

Événements météorologiques extrêmes et changement climatique

Julien Cattiaux

Chercheur CNRS

Laboratoire CNRM-GAME, CNRS/Météo-France, Toulouse

Formaterre, IFÉ/ENS Lyon

13 Novembre 2015

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

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

C'est quoi un extrême ? – Illustrations

C'est quoi un extrême ? – Illustrations

En France, en 15 ans. . .

Août 2003



Avril 2011



Juin 2013



Décembre 2009



Décembre 1999



Février 2010

C'est quoi un extrême ? – Illustrations

Dans le monde, en une année (2012)...

USA



Mexique



Pékin



Genève



USA Atl.



Groënland

Des questions légitimes...

Des questions légitimes. . .

Y a-t-il de plus en plus d'événements extrêmes ?

Des questions légitimes. . .

Y a-t-il de plus en plus d'événements extrêmes ?

Sont-ils de plus en plus intenses ?

Des questions légitimes. . .

Y a-t-il de plus en plus d'événements extrêmes ?

Sont-ils de plus en plus intenses ?

Est-ce la faute du réchauffement climatique ? De l'Homme ?

Des questions légitimes. . .

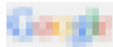
Y a-t-il de plus en plus d'événements extrêmes ?

Sont-ils de plus en plus intenses ?

Est-ce la faute du réchauffement climatique ? De l'Homme ?

Comment est-ce que tout ça va évoluer ?

... et des réponses variées !

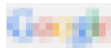


quel sens donner aux extrêmes dans le contexte du changement climatique?



Appuyez sur Entrée pour lancer la recherche.

... et des réponses variées !



quel sens donner aux extrêmes dans le contexte du changement climatique?

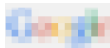


Appuyez sur Entrée pour lancer la recherche.

- ▶ [France 24](#), 27/09/2013, interview d'un climatologue :

"Il y a clairement une multiplication des événements extrêmes", note ce climatologue. [...] le réchauffement de l'atmosphère dû aux émissions de gaz à effet de serre fournit l'énergie nécessaire au déclenchement de ces événements. Pour lui, même les ouragans de type Sandy [...] proviennent du réchauffement climatique.

... et des réponses variées !



quel sens donner aux extrêmes dans le contexte du changement climatique?



Appuyez sur Entrée pour lancer la recherche.

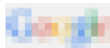
- ▶ [France 24](#), 27/09/2013, interview d'un climatologue :

"Il y a clairement une multiplication des événements extrêmes", note ce climatologue. [...] le réchauffement de l'atmosphère dû aux émissions de gaz à effet de serre fournit l'énergie nécessaire au déclenchement de ces événements. Pour lui, même les ouragans de type Sandy [...] proviennent du réchauffement climatique.

- ▶ [Le Nouvel Obs](#), 29/09/2013, tribune d'un mathématicien :

"La température de la Terre n'augmente plus depuis quinze ans [...] Les répliques de la canicule de 2003 se font attendre. Sandy n'est pas Katrina. L'activité cyclonique est à un niveau particulièrement bas ces dernières années."

... et des réponses variées !



Appuyez sur Entrée pour lancer la recherche.

- ▶ [France 24](#), 27/09/2013, interview d'un climatologue :
"Il y a clairement une multiplication des événements extrêmes", note ce climatologue. [...] le réchauffement de l'atmosphère dû aux émissions de gaz à effet de serre fournit l'énergie nécessaire au déclenchement de ces événements. Pour lui, même les ouragans de type Sandy [...] proviennent du réchauffement climatique.
- ▶ [Le Nouvel Obs](#), 29/09/2013, tribune d'un mathématicien :
"La température de la Terre n'augmente plus depuis quinze ans [...] Les répliques de la canicule de 2003 se font attendre. Sandy n'est pas Katrina. L'activité cyclonique est à un niveau particulièrement bas ces dernières années."

Que dit la littérature scientifique ?

Un état de l'art régulièrement actualisé

Depuis 1990, les scientifiques produisent régulièrement des **rapports de synthèse** (AR). La coordination est assurée par le **GIEC** (IPCC), créé en 1988 par l'ONU et l'OMM.



Un état de l'art régulièrement actualisé

Depuis 1990, les scientifiques produisent régulièrement des **rapports de synthèse** (AR). La coordination est assurée par le **GIEC** (IPCC), créé en 1988 par l'ONU et l'OMM.



“Le GIEC n'est pas scientifique mais politique / politisé.”

Un état de l'art régulièrement actualisé

Depuis 1990, les scientifiques produisent régulièrement des **rapports de synthèse** (AR). La coordination est assurée par le **GIEC** (IPCC), créé en 1988 par l'ONU et l'OMM.



“Le GIEC n'est pas scientifique mais politique / politisé.”

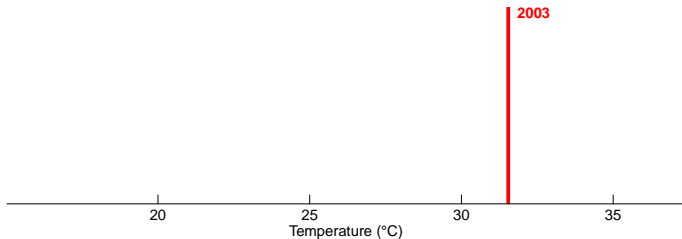
→ Faux.

Les rapports coordonnés par le GIEC sont des synthèses des connaissances *scientifiques* faites par des *scientifiques* selon la procédure *scientifique* de publication *peer-reviewed*.

C'est quoi un extrême ? – Définition plus scientifique

En août 2003, en France et en journée, il a fait en moyenne **31.5 °C**.

Température en journée, France, mois d'août



Données : Météo-France.

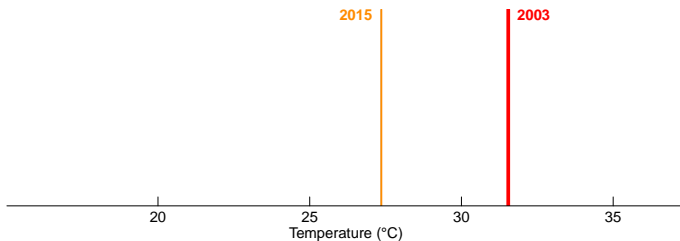
Un extrême est météo. Les extrêmes renseignent sur le climat (*queues*).

C'est quoi un extrême ? – Définition plus scientifique

En août 2003, en France et en journée, il a fait en moyenne 31.5°C .

Mais d'autres T possibles : il suffit de regarder **les autres années** !

Température en journée, France, mois d'août



Données : Météo-France.

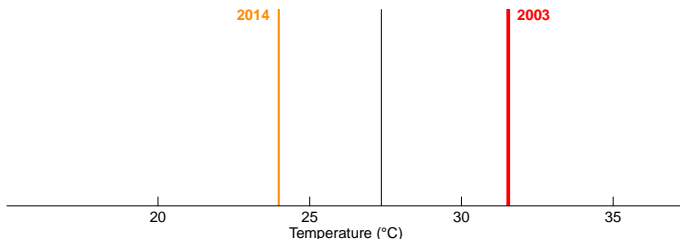
Un extrême est météo. **Les extrêmes** renseignent sur le climat (*queues*).

C'est quoi un extrême ? – Définition plus scientifique

En août 2003, en France et en journée, il a fait en moyenne **31.5 °C**.

Mais d'autres T possibles : il suffit de regarder **les autres années** !

Température en journée, France, mois d'août



Données : Météo-France.

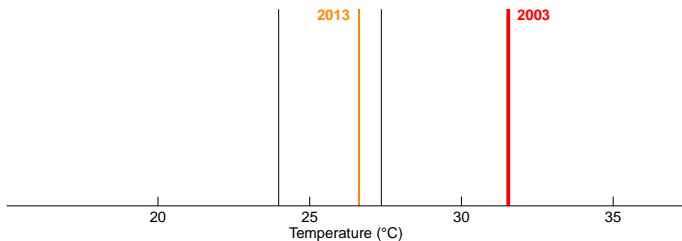
Un extrême est météo. **Les extrêmes** renseignent sur le climat (*queues*).

C'est quoi un extrême ? – Définition plus scientifique

En août 2003, en France et en journée, il a fait en moyenne 31.5°C .

Mais d'autres T possibles : il suffit de regarder **les autres années** !

Température en journée, France, mois d'août



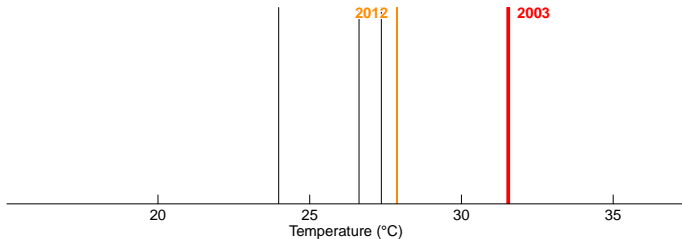
Données : Météo-France.

Un extrême est météo. **Les extrêmes** renseignent sur le climat (*queues*).

C'est quoi un extrême ? – Définition plus scientifique

En août 2003, en France et en journée, il a fait en moyenne 31.5°C .
Mais d'autres T possibles : il suffit de regarder **les autres années** !

Température en journée, France, mois d'août



Données : Météo-France.

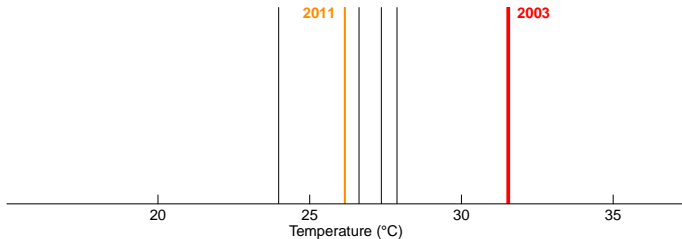
Un extrême est météo. **Les extrêmes** renseignent sur le climat (*queues*).

C'est quoi un extrême ? – Définition plus scientifique

En août 2003, en France et en journée, il a fait en moyenne **31.5 °C**.

Mais d'autres T possibles : il suffit de regarder **les autres années** !

Température en journée, France, mois d'août



Données : Météo-France.

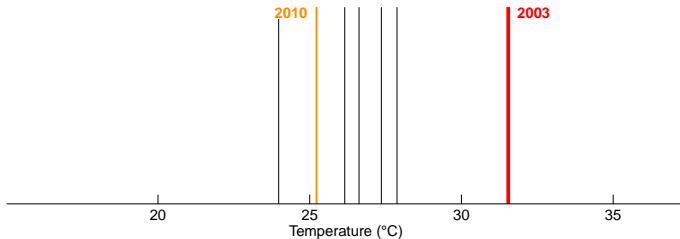
Un extrême est météo. **Les extrêmes** renseignent sur le climat (*queues*).

C'est quoi un extrême ? – Définition plus scientifique

En août 2003, en France et en journée, il a fait en moyenne 31.5°C .

Mais d'autres T possibles : il suffit de regarder **les autres années** !

Température en journée, France, mois d'août



Données : Météo-France.

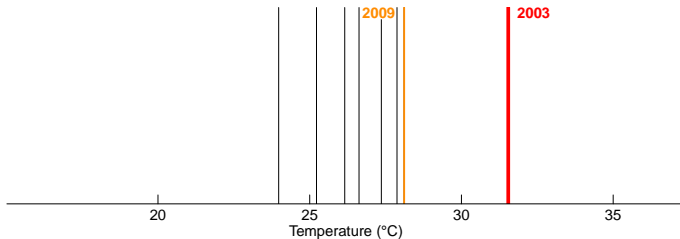
Un extrême est météo. **Les extrêmes** renseignent sur le climat (*queues*).

C'est quoi un extrême ? – Définition plus scientifique

En août 2003, en France et en journée, il a fait en moyenne 31.5°C .

Mais d'autres T possibles : il suffit de regarder **les autres années** !

Température en journée, France, mois d'août



Données : Météo-France.

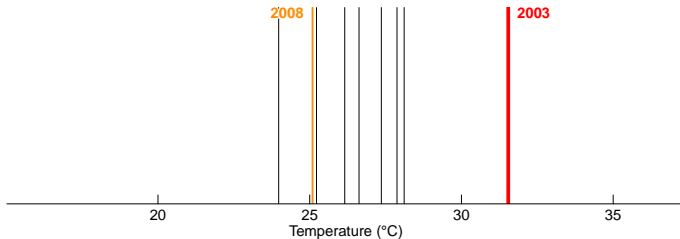
Un extrême est météo. **Les extrêmes** renseignent sur le climat (*queues*).

C'est quoi un extrême ? – Définition plus scientifique

En août 2003, en France et en journée, il a fait en moyenne 31.5°C .

Mais d'autres T possibles : il suffit de regarder **les autres années** !

Température en journée, France, mois d'août



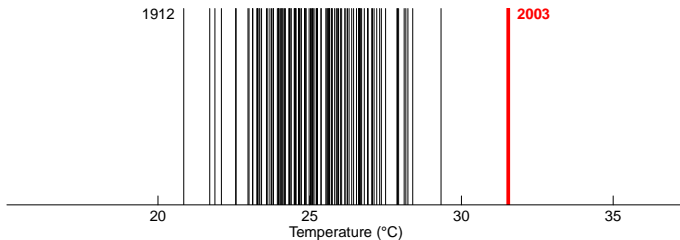
Données : Météo-France.

Un extrême est météo. **Les extrêmes** renseignent sur le climat (*queues*).

C'est quoi un extrême ? – Définition plus scientifique

En août 2003, en France et en journée, il a fait en moyenne 31.5°C .
Mais d'autres T possibles : il suffit de regarder **les autres années** !

Température en journée, France, mois d'août



Données : Météo-France.

Un extrême est météo. **Les extrêmes** renseignent sur le climat (*queues*).

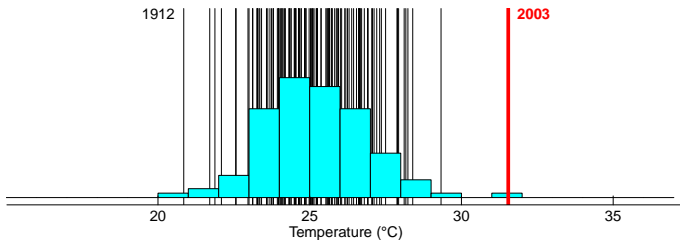
C'est quoi un extrême ? – Définition plus scientifique

En août 2003, en France et en journée, il a fait en moyenne 31.5°C .

Mais d'autres T possibles : il suffit de regarder **les autres années** !

Au final, on peut construire l'**histogramme** des T possibles.

Température en journée, France, mois d'août



Données : Météo-France.

Un extrême est météo. **Les extrêmes** renseignent sur le climat (*queues*).

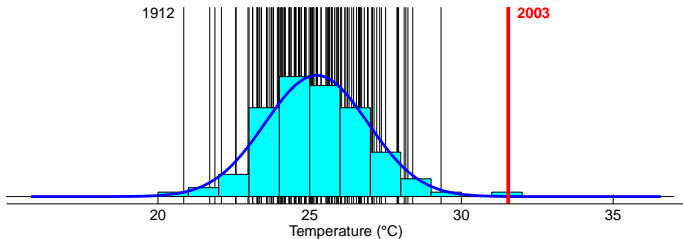
C'est quoi un extrême ? – Définition plus scientifique

En août 2003, en France et en journée, il a fait en moyenne 31.5°C .

Mais d'autres T possibles : il suffit de regarder **les autres années** !

Au final, on peut construire l'**histogramme** des T possibles.

Température en journée, France, mois d'août



Données : Météo-France.

Le **climat** est l'ensemble des **météos** possibles (*distribution*).

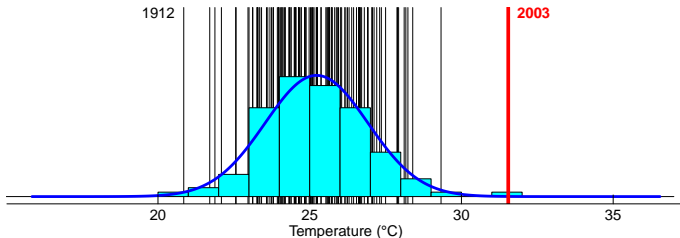
C'est quoi un extrême ? – Définition plus scientifique

En août 2003, en France et en journée, il a fait en moyenne 31.5°C .

Mais d'autres T possibles : il suffit de regarder **les autres années** !

Au final, on peut construire l'**histogramme** des T possibles.

Température en journée, France, mois d'août



Données : Météo-France.

Le **climat** est l'ensemble des **météos** possibles (*distribution*).
Un extrême est **météo**. **Les extrêmes** renseignent sur le **climat** (*queues*).

Météo vs. climat

Le *climat* est la distribution probabiliste des *météos* possibles.
T, P, V etc.

Météo vs. climat

Le *climat* est la distribution probabiliste des *météos* possibles.
T, P, V etc.

Au premier ordre, il peut être décrit par sa moyenne : les fameuses *normales*.
La convention OMM est de les calculer sur 30 ans (actuellement 1981–2010).

Météo vs. climat

Le *climat* est la distribution probabiliste des *météos* possibles.
T, P, V etc.

Au premier ordre, il peut être décrit par sa moyenne : les fameuses *normales*.
La convention OMM est de les calculer sur 30 ans (actuellement 1981–2010).

Par définition, la météo n'est jamais normale : c'est la *variabilité climatique*.

Météo vs. climat

Le *climat* est la distribution probabiliste des *météos* possibles.
T, P, V etc.

Au premier ordre, il peut être décrit par sa moyenne : les fameuses *normales*.
La convention OMM est de les calculer sur 30 ans (actuellement 1981–2010).

Par définition, la météo n'est jamais normale : c'est la *variabilité climatique*.

—

“Comment prétendre prévoir le climat alors qu'on ne sait pas (bien) prévoir la météo ?”

Météo vs. climat

Le *climat* est la distribution probabiliste des *météos* possibles.
T, P, V etc.

Au premier ordre, il peut être décrit par sa moyenne : les fameuses *normales*.
La convention OMM est de les calculer sur 30 ans (actuellement 1981–2010).

Par définition, la météo n'est jamais normale : c'est la *variabilité climatique*.

—
“Comment prétendre prévoir le 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, effet papillon), sa *distribution de probabilité* est déterminée par de grands équilibres physiques (cf. la suite).

Plan de l'exposé

- 1 Introduction : extrêmes, météo, climat.
- 2 Physique du climat, effet de serre et modélisation
- 3 Changement climatique actuel : théorie, observations, projections
- 4 Quels impacts sur les événements météorologiques extrêmes ?

Plan de l'exposé

- 1 Introduction : extrêmes, météo, climat.
- 2 Physique du climat, effet de serre et modélisation
- 3 Changement climatique actuel : théorie, observations, projections
- 4 Quels impacts sur les événements météorologiques extrêmes ?

Rayonnement et énergie : généralités

Rayonnement et énergie : généralités

1. Tout corps émet du rayonnement et ainsi perd de l'énergie.

L'émission peut être dans le visible (soleil, lampe à filament, etc.), mais pas seulement : exemple du rayonnement infra-rouge capturé par une caméra thermique.

Rayonnement et énergie : généralités

1. Tout corps émet du rayonnement et ainsi perd de l'énergie.

L'émission peut être dans le visible (soleil, lampe à filament, etc.), mais pas seulement : exemple du rayonnement infra-rouge capturé par une caméra thermique.

2. Plus la température du corps est élevée, plus le rayonnement est fort.

Loi de Stefan-Boltzmann : $E = \sigma T^4$, avec $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

Rayonnement et énergie : généralités

1. Tout corps émet du rayonnement et ainsi perd de l'énergie.

L'émission peut être dans le visible (soleil, lampe à filament, etc.), mais pas seulement : exemple du rayonnement infra-rouge capturé par une caméra thermique.

2. Plus la température du corps est élevée, plus le rayonnement est fort.

Loi de Stefan-Boltzmann : $E = \sigma T^4$, avec $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

3. Tout corps tend à équilibrer son bilan d'énergie.

S'il reçoit plus d'énergie qu'il n'en perd, sa température augmente.

S'il reçoit moins d'énergie qu'il n'en perd, sa température diminue.

Bilan d'énergie du système {Terre} 1/2

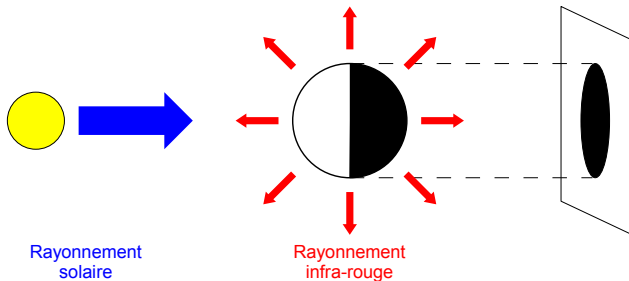
Système {Terre} : Atmosphère ↔ Océans ↔ Continents ↔ Cryosphère

Bilan d'énergie du système {Terre} 1/2

Système {Terre} : Atmosphère ↔ Océans ↔ Continents ↔ Cryosphère

Énergie entrante : rayonnement solaire arrivant sur un disque (πR^2).

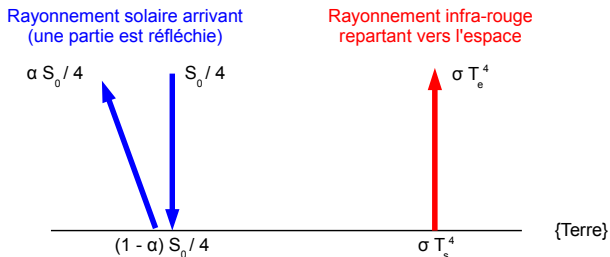
Énergie sortante : rayonnement infra-rouge émis par une sphère ($4\pi R^2$).



A l'équilibre : $E_{\text{solaire}} = E_{\text{infra-rouge}}$.

Bilan d'énergie du système {Terre} 2/2

S'il n'y avait pas d'atmosphère :

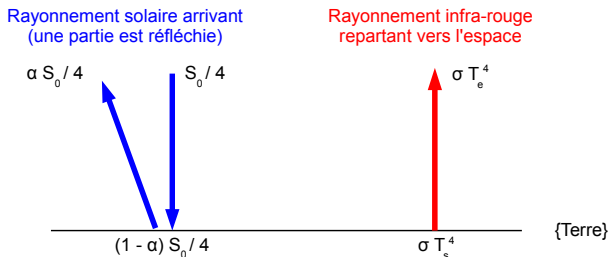


$$E_{\text{solaire}} = (1 - \alpha) S_0/4 = E_{\text{infra-rouge}} = \sigma T_e^4,$$

avec $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$, $\alpha = 0.3$ et $S_0 = 1368 \text{ W.m}^{-2}$.

Bilan d'énergie du système {Terre} 2/2

S'il n'y avait pas d'atmosphère :



$$E_{\text{solaire}} = (1 - \alpha) S_0/4 = E_{\text{infra-rouge}} = \sigma T_e^4,$$

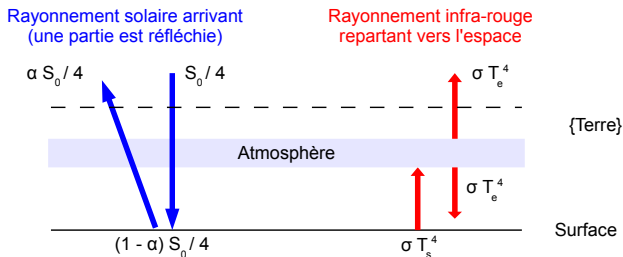
avec $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$, $\alpha = 0.3$ et $S_0 = 1368 \text{ W.m}^{-2}$.

→ Température de surface : $T_s = T_e = 255 \text{ K} = -18^\circ \text{C}$.

Pourtant on observe $\sim 15^\circ \text{C}$. La différence est due à l'**effet de serre**.

L'effet de serre

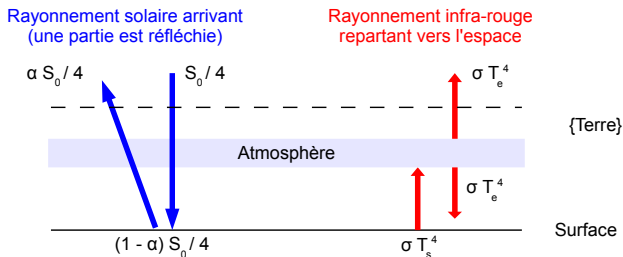
Avec une atmosphère simplifiée :



→ Température de surface : $T_s^4 = 2 T_e^4 \Rightarrow T_s = 303 \text{ K} = 30^\circ \text{C}$.

L'effet de serre

Avec une atmosphère simplifiée :



→ Température de surface : $T_s^4 = 2T_e^4 \Rightarrow T_s = 303 \text{ K} = 30^\circ \text{ C}$.

—
Limites : En réalité, l'atmosphère n'est pas complètement transparente au **solaire**, pas complètement opaque à l'**infra-rouge**, et de T non uniforme sur la verticale.

L'effet de serre – Un peu d'histoire

1820s : découverte de la *chaleur obscure* par J.B.J. Fourier.

1860s : mise en évidence de l'importance du CO_2 par J. Tyndall.

1890s : calcul de la réponse en T à un doublement de $[\text{CO}_2]$ par S. Arrhenius.



FOURIER, 1766-1830

TYNDALL, 1820-1893



ARRHENIUS, 1859-1927

—

L'effet de serre – Un peu d'histoire

1820s : découverte de la *chaleur obscure* par J.B.J. Fourier.

1860s : mise en évidence de l'importance du CO_2 par J. Tyndall.

1890s : calcul de la réponse en T à un doublement de $[\text{CO}_2]$ par S. Arrhenius.



FOURIER, 1766-1830

TYNDALL, 1820-1893



ARRHENIUS, 1859-1927

“La climatologie est une science toute jeune, encore balbutiante.”

L'effet de serre – Un peu d'histoire

1820s : découverte de la *chaleur obscure* par J.B.J. Fourier.

1860s : mise en évidence de l'importance du CO_2 par J. Tyndall.

1890s : calcul de la réponse en T à un doublement de $[\text{CO}_2]$ par S. Arrhenius.



FOURIER, 1766-1830

TYNDALL, 1820-1893

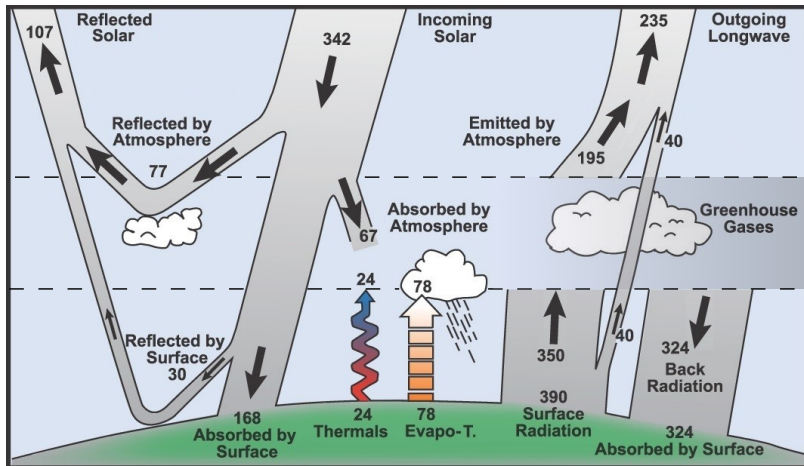


ARRHENIUS, 1859-1927

“La climatologie est une science toute jeune, encore balbutiante.”

→ Faux.

Bilan d'énergie *moins simplifié* du système {Terre}

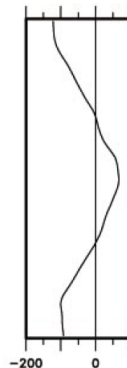
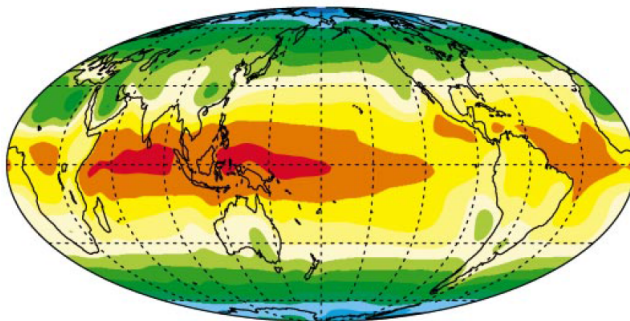


Adapté de l'IPCC AR4 (2007) FAQ 1.1 Fig. 1. Flux en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Bilan énergétique : répartition géographique

Net Radiation

(W m^{-2})



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

Le climat moyen est le résultat du bilan énergétique.
Il est ensuite redessiné par la circulation et la géographie.

Climat moyen Monde – Température

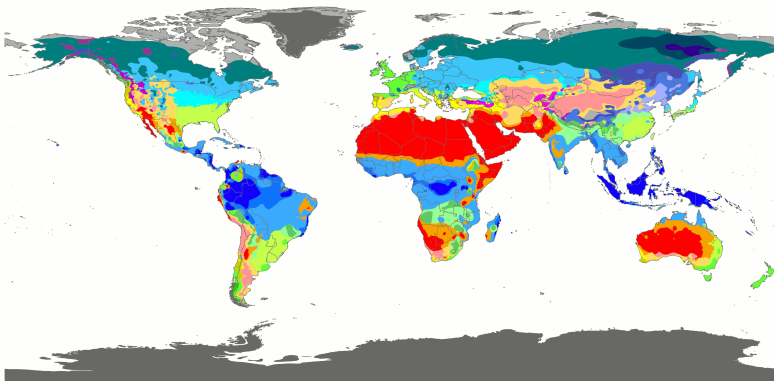
Tracé à partir des données [CRU](#) 1961–1990.

Climat moyen Monde – Précipitations

Tracé à partir des données [GPCP](#) 1981–2010.

Classification des climats

World map of Köppen-Geiger climate classification



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

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

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

PERIOD OF RECORD : All available

MIN LENGTH : ≥30 for each month.

RESOLUTION : 0.1 degree lat/long

Crédits : [Wikipédia](#).



Modéliser le climat

Modéliser le climat

Représenter mathématiquement le système climatique
sur la base de principes physiques.

Modéliser le climat

Représenter mathématiquement le système climatique
sur la base de principes physiques.

1. On sépare les différentes composantes du système.
Atmosphère, océans, etc.

Modéliser le climat

Représenter mathématiquement le système climatique
sur la base de principes physiques.

1. On sépare les différentes composantes du système.

Atmosphère, océans, etc.

2. On décrit les composantes et leurs échanges par des équations physiques.

Lois de conservation (masse, énergie), équation du mouvement (circulation), etc.

Modéliser le climat

Représenter mathématiquement le système climatique
sur la base de principes physiques.

1. On sépare les différentes composantes du système.

Atmosphère, océans, etc.

2. On décrit les composantes et leurs échanges par des équations physiques.

Lois de conservation (masse, énergie), équation du mouvement (circulation), etc.

3. On renseigne uniquement les conditions aux limites en *input*.

Energie solaire entrante, composition de l'atmosphère (GES, aérosols), etc.

Modéliser le climat

Représenter mathématiquement le système climatique
sur la base de principes physiques.

1. On sépare les différentes composantes du système.

Atmosphère, océans, etc.

2. On décrit les composantes et leurs échanges par des équations physiques.

Lois de conservation (masse, énergie), équation du mouvement (circulation), etc.

3. On renseigne uniquement les conditions aux limites en *input*.

Energie solaire entrante, composition de l'atmosphère (GES, aérosols), etc.

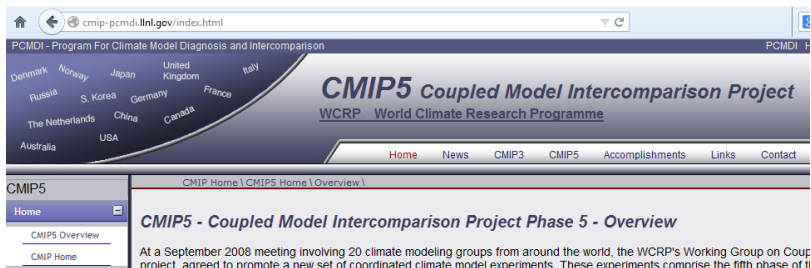
4. On résout les équations numériquement.

Utilisation de calculateurs (ordinateurs).

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

Le programme CMIP

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

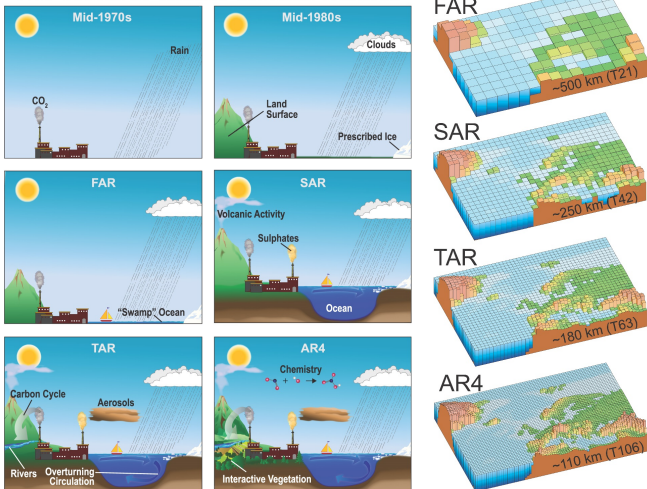


The screenshot shows the website for the CMIP5 project. The browser address bar displays "cmip-pcmdi.llnl.gov/index.html". The page header includes "PCMDI - Program For Climate Model Diagnosis and Intercomparison" and "PCMDI". A map of the world highlights participating countries: Denmark, Norway, Japan, 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 shows a menu with "Home", "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 t".

- ▶ 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.

Peut-on avoir confiance dans les modèles de climat ?

Effort permanent d'évaluation par rapport aux observations disponibles.

Exemple : comparaison modèles vs. obs. du cycle annuel des températures :

À votre avis les observations sont à droite ou à gauche ?

Peut-on avoir confiance dans les modèles de climat ?

Effort permanent d'évaluation par rapport aux observations disponibles.

Exemple : comparaison modèles vs. obs. du cycle annuel des températures :

Observations

Modèles

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

Peut-on avoir confiance dans les modèles de climat ?

Effort permanent d'évaluation par rapport aux observations disponibles.

Exemple : comparaison modèles vs. obs. du cycle annuel des précipitations :

Observations

Modèles

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

Climat *stationnaire* : et pourtant ça bouge ! 1/2

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

Températures brutes

Données : modèle CNRM-CM5.

Climat *stationnaire* : et pourtant ça bouge ! 1/2

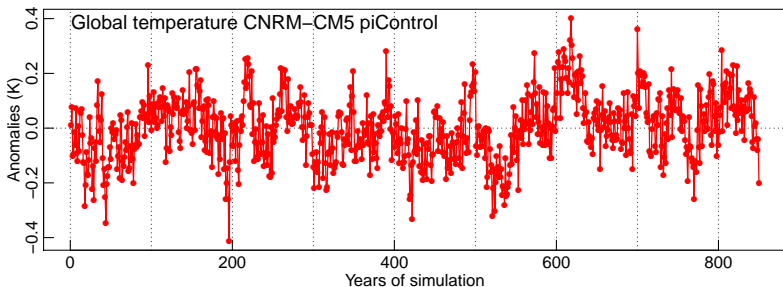
Simulation à bilan d'énergie toujours équilibré (*inputs constants*)

Anomalies de température

Données : modèle CNRM-CM5.

Climat *stationnaire* : et pourtant ça bouge ! 2/2

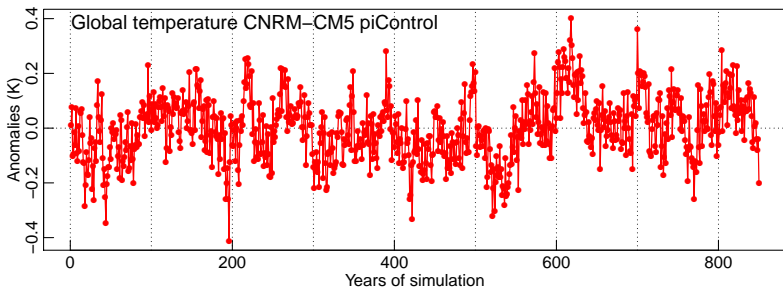
Simulation à bilan d'énergie toujours équilibré (*inputs constants*)



Données : modèle CNRM-CM5.

Climat *stationnaire* : et pourtant ça bouge ! 2/2

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



Données : modèle CNRM-CM5.

→ Variabilité *interne* à toutes les échelles (espace et temps).

De globale & multi-décennale (origine surtout *océanique*)...

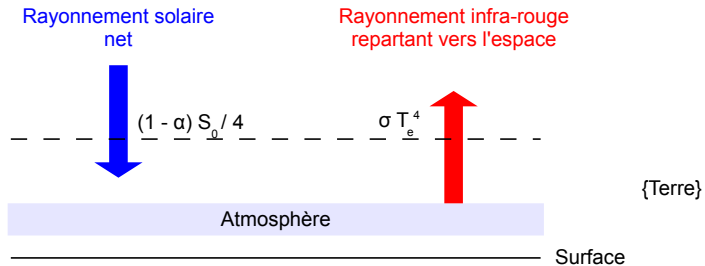
... à régionale & inter-annuelle (origine surtout *atmosphérique*).

Plan de l'exposé

- 1 Introduction : extrêmes, météo, climat.
- 2 Physique du climat, effet de serre et modélisation
- 3 Changement climatique actuel : théorie, observations, projections
- 4 Quels impacts sur les événements météorologiques extrêmes ?

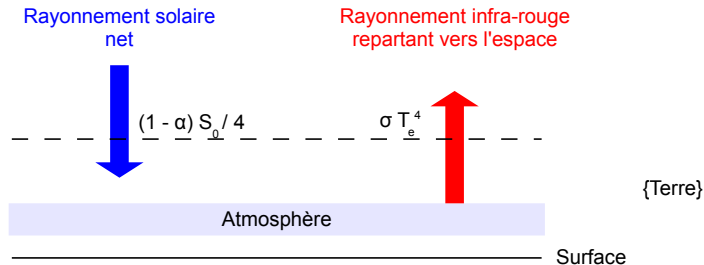
Comment perturber le climat ?

Rappel : Le climat est piloté par l'équilibre énergétique du système {Terre}.



Comment perturber le climat ?

Rappel : Le climat est piloté par l'équilibre énergétique du système {Terre}.

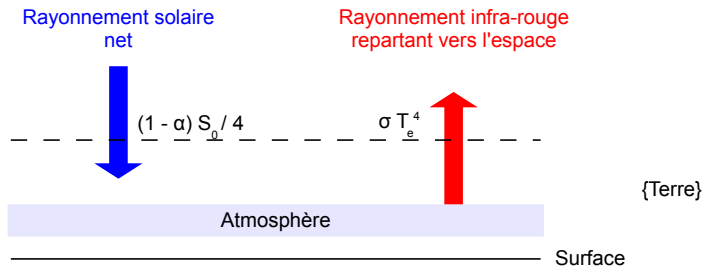


Réponse : il suffit de perturber cet équilibre !

→ On peut jouer sur 3 paramètres : S_0 , α , et T_e . On parle de **forçage radiatif**.

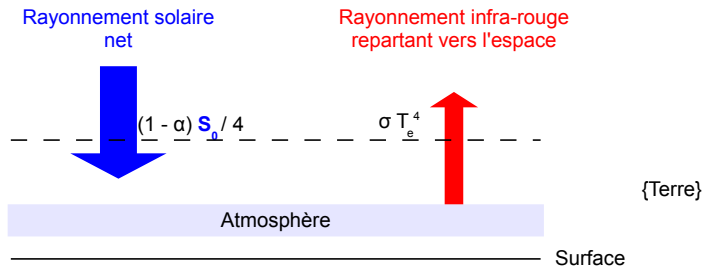
Forçage solaire (via S_0)

Forçage positif : si S_0 augmente, la Terre reçoit + d'énergie.



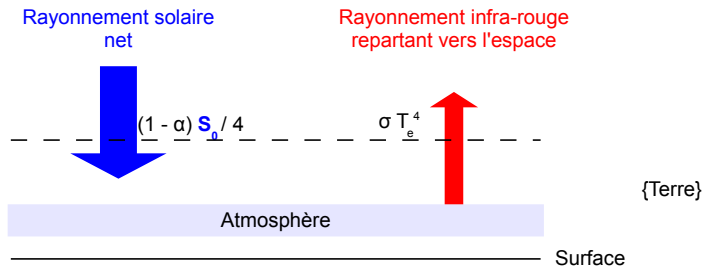
Forçage solaire (via S_0)

Forçage positif : si S_0 augmente, la Terre reçoit + d'énergie.



Forçage solaire (via S_0)

Forçage **positif** : si S_0 augmente, la Terre reçoit + d'énergie.



$\sim 10^4 - 10^6$ années : variations de l'**orbite terrestre**.

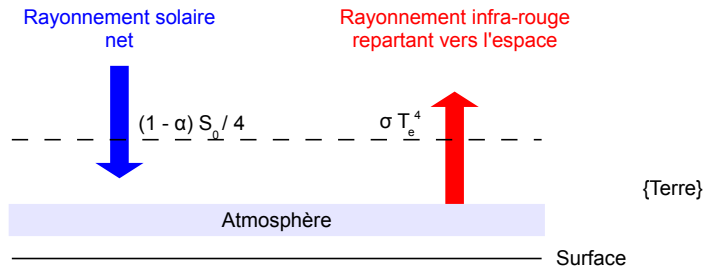
Alternance des périodes *glaciaires* et *inter-glaciaires*.

$\sim 10^0 - 10^2$ années (i.e. à notre échelle) : **activité solaire**.

Variations de l'*irradiance* solaire, cycles à ~ 11 ans.

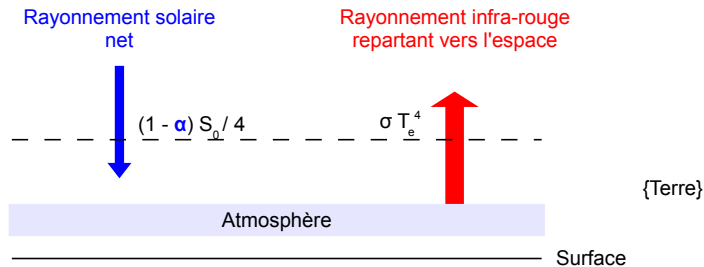
Forçage aérosols (via α)

Forçage **néгатif** : si plus d'aérosols, α augmente et la Terre reçoit – d'énergie.



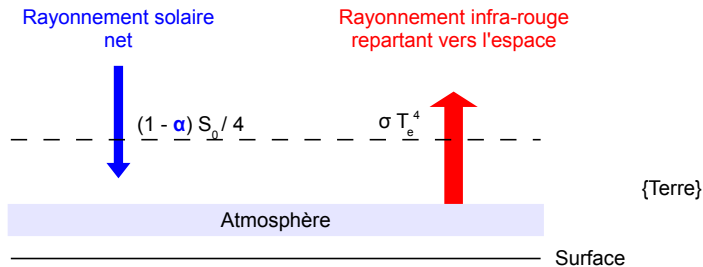
Forçage aérosols (via α)

Forçage **néгатif** : si plus d'aérosols, α augmente et la Terre reçoit – d'énergie.



Forçage aérosols (via α)

Forçage **négatif** : si plus d'aérosols, α augmente et la Terre reçoit – d'énergie.



Aérosols = particules en suspension dans l'atmosphère.

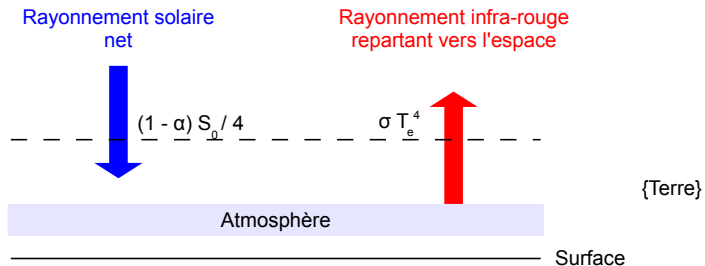
→ Naturels : poussières volcaniques, désertiques, feux de forêts, etc.

→ Anthropiques : combustion fossile, feux de forêts, etc.

N.B. Durée de vie courte, répartition localisée (sauf volcans massifs).

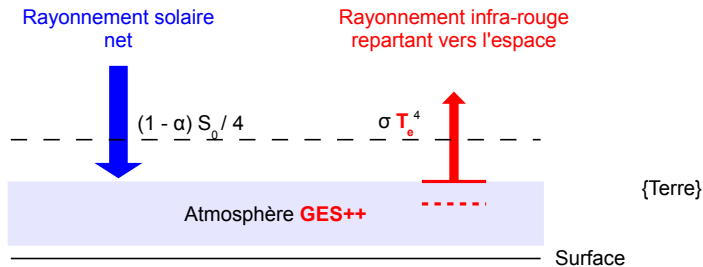
Forçage GES (via T_e)

Forçage positif : si plus de GES, T_e diminue et la Terre reçoit + d'énergie.



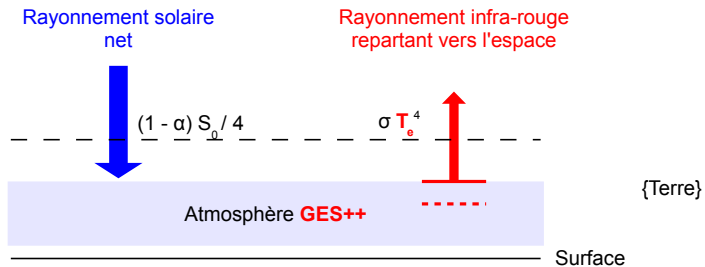
Forçage GES (via T_e)

Forçage positif : si plus de GES, T_e diminue et la Terre reçoit + d'énergie.



Forçage GES (via T_e)

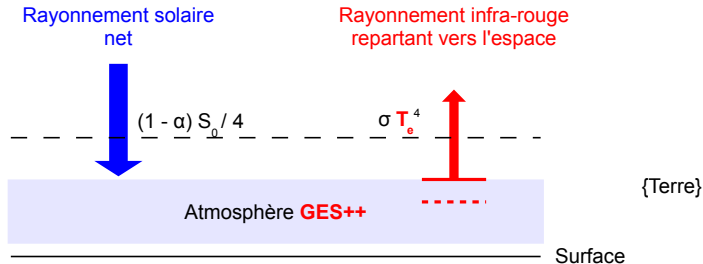
Forçage positif : si plus de GES, T_e diminue et la Terre reçoit + d'énergie.



“L'effet de serre est déjà saturé. L'ajout de CO_2 ne change rien.”

Forçage GES (via T_e)

Forçage positif : si plus de GES, T_e diminue et la Terre reçoit + d'énergie.



“L'effet de serre est déjà saturé. L'ajout de CO_2 ne change rien.”

→ Faux. En fait c'est le flux infra-rouge émis qui est plus faible :

1. En augmentant les [GES], on élève l'altitude d'émission.
2. Dans la basse atmosphère, la température diminue avec l'altitude.

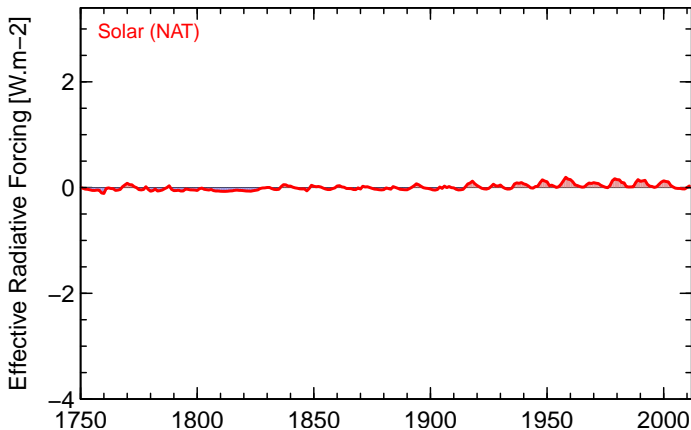
Evolution récente des [GES]

- ▶ Effet de serre **additionnel** : GES à durée longue (CO_2 , CH_4 et N_2O).
- ▶ Présents à l'état naturel, mais augmentation récente **anthropique**.

Vidéo CO2

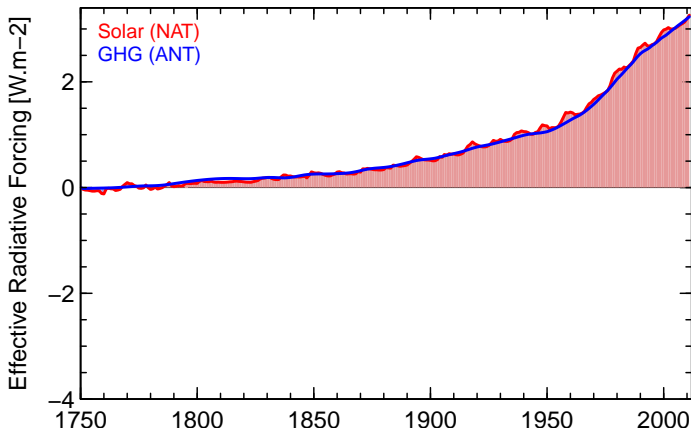
Évolution des forçages depuis 1750

Adapté de la Figure 8.18 de l'IPCC AR5 (2013). Estimations fournies par F.M. Bréon (LSCE).



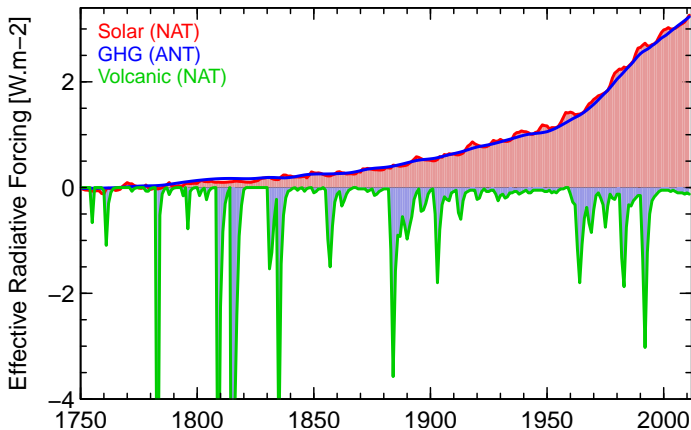
Évolution des forçages depuis 1750

Adapté de la Figure 8.18 de l'IPCC AR5 (2013). Estimations fournies par F.M. Bréon (LSCE).



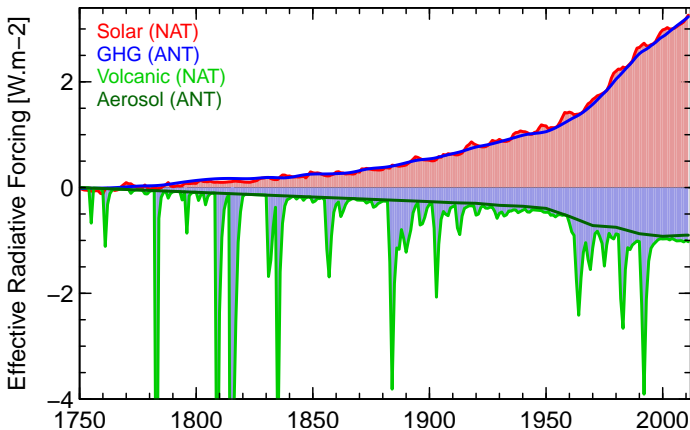
Évolution des forçages depuis 1750

Adapté de la Figure 8.18 de l'IPCC AR5 (2013). Estimations fournies par F.M. Bréon (LSCE).



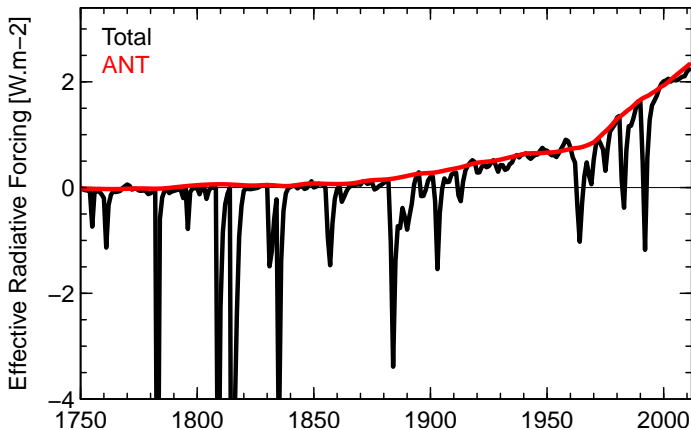
Évolution des forçages depuis 1750

Adapté de la Figure 8.18 de l'IPCC AR5 (2013). Estimations fournies par F.M. Bréon (LSCE).



Évolution des forçages depuis 1750

Adapté de la Figure 8.18 de l'IPCC AR5 (2013). Estimations fournies par F.M. Bréon (LSCE).



Les activités humaines induisent un excès énergétique.

Les rétroactions

Principe

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

Les rétroactions

Principe

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

Les principales rétroactions sont positives :

- Vapeur d'eau : un air plus chaud peut contenir plus de vapeur d'eau (GES).
- Cryosphère : en fondant, la glace/neige devient moins réfléchissante.
- Nuages : plus compliqué, changements de répartition dans l'atmosphère.

Par exemple, si la concentration de CO₂ est brusquement doublée :

- La température s'élève rapidement de $\sim 1.2^\circ\text{C}$.
- Puis les rétroactions ajoutent $\sim 1.8^\circ\text{C} (\pm 1.5)$ supplémentaires¹.

¹ Estimations tirées de Dufresne and Bony (2008).

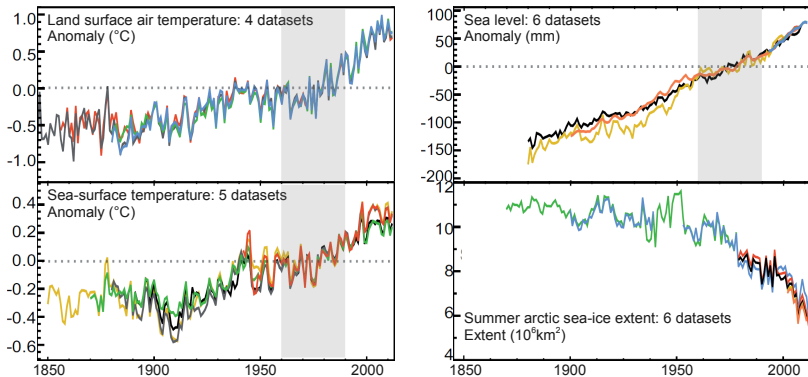
Où va l'excès d'énergie ?

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%}

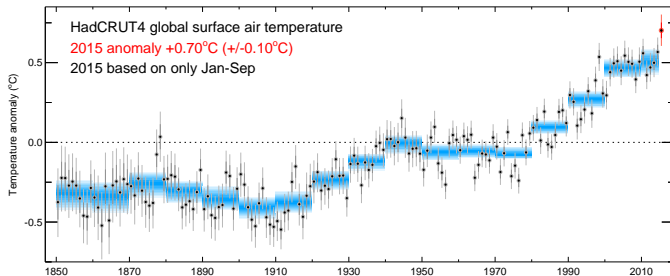


Source : IPCC AR5 (2013) FAQ 2.1 Fig. 1.

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

Le réchauffement sur un plateau ?

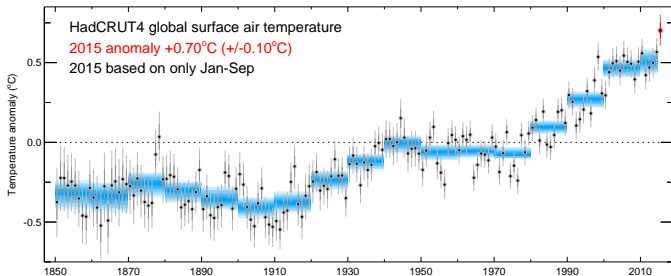
“Le réchauffement s'est arrêté il y a 17 ans.”



Données HadCRUT4. Figure fournie par T. Osborn (CRU, @TimOsbornClim).

Le réchauffement sur un plateau ?

“Le réchauffement s'est arrêté il y a 17 ans.”



Données HadCRUT4. Figure fournie par T. Osborn (CRU, @TimOsbornClim).

→ Doublement faux, erreur statistique et physique.

1. La tendance 1998–2012 est de $+0.05$ [-0.05 à $+0.15$] °C/décennie. Elle est certes cohérente avec 0, mais aussi avec la tendance 1951–2012 ($+0.12$ [$+0.08$ à $+0.14$]).
2. La T moyenne globale n'est pas le seul indicateur du réchauffement.

Détecter l'influence anthropique *a posteriori*

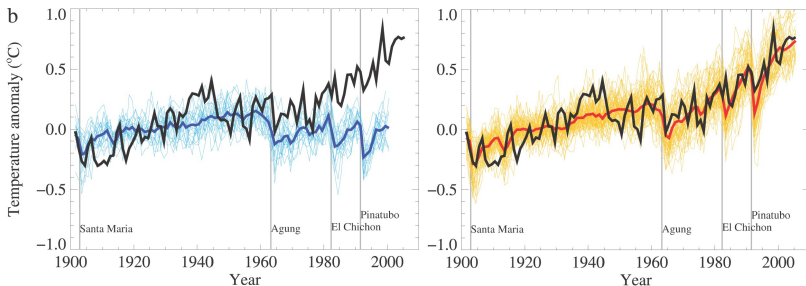
“Le réchauffement actuel est un phénomène naturel.”

Détecter l'influence anthropique *a posteriori*

“Le réchauffement actuel est un phénomène naturel.”

Exemple de la température moyenne globale :

1. son évolution n'est pas expliquée par les **causes naturelles seules** ;
2. elle l'est par les **causes naturelles + anthropiques**.



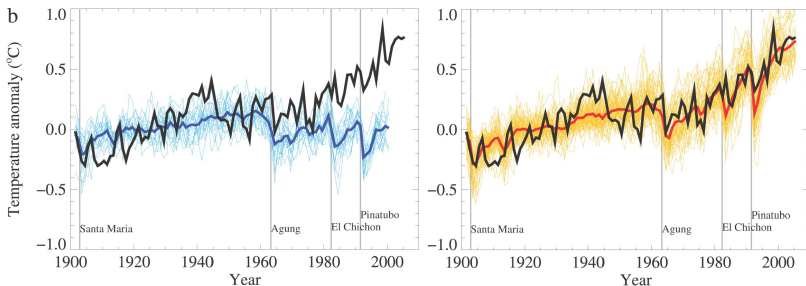
Source : IPCC AR4 (2007) Fig. 4.9.5.

Détecter l'influence anthropique *a posteriori*

“Le réchauffement actuel est un phénomène naturel.”

Exemple de la température moyenne globale :

1. son évolution n'est pas expliquée par les **causes naturelles seules** ;
2. elle l'est par les **causes naturelles + anthropiques**.

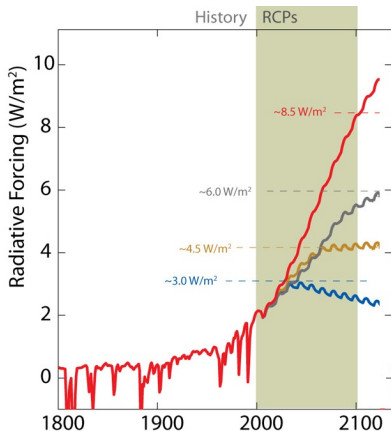


Source : IPCC AR4 (2007) Fig. 4.9.5.

→ *“Très probablement” faux.*

Quelle évolution pour le 21e siècle ?

1. L'évolution future du climat dépend de la composition de l'atmosphère.
 2. La composition de l'atmosphère dépend des activités humaines.
- Utilisation de **scénarii socio-économiques**.

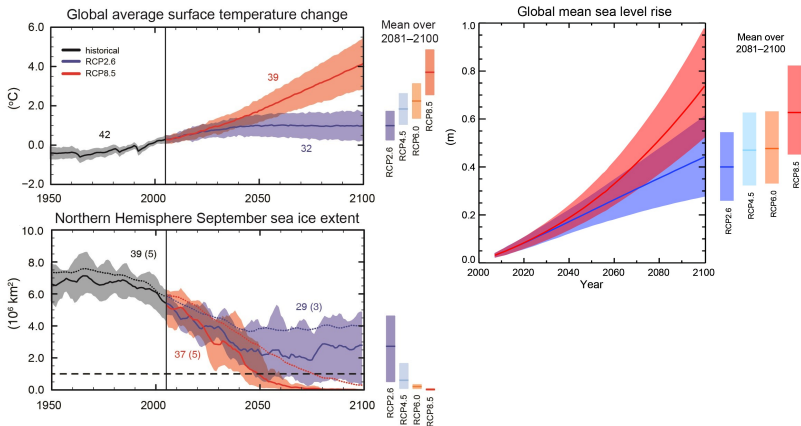


Nouveauté AR5

Les précédents ARs étaient basés sur des scénarii *d'émissions* (SRES), alors que les RCPs de l'AR5 sont des scénarii *de concentrations*.

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

Et selon le scénario, un climat à la carte



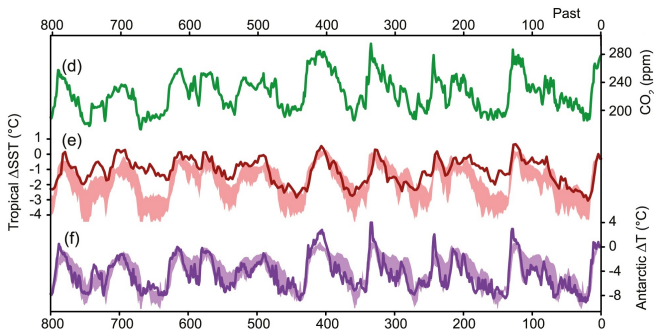
Source : IPCC AR5 (2013) Figs. SPM7 & SPM9.

Pour un scénario donné, la fourchette est due à deux choses :
l'incertitude de **modélisation** et la **variabilité interne**.

Un peu de recul

"Quelques degrés de plus, c'est pas grand chose."

Reconstructions paléo-climatiques.

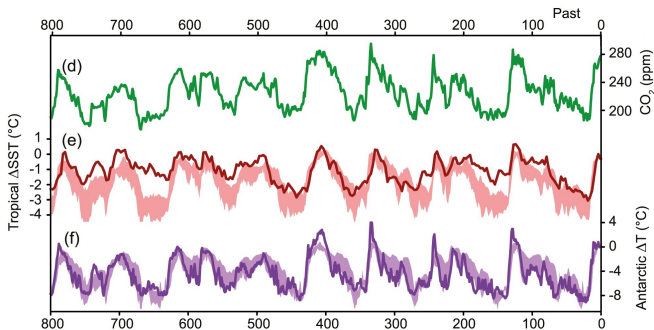


Source : IPCC AR5 (2013) Fig. 5.3.

Un peu de recul

"Quelques degrés de plus, c'est pas grand chose."

Reconstructions paléo-climatiques.



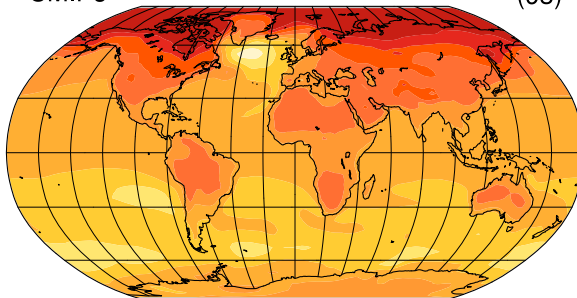
Source : IPCC AR5 (2013) Fig. 5.3.

→ 4°C, c'est l'ordre de grandeur de l'écart glaciaire - inter-glaciaire.

Géographie du changement climatique Températures

- ▶ Réchauffement plus fort sur continents que sur océans.
- ▶ Amplification Arctique due à la fonte de la banquise.

Température normalisée par T globale
CMIP5 (93)



°C par °C de réchauffement global



0 0.25 0.5 0.75 1 1.25 1.5 1.75 2

Source : Boucher et al., *La Météorologie Spécial Climat* (2015).

Changement climatique vs. variabilité interne 1/2

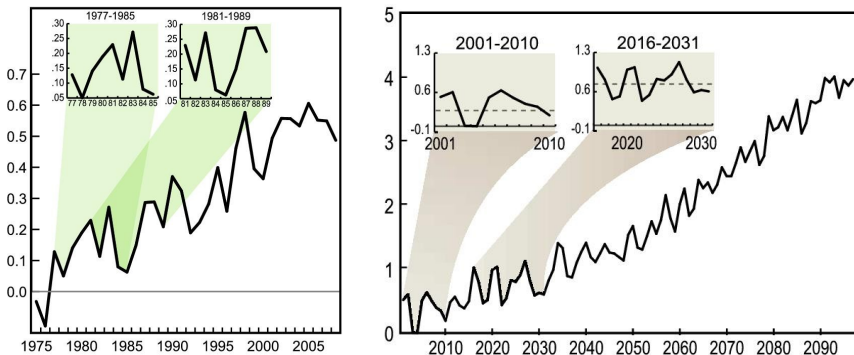
20e + scénario bas (RCP2.6)

20e + scénario haut (RCP8.5)

Données : simulations par le modèle CNRM-CM5.

Changement climatique vs. variabilité interne 2/2

N.B. 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).

Résumé

Les activités humaines induisent un **forçage** radiatif positif (excès d'énergie).

La réponse du système à ce forçage et aux rétroactions s'illustre par des **tendances** dans de multiples composantes du système, détectables malgré la **variabilité interne**.

Ces tendances sont cohérentes avec la réponse attendue du système à la combinaison des causes **naturelles et anthropiques**.

—

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 pour réduire l'incertitude de **modélisation**.

Plan de l'exposé

- 1 Introduction : extrêmes, météo, climat.
- 2 Physique du climat, effet de serre et modélisation
- 3 Changement climatique actuel : théorie, observations, projections
- 4 Quels impacts sur les événements météorologiques extrêmes ?

Les questions qu'on nous pose

Y a-t-il de plus en plus d'événements extrêmes ?

Sont-ils de plus en plus intenses ?

Est-ce la faute du réchauffement climatique ? De l'Homme ?

Comment est-ce que tout ça va évoluer ?

—

Les questions qu'on nous pose

Y a-t-il de plus en plus d'événements extrêmes ?

Sont-ils de plus en plus intenses ?

Est-ce la faute du réchauffement climatique ? De l'Homme ?

Comment est-ce que tout ça va évoluer ?

—

Il n'existe pas de "mesure globale" des événements extrêmes.

→ Il faut s'interroger par **type d'événements** (ex. *les canicules, les cyclones, etc.*), voire par **événement singulier** (ex. *la canicule 2003 en France, l'ouragan Sandy, etc.*).

Les questions qu'on se pose

À quoi s'attend-t-on pour tel type d'événement ?

Fréquence, intensité, caractéristiques spatio-temporelles.

Les questions qu'on se pose

À quoi s'attend-t-on pour tel type d'événement ?

Fréquence, intensité, caractéristiques spatio-temporelles.

Qu'observe-t-on déjà ?

—

Les questions qu'on se pose

À quoi s'attend-t-on pour tel type d'événement ?

Fréquence, intensité, caractéristiques spatio-temporelles.

Qu'observe-t-on déjà ?

—

Quelle est la probabilité d'occurrence de tel événement ?

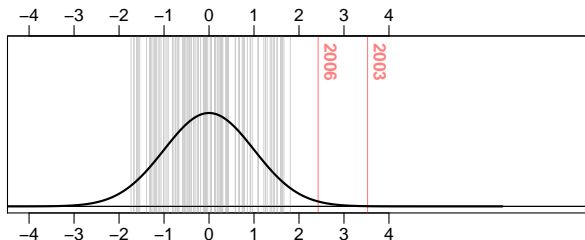
Comment a-t-elle évolué ? Comment va-t-elle évoluer ?

Comment aurait-elle évolué dans un monde sans forçage anthropique ?

Extrêmes de température : facile !

Un décalage vers un climat + chaud rend les **extrêmes chauds + probables/chauds**,
et les **extrêmes froids – probables/froids**.

Exemple des T été en Europe

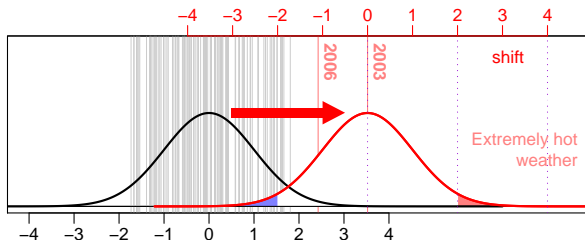


Données [CRU](#).

Extrêmes de température : facile !

Un décalage vers un climat + chaud rend les **extrêmes chauds + probables/chauds**,
et les **extrêmes froids – probables/froids**.

Exemple des T été en Europe

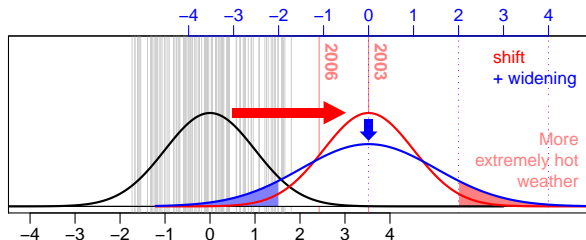


Données [CRU](#).

Extrêmes de température : facile !

Un décalage vers un climat + chaud rend les **extrêmes chauds + probables/chauds**,
et les **extrêmes froids – probables/froids**.

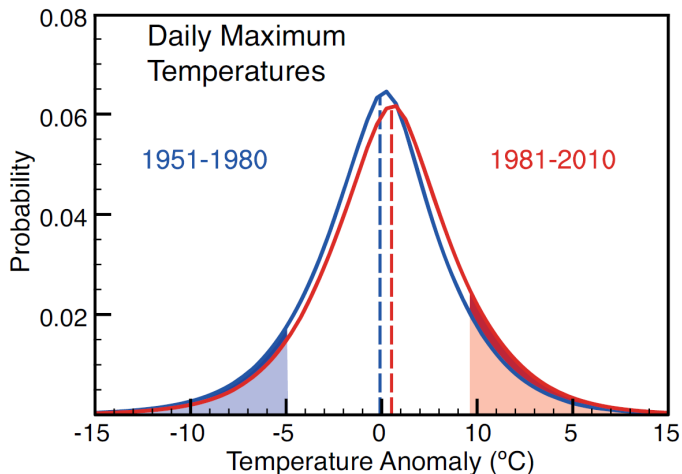
Exemple des T été en Europe



Données CRU.

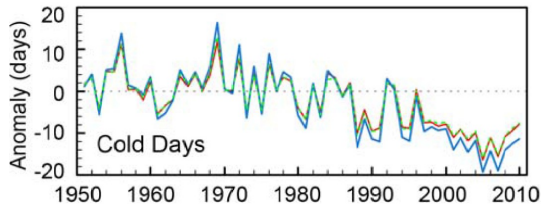
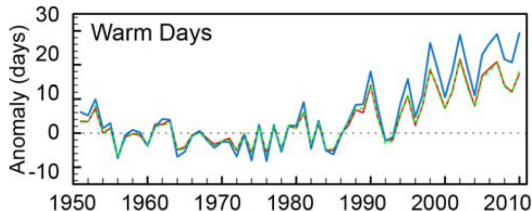
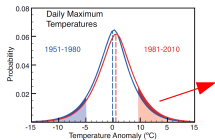
N.B. L'effet "décalage" peut être modulé par des changements de variabilité.

Plus d'extrêmes chauds, moins d'extrêmes froids



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

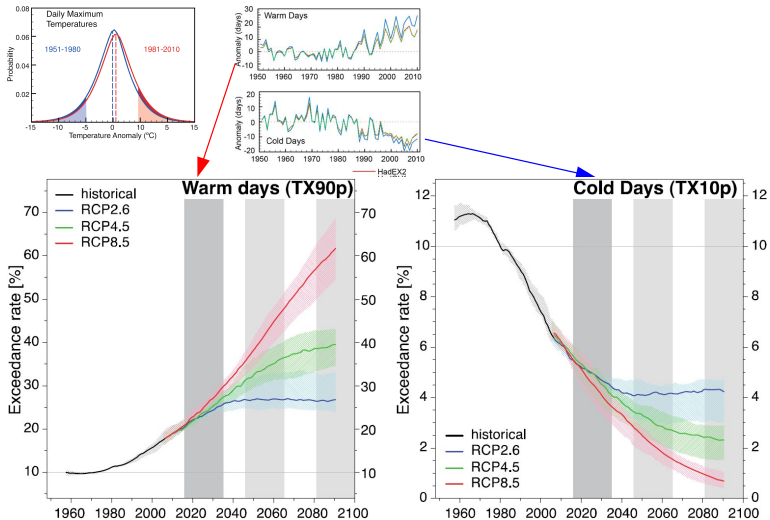
Plus d'extrêmes chauds, moins d'extrêmes froids



— HadEX2
 — HadGHCND
 - - - GHCNDEX

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

Plus d'extrêmes chauds, moins d'extrêmes froids



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

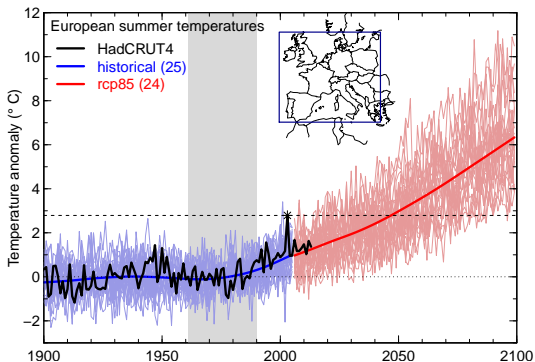
Canicule 2003 – Mise en perspective

“Avec le réchauffement, on aura un été 2003 tous les ans.”

Canicule 2003 – Mise en perspective

“Avec le réchauffement, on aura un été 2003 tous les ans.”

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

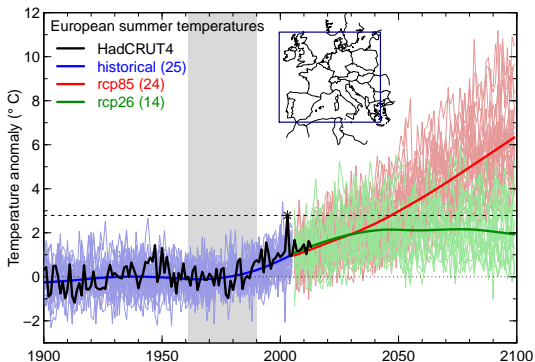


Source : Boucher et al., *La Météorologie Spécial Climat* (2015).

Canicule 2003 – Mise en perspective

“Avec le réchauffement, on aura 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**.



Source : Boucher et al., *La Météorologie Spécial Climat* (2015).

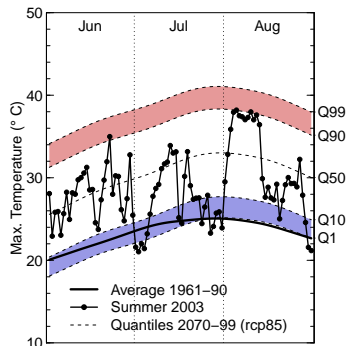
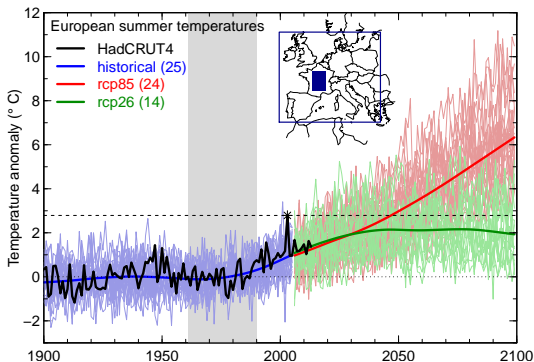
Canicule 2003 – Mise en perspective

“Avec le réchauffement, on aura 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 France encore *anormales* en 2100 en scénario haut.



Source : Boucher et al., *La Météorologie Spécial Climat* (2015).

Canicule 2003 – Mise en perspective

“Avec le réchauffement, on aura 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 France encore *anormales* en 2100 en scénario haut.

→ Ce n'est pas aussi simple que ça.

La réponse dépend du scénario et de la définition de l'événement “été 2003”.

—
Voir aussi [ClimatHD](#), outil de visualisation de Météo-France.

Canicule 2003 – À qui la faute ?

“La canicule de 2003 a été causée par le réchauffement climatique.”

Canicule 2003 – À qui la faute ?

“La canicule de 2003 a été causée par le réchauffement climatique.”

→ Faux.

On ne peut pas imputer un événement météorologique au changement climatique.
En revanche on peut estimer comment sa *probabilité d'occurrence* a été modifiée.

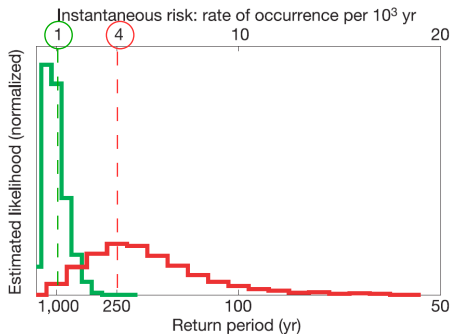
Canicule 2003 – À qui la faute ?

“La canicule de 2003 a été causée par le réchauffement climatique.”

→ Faux.

On ne peut pas imputer un événement météorologique au changement climatique.
En revanche on peut estimer comment sa *probabilité d'occurrence* a été modifiée.

Été 2003 : proba **naturelle** multipliée par 4 [2–10] par **facteurs anthropiques**.



Extrêmes hydrologiques 1/2

Extrêmes hydrologiques 1/2

Que nous disent E. Clausius et R. Clapeyron (1850s) ?

Extrêmes hydrologiques 1/2

Que nous disent E. Clausius et R. Clapeyron (1850s) ?

Réponse : $\partial_T \ln(e_s) = L/RT^2$

Extrêmes hydrologiques 1/2

Que nous disent E. Clausius et R. Clapeyron (1850s) ?

Réponse : $\partial_T \ln(e_s) = L/RT^2$

Traduction : *un air plus chaud peut contenir plus de vapeur d'eau.*

Extrêmes hydrologiques 1/2

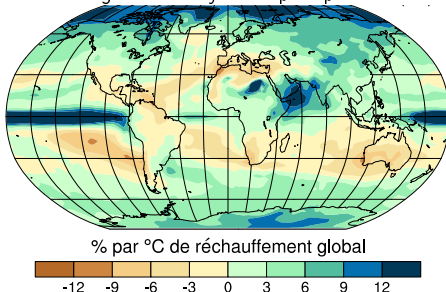
Que nous disent E. Clausius et R. Clapeyron (1850s) ?

Réponse : $\partial_T \ln(e_s) = L/RT^2$

Traduction : *un air plus chaud peut contenir plus de vapeur d'eau.*

Conséquence : intensification du cycle hydrologique (*wet get wetter, dry get drier*).

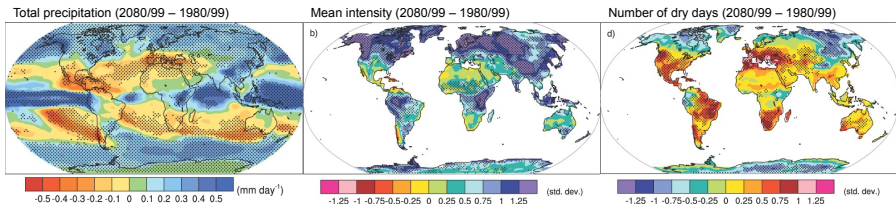
Changement moyen de précipitations



Source : Boucher et al., *La Météorologie Spécial Climat* (2015).

Extrêmes hydrologiques 2/2

Changements projetés de pluies intenses et de jours secs



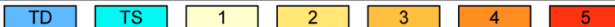
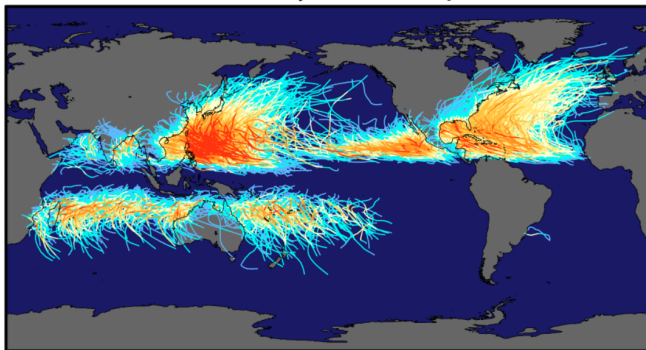
Source : IPCC AR4 (2007) Figs. 10.12 et 10.18.

- ▶ **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 1/2

Les cyclones 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 2/2

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)).

—

Qu'observe-t-on déjà ?

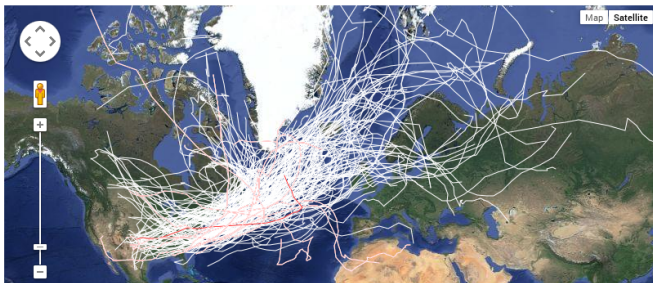
Pas de tendance *détectée* à l'heure actuelle.

Forte variabilité, hétérogénéité des observations, insuffisances des modèles.

Un mot sur les tempêtes

Les tempêtes extra-tropicales ont une dynamique principalement **atmosphérique**.

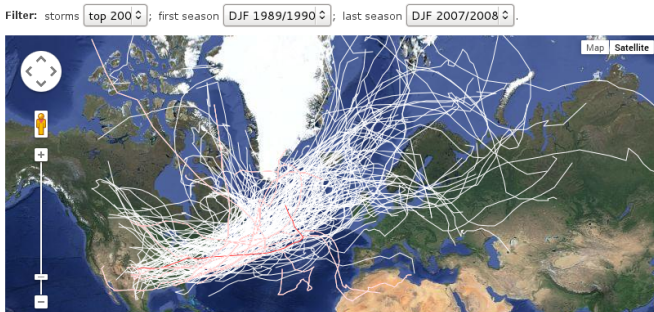
Filter: storms ; first season ; last season



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

Un mot sur les tempêtes

Les tempêtes extra-tropicales ont une dynamique principalement **atmosphérique**.



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

Quelles tendances ?

Décalage vers les pôles *probable* dans les projections.

Pas de tendance détectée, forte variabilité.

Changement climatique et extrêmes – Résumé

“Avec le réchauffement, il y aura plus d'extrêmes.”

Changement climatique et extrêmes – Résumé

“Avec le réchauffement, il y aura plus d'extrêmes.”

→ Vrai pour certains types d'événements, faux pour d'autres.

Changement climatique et extrêmes – Résumé

“Avec le réchauffement, il y aura plus d'extrêmes.”

→ Vrai pour certains types d'événements, faux pour d'autres.

a) À quoi peut-on s'attendre ? b) Qu'observe-t-on déjà ?

1. Extrêmes de température (canicules, vagues de froid)

- a) Décalage vers un climat + chaud \Rightarrow + d'extrêmes chauds, – d'extrêmes froids.
- b) Déjà observé.

2. Extrêmes du cycle hydrologique (précipitations intenses, sécheresses)

- a) Intensification cycle hydrologique \Rightarrow + d'extrêmes pluvieux et secs.
- b) Partiellement observé pour précipitations intenses, pas de signal pour sécheresses.

3. Cyclones tropicaux (ouragans, typhons)

- a) Probablement – fréquents, mais + intenses (vents, précipitations, surcôtes).
- b) Pas de tendance observée.

4. Tempêtes nord-atlantiques (cf. Xynthia)

- a) Probable décalage vers les pôles, incertitudes sur fréquence/intensité.
- b) Pas de tendance observée.

Conclusions

Conclusions

1. Le climat est la distribution de probabilité de la météo.

Les événements météo extrêmes sont une vitrine de la variabilité climatique.

Conclusions

1. Le climat est la distribution de probabilité de la météo.

Les événements météo extrêmes sont une vitrine de la variabilité climatique.

2. Le climat est piloté par de grands équilibres physiques.

Si on perturbe ces équilibres, on modifie le climat.

Conclusions

1. Le climat est la distribution de probabilité de la météo.

Les événements météo extrêmes sont une vitrine de la variabilité climatique.

2. Le climat est piloté par de grands équilibres physiques.

Si on perturbe ces équilibres, on modifie le climat.

3. Les activités humaines perturbent l'équilibre énergétique.

Elles induisent un excès d'énergie, donc un réchauffement du climat.

Conclusions

1. Le climat est la distribution de probabilité de la météo.

Les événements météo extrêmes sont une vitrine de la variabilité climatique.

2. Le climat est piloté par de grands équilibres physiques.

Si on perturbe ces équilibres, on modifie le climat.

3. Les activités humaines perturbent l'équilibre énergétique.

Elles induisent un excès d'énergie, donc un réchauffement du climat.

4. Le réchauffement se superpose à la variabilité interne.

Localement (une variable, un lieu, un temps), le signal peut être noyé dans le bruit.

Conclusions

1. Le climat est la distribution de probabilité de la météo.

Les événements météo extrêmes sont une vitrine de la variabilité climatique.

2. Le climat est piloté par de grands équilibres physiques.

Si on perturbe ces équilibres, on modifie le climat.

3. Les activités humaines perturbent l'équilibre énergétique.

Elles induisent un excès d'énergie, donc un réchauffement du climat.

4. Le réchauffement se superpose à la variabilité interne.

Localement (une variable, un lieu, un temps), le signal peut être noyé dans le bruit.

5. L'incertitude majeure pour le 21e siècle est socio-économique.

Selon le scénario, un climat à la carte.

Conclusions

1. Le climat est la distribution de probabilité de la météo.

Les événements météo extrêmes sont une vitrine de la variabilité climatique.

2. Le climat est piloté par de grands équilibres physiques.

Si on perturbe ces équilibres, on modifie le climat.

3. Les activités humaines perturbent l'équilibre énergétique.

Elles induisent un excès d'énergie, donc un réchauffement du climat.

4. Le réchauffement se superpose à la variabilité interne.

Localement (une variable, un lieu, un temps), le signal peut être noyé dans le bruit.

5. L'incertitude majeure pour le 21e siècle est socio-économique.

Selon le scénario, un climat à la carte.

6. Changer le climat, c'est modifier l'ensemble des météos possibles.

En particulier, c'est modifier la probabilité de certains événements.

Conclusions

1. Le climat est la distribution de probabilité de la météo.

Les événements météo extrêmes sont une vitrine de la variabilité climatique.

2. Le climat est piloté par de grands équilibres physiques.

Si on perturbe ces équilibres, on modifie le climat.

3. Les activités humaines perturbent l'équilibre énergétique.

Elles induisent un excès d'énergie, donc un réchauffement du climat.

4. Le réchauffement se superpose à la variabilité interne.

Localement (une variable, un lieu, un temps), le signal peut être noyé dans le bruit.

5. L'incertitude majeure pour le 21e siècle est socio-économique.

Selon le scénario, un climat à la carte.

6. Changer le climat, c'est modifier l'ensemble des météos possibles.

En particulier, c'est modifier la probabilité de certains événements.

Merci de votre attention.