

Changement climatique

Aurélien Ribes

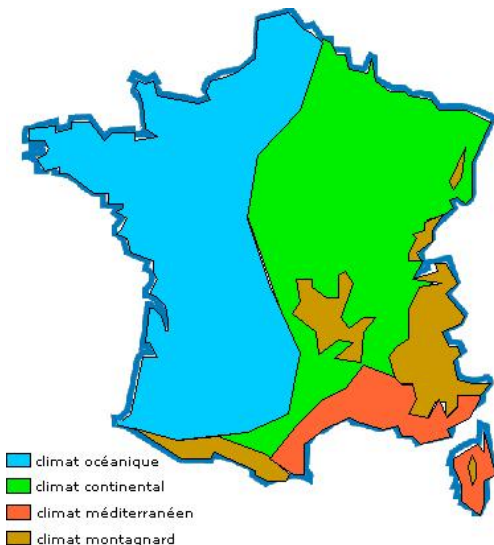
CNRM - GAME, Météo France - CNRS

ENPC, 5 Mars 2012

- 1 Introduction - Qu'est-ce que le climat ?
- 2 Système climatique
- 3 Modélisation du climat
- 4 Changement climatique : principe
- 5 Changement climatique : observations et attribution
- 6 Changement climatique : Scénarios et Projections
- 7 Impacts

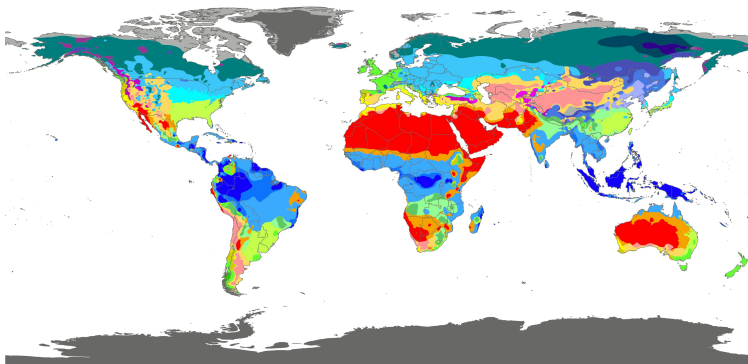
- 1 Introduction - Qu'est-ce que le climat ?
- 2 Système climatique
- 3 Modélisation du climat
- 4 Changement climatique : principe
- 5 Changement climatique : observations et attribution
- 6 Changement climatique : Scénarios et Projections
- 7 Impacts

Le climat classifié



Le climat classifié

World map of Köppen-Geiger climate classification



Af	BWh	Csa	Cwa	Cfa	Dsa	Dwa	Dfa	ET
Am	BWk	Csb	Cwb	Cfb	Dsb	Dwb	Dfb	EF
Aw	BSh	Cwc	Cfc	Dsc	Dwc	Dfc		
BSk				Dsd	Dwd	Dfd		

Contact : Murray C. Peel (mpeel@unimelb.edu.au) for further information

DATA SOURCE : GHCN v2.0 station data
Temperature (N = 4,844) and
Precipitation (N = 12,396)

PERIOD OF RECORD : All available

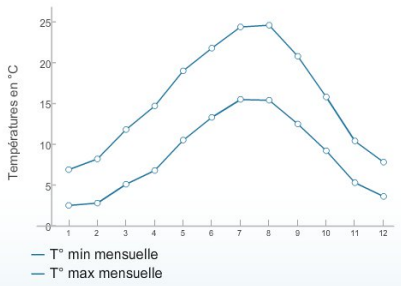
MIN LENGTH : ≥30 for each month.

RESOLUTION : 0.1 degree lat/long

Le climat parisien

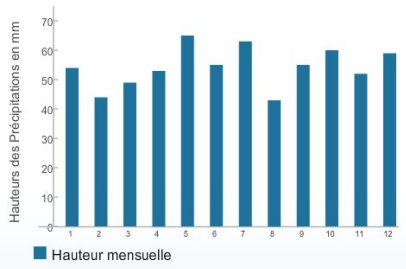
France → Ile-de-France → Paris-Montsouris

Normales mensuelles



France → Ile-de-France → Paris-Montsouris

Normales mensuelles

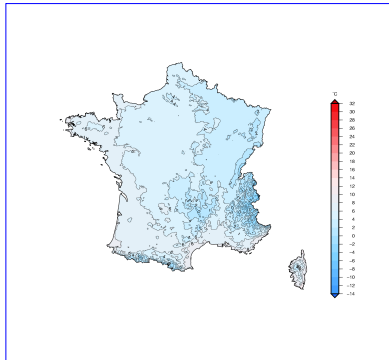


Source : Météo France

La France en Décembre



France

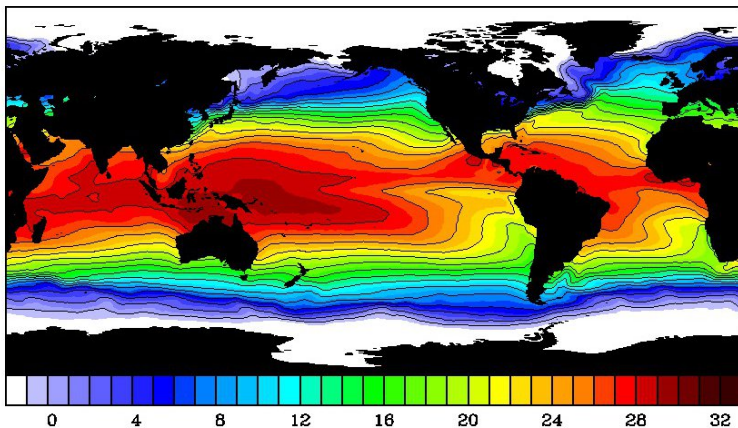


N.B. - La vente, redistribution ou rediffusion des informations reçues, en l'état ou sous forme de produits dérivés, est strictement interdite sans l'accord de METEO-FRANCE

Édité le : 24/02/2012
 Données du : 16/11/2011 10:09 UTC

Le climat de l'océan

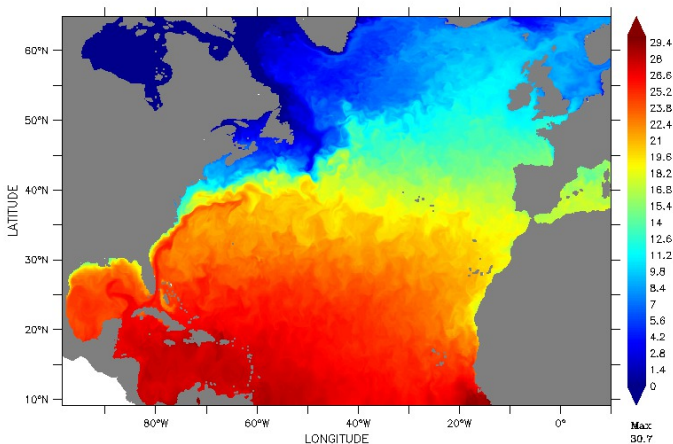
Reynolds Global SST Climatology December



Source : NOAA

Le climat de l'océan

Mercator_Ocean_PSY2V4 1/12 deg
North_Atlantic



Depth (m) : 0
Time : 21-DEC-2011 (analysis)

Temperature (degC)

Max
30.7
Min
-2.8
Average
18.6

L'été 2003

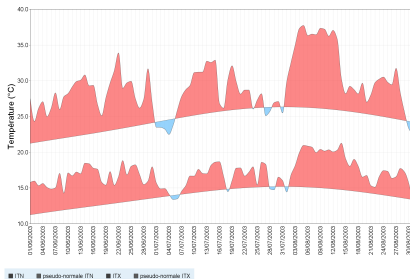


METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

Indicateurs quotidiens des températures minimales et maximales

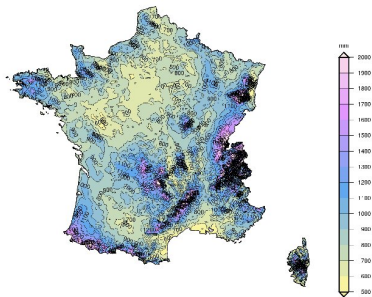
1er Juin 2003 au 31 Août 2003

zone climatique : France



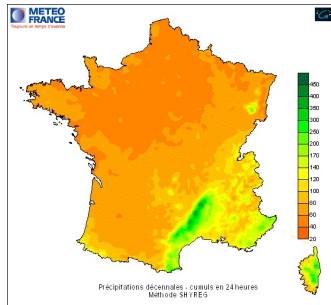
Précipitations en France

Cumuls annuels



Cumuls quotidiens max.

Durée de retour 10 ans



Source : Météo France

Sciences de l'atmosphère

Météo et climat

- Dans les deux cas, il s'agit de décrire l'état de l'atmosphère (au départ !), sa dynamique, etc.
- Les deux utilisent les mêmes variables (température, pression, pluie).

Sciences de l'atmosphère

Météo et climat

- Dans les deux cas, il s'agit de décrire l'état de l'atmosphère (au départ !), sa dynamique, etc.
- Les deux utilisent les mêmes variables (température, pression, pluie).

Grands principes

- Description physique de la dynamique de l'atmosphère à partir des équations de la mécanique des fluides (conservation de la masse, de l'énergie, de la quantité de mouvement, équation d'état + conditions aux limites).
- Les équations aux dérivées partielles (Navier-Stokes entre autres) sont non linéaires, on ne sait pas les résoudre explicitement.

Le climat

- Définitions : Climate in a narrow sense is usually defined as the average weather, or more rigorously, as the statistical description in terms of the mean and variability of relevant quantities over a period of time ranging from months to thousands of millions of years. The classical period for averaging these variables is 30 years, as defined by the World Meteorological Organization. The relevant quantities are most often surface variables such as temperature, precipitation and wind. Climate in a wider sense is the state, including a statistical description of the climate system (IPCC, 2007).
- Avec les mains : c'est la distribution probabiliste des différents « temps » (météorologiques) possibles.
- Si la prévision déterministe du temps (état de l'atmosphère) nous est inaccessible au delà de qq jours, sa distribution de probabilité est déterminée par de grands équilibres physiques (cf la suite !).

Le GIEC

- Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC ou IPCC en anglais) a été mis en place en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale et par le Programme des Nations Unis pour l'Environnement.
- Son objectif principal est d'évaluer l'information scientifique et socio-économique sur le changement climatique, ses impacts et les différentes options pour l'atténuer ou s'y adapter.
- Activité divisée en trois groupes de travail : bases physiques et scientifiques du changement climatique (WGI), impacts, vulnérabilité et adaptation (WGII), atténuation (ou *mitigation*, WGIII).
- Publie un rapport d'évaluation tous les 4 à 7 ans sur l'état des connaissances. Le volet I (WGI) du dernier rapport (AR4) publié en Février 2007, a associé environ 600 experts et environ 620 experts *reviewers*.
- Les rapports sont l'occasion de comparer les modèles de climat mondiaux sur la base de mêmes scénarios d'évolution (projets CMIP).

- 1 Introduction - Qu'est-ce que le climat ?
- 2 Système climatique**
- 3 Modélisation du climat
- 4 Changement climatique : principe
- 5 Changement climatique : observations et attribution
- 6 Changement climatique : Scénarios et Projections
- 7 Impacts

Définition

On pourrait se contenter d'étudier les propriétés probabilistes de l'atmosphère , mais :

- l'état de certaines des conditions aux limites est lui-même variable (ex : l'océan), et peut être considéré comme aléatoire au même titre que l'atmosphère (fluide, Navier-Stokes, etc) ; de plus l'état de l'océan n'est pas indépendant de celui de l'atmosphère !
- n'étudier que l'atmosphère serait nécessairement limité en présence d'un changement important du système (ex : augmentation de l'effet de serre).

Climate system (IPCC, 2007) :

The climate system is the highly complex system consisting of five major components : the atmosphere, the hydrosphere, the cryosphere, the land surface and the biosphere, and the interactions between them. [...]

Définition

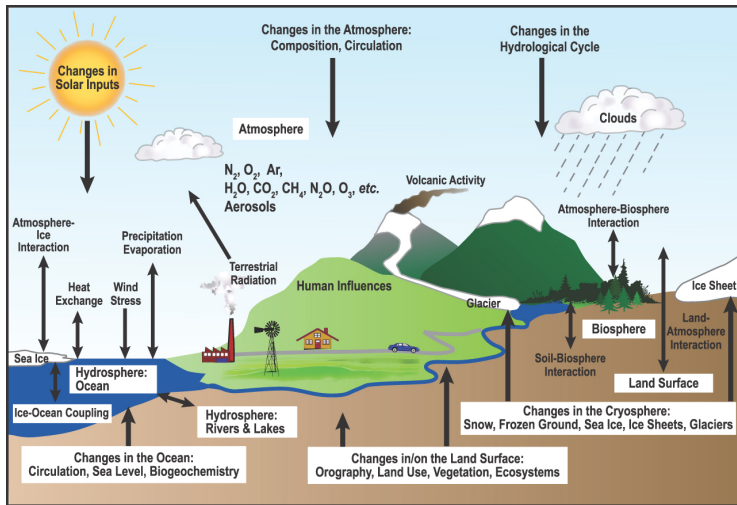
On pourrait se contenter d'étudier les propriétés probabilistes de l'atmosphère , mais :

- l'état de certaines des conditions aux limites est lui-même variable (ex : l'océan), et peut être considéré comme aléatoire au même titre que l'atmosphère (fluide, Navier-Stokes, etc) ; de plus l'état de l'océan n'est pas indépendant de celui de l'atmosphère !
- n'étudier que l'atmosphère serait nécessairement limité en présence d'un changement important du système (ex : augmentation de l'effet de serre).

Climate system (IPCC, 2007) :

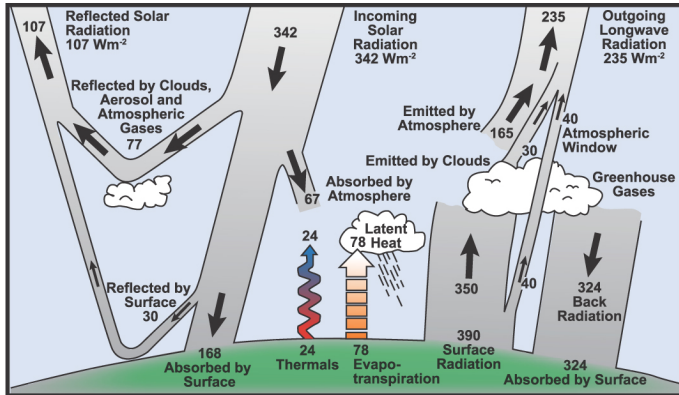
The climate system is the highly complex system consisting of five major components : the atmosphere, the hydrosphere, the cryosphere, the land surface and the biosphere, and the interactions between them. [...]

Le système climatique schématisé



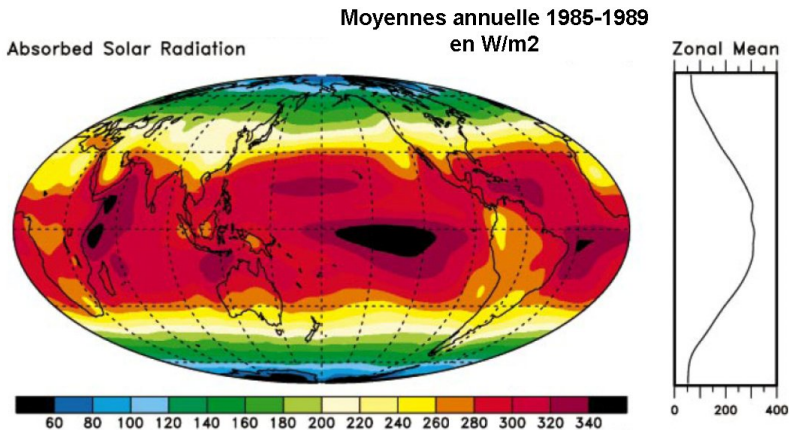
Source : GIEC, 2007.

Bilan d'énergie



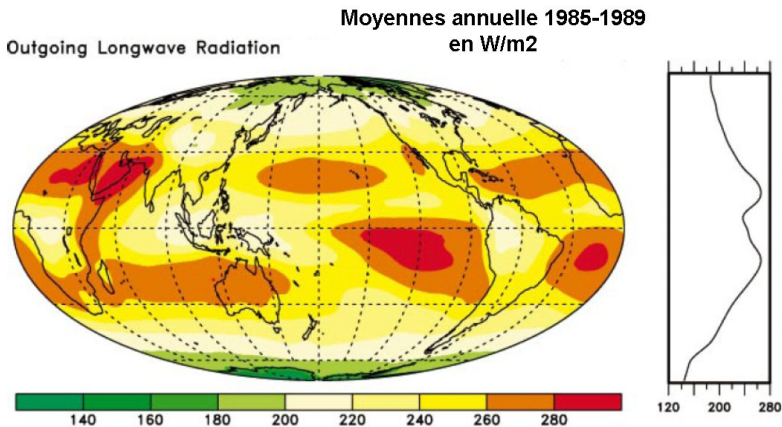
Source : GIEC, 2007

Bilan d'énergie



Source : Trenberth & Stepaniak, 2003

Bilan d'énergie

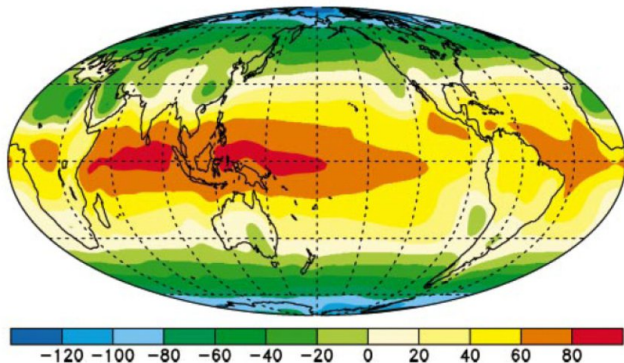


Source : Trenberth & Stepaniak, 2003

Bilan d'énergie

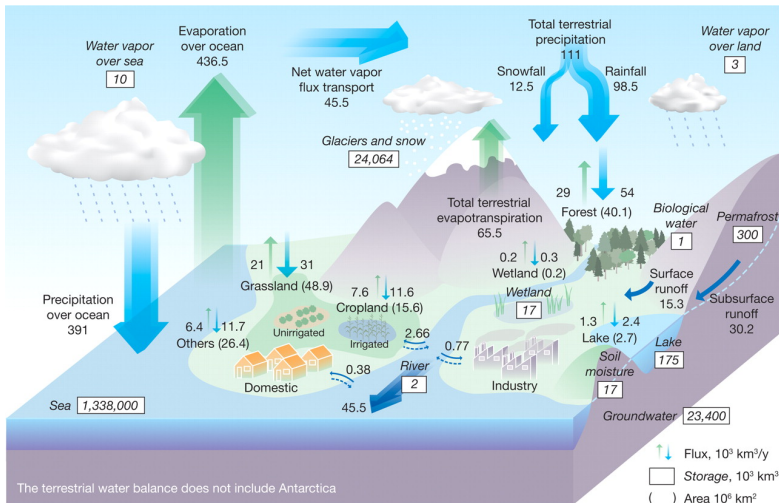
Moyennes annuelle 1985-1989
en W/m^2

Net Radiation



Source : Trenberth & Stepaniak, 2003

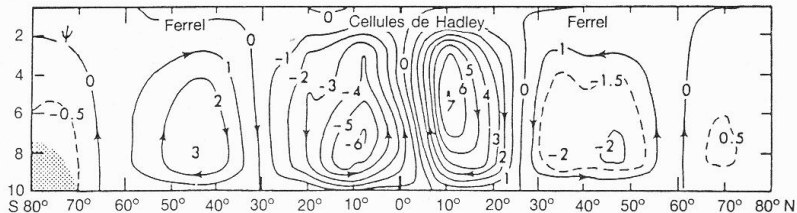
Cycle de l'eau



Source : Oki & Kanae, 2006

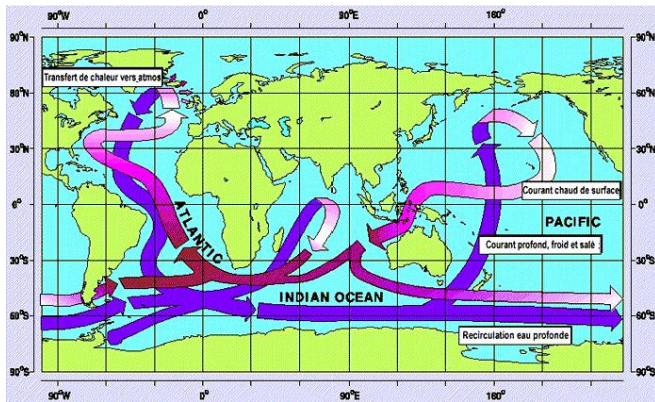
Circulation moyenne

L'atmosphère



Circulation moyenne

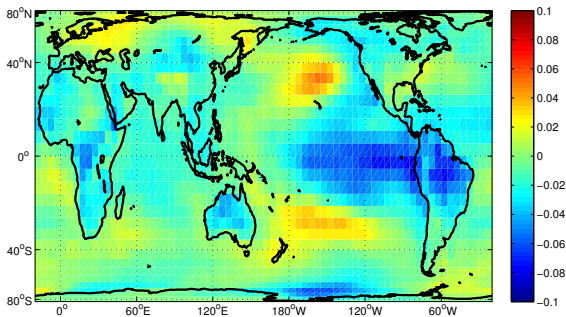
L'océan profond



Modes de variabilité

Événements Nino / Nina

(1^{ère} composante principale de la température à 2m)

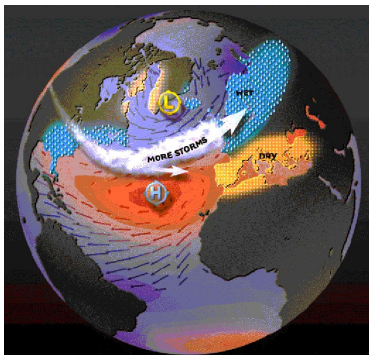


Source : calcul de l'auteur

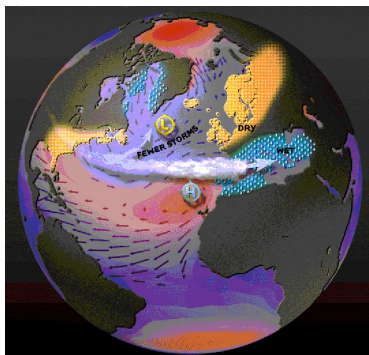
Modes de variabilité

L'oscillation Nord-Atlantique

NAO+



NAO-



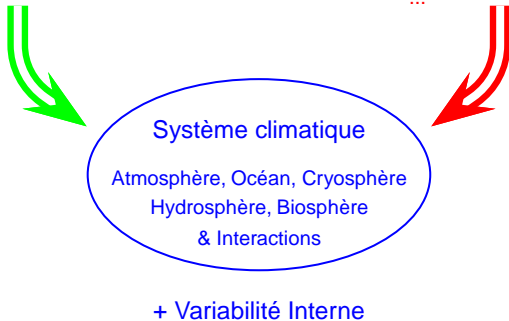
Les influences extérieures

Forçages naturels

- Activité solaire
- Éruptions volcaniques
- Variations d'orbite ("astronomique")
- ...

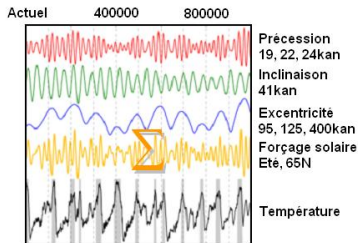
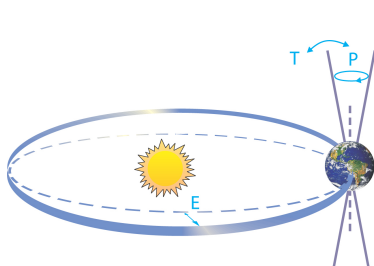
Forçages anthropiques

- Gaz à effet de serre
- Aérosols
- Utilisation des sols
- ...



Le forçage astronomique

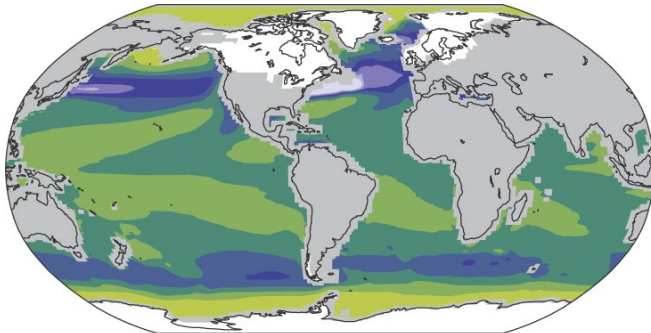
Variations de l'orbite terrestre



Source : GIEC, 2007

Le forçage astronomique

Le dernier maximum glaciaire

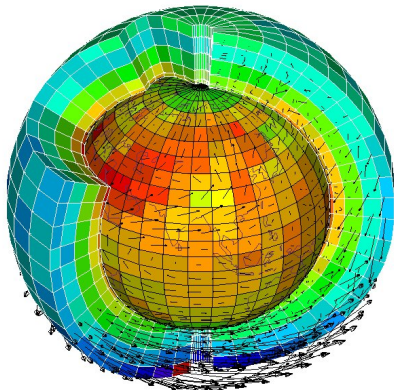


Sea Surface Temperature Change (°C)

Source : GIEC, 2007

- 1 Introduction - Qu'est-ce que le climat ?
- 2 Système climatique
- 3 Modélisation du climat**
- 4 Changement climatique : principe
- 5 Changement climatique : observations et attribution
- 6 Changement climatique : Scénarios et Projections
- 7 Impacts

La modélisation



Modélisation basée sur :

- équations physiques
- résolution numérique
approchée des EDP
(schéma numériques)

Discrétisation :

- spatiale (H) \sim qq à 100 km,
- spatiale (V) \sim qq à 500 m,
- temporel \sim 15'.

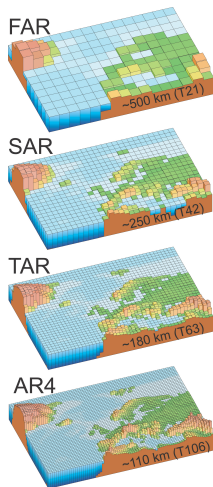
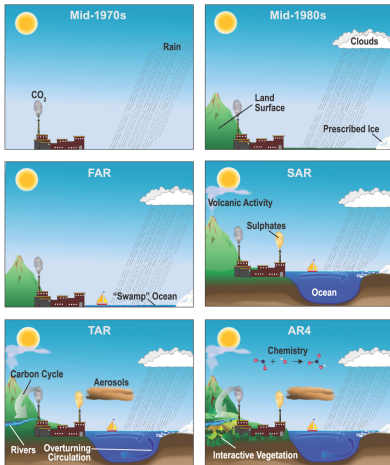
Source : IPSL

Modélisation du système climatique

- Comprendre le climat signifie comprendre l'ensemble du système climatique.
- On construit des modèles qui ne représentent plus seulement l'atmosphère, mais l'ensemble des constituants du système climatique.
- Ex : l'océan est régi, qualitativement, par des équations du même type que celles de l'atmosphère

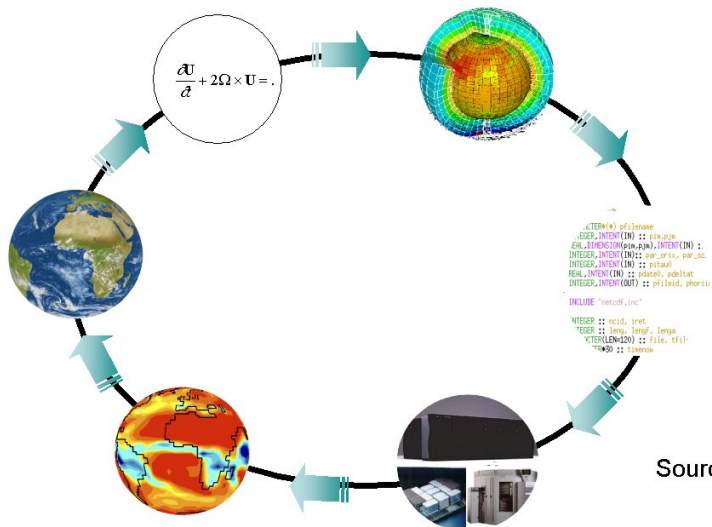
Complexification des modèles de climat

The World in Global Climate Models



Source : GIEC, 2007

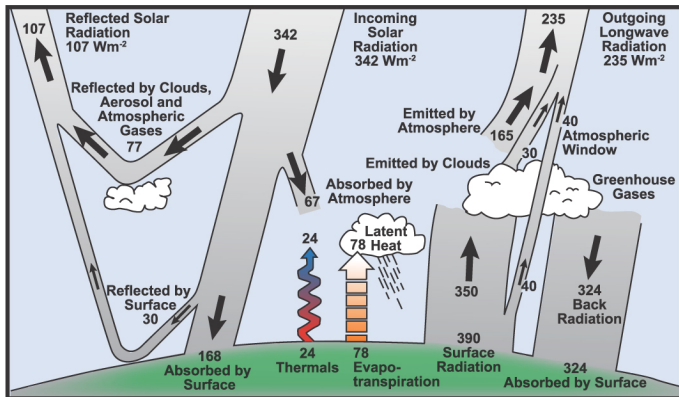
Boucle de modélisation



Source: IPSL

- 1 Introduction - Qu'est-ce que le climat ?
- 2 Système climatique
- 3 Modélisation du climat
- 4 Changement climatique : principe**
- 5 Changement climatique : observations et attribution
- 6 Changement climatique : Scénarios et Projections
- 7 Impacts

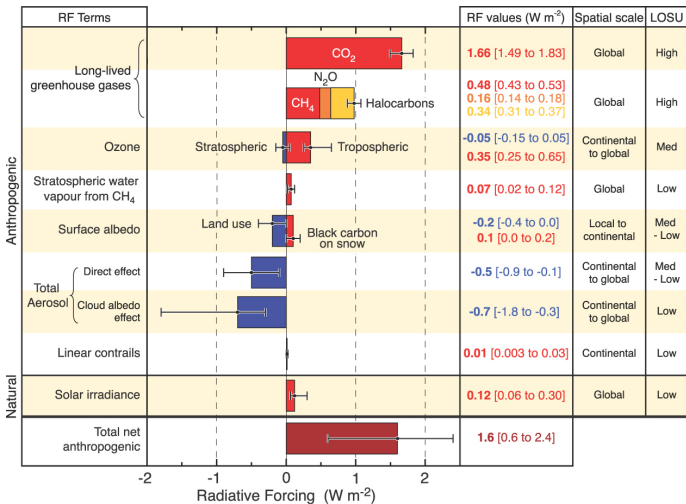
Bilan radiatif planétaire



Source : GIEC, 2007

Importance de l'effet de serre, H_2O , rétroactions, rôle des différents forçages.

Contribution des différents forçages (2005 vs 1750)

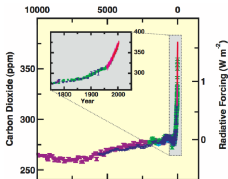


Source : GIEC, 2007

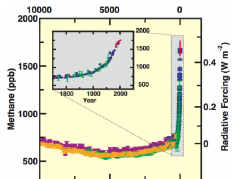
- 1 Introduction - Qu'est-ce que le climat ?
- 2 Système climatique
- 3 Modélisation du climat
- 4 Changement climatique : principe
- 5 Changement climatique : observations et attribution**
- 6 Changement climatique : Scénarios et Projections
- 7 Impacts

Évolution des concentrations de GES

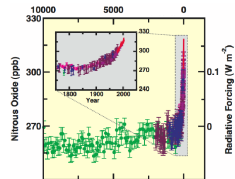
CO_2



CH_4

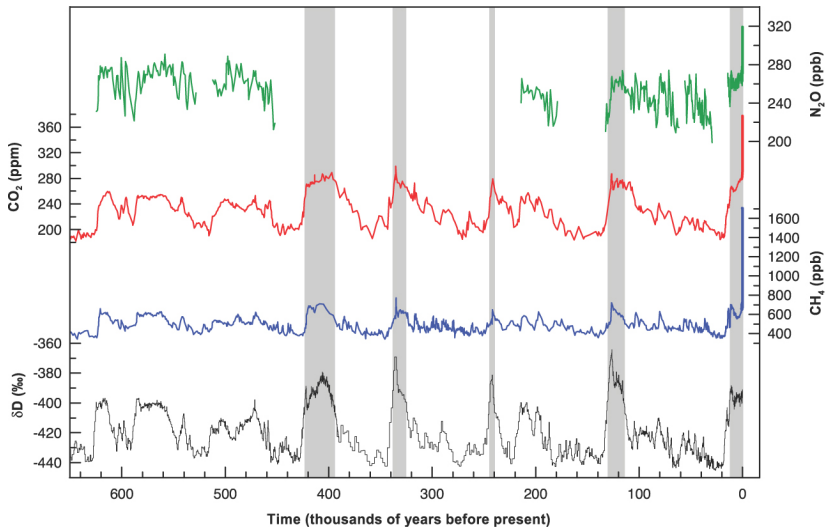


N_2O



Source : GIEC, 2007

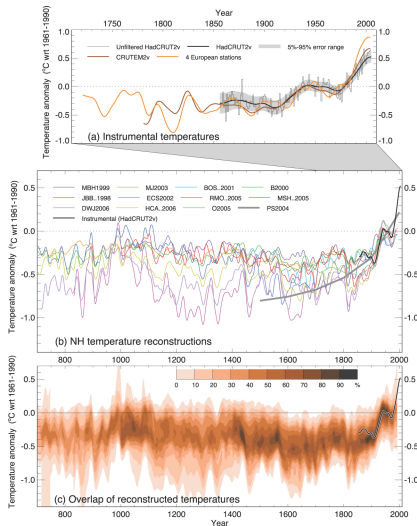
Observations paléo-climatiques



Histoire des GES, de T, liens et rétroaction.

(Source : GIEC, 2007)

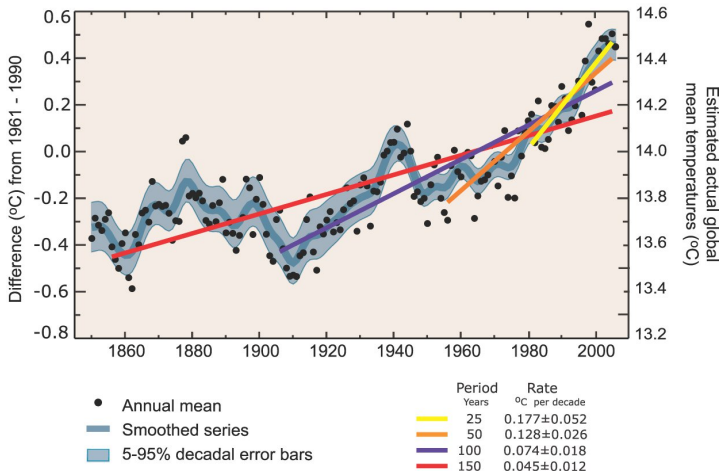
Observations du dernier millénaire



Proxies, niveau de confiance, etc.

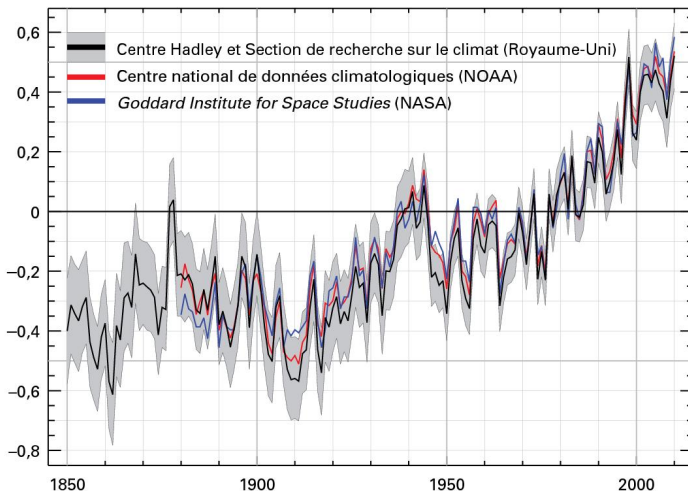
(Source : GIEC, 2007)

Observations récentes (*instrumentales*)



Source : GIEC, 2007

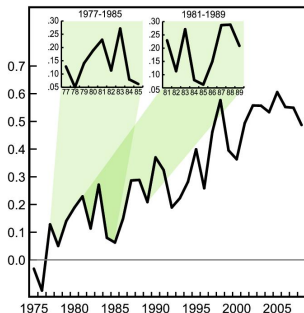
Observations récentes (*instrumentales*)



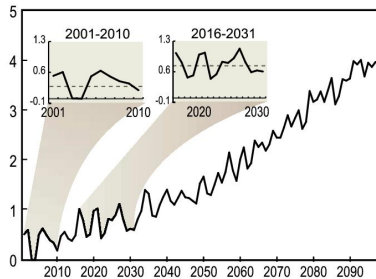
Source : OMM

Observations récentes (*instrumentales*)

Observations 1975-2008



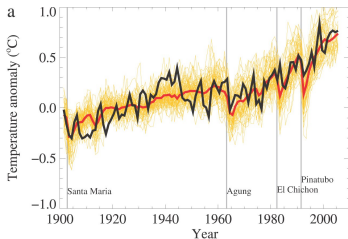
Projections 2000-2100, scénario A2



Source : Easterling & Wehner, 2009

Rôle des forçages

Forçages Anth. + Nat.



Forçages Nat.

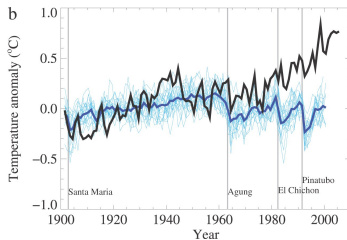


FIG. 1: Attribution (points 2 et 3) du réchauffement de la température annuelle moyenne globale au(x) forçage(s) anthropique(s) (Illustration, 4^{ème} Rapport du GIEC, 2007)

Attribution à l'échelle globale : résultats de l'AR4

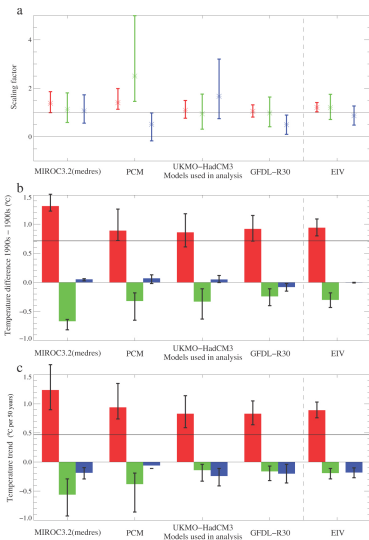


FIG. 2 : Résultats de l'AR4 sur l'estimation des *scaling factors* sur la température moyenne globale annuelle. Interprétation.

“Greenhouse gas forcing alone during the past half century would *likely* have resulted in greater than the observed warming if there had not been an offsetting cooling effect from aerosol and other forcings.”

Source : GIEC, 2007.

En France

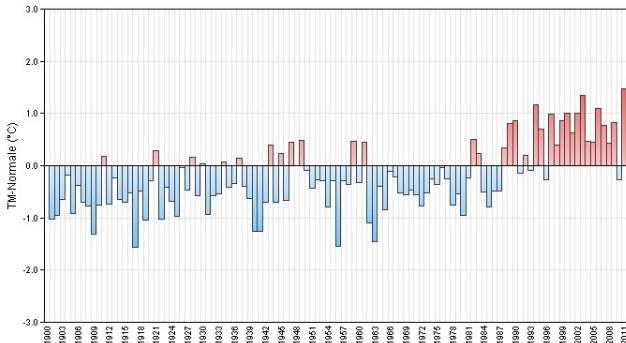


FIG. 2: Écart à la moyenne annuelle de référence 1971-2000 de l'indicateur de température moyenne France (Source : Météo France).

En France (2)

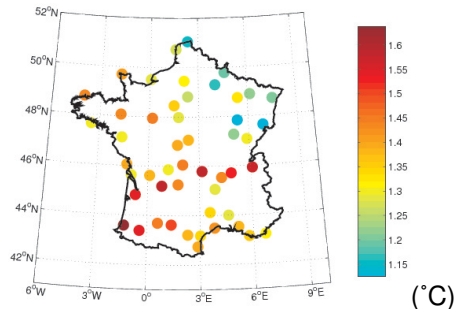


FIG. 3: Changement de température moyenne estimé entre 1900 et 2006 (Ribes et al., 2010).

En France (2)

La distribution spatiale du changement estimé est :

- non nulle,
- de moyenne non nulle,
- non uniforme.

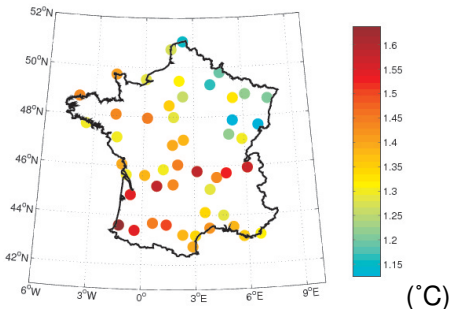
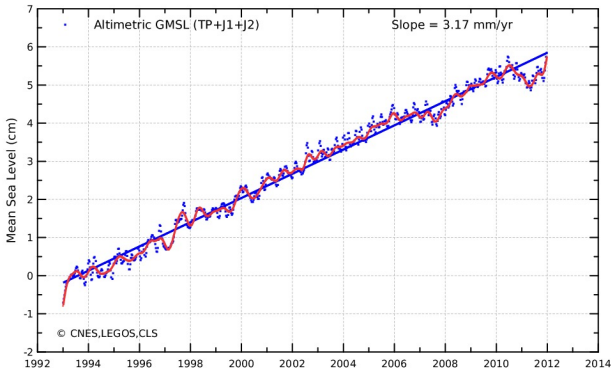


FIG. 3: Changement de température moyenne estimé entre 1900 et 2006 (Ribes et al., 2010).

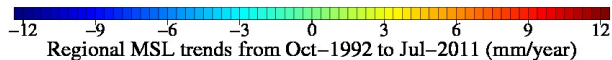
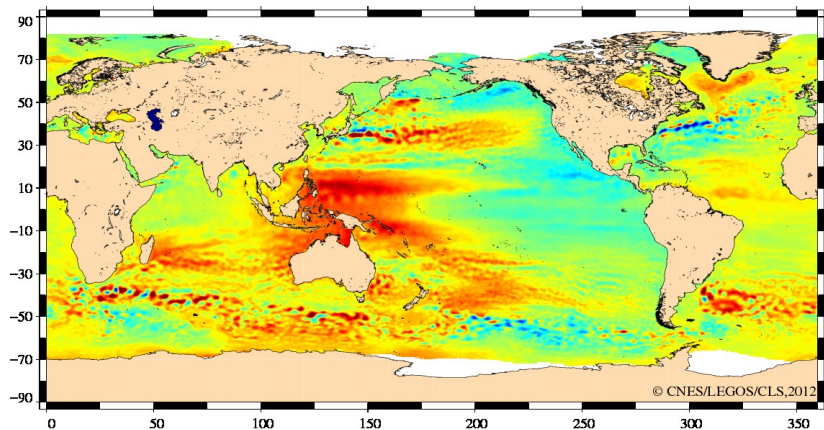
Niveau de la mer



Source : LEGOS

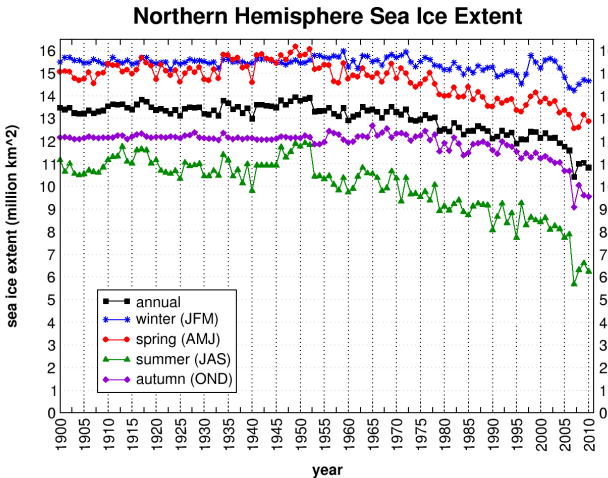
Contributions : stérique (1/3), glaciers (1/3), calottes(1/3).

Niveau de la mer

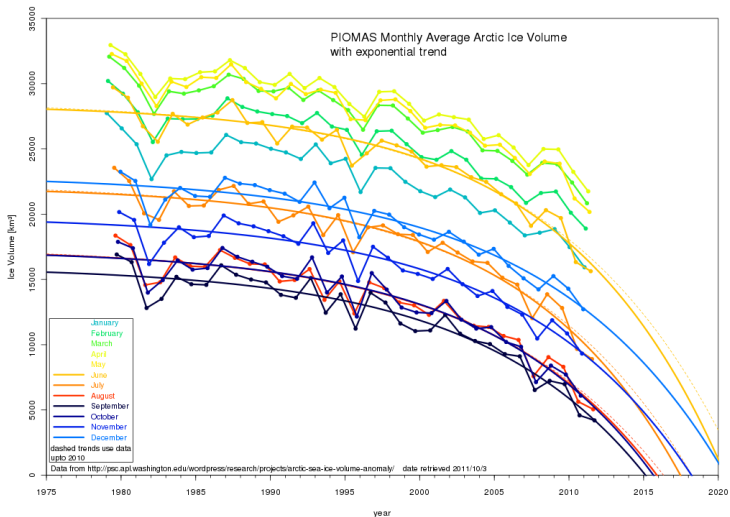


Source : LEGOS

La banquise arctique



La banquise arctique



Quelques conclusions du GIEC

- Le réchauffement du système climatique est sans équivoque, car il ressort désormais des observations de l'augmentation des températures moyennes mondiales de l'atmosphère et de l'océan, de la fonte généralisée des neiges et des glaces, et de l'élévation du niveau moyen mondial de la mer.
- L'essentiel de l'accroissement observé sur la température moyenne globale depuis le milieu du XX^{ème} siècle est très probablement dû à l'augmentation observée des concentrations des gaz à effet de serre anthropiques.
- Les informations paléoclimatiques confirment l'interprétation que le réchauffement du dernier demi-siècle est atypique sur au moins les 1 300 dernières années. La dernière fois que les régions polaires ont été significativement plus chaudes qu'actuellement pendant une longue durée (il y a environ 125 000 ans), la réduction du volume des glaces polaires a conduit à une élévation du niveau des mers de 4 à 6 mètres.

Autres conclusions

- De nombreux autres composants du système climatique montrent des évolutions significatives :
 - Glaciers de montagnes,
 - Enneigement en montagne,
 - Contenu de chaleur et salinité de l'océan,
 - Cours d'eau (débits, régimes, extrêmes),
 - etc.

- Certaines caractéristiques du climat ne montrent pas d'évolution significative à l'heure actuelle ; ex :
 - Tempêtes en France,
 - Épisodes de précipitations intenses en France.

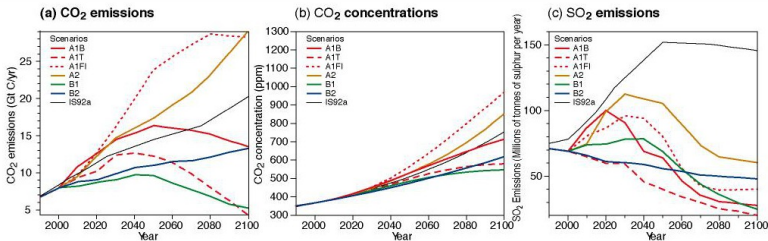
- 1 Introduction - Qu'est-ce que le climat ?
- 2 Système climatique
- 3 Modélisation du climat
- 4 Changement climatique : principe
- 5 Changement climatique : observations et attribution
- 6 Changement climatique : Scénarios et Projections**
- 7 Impacts

Scénarios socio-économiques

Scenario	Population	Economy	Environment	Equity	Technology	Globalization
A1FI						
A1B						
A1T						
B1						
A2						
B2						

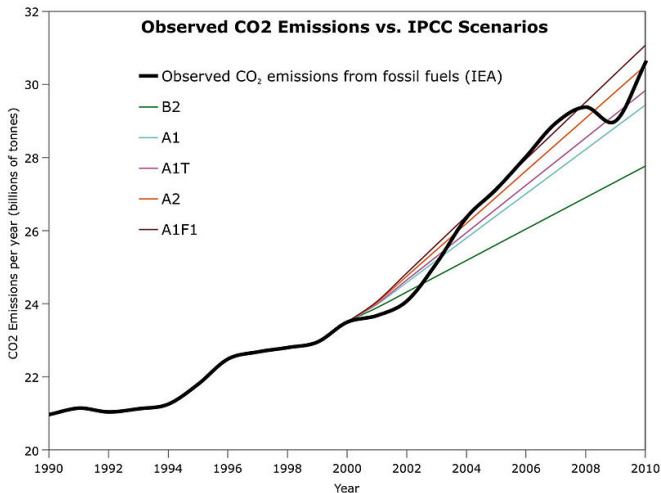
Source : GIEC, 2001 (WGIII, TS)

Scénarios d'émissions



Source : GIEC, 2001 (WGI, SPM)

Scénarios d'émissions

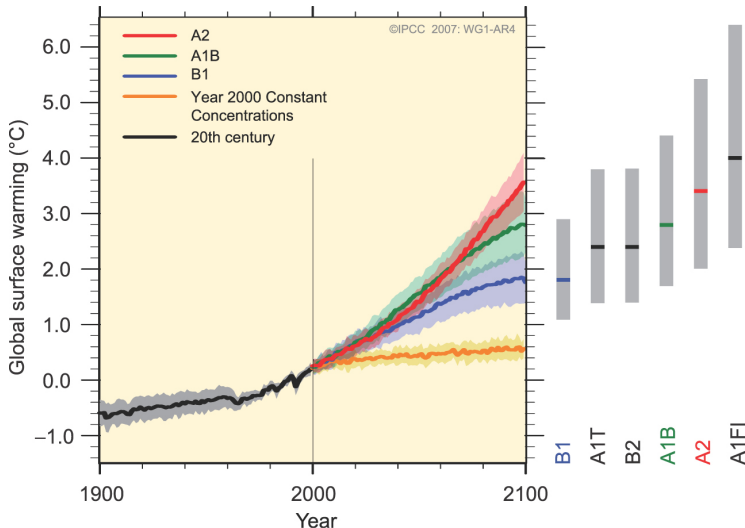


Source : www.skepticalscience.com, selon données AIE

Projections température moyenne globale

Animation Simulation A2

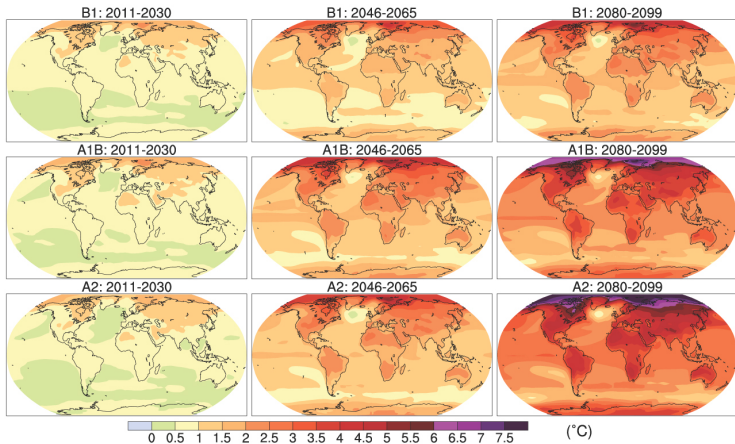
Projections température moyenne globale



Part du scénario, part de la modélisation.

(Source : GIEC, 2007)

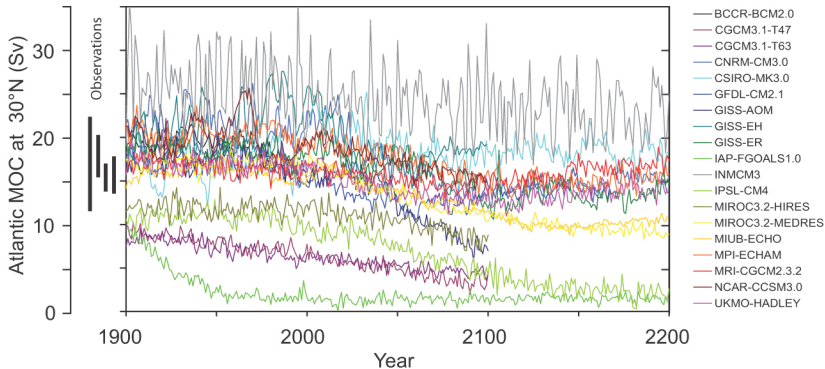
Distribution spatiale du réchauffement



Moyen terme vs long terme, structure spatiale.

(Source : GIEC, 2007)

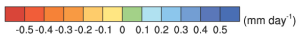
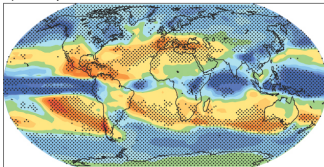
Dérive Nord-Atlantique



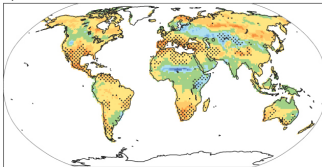
Source : GIEC, 2007

Projections sur le cycle de l'eau

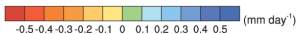
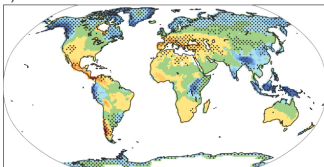
a) Precipitation



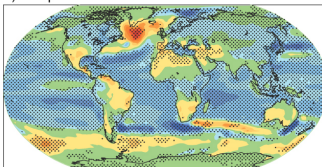
b) Soil moisture



c) Runoff

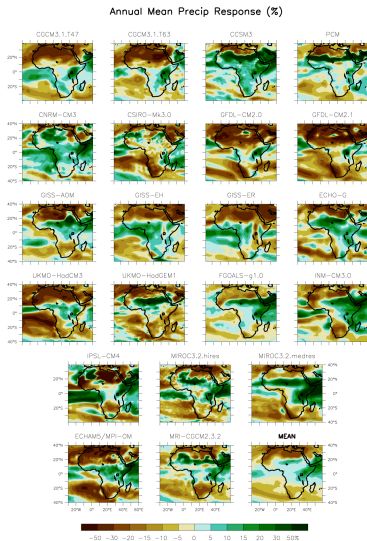


d) Evaporation



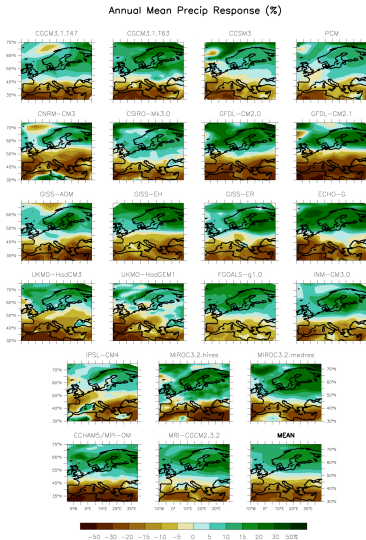
Source : GIEC, 2007

Incertitudes sur les précip



Source : GIEC, 2007

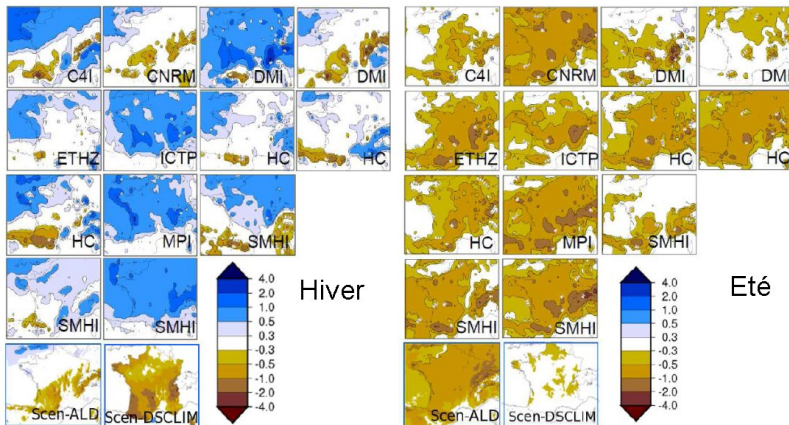
Incertitudes sur les précip



Source : GIEC, 2007

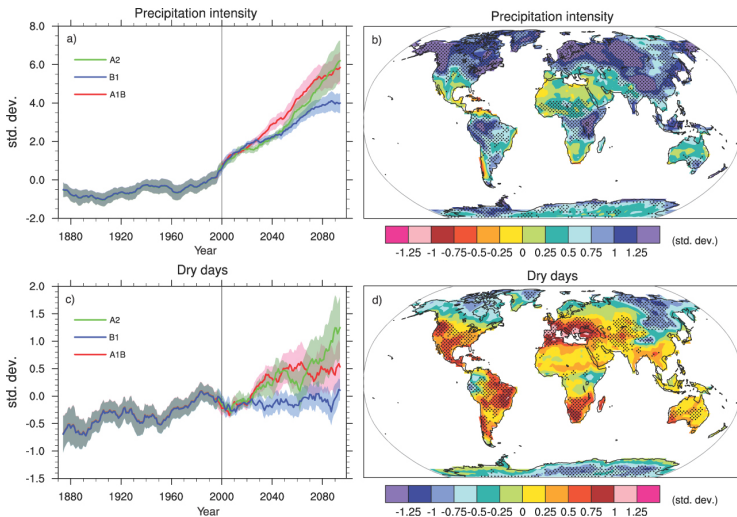
Incertitudes sur les précip

Prec. change (mm/j) 2071-2100 vs 1961-1990



Source : projets MEDUP et ENSEMBLES

Distribution des précipitations

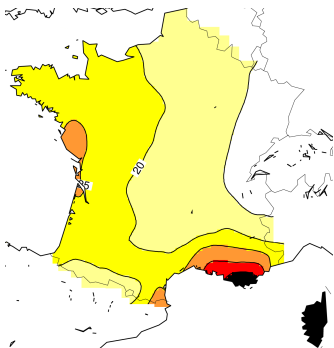


Source : GIEC, 2007

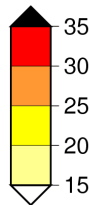
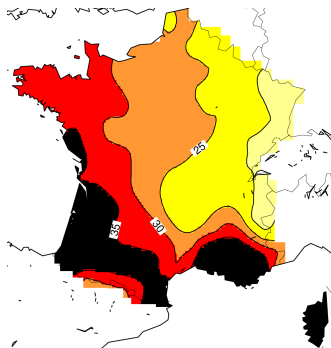
Distribution des précipitations

Nombre maximal de jours secs consécutifs en été

Fin du XX^{ème} siècle

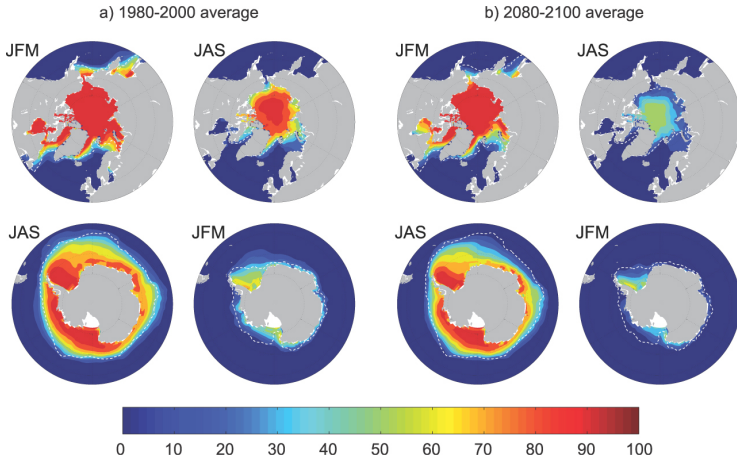


Fin du XXI^{ème} siècle



Source : Projet IMFREX

Projection sur la banquise arctique



Source : GIEC, 2007

Au delà de la moyenne

Table SPM.2. Recent trends, assessment of human influence on the trend and projections for extreme weather events for which there is an observed late-20th century trend. (Tables 3.7, 3.8, 9.4; Sections 3.8, 5.5, 9.7, 11.2–11.9)

Phenomenon ^a and direction of trend	Likelihood that trend occurred in late 20th century (typically post 1960)	Likelihood of a human contribution to observed trend ^b	Likelihood of future trends based on projections for 21st century using SRES scenarios
Warmer and fewer cold days and nights over most land areas	<i>Very likely^c</i>	<i>Likely^d</i>	<i>Virtually certain^d</i>
Warmer and more frequent hot days and nights over most land areas	<i>Very likely^e</i>	<i>Likely (nights)^d</i>	<i>Virtually certain^d</i>
Warm spells/heat waves. Frequency increases over most land areas	<i>Likely</i>	<i>More likely than not^f</i>	<i>Very likely</i>
Heavy precipitation events. Frequency (or proportion of total rainfall from heavy falls) increases over most areas	<i>Likely</i>	<i>More likely than not^f</i>	<i>Very likely</i>
Area affected by droughts increases	<i>Likely in many regions since 1970s</i>	<i>More likely than not</i>	<i>Likely</i>
Intense tropical cyclone activity increases	<i>Likely in some regions since 1970</i>	<i>More likely than not^f</i>	<i>Likely</i>
Increased incidence of extreme high sea level (excludes tsunamis) ^g	<i>Likely</i>	<i>More likely than not^h</i>	<i>Likelyⁱ</i>

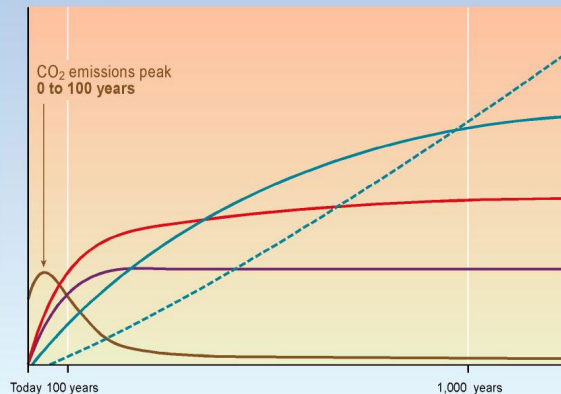
Reste beaucoup à faire et à préciser

- Niveau de la mer et calottes polaires,
- Évolution de certain types d'événements extrêmes,
- Progresser vers la régionalisation (ex : cas de la France),
- etc.

Quelques constantes de temps

CO₂ concentration, temperature, and sea level continue to rise long after emissions are reduced

Magnitude of response



Time taken to reach equilibrium

Sea-level rise due to ice melting:
several millennia

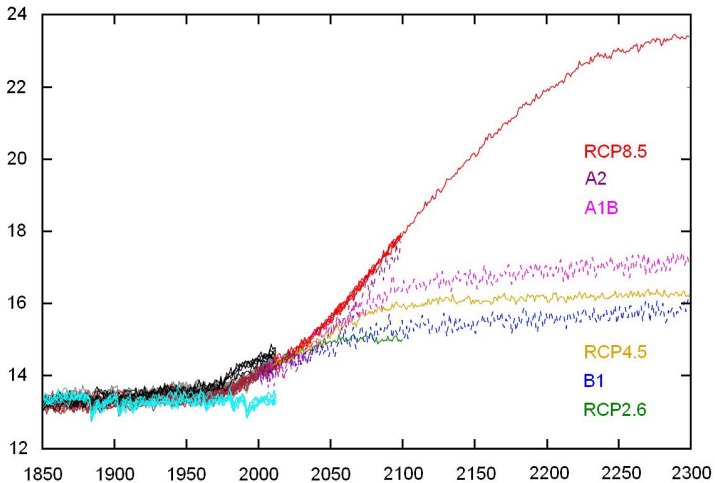
Sea-level rise due to thermal expansion:
centuries to millennia

Temperature stabilization:
a few centuries

CO₂ stabilization:
100 to 300 years

CO₂ emissions

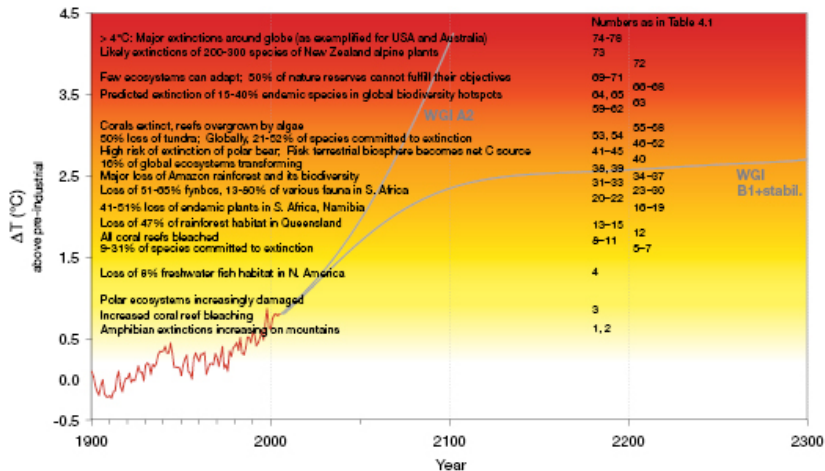
Quelques constantes de temps



Source : CNRM

- 1 Introduction - Qu'est-ce que le climat ?
- 2 Système climatique
- 3 Modélisation du climat
- 4 Changement climatique : principe
- 5 Changement climatique : observations et attribution
- 6 Changement climatique : Scénarios et Projections
- 7 Impacts**

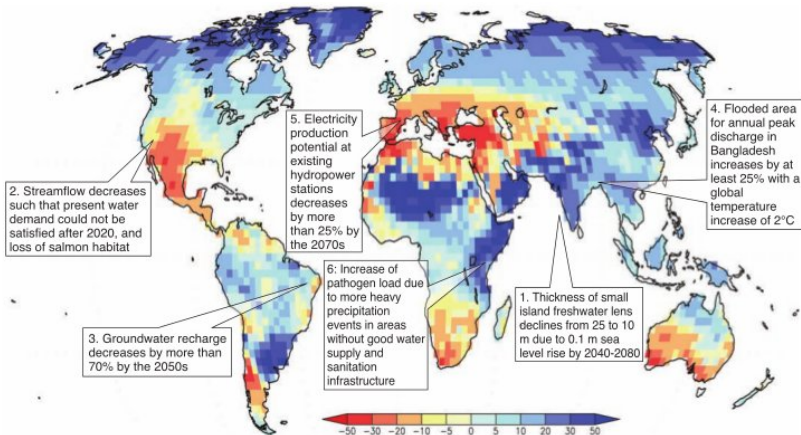
Biodiversité



Source : GIEC, 2007

Ressource en eau

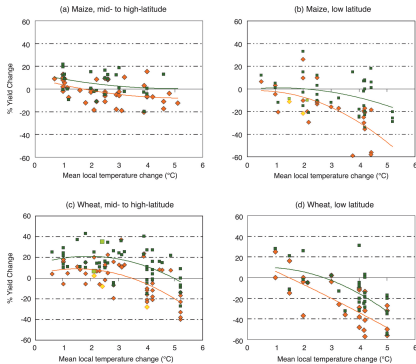
Évolution de la ressource en eau (ruissellement de surface)



Source : GIEC, 2007

Agriculture

Évolution des rendements agricoles du blé et du maïs en fonction du changement de température



Source : GIEC, 2007

Infrastructure

Vulnérabilité des deltas à la montée de la mer : population potentiellement déplacée en 2050 au rythme actuel de montée de la mer (Extreme > 1M > High > 50k > Medium > 5k).



Source : GIEC, 2007

Infrastructure

Changements attendus du permafrost d'ici à 2100 (A2)



- Modern southern permafrost boundary
- Permafrost area likely to thaw by 2100
- Permafrost area projected to be under different stages of degradation

Source : GIEC, 2007