

# Climat et changement climatique

## *La planète se réchauffe-t-elle (vraiment) ?*

Julien Cattiaux

Chercheur CNRS

Laboratoire GAME, CNRS/Météo-France, Toulouse

Lycée Jules Fil, Carcassonne

19 Mars 2015

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

Mail : [julien.cattiaux@meteo.fr](mailto:julien.cattiaux@meteo.fr) | Twitter : [@julienC4ttiaux](https://twitter.com/julienC4ttiaux)

# Spoiler

## Ce dont je parlerai :

physique du climat, théorie de l'effet de serre, modélisation numérique, changement climatique observé, projections futures, liens avec la météo.

---

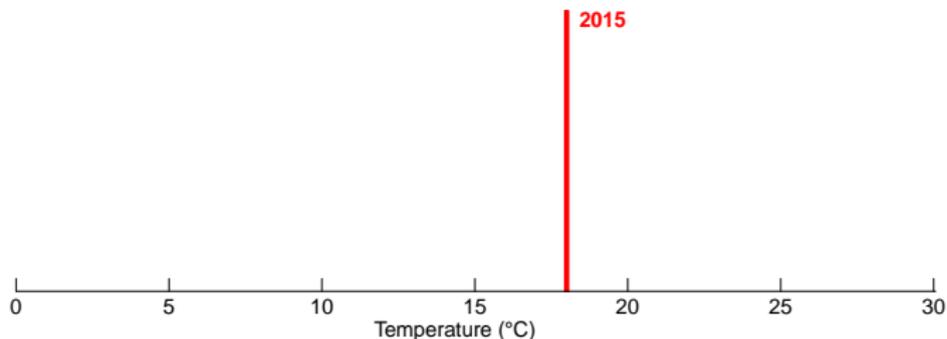
## Ce dont je ne parlerai pas :

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

# De la météo au climat

- ▶ Aujourd'hui il fait **18°C**.

Température à Carcassonne le 19/03

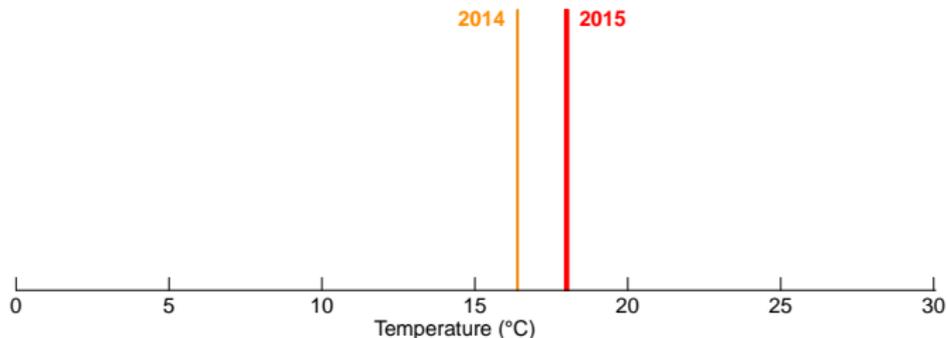


Données : Météo-France.

# De la météo au climat

- ▶ Aujourd'hui il fait **18°C**.
- ▶ Mais d'autres T auraient été possibles : il suffit de regarder dans **le passé**.

Température à Carcassonne le 19/03

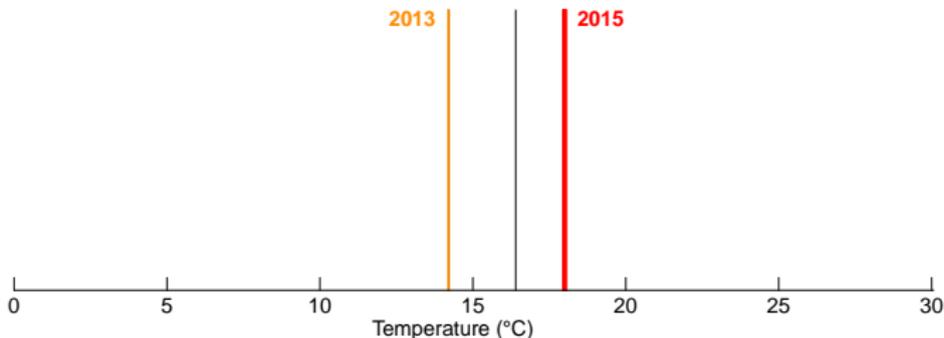


Données : Météo-France.

# De la météo au climat

- ▶ Aujourd'hui il fait **18°C**.
- ▶ Mais d'autres T auraient été possibles : il suffit de regarder dans **le passé**.

Température à Carcassonne le 19/03

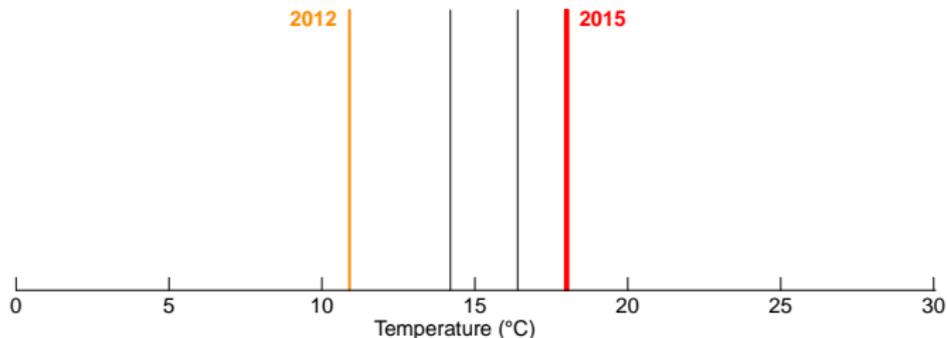


Données : Météo-France.

# De la météo au climat

- ▶ Aujourd'hui il fait **18°C**.
- ▶ Mais d'autres T auraient été possibles : il suffit de regarder dans **le passé**.

Température à Carcassonne le 19/03

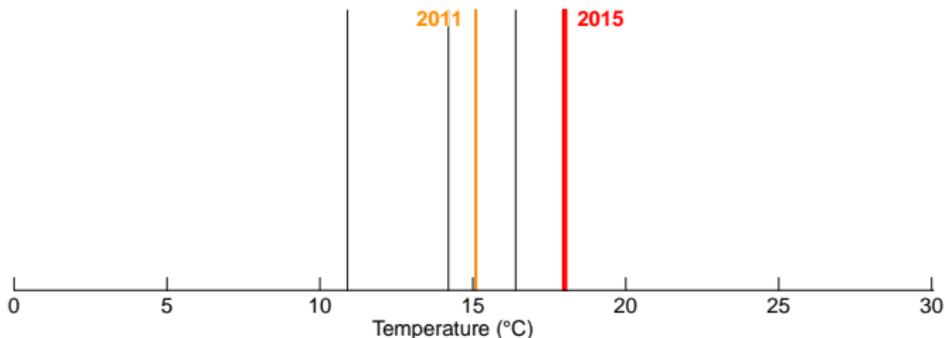


Données : Météo-France.

# De la météo au climat

- ▶ Aujourd'hui il fait **18°C**.
- ▶ Mais d'autres T auraient été possibles : il suffit de regarder dans **le passé**.

Température à Carcassonne le 19/03

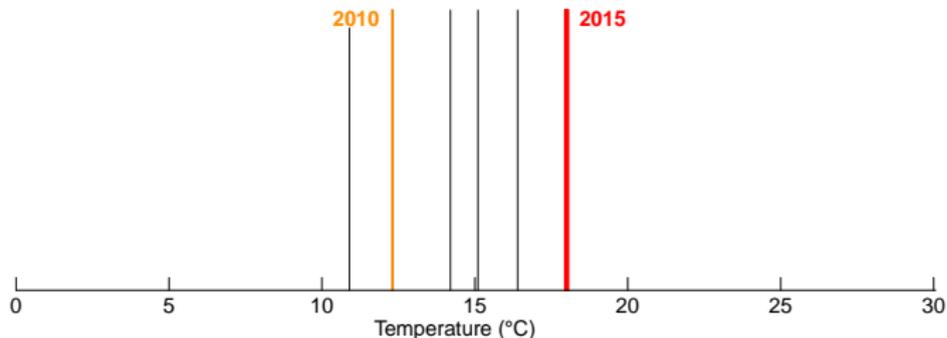


Données : Météo-France.

# De la météo au climat

- ▶ Aujourd'hui il fait **18°C**.
- ▶ Mais d'autres T auraient été possibles : il suffit de regarder dans **le passé**.

Température à Carcassonne le 19/03

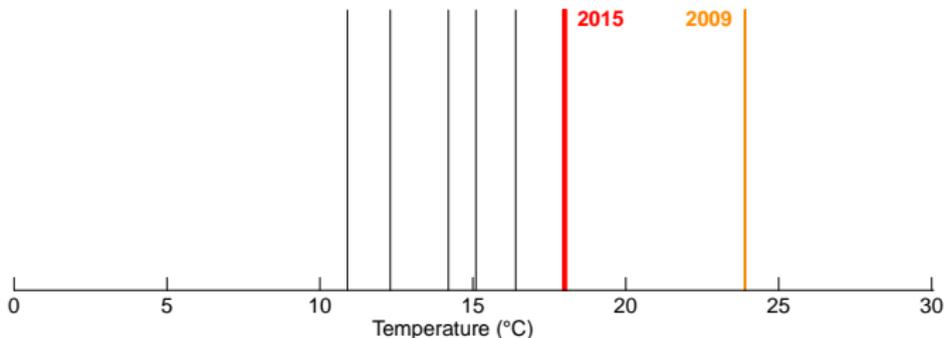


Données : Météo-France.

# De la météo au climat

- ▶ Aujourd'hui il fait **18°C**.
- ▶ Mais d'autres T auraient été possibles : il suffit de regarder dans **le passé**.

Température à Carcassonne le 19/03

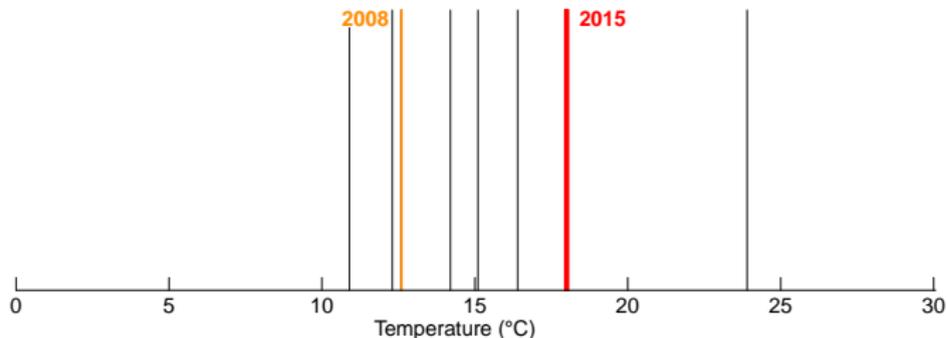


Données : Météo-France.

# De la météo au climat

- ▶ Aujourd'hui il fait **18°C**.
- ▶ Mais d'autres T auraient été possibles : il suffit de regarder dans **le passé**.

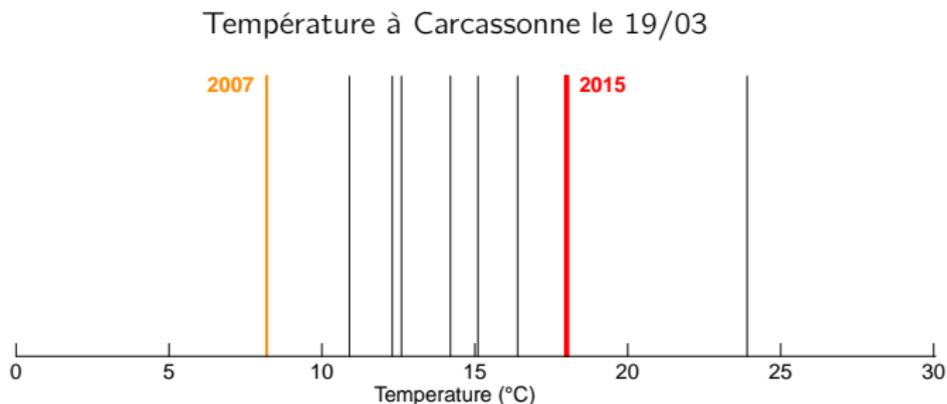
Température à Carcassonne le 19/03



Données : Météo-France.

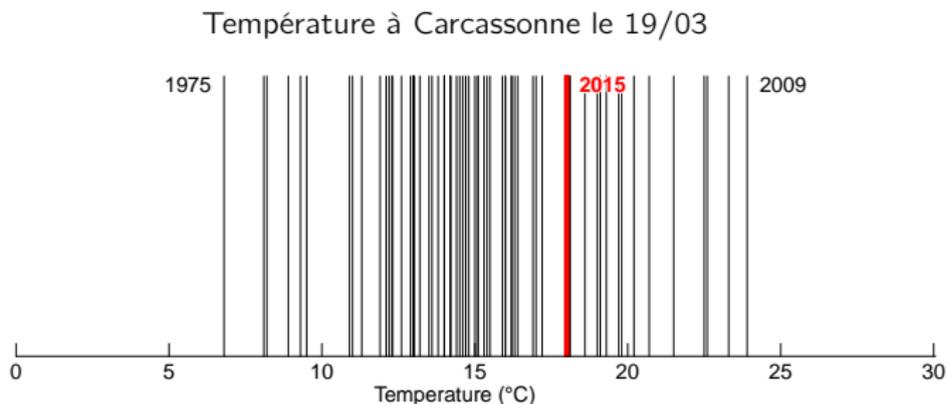
# De la météo au climat

- ▶ Aujourd'hui il fait **18°C**.
- ▶ Mais d'autres T auraient été possibles : il suffit de regarder dans **le passé**.



# De la météo au climat

- ▶ Aujourd'hui il fait **18°C**.
- ▶ Mais d'autres T auraient été possibles : il suffit de regarder dans **le passé**.

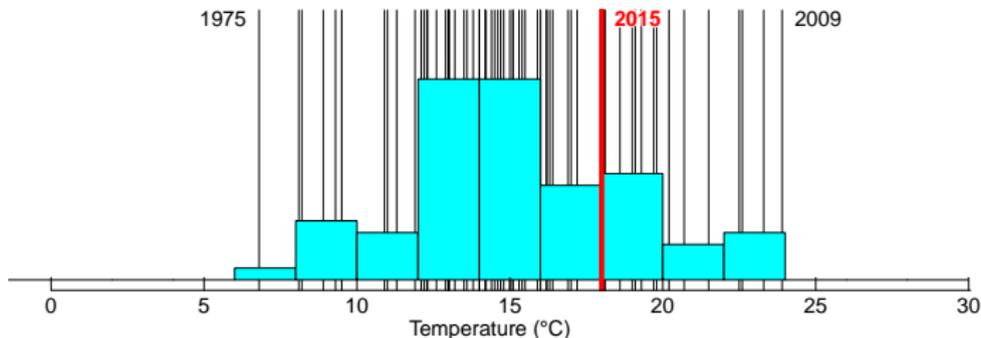


Données : Météo-France.

# De la météo au climat

- ▶ Aujourd'hui il fait **18°C**.
- ▶ Mais d'autres T auraient été possibles : il suffit de regarder dans **le passé**.
- ▶ Au final, on peut construire l'**histogramme** des T possibles.

Température à Carcassonne le 19/03

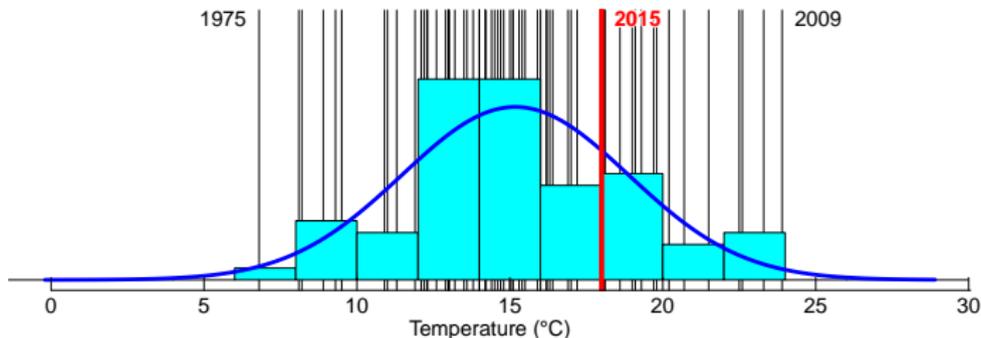


Données : Météo-France.

# De la météo au climat

- ▶ Aujourd'hui il fait **18°C**.
- ▶ Mais d'autres T auraient été possibles : il suffit de regarder dans **le passé**.
- ▶ Au final, on peut construire l'**histogramme** des T possibles.

Température à Carcassonne le 19/03



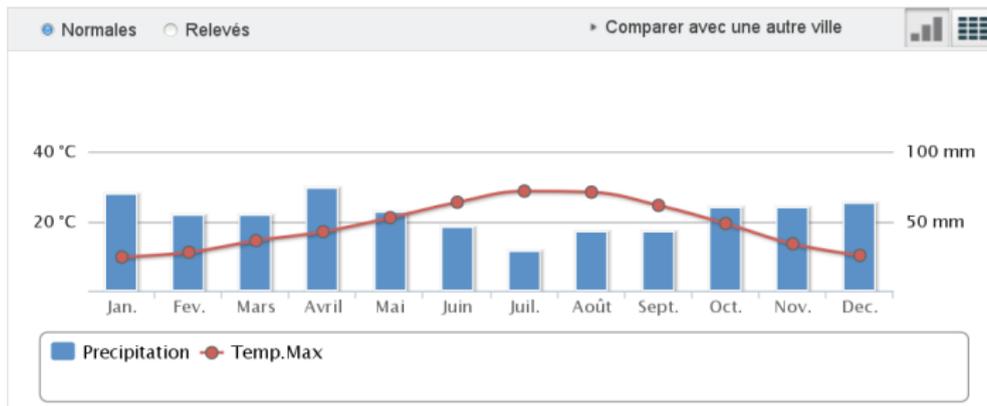
Données : Météo-France.

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

# Les fameuses normales de saison

- ▶ Au premier ordre, le **climat** peut être décrit par sa **moyenne** (normale).
- ▶ Les organismes météorologiques moyennent sur une **période de référence**.  
Exemple : Météo-France définit actuellement les *normales* sur la période 1981-2010.

## Données climatiques de la station de Carcassonne

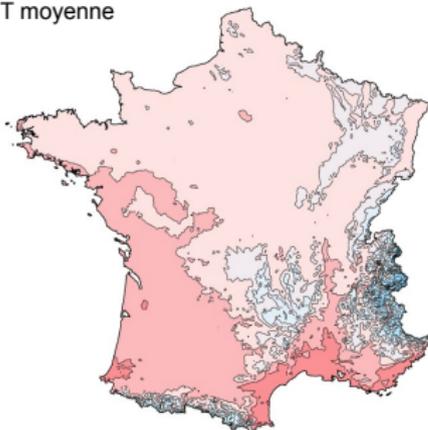


Source : site public de Météo-France, onglet [climat](#).

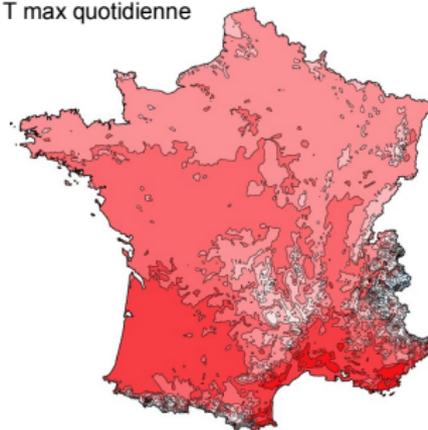
# Climat moyen France

- Il fait plus chaud au sud qu'au nord.

T moyenne



T max quotidienne

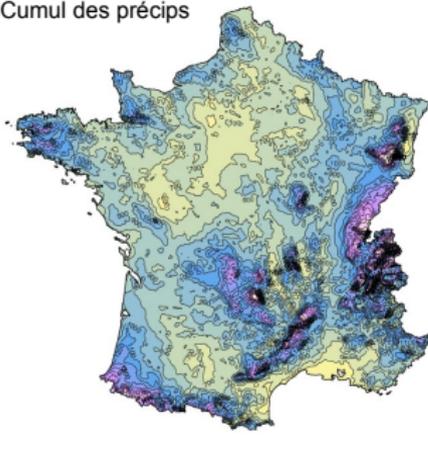


Source et crédits figures : Météo-France (normales 1981-2010).

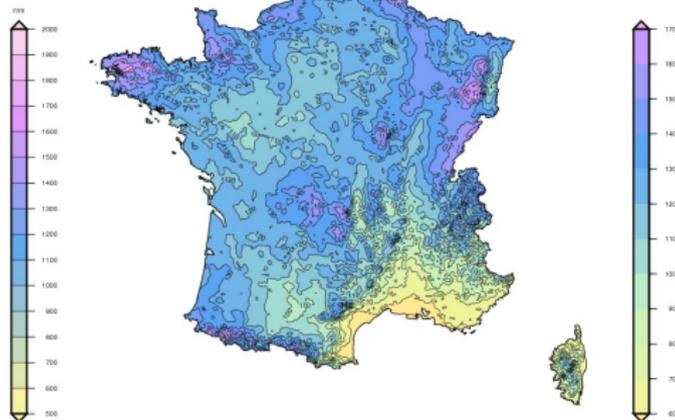
# Climat moyen France

- ▶ Il fait plus chaud au sud qu'au nord.
- ▶ Il pleut autant à Nice qu'à Brest (mais moins souvent).

Cumul des précips



Nb jours > 1mm



Source et crédits figures : Météo-France (normales 1981-2010).

# Climat moyen Monde Température

- ▶ Il fait plus chaud aux tropiques qu'aux pôles.
- ▶ Il fait plus chaud en été qu'en hiver.

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

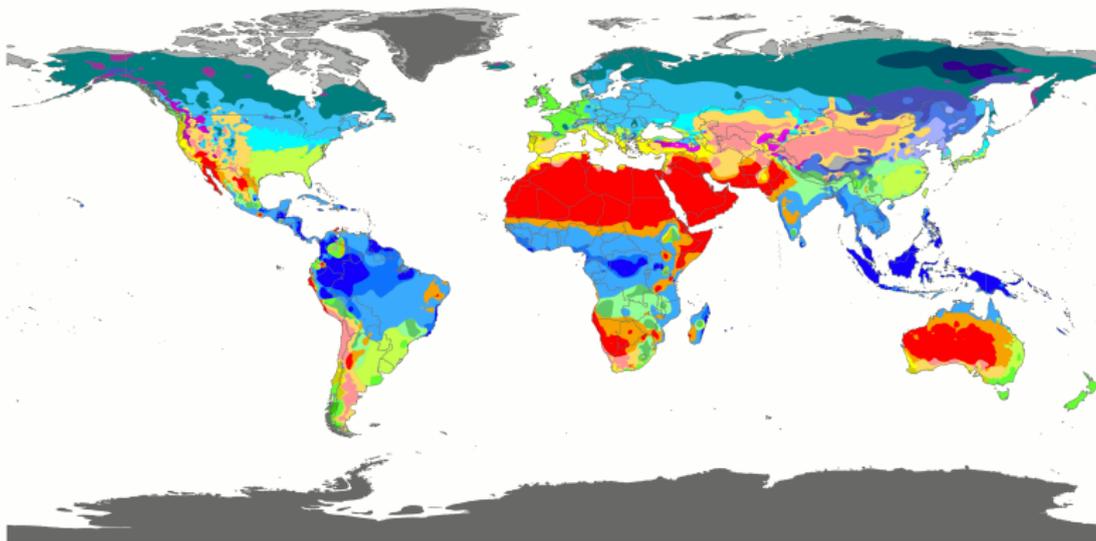
# Climat moyen Monde Précipitations

- ▶ Il pleut plus aux tropiques qu'ailleurs.
- ▶ La zone tropicale fluctue avec les saisons.

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				

**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

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

Crédits : [Wikipédia](#).



# Résumé

Le **climat** est l'ensemble des **météos** possibles.

Au premier ordre, il peut être décrit par sa moyenne (les normales).

→ *Par définition, la météo n'est jamais normale !*

La météo est pilotée par le mouvement des masses d'air (compliqué),  
mais **le climat est déterminé par de grands équilibres physiques** (cf. suite).

# Plan de l'exposé

- 1 Introduction
- 2 Physique du climat, effet de serre et 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 Physique du climat, effet de serre et 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 ?

# 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 élevé, 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.

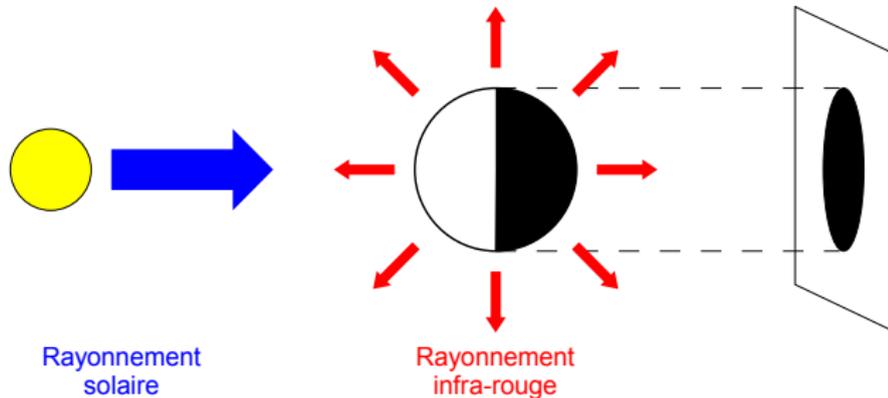
# Bilan d'énergie du système {Terre} 1/2

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



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

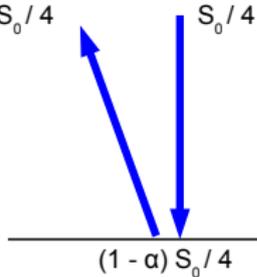
# Bilan d'énergie du système {Terre} 2/2

S'il n'y avait pas d'atmosphère :

Rayonnement solaire arrivant  
(une partie est réfléchié)

$$\alpha S_0 / 4$$

$$S_0 / 4$$



Rayonnement infra-rouge  
repartant vers l'espace

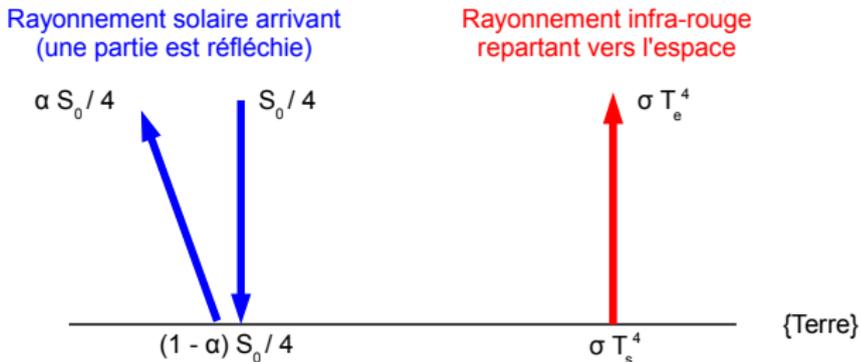
$$\sigma T_e^4$$

$$\sigma T_s^4$$

{Terre}

# 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  $S_0 = 1368 \text{ W.m}^{-2}$ .

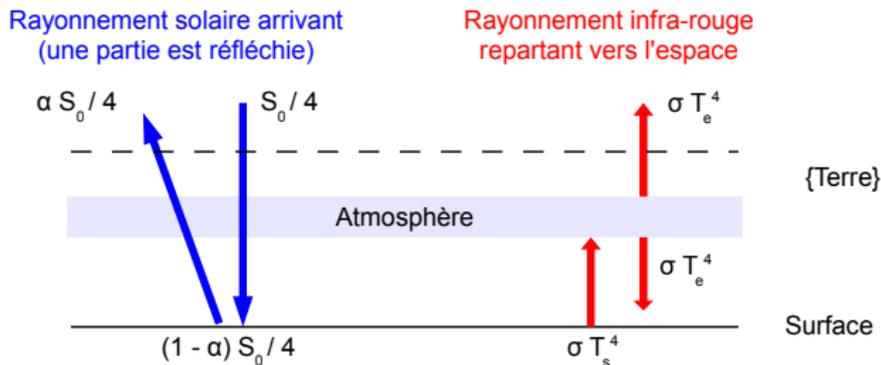
► Température de surface :  $T_s = T_e = 255 \text{ K} = -18^\circ \text{C}$ .

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

# L'effet de serre – J. Fourier (1820s) et la chaleur obscure

Avec une atmosphère simplifiée :

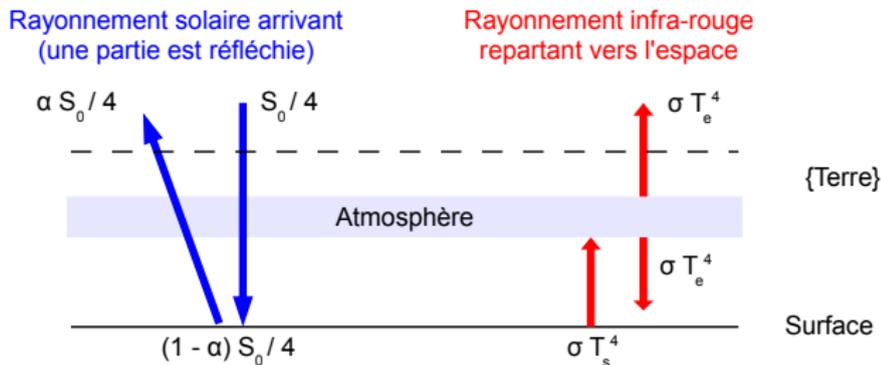
(i.e. transparente au **solaire**, opaque à l'**infra-rouge**, et de T uniforme)



# L'effet de serre – J. Fourier (1820s) et la chaleur obscure

Avec une atmosphère simplifiée :

(i.e. transparente au **solaire**, opaque à l'**infra-rouge**, et de T uniforme)



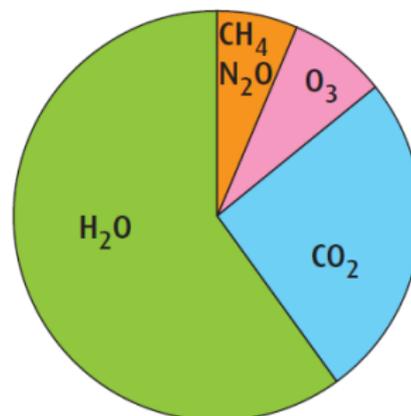
► Température de surface :  $T_s^4 = 2T_e^4 \Rightarrow T_s = 303 \text{ K} = 30^\circ \text{ C}$ .

**Remarque** : En réalité, c'est un peu moins simple ; en particulier, la température de l'atmosphère n'est pas uniforme sur la verticale.

# Les principaux gaz à effet de serre (GES)

## Effet de serre ciel clair

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



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

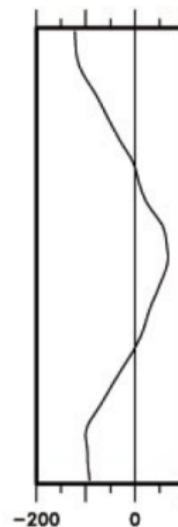
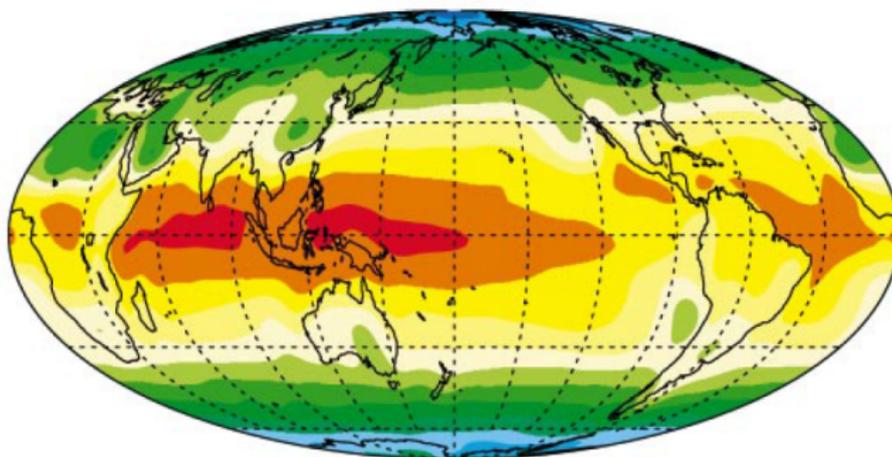
- Vapeur d'eau : durée de vie courte, très variable en temps et en espace.
- Ozone : surtout entre 15 et 50km (couche d'ozone *stratosphérique*).
- Autres GES : durée de vie longue, bien mélangés.

# Bilan énergétique : répartition géographique

- ▶ Les **tropiques** reçoivent plus d'énergie qu'ils n'en perdent.
- ▶ Les **pôles** perdent plus d'énergie qu'ils n'en reçoivent.

Net Radiation

( $W m^{-2}$ )



-120 -100 -80 -60 -40 -20 0 20 40 60 80

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

# Et nous y revoilà !

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

Température

Précipitations

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

# 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 *forçages* en entrée du modèle.

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 *forçages* en entrée du modèle.

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).

# Peut-on avoir confiance dans les modèles de climat ?

Effort permanent d'évaluation par rapport aux observations disponibles.

Exemple 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 du cycle annuel des précipitations :

Observations

Modèles

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

# La variabilité interne

Pourquoi ne fait-il pas toujours  $15^{\circ}\text{C}$  un 19/03 à Carcassonne ?

# La variabilité interne

Pourquoi ne fait-il pas toujours  $15^{\circ}\text{C}$  un 19/03 à Carcassonne ?

Réponse : même à l'équilibre (forçages constants), la météo bouge.  
→ C'est ce qu'on appelle la **variabilité interne** du climat.

# La variabilité interne

Pourquoi ne fait-il pas toujours  $15^{\circ}\text{C}$  un 19/03 à Carcassonne ?

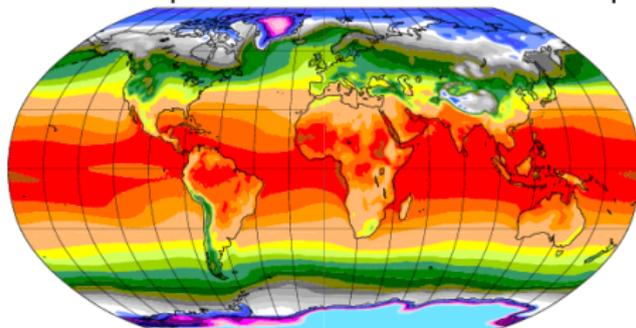
Réponse : même à l'équilibre (forçages constants), la météo bouge.  
 → C'est ce qu'on appelle la **variabilité interne** du climat.

Exemple d'une expérience à forçages constants (modèle CNRM-CM5):

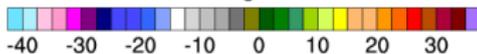
Températures annuelles

CNRM tas piControl raw

1



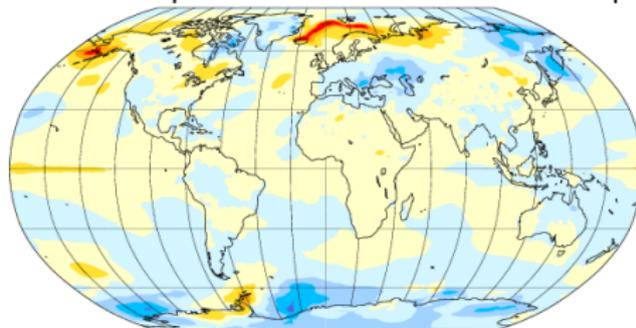
degC



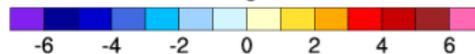
Écarts à la moyenne

CNRM tas piControl ano

1



degC



# La variabilité interne

Pourquoi ne fait-il pas toujours  $15^{\circ}\text{C}$  un 19/03 à Carcassonne ?

Réponse : même à l'équilibre (forçages constants), la météo bouge.

→ C'est ce qu'on appelle la **variabilité interne** du climat.

Exemple d'une expérience à forçages constants (modèle CNRM-CM5):

Températures annuelles

Écarts à la moyenne

# Résumé

Le climat est déterminé par de **grands équilibres physiques**, en premier lieu l'équilibre énergétique du système {Terre}.

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

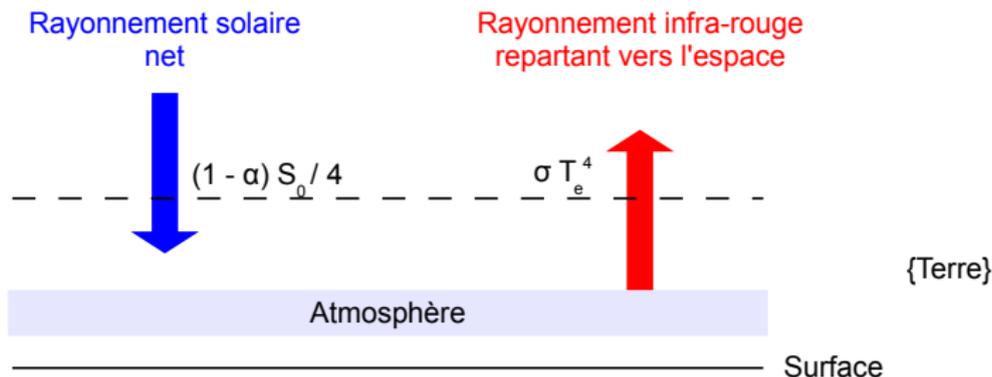
Les **modèles numériques** de climat permettent de décrire, comprendre, expérimenter le système climatique.

# Plan

- 1 Introduction
- 2 Physique du climat, effet de serre et 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 ?

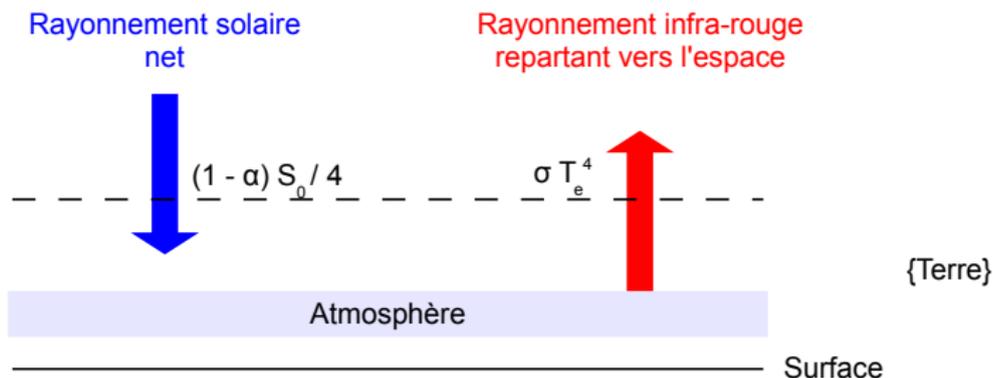
# Comment perturber le climat ?

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}.

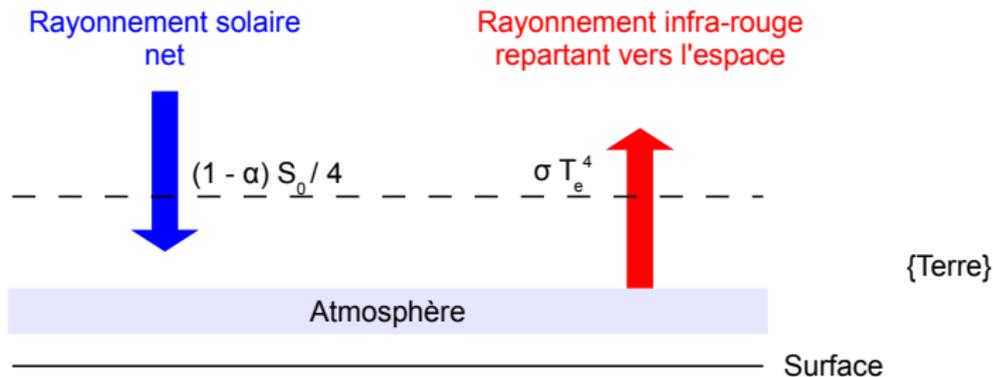


Réponse : il suffit de perturber cet équilibre !

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

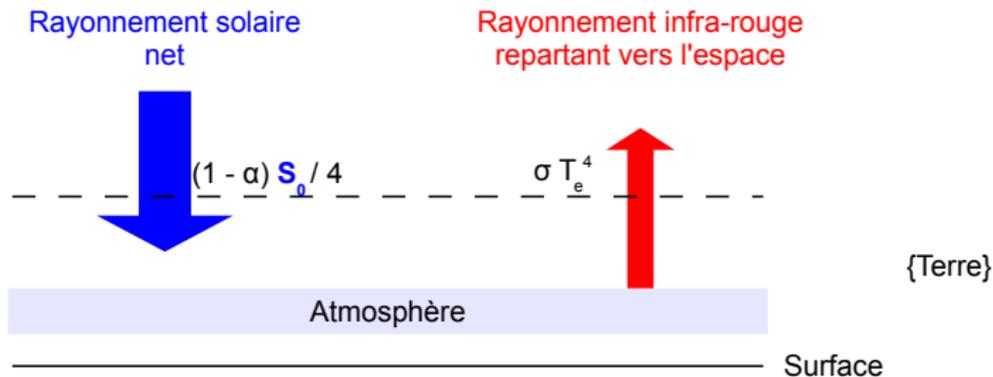
# Forçage solaire (via $S_0$ )

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



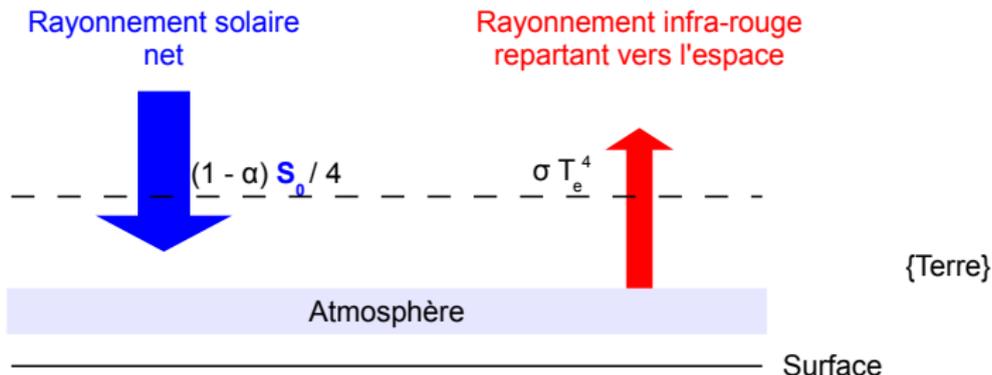
# Forçage solaire (via $S_0$ )

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**.

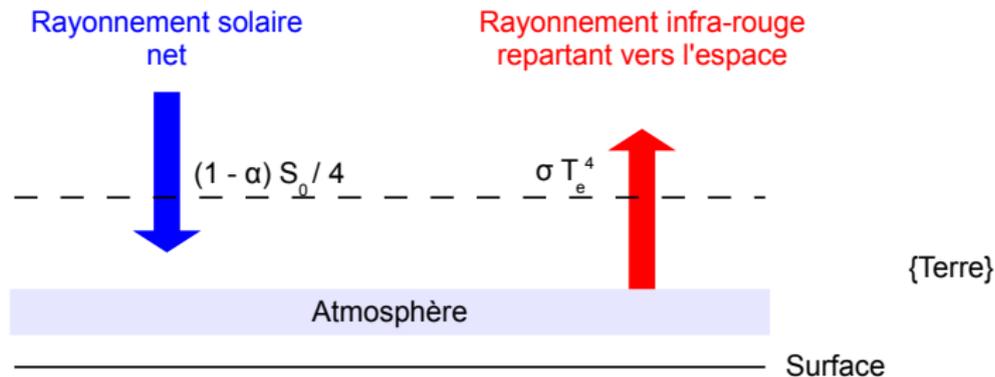
Alternance des périodes *glaciaires* et *inter-glaciaires*.

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

Variations de l'*irradiance* solaire, cycles à  $\sim 11$  ans.

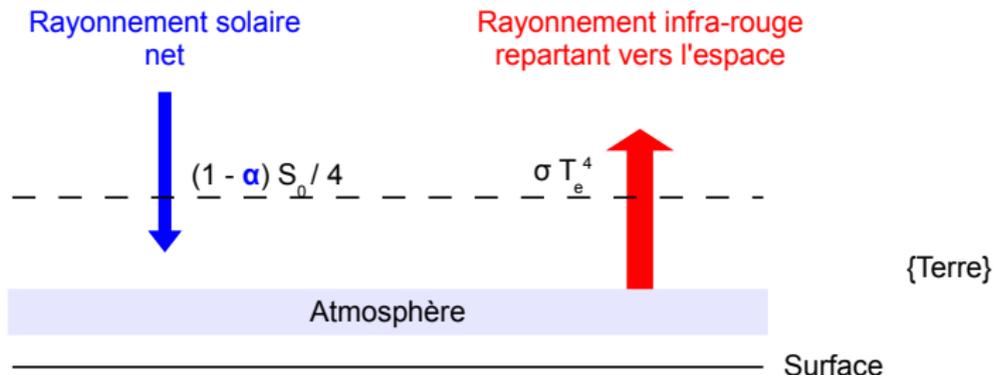
# Forçage aérosols (via $\alpha$ )

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



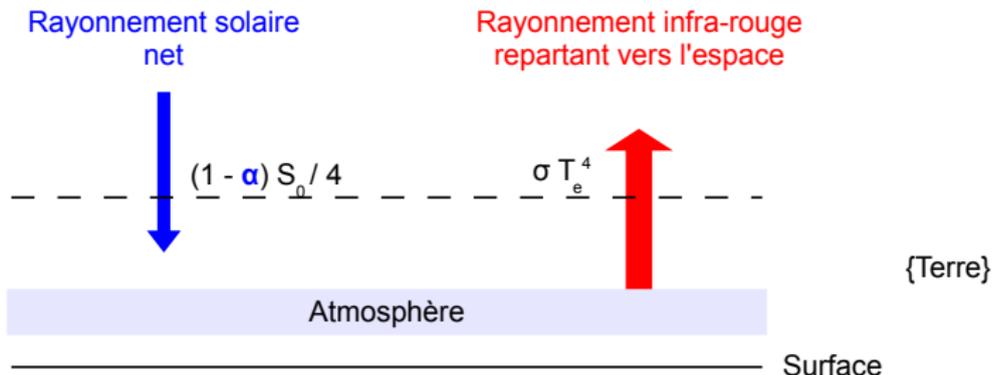
# Forçage aérosols (via $\alpha$ )

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



# Forçage aérosols (via $\alpha$ )

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



**Aérosols** = particules en suspension dans l'atmosphère.

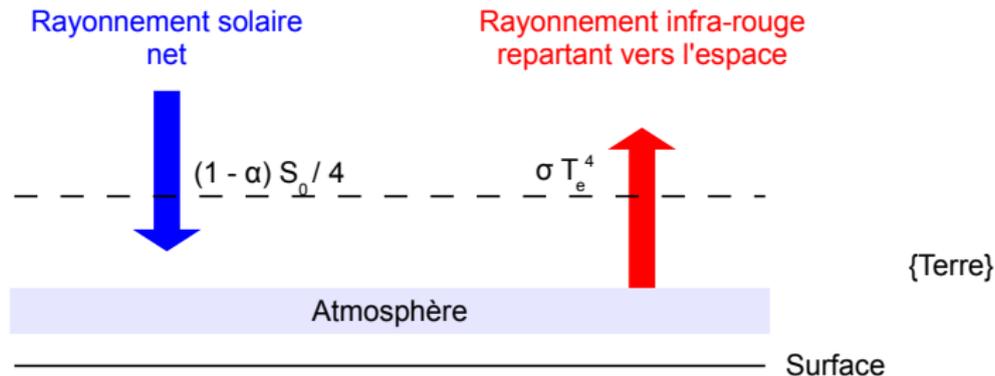
→ Naturels : poussières volcaniques, désertiques, feux de forêts, etc.

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

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

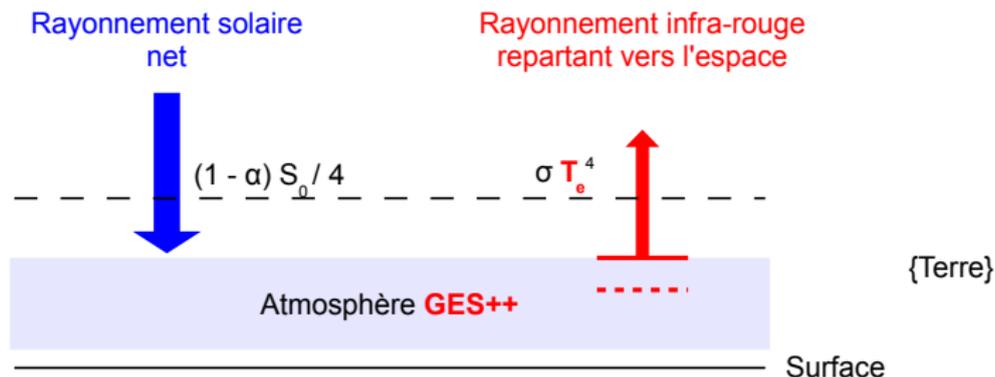
# Forçage GES (via $T_e$ )

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



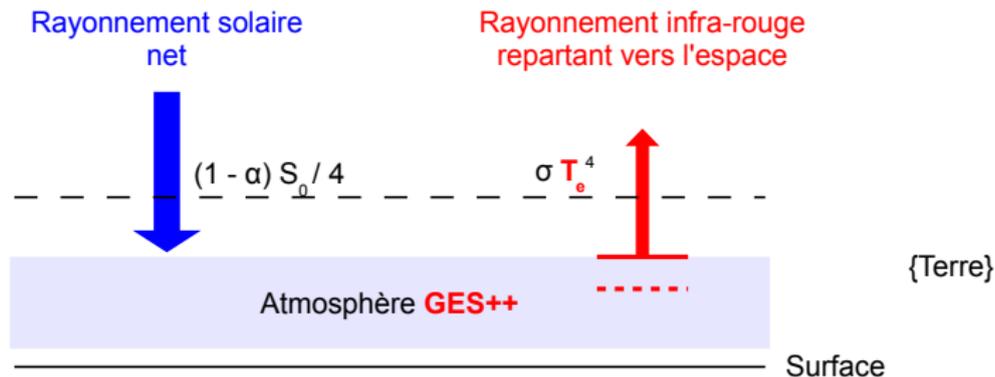
# Forçage GES (via $T_e$ )

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.



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.

**N.B.** Ce n'est donc pas que l'atmosphère absorbe davantage.

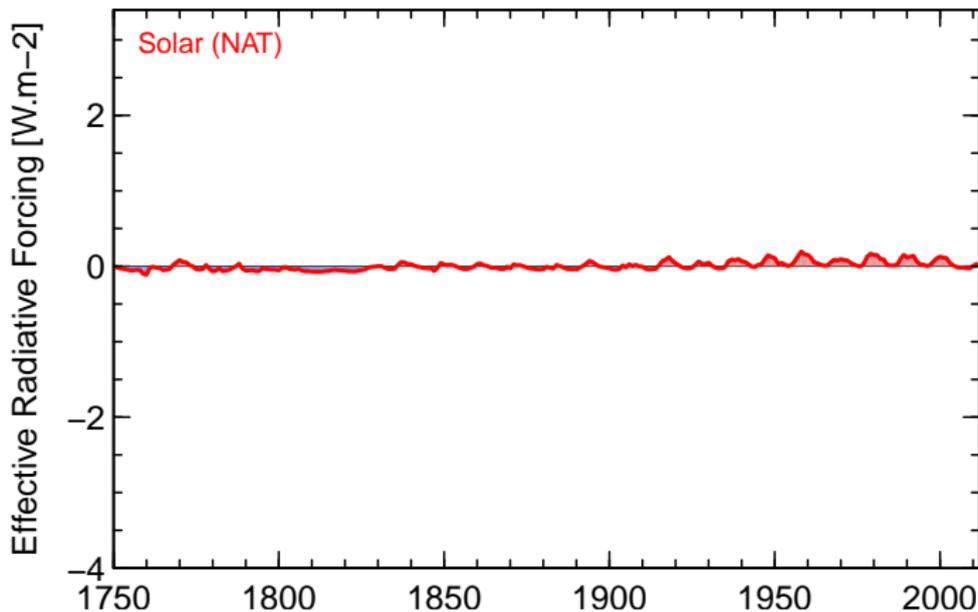
# Evolution récente des concentrations de GES

- ▶ Principaux gaz concernés : ceux à durée longue ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  et  $\text{N}_2\text{O}$ ).
- ▶ Présents à l'état naturel, mais augmentation récente **anthropique**.

Vidéo CO2

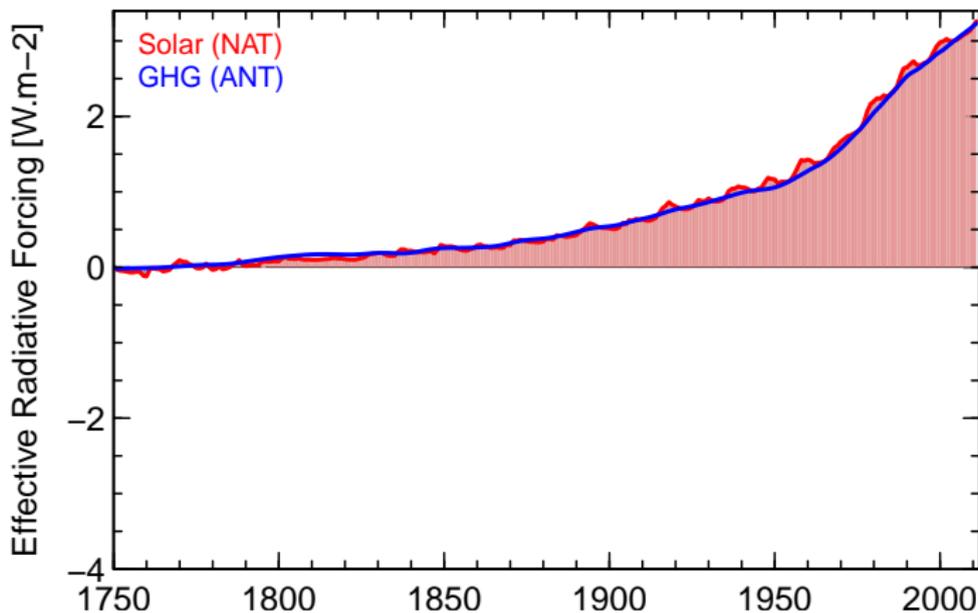
# Évolution des forçages depuis 1750

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



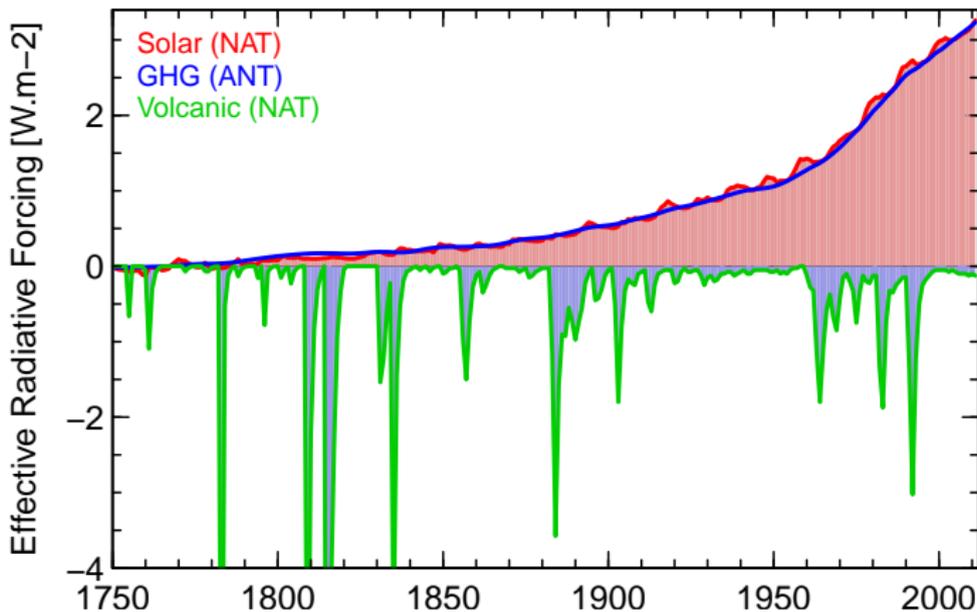
# Évolution des forçages depuis 1750

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



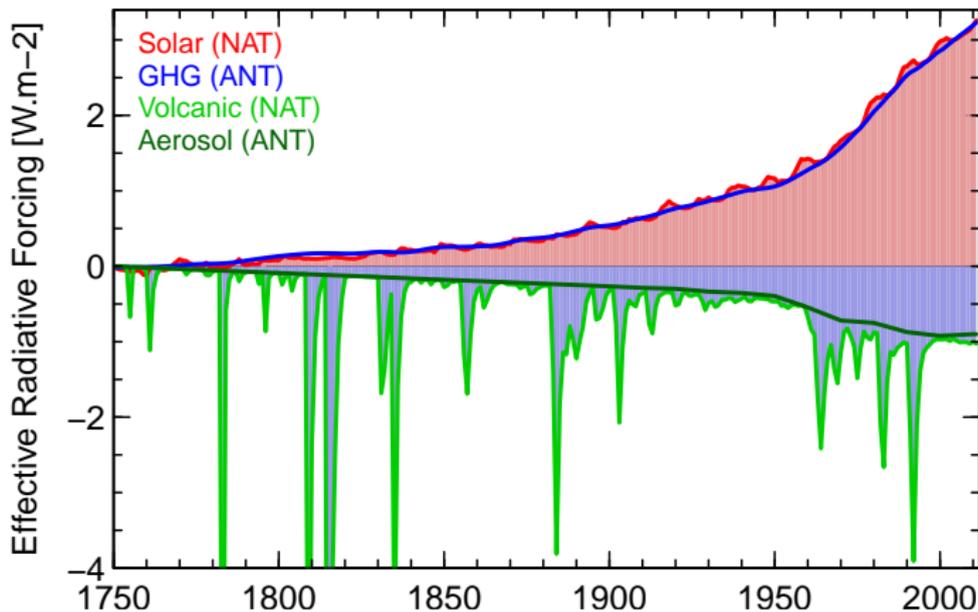
# Évolution des forçages depuis 1750

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



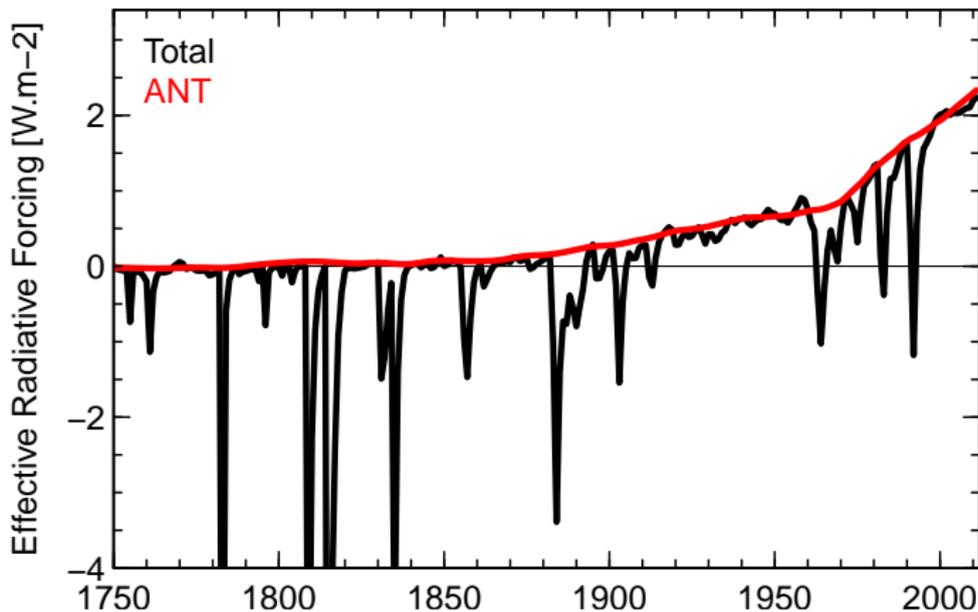
# Évolution des forçages depuis 1750

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



# Évolution des forçages depuis 1750

Adapté de la Figure 8.18 de l'IPCC AR5 (2013). Données 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 CO<sub>2</sub> est brusquement doublée :

- La température s'élève rapidement de  $\sim 1.2^\circ\text{C}$ .
- Puis les rétroactions ajoutent  $\sim 1.8^\circ\text{C}$  ( $\pm 1.5$ ) supplémentaires<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Estimations tirées de Dufresne and Bony (2008).

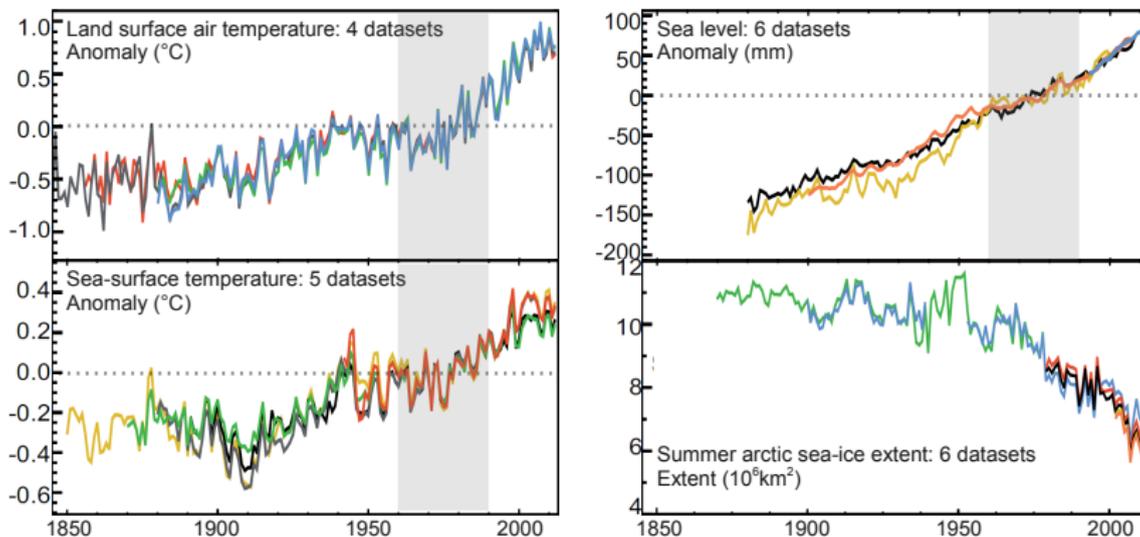
# Où va l'excès d'énergie ?

# Où va l'excès d'énergie ?

→ {Océans}<sub>93%</sub> + {Cryosphère}<sub>3%</sub> + {Continents}<sub>3%</sub> + {Atmosphère}<sub>1%</sub>

# Où va l'excès d'énergie ?

→ {Océans}<sub>93%</sub> + {Cryosphère}<sub>3%</sub> + {Continents}<sub>3%</sub> + {Atmosphère}<sub>1%</sub>



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.

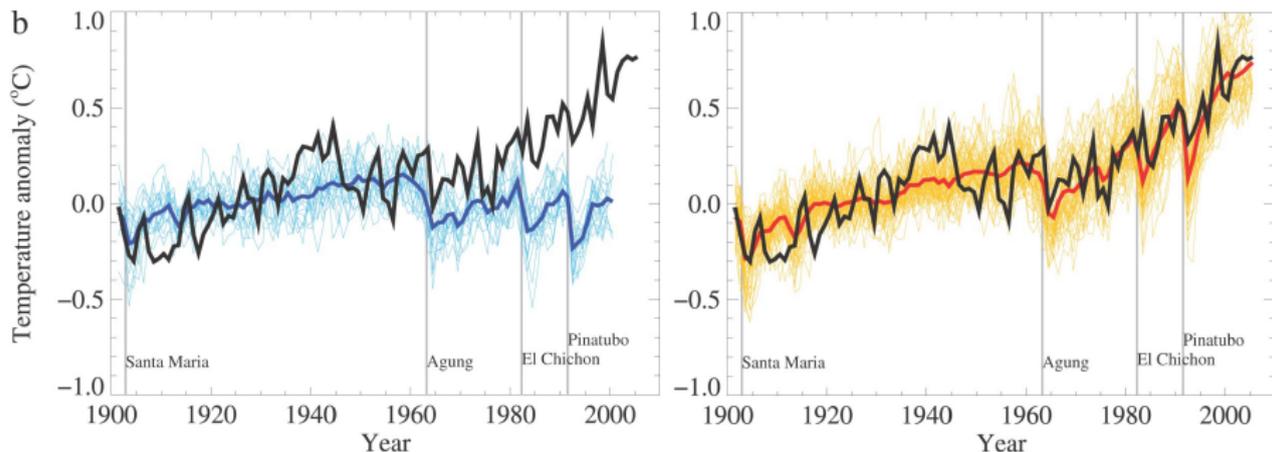
# Peut-on détecter l'influence anthropique *a posteriori* ?

# Peut-on détecter l'influence anthropique *a posteriori* ?

Réponse : oui.

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.

# 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 de causes naturelles et anthropiques.

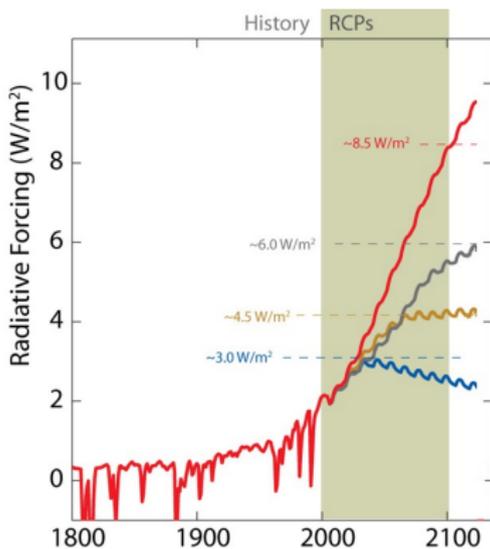
→ **Autrement dit, les mesures sont en accord avec la théorie physique.**

# Plan

- 1 Introduction
- 2 Physique du climat, effet de serre et 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 ?

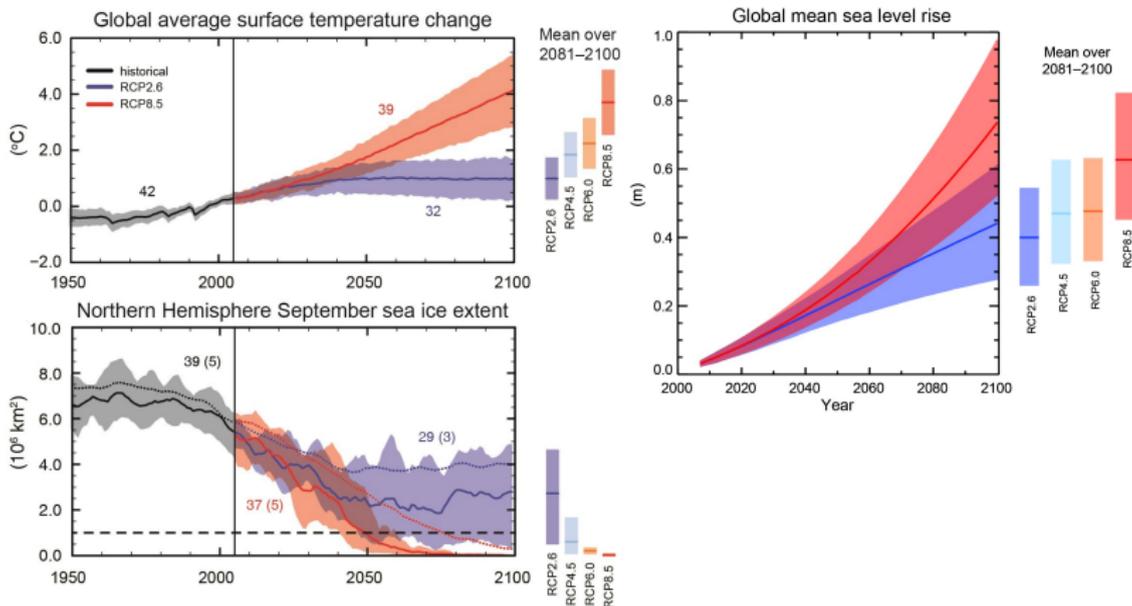
# Quelle évolution pour le 21e siècle ?

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



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**.

# Changement climatique vs. variabilité interne 1/2

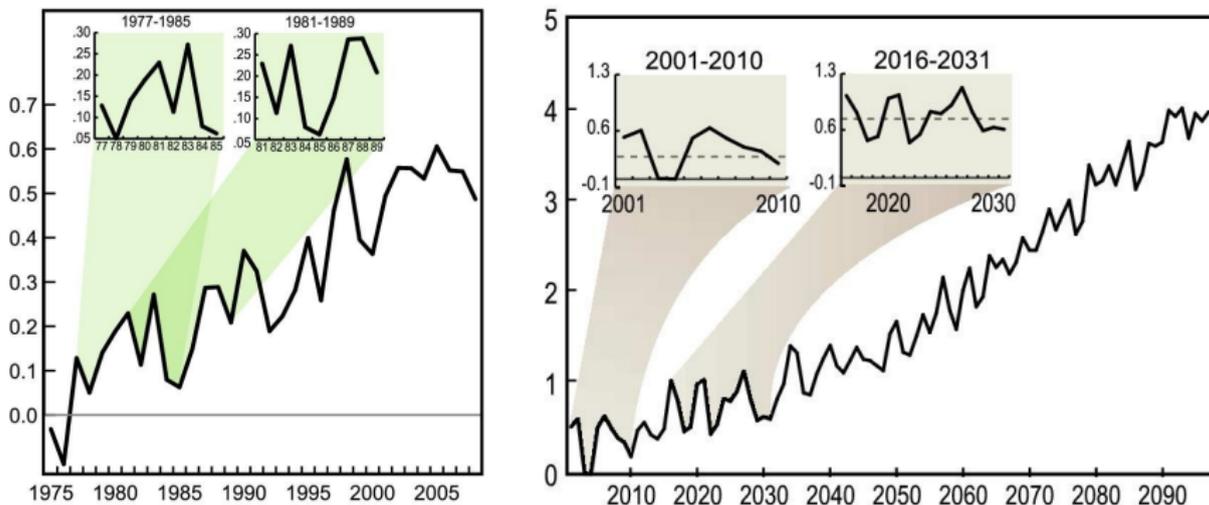
20e + scénario bas

20e + scénario haut

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

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**.

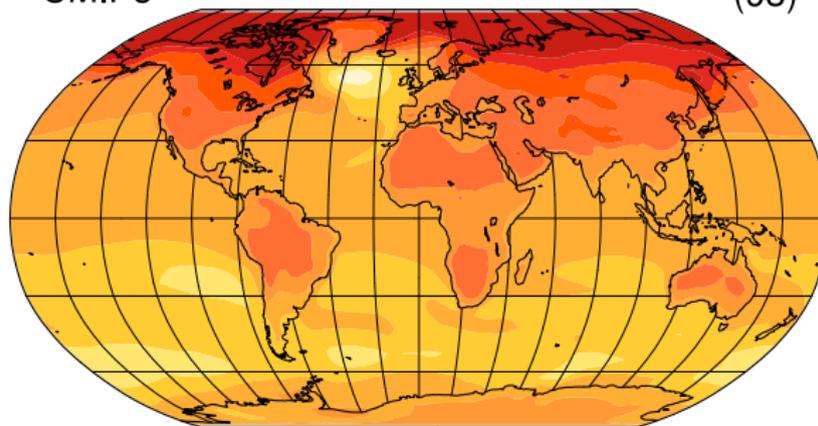
# Plan

- 1 Introduction
- 2 Physique du climat, effet de serre et 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 ?

# Géographie du changement climatique Températures

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

Température normalisée par T globale  
CMIP5 (93)



°C par °C de réchauffement global

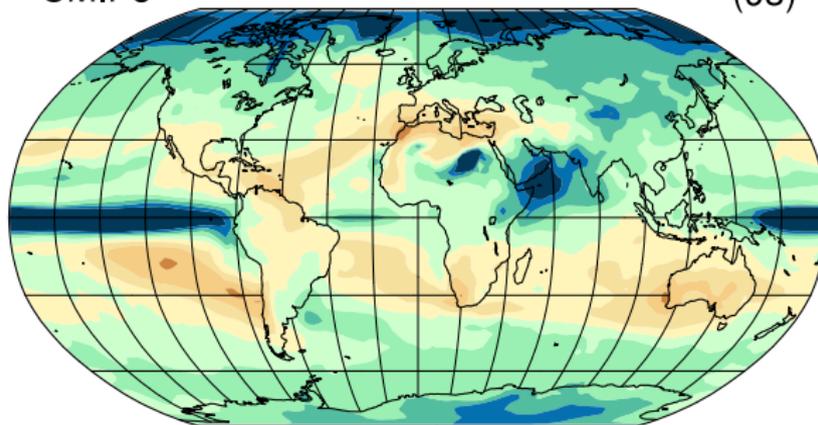


Source : Boucher et al., *La Météorologie Spécial Climat* (2015).

# Géographie du changement climatique Précipitations

- ▶ Intensification du cycle hydrologique (*wet get wetter, dry get drier*).
- ▶ Plus incertain que pour température (ex. assèchement zone Méditerranée).

Précipitation normalisée par T globale  
CMIP5 (93)



% par °C de réchauffement global

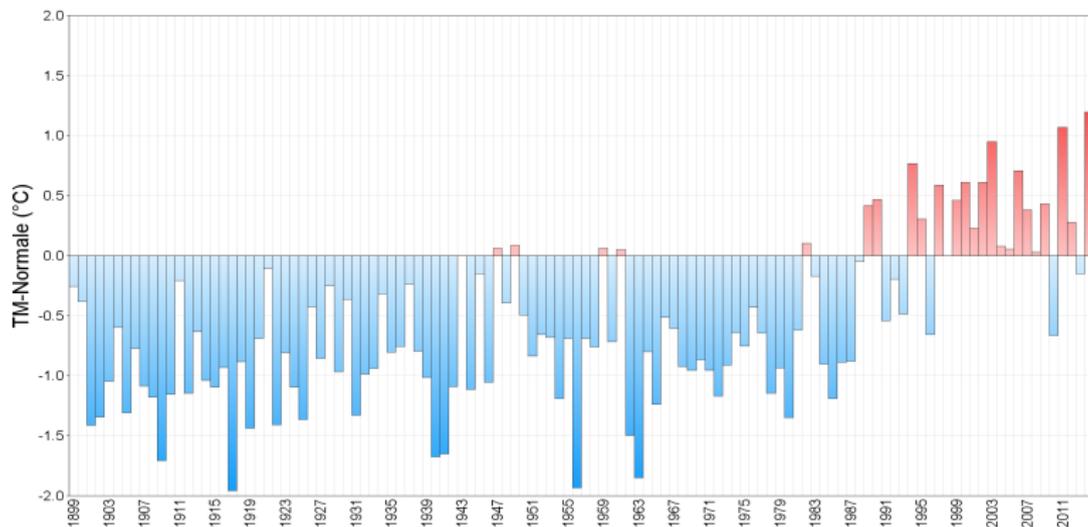


Source : Boucher et al., *La Météorologie Spécial Climat* (2015).

# La France s'est-elle déjà réchauffée ?

→ Oui.

## Température annuelle moyenne France

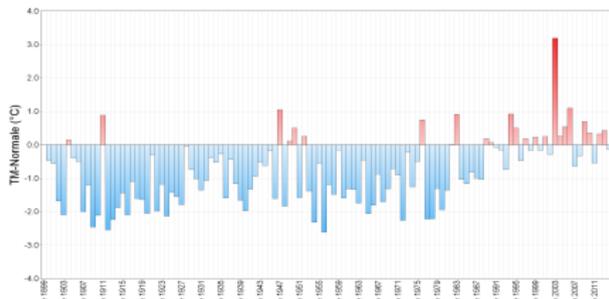


Source et crédits figures : Météo-France (écarts aux normales 1981-2010).

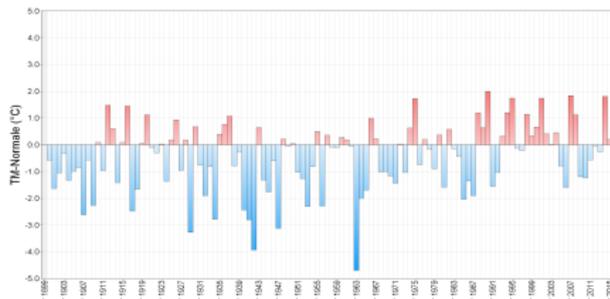
# La France s'est-elle déjà réchauffée ?

→ Oui. Mais pas toujours évident à percevoir (ex. hiver).

## Température été



## Température hiver



Source et crédits figures : Météo-France (écarts aux normales 1981-2010).

# Peut-on attribuer un événement au C.C. ?

# Peut-on attribuer un événement au C.C. ?

→ Question mal posée : un événement est par définition météorologique.

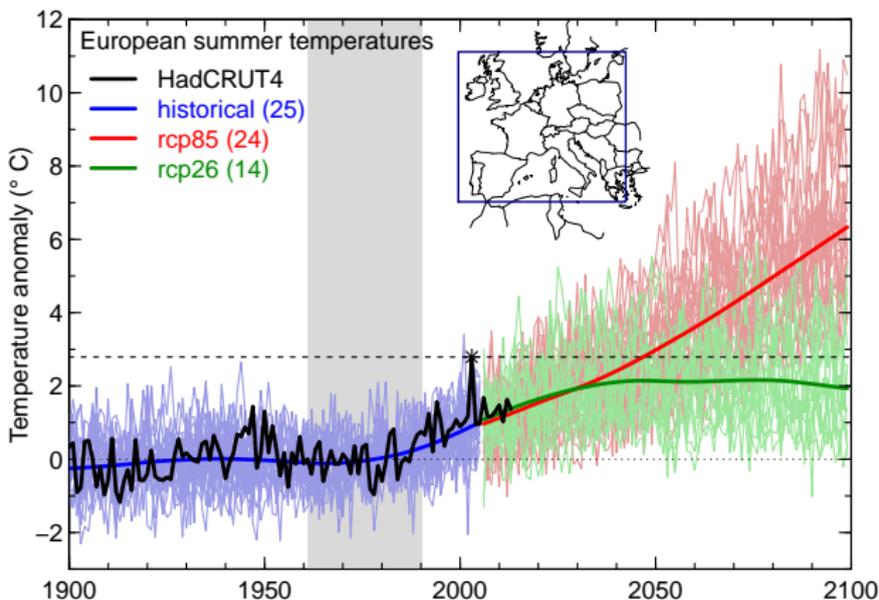
La bonne question est : la probabilité de l'événement a-t-elle changé ?

# Peut-on attribuer un événement au C.C. ?

→ Question mal posée : un événement est par définition météorologique.

La bonne question est : la probabilité de l'événement a-t-elle changé ?

Exemple de l'été 2003 en Europe :



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

# Changement climatique et extrêmes

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

# Changement climatique et extrêmes

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.

# Changement climatique et extrêmes

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.

# Changement climatique et extrêmes

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.

# Changement climatique et extrêmes

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.

# Résumé

Le changement climatique modifie-t-il la météo et ses extrêmes ?

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

—

Peut-on imputer un événement au changement climatique ?

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

# Conclusions

# Conclusions

1. Le climat est piloté par de grands équilibres physiques.  
Si on perturbe ces équilibres, on modifie le climat.

# Conclusions

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

Si on perturbe ces équilibres, on modifie le climat.

2. Les activités humaines perturbent l'équilibre énergétique.

L'augmentation de GES dans l'atmosphère induit un excès d'énergie.

# Conclusions

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

Si on perturbe ces équilibres, on modifie le climat.

2. Les activités humaines perturbent l'équilibre énergétique.

L'augmentation de GES dans l'atmosphère induit un excès d'énergie.

3. La théorie est confirmée par les mesures.

On s'attend à un réchauffement, et on l'observe.

# Conclusions

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

Si on perturbe ces équilibres, on modifie le climat.

2. Les activités humaines perturbent l'équilibre énergétique.

L'augmentation de GES dans l'atmosphère induit un excès d'énergie.

3. La théorie est confirmée par les mesures.

On s'attend à un réchauffement, et on l'observe.

4. Le réchauffement se superpose à la variabilité interne.

La lenteur des changements peut les rendre difficilement perceptibles.

# Conclusions

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

Si on perturbe ces équilibres, on modifie le climat.

2. Les activités humaines perturbent l'équilibre énergétique.

L'augmentation de GES dans l'atmosphère induit un excès d'énergie.

3. La théorie est confirmée par les mesures.

On s'attend à un réchauffement, et on l'observe.

4. Le réchauffement se superpose à la variabilité interne.

La lenteur des changements peut les rendre difficilement perceptibles.

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

Selon le scénario, un climat à la carte.

# Conclusions

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

Si on perturbe ces équilibres, on modifie le climat.

2. Les activités humaines perturbent l'équilibre énergétique.

L'augmentation de GES dans l'atmosphère induit un excès d'énergie.

3. La théorie est confirmée par les mesures.

On s'attend à un réchauffement, et on l'observe.

4. Le réchauffement se superpose à la variabilité interne.

La lenteur des changements peut les rendre difficilement perceptibles.

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 piloté par de grands équilibres physiques.

Si on perturbe ces équilibres, on modifie le climat.

2. Les activités humaines perturbent l'équilibre énergétique.

L'augmentation de GES dans l'atmosphère induit un excès d'énergie.

3. La théorie est confirmée par les mesures.

On s'attend à un réchauffement, et on l'observe.

4. Le réchauffement se superpose à la variabilité interne.

La lenteur des changements peut les rendre difficilement perceptibles.

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.

