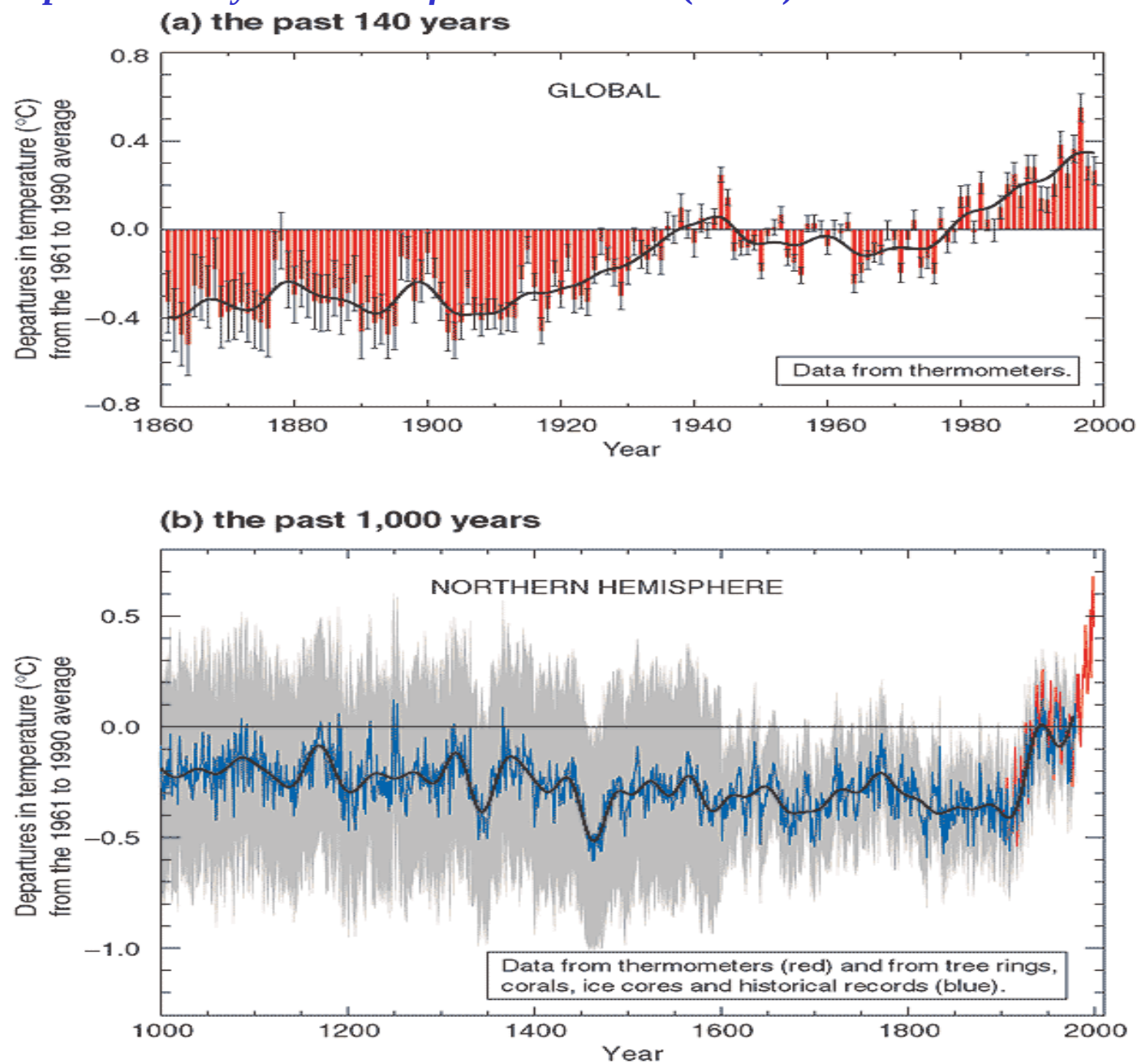


Benjamin SULTAN

LOCEAN : Laboratoire d'Océanographie et de Climatologie par
l'Expérimentation et l'Approche Numérique

Le changement climatique et ses impacts : les prévisions pour 2100

Evolution de la *température moyenne de surface de la Terre* (en °C) observée durant le dernier millénaire



Résumé

- La température de la surface de la Terre a augmenté de 0.6°C sur le siècle
- La phase de réchauffement récente (post-1976) est très rapide
- L'année 1998 est la plus chaude du millénaire
- La stratosphère se refroidit depuis le début des enregistrements
- La couverture nuageuse globale diminue légèrement depuis 20 ans
- On retrouve certaines tendances globales à l'échelle régionale
- Les concentrations des gaz à effet de serre atteignent des valeurs jamais rencontrées jusqu'alors
- Les analyses attribuent le réchauffement à l'augmentation des gaz à effet de serre

Bref nous sommes à l'heure actuelle dans un monde plus chaud

→ Et dans 100 ans ????

Plan du cours :

- Les outils pour prédire le climat futur
- Les prédictions du climat futur
- Les incertitudes
- Les impacts du climat
- Conclusions et perspectives
- Un exemple : la canicule 2003

Plan du cours :

- Les outils pour prédire le climat futur
- Les prédictions du climat futur
- Les incertitudes
- Les impacts du climat
- Conclusions et perspectives
- Un exemple : la canicule 2003

Qu'est ce que l'IPCC ?

International Panel on Climate Change* IPCC

Groupement d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat GIEC
(environ 2500 scientifiques)

Objectif

« Fournir une estimation de la compréhension de tous les aspects du changement climatique en incluant l'effet des activités humaines sur le climat »

Instauré en 1988 par l'Organisation Mondiale de la Météorologie et le programme environnemental des Nations Unies

- Le premier rapport est sorti en 1990
- Le deuxième en 1996 et c'est la première fois que l'action de l'homme est clairement mentionnée :

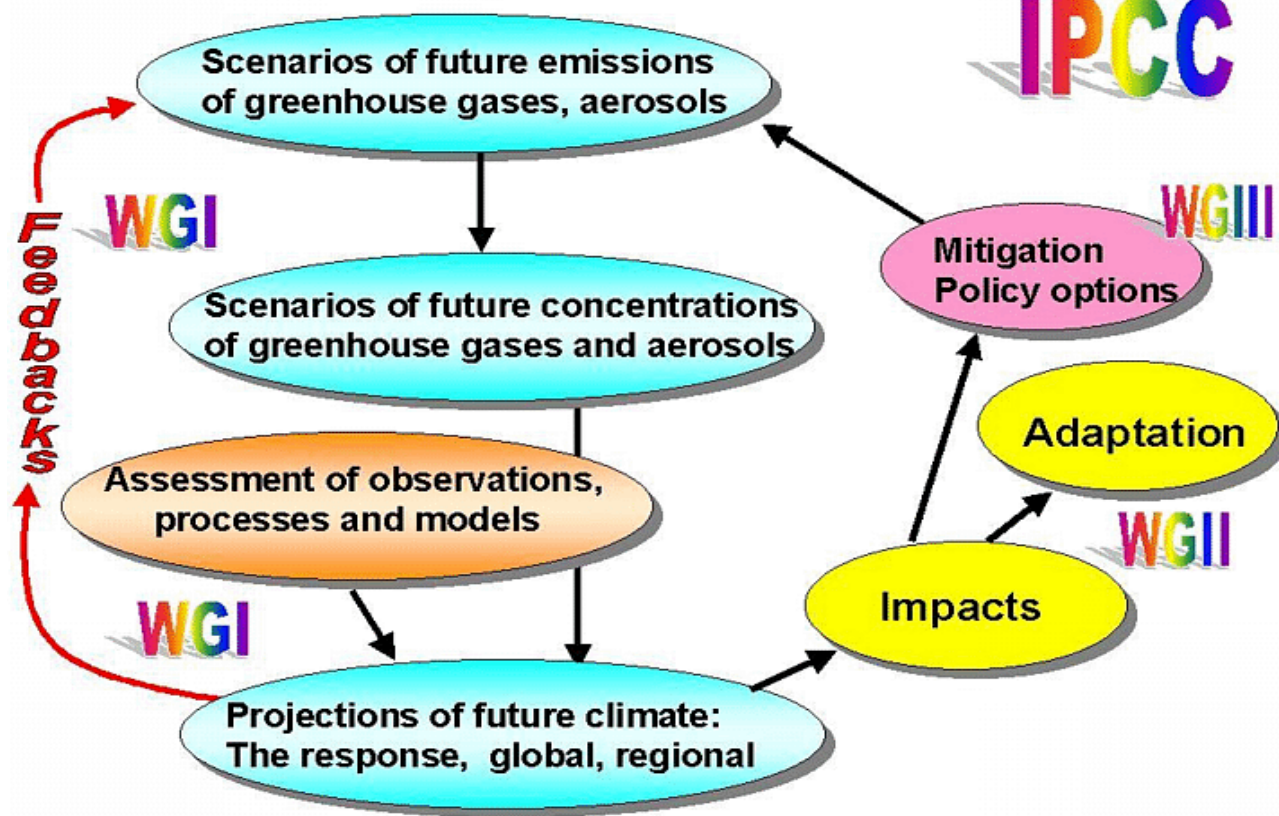
« *The balance of evidence suggests a discernible human influence on global climate* »

- Le dernier en date est publié en 2001

*Climate change :

inclus les effets de l'homme et la variabilité naturelle du climat

Structure et fonctionnement



Chaque Working group produit un rapport environ tous les 5 ans pour mettre à jour les connaissances pour les « politiques » et autres « decisions makers »

Dans le cadre du présent séminaire, on s'intéresse aux rapports du WG₁ et WG₂

Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

International Panel on Climate Change (GIEC / IPCC)

- * Créé en 1988 à l'initiative de l'OMM et du PNUE (Nations-Unies)
- * Trois groupes de travail : I Science, II Impacts,.. III Aspects socio - économiques
- * **Premier rapport en 1990 (Rio 1992)**
- * **1995 : Second rapport complet**
- * **2001 : Troisième rapport**
- * **Quatrième rapport 2007**
- **Conférence des parties (convention climat 1992)**
 - **COP 3 : Kyoto 1997 ; COP 10 Buenos-Aires**

Anthropogenic interference with the climate system ?

Les activités humaines ont-elles déjà influencé le climat ?

IPCC 1990 ? : The size of this warming is broadly consistent with predictions of climate models, but it is also of the same magnitude as natural climate variability. **Thus the observed increase could be largely due to this natural variability ; (On ne sait pas)**

IPCC 1995 : The balance of evidence suggests a discernible influence on global climate. **(Peut-être)**

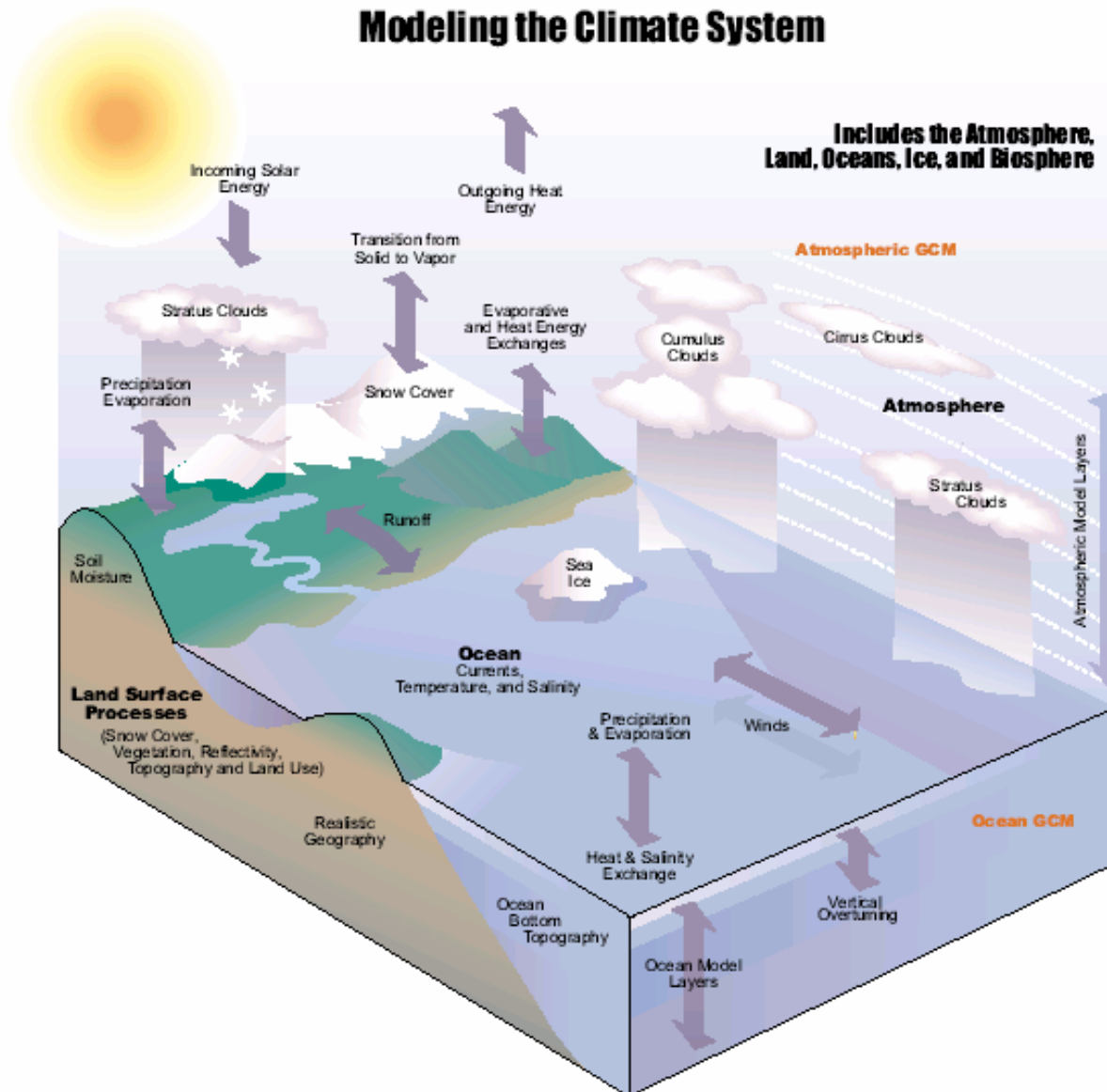
IPCC 2001 : There is new and stronger evidence that most of the warming observed over the last 50 years is attributable to human activities. **(Probablement)**

IPCC 2007 ?

Jouzel (2005)

LE SYSTÈME CLIMATIQUE

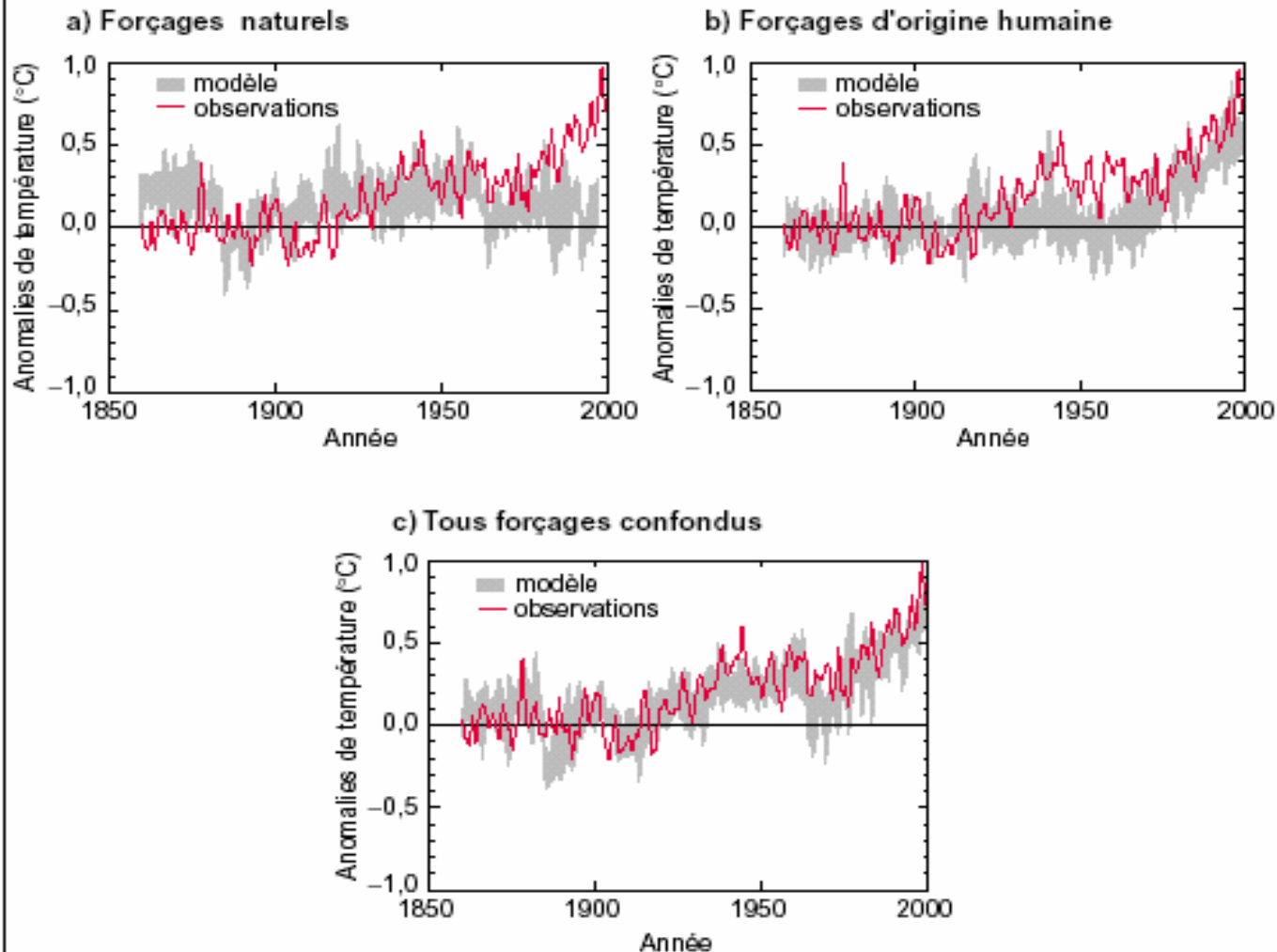
Modeling the Climate System



Le système climatique est complexe et sa compréhension fait appel à de nombreux processus radiatifs, thermodynamiques et dynamiques à toutes les échelles (10^{-6} à 10^8 m)

Tout représenter dans un modèle numérique (Global Climate Model)

Températures à la surface simulées et moyennées annuellement et globalement



Meilleure connaissance du climat du dernier millénaire
Comparaison données - modèles

*** Ce que nous savons (nos certitudes)**

- Les activités humaines ont augmenté l'effet de serre (1%)
- Le climat se réchauffe

*** Ce que nous croyons**

- Il est probable qu'une large part du réchauffement observé au cours des 50 dernières années est lié aux activités humaines

*** Ce que nous prédisons**

- Les scénarios fournis par les économistes
- Ce qu'il faudrait faire

*** Incertitudes ; risques de surprises**

Modélisation du climat

- **Réalisation de simulations numériques** avec différentes conditions aux limites (différents forçages) ou différentes conditions initiales

→ Runs d'ensemble

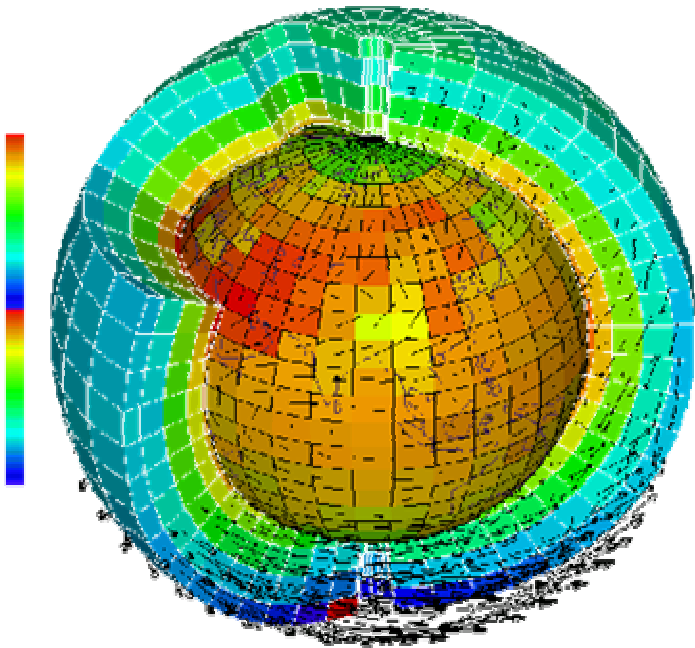
- **Analyses statistiques des résultats** de simulations

- **Exemple:** simulation de l'évolution du climat de 1850 à 2100 sous l'effet d'un accroissement des gaz à effet de serre

L'estimation du climat futur repose sur l'exploitation des modèles couplés océan-atmosphère

On impose un forçage radiatif soit constant (doublement du CO₂) soit progressif au cours du temps (scénario de développement économique)

On obtient ainsi le climat perturbé i.e. les régimes de temps moyens correspondant à la perturbation



Les limites des prédictions sont donc associées aux limites des :

1- Scénarii de l'évolution de l'émission des gaz à effet de serre et aérosols

2- Modèles eux-mêmes, c'est à dire leurs capacités intrinsèques à représenter les processus qui gouvernent le climat

Différents scénarii pour le nouveau siècle

A1 Croissance rapide de l'économie

Population mondiale augmente jusqu'au milieu du siècle puis diminue
Introduction rapide de nouvelles technologies plus efficaces

A1FI Repose intensivement sur le pétrole

A1T Energie non-fossile

A1B Equilibre

A2 Croissance inhomogène et plus lente que A1

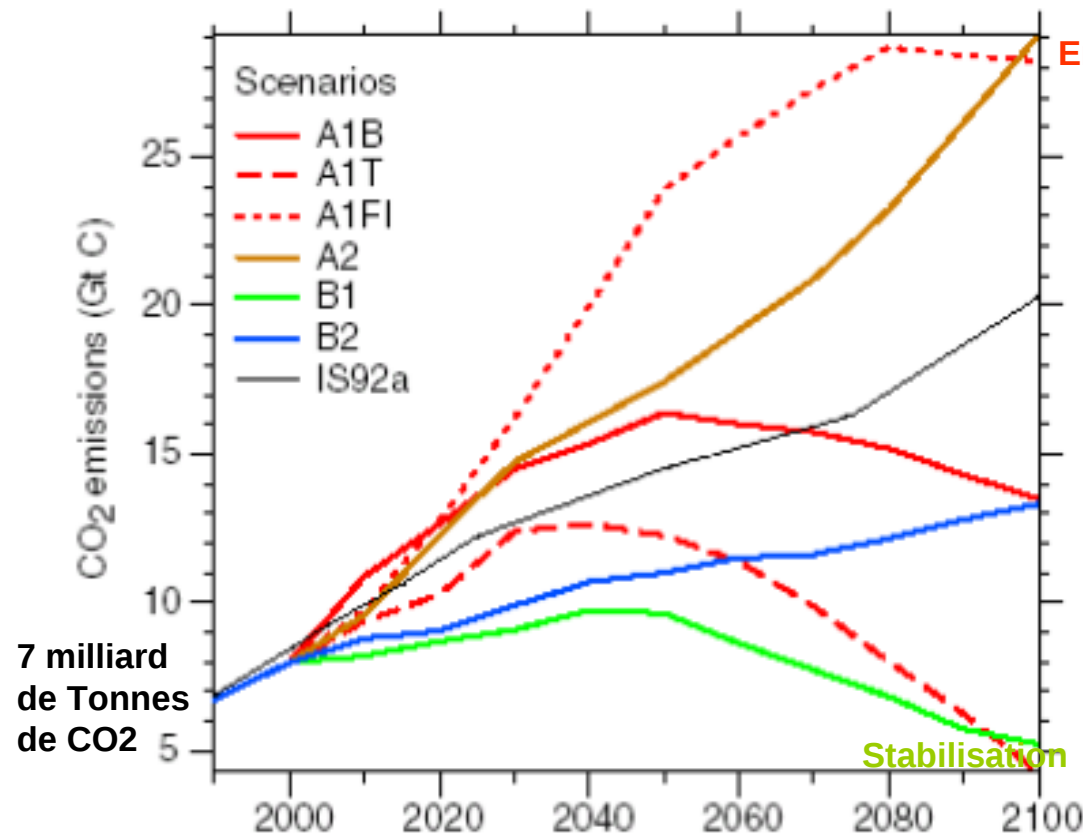
B1 Comme A1 mais avec plus de services et moins d'industries

Moins polluante et politique orientée vers le développement durable

B2 Croissance continue de la population niveau économique intermédiaire

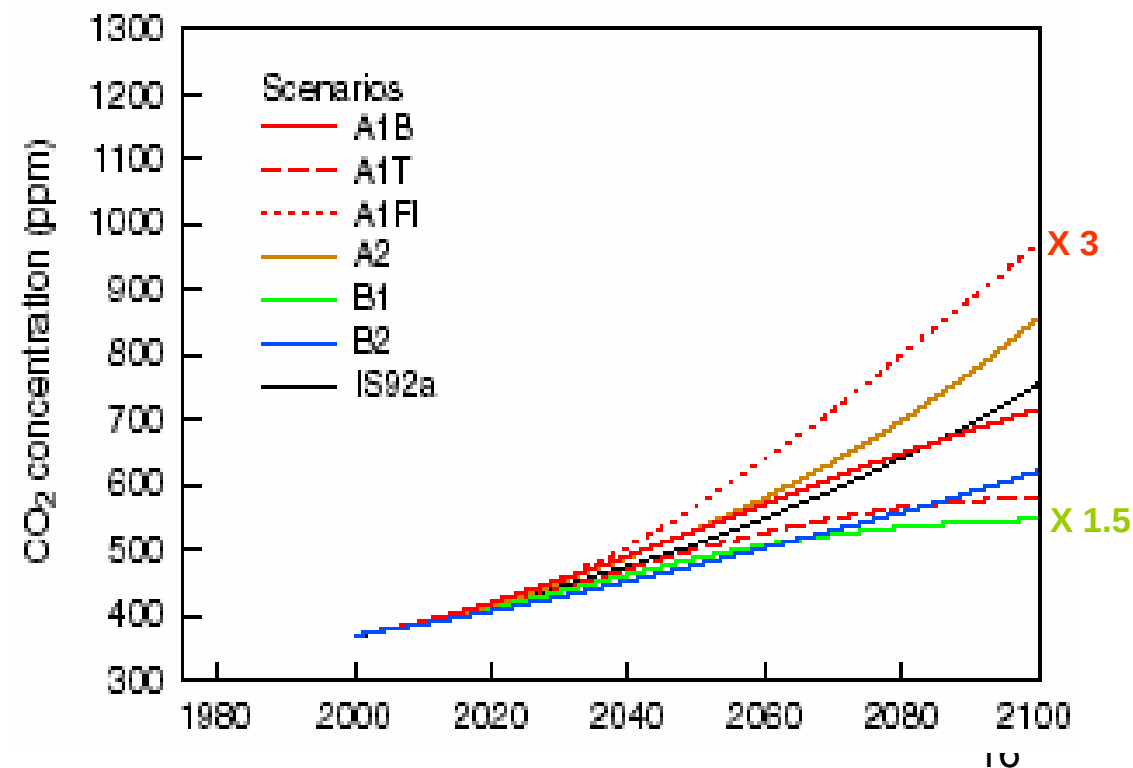
IS92 Business as usual (1992)

Les scénarios d'émission



Objectif n°1 de la convention-climat :
Stabiliser l'effet de serre

Même si les émissions se stabilisent :
Les concentrations augmentent



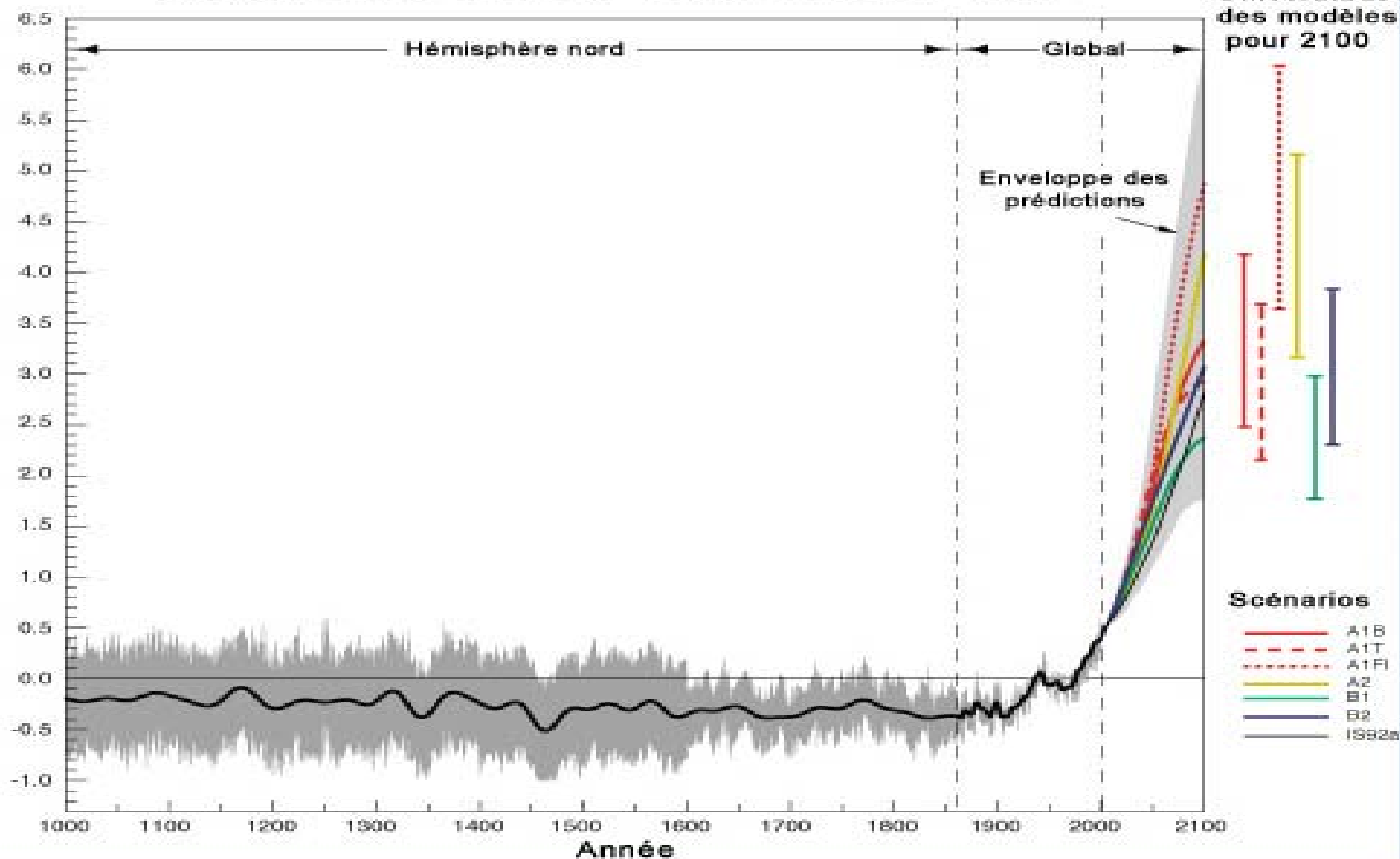
→ Il n'est pas suffisant de stabiliser les émissions pour que la concentration dans l'atmosphère se stabilise

Plan du cours :

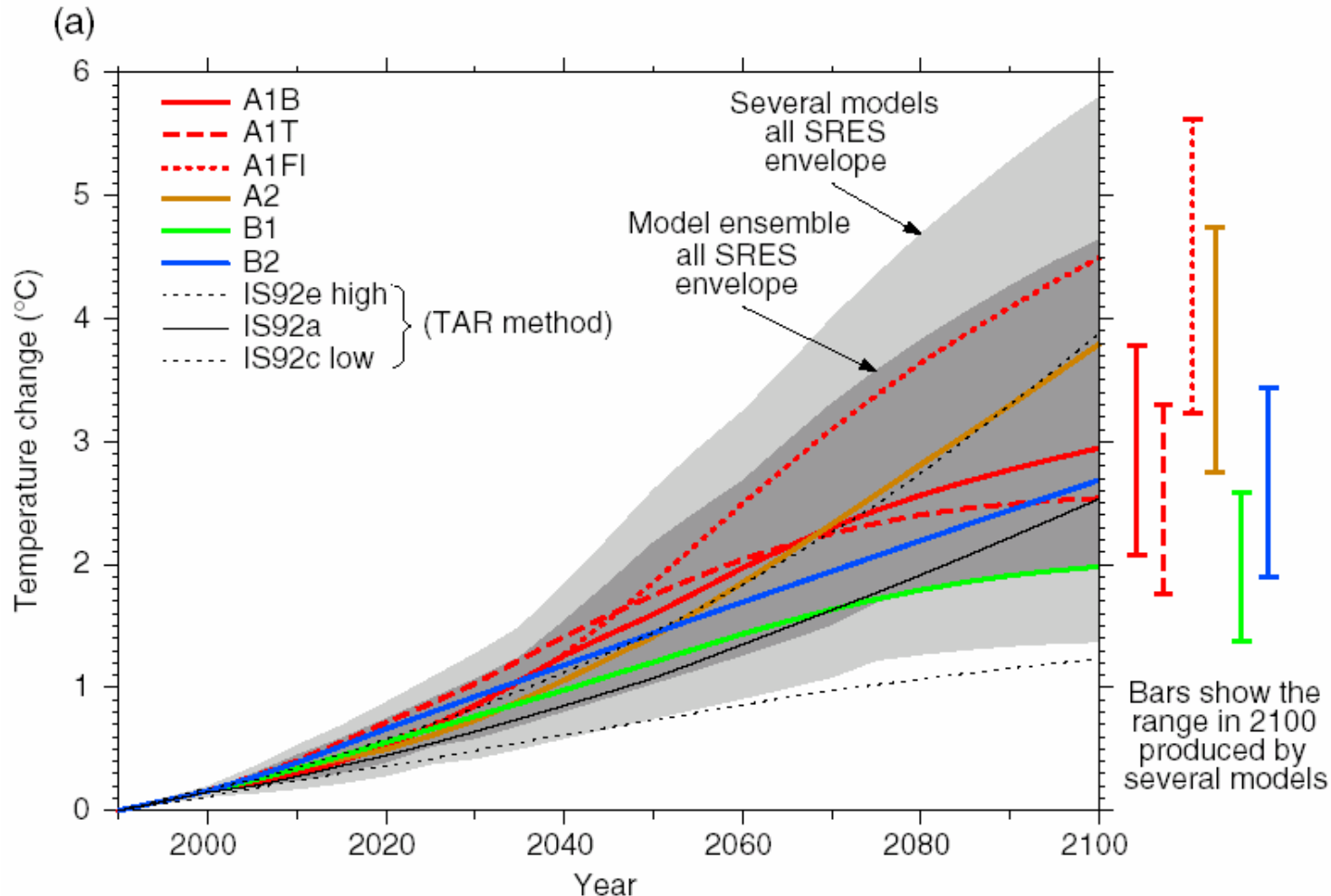
- Les outils pour prédire le climat futur
- Les prédictions du climat futur
- Les incertitudes
- Les impacts du climat
- Conclusions et perspectives
- Un exemple : la canicule 2003

Et dans 100 ans ?

Variations de la température de surface de la Terre de l'an 1000 à l'an 2100



Projection température



Une moitié de la dispersion est liée à notre comportement (SRES)

L'autre moitié est liée au comportement du système climatique (incertitudes des modèles)

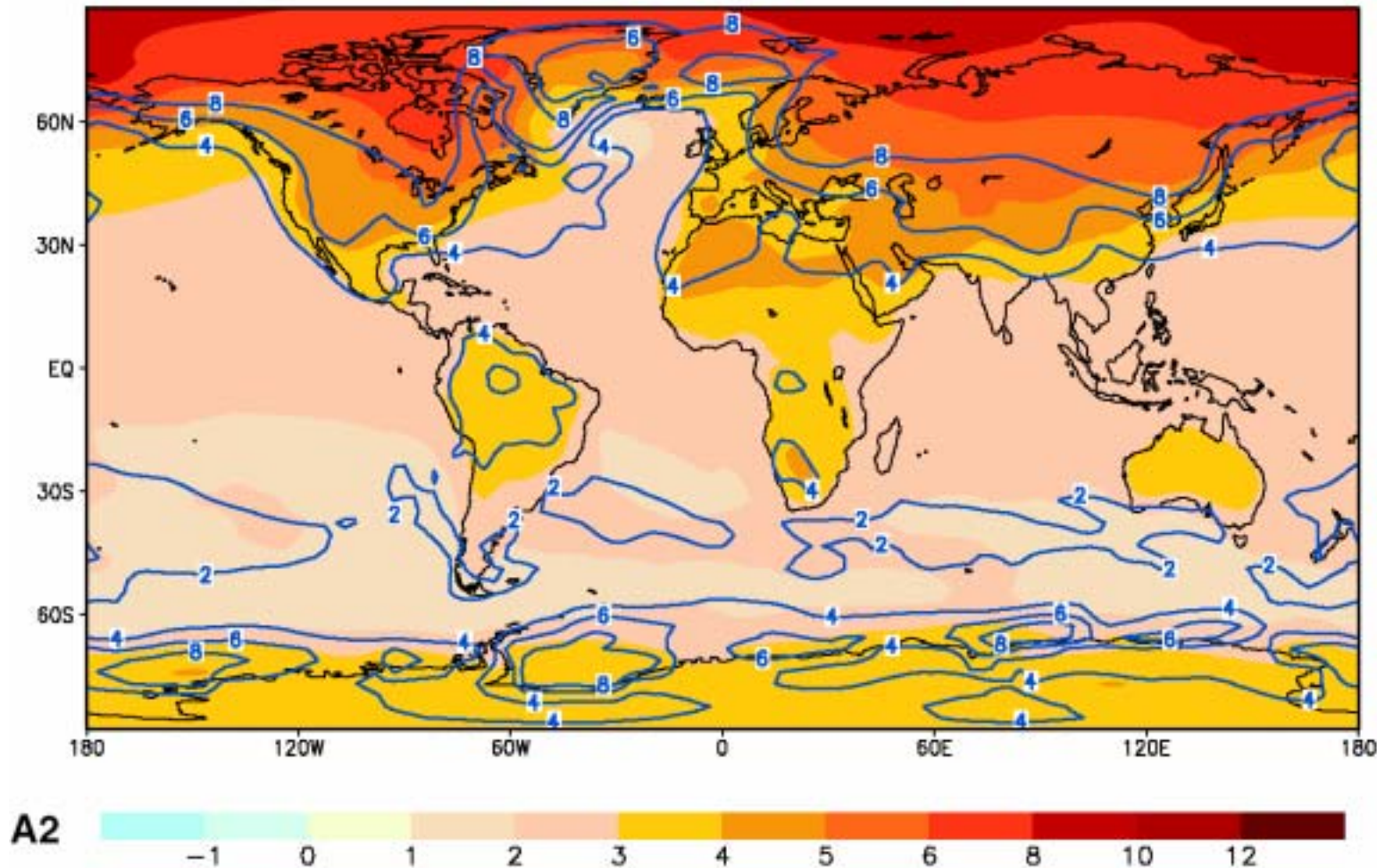
Moyenne : 3°C

(La moitié d'un changement interglaciaire / glaciaire qui prend 5000 ans !)

Le spectre des réponses couvre +1.4° à +5.8° selon les scénarii et les modèles

Distribution des températures

Anomalies de température en 2071-2100 / 1961-1990 (scénario intermédiaire)



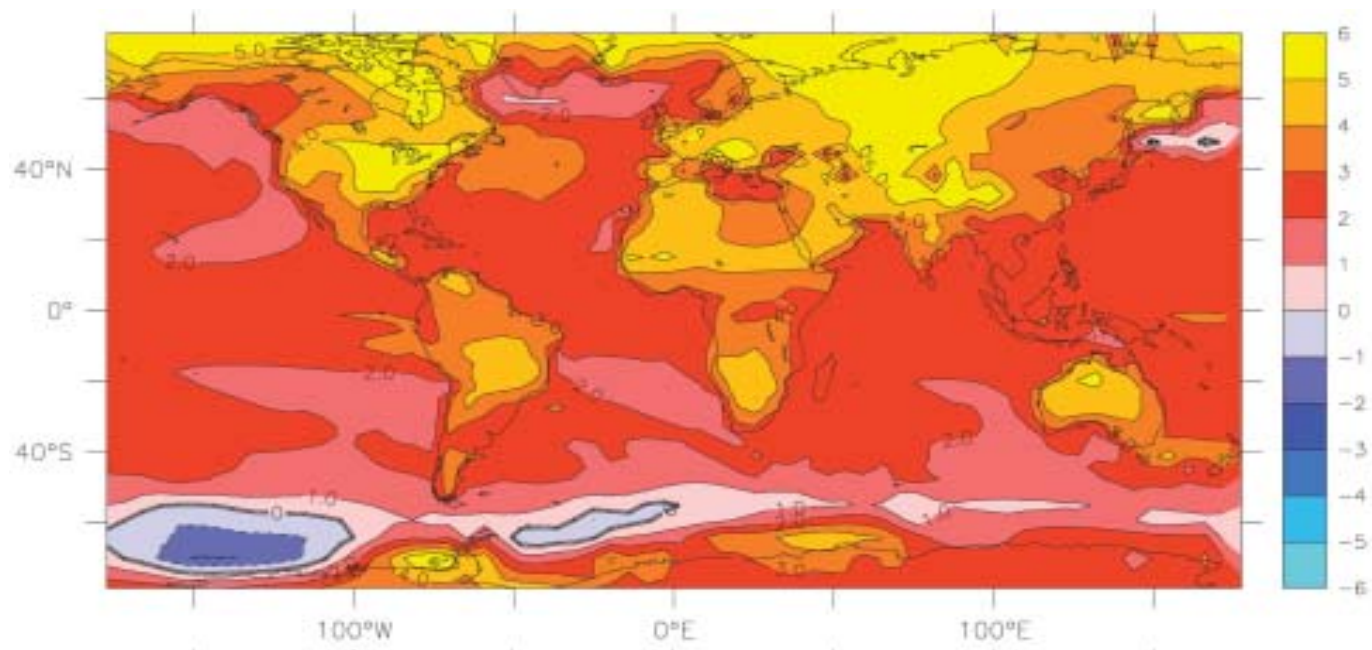
Moyenne
globale : 3°C

Réchauffement énorme aux pôles; les océans tropicaux 2°C;
Les continents sont plus chauds que les océans

Et dans 100 ans ?

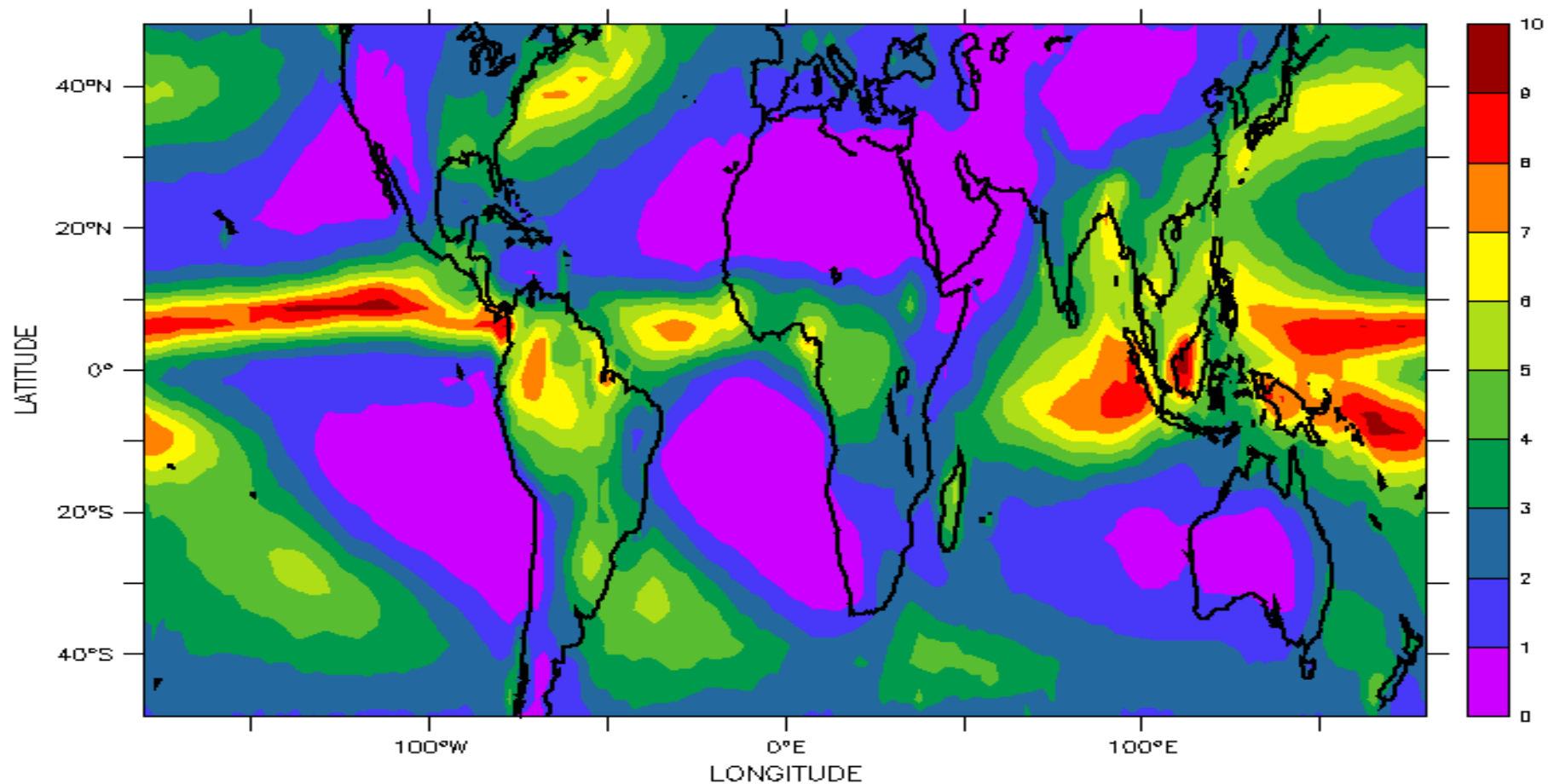
**Changements
climatiques, entre 1860
et 2100, calculés avec
le modèle de l'IPSL.**

Changement
de température
(en °C)
[moyenne: 3,5°C]



Changement des précipitations

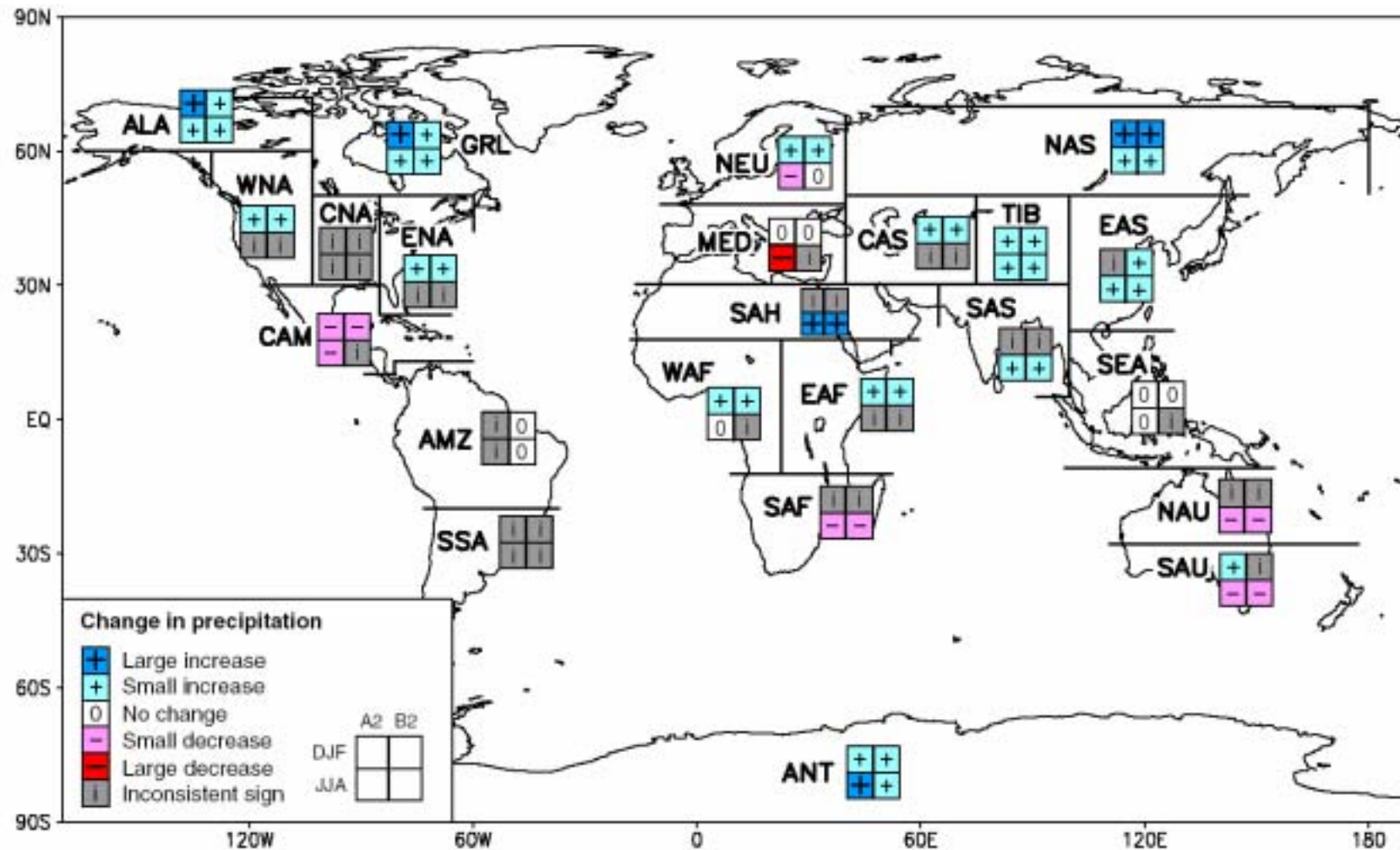
Moyenne annuelle 1987-2000



GPCP Precipitation (mm/day)

Changement des précipitations

Modification des précipitations dans le cas de 2 scénarios extrêmes

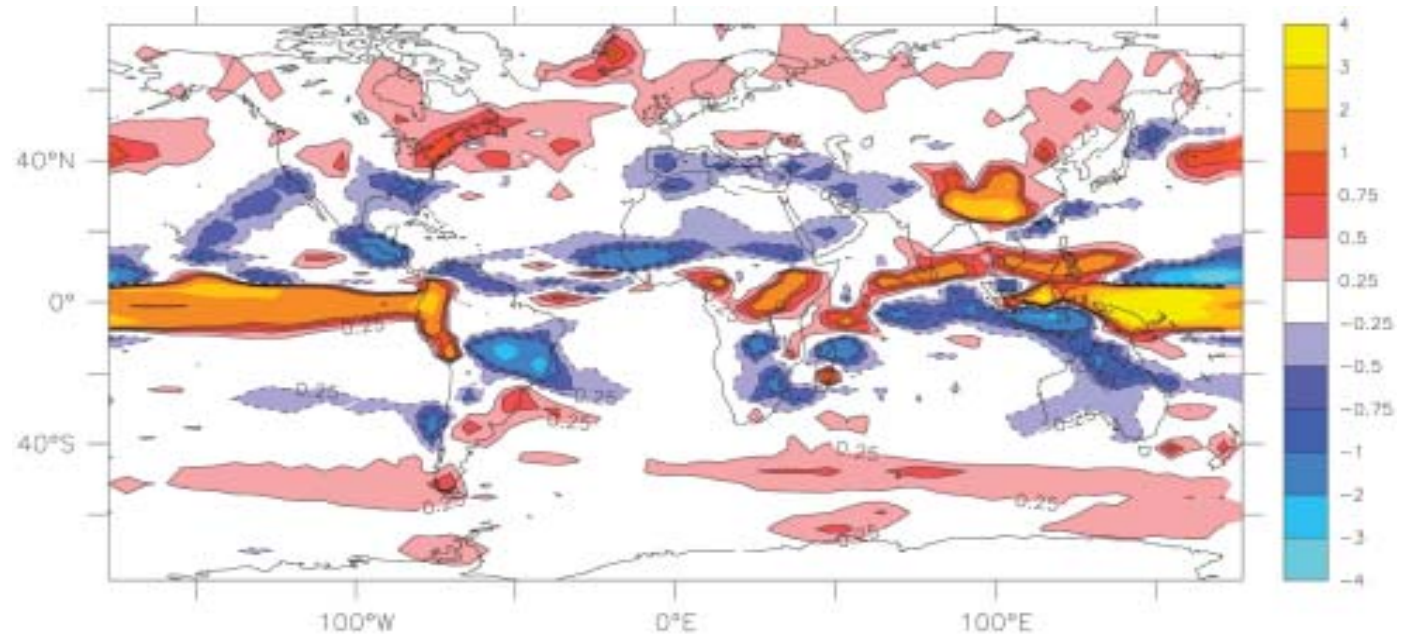


Incertitude sur les impacts du changement climatique et le cycle de l'eau

Et dans 100 ans ?

**Changements
climatiques, entre 1860
et 2100, calculés avec
le modèle de l'IPSL.**

Changement de
précipitations
(en mm/j)

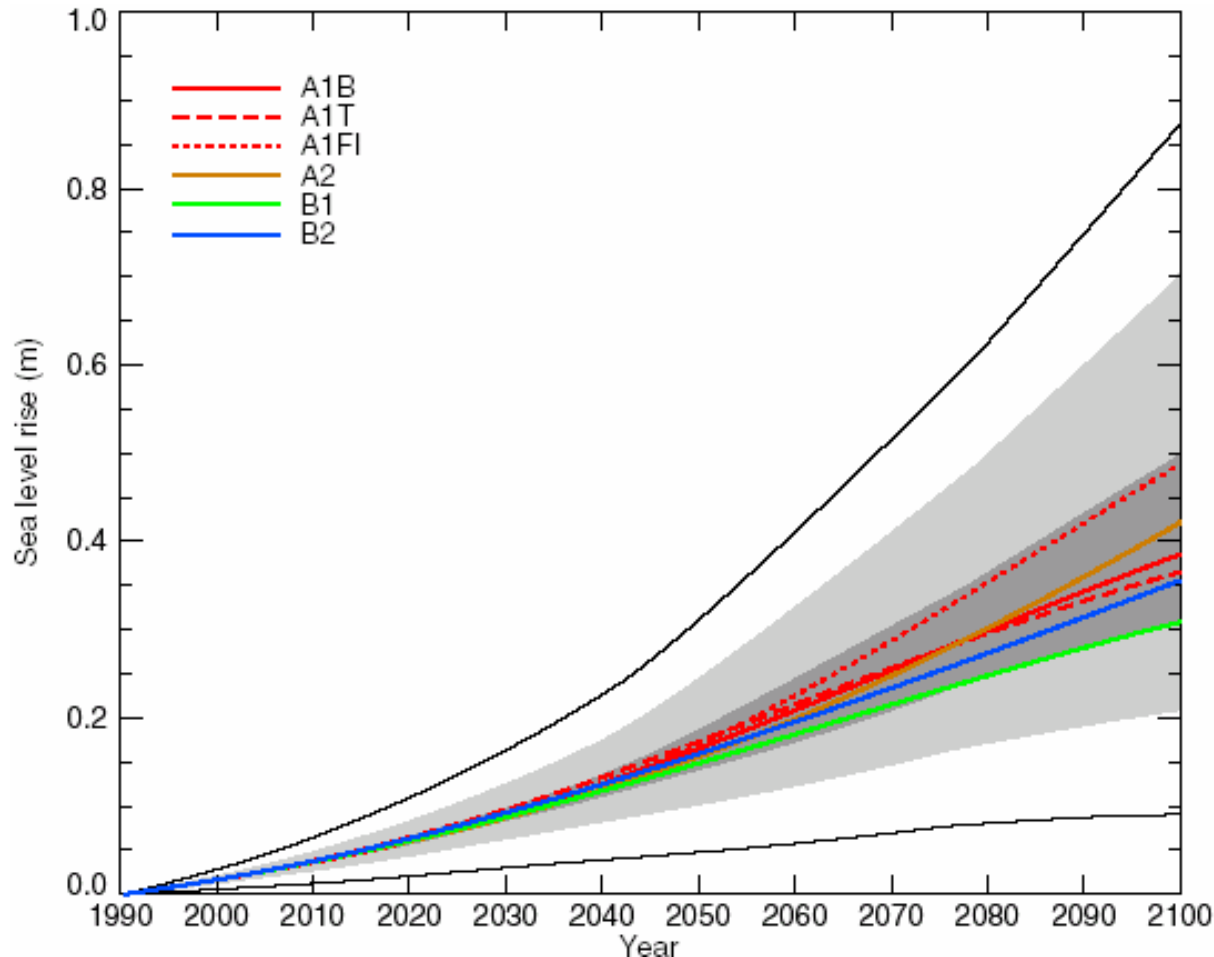


La montée des eaux

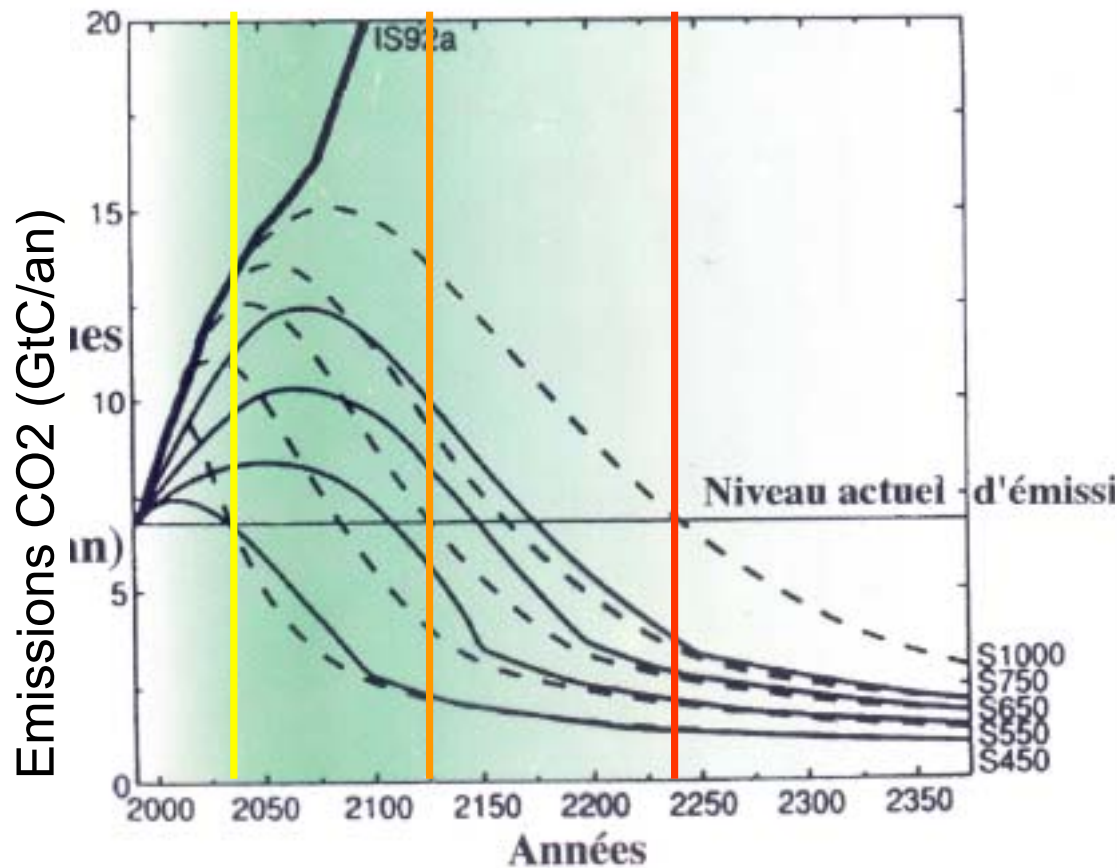
Plusieurs facteurs contribuent aux variations du niveau de la mer:

→ des changements de volume des océans qui résultent essentiellement des variations de température (une eau chaude est plus volumineuse qu'une eau froide)

→ d'autre part, des changements du contenu en eau des océans causés par les échanges avec les autres réservoirs de surface (atmosphère, réservoirs d'eau continentale, glaciers et calottes polaires).

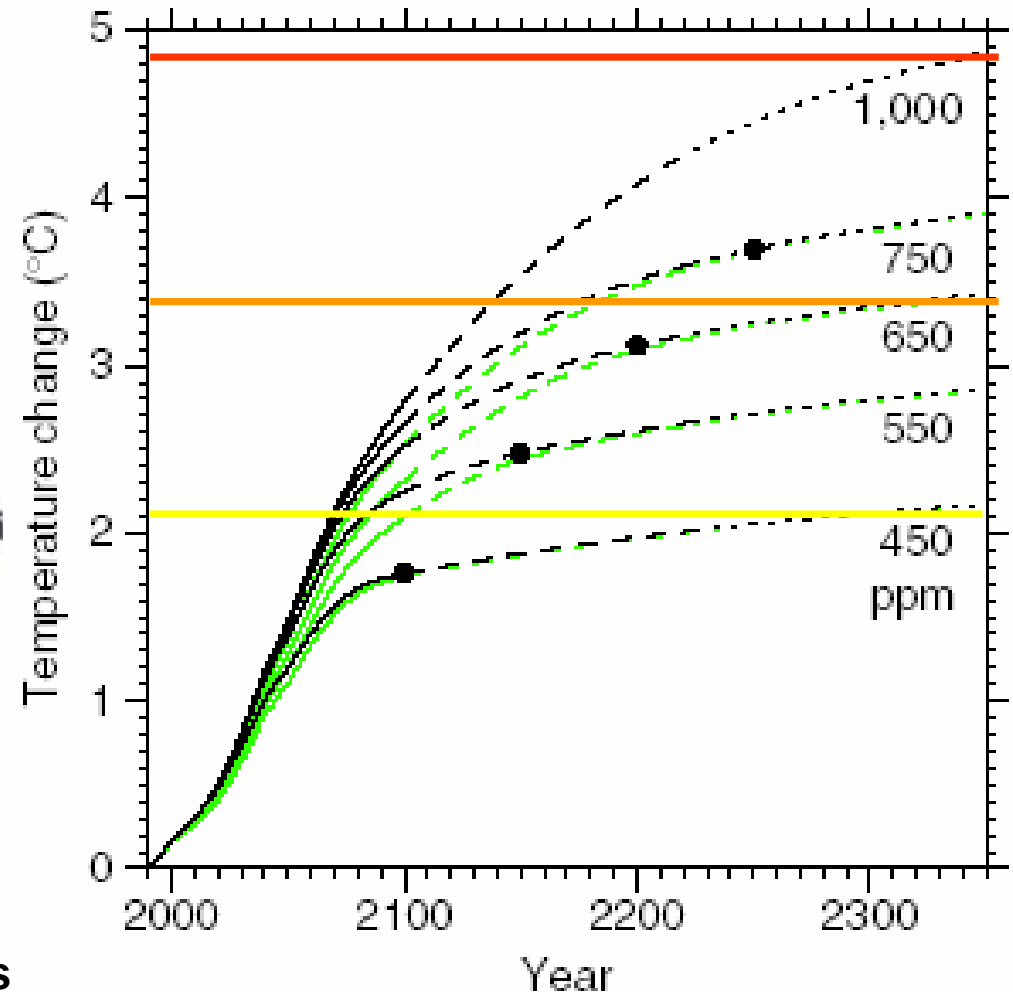


L'eau monte non pas à cause de la fonte des glaces mais par dilatation thermique

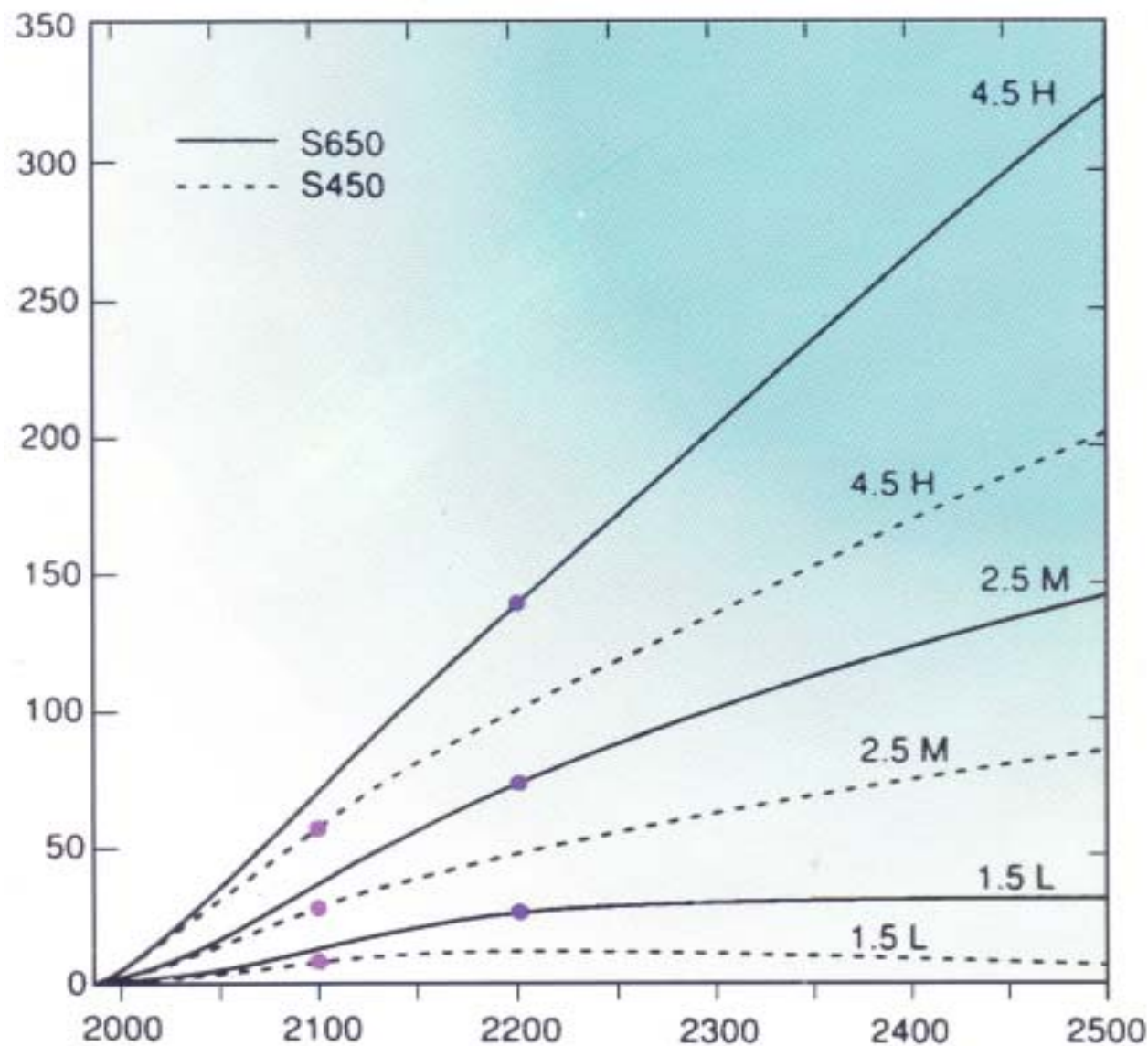


Il faudrait que les émissions tombent en-dessous de leur niveau de 1990 :

- En qq décennies pour stabiliser le CO₂ à 450 ppm et le réchauffement à 2°C
- En un siècle environ pour stabiliser le CO₂ à 650 ppm et le réchauffement à 3.5°C
- En deux siècles pour stabiliser le CO₂ à 1000 ppm et le réchauffement à 5°C



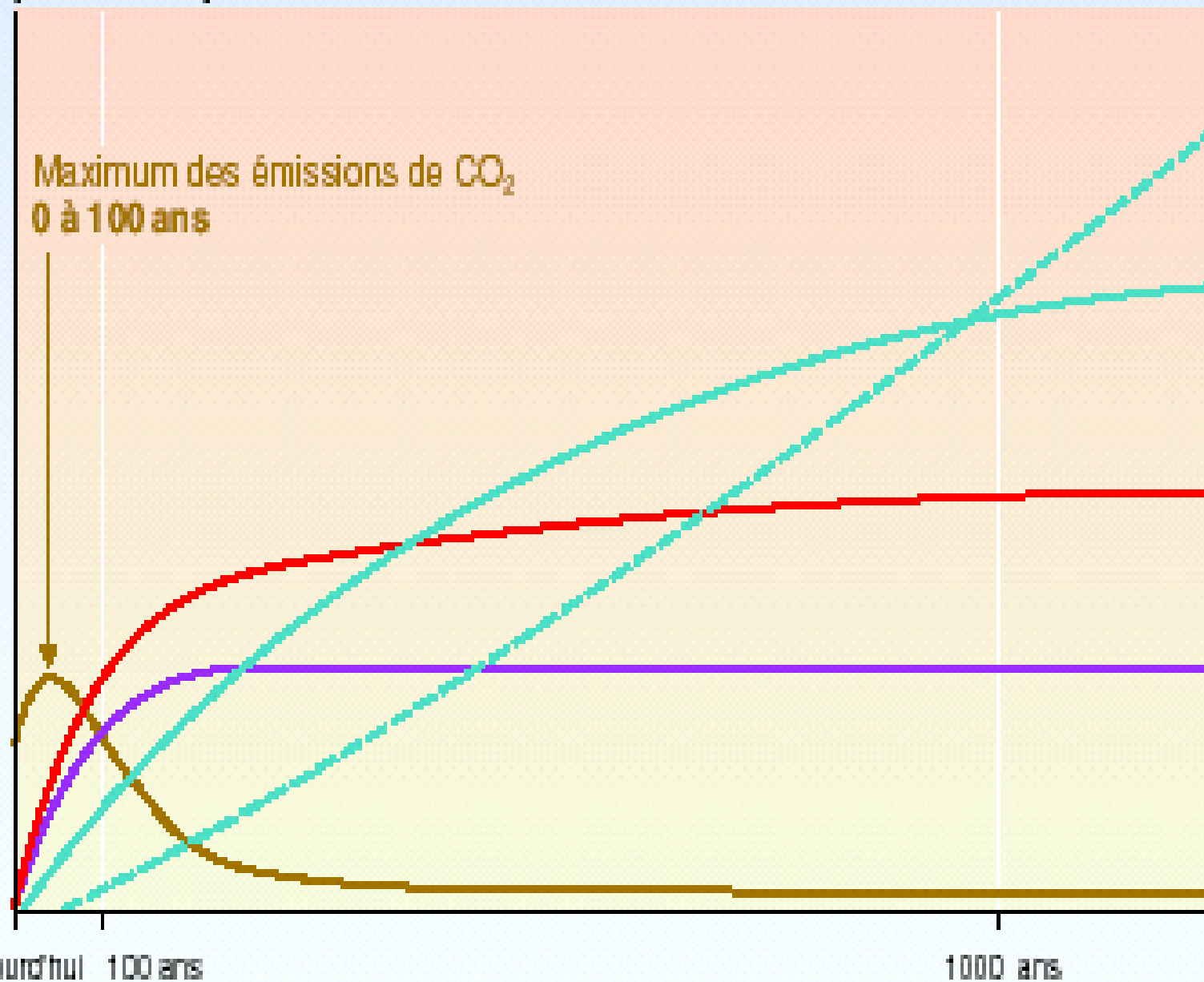
La stabilisation de la température est retardée par rapport à la diminution des émissions



Même en cas de stabilisation de l'effet de serre à la fin du siècle le niveau de la mer va continuer à augmenter régulièrement (inertie de l'océan). S'y ajoute à l'échelle de quelques siècles un risque de fonte partielle du Groenland. **On peut craindre une élévation du niveau de la mer de 3 à 4 mètres au milieu du millénaire.**

La concentration de CO₂, la température, et le niveau de la mer continuent d'augmenter bien après la réduction des émissions

Ampleur de la réponse



Temps nécessaire pour
parvenir à l'équilibre

Elévation du niveau de la mer
due à la fonte des glaces :
Plusieurs milliers d'années

Elévation du niveau de la mer
due à la dilatation thermique :
Des siècles à des millénaires

Stabilisation de la température :
Quelques siècles

Stabilisation du CO₂ :
100 à 300 ans

Emissions de CO₂

Evenements extrêmes

Évènement	Observé durant le 20ème siècle	Prévu d'ici la fin du 21ème siècle
Températures maximales plus élevées	Très vraisemblable	Très vraisemblable
Plus d'étés chauds	Vraisemblable	Très vraisemblable
Augmentation des indices thermiques	Vraisemblable	Très vraisemblable
Températures minimales plus élevées	Très vraisemblable	Très vraisemblable
Moins de jours de gel	Très vraisemblable	Très vraisemblable
Plus de vagues de chaleur	Possible	Très vraisemblable
Moins de vagues de froid	Très vraisemblable	Très vraisemblable
Sécheresses aggravées	Peu vraisemblable	Très vraisemblable
Plus d'évènements pluvieux	Vraisemblable	Vraisemblable
Plus de cyclones tropicaux	Peu vraisemblable	Possible
Plus de tempêtes tropicales	Peu vraisemblable	Possible
Plus de tempêtes aux latitudes moyennes	Possible	Possible
Episodes El Niño plus intenses	Possible	Possible
Plus de conditions de type El Niño	Vraisemblable	Vraisemblable

Le cyclone Katrina : une conséquence du changement climatique ?

Cyclone Katrina : 2005 August 28

Katrina from NOAA/GOES 12.

Courtesy NOAA/NESDIS: <http://www.nnvl.noaa.gov/>



Nouvelle-Orléans : lundi 29 Août 2005

Le cyclone Katrina : une conséquence du changement climatique ?

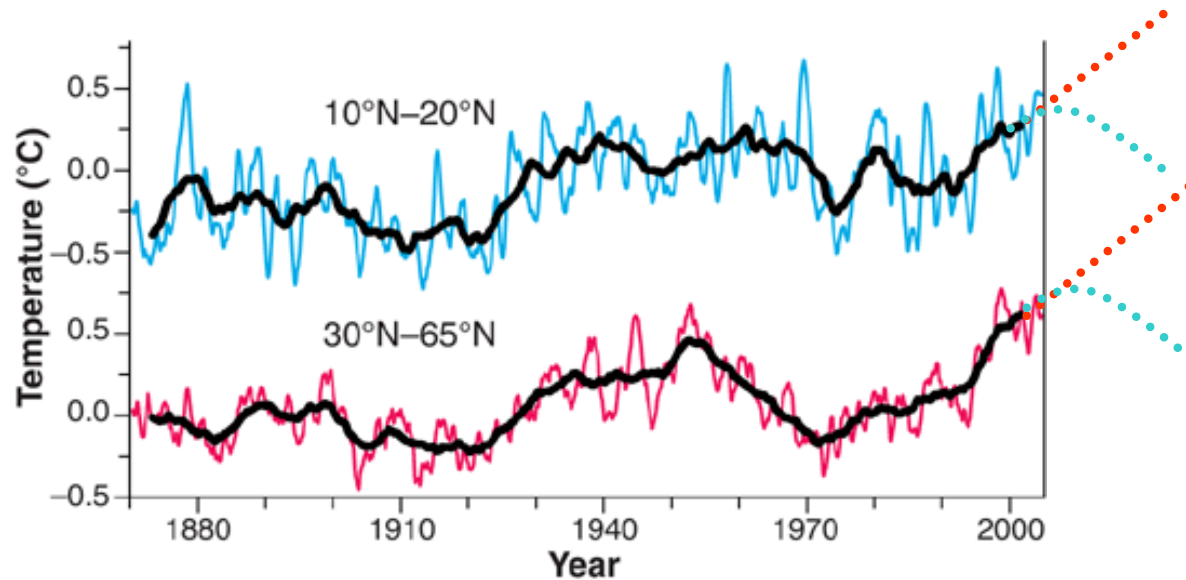
- Difficile de dire si un seul événement extrême est une réponse au changement climatique ou bien s'il s'inscrit dans la variabilité naturelle du climat
- Variabilité décennale des cyclones bien connue : nous sommes actuellement dans une période où les cyclones sont actifs

Mais...

Les cyclones sont fortement liées aux SST

- Réchauffement de l'Océan Atlantique : redoublement de l'intensité des cyclones
- Réchauffement non uniforme : changement de trajectoire des cyclones

Le cyclone Katrina : une conséquence du changement climatique ?



Getting warmer. Annual mean SST anomalies relative to 1961 to 1990 (23) for 1870 to 2004, averaged over the tropical Atlantic (10°N to 20°N, excluding the Caribbean west of 80°W) (**top**) and the extratropical North Atlantic (30°N to 65°N) (**bottom**). Heavy lines are 10-year running means.

- Higher SSTs are associated with increased water vapor in the lower troposphere
- Both higher SSTs and increased water vapor tend to increase the energy available for atmospheric convection, such as thunderstorms, and for the development of tropical cyclones

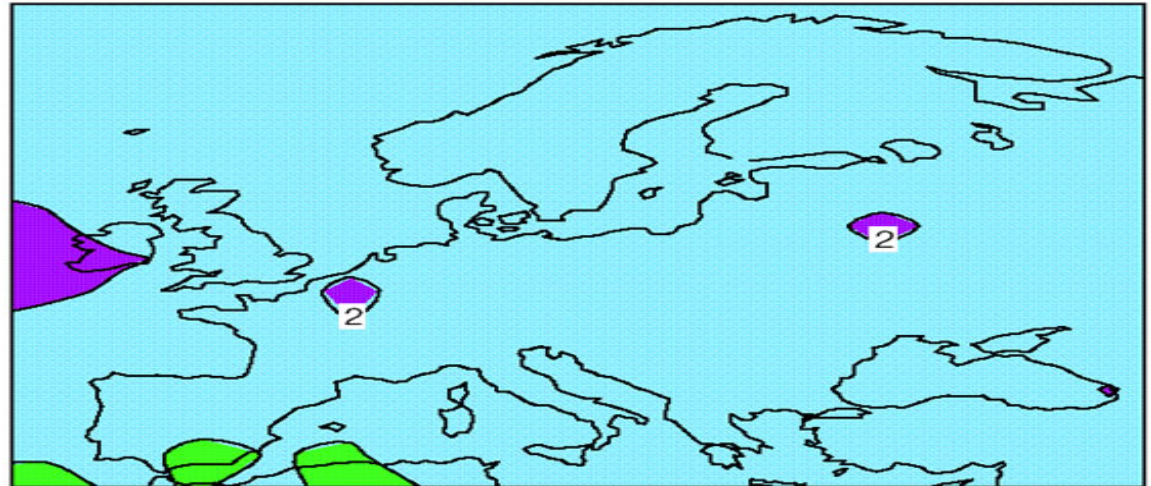
*Trenberth, Science (2005) : Uncertainty in Hurricanes and Global Warming
(Publié un mois avant Katrina !)*

Hivers extremes en Europe

Simulation des probabilités
d'occurrence d'hivers très
humides (%) :

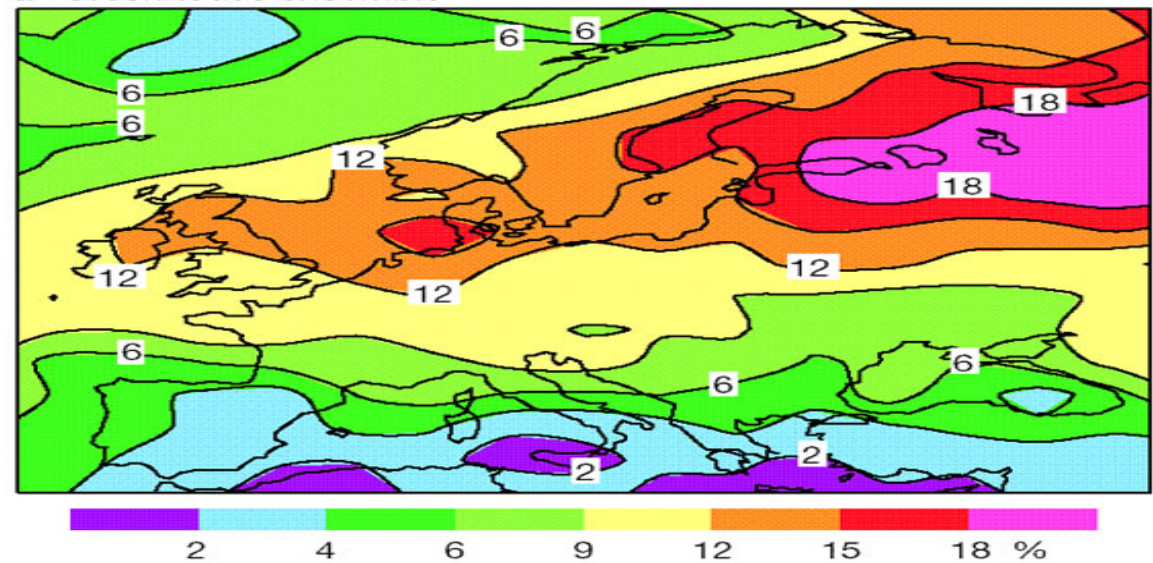
Dans la situation actuelle

a Control ensemble



En cas de doublement du CO2

b Greenhouse ensemble



Plan du cours :

- Les outils pour prédire le climat futur
- Les prédictions du climat futur
- **Les incertitudes**
- Les impacts du climat
- Conclusions et perspectives
- Un exemple : la canicule 2003

Toutefois des incertitudes subsistent :

- Problèmes d'échelles :

Echelles des milliers de km

Représentation explicite.

Ex : Cellule de Hadley-Walker, dépressions et Ac des moy. lat...

Echelle kilométrique

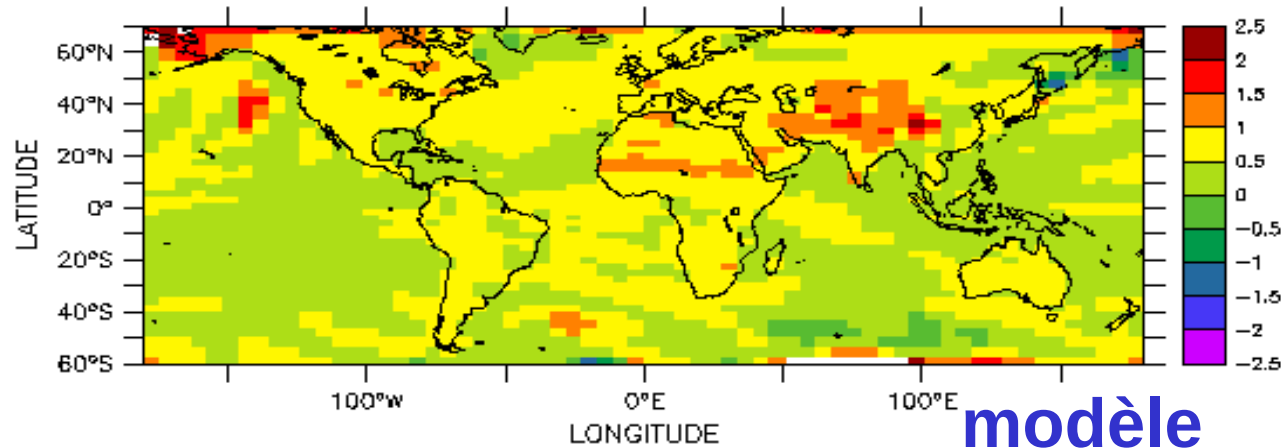
Paramétrisation

Ex : cellules convectives, pluies, nuages...

- Rétroactions atmosphériques (vapeur d'eau, aérosols, nuages...)
- Sensibilité aux conditions initiales
- Rétroactions lentes (circulation thermohaline)

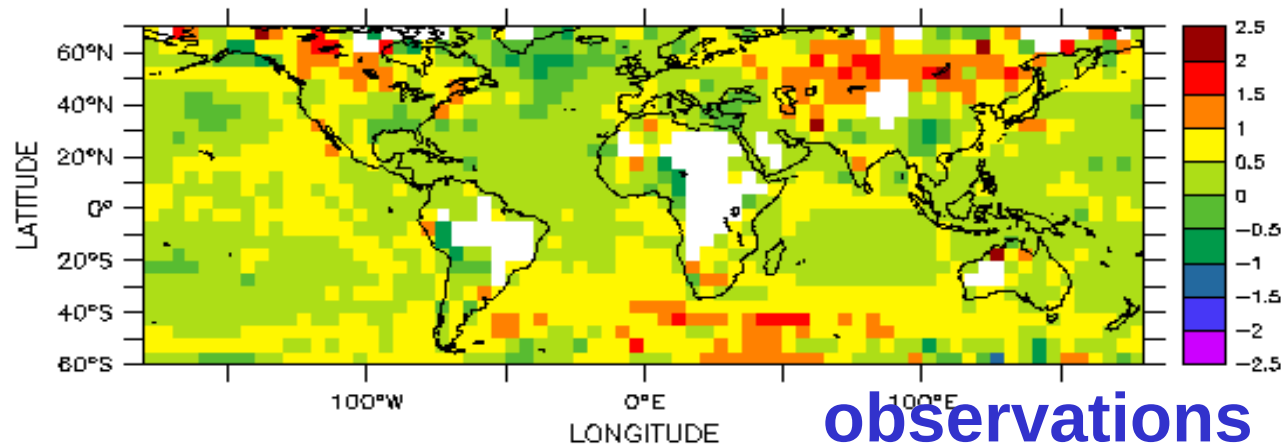
Est ce que les modèles sont bons ?

Temperature difference
(1979,1998)–(1860,1940)



IPSL model

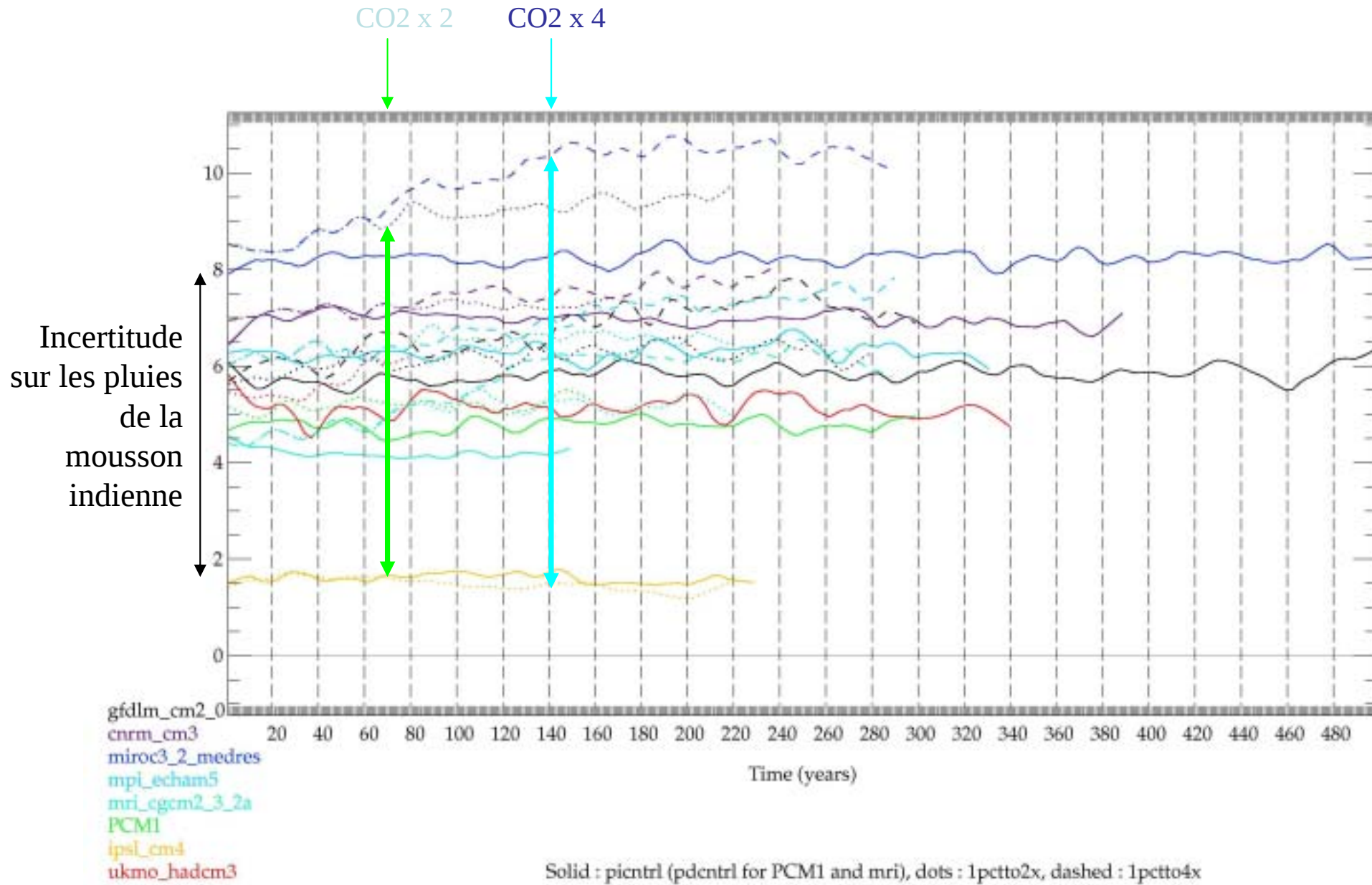
modèle



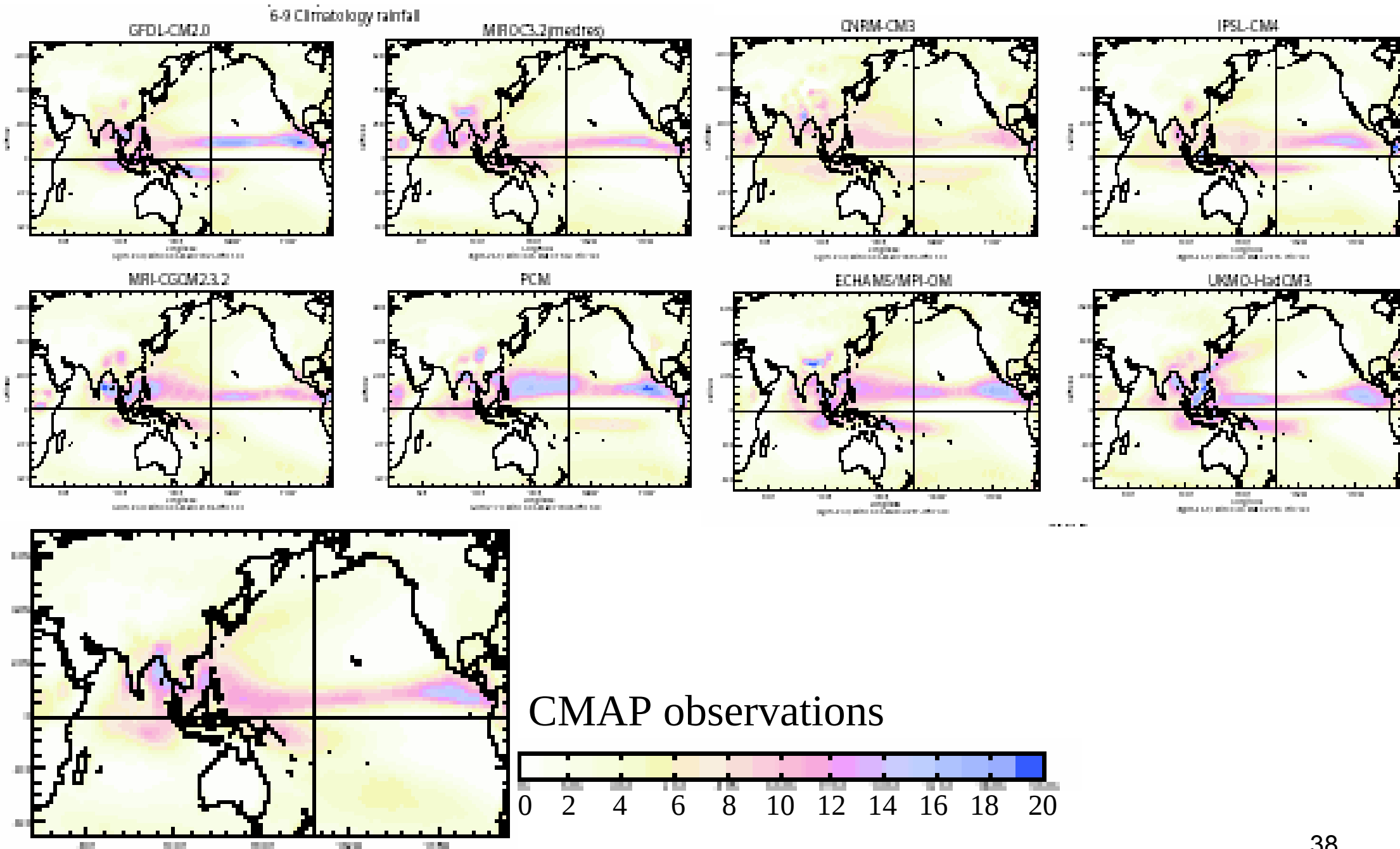
observations

Les ordres de grandeurs sont corrects MAIS il reste une certain nombre de régions pour lesquelles le modèle erre

Est ce que les modèles sont bons ?



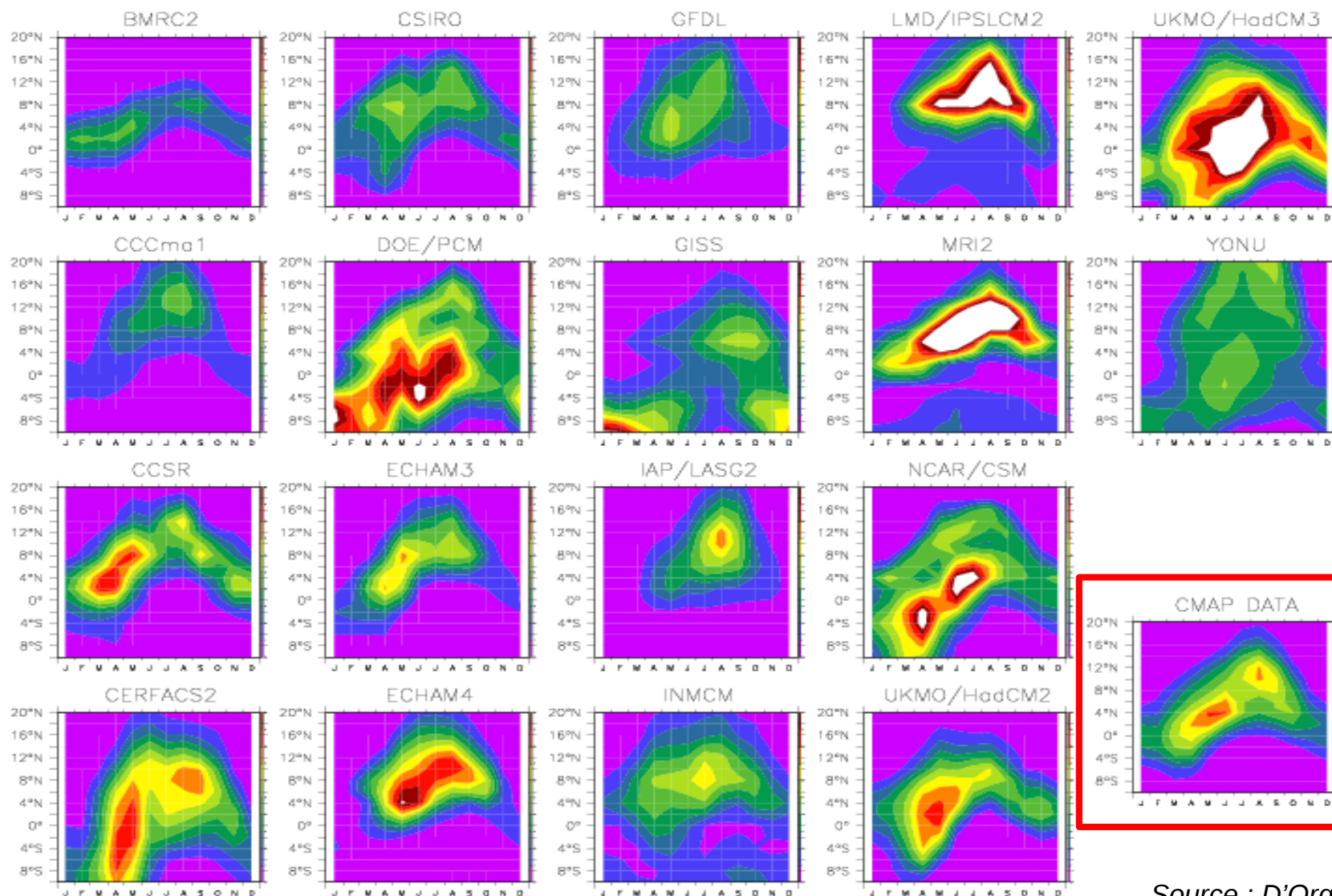
Est ce que les modèles sont bons ?



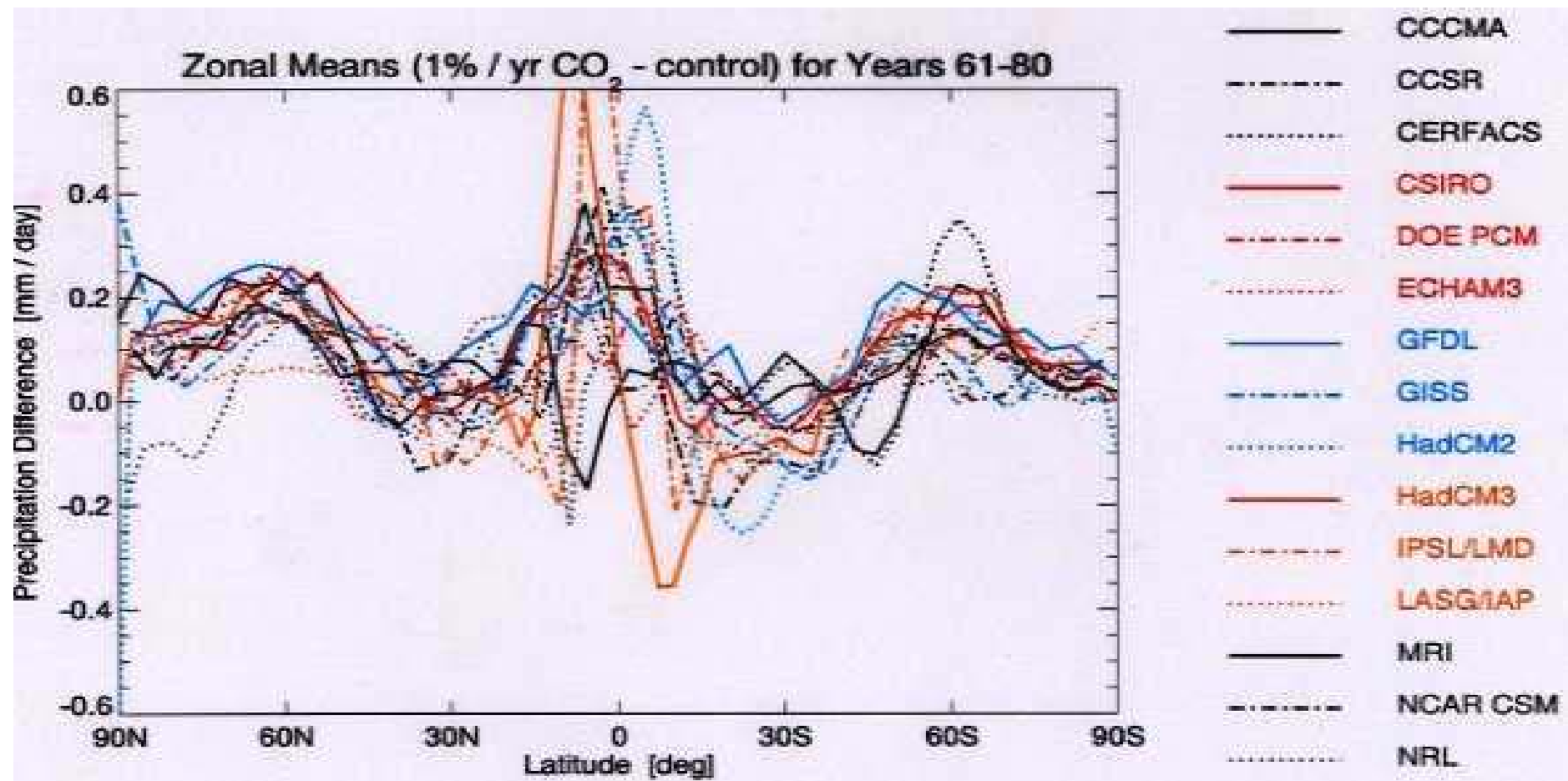


I. Simulating CC and the WAM

Monsoon representation in CTL runs: CMIP2 Hovmoller Diagrams: Climatology of precip between 10S and 20N



Agreement between models is scale dependent



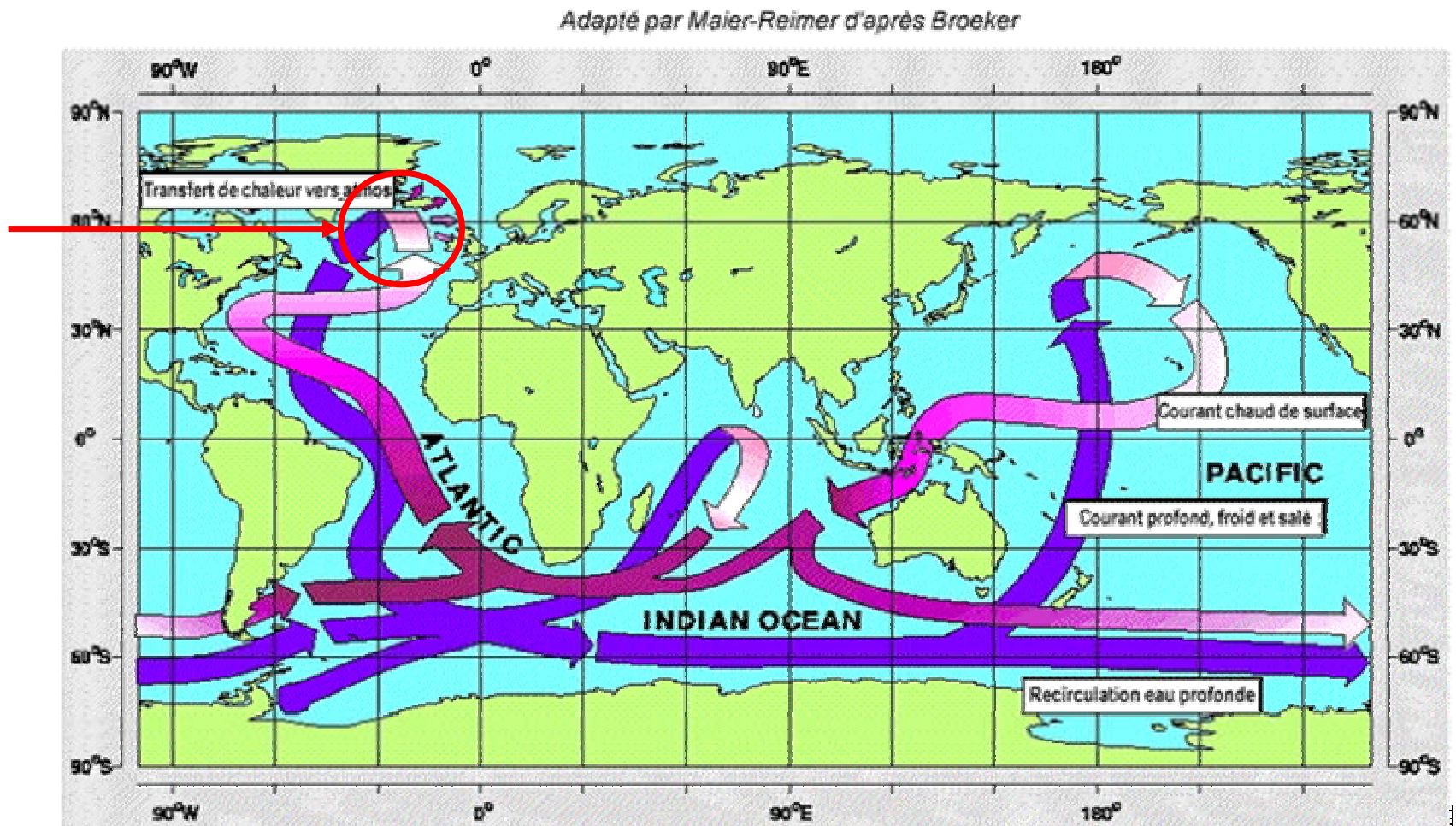
CMIP models

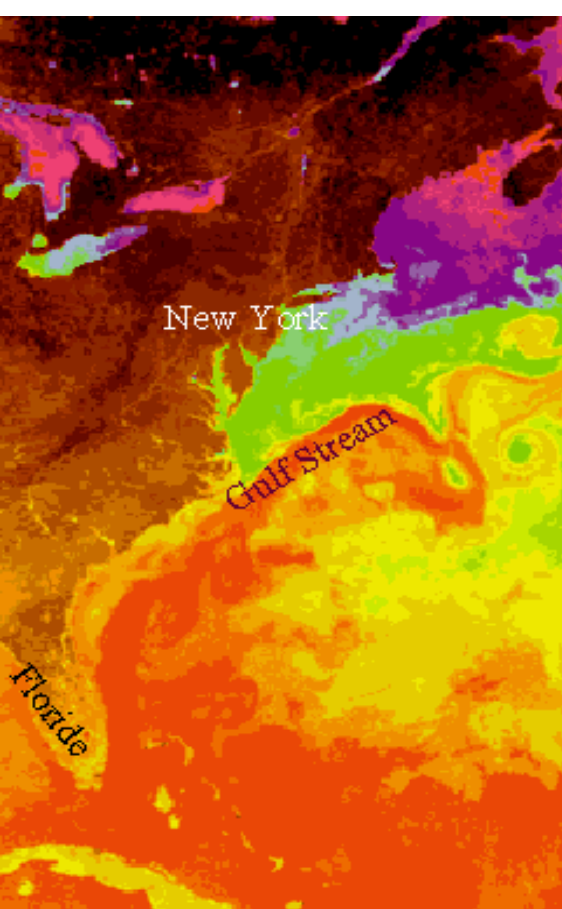
Les rétroactions lentes : la circulation thermohaline

La circulation thermohaline joue un rôle majeur dans le transport thermique méridien dans l'Océan Atlantique.

→ Induite par la variation de densité des eaux (liée à la température et à la salinité)

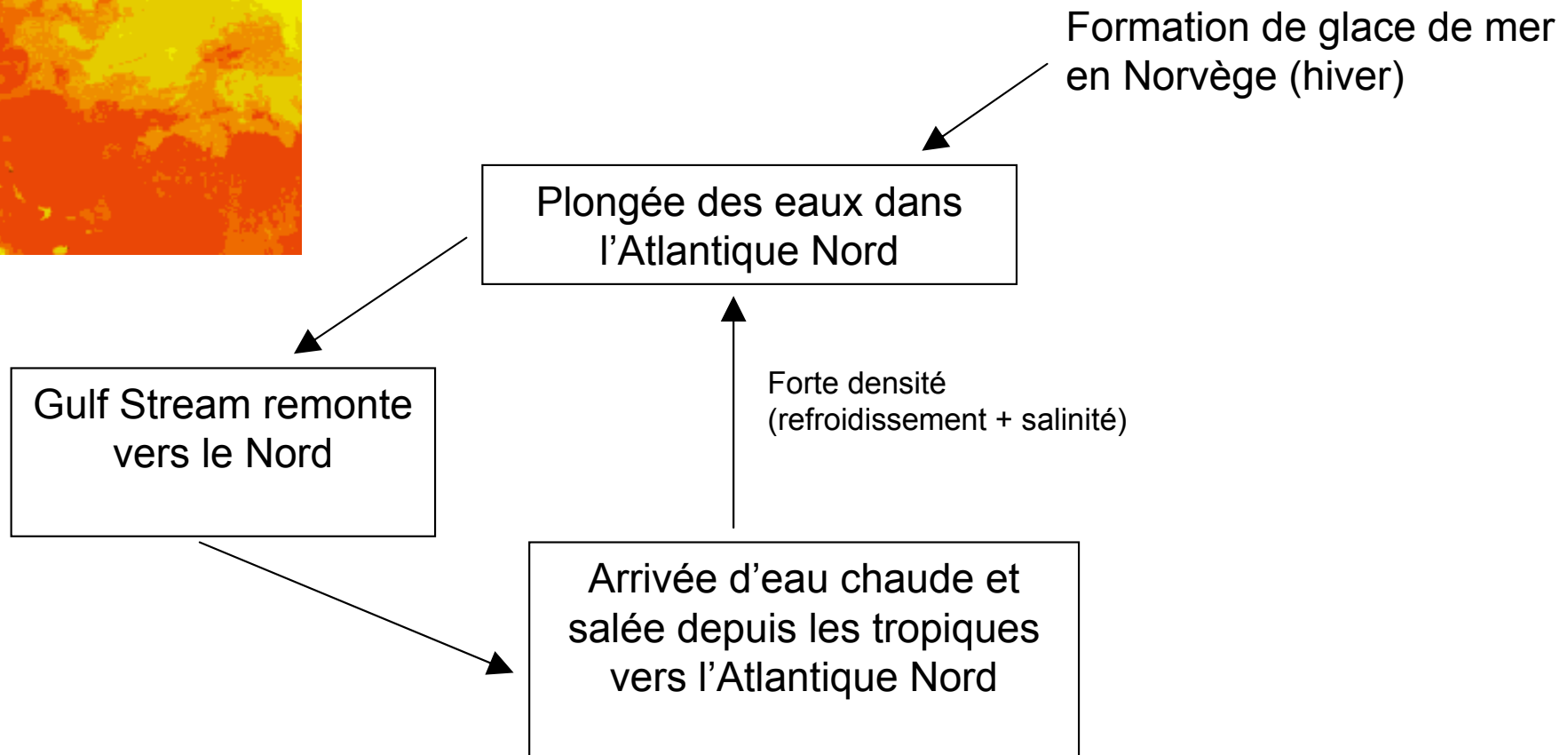
Convection :
plongée des eaux
de surface dans
l'Atlantique Nord
(mer de Norvège,
mers du
Groenland et du
Labrador)



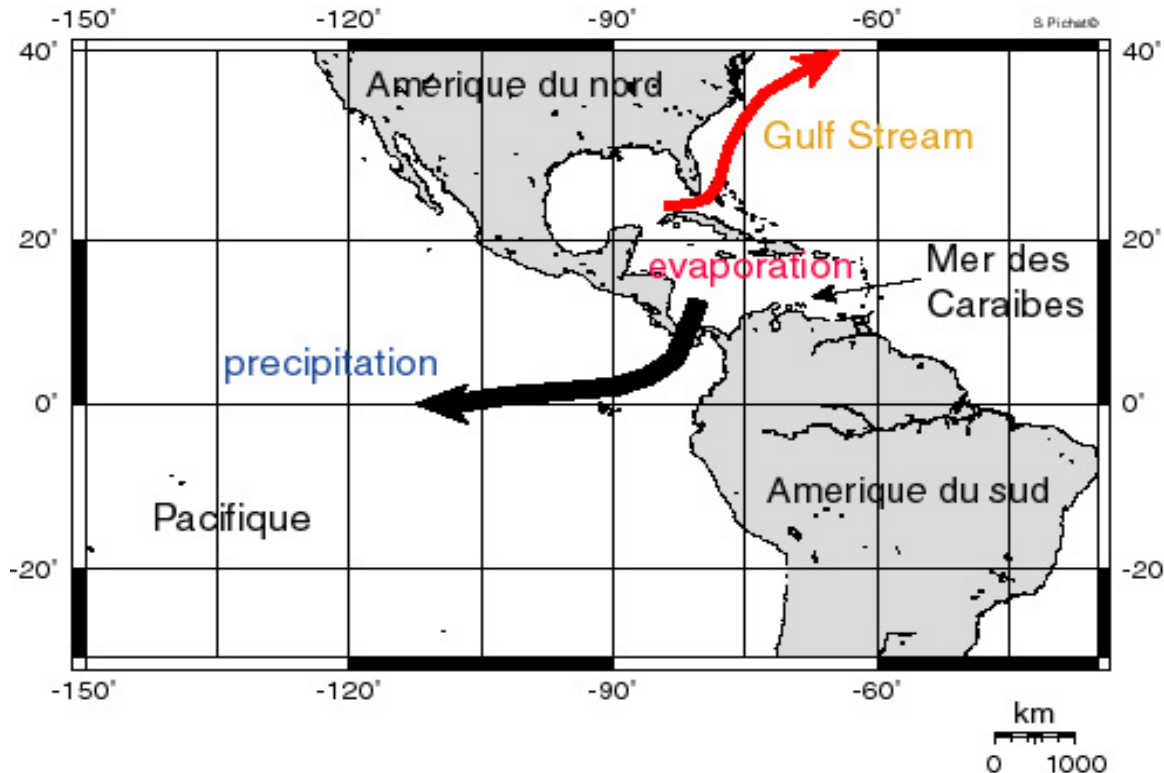


Le Gulf Stream

C'est parce qu'il y a circulation thermohaline et plongée d'eau que le Gulf Stream remonte vers le Nord pour remplacer l'eau qui plonge



Le Gulf Stream



Origines de la forte salinité globale de l'Atlantique :

→ L'eau qui s'évapore dans les tropiques est entraînée vers l'Ouest par les alizés : perte d'eau sur l'Atlantique (au profit du Pacifique Ouest)

→ Forte évaporation lors de la remontée vers le Nord du Gulf Stream non compensée par des précipitations : bilan hydrique négatif

Les différences de salinité dans les océans

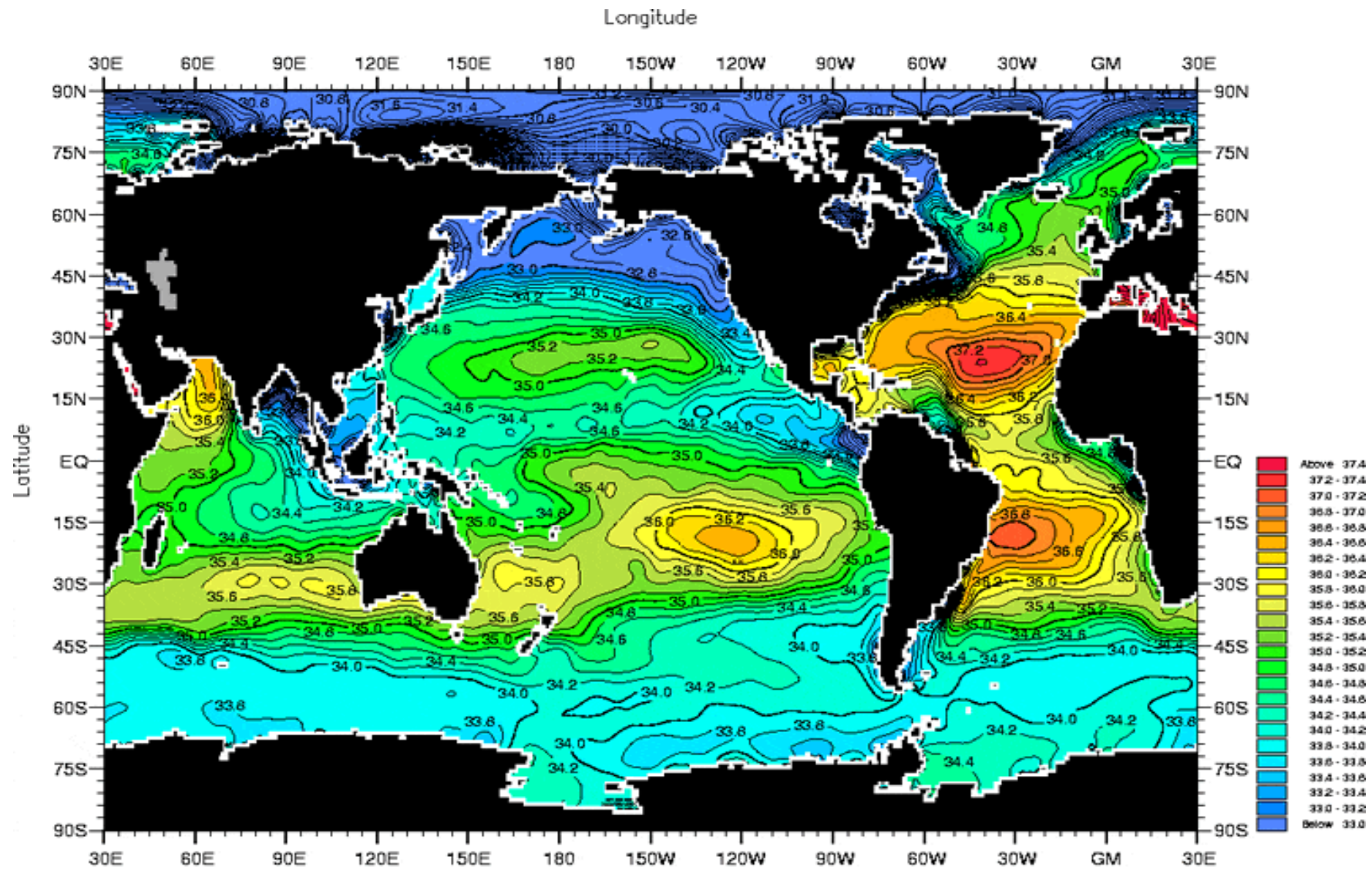
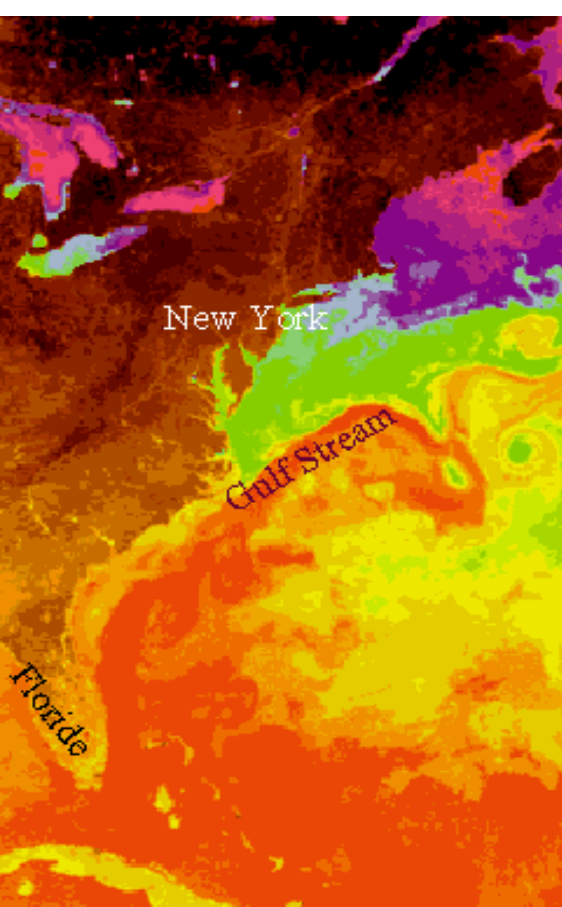


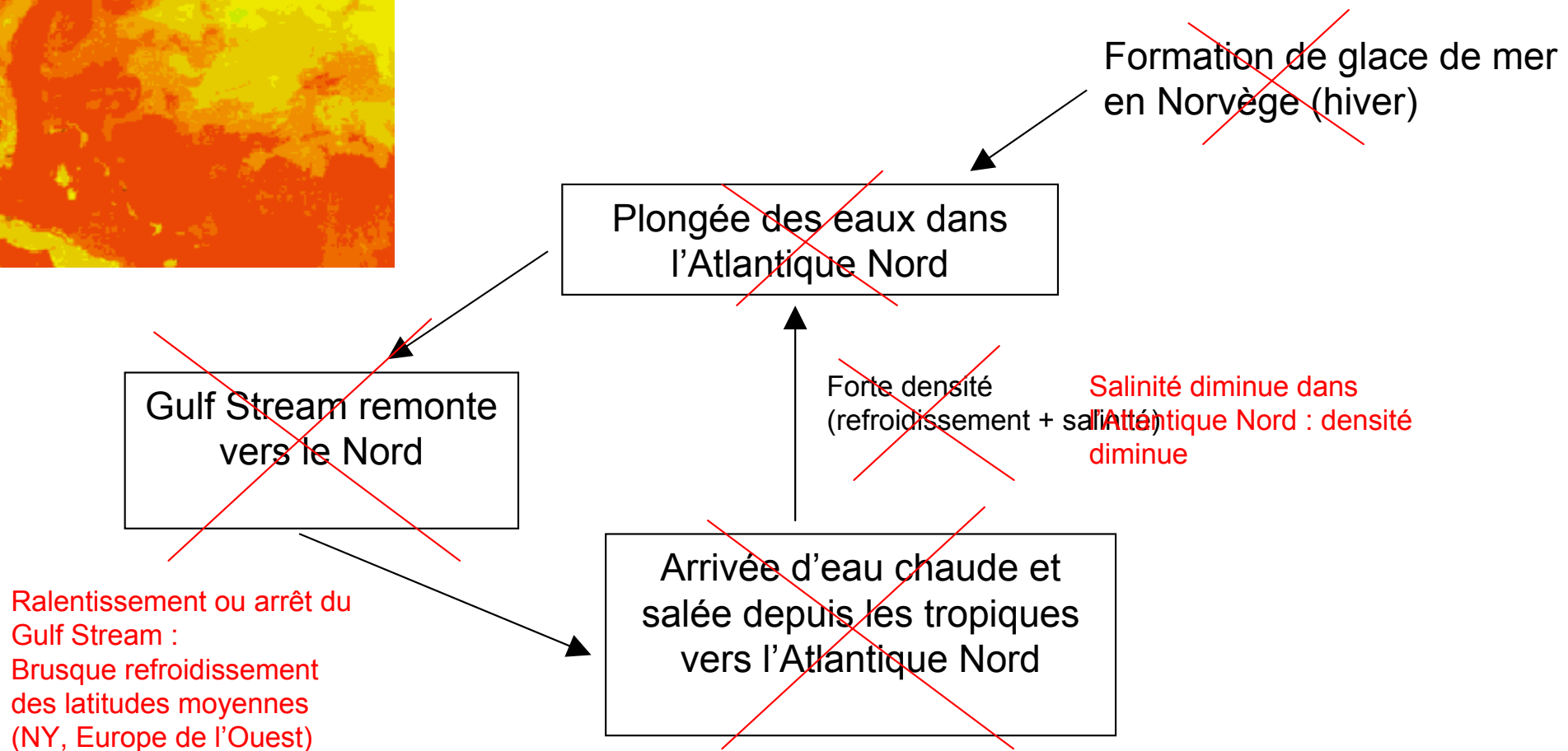
Fig. A2-1. Annual mean salinity (PSS) at the surface .
 Minimum Value= 33.57 Maximum Value= 40.02 Contour Interval: 0.20

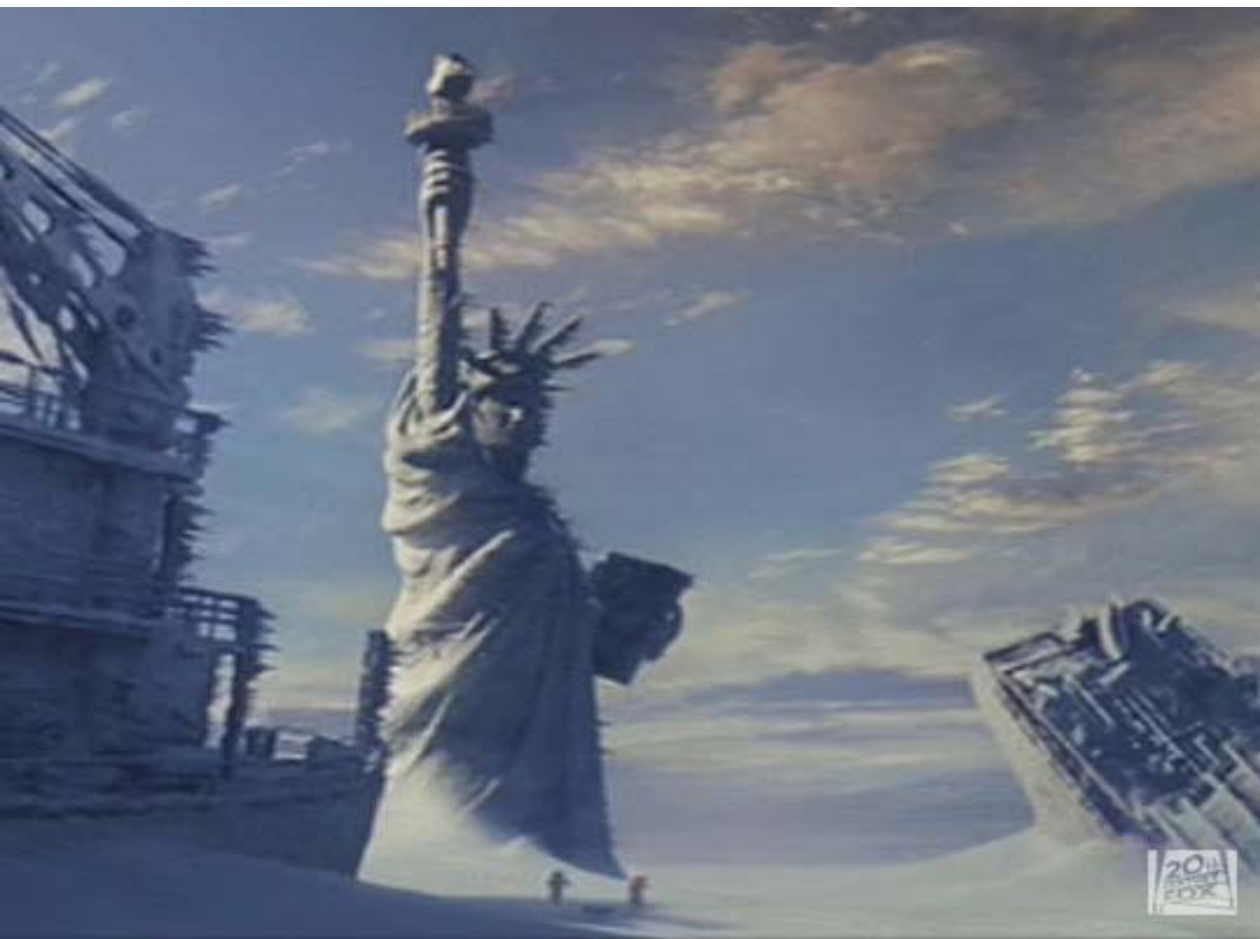


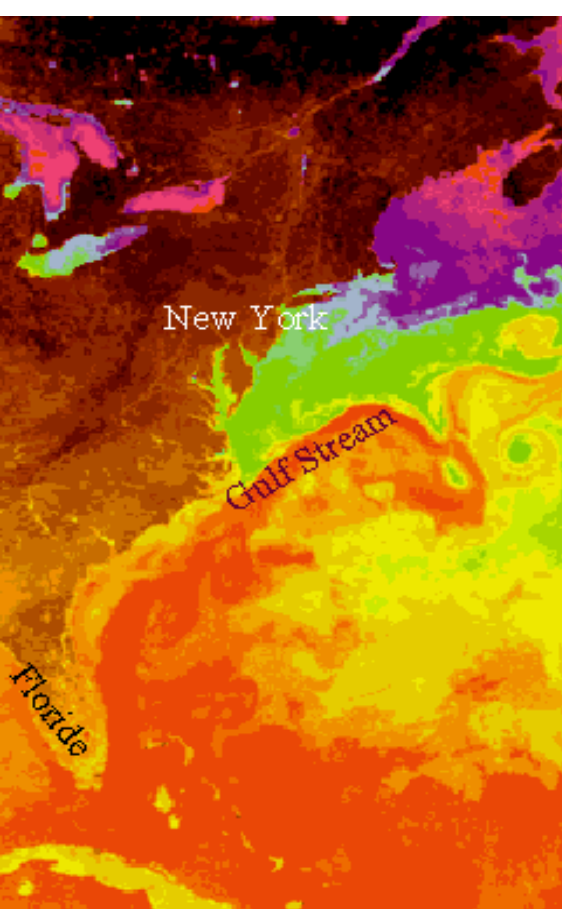
Le Gulf Stream et le réchauffement climatique

Un équilibre fragile : avenir incertain dans le cadre du réchauffement global

Si la calotte du Groenland fond plus rapidement que l'actuel et que les températures augmentent :







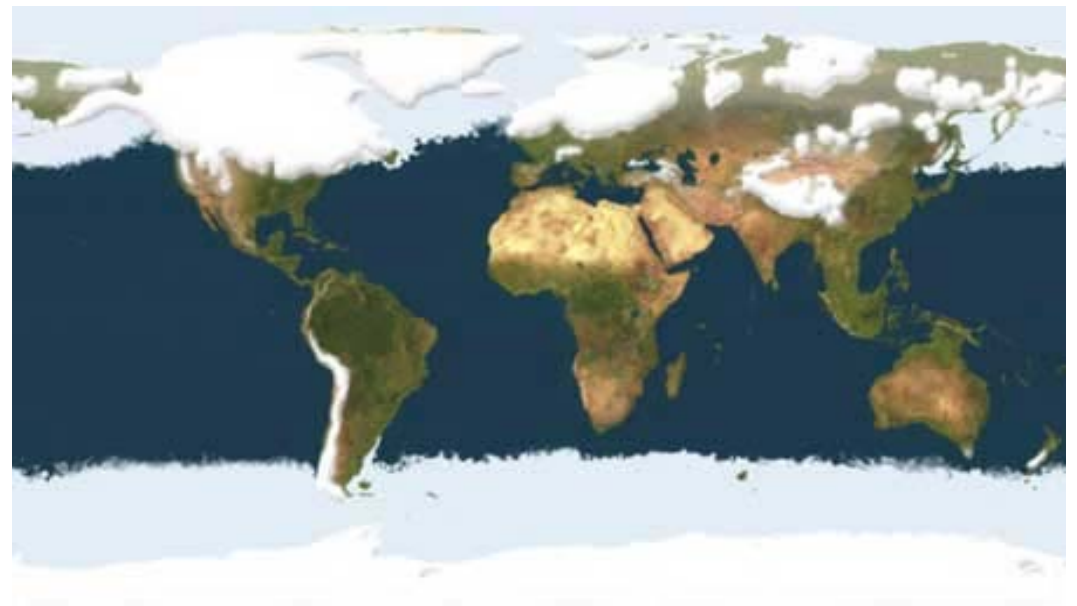
Un scénario plausible :

Un arrêt du Gulf Stream a déjà eu lieu il y a 13000 ans (le Dryas récent)

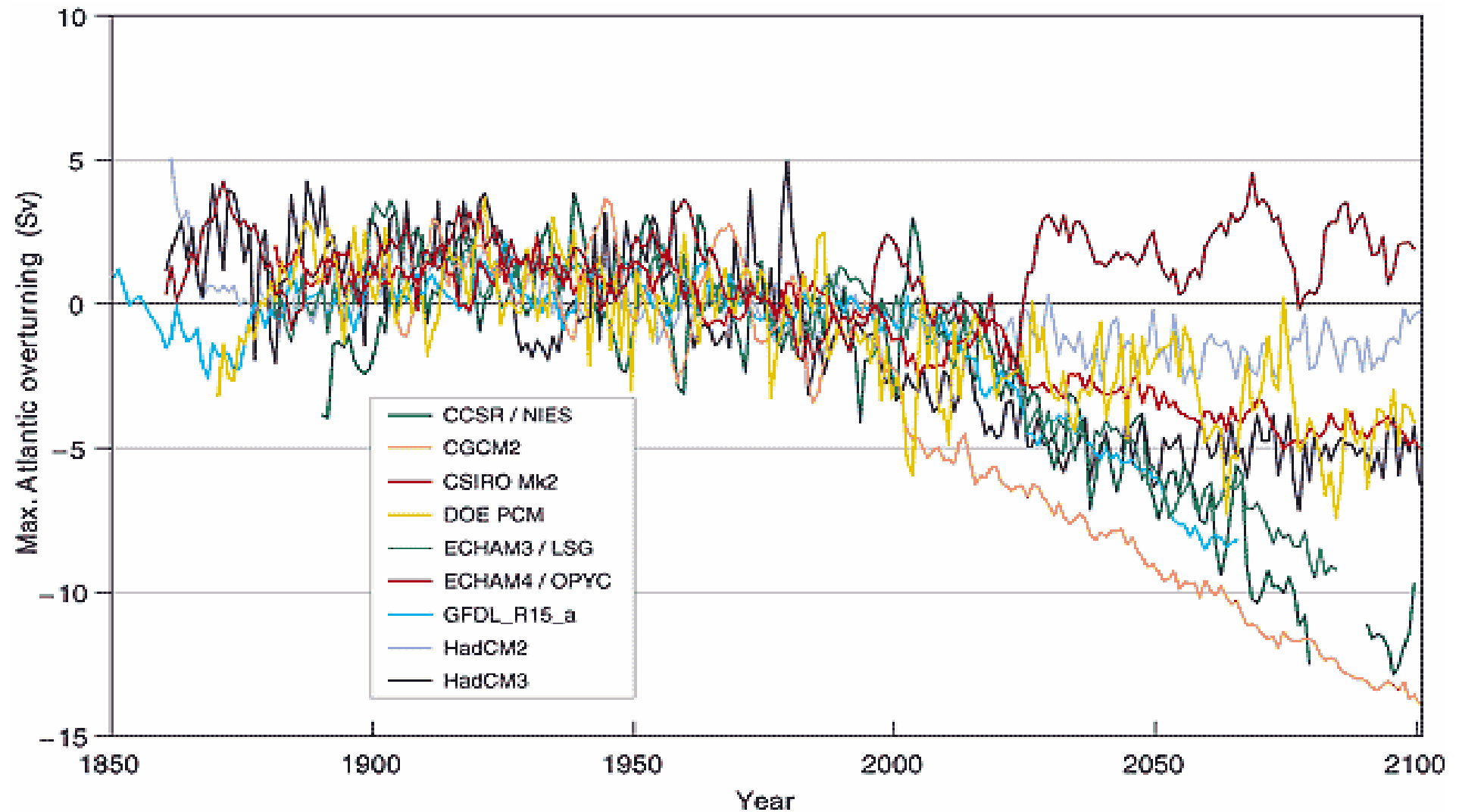
A la fin du dernier épisode glaciaire, la fonte de la calotte canadienne a contribué à une baisse brutale de la salinité de l'Atlantique Nord.

→ Episode climatique très froid (la température de l'Europe a chuté de plusieurs degrés en moins de 50 ans)

Etendue des calottes glaciaires et de la banquise il y a 13 000 ans



Projection pour l'évolution future de la circulation thermohaline



Projection pour l'évolution future de la circulation thermohaline

Dans la plupart des modèles, la circulation thermohaline s'affaiblit : le réchauffement des latitudes moyennes existe encore mais il est atténué.

Toutefois des incertitudes subsistent :

- Des phénomènes couplés mal simulés par les modèles peuvent avoir un rôle important (évaporation, précipitations, ruissellement)

- Mauvaise représentation des phénomènes océaniques à petite échelle (écoulements, petits détroits...)

- Rôles des flux d'eau douce et de la chaleur en surface encore mal connus

→ Les modèles actuels ne sont pas vraiment capables de simuler de gros changements dans la circulation thermohaline

Variabilité dans les prédictions des modèles

Paramétrisation

Processus sous-maïlles
(précipitations, nuages...)

Conditions initiales

Etat initial à partir duquel la simulation est démarrée

Forçages

Gaz à effet de serre, activité solaire, éruptions volcaniques...

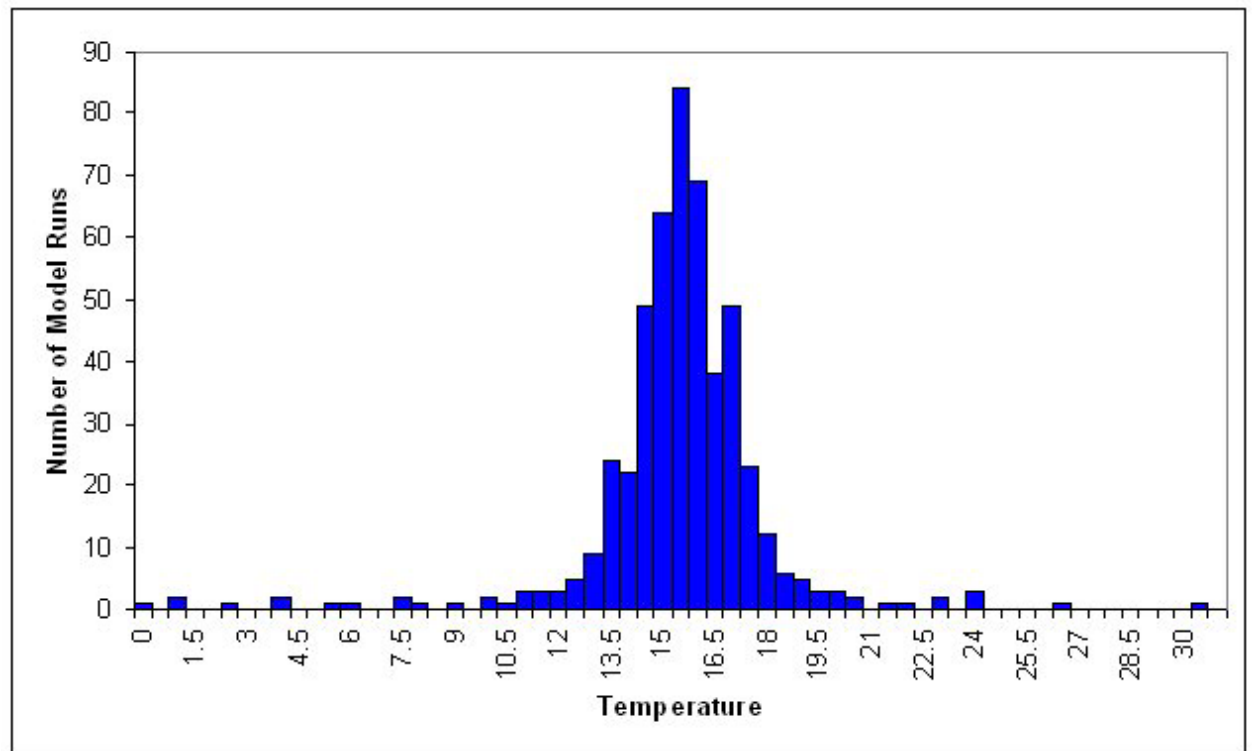
Sensibilité aux conditions initiales

De très petites variations dans les conditions initiales des modèles peuvent induire des changements importants dans les sorties des modèles → comportement chaotique du climat

« Le battement d'ailes d'un papillon dans la forêt amazonienne peut produire une tornade au Texas »

Besoin de faire des ensembles de simulations pour obtenir des fonctions de distribution

Ex: le centre européen effectue des ensembles de 50 runs pour faire la prévision météo

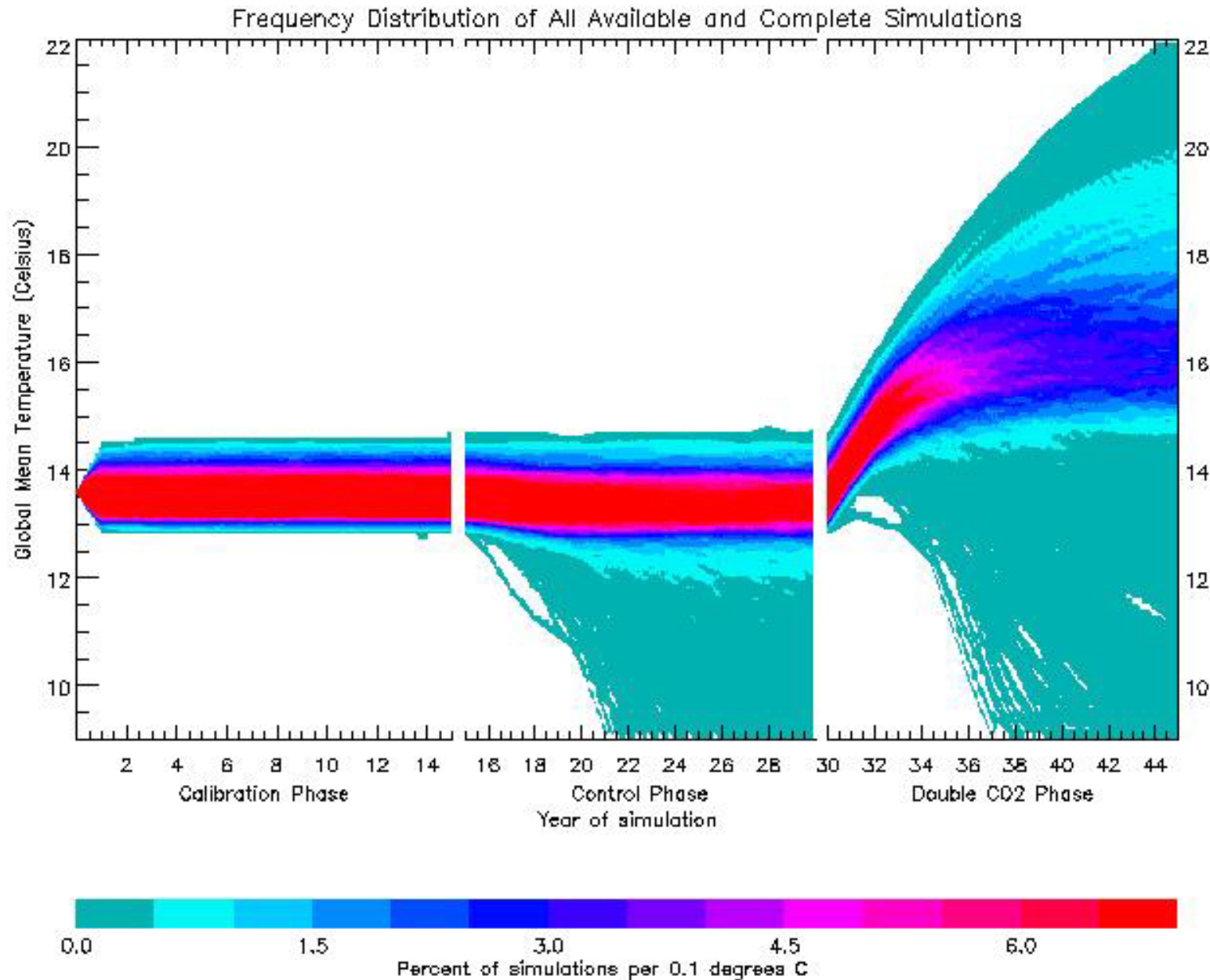


500 prévisions à 5 jours de la température à Londres
(climateprediction.net)

Sensibilité à la paramétrisation

ClimatePrediction.net

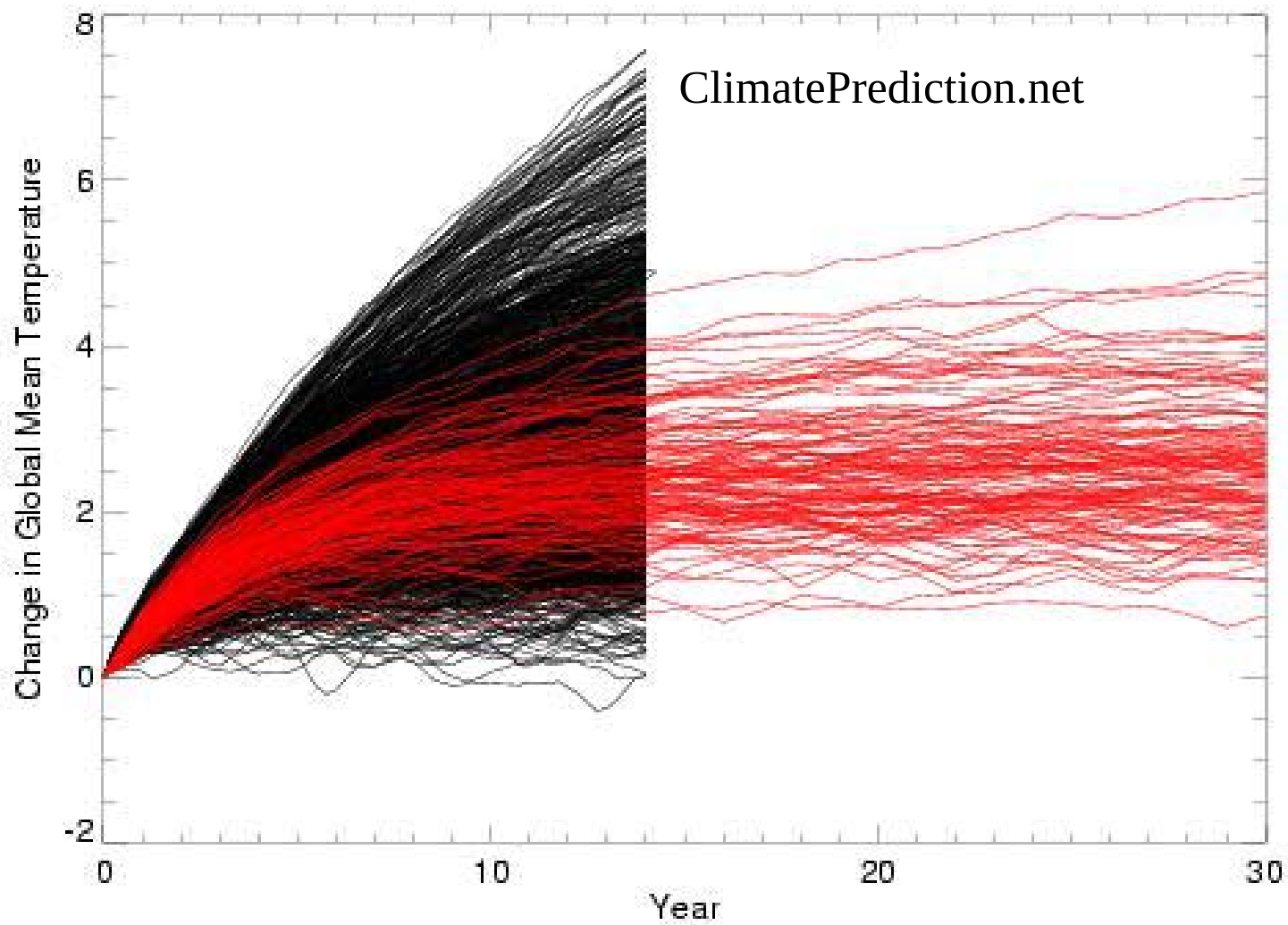
→ Un maximum de simulations pour obtenir la réponse du climat la plus probable



27 000 simulations !!!

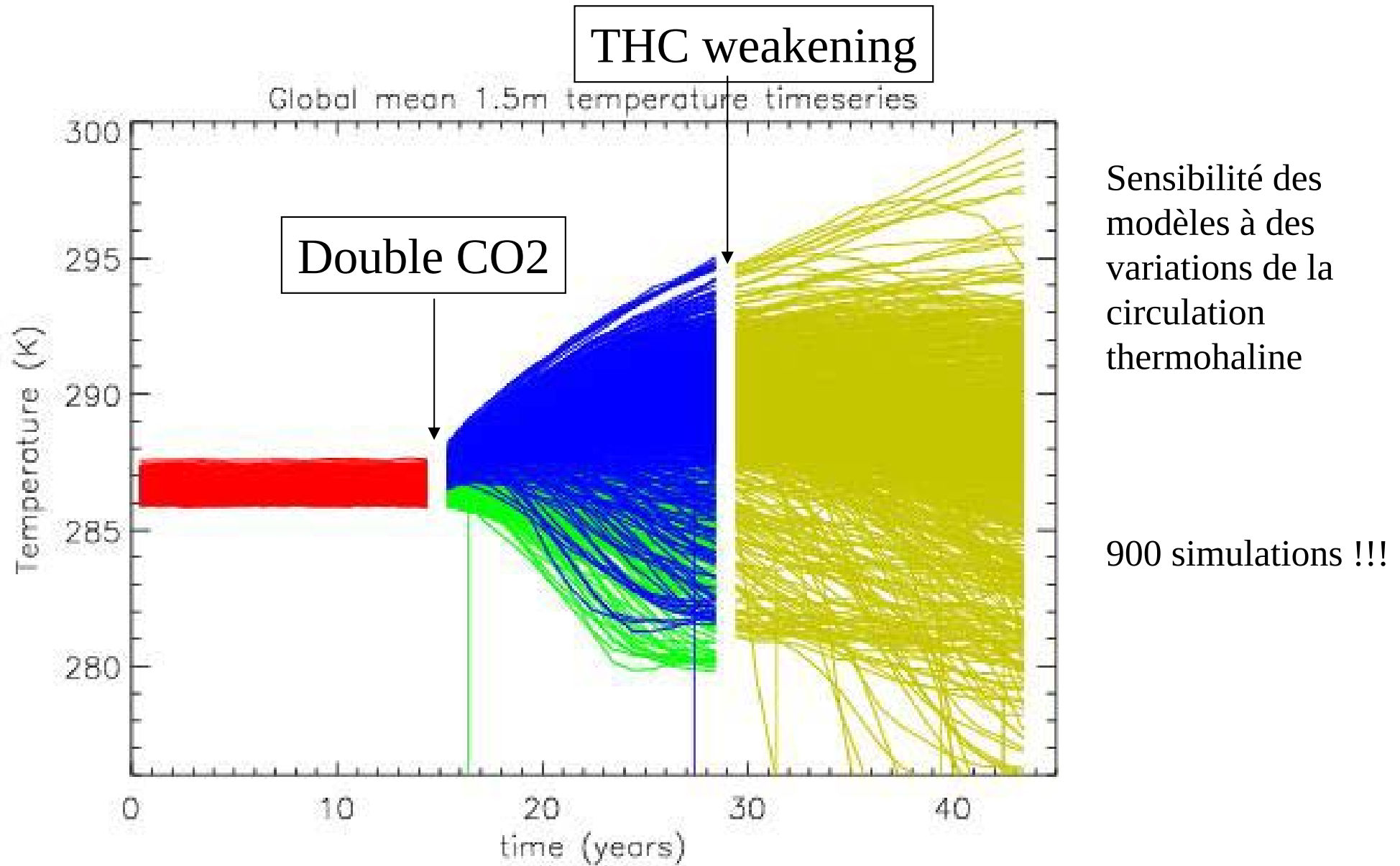
Stainforth et al.,
Nature 2005

Sensibilité à la paramétrisation



127 simulations de 30
ans avec super-
computer

Sensibilité à la paramétrisation et baisse de la THC



Plan du cours :

- Les outils pour prédire le climat futur
- Les prédictions du climat futur
- Les incertitudes
- **Les impacts du climat**
- Conclusions et perspectives
- Un exemple : la canicule 2003

Impacts sur les ressources en eau

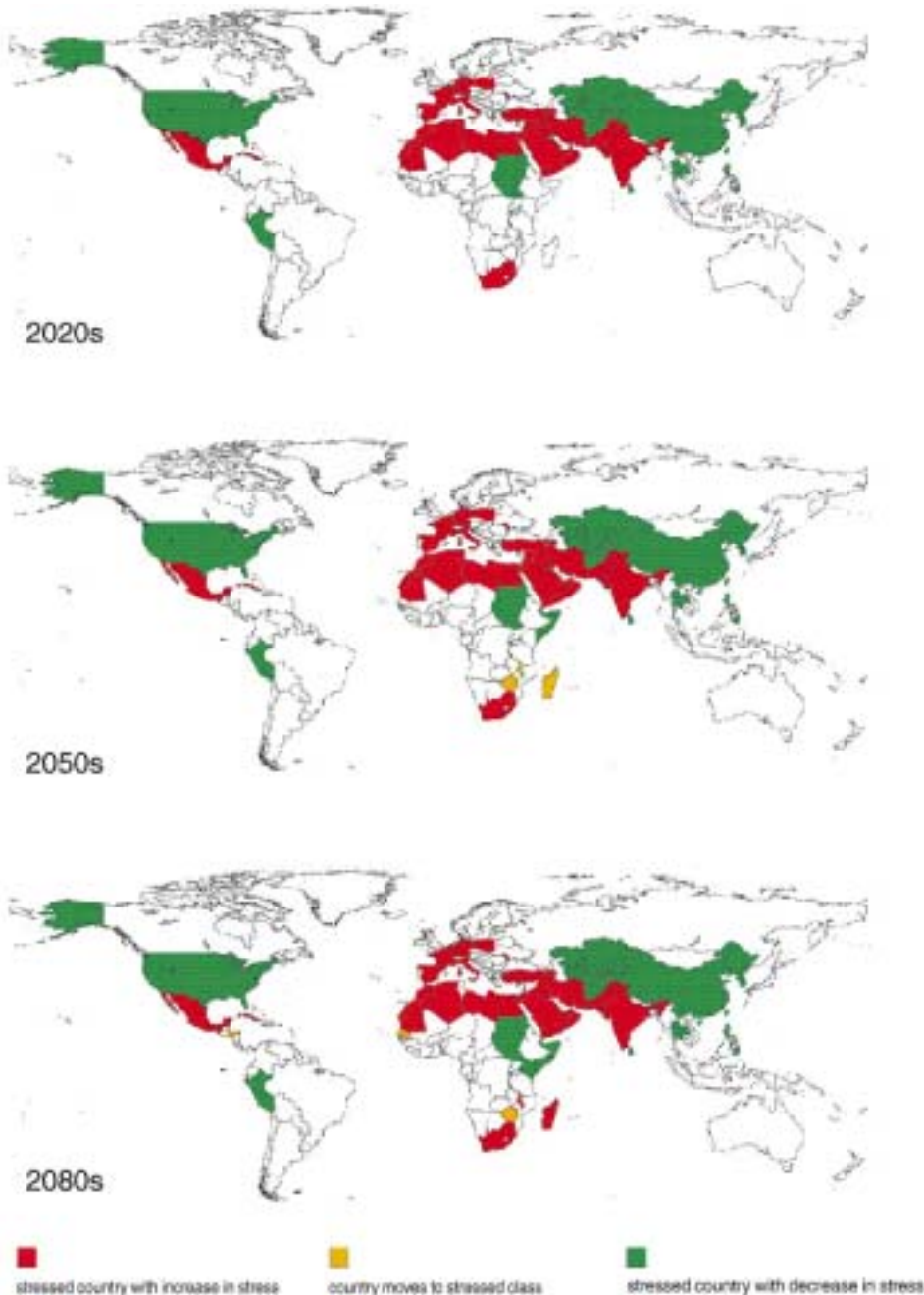
Red : stressed countries with increase in stress

Yellow : countries moving to stressed class

Green : stressed countries with decrease in stress

Water availability will be the major issue in the coming century.

Pressure on water supplies comes not only from climate change but also human use.



Impacts sur l'agriculture

Climate has a strong influence on agricultural production :

The most weather-dependent of all human activities (Oram 1989; Hansen 2002)

Socio-economical impacts whose severity varies from one region to another (Ogallo et al. 2000)

These impacts are particularly strong in developing countries in the tropics :

- High variability in climate like the monsoon system over West Africa and India and the ENSO influence over the American continent (Challinor et al. 2003)
- Poverty increases the risk and the impact of natural disasters (UNDP 2004).

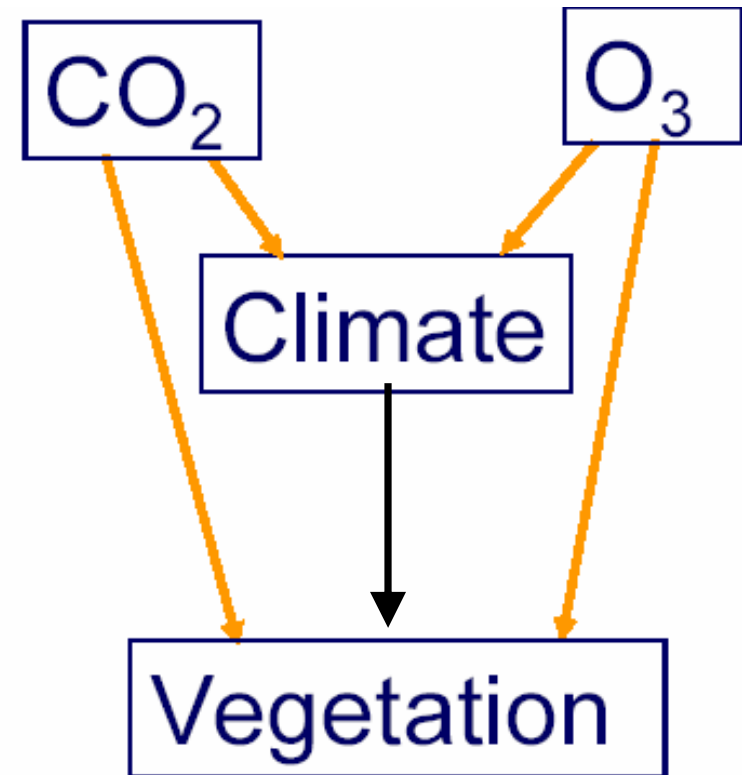
This is especially true in the Sahel :

- Rainfed crop production is the main source of food and income
- Means to control the crop environment are largely unavailable to farmers (no irrigation, low use of mechanization, fertilizers)
- Rapidly growing population

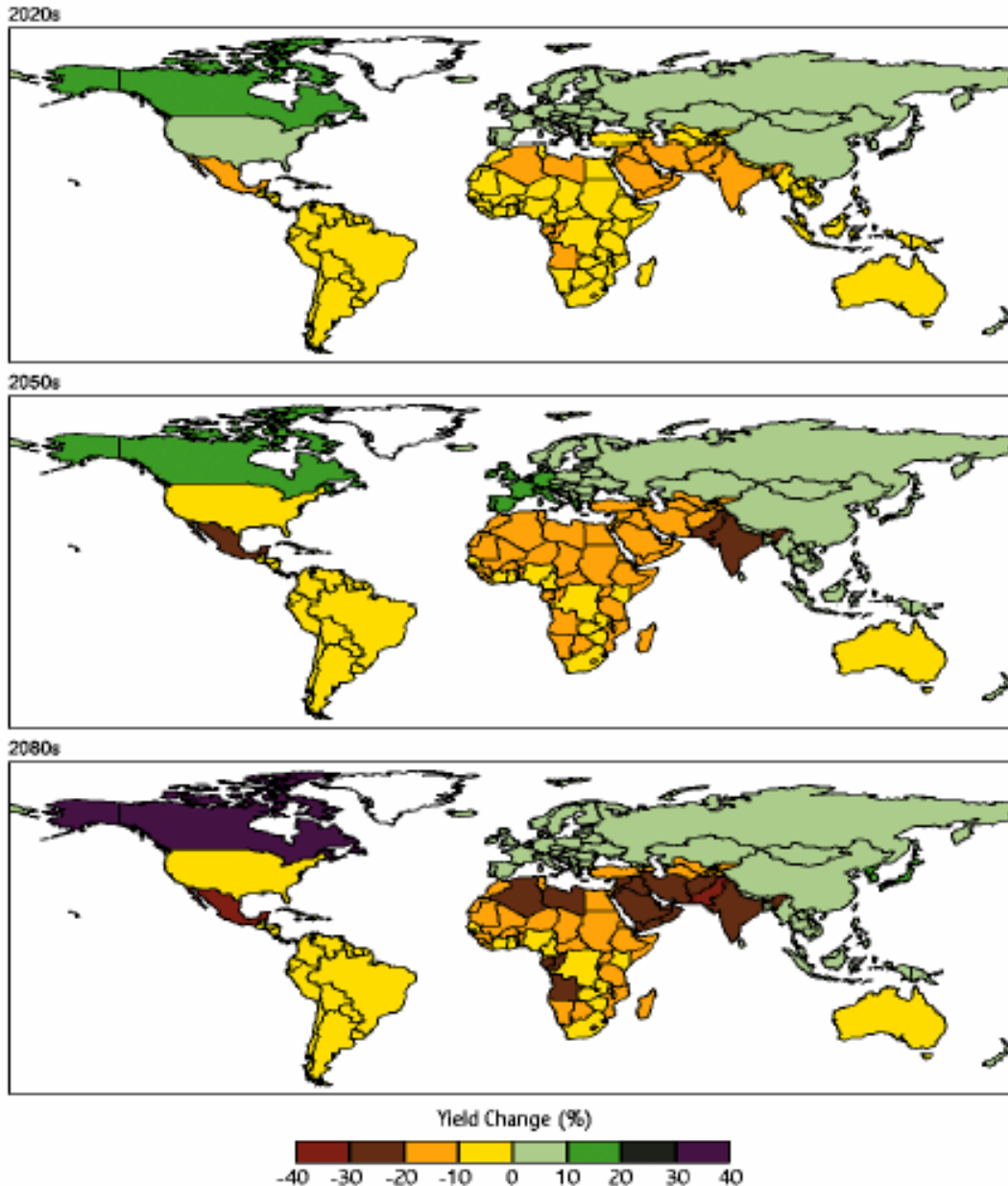
Impacts sur l'agriculture

Les facteurs environnementaux ayant des impacts agronomiques :

- Effet de fertilisation par le CO₂
- Effet de l'ozone
- Effet du climat



Impacts sur l'agriculture

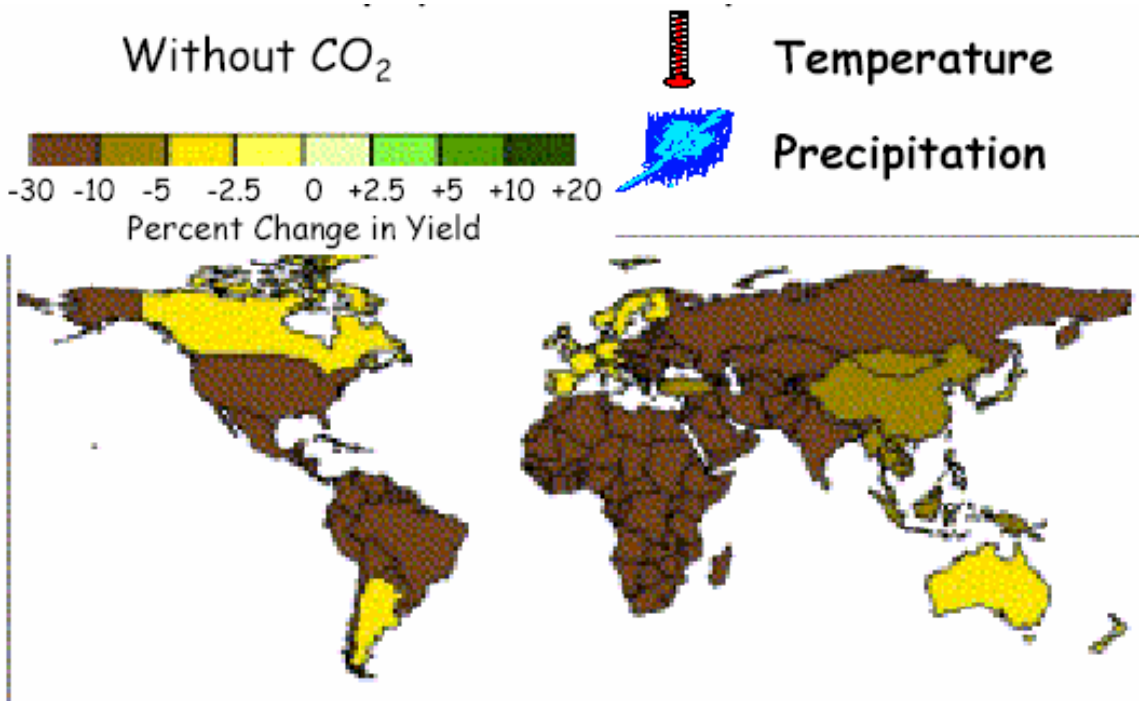


% de changement dans le rendement moyen dans les principales cultures (blé, maïs et riz)

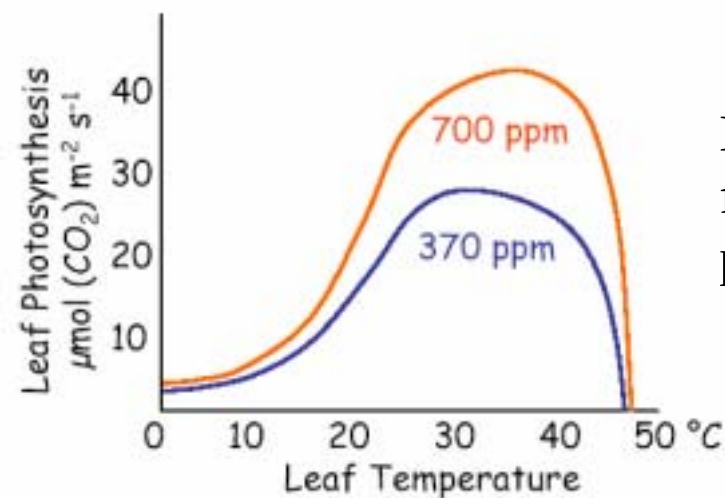
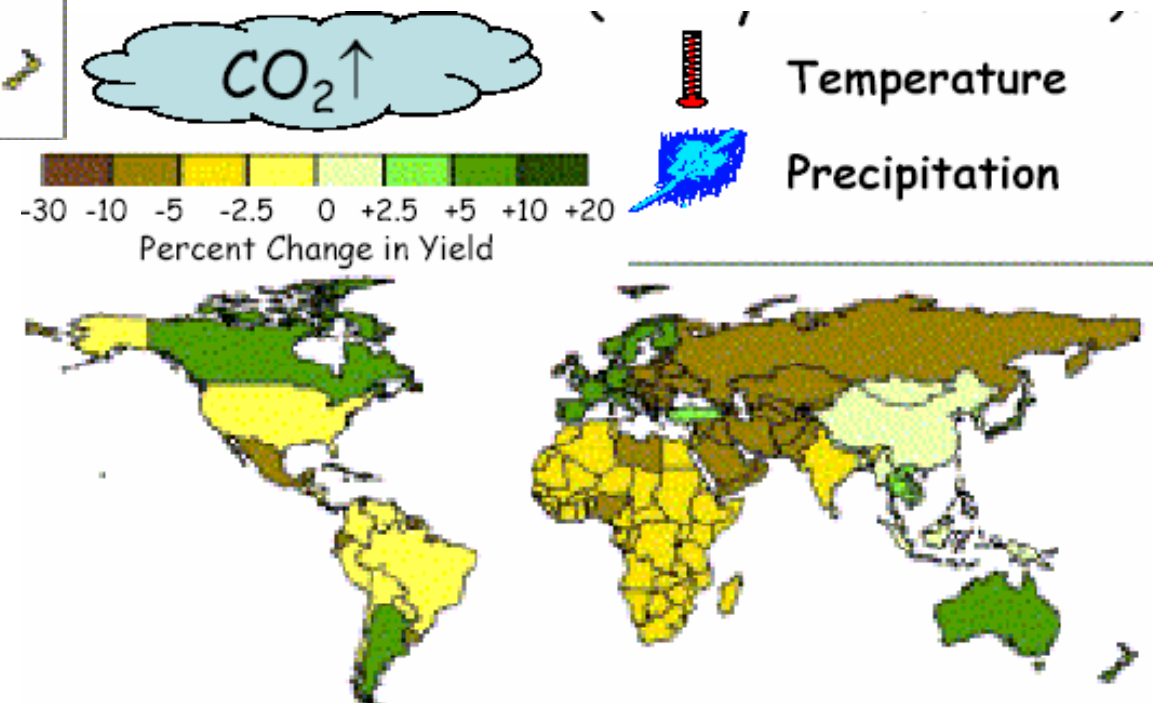
Jaune, orange, marron : tendance à la baisse

Tendance à la hausse des rendements dans les latitudes moyennes

Impacts sur l'agriculture : l'importance du CO₂

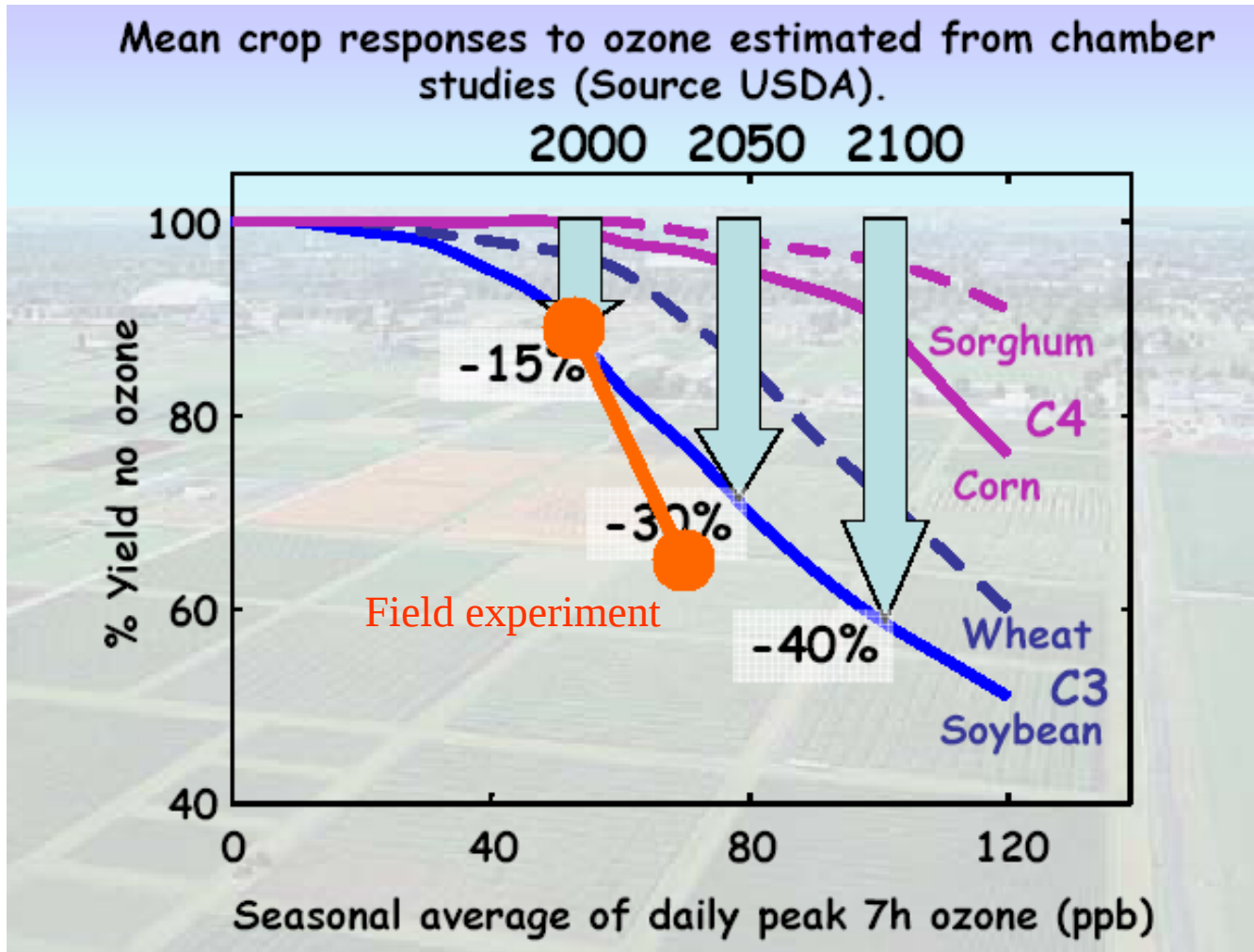


Predicted effect of CC 2050 on crop yield (Parry et al. 2004)



Effet de fertilisation par le CO₂

Impacts sur l'agriculture : l'importance de l'ozone

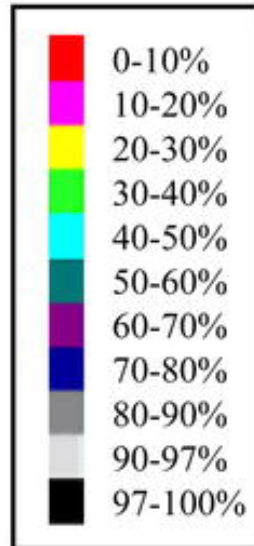
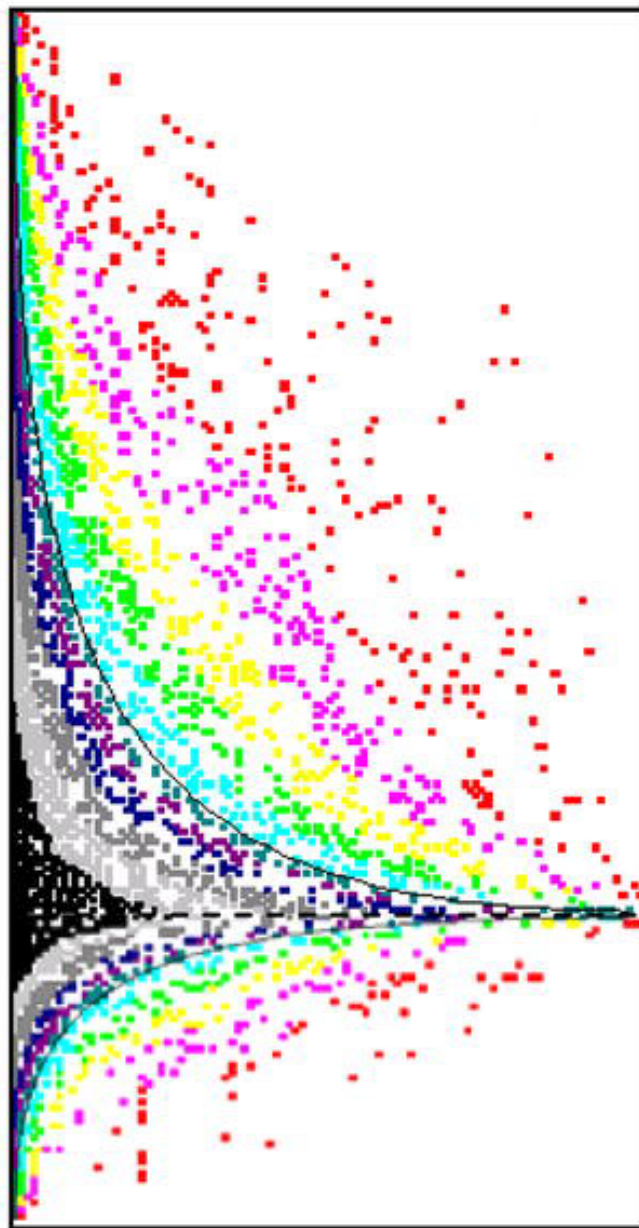


The phytotoxic effects of rising O₃

Expériences en chambres : trop petites, plus chaudes et plus humides, effets de bord

→ Effet de l'ozone sous-estimé

Impacts sur la santé



332 different
human
pathogens
across 224
countries

Northern Hemisphere
(172 countries)

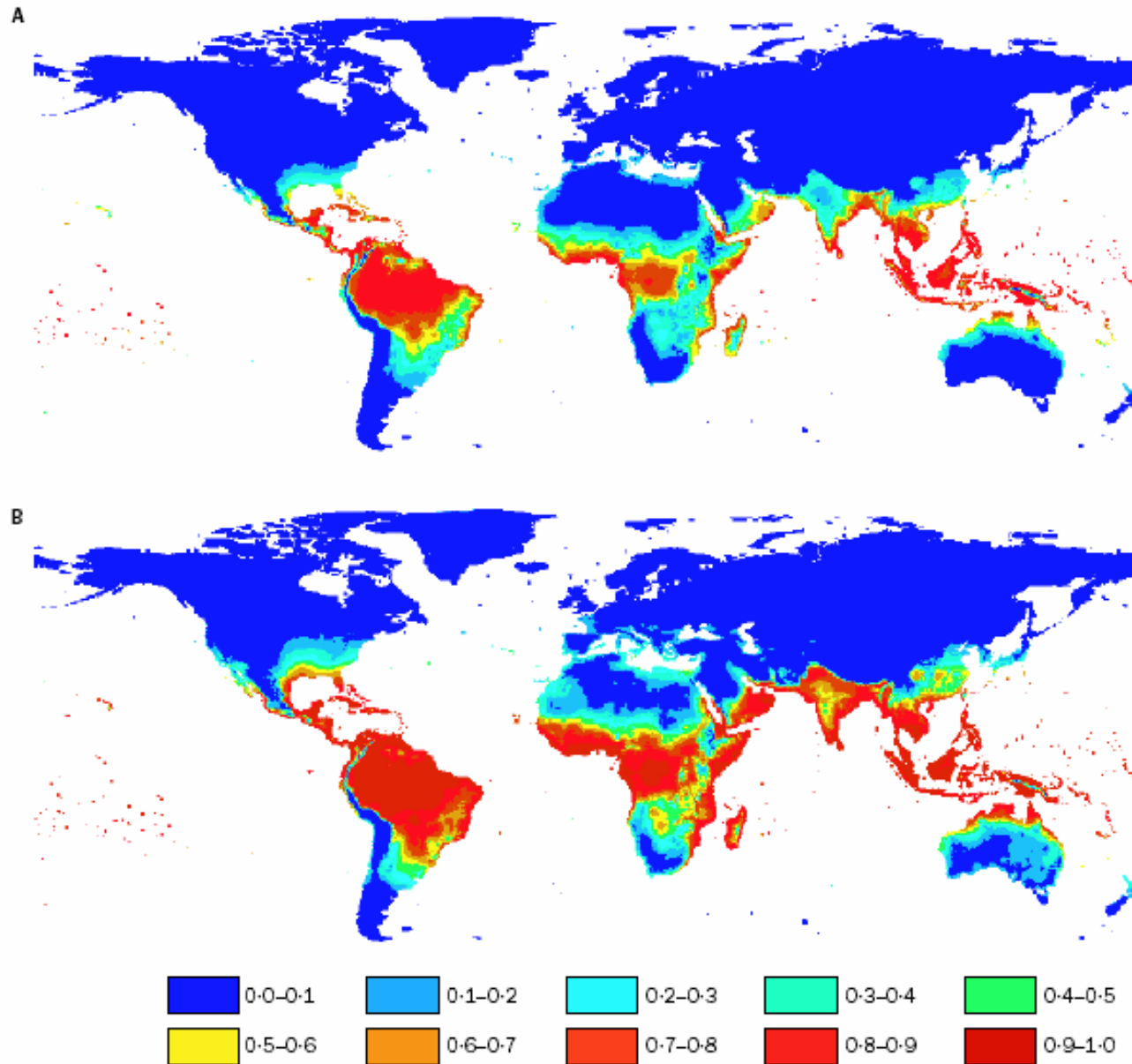
Equator

Southern Hemisphere
(52 countries)

Distribution selon la
latitude : importance
des précipitations et
des températures

*Guernier et al., Plos-
Biology, 2004*

Impacts sur la santé



**Extension de l'ère
géographique des zones à
risque de Dengue**

Zone à risque en 1990

Zone à risque en 2085

Figure 2: Estimated baseline population at risk in 1990 (A) and estimated population at risk in 2085 (B)
Results of a logistic regression model with vapour pressure (humidity) as the predictor of dengue fever risk, using climate data from 1961 to 1990 (A).
Forecast geographical distribution of dengue transmission based on climate projections for 2080-2100 from a global circulation model (CCGCM2) (B).
Colours represent probability of dengue fever transmission.

- Les différents modèles sont en accord entre eux sur le réchauffement
- Une forte gamme de température globale possible est proposée: $+1.5^{\circ}\text{C}$ / $+6^{\circ}\text{C}$
- Elle dépend des scénarii d'évolution de l'économie et du comportement des modèles
- Les différents modèles ne sont pas en accord sur l'évolution des précipitations
- Il est trop tôt pour prédire des changements dans les événements extrêmes
- La stabilisation éventuelle de la température est décalée par rapport aux diminutions des émissions de gaz à effet de serre

Mais : Beaucoup d'incertitudes dans les prévisions

→ Les impacts pourraient être très importants même s'ils sont difficiles à appréhender à l'heure actuelle compte-tenu de ces incertitudes

→ Que faire ??????

Plan du cours :

- Les outils pour prédire le climat futur
- Les prédictions du climat futur
- Les incertitudes
- Les impacts du climat
- **Conclusions et perspectives**
- Un exemple : la canicule 2003

L'objectif ultime de la convention-cadre sur les changements climatiques (CCNUCC) est:

de **stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre** dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique.

Il conviendra d'atteindre ce niveau dans un délai convenable pour :

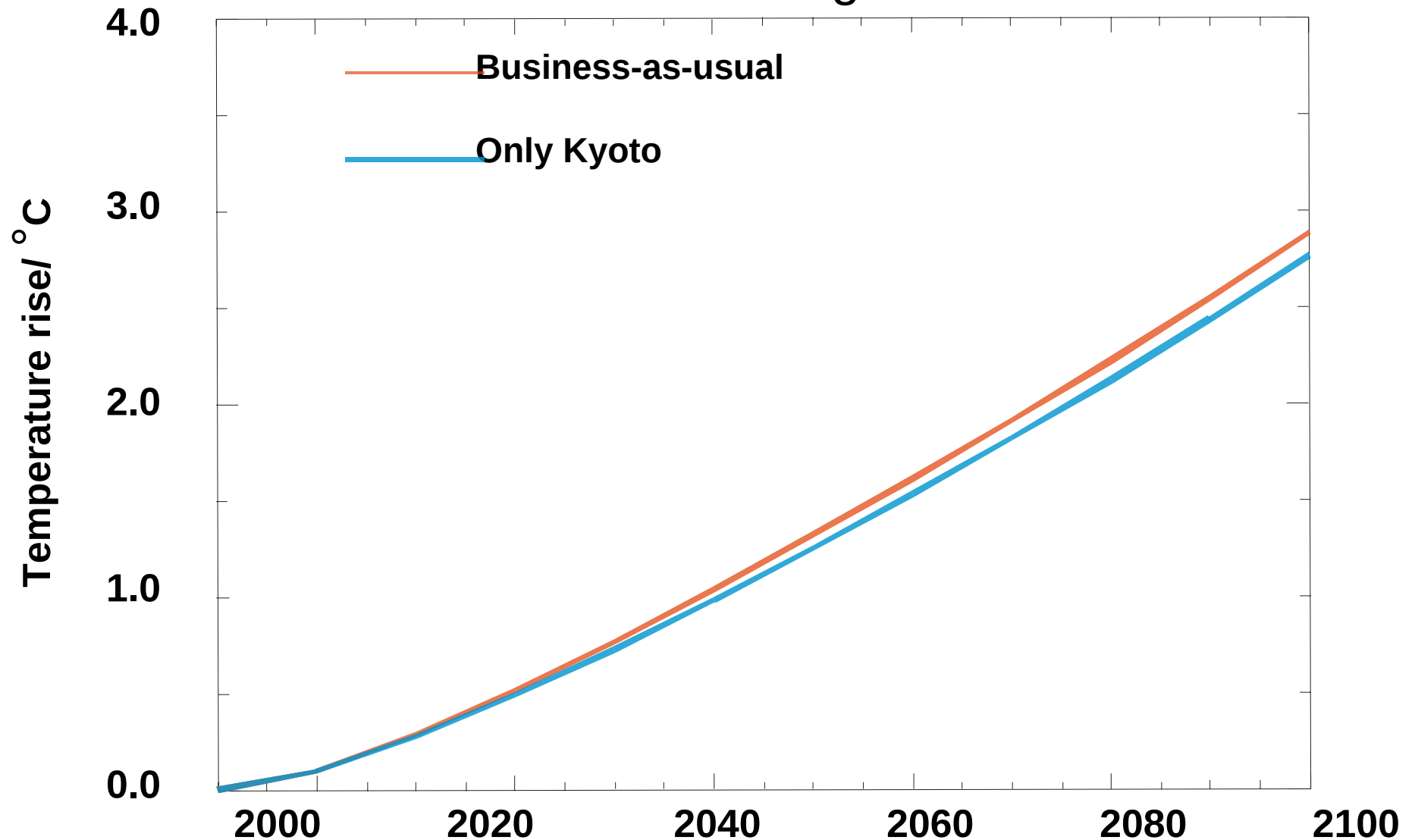
- que les **écosystèmes** puissent s'adapter naturellement aux changements,
- que la **production alimentaire** ne soit pas menacée
- et que le **développement** économique puisse se poursuivre d'une manière **durable**

The 1997 KYOTO protocol

- Developed countries (38) agreed to reduce emissions of greenhouse gases below their 1990 levels by 2010
- Reductions average 5% (UK reduction 12%)
- Planting trees can offset emissions by absorbing CO₂
- Countries can buy and sell carbon emissions reductions

BUT United States has declined to ratify

Even if all countries ratify,
reduction in warming will be small



How can we reduce CO2 emissions ?

- **Use less energy**

- insulate homes, businesses and factories
- less polluting transport; travel less
- Combined Heat and Power generation



- **Generate energy without emissions of CO2**

- renewable energy (wind, solar..)
- nuclear power

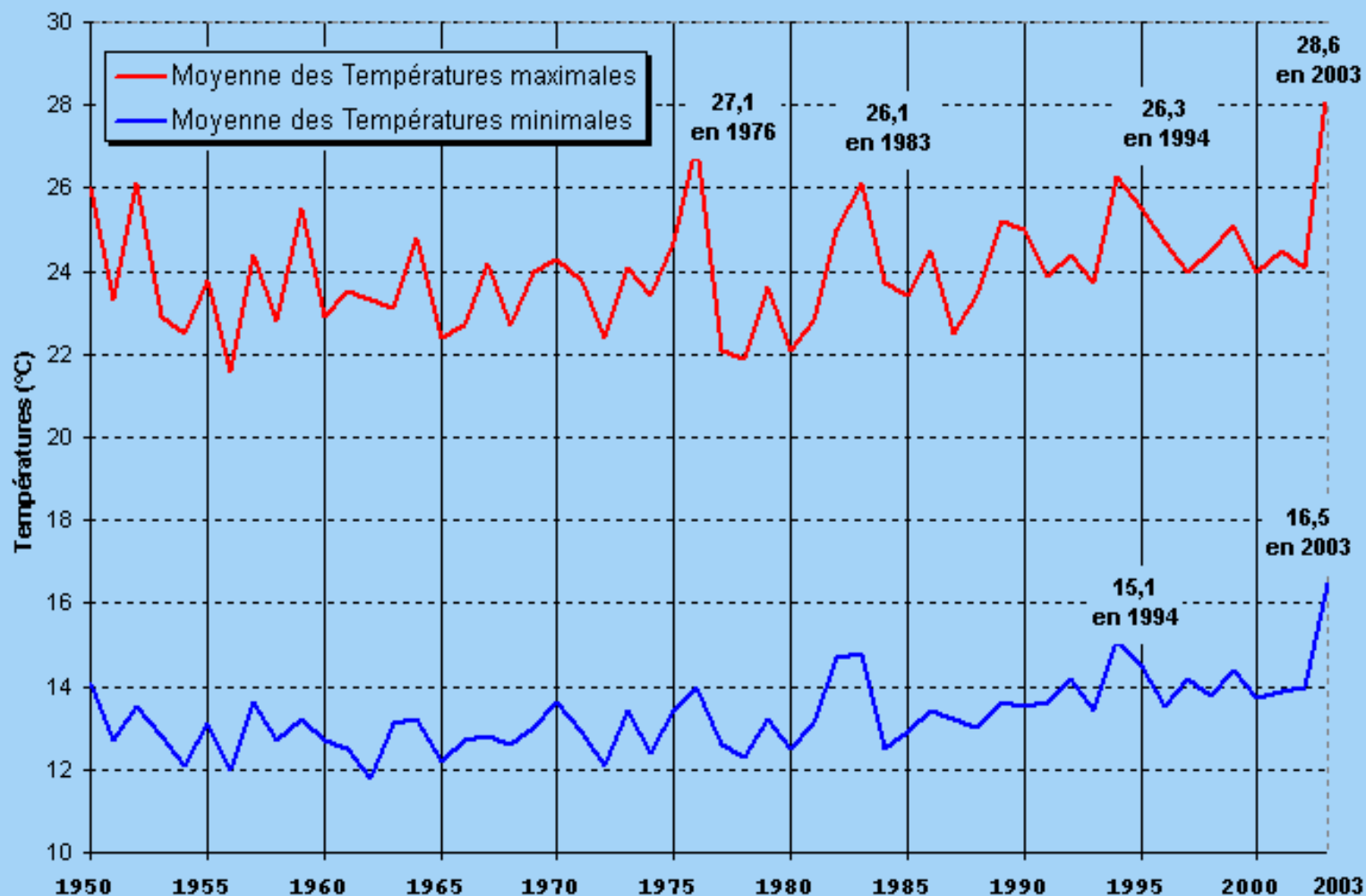


Plan du cours :

- Les outils pour prédire le climat futur
- Les prédictions du climat futur
- Les incertitudes
- Les impacts du climat
- Conclusions : ce qu'il faudrait faire
- **Un exemple : la canicule 2003**

La canicule de 2003

Moyenne des températures pour la période du 1 juin au 11 août
(moyenne effectuée sur les stations représentatives des 22 régions économiques)



Eté le plus chaud de ces 50 dernières années :

+ 2°C TX (par rapport à 76, 83 et 94)

+3.5°TN (par rapport à 1950-1980)

La canicule de la première quinzaine d'août est exceptionnelle Sur la France

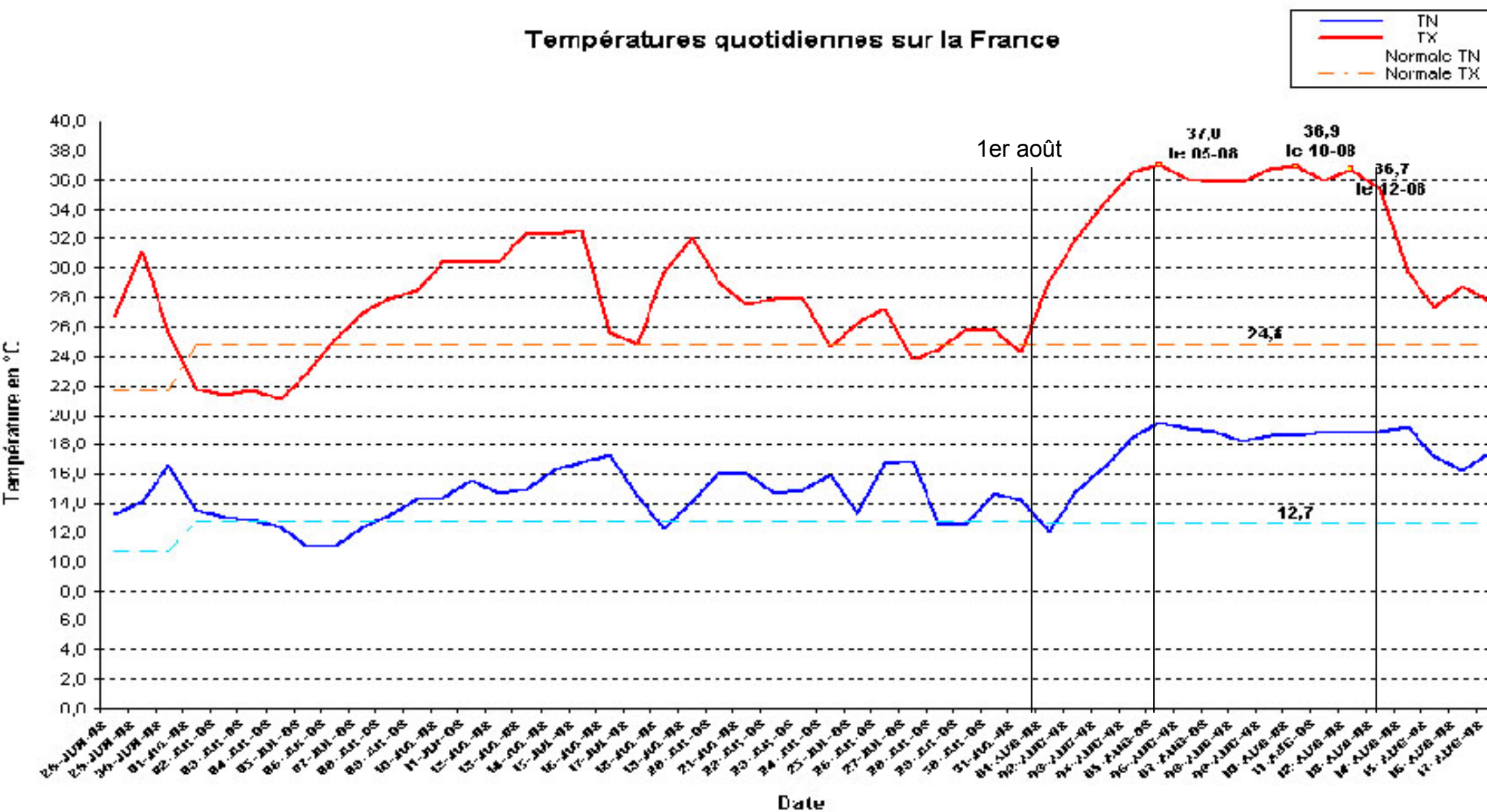
Cette canicule a été exceptionnelle par sa durée (près de deux semaines), et son intensité.

Les records absolus de température maximale ont été battus au cours des douze premiers jours d'août 2003 sur plus de 70 stations météorologiques (d'un ensemble de 180 stations, notre échantillon représentatif des villes françaises).

Depuis le 4 août, des températures supérieures à 35°C ont été observées dans les 2/3 de ces stations météorologiques, réparties sur l'ensemble des régions françaises. Des températures supérieures à 40°C y ont été observées dans 15% des stations, y compris en Bretagne ce qui n'était encore jamais arrivé depuis le début des mesures de température.

(Meteo France)

Températures quotidiennes sur la France



Depuis le 4 août, la France enregistre chaque jour au moins une température supérieure à 40 °C, y compris en Bretagne ce qui n'était encore jamais arrivé depuis le début des mesures de température.

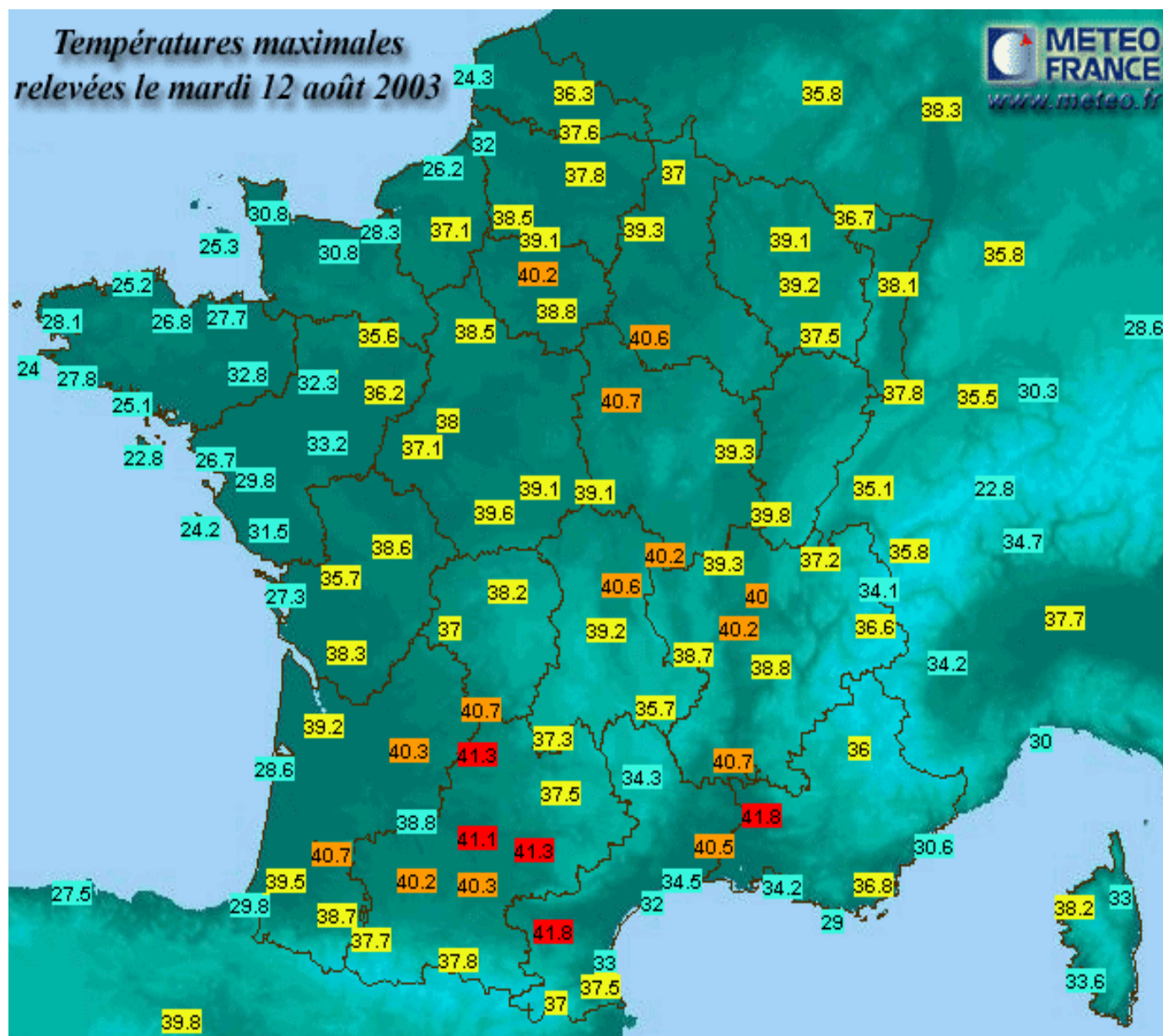
Mardi a encore délivré son lot de records avec 41.9 °C à Carpentras, 41.7°C à Carcassonne.

Des températures supérieures à 35°C ont été observées dans les 2/3 de nos stations météorologiques, sur l'ensemble des régions françaises. Des températures supérieures à 40°C ont été observées dans 15% des villes. (sur 180 villes, échantillon représentant la France)

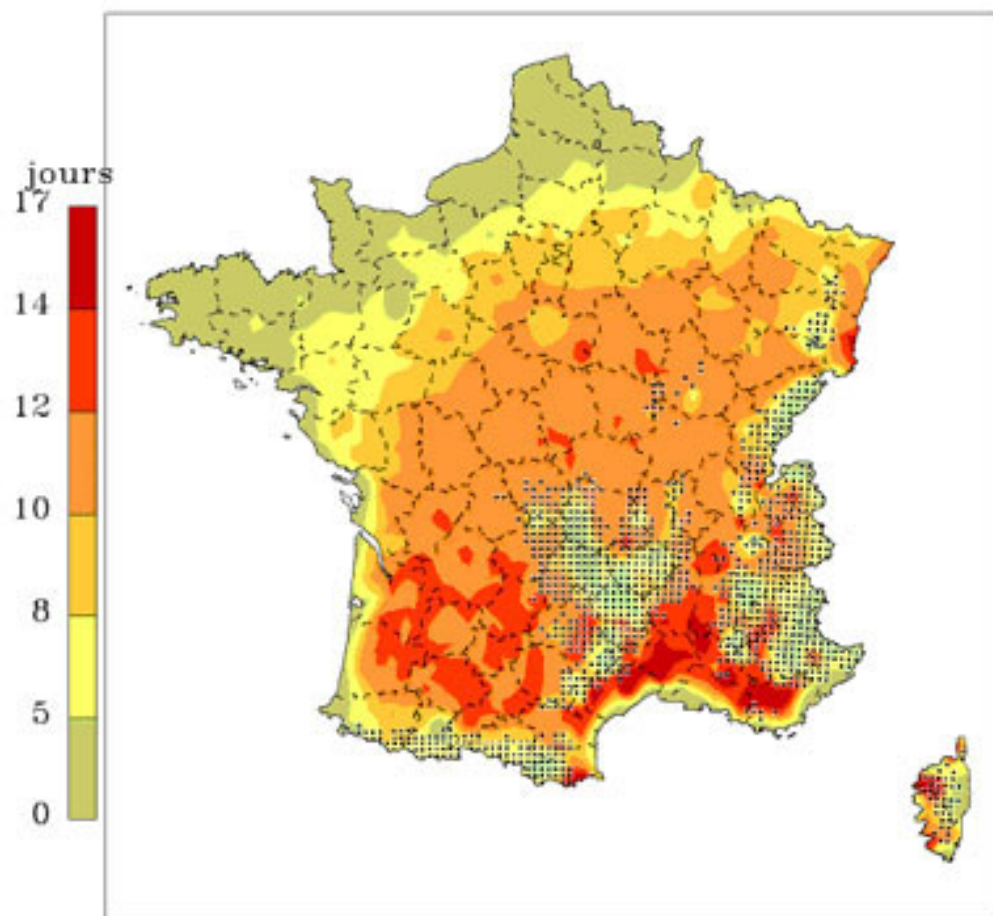
Enfin, les records absolus de température ont été battus au cours de ces premiers jours d'août 2003 sur plus de 70 stations météorologiques d'un ensemble de 180 stations représentant notre pays.

La persistance de cette situation, qui conjugue températures minimales et maximales élevées, est exceptionnelle et constitue un risque sanitaire pour les personnes sensibles (personnes âgées, personnes malades et nourrissons).

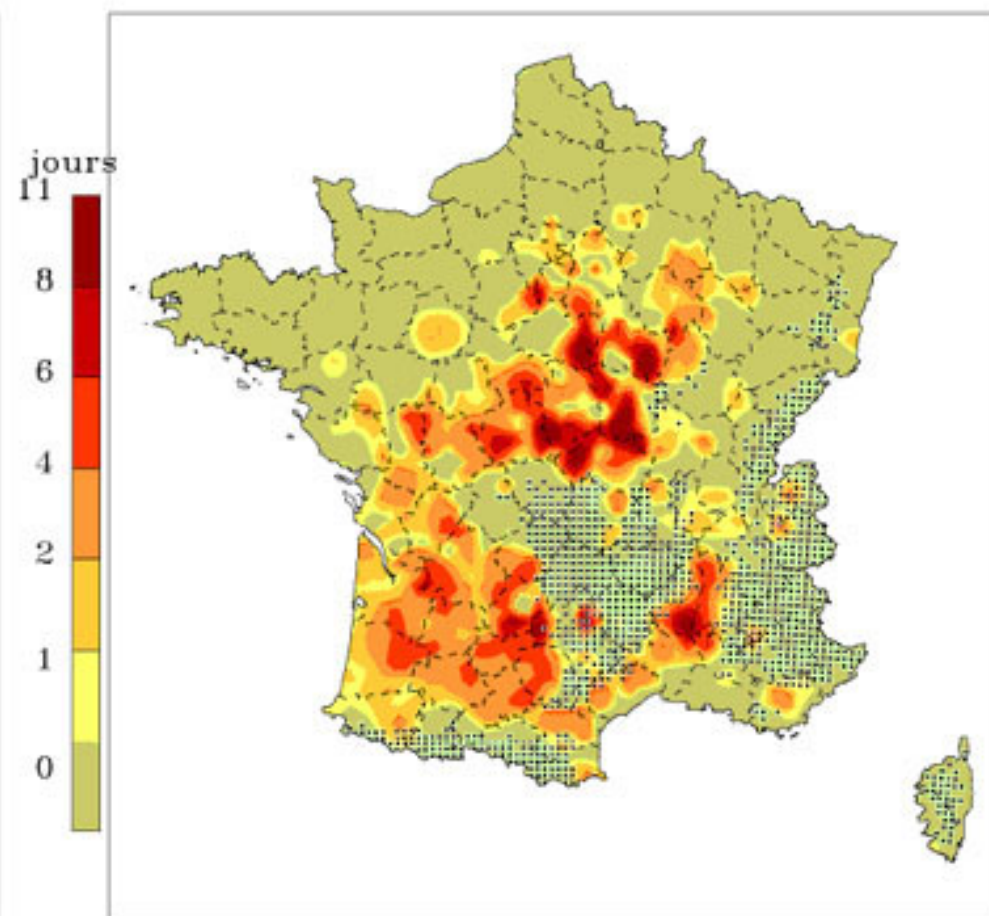
Copyright Météo-France - Tous droits de reproduction réservés.



Nombre de jours avec température maximale $\geq 35^{\circ}\text{C}$
Période du 01/08/2003 au 18/08/2003



Nombre de jours avec température maximale $\geq 40^{\circ}\text{C}$
Période du 01/08/2003 au 18/08/2003



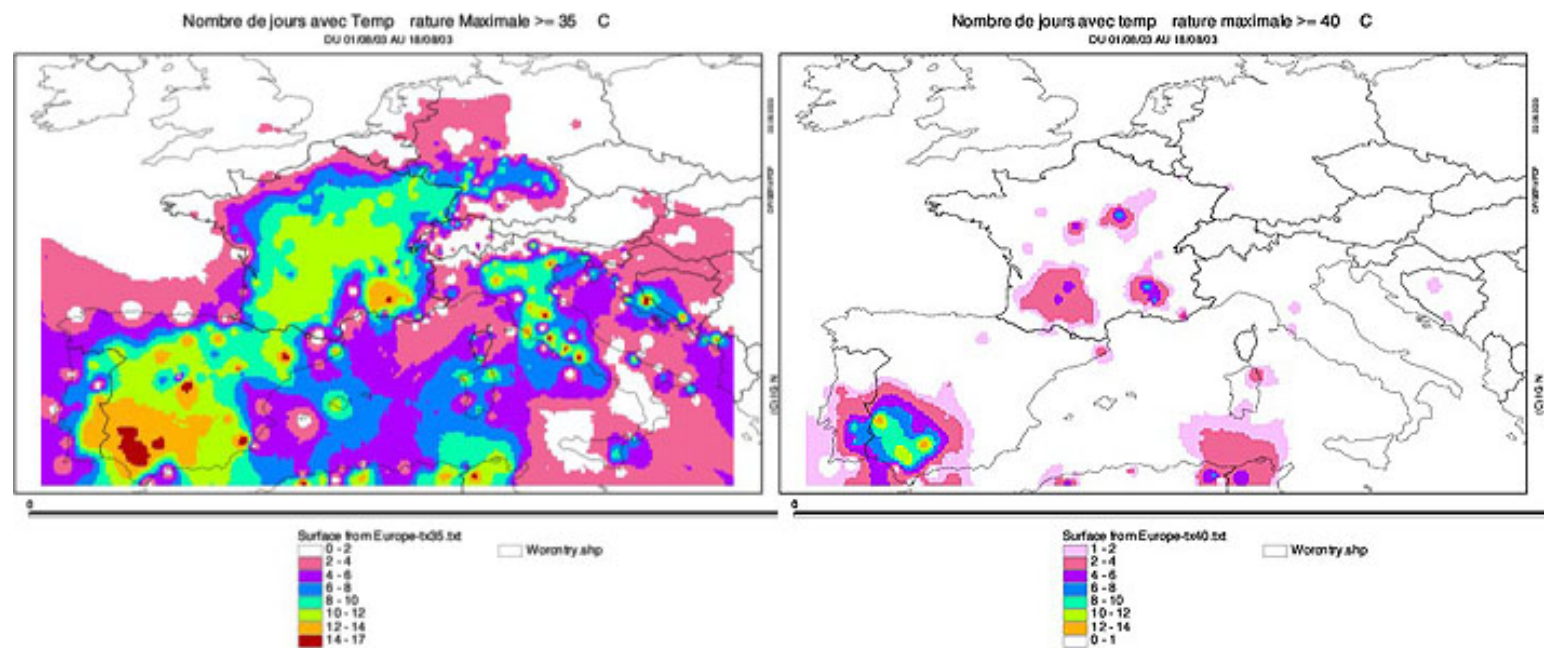
Stations d'altitude < 500 m

Un "blocage" exceptionnel sur l'Europe de l'ouest

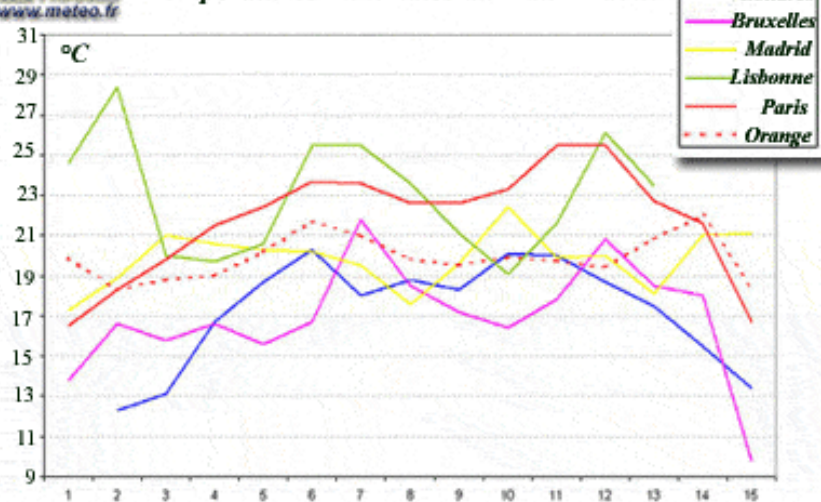
Il s'agit d'une situation météorologique classique pour l'été avec des hautes pressions sur l'Europe de l'Ouest (l'Anticyclone des Açores se prolonge par une dorsale de hautes pressions).

Le caractère singulier de cette situation est qu'elle dure longtemps et qu'elle amène de l'air très chaud et très sec en provenance du sud de la Méditerranée, près de la surface comme en altitude. Les hautes pressions forment un obstacle au passage des perturbations orageuses.

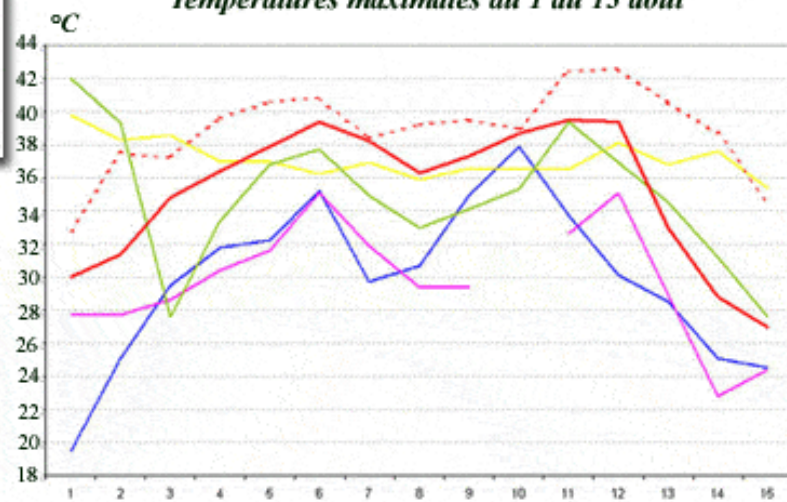
On parle de phénomène de blocage, connu par les météorologistes mais qui dure beaucoup plus longtemps qu'habituellement.



Températures minimales du 1 au 15 août

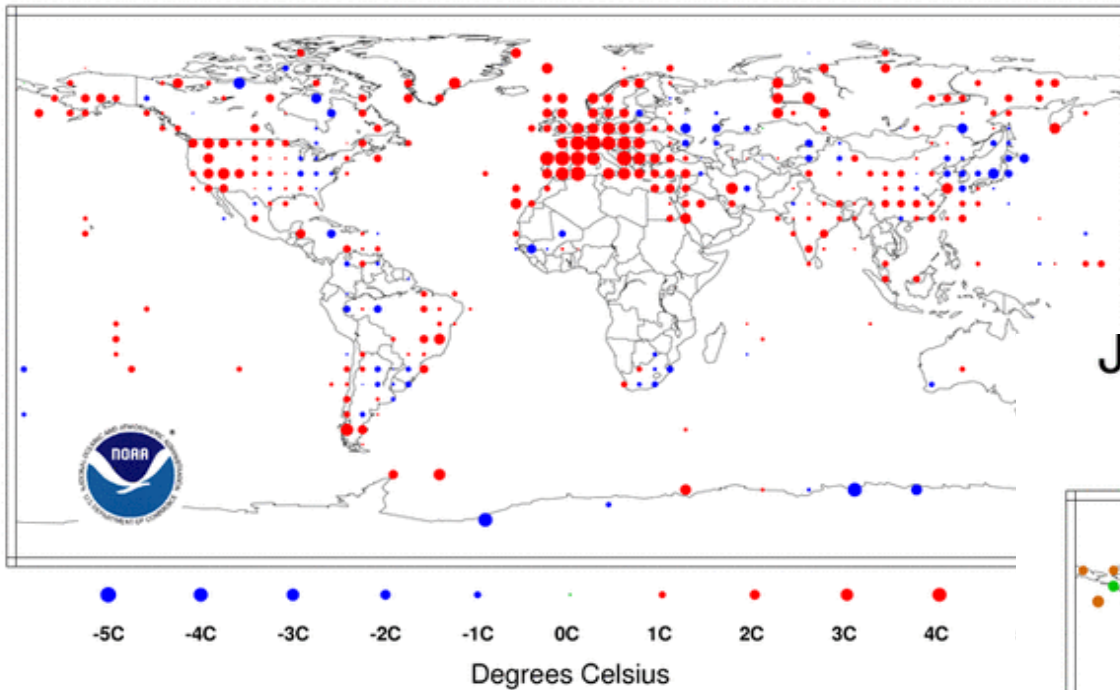


Températures maximales du 1 au 15 août



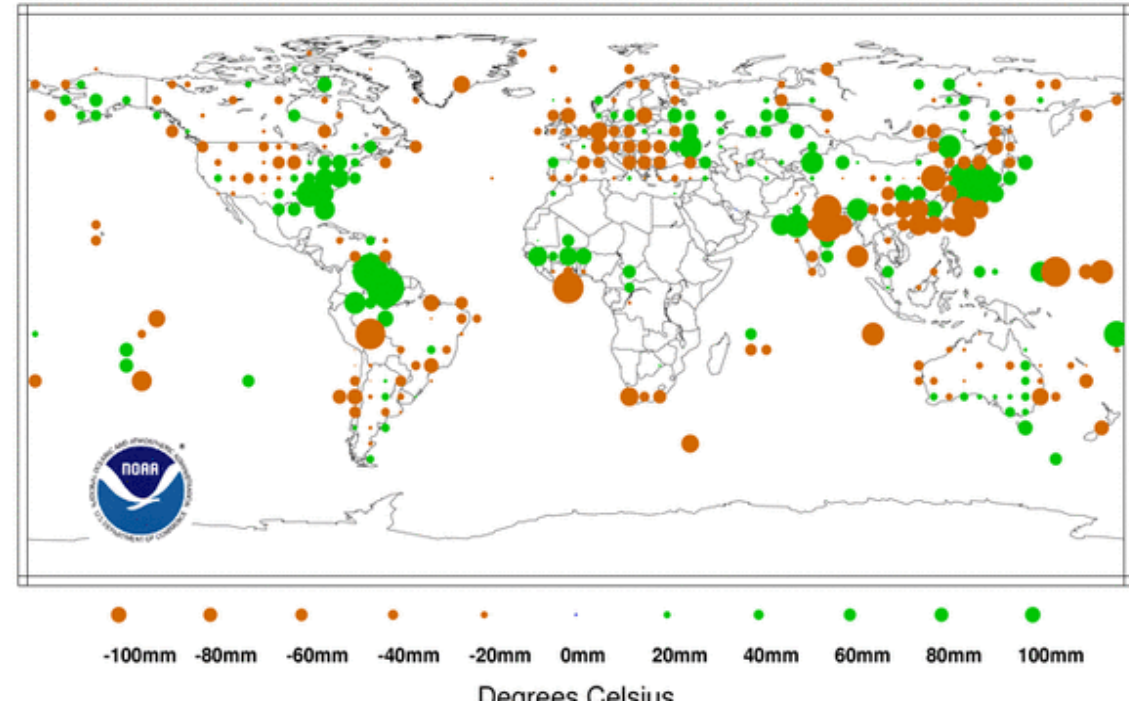
June-August 2003 Temperature Anomalies

National Climatic Data Center/NESDIS/NOAA

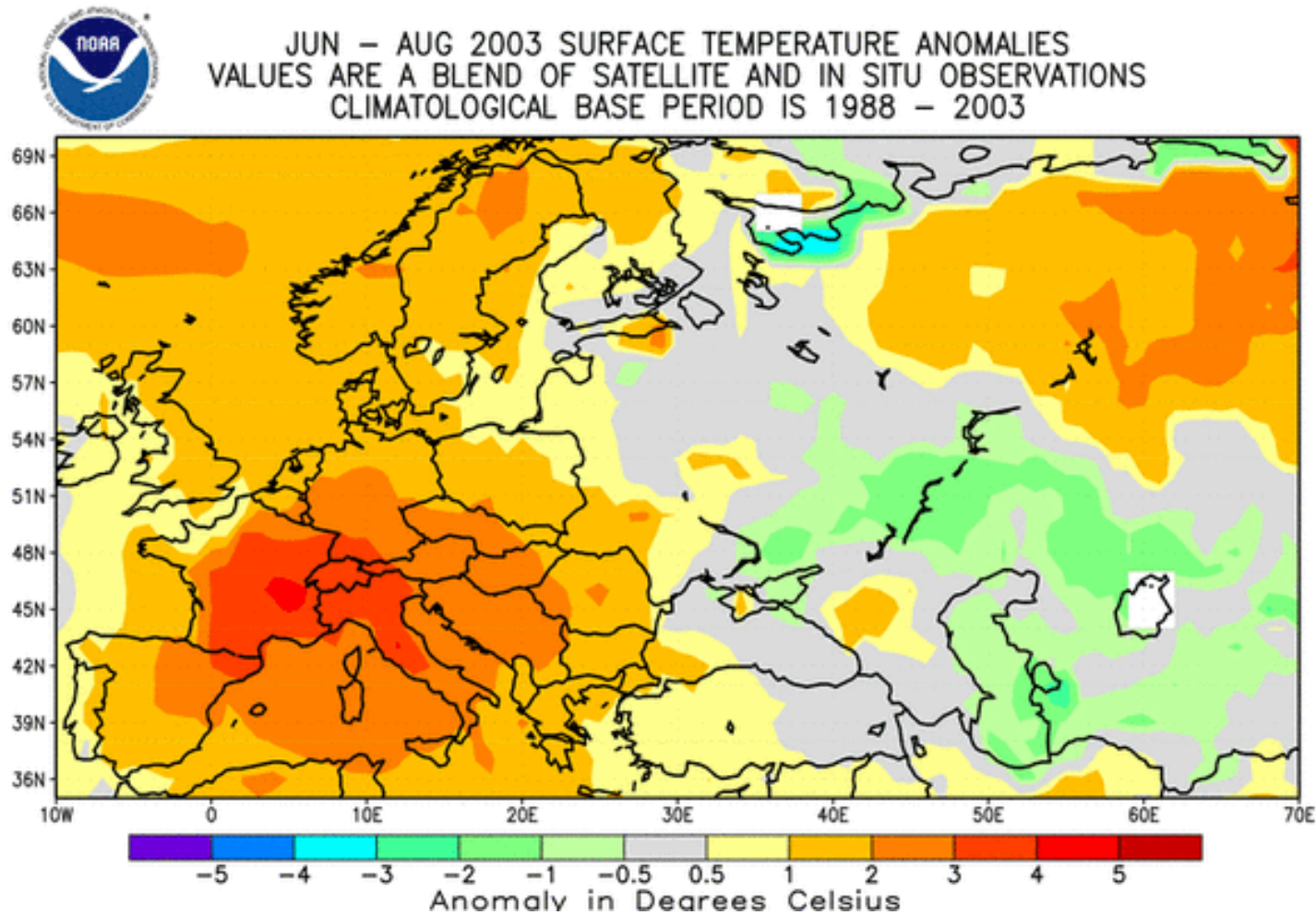


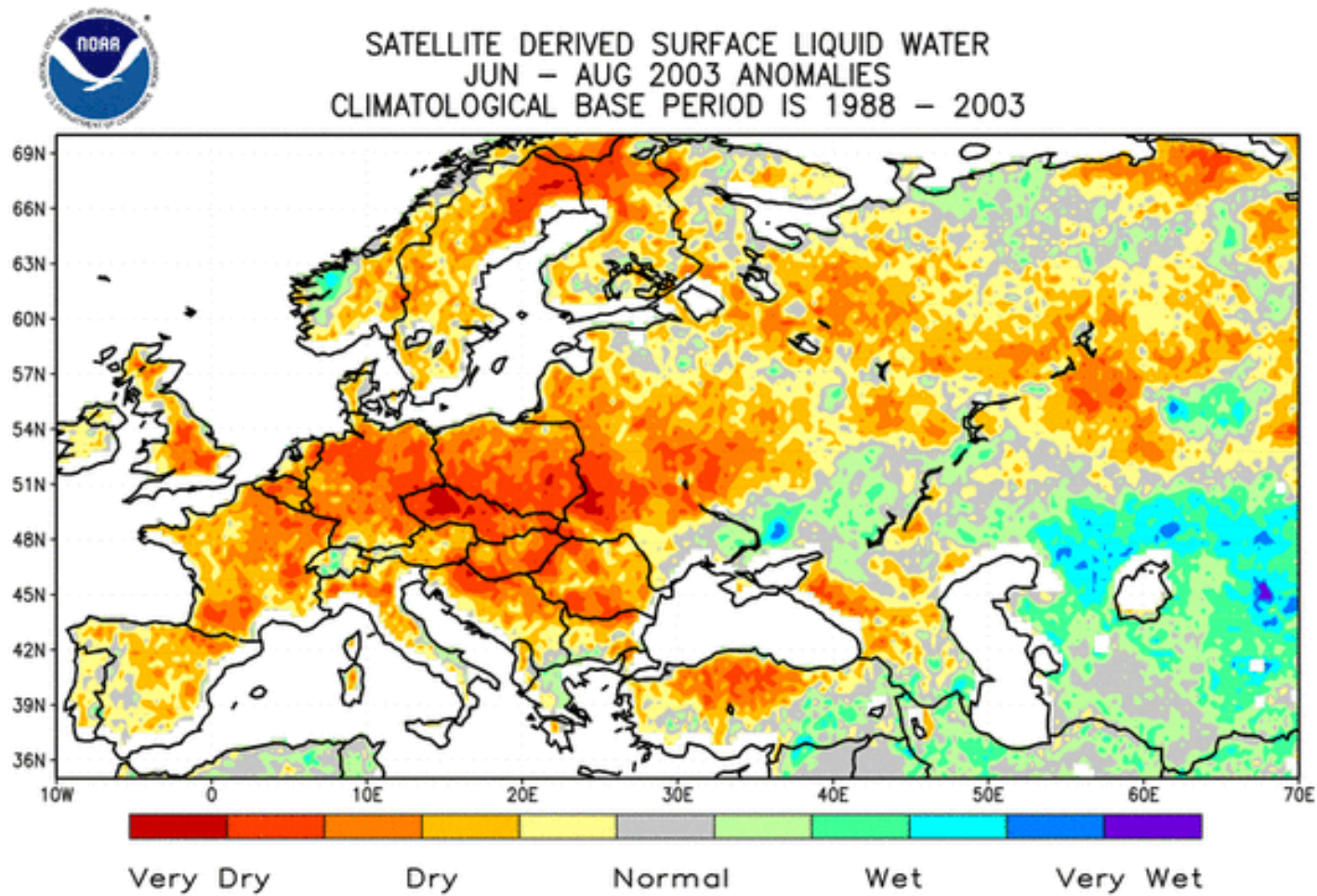
June-August 2003 Precipitation Anomalies

National Climatic Data Center/NESDIS/NOAA



Température du sol





- Le pays est sec.

Cet état de sécheresse explique particulièrement les valeurs records des températures. On ne peut observer de phénomènes limitant habituellement la chaleur, comme l'évaporation des plantes. Le sol, sec sur le premier mètre de profondeur dans de nombreuses régions, n'a plus rien à évaporer, les plantes sont en stress hydrique.

L'énergie se concentre donc totalement sur l'échauffement des molécules d'air, comme dans les déserts chauds. La nuit, la terre restitue une partie de la chaleur. Une sorte de couvercle d'air chaud en altitude, allant de l'ouest du Sahara à l'Europe occidentale, empêche alors l'air chaud de basse couche de s'évacuer.

Les températures ne descendent pas au-dessous de 25° C dans les villes, ce qui est exceptionnel.

- La France est sous conditions anticycloniques sèches. La dépression d'Islande est montée en latitude jusqu'au nord de l'Islande. Les hautes pressions subtropicales sont installées sur l'Europe suivant un axe Sahara-Bénélux avec de l'air chaud et sec, empêchant toute alimentation en air marin et humide. Le pays ne connaît quasiment pas de brume ni de rosée matinale, et l'air en altitude est également anormalement chaud et sec (+24°C à 1500 m sur la moitié sud) Meteo-France

Canicule = conditions générales propices

+ sécheresse du sol

+ anomalies de la circulation générale

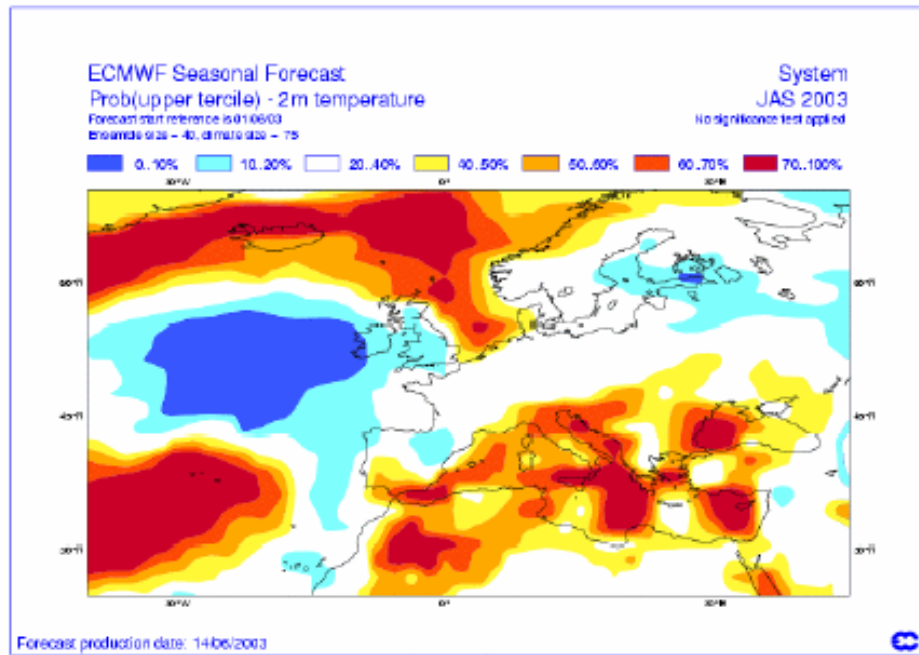
Le record absolu mesuré sous abri en France depuis les années 50 : 42.7°C au Luc (Provence, Var) en juillet 1982.

En remontant un peu plus loin dans le temps, Il a fait 44 °C à Toulouse en 1923 ! © Météo-France

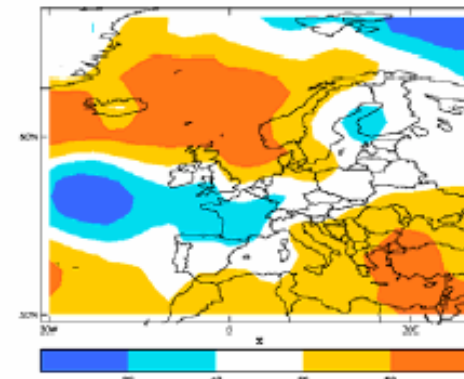
Saison prévue et date de diffusion (2003)	CEPMMT	UKMO	IRI
JJA, prévision d'avril	Prob($T' > 0$) de l'ordre de 60% sur l'Europe de l'ouest et centrale (France, Allemagne, Italie du nord). Signature très nette de l'anomalie de SST de l'Atlantique nord.	Aucun signal sur l'Europe de l'ouest.	Léger signal sur l'ensemble de l'Europe (Prob($T' \uparrow 33\%$) de 40-45%), sauf France et Italie.
JJA, prévision de mai (cf Fig. 1)	Prob($T' > 0$) de 70-80%, Prob($T' \uparrow 15\%$) de 25-35% sur la France, l'Italie, l'Espagne	Aucun signal sur la France, l'Angleterre et l'Allemagne. Léger signal sur l'Ecosse. Prob($T' > 0$) de 60-80% sur l'Italie et la Grèce	Signal significatif sur la façade ouest de l'Europe, du Cap Nord au Portugal. Prob($T' \uparrow 33\%$) de 45-50% sur les îles Britanniques. Prob($T' \uparrow 33\%$) légèrement significatif sur l'Europe méditerranéenne.
JAS⁶, prévision de mai	Prob($T' > 0$) de 60-70%, Prob($T' \uparrow 15\%$) de 35-50% sur la France et l'Italie.	Aucun signal sur la France. Prob($T' < 0$) de 60-70% sur l'Allemagne et les pays baltes. Les signaux sur l'Ecosse et l'Europe du sud restent identiques.	Même schéma que ci-dessus.
JAS, prévision de juin (cf. Fig. 2)	Plus aucun signal sur la France et l'Europe centrale. Prob($T' \uparrow 33\%$) de 70% sur l'Europe du sud (sud de l'Espagne, Italie, Grèce) liée à des températures élevées en Méditerranée.	Prob($T' < 0$) de 60-70% sur la France. Le signal s'intensifie sur l'Ecosse et l'est de l'Angleterre.	Signal significatif sur l'ensemble de l'Europe. Les zones où Prob($T' \uparrow 33\%$) est la plus forte sont le nord de la France, le Bénélux et l'est de l'Angleterre, l'Espagne, et les Balkans.

CEPMMT et MetOffice :
prévisions AOGCM (runs d'ensemble)

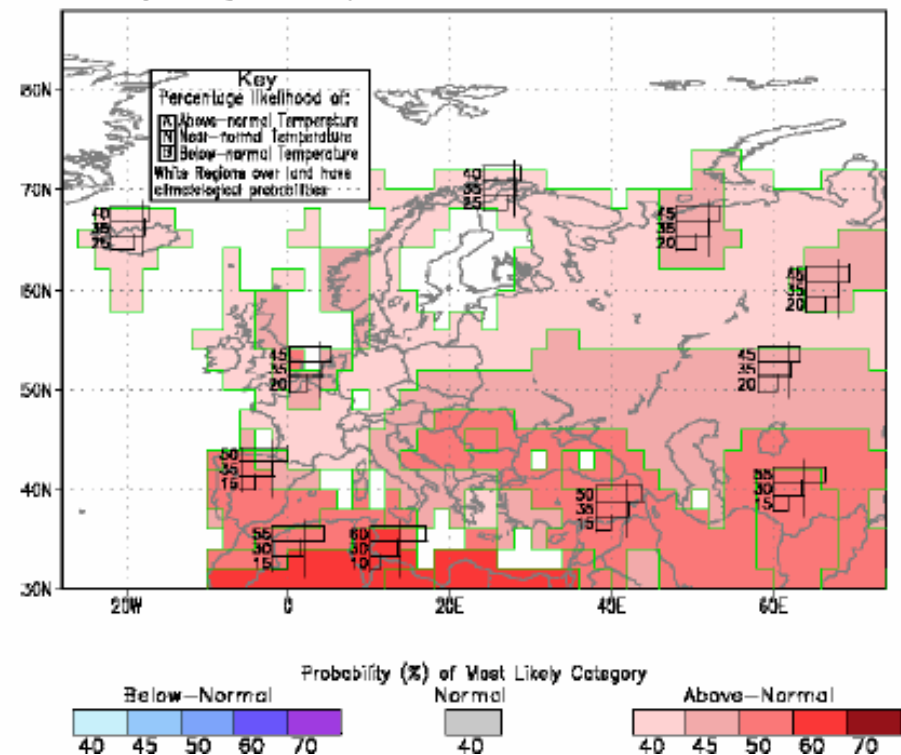
IRI : prévisions par méthodes statistico-dynamiques (AOGCM+statistiques)

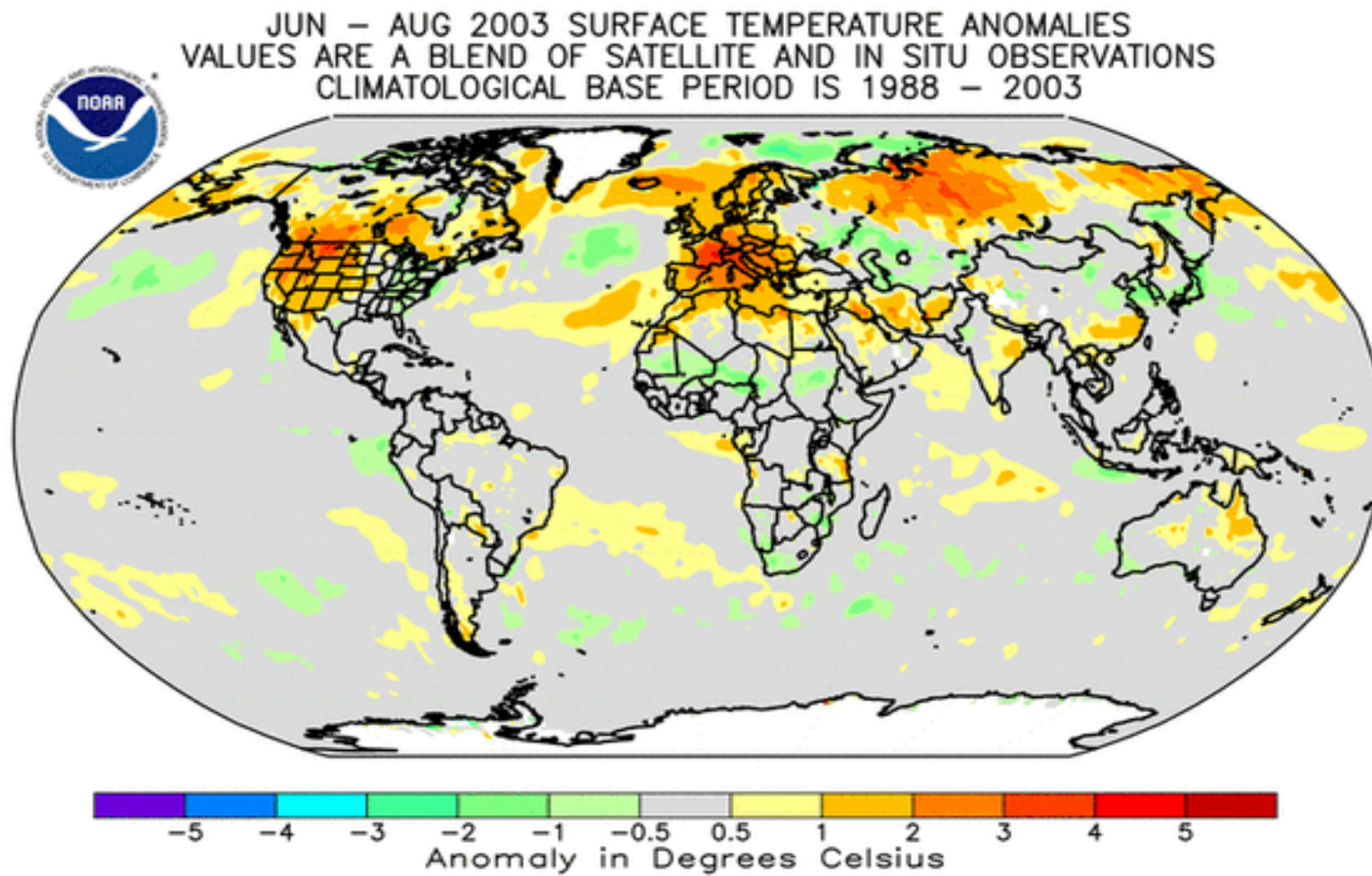


Prévision UKMO (Juin)



IRI Multi-Model Probability Forecast for Temperature July–August–September 2003 made June 2003





L'exemple de la canicule 2003 : sa place dans le CC global

Quelques étés français caniculaires au cours de ces 20 dernières années

Juillet 1983: Une canicule mémorable dans le Sud-Est : 500 décès cet été-là dans la seule régions de Marseille, imputables directement ou indirectement à la chaleur. La dernière semaine de juillet les thermomètres sous abri à Marseille affichaient des températures minimales de 28°C de bon matin avec de l'air humide et des températures maximales atteignant 35 à 41°C. De plus, le thermomètre n'est pas redescendu en dessous de 20°C pendant 15 jours.

10 juillet au 10 août 1990: Chaud, sec et ensoleillé, 39°C à Bordeaux, 35°C à Brest

Août 1992, Chaud dans l'Est et le Sud-Est. Premier épisode de pollution niveau 3 (à l'ozone) sur la région parisienne

Juillet 1994 Très chaud sur tout le pays suivi d'un mois d'août record dans le Sud-Est

Août 1995 Canicule, jusqu'à 36 ° C à Paris

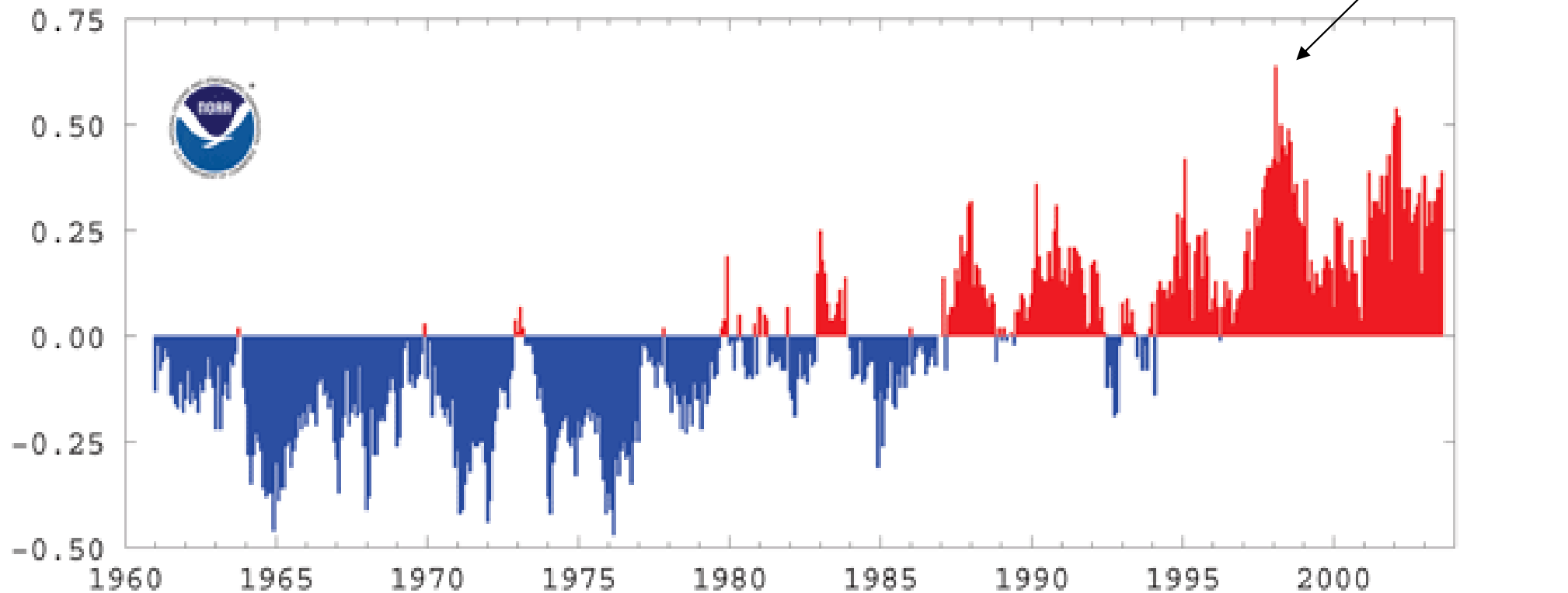
Août 1997 Très chaud, moyenne sur l'ensemble du mois des maximales à Paris : 29°C, incluant 15 jours avec des maximales supérieures à 30°C et 21 jours avec des températures maximales supérieures à 30 °C à Lyon

Août 1998 Maximales supérieures à 35°C pendant quatre jours consécutifs sur une grande partie du territoire (2/3 du pays, du Sud-Ouest au Nord-Est et en Région Parisienne : 38°C à Orly, 39°C à Metz). Cette canicule survenait après un mois de juillet record par sa faible insolation, et qui fut pourtant une année de record de chaleur pour l'ensemble du globe.

Juin 2002 Du 12 au 27 juin, vague de chaleur sur tout le pays

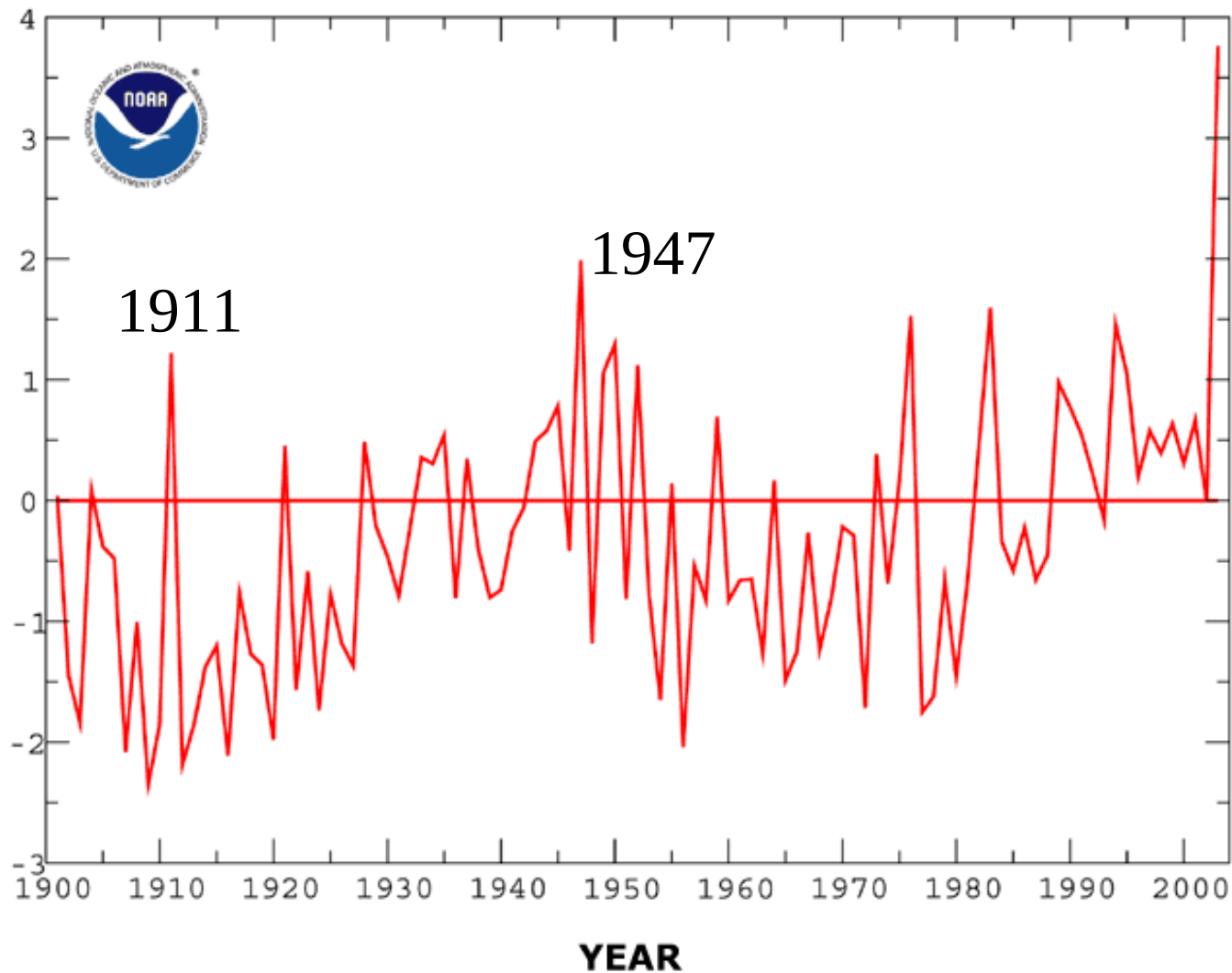
Et les étés caniculaires de référence : **1911 et 1947** (40.4°C à Paris Montsouris).

Monthly Global Temperature Anomalies (Land and Ocean)
Base Period is 1971-2000



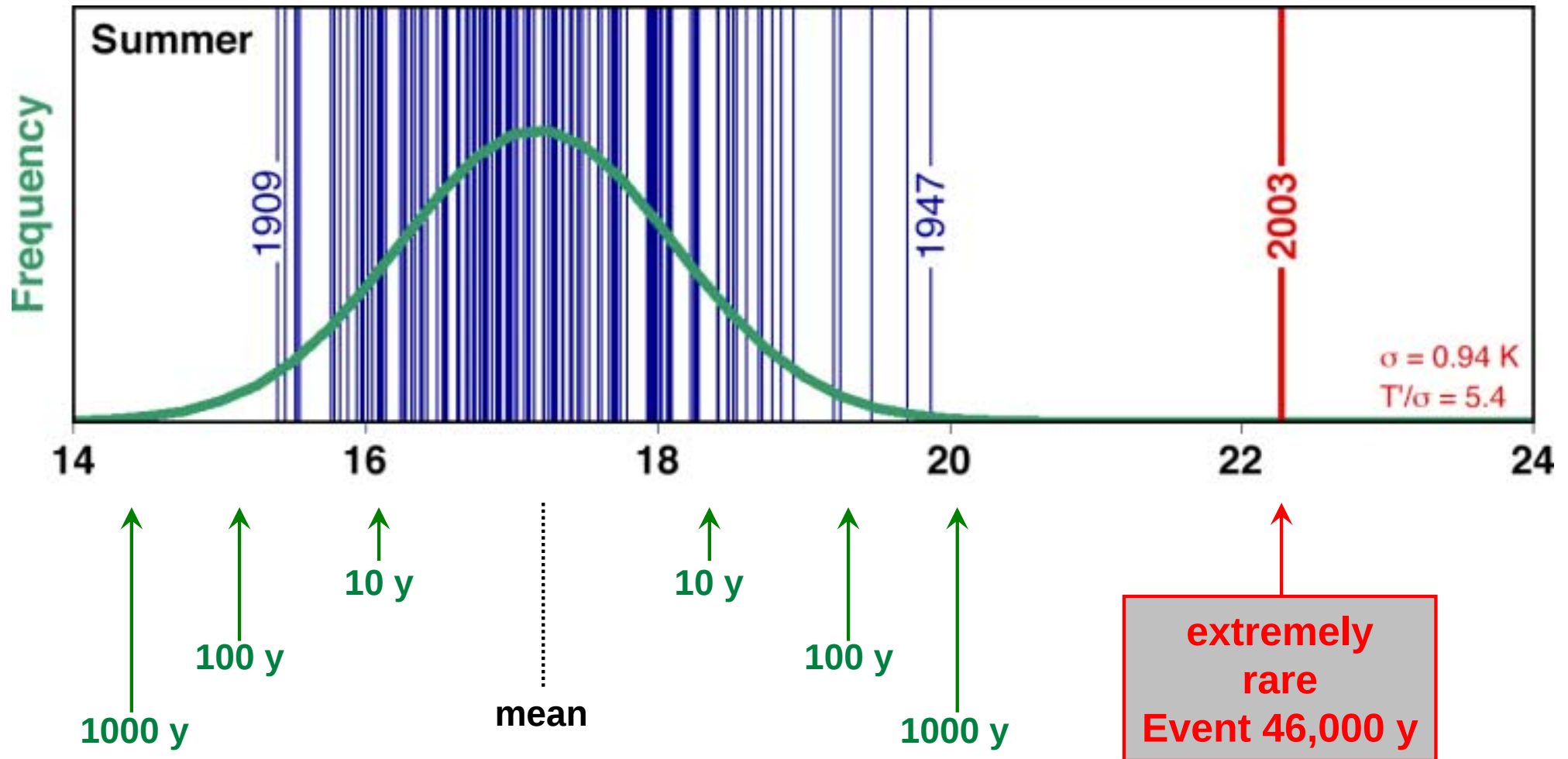
L'été 2003 n'apparaît pas particulièrement chaude à l'échelle du globe par rapport aux années très récentes

Summer (June-August) Average Temperature (FRANCE 1901-2003)



Estimation of Return Periods

Swiss Temperature Series 1864-2003 (mean of 4 stations)



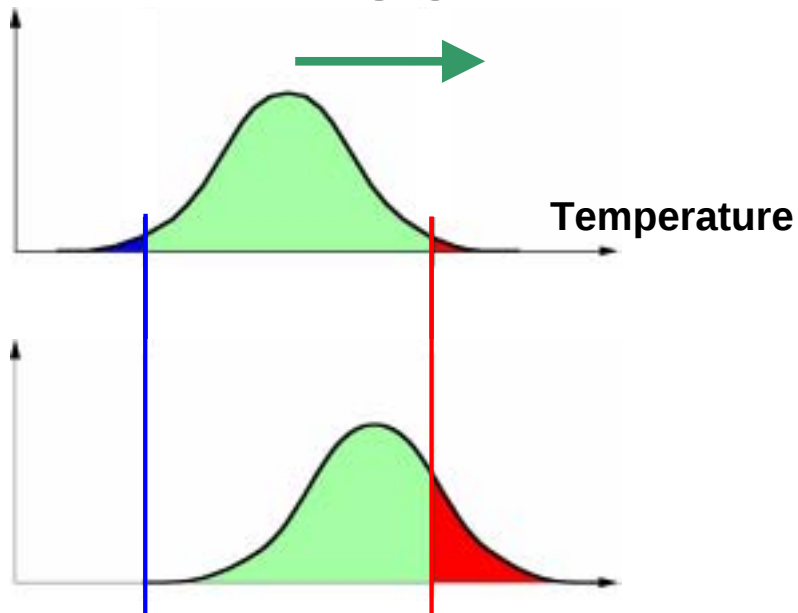
(Schär et al. 2004, *Nature*, **427**, 332-336)
90

Changes in Mean

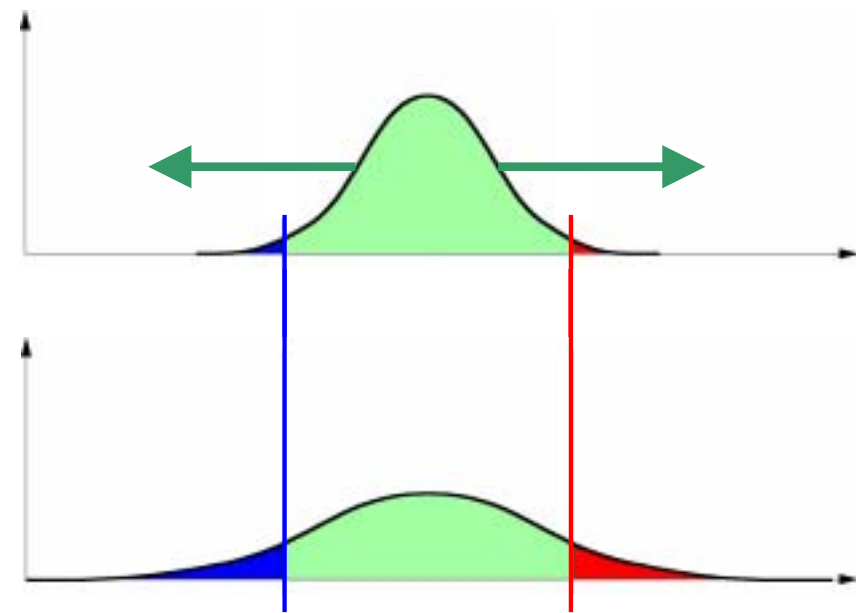
versus

Changes in Variability

Frequency

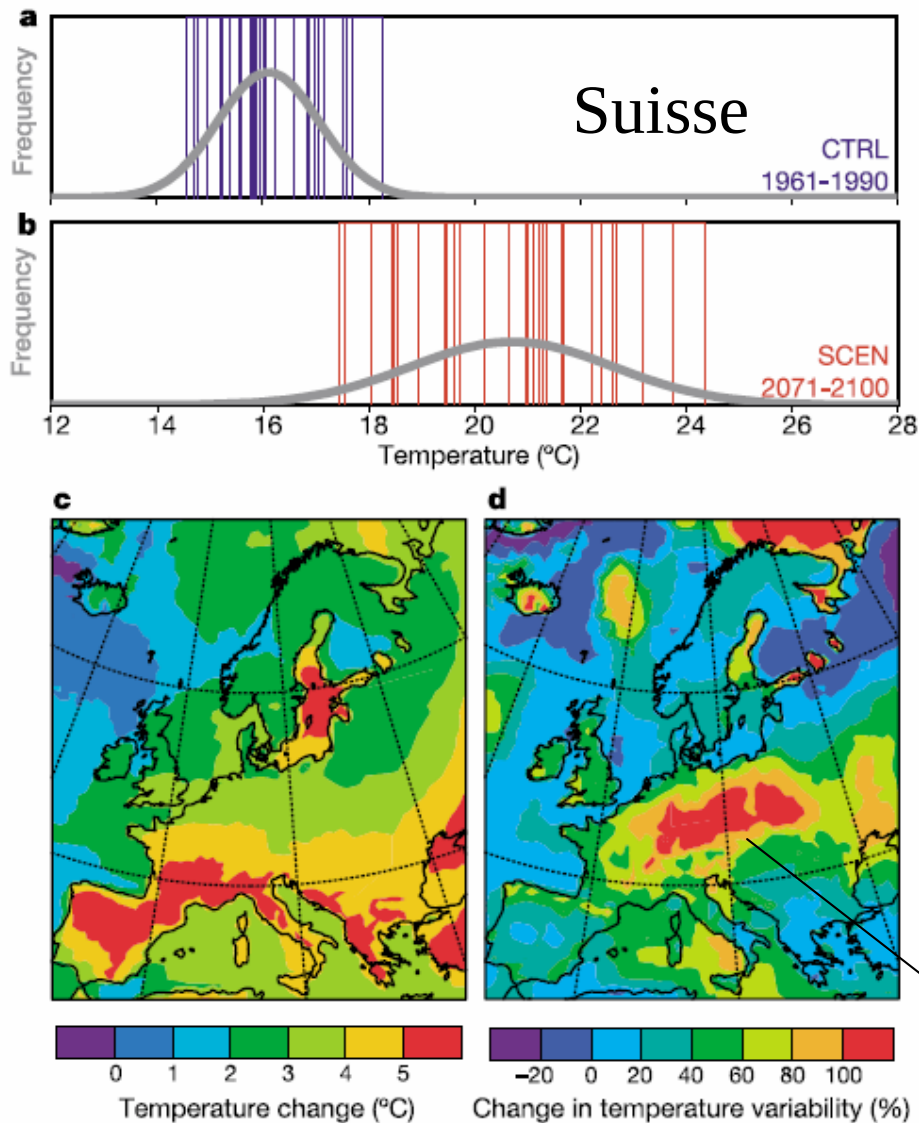


increase in the frequency of
extreme **warm** conditions

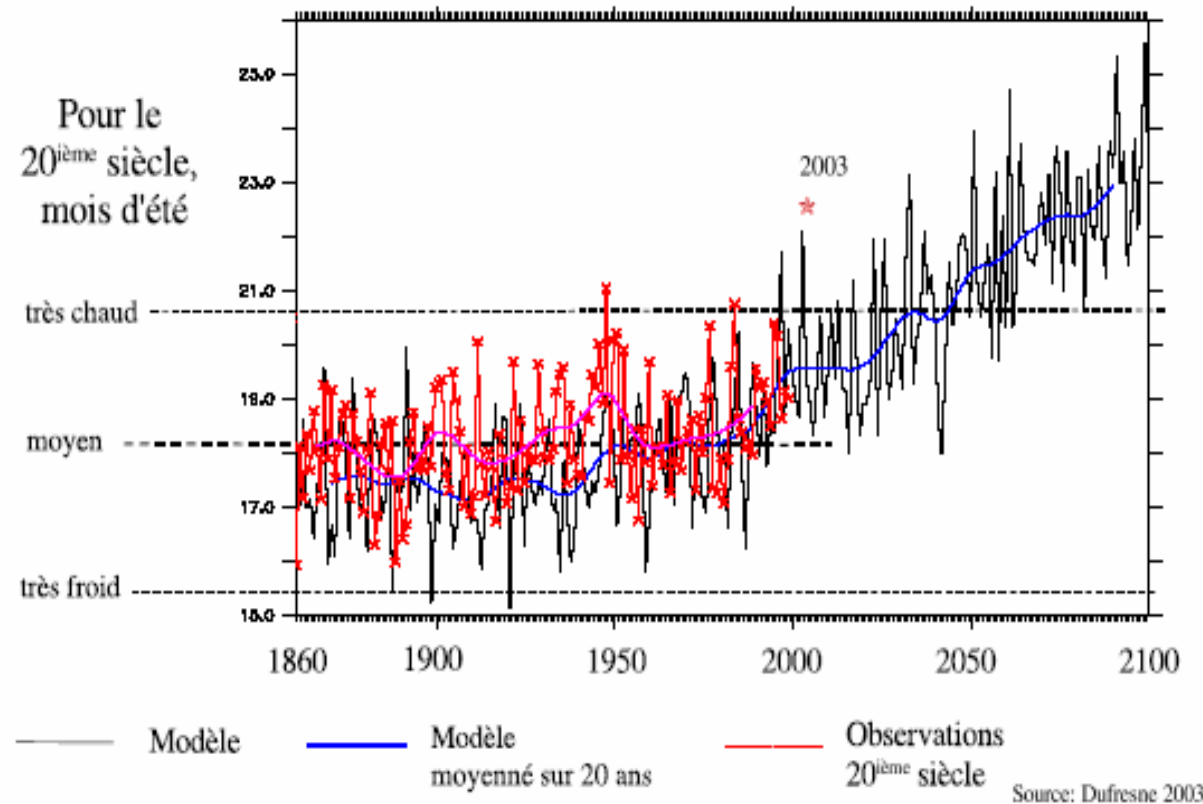


increase in the frequency of
extreme **warm/cold** conditions

For extremes far away from mean,
“variability is more important than mean”



Evolution de la température moyenne en été en France de 1860 à 2100 (modèle de l'IPSL, scénario SRES A2, sans aérosols)



Augmentation de la moyenne et de la variance
Donc de la variabilité d'une année sur l'autre
(inondation, canicule, etc...)

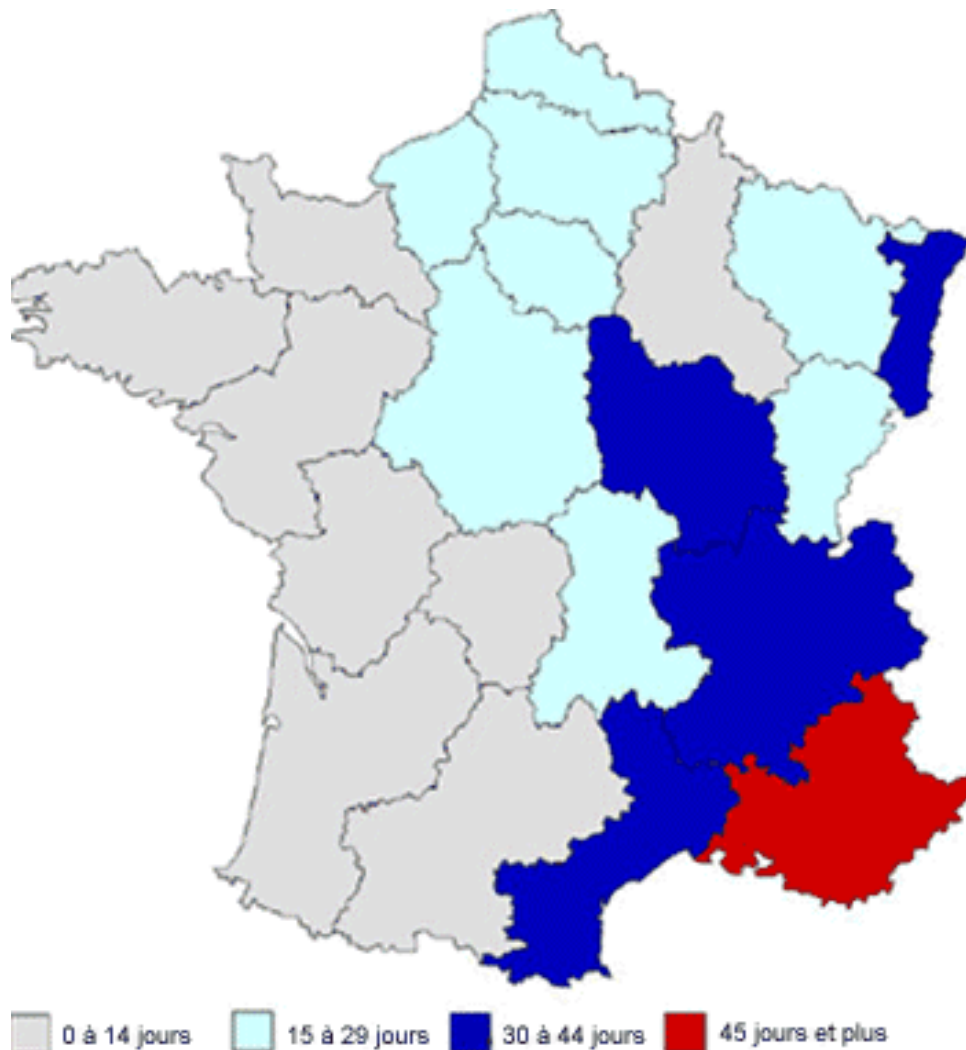
L'exemple de la canicule 2003 : ses impacts

Impacts sur la qualité de l'air

La situation aérologique à l'origine de cette canicule a également contribué à créer et à entretenir une forte pollution de l'atmosphère :

- L'importance de la radiation solaire propice à la formation dans les basses couches de grandes quantités d'ozone
- La persistance d'un puissant anticyclone a amené la stagnation des polluants, l'absence de vent s'opposant à toute dispersion horizontale tandis
- La forte subsidence faisait obstacle à la moindre dispersion verticale.

Des records de teneurs de l'air en polluants et de nombre de jours pollués ont été dépassés début août dans de nombreuses régions, et ils l'avaient souvent déjà été en juillet.

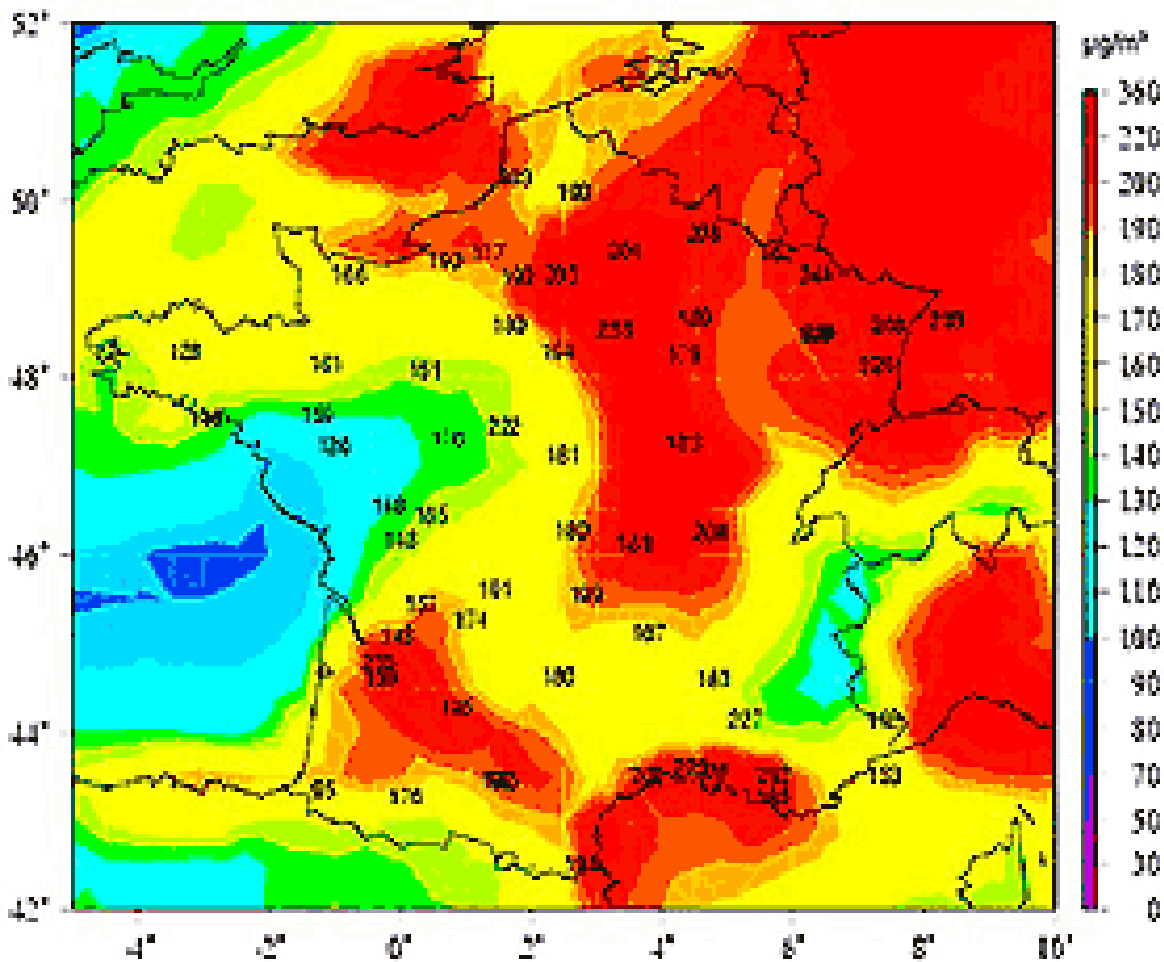


Nombre de jours de dépassement du seuil de 180 µg/m³ (seuil d'information) pour l'ozone entre juin et septembre 2003.

Source : données ADEME

Besancenot, Geoconfluence (2004)

Impacts sur la qualité de l'air



La teneur de l'air en ozone en France le 12 août 2003

Source : INERIS/ CNRS/Ademe PREV'AIR

En outre, un maximum horaire de $417 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (supérieur au seuil d'alerte à l'époque fixé à $360 \mu\text{g}/\text{m}^3$, et ramené depuis lors à 240) a été relevé dans les Bouches-du-Rhône.

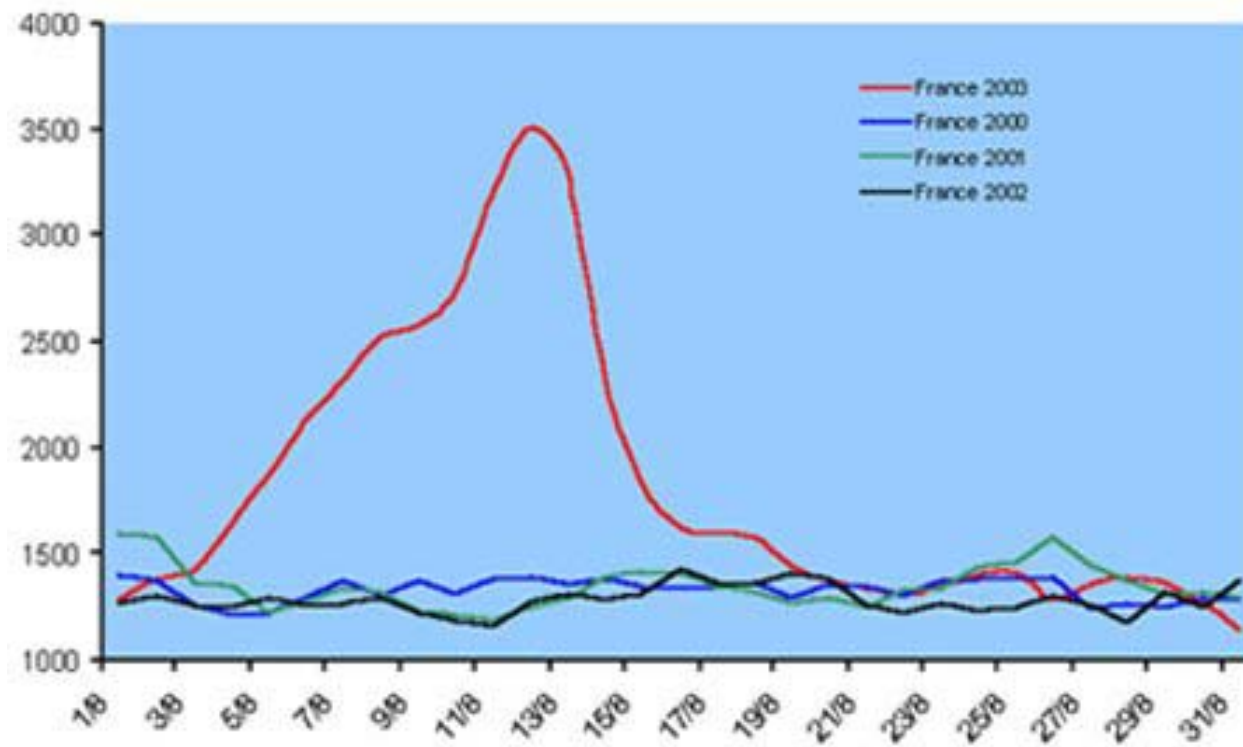
Là encore, les 11 et 12 août ont presque partout représenté la situation la plus critique. La durée et l'extension spatiale de la pollution notamment par l'ozone) ont finalement été plus exceptionnelles que son intensité.

Un pic de dioxyde d'azote (NO_2) a également été noté les 11 et 12 août en de nombreux endroits, tout spécialement à Paris.

Besancenot, Geoconfluence (2004)

Impacts sur la santé

Fortes températures + mauvaise qualité de l'air = élévation brutale de la mortalité



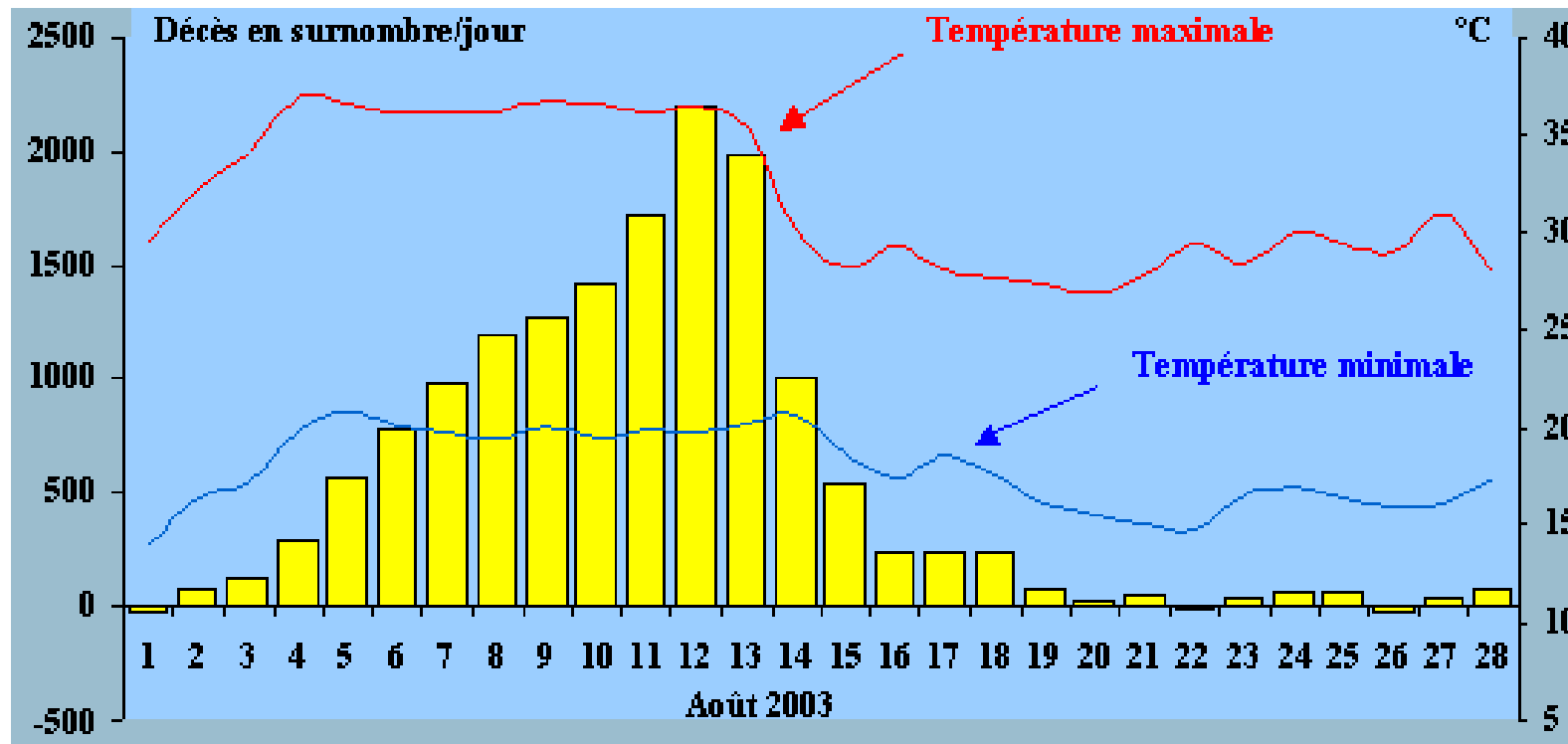
En août 2003 :
56 500 décès
dans la France
entière

Nombres journaliers de décès d'août 2003, comparés à ceux des trois mois d'août antérieurs (France entière)

Source : données INSEE

Impacts sur la santé

Fortes températures + mauvaise qualité de l'air = élévation brutale de la mortalité



Surmortalité d'août 2003 en France et températures extrêmes journalières

Source : *Institut de Veille Sanitaire*

Impacts sur la santé

Classes d'âge Surmortalité

< 45 ans	NS
45-54 ans	+23 %
55-74 ans	+29 %
75-94 ans	+70 %
> 95 ans	+122 %

À la fragilité de la personne âgée, souvent polypathologique, et à son incapacité progressive à assurer sa constance thermique interne, s'ajoute le fait que le vieillard n'éprouve de sensation de chaleur et ne ressent le besoin de se protéger que pour une élévation proche de 5°C de sa température cutanée, contre 0,5°C chez l'adulte. Le besoin de boire est, lui aussi, de moins en moins perçu avec l'âge, une déshydratation modérée n'entraînant guère de sensation de soif au-delà de 70 ou 75 ans.

Hommes	Femmes
+38 %	+73,5 %

Ce différentiel, habituel en Europe, tient en partie à la féminisation croissante de la population âgée, mais il subsiste après standardisation des taux. Il est vrai qu'à partir de la soixantaine, les femmes présentent une plus forte occurrence de troubles de la régulation thermique, notamment de troubles de la sudation. Elles sont également plus nombreuses à vivre seules avec de faibles revenus, ce qui constitue un important facteur de risque.

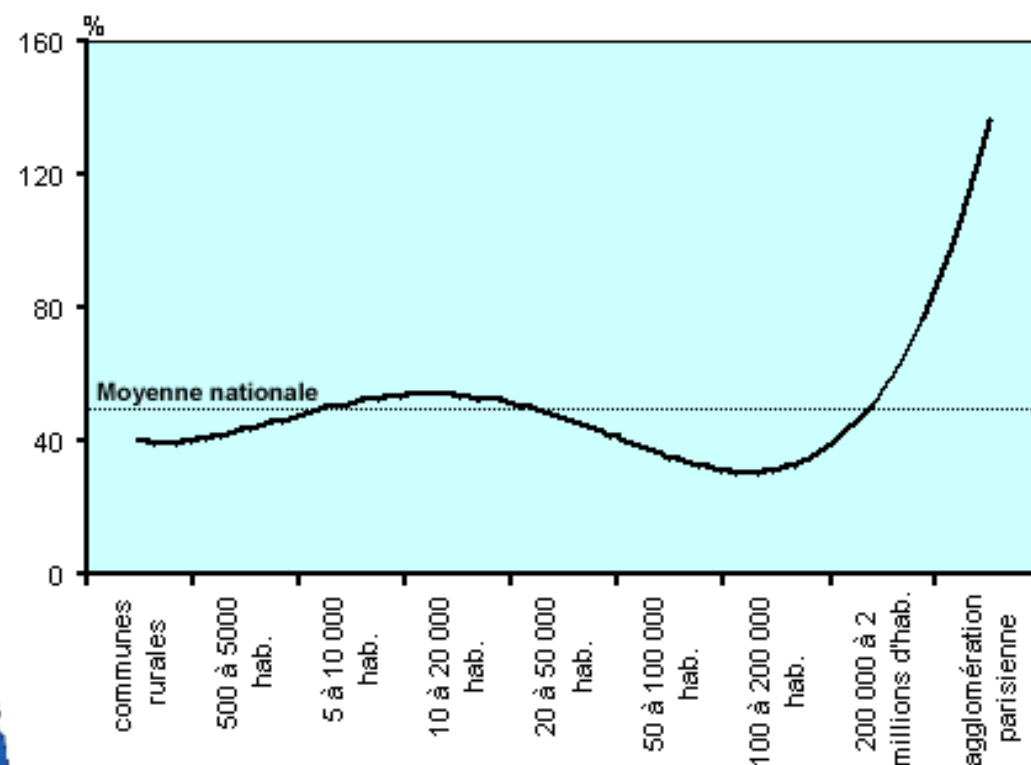
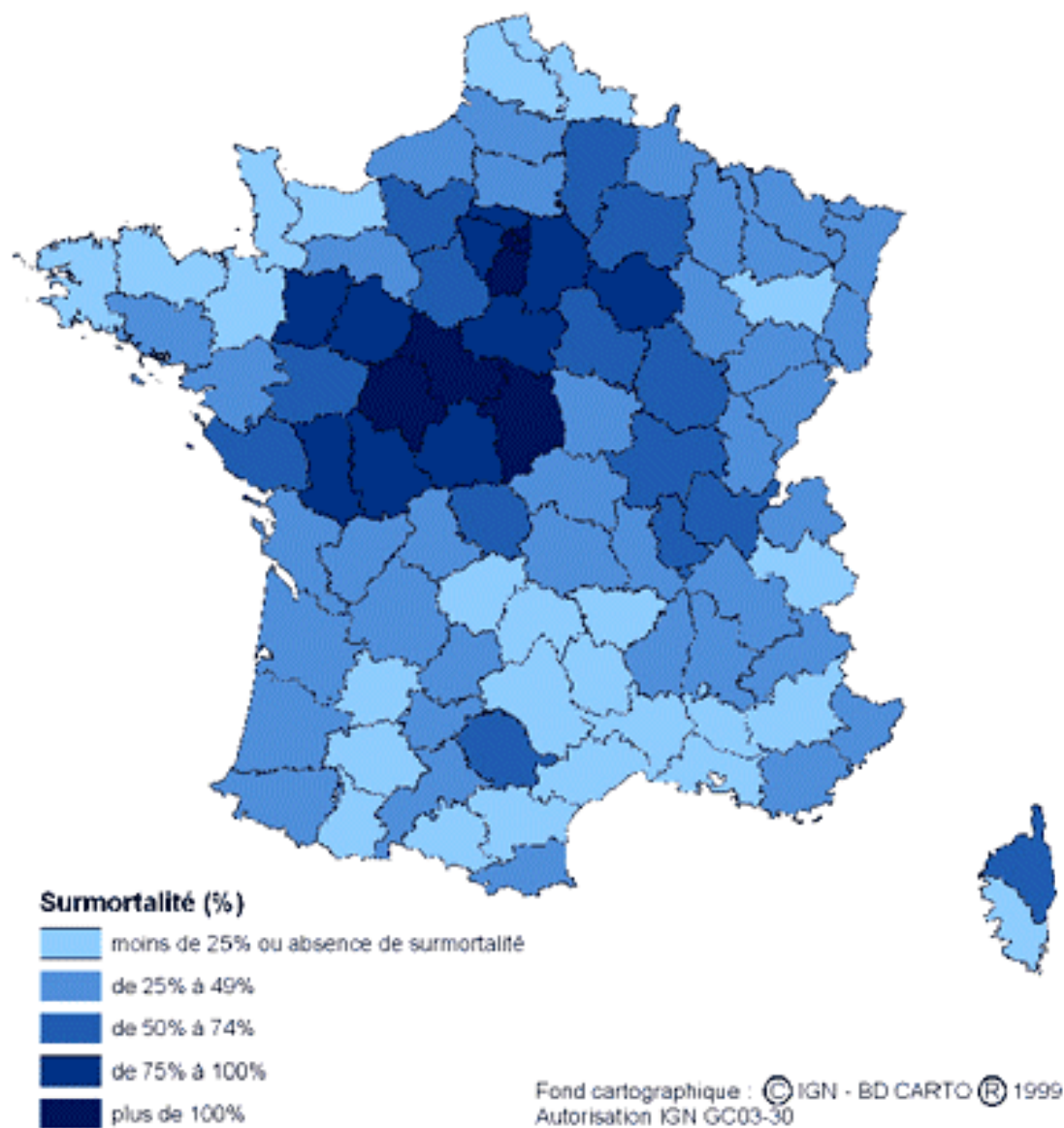
Besancenot, Geoconfluence (2004)

Allemagne	7 000
Espagne	4 200
Italie	4 000
GB	2 045
Pays-Bas	1 400
Portugal	1 300
Belgique	150

20 000
(est. Juin 2005)

INSE RM: "Surmortalité liée à la canicule de l'été 2003", AP September 25, 2003

Impacts sur la santé



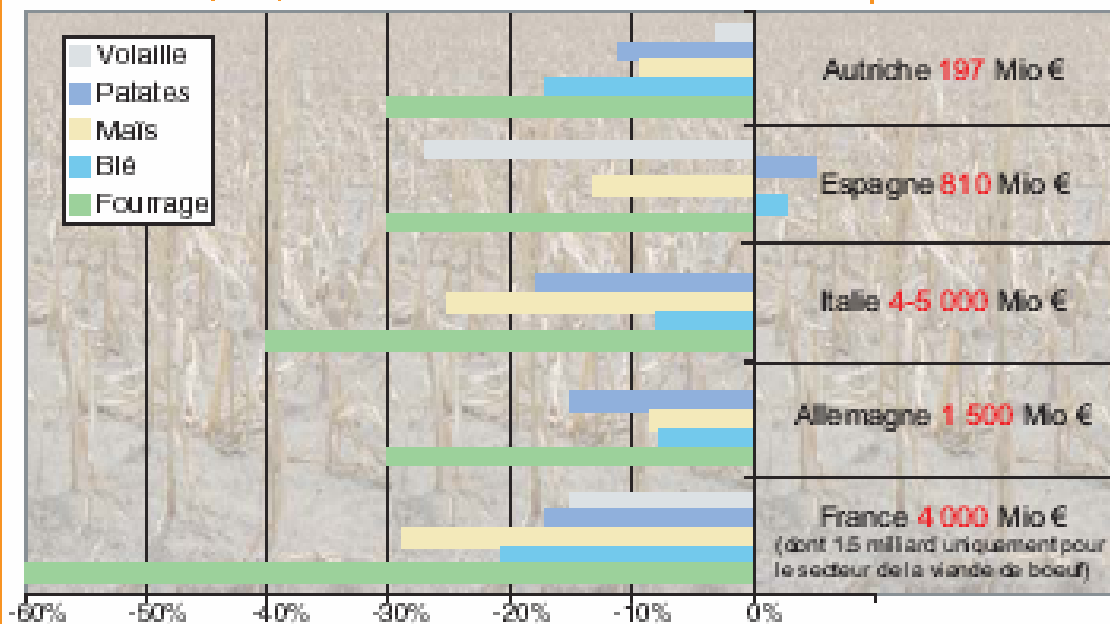
Besancenot, Geoconfluence (2004)

Impacts sur l'agriculture

Impacts de la canicule de l'année 2003 sur l'agriculture et la sylviculture pour 5 pays sélectionnés

Impact production 2003/2002

Impact financier



Source de données: COPA-COGECA 2003

La sécheresse a affecté la végétation en ralentissant l'activité photosynthétique, ce qui a induit une réduction de la production, particulièrement pour les cultures et le fourrage



Plus de 25000 feux ont été enregistrés au Portugal, en Espagne, en Italie, en France, en Autriche, en Finlande, au Danemark et en Irlande.

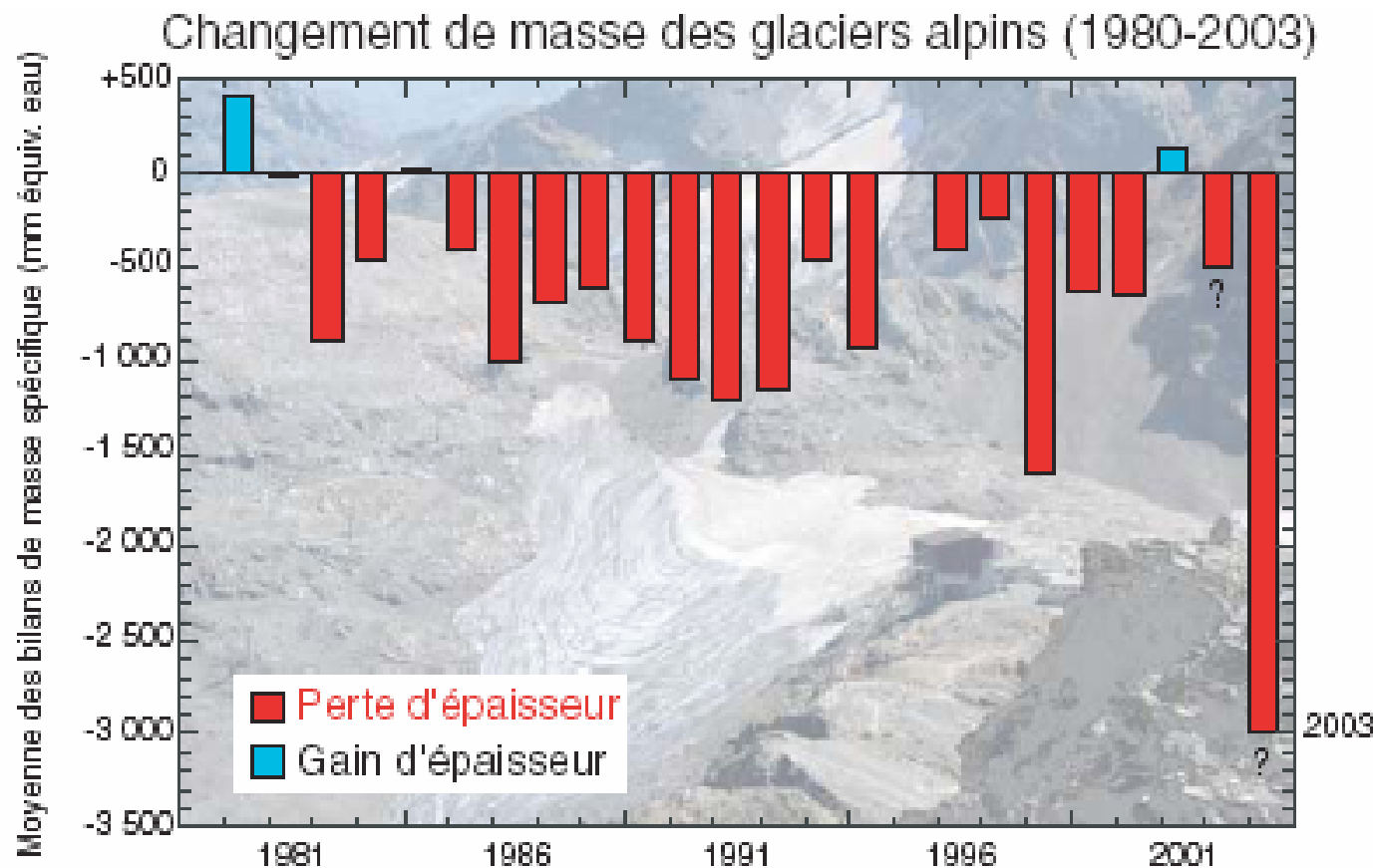
L'évaluation des surfaces de forêt brûlées est de 647 069 ha. Le Portugal est le 1er touché avec plus de 390 000 ha (près de 5.6% de sa surface forestière)

L'impact financier global de la sécheresse et des feux de forêt en Europe dépasse les 13 milliards d'euros

Source : COPA COGECA 2003

Les feux de forêt au Portugal

les limites en rouge montrent les fronts de feux actifs le 3 août détectés par le capteur de MODIS sur le satellite Aqua. Le nord du Portugal est caché par un grand panache de fumée. Image fournie par Jacques Descloitres, MODIS Rapid Response Team at NASA GSFC.



Bilan basé sur 10 glaciers alpins : St Sorlin, Sarennes, Silvretta, Gries, Sonnblickkees, Vernagtferner, Kesselwandferner, Hintereis-ferner, Careser

Source : World Glacier Monitoring Service, Zurich

Rien qu'en 2003, l'ensemble des pertes du volume des glaciers alpins correspond à 5-10% (probablement 10%) du volume restant de glace.

Les glaciers alpins ont déjà perdu plus de 25% de leur volume pendant les 25 dernières années et approximativement les 2/3 de leur volume original depuis 1850.

A de tels taux, moins de 50% du volume de glacier encore en place en 1970/1980 resterait en 2025 et 5% en 2100.

Merci de votre attention....