

Modéliser l'océan

pour comprendre et anticiper les
variations du climat



Eric Guilyardi

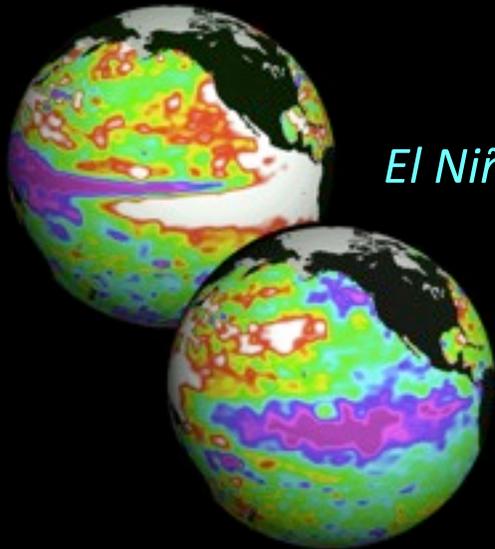
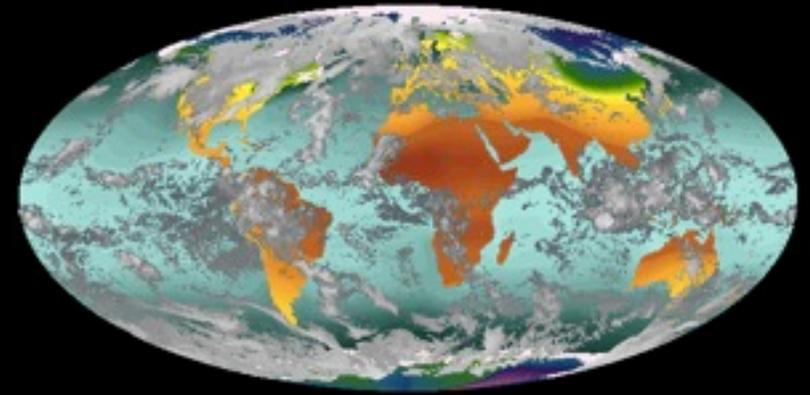


Collège de France, 27 mai 2011

Océan et climat

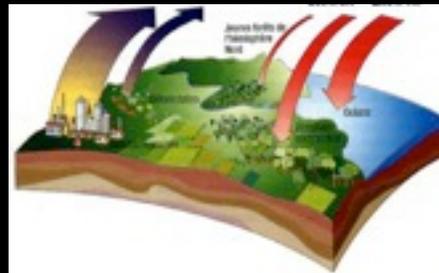
Gardien des équilibres...

...acteur des variations lentes du climat

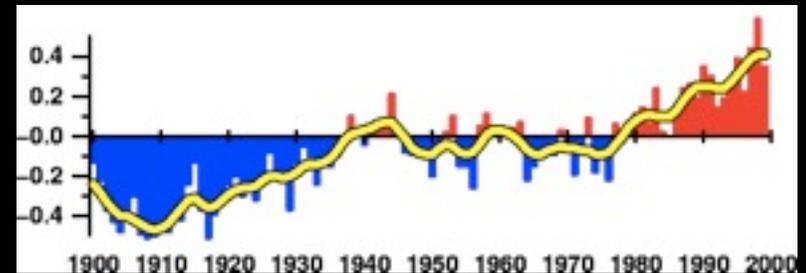


El Niño

Cycle du carbone



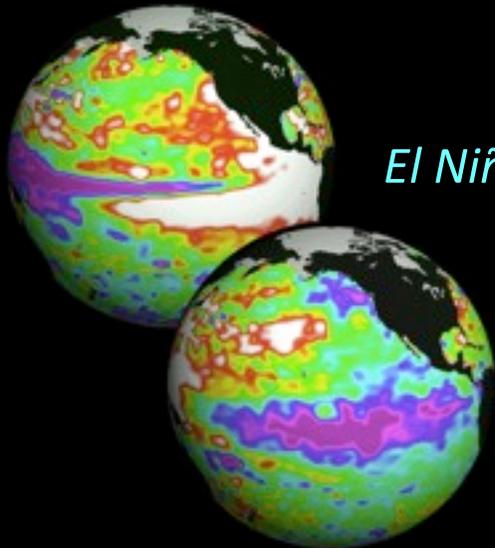
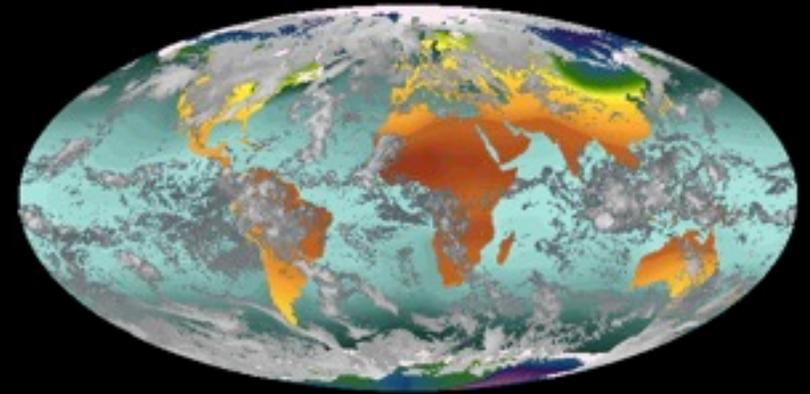
Réchauffement planétaire



Océan et climat

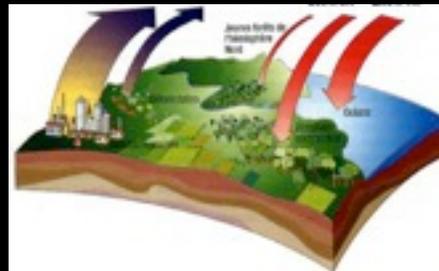
Gardien des équilibres...

...acteur des variations lentes du climat

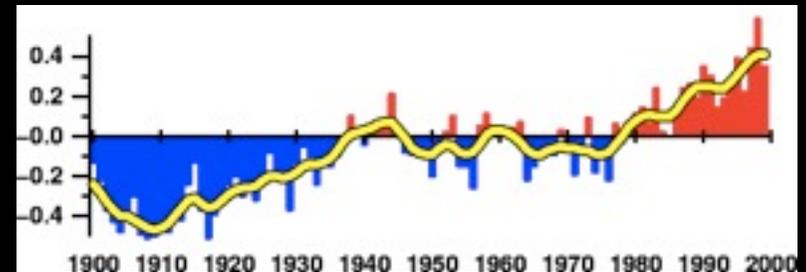


El Niño

Cycle du carbone



Réchauffement planétaire



→ **Source de prévisibilité**

Saison
Pluri-annuel
Décennal
Séculaire

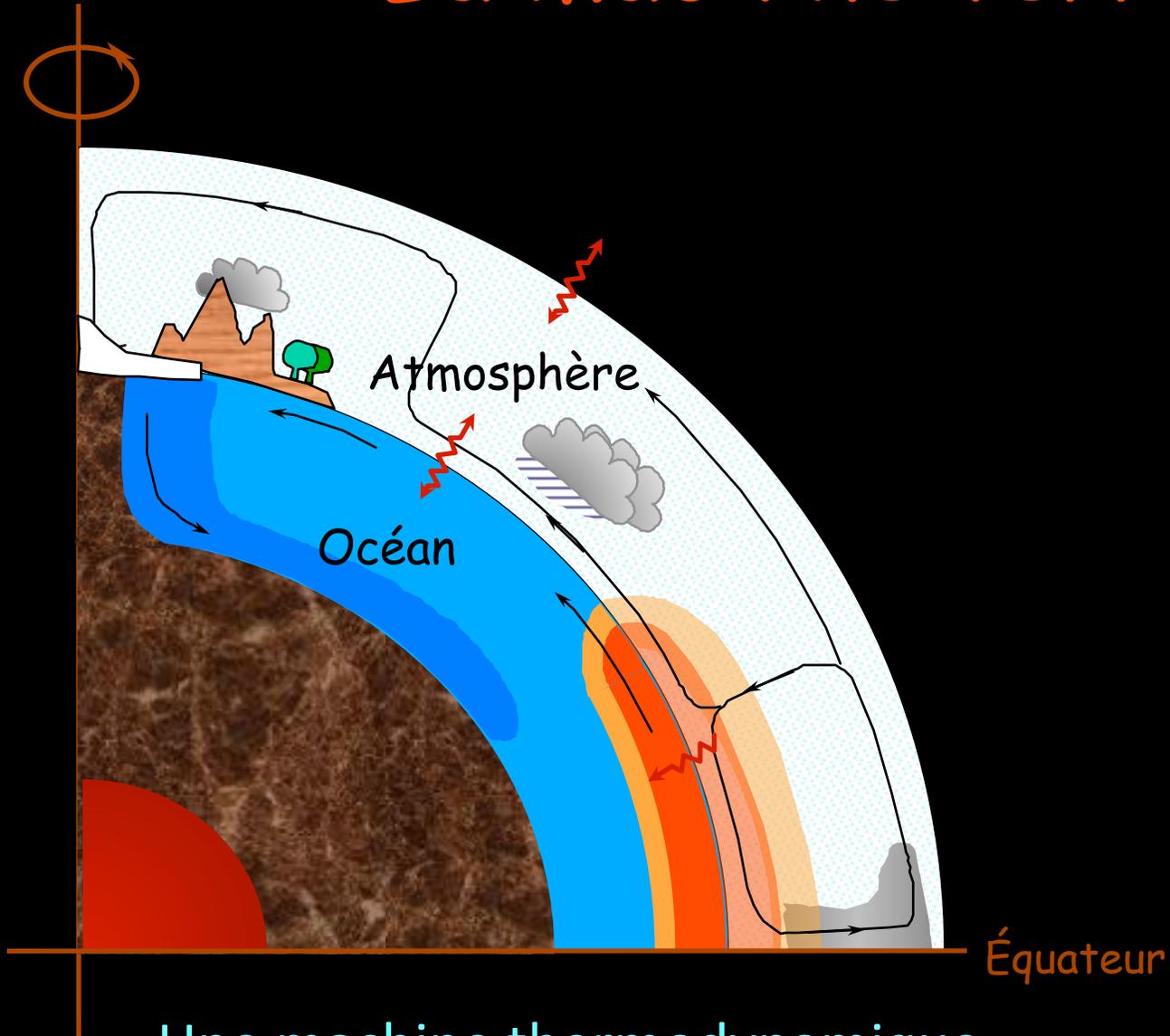
Plan de l'exposé

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

- Enjeux

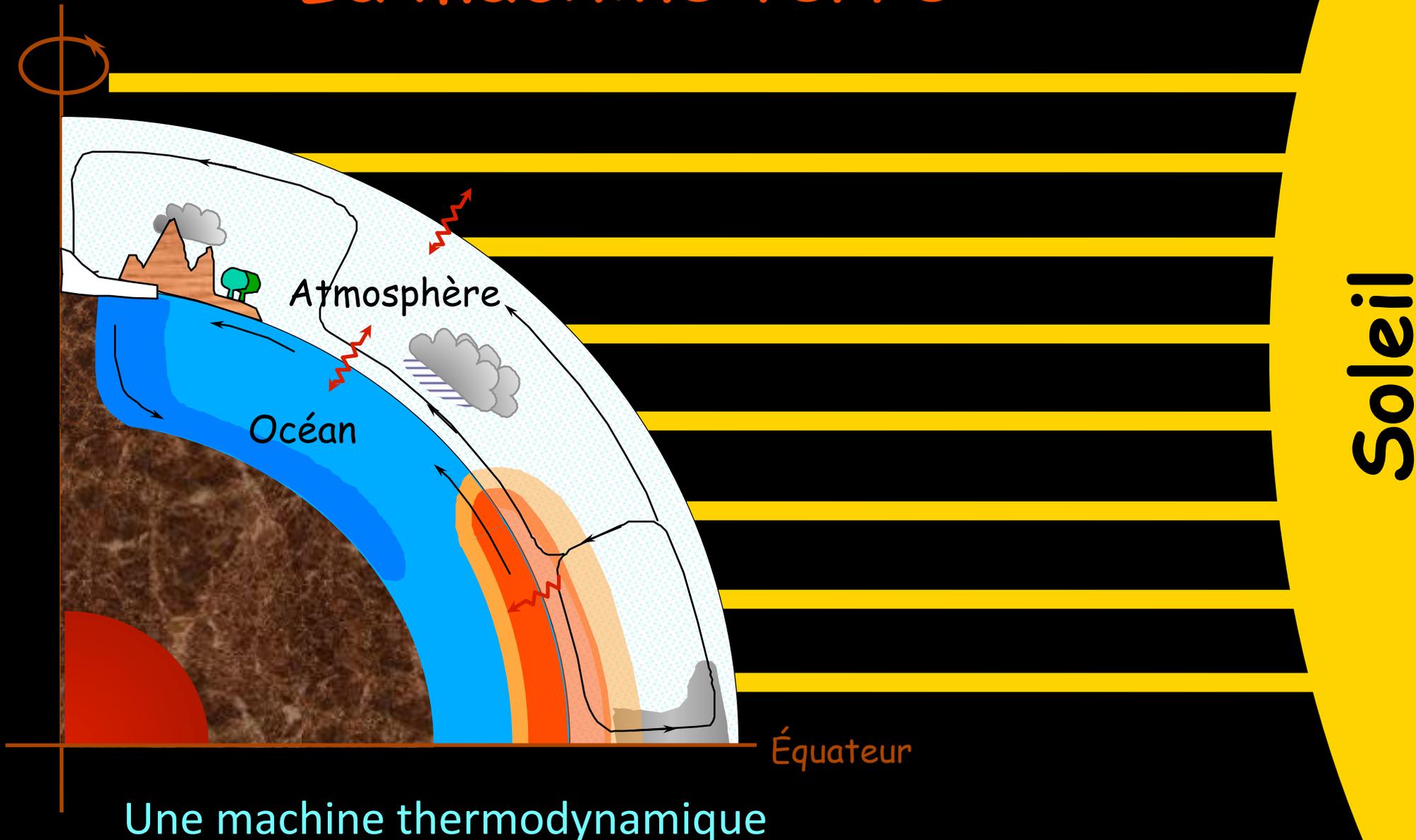
1 - La machine climatique et le rôle de l'océan

La machine terre

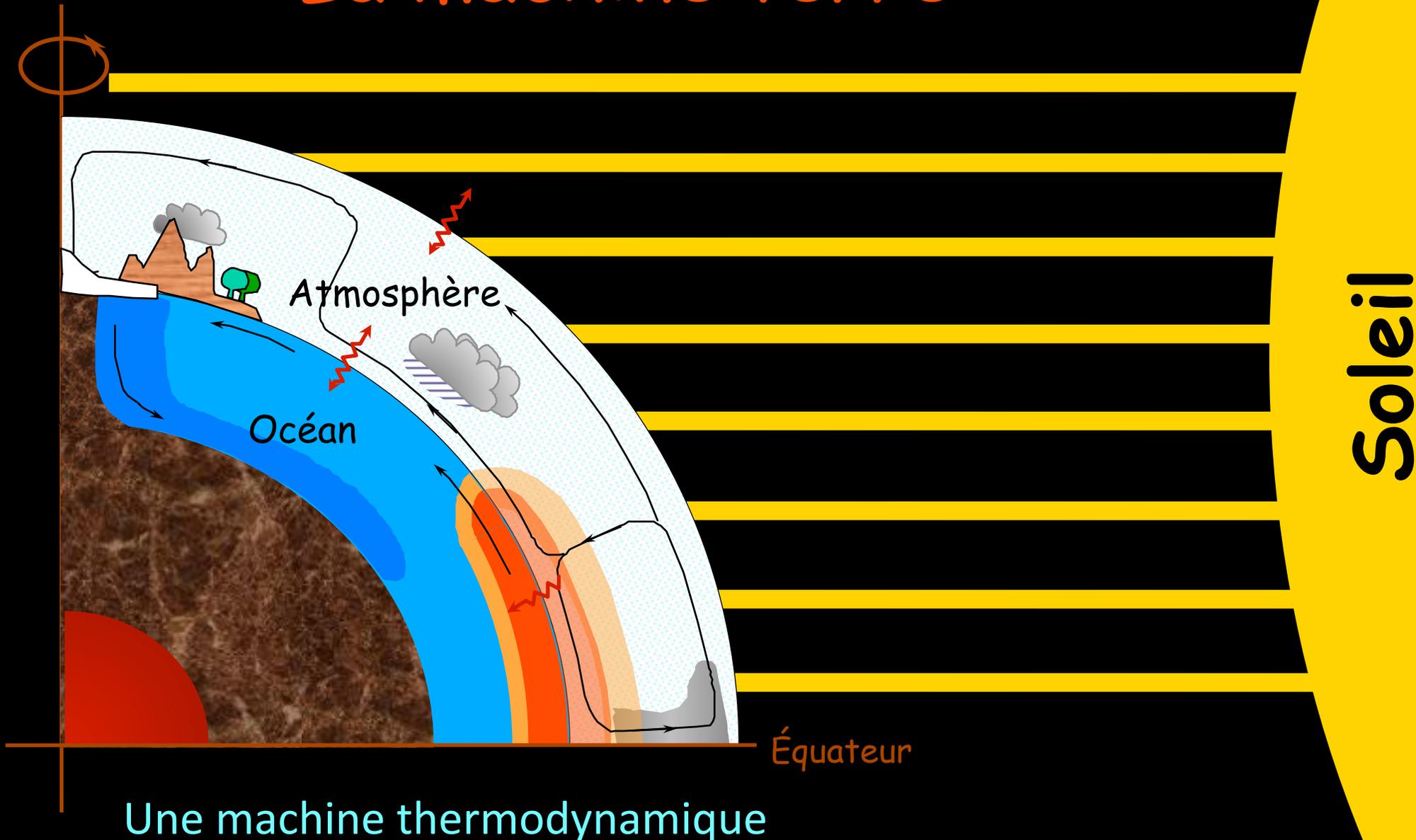


Une machine thermodynamique

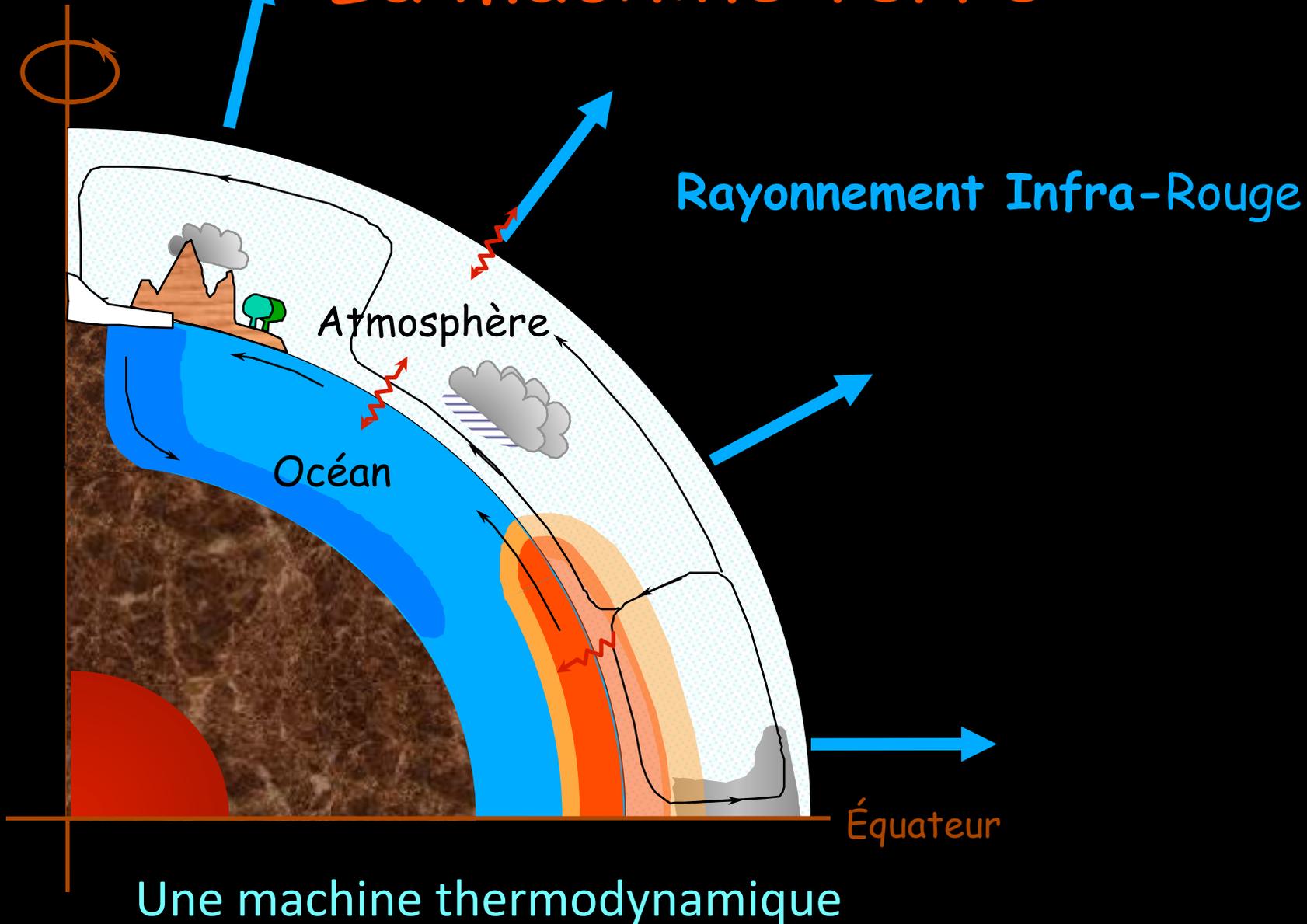
La machine terre



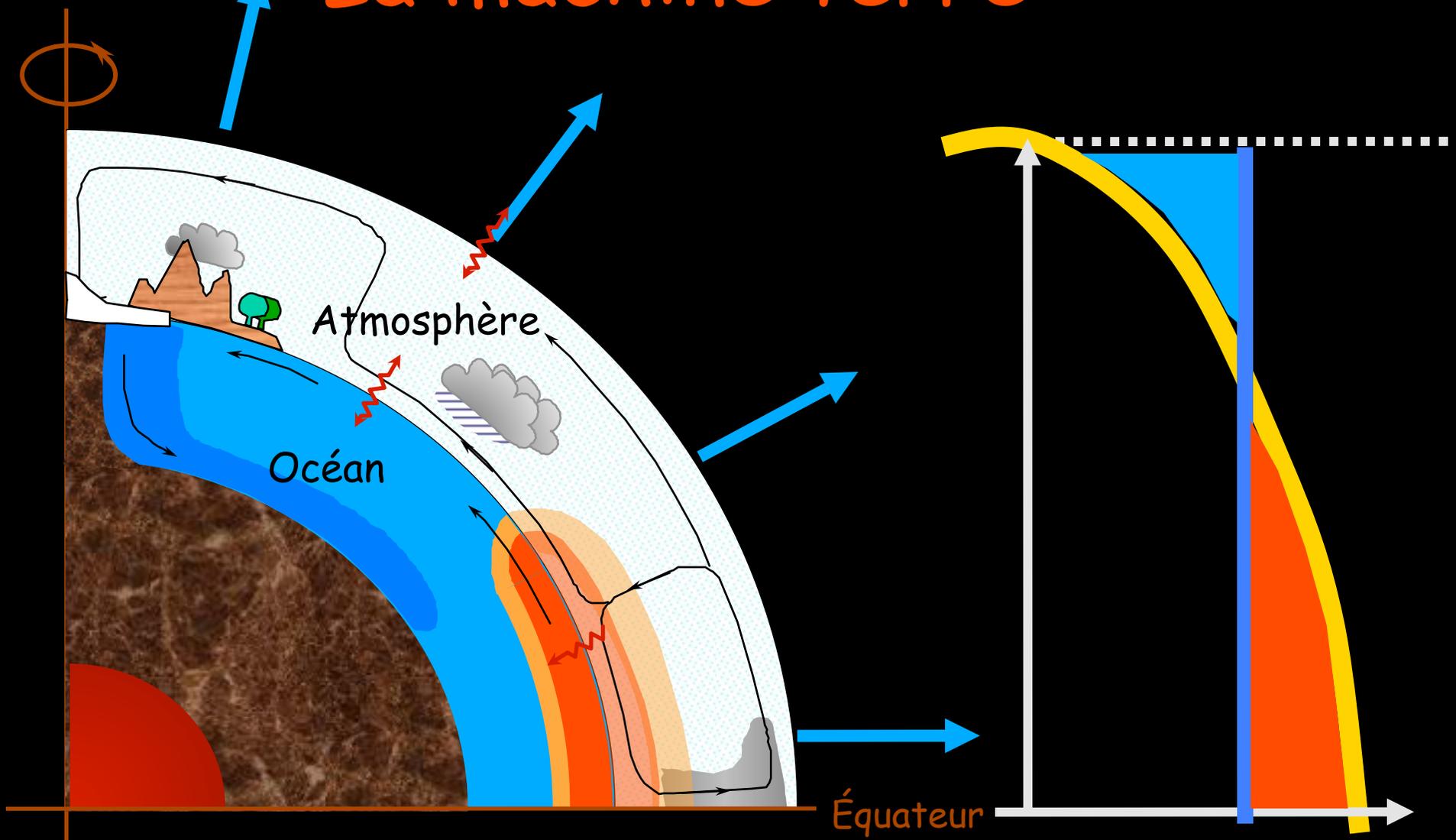
La machine terre



La machine terre



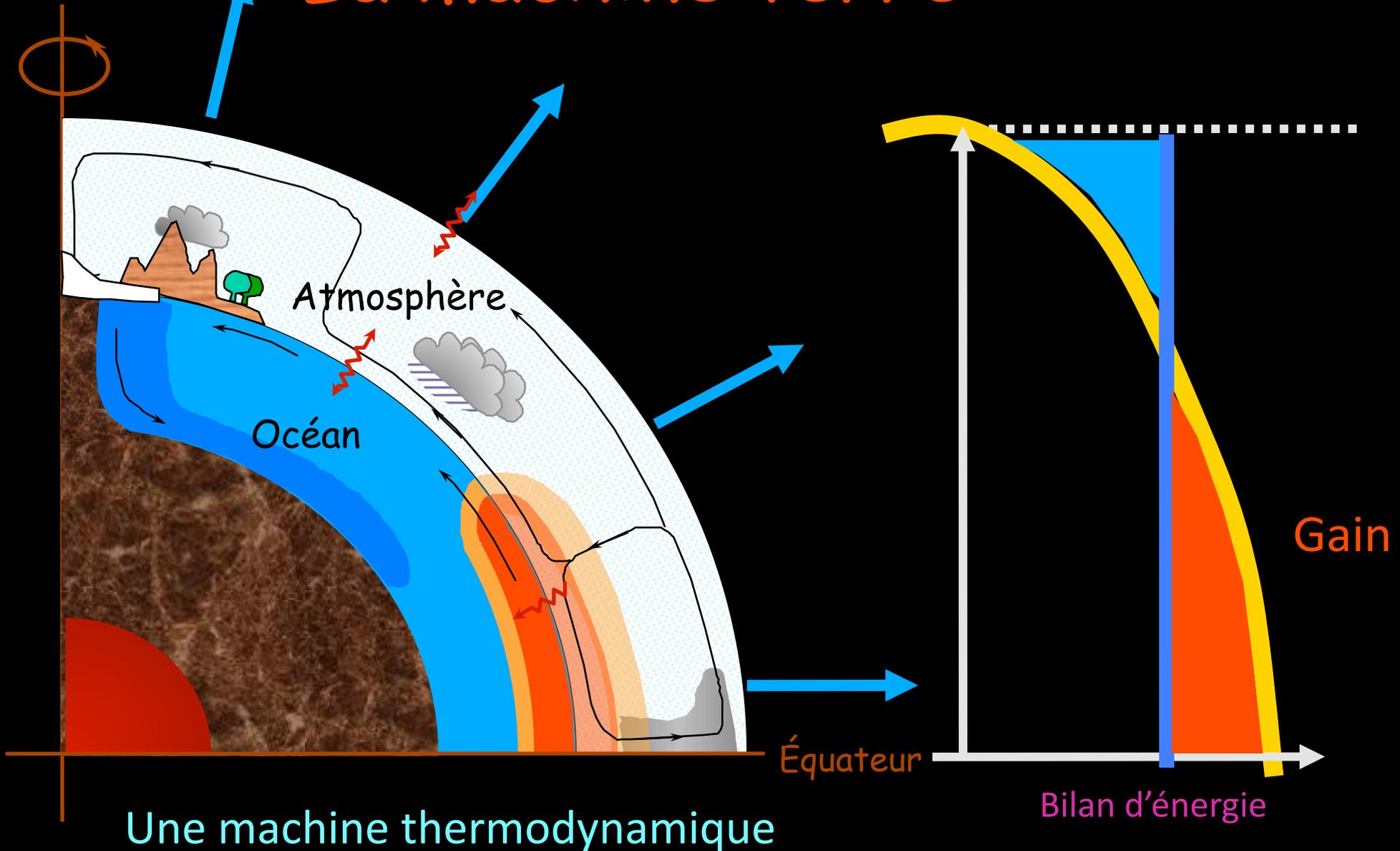
La machine terre



Une machine thermodynamique

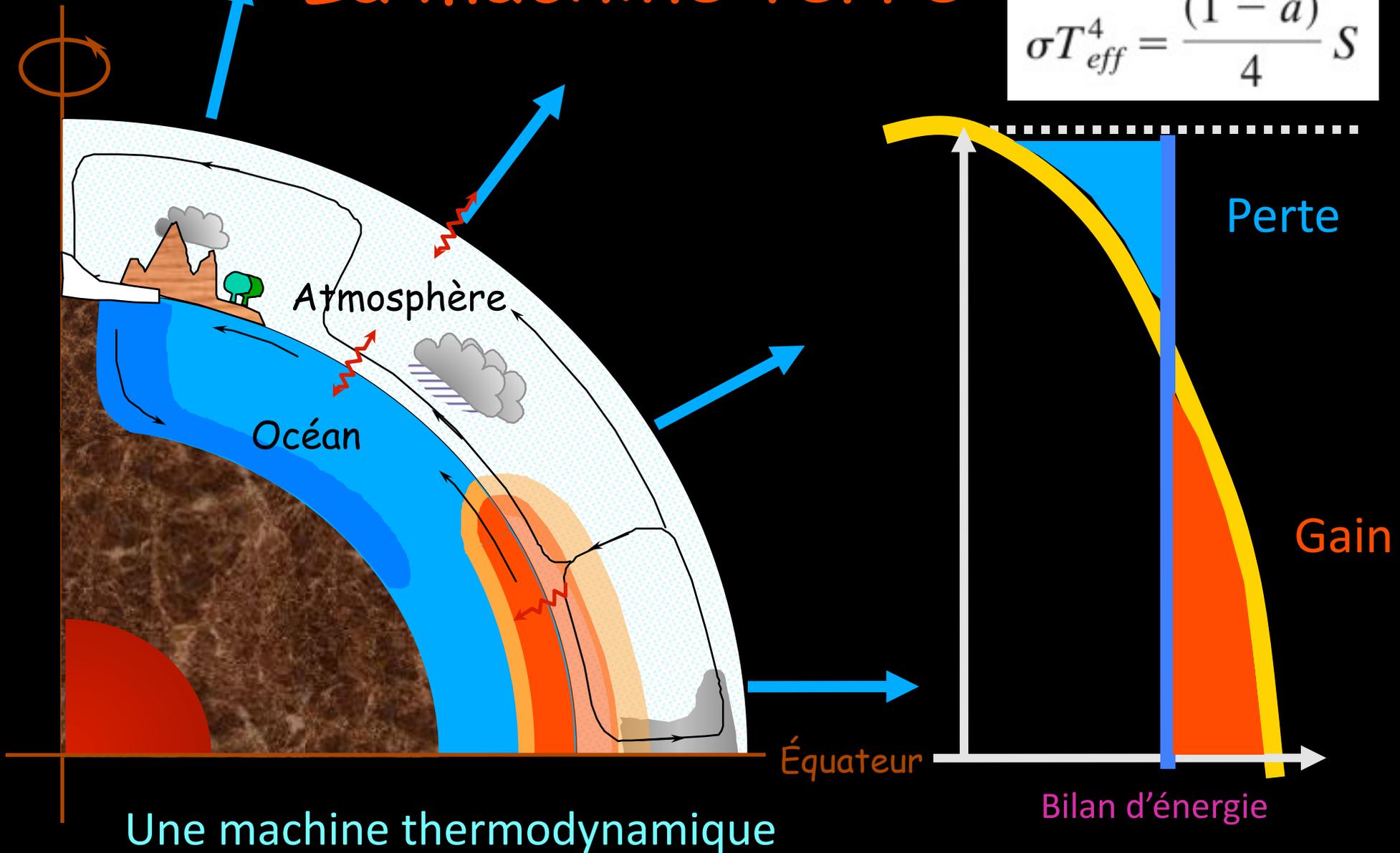
Bilan d'énergie

La machine terre



La machine terre

$$\sigma T_{eff}^4 = \frac{(1 - a)}{4} S$$



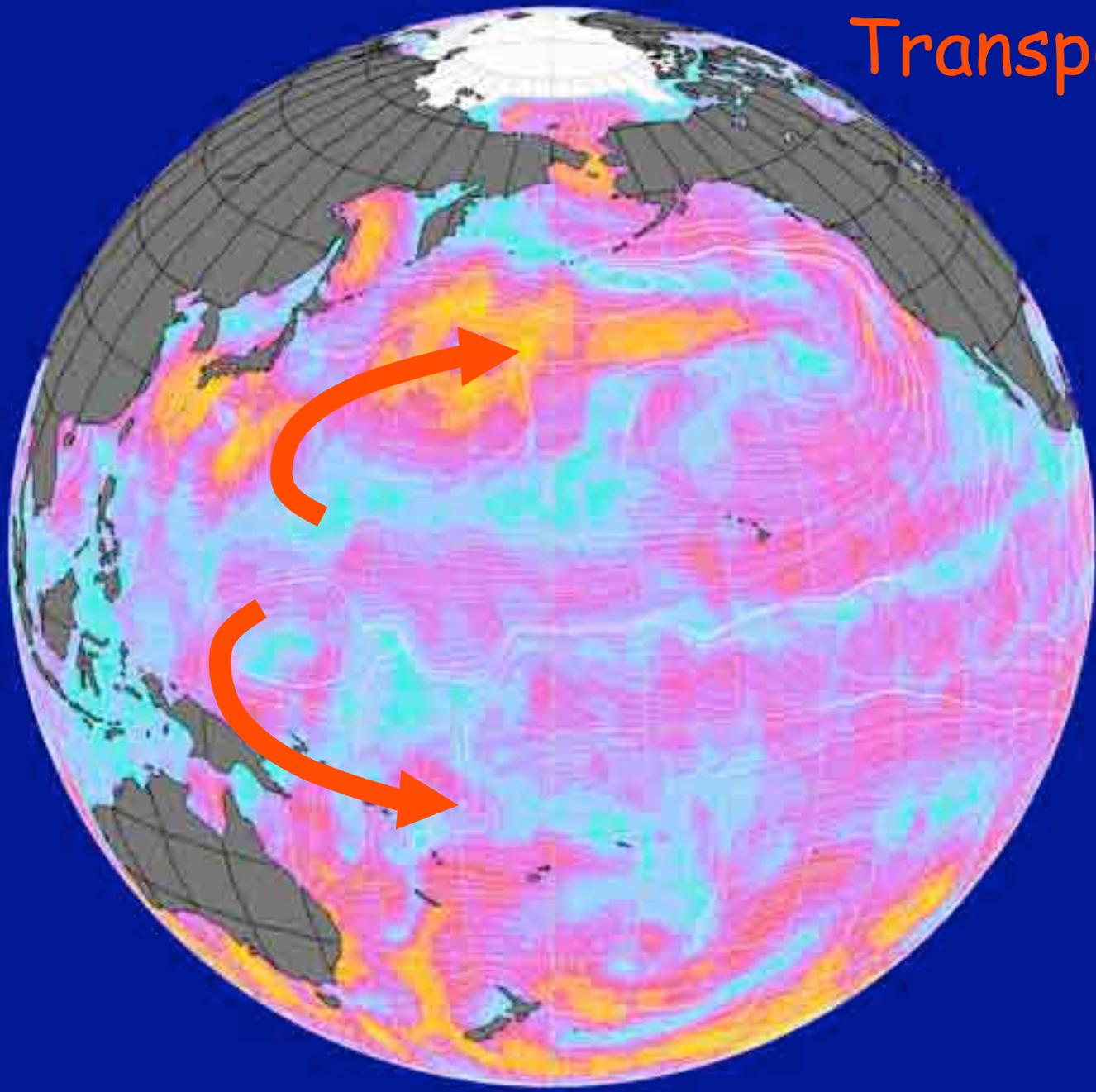
Une machine thermodynamique

Bilan d'énergie

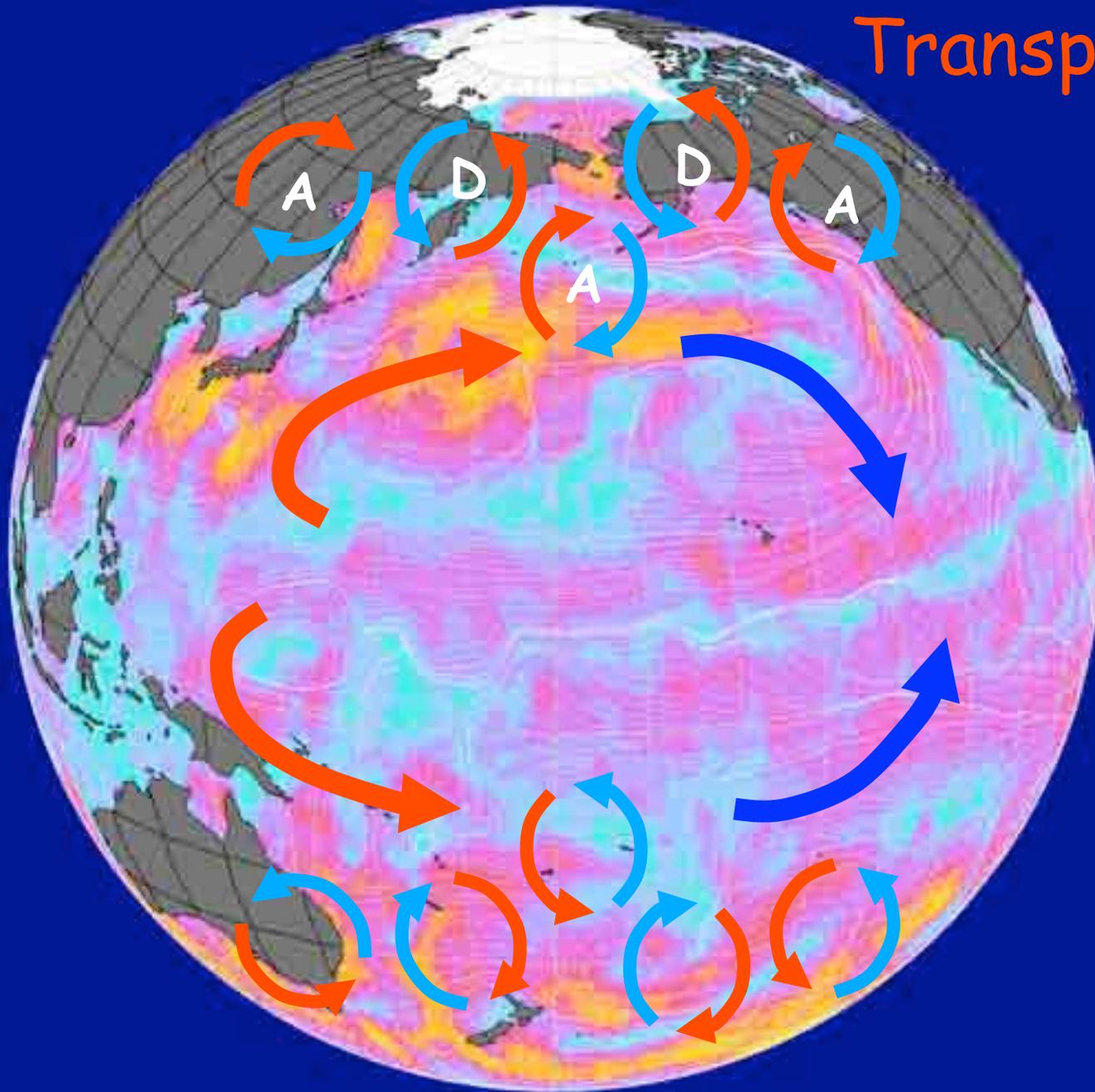
Transport de Chaleur

Atmosphère

Océan



Transport de Chaleur



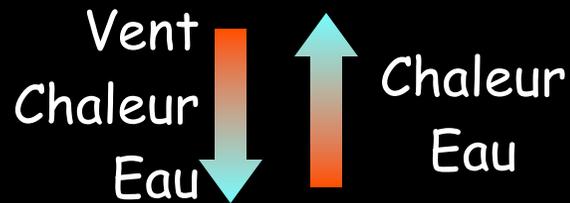
Atmosphère

Océan

L'océan, mémoire du climat

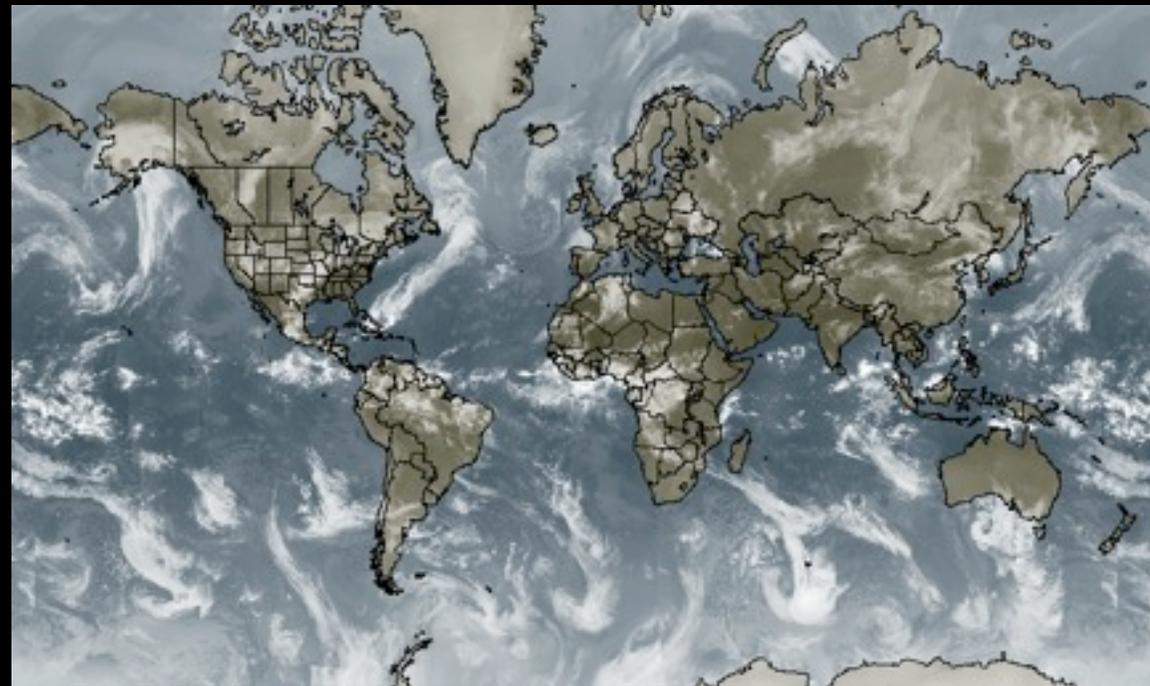
Atmosphère

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

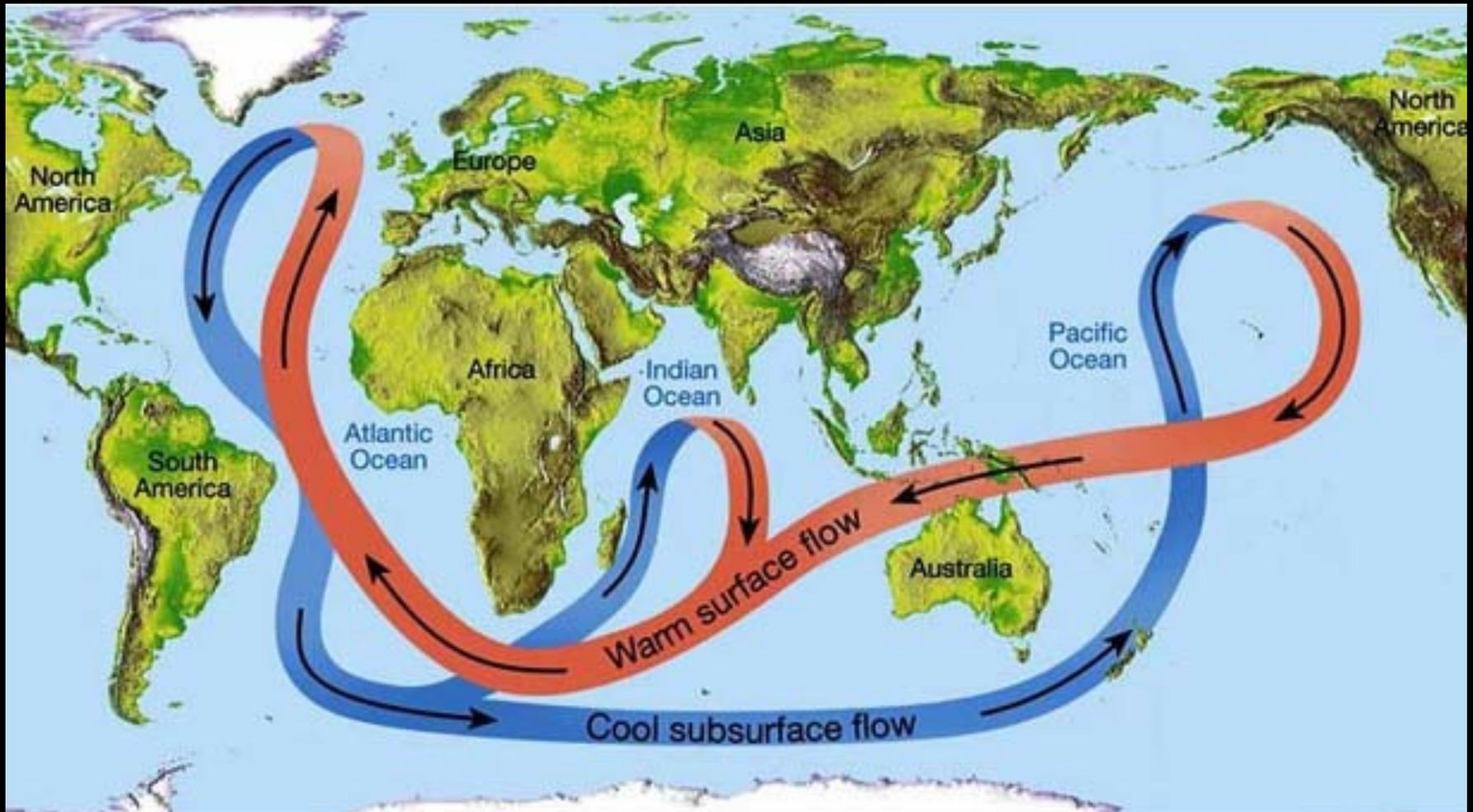


Océan

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



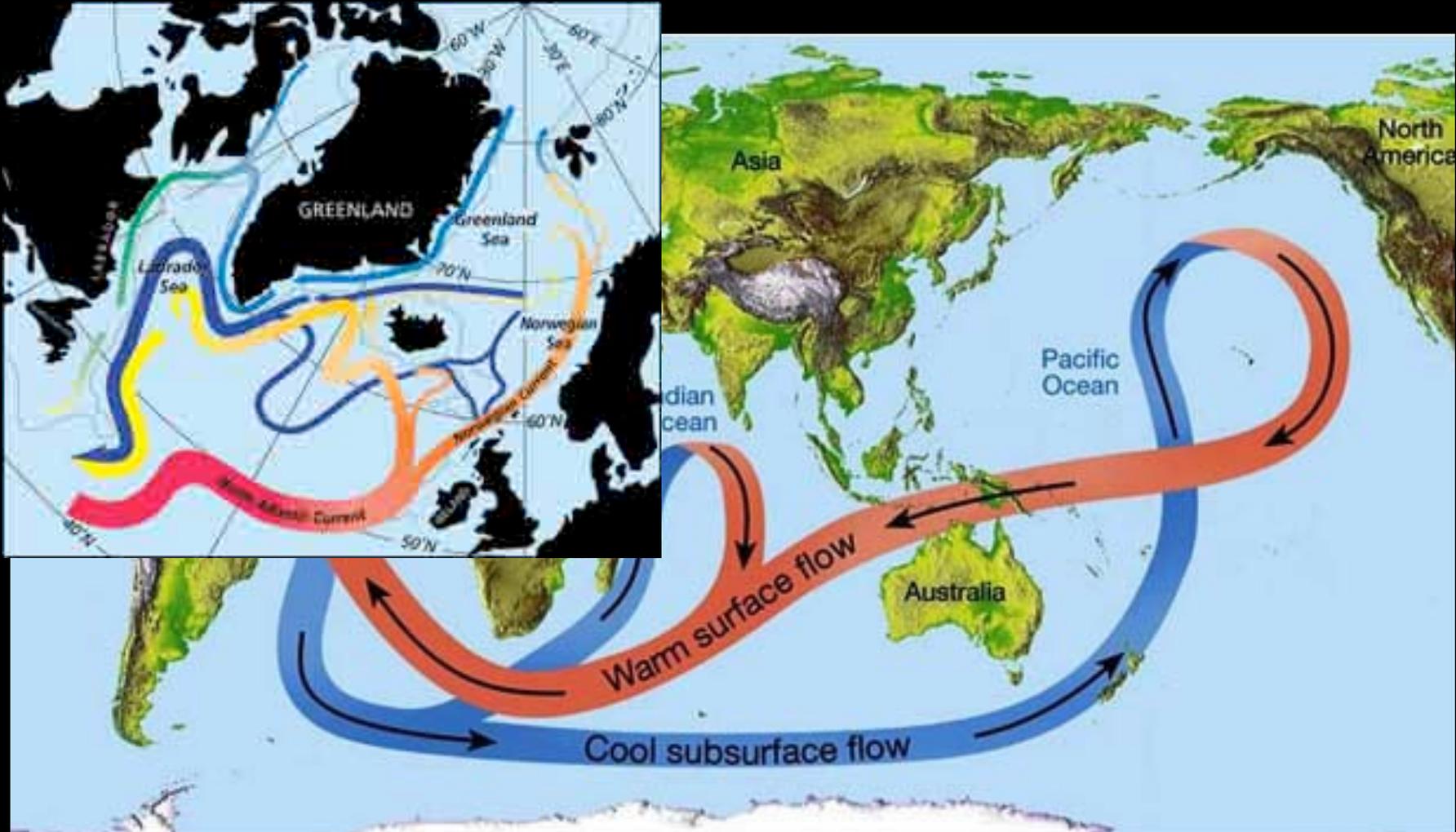
La circulation thermohaline



Un «tapis roulant» global...

...qui avance à 1 cm/sec !

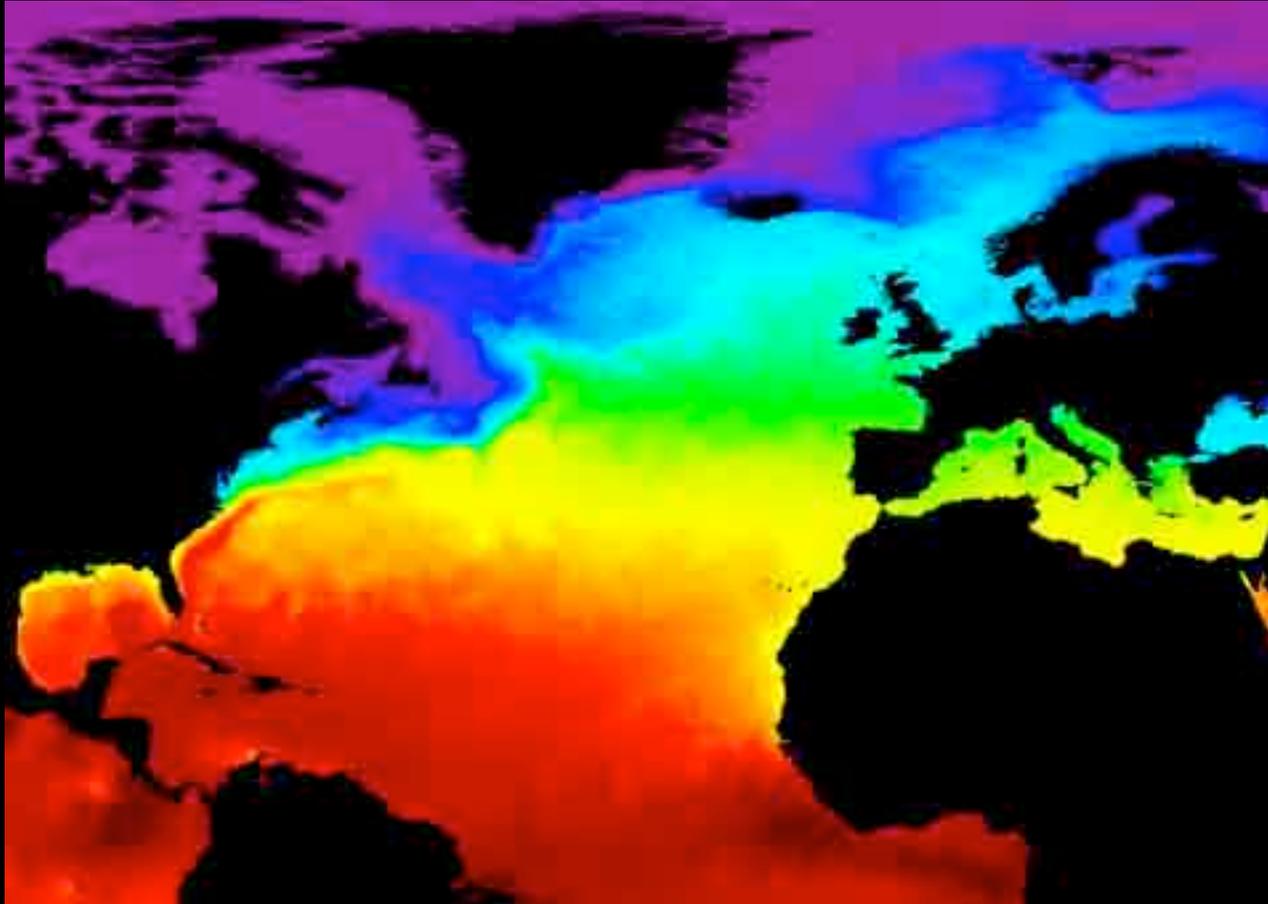
La circulation thermohaline



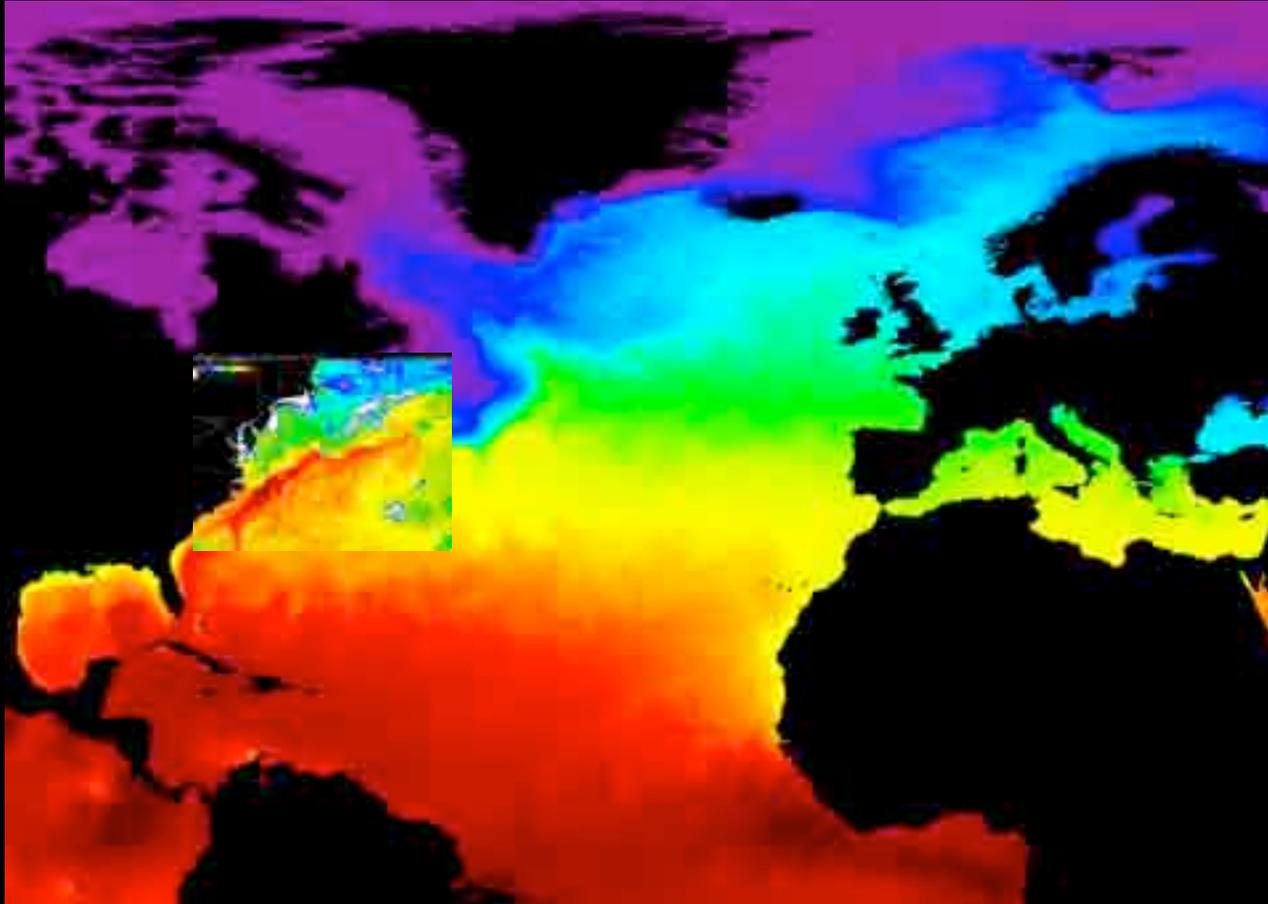
Un «tapis roulant» global...

...qui avance à 1 cm/sec !

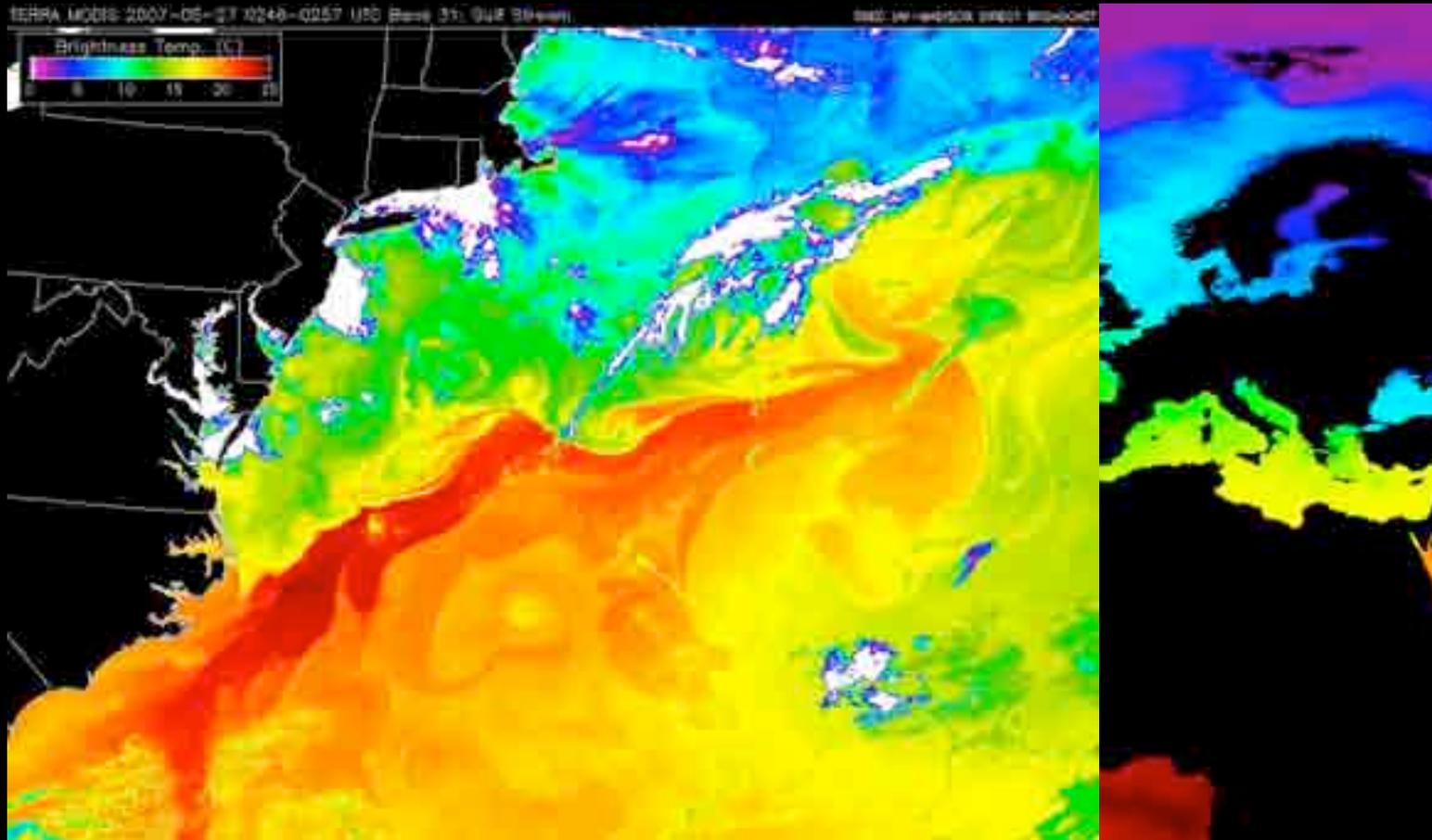
Gulf Stream et climat en Europe



Gulf Stream et climat en Europe



Gulf Stream et climat en Europe

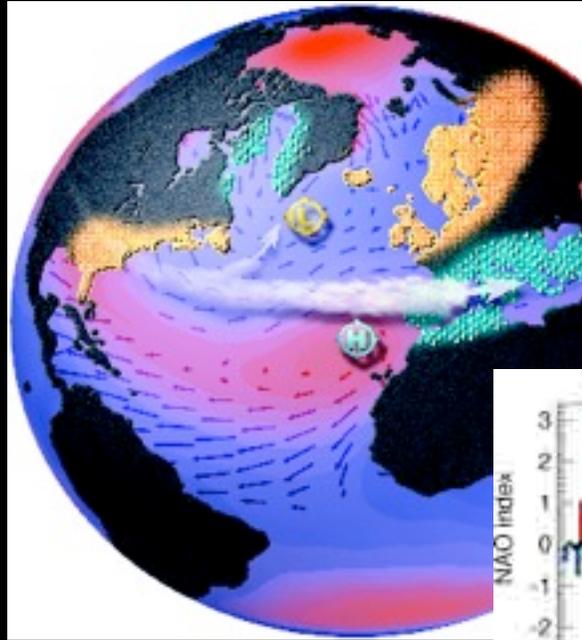
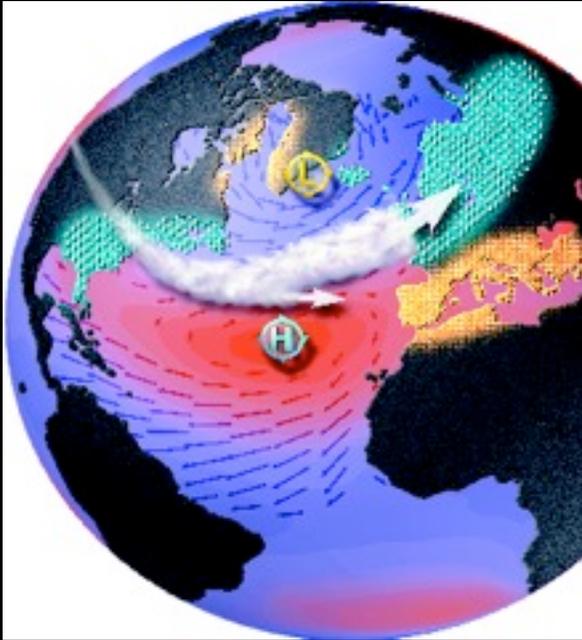


L'océan est un champ de tourbillons

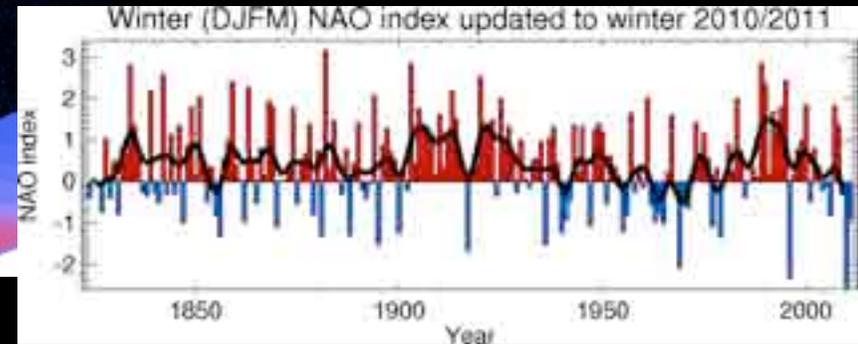
Oscillation Nord Atlantique

NAO +

NAO -



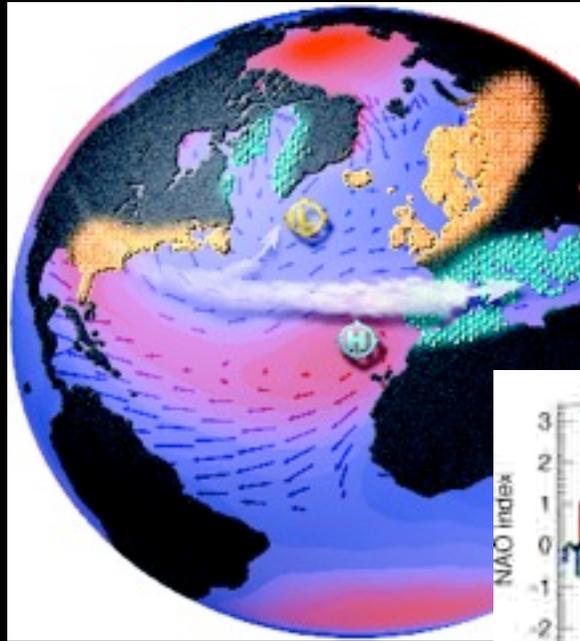
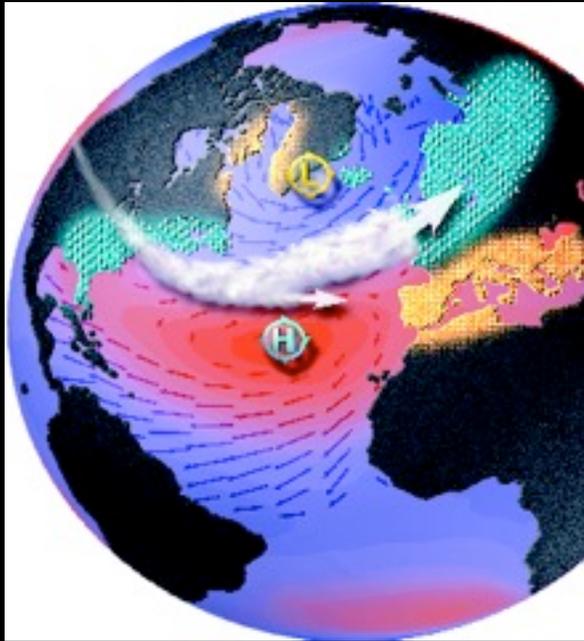
Source: Martin Visbeck and Heidi Cullen



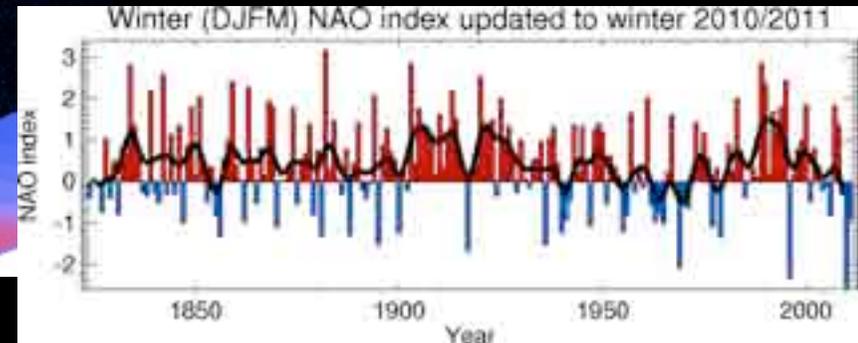
Oscillation Nord Atlantique

NAO +

NAO -

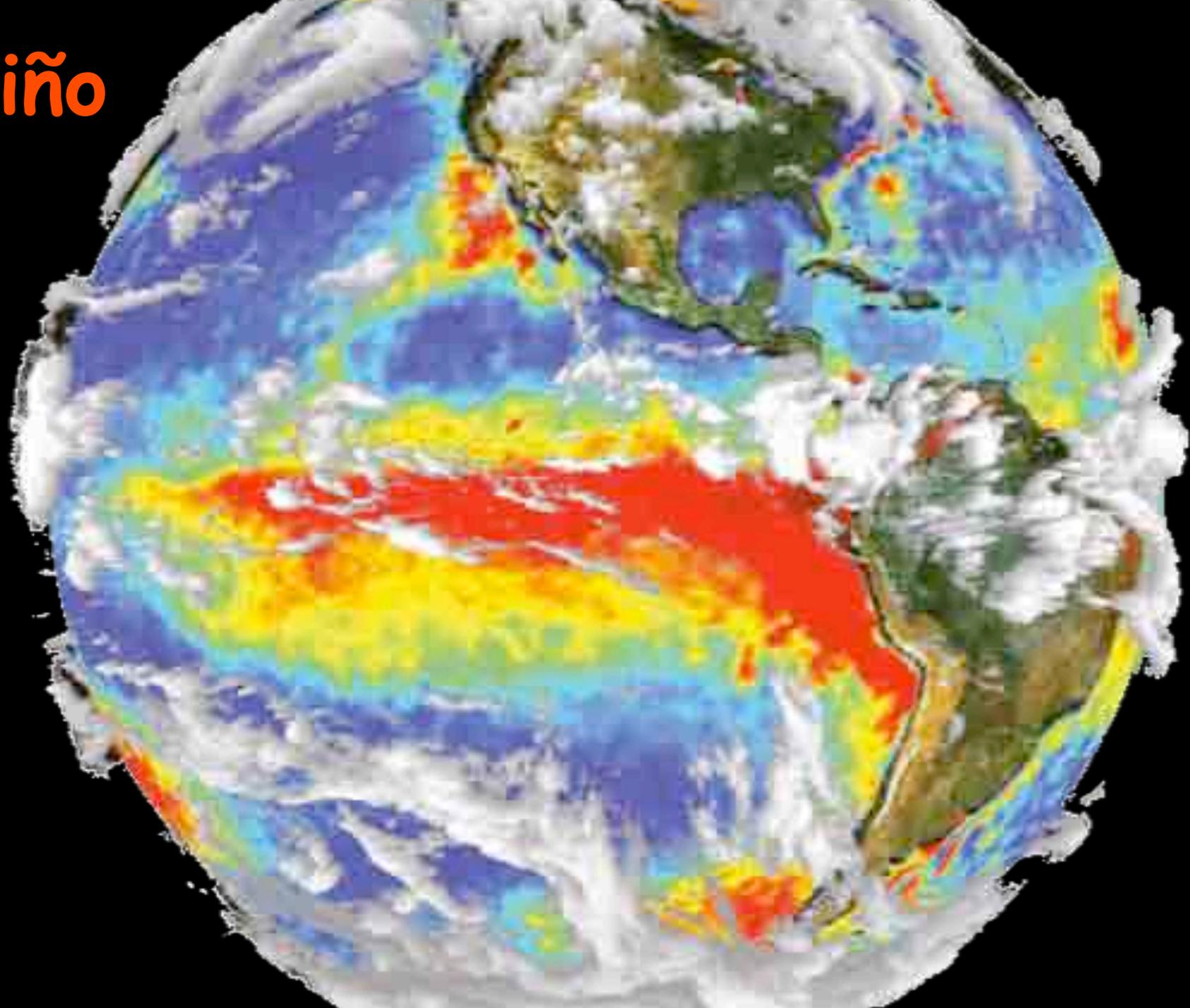


Source: Martin Visbeck and Heidi Cullen



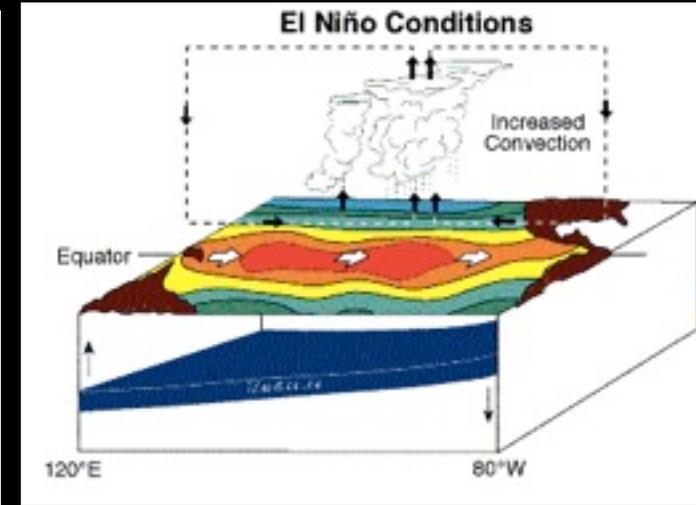
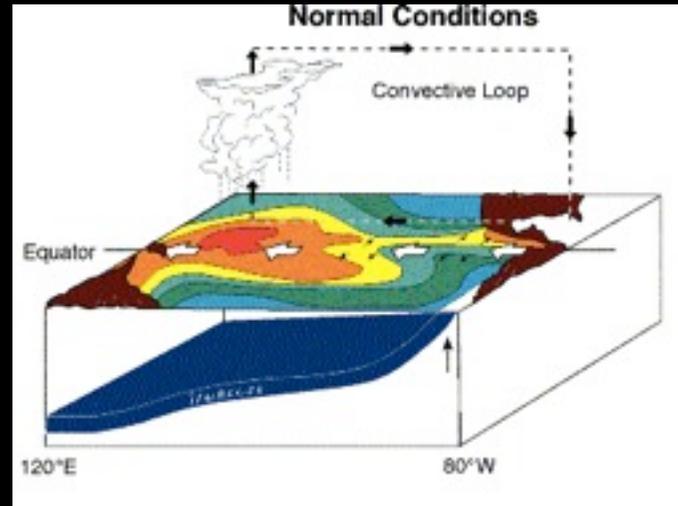
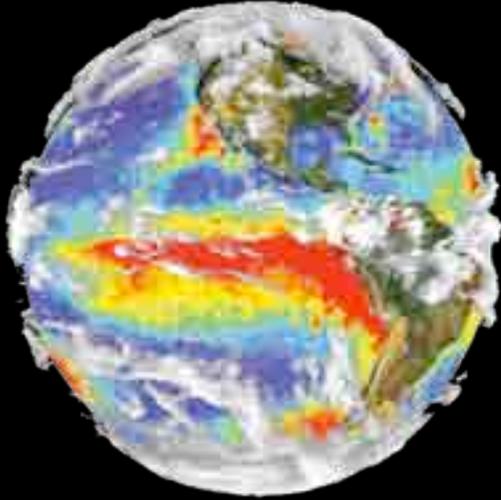
Influence de la température de surface de la mer en hiver sur les conditions météorologiques en Europe

El Niño



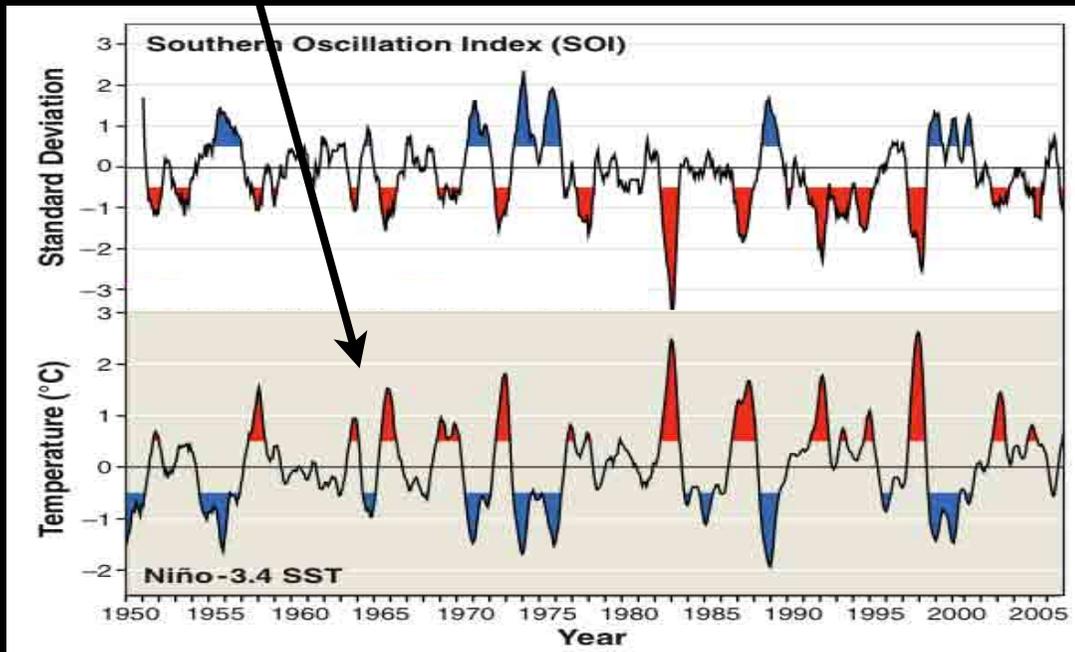
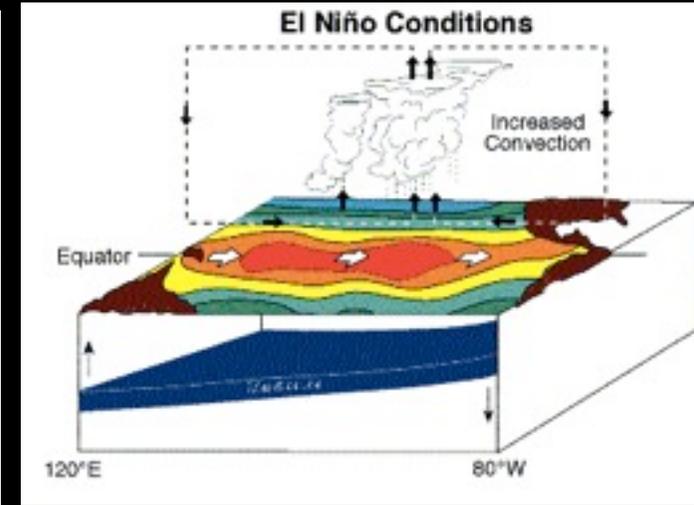
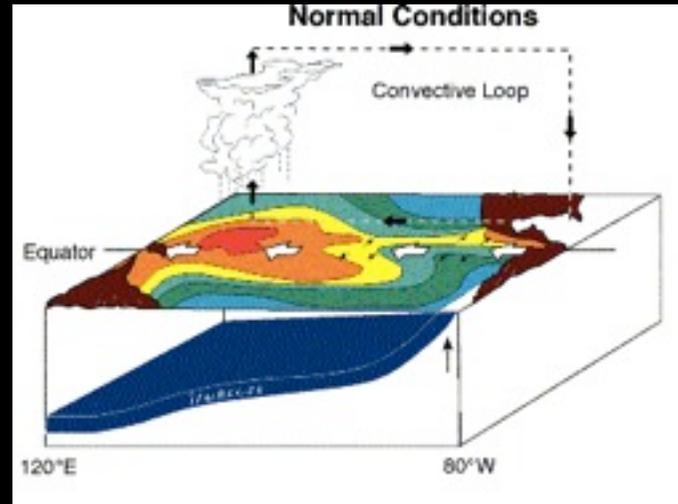
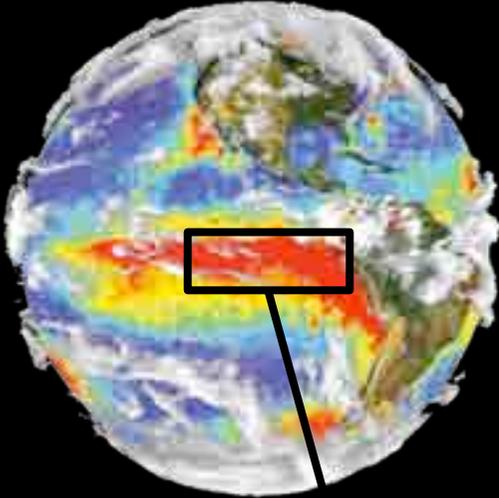
El Niño

Oscillation couplée océan-atmosphère



El Niño

Oscillation couplée océan-atmosphère



El Niño

La Niña

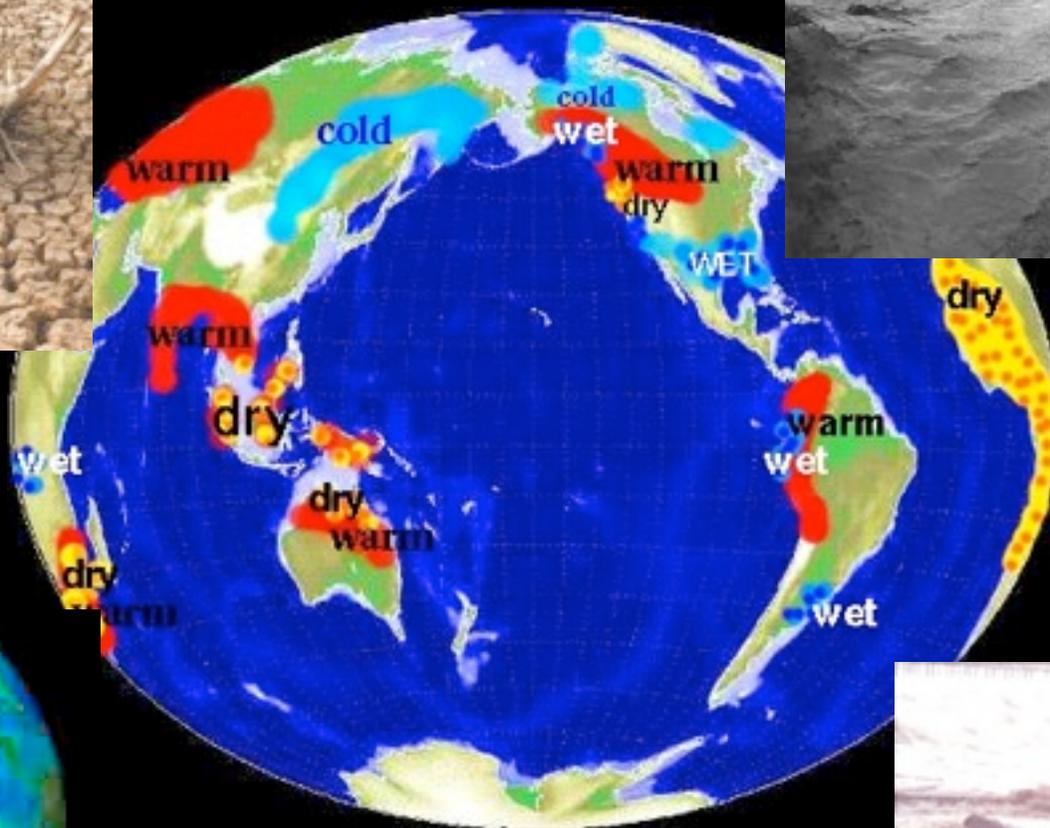
Impacts d'El Niño



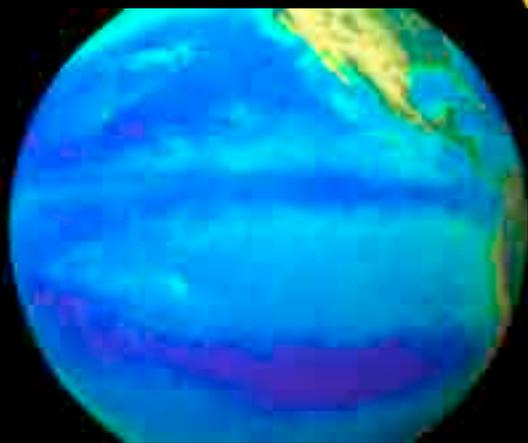
Sécheresses



Inondations



Prévision clef !



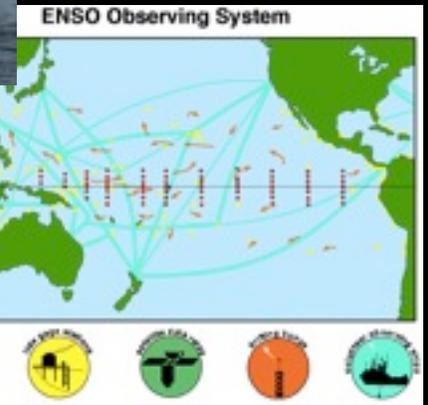
Pêche



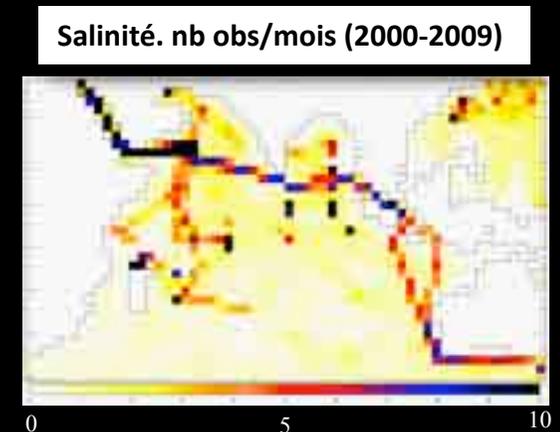
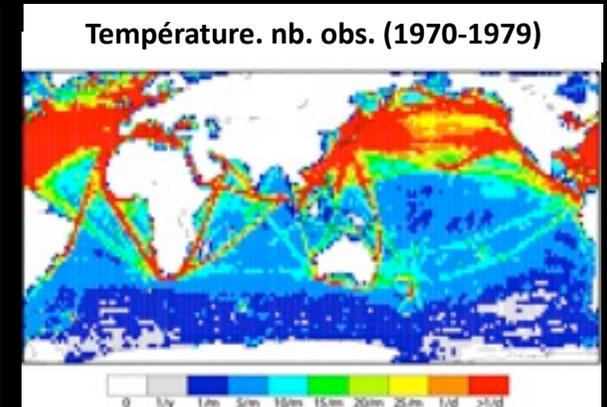
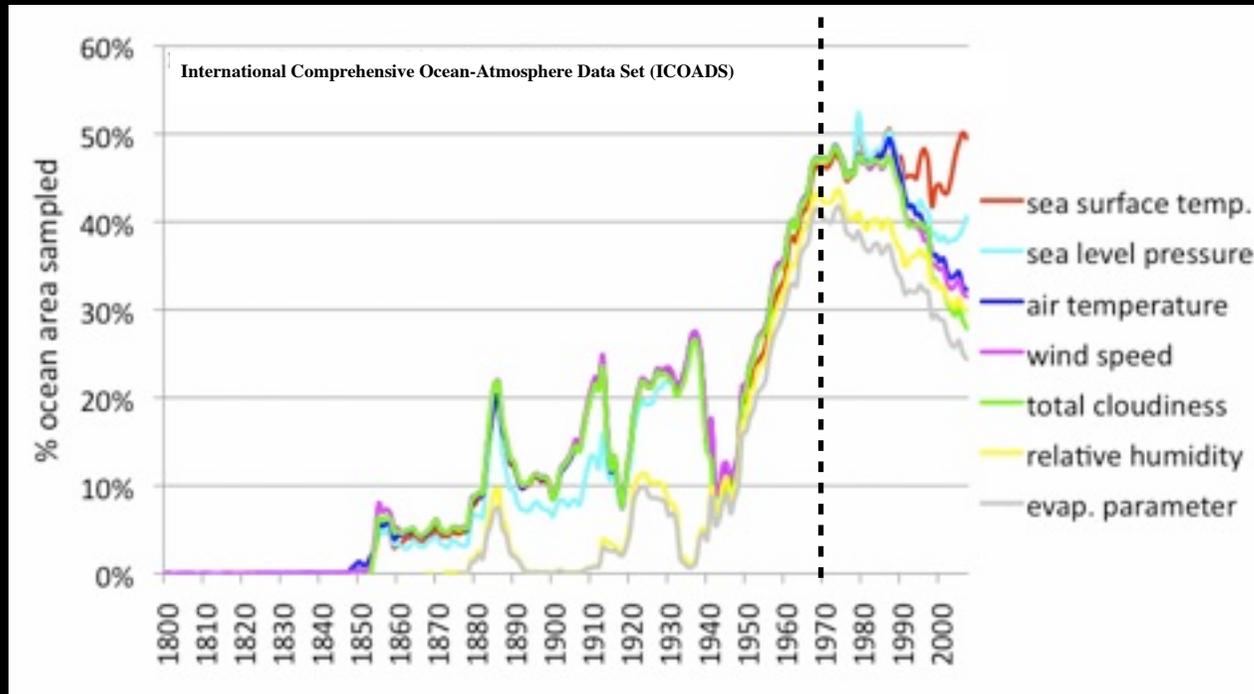
Ouragans

Observer et mesurer l'océan

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



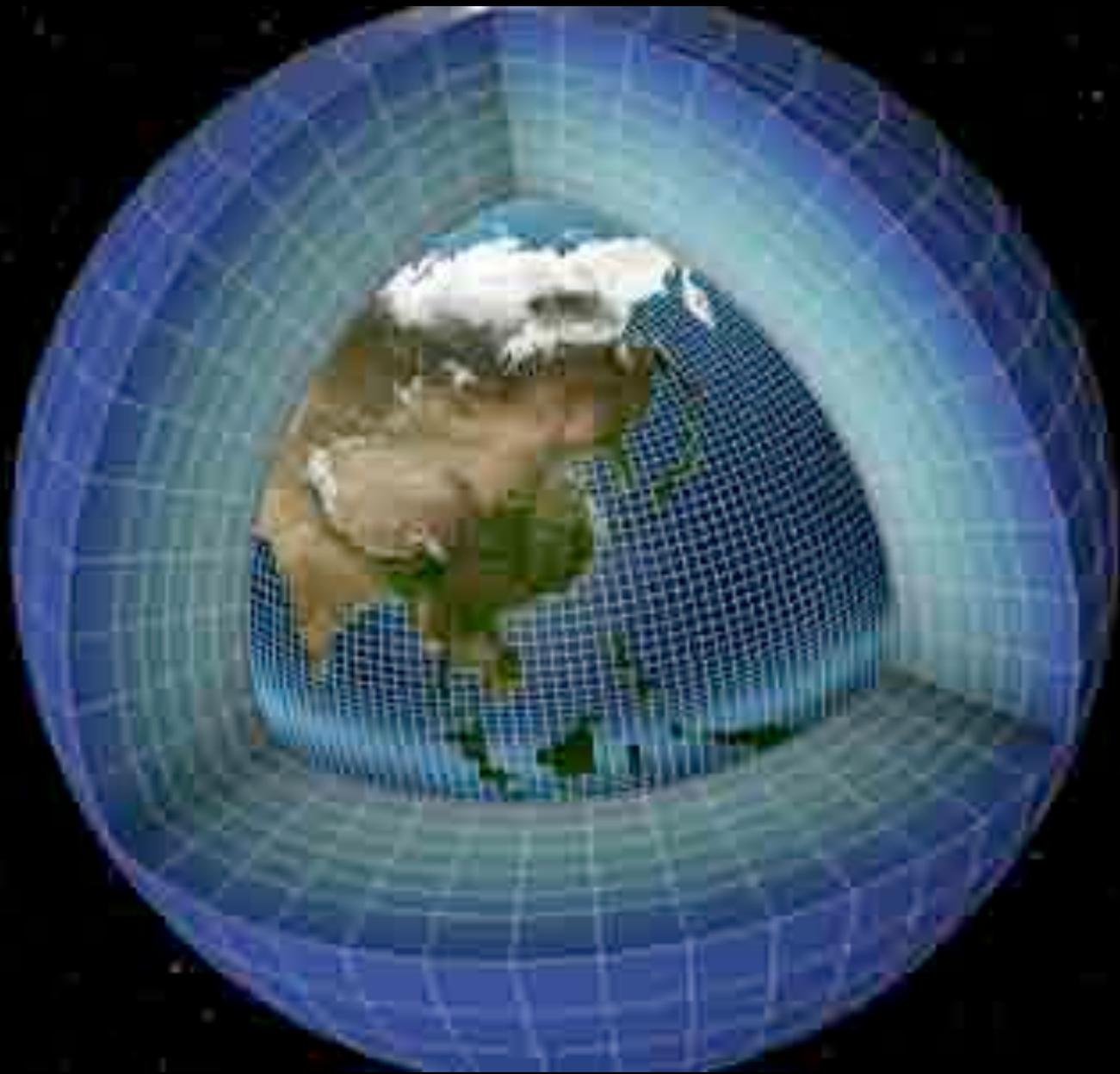
Des observations rares...



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)

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

Physique = processus diabatiques

(e.g. mélange turbulent)

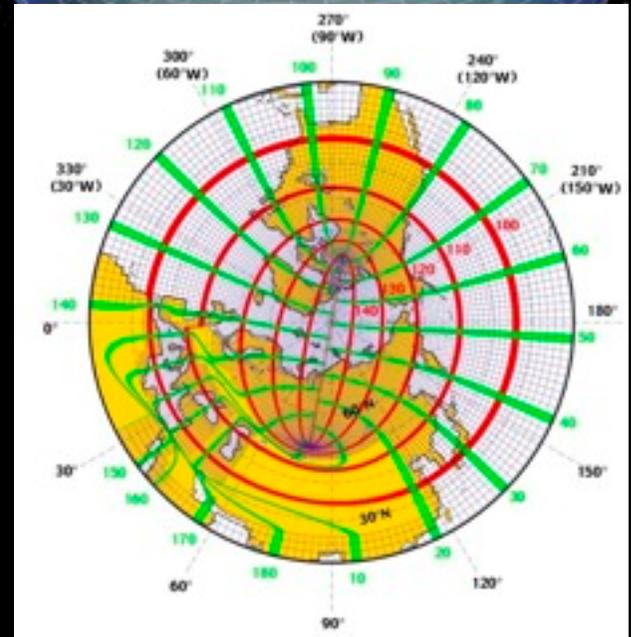
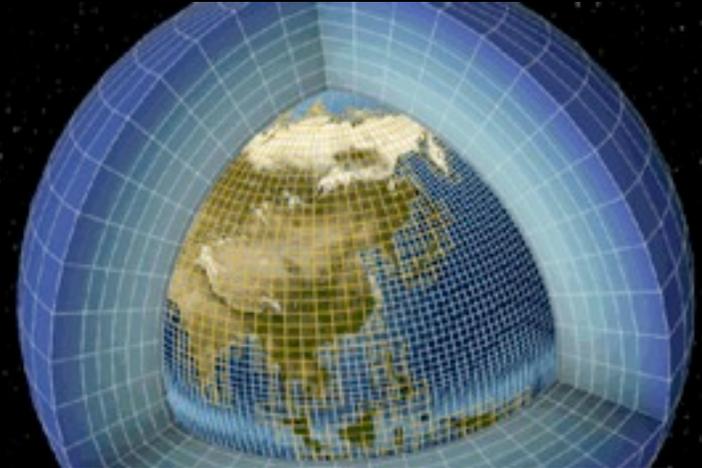
$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot (T \mathbf{U}) + D^T + F^T$$
$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\nabla \cdot (S \mathbf{U}) + D^S + F^S$$

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

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

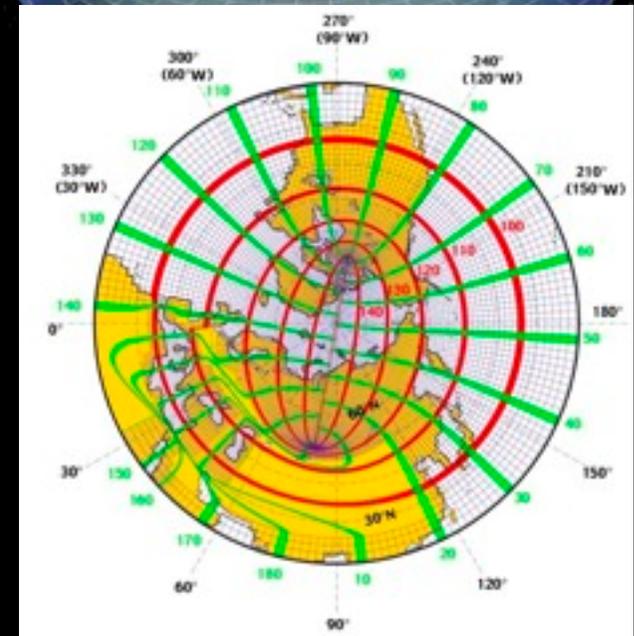
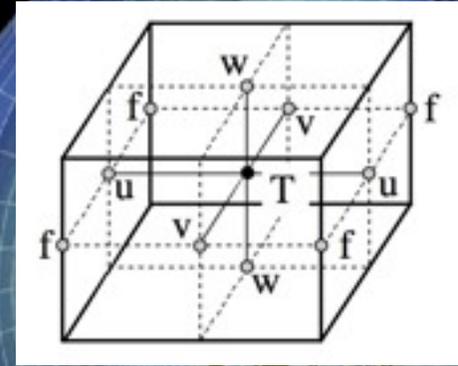


Grille “ORCA2” vue polaire

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



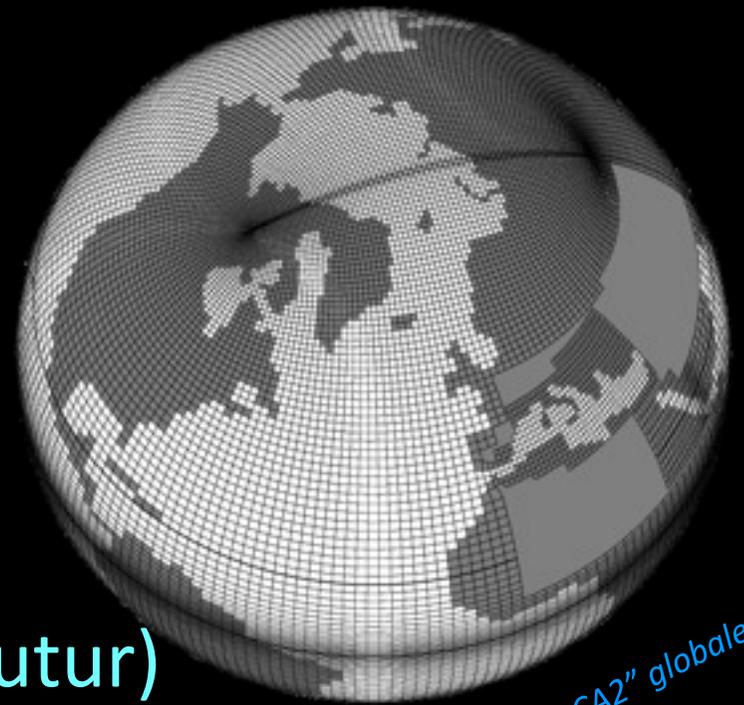
Grille “ORCA2” vue polaire

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

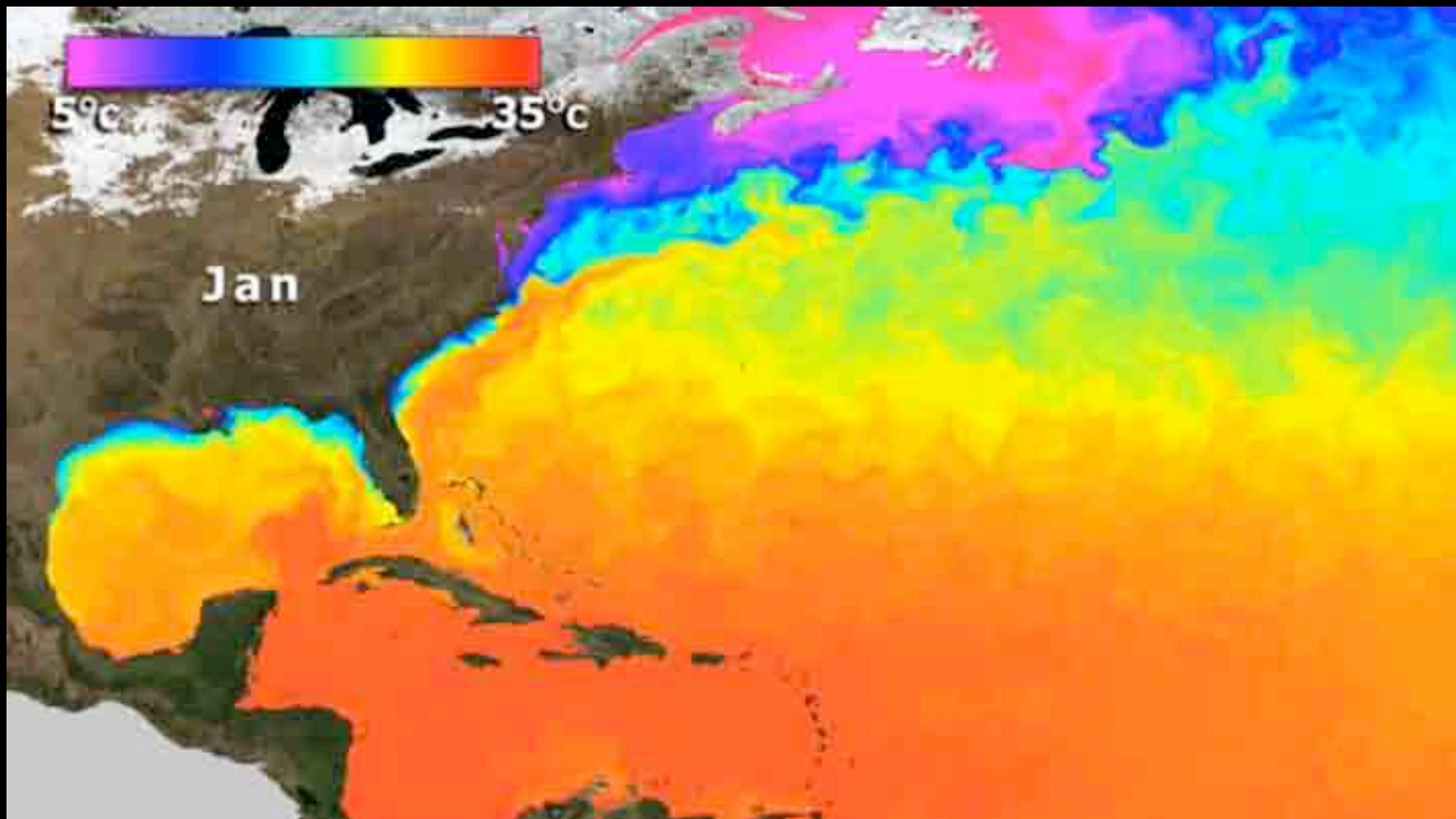


La prévision océanique





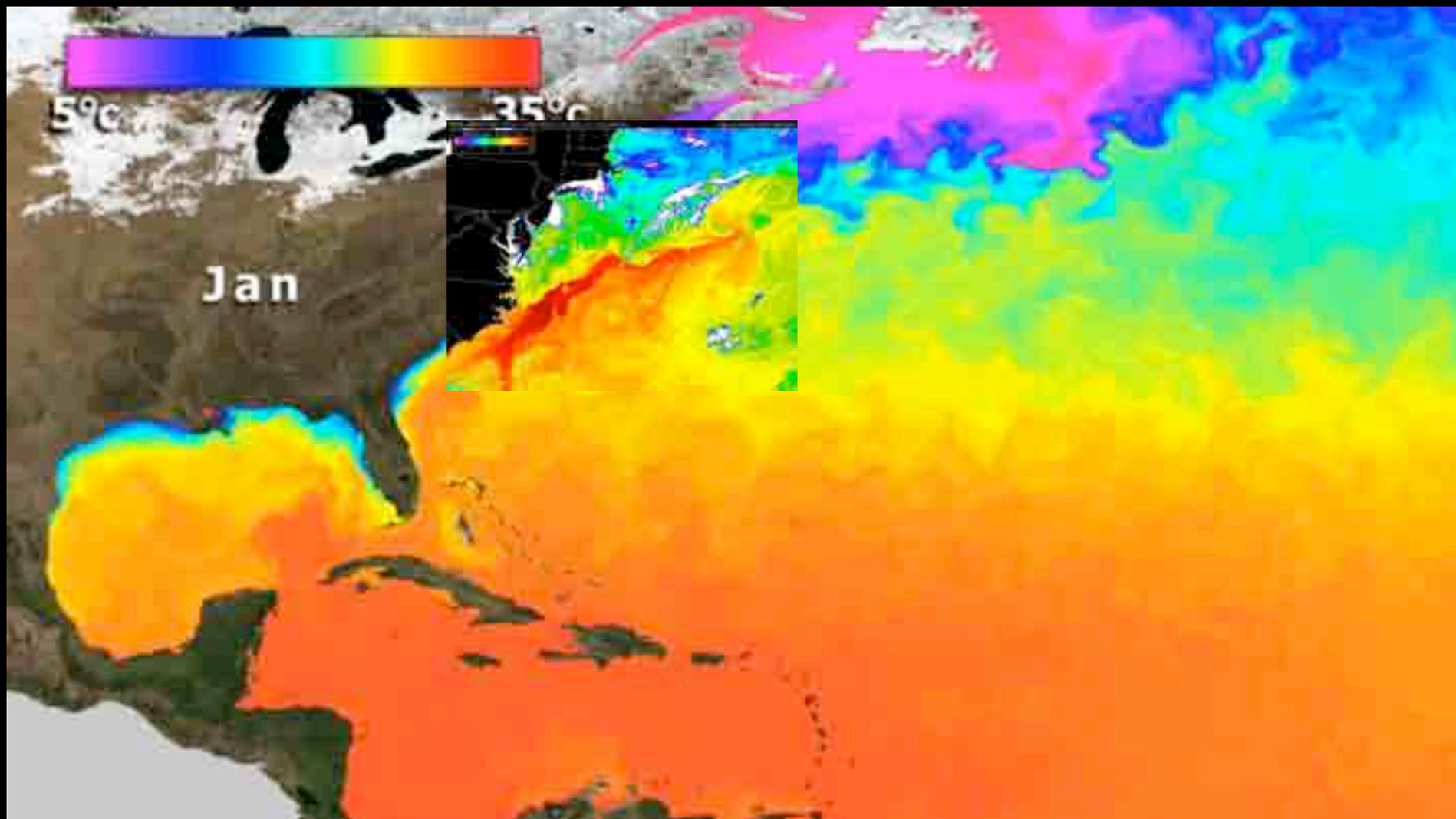
La prévision océanique



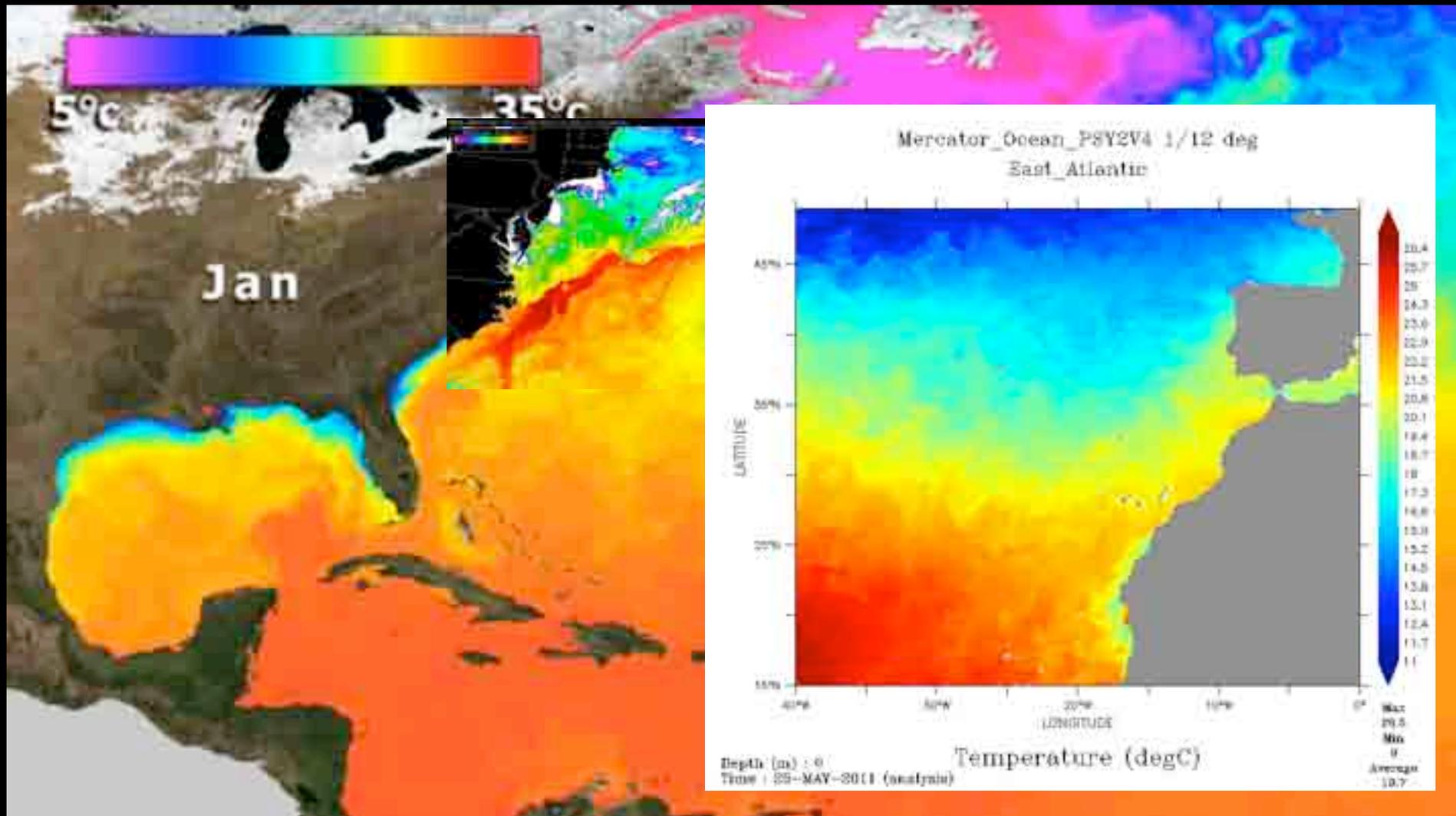
Température de surface de la mer - NEMO 1/12e Mercator-Océan



La prévision océanique

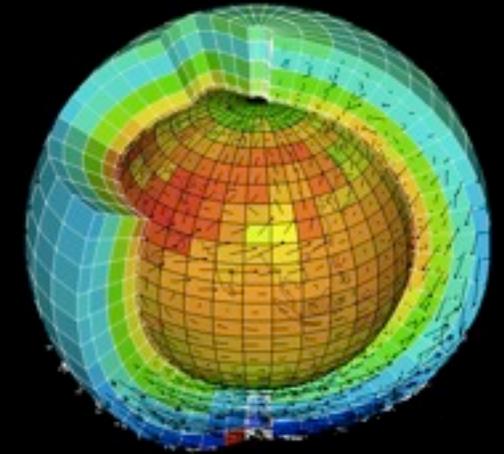


Température de surface de la mer - NEMO 1/12e Mercator-Océan



Etude du climat

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



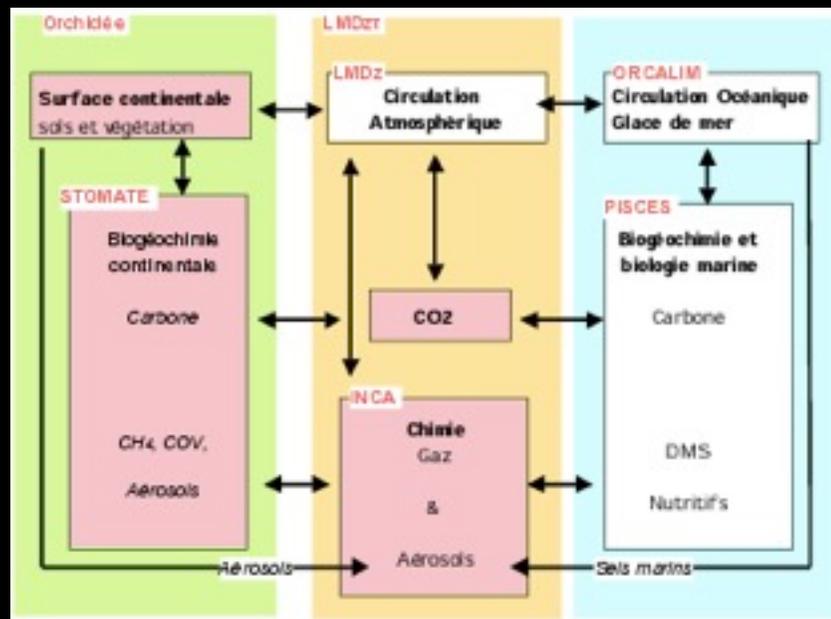
Atmosphère (LMDz)



Océan (NEMO)



Continents Atmosphère Océan



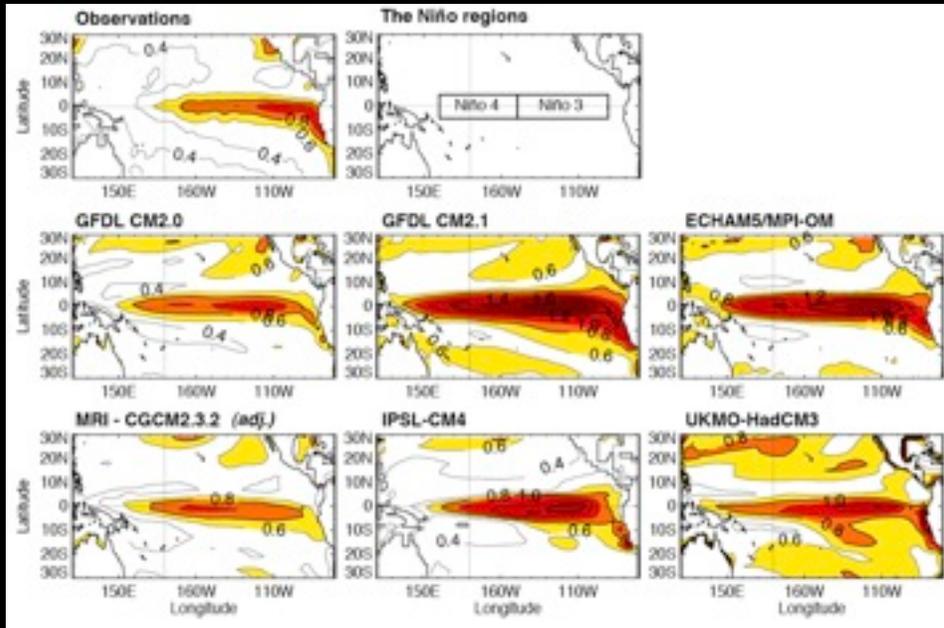
Physique

Carbone

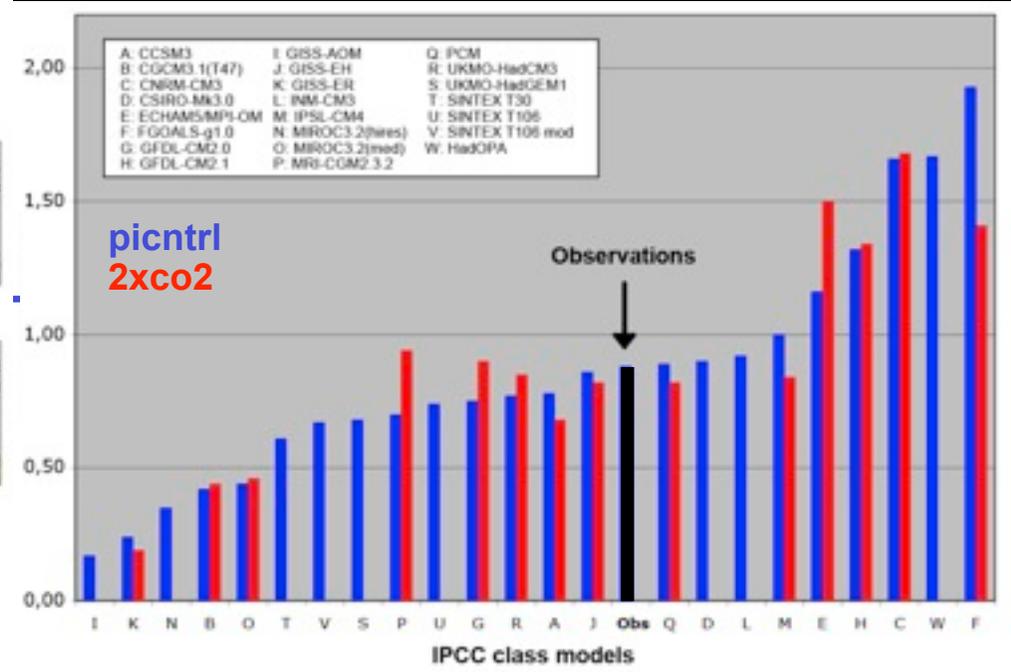
Chimie

Modélisation d'El Niño

Structure spatiale



Amplitude d'El Niño



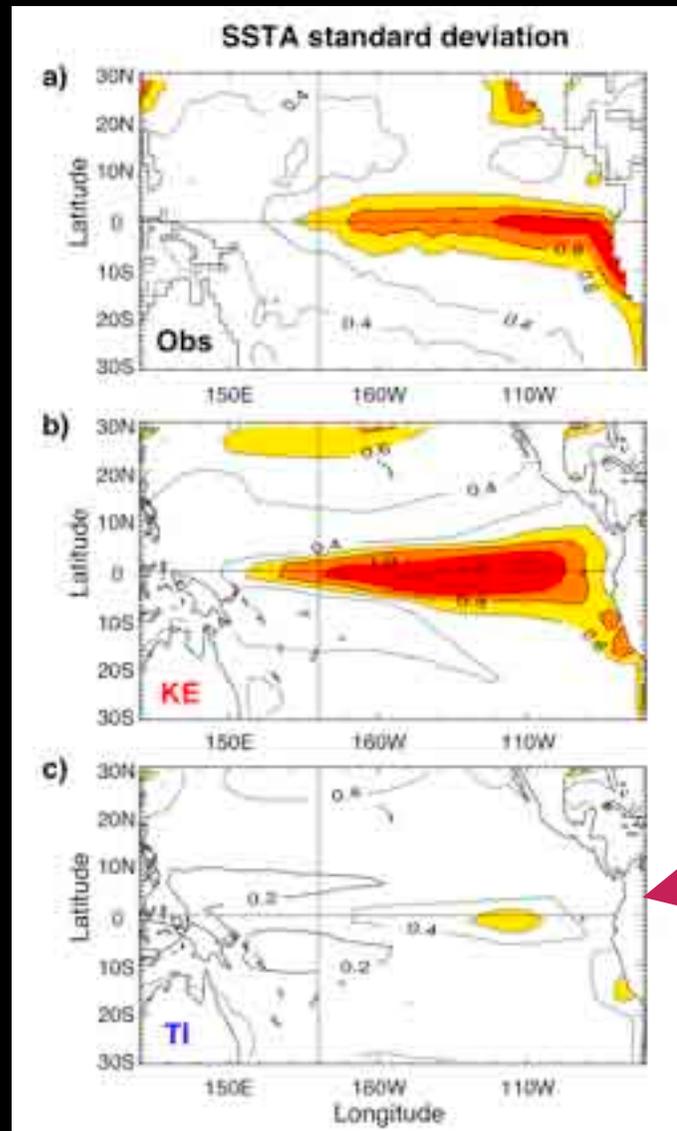
- Etudes des mécanismes d'El Niño
- Prévision saisonnière

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 ?

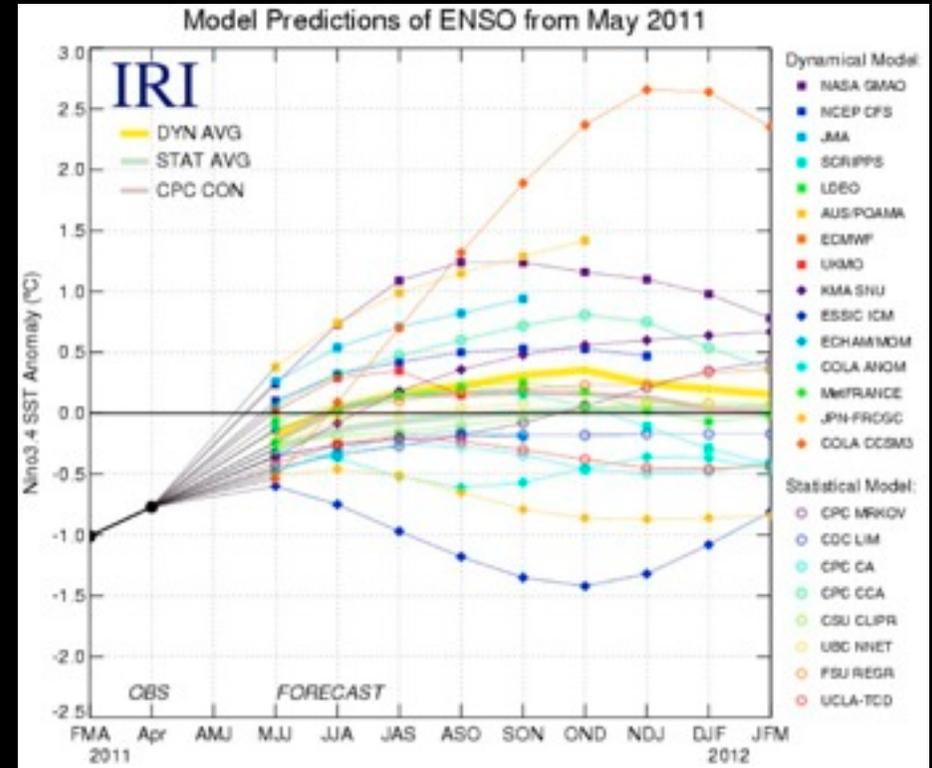
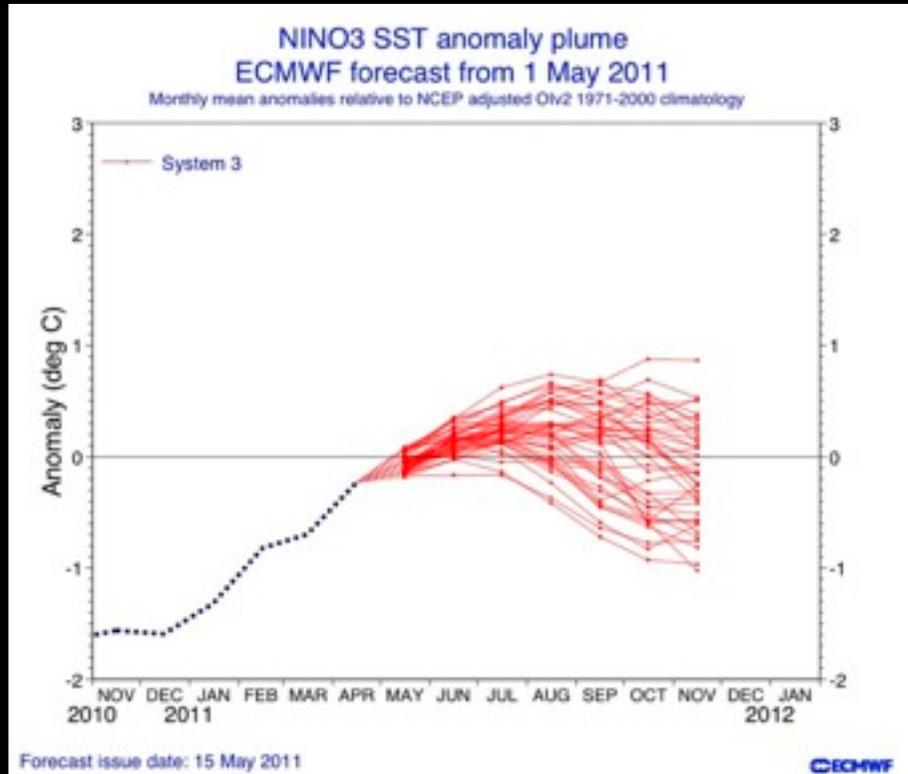
Impact of deep convection scheme on atmosphere feedbacks during El Niño

		Bjerknes dynamical feedback μ	Heat flux feedback α	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)

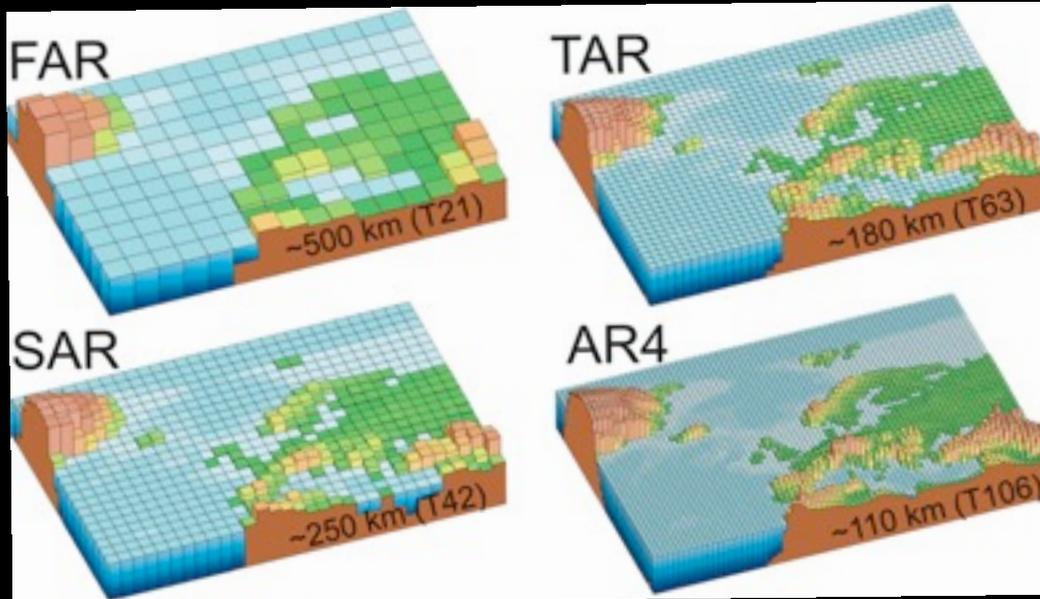
Need to get the right ENSO amplitude for the right reasons !
Process-based metrics for the evaluation of ENSO in CGCMs

Prévision d'El Niño



Prévision d'ensemble et multi-modèle

Résolution des modèles

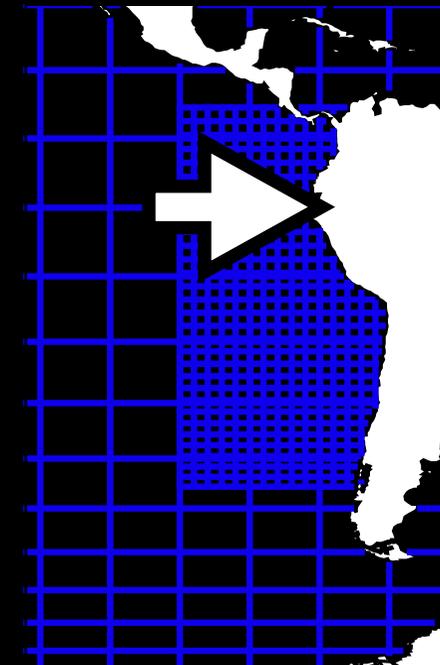


AR4 WG1 Chap1, 2007

- 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

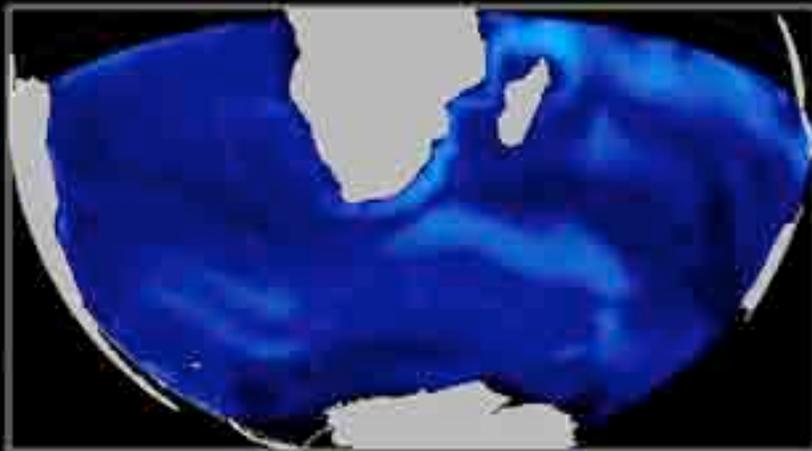
Source: S. Masson

Quel degré de détail ?



Courants océaniques à 150 km et à 6 km

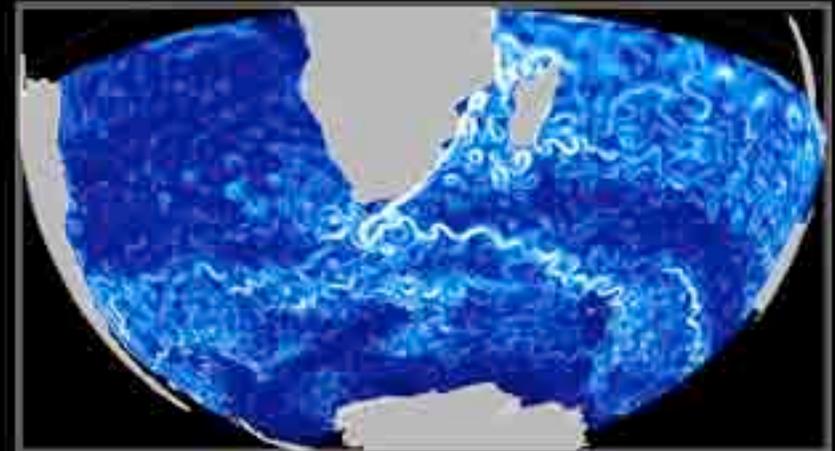
ORCAO2 20040102 velocity 15m



~150km

S. Flavoni. Equipe système NEMO

ORCAO12-T103 y2004m01d01 velocity 15m



~6km

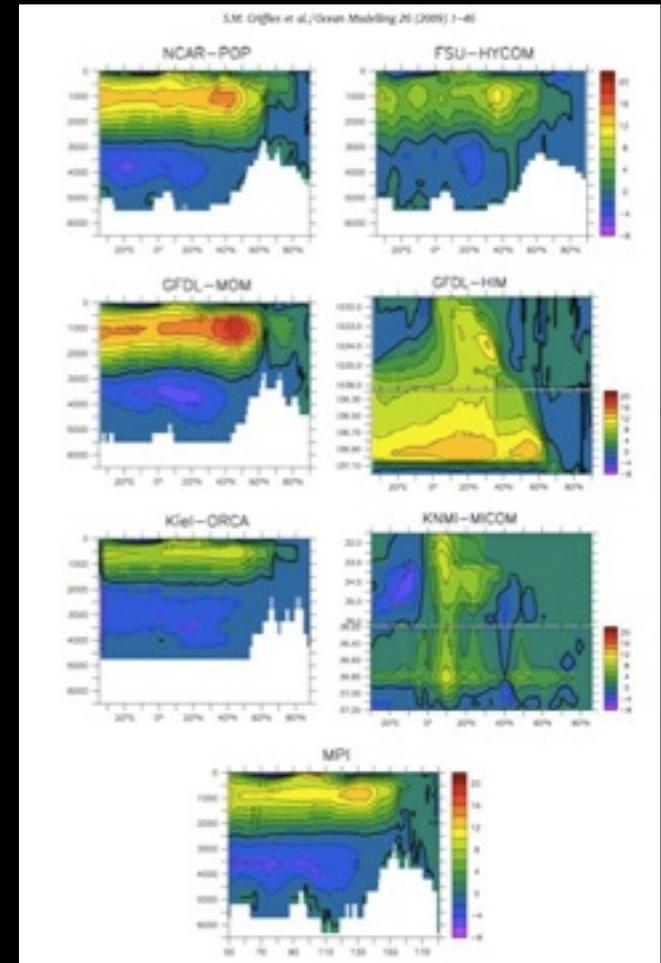
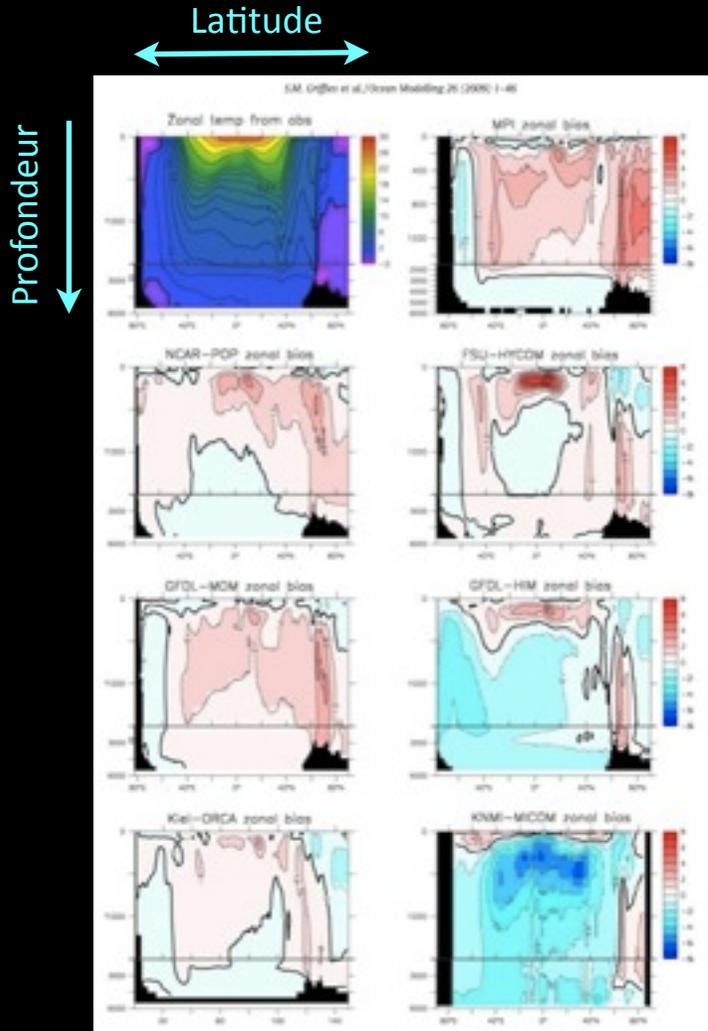
R. Bourdallé-Badie. Mercator-Ocean

?

Tourbillons \Leftrightarrow Climat grande échelle

Source: S. Masson

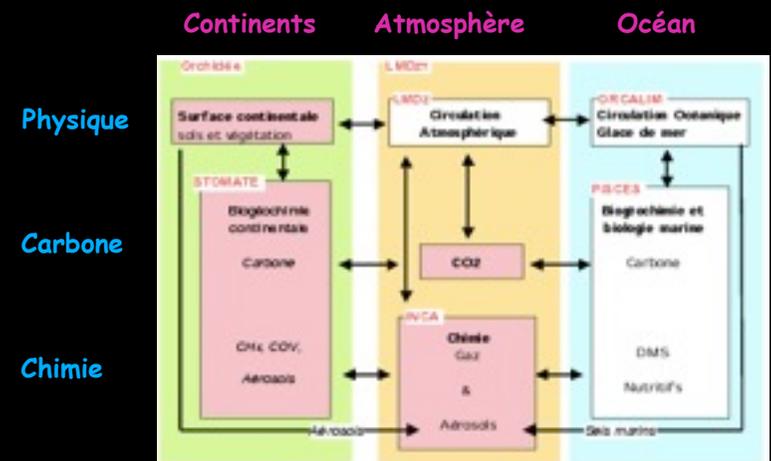
Validation des modèles d'océan



Griffies et al. (2009)

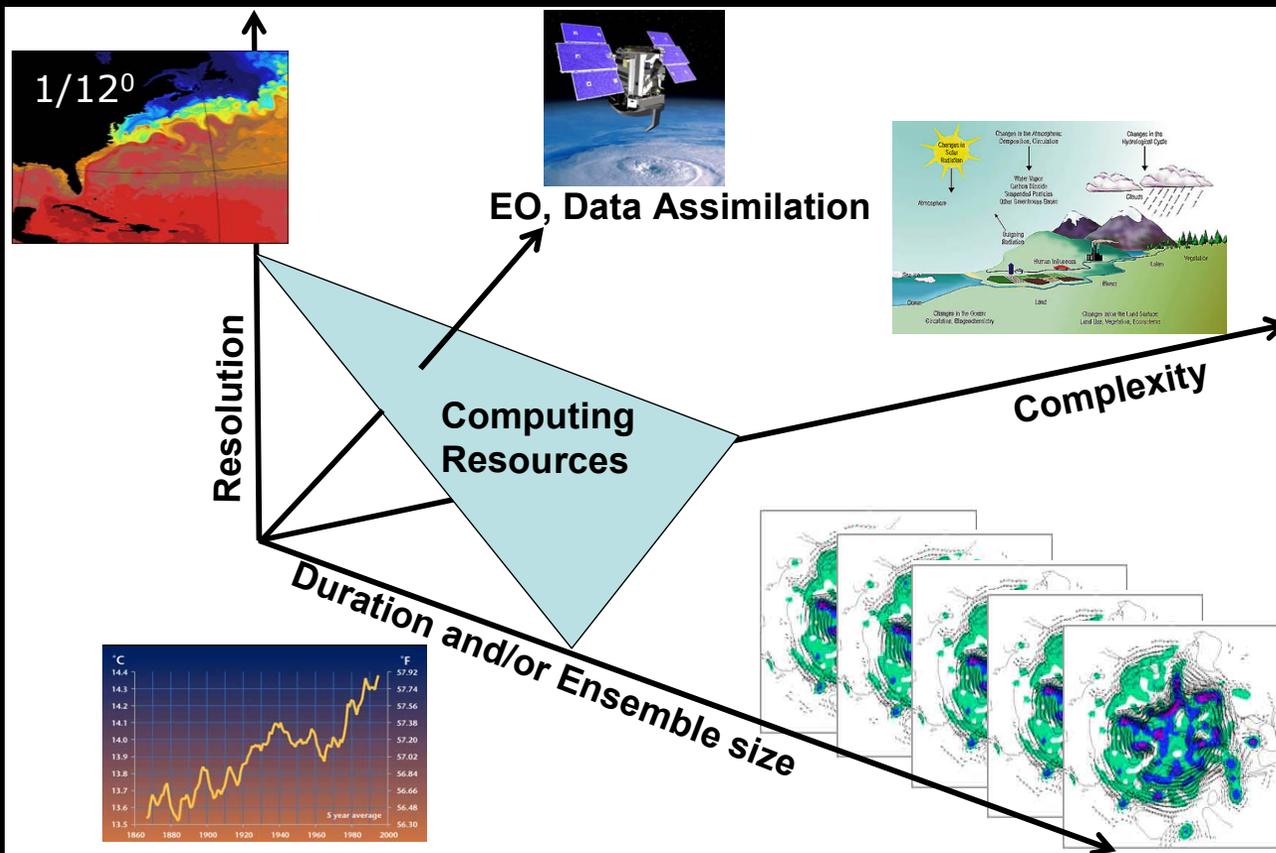
Défis de la modélisation de l'océan et du climat

- 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



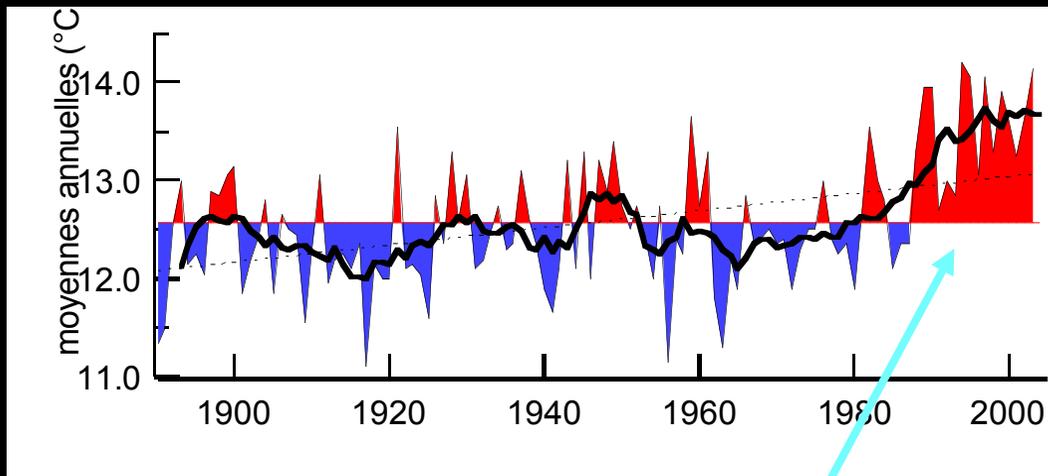
Earth Simulator - Yokohama

3 - Le changement climatique

- Détection/attribution
- Projections

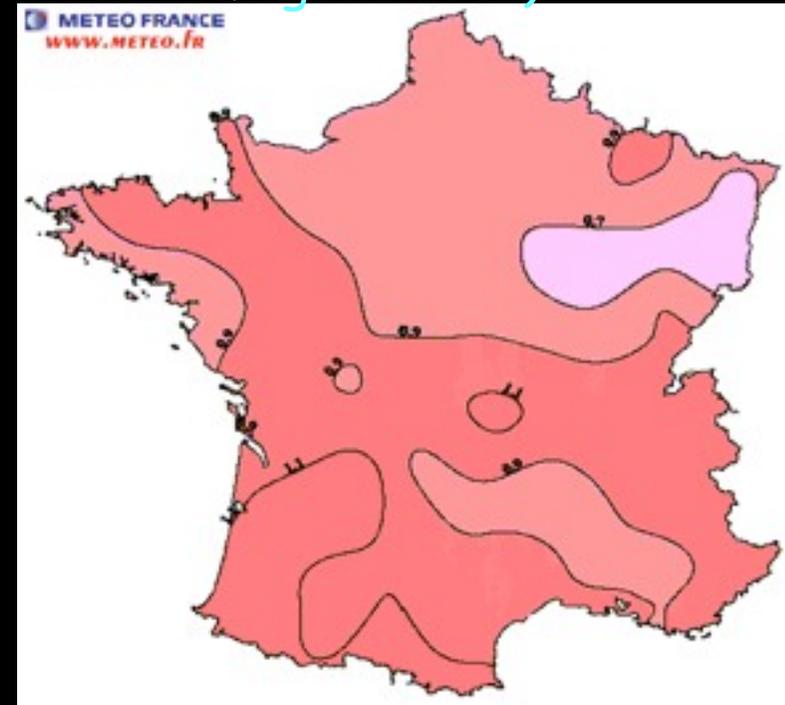
Histoire des températures

Température annuelle à Paris depuis 1890



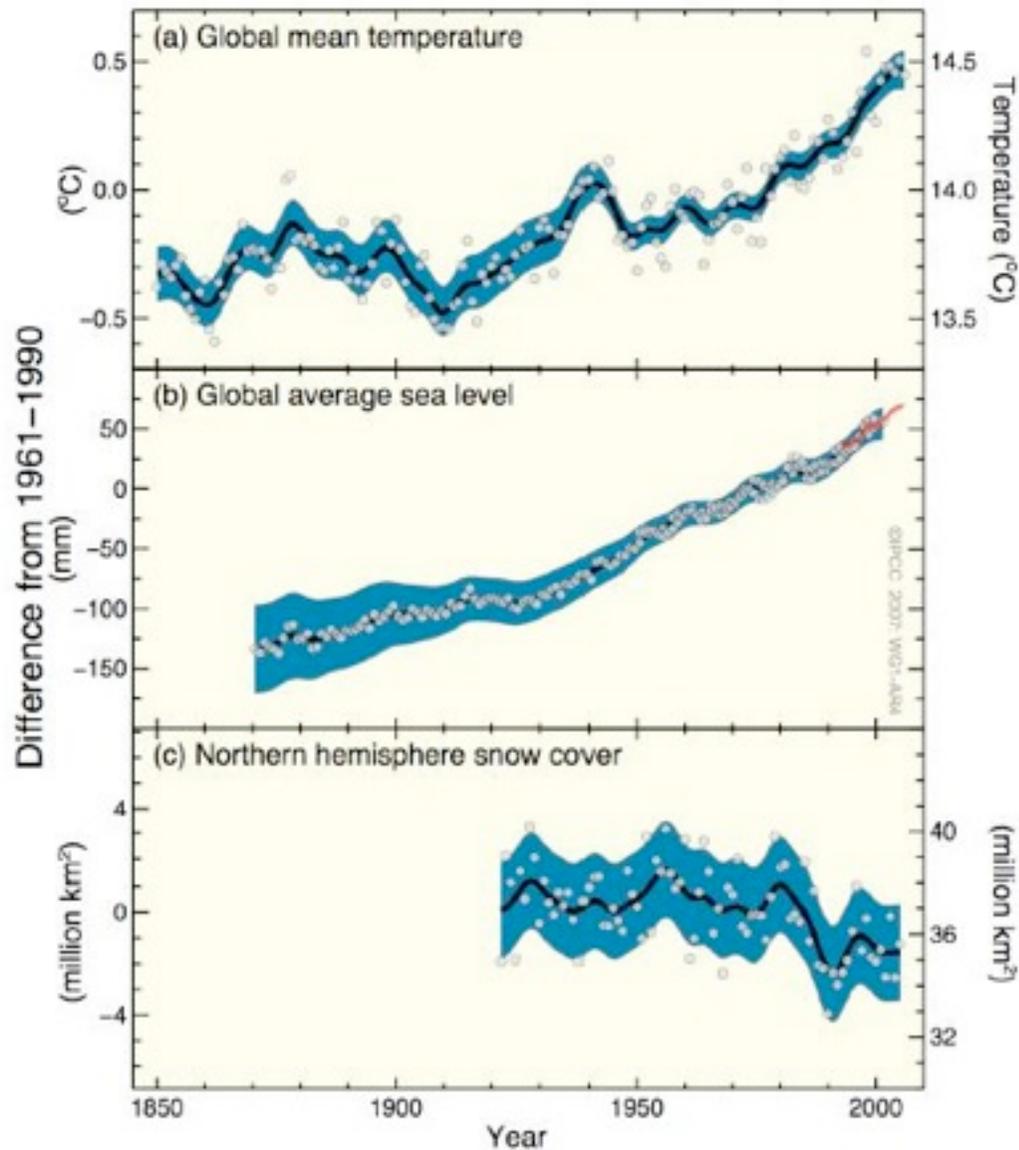
Significatif ?
Origine ?

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



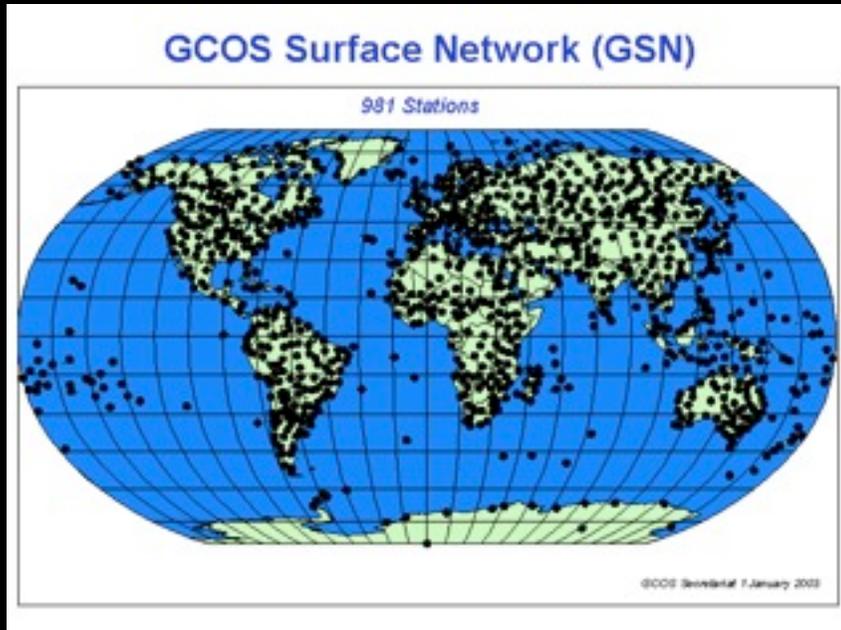
Signal global

+0.8°C depuis 1900
+0.6°C depuis 1950
10 records de température
au cours des 12 dernières
années

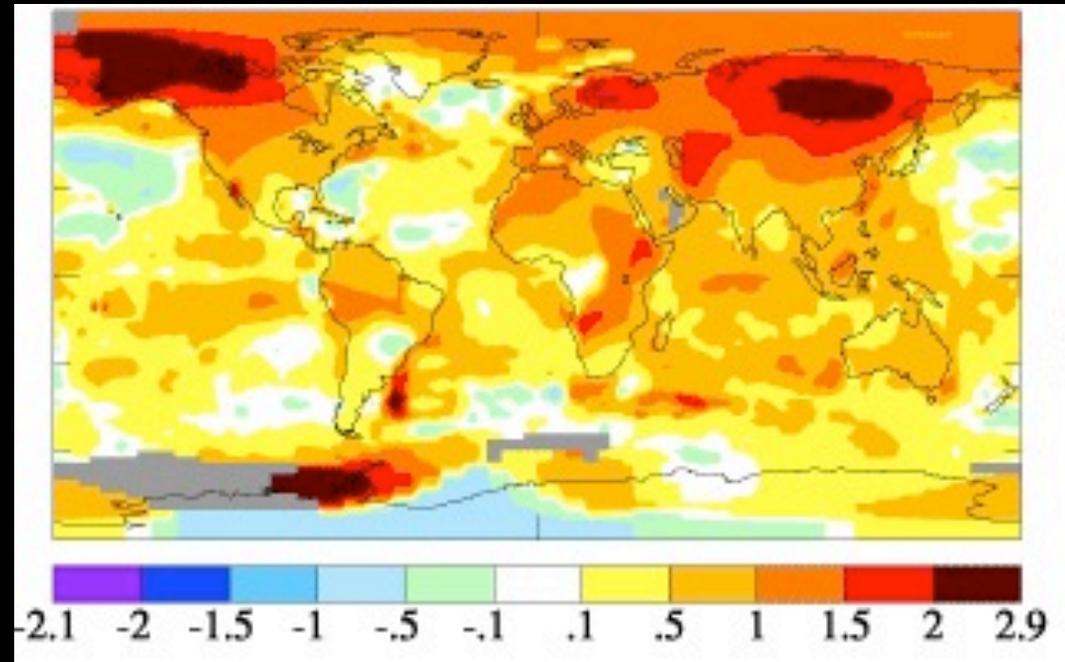
IPCC (2007)

Température globale

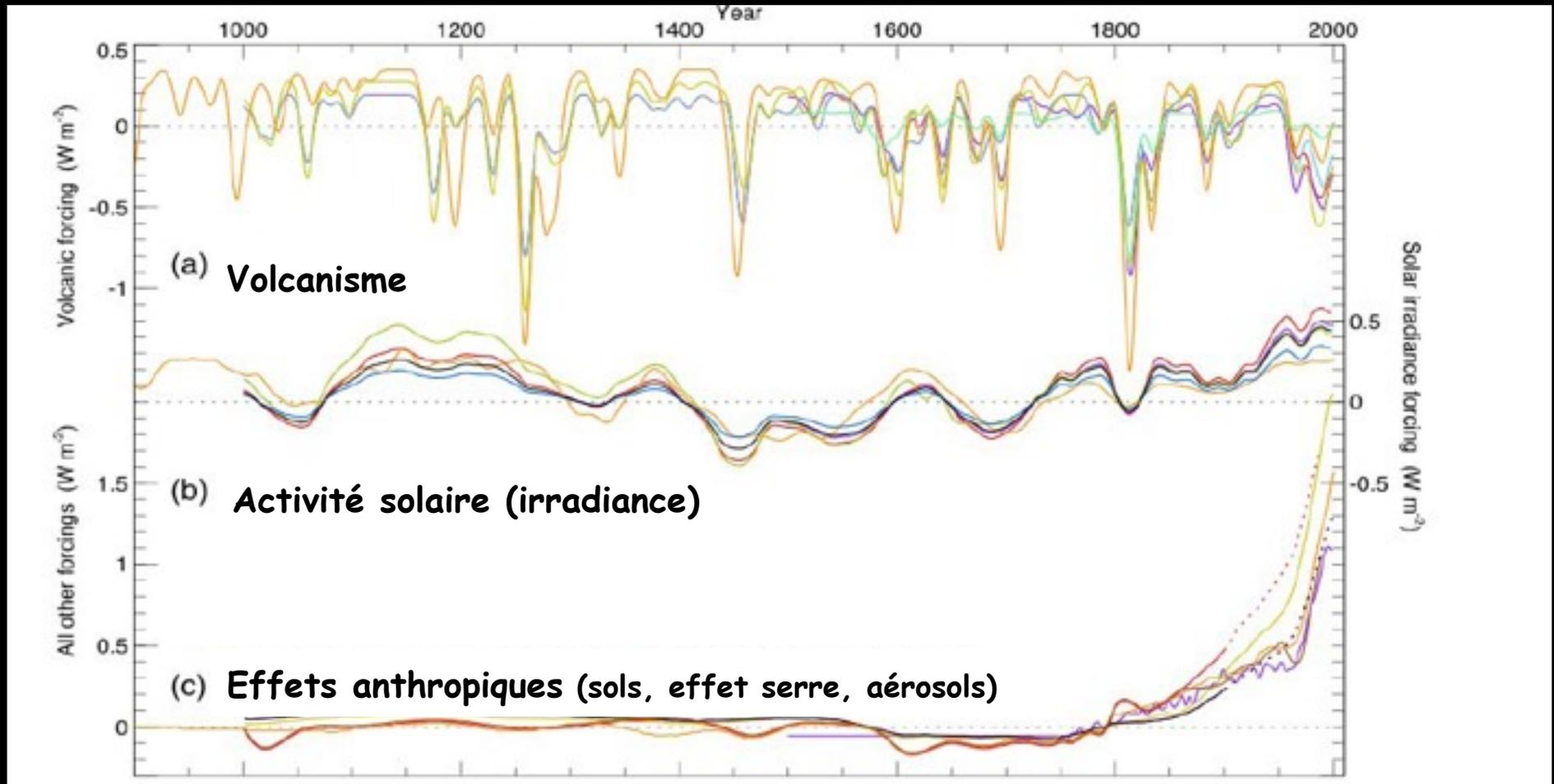
Réseau dense



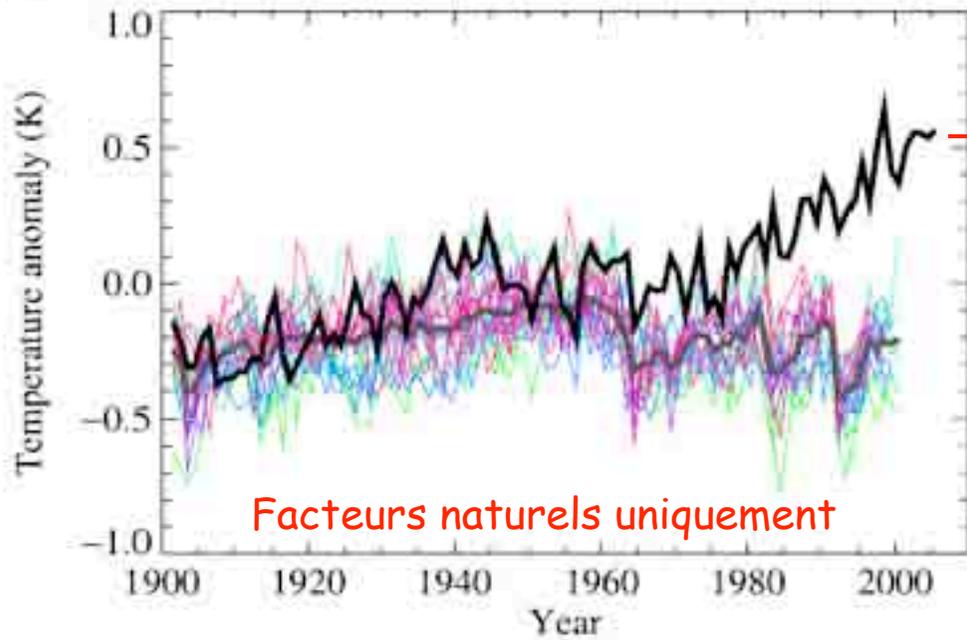
Tendance 1955 - 2005



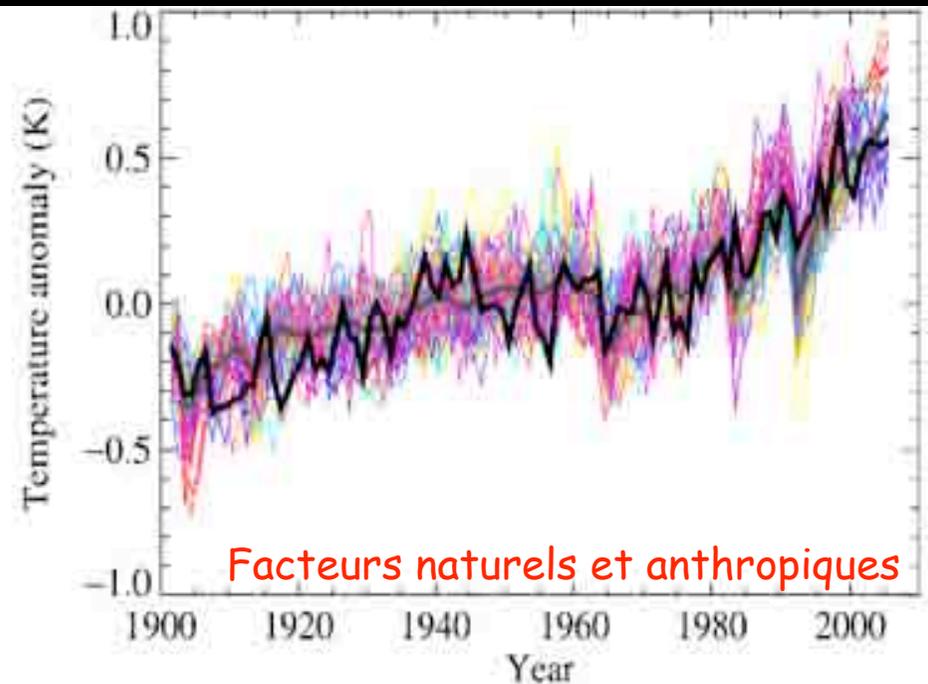
Impact des différents facteurs sur le bilan radiatif de la Terre



Simulation de la température globale

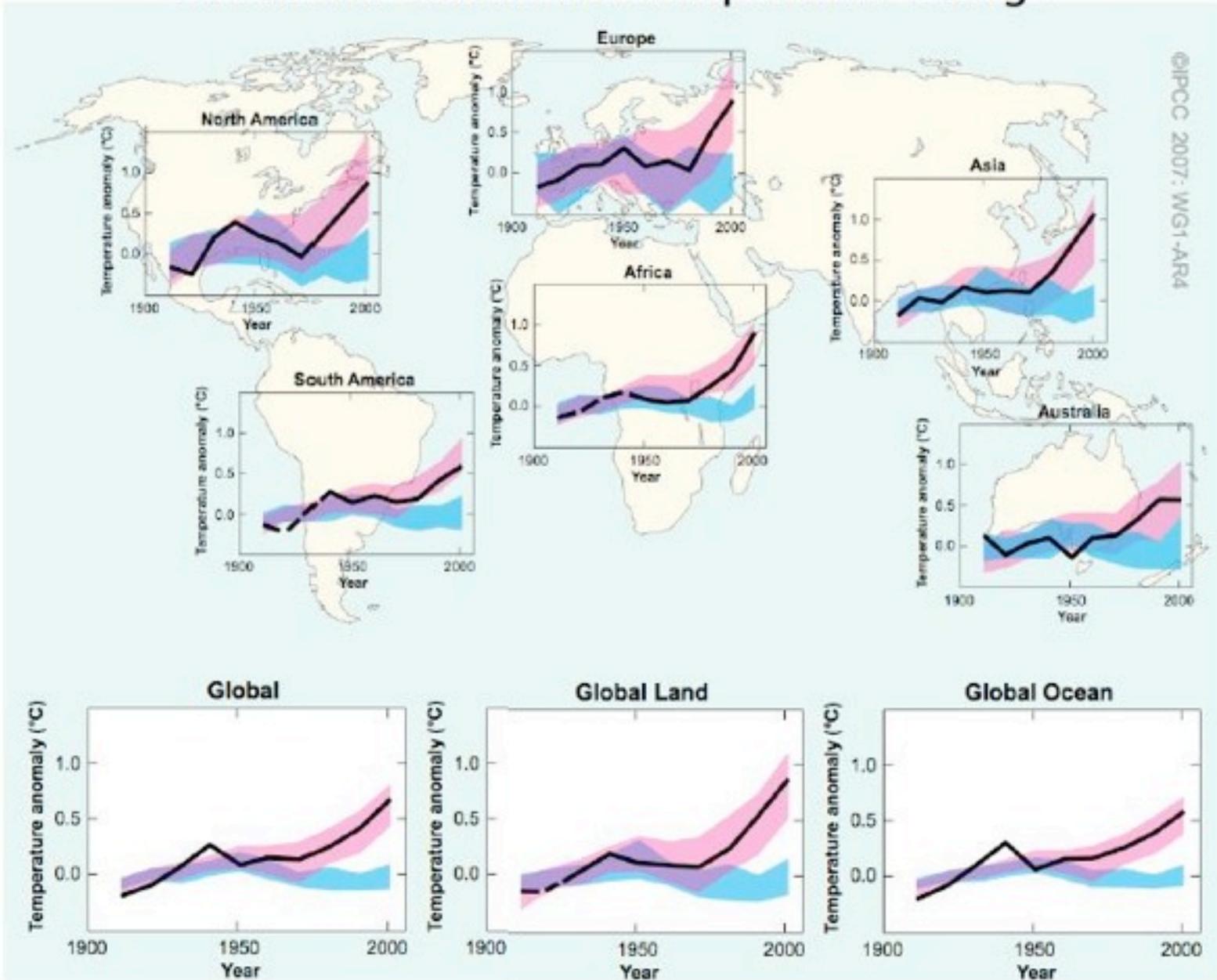


Le réchauffement observé depuis ~1970 ne peut s'expliquer que par l'effet des activités humaines (gaz à effet de serre)



IPCC (2007)

Global and Continental Temperature Change



IPCC (2007)

Les projections climatiques

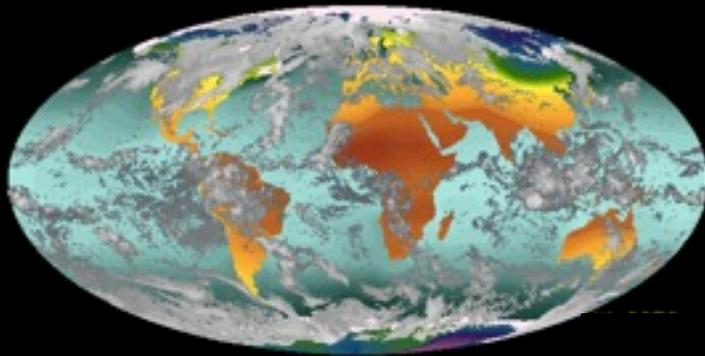
Prévision et Projection

- 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



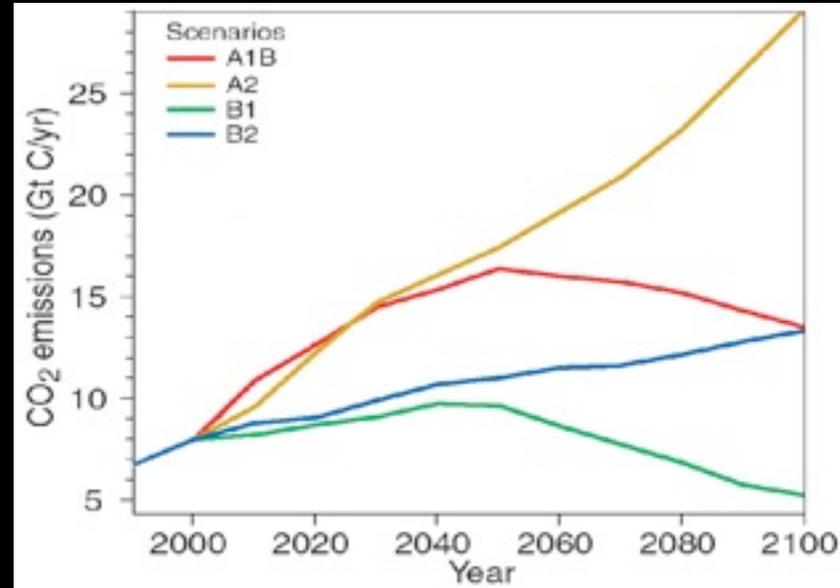
GIEC*:

- 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)

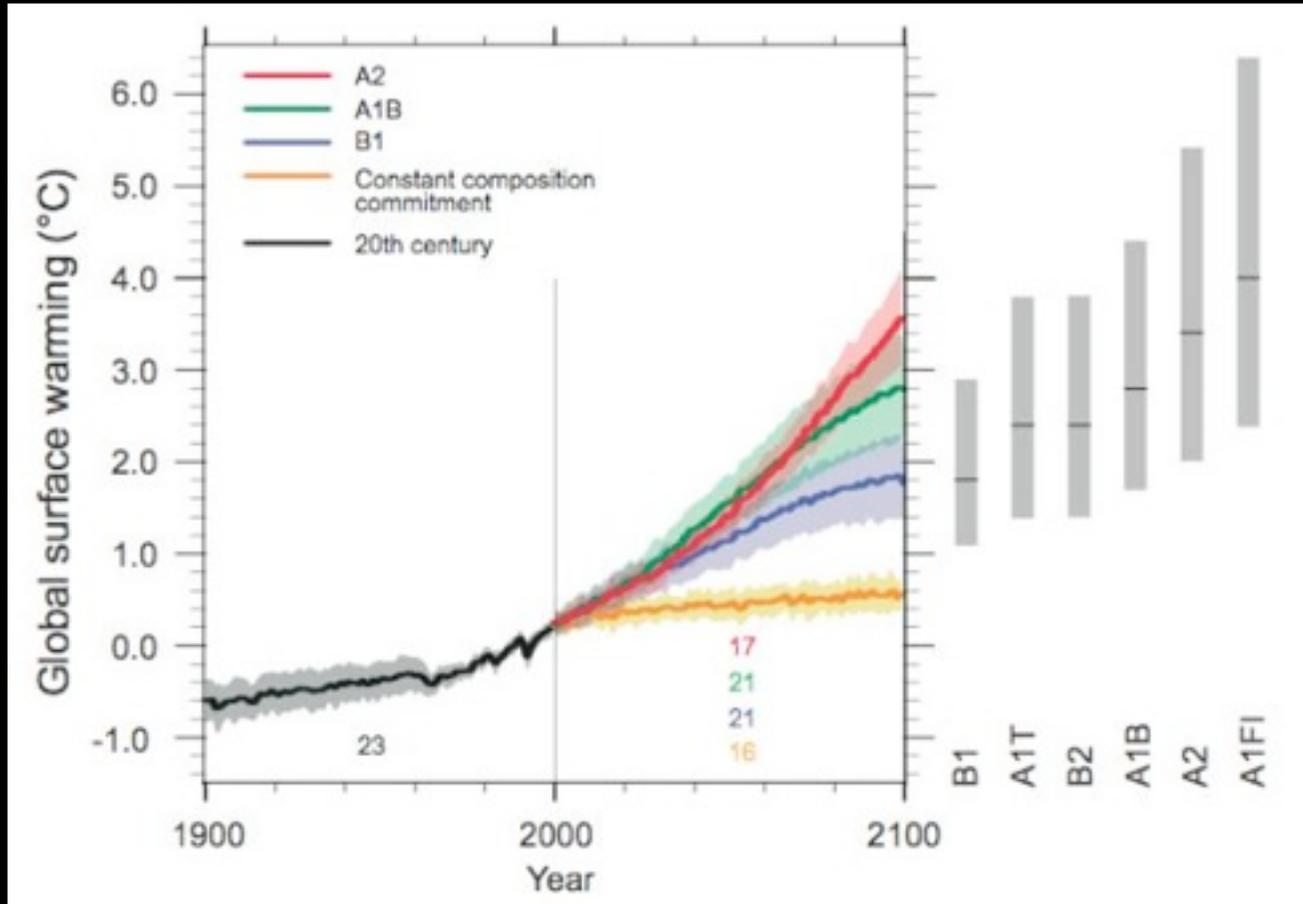
Projections des variations de la température globale (IPCC 2007)



Différent « scénarios » d'émission de CO₂ sont fournis par les économistes

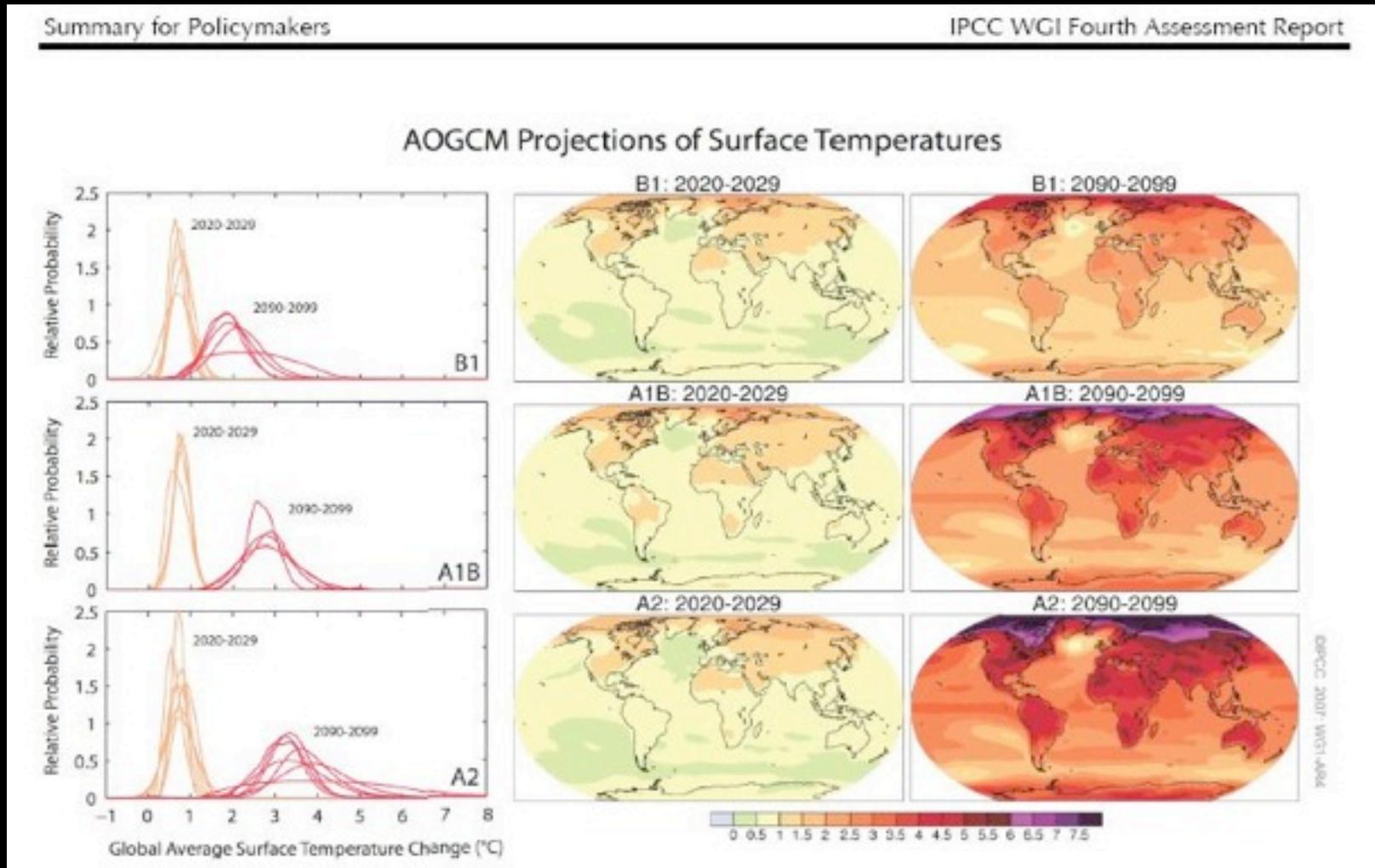
Projections des variations de la température globale (IPCC 2007)

IPCC (2007)



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

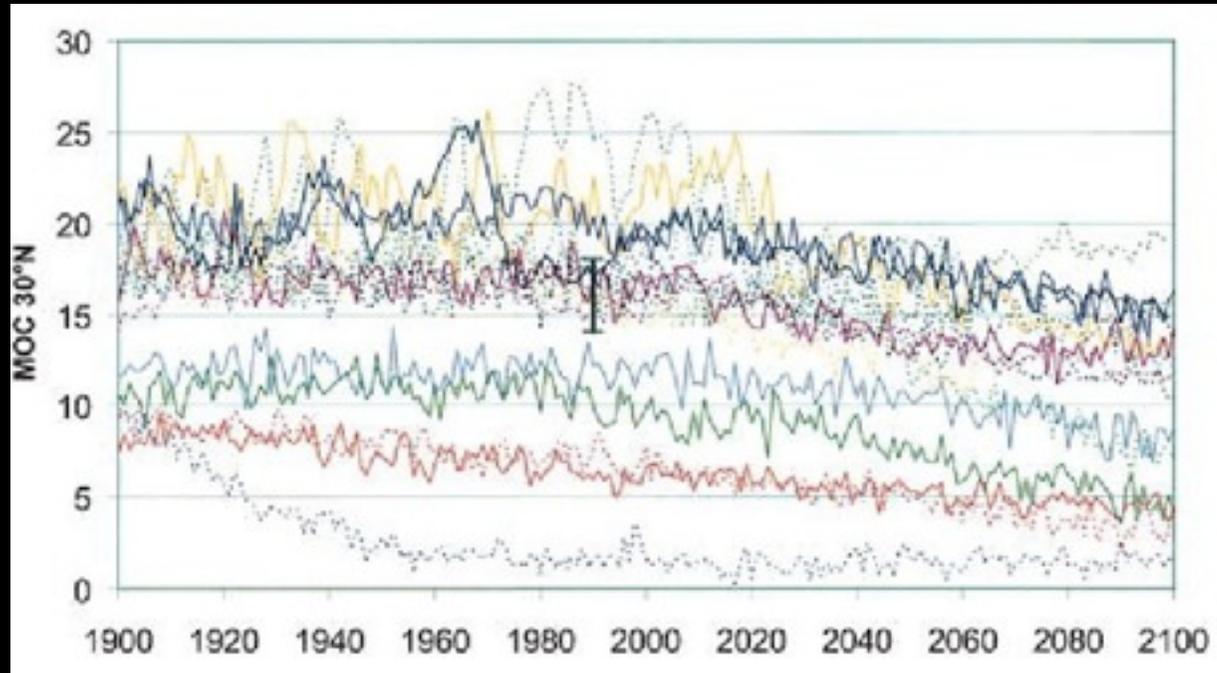
Projections des variations de la température



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

Modification de la circulation thermohaline ?

Evolution de la circulation thermohaline

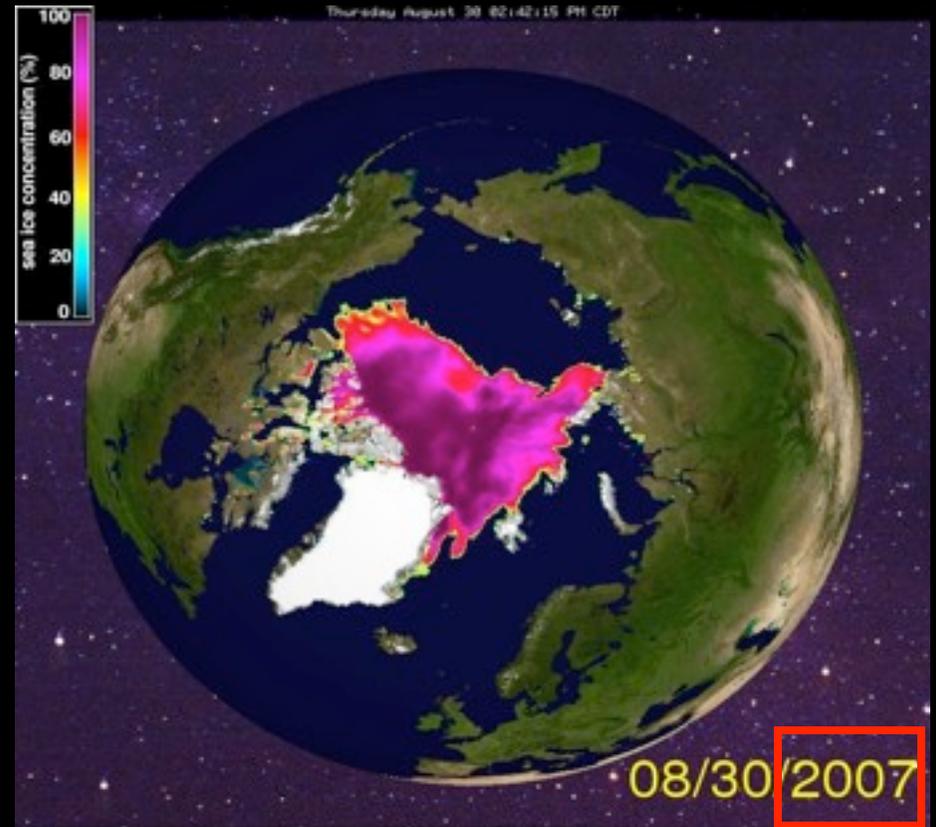
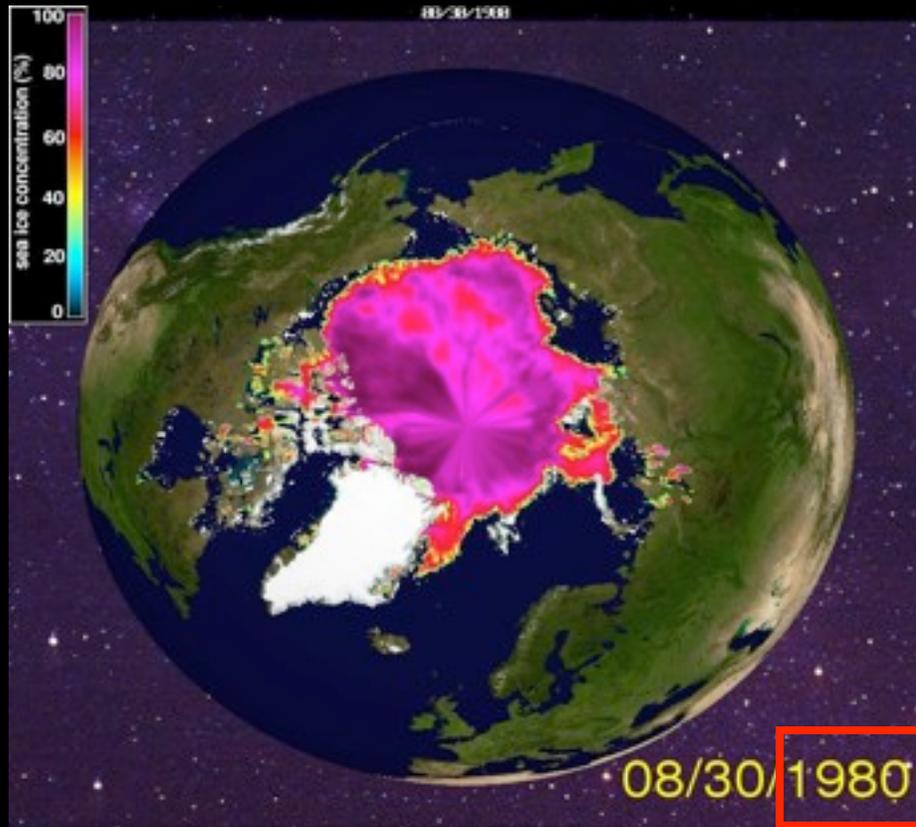


Modèles CMIP3 (2007)

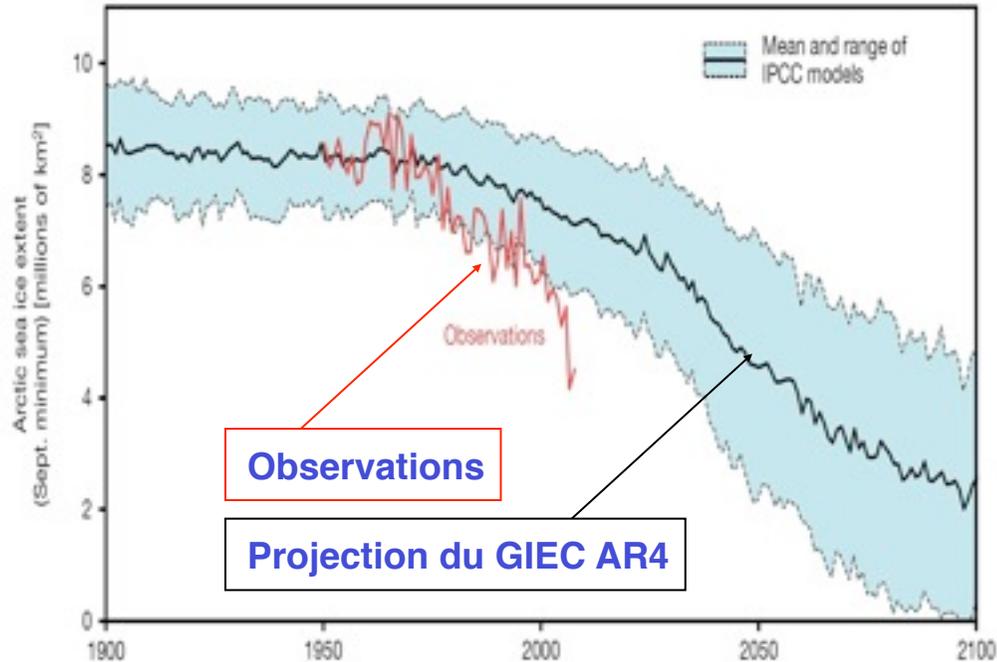


Modification de la banquise arctique

Observations, banquise d'été



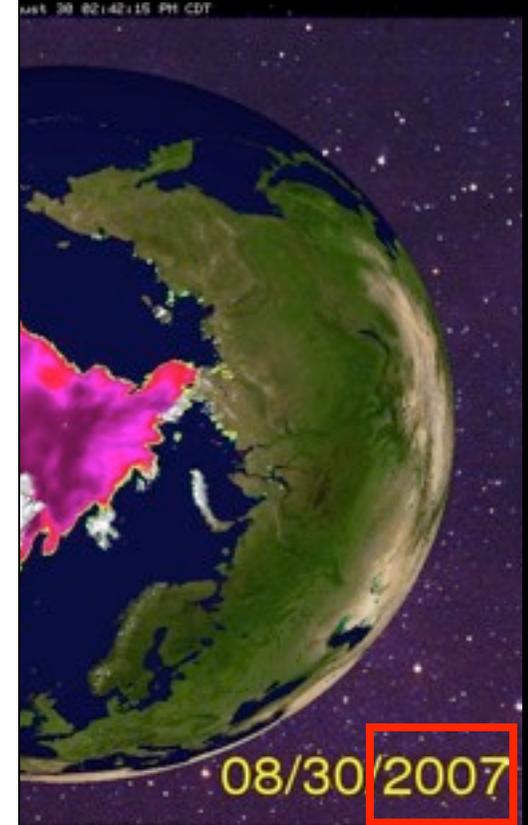
Modification de la banquise arctique



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



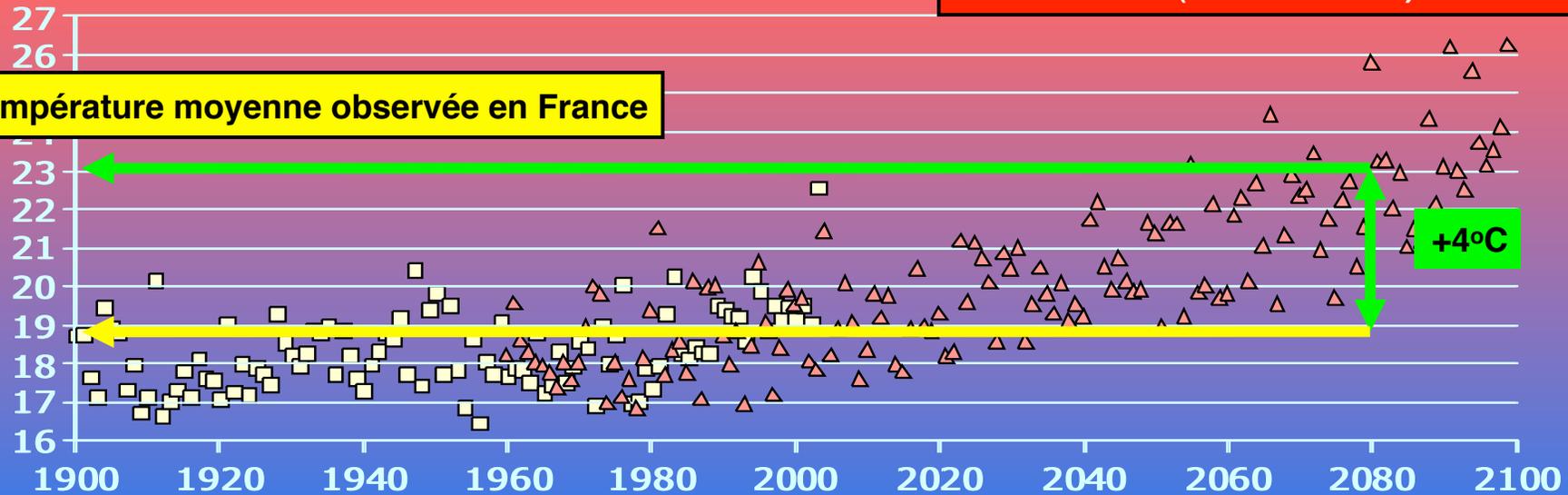
Présence de phénomènes à seuil,
Sous-estimation des rétroactions



Été en France: 20^{ème} et 21^{ème} siècles

Température moyenne simulée en France
(Scenario A1B)

Température moyenne observée en France



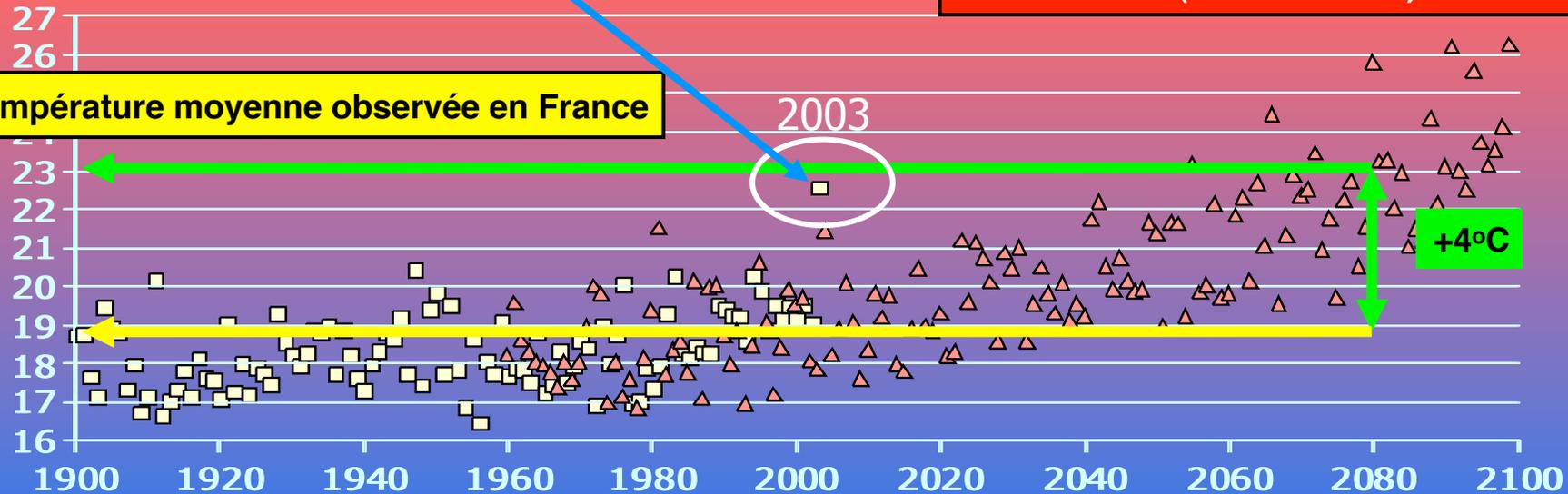
L'été 2003 peut être considéré comme un avant gout de nos étés a la fin du siècle:
Ce sera l'été « normal » (cad une fois sur deux de 2080), et un été froid pour 2100.

Été en France: 20^{ème} et 21^{ème} siècles

Anomalie 2003 = 3,7°C

Température moyenne simulée en France
(Scenario A1B)

Température moyenne observée en France



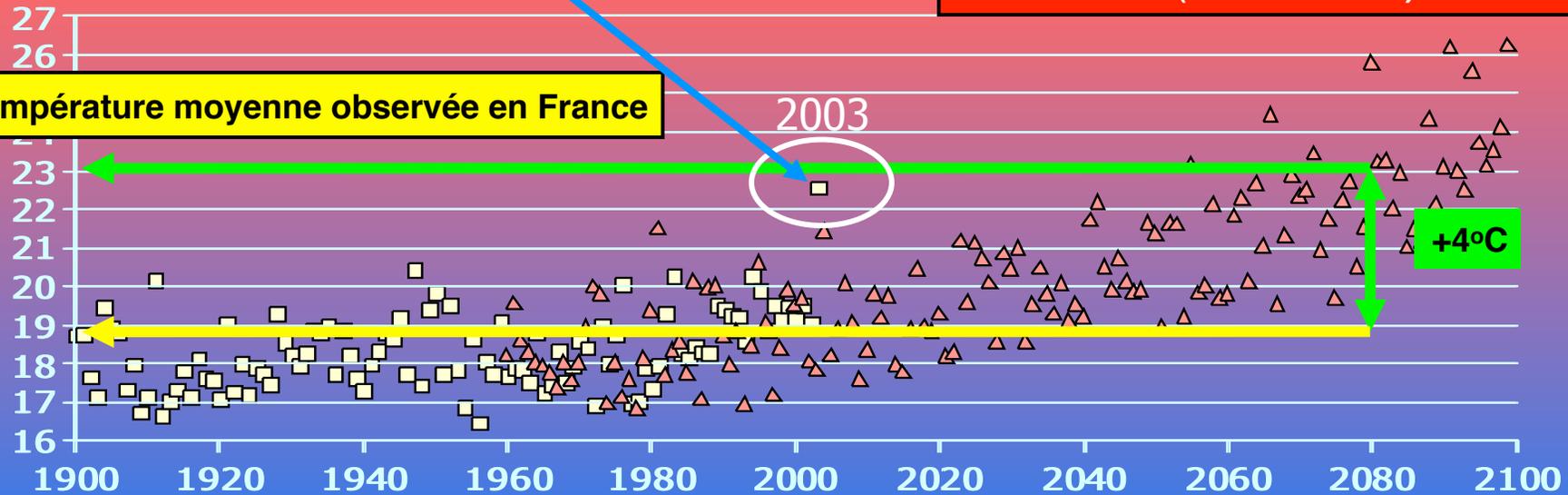
L'été 2003 peut être considéré comme un avant gout de nos étés a la fin du siècle:
Ce sera l'été « normal » (cad une fois sur deux de 2080), et un été froid pour 2100.

Été en France: 20^{ème} et 21^{ème} 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)

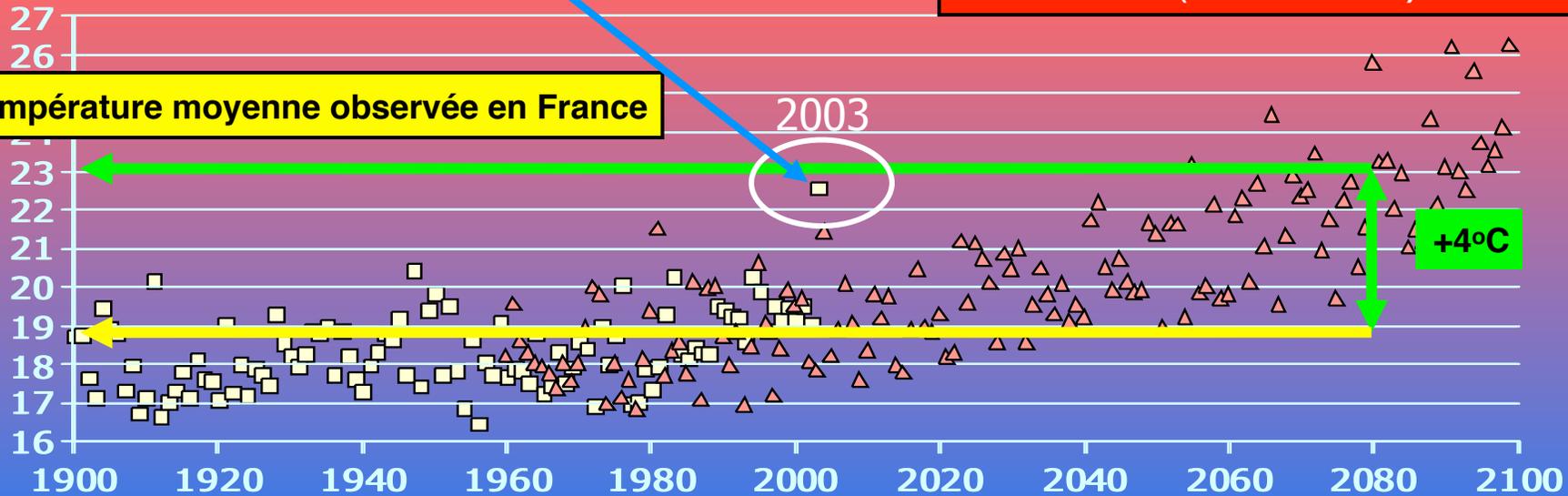
Source: C. Cassou

Été en France: 20^{ème} et 21^{ème} 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

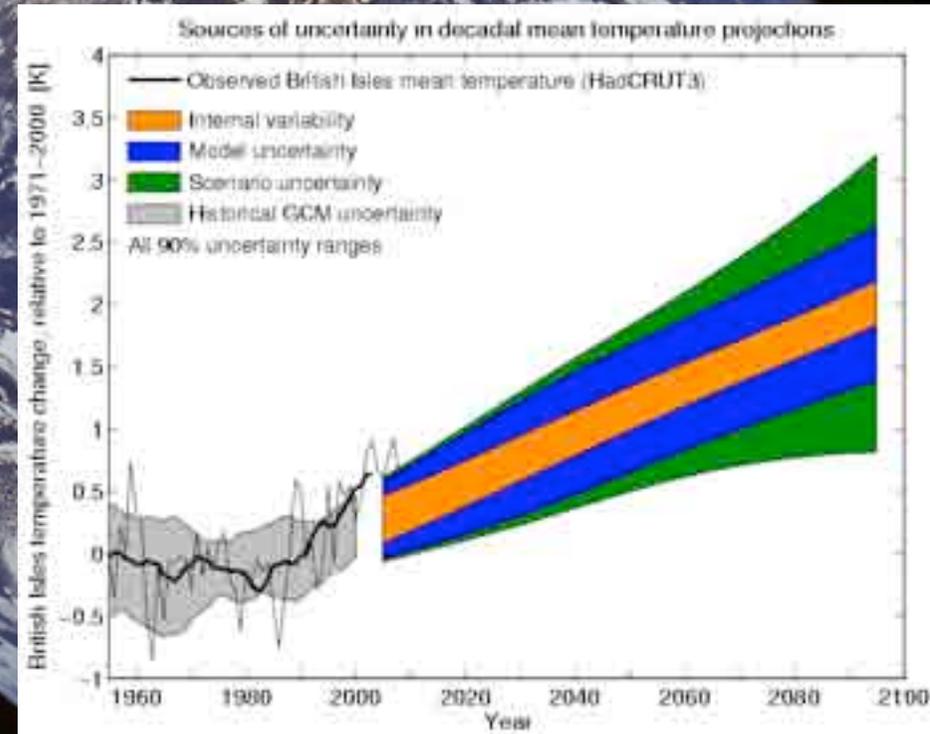


Certitudes et incertitudes

Les activités humaines
ont modifié le climat global

Incertitudes sur :

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



Hawkins and Sutton 2009

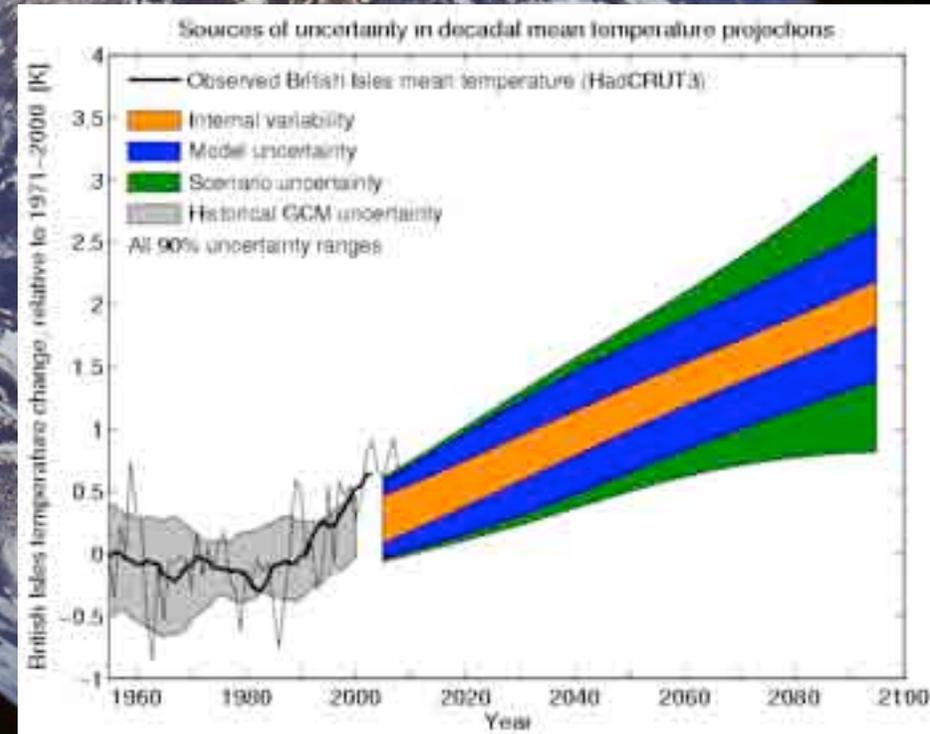
Certitudes et incertitudes

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 CO₂,
donc à nos choix de société à venir



Hawkins and Sutton 2009

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^{ème} 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

CNRS EDITIONS