

Le système climatique

Modélisation

Observation

Constat de crise

Robert Kandel

Laboratoire de Météorologie Dynamique du C.N.R.S.,
Ecole Polytechnique, Palaiseau



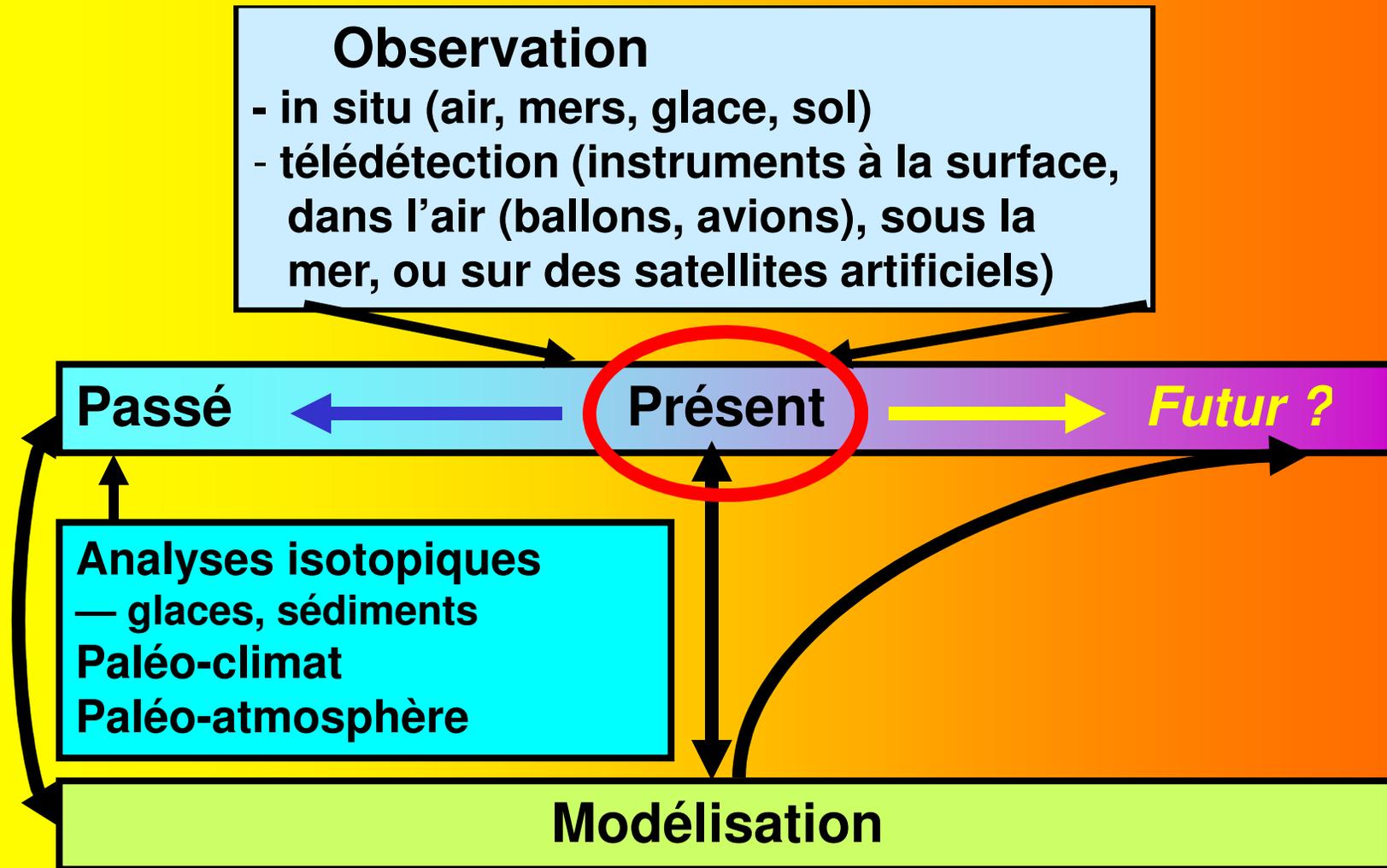
Nancy: 20 novembre
2010



Robert Kandel - La crise climatique



Les grands axes de la recherche sur les climats



Les échelles de temps du climat

Cycles Astronomiques

Cycles internes

Cycle diurne

27 jours ?

Cycle annuel

Quelques années à quelques décennies

Oscillation Australe (ENSO)

Oscillation Nord-Atlantique (NAO)

Oscillation Arctique

**Plus de 1.200 ans pour mélanger
complètement les océans**

Cycles astronomiques (Milankovitch)

- 19.000 à 400.000 ans

Les variations astronomiques — les cycles de Milankovitch

Variations d'insolation (à 65°N, etc.)

- ne pas confondre avec des variations du Soleil

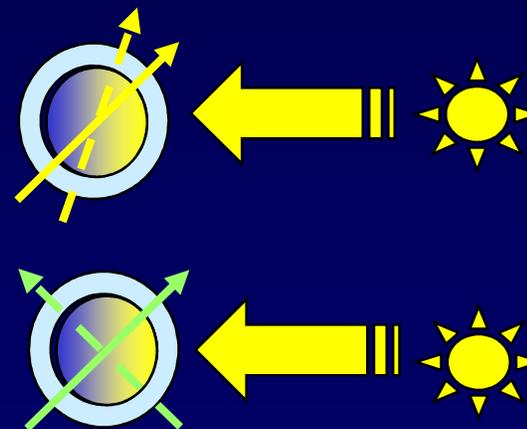
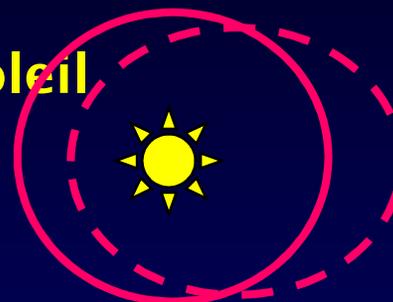
Variations avec des quasi périodicités de
400.000, 100.000, 40.000 et 21.000 ans

- de l'excentricité de l'orbite de la Terre

- de l'obliquité de l'écliptique

- de la longitude du périhélie

Modifiant la répartition de l'insolation
avec la latitude et la saison



Les échelles de temps du climat



Modélisation et Observation

Observations locales

⇒ *synthèses de moyennes régionales et planétaires*

Observations instantanées

⇒ *synthèses de moyennes mensuelles, annuelles...*

Données (locales, globales) sur le passé

⇒ *synthèses de l'histoire climatique*

Modélisation globale (0-D, 1-D, 2-D)

⇒ *équilibre, sensibilité aux perturbations...*

⇒ *simulations du futur*

Modélisation détaillée (3-D + t)

⇒ *équilibre, sensibilité aux perturbations...*

⇒ *simulations du présent et du futur*

La crise climatique

En 2009-2010, une crise médiatique et politique.

Un déluge de désinformation et de déni des réalités scientifiques établies, déluge étayé par une campagne bien financée et très organisée.

Et en France au moins, des débordements de déni bénéficiant de la complaisance entre les médias et quelques intellectuels non-scientifiques voire de certains scientifiques ignorants du climat.

Je parlerai en scientifique du climat.

Quels sont les risques réels d'une *crise climatique* – voire d'une véritable catastrophe climatique – avant la fin de ce siècle ?

Mécanismes physiques du climat

La climatologie physique, une science ancienne: mécanismes principaux définis depuis 150 ans.

1824: Jean-Baptiste-Joseph Fourier (1768-1830)

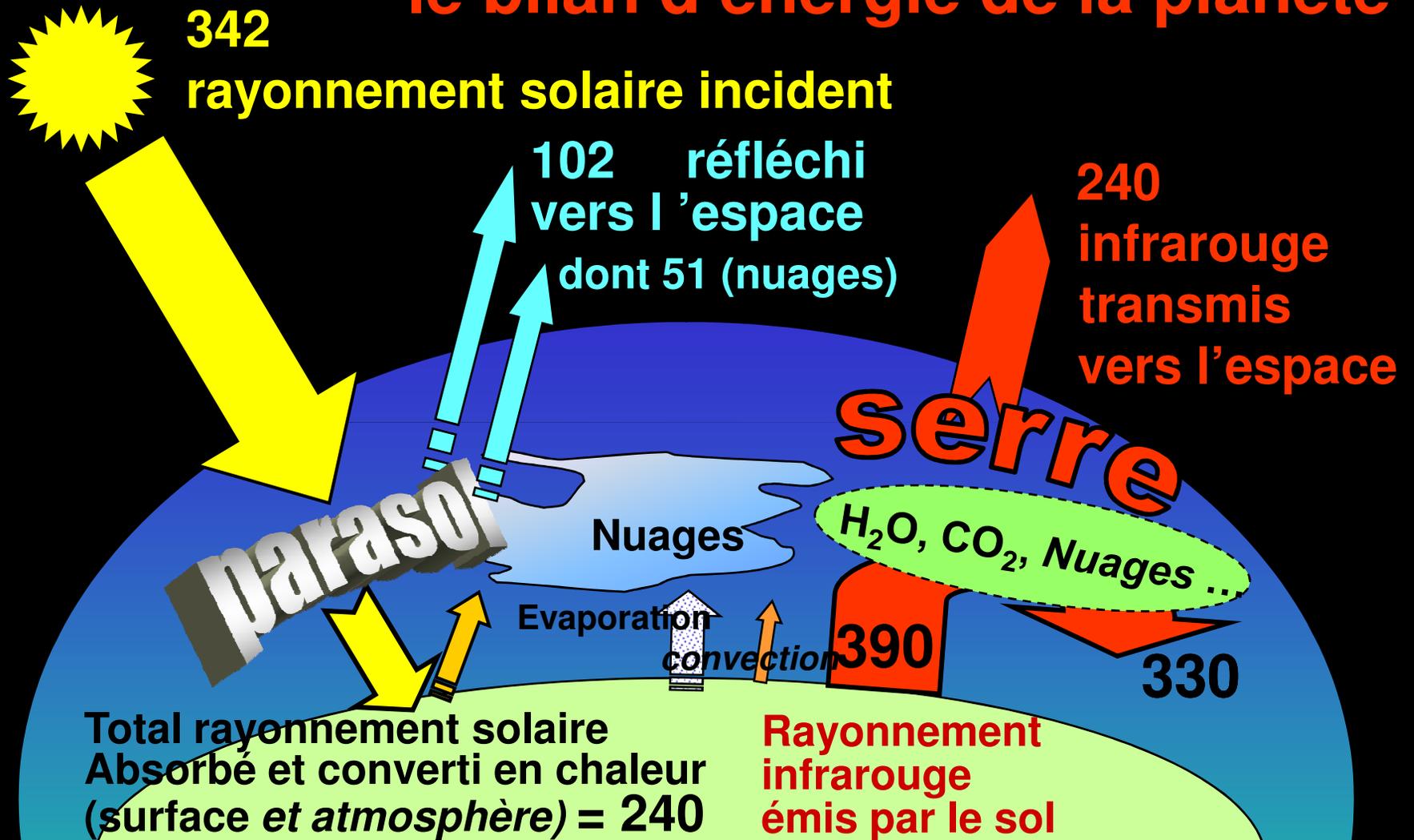
1860: John Tyndall (1820-1888)

sans oublier H.-B. de Saussure, A. von Humboldt, ...

La climatologie physique, une science jeune et dynamique, en plein essor grâce aux progrès dans les possibilités d'observation (espace, océans, glaces), les instruments de mesure et de sondage, les méthodes d'analyse et la puissance des moyens de calcul numérique.

La climatologie physique, une science robuste: les principes définis il y a 150 ans restent valables.

La physique de l'atmosphère et du climat - le bilan d'énergie de la planète



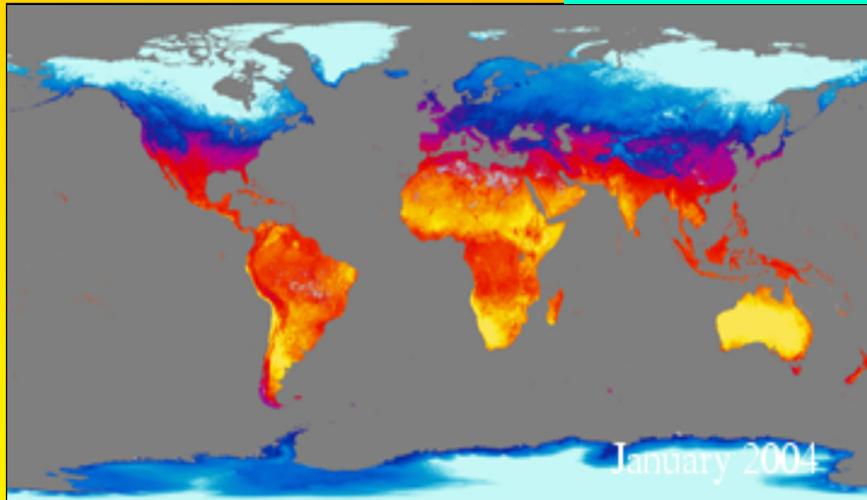
Flux en watts par mètre carré

↓ 0,6 ? ↑ 0,1

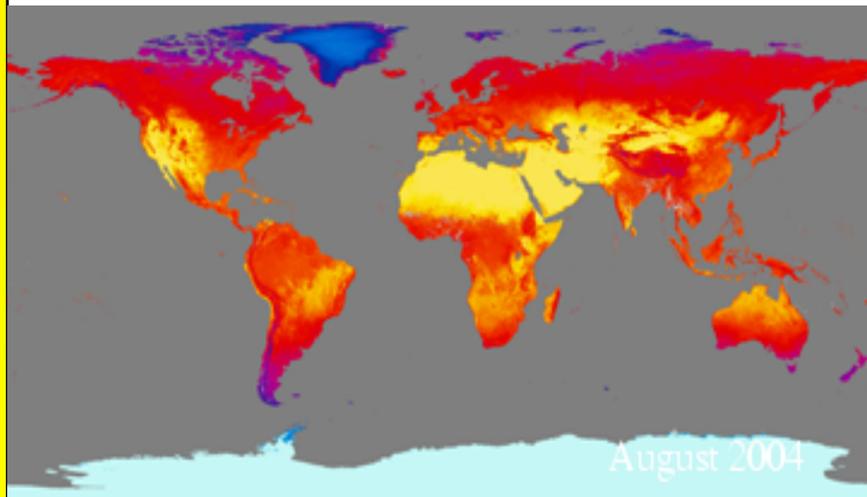
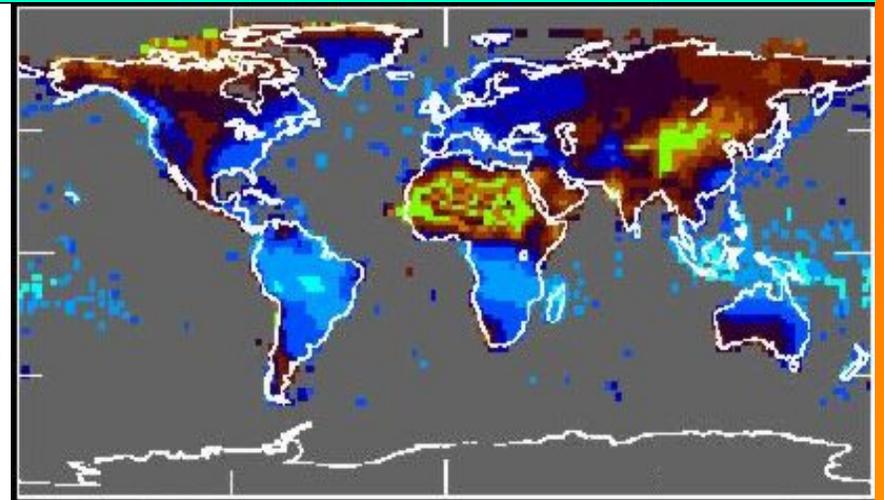
R. Kandel - 2010

Le Climat – température

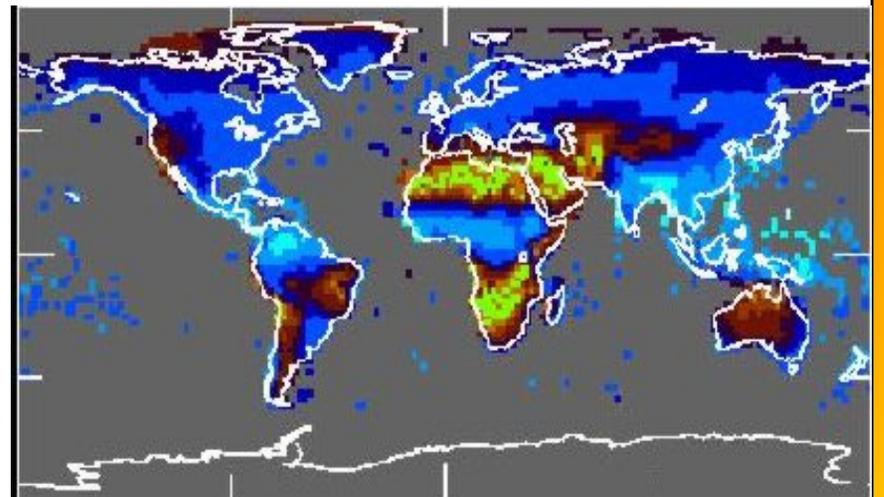
Mais aussi une affaire d'eau - précipitation



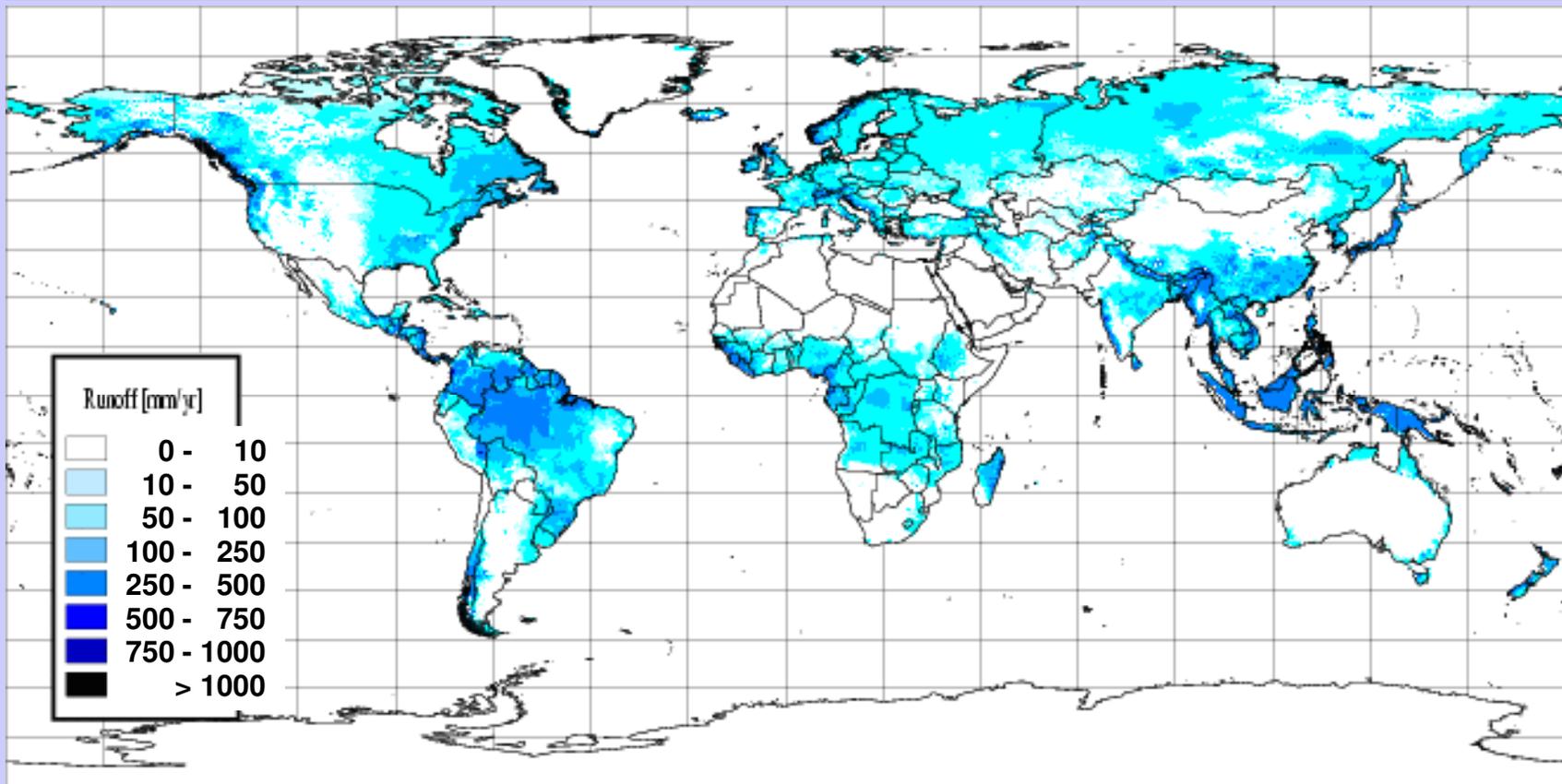
janvier



juillet

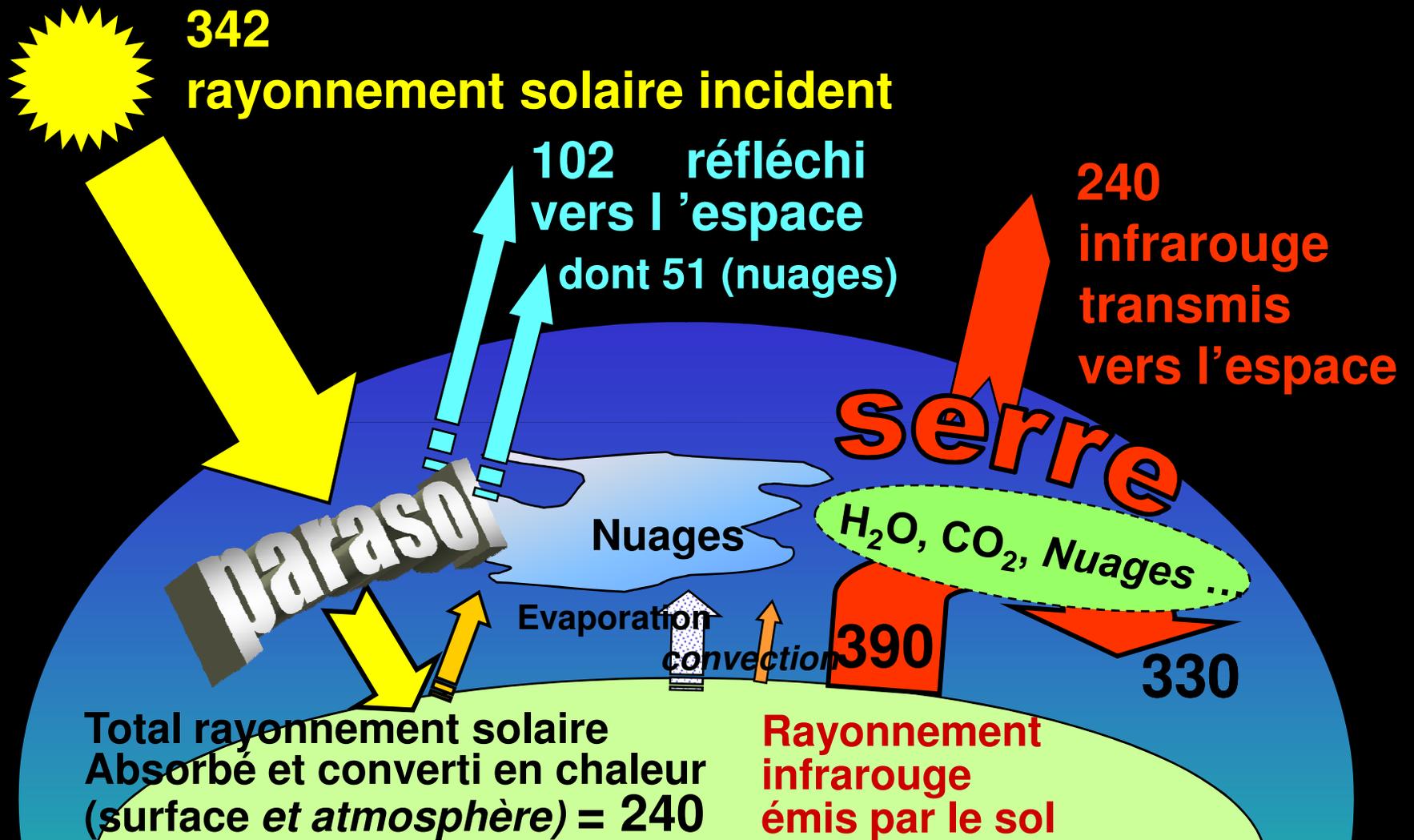


**Et aussi l'eau qui coule –
Ruissellement = Précipitation – Evaporation
(moyenne annuelle en mm/an)**



ISEOS/UNH (USA) and GRDC/BfG (Germany)
Composite Runoff Fields

Retour - le bilan d'énergie de la planète



Flux en watts par mètre carré

↓ 0,6 ? ↑ 0,1

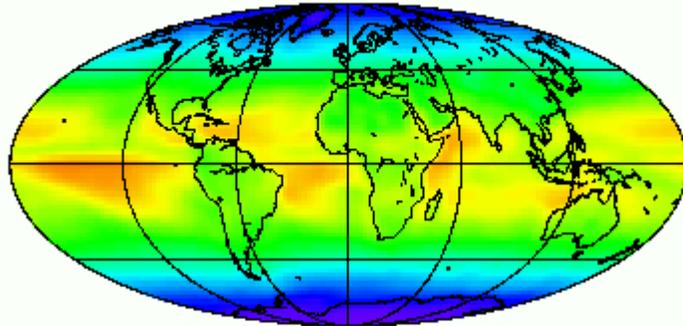
R. Kandel - 2010

Rayonnement solaire absorbé

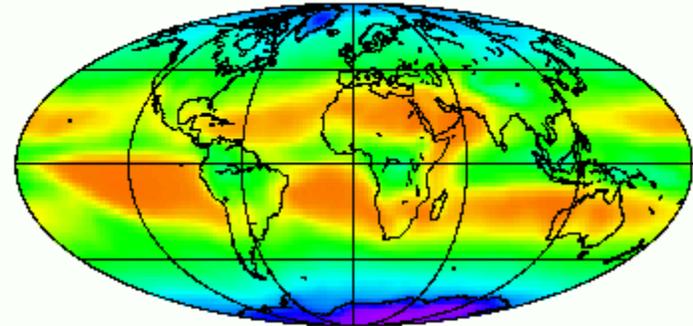
Infrarouge thermique émis

Puissance Solaire Absorbée

Puissance Infrarouge Emise

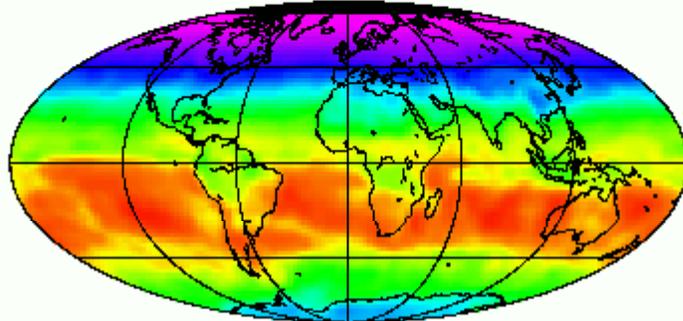


1994-
1995

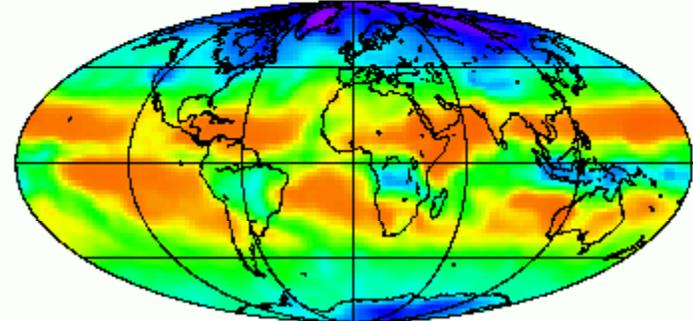


Moyenne Annuelle

Moyenne Annuelle

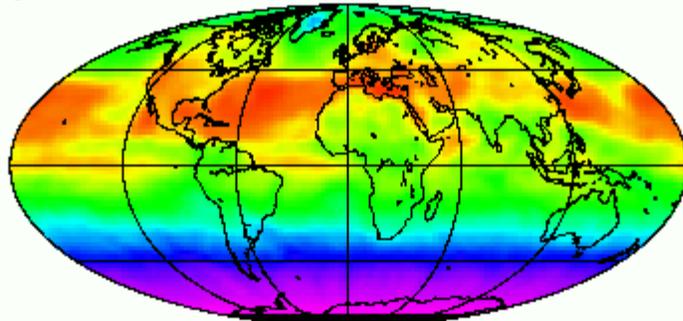


Janvier
1995

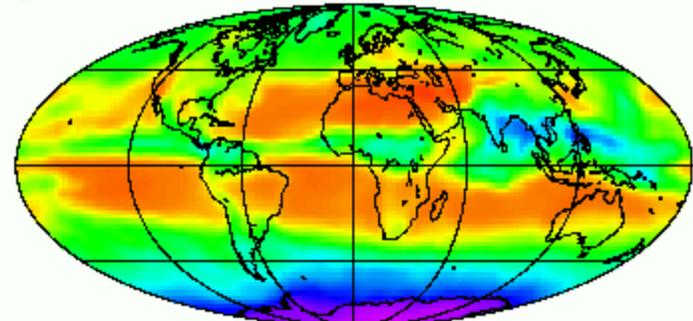


Janvier 1995

Janvier 1995



Juillet
1994

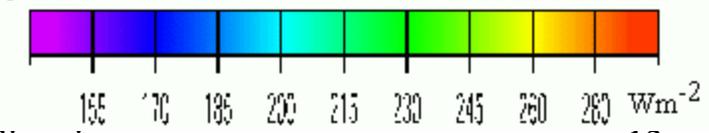
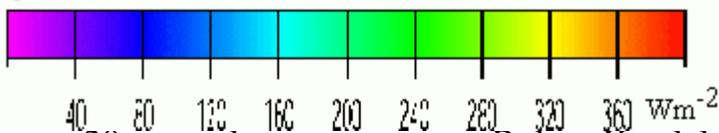


Juillet 1994

ScaRaB CNRS/LMD

Juillet 1994

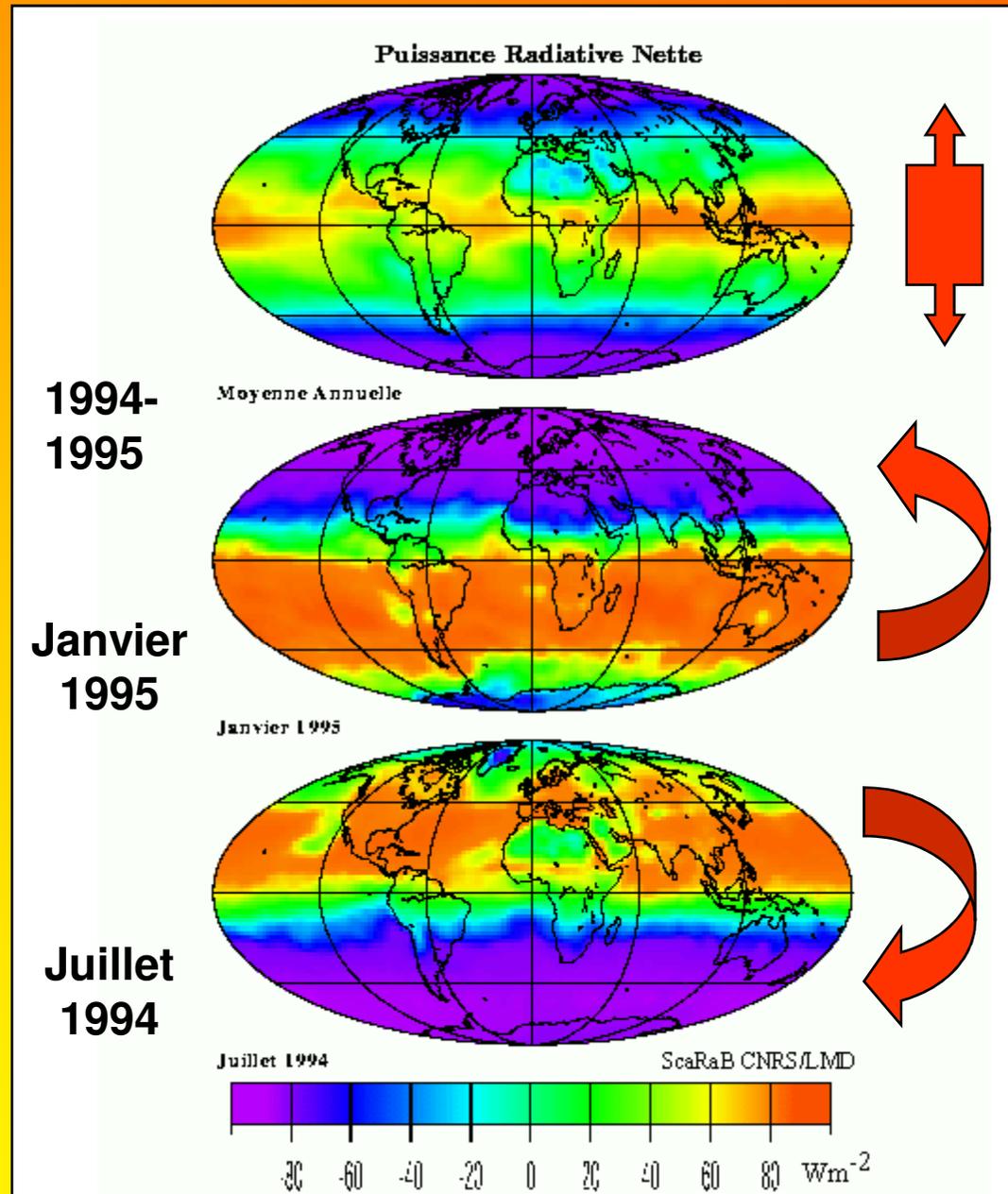
ScaRaB CNRS/LMD



Flux Net

Bilan Radiatif

Transports horizontaux
d'énergie
et d'eau



Le Climat « Planétaire »

Soleil, Parasol, Serre



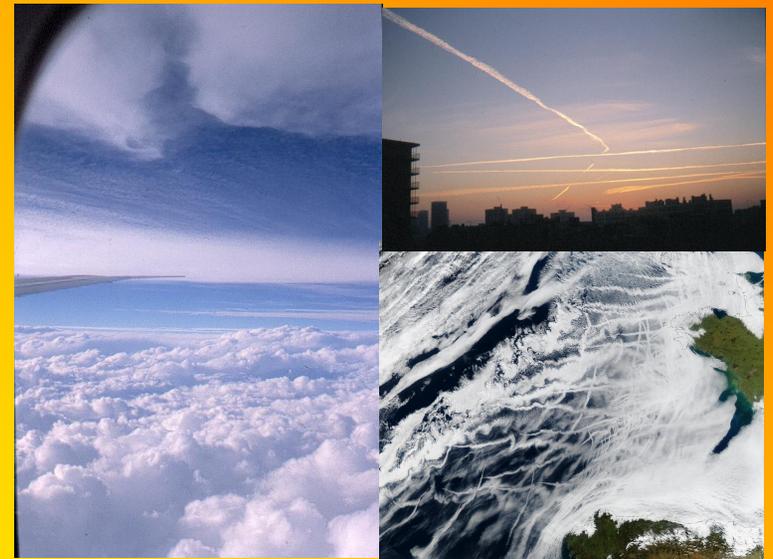
Le Soleil

- *Les activités humaines n'ont aucun effet*
- *L'activité solaire affecte-t-elle le climat ?*



Le Parasol

- **Nuages**, glaces
- Poussières
- Eruptions volcaniques
- *Pollution Visible*



La Serre !

- *Pollution invisible !*
- *Emissions anthropiques de CO₂ et d'autres gaz*
- *Perturbation anthropique du cycle de l'eau*

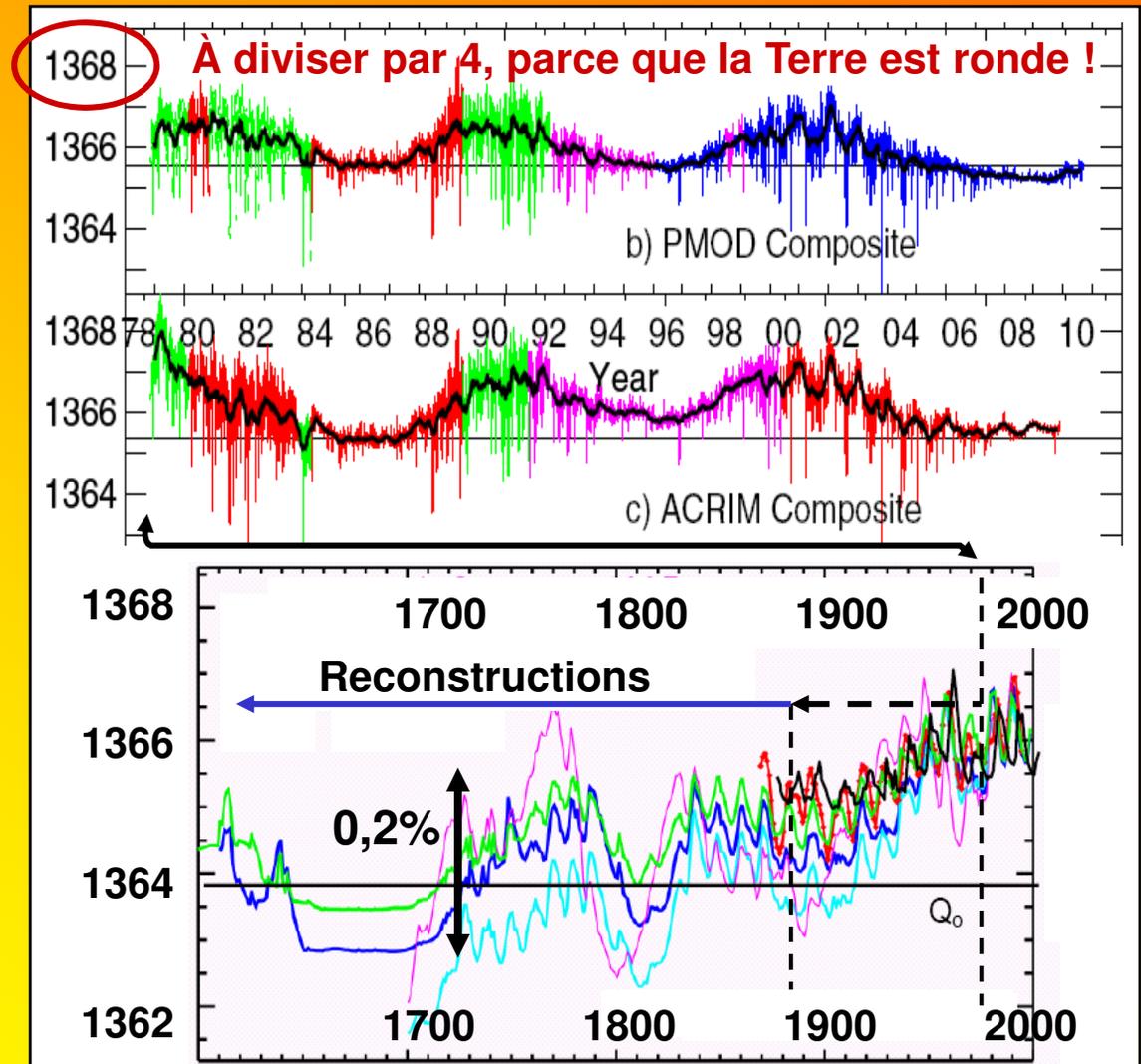
Le Soleil – activité parfois spectaculaire mais irradiance presque *constante*



Lumière visible



Rayonnement
ultraviolet



Le Parasol et son renforcement ?

Aérosols (particules solides ou liquides suspendues dans l'air)

Aérosols volcaniques

Résidant 1 à 2 ans dans la stratosphère
(10-20 km d'altitude)
⇒ refroidissement global temporaire, ou
pause dans le réchauffement



Aérosols anthropiques (pollution)

- dans la troposphère (0 – 10 km d'altitude)
Temps de résidence court - effets *régionaux*
- Aérosols réfléchissants, refroidissant la surface du globe
 - Aérosols noirs (suies...), réchauffant l'air mais réduisant l'ensoleillement à la surface
 - *Effets indirects, sur les nuages ?!*



L'effet de serre et son renforcement

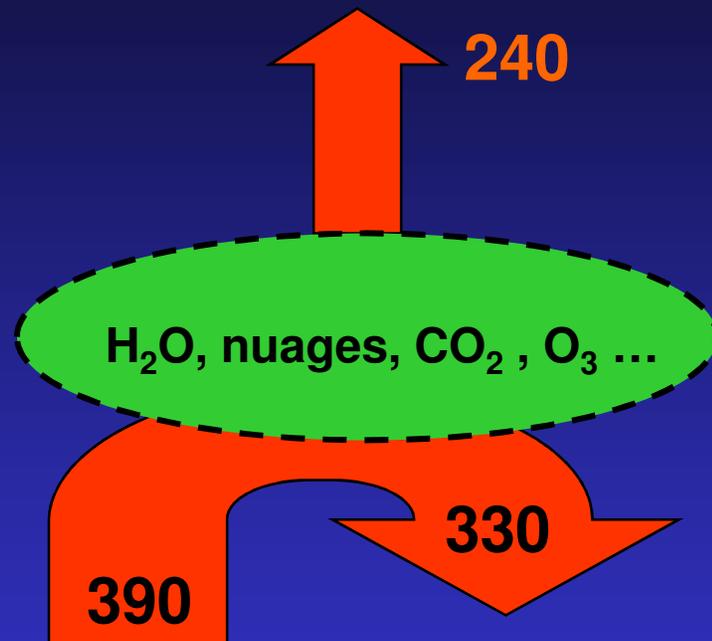
Contrôle l'évacuation d'énergie vers l'espace par rayonnement infrarouge.

Absorption/émission de l'infrarouge par les seules molécules *polyatomiques* de l'atmosphère ainsi que par les nuages.

L'azote, l'oxygène, l'argon (99% de l'atmosphère) ne jouent aucun rôle.

Le rayonnement infrarouge *vers le bas* réchauffe la surface du globe et les basses couches de l'atmosphère.

Ajouter des molécules de CO_2 à l'atmosphère *intensifie* l'effet de serre.



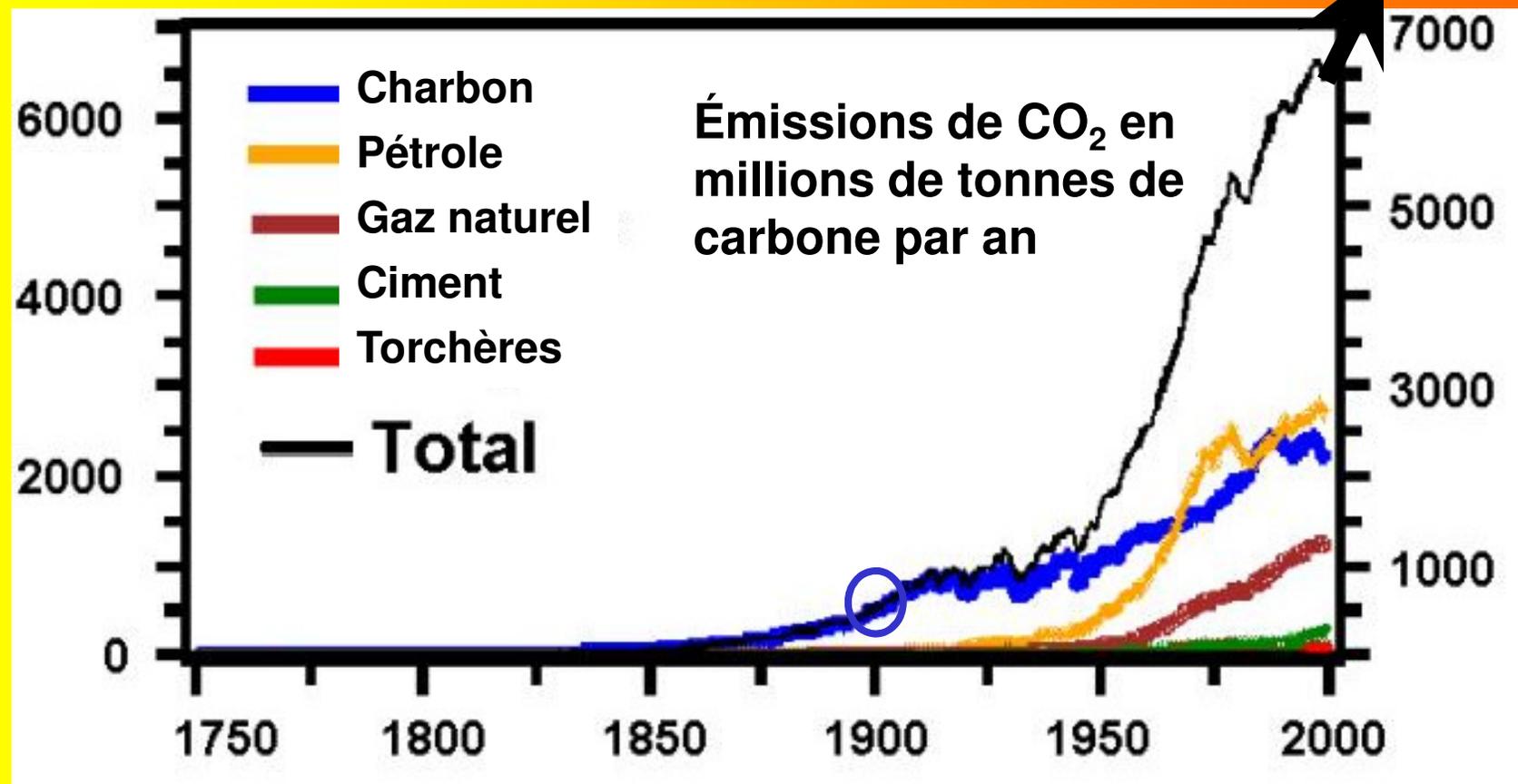
Effet de serre: $390 - 240 = 150 \text{ Wm}^{-2}$
Principalement dû à
H₂O 90; nuages 30; CO₂ 30
ozone, méthane, protoxyde d'azote, CFC ...

Crise climatique ?

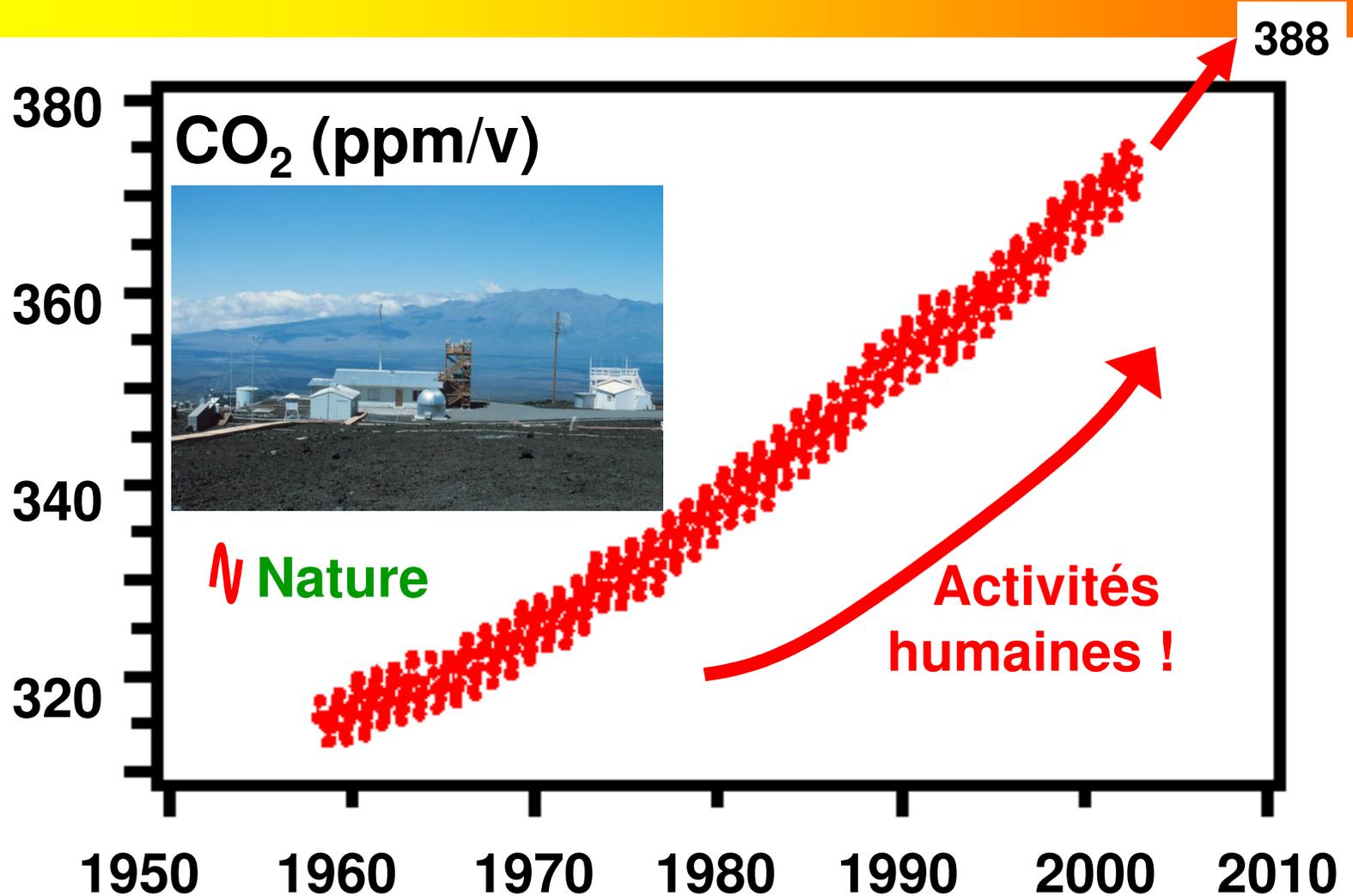
Nous changeons d'ère parce que nous changeons l'air.



Émissions mondiales de CO₂ – multipliées par un facteur 15 depuis 1900

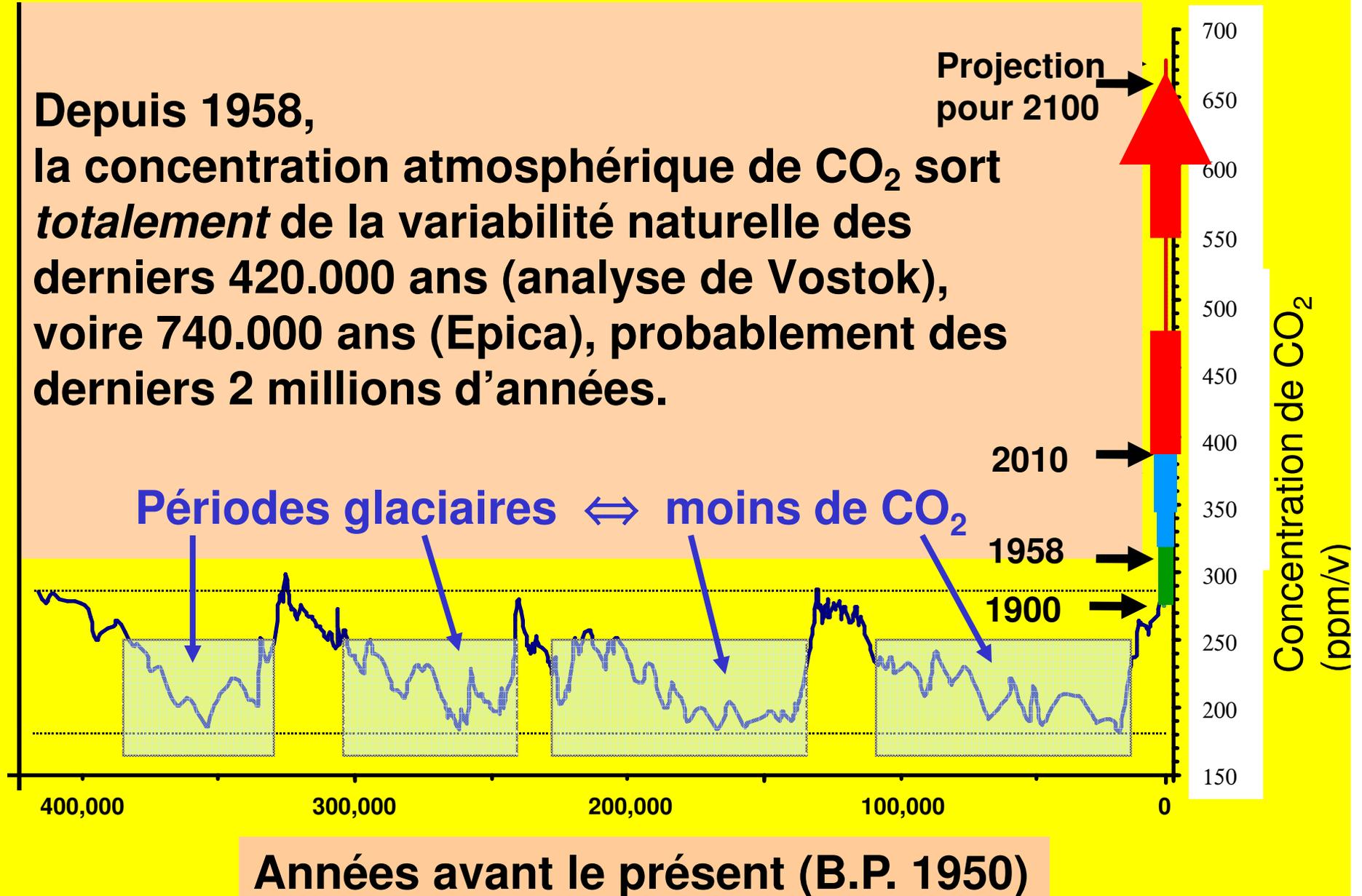


La découverte : le CO₂ dans l'air augmente



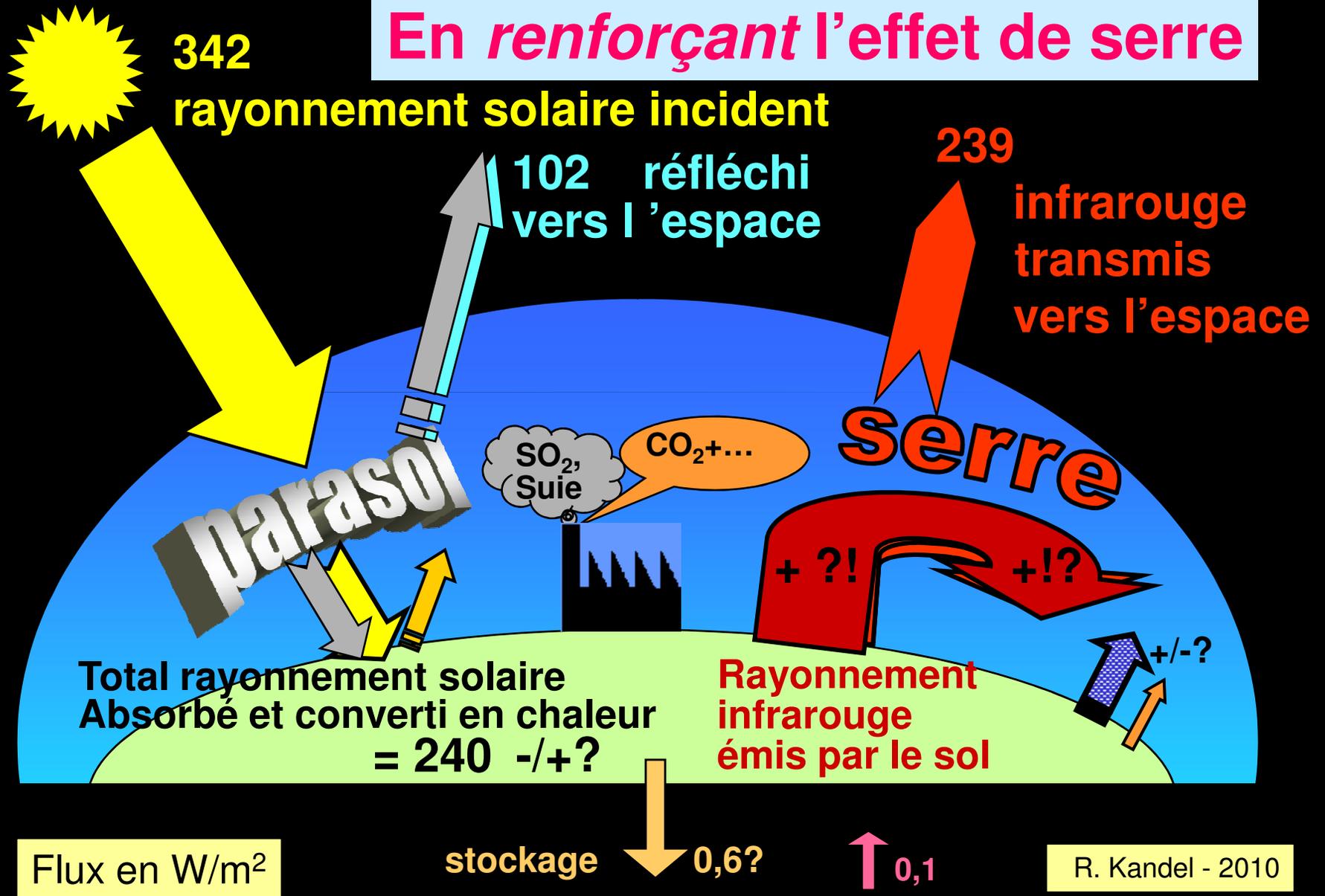
Source: Dave Keeling and Tim Whorf (Scripps Institution of Oceanography)

Depuis 1958,
la concentration atmosphérique de CO₂ sort
totalemment de la variabilité naturelle des
derniers 420.000 ans (analyse de Vostok),
voire 740.000 ans (Epica), probablement des
derniers 2 millions d'années.

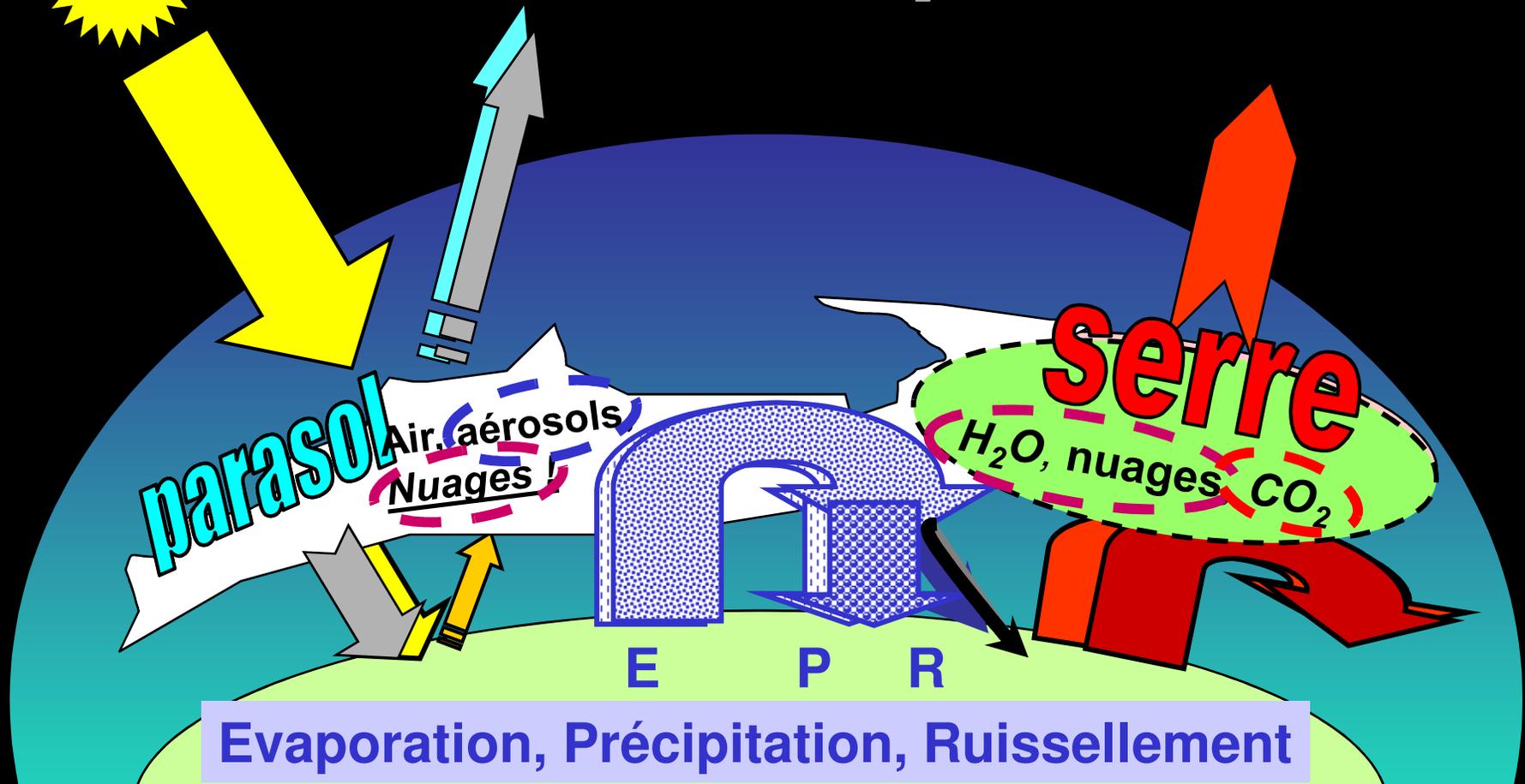


Nous perturbons le climat

En renforçant l'effet de serre

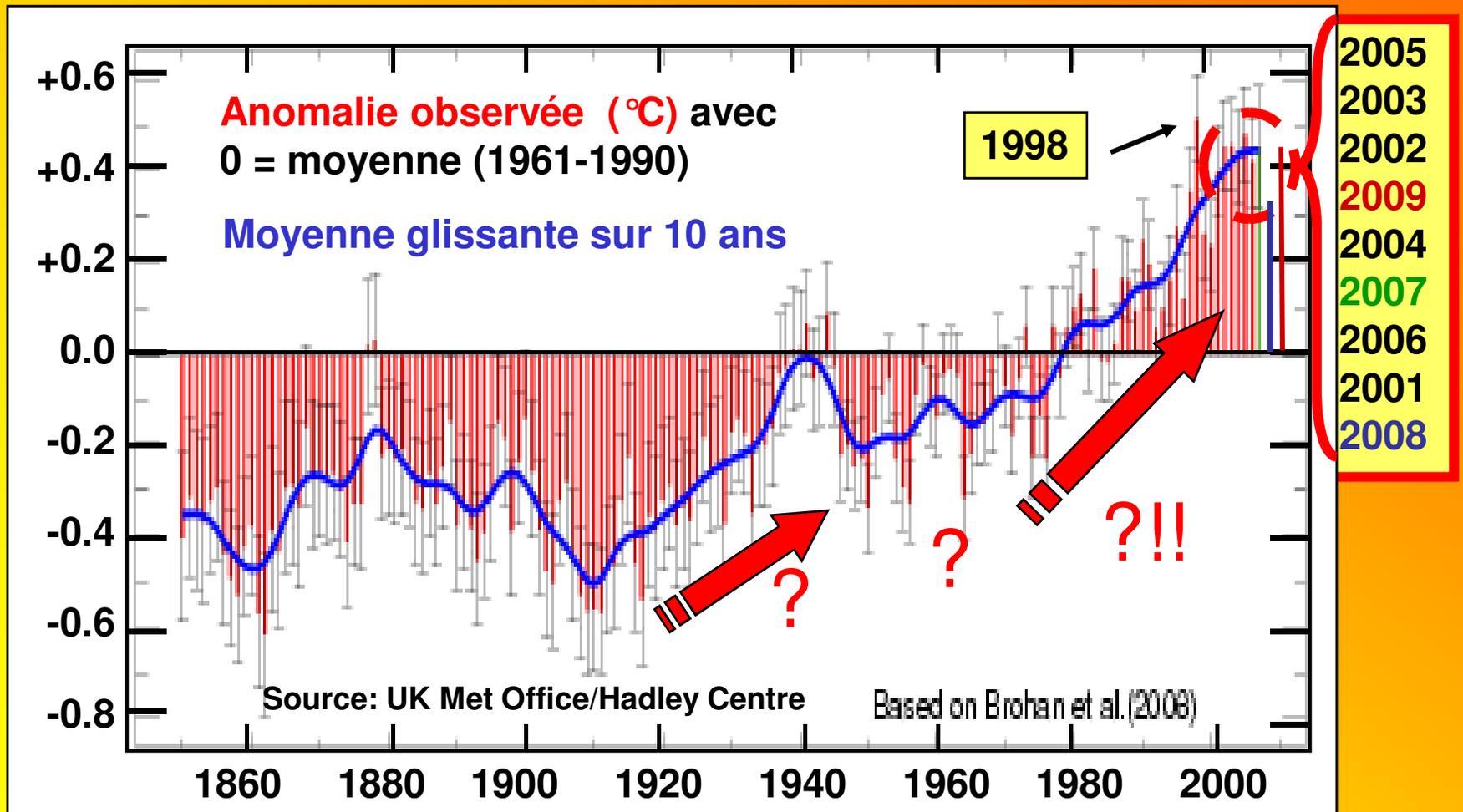


Complication:
changer le climat en changeant les flux radiatifs,
c'est aussi changer le cycle de l'eau

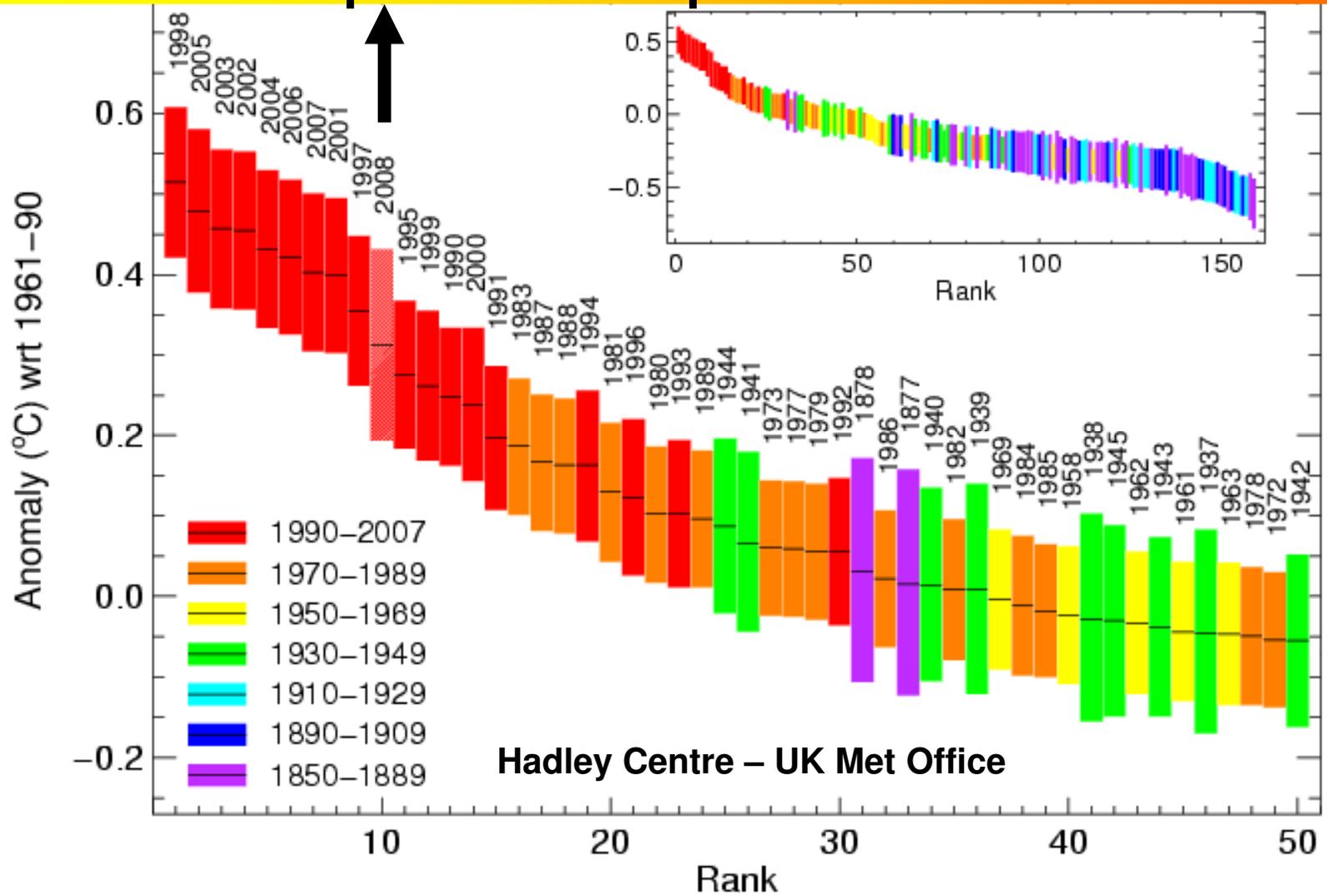


Fait observé: La planète se réchauffe

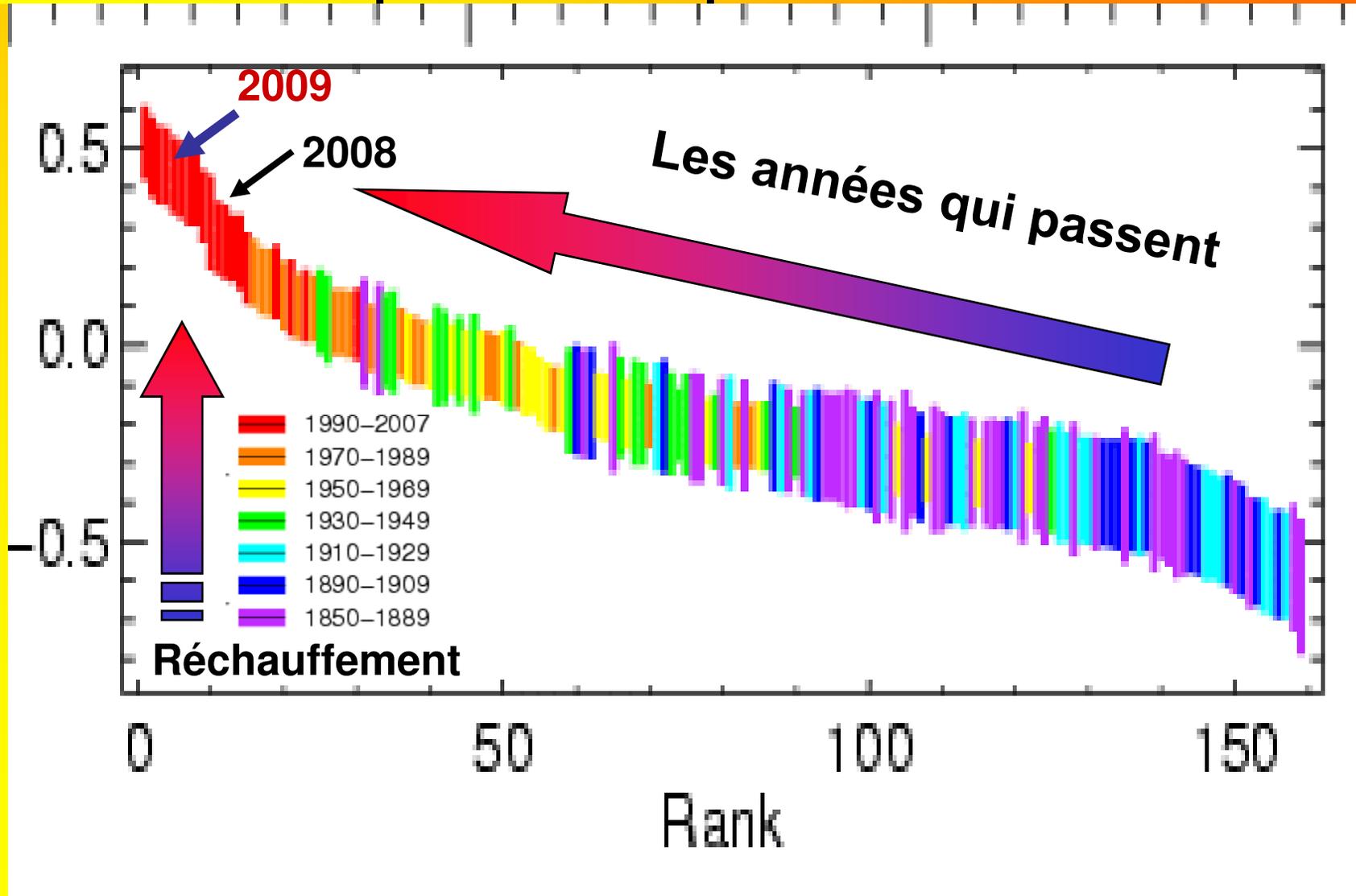
Température moyenne de l'air à la surface du globe

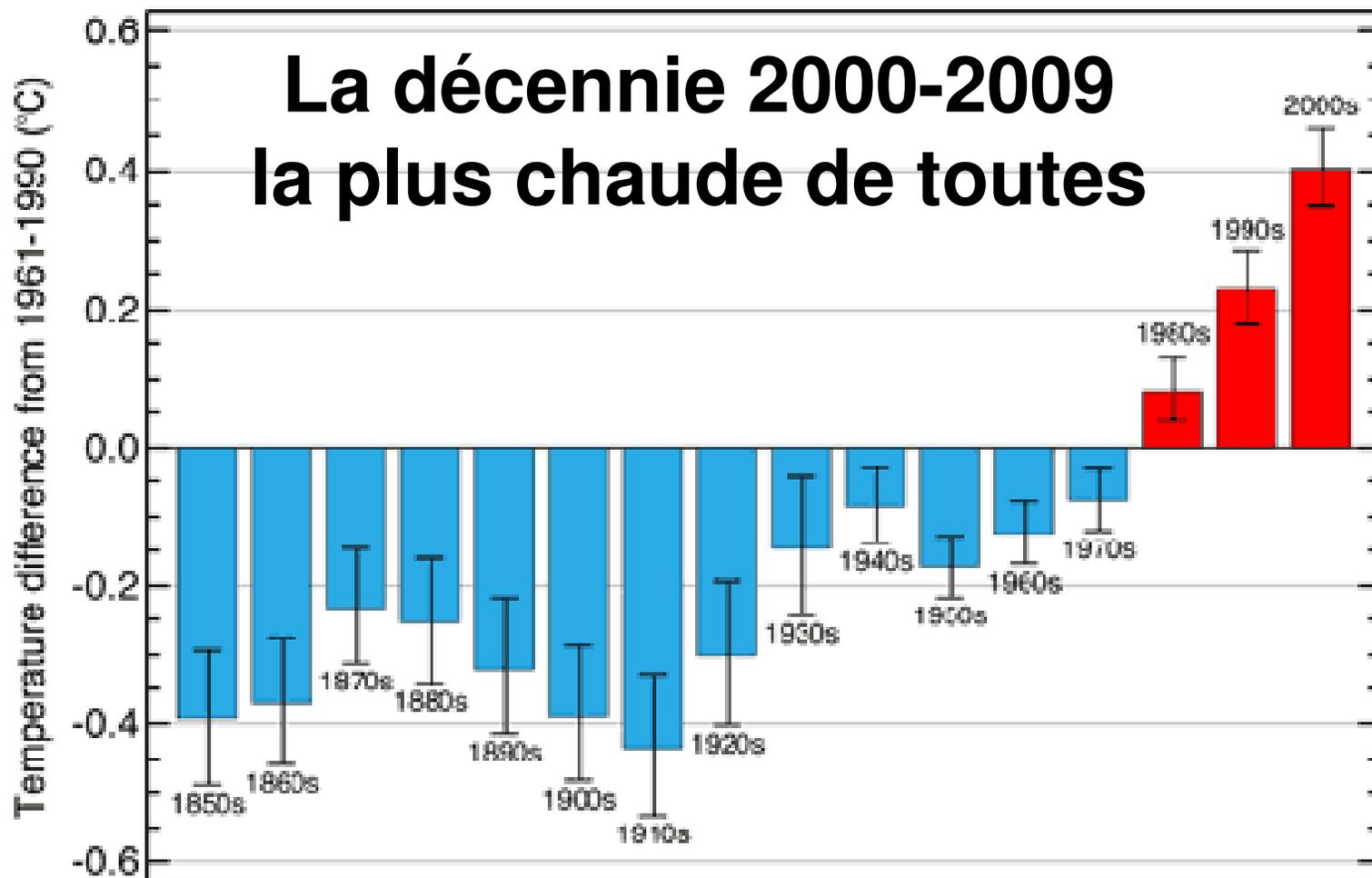


**2008 – l'année la moins chaude - depuis 1997 –
mais plus chaude que *toutes* de 1850 à 1996**

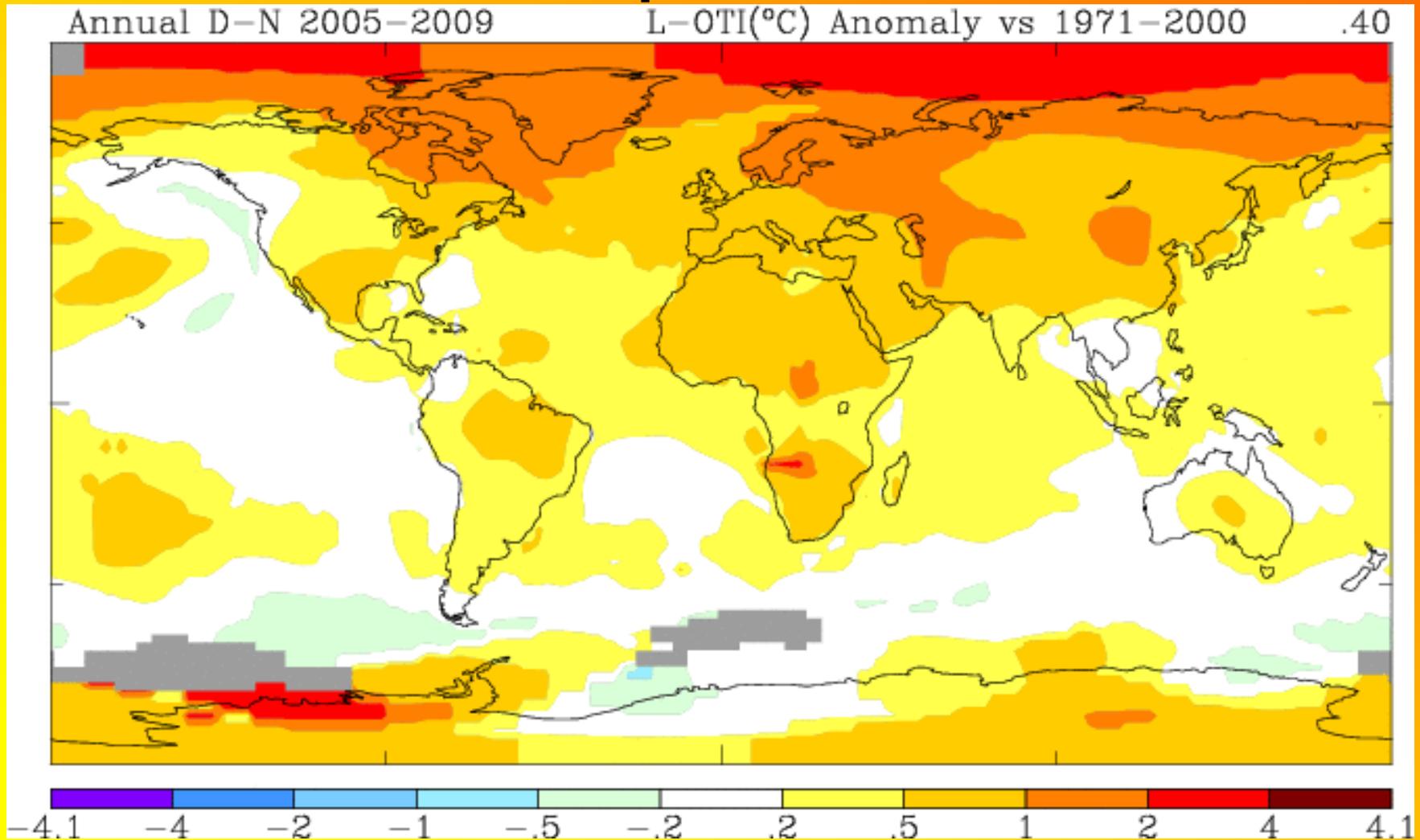


**2008 – l'année la moins chaude - depuis 1997 –
mais plus chaude que *toutes* de 1850 à 1996**



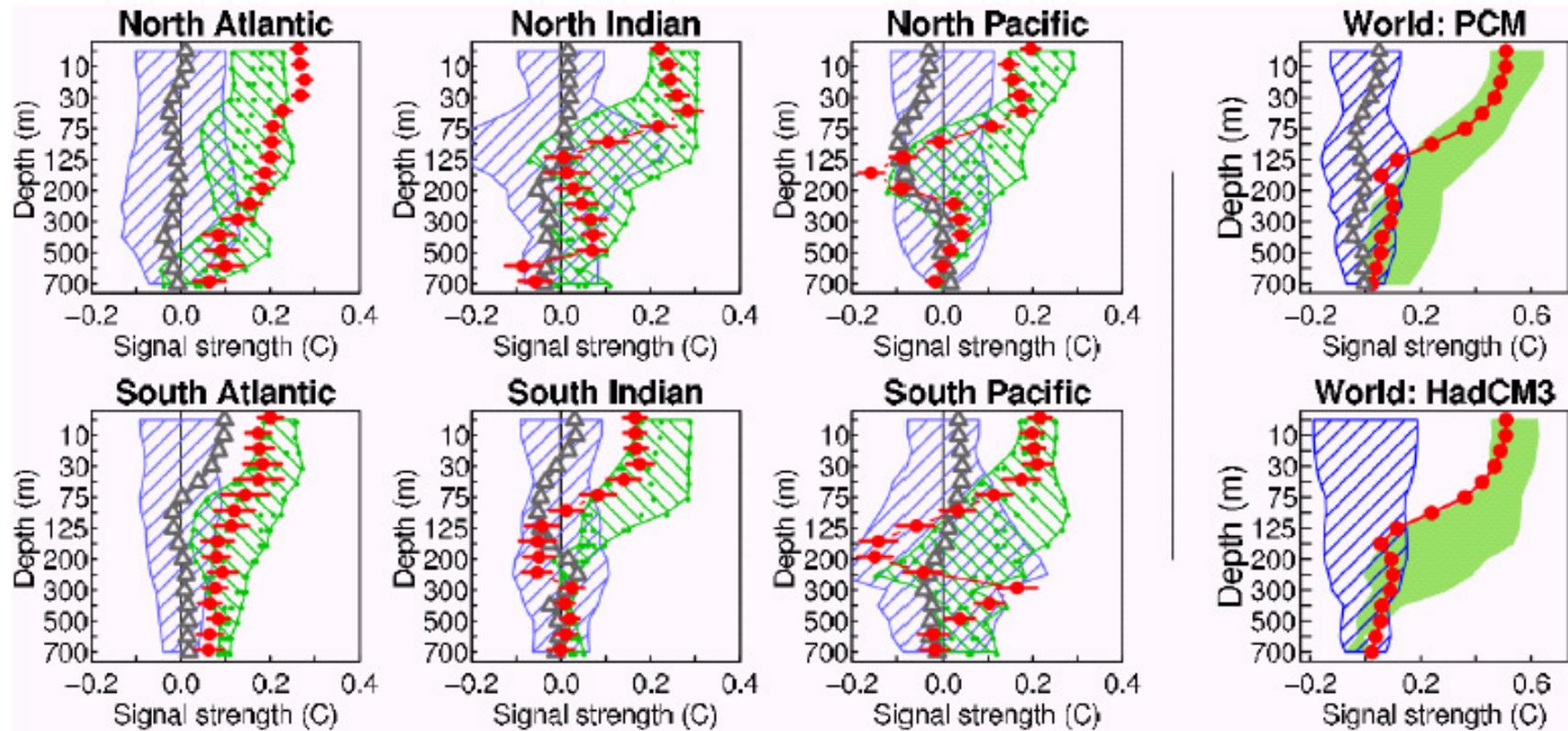


Températures moyennes <2005-2009> comparées à <1971-2000>



Les océans se réchauffent

Résultat du renforcement anthropique de l'effet de serre



—●— Observations

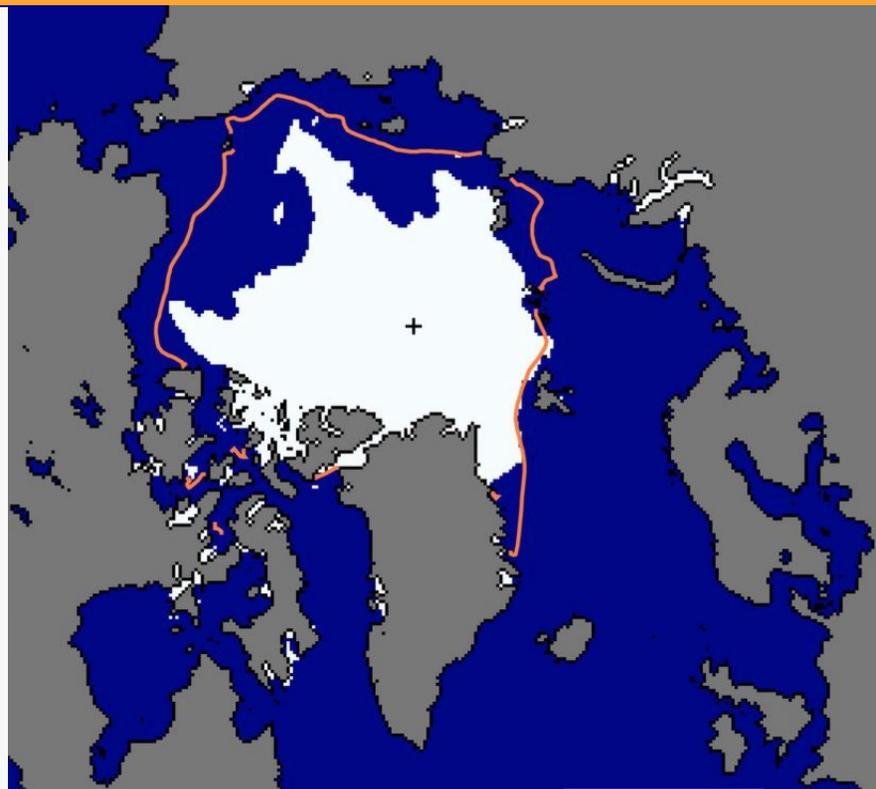
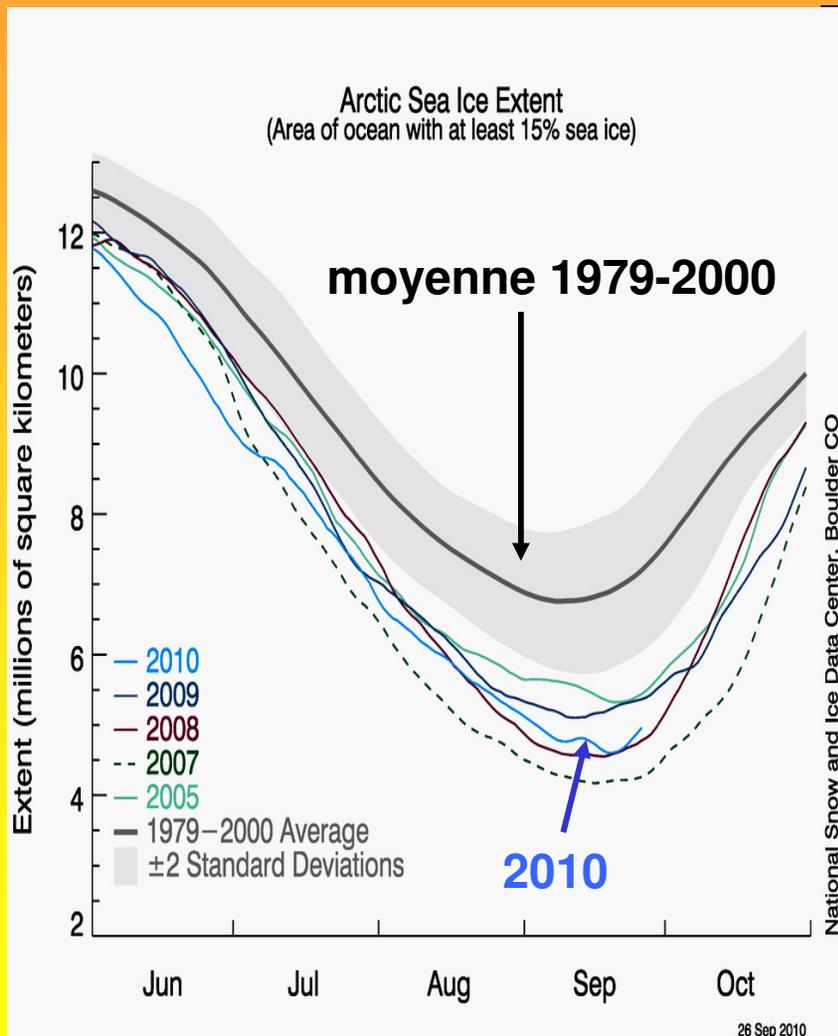


Variabilité Naturelle



Réchauffement Forcé

Les glaces flottantes de l'océan Arctique se sont amincies, et leur étendue a diminué.



moyenne 1979-2000 2010

Vers un Océan Arctique
libre de glaces en septembre 2050 ?
Ou avant ?

Velage accéléré des glaciers de l'Arctique ?



Nancy: 20 novembre
2010

Bengtstengreen (Svalbard 80°N 22°E) 21/08/10 - 17.04 UTC
photo R. Kandel

Les glaciers de montagne reculent

L'exemple du glacier du Rhône



Nancy: 20 novembre
2010

Robert Kandel - La crise climatique

33

Modélisation moderne du climat

Modélisation de la circulation générale de l'atmosphère, couplée à celle des océans (3-D + t)

Equations de Navier-Stokes

Conservation de l'énergie

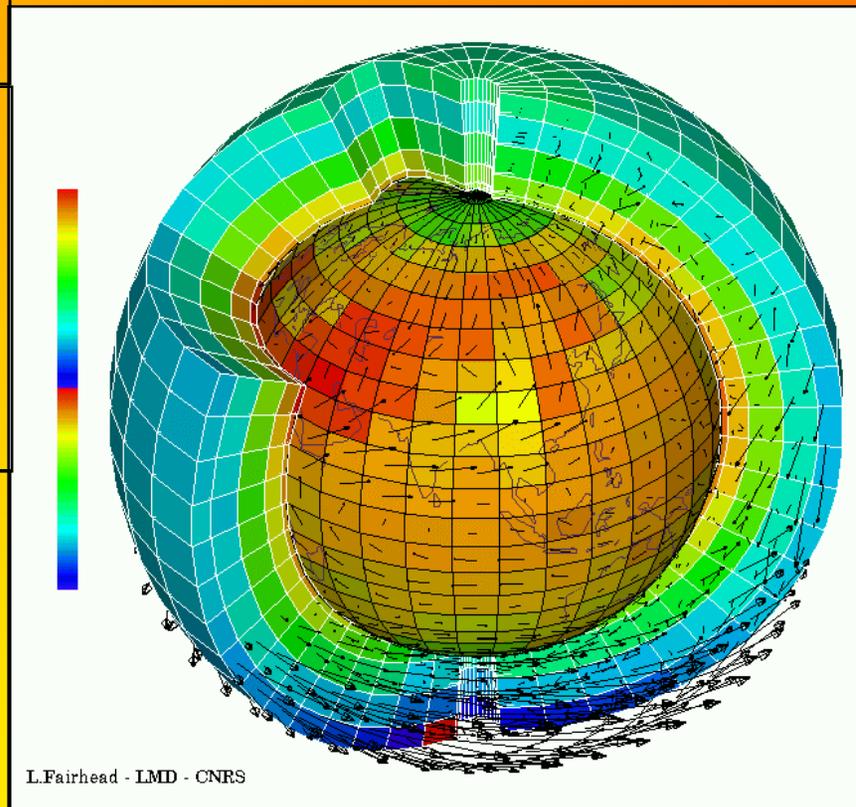
Transfert radiatif

- rayonnement solaire (0-4 μm)
- rayonnement thermique (4-100 μm)

Transferts non-radiatifs

Conservation de l'eau

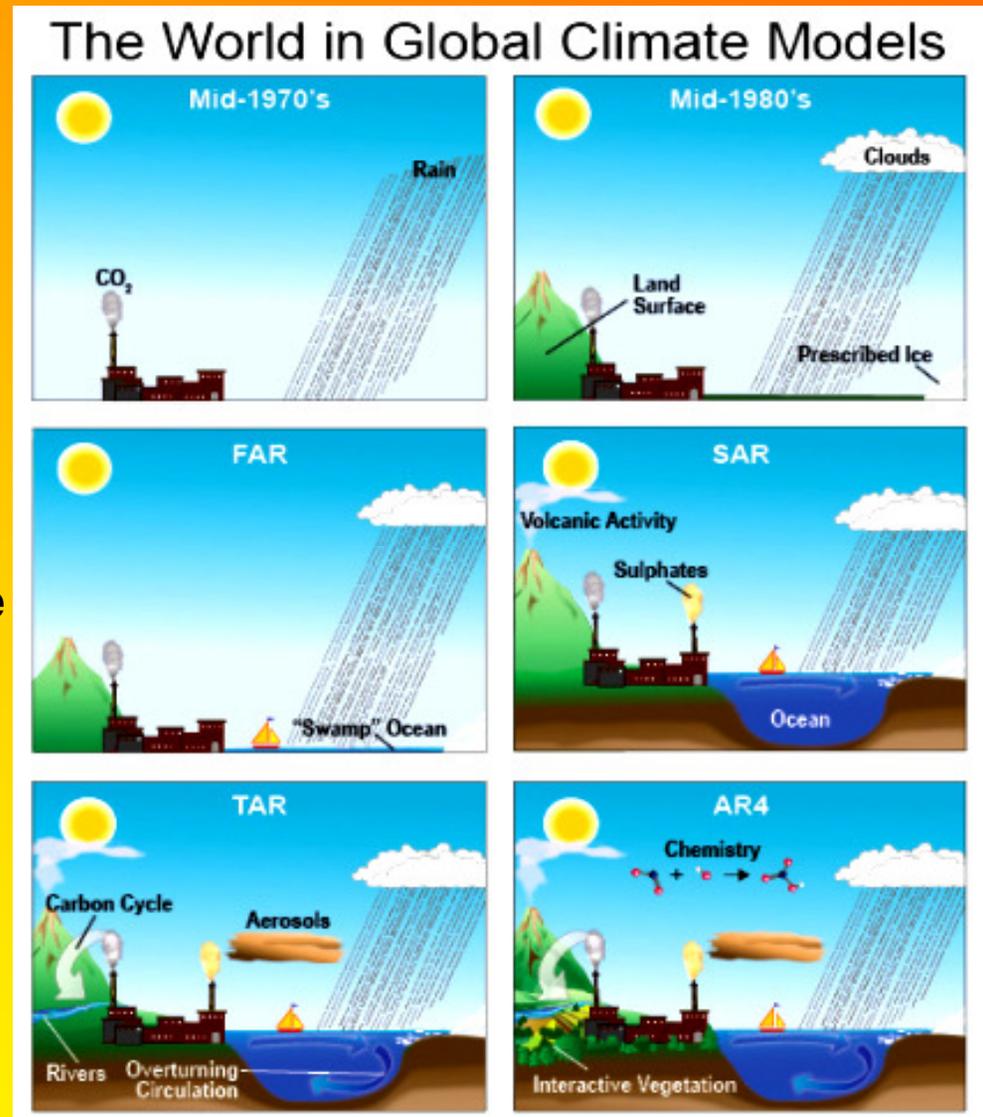
- évaporation
- condensation, précipitation
- ruissellement
- fonte et gel



Les progrès dans la modélisation

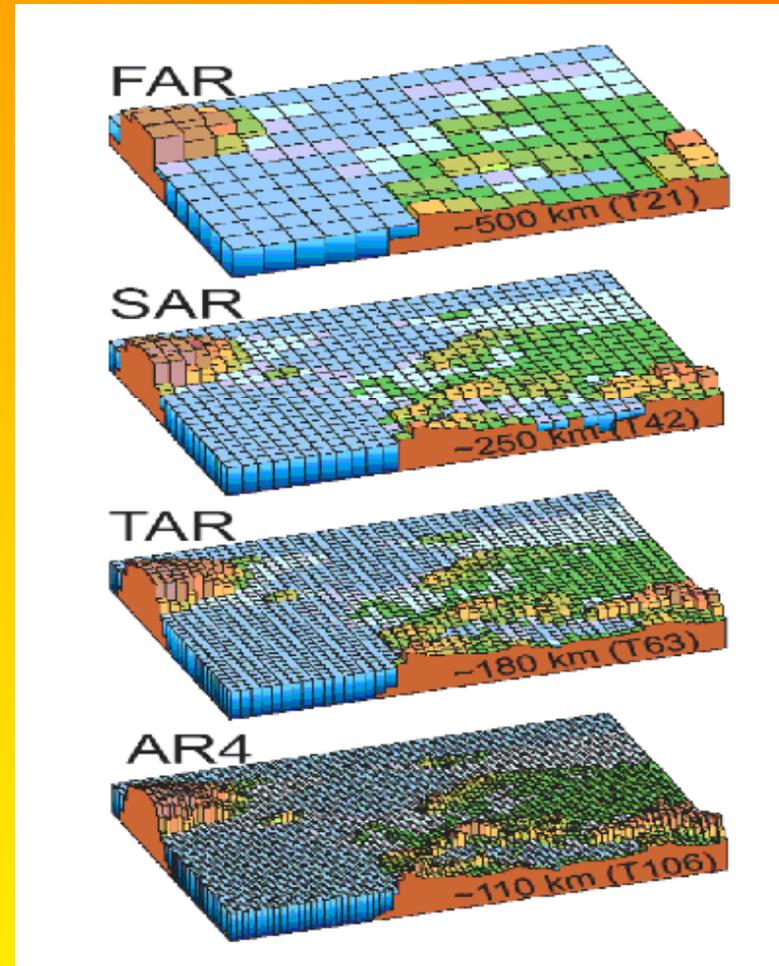
Complexités introduites depuis les années 1970

- pluie et nuages
- glaces (prescrites)
- surfaces émergées
- mers profondes
- volcans, pollution SO_2
- végétation, cycle de carbone
- rivières
- aérosols
- circulation océanique 3-D
- végétation interactive
- chimie atmosphérique
- ...



Amélioration de la résolution spatiale des modèles climatiques

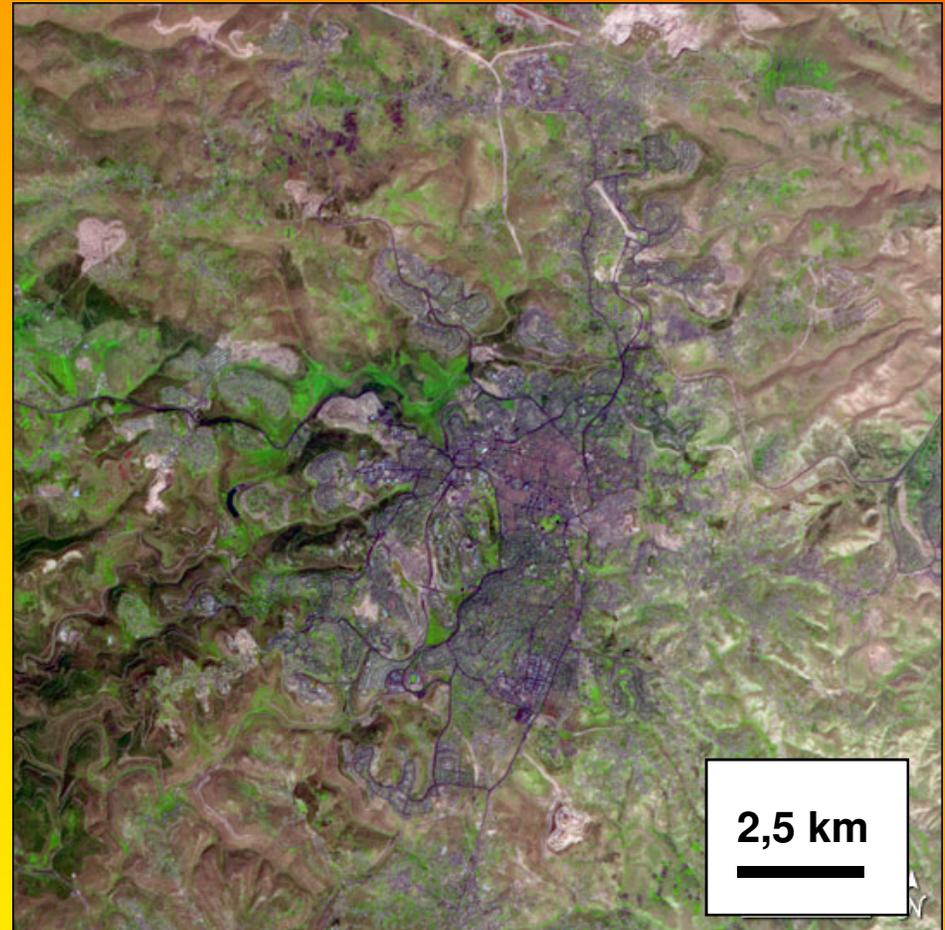
Améliorant la vraisemblance de la simulation de la Terre



Restent les problèmes des hétérogénéités à petite échelle

Surfaces émergées

- albédo
- évaporation
- évapotranspiration
- ruissellement



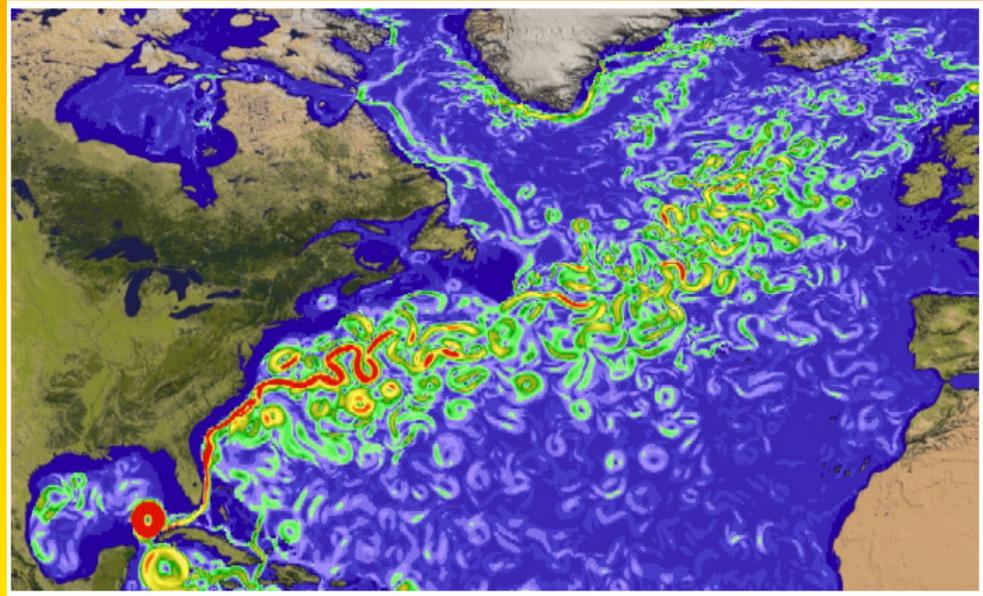
Restent les problèmes des hétérogénéités à petite échelle

Surfaces émergées

- albédo
- évaporation
- évapotranspiration
- ruissellement

Tourbillons océaniques

- échanges de chaleur
- évaporation



Restent les problèmes des hétérogénéités à petite échelle

Surfaces émergées

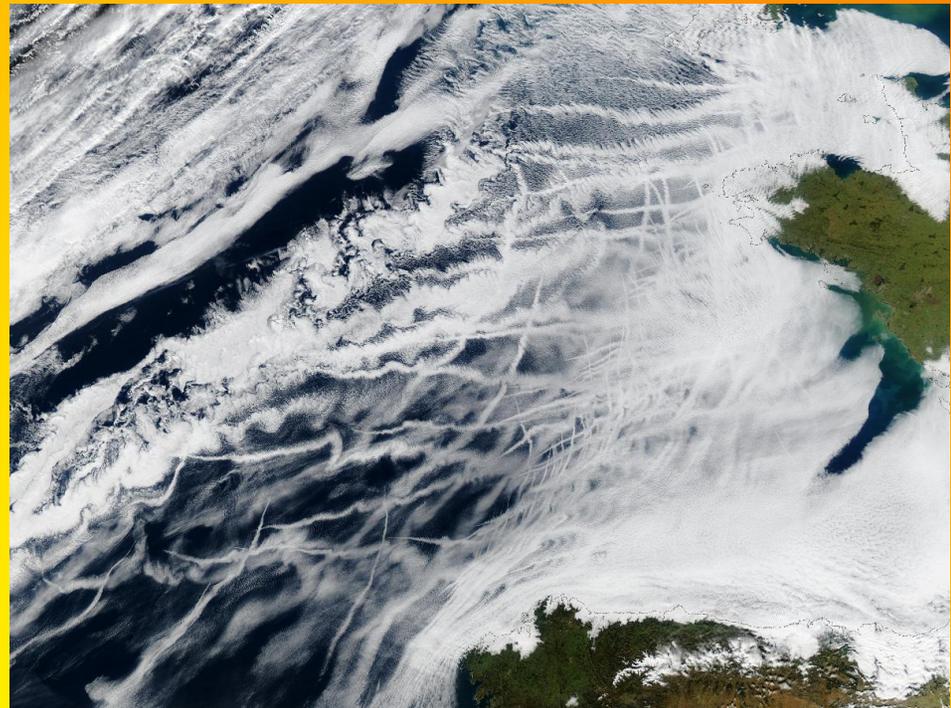
- albédo
- évaporation
- évapotranspiration
- ruissellement

Tourbillons océaniques

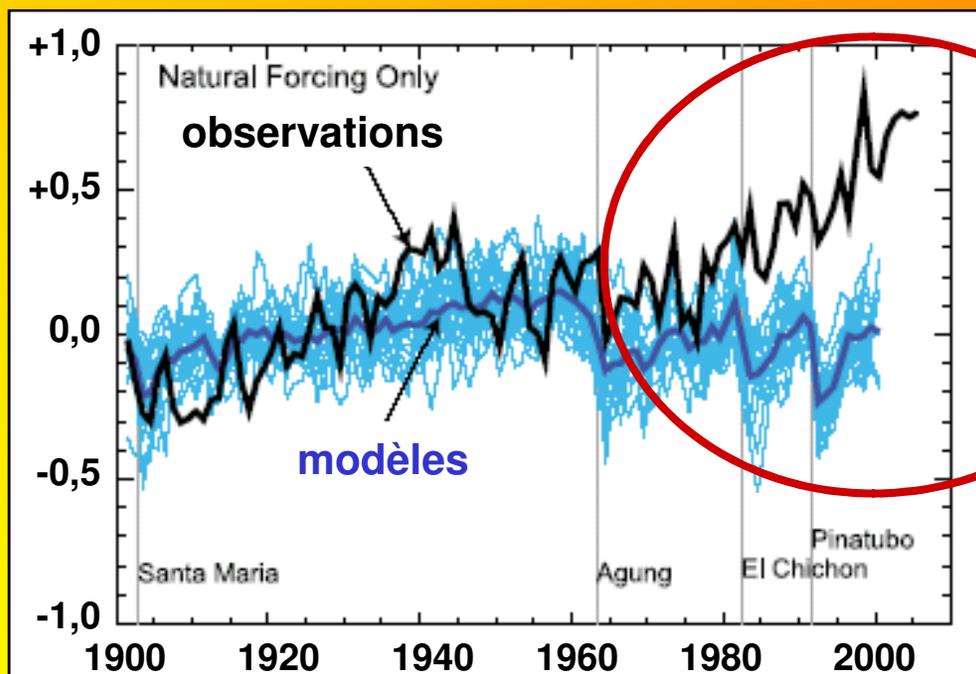
- échanges de chaleur
- évaporation

Nuages !

- effets radiatifs
- précipitations
- processus microscopiques
(rôle des aérosols)



Les modèles donnent le réchauffement observé *seulement* si on inclut les forçages anthropiques



Forçages naturels

Fluctuations solaires
Eruptions volcaniques

Les modèles donnent le réchauffement observé *seulement* si on inclut les forçages anthropiques

Forçages naturels

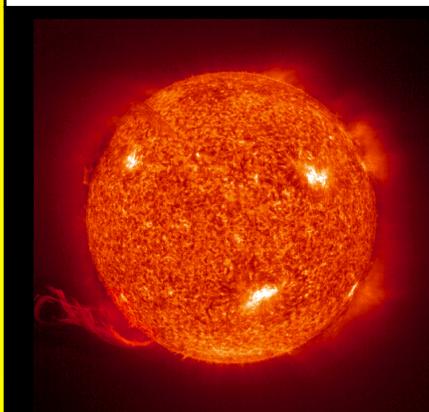
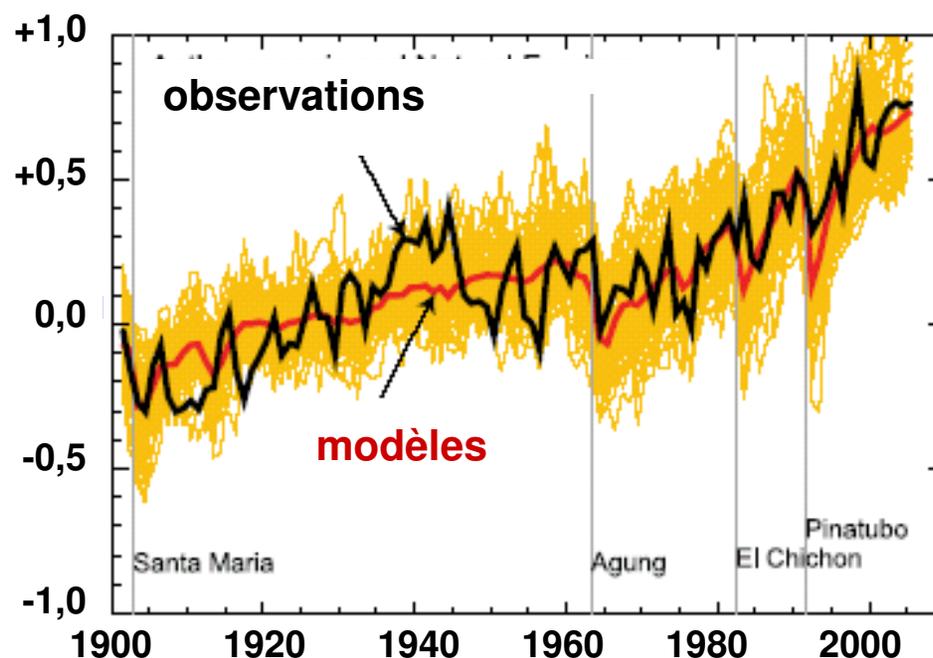
Fluctuations solaires

Eruptions volcaniques

+ Forçages anthropiques

CO₂ CH₄ ...

SO₂ ...



Nancy: 20 novembre
2010

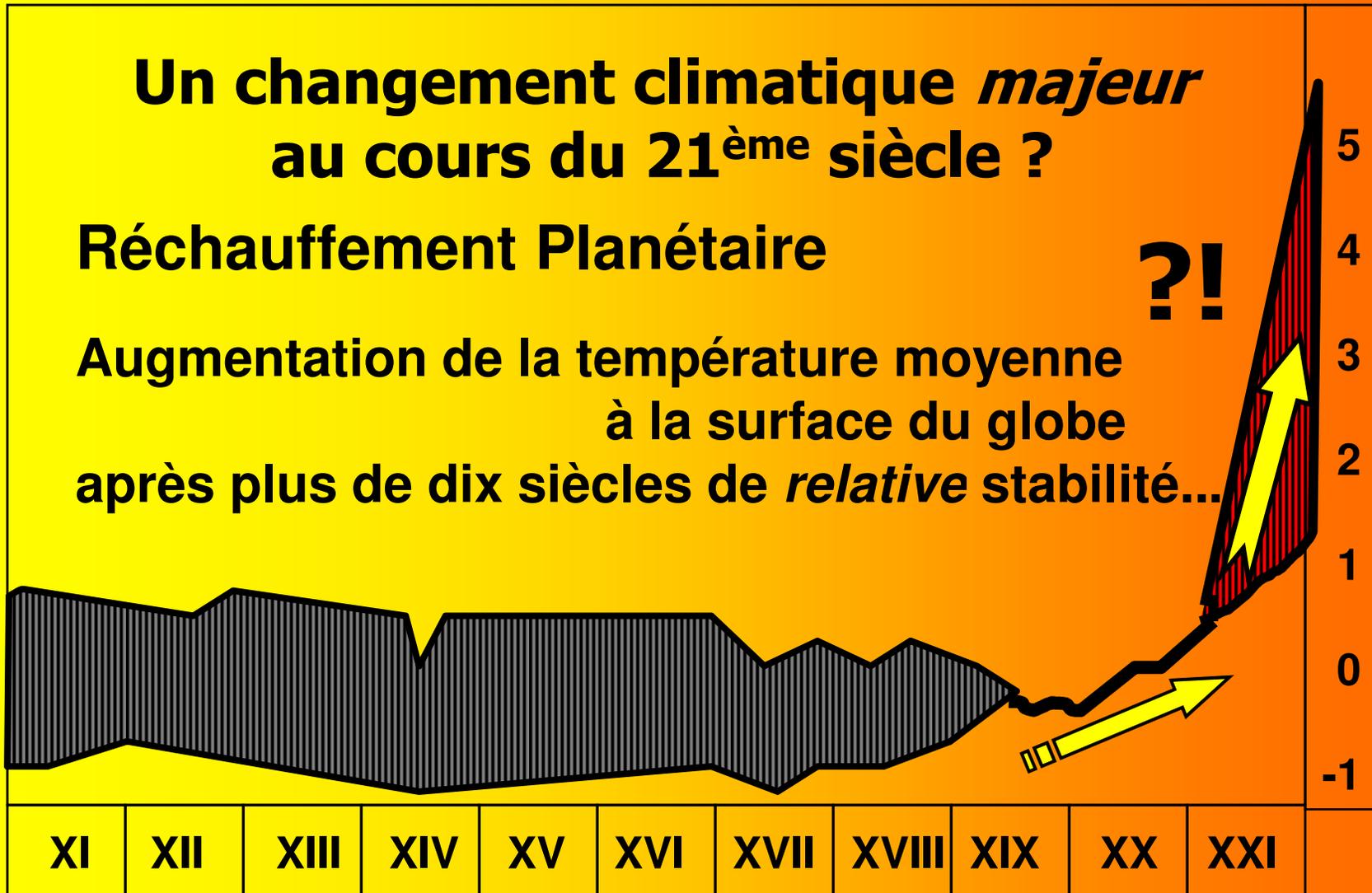
Robert Kandel - La crise climatique

41

Un changement climatique *majeur* au cours du 21^{ème} siècle ?

Réchauffement Planétaire

Augmentation de la température moyenne
à la surface du globe
après plus de dix siècles de *relative* stabilité...



Incertitudes des projections

Quelle évolution des GES de l'atmosphère ?

- évolution des émissions de GES
- économie, politique, technologie
- échanges atmosphère-océan-biosphère continentale

Quels autres forçages anthropiques ou naturels ?

- modifications des surfaces
- éruptions volcaniques, variations de l'irradiance solaire ...?

Quelles rétroactions ?

- les rétroactions du cycle de l'eau
 - vapeur d'eau, nuages, glaces
- les rétroactions de la végétation
- les rétroactions des pergélisols (méthane...)
- une rétroaction de l'intelligence humaine ?



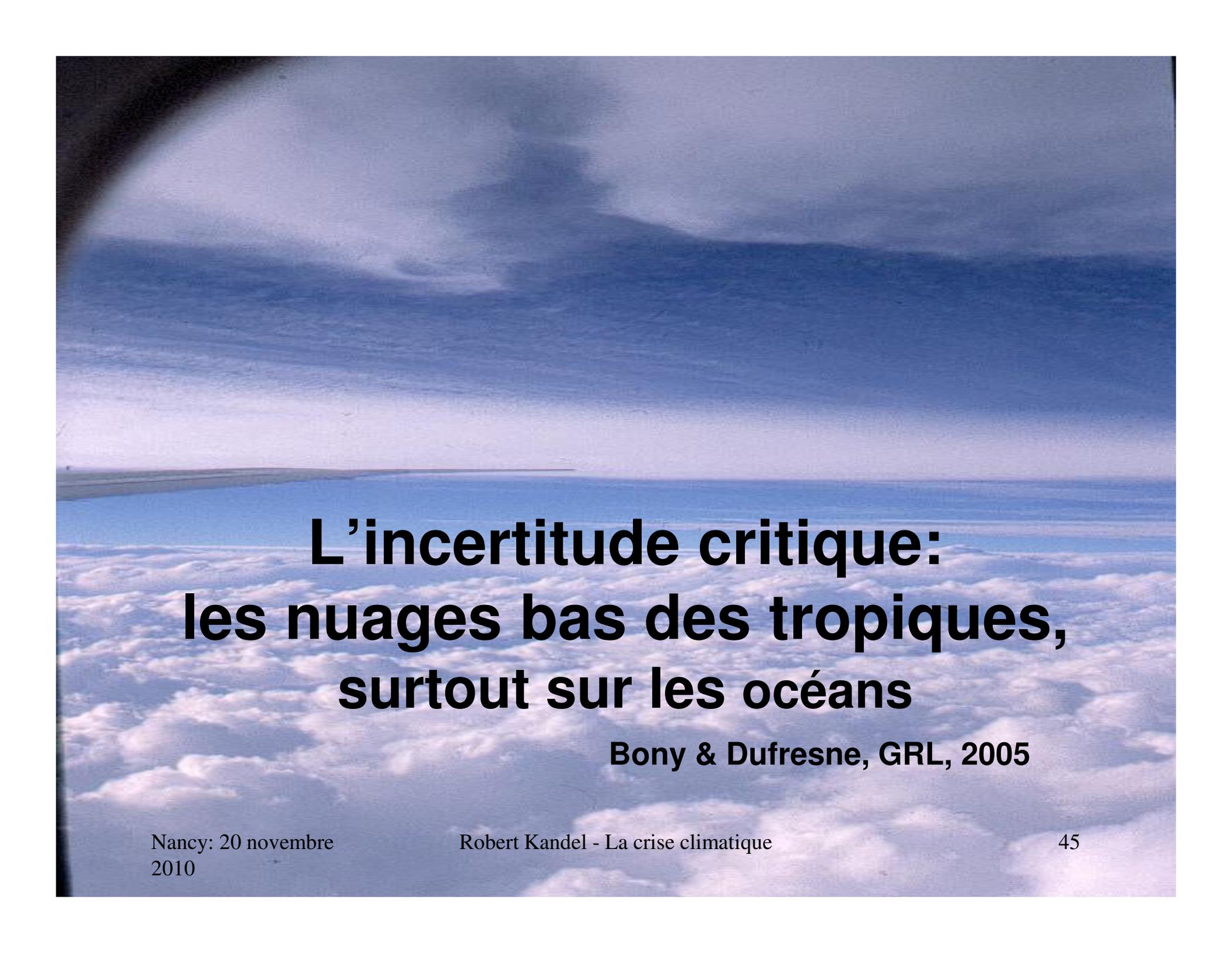
Les nuages élevés, acteurs importants à la fois dans l'effet parasol et l'effet de serre.

Les rétroactions du cycle de l'eau

La vapeur d'eau dans l'atmosphère, acteur principal dans l'effet de serre naturel.

Les nuages bas, acteurs majeurs dans l'effet parasol.

**Limitation ou *amplification* – et de combien ?
– de la réponse climatique au forçage.**



**L'incertitude critique:
les nuages bas des tropiques,
surtout sur les océans**

Bony & Dufresne, GRL, 2005

Forçage radiatif de la nébulosité

Cloud-radiative forcing : ScaRaB-1 (March 1994 - February 1995)

$$C_{lw} = F_{cl} - F$$

$$C_{sw} = S(\alpha_{cl} - \alpha)$$

$$C_{net} = C_{lw} + C_{sw}$$

$$C_{lw} = +27 \text{ Wm}^{-2} \text{ ('serre')}$$

$$C_{sw} = -48 \text{ Wm}^{-2} \text{ ('parasol')}$$

$$C_{net} = -21 \text{ Wm}^{-2}$$

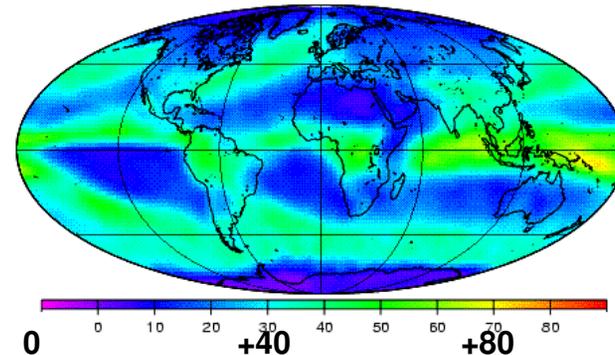
CRF de même ordre que le forçage « tout ou rien » du CO_2 ($\approx +30 \text{ Wm}^{-2}$)

La question critique:
Comment *changera*
le CRF ?

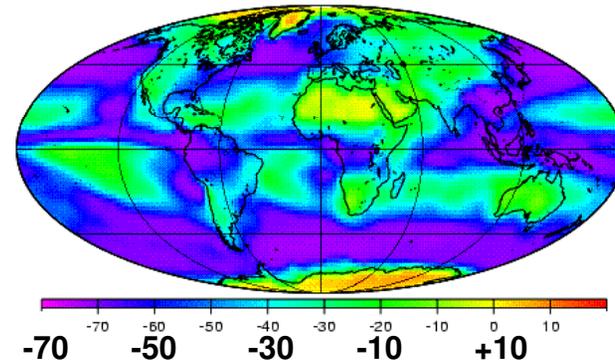
Nancy: 20 novembre
2010

Robert Ka

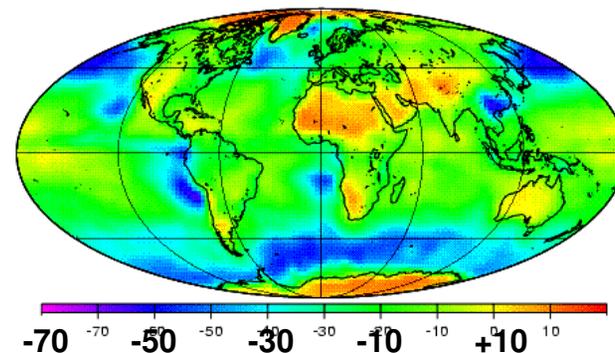
LW



SW



Net



Le climat change à cause des activités humaines

Les risques sont grands

Montée du niveau de la mer

*Plus ou moins
lentement*



**Réchauffement
climatique**

Facteurs en cause:

Dilatation thermique des eaux

Bilan de masse des glaces sur
les continents

Eaux souterraines ?

Conséquences : +20 ou +60 cm d'ici 2100 ?

Ou plus ? ... et après 2100 ?

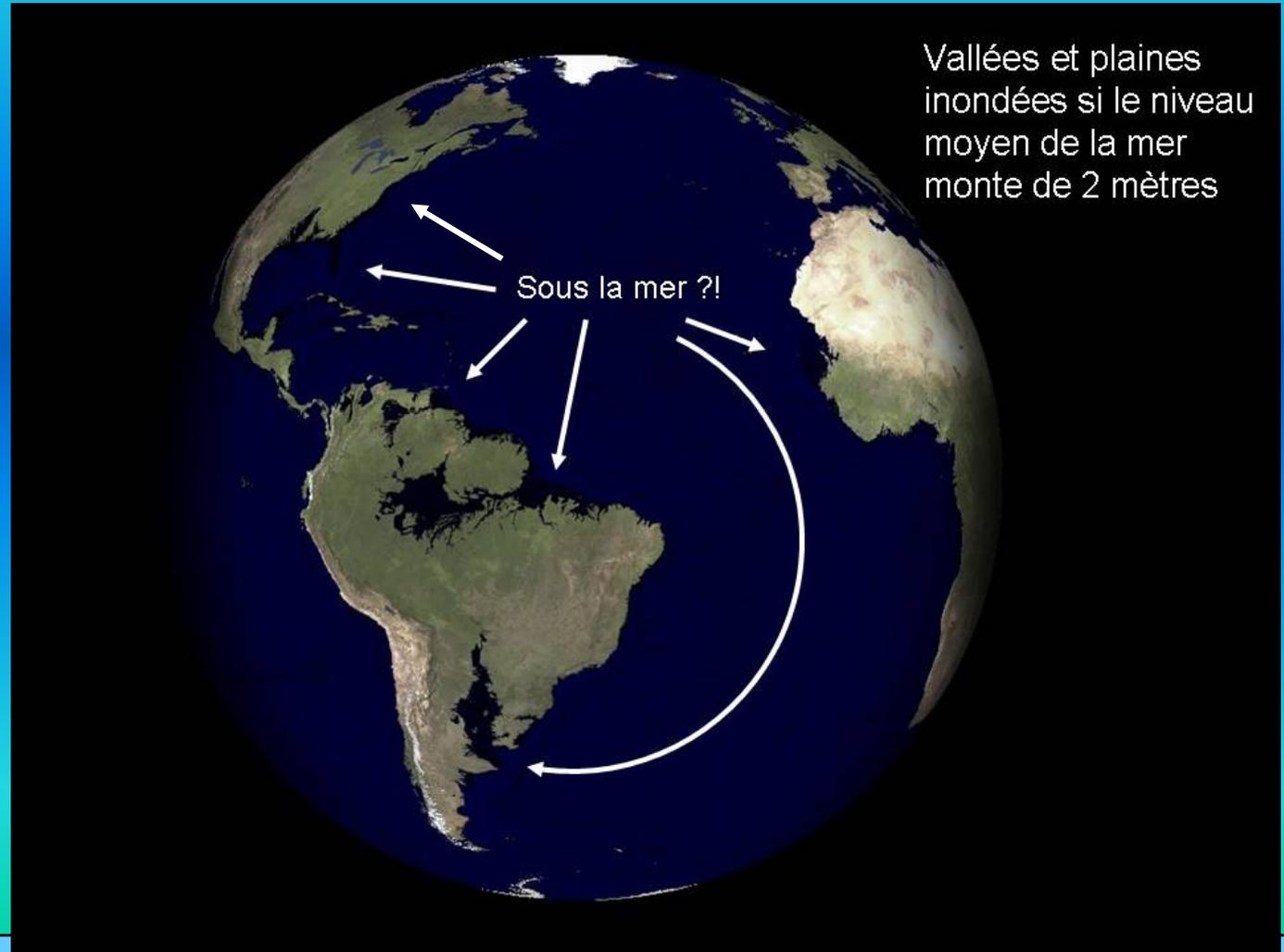
- **risques accrus sur les côtes en cas de tempête**
- inondation des plaines côtières, des terres humides
- **infiltration de la nappe phréatique**

Inondation des plaines côtières et des vallées ?

Altitude
< 2 m

Le niveau des
mers peut-il
remonter de 2 m
avant 2100 ?

**Probable
avant
2200?**



Intensification du cycle de l'eau

rapidement



Réchauffement
climatique

rapidement



Nouveau partage
des eaux douces

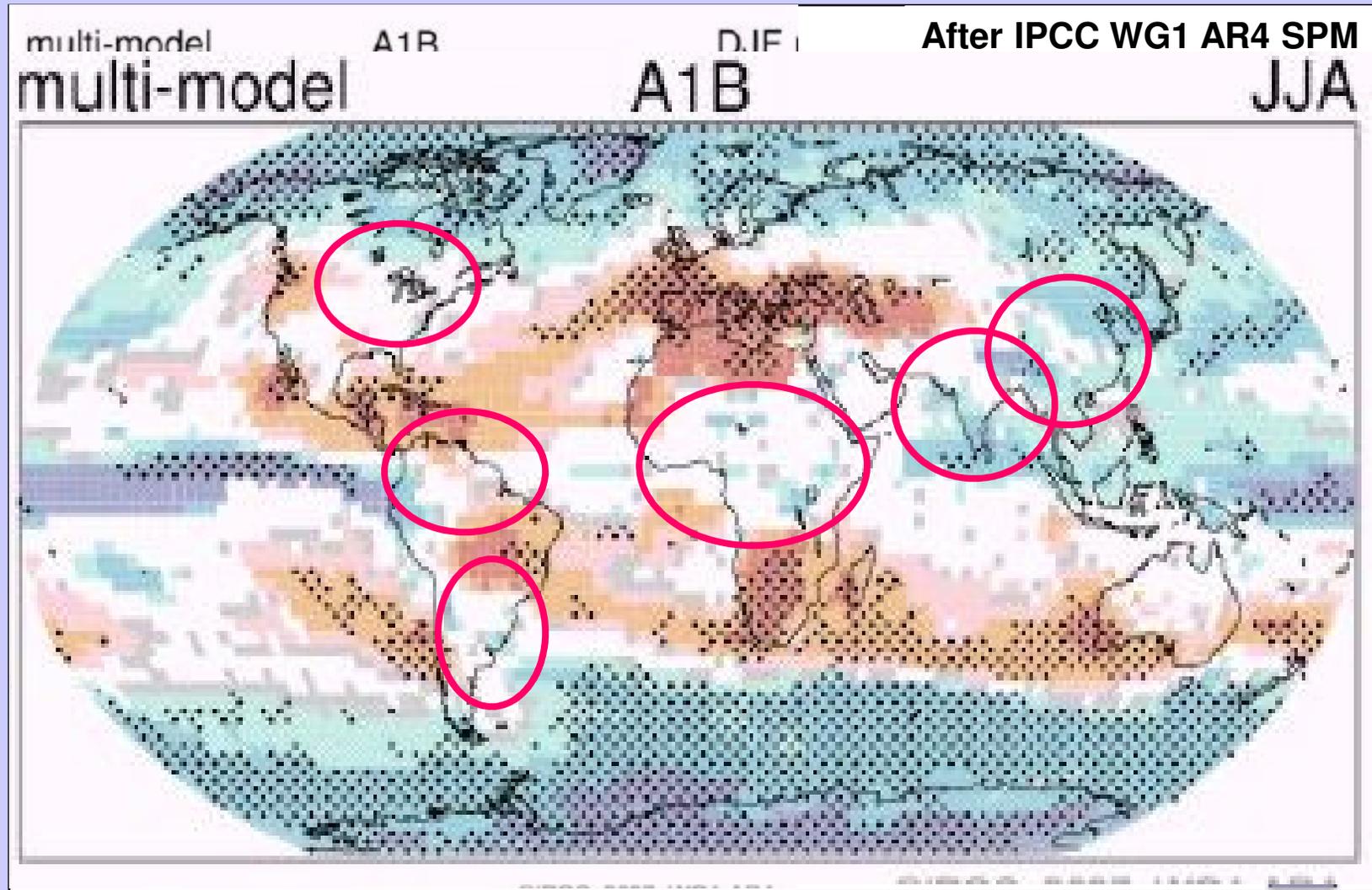
Conséquences :
Augmentation de la variabilité ?
Modification de la carte de *risque* de

- **sécheresses, canicules**
- *pluies fortes, inondations*
- **tempêtes et cyclones**

Conséquences pour :

- agriculture et sylviculture
- ressource hydroélectrique
- approvisionnement en eau
- la biosphère naturelle

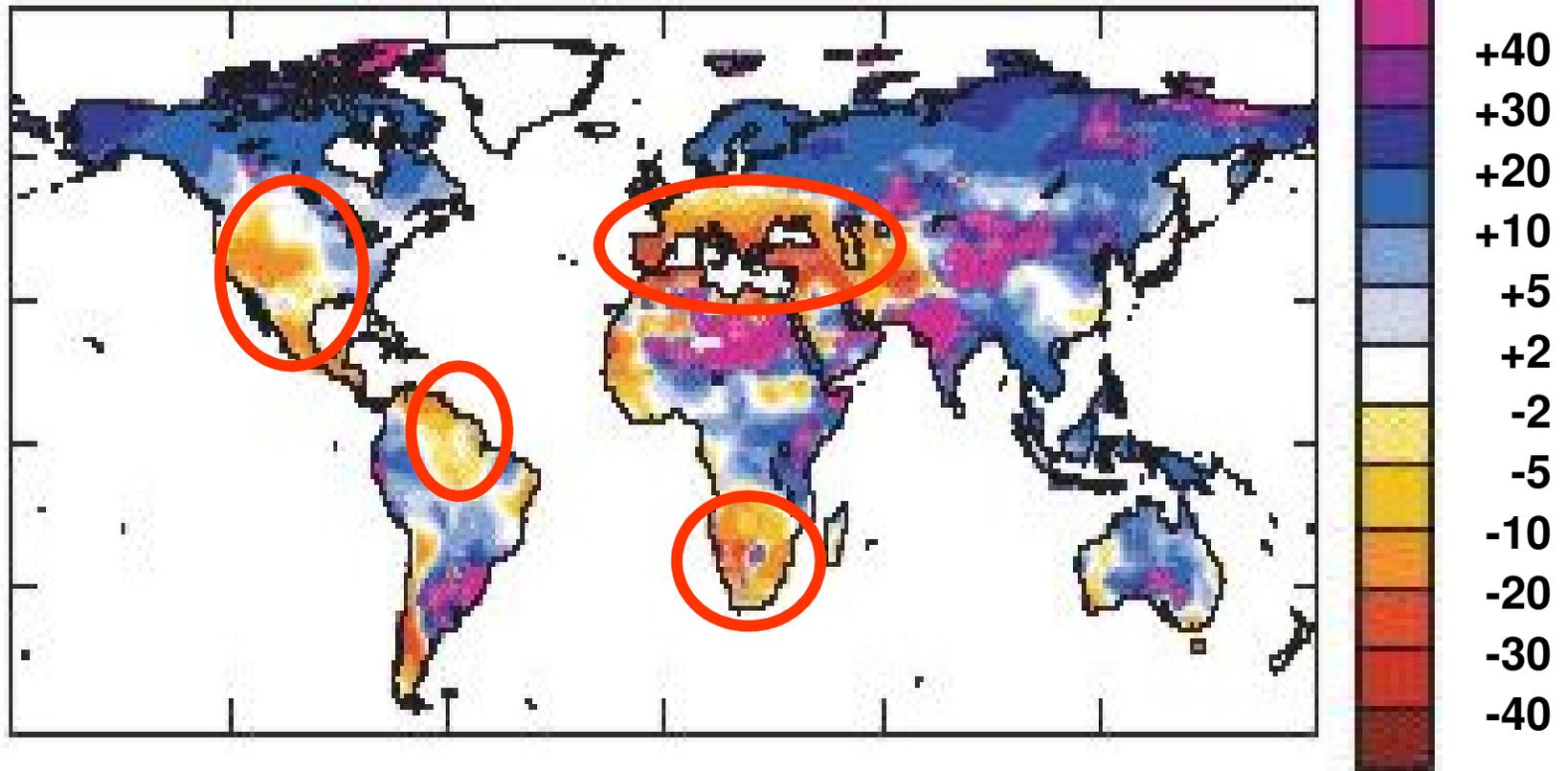
Comment changeront les précipitations?



Modifications du Ruissellement – eau douce disponible

Scénario A1B : (2041-2060) – (1900-1970)

%



Milly, Dunne, & Vecchia, *Nature*, 17/11/05

Augmentation de la fréquence ou de l'intensité d'événements météorologiques extrêmes ?



Mumbai, Inde, 2008, 2009



Nancy: 20 novembre
2010

Robert Kandel - La crise climatique

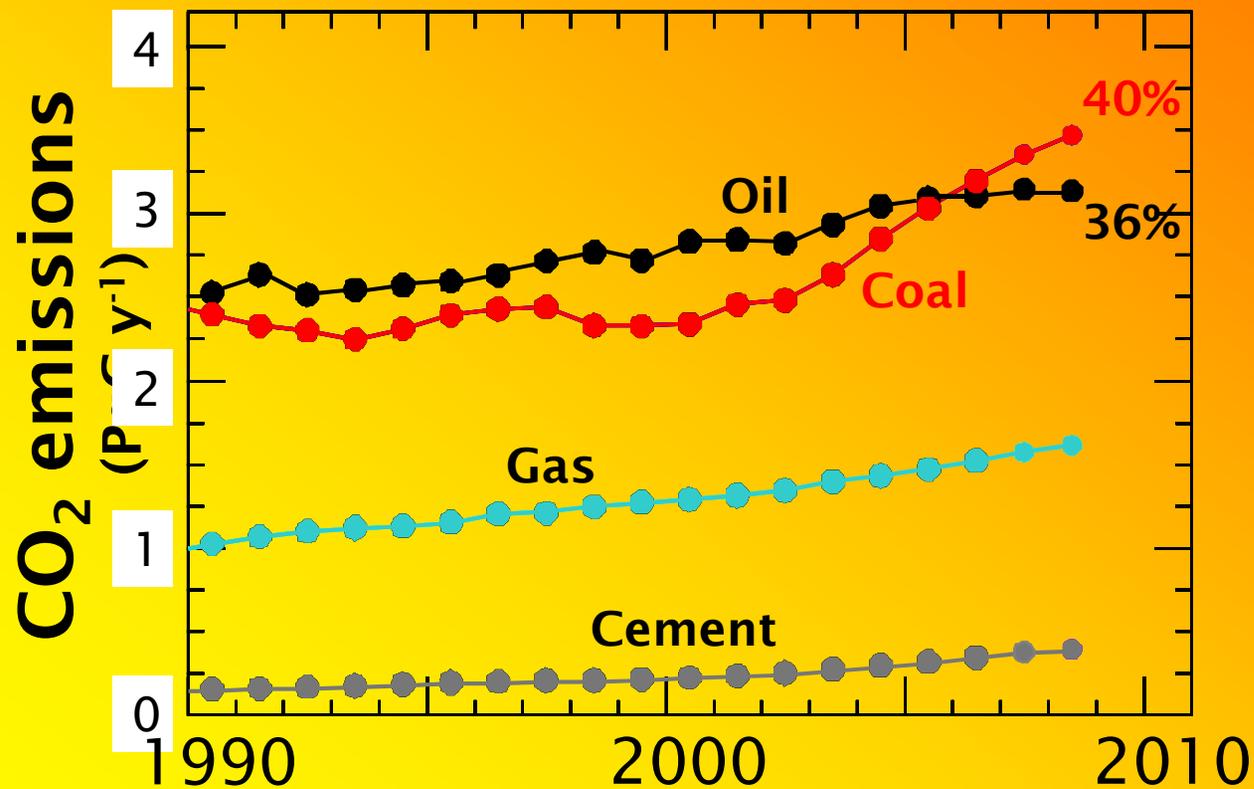
53

Le climat change – Il faut agir, et vite !

**Ralentir le changement climatique en
accélérant le passage vers des modes de
production et de consommation
plus compatibles avec la finitude de
l'environnement –**

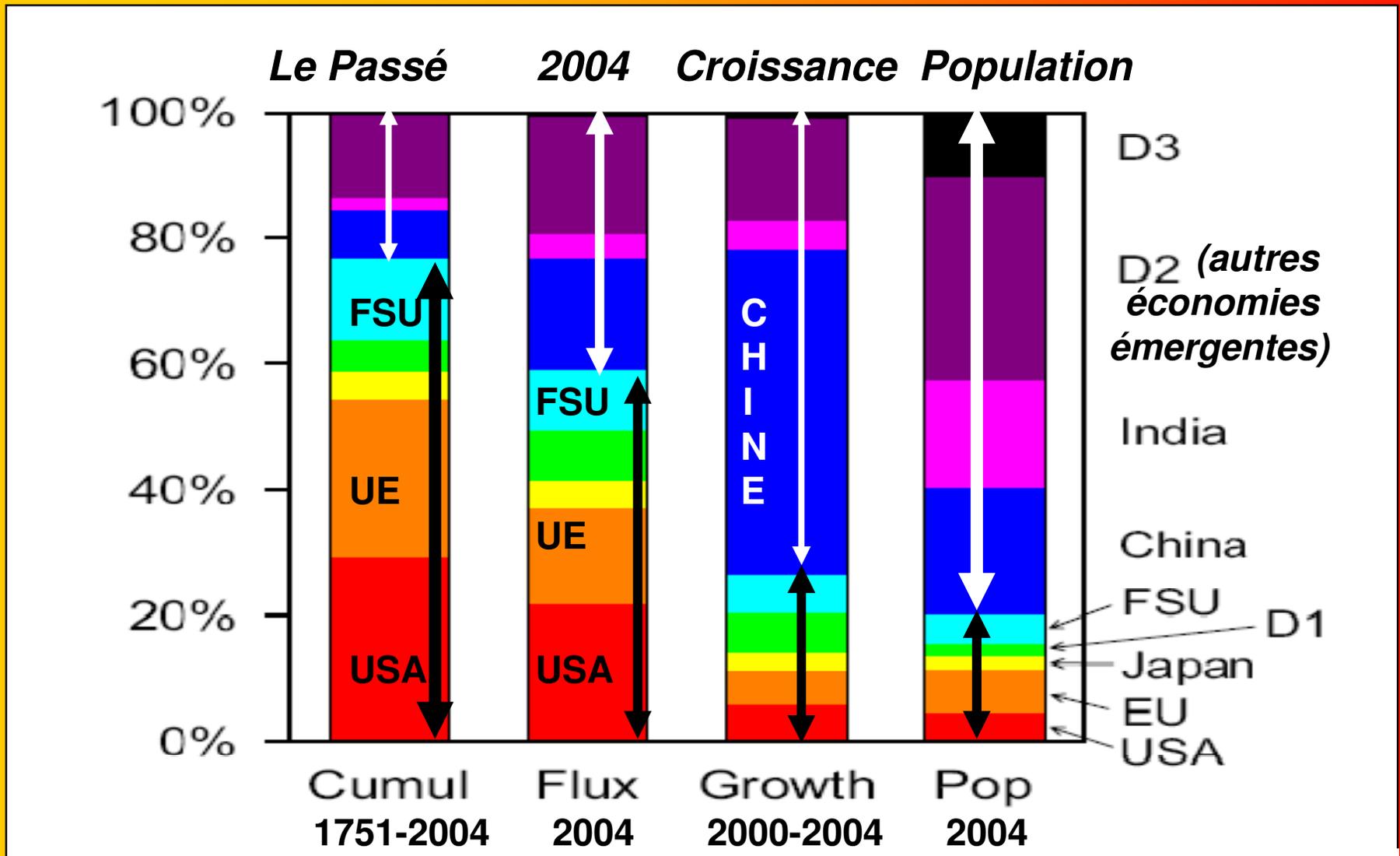
une nécessité impérieuse

1990-2010: Emissions de CO₂ par combustion de carburants fossiles



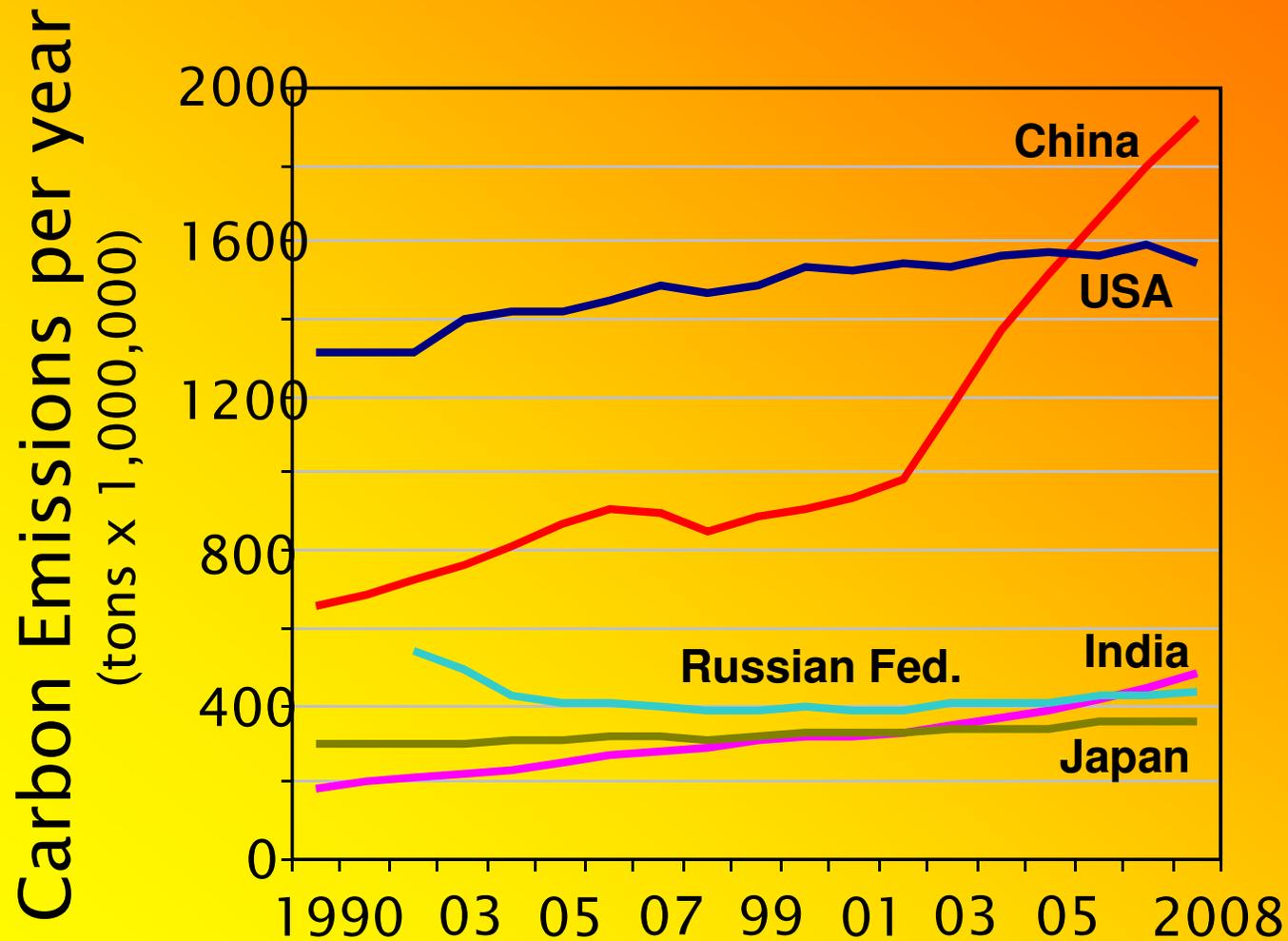
Le Quéré et al. 2009, Nature-geoscience

Emissions de CO₂



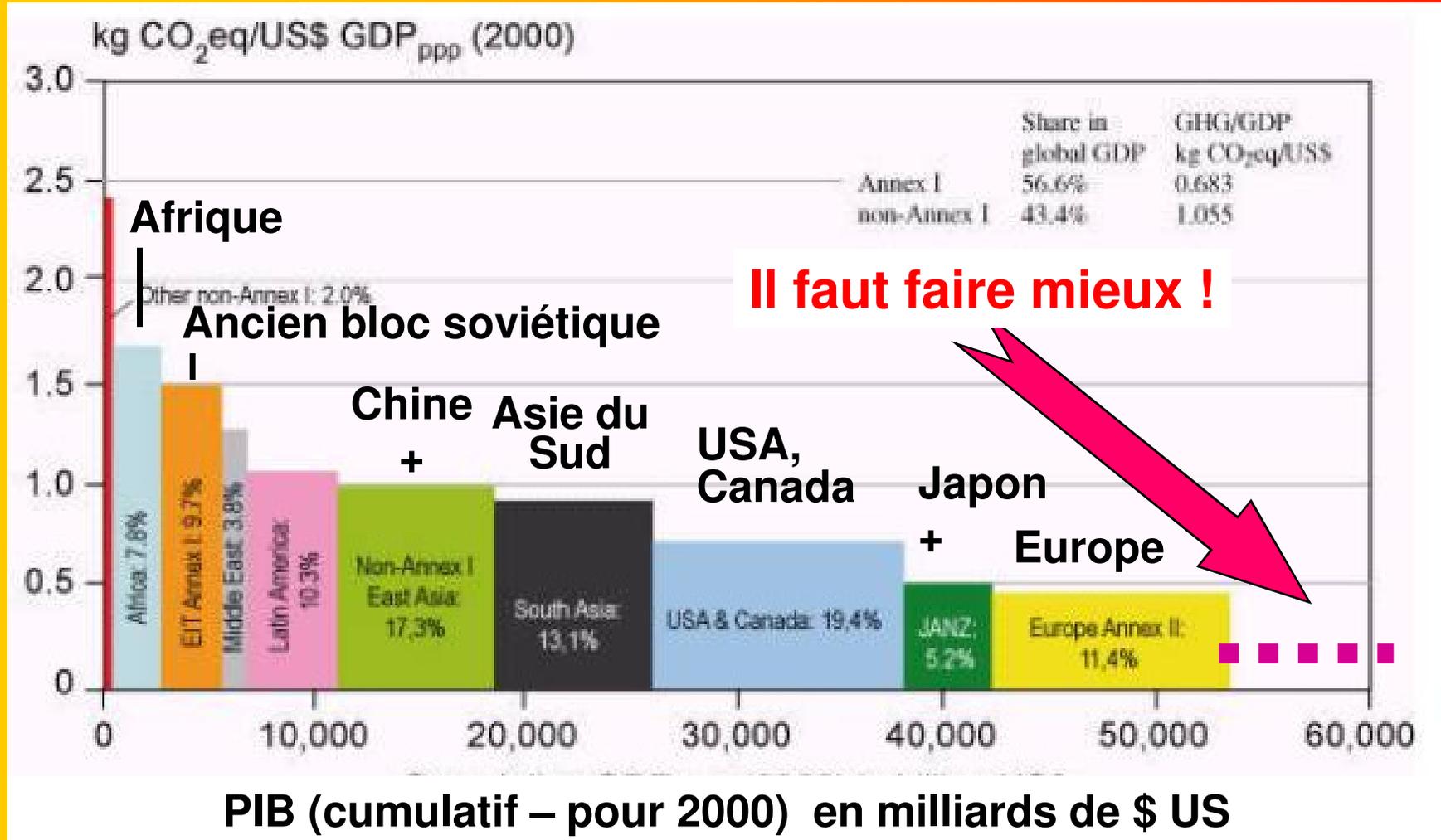
Source: Global Carbon Project, PNAS 2007

Fossil Fuel Emissions: Top Emitters (>4% of Total)



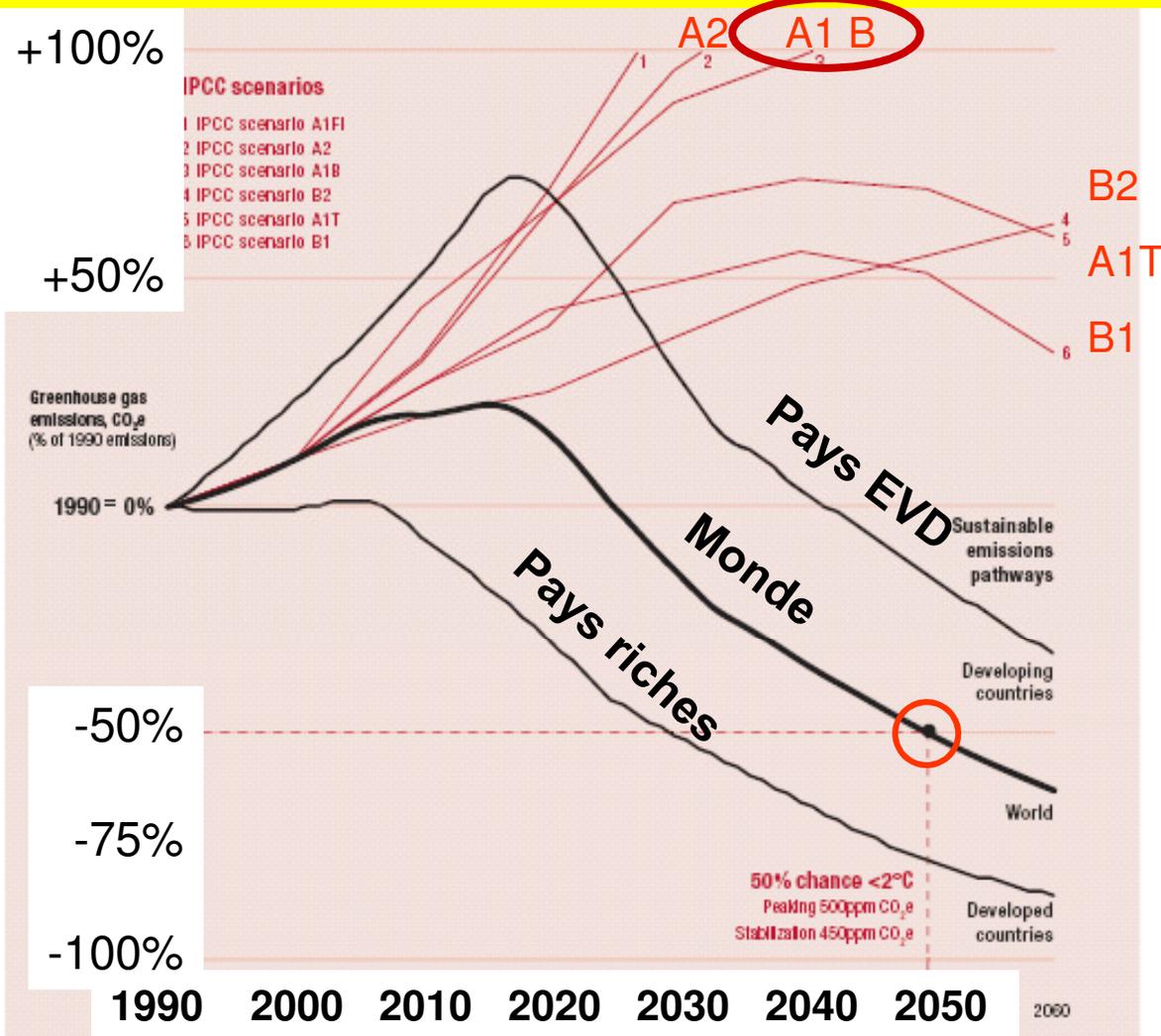
Global Carbon Project 2009;
Data: Gregg Marland, CDIAC 2009

Intensité carbonique en 2004



Scénarios d'émission pour 2000-2050

et ce qu'il faut pour éviter la zone de danger



Note: IPCC scenarios describe plausible future patterns of population growth, economic growth, technological change and associated CO₂ emissions. The A1 scenarios assume rapid economic and population growth combined with reliance on fossil fuels (A1FI), non-fossil energy (A1T) or a combination (A1B). The A2 scenario assumes lower economic growth, less globalization and continued high population growth. The B1 and B2 scenarios contain some mitigation of emissions, through increased resource efficiency and technology improvement (B1) and through more localized solutions (B2).

Source: Meinshausen 2007.

Les questions clé

Quand et à quel niveau vont être stabilisées les concentrations atmosphériques de CO₂ ?

Saura-t-on réduire les émissions mondiales nettes de GES par un facteur 2 d'ici 2050 ?

Les pays à technologie avancée sauront-ils réduire leurs émissions de GES par un facteur 4 d'ici 2050 ?

Qui montrera la voie pour faire mieux avec moins ?

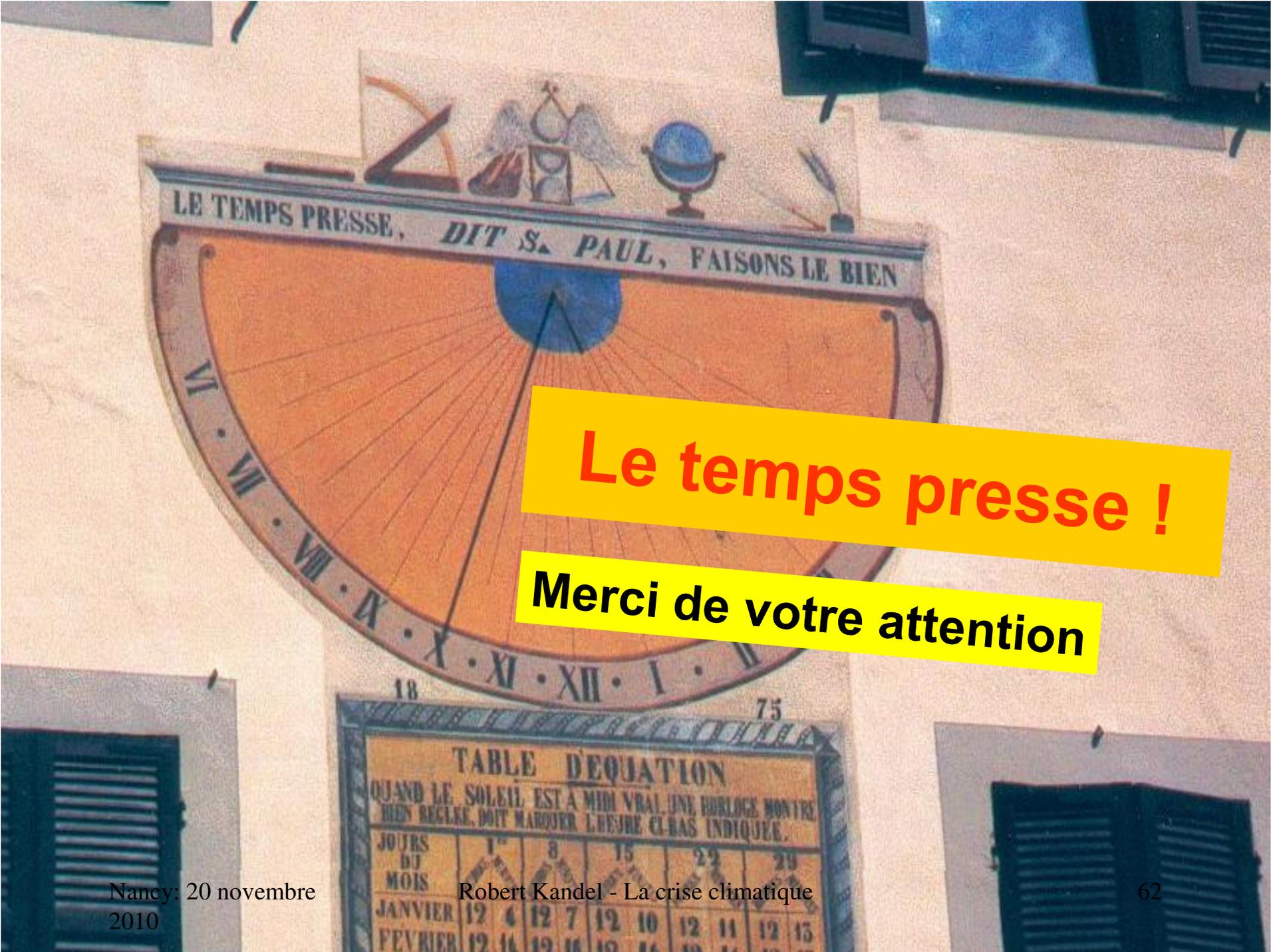
Une *catastrophe* climatique ?

Le changement climatique selon les modèles entraînera des catastrophes pour divers éléments de la biosphère naturelle et des sociétés humaines. Il faut préparer l'adaptation.

Mais les modèles ont leurs limitations.

Et si les projections des modèles *sous-estiment l'ampleur et la rapidité* du changement climatique ?

Comment s'adapter à une mutation de la carte bioclimatique qui se dessinerait en moins de 20 ans ?



LE TEMPS PRESSE, DIT S. PAUL, FAISONS LE BIEN

Le temps presse !

Merci de votre attention

18 75

TABLE D'EQUATION
 QUAND LE SOLEIL EST A MIDI VRAI UNE HORLOGE BIEN REGLEE DOIT MARQUER L'HEURE CI-BAS INDIQUEE.

JOURS DU MOIS	1 ^{er}	8	15	22	29					
JANVIER	12	6	12	7	12	10	12	11	12	15
FEVRIER	12	14	19	16	19	16	19	14	19	15

La catastrophe climatique

Un essai sur le rôle des catastrophes, surtout climatiques, dans l'histoire de la planète et dans la vie des hommes.

Un rappel sur le fait que les activités humaines changent l'atmosphère et de ce fait changent le climat.

Un avertissement sur les implications de la poursuite des émissions de gaz à effet de serre.

Robert Kandel et Maya Kandel

Hachette/Fayard, 2009

