

Changement climatique : une introduction

Julien Cattiaux
CNRM-GAME | CNRS/Météo-France

ENPC
26 Mai 2014

Retrouver ce cours sur ma page web : <http://www.cnrm-game.fr/spip.php?article629>

Mail : julien.cattiaux@meteo.fr | Twitter : [@julienc4ttiaux](https://twitter.com/julienc4ttiaux)

Spoiler

Ce que ce cours abordera :

physique du système climatique, modélisation, changement climatique observé, projections futures, incertitudes, conséquences sur la météo et ses extrêmes.

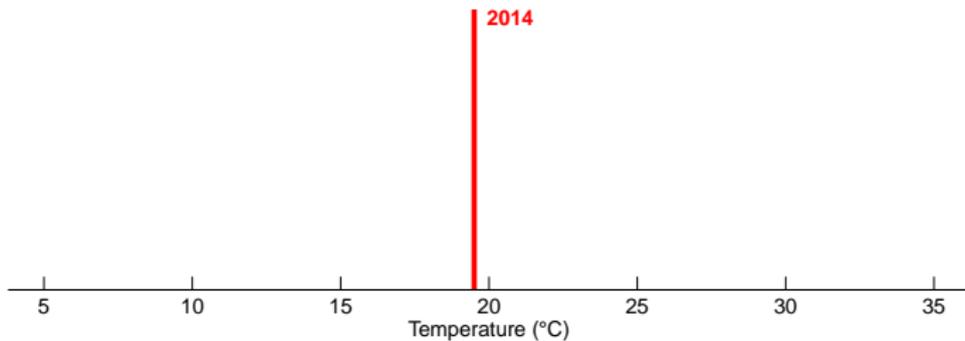
Ce que ce cours n'abordera pas :

impacts socio-environnementaux du changement climatique, questions d'adaptation et de mitigation, problématiques d'énergie, etc.

De la météo au climat

Climate is what you expect, weather is what you get - E. Lorenz.

Exemple : T Paris 26/05/2014

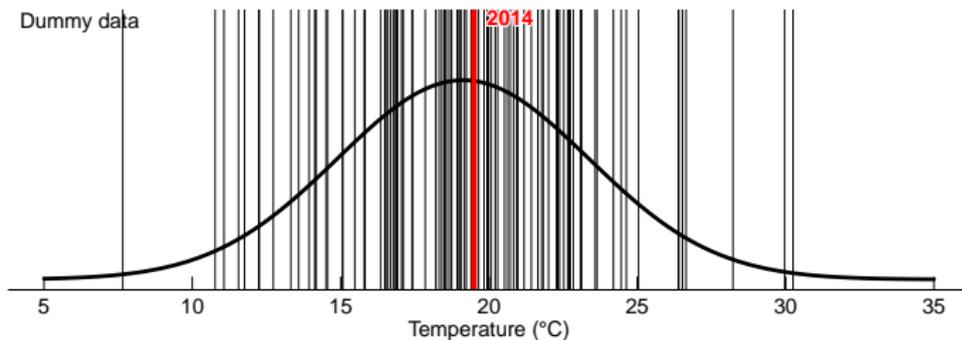


Données : Météo-France.

De la météo au climat

Climate is what you expect, weather is what you get - E. Lorenz.

Exemple : T Paris 26/05/2014 — Autres T possibles



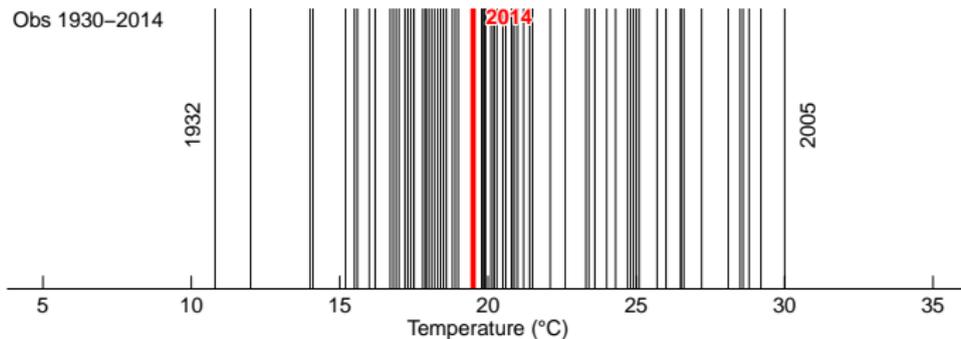
Données : Météo-France.

- Climat vs. météo : distribution vs. réalisation.

De la météo au climat

Climate is what you expect, weather is what you get - E. Lorenz.

Exemple : **T Paris 26/05/2014** — Autres T possibles (observations).



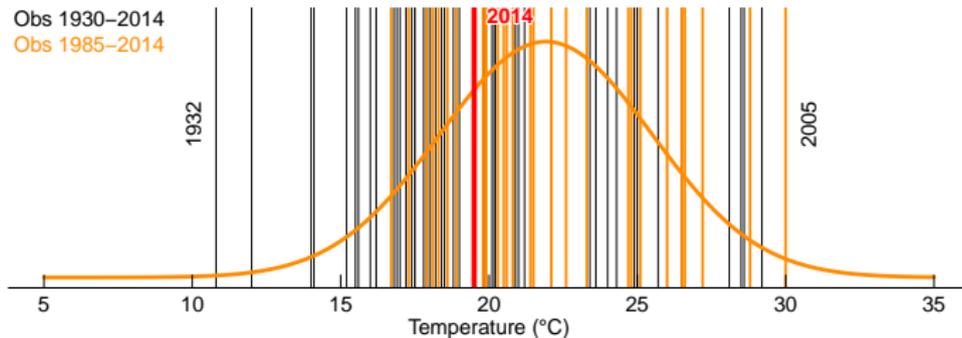
Données : Météo-France.

- ▶ Climat vs. météo : distribution vs. réalisation.
 - ▶ Comment estimer cette distribution ?
- On ne dispose que des observations passées.

De la météo au climat

Climate is what you expect, weather is what you get - E. Lorenz.

Exemple : **T Paris 26/05/2014** — Autres T possibles (observations).



Données : Météo-France.

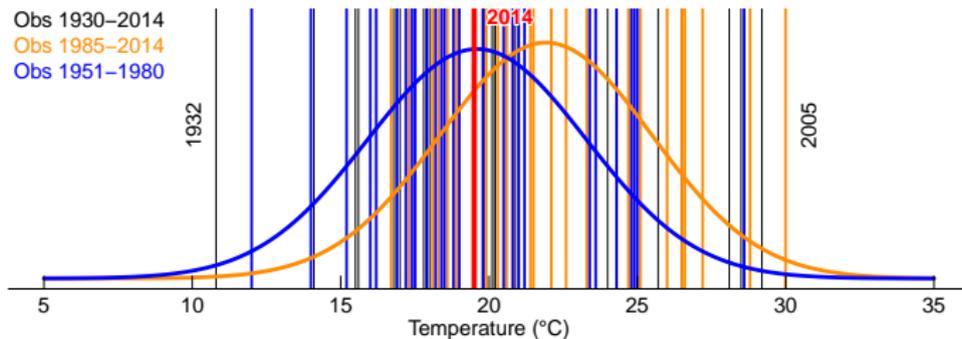
- ▶ Climat vs. météo : distribution vs. réalisation.
- ▶ Comment estimer cette distribution ?

On ne dispose que des observations passées. OMM \equiv estimation empirique sur 30 ans.

De la météo au climat

Climate is what you expect, weather is what you get - E. Lorenz.

Exemple : T Paris 26/05/2014 — Autres T possibles (observations).



Données : Météo-France.

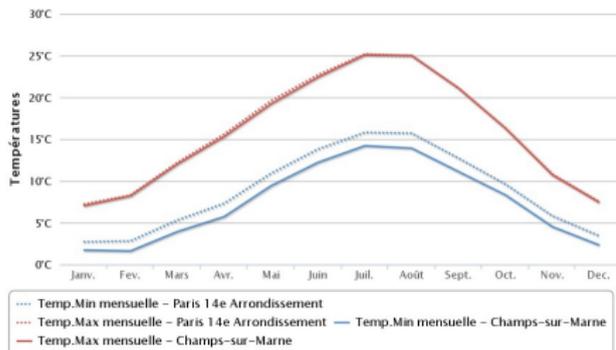
- ▶ Climat vs. météo : distribution vs. réalisation.
- ▶ Comment estimer cette distribution ?

On ne dispose que des observations passées. OMM \equiv estimation empirique sur 30 ans.

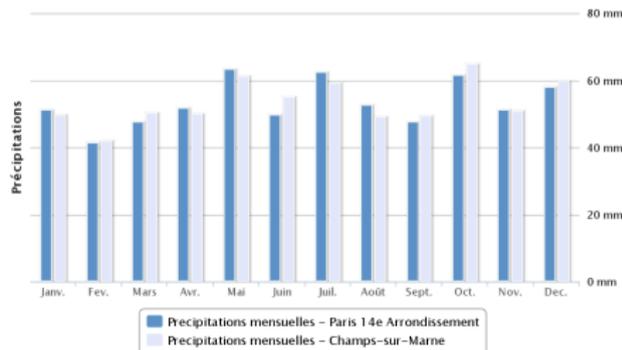
Les fameuses normales de saison

- Définies comme les moyennes de T, P, V, etc. sur 30 ans. Météo-France utilise actuellement 1981-2010.

Temp Champs-sur-Marne / Paris



Précip Champs-sur-Marne / Paris

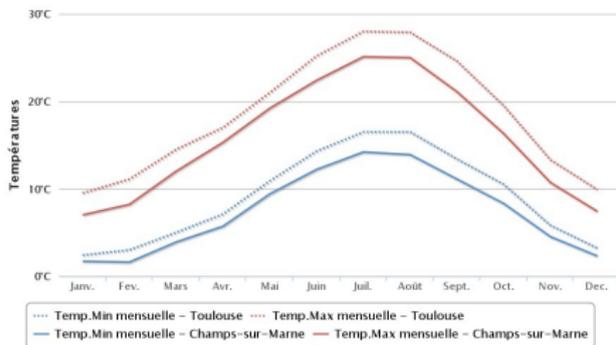


Source : site public de Météo-France, onglet [climat](#).

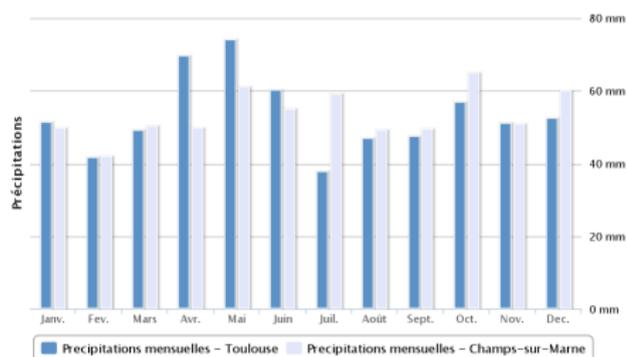
Les fameuses normales de saison

- Définies comme les moyennes de T, P, V, etc. sur 30 ans. Météo-France utilise actuellement 1981-2010.

Temp Champs-sur-Marne / Toulouse



Précip Champs-sur-Marne / Toulouse

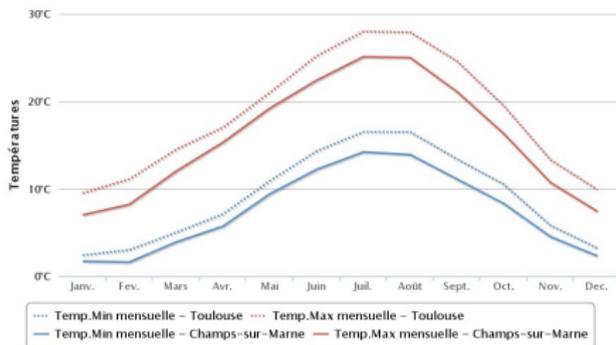


Source : site public de Météo-France, onglet [climat](#).

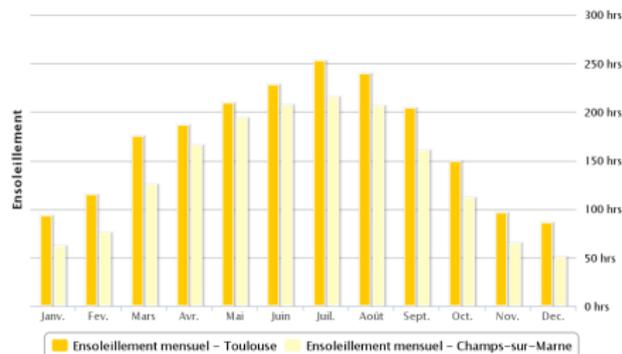
Les fameuses normales de saison

- Définies comme les moyennes de T, P, V, etc. sur 30 ans. Météo-France utilise actuellement 1981-2010.

Temp Champs-sur-Marne / Toulouse



Ensol Champs-sur-Marne / Toulouse

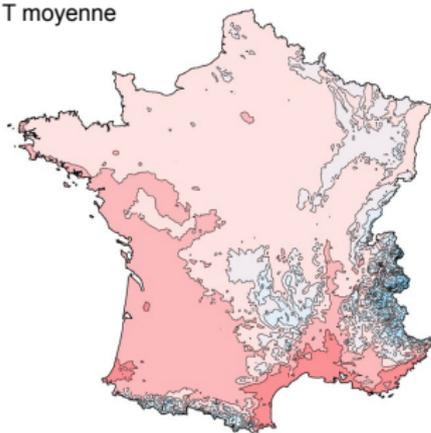


Source : site public de Météo-France, onglet [climat](#).

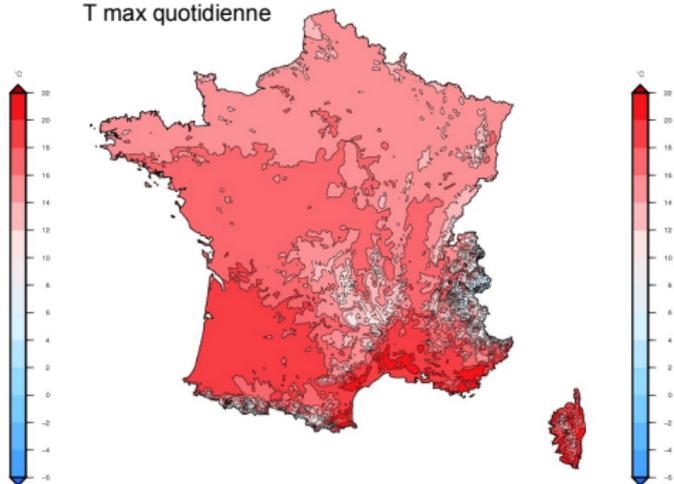
Normales France

► Moyennes 1981-2010.

T moyenne



T max quotidienne

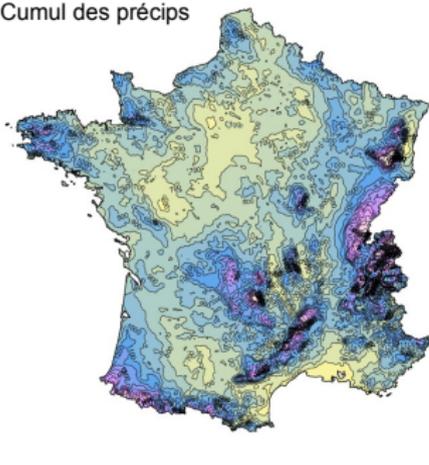


Source et crédits figures : Météo-France.

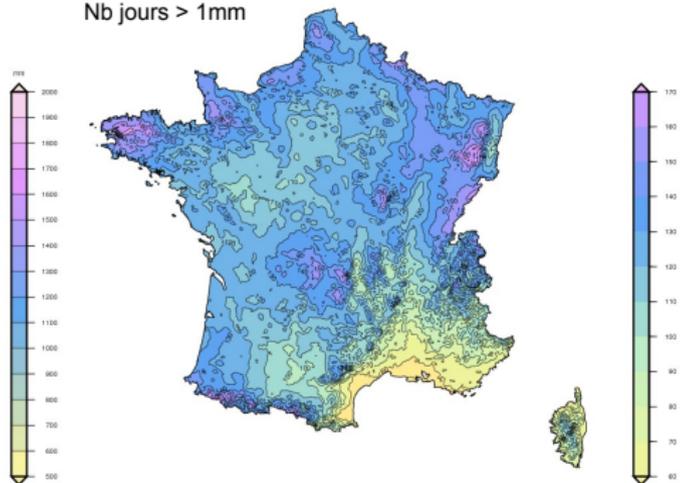
Normales France

► Moyennes 1981-2010.

Cumul des précips



Nb jours > 1mm



Source et crédits figures : Météo-France.

Normales Monde

Température

Précipitations

Tracé à partir des données [CRU](#) 1961–1990 et [GPCP](#) 1981–2010.

Normales Monde

Température

Précipitations

Tracé à partir des données [CRU](#) 1961–1990 et [GPCP](#) 1981–2010.

Résumé

Le *climat* est la distribution probabiliste des *temps* possibles (T, P, V etc.).

Au premier ordre, il peut être décrit par sa moyenne → par définition, la météo n'est pas *normale*...

—

Pourquoi faire du climat alors qu'on ne sait pas (bien) prévoir la météo ?

Si la prévision déterministe du temps est bornée à quelques jours (théorie du chaos, E. Lorenz), sa *distribution de probabilité* est déterminée par de grands équilibres physiques (cf. la suite).

Plan du cours

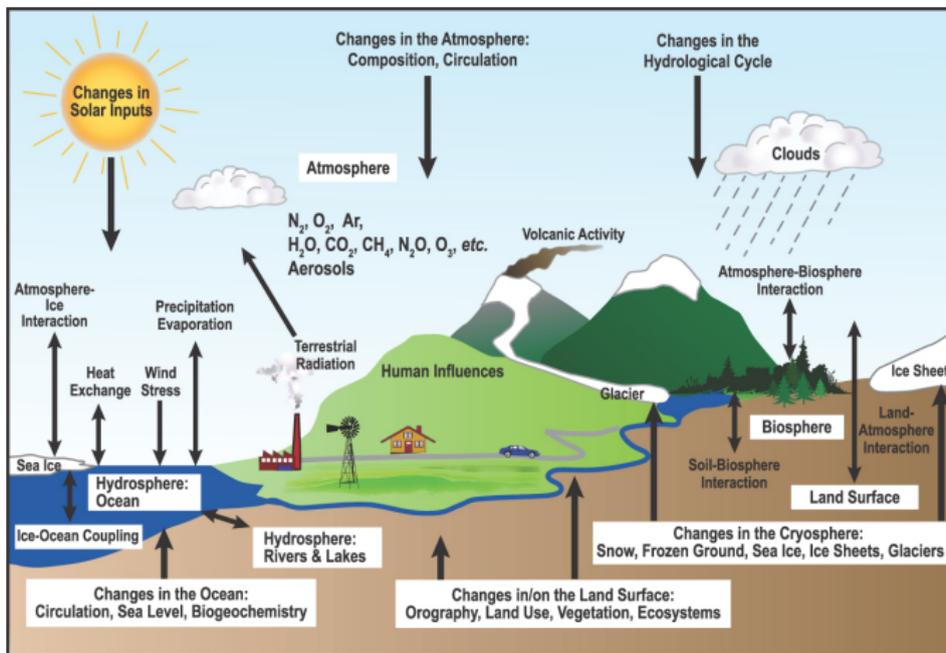
- 1 Introduction
- 2 Le climat du système Terre et sa modélisation
- 3 Le changement climatique : principe physique et observations
- 4 Projections futures et principales incertitudes
- 5 Quels impacts sur la météo et ses événements extrêmes ?

Plan

- 1 Introduction
- 2 Le climat du système Terre et sa modélisation**
- 3 Le changement climatique : principe physique et observations
- 4 Projections futures et principales incertitudes
- 5 Quels impacts sur la météo et ses événements extrêmes ?

Le système {Terre}

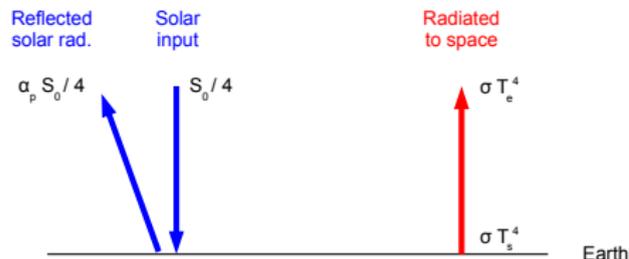
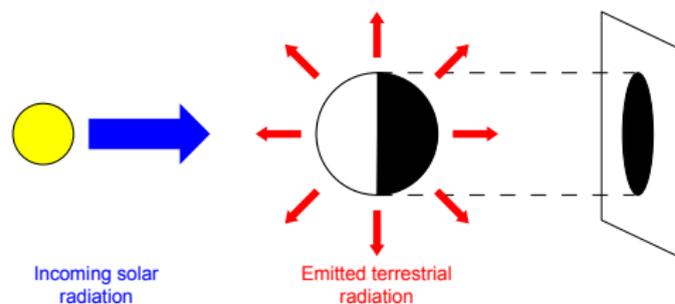
Atmosphère ↔ Hydrosphère ↔ Cryosphère ↔ Continents ↔ Biosphère



Source : IPCC AR4 (2007) FAQ 1.2 Fig. 1.

Un bilan énergétique simplifié

- J.-B.-J. Fourier (1820s), *chaleur obscure* et *effet de serre*.



Équilibre:

$$\pi R^2 (1 - \alpha_p) S_0 = 4\pi R^2 \sigma T_e^4$$

Température de surface :

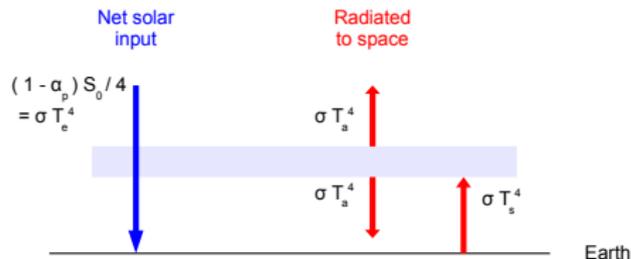
$$T_s = T_e = \left(\frac{1}{4\sigma} (1 - \alpha_p) S_0 \right)^{1/4}$$

$$\begin{cases} \sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4} \\ \alpha_p = 0.3 \\ S_0 = 1368 \text{ W.m}^{-2} \end{cases}$$

$$\Rightarrow T_s = T_e = 255 \text{ K.}$$

Un bilan énergétique *moins* simplifié

- ▶ J. Tyndall (1860s), S. Arrhenius (1890s) et l'importance du CO₂.



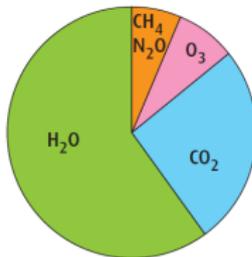
$$\left. \begin{aligned} T_a^4 &= T_e^4 \\ 2T_a^4 &= T_s^4 \\ T_a^4 + T_e^4 &= T_s^4 \end{aligned} \right\} T_s^4 = 2T_e^4$$

$$\implies T_s = 303 \text{ K.}$$

- ▶ Principaux gaz à effet de serre (GES) :

Effet de serre ciel clair

	(W.m ⁻²)	(%)
Vapeur d'eau	75	60 %
CO ₂	32	26 %
Ozone	10	8 %
N ₂ O + CH ₄	8	6 %
Total ciel clair	125	100 %

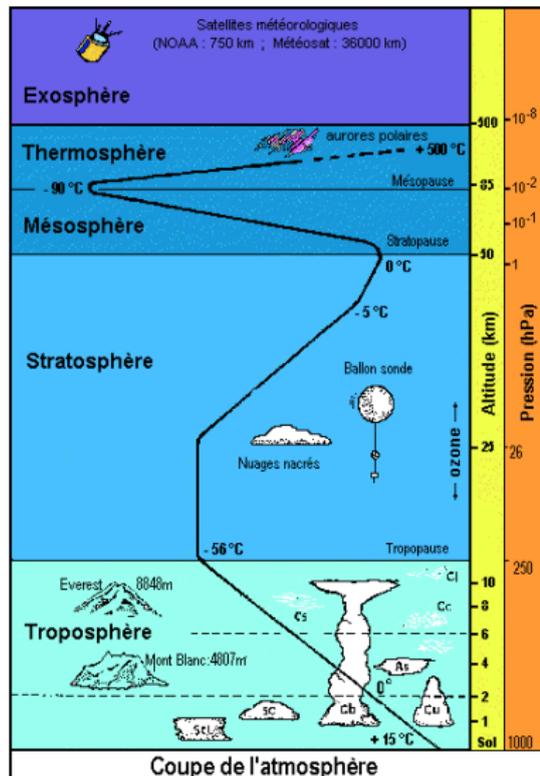


Données : Kiehl and Trenberth (1997).
Figure : Dufresne et Treiner, *La Météorologie* (2011).

Limites

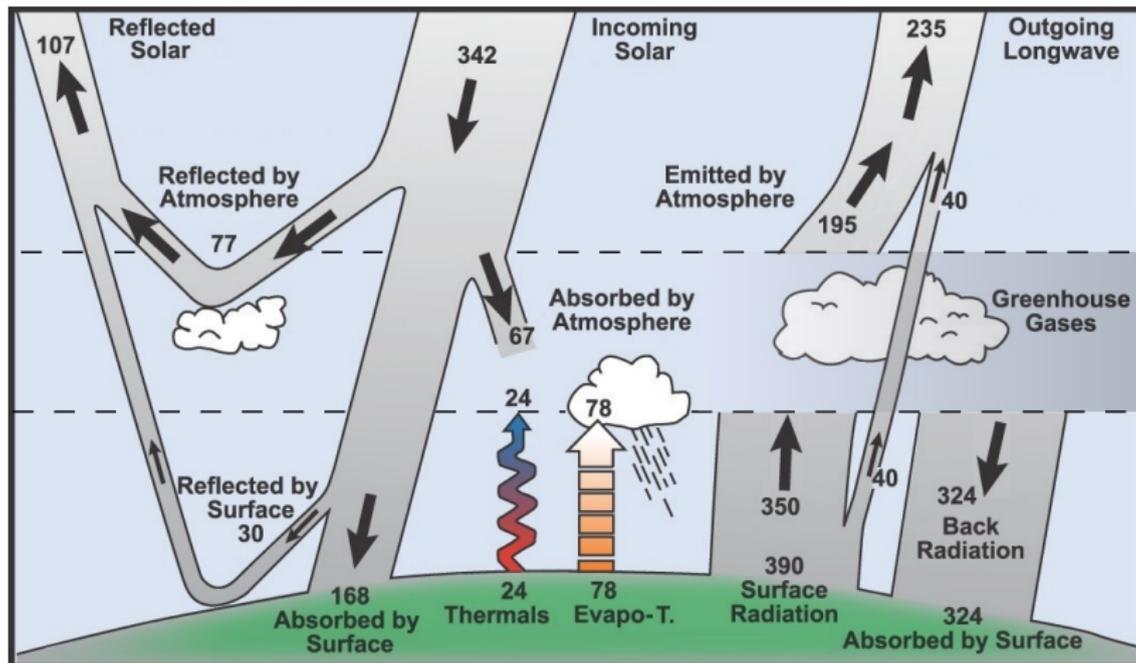
- ▶ Atmosphère pas complètement transparente au rayonnement solaire.
Réflexion / absorption.
- ▶ Atmosphère pas complètement opaque au rayonnement terrestre.
Fenêtre atmosphérique.
- ▶ Surface ne fait pas qu'émettre du rayonnement.
Flux de chaleur latente et sensible.
- ▶ Température de l'atmosphère non-homogène.
Gradient vertical de température, cf. diapo suivante.

Gradient vertical de température



Source : Cours de J.-L. Dufresne
(disponible [ici](#)).

Un bilan énergétique *encore moins* simplifié



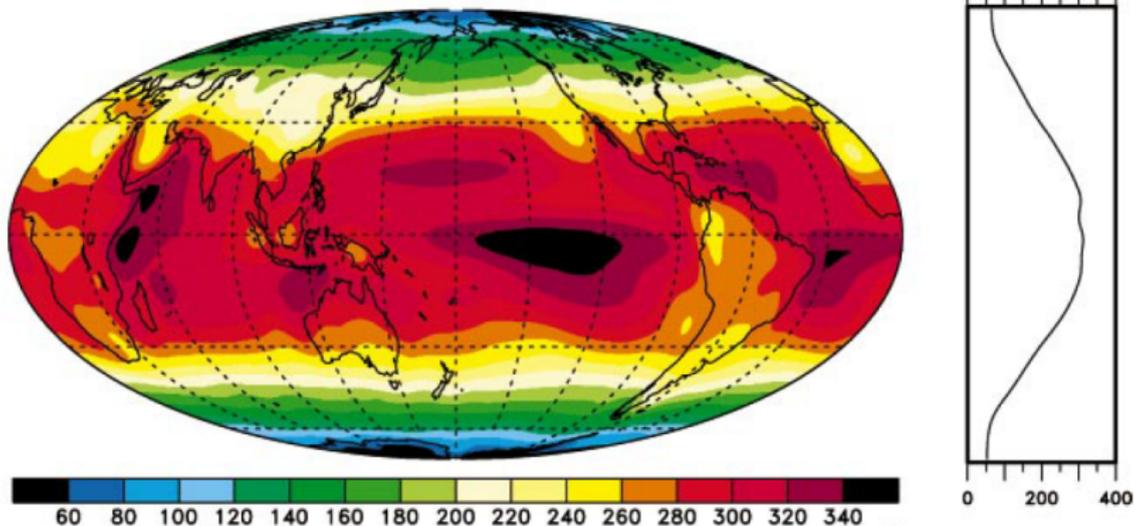
Adapté de l'IPCC AR4 (2007) FAQ 1.1 Fig. 1. Flux en W.m^{-2} .

Bilan énergétique : répartition géographique

Absorbed Solar Radiation

(W m^{-2})

Zonal Mean

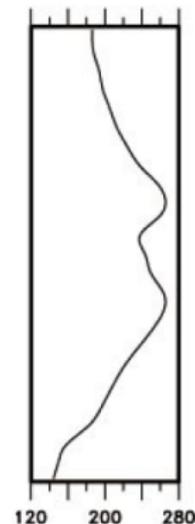
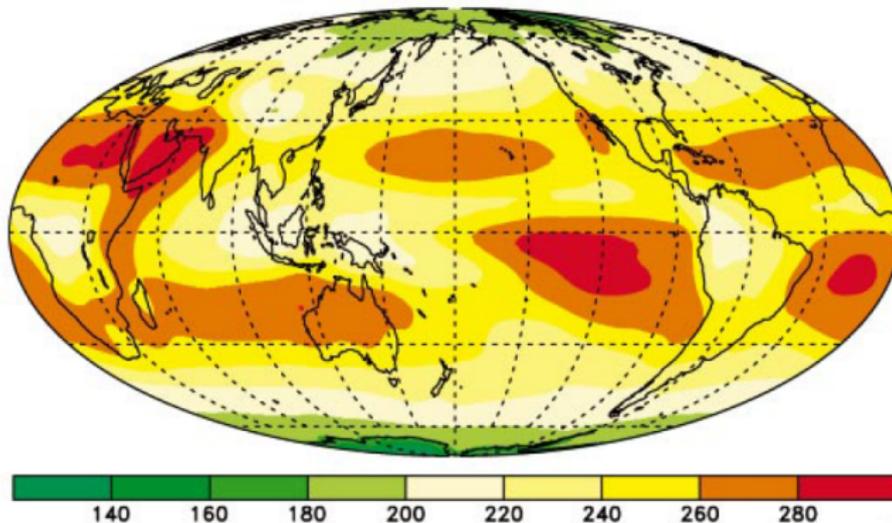


Source : Trenberth and Stepaniak (2003). Données: ERBE 1985–1989.

Bilan énergétique : répartition géographique

Outgoing Longwave Radiation

(W m⁻²)

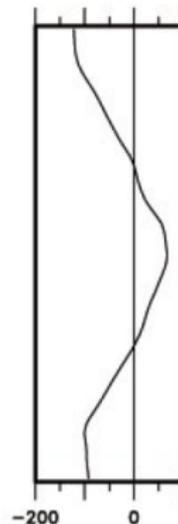
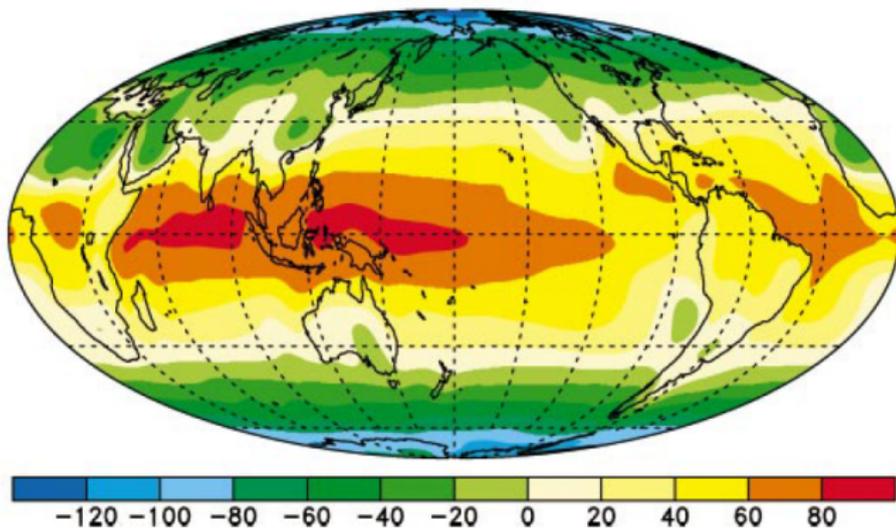


Source : Trenberth and Stepaniak (2003). Données: ERBE 1985–1989.

Bilan énergétique : répartition géographique

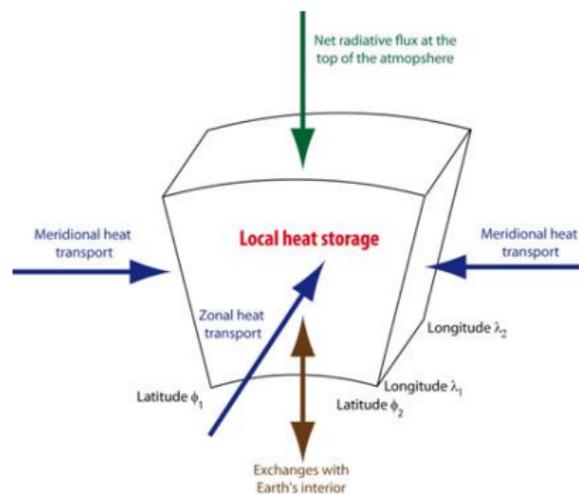
Net Radiation

(W m⁻²)



Source : Trenberth and Stepaniak (2003). Données: ERBE 1985–1989.

Que devient cette énergie ?



Source : Gosse et al. [online](#) textbook
(Fig. 2.15).

- Stockage local.

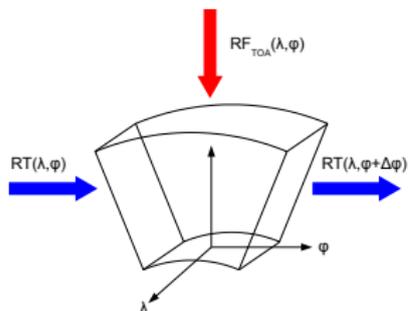
$$C_{ocean} \gg C_{atmos}, C_{ground}$$

- Transport horizontal.

Dynamique océan + atmosphère.

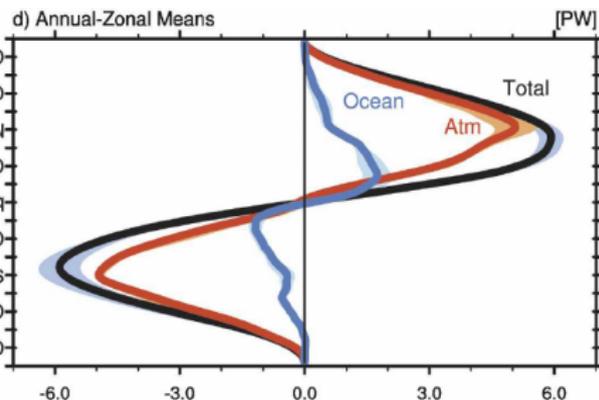
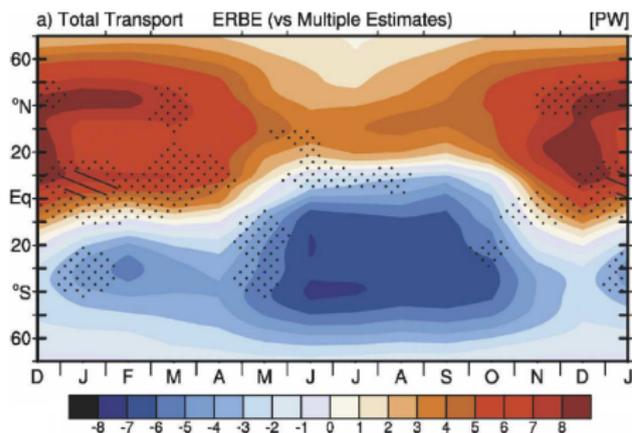
En moyenne annuelle, le déséquilibre énergétique équateur-pôles est quasi-entièrement rétabli par le transport, lui-même principalement atmosphérique.

De l'équateur vers les pôles



Intégrale du pôle sud à la latitude Φ :

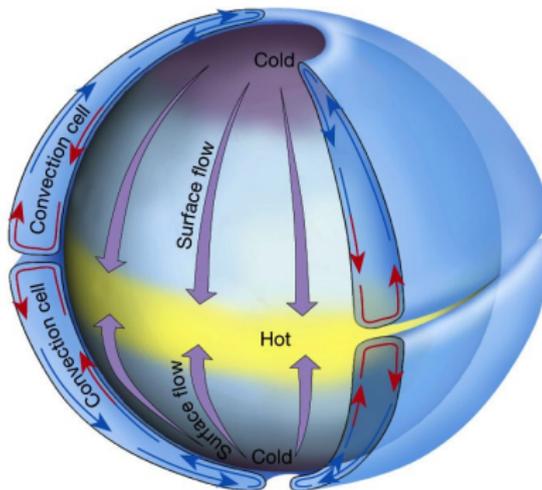
$$RT(\Phi) = \int_{-\pi/2}^{\Phi} \int_0^{2\pi} RF_{TOA}(\lambda, \varphi) R^2 \cos\varphi d\lambda d\varphi$$



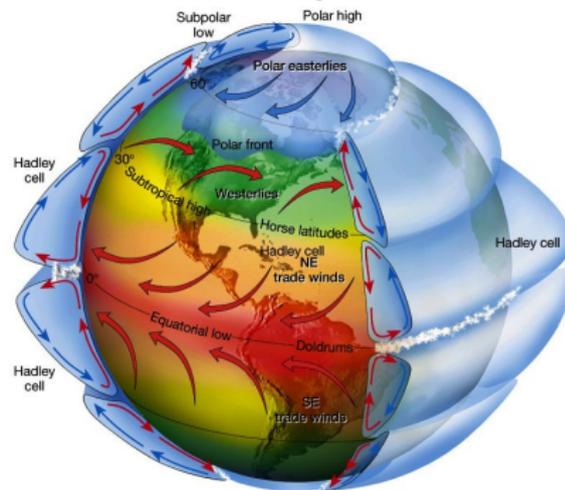
Source : Fasullo and Trenberth (2008).

Dynamique atmosphérique

Non-rotating Earth



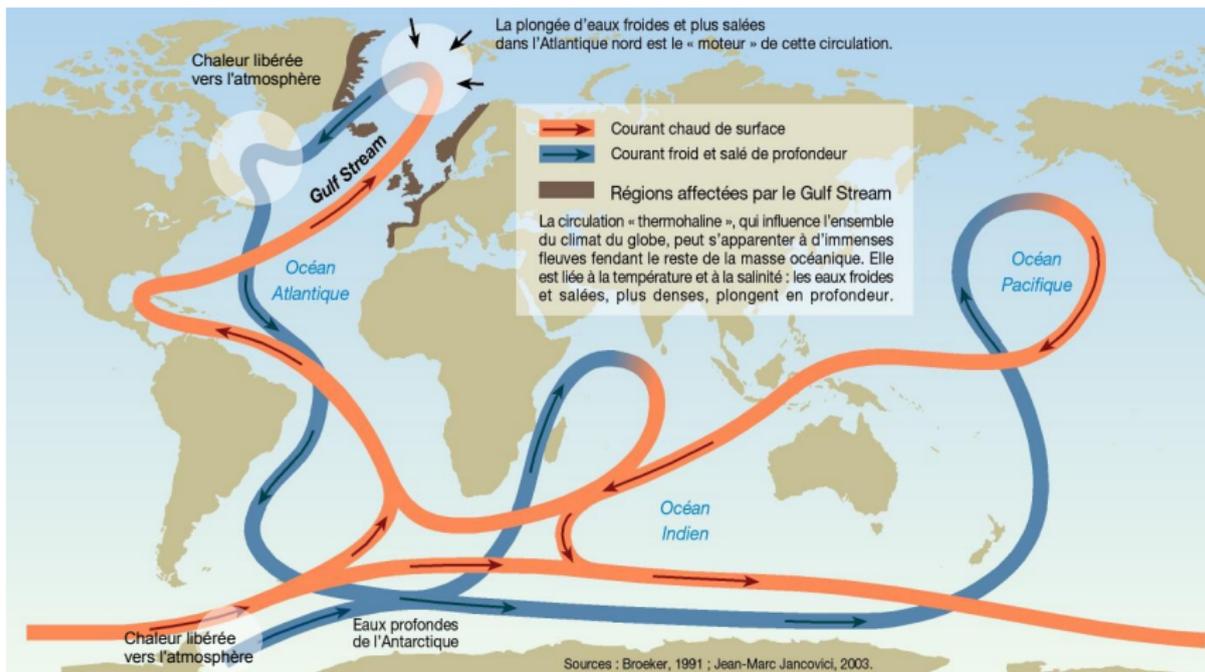
Rotating Earth



Source : Lutgens and Tarbuck (2001).

- ▶ Sans rotation : *convection* aux tropiques, *subsidence* aux pôles.
- ▶ Coriolis : cellules de Hadley, circulation des moyennes latitudes (*eddies*).

Dynamique océanique



- ▶ Circulation *thermohaline*, lente mais efficace !
- ▶ Particularité de l'Atlantique Nord, influence du *Gulf Stream*.

Et nous y (re)voilà

Température

Précipitations

Données [CRU](#) 1961–1990 et [GPCP](#) 1981–2010.

Modéliser le climat

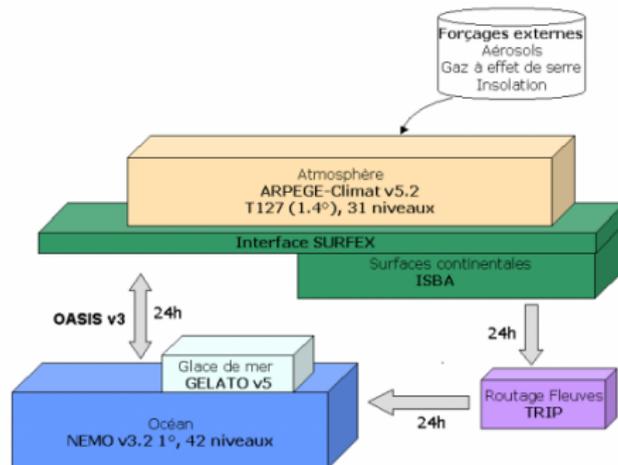
Représenter mathématiquement le système climatique sur la base de principes physiques, biologiques et chimiques.

- ▶ Discrétisation sur un maillage horizontal & vertical :
 - Résolution *numérique* des équations fondamentales (Navier-Stokes, etc.).
 - Paramétrisation *empirique* des phénomènes sous-maillages.
- ▶ Assemblage des composantes (cf. diapo suivante).
- ▶ Modèles de climat vs. modèles de prévision du temps :
 - Objet commun, objectif différent → approximations différentes.
 - Prévision du temps vs. simulation climatique : état initial vs. asymptote.

Une hiérarchie de modèles \pm complexes

► Selon ce que l'on cherche à représenter :

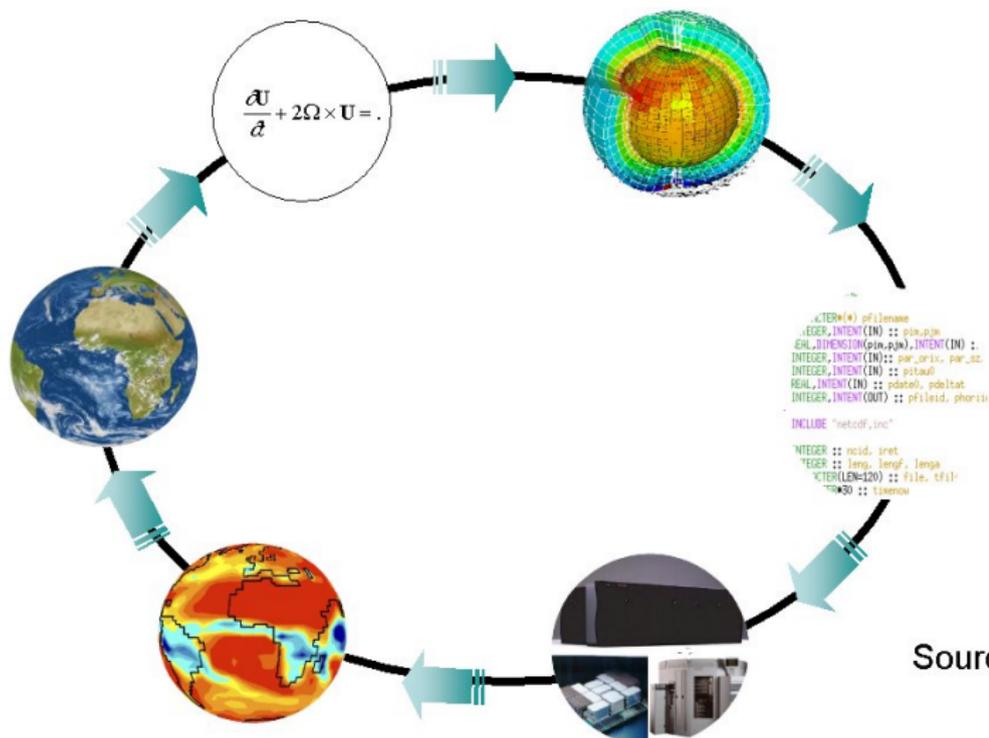
- *Energy Balance Models* (EBMs) \rightarrow e.g. sensibilité climatique globale.
- *Earth Models of Intermediate Complexity* (EMICs) \rightarrow simulations longues.
- *General Circulation Models* (GCMs) / *Earth System Models* (ESMs) :



Exemple de GCM. Crédits : CNRM-GAME (plus d'infos [ici](#)).

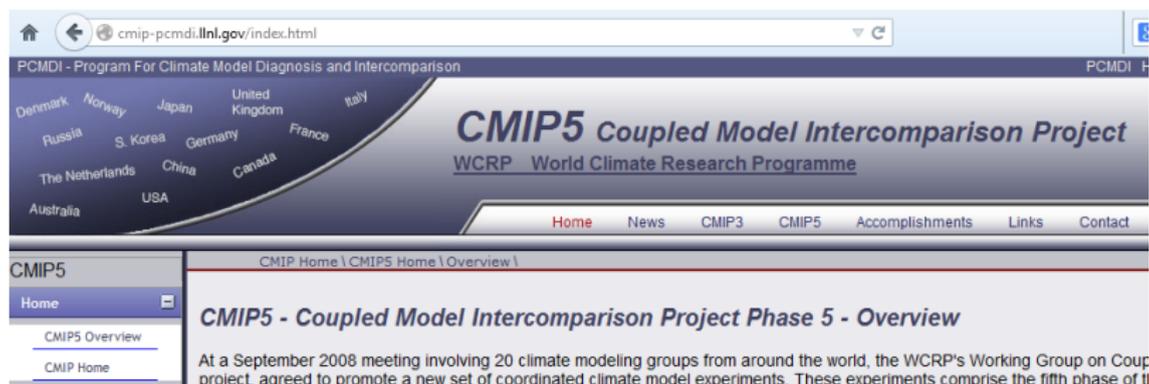
En pratique

- ▶ On dit qu'on fait *tourner* un modèle. . . #GrosseBlague



Le programme CMIP

Projet international proposant un protocole commun pour réaliser des simulations climatiques et mettre à disposition les résultats.

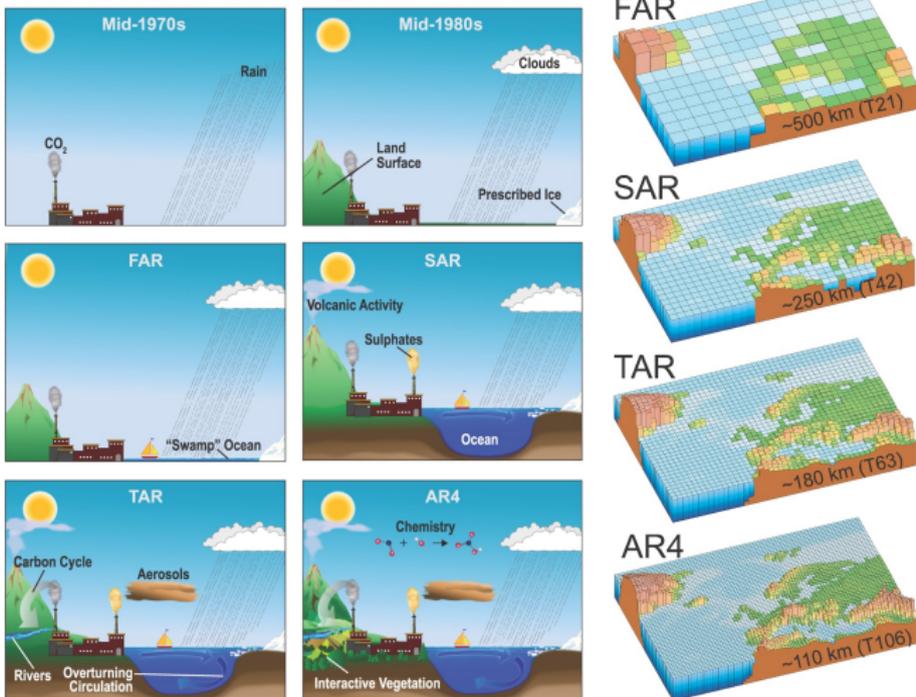


The screenshot shows the website for the CMIP5 project. The browser address bar displays "cmip-pcmdi.llnl.gov/index.html". The page header includes "PCMDI - Program For Climate Model Diagnosis and Intercomparison" and "PCMDI H". A globe graphic lists participating countries: Denmark, Norway, Japan, United Kingdom, Italy, Russia, S. Korea, Germany, France, The Netherlands, China, Canada, Australia, and USA. The main heading is "CMIP5 Coupled Model Intercomparison Project" under the "WCRP World Climate Research Programme". A navigation menu includes "Home", "News", "CMIP3", "CMIP5", "Accomplishments", "Links", and "Contact". The left sidebar has "CMIP5" and "Home" with sub-links for "CMIP5 Overview" and "CMIP Home". The main content area is titled "CMIP5 - Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 - Overview" and contains the text: "At a September 2008 meeting involving 20 climate modeling groups from around the world, the WCRP's Working Group on Coupled project, agreed to promote a new set of coordinated climate model experiments. These experiments comprise the fifth phase of the..."

- ▶ Lancé en 1995, phasé avec les rapports de l'IPCC (GIEC).
- ▶ Aujourd'hui à sa 5^e phase (24 centres, 61 versions de GCMs).
- ▶ Stockage CMIP5 : 2 PB de données (= 2 000 000 GB)...

La course aux composantes & à la résolution

The World in Global Climate Models



Source : IPCC AR4 ([2007](#)) Figs. 1.2 & 1.4.

Évaluer la qualité des modèles

Observations

Modèles

Données [CRU](#) 1961–1990 et [CMIP5](#) (ensemble de 38 GCMs).

En général on ne cherche pas à reproduire la *chronologie* mais la *distribution*.

Évaluer la qualité des modèles

Observations

Modèles

Données [CRU](#) 1961–1990 et [CMIP5](#) (ensemble de 38 GCMs).

En général on ne cherche pas à reproduire la *chronologie* mais la *distribution*.

Évaluer la qualité des modèles

Observations

Modèles

Données [GPCP](#) 1981–2010 et [CMIP5](#) (ensemble de 38 GCMs).

En général on ne cherche pas à reproduire la *chronologie* mais la *distribution*.

Synthèse sur la modélisation

Représentation *simplifiée* du système climatique sur la base de lois φ .

Seuls *inputs* : forçages externes (insolation, GES, etc.).

Utilisation : simulations des climats passé/présent/futur, expériences de sensibilité (impossible dans la réalité), études de prévisibilité saisonnière à décennale (dans ce cas, importance de l'initialisation).

Peut-on avoir confiance dans les modèles de climat ?

Effort permanent d'évaluation via la confrontation aux observations disponibles : état moyen et variabilité du climat récent, de climats anciens ou d'autres planètes (e.g. Mars, Vénus), tests idéalisés (e.g. $2 \times [\text{CO}_2]$).

À lire : [Climat, modéliser pour comprendre et anticiper](#) (2013, projet MISSTERRE).

Climat *stationnaire* : et pourtant ça bouge !

Simulation à bilan d'énergie toujours équilibré (*inputs* constants).

Températures brutes

Anomalies

Données : modèle CNRM-CM5.

Climat *stationnaire* : et pourtant ça bouge !

Simulation à bilan d'énergie toujours équilibré (*inputs constants*).

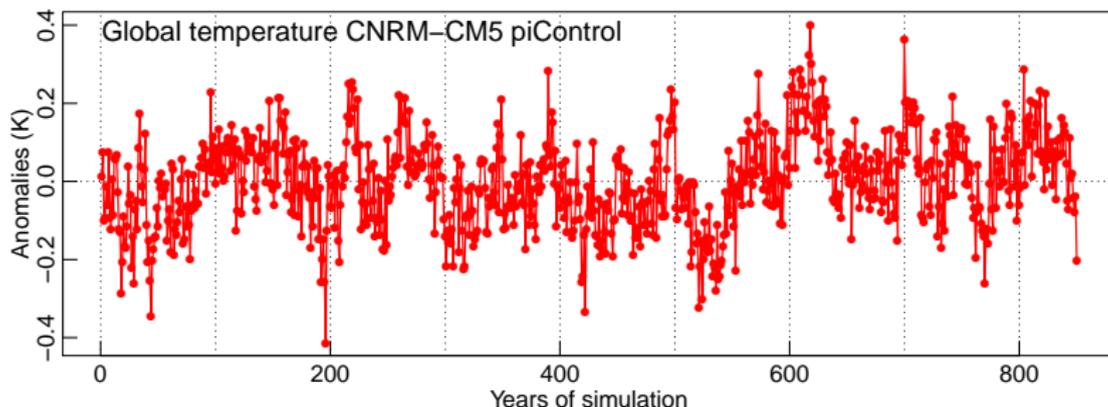
Températures brutes

Anomalies

Données : modèle CNRM-CM5.

Climat *stationnaire* : et pourtant ça bouge !

- Mise en évidence d'une variabilité *interne* à toutes les échelles (s&t).

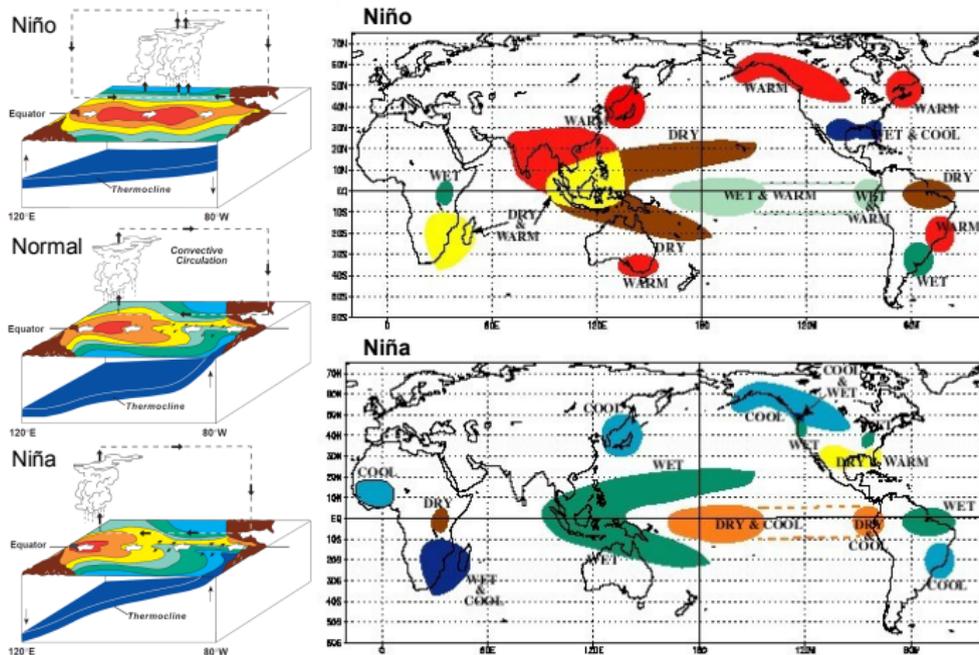


Données : modèle CNRM-CM5.

- De globale & multi-décennale (origine surtout *océanique*)...
- ...à régionale & inter-annuelle (origine surtout *atmosphérique*).

ENSO - El Niño Southern Oscillation

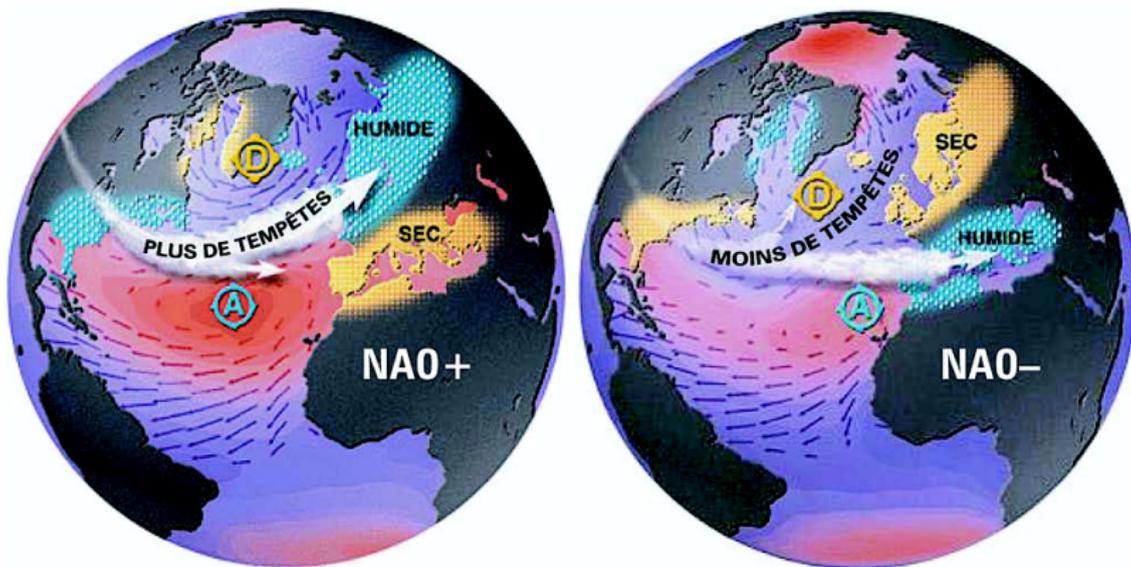
- 1^{er} mode de variabilité globale inter-annuelle (couplé océan-atmosphère).



Crédits : NOAA.

NAO - North Atlantic Oscillation

- ▶ 1^{er} mode de variabilité Nord-Atlantique inter-annuelle (atmosphère).



Crédits : Lamont-Doherty Earth Observatory.

Résumé

Le *déséquilibre énergétique* (excès tropical, déficit aux pôles) induit un transport méridien atmosphérique et océanique.

L'état moyen zonal est redessiné par la géographie, le cycle de l'eau, etc.

La *variabilité interne* se superpose à l'état moyen à toutes les échelles.

Les modèles numériques de climat permettent de décrire, comprendre, expérimenter le système climatique.

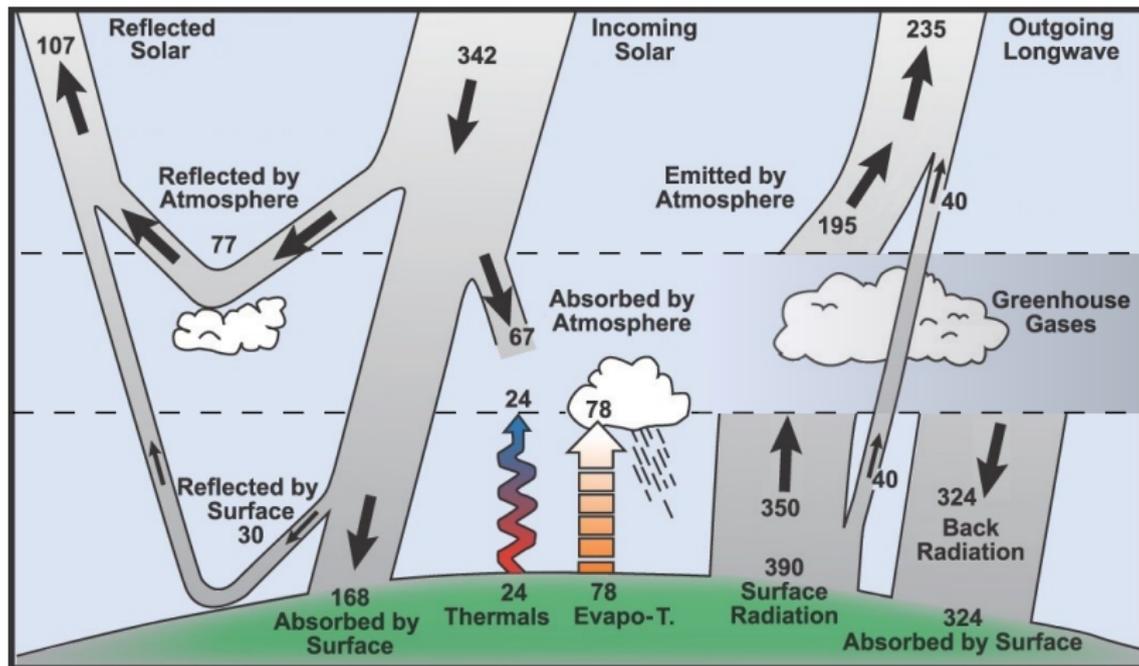
Plan

- 1 Introduction
- 2 Le climat du système Terre et sa modélisation
- 3 Le changement climatique : principe physique et observations
- 4 Projections futures et principales incertitudes
- 5 Quels impacts sur la météo et ses événements extrêmes ?

Comment perturber le climat ?

Comment perturber le climat ?

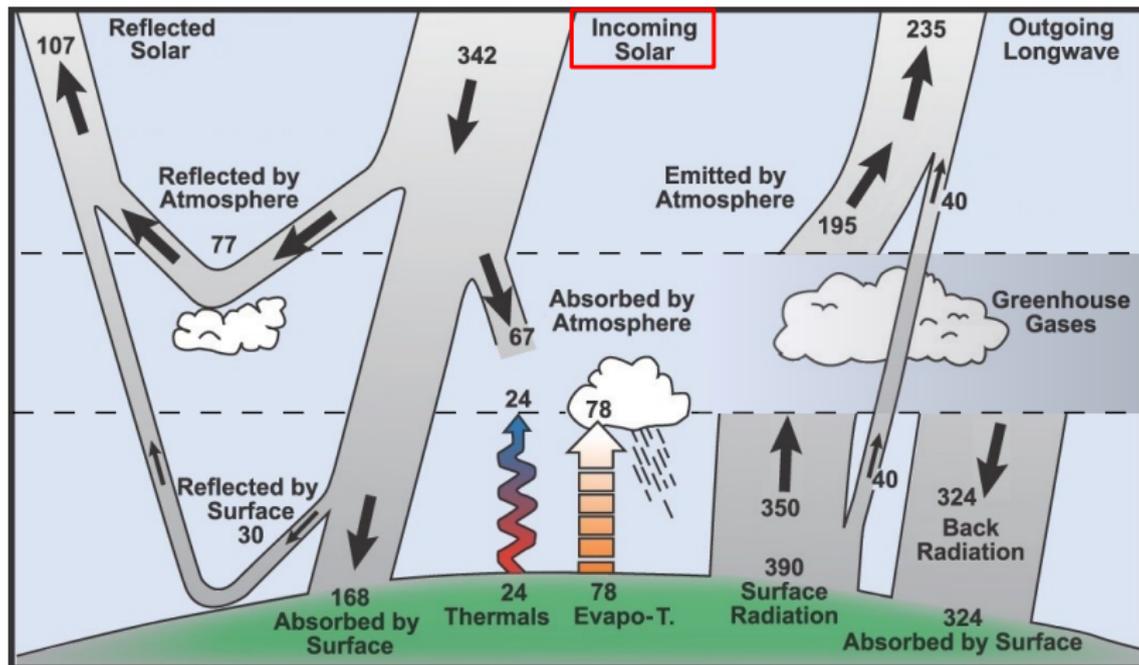
- En perturbant son bilan énergétique : notion de *forçage radiatif*.



Adapté de l'IPCC AR4 (2007) FAQ 1.1 Fig. 1. Flux en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Comment perturber le climat ?

- ▶ En perturbant son bilan énergétique : notion de *forçage radiatif*.

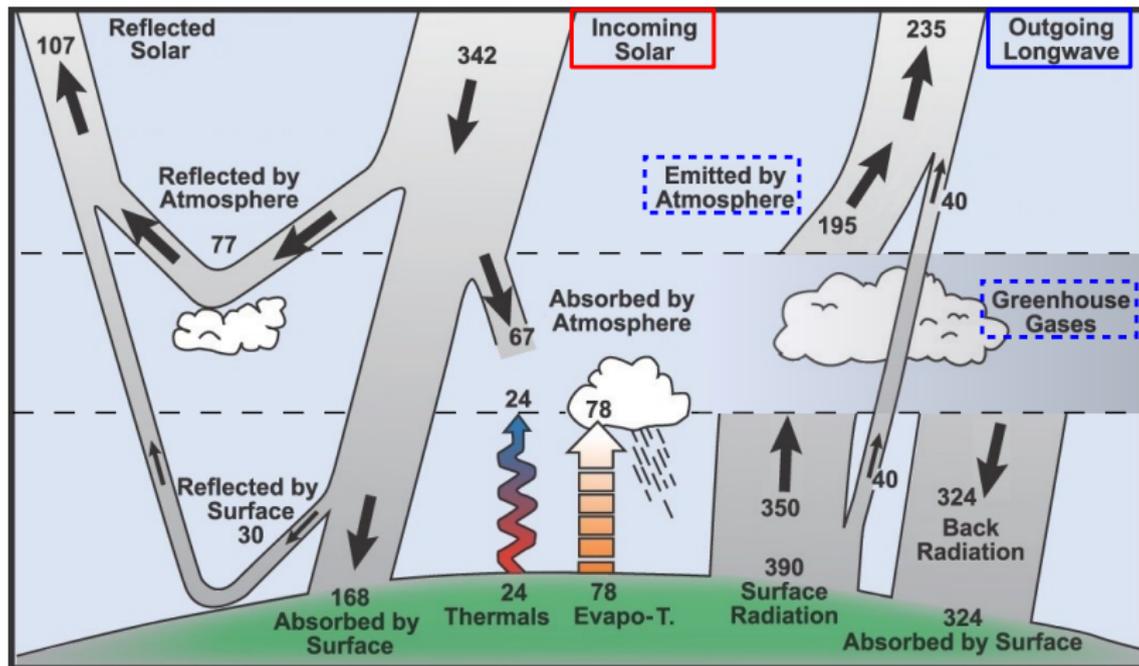


Adapté de l'IPCC AR4 (2007) FAQ 1.1 Fig. 1. Flux en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

- ▶ Principaux forçages : **Solaire**

Comment perturber le climat ?

- En perturbant son bilan énergétique : notion de *forçage radiatif*.

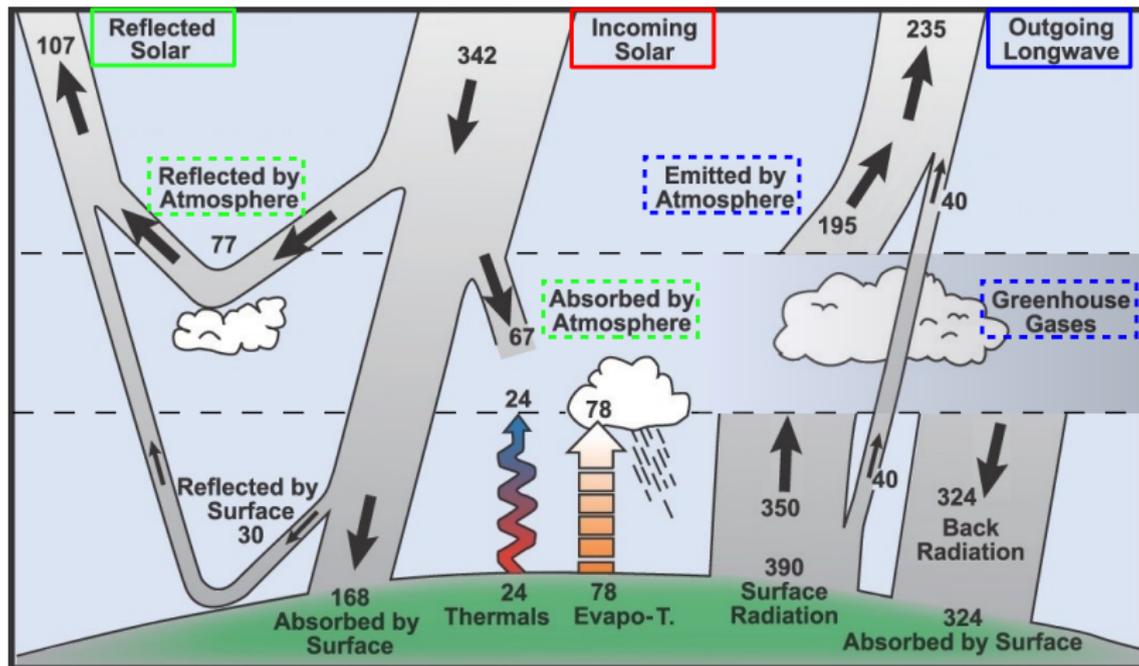


Adapté de l'IPCC AR4 (2007) FAQ 1.1 Fig. 1. Flux en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

- Principaux forçages : **Solaire** – **GES**

Comment perturber le climat ?

- En perturbant son bilan énergétique : notion de *forçage radiatif*.

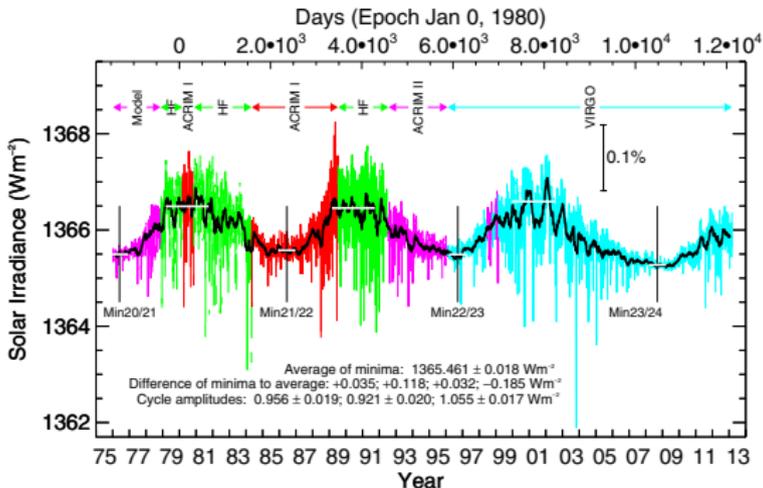


Adapté de l'IPCC AR4 (2007) FAQ 1.1 Fig. 1. Flux en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

- Principaux forçages : Solaire – GES – Aérosols.

Forçage solaire (+)

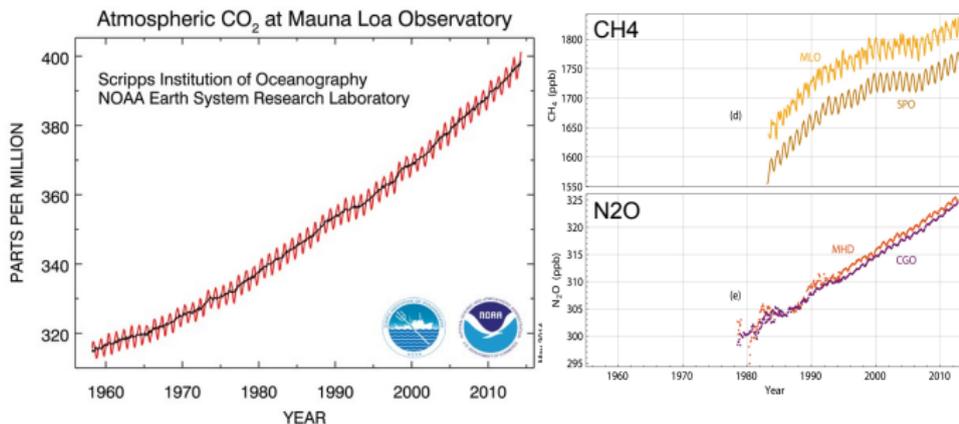
- ▶ $t \sim 10^4 - 10^5$ années : variations de l'orbite terrestre.
Alternance glaciaire - inter-glaciaire, théorie de Milankovic.
- ▶ $t \sim 10^0 - 10^2$ années (ce qui nous intéresse ici) : *activité solaire*.
Variations de l'irradiance solaire, cycles à ~ 11 ans.



Données : satellites ACRIM, HF & VIRGO. Figure de C. Fröhlich, détails [ici](#).

Forçage GES (+)

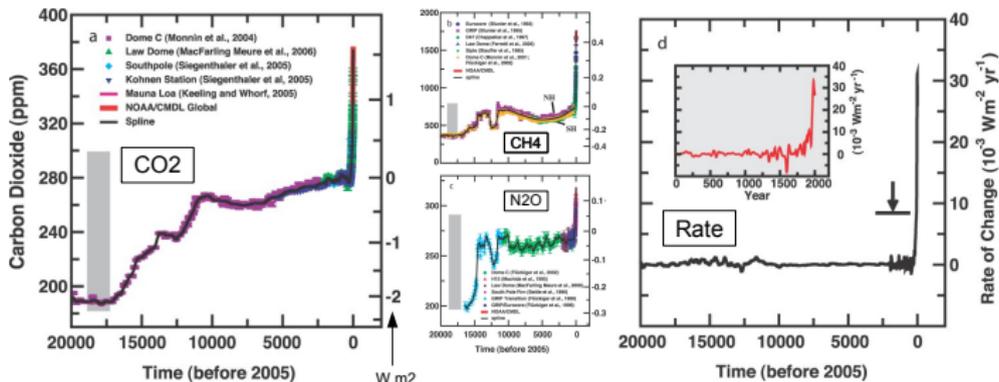
- ▶ Principaux gaz concernés : CO₂, CH₄ et N₂O.
- ▶ Durée : $\sim 10 - 10^2$ années. Répartition homogène (*bien mélangés*).



Source : Mauna Loa (infos [ici](#)) et IPCC AR5 (2013) Fig. 6.3.

Forçage GES (+)

- ▶ Principaux gaz concernés : CO₂, CH₄ et N₂O.
- ▶ Durée : $\sim 10 - 10^2$ années. Répartition homogène (*bien mélangés*).



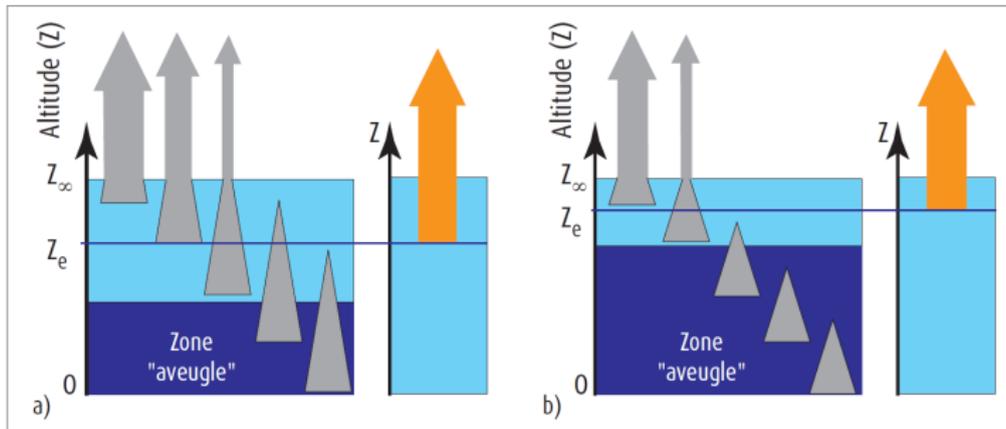
Source : IPCC AR4 (2007) Fig. 6.4.

- ▶ Présents à l'état naturel, mais augmentation récente *anthropique*.
[C] (*very high conf*) & $\partial_t[C]$ (*medium conf*) sans précédent dans carottages ($\sim 10^6$ ans).

Forçage GES (+) : comment ça marche ?

Puisque tout l'IR de surface est déjà absorbé, pourquoi l'ES augmente ?

- En augmentant la [C] d'absorbant, on élève l'altitude d'émission.
- Or $\partial_z T < 0$ (troposphère) \rightarrow flux IR émis plus faible puisque $\sim \sigma T^4$.

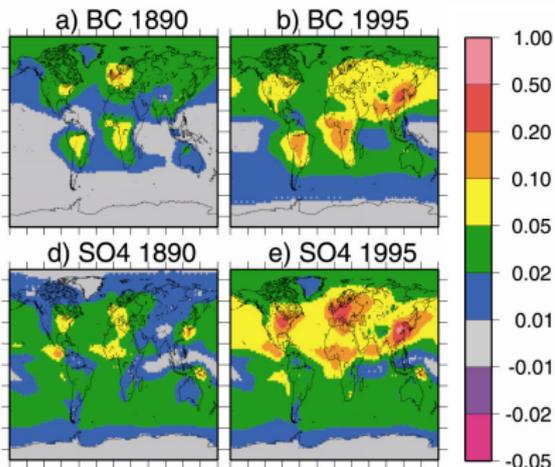


Source : Dufresne et Treiner, *La Météorologie* (2011).

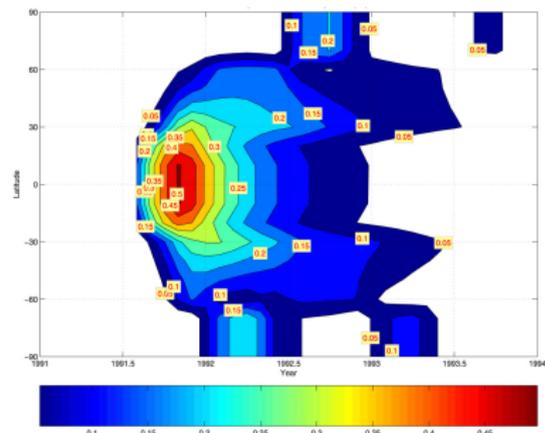
N.B. Forçages en $\log[CO_2]$, $\sqrt{[CH_4]}$ et $\sqrt{[N_2O]}$.

Forçage aérosols (–)

- ▶ **Aérosols** = particules en suspension dans l'atmosphère.
 - Naturels : poussières désertiques, océaniques, volcaniques, feux de forêts, etc.
 - Anthropiques : combustion (fossile, biomasse). Principaux : SO_4 & BC.
- ▶ **Durée** : qq jours. Répartition hétérogène. SAUF s'ils atteignent la stratosphère (e.g. éruptions volcaniques).



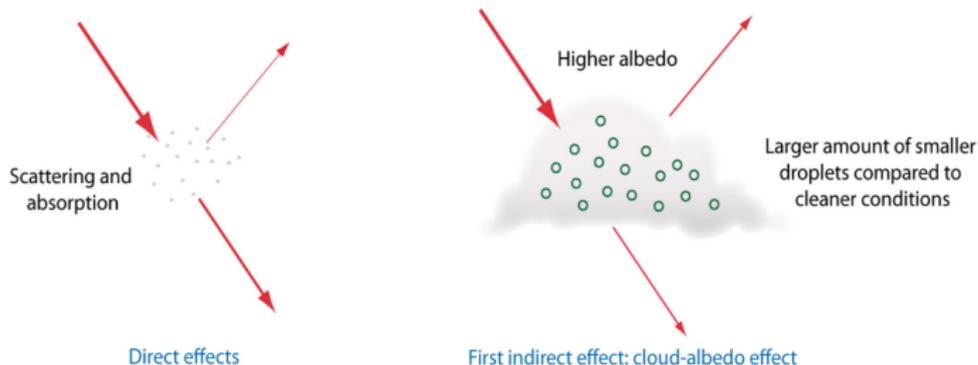
Épaisseurs optiques BC ($\times 10$) & SO_4
Source : Koch et al. (2009).



Épaisseur optique aérosols post-Pinatubo
Source : Gao et al. (2008).

Forçage aérosols (–) : effets multiples

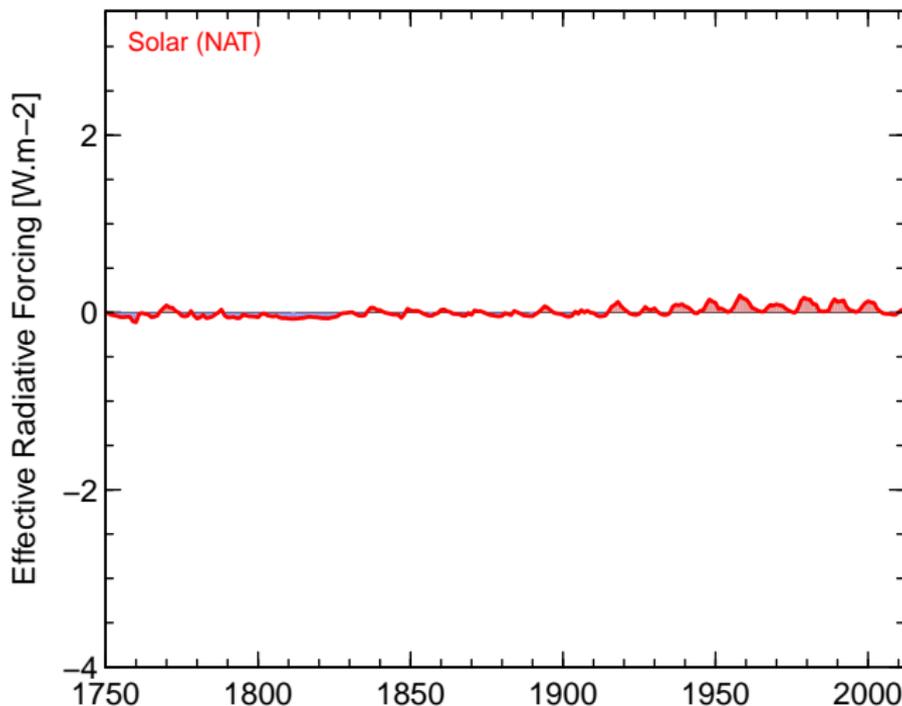
- ▶ Effet *direct* : diffusion (–) & absorption (+) du rayonnement solaire. Signe dépend du type d'aérosol, mais dans l'ensemble, forçage (–).
- ▶ 1^{er} effet *indirect* : noyaux de condensation pour nuages (–).



Source : Goose et al. [online](#) textbook.

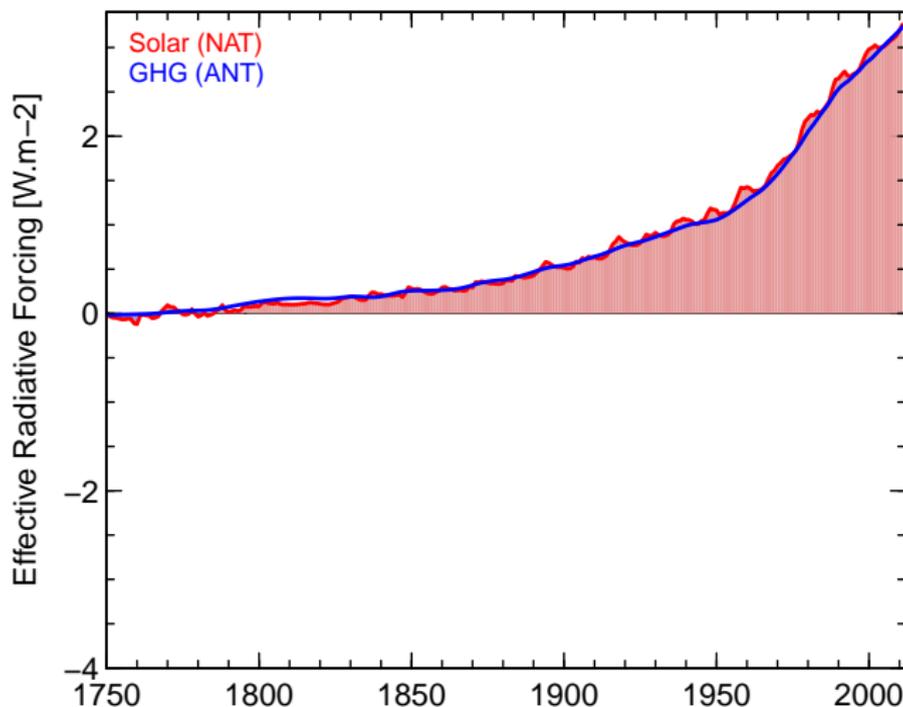
+ autres effets : semi-direct (T , H locales), 2^e indirect (z , t nuages)...

Synthèse : forçages externes depuis 1750



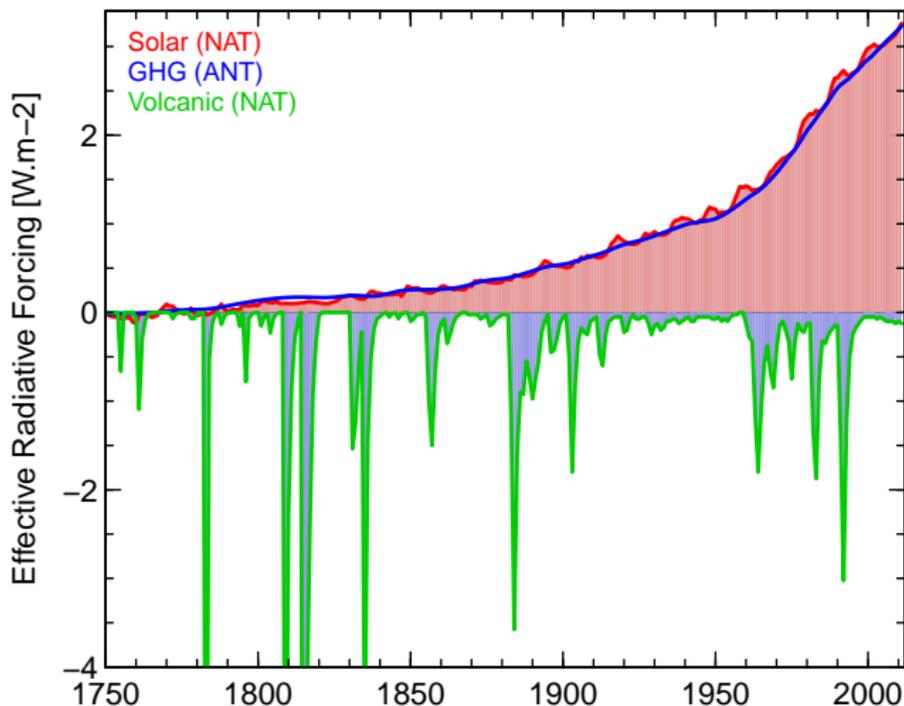
Données : F.M. Bréon (LSCE, communication personnelle).

Synthèse : forçages externes depuis 1750



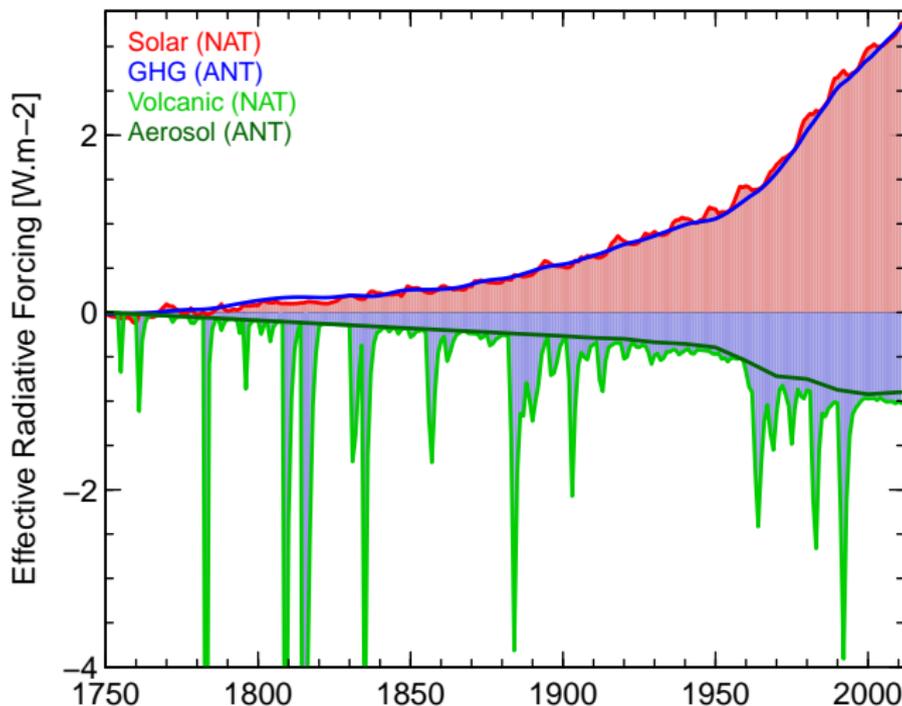
Données : F.M. Bréon (LSCE, communication personnelle).

Synthèse : forçages externes depuis 1750



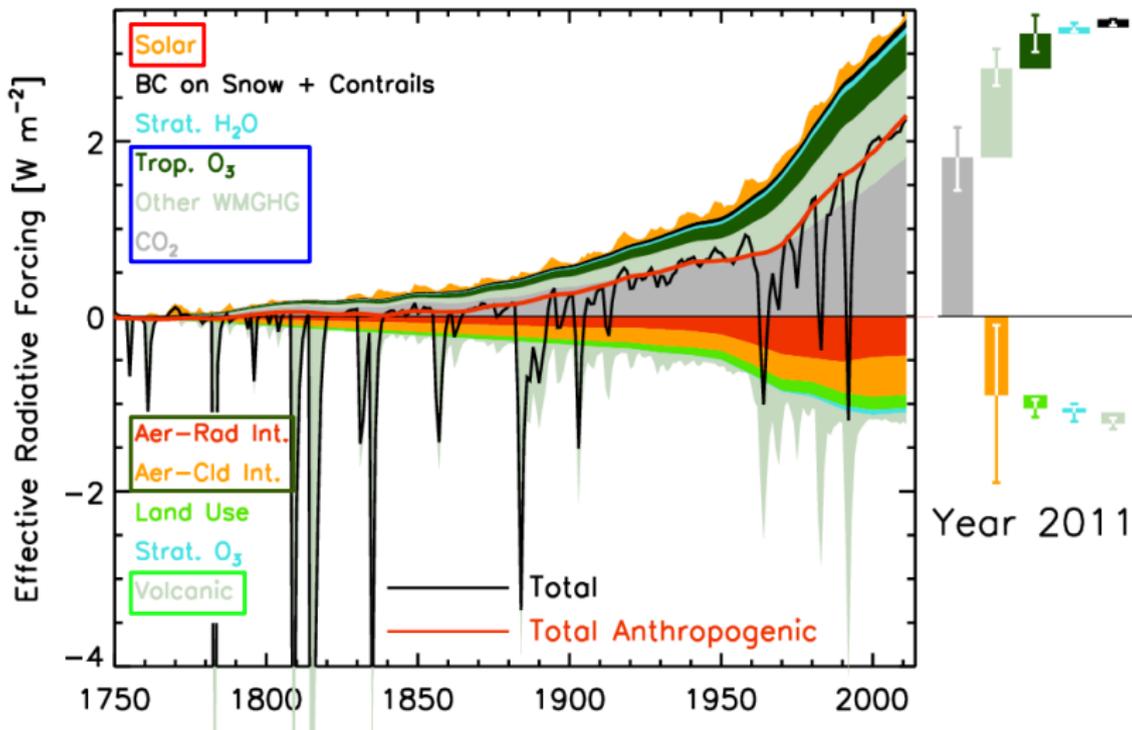
Données : F.M. Bréon (LSCE, communication personnelle).

Synthèse : forçages externes depuis 1750



Données : F.M. Bréon (LSCE, communication personnelle).

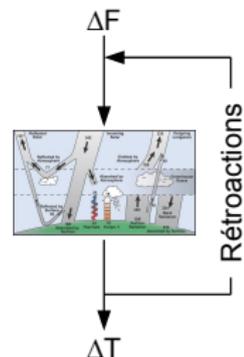
Synthèse : forçages externes depuis 1750



Source : IPCC AR5 (2013) Fig. 8.18.

Forçages et rétroactions

En modifiant le bilan d'énergie, on modifie le système. . .
. . . et on modifie le bilan d'énergie en retour.



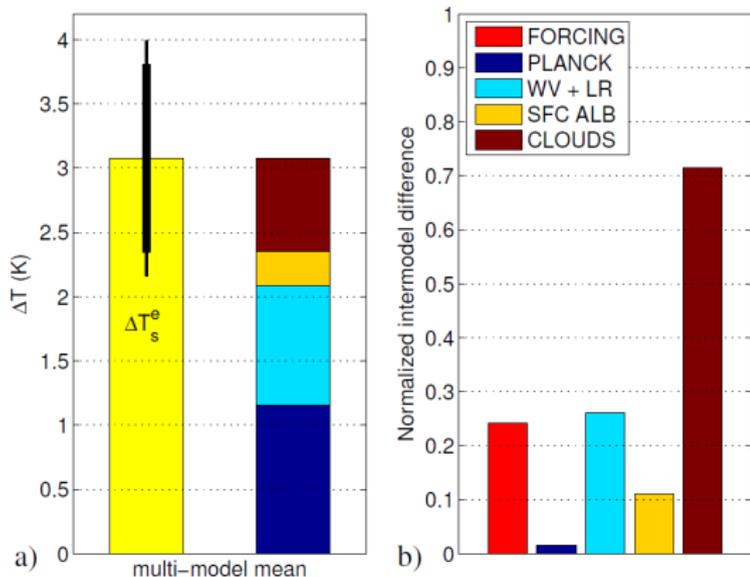
Principales rétroactions :

- ▶ Vapeur d'eau : rétroaction **positive** via Clausius-Clapeyron.
Un air plus chaud peut contenir plus de vapeur d'eau, puissant GES.
- ▶ Cryosphère : rétroaction **positive** via l'albédo de surface.
En fondant, la glace/neige devient moins réfléchissante au rayonnement solaire.
- ▶ Nuages : encore très incertain, mais rétroaction plutôt **positive**.
Effets combinés de l'élévation en altitude et de changements de dynamique.

Importance des rétroactions

- Exemple de la réponse en température à un doublement de $[\text{CO}_2]$.
Contributions estimées à partir de modèles de climat.

Réponse de Planck
+ rétroactions vapeur d'eau,
cryosphère, et nuages.



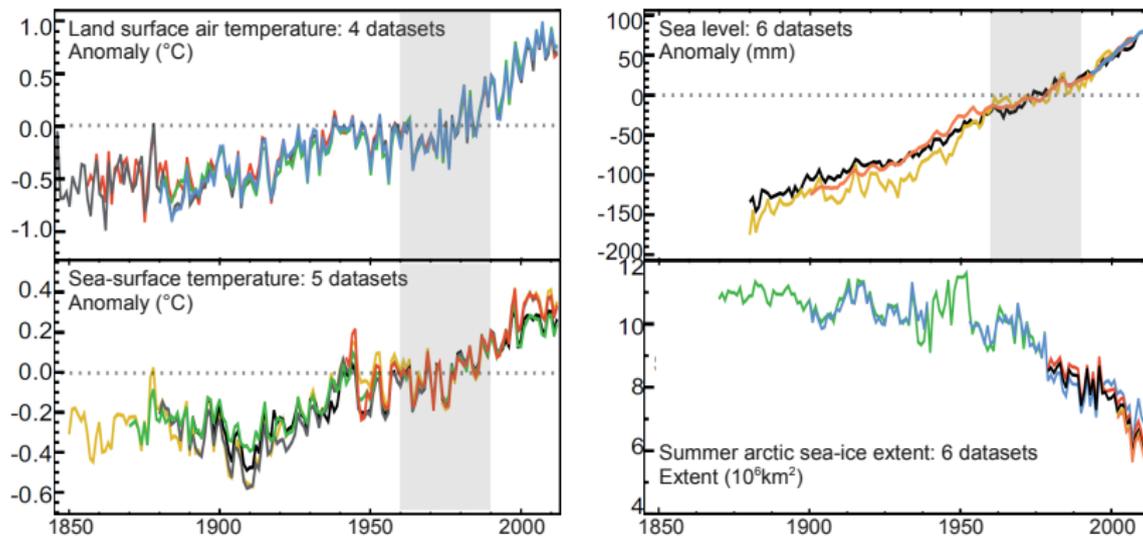
Source : Dufresne and Bony (2008).

Où va l'excès d'énergie ?

→ {Océans}_{93%} + {Cryosphère}_{3%} + {Continents}_{3%} + {Atmosphère}_{1%}

Où va l'excès d'énergie ?

→ {Océans}_{93%} + {Cryosphère}_{3%} + {Continents}_{3%} + {Atmosphère}_{1%}

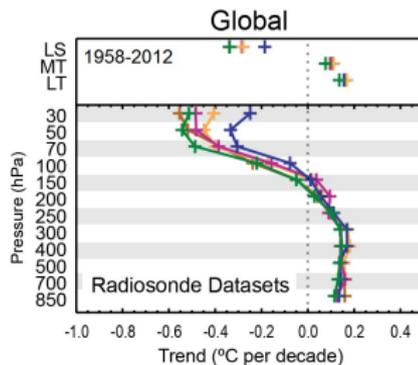
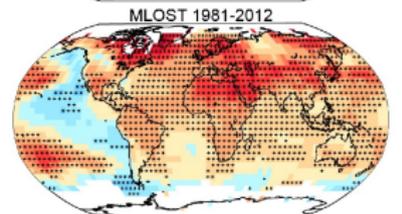
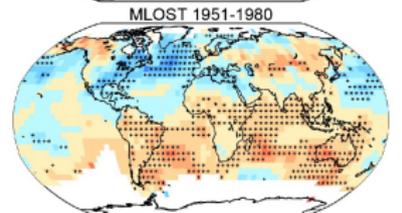
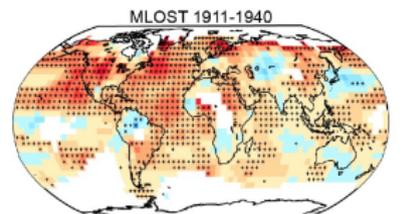
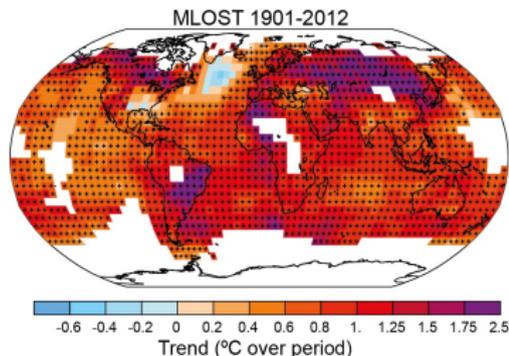


Source : IPCC AR5 (2013) FAQ 2.1 Fig. 1.

- ▶ Le système *s'échauffe* en réponse aux forçages externes & rétroactions.
- ▶ Ce *réchauffement global* se superpose à la variabilité interne.

Global ne signifie pas uniforme !

- Structures :
- horizontale,
 - verticale,
 - temporelle.



Source : IPCC AR5 (2013) Figs. 2.21, 2.22 et 2.26.

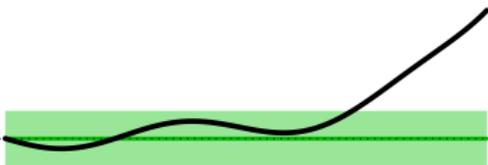
Peut-on détecter l'influence anthropique ?

► Principe de la détection et de l'attribution.

Utilisation des modèles de climat avec sélection des forçages.

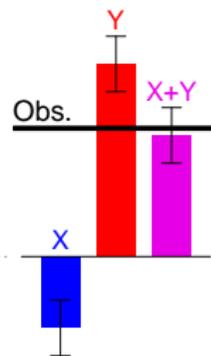
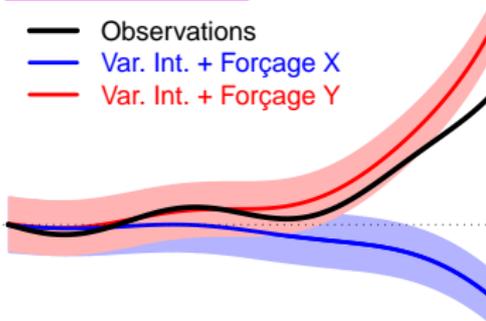
Détection

- Observations
- Variabilité Interne



Attribution

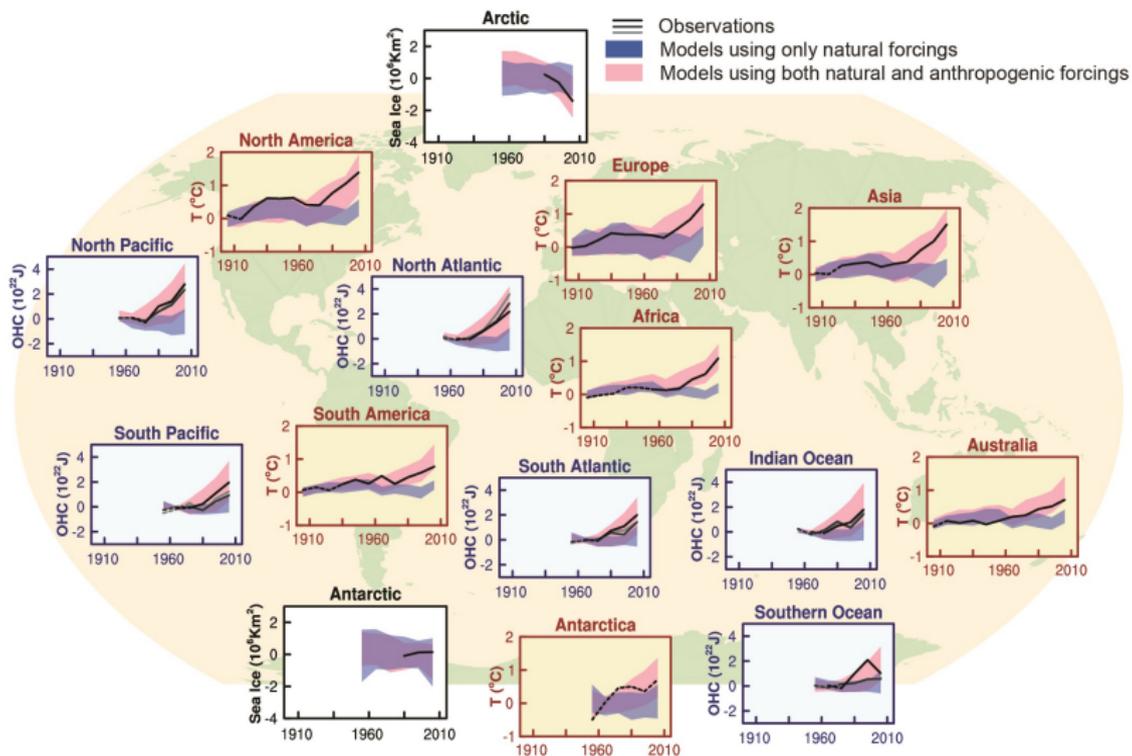
- Observations
- Var. Int. + Forçage X
- Var. Int. + Forçage Y



► Problématique de *rapport signal sur bruit*.

Méthodes statistiques et tests d'hypothèses.

Peut-on détecter l'influence anthropique ? Oui.



Source : IPCC AR5 (2013) Fig. SPM6.

Résumé

Les activités humaines induisent un *forçage* radiatif positif. L'effet des GES est atténué par celui des aérosols anthropiques.

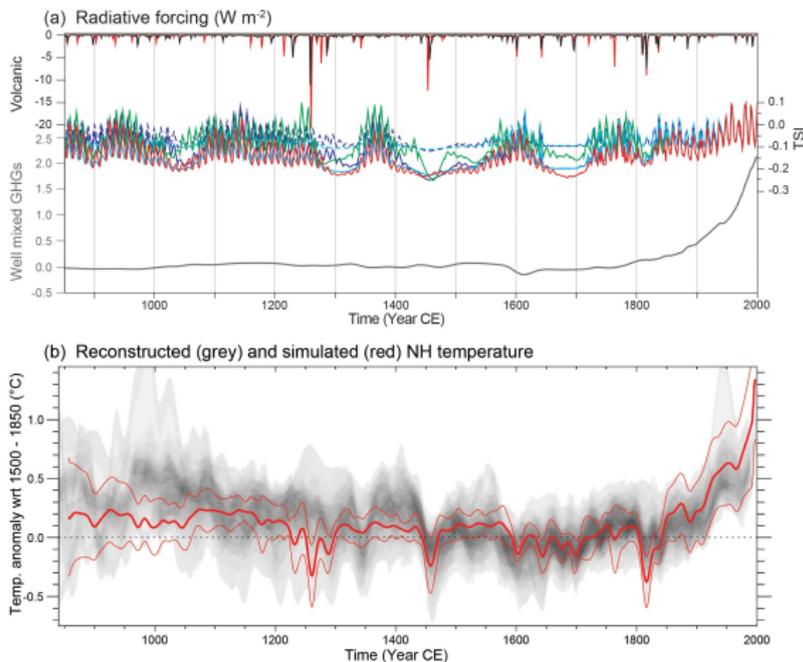
La réponse du système à ce forçage s'illustre par des *tendances observées* dans de multiples composantes du système, modulées par des *rétroactions*.

Certaines tendances observées ne peuvent pas être expliquées par les causes naturelles seules.

La détection du *signal* anthropique dans le *bruit* de la variabilité naturelle est limitée par la qualité des observations disponibles, la performance des modèles de climat, et la difficulté de séparer les effets des GES et des aérosols.

Un peu de recul

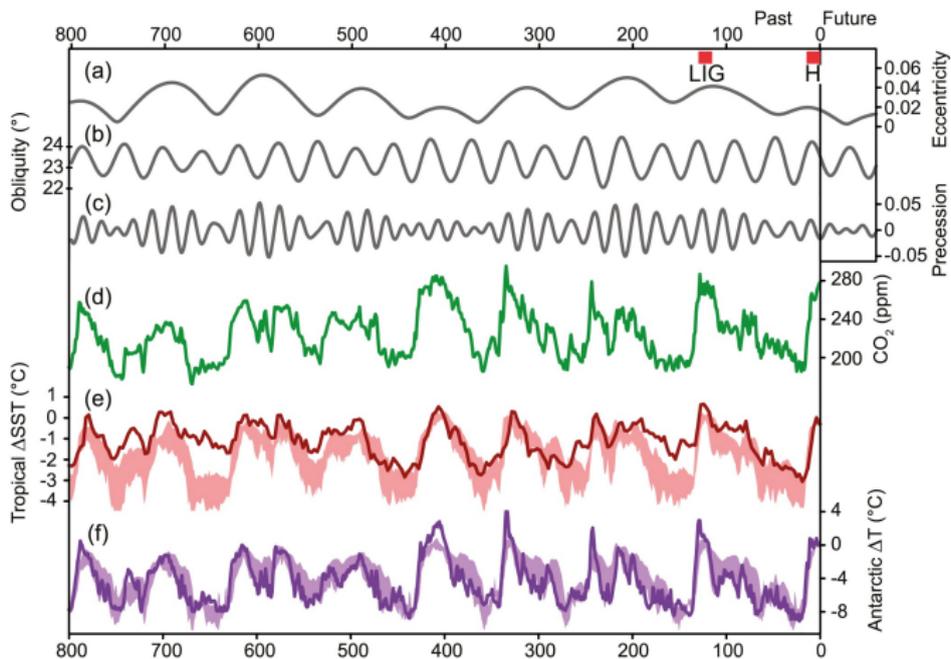
- Réchauffement actuel vs. dernier millénaire.



Source : IPCC AR5 (2013) Fig. TS Box 5.1.

Un peu *plus* de recul

- Réchauffement actuel vs. alternance glaciaire - inter-glaciaire.



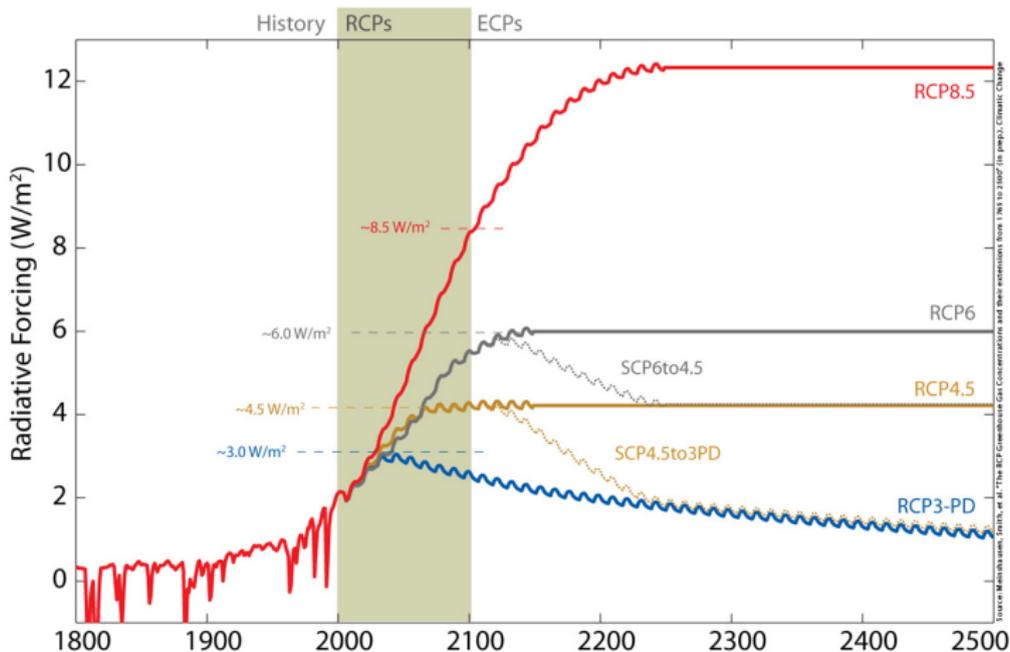
Source : IPCC AR5 (2013) Fig. 5.3.

Plan

- 1 Introduction
- 2 Le climat du système Terre et sa modélisation
- 3 Le changement climatique : principe physique et observations
- 4 Projections futures et principales incertitudes**
- 5 Quels impacts sur la météo et ses événements extrêmes ?

Quels scénarii pour le 21e siècle ?

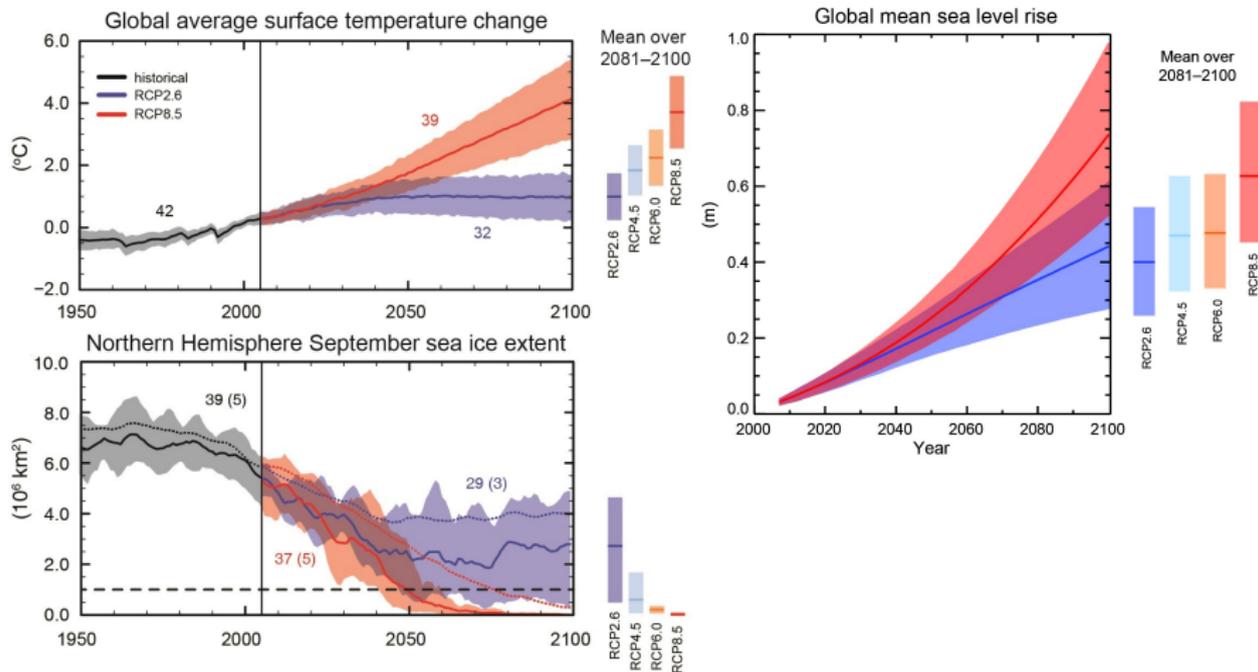
- Forçages résultant d'hypothèses *socio-économiques*.



Source : Meinhausen et al. (2011), infos [ici](#).

Projections futures

- Selon le scénario, un climat à la carte...



Source : IPCC AR5 (2013) Figs. SPM7 & SPM9.

Géographie du réchauffement de surface

Scénario bas

Scénario haut

Données : projections **CMIP5** – RCP2.6 : 21 GCMs – RCP8.5 : 33 GCMs.

Précip : *wet get wetter - dry get drier*

Scénario bas

Scénario haut

Données : projections **CMIP5** – RCP2.6 : 21 GCMs – RCP8.5 : 33 GCMs.

Changement climatique vs. variabilité interne

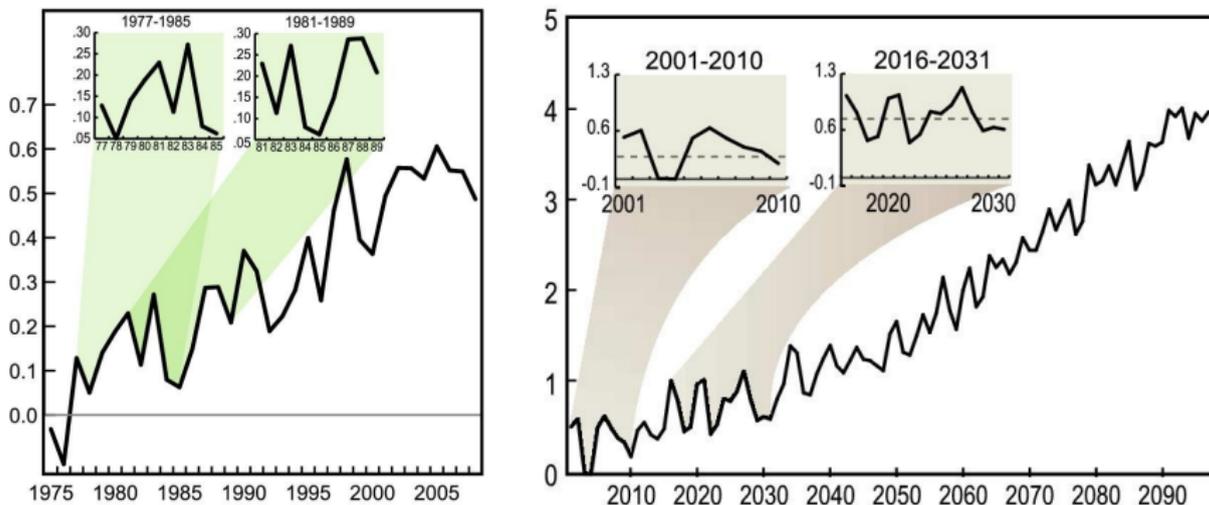
Température

Précipitations

Données : une projection du modèle CNRM-CM5 dans le scénario RCP8.5.

Changement climatique vs. variabilité interne

- La variabilité interne peut masquer temporairement le réchauffement. Exemple des **observations** et d'une projection de modèle (scénario haut).

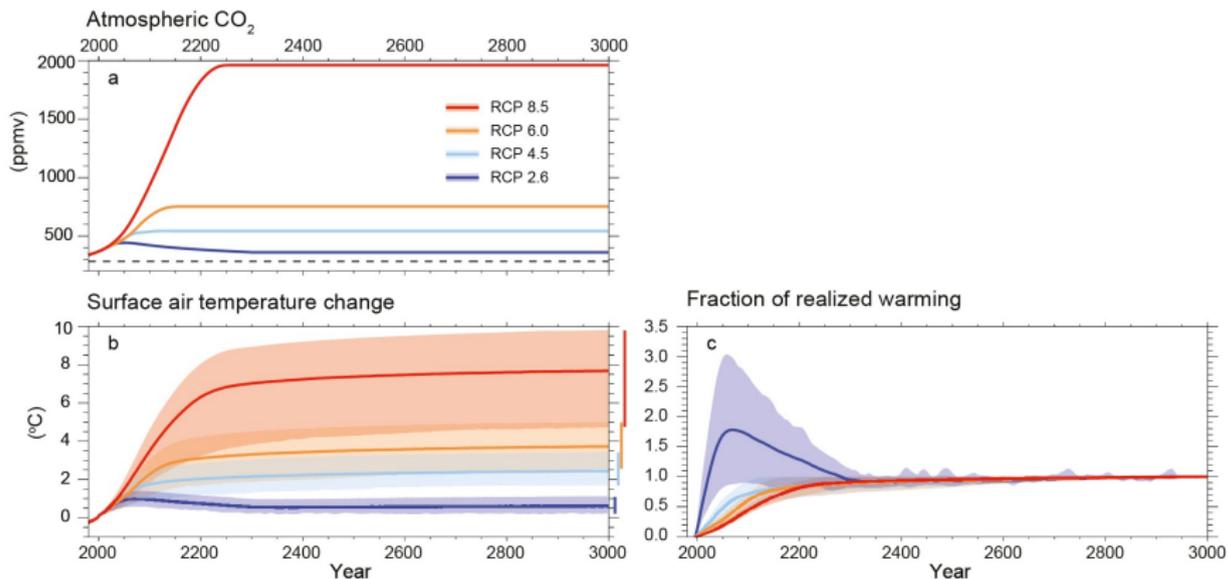


Température globale (anomalie en K). Source : Easterling and Wehner (2009).

À plus long terme

- Lente inertie du système (e.g. contenu de chaleur des océans profonds).

À lire : *The recalcitrant component of global warming*, sur le blog d'I. Held.



Source : IPCC AR5 (2013) Fig. 12.43.

Cascade d'incertitude

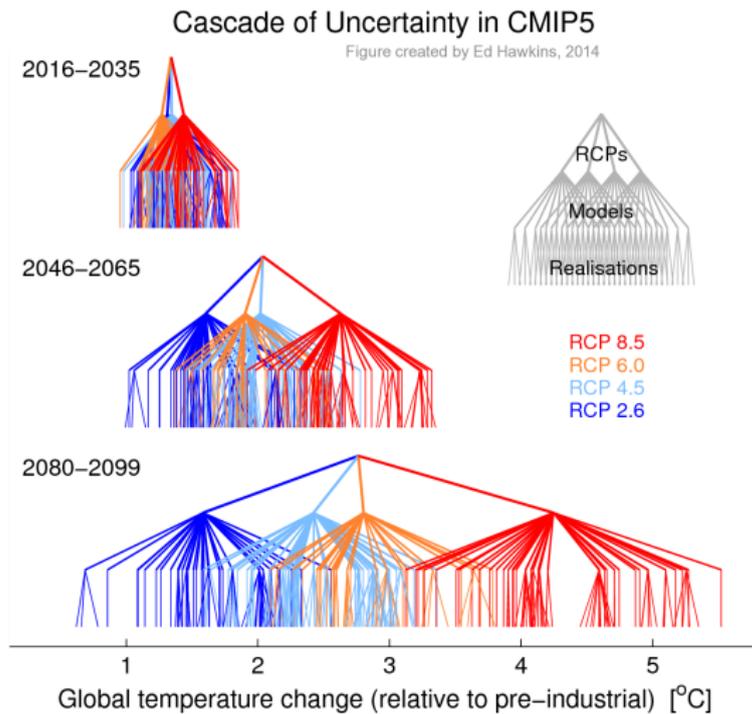
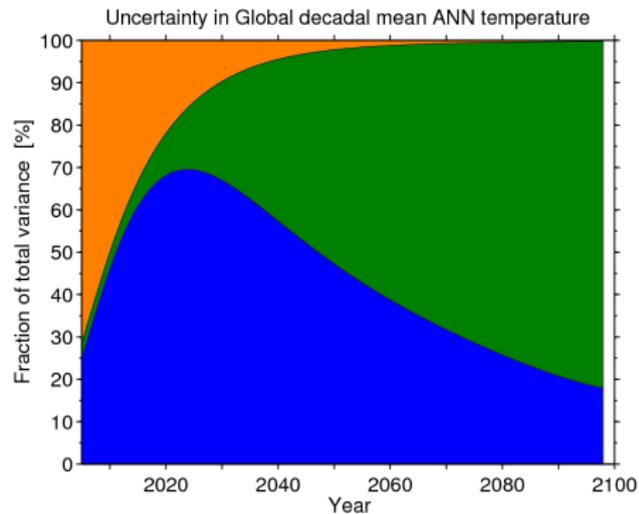
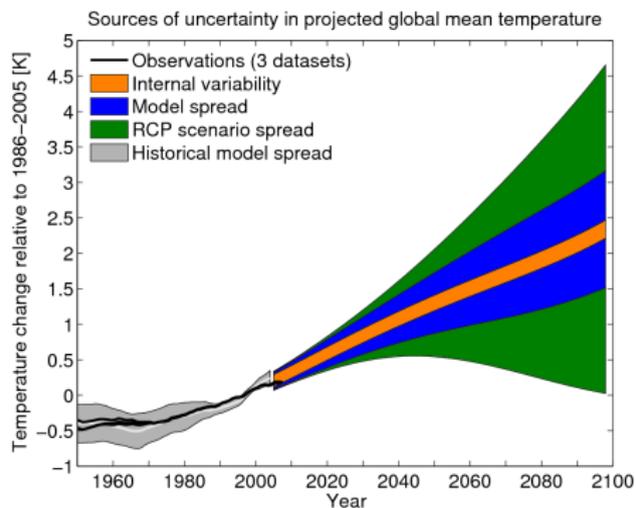


Figure de [E. Hawkins](#), à retrouver sur son [blog](#).

Poids des différentes sources d'incertitude

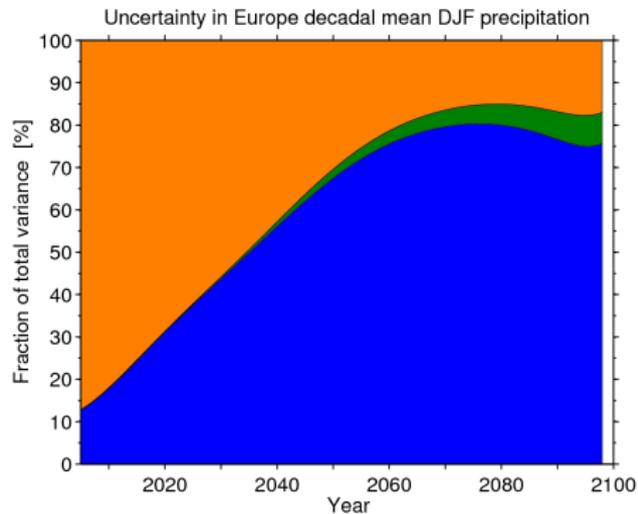
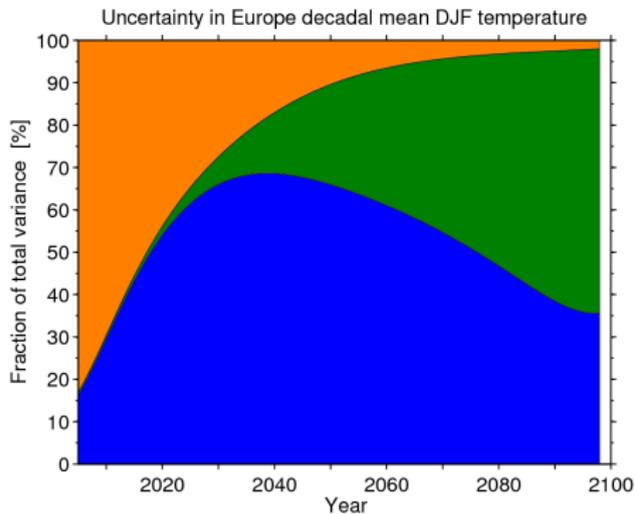
- Variabilité interne – Modèle – Scénario.



Figures de [E. Hawkins](#), à retrouver sur son [blog](#).

Poids des différentes sources d'incertitude

- Variabilité interne – Modèle – Scénario.

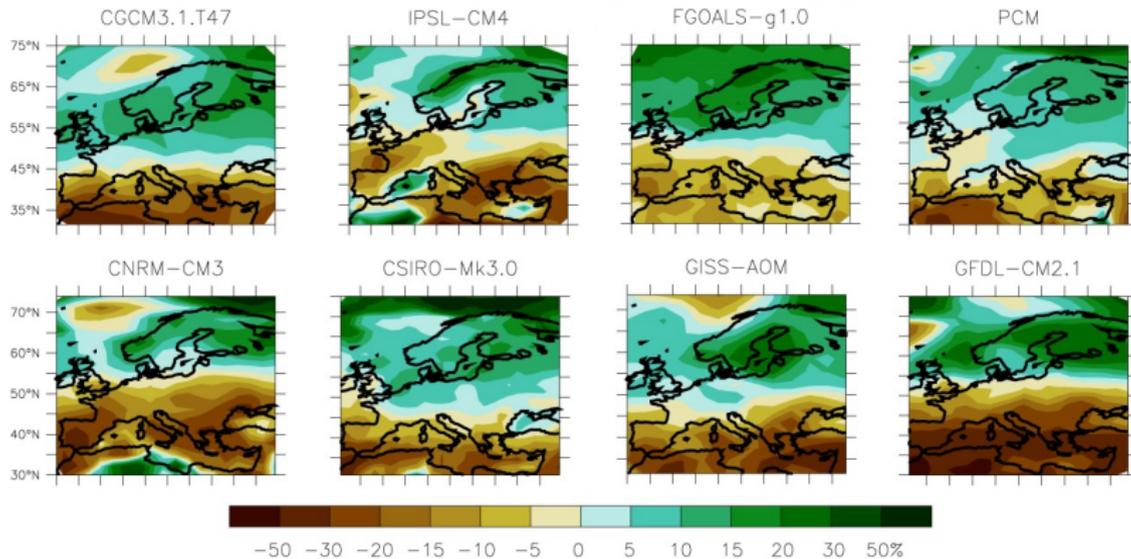


Figures de [E. Hawkins](#), à retrouver sur son [blog](#).

Incertitude *modèle* : exemple des précips Europe

- ▶ 2080–99 vs. 1980–99 dans le scénario A1B (intermédiaire).

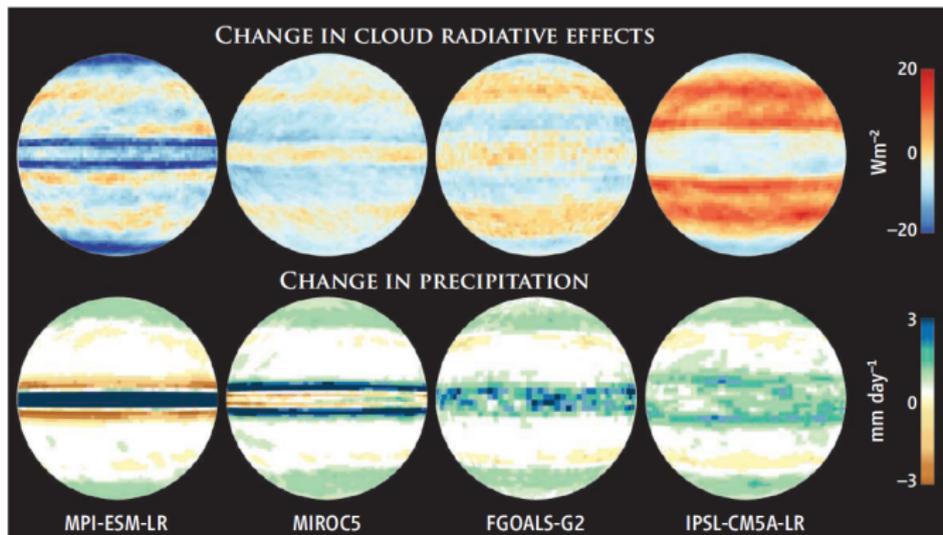
Annual Mean Precip Response (%)



Adapté de l'IPCC AR4 (2007) Fig. S11.14.

D'où vient l'incertitude *modèle* ?

- ▶ L'estimation de la *sensibilité climatique* n'a pas évolué depuis les 1970s. Fourchette 1.5–4.5°C pour $2\times[\text{CO}_2]$ déjà dans le rapport Charney (1979, [pdf](#)).
- ▶ Forte incertitude sur la réponse des nuages et des précip.



Source : Stevens and Bony (2013).

Résumé

Pour beaucoup d'indicateurs climatiques, l'incertitude majeure en 2100 est le *scénario* socio-économique.

Même dans le scénario le plus haut, la *variabilité interne* est capable de masquer ponctuellement l'effet du réchauffement.

Reste encore beaucoup à faire et à préciser : *sensibilité climatique* & réponse des nuages, niveau de la mer & fonte des *calottes glaciaires*, changements aux échelles *régionales*, impacts sur les *événements extrêmes* (cf. suite), etc.

Plan

- 1 Introduction
- 2 Le climat du système Terre et sa modélisation
- 3 Le changement climatique : principe physique et observations
- 4 Projections futures et principales incertitudes
- 5 Quels impacts sur la météo et ses événements extrêmes ?

Dis, c'est la faute au changement climatique ?

En France, en 15 ans...

Août 2003



Avril 2011



Juin 2013



Décembre 2009



Décembre 1999



Février 2010

Dis, c'est la faute au changement climatique ?

Dans le monde, en 2012...

USA



Mexique



Pékin



Genève

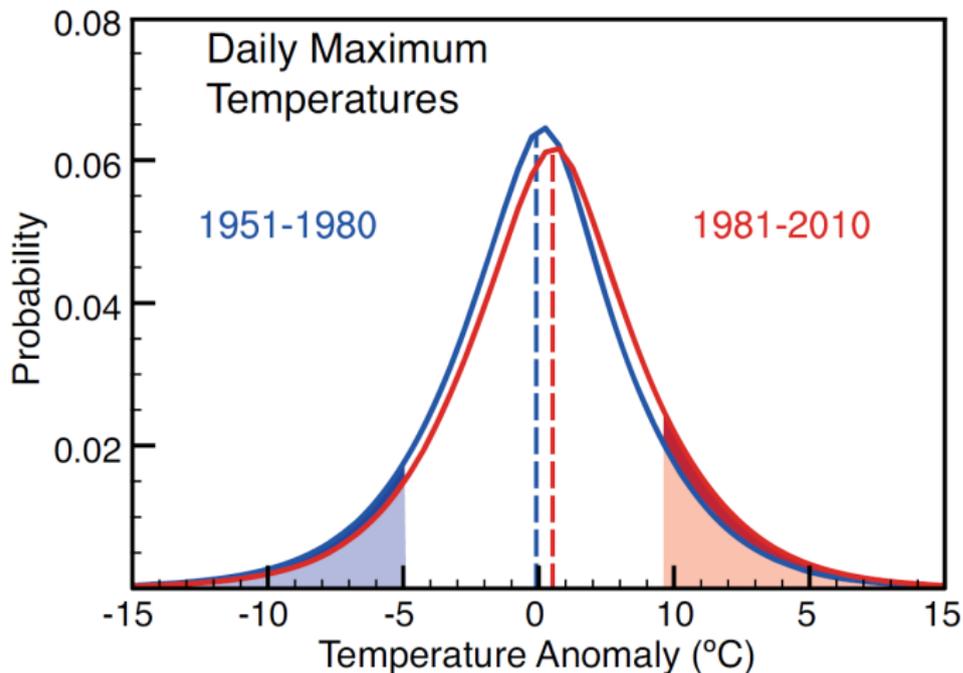


USA Atl.



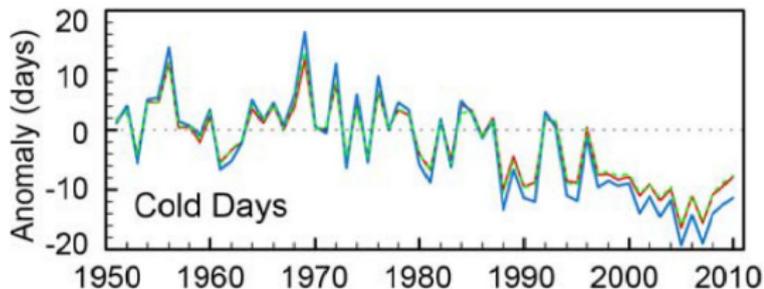
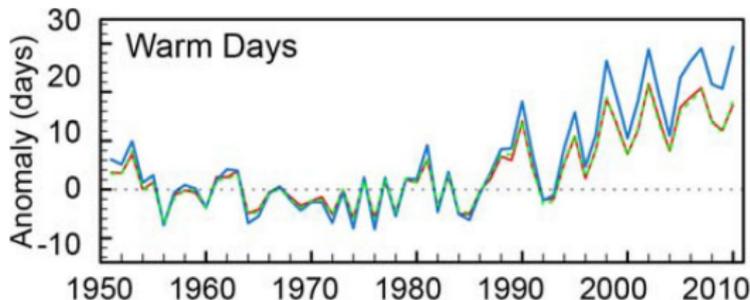
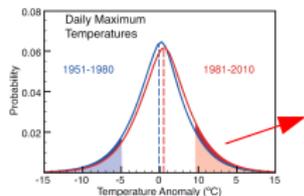
Groënland

Qu'implique un changement de distribution ?



Source : IPCC AR5 (2013) FAQ 2.2 Fig. 1.

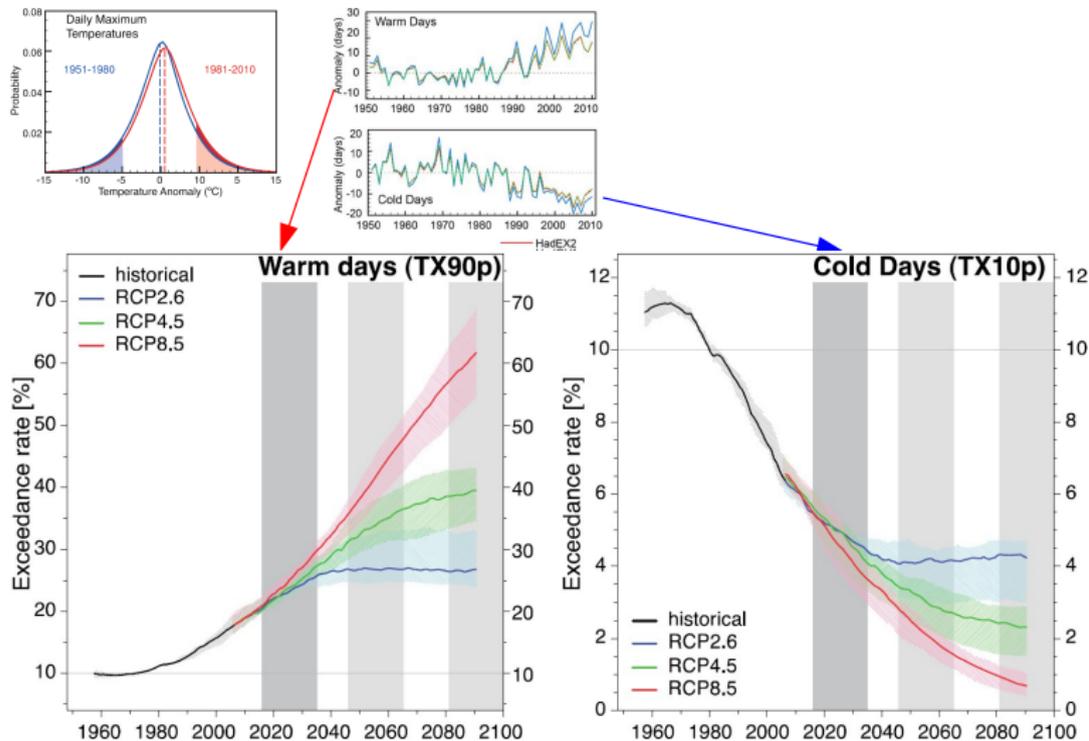
Qu'implique un changement de distribution ?



— HadEX2
— HadGHCND
- - - GHCNDEX

Source : IPCC AR5 (2013) FAQ 2.2 Fig. 1 & Fig. 2.32.

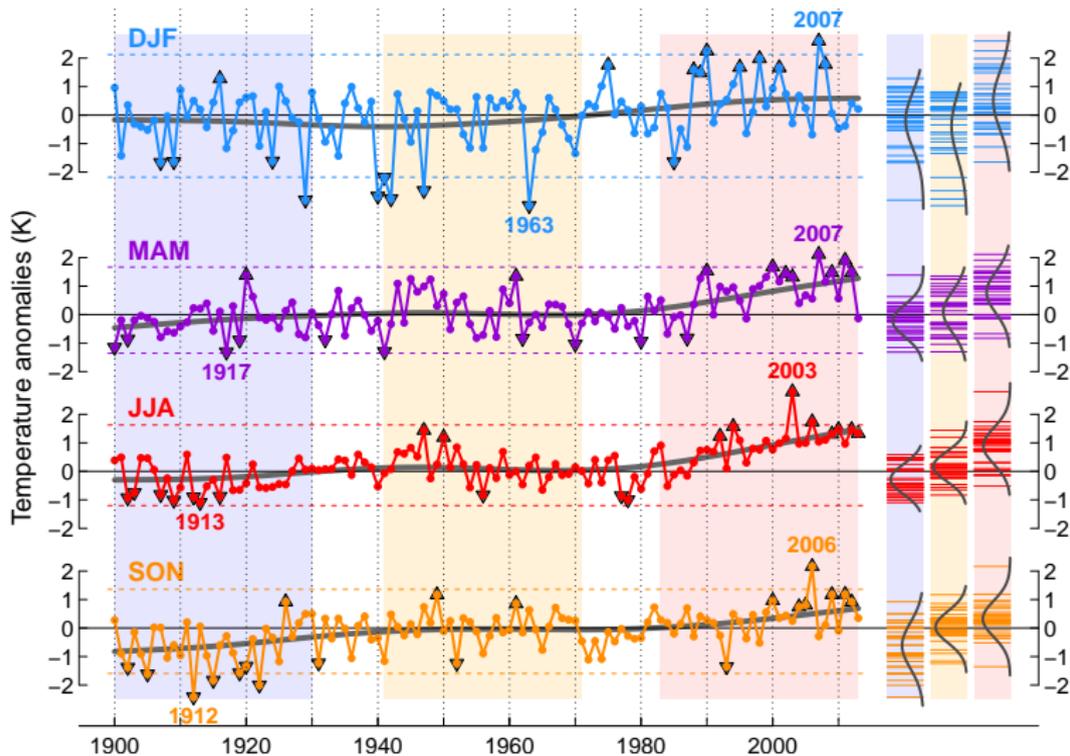
Qu'implique un changement de distribution ?



Source : IPCC AR5 (2013) FAQ 2.2 Fig. 1 & Fig. 2.32 & Fig. 11.17.

Plus près de chez nous

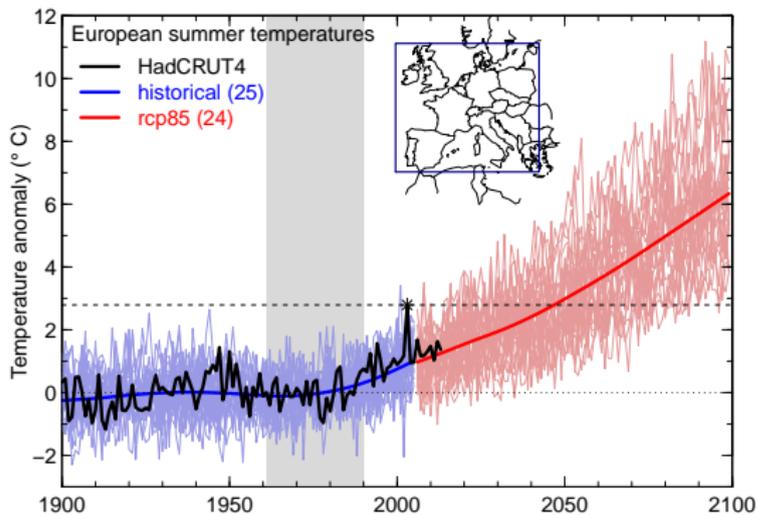
- Tous les *records chauds* saisonniers battus depuis 10 ans.



Adapté de
Cattiaux (2010).
Données :
HadCRUT4.

Un été 2003 tous les ans ?

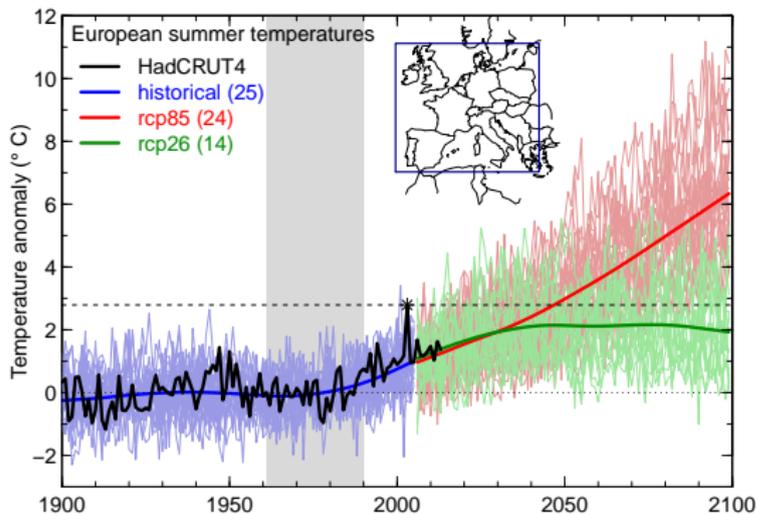
- Une T saisonnière Europe dans la moyenne d'ici 2050 en **scénario haut**.



Adapté de Stott et al. (2004)

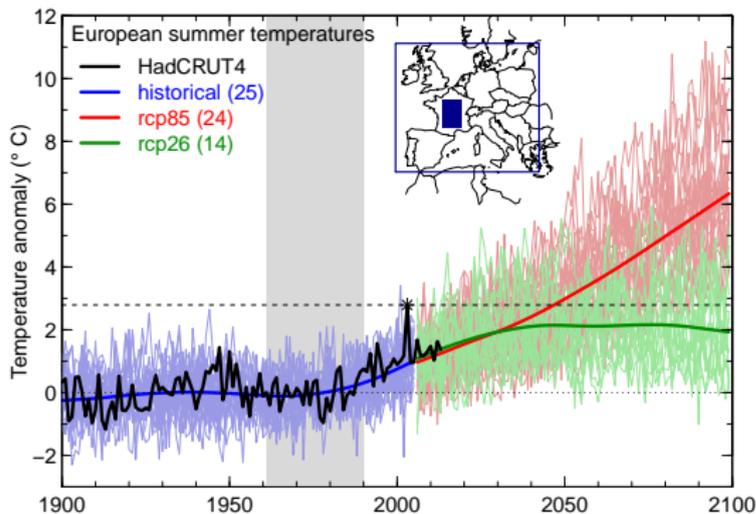
Un été 2003 tous les ans ?

- ▶ Une T saisonnière Europe dans la moyenne d'ici 2050 en **scénario haut**.
MAIS toujours élevée en 2100 en **scénario bas**.

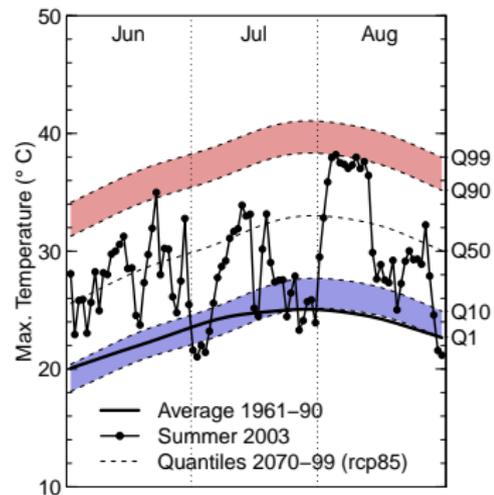


Un été 2003 tous les ans ?

- ▶ Une T saisonnière Europe dans la moyenne d'ici 2050 en **scénario haut**.
MAIS toujours élevée en 2100 en **scénario bas**.
- ▶ Certaines T quotidiennes FR encore *anormales* en 2100 en scénario haut.

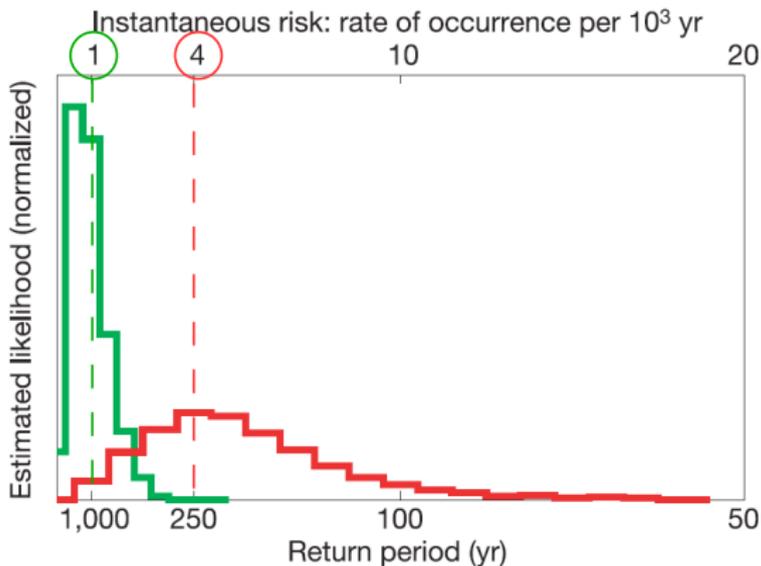


Adapté de Stott et al. (2004) et de Beniston (2007).



Influence anthropique sur l'été 2003

- Estimation du changement de *probabilité d'occurrence* de l'événement. Ici : probabilité **naturelle** multipliée par 4 [2–10] par **facteurs anthropiques**.

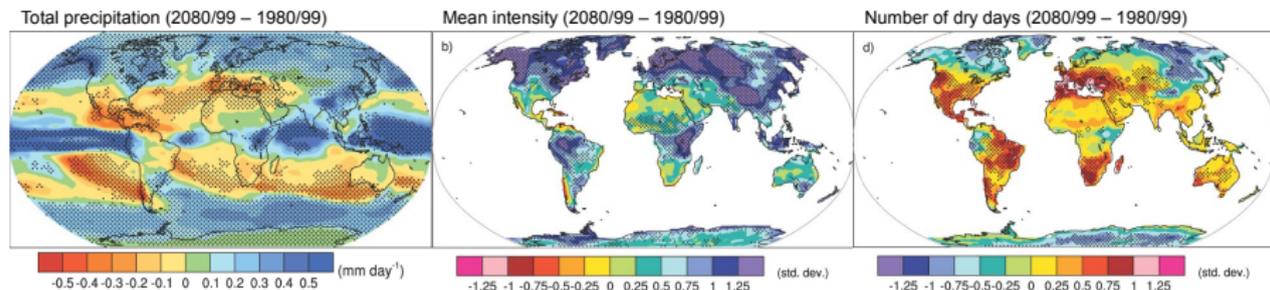


Source : Stott et al. (2004).

Plus d'infos sur les projections climatiques en France : visiter le [portail DRIAS](#).

Clausius-Clapeyron et les extrêmes hydrologiques

- *Un air plus chaud peut contenir plus de vapeur d'eau* ($\partial_T \ln(e_s) = L/RT^2$).
Intensification du cycle hydrologique.



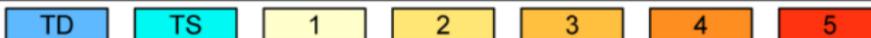
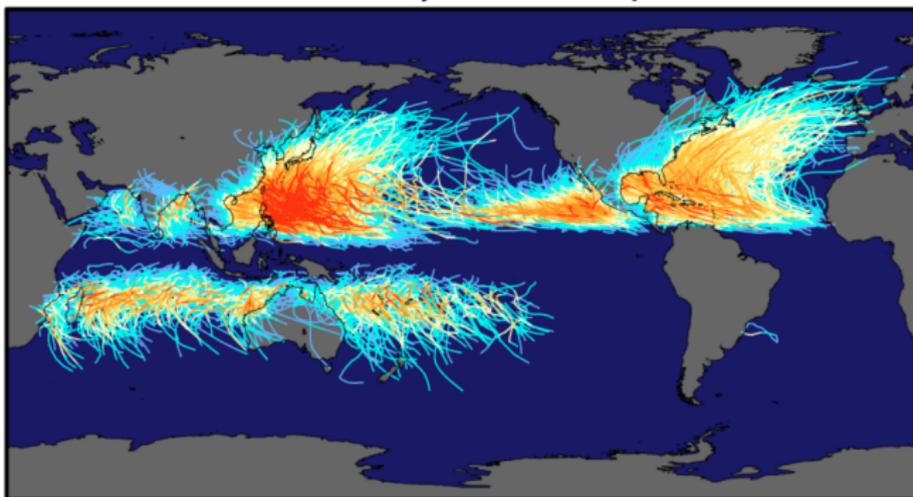
Source : IPCC AR4 (2007) Figs. 10.12 et 10.18.

- **Précipitations intenses** : **augmentation** projetée & partiellement observée, influence anthropique *détectée* sur certains événements (Pall et al. (2011)), pas de signal clair sur les crues.
- **Sécheresses** : **augmentation probable** dans certaines régions (dont Europe méridionale), mais pas de signal *détecté* (Dai et al. (2011 vs. 2004)).

Cyclones tropicaux

- ▶ Se forment sous certaines conditions *thermiques* et *dynamiques*.

Tracks and Intensity of All Tropical Storms



Saffir-Simpson Hurricane Intensity Scale

Crédits : NASA Earth Observatory, infos [ici](#).

Cyclones tropicaux et changement climatique

► À quoi peut-on s'attendre ?

Fréquence globale *probablement à la baisse* ou constante.

Augmentation probable des vents max dans certains bassins.

Augmentation probable des phénomènes associés : précips, surcôtes.

Exemple : proba inondations Sandy multipliée par 2 (Sweet et al. (2012)).

—

MAIS pas de tendance *détectée* à l'heure actuelle.

Forte variabilité, hétérogénéité des observations, insuffisances des modèles.

Un mot sur les tempêtes

- Origine principalement *atmosphérique*.

Filter: storms ; first season ; last season .



Crédits : [Atlas](#) de l'Université de Reading.

- Quelles tendances ?

Décalage vers les pôles, observé et projeté (*probable*).

MAIS pas d'*attribution* formelle aux forçages anthropiques (forte variabilité !).

Résumé

Le changement climatique modifie-t-il les événements extrêmes ?

Oui. Signaux clairs pour certains (e.g. température), plus complexes pour d'autres (e.g. cyclones).

—

Peut-on imputer un événement au changement climatique ?

Non. Mais on peut estimer comment sa *probabilité d'occurrence* a été modifiée.

Références I

- ▶ M. Beniston, *Entering into the "greenhouse century": Recent record temperatures in Switzerland are comparable to the upper temperature quantiles in a greenhouse climate*, *Geophys. Res. Lett.* **34** (2007), no. 16, 16710.
- ▶ J. Cattiaux, *Extrêmes de température en Europe : mécanismes et réponses au changement climatique*, PhD Thesis, 2010.
- ▶ A. Dai, *Drought under global warming: a review*, *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change* **2** (2011), no. 1, 45–65.
- ▶ J.-L. Dufresne and S. Bony, *An Assessment of the Primary Sources of Spread of Global Warming Estimates from Coupled Atmosphere–Ocean Models.*, *J. Clim.* **21** (2008), no. 19.
- ▶ A. Dai, K.E. Trenberth, and T. Qian, *A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming*, *J. Hydrometeor.* **5** (2004), no. 6, 1117–1130.
- ▶ D.R. Easterling and M.F. Wehner, *Is the climate warming or cooling?*, *Geophys. Res. Lett.* **36** (2009), no. 8.
- ▶ J.T. Fasullo and K.E. Trenberth, *The annual cycle of the energy budget. Part II: Meridional structures and poleward transports*, *J. Clim.* **21** (2008), no. 10.
- ▶ H. Goosse, P.Y. Barriat, W. Lefebvre, M.F. Loutre, and V. Zunz, *Introduction to climate dynamics and climate modeling*, online textbook available at <http://www.elic.ucl.ac.be/textbook>, 2014.
- ▶ C. Gao, A. Robock, and C. Ammann, *Volcanic forcing of climate over the past 1500 years: An improved ice core-based index for climate models*, *J. Geophys. Res.* **113** (2008), no. D23, 1984–2012.

Références II

- ▶ D. Koch, S. Menon, A. Del Genio, R. Ruedy, I. Alienov, and G.A. Schmidt, *Distinguishing aerosol impacts on climate over the past century*, J. Clim. **22** (2009), no. 10.
- ▶ J.T. Kiehl and K.E. Trenberth, *Earth's annual global mean energy budget*, Bull. Am. Meteorol. Soc. **78** (1997), no. 2, 197–208.
- ▶ F.K. Lutgens and E.J. Tarbuck, *The Atmosphere: an Introduction to Meteorology*, Prentice Hall, 2001.
- ▶ P. Pall, T. Aina, D.A. Stone, P.A. Stott, T. Nozawa, A.G.J. Hilberts, D. Lohmann, and M.R. Allen, *Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000*, Nature **470** (2011), no. 7334, 382–385.
- ▶ B. Stevens and S. Bony, *What are climate models missing*, Science **340** (2013), no. 6136, 1053–1054.
- ▶ P.A. Stott, D.A. Stone, and M.R. Allen, *Human contribution to the European heatwave of 2003*, Nature **432** (2004), no. 7017, 559–60.
- ▶ W. Sweet, C. Zervas, S. Gill, and J. Park, *Hurricane Sandy inundation probabilities today and tomorrow*, in “Explaining Extreme Events of 2012 from a Climate Perspective”, Bull. Am. Meteorol. Soc. **94** (2013), no. 9, S17–S20.
- ▶ K.E. Trenberth and D.P. Stepaniak, *Covariability of components of poleward atmospheric energy transports on seasonal and interannual timescales*, J. Clim. **16** (2003), no. 22.