

# Mécanismes des changements climatiques : du passé vers le futur



Pascale Braconnot - Valérie Masson-Delmotte  
Laboratoire des Sciences du Climat & de l'Environnement  
Institut Pierre Simon Laplace/CEA-CNRS-UVSQ, Gif-sur-Yvette

# Histoire des sciences du climat



Antiquité

Moyen  
Age

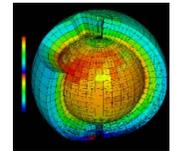
17<sup>ème</sup> siècle  
Instruments  
météo

19<sup>ème</sup> siècle  
Réseaux  
Glaciations  
Effet de serre

20<sup>ème</sup> siècle  
Climats passés  
Modélisation du climat

Physique des fluides  
Thermodynamique  
Transferts radiatifs

Datations/reconstructions  
Super calculateurs  
Satellites

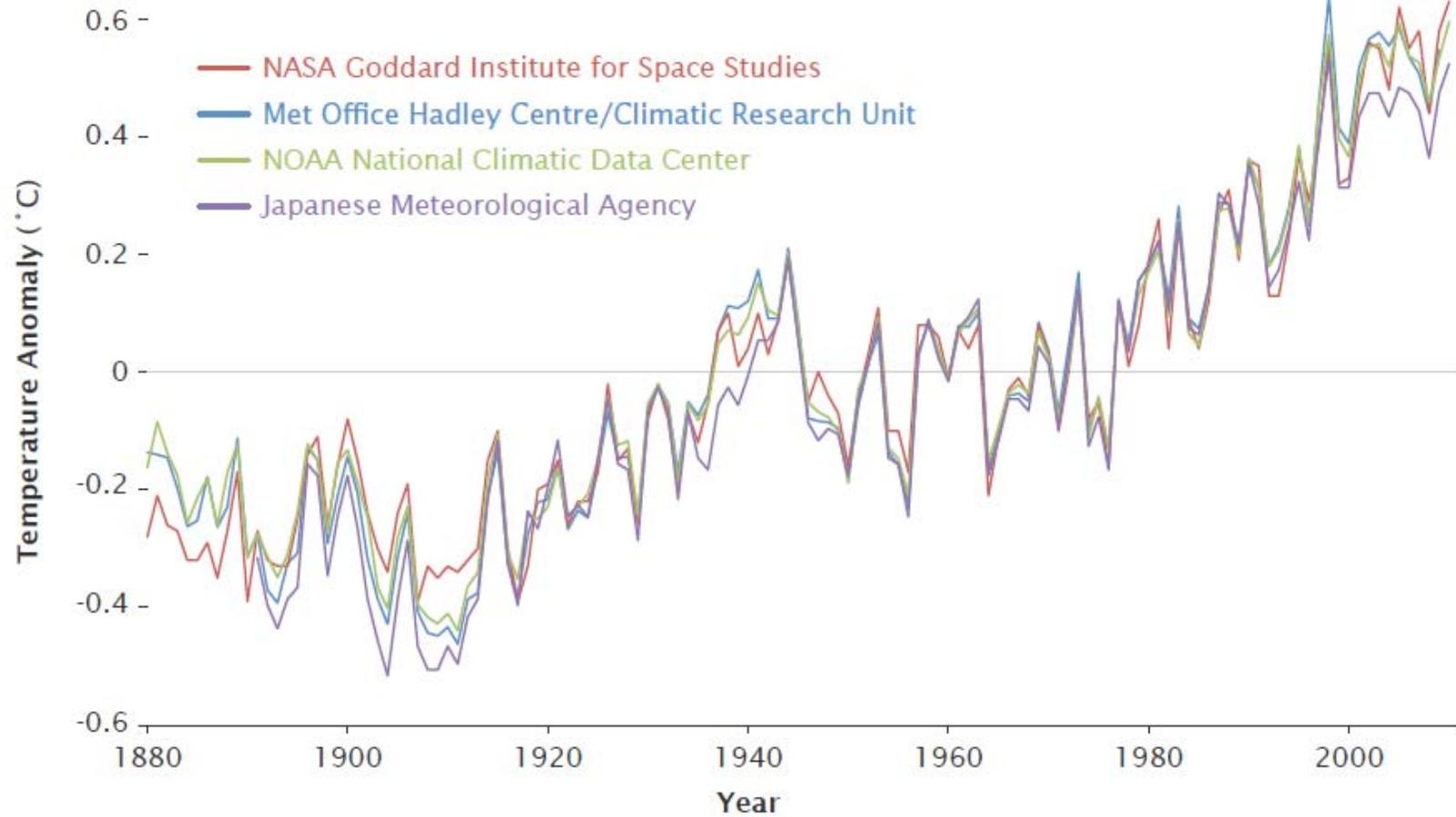


**Changements en cours**

# Réchauffement mesuré

## Global Surface Temperatures

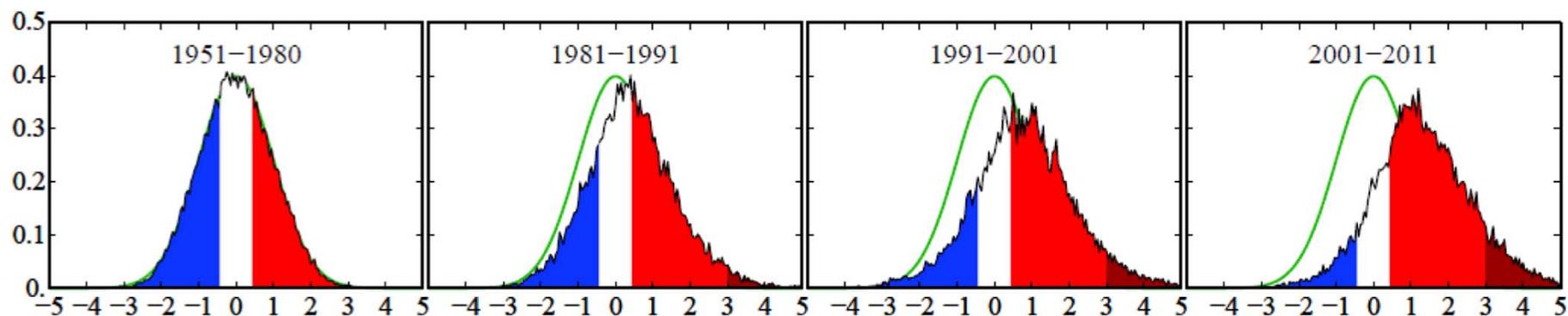
Four independent records show nearly identical long-term warming trends.



Credit: NASA Earth Observatory/Robert Simmon

# Changement de variabilité

Distribution des anomalies de température d'été (continents hémisphère nord)

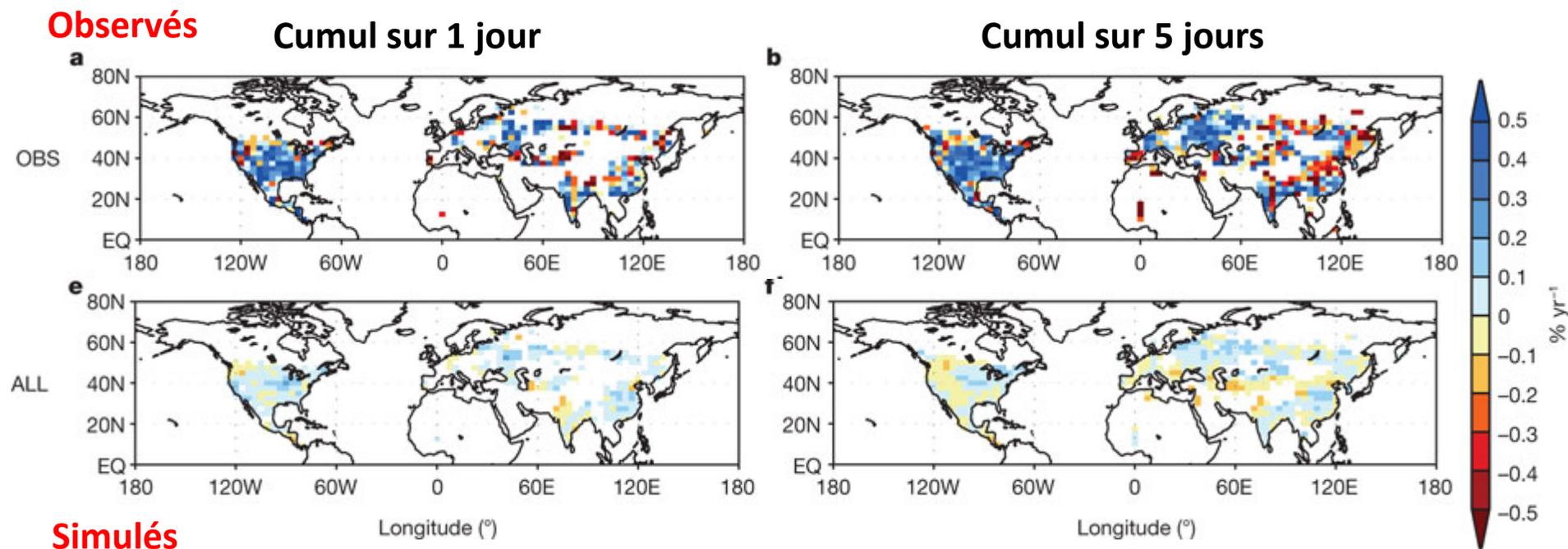


Période de référence  
(1951-1980)

Unités : écarts types locaux

Augmentation de l'intensité et de la fréquence  
des vagues de chaleur estivales

# Records de précipitations

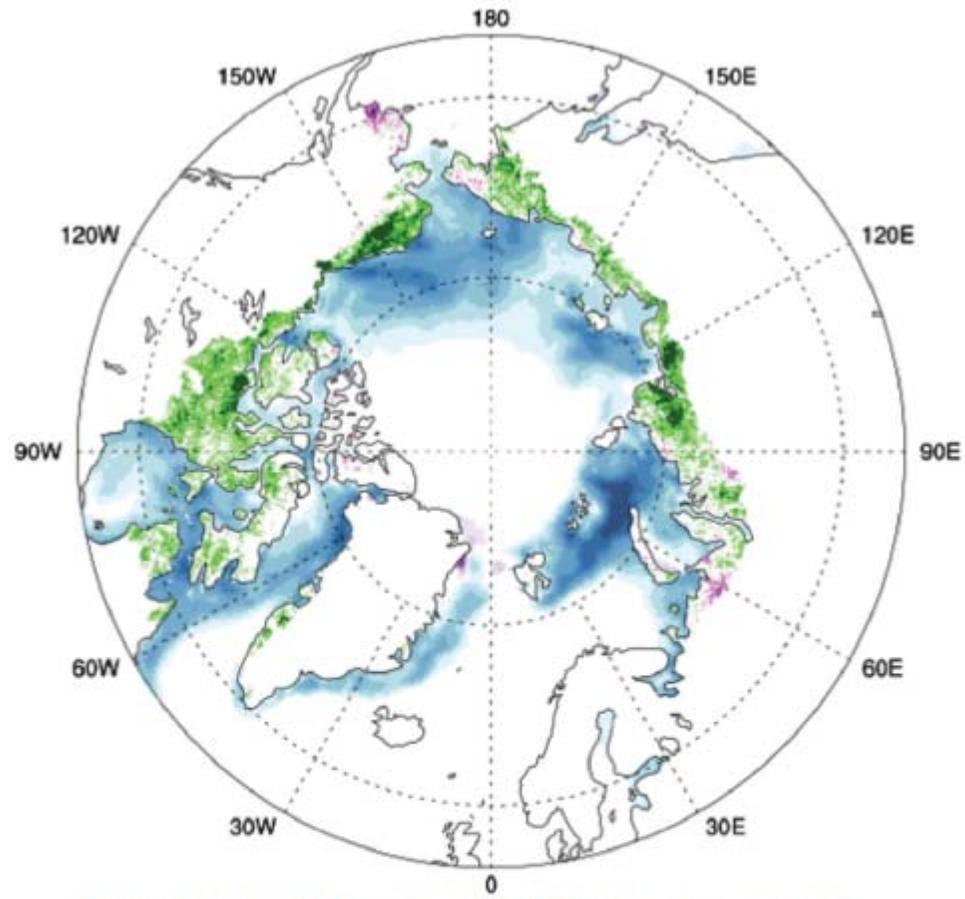


**Simulés**

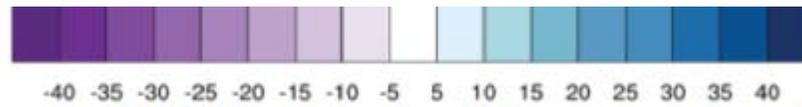
**+7% d'humidité par °C de réchauffement global**

**notion de « catastrophe naturelle »**

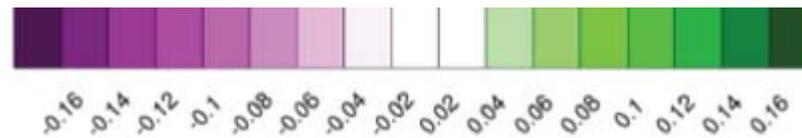
*Min et al, 2011*



**Eaux libres de glace (ampleur du changement, % entre 1982 et 2010)**

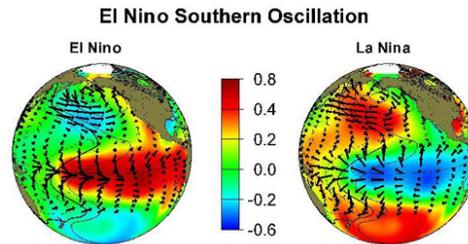


**Indice de végétation (changement sans unité entre 1982 et 2010)**



# Qu'est ce qui fait varier le climat?

Variabilité interne



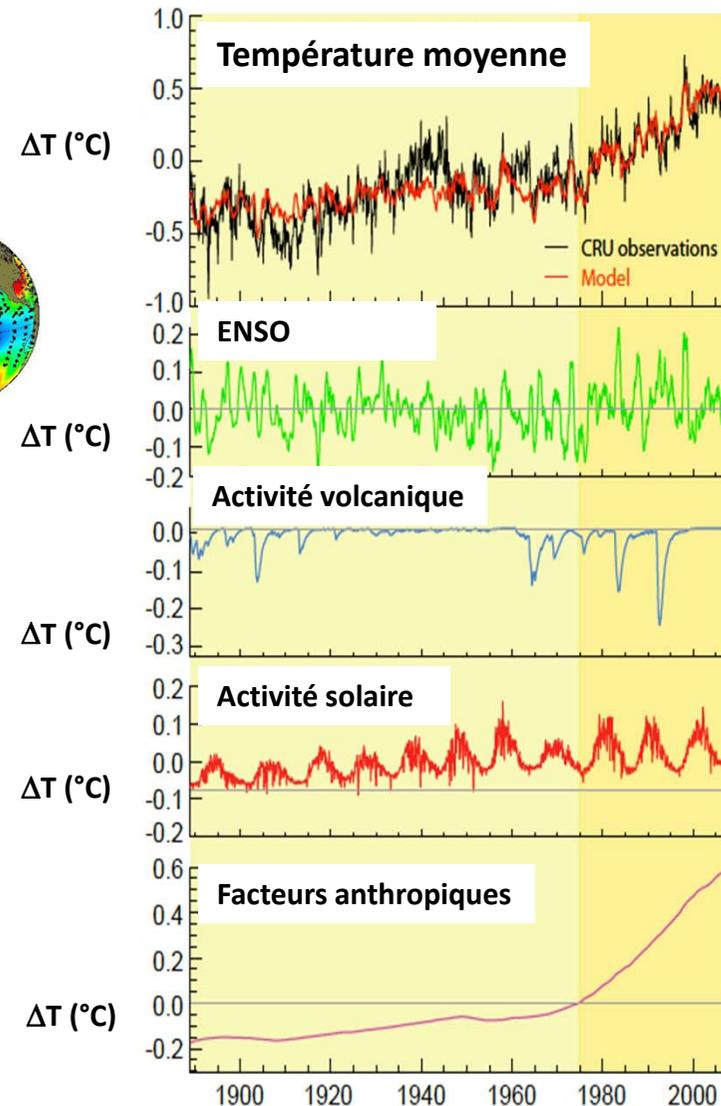
Activité volcanique



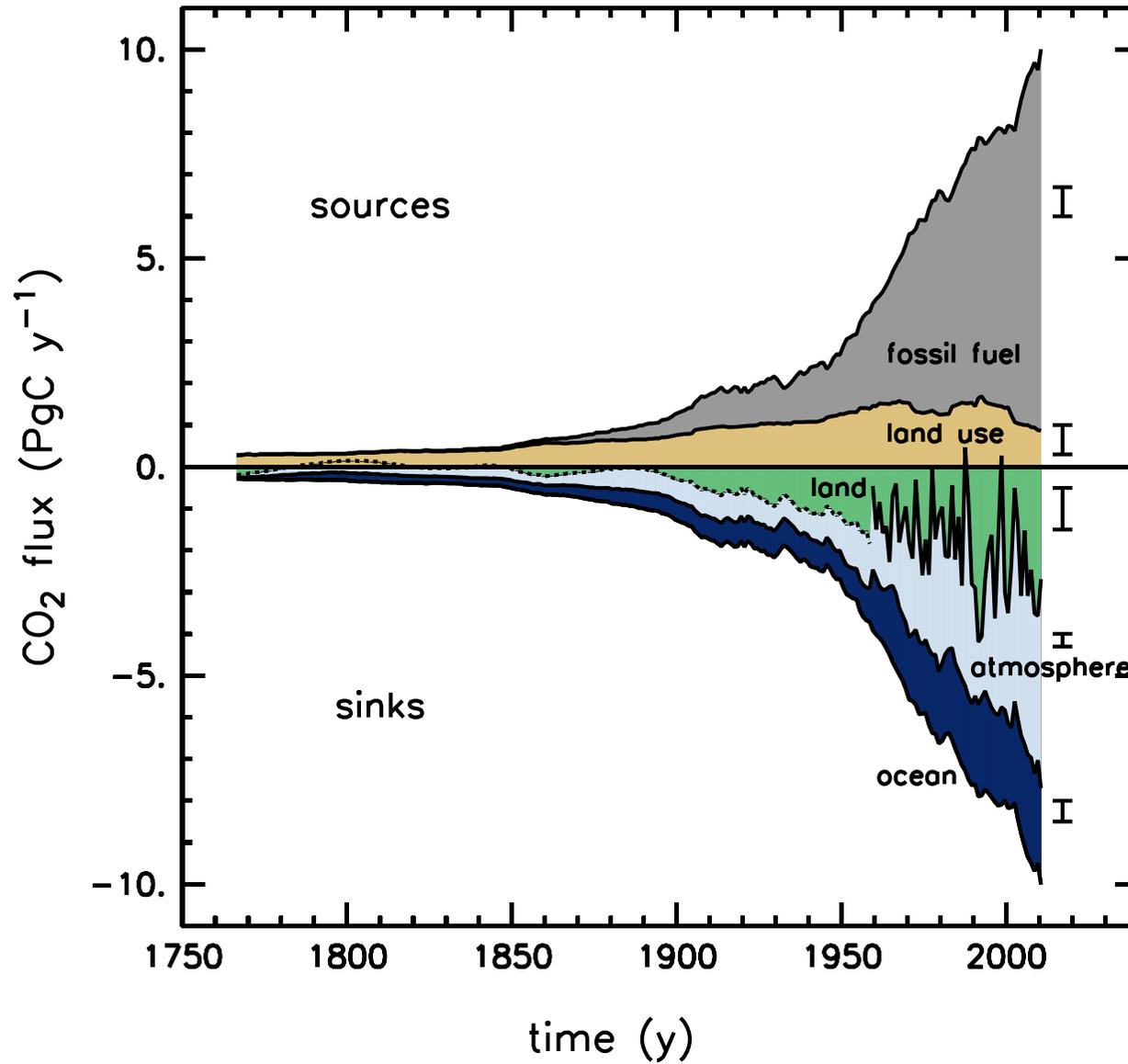
Activité solaire



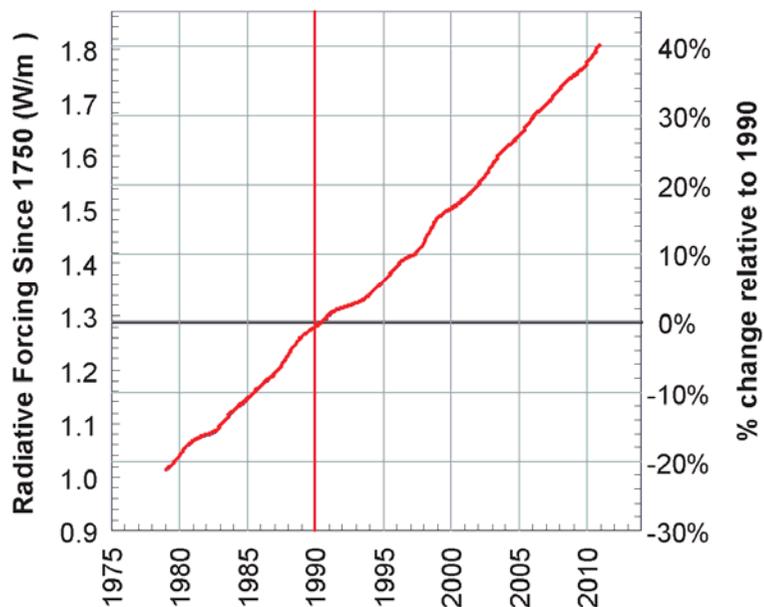
Facteurs anthropiques



# Perturbation du cycle du carbone

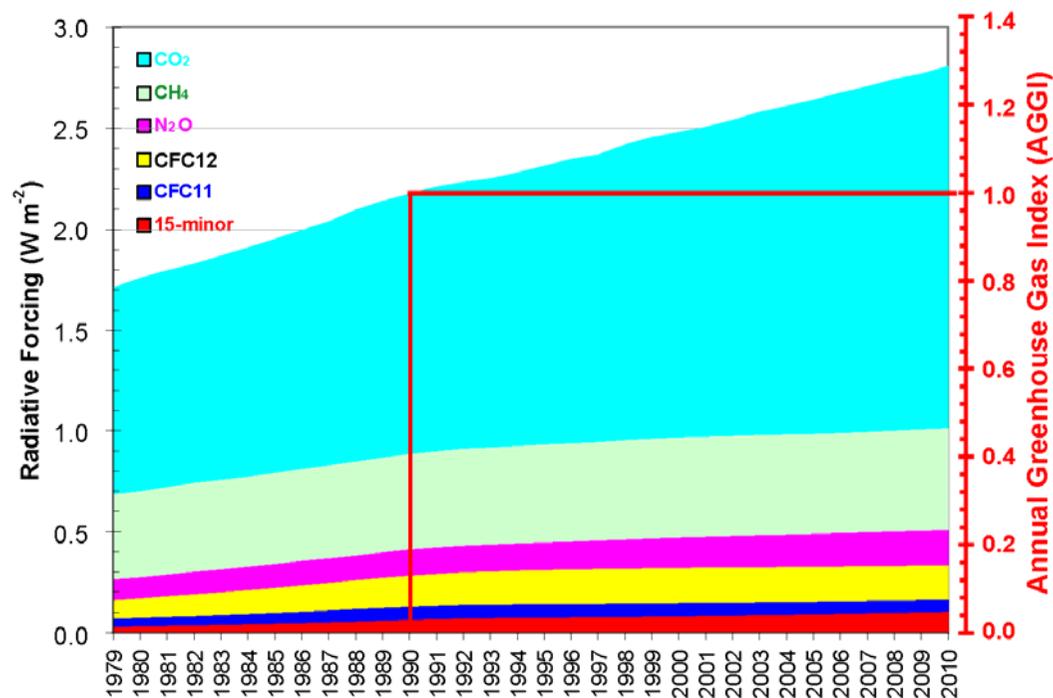


Carbon Dioxide Radiative Forcing

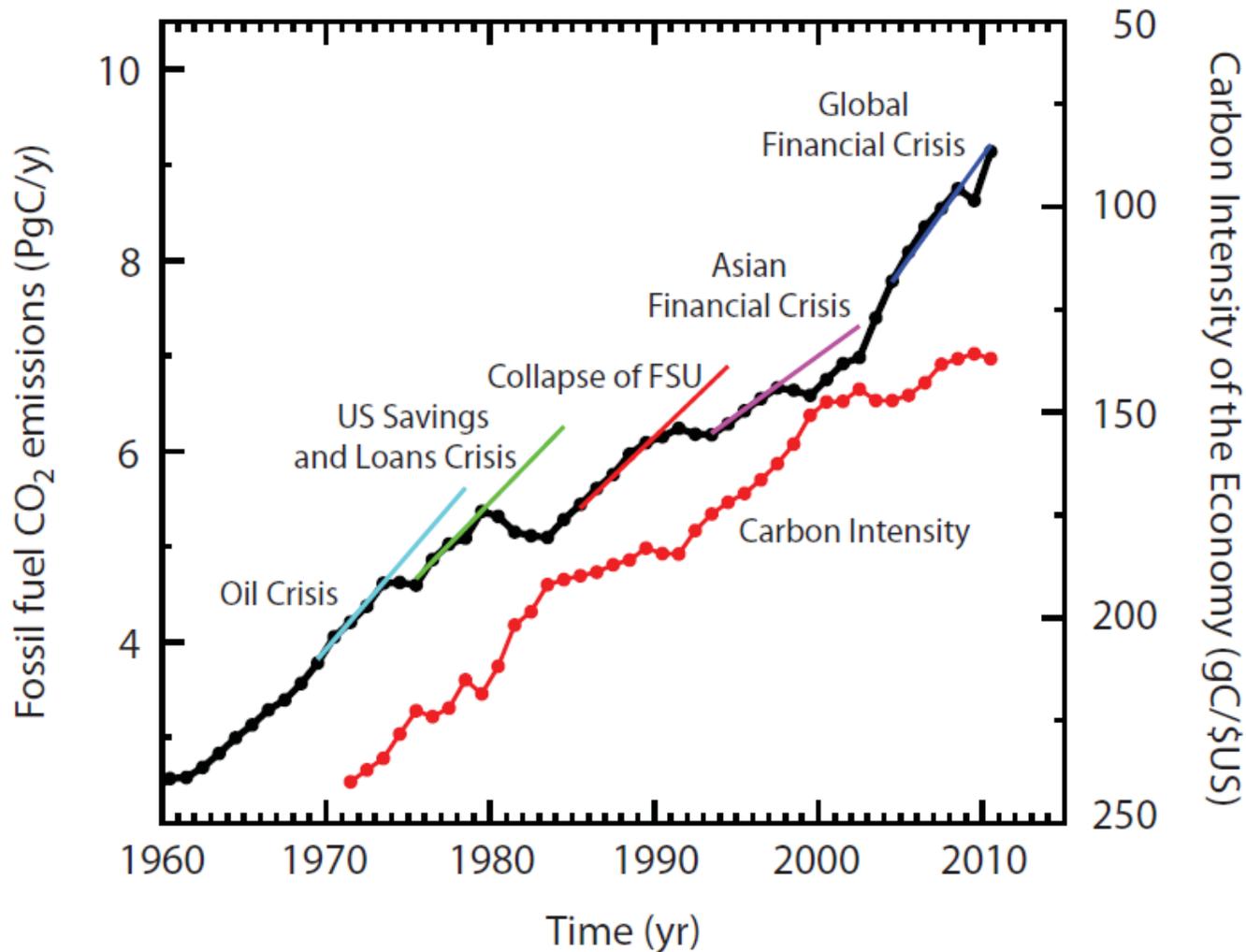


## Enjeux des rejets de CO<sub>2</sub>:

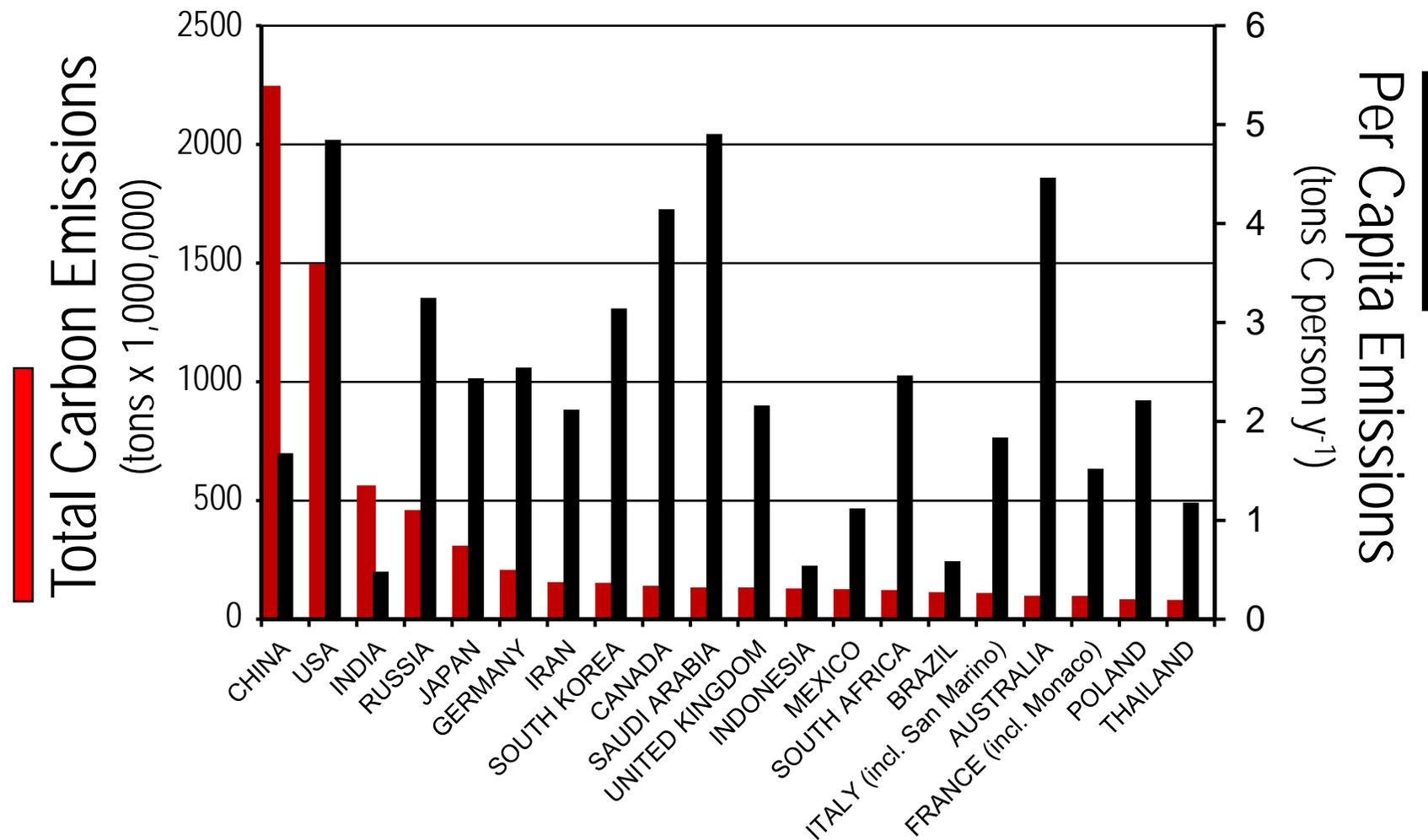
- Effet radiatif le plus important
- Très longue durée de vie (100-30 000 ans)
- Acidification des océans



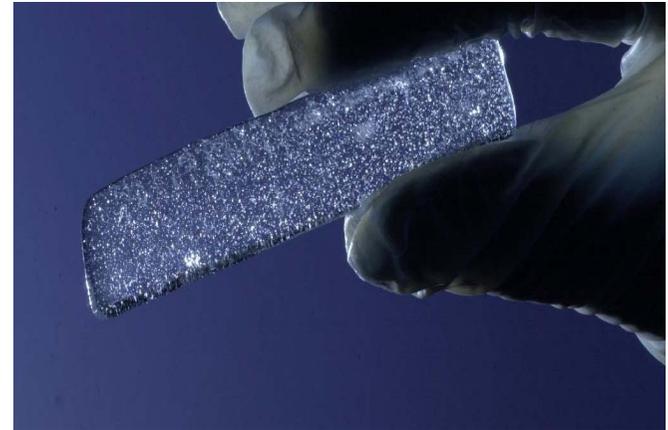
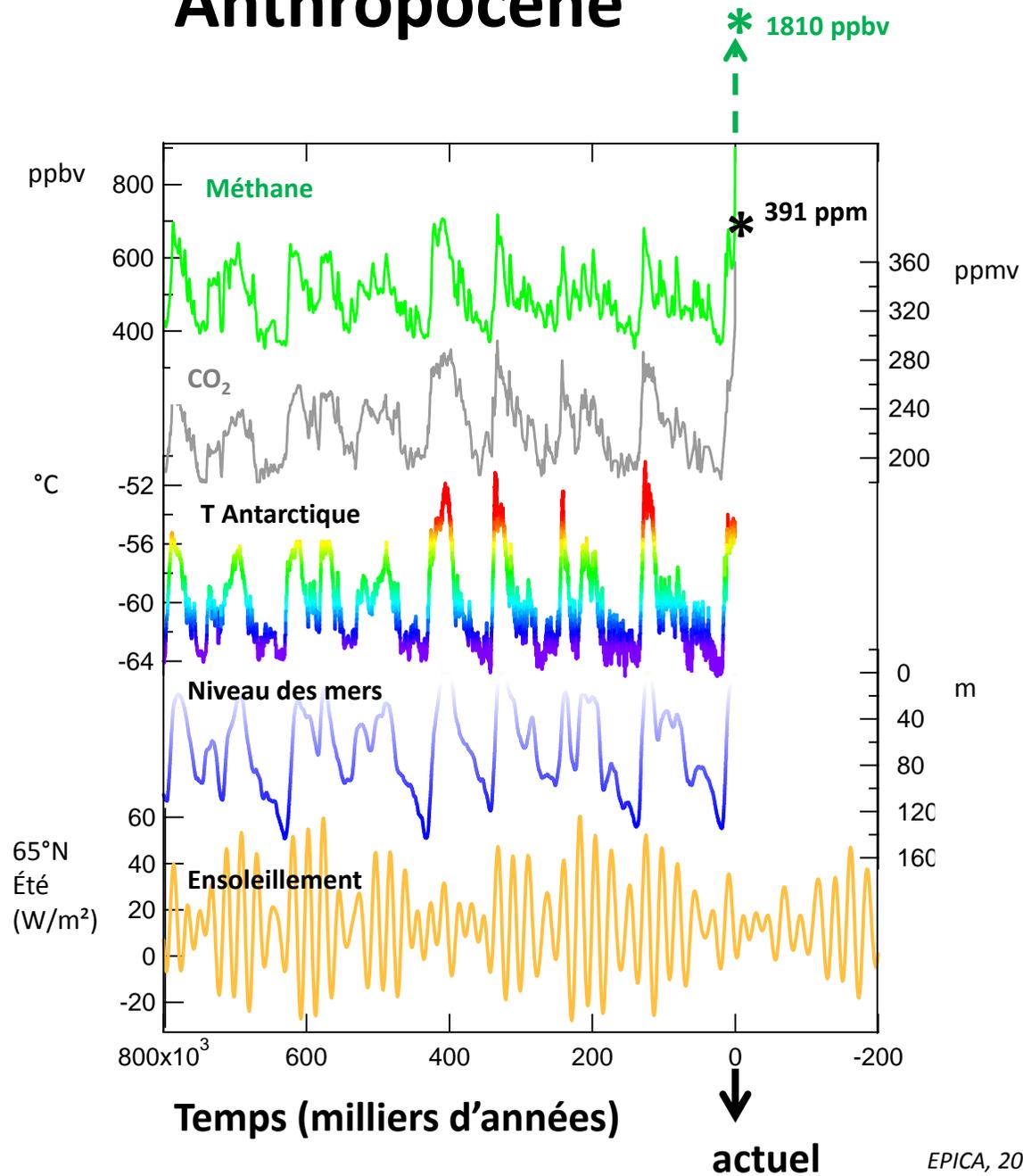
# Emissions et intensité carbone de l'économie mondiale



# Top 20 des pays : émissions totales et par habitant



# Anthropocène



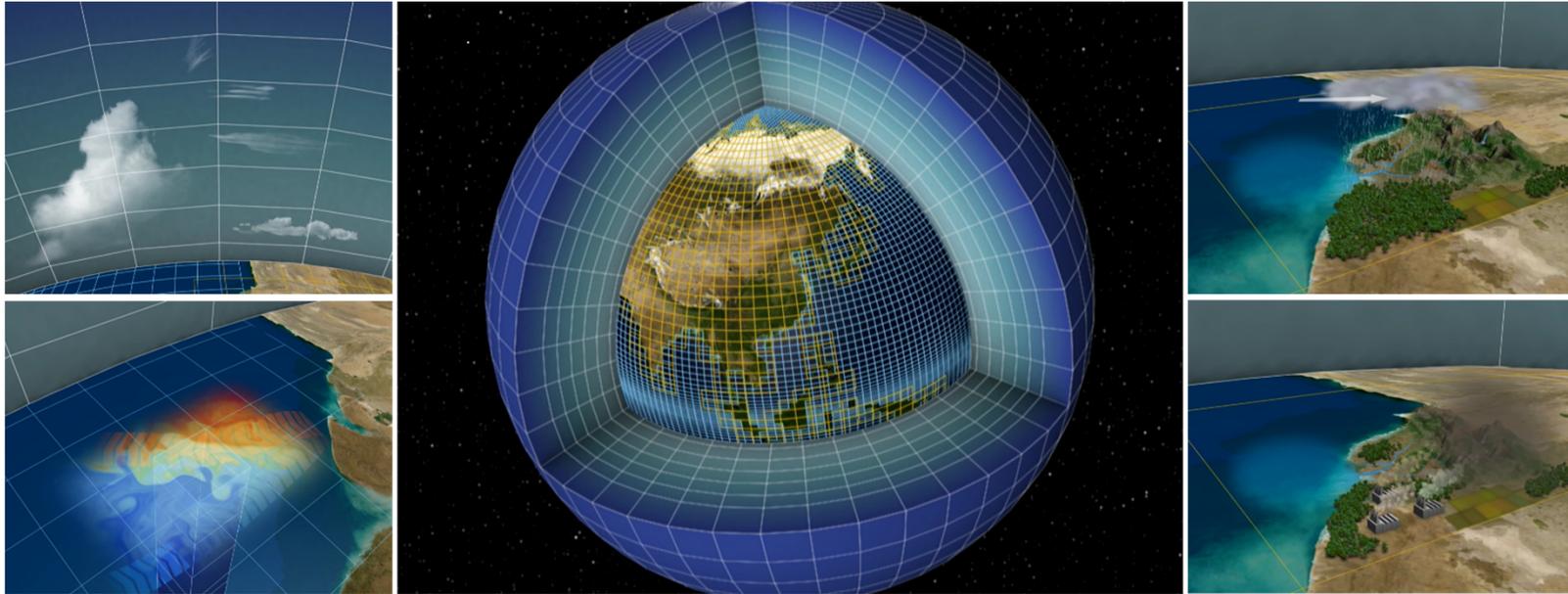
# **Modélisation du climat et projections**

# Le rôle de la modélisation

- Le climat futur n'est pas une simple extrapolation de l'actuel
- La simulations numérique a pour objectif de nous aider à:
  - Comprendre le fonctionnement du climat à différentes échelles de temps
  - Identifier comment le climat varie selon la perturbation appliquée
  - Tester des hypothèses (ex/ perturbation anthropique selon différents scénarios socio-économiques, rôle d'un phénomène ou d'une rétroaction)
- Les études actuelles ont pour objectif de mieux cerner les incertitudes
  - Crédibilité des modèles utilisés
  - Interactions complexes entre climat et environnement
  - Ignorance scientifique

# Modèle de climat

## (Modèle de circulation générale)

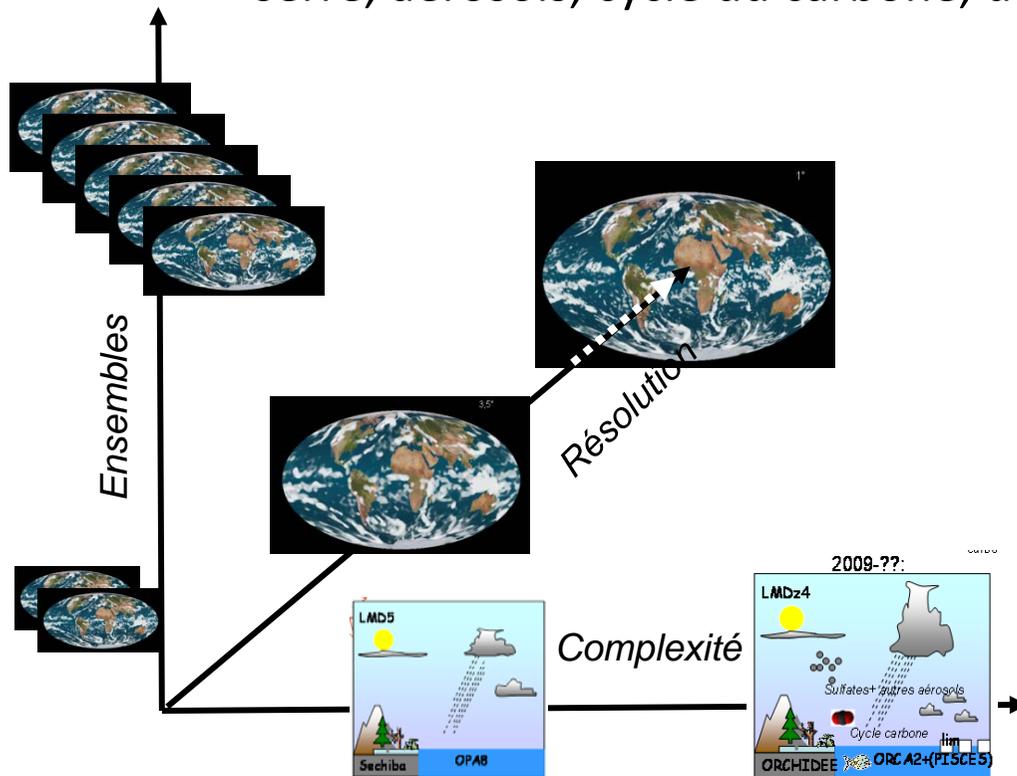


Images issues d'un film présentant la modélisation du climat. Copyright CEA

- Une représentation 3D de l'atmosphère l'océan glaces de mer et surfaces continentales (couplages de différents modèles)
- Une représentation du couplage avec les cycles biogéochimiques dans l'atmosphère l'océan et le continent

# Des questions de plus en plus précises avec :

- De nombreuses échelles de temps et d'espace (global au local, quelques années à quelques décennies)
- Evolution des caractéristiques de la météorologies et de la variabilité climatique (heure à décennale)
- Couplages entre le climat et les cycles biogéochimiques (gaz à effet de serre, aérosols, cycle du carbone, utilisation des terres,...)



*40 modèles dans le monde pour environ 20 groupes de modélisation*

*2 modèles en France :*

*La résolution spatiale est de l'ordre de 150 km pour le modèle du CNRM.*

*Deux résolutions pour le modèle de l'IPSL : 180 et 260 km. Le cycle du carbone est interactif.*

# Se projeter jusqu'en 2100 et au-delà: ex IPCC (2007)

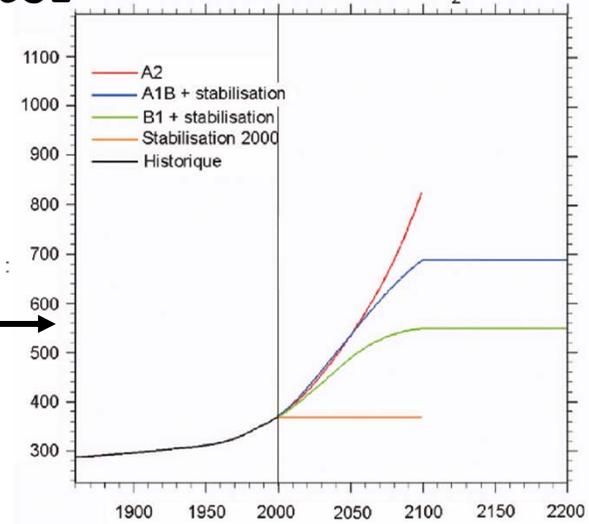
➤ A partir d'hypothèses sur les conséquences de l'activité anthropique sur la composition atmosphérique et les caractéristiques des surface continentales

Emission scenarios

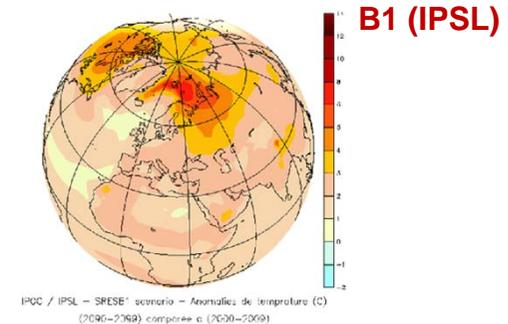
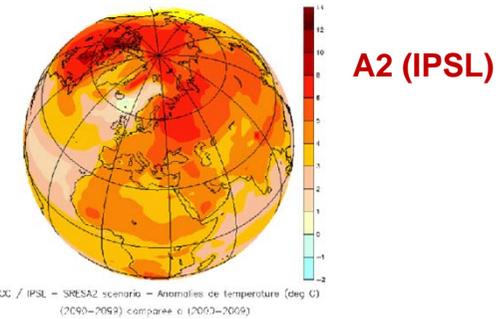
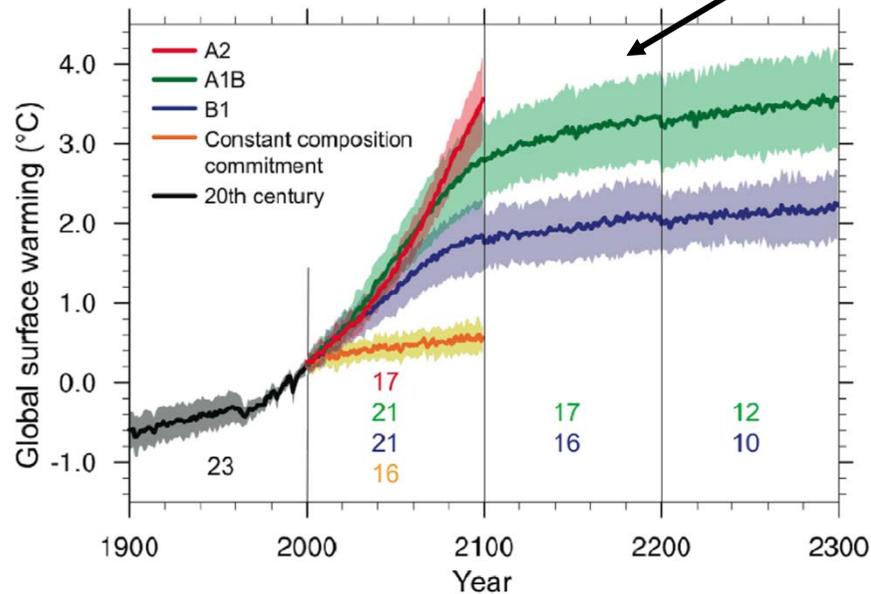
➤ Calcul des caractéristiques du climat (météorologie, saisonnalité, variabilité interannuelle..).

Ex: CO<sub>2</sub>

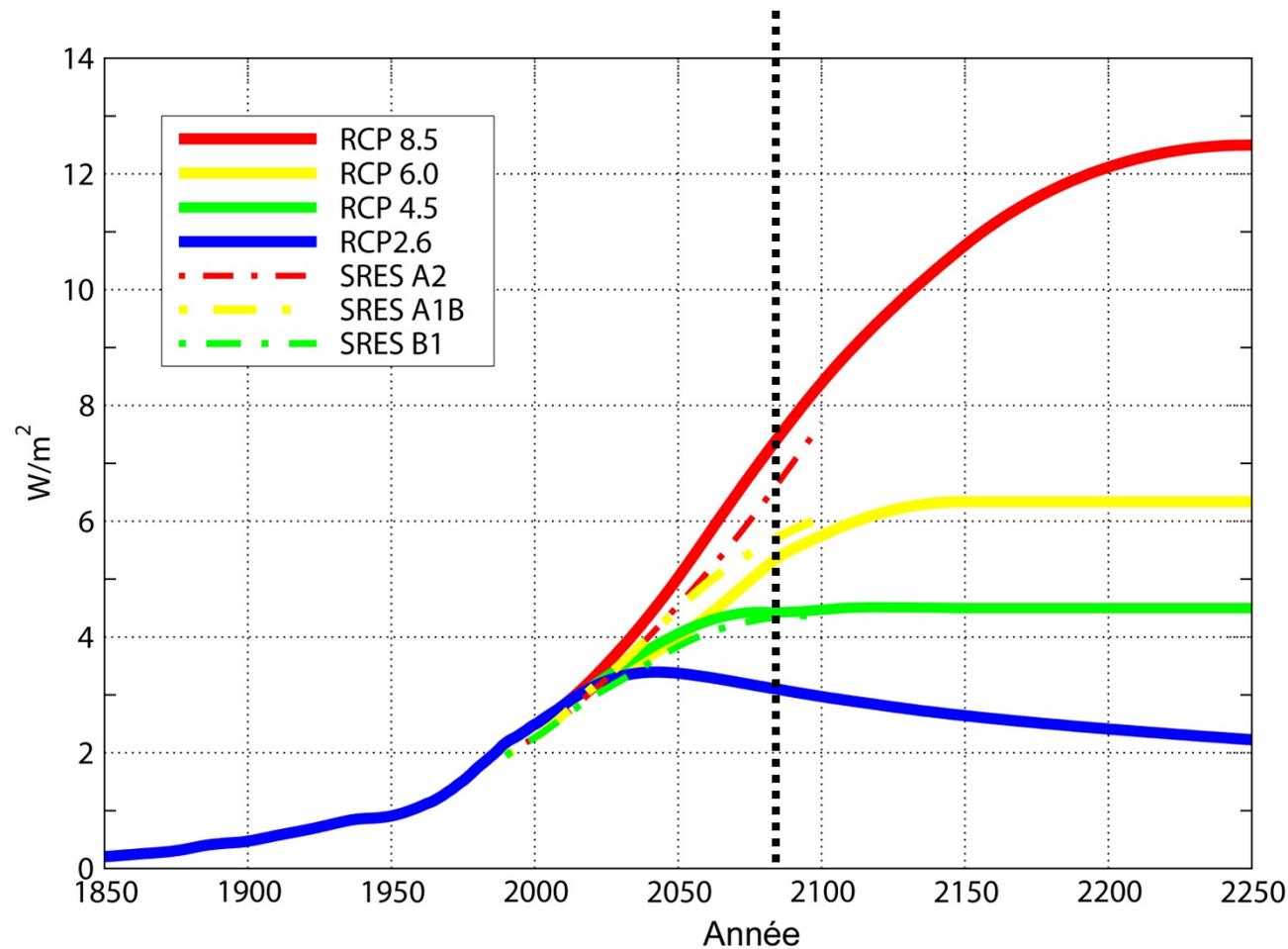
Concentration de CO<sub>2</sub>



Ex :  
Température  
annuelle  
globale



# Une nouvelle philosophie de travail : les RCPs



Ces scénarios "RCP" mesurent l'intensité de la perturbation du système climatique par l'homme, via:

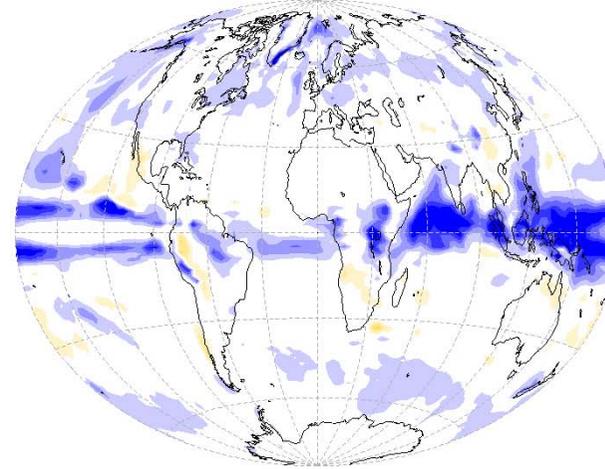
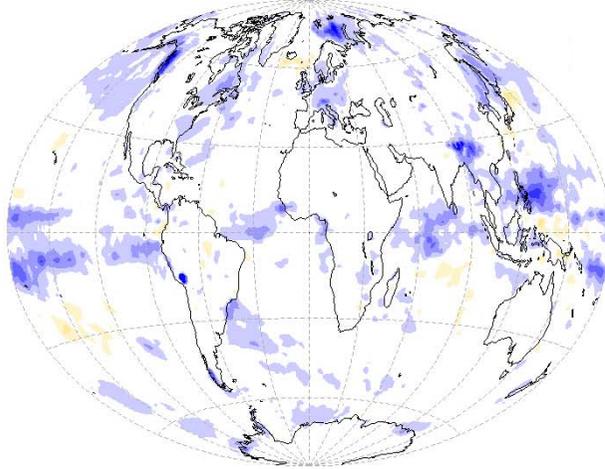
- les émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols
- les transformations de l'occupation des sols

# Changement de précipitations dans 100 ans: 2 scénarios extrêmes

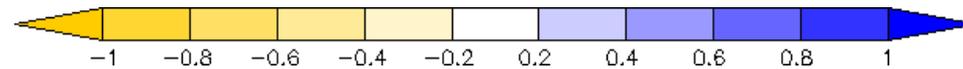
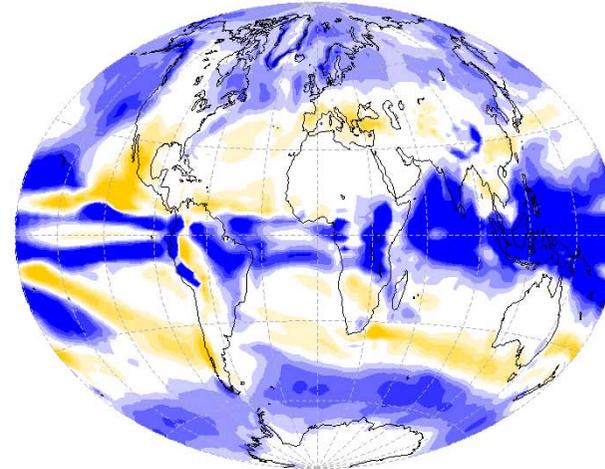
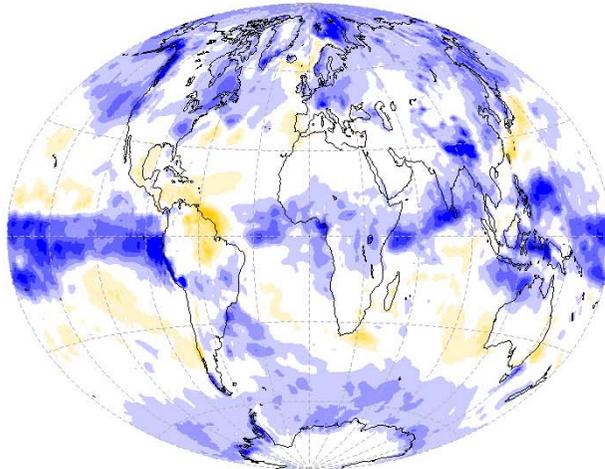
CNRM-CERFACS

IPSL

RCP2.6



RCP8.5



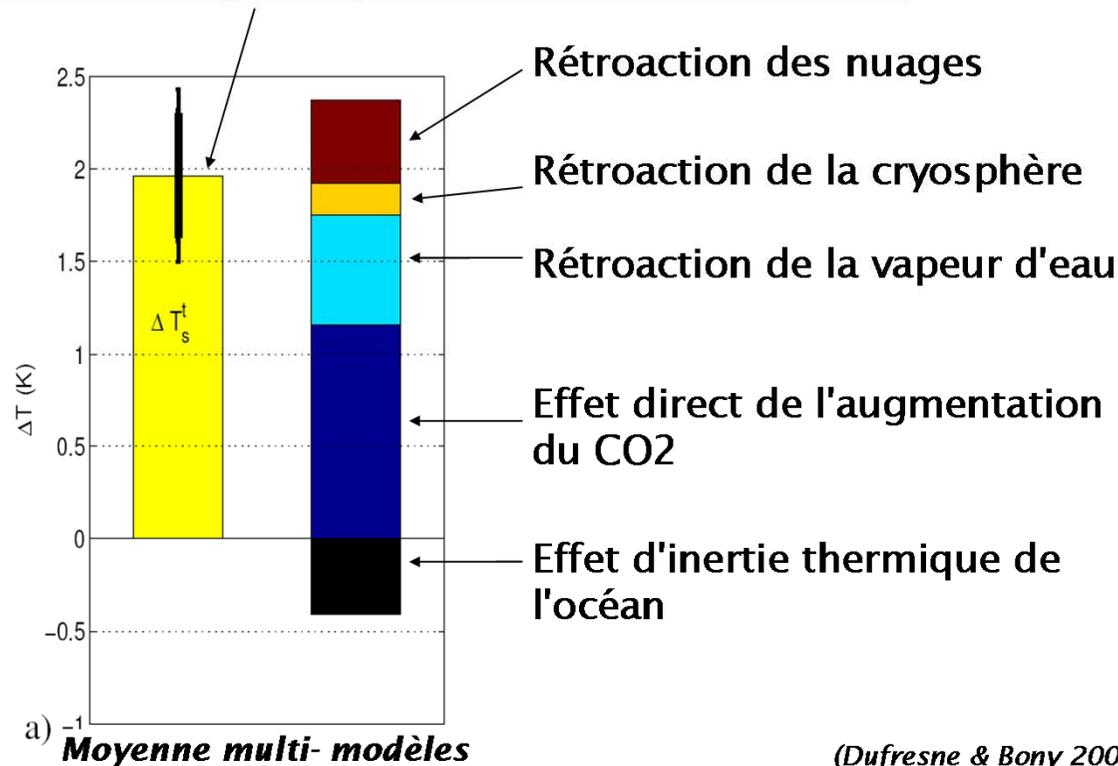
(mm/jour)

Entre  
1961-1990  
et 2071-2100

# Comment les rétroactions « amplifient »-elles l'albédo planétaire et l'effet de serre?

- Études à partir d'expériences simplifiées (ex: réponse au doublement de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique)

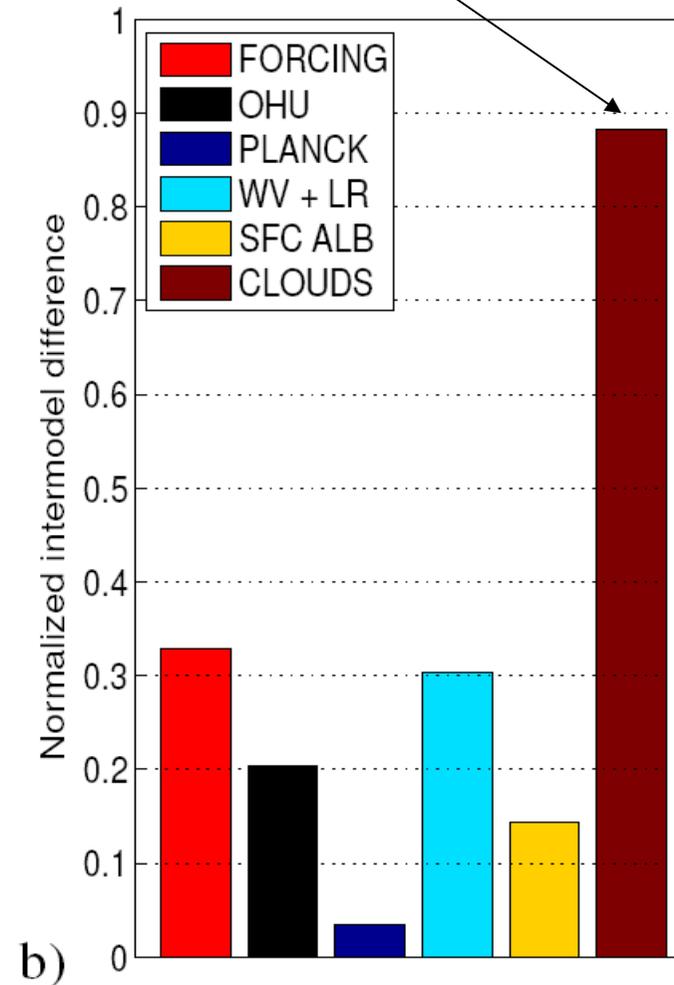
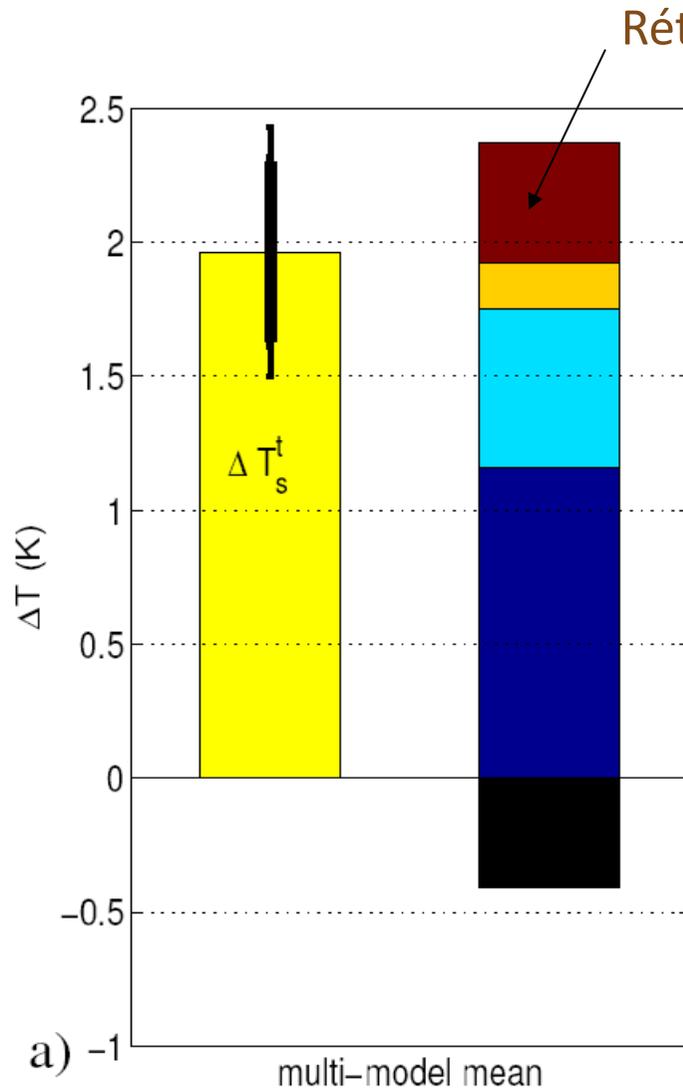
## Réchauffement global pour un doublement de CO<sub>2</sub>



# Estimation des incertitudes des rétroactions

Moyenne des modèles

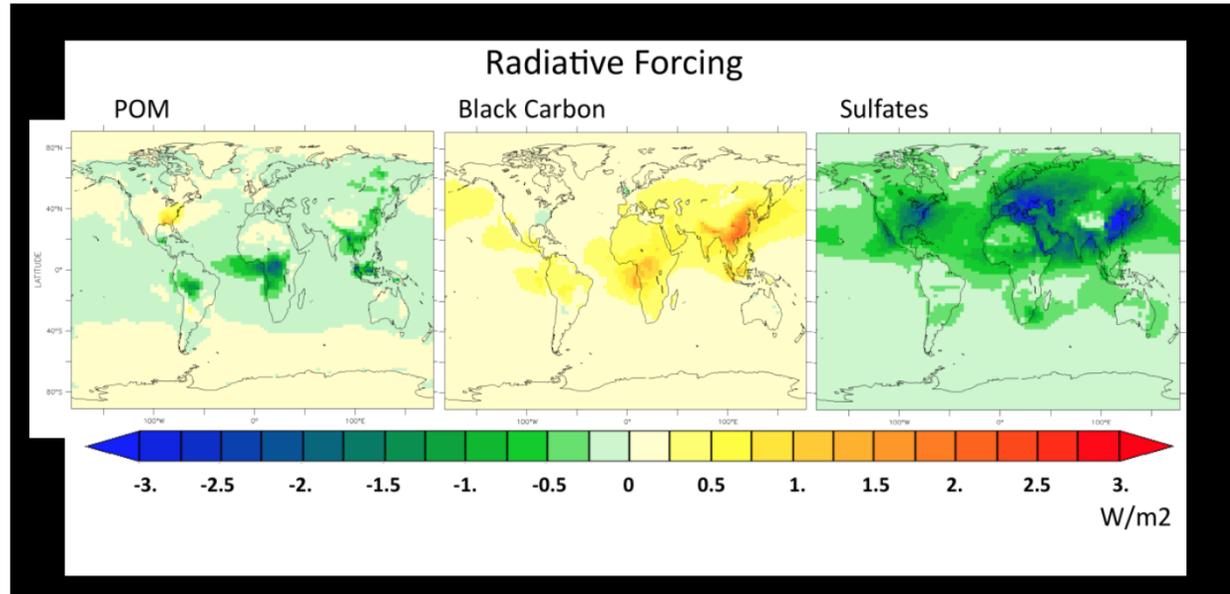
Dispersion entre les modèles



(Dufresne & Bony 2008)

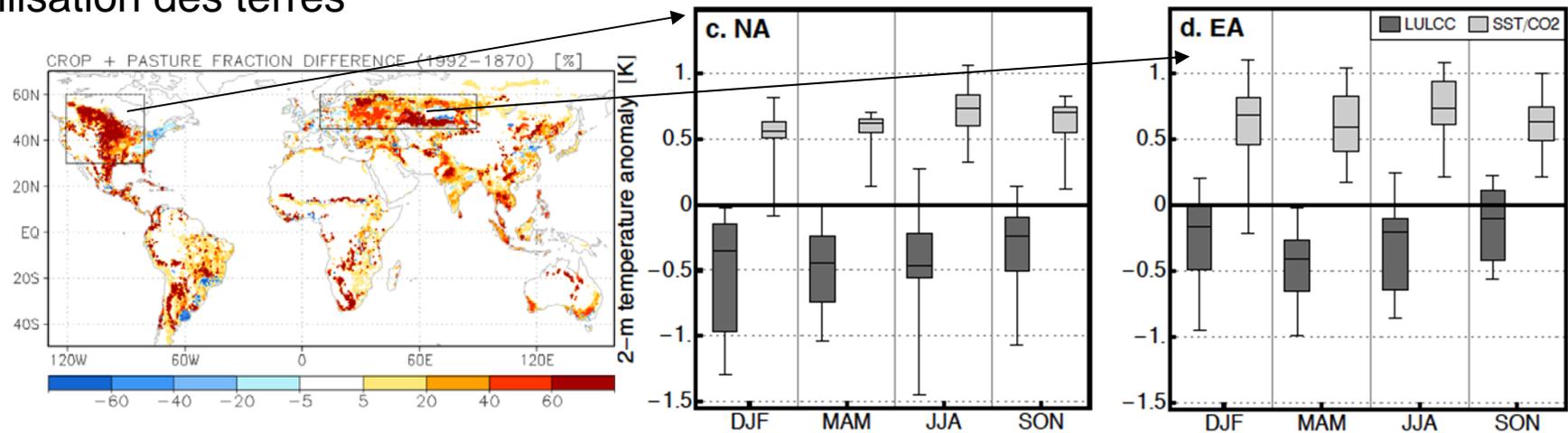
# Sans oublier des effets régionaux

Ex aérosols



*Szopa et al. 2012*

Ex utilisation des terres

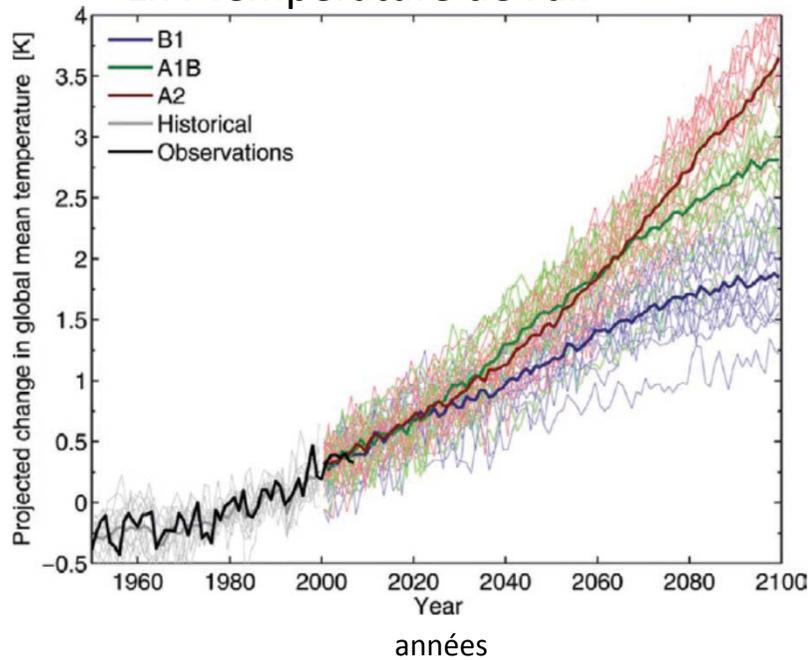


Résultats multi modèles

*Pitman et al., GRL 2009; de Noblet-Ducoudré et al., J. Clim. 2012; Boisier et al., JGR in press*

# Sources d'incertitudes

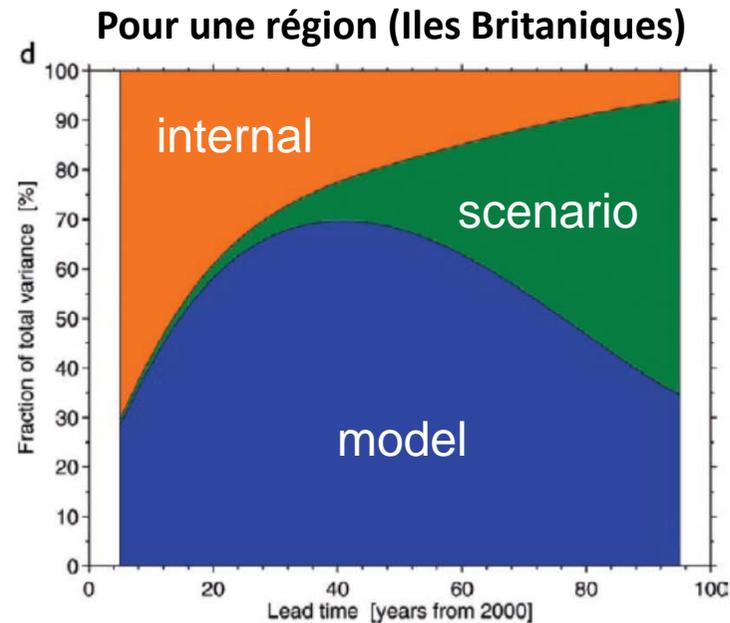
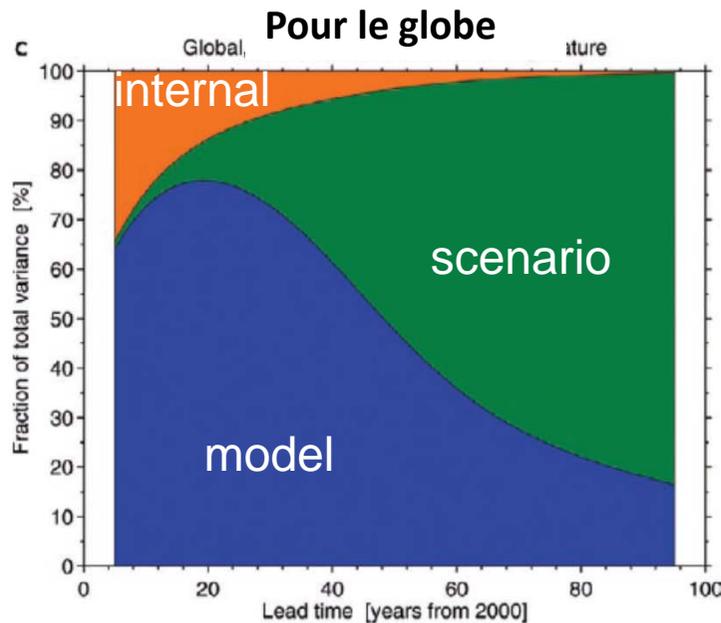
Ex : Température de l'air



*Hawkins and Sutton, BAMS, 2009*

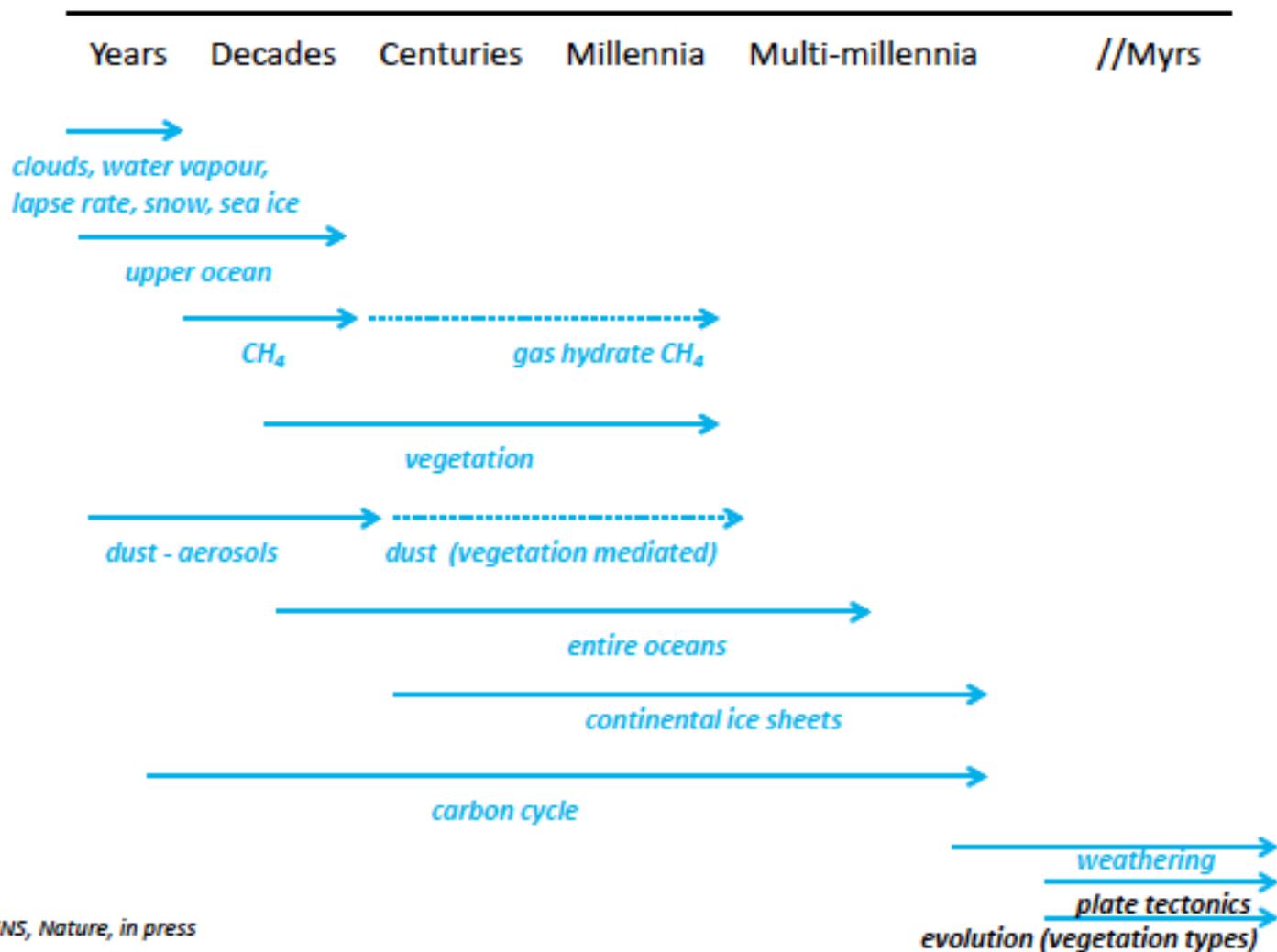
Evolution de l'incertitude au cours du temps

Suivant question posée et région considérée différentes combinaisons des principales sources d'incertitude

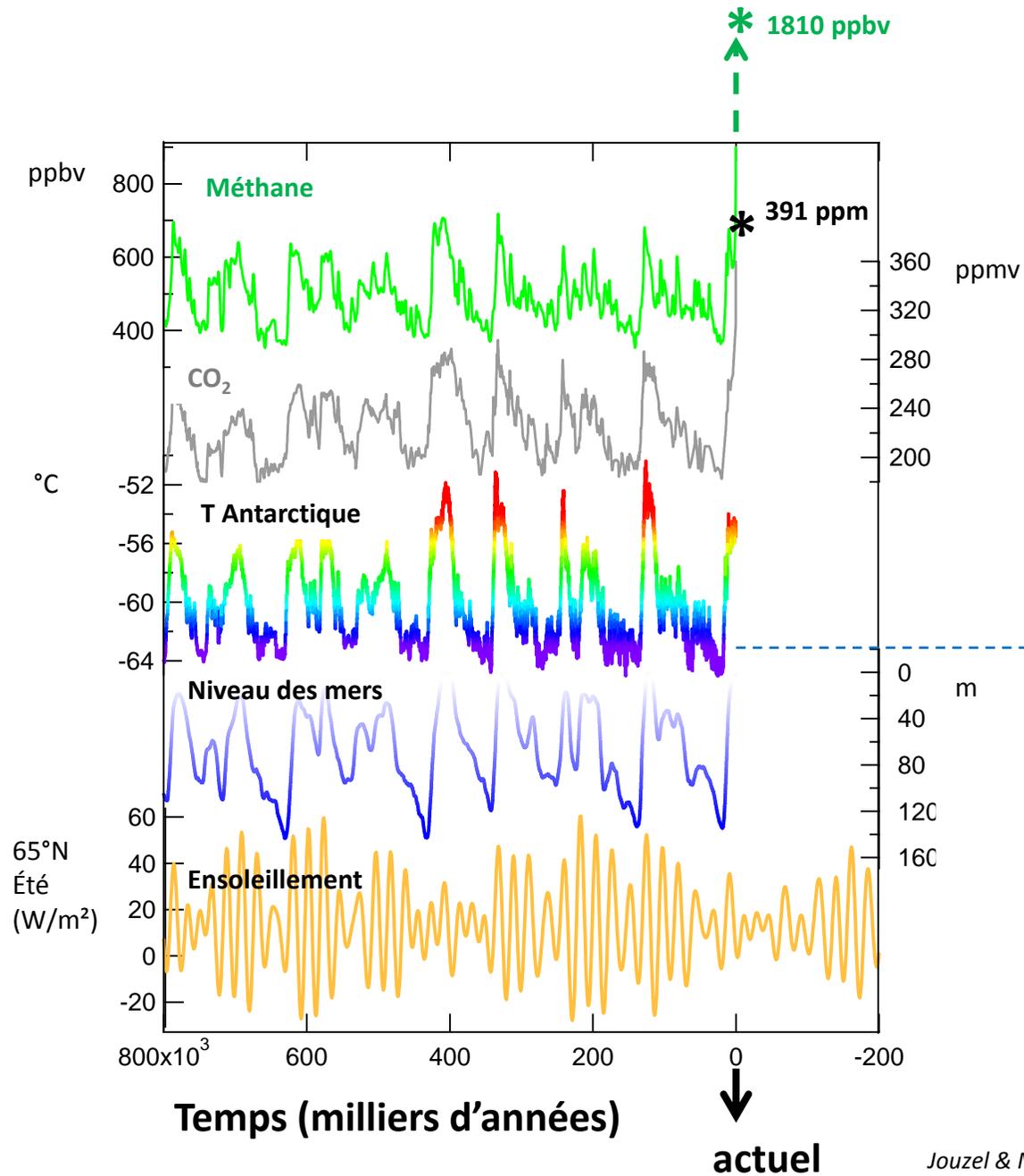


**Mise au regard des climats passés**

# Climats passés

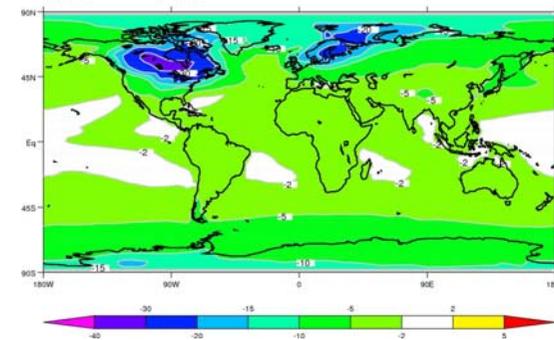


# Climat glaciaire

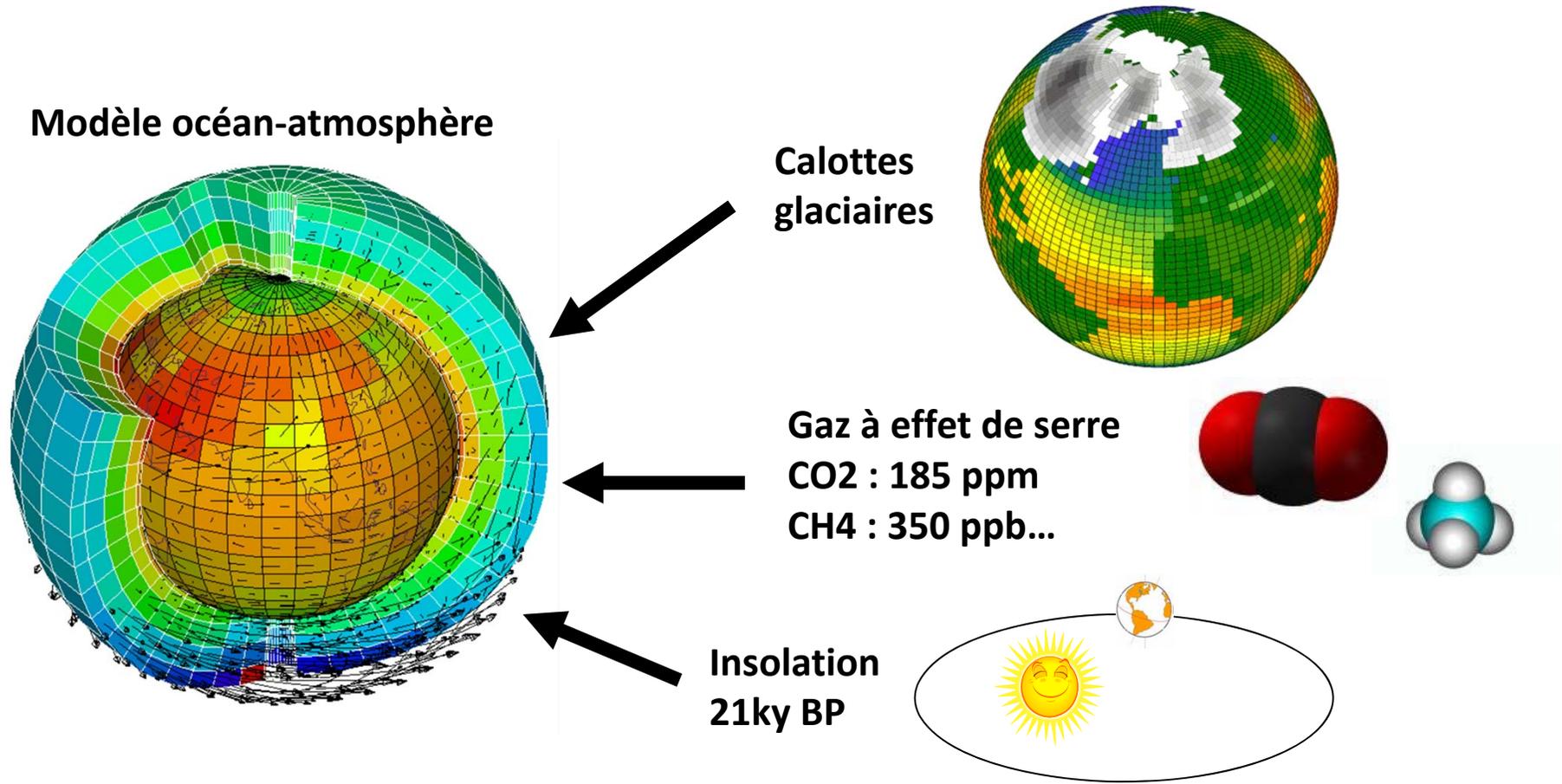


-4 -6°C

ΔT glaciaire (20 000 ans)



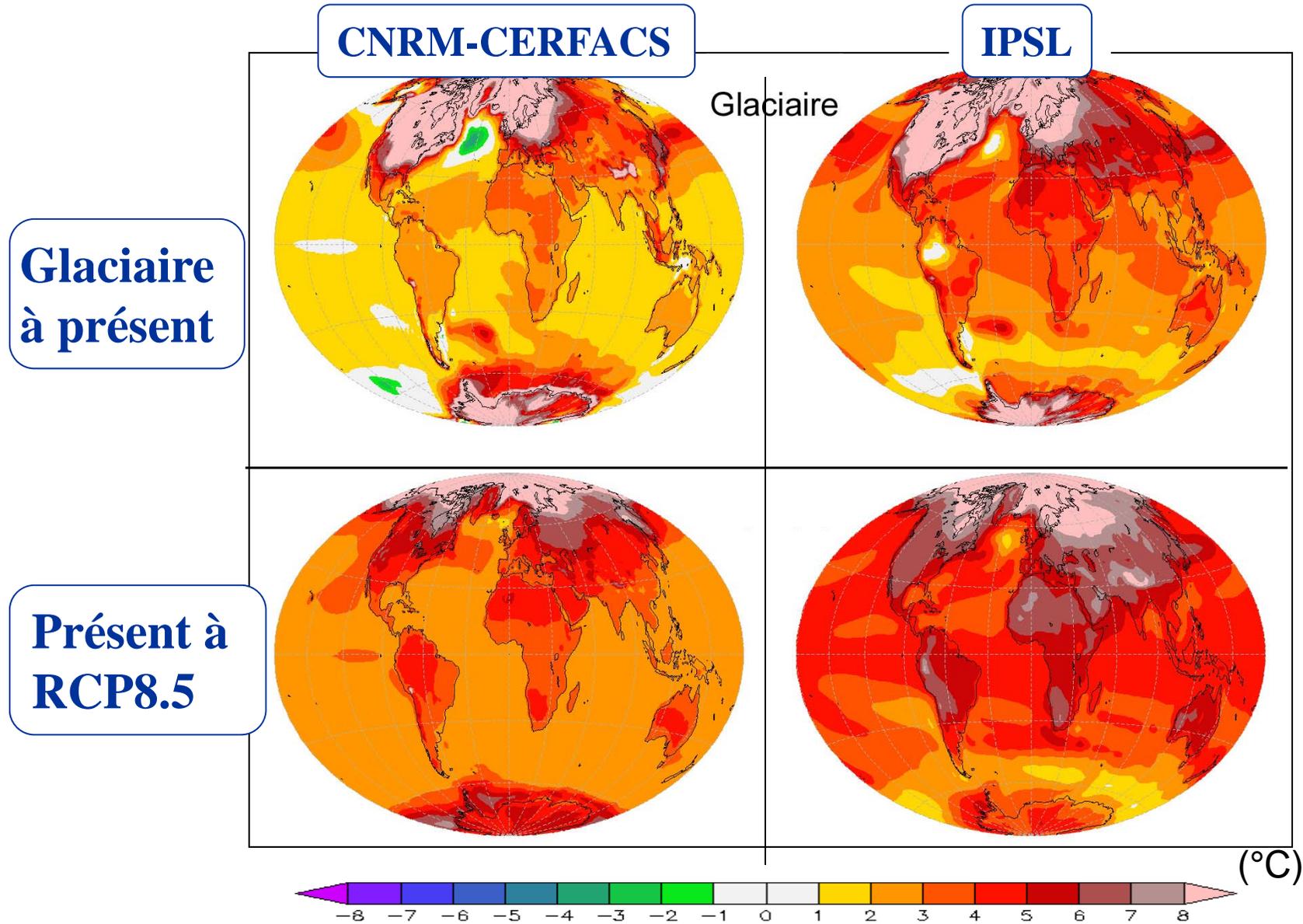
# Simulation du climat du Dernier Maximum Glaciaire



cf. <http://pmip3.lsce.ipsl.fr>

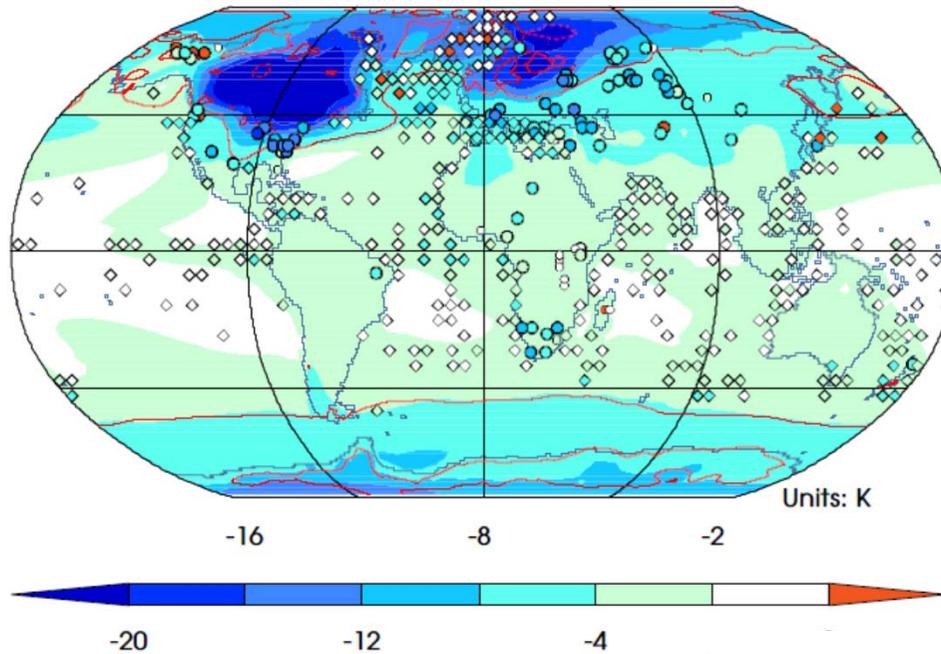
Kageyama et al 2006

# Mise en perspective : glaciaire / RCP8.5



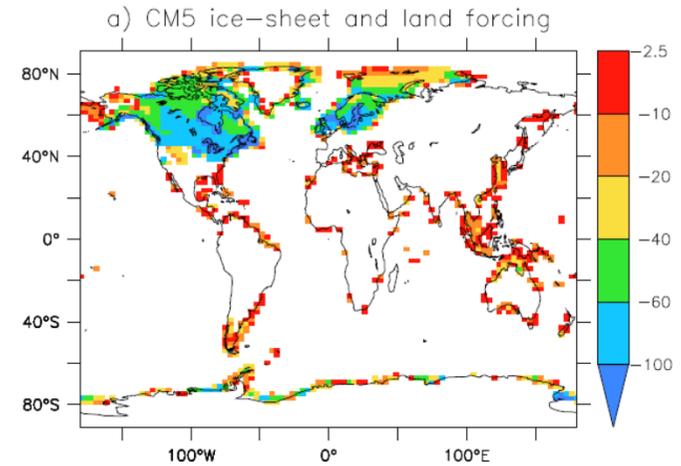
# Climat glaciaire : modèles-données

Surface air temperature / 21k - 0k Annual mean

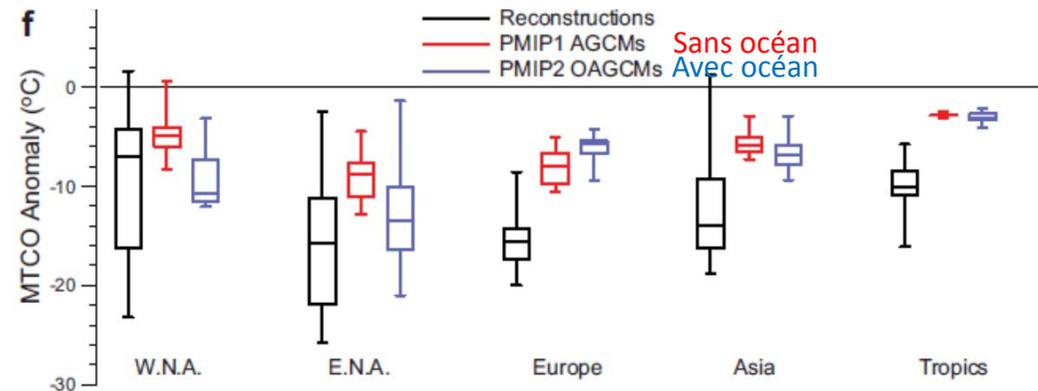


Bartlein et al. 2012

Impact radiatif des calottes et du niveau marin



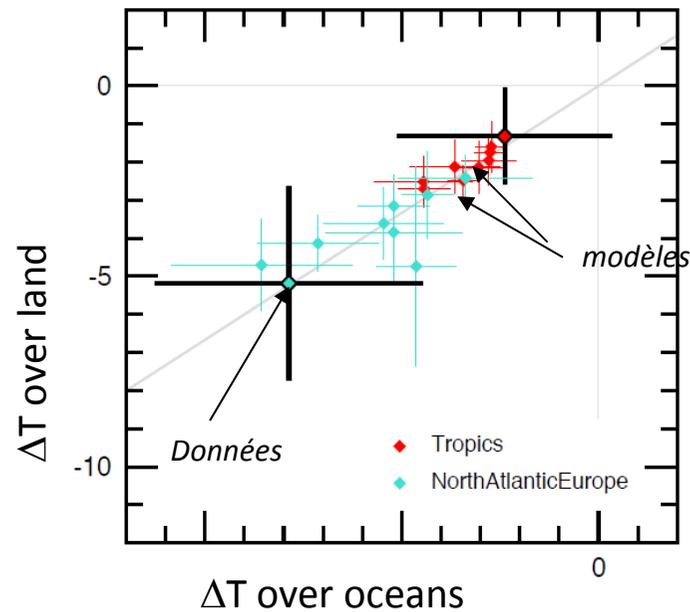
## Evaluation systématique des résultats des simulations



Braconnot et al. 2012

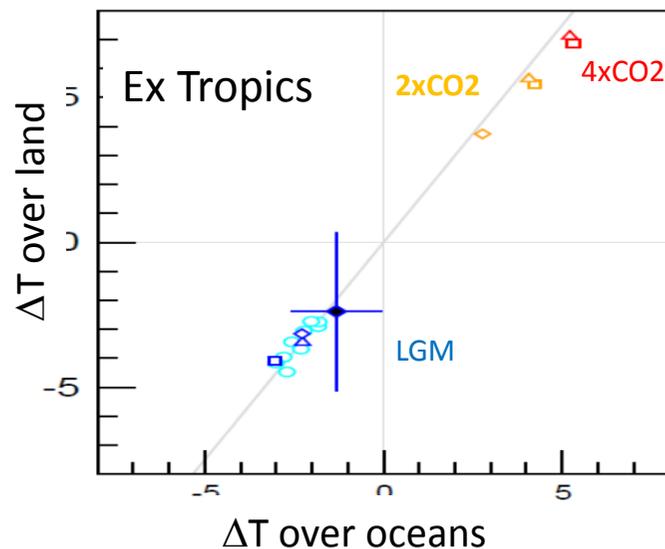
# Températures glaciaires

En glaciaire



- Modèles ont tendance à
  - Surestimer le refroidissement tropical
  - Sous estimer le refroidissement des moyennes latitudes
  - Sous estimer le gradient équateur/pôle

Comparaison aux projections futures



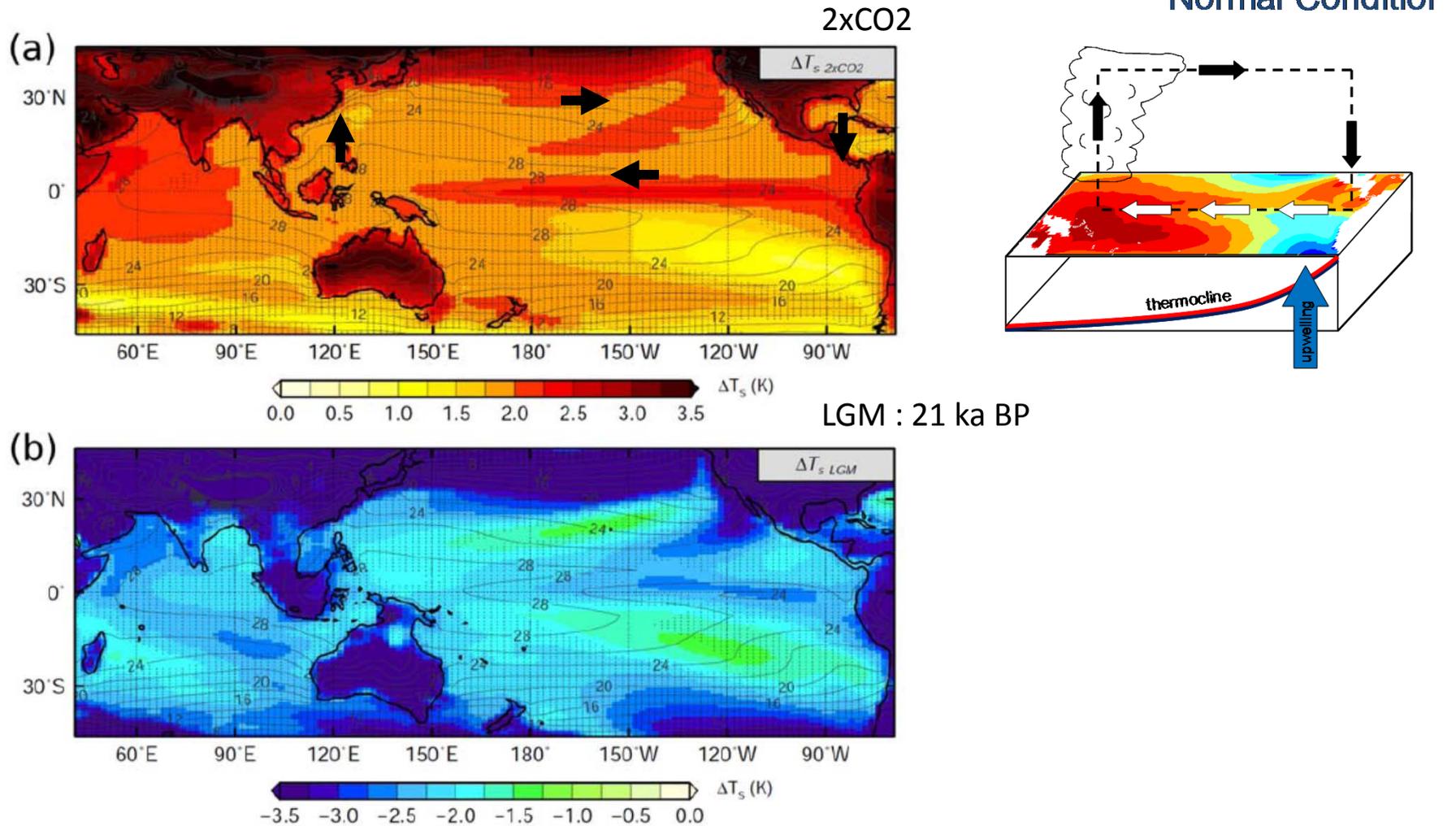
- Critères d'évaluation de la sensibilité climatique :
  - Gradient terre/océan
  - Régions liées à la sensibilité globale et au forçage CO<sub>2</sub>

*Braconnot et al. 2012*

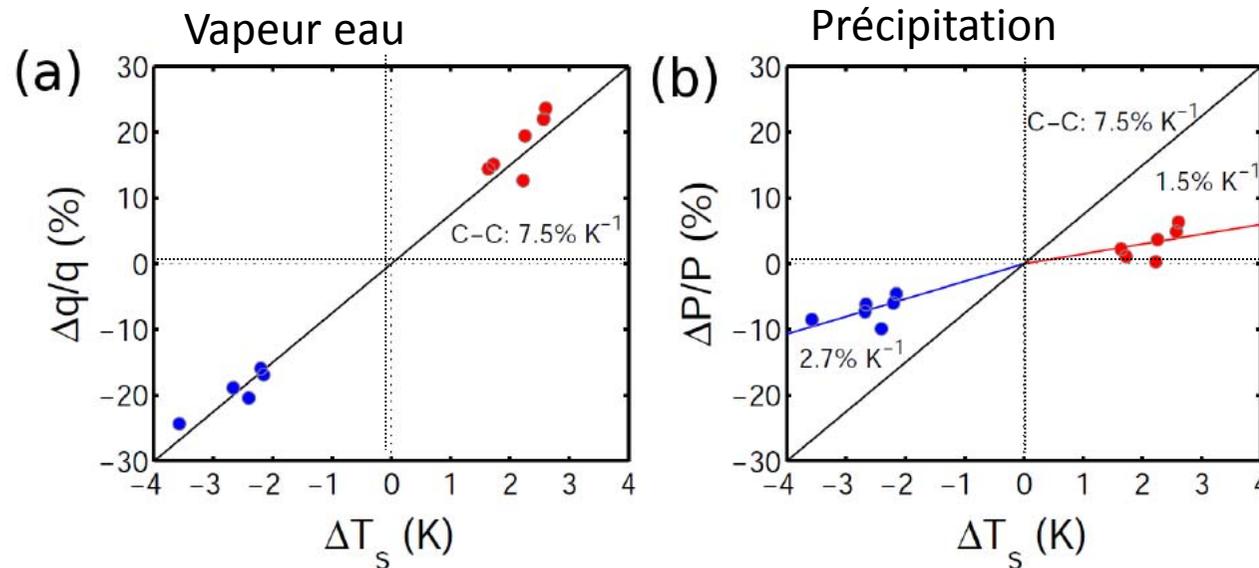
# Relations cycle hydrologique - température

Modification des cellules de Walker

Différences avec l'actuel: moyenne d'ensemble de 6 modèles

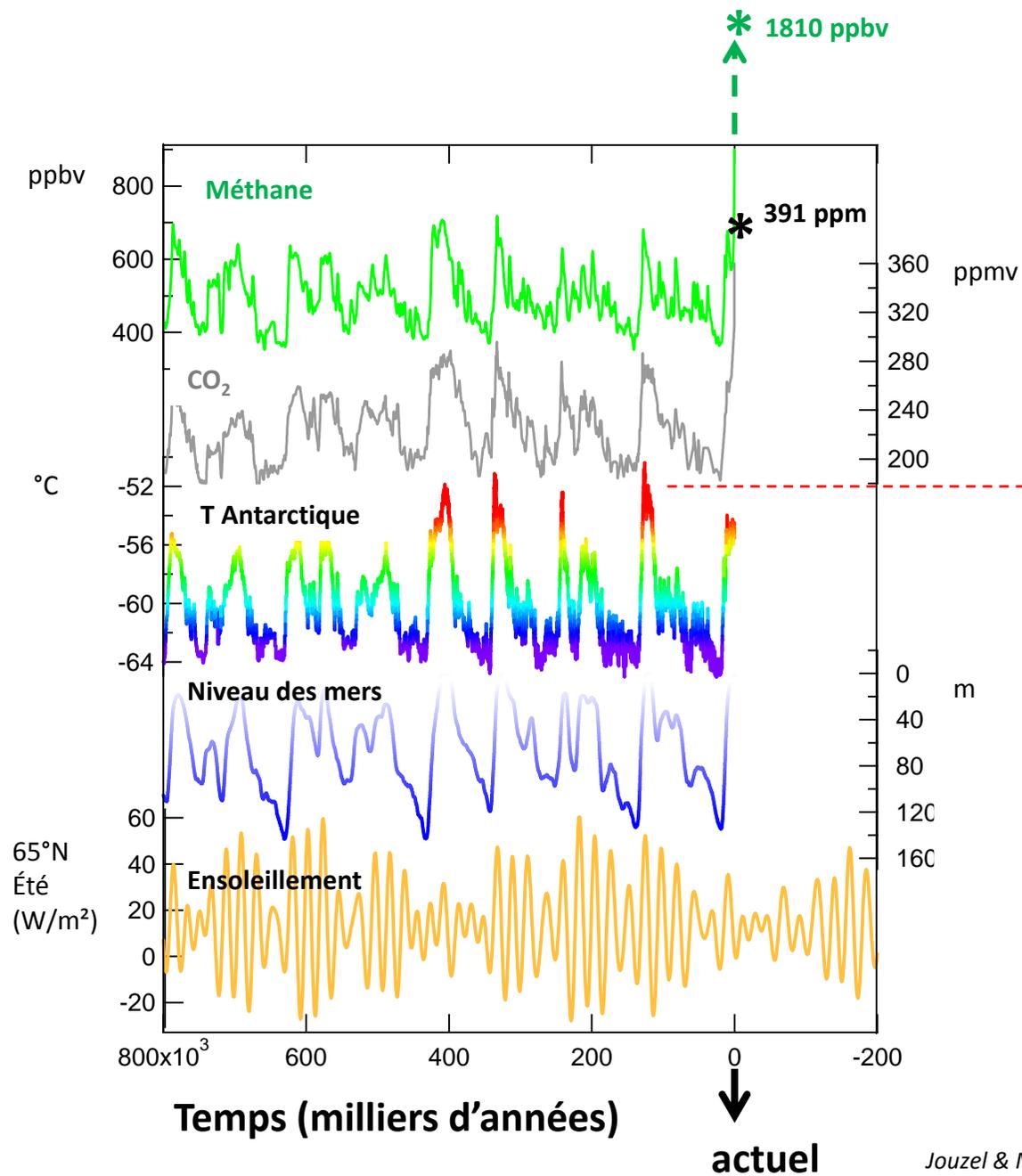


# Cycle hydrologique et dynamique atmosphérique

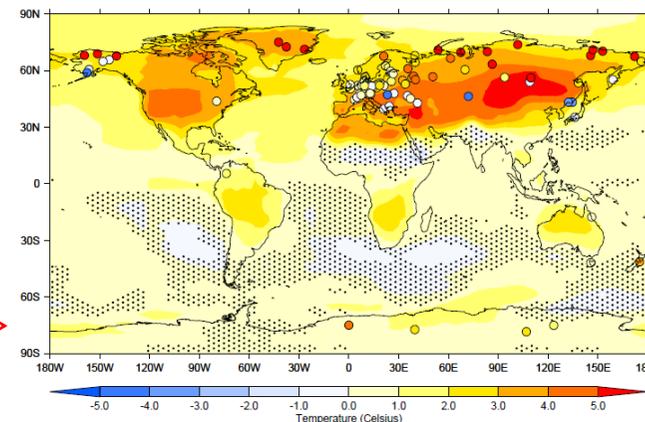


- Vapeur eau suit Clausius-Clapeyron
- Précipitation taux plus faible

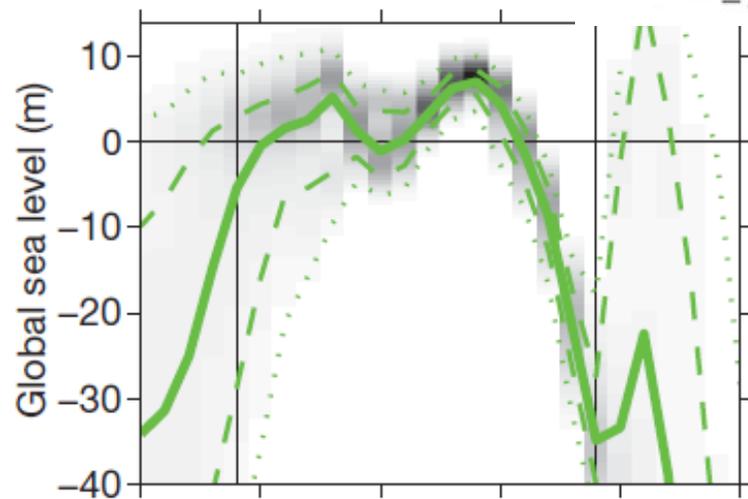
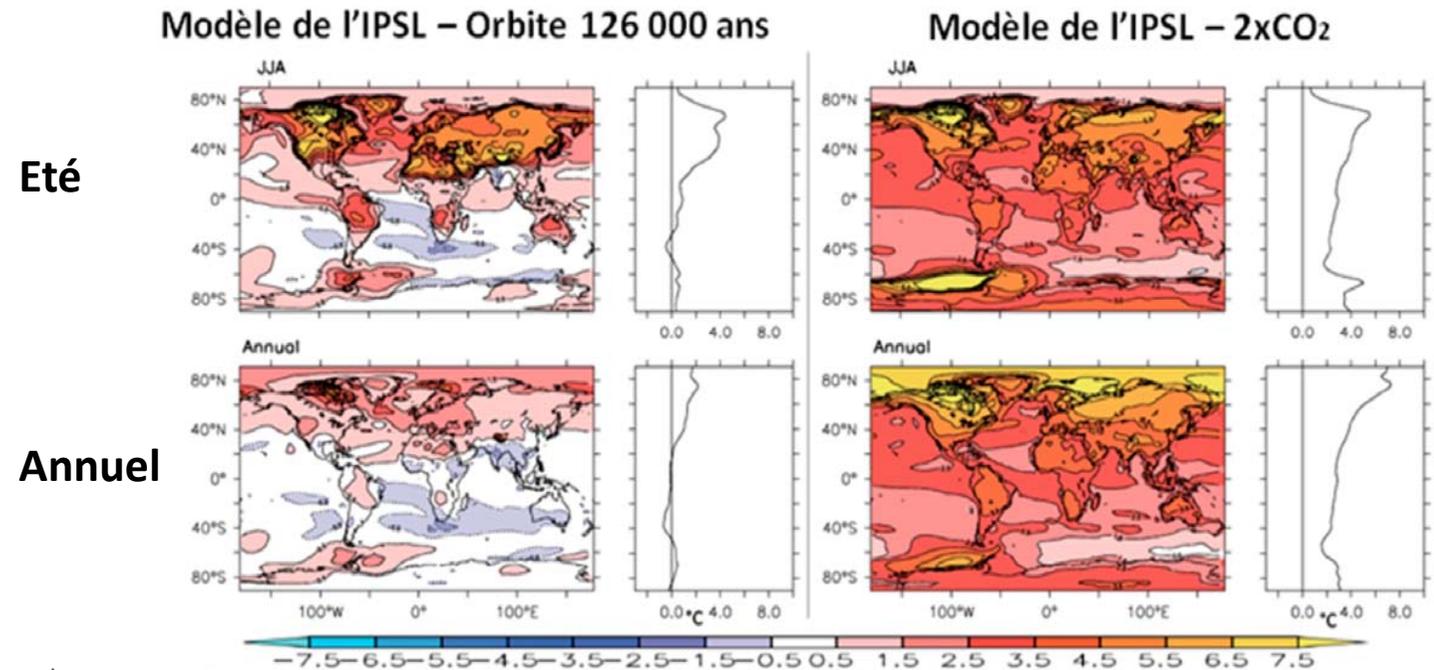
- Lien avec l'intensité de la convection :
  - Réduction en 2xCO<sub>2</sub>
  - Augmentation pour LGM
- Lien avec intensité gradient E/W dans le Pacifique :
  - Gradient diminué pour 2xCO<sub>2</sub>
  - Gradient augmenté pour LGM, mais large dispersion entre modèles



**+1 °C**  
**ΔT interglaciaire (125 000 ans)**

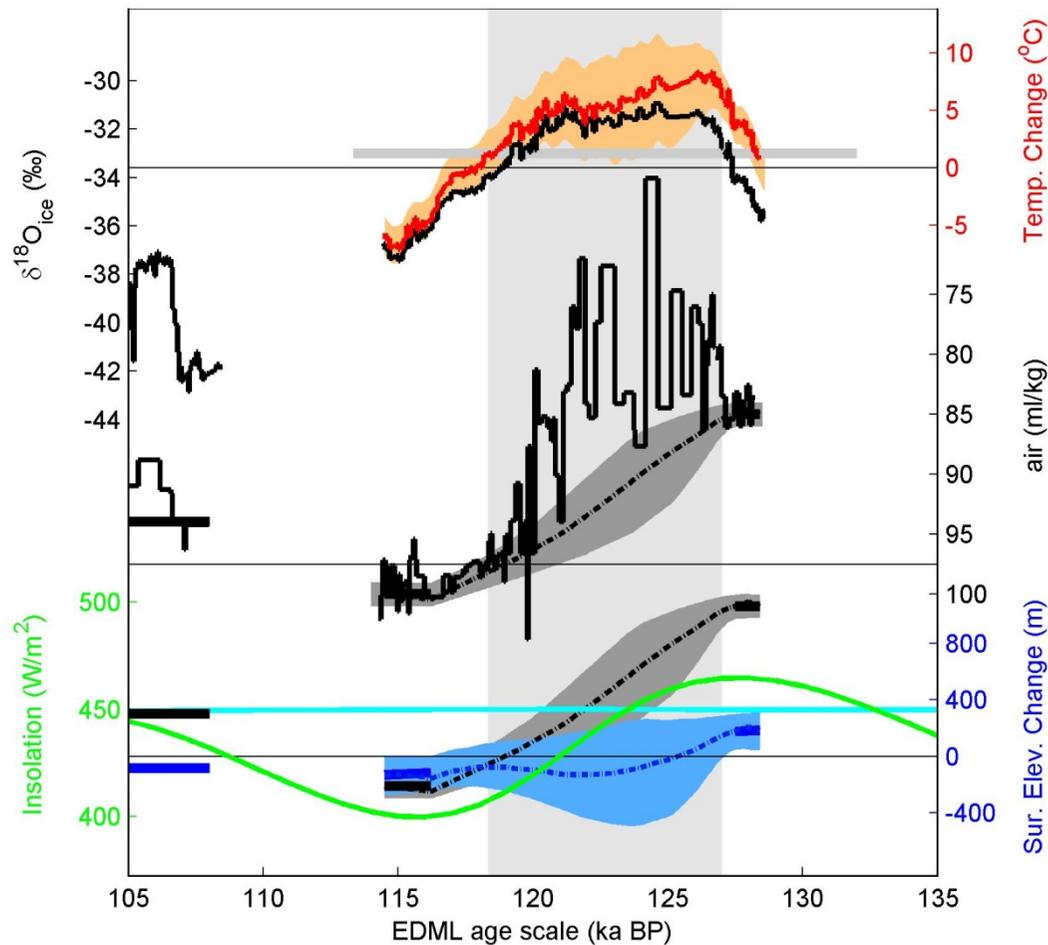
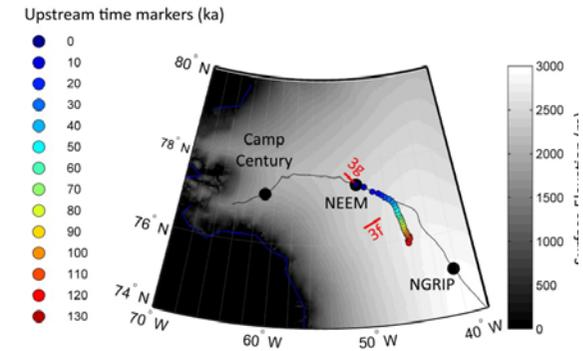


# Dernière période interglaciaire



Kopp 2009; Masson-Delmotte et al 2011

# Résultats du forage NEEM



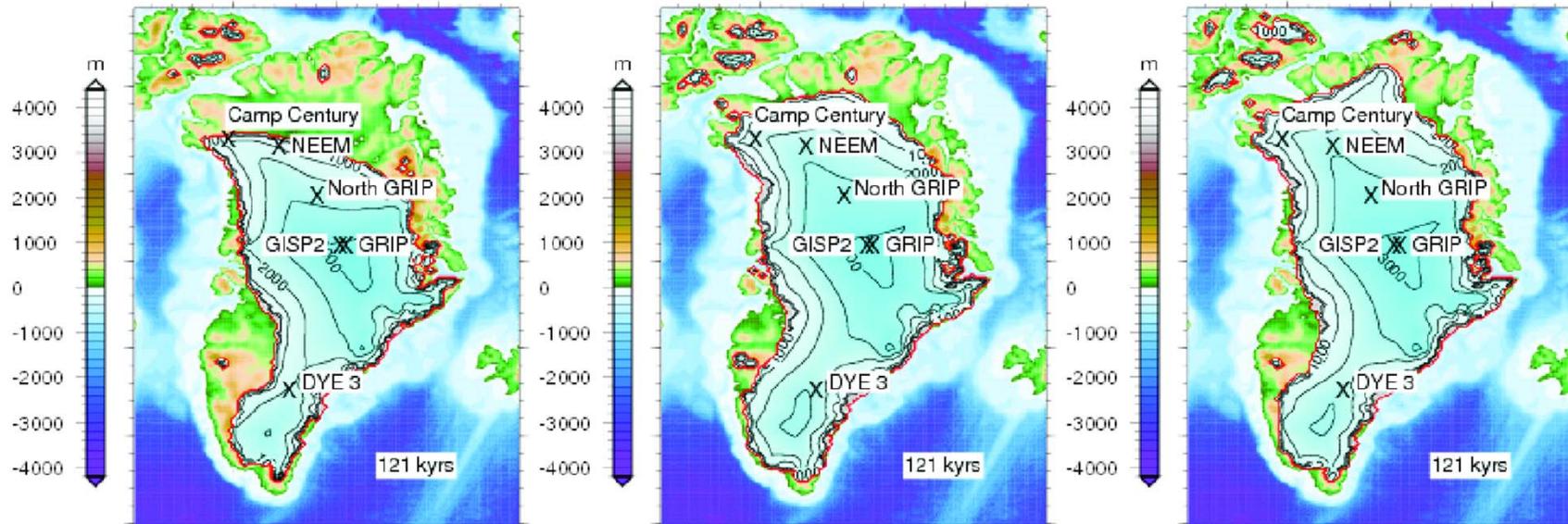
Température "à altitude fixe"  
 +8 °C at 126 ka  
 0 °C at 118 ka

Par rapport à l'actuel

Altitude par rapport à l'actuel:  
 + 230 m à 128 ka  
 - 100 m à 122 ka

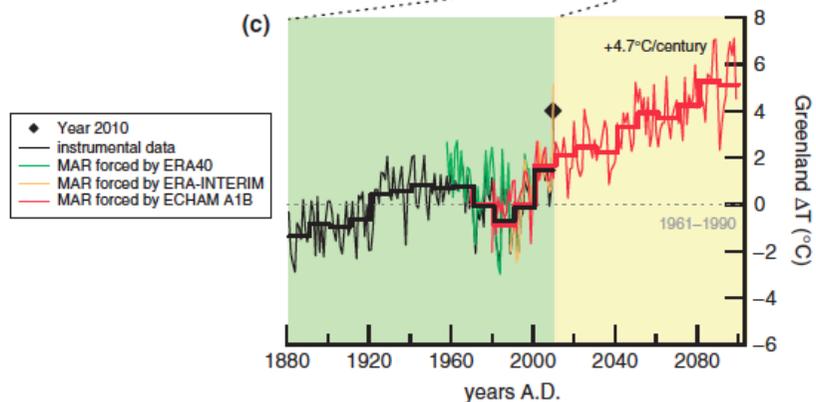
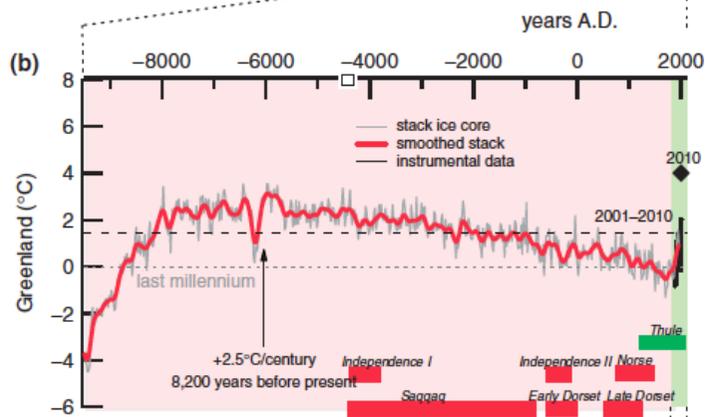
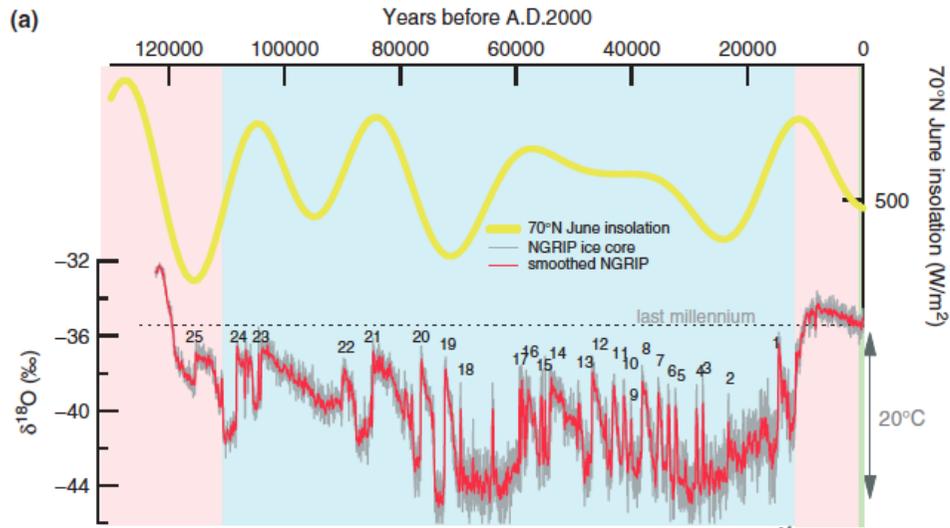
Baisse de 6 cm/an

# Simulations de l'évolution du Groenland



# Dernière période interglaciaire

- Forçage orbital large en été aux hautes latitudes nord (+70W/m<sup>2</sup>)
- Rétroactions rapides estivales (vapeur d'eau, nuages, banquise...) comparables en intensité à 2xCO<sub>2</sub>
- Réchauffement Groenland simulé trop faible par rapport aux données paléoclimatiques
- Fonte partielle Groenland (2m) et donc déstabilisation d'une partie de l'Antarctique (total : 6 à 10 m)
- Grandes incertitudes sur les mécanismes contrôlant l'évolution du climat et de la calotte en Antarctique



**Projections pour  
le Groenland  
mises en perspective**

# Conclusions

- Modéliser le climat pour comprendre le fonctionnement de ce système complexe et évaluer les risques futurs
- Climats passés : expériences « naturelles » sur la machine climatique
- Intérêt des climats passés pour tester les mécanismes simulés par les modèles de climat
- Emergence de méthodes pour tirer parti des données paléoclimatiques afin de discriminer entre modèles de climat représentant différemment certains mécanismes