

# Modéliser l'océan

pour comprendre et anticiper les  
variations du climat



Eric Guilyardi

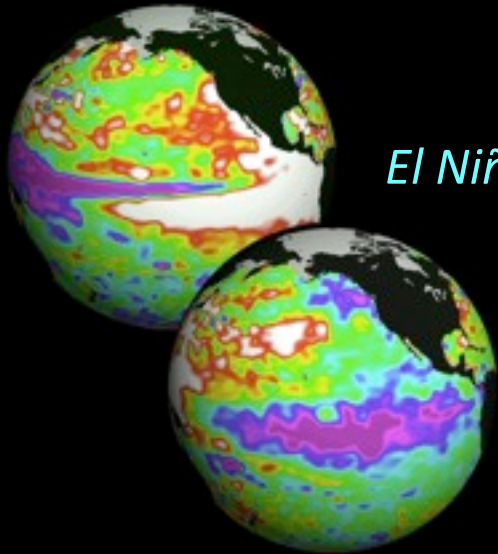
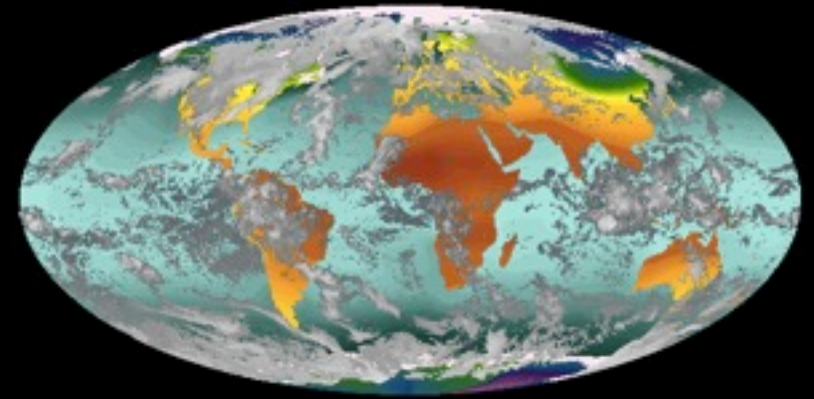


*Collège de France, 27 mai 2011*

# Océan et climat

Gardien des équilibres...

...acteur des variations lentes du climat

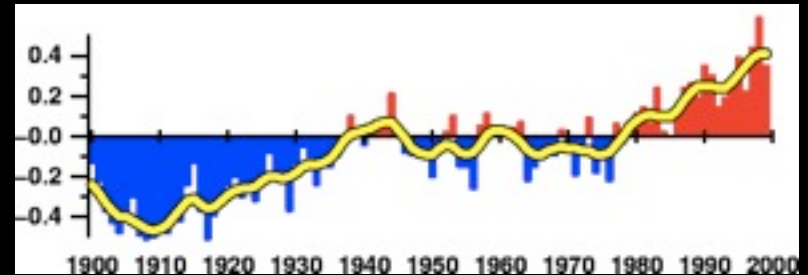


*El Niño*

*Cycle du carbone*



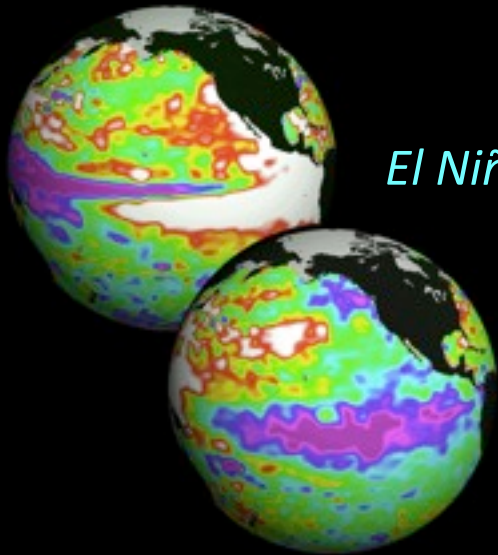
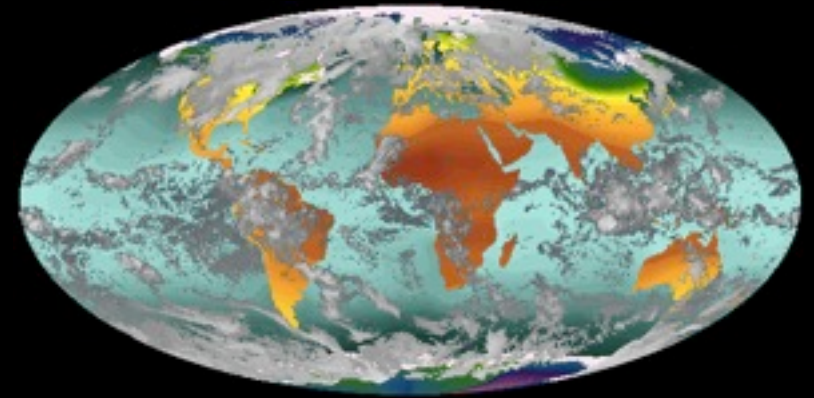
*Réchauffement planétaire*



# Océan et climat

Gardien des équilibres...

...acteur des variations lentes du climat

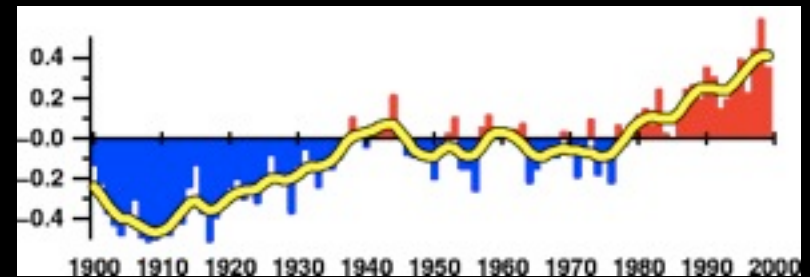


*El Niño*

*Cycle du carbone*



*Réchauffement planétaire*



→ **Source de prévisibilité**

Saison  
Pluri-annuel  
Décennal  
Séculaire

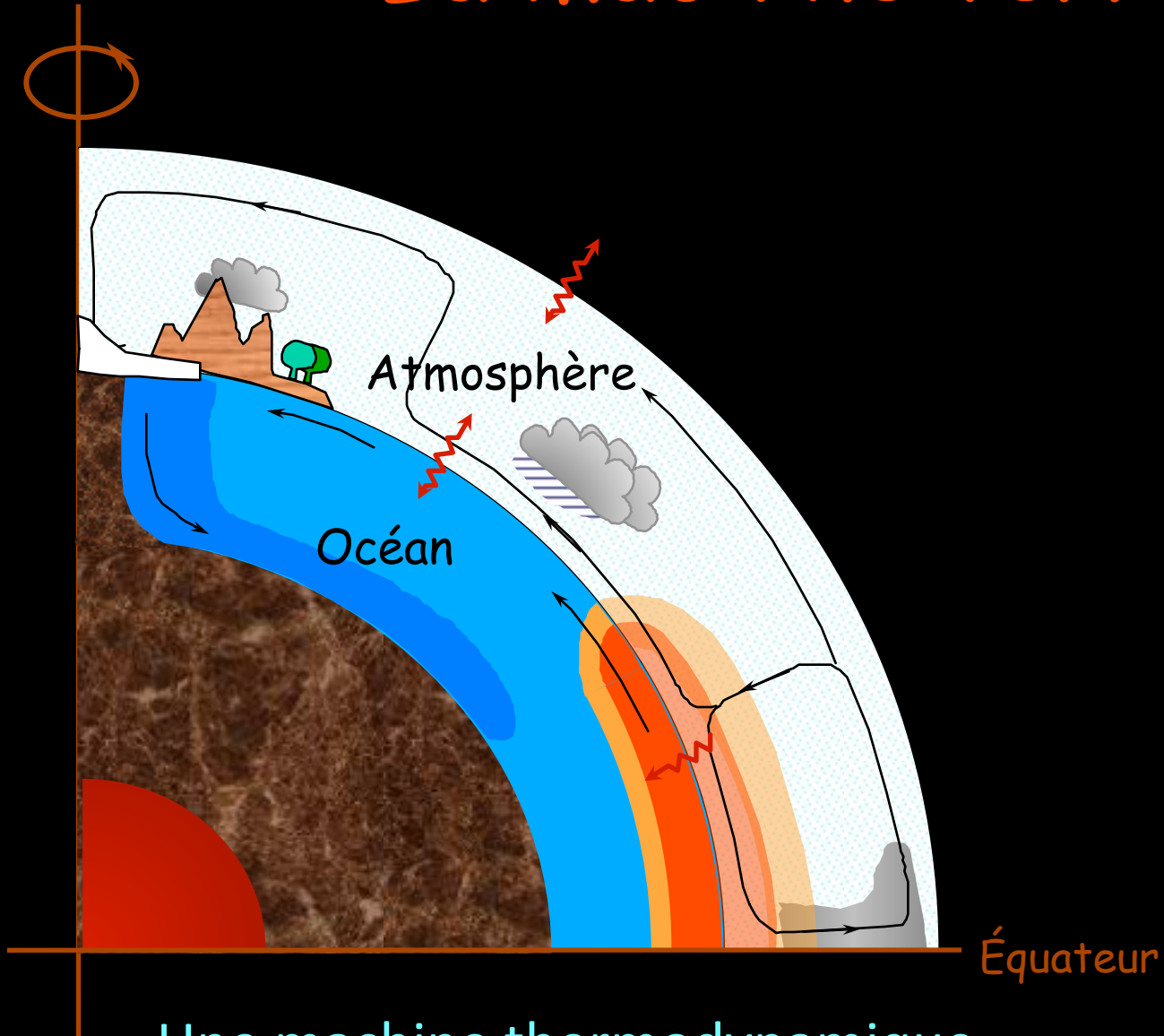
# Plan de l'exposé

- Le rôle de l'océan dans le climat
- Modéliser l'océan pour le climat
- Les projections climatiques
  
- Enjeux

# 1 - La machine climatique et le rôle de l'océan

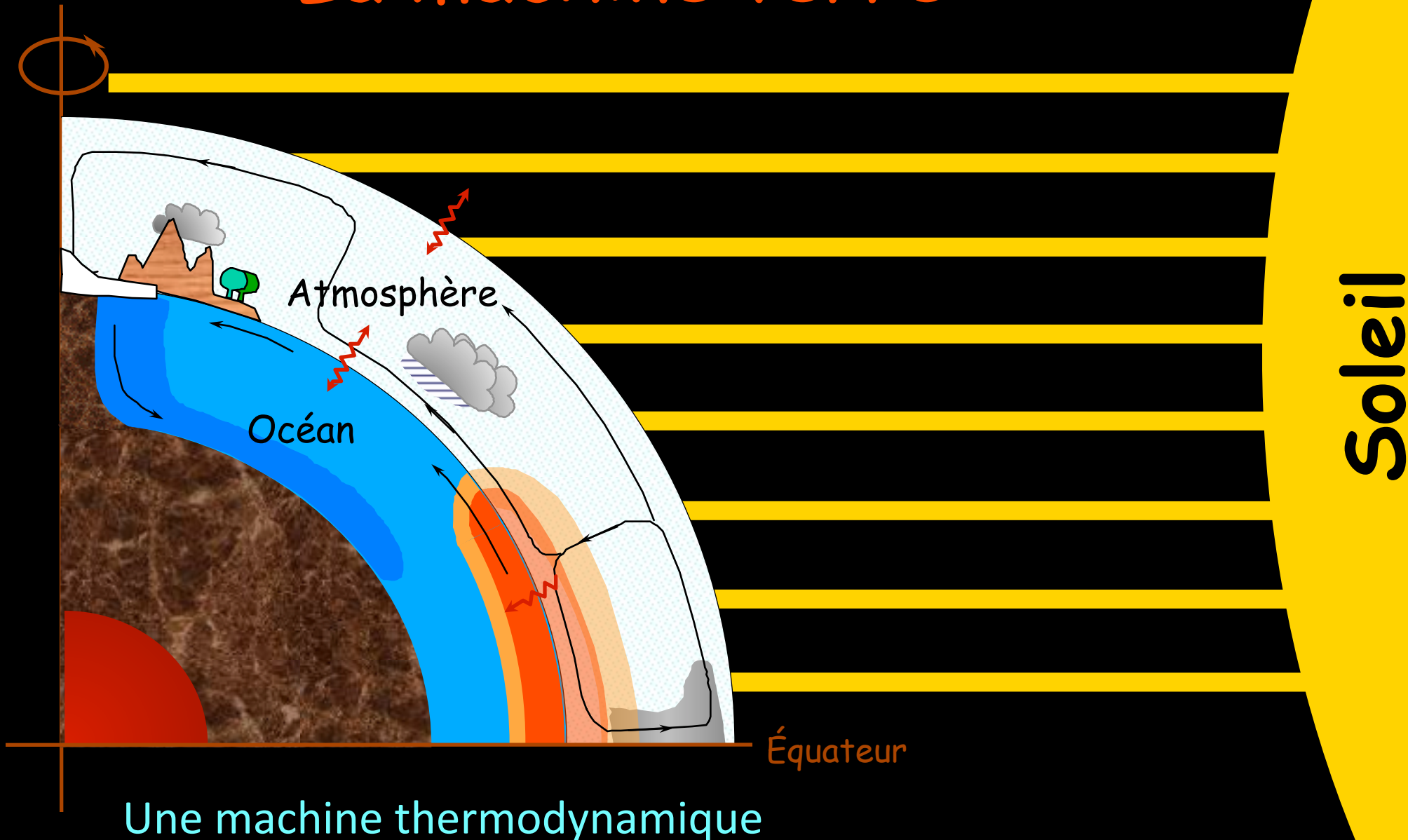


# La machine terre

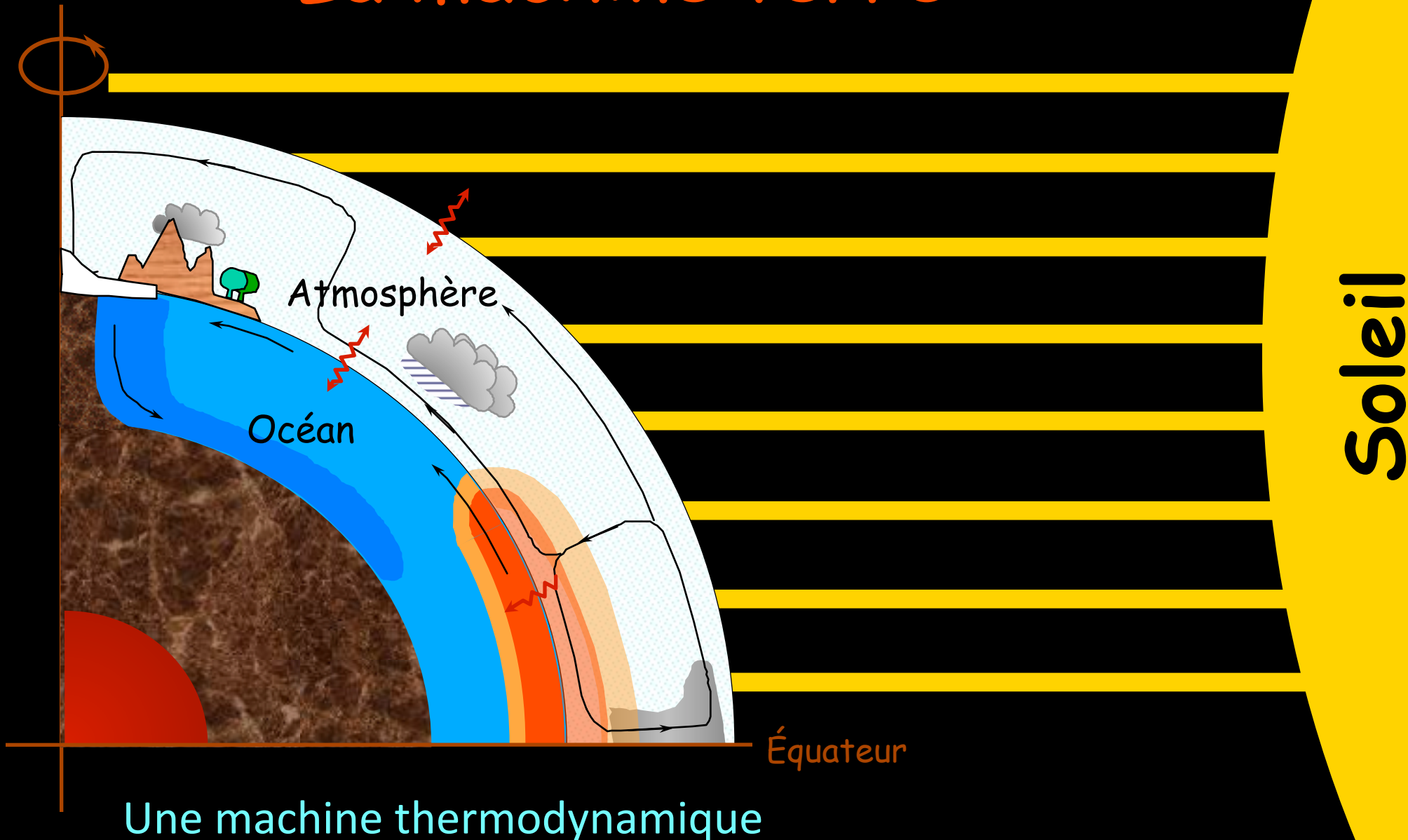


Une machine thermodynamique

# La machine terre

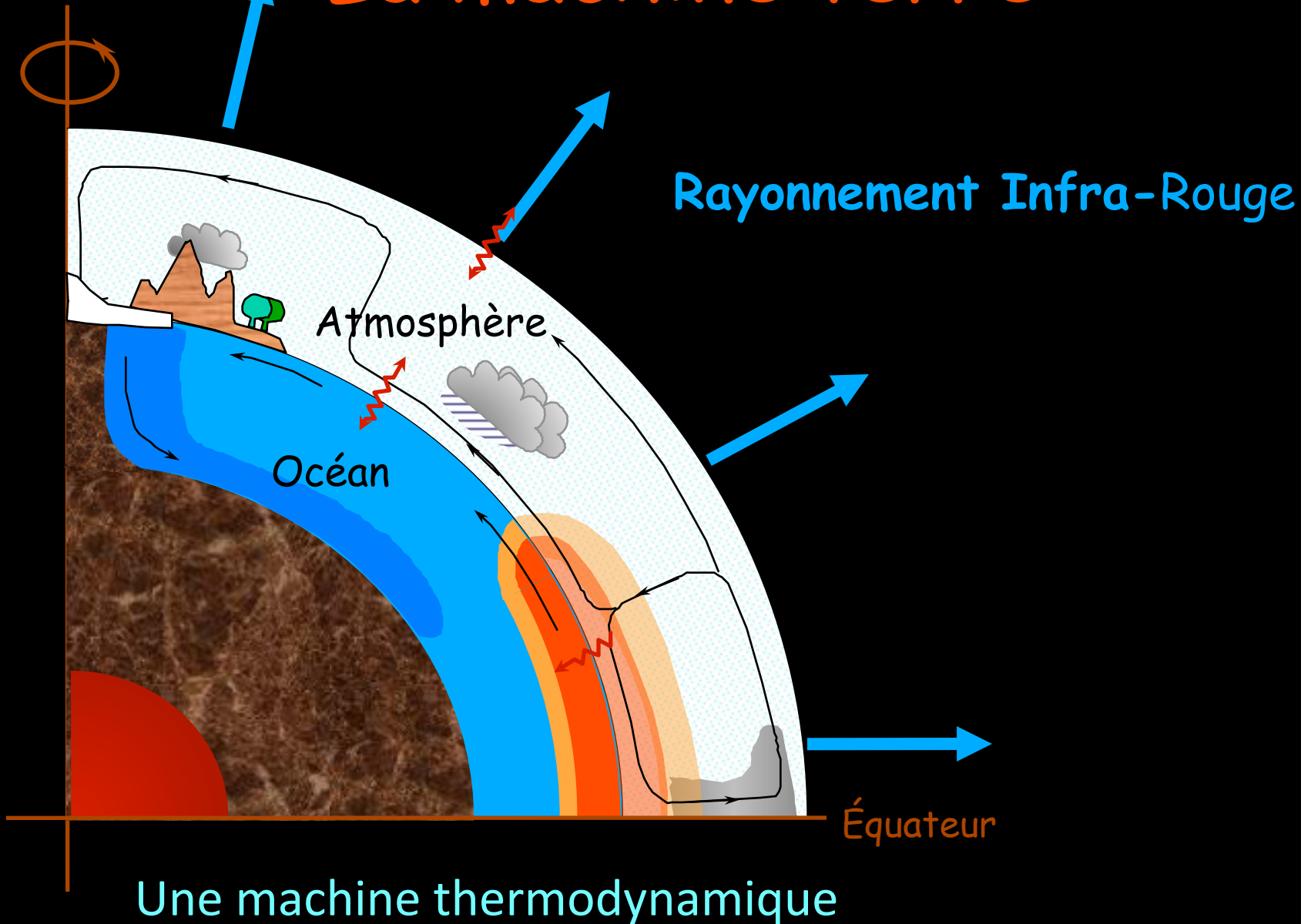


# La machine terre

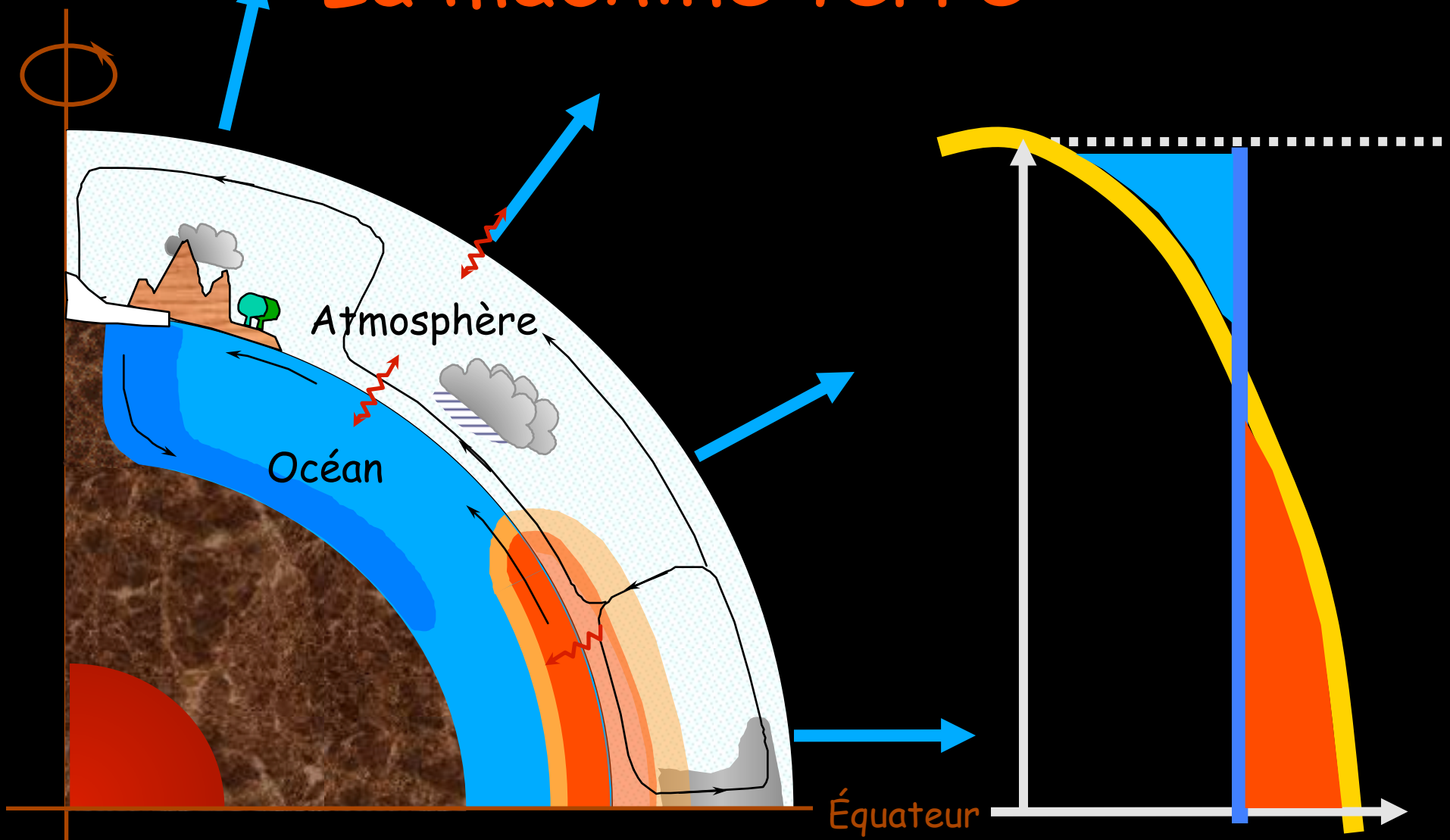




# La machine terre



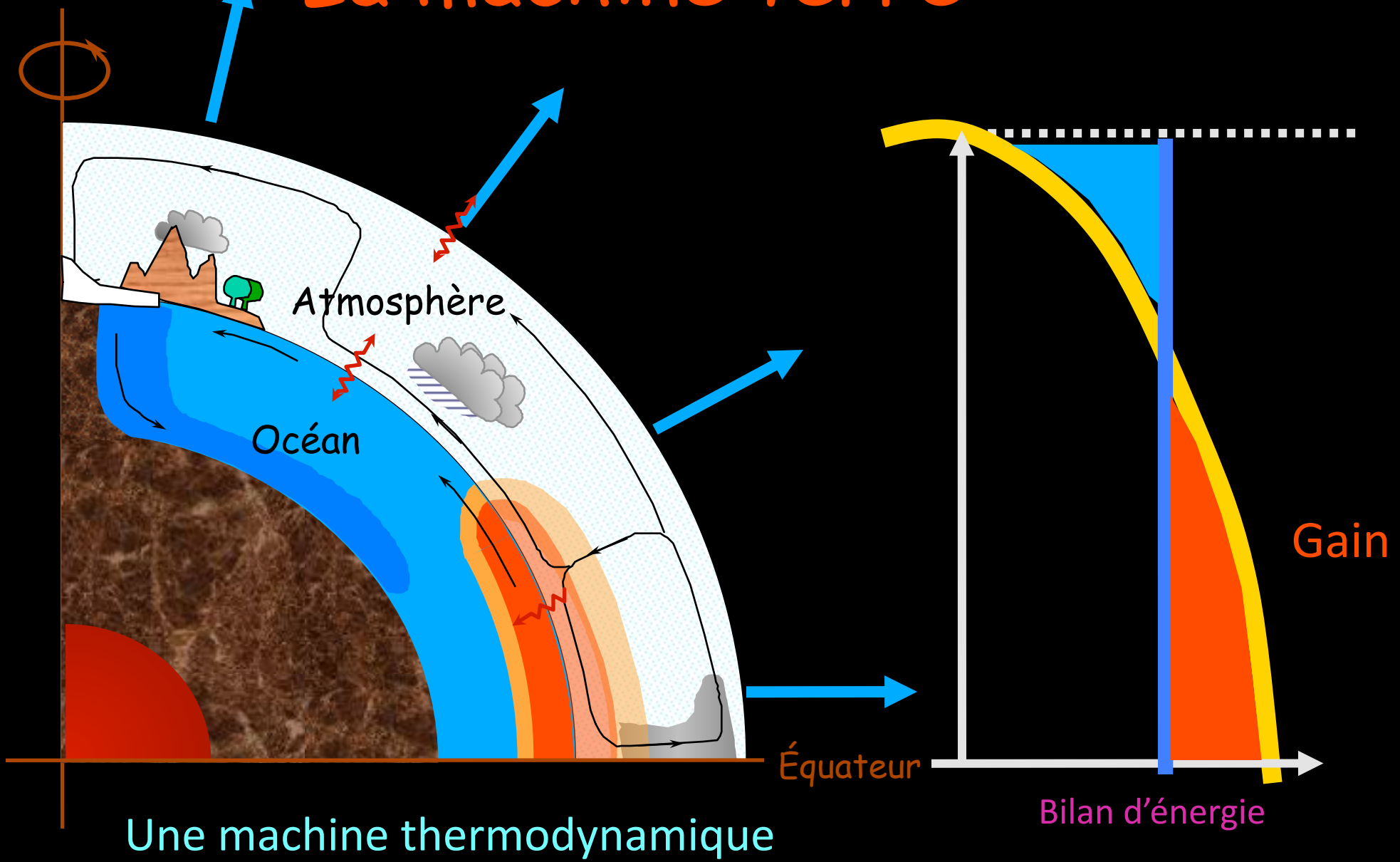
# La machine terre



Une machine thermodynamique

Bilan d'énergie

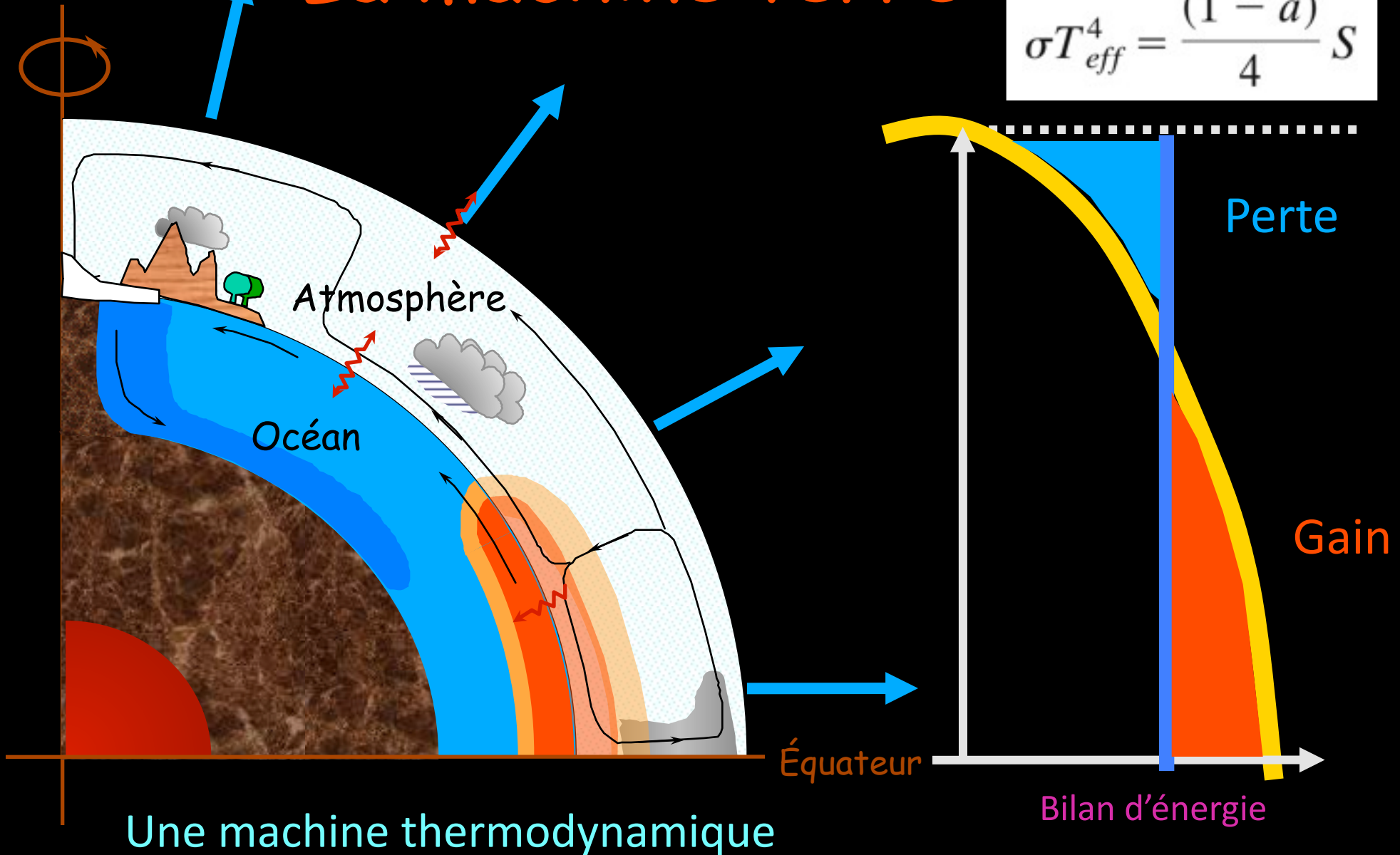
# La machine terre



Une machine thermodynamique

Bilan d'énergie

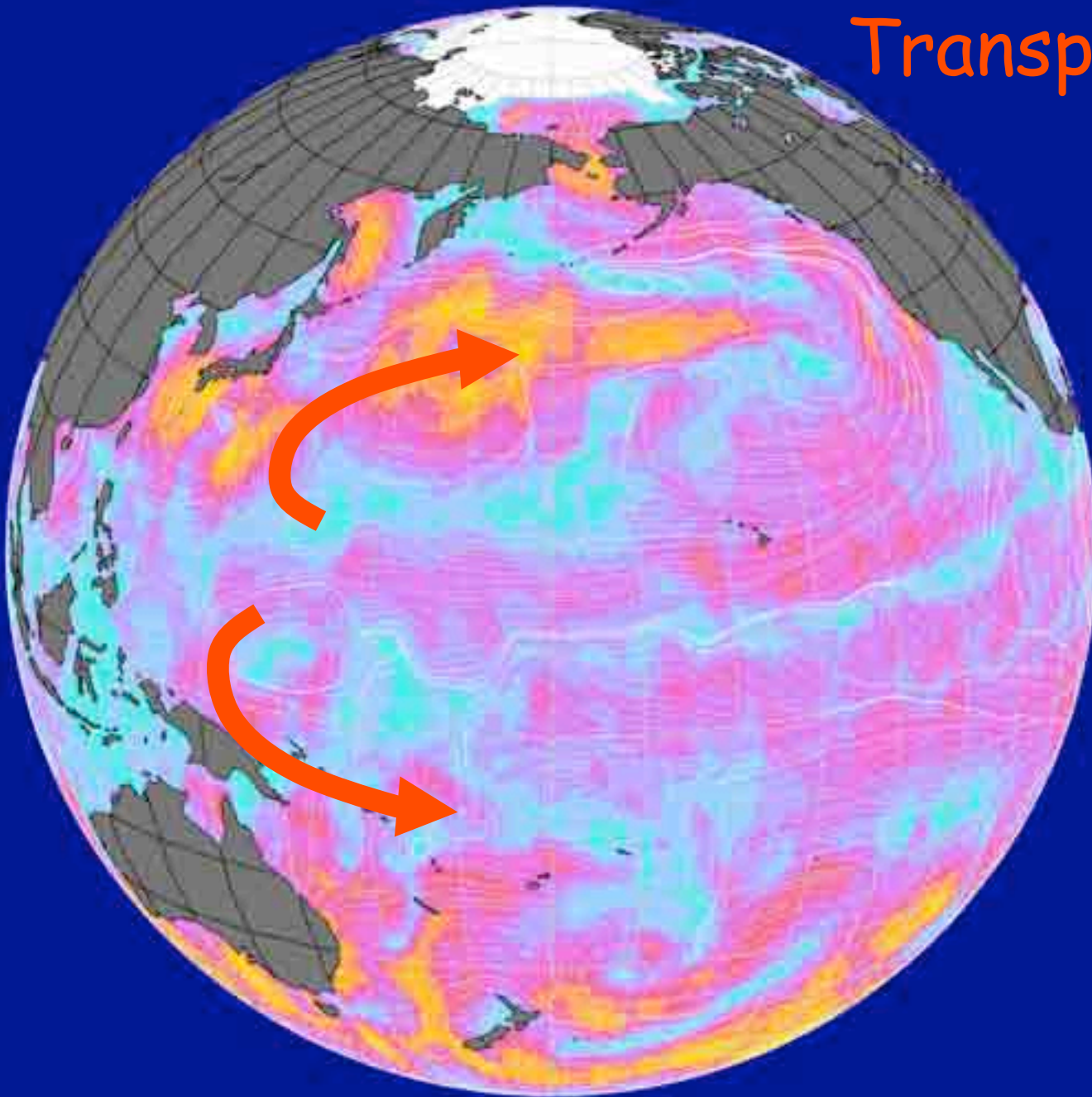
# La machine terre



# Transport de Chaleur

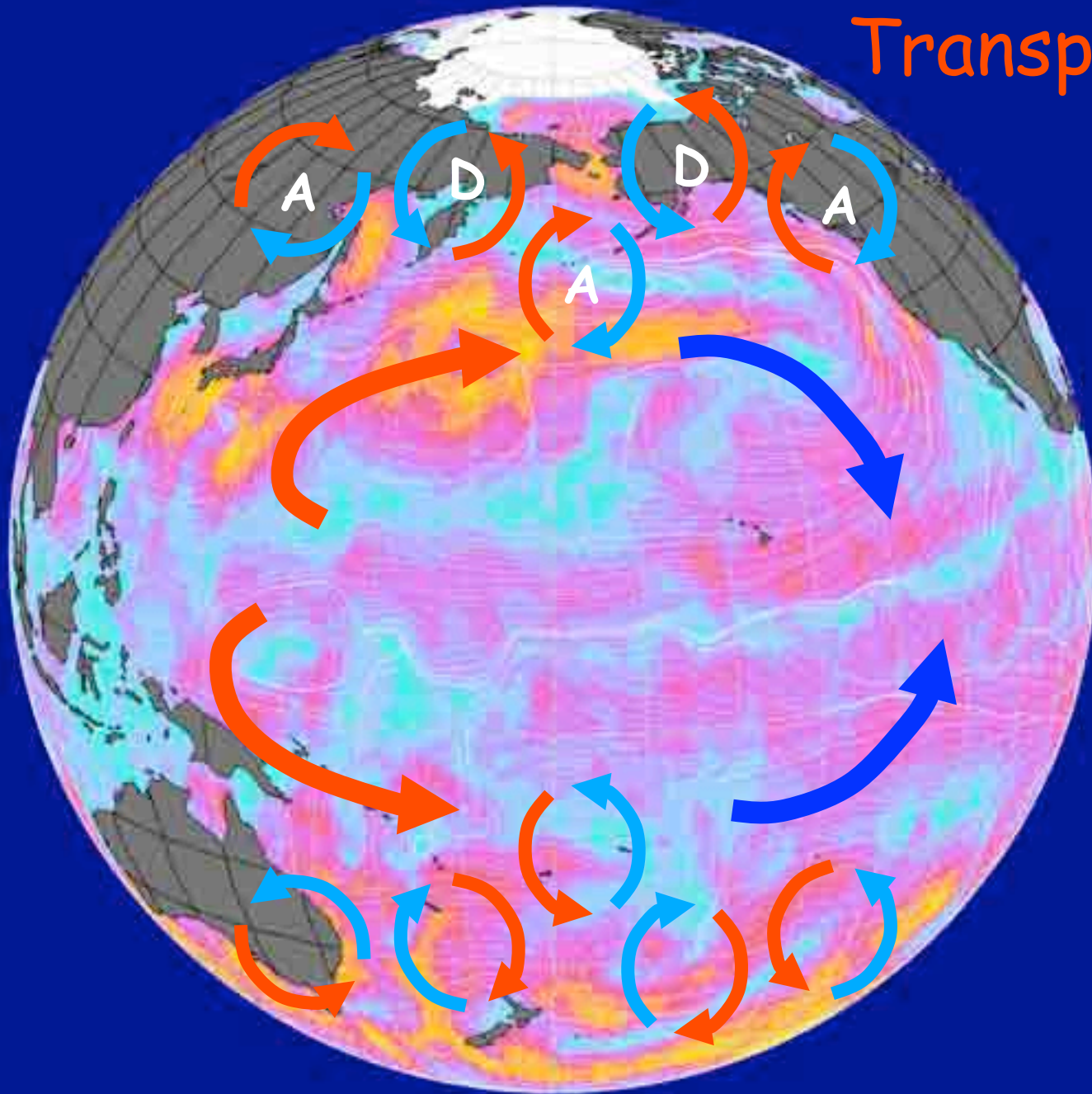
Atmosphère

Océan





# Transport de Chaleur



Atmosphère

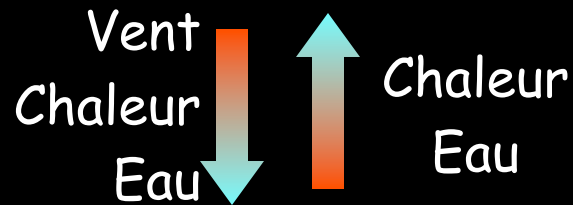
Océan



# L'océan, mémoire du climat

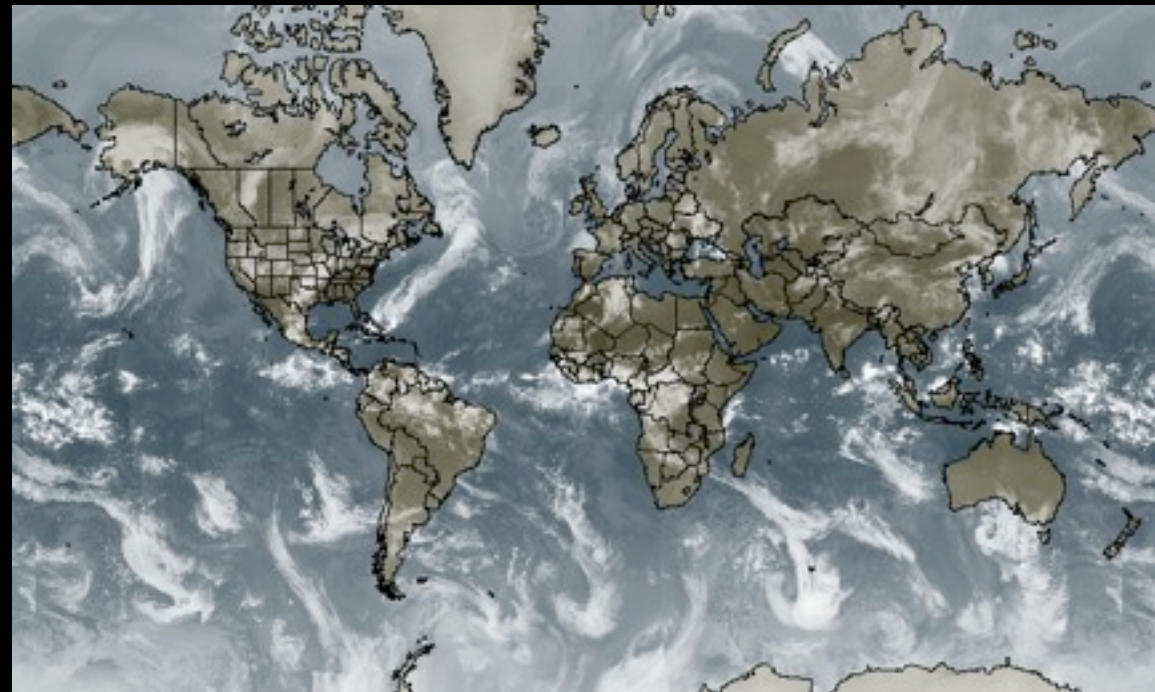
## Atmosphère

- Rapide (jour - 3 semaines)
- Peu de mémoire
- Chauffée par le bas

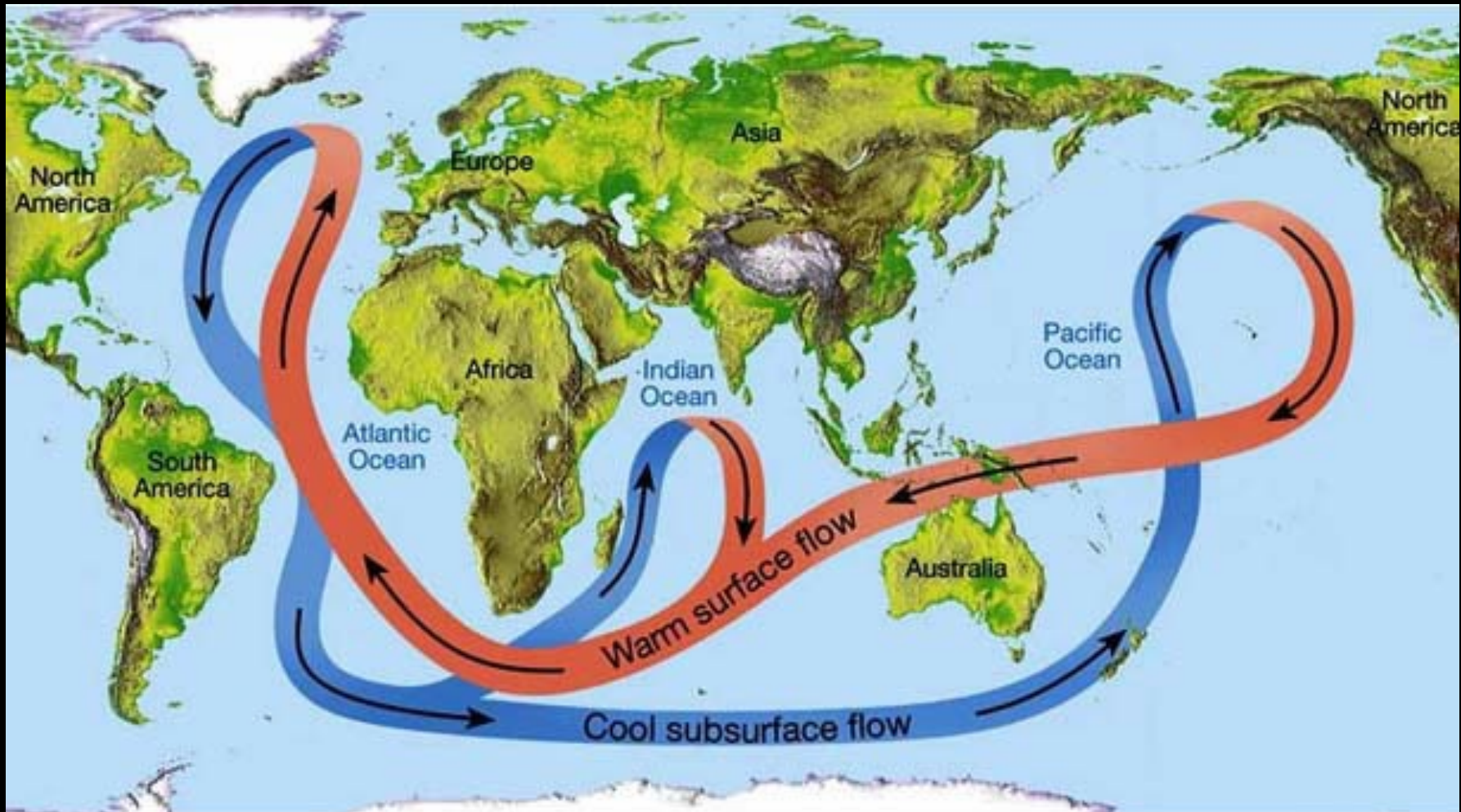


## Océan

- Lent (saison - 1000 ans)
- Inertie thermique
- Chauffé par le haut
- Opaque



# La circulation thermohaline

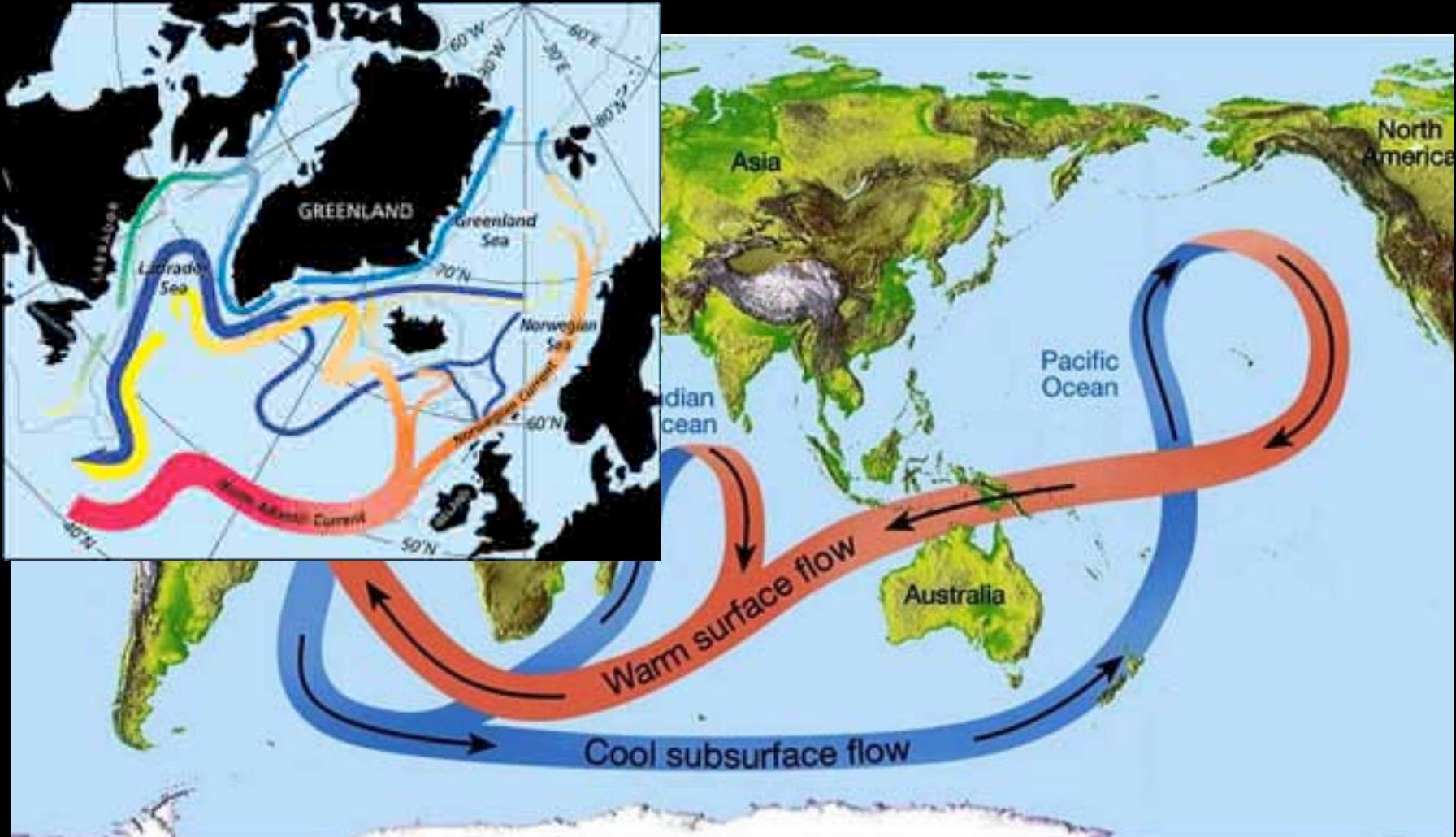


Un «tapis roulant» global...

...qui avance à 1 cm/sec !



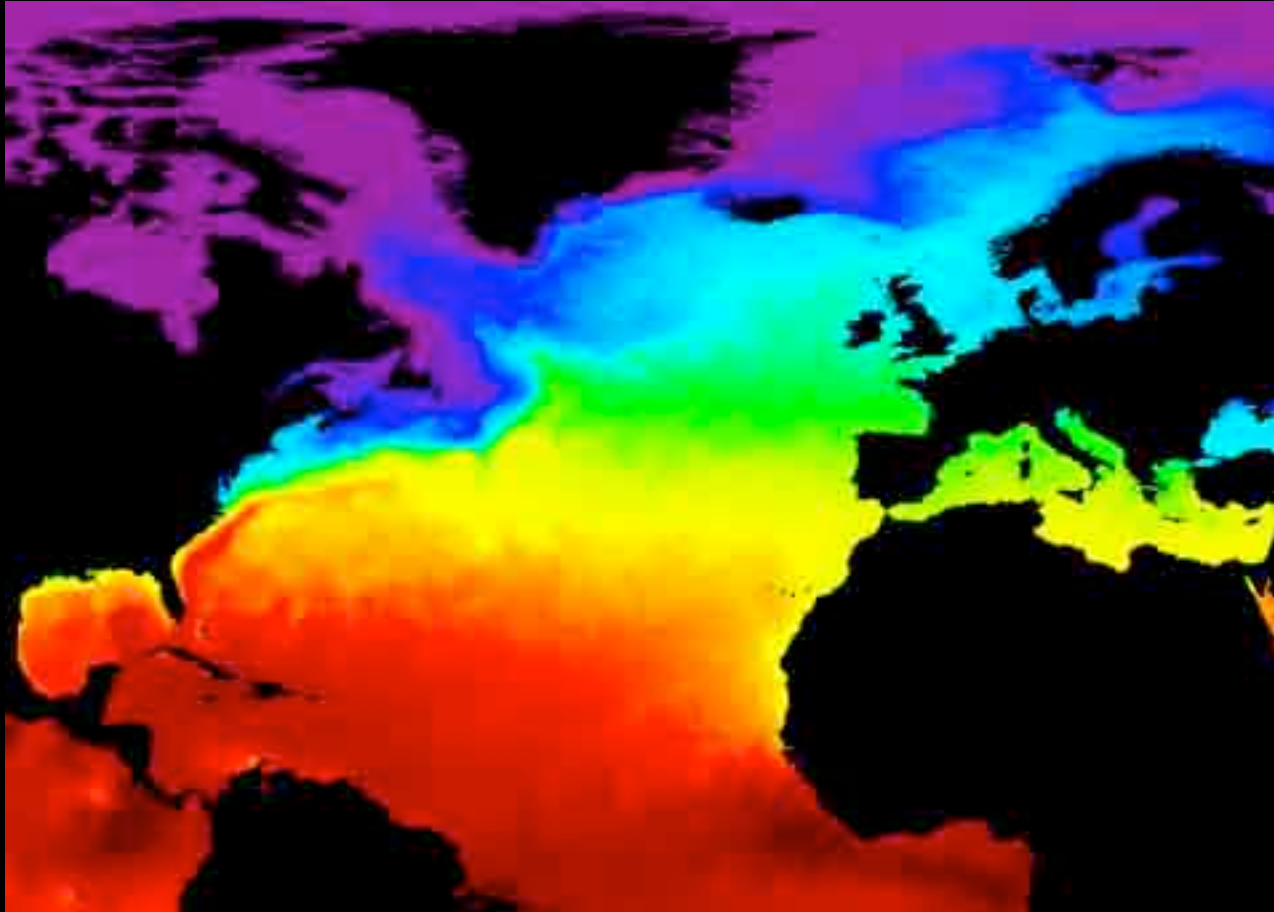
# La circulation thermohaline



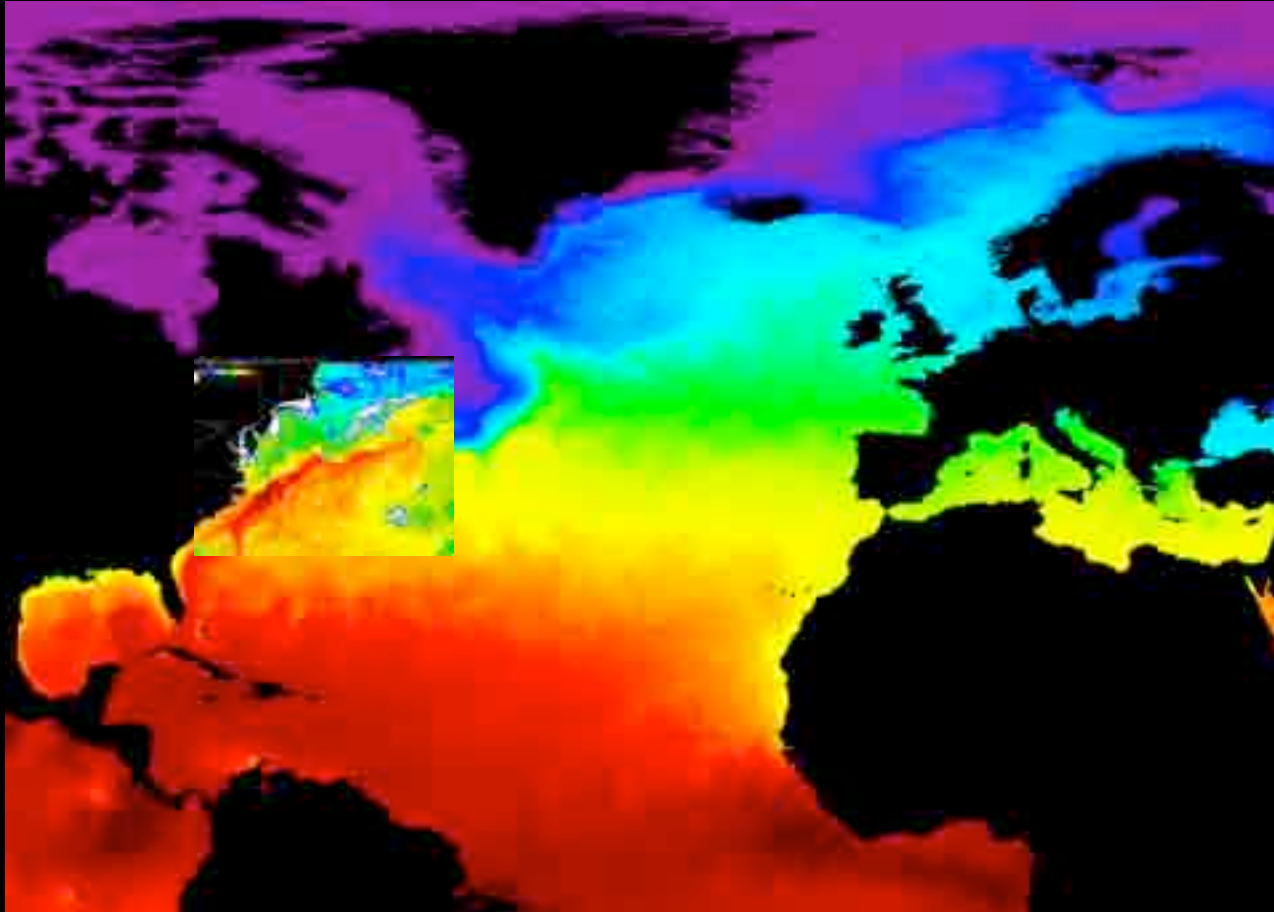
Un «tapis roulant» global...

...qui avance à 1 cm/sec !

# Gulf Stream et climat en Europe

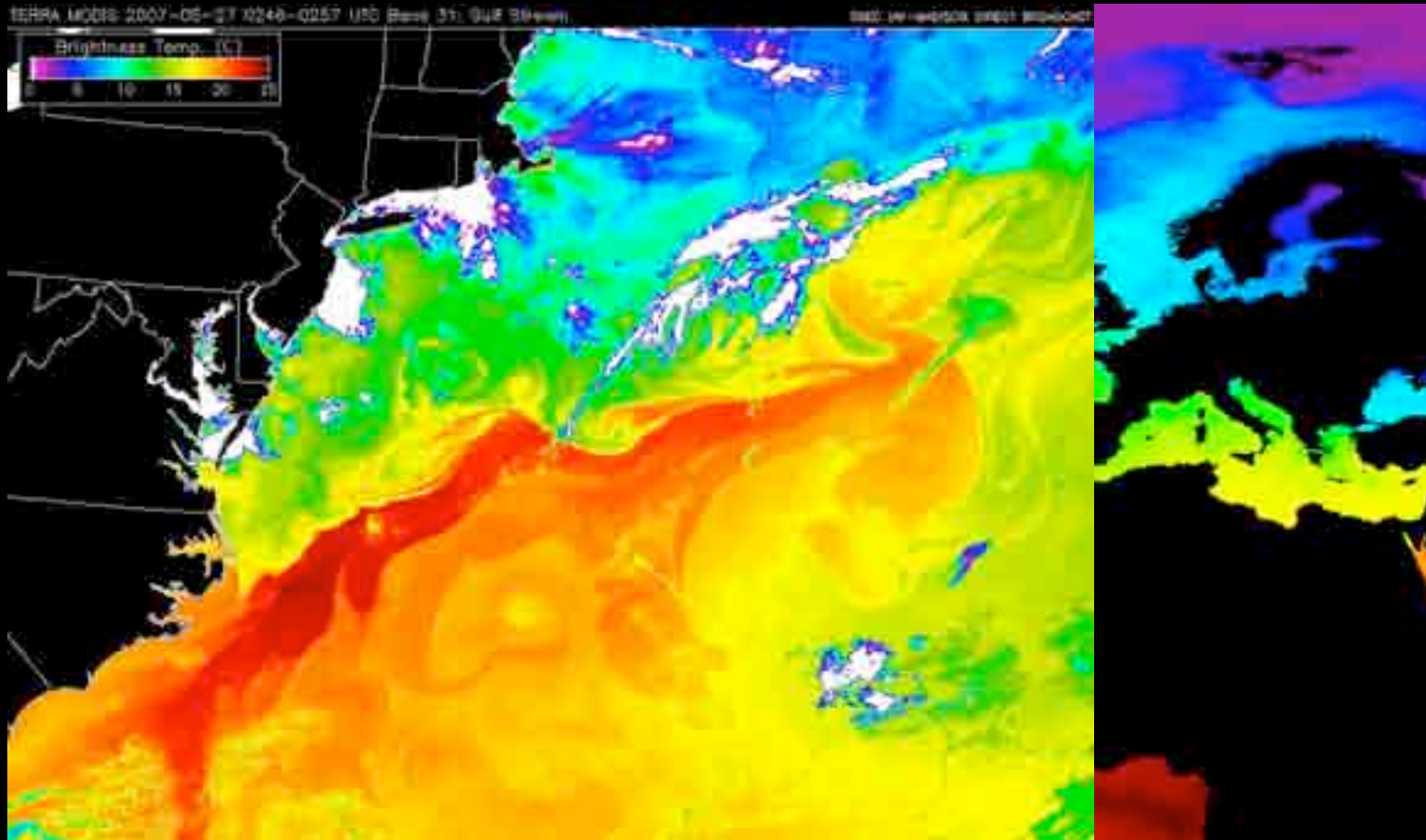


# Gulf Stream et climat en Europe





# Gulf Stream et climat en Europe



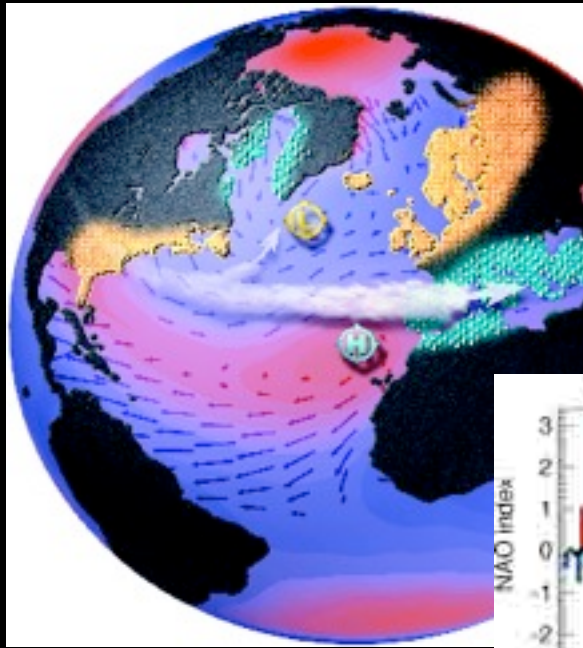
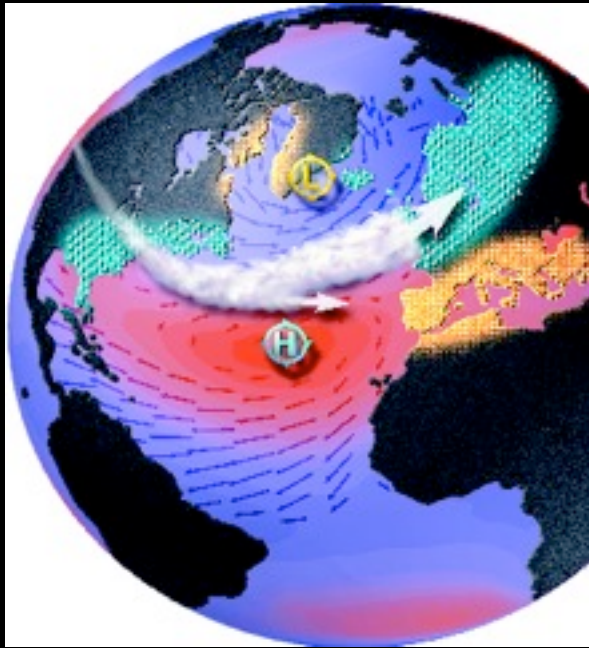
L'océan est un champ de tourbillons



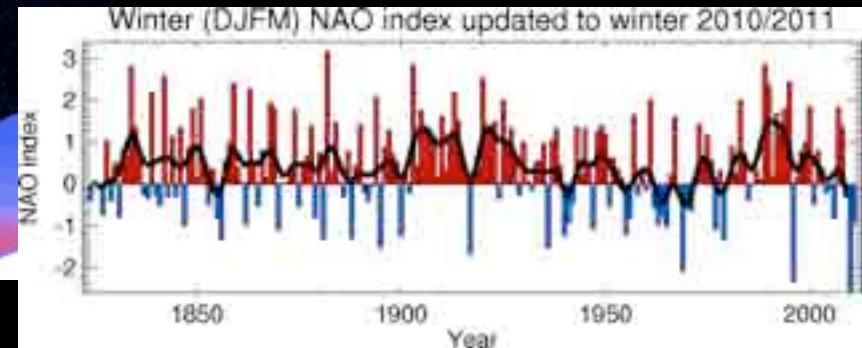
# Oscillation Nord Atlantique

NAO +

NAO -



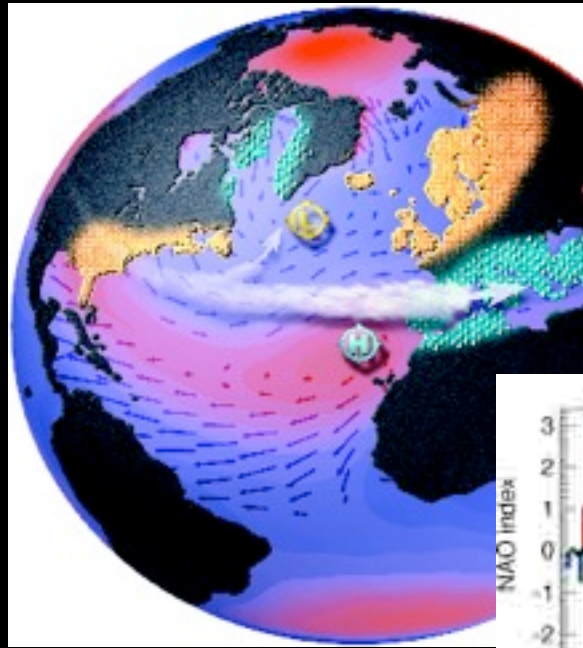
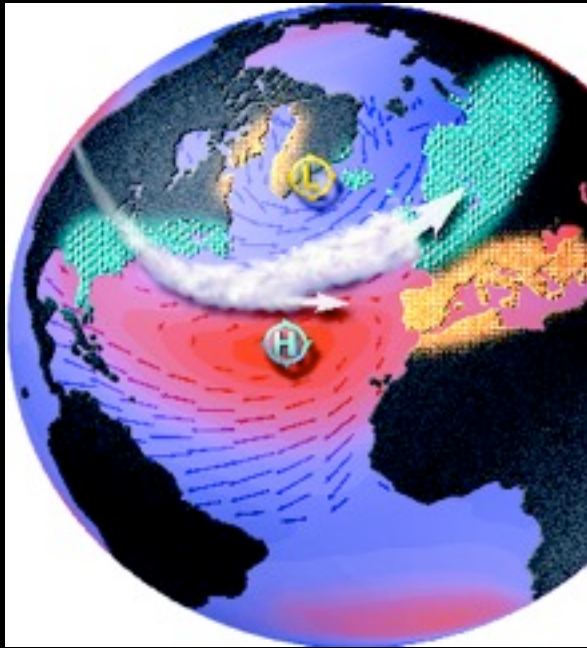
Source: Martin Visbeck and Heidi Cullen



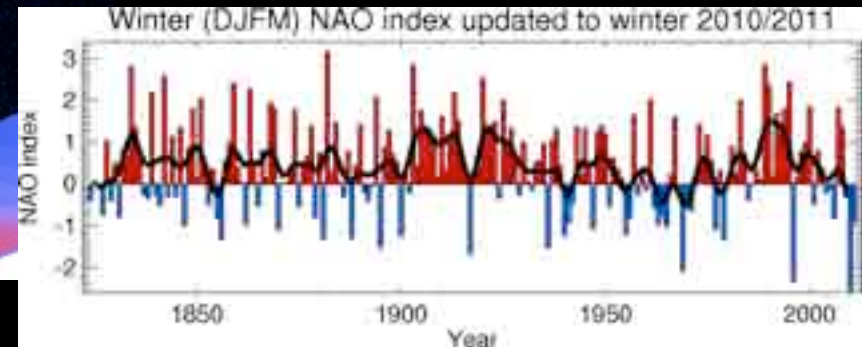
# Oscillation Nord Atlantique

NAO +

NAO -



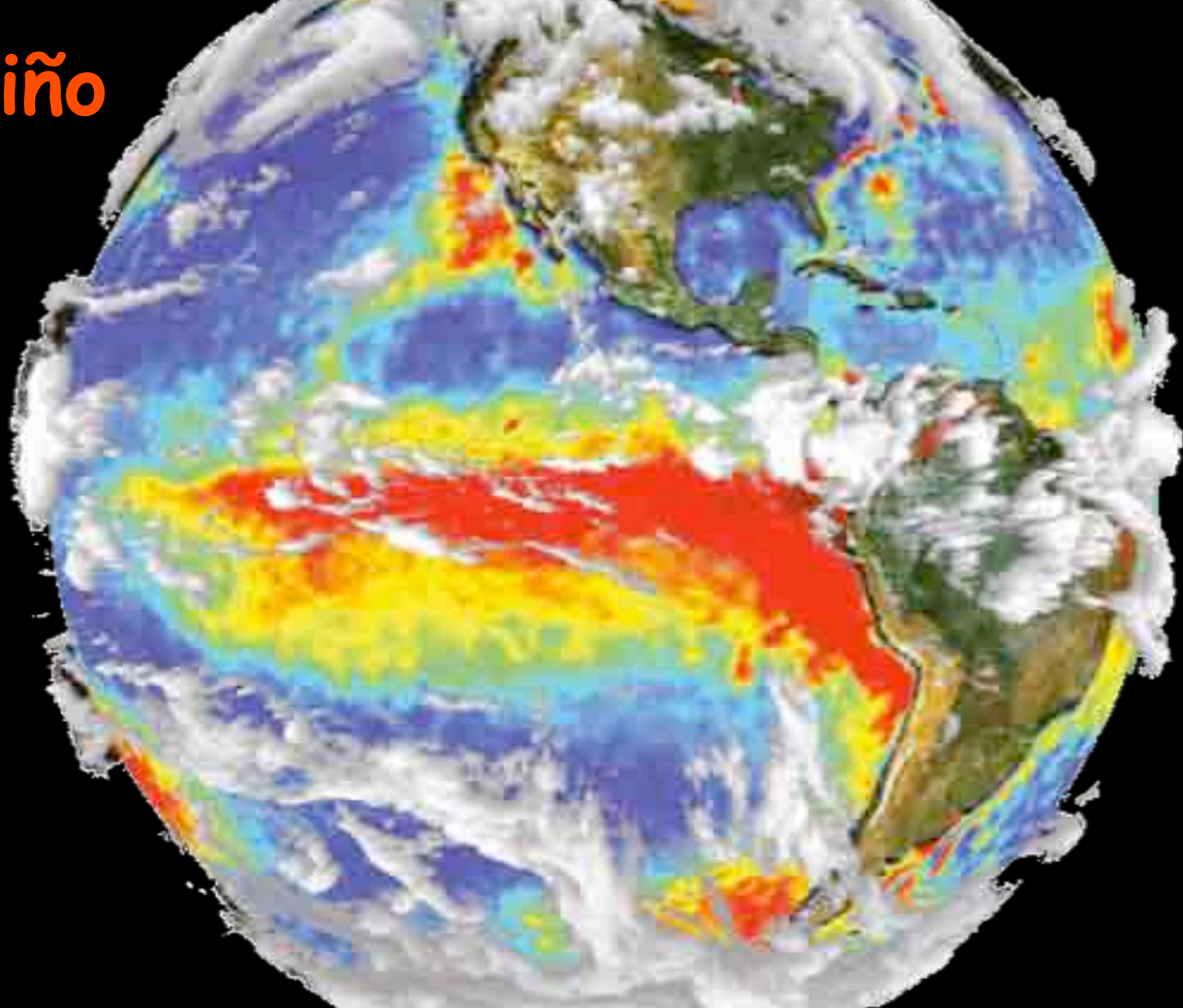
Source: Martin Visbeck and Heidi Cullen



Influence de la température de surface de la mer en hiver sur les conditions météorologiques en Europe

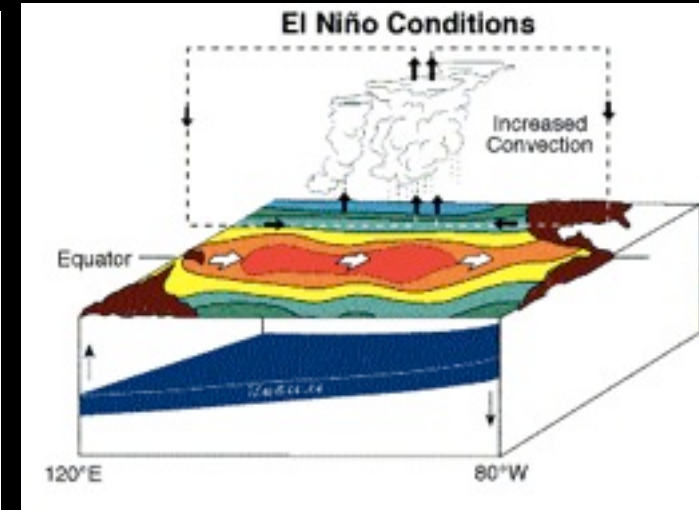
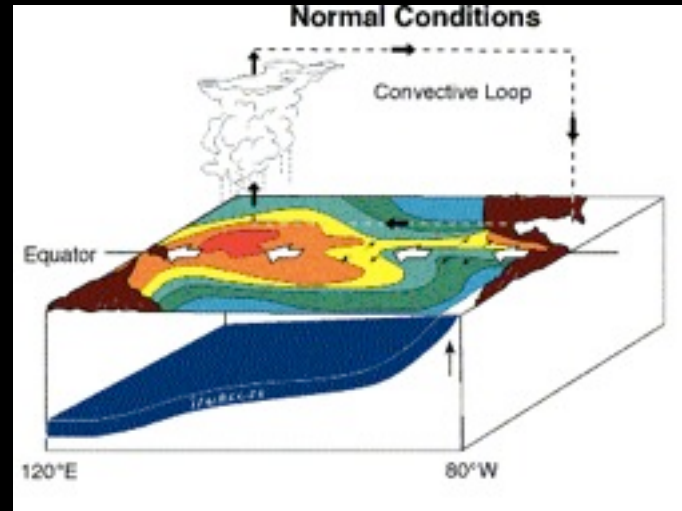
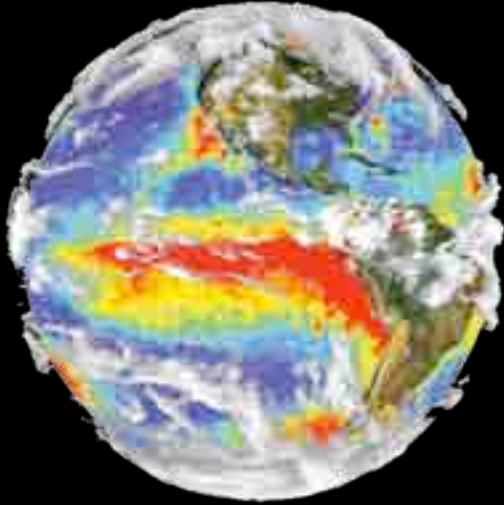


# El Niño



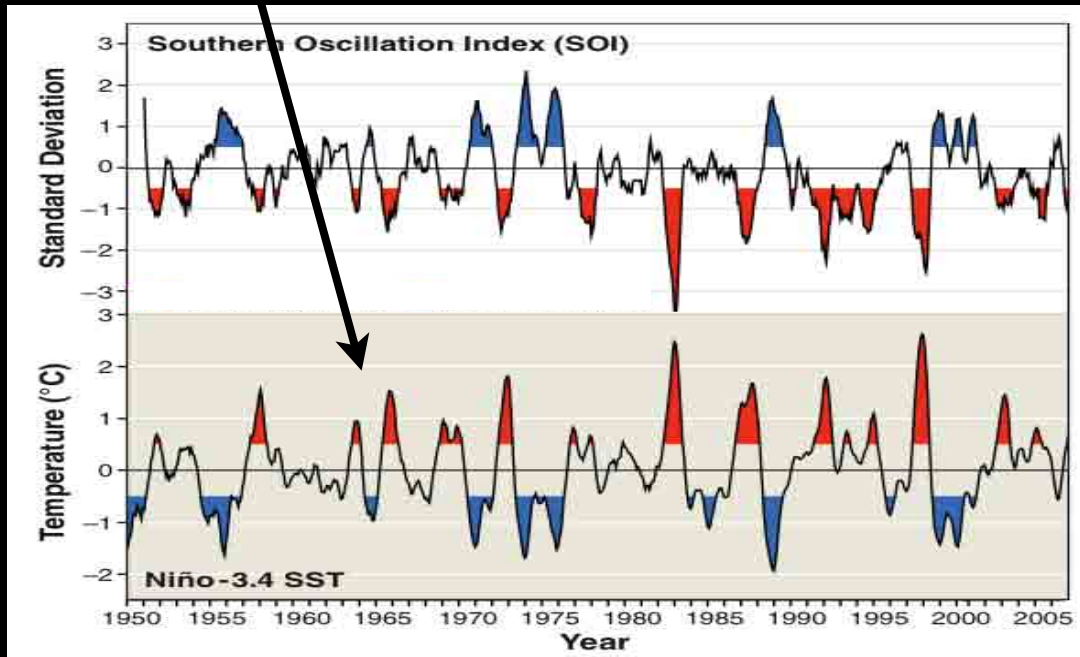
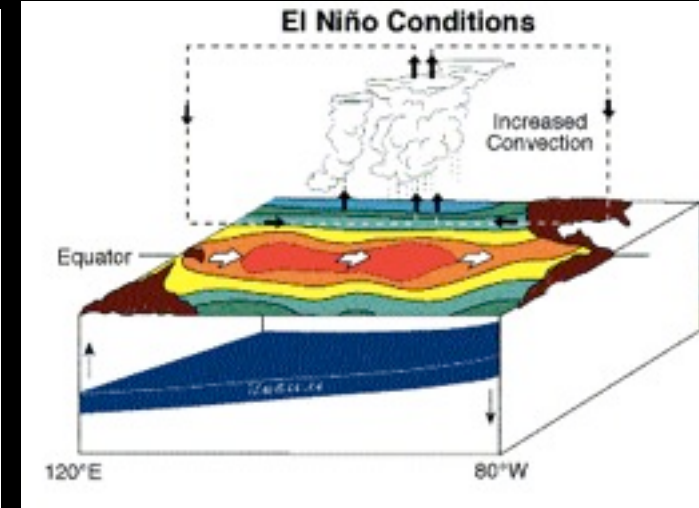
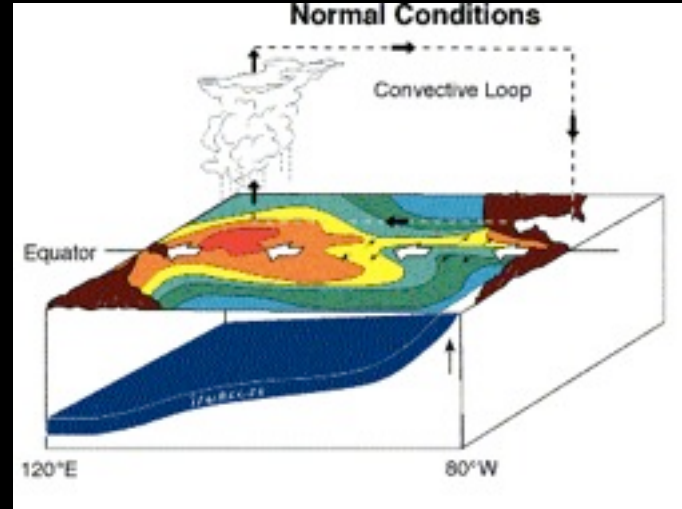
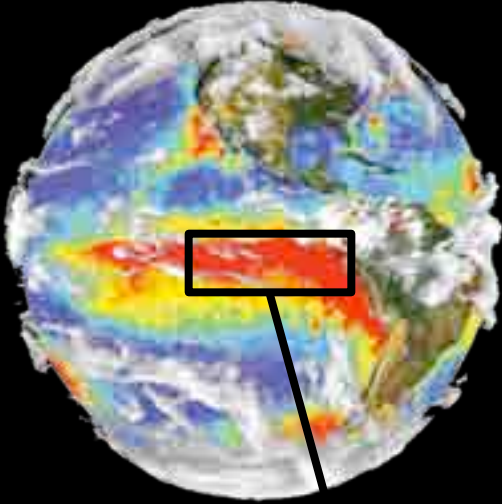
# El Niño

## Oscillation couplée océan-atmosphère



# El Niño

## Oscillation couplée océan-atmosphère



El Niño

La Niña

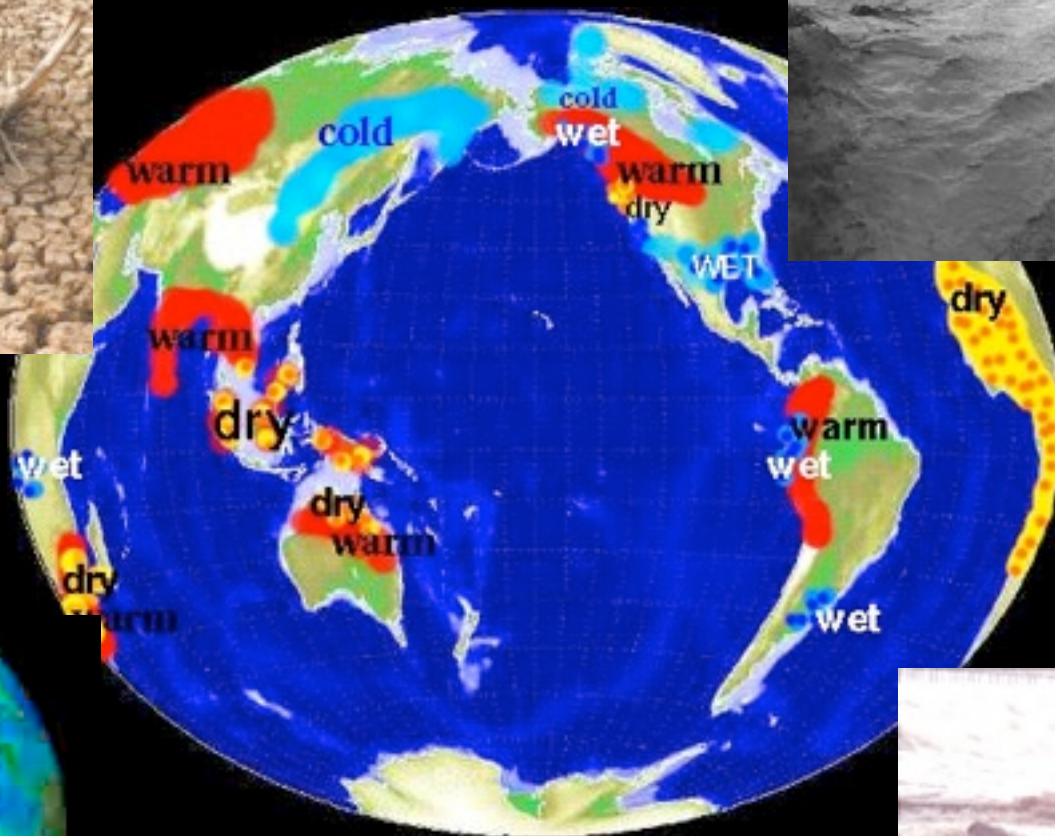




# Impacts d'El Niño



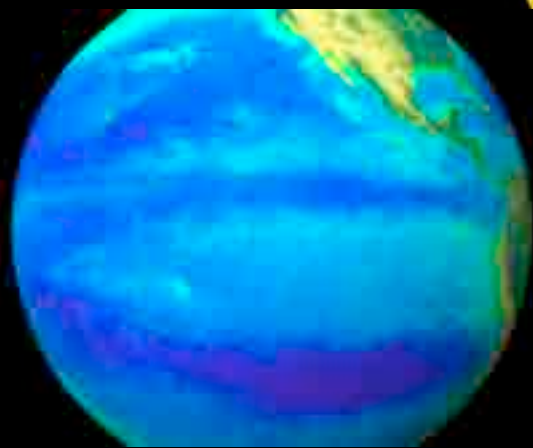
Sécheresses



Prévision clef !



Inondations



Pêche

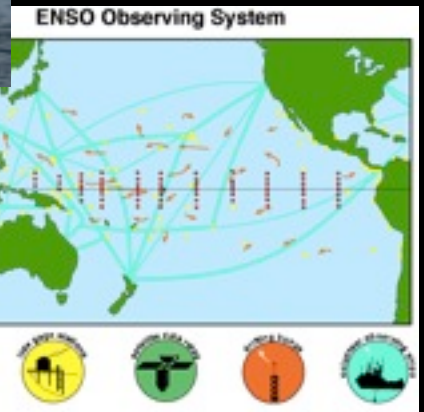


Ouragans

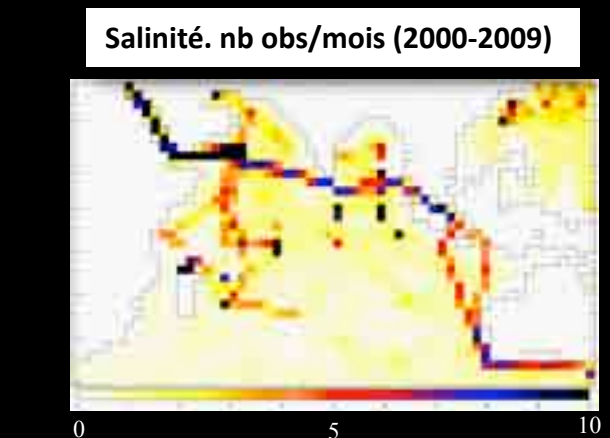
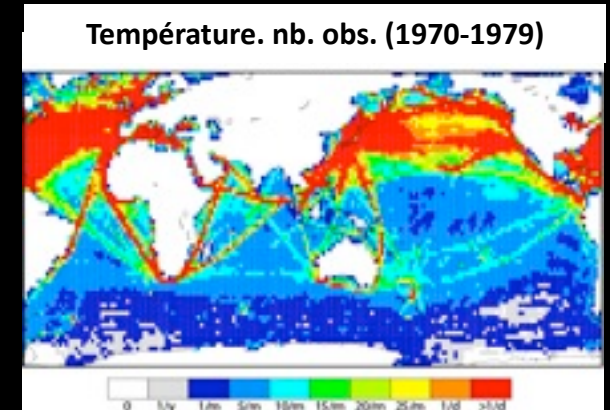
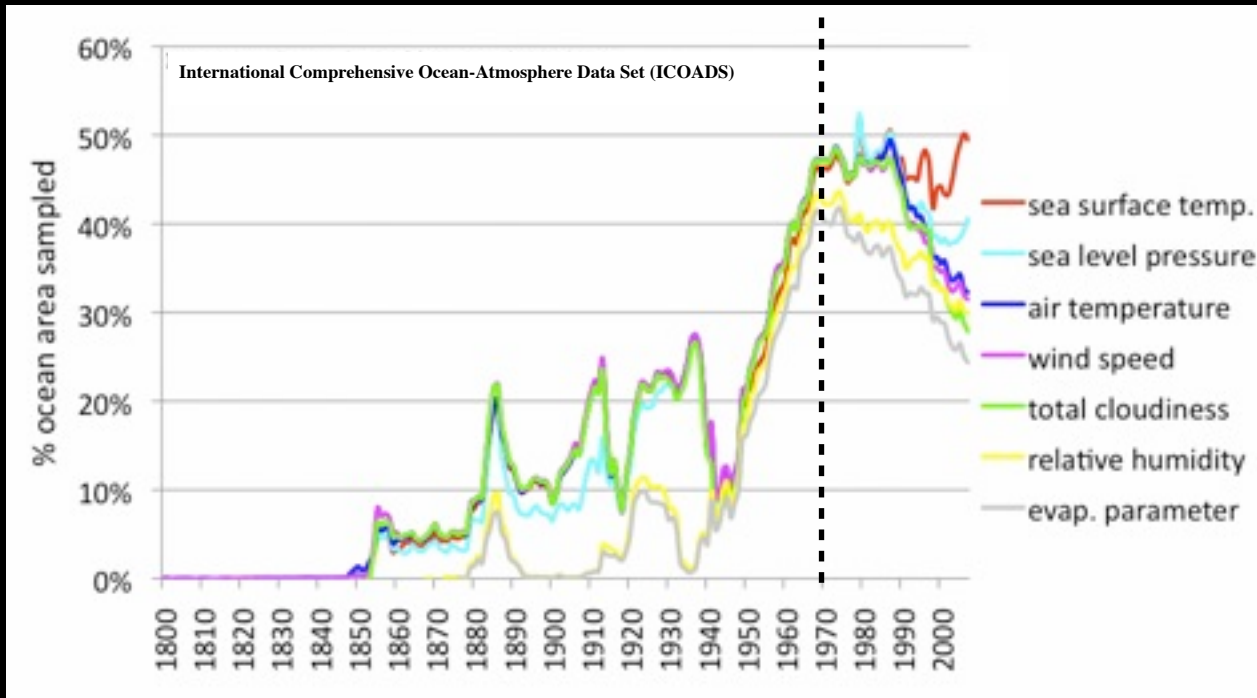


# Observer et mesurer l'océan

- Entreprise titanesque
- Coordination internationale
- Campagnes en mer
- Bouées fixes ou dérivantes
- Réseaux temps réel
- Satellites



# Des observations rares...

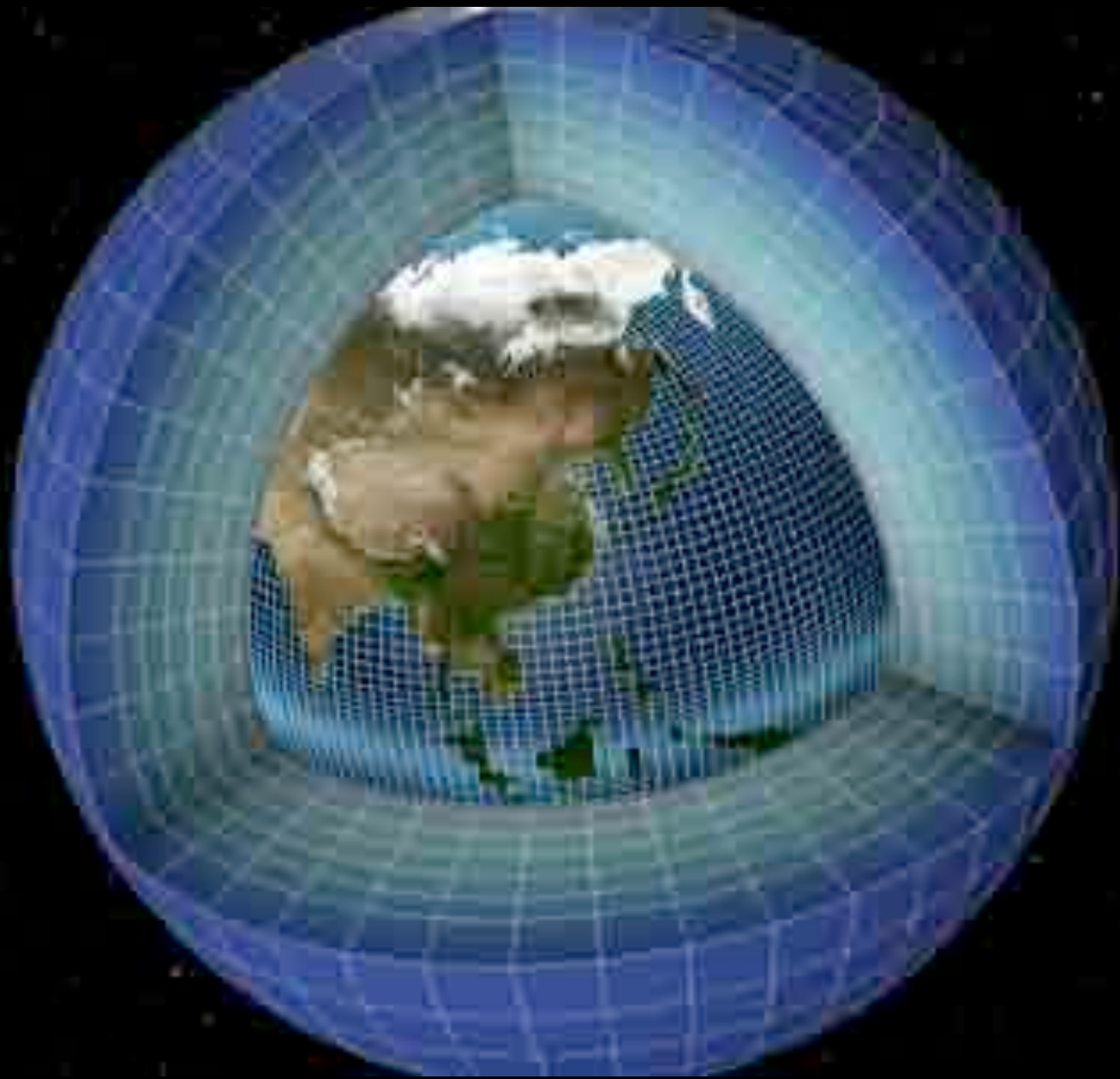


Limites des satellites: 1) ne voient pas sous la surface  
2) ne mesurent que quelques grandeurs

→ **Simulateurs d'océan**

## 2 - Modéliser l'océan pour le climat





*Crédits: P. Brockmann et L. Fairhead (IPSL)*

# Modélisation de l'océan

## Lois physiques

- Conservation du moment (Navier-Stokes)

$$\frac{\partial \mathbf{U}_h}{\partial t} = - \left[ (\nabla \times \mathbf{U}) \times \mathbf{U} + \frac{1}{2} \nabla (\mathbf{U}^2) \right]_h - f \mathbf{k} \times \mathbf{U}_h - \frac{1}{\rho_o} \nabla_h p + \mathbf{D}^{\mathbf{U}} + \mathbf{F}^{\mathbf{U}}$$

- Equilibre hydrostatique
- Incompressibilité
- Conservation Temp. et Salinité
- Equation d'état

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot (T \mathbf{U}) + D^T + F^T$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\nabla \cdot (S \mathbf{U}) + D^S + F^S$$

$$\rho = \rho(T, S, p)$$

→ “Equations primitives”



# Modélisation de l'océan

On distingue “dynamique” et “physique”

Dynamique = processus adiabatiques et inviscides  
(thermodynamiquement réversibles)

$$\frac{\partial \mathbf{U}_h}{\partial t} = - \left[ (\nabla \times \mathbf{U}) \times \mathbf{U} + \frac{1}{2} \nabla (\mathbf{U}^2) \right]_h - f \mathbf{k} \times \mathbf{U}_h - \frac{1}{\rho_o} \nabla_h p + \mathbf{D}^{\mathbf{U}} + \mathbf{F}^{\mathbf{U}}$$

Physique = processus diabatiques

(e.g. mélange turbulent)

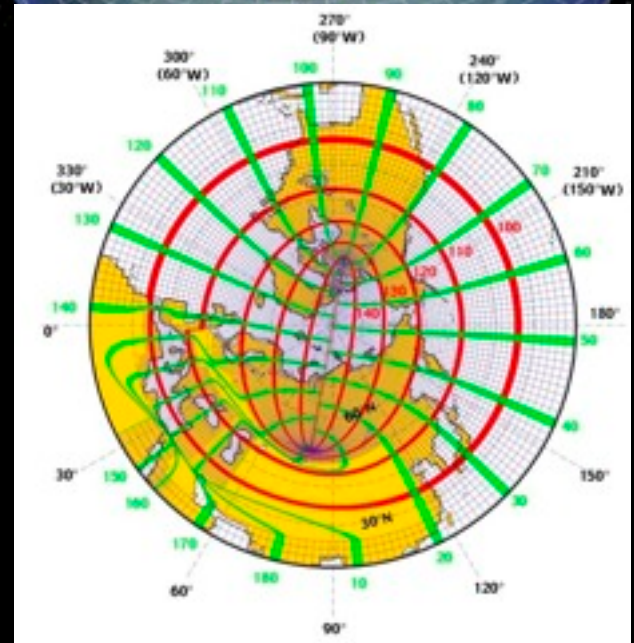
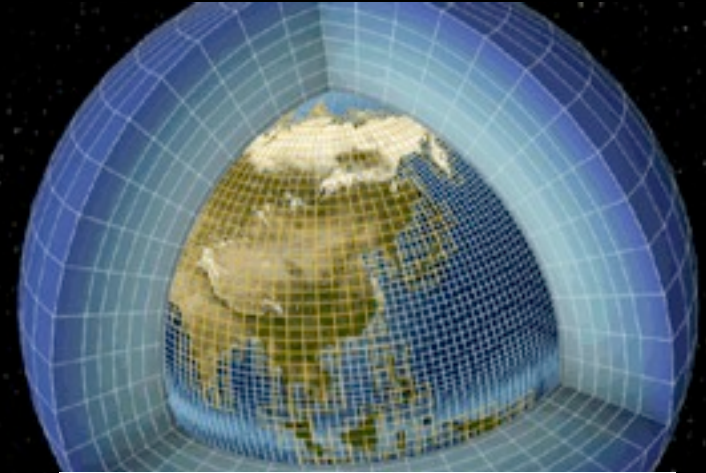
$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot (T \mathbf{U}) + D^T + F^T$$
$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\nabla \cdot (S \mathbf{U}) + D^S + F^S$$

$$\rho = \rho(T, S, p)$$

# Modélisation de l'océan

## Bases numériques

- Discrétisation des équations:
  - spatiale “grille numérique”
  - temporelle “pas de temps”
- Modélisation des processus d'échelle sous-maille (turbulence, bathymétrie,...)
- Contraintes numériques
  - CFL, filtrage ondes de gravité,...
  - points singuliers (pôle nord)
  - conservation propriétés physiques

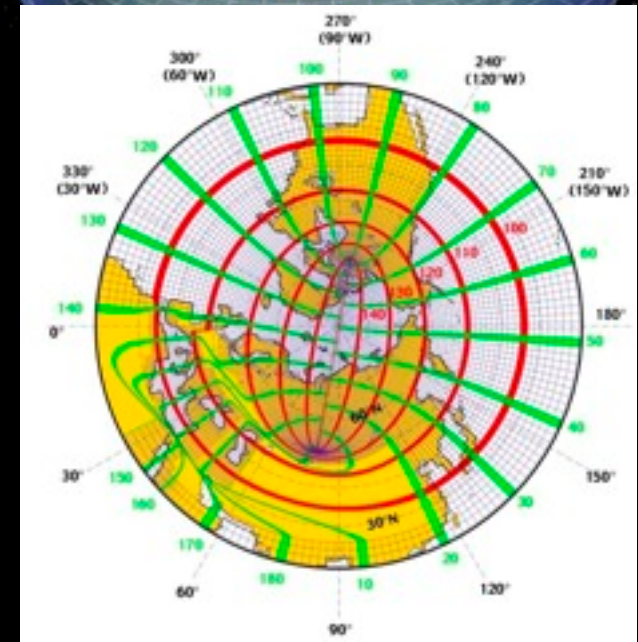
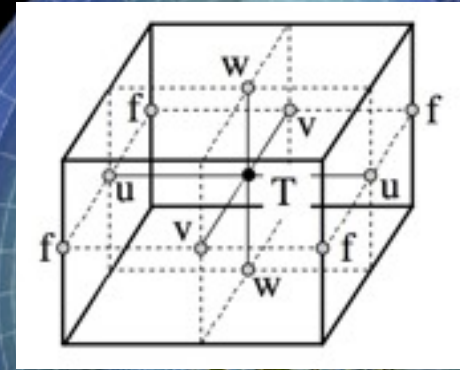


Grille “ORCA2” vue polaire

# Modélisation de l'océan

## Bases numériques

- Discrétisation des équations:
  - spatiale “grille numérique”
  - temporelle “pas de temps”
- Modélisation des processus d'échelle sous-maille (turbulence, bathymétrie,...)
- Contraintes numériques
  - CFL, filtrage ondes de gravité,...
  - points singuliers (pôle nord)
  - conservation propriétés physiques



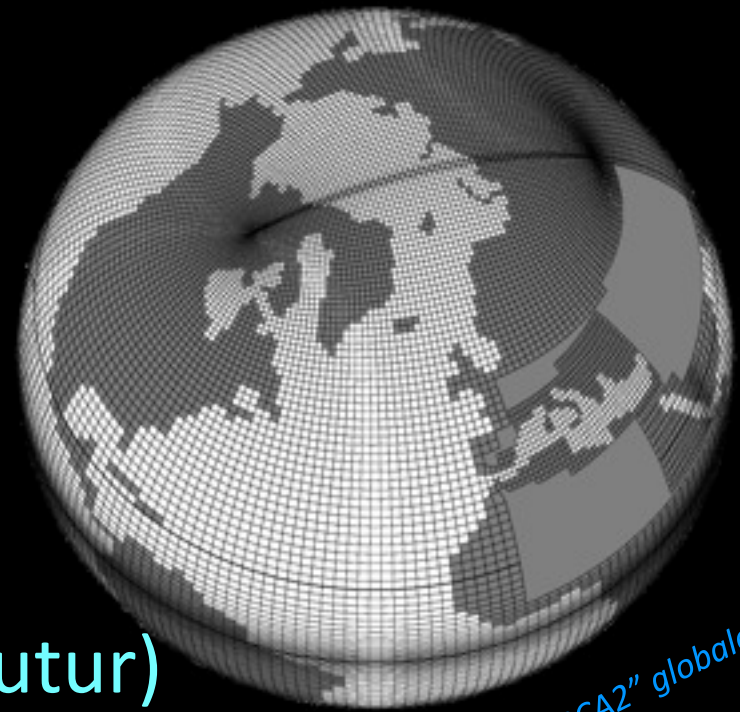
Grille “ORCA2” vue polaire

# Le modèle NEMO\*

Modèle de "Circulation Générale" (MCG ou GCM)

- Etude de l'océan
- Etude du climat et de ses variations (passé, présent, futur)
- Prévision océanique
- Réanalyses océaniques
- Configurations régionales et idéalisées

\* Nucleus for a European Modelling of the Ocean  
(CNRS-IPSL, Mercator-Océan, UK Met Office,  
NERC, INGV)



Grille "ORCA2" globale



Madec et al. 2011



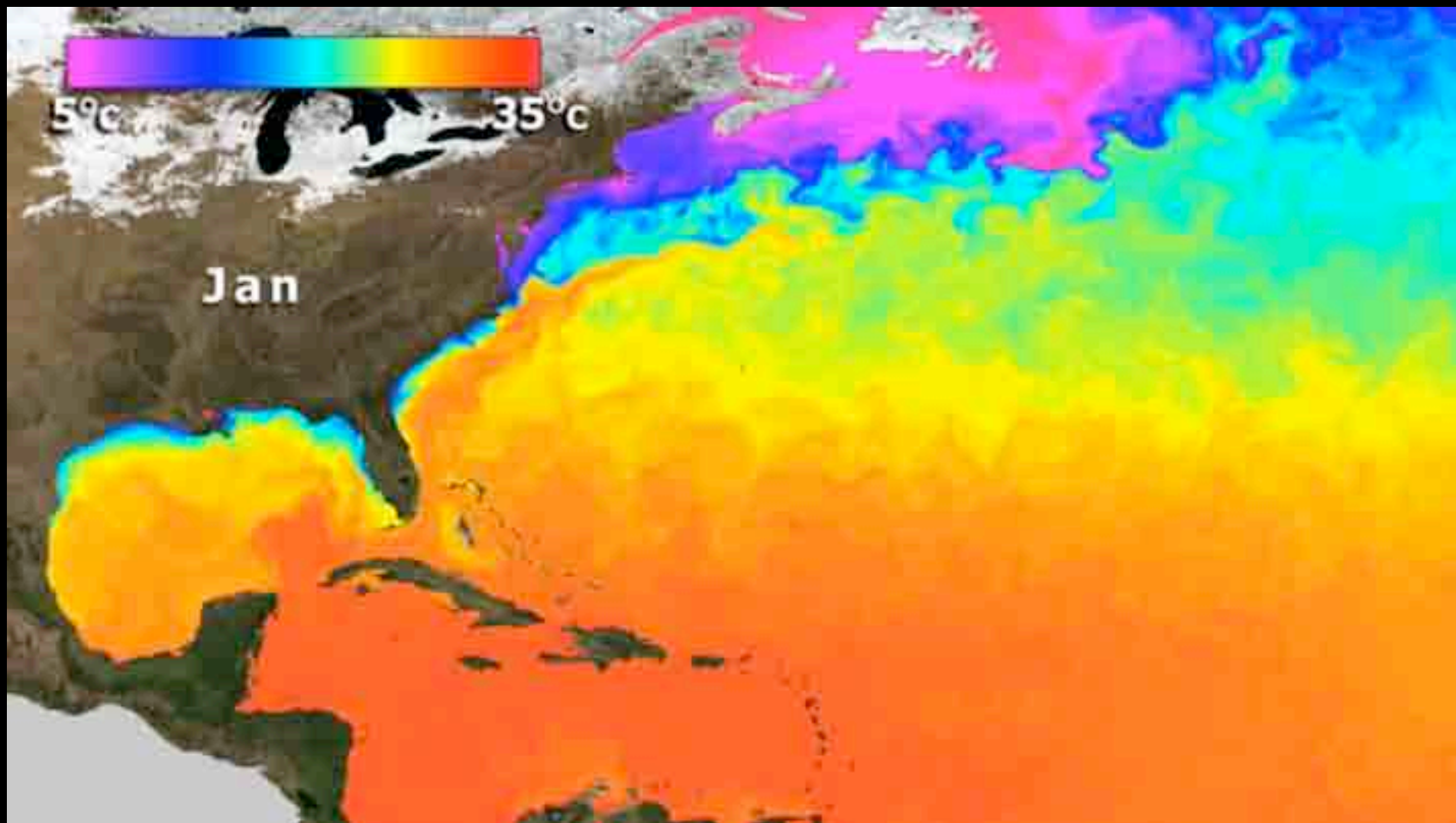


# La prévision océanique





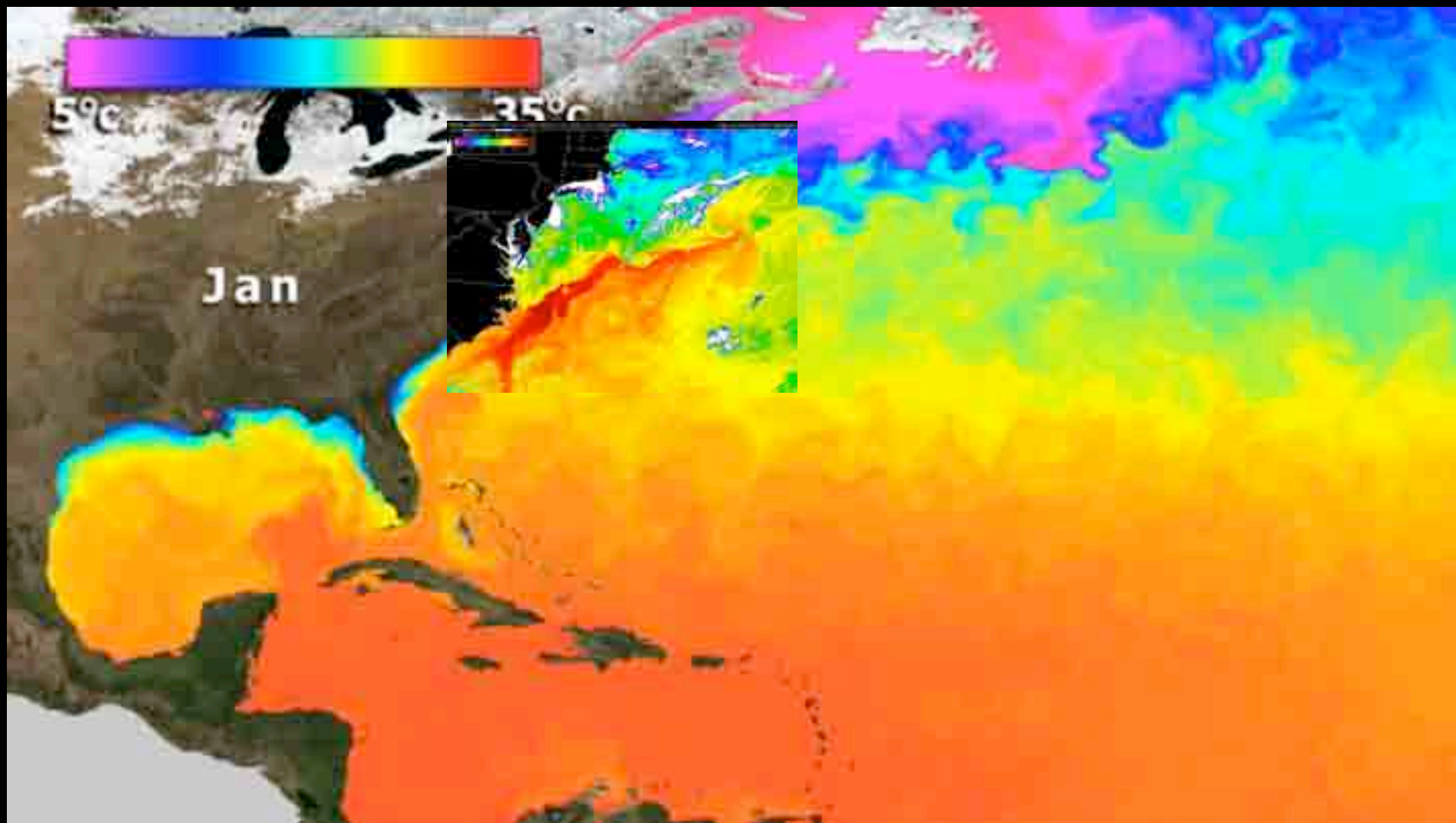
# La prévision océanique



Température de surface de la mer - NEMO 1/12e Mercator-Océan

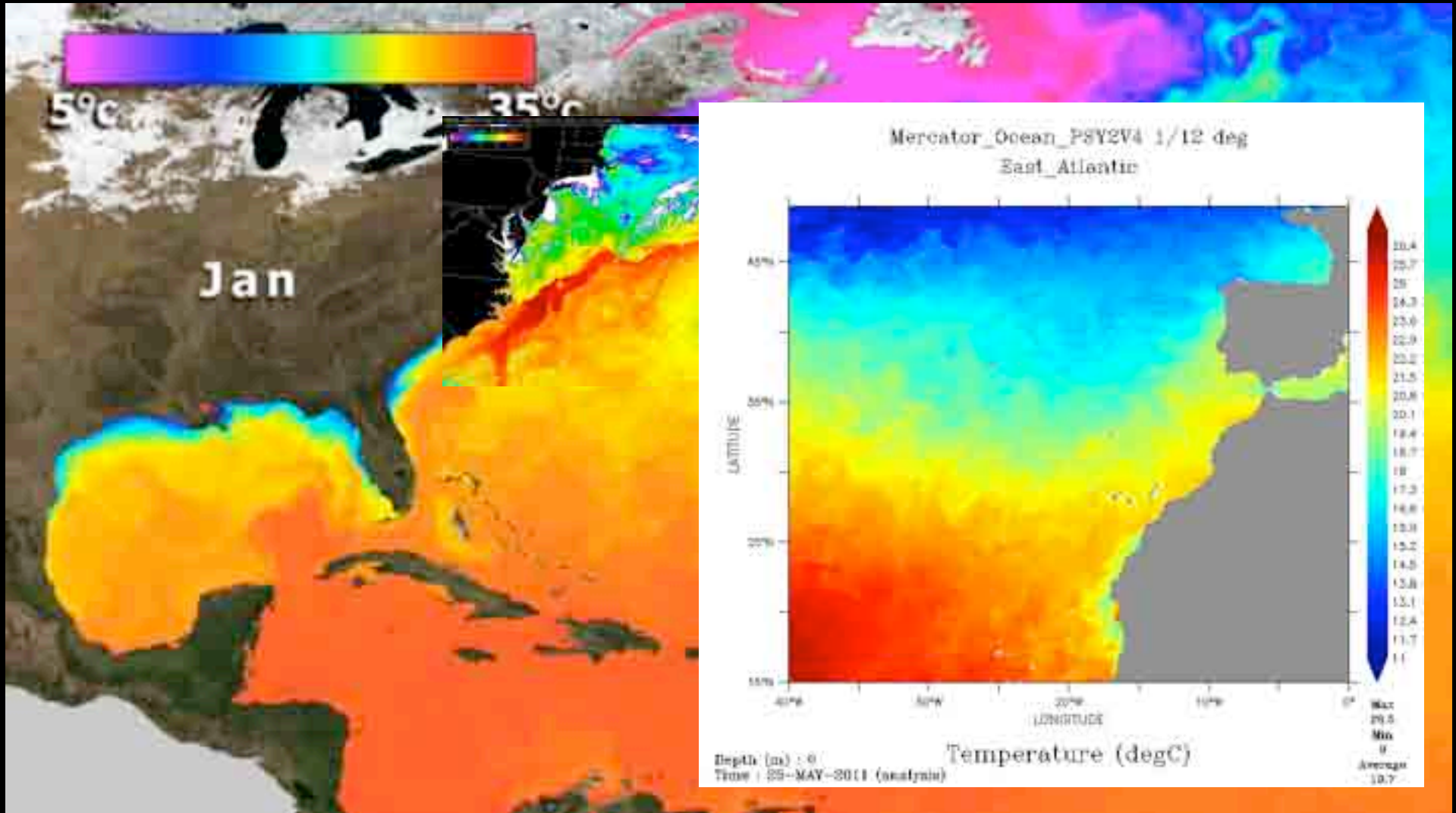


# La prévision océanique



Température de surface de la mer - NEMO 1/12e Mercator-Océan

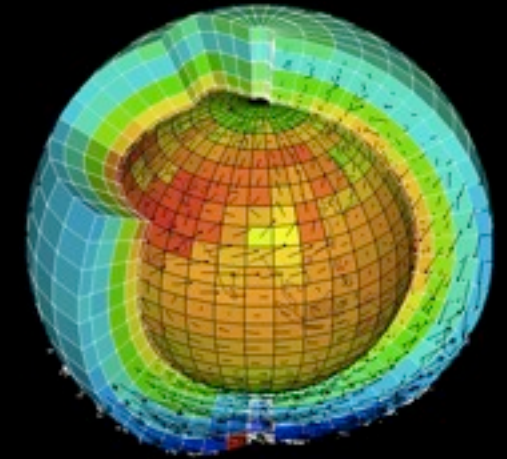






# Etude du climat

NEMO, composante océanique du modèle de climat de l'IPSL



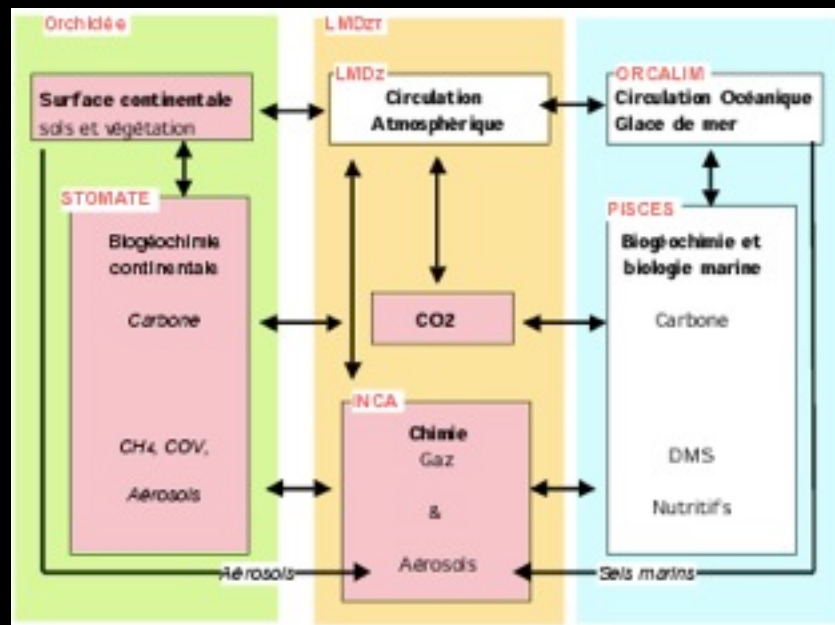
Atmosphère (LMDz)



Océan (NEMO)



Continents      Atmosphère      Océan



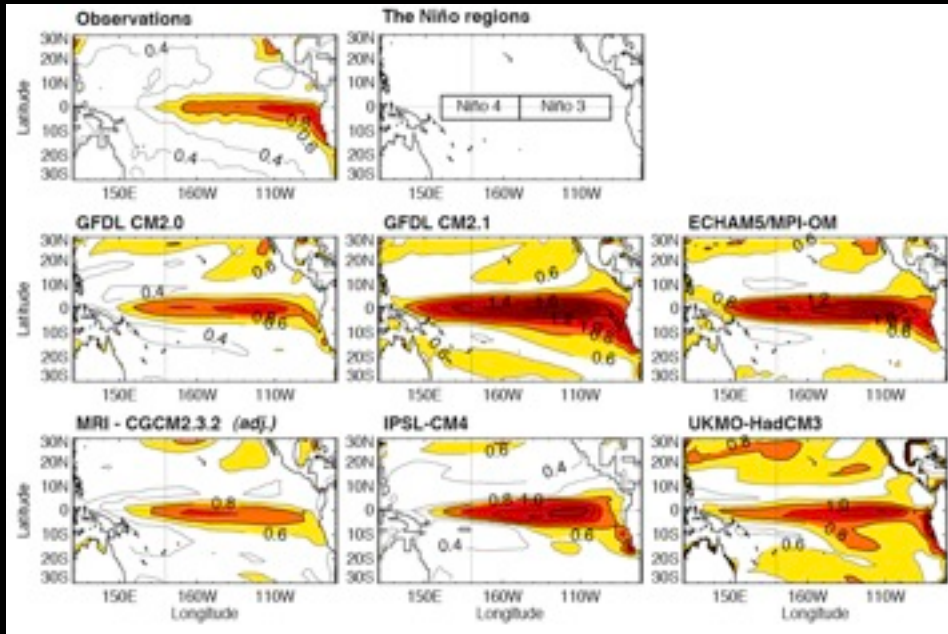
Physique

Carbone

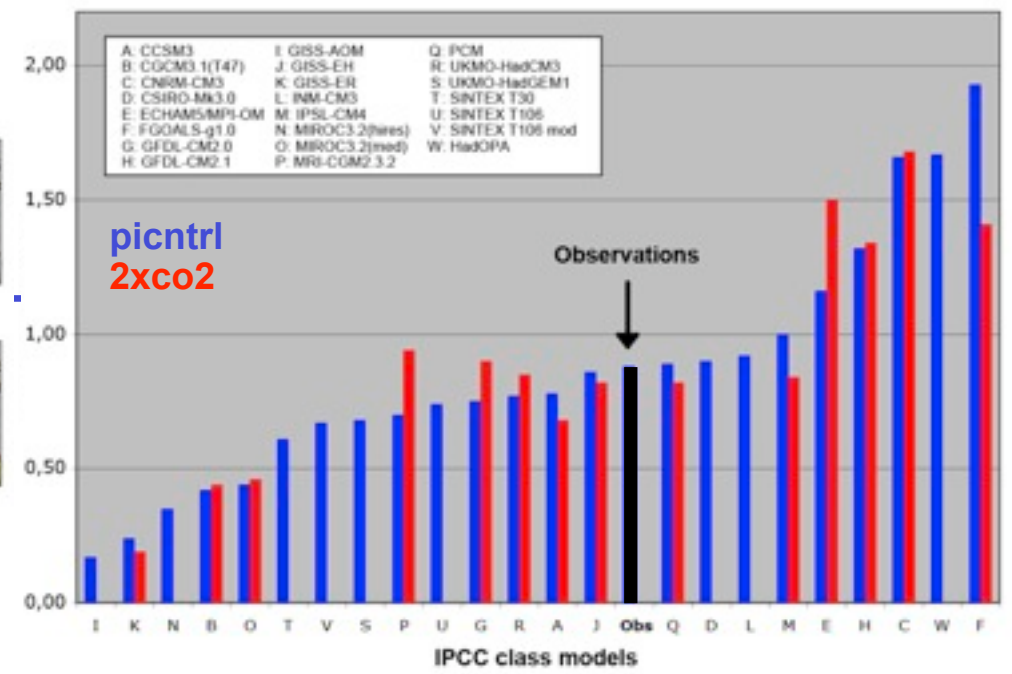
Chimie

# Modélisation d'El Niño

## Structure spatiale



## Amplitude d'El Niño



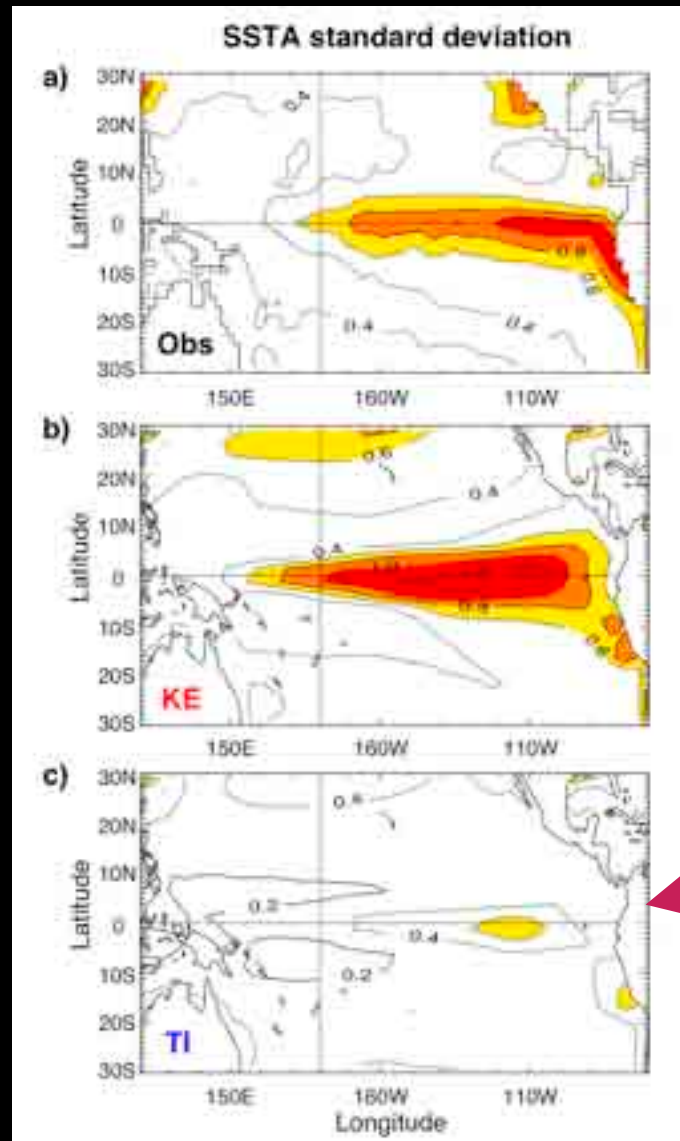
- Etudes des mécanismes d'El Niño
- Prévision saisonnière

# Impact of atmosphere convection scheme on El Niño

Observations  
(0.9 C) - HadISST1.1

IPSL (KE)  
Kerry Emanuel  
(1.0 C) - in IPCC

IPSL/Tiedke (TI)  
(0.3 C) – old scheme



IPSL-CM4 model

ENSO has  
disappeared !

What role for  
atmosphere  
feedbacks ?

# Impact of deep convection scheme on atmosphere feedbacks during El Niño

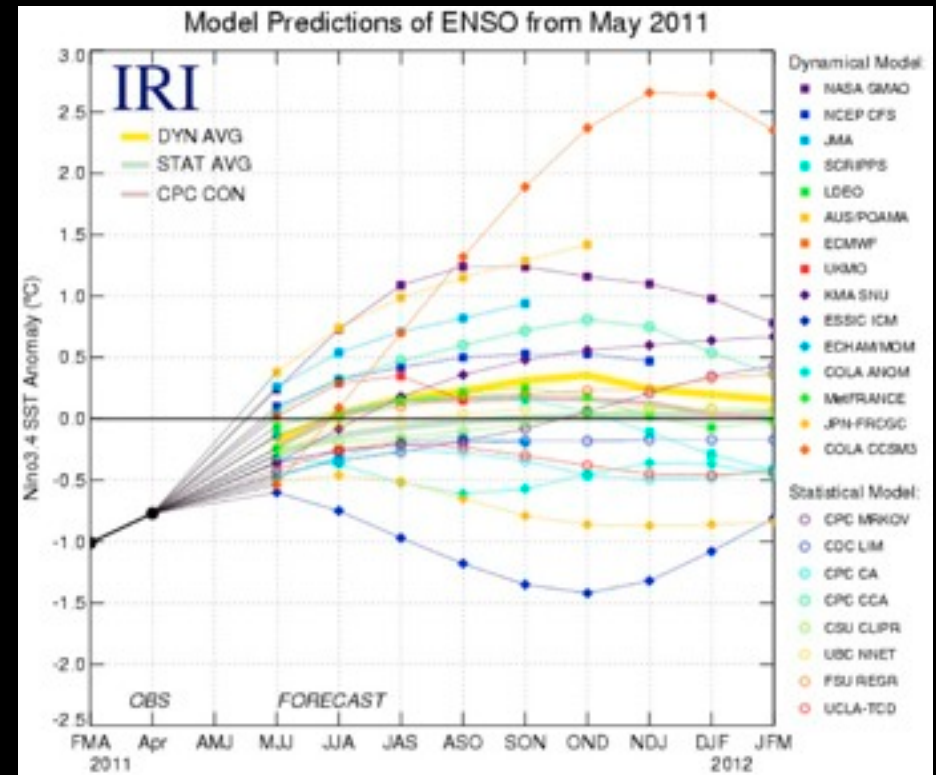
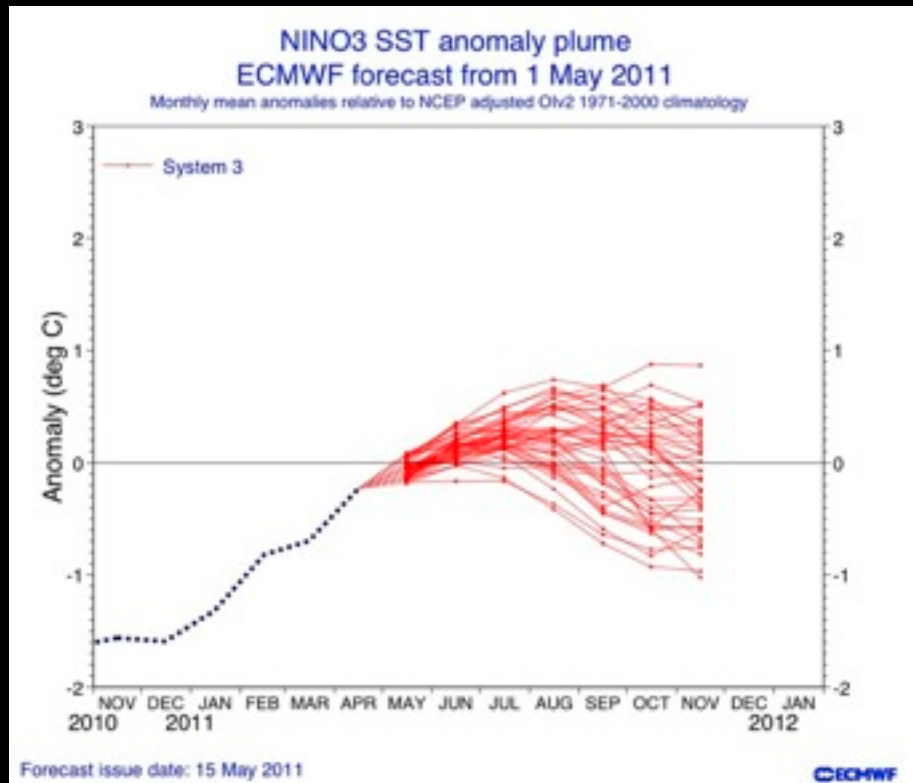
		Bjerknes dynamical feedback $\mu$	Heat flux feedback $\alpha$	El Niño Amplitude	
	Obs	10	-18	0.9	
IPSL-CM4	KE scheme	4	-5	1.0	Error compensation !
	Tiedke scheme	4	-20	0.3	
		$10^{-3} \text{ N.m}^{-2}/\text{C}$	$\text{W.m}^{-2}/\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	
		↓	↓		
		Too weak (improves with atmosphere resolution)	Due to shortwave feedback difference (clouds, convective regime stronger in TI)		

Guilyardi et al. (2009)

**Need to get the right ENSO amplitude for the right reasons !  
Process-based metrics for the evaluation of ENSO in CGCMs**

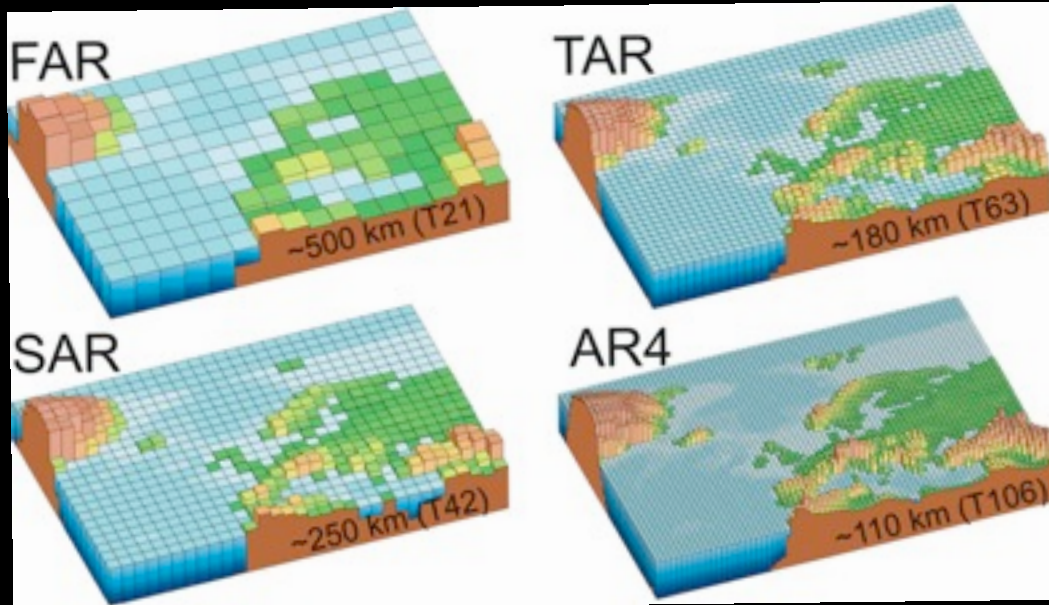


# Prévision d'El Niño



Prévision d'ensemble et multi-modèle

# Résolution des modèles

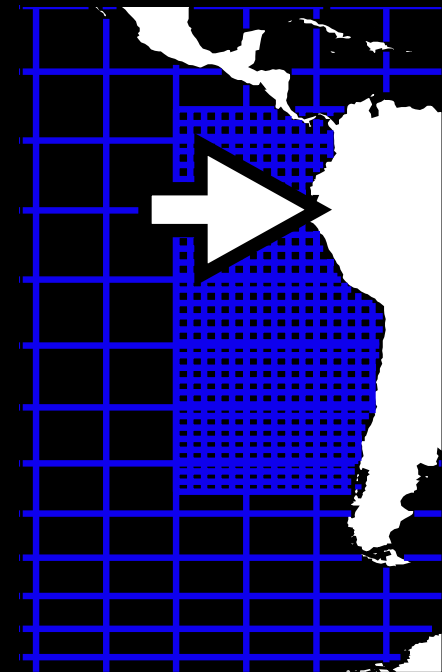


AR4 WG1 Chap1, 2007

- impact régional du changement climatique
- événements extrêmes (pluies, tempêtes, cyclones)
- impact sur les écosystèmes

Circulation de grande échelle

Régionalisation



Source: S. Masson

# Quel degré de détail ?

Courants océaniques à 150 km et à 6 km



~150km

S. Flavoni. Equipe système NEMO

~6km

R. Bourdallé-Badie. Mercator-Ocean

?

Tourbillons  $\Leftrightarrow$  Climat grande échelle

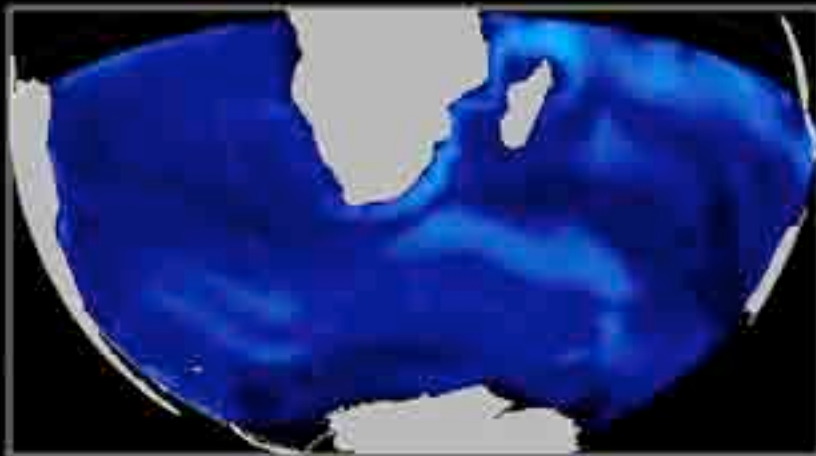
Source: S. Masson

# Quel degré de détail ?



Courants océaniques à 150 km et à 6 km

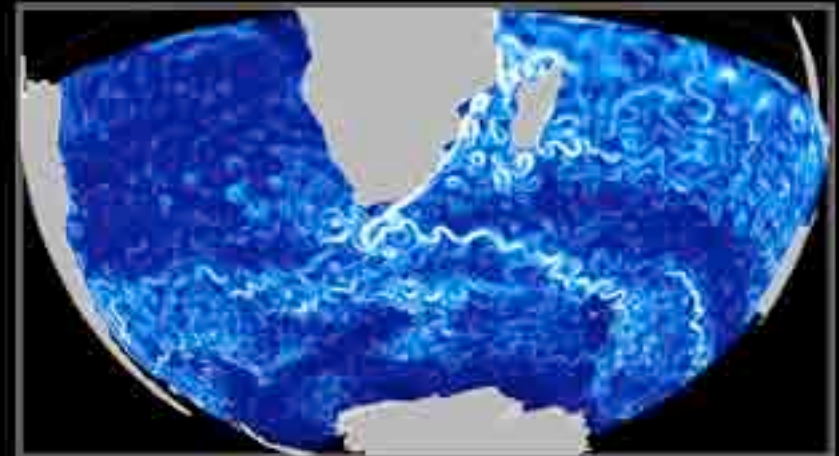
ORCAO2 20040102 velocity 15m



~150km

S. Flavoni. Equipe système NEMO

ORCAH12-T103 y2004m01d01 velocity 15m



~6km

R. Bourdallé-Badie. Mercator-Ocean

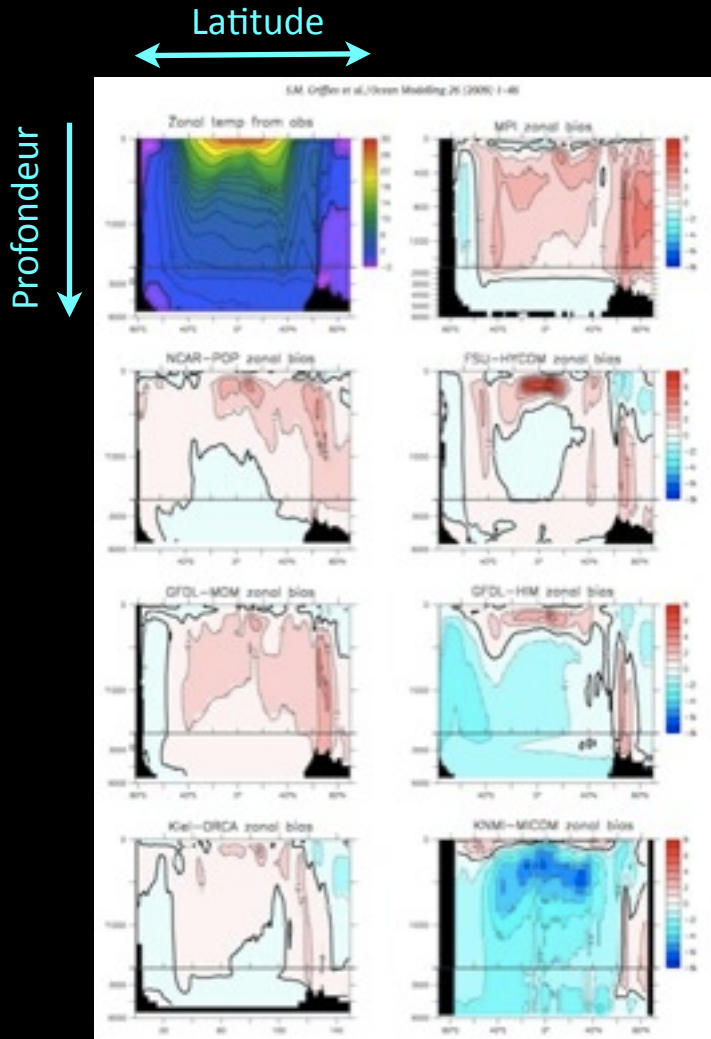
?

Tourbillons  $\Leftrightarrow$  Climat grande échelle

Source: S. Masson



# Validation des modèles d'océan

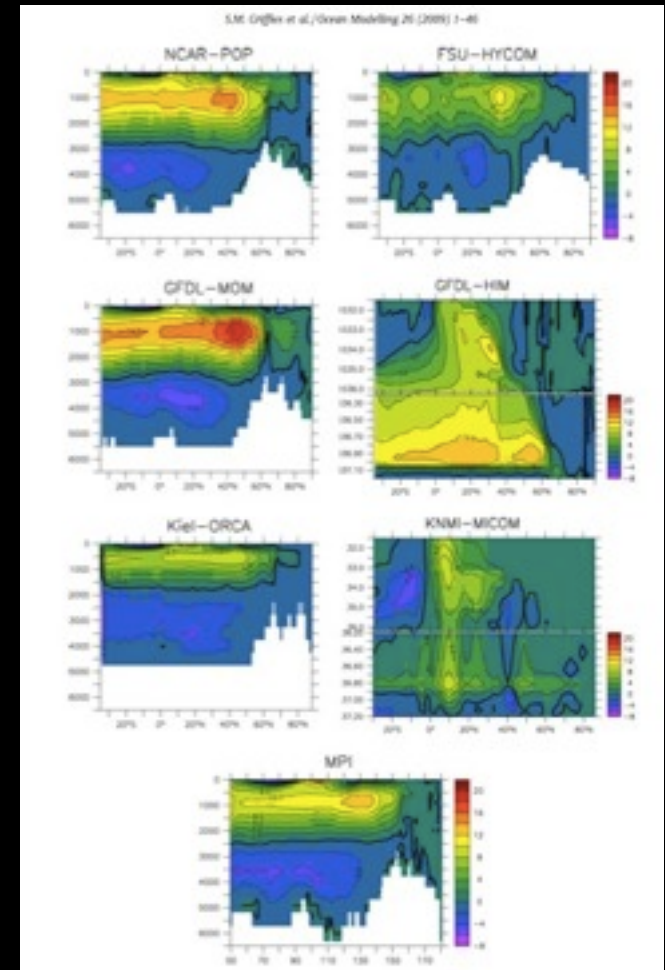


Température

Circulation  
thermohaline  
Atlantique Nord

Comparaison aux  
observation

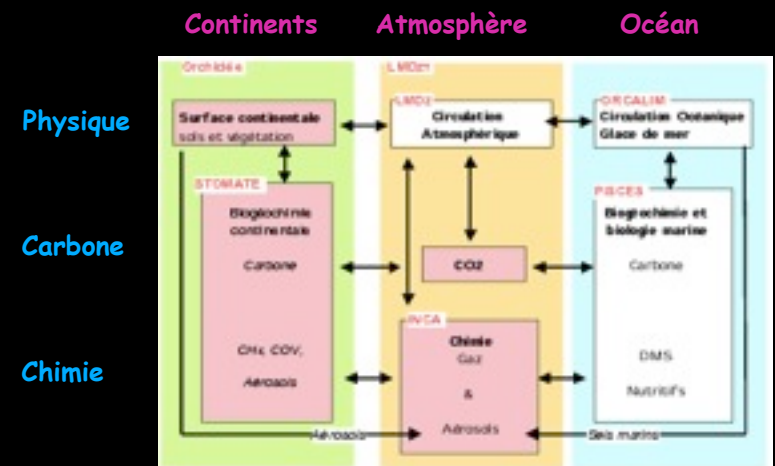
Intercomparaison



Griffies et al. (2009)

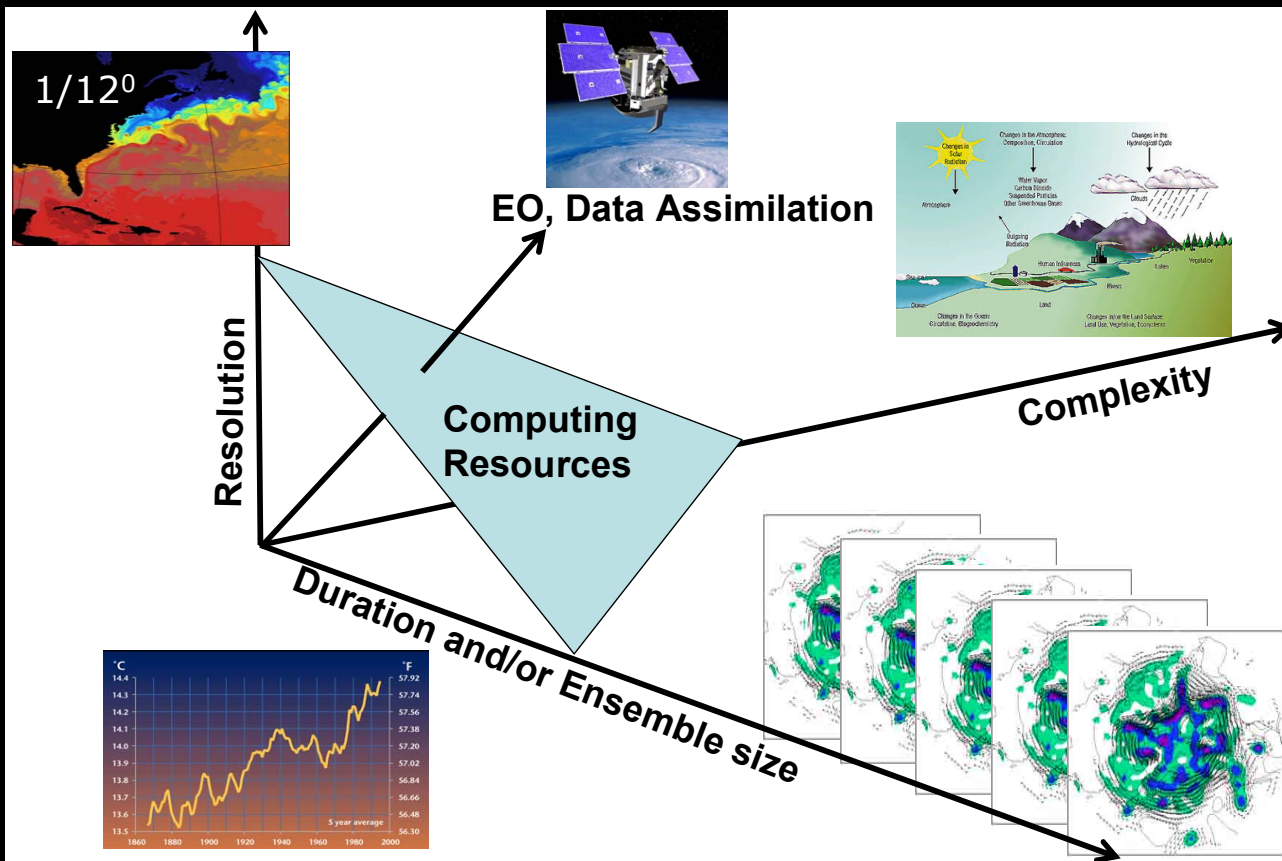
# Défis de la modélisation de l'océan et du climat

- Représentation des processus « sous-maille »
  - nuages, turbulence
  - source d'incertitude majeure
- Validation par observations
  - Equilibre global et détail des processus
  - Disponibilité
- Couplages pluri-disciplinaires



# Défis de la modélisation de l'océan et du climat

## Capacité des super-calculateurs



Earth Simulator - Yokohama

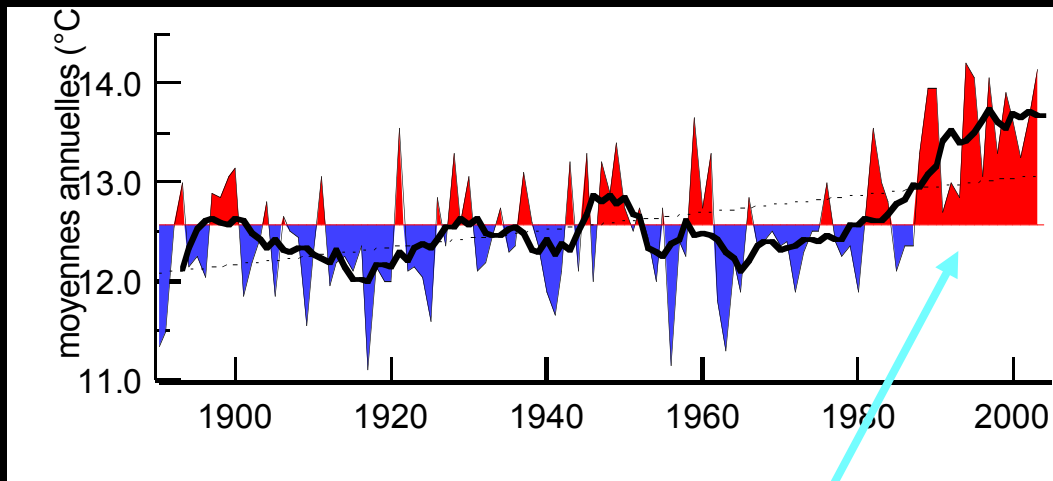
# 3 - Le changement climatique

- Détection/attribution
- Projections



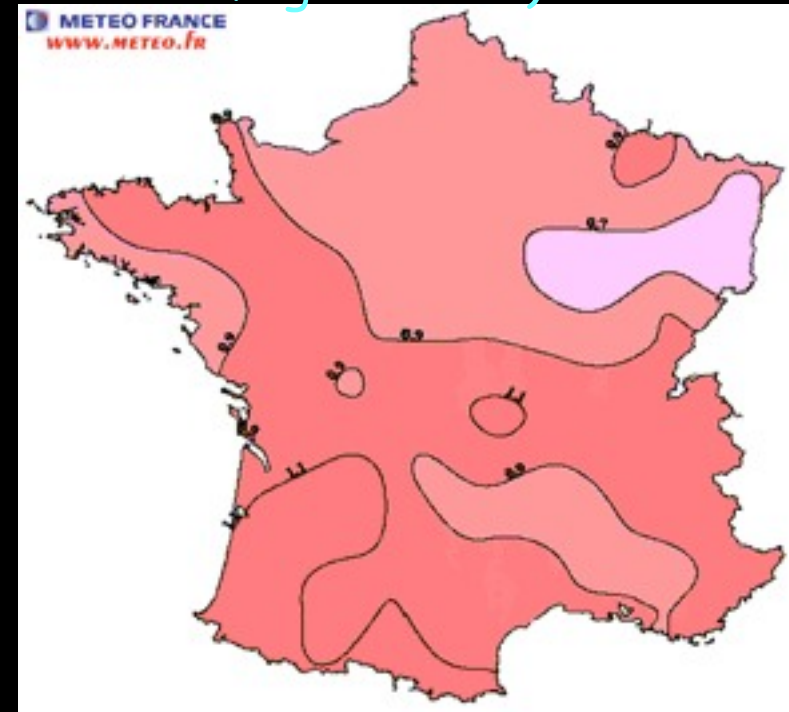
# Histoire des températures

Température annuelle à Paris depuis 1890



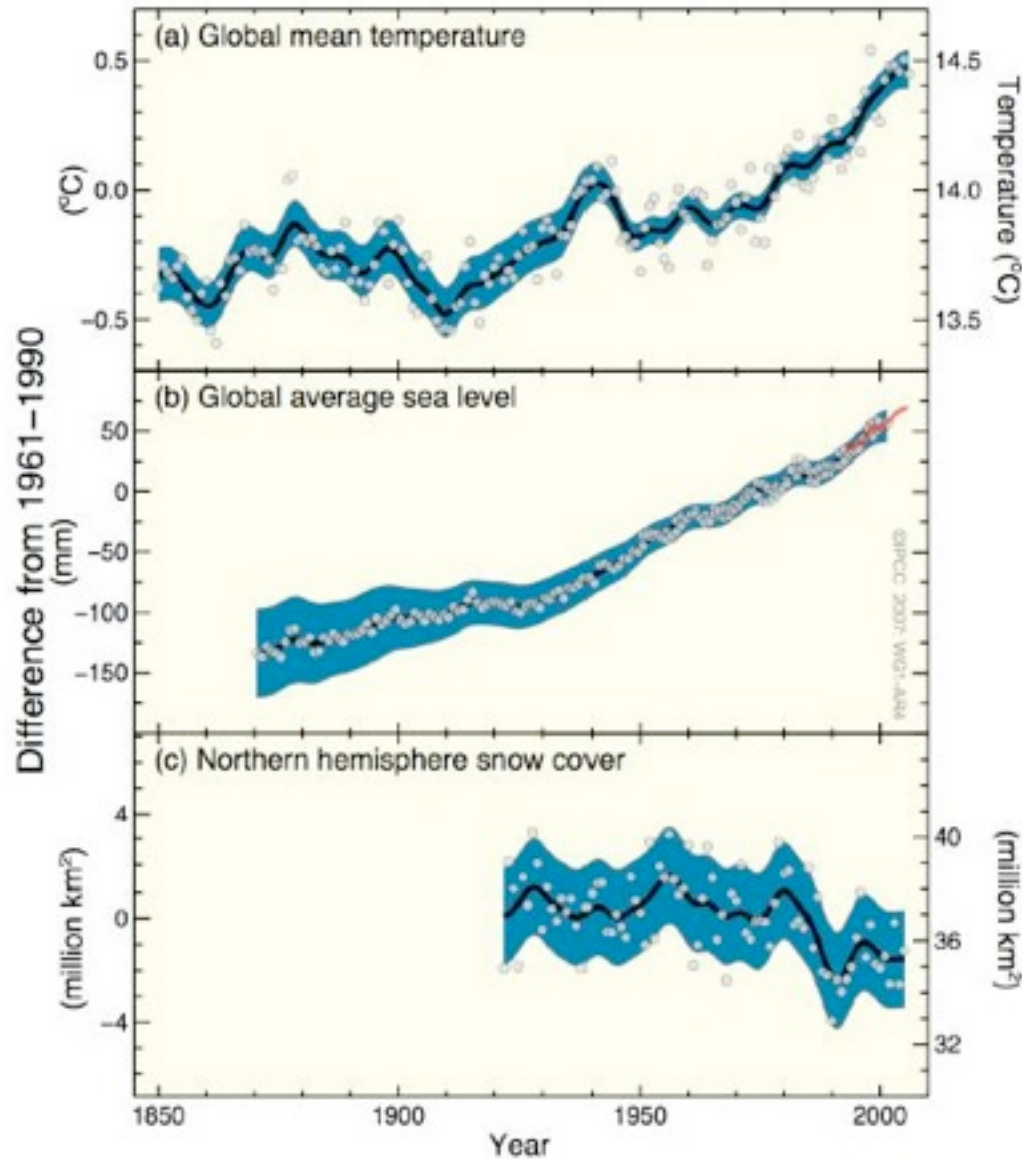
Significatif ?  
Origine ?

Evolution de la température annuelle au 20ème siècle (70 séries homogénéisées)



+0.9 °C en un siècle

## Changes in Temperature, Sea Level and Northern Hemisphere Snow Cover



# Signal global

+0.8°C depuis 1900

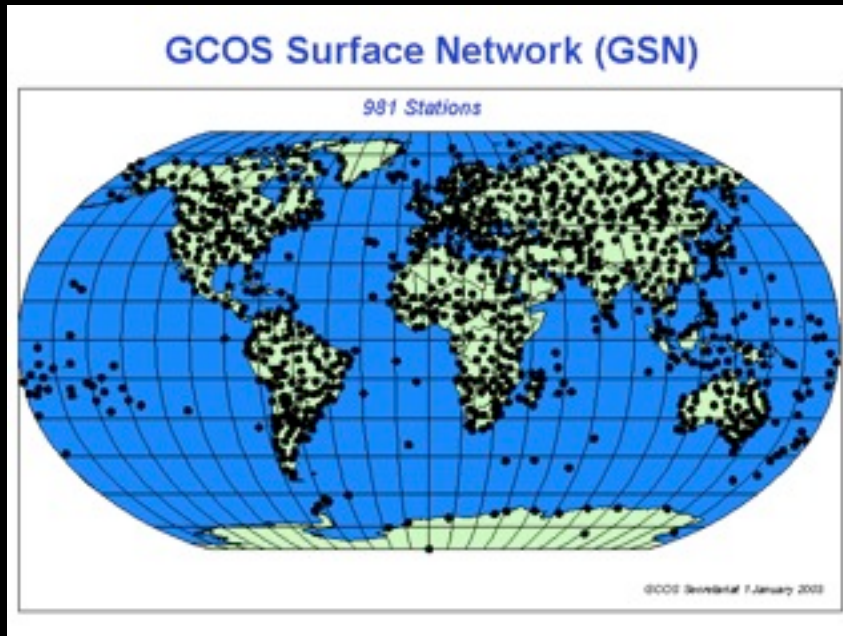
+0.6°C depuis 1950

10 records de température  
au cours des 12 dernières  
années

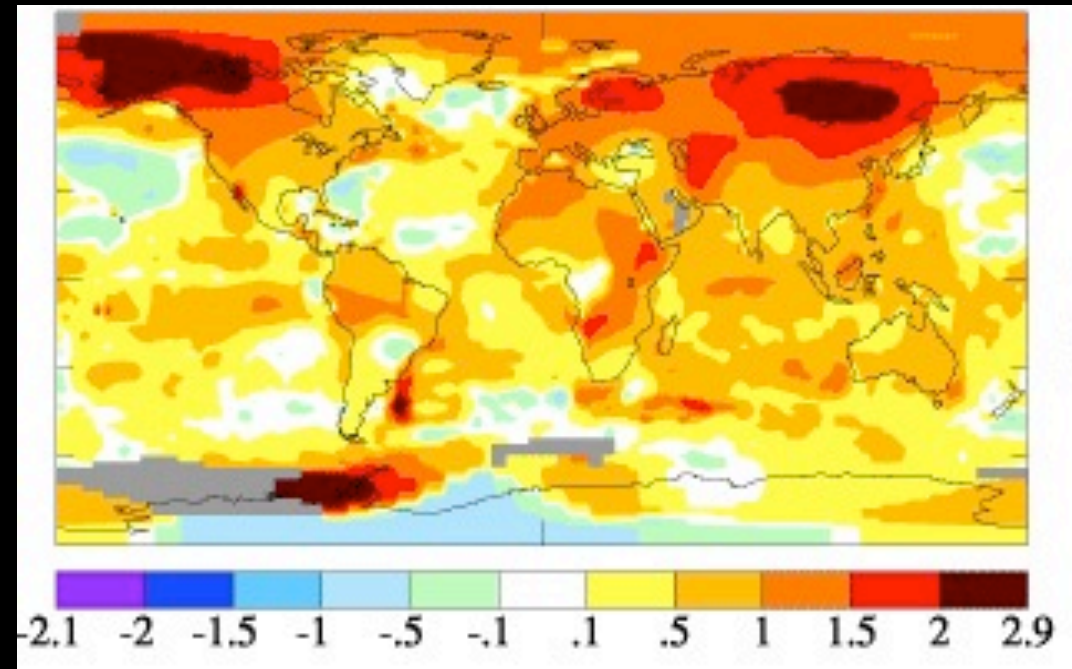
IPCC (2007)

# Température globale

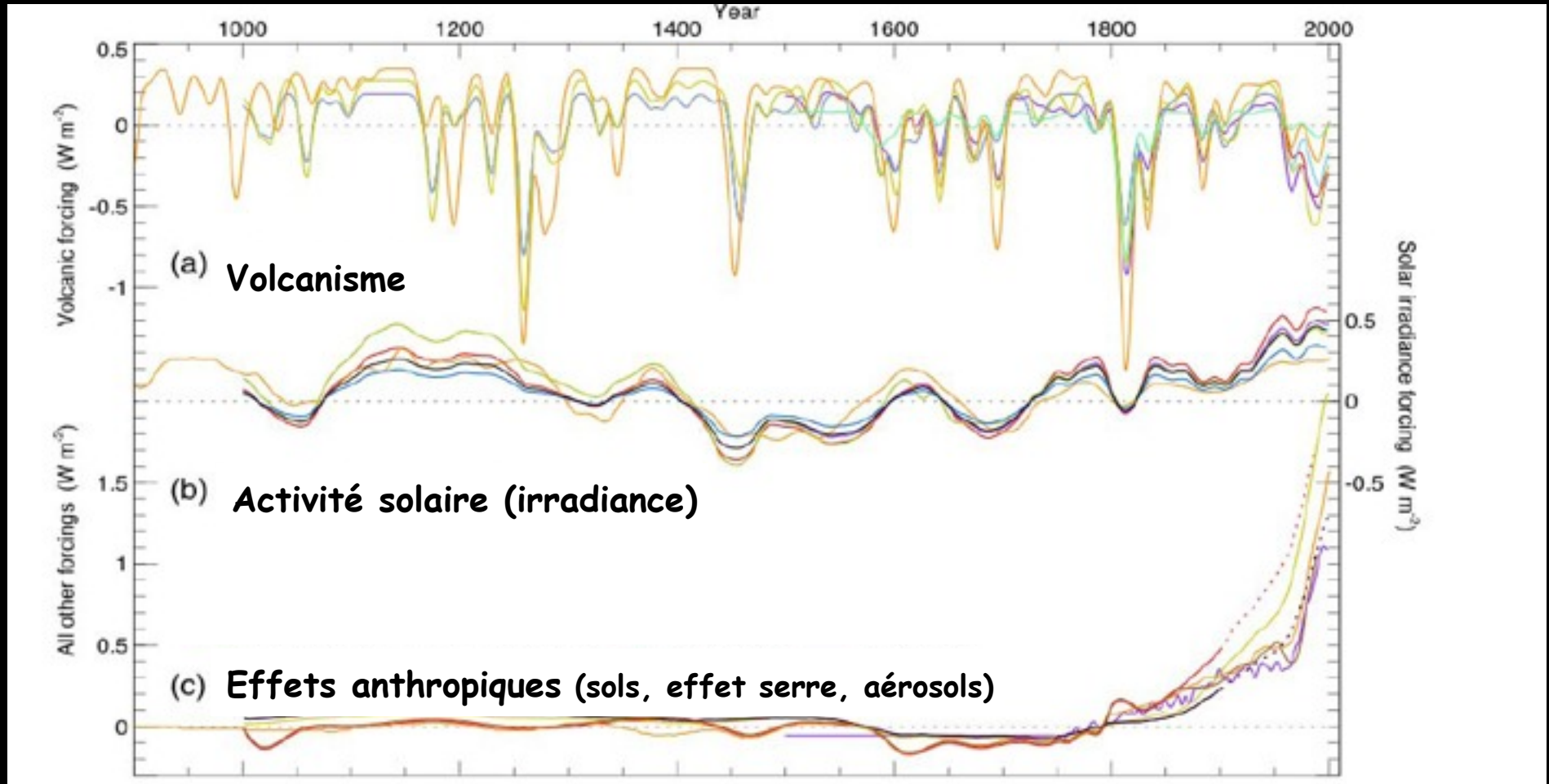
Réseau dense



Tendance 1955 - 2005

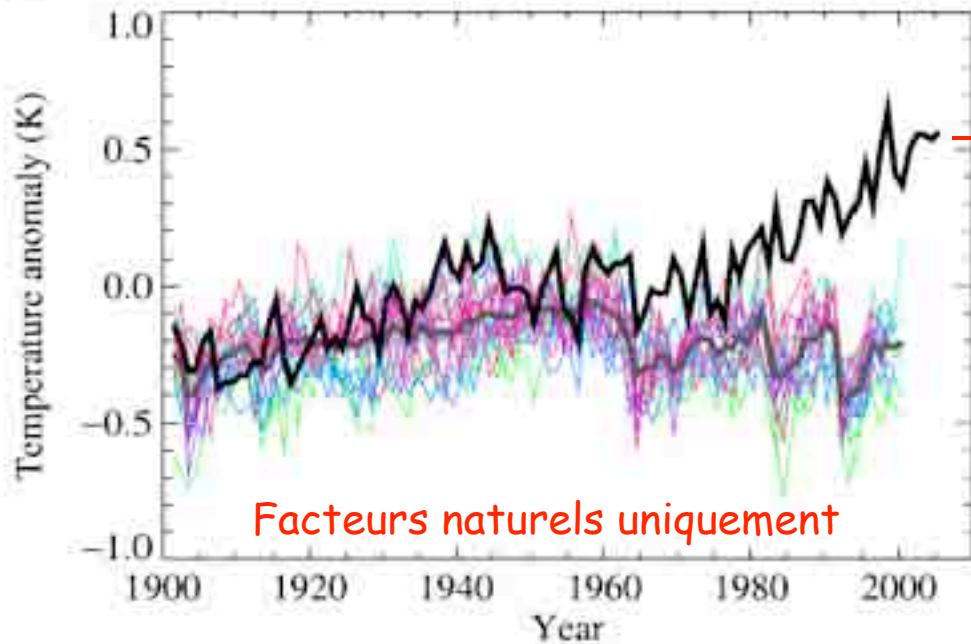


# Impact des différents facteurs sur le bilan radiatif de la Terre

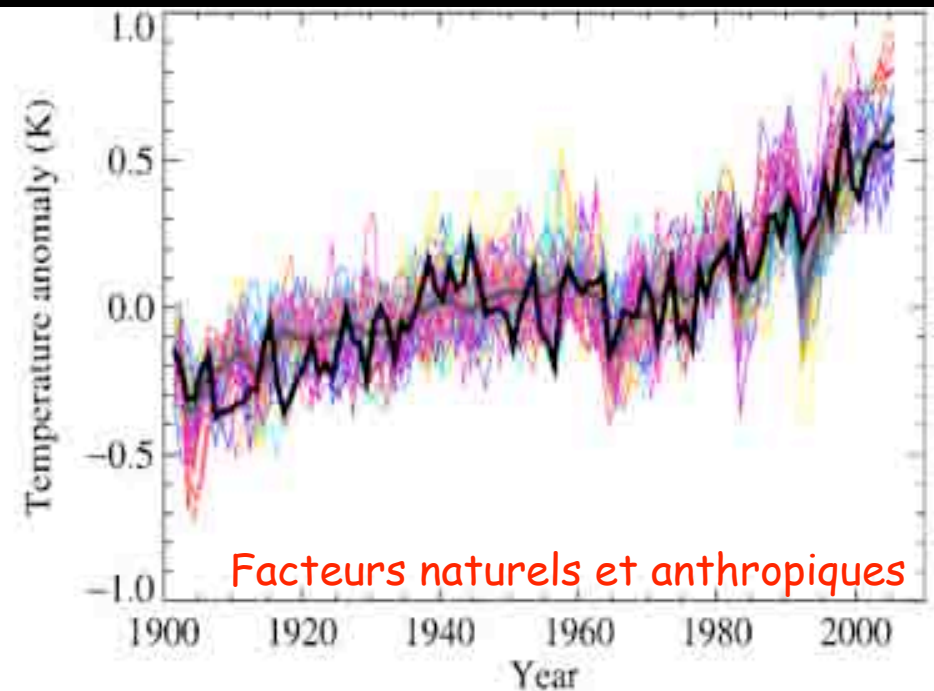




# Simulation de la température globale

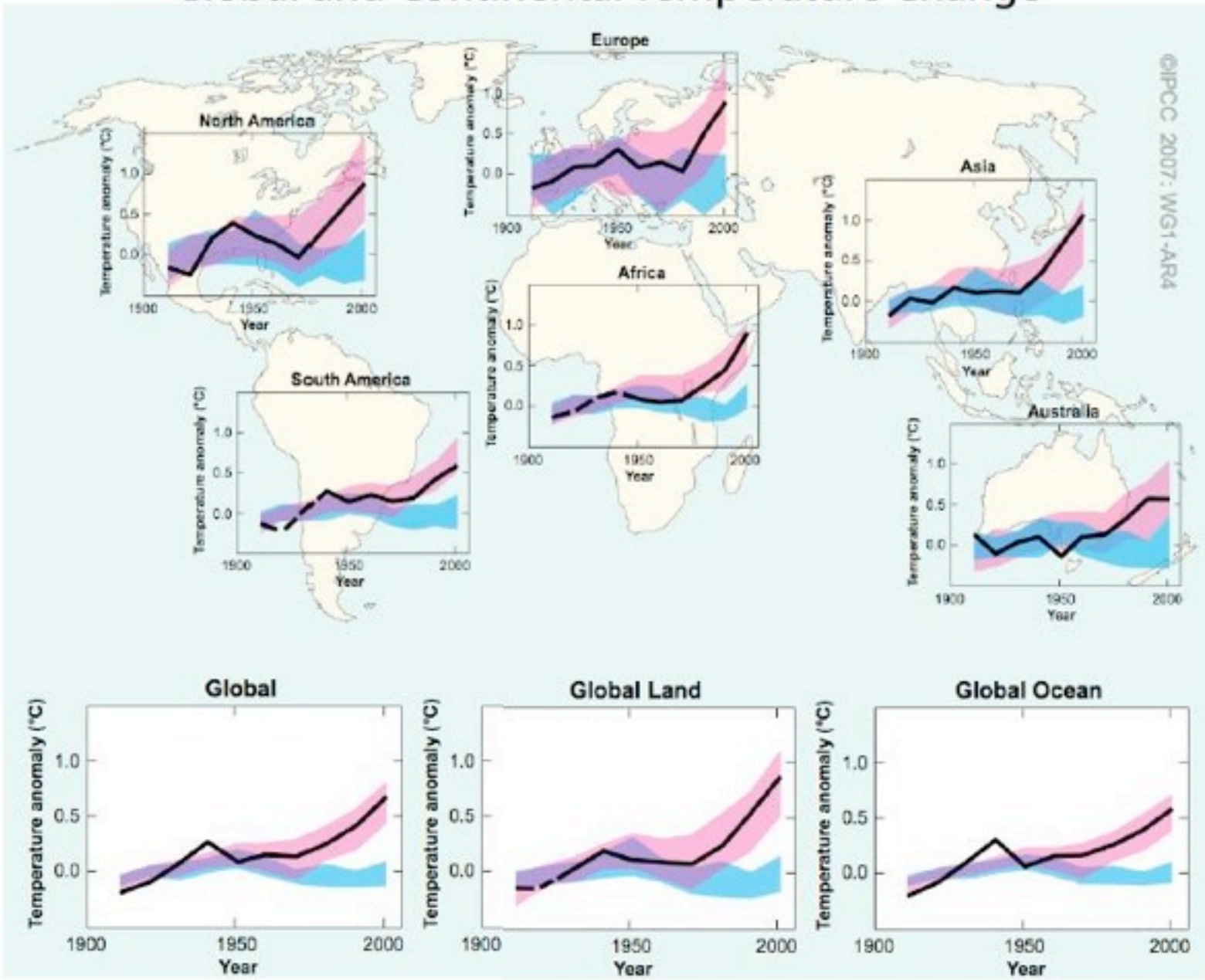


Le réchauffement observé depuis ~1970 ne peut s'expliquer que par l'effet des activités humaines (gaz à effet de serre)



IPCC (2007)

# Global and Continental Temperature Change



IPCC (2007)

# Les projections climatiques

# Prévision et Projection

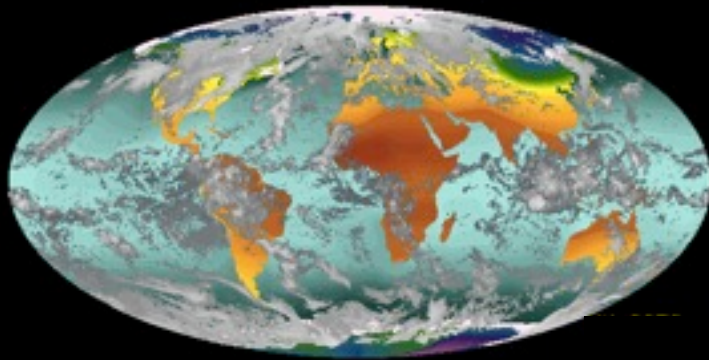
- Prévision: déterministe (la météo demain, les courants la semaine prochaine)
- Projection: probabilité d'occurrence en fonction d'un scénario



# Effort international coordonné par l'ONU

Programme mondial de recherche sur le climat (WCRP)  
Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)

Plus de 20 modèles de climat



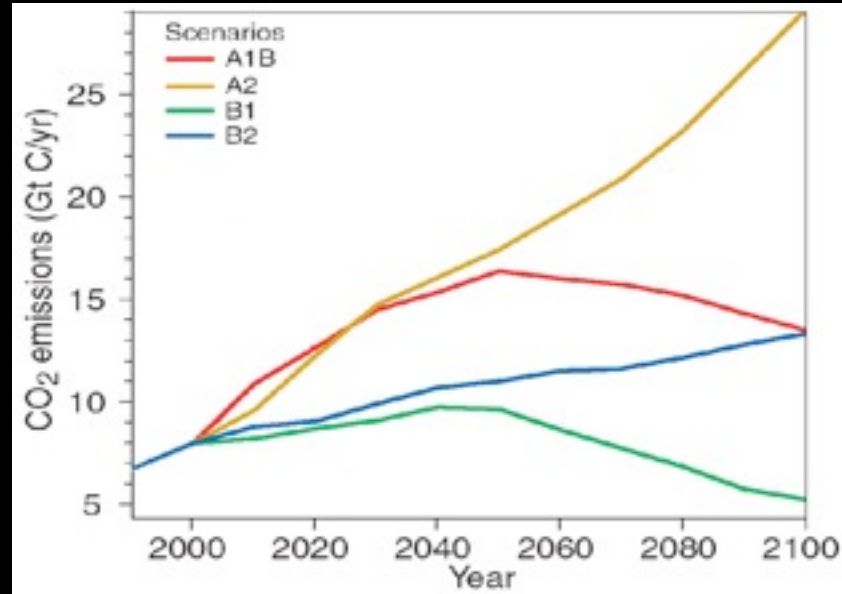
GIEC\*:

- Synthèse des connaissances
- 4 ans de travail
- 600 auteurs
- 3 tomes de 1000 pp.

\*Groupe d'experts Intergouvernemental sur  
l'Evolution du Climat

- CCSM3            NCAR (USA)
- CGCM3.1(T47)   CCCMA (Canada)
- CNRM-CM3        Météo-France/CNRM (France)
- CSIRO-Mk3.0     CSIRO (Australia)
- ECHAM5/MPI-OM   MPI-M (Germany)
- FGOALS-g1.0     LASG/IAP (China)
- GFDL-CM2.0       GFDL (USA)
- GFDL-CM2.1       GFDL (USA)
- GISS-AOM         NASA/GISS (USA)
- GISS-EH           NASA/GISS (USA)
- GISS-ER           NASA/GISS (USA)
- INM-CM3           INM (Russia)
- IPSL-CM4           IPSL (France)
- MIROC3.2         CCSR/NIES/FRCGC (Japan)
- MIROC3.2         CCSR/NIES/FRCGC (Japan)
- MRI-CGM2.3.2    MRI (Japan) (FC)
- PCM                NCAR (USA)
- UKMO-HadCM3    Hadley Centre (UK)
- UKMO-HadGEM1   Hadley Centre (UK)

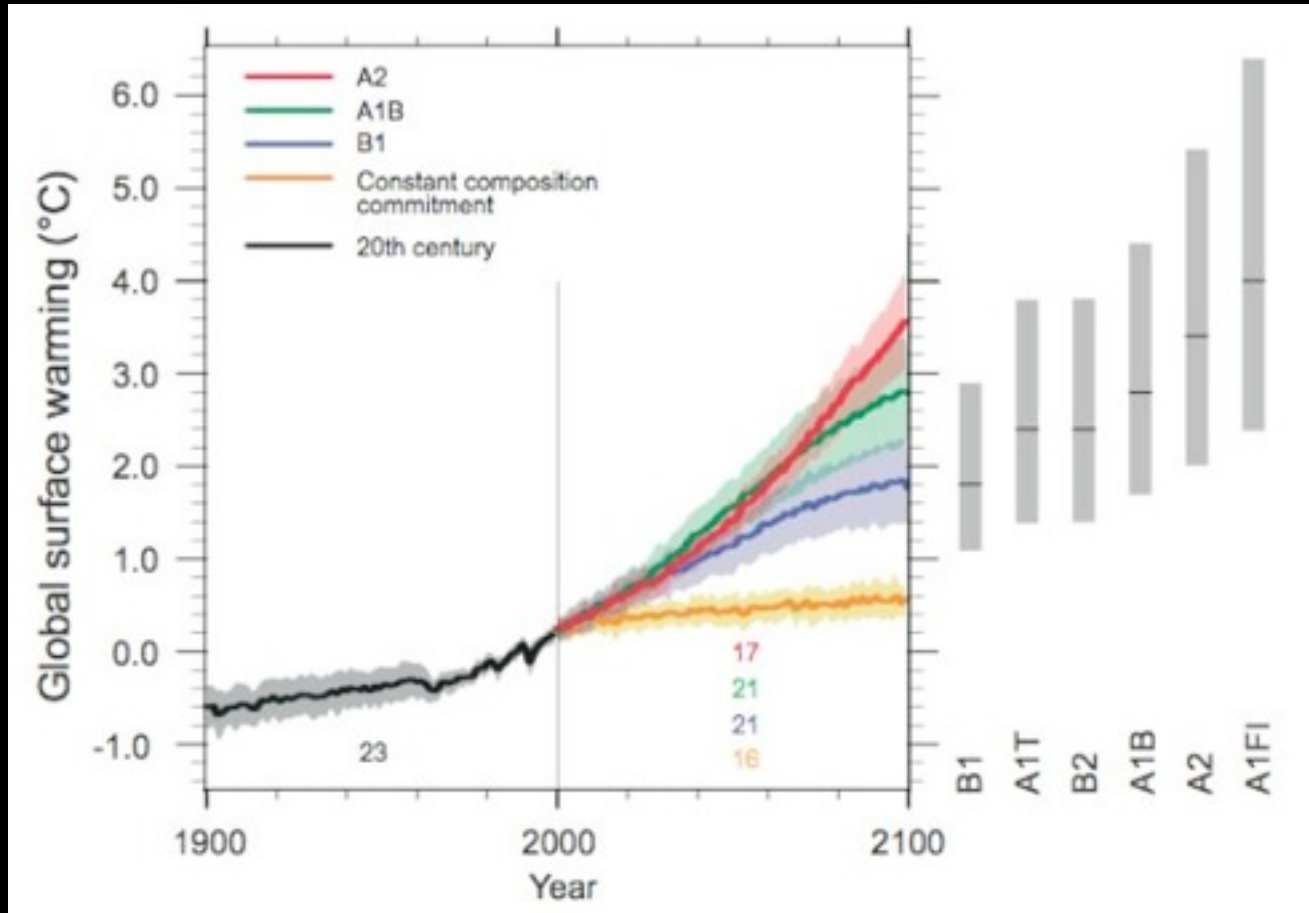
# Projections des variations de la température globale (IPCC 2007)



Différent « scénarios » d'émission de CO<sub>2</sub> sont fournis par les économistes

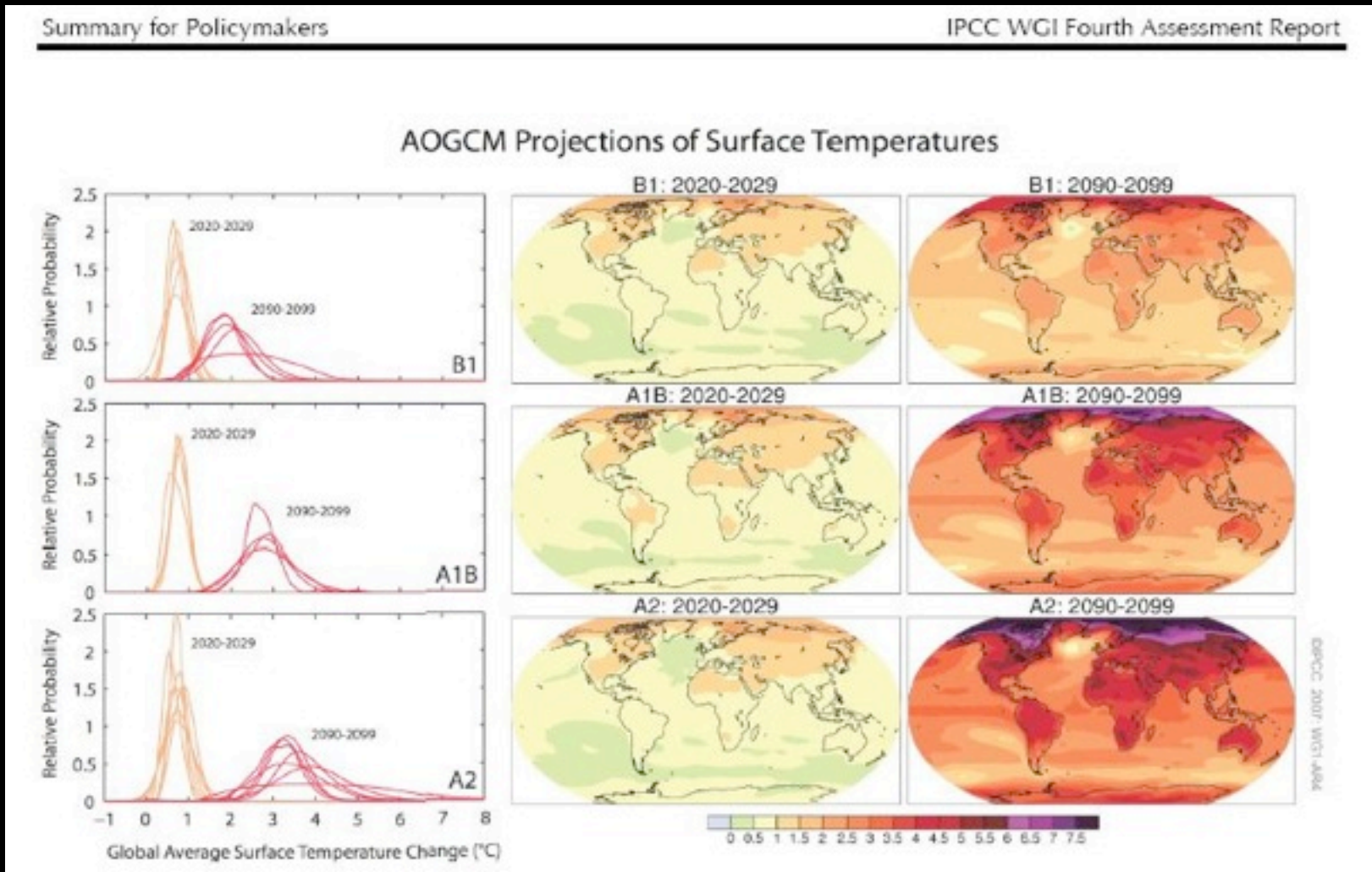
# Projections des variations de la température globale (IPCC 2007)

IPCC (2007)



La physique et la dynamique des modèles de climat répondent à ce forçage

# Projections des variations de la température

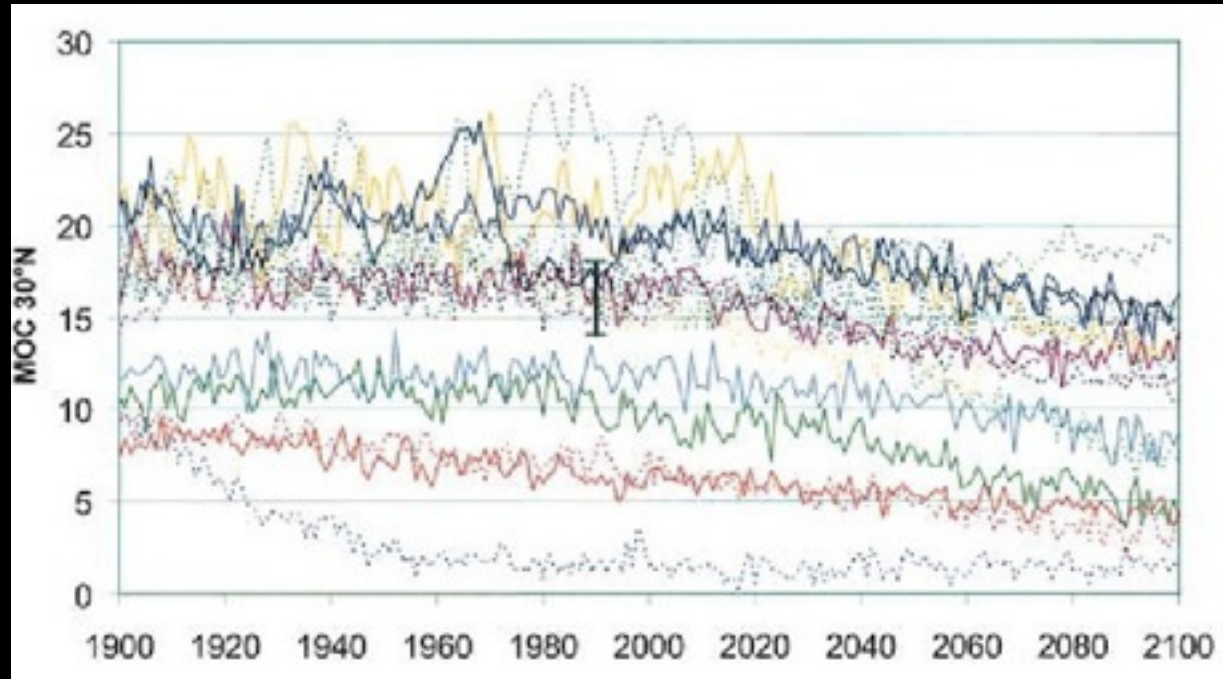


Continents se réchauffent plus vite, l'océan amorti le réchauffement



# Modification de la circulation thermohaline ?

## Evolution de la circulation thermohaline

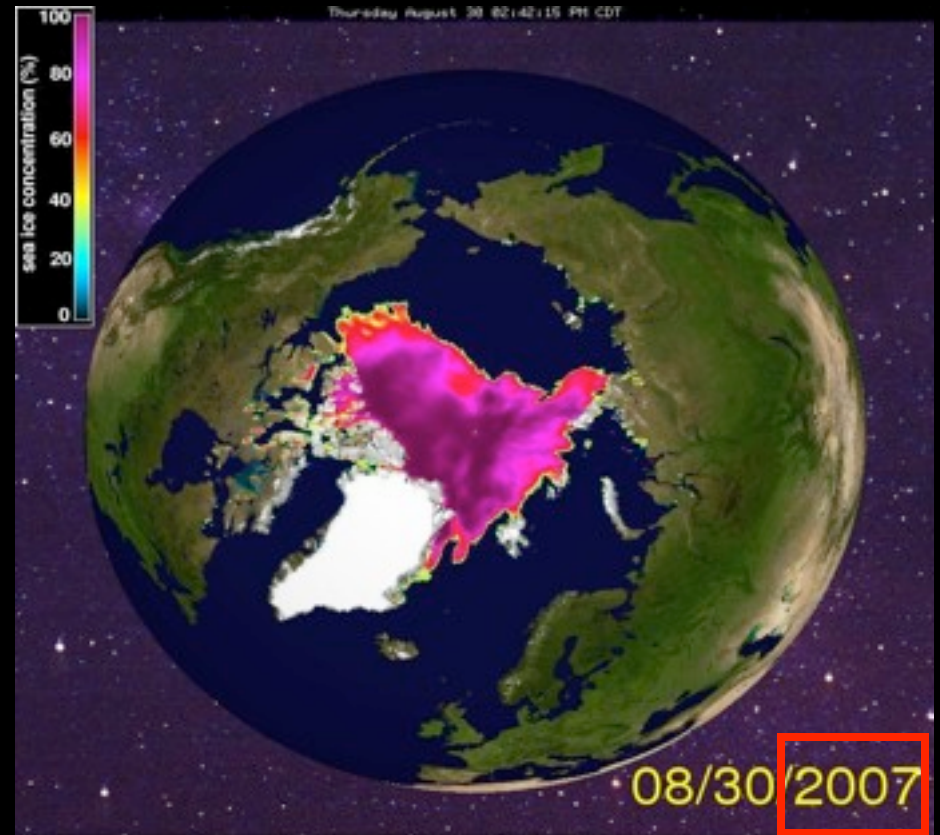
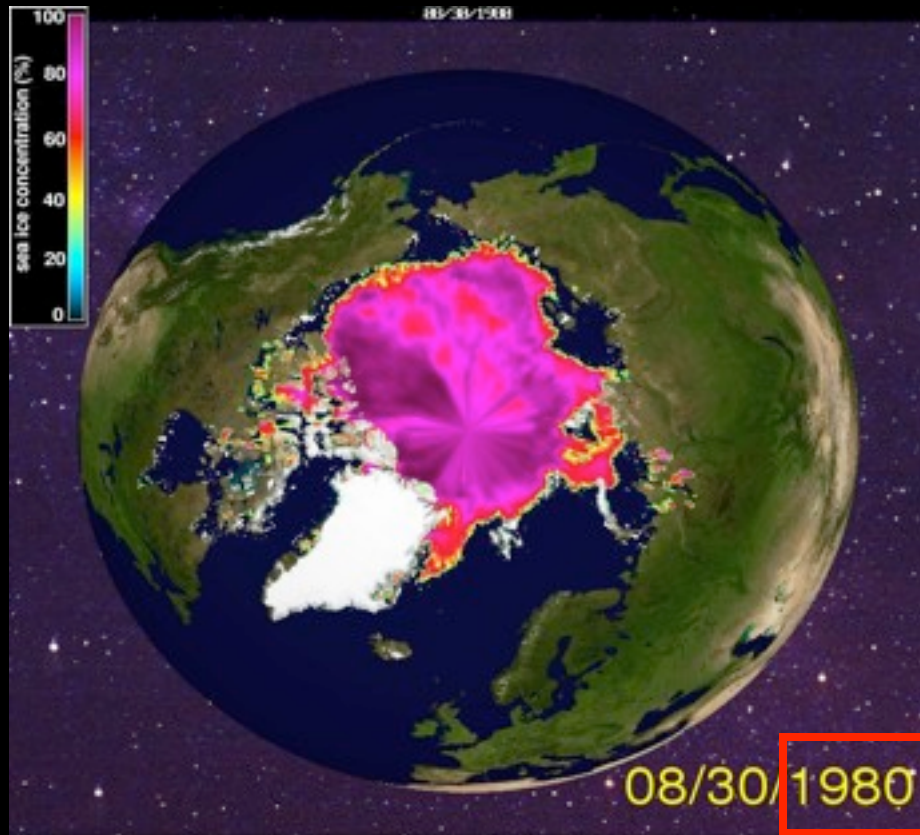


Modèles CMIP3 (2007)



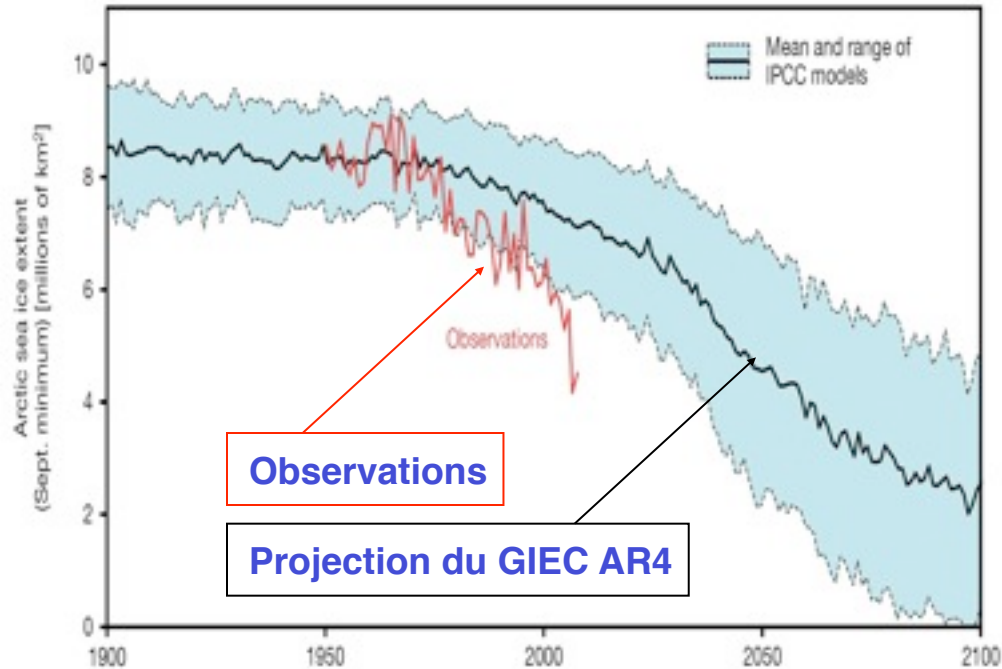
# Modification de la banquise arctique

## Observations, banquise d'été

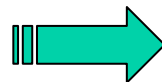




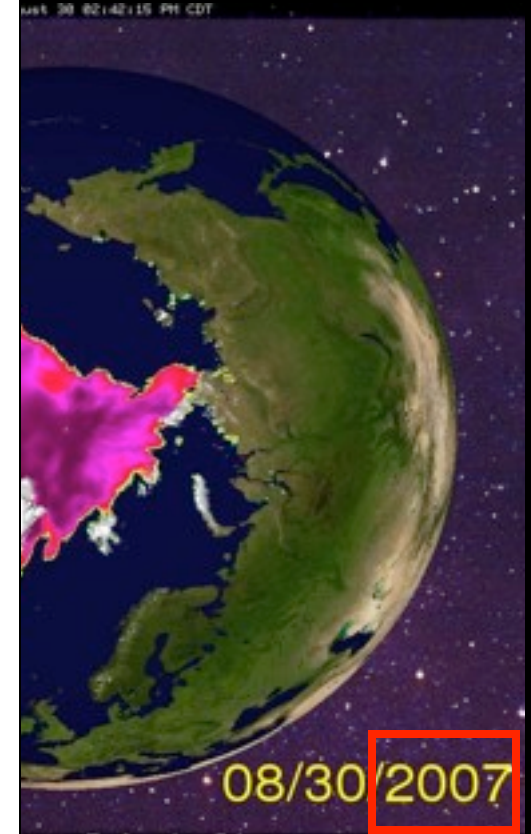
# Modification de la banquise arctique



Les modèles de climat semblent sous-estimer la fonte de la banquise



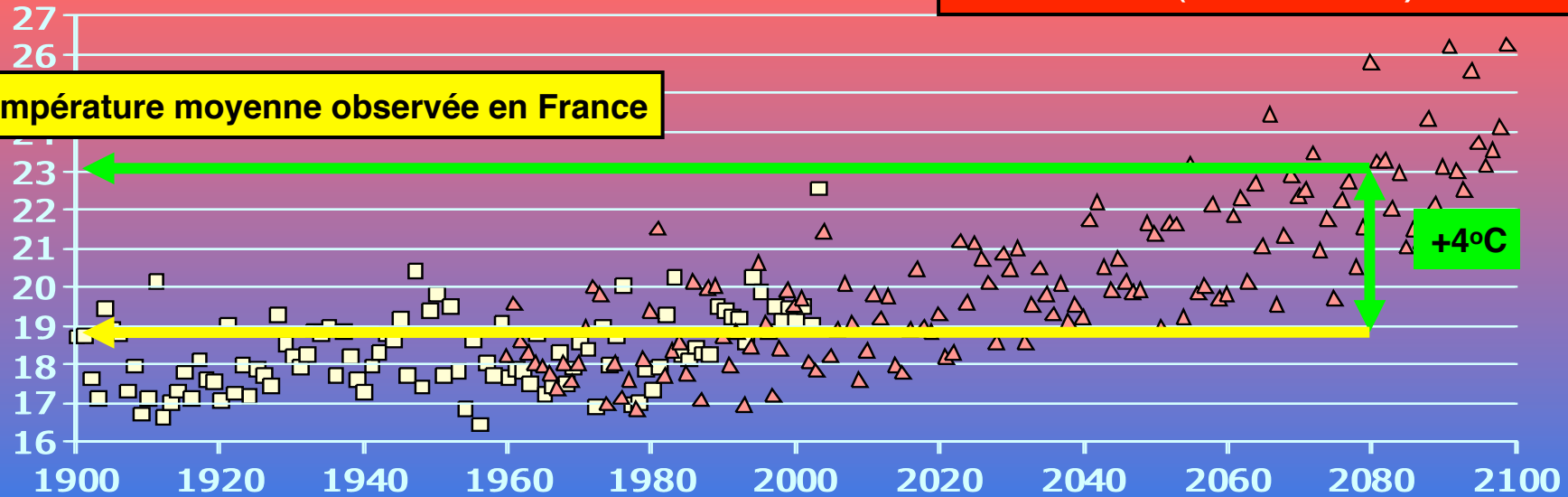
Présence de phénomènes à seuil,  
Sous-estimation des rétroactions



# Été en France: 20<sup>ème</sup> et 21<sup>ème</sup> siècles

Température moyenne simulée en France  
(Scenario A1B)

Température moyenne observée en France



L'été 2003 peut être considéré comme un avant gout de nos étés a la fin du siècle:  
Ce sera l'été « normal » (cad une fois sur deux de 2080), et un été froid pour 2100.

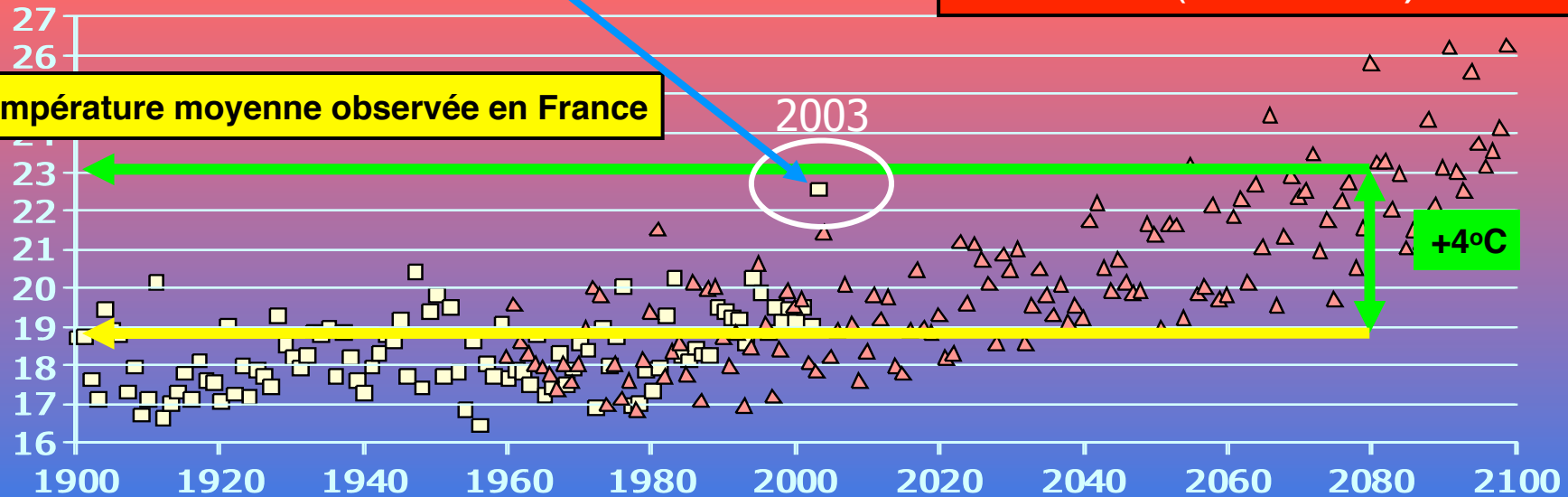


# Été en France: 20<sup>ème</sup> et 21<sup>ème</sup> siècles

Anomalie 2003 = 3,7°C

Température moyenne simulée en France  
(Scenario A1B)

Température moyenne observée en France



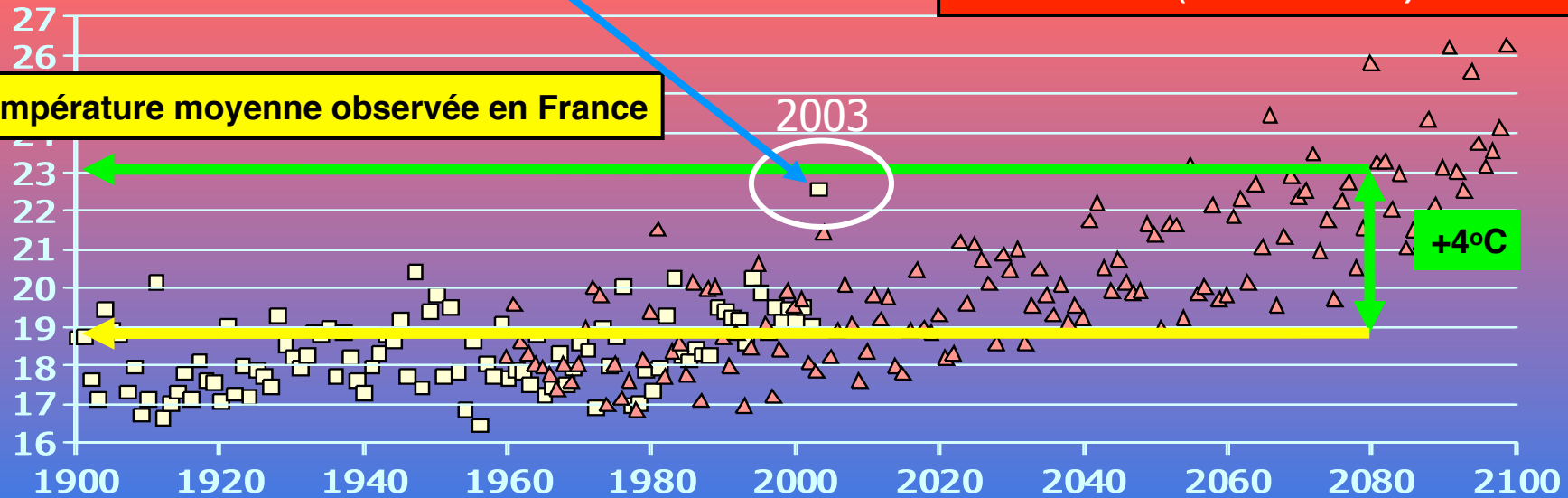
L'été 2003 peut être considéré comme un avant gout de nos étés a la fin du siècle:  
Ce sera l'été « normal » (cad une fois sur deux de 2080), et un été froid pour 2100.

# Été en France: 20<sup>ème</sup> et 21<sup>ème</sup> siècles

Anomalie 2003 = 3,7°C

Température moyenne simulée en France  
(Scenario A1B)

Température moyenne observée en France



L'été 2003 peut être considéré comme un avant gout de nos étés a la fin du siècle:  
Ce sera l'été « normal » (cad une fois sur deux de 2080), et un été froid pour 2100.



**+ 4°C**  
(climat)

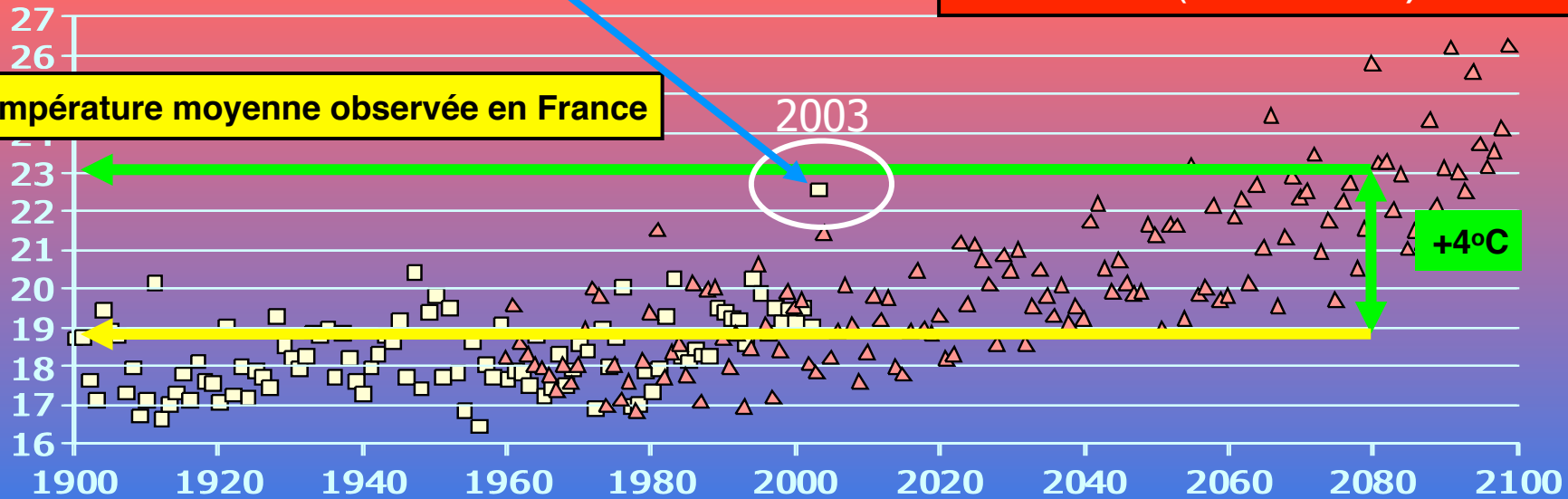
Source: C. Cassou

# Été en France: 20<sup>ème</sup> et 21<sup>ème</sup> siècles

Anomalie 2003 = 3,7°C

Température moyenne simulée en France  
(Scenario A1B)

Température moyenne observée en France



L'été 2003 peut être considéré comme un avant gout de nos étés a la fin du siècle:  
Ce sera l'été « normal » (cad une fois sur deux de 2080), et un été froid pour 2100.



**+ 4°C**  
(climat)



**40°C**  
(météo)



Source: C. Cassou

# Certitudes et incertitudes

Les activités humaines  
ont modifié le climat global



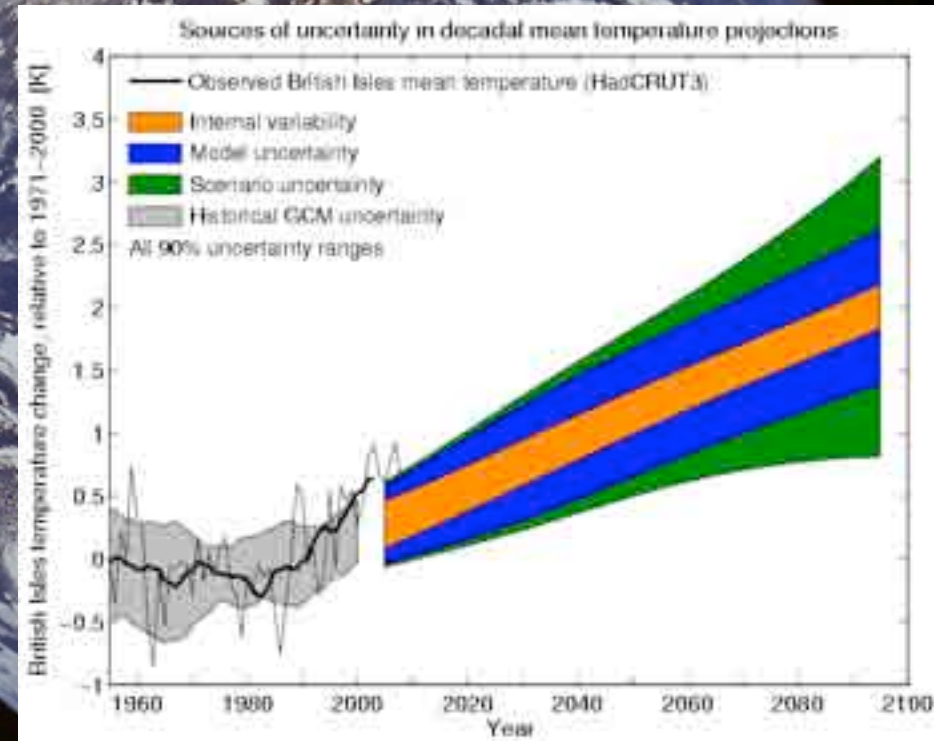


# Certitudes et incertitudes

Les activités humaines  
ont modifié le climat global

## Incertitudes sur :

- l'ampleur
- les effets régionaux
- les risques de changement rapide



*Hawkins and Sutton 2009*

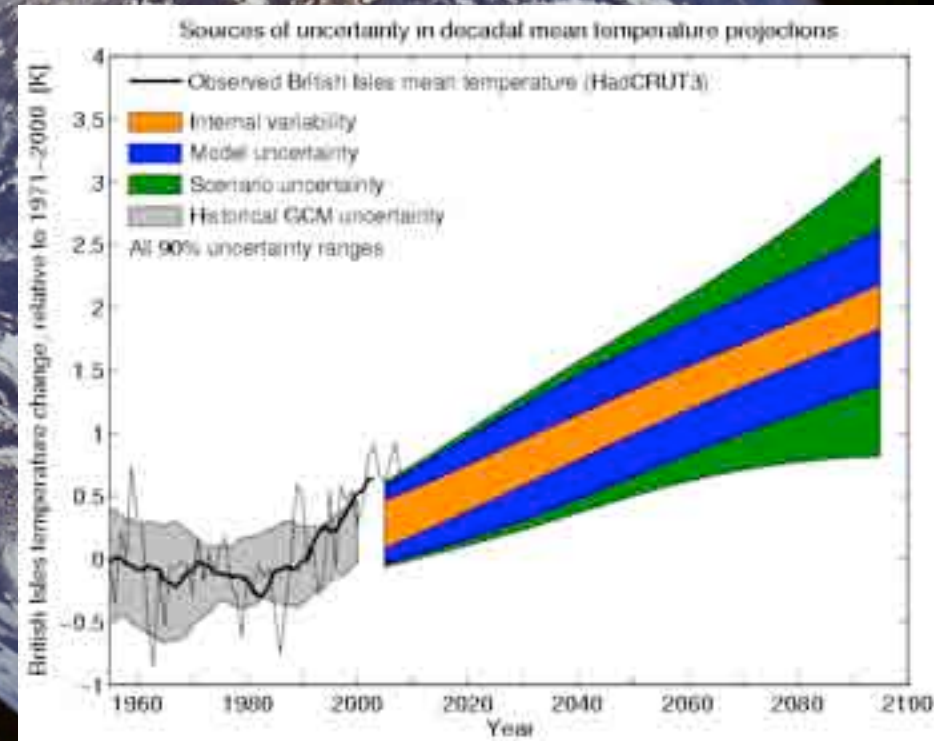
# Certitudes et incertitudes

Les activités humaines  
ont modifié le climat global

## Incertitudes sur :

- l'ampleur
- les effets régionaux
- les risques de changement rapide

La moitié des incertitudes est liée  
aux scénarios d'émissions de CO<sub>2</sub>,  
donc à nos choix de société à venir



# Résumé

- Océan, gardien des équilibres et acteur de la variabilité lente du climat
- Modélisation a fait des progrès fulgurants (théorie, expérimentation, observations)
- Science fait appel à de nombreuses disciplines
- Composante fondamentale pour anticiper les variation et l'évolution du climat

# Enjeux de recherche

Modélisation du système Terre: défi scientifique majeur du 21<sup>ème</sup> siècle (e.g. projets Manhattan, Apollo, Génome humain)

- Avancer la connaissance scientifique
- Régionalisation du changement climatique
- Prévisibilité saisonnière à décennale
- Pluridisciplinarité: coordonner des expertises
- Infrastructures de recherche



# Approche coordonnée de la modélisation du système Terre ?



En savoir plus:

Sous la direction de

CATHERINE JEANDEL  
RÉMY MOSSERI

Comité National de la Recherche Scientifique

# Le climat à découvert

Outils et méthodes  
en recherche climatique

[Eric.Guilyardi@locean-ipsl.upmc.fr](mailto:Eric.Guilyardi@locean-ipsl.upmc.fr)

CNRS EDITIONS