EPOQUE**

**EXCEPTONNELLE**

**1. LE FORCAGE PRINCIPAL  
(ASTR) A L'ECHELLE DE  
MILLIERS D'ANNEES  
N'ALLANT PLUS VARIER AU  
COURS DES MILLIERS  
D'ANNEES A VENIR,  
L'IMPORTANCE DES AUTRES  
(GES) S'EN TROUVE  
LARGEMENT ACCRUE**

**2. L'ENTREE EN GLACIATION  
NE PEUT PLUS SERVIR  
D'EXCUSE AUX EMISSIONS DE  
GES.**

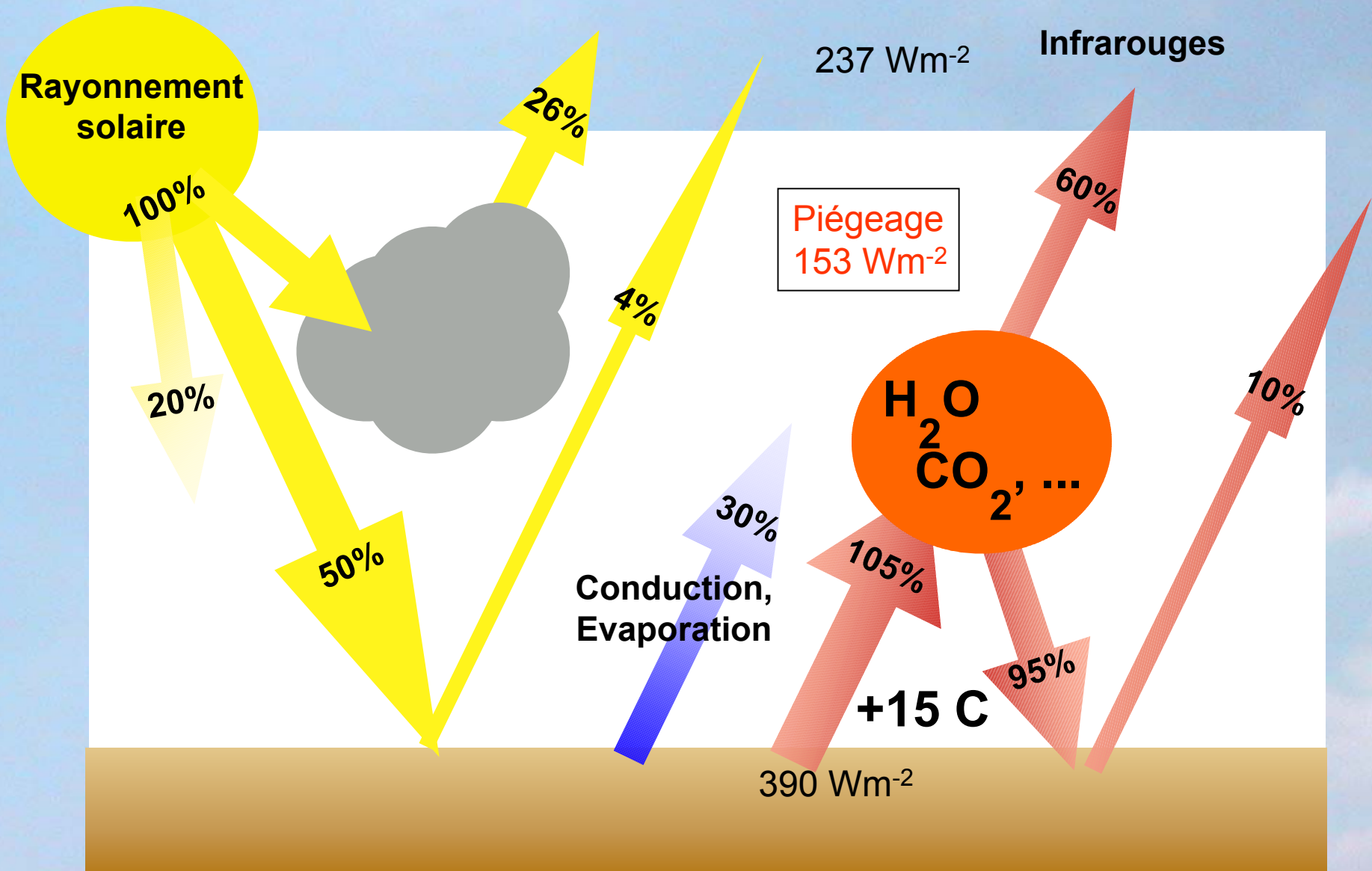
**AU CONTRAIRE, LE RG  
POURRAIT ETRE A L'ORIGINE  
D'UN REFROIDISSEMENT DU  
NORD DE L'ATLANTIQUE NORD  
DU A UN AFFAIBLISSEMENT DU  
GULF STREAM**

2200 A.D.

**N'est-ce pas le  
type de la théorie  
astronomique et  
ses prévisions en  
2000**

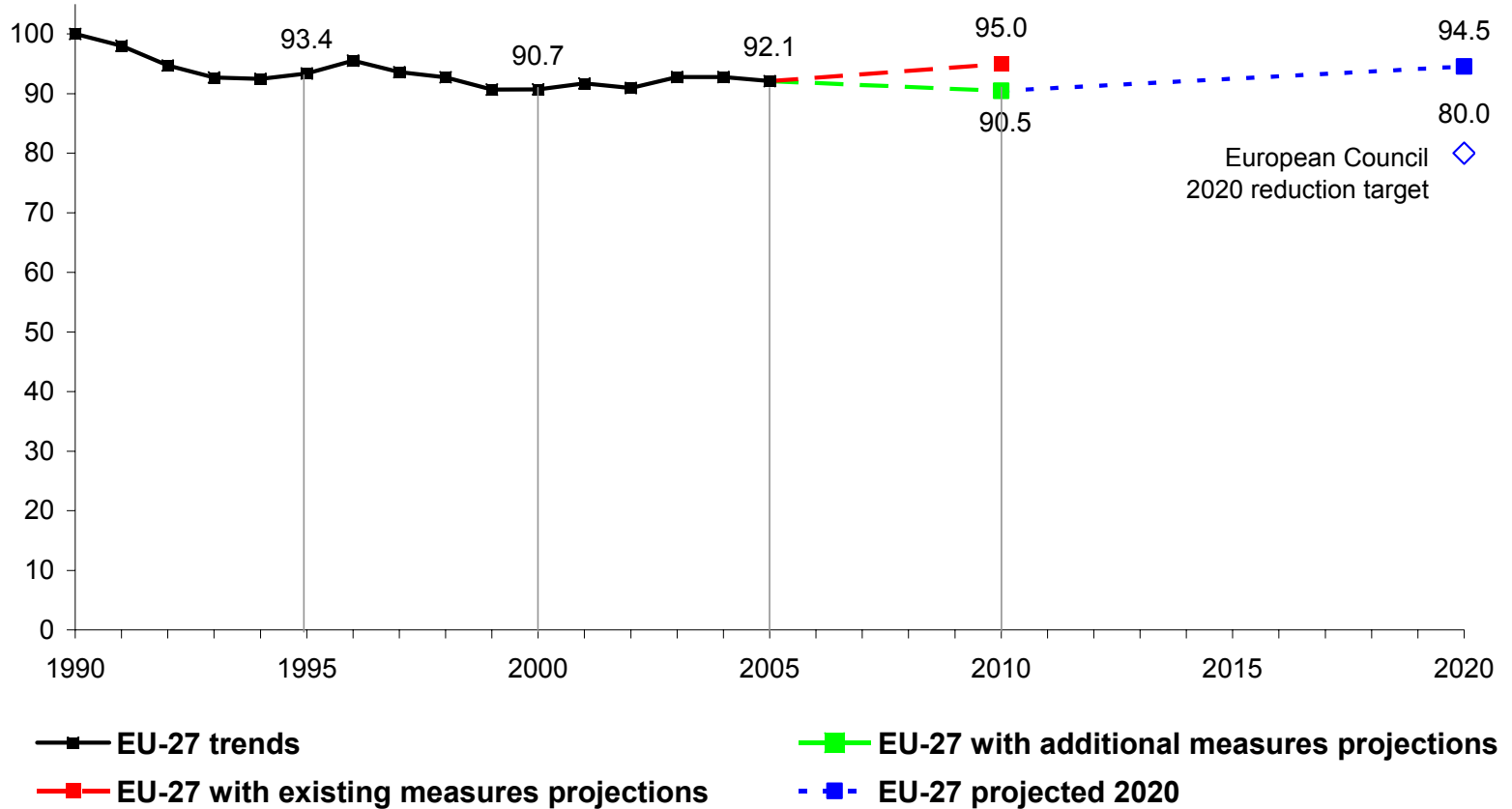


# Cycle de l'énergie et effet de serre



# Figure 3.1 Greenhouse gas emission trends and projections for EU-27 and outlook for 2020

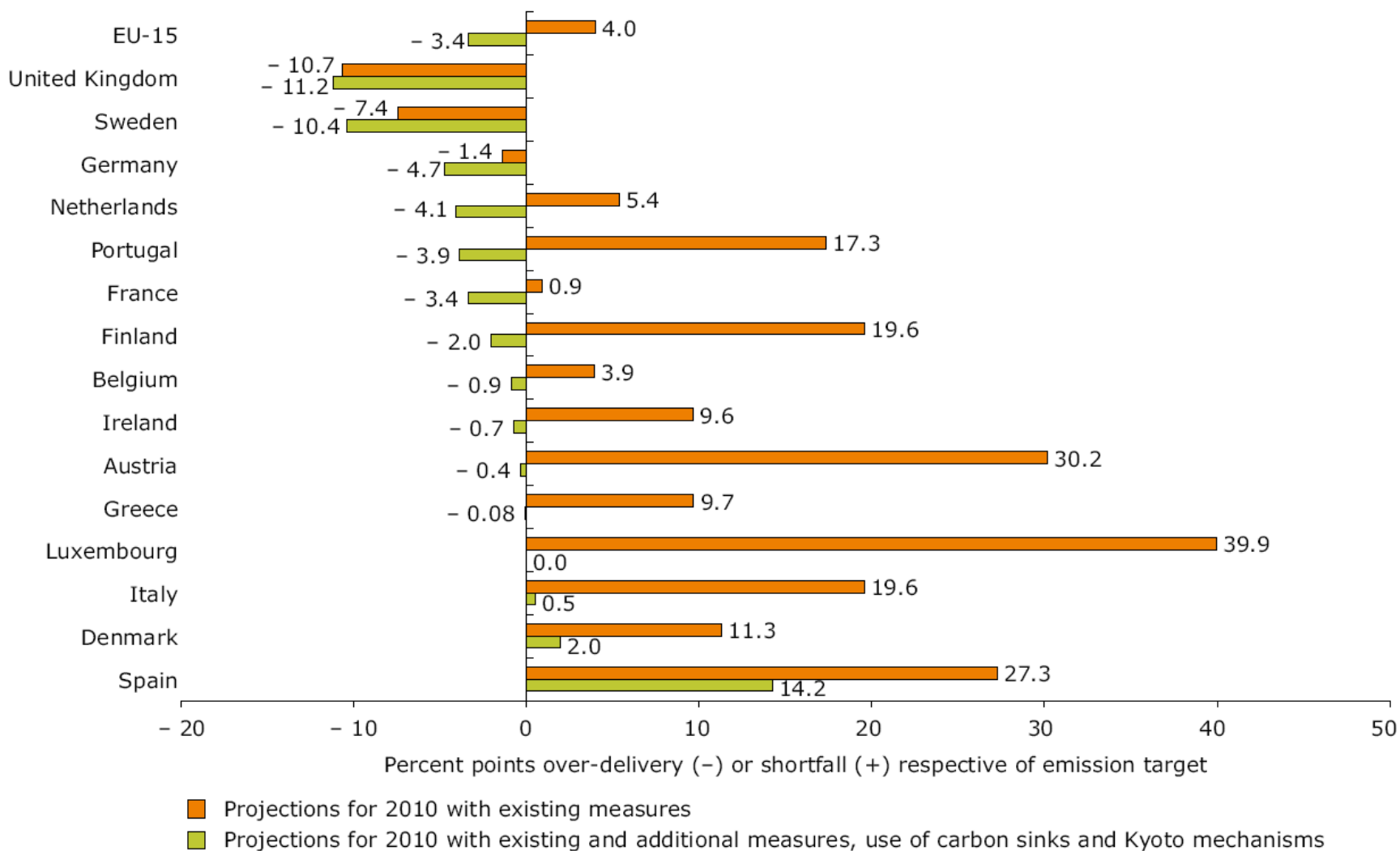
**GHG emissions**  
(1990 level = 100)



**Note:** Data exclude emissions and removals from land-use change and forestry. The following countries did not report 2015 nor 2020 projections: Portugal, Luxembourg, Estonia and Malta. For Portugal, Luxembourg and Estonia, projections were gap filled with their respective 2010 burden-sharing or Kyoto target for 2010. For Malta, the 2010 projection is used for 2015 and 2020.

**Source:** EEA, based on EU Member States greenhouse gas inventories and projections.

**Figure 4.4 Relative gaps (over-delivery or shortfall) between greenhouse gas projections and 2010 targets for EU-15 Member States**





# EOLIENNES - CENTRALES ?

## 2002

EU15 : 428 gCO<sub>2</sub> / kwhe

NU(%)RE

78-12	FR	:	106
58- 3	BE	:	323
46-49	SE	:	84

NU(%)RE

29- 8	DE	624
4- 4	NL	665
0-19	DK	676
26-15	ES	460
0-17	IT	538

## Éoliennes et CO<sub>2</sub>

Scénario 1998-2005 1 centrale nucléaire 0,83 GW → eol :

0,83 GW = 553 eol x 1,5 MW = 1,97 TWh (6,5 h par jour)

0,83 GW = 1 centr. Therm. = 5,30 TWh = 4,46 MtCO<sub>2</sub> (842 gCO<sub>2</sub>/kWh)  
(17,5 h/jour)

Total (2 X 0,83 GW) = 7,27 TWh

Cela donne donc 613 gCO<sub>2</sub>/kWh ou 1,8 x actuel 1998-2005

1 éol+therm (2 x 1,5 MW) = 8000 tCO<sub>2</sub> par an

13.2 GWh = 4000 familles x 2 tCO<sub>2</sub> : 1 tCO<sub>2</sub> en plus par famille/an

# BELGIQUE

	EMISSIONS					ELECTRICITE TWh					
	MtCO <sub>2</sub> eq	Non CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Non- elec	Elec	Elec	Nucl	Renouv.	Therm.	MtCO <sub>2</sub> /TWh Them Global	
1990	145,6	26,5	119,1	89,2	29,9	70,8	42,7	0,9	27,2	1,10	0,422
1998	152,7	25,4	127,3	97,2	30,1	83,2	46,1	1,5	35,6	0,846	0,362
2003	147,8	21,5	126,3	97,2	29,1	84,6	47,4	1,7	34,5	0,843	0,394
2010	134,7	21,5	113,2	100	13,2	87,4	56,66	8,74 2456 eol	22,0	0,600	0,151
	159,8	21,5	138,3	100	38,3	87,4	0	23,6 (*)	63,8	0,600	0,438
	175,3		153,8		53,8					0,843	0,615

Nucléaire : 7 réacteurs = 5,8 GW = 46,1 TWh  
 1000 éoliennes de 1,5 MW = 3,6 TWh  
 (1) + 35 Mt ou 175 M€ (2) + 40 Mt ou 200 M€

1 réacteur = 6,6 TWh = 1830 éoliennes  
 (\*) 6600 éol de 1,5 MW

***La production d'électricité en Belgique (EU, 2005) et les émissions de CO2 qui en résultent (EEA, 2005b). Situations en 1990, 1998 et 2003 et projection pour 2010. (Berger, 2008 dans Changeux et Reisse, Odille Jacob, Collège de France) update***

	EMISSIONS					ELECTRICITE TWh					
	MtCO <sub>2eq</sub>	Non CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Non- elec	Elec	Elec (1)	Nucl	Renouv	Therm.	MtCO <sub>2</sub> /TWh Them Global	
1990	145,6	26,5	119,1	89,2	29,9	70,8	42,7	0,9	27,2	1,10	0,422
1998	152,7	25,4	127,3	97,2	30,1	83,2	46,1	1,5	35,6	0,846	0,362
2003	147,8	21,5	126,3	97,2	29,1	84,6	47,4	1,7	34,5	0,843	0,344
2003Nuc0	187,7	21,5	166,2	97,2	69,0	84,6	0,0	1,7	81,9	0,843	0,816
2003Kyoto (9 nucl pp)	138,5	21,5	117,0	97,2	19,8	84,6	59,4	1,7	23,5	0,843	0,234
2010hightec	134,7	21,5	113,2	89,2	24,0	87,4	18,66	8,74 2456 eol	60,0	0,400	0,275
2010midtec	134,7	21,5	113,2	100	13,2	87,4	56,66	8,74	22,0	0,600	0,151
2010Nuc9	133,0	21,5	111,5	100	11,5	87,4	59,40	8,74	19,26	0,600	0,132

(1) pour les lignes 2003, il faut ajouter "pumped storage" qui vaut 1 TWh aux sources d'énergie

2003Nuc0 : les émissions si pas de centrales nucléaires → 49,3 MtCO<sub>2eq</sub> excédentaires. Électricité représente alors 37% des émissions belges, devant résidentiel-tertiaire (17%), industries (16%), transport (14%), processus industriels et agriculture (16%).

2003Kyoto : respect de Kyoto dans les mêmes hypothèses non-CO2 et non-elec requiert 9 centrales nucléaires (cad 2 de plus qu'en 2003 et ce, d'une puissance plus ou moins équivalente à la moyenne de 2003)

2010hightec : respect de Kyoto avec centrales thermiques à 400gCO<sub>2</sub> par kWh, eol de 1,5 MW

2010midtec : centrales thermiques plus réalistes à 600 gCO<sub>2</sub> par kWh et 100 MtCO<sub>2</sub> pour non-elec tenant compte de l'accroissement du transport routier. On a alors besoin de plus d'une centrale nucléaire en plus! Ou se priver de 9,6 TWh d'électricité ou payer 5,76 MtCO<sub>2eq</sub> excédentaires.

2010nuc9 : même scénario si 9 centrales nucléaires. Alors on est 1,7 MtCO<sub>2eq</sub> au-dessous de Kyoto

Références observations : European Environment Agency, Technical Report 4, 2005 et UNFCCC. Pour scénarios : Berger A., 2007

## MECANISMES DE KYOTO EU-15

Période d'engagement (commitment period) : 2008-2012

Permis d'émissions (IET), Implantation conjointe (JI), Mécanisme de développement propre (CDM)

Réduction prévue : 106.8 MtCO<sub>2eq</sub> par an représentant 30 % des 340 requis ou 2.5 des 8 % promis

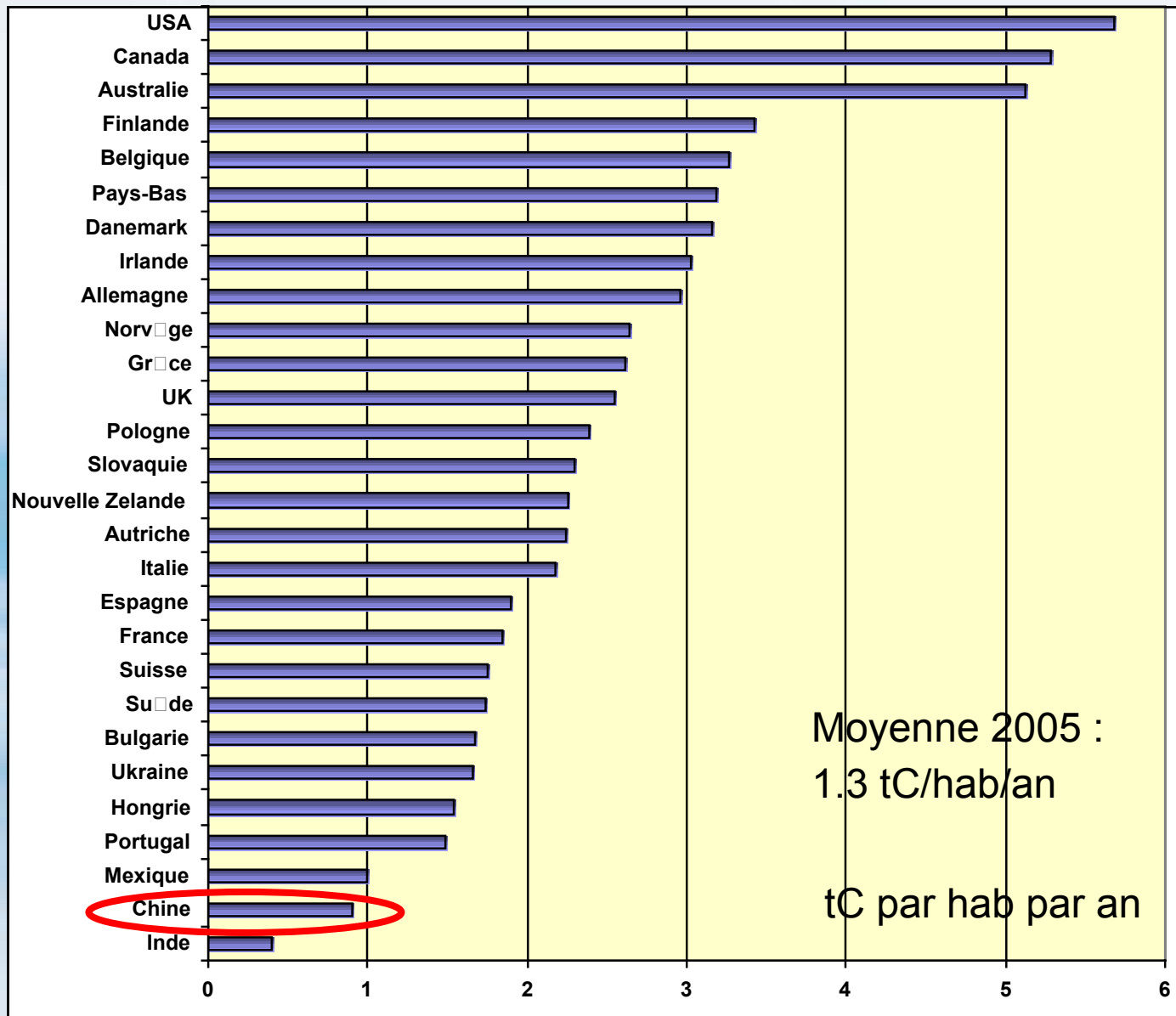
Autriche, Belgique, Danemark, Finlande, Allemagne, Italie, Pays-Bas, Espagne, Suède ont prévu 2730 M euros, ce qui à 7.4 euros / tCO<sub>2eq</sub> représente une réduction de 74 MtCO<sub>2eq</sub>/an

Italie : 1320, Pays-Bas : 606, Autriche : 288, Espagne : 200 M euros

Belgique : 118 M euros : GF (JI-CDM) : 70, Brux : 9, FI : 25, W (CDM) : 14

Projection : 148.4 M tCO<sub>2eq</sub> cad 15.2 au-dessus de Kyoto

# C'est «encore plus vrai» pour les émissions par habitant



Jancovici,cdf  
oct 04

Émissions brutes de CO<sub>2</sub> par habitant pour quelques pays en 1998. Source UNFCCC. Un Chinois émet 6 fois moins qu'un Américain

Si les Chinois se mettent à consommer comme en Belgique, leurs émissions par habitant et par an passera à 3 tC . Cela représente une augmentation totale de  $2 \times 1,3 \text{ GtC} = 2,6 \text{ GtC/an}$ .

Sur un total actuel de 8 GtC, cela représente une augmentation de 33 %