

Changement climatique : la planète se réchauffe-t-elle vraiment ?

Julien Cattiaux

Chercheur CNRS

Centre National de Recherches Météorologiques
(UMR CNRS/Météo-France)

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

Lycée Pierre-Paul Riquet, Saint-Orens | 22 novembre 2017

Météo et climat

Physique du système climatique

Évolution récente du climat et projections futures

Météo et climat

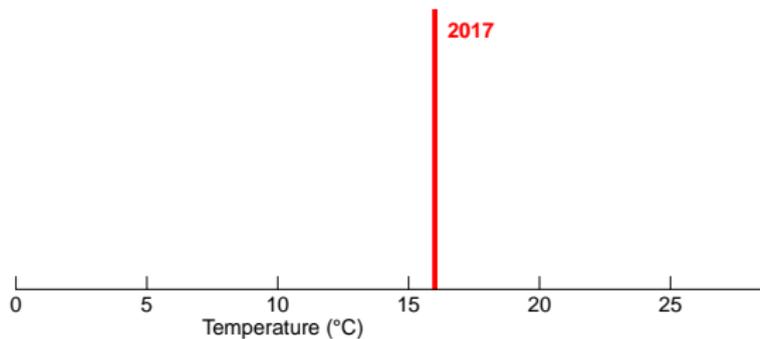
Physique du système climatique

Évolution récente du climat et projections futures

Météo et climat : une définition

Aujourd'hui, à Toulouse, il fait **16 °C** : c'est la **météo**.

Température à Toulouse le 22 novembre



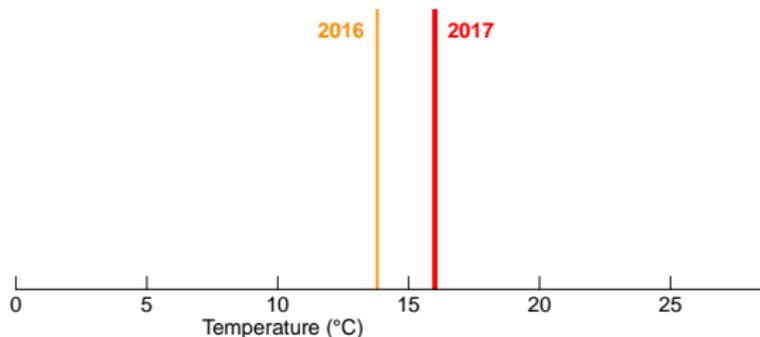
Tracé à partir des données Météo-France (1947–2017).

Météo et climat : une définition

Aujourd'hui, à Toulouse, il fait **16 °C** : c'est la **météo**.

Mais d'autres T auraient été possibles (cf. **statistiques du passé**).

Température à Toulouse le 22 novembre



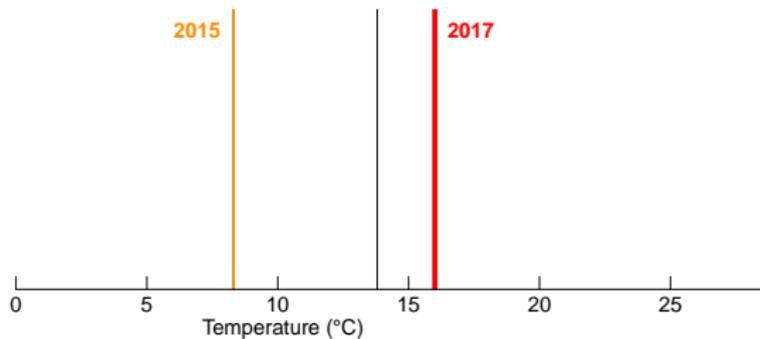
Tracé à partir des données Météo-France (1947–2017).

Météo et climat : une définition

Aujourd'hui, à Toulouse, il fait **16 °C** : c'est la **météo**.

Mais d'autres T auraient été possibles (cf. **statistiques du passé**).

Température à Toulouse le 22 novembre



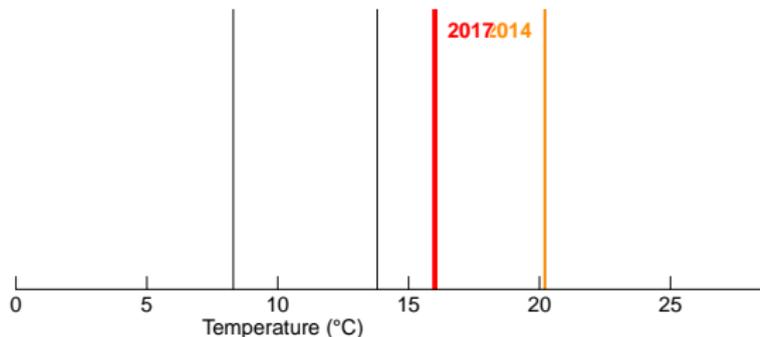
Tracé à partir des données Météo-France (1947–2017).

Météo et climat : une définition

Aujourd'hui, à Toulouse, il fait **16 °C** : c'est la **météo**.

Mais d'autres T auraient été possibles (cf. **statistiques du passé**).

Température à Toulouse le 22 novembre



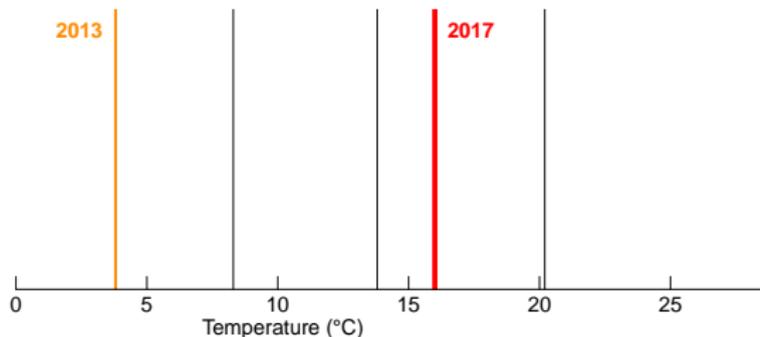
Tracé à partir des données Météo-France (1947–2017).

Météo et climat : une définition

Aujourd'hui, à Toulouse, il fait **16 °C** : c'est la **météo**.

Mais d'autres T auraient été possibles (cf. **statistiques du passé**).

Température à Toulouse le 22 novembre



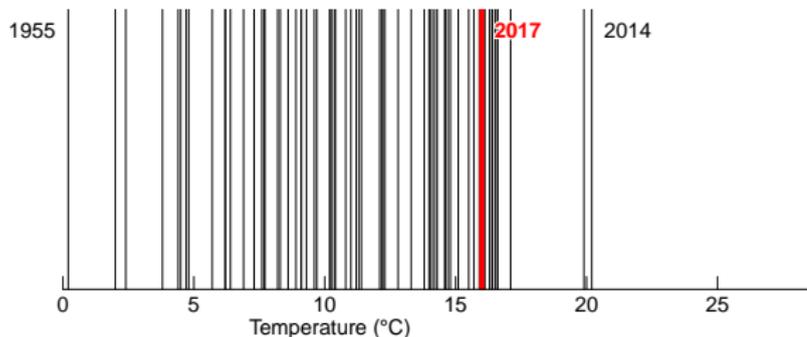
Tracé à partir des données Météo-France (1947–2017).

Météo et climat : une définition

Aujourd'hui, à Toulouse, il fait **16 °C** : c'est la **météo**.

Mais d'autres T auraient été possibles (cf. **statistiques du passé**).

Température à Toulouse le 22 novembre



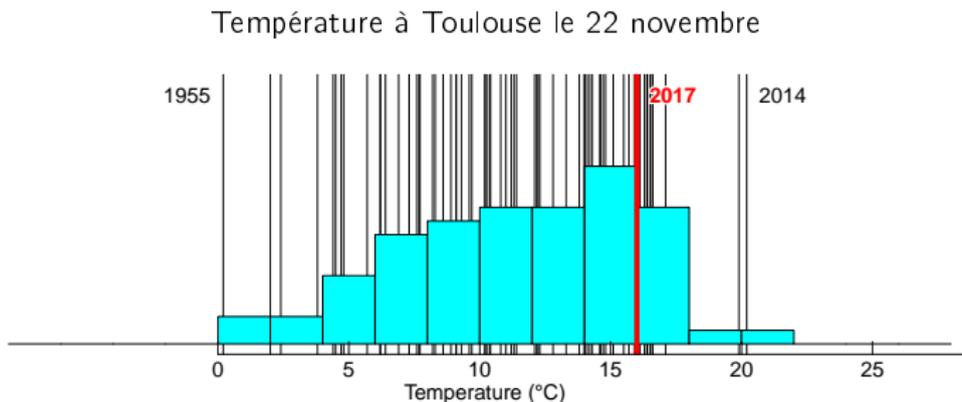
Tracé à partir des données Météo-France (1947–2017).

Météo et climat : une définition

Aujourd'hui, à Toulouse, il fait 16°C : c'est la météo.

Mais d'autres T auraient été possibles (cf. statistiques du passé).

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



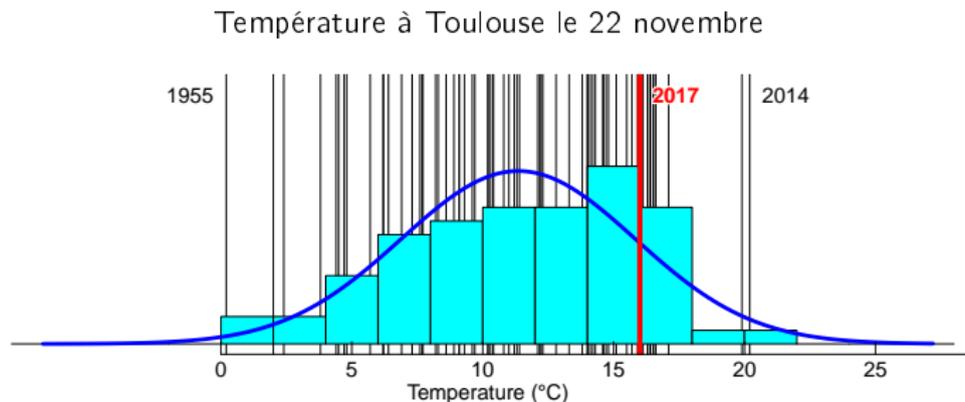
Tracé à partir des données Météo-France (1947–2017).

Météo et climat : une définition

Aujourd'hui, à Toulouse, il fait 16°C : c'est la **météo**.

Mais d'autres T auraient été possibles (cf. **statistiques du passé**).

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



Tracé à partir des données Météo-France (1947–2017).

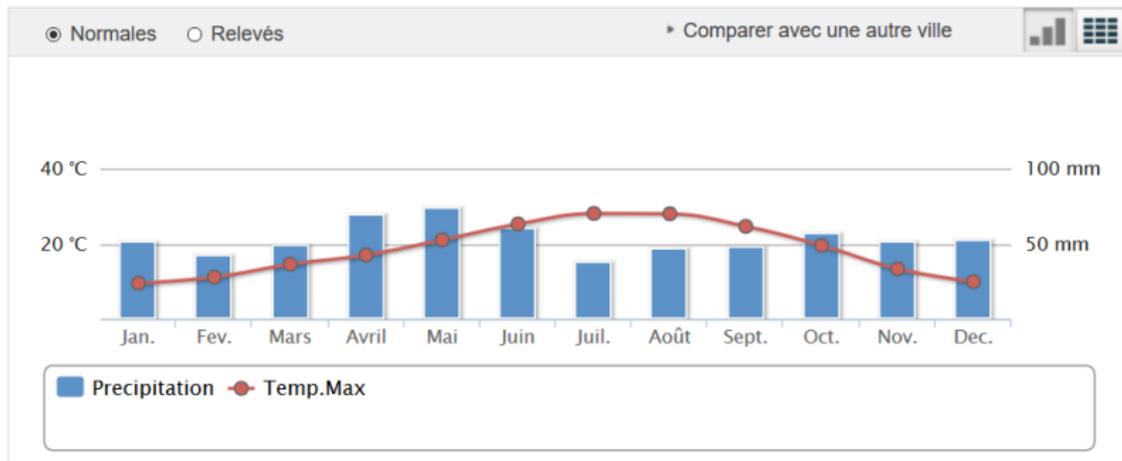
Le **climat** est l'ensemble des **météos** possibles
(notion de *distribution de probabilité*).

Les fameuses normales de saison

Au premier ordre, comme toute distribution de probabilité, le climat peut être décrit par sa **moyenne** : la **normale**.

Exemple : Météo-France moyenne actuellement sur 1981–2010.

DONNEES CLIMATIQUES DE LA STATION DE TOULOUSE



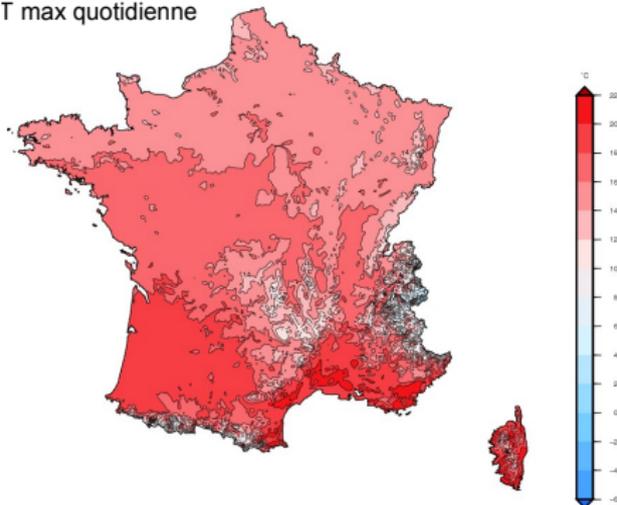
Source : site public de Météo-France, onglet [climat](#).

Normales France

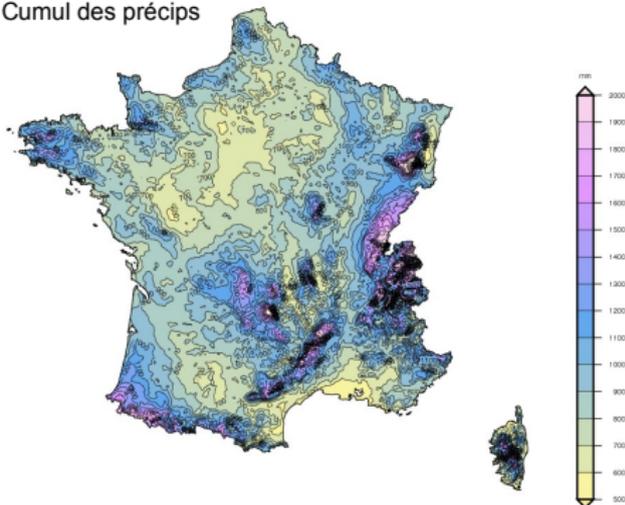
Il fait plus **chaud** au sud qu'au nord.

Il **pleut** autant à Nice qu'à Brest !

T max quotidienne



Cumul des précip



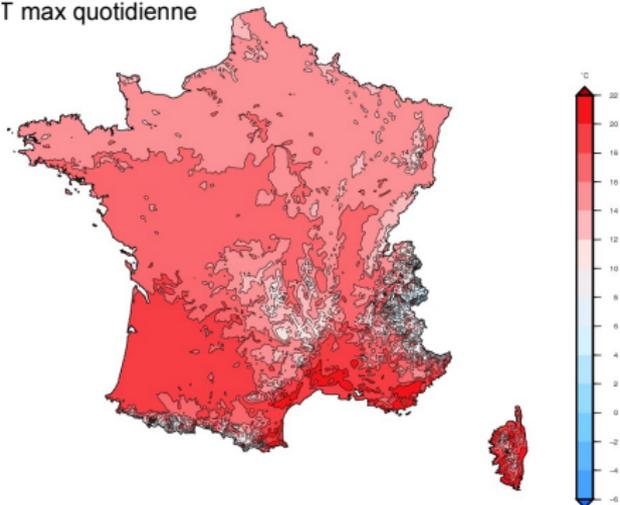
Source et crédits figures : Météo-France (normales 1981-2010).

Normales France

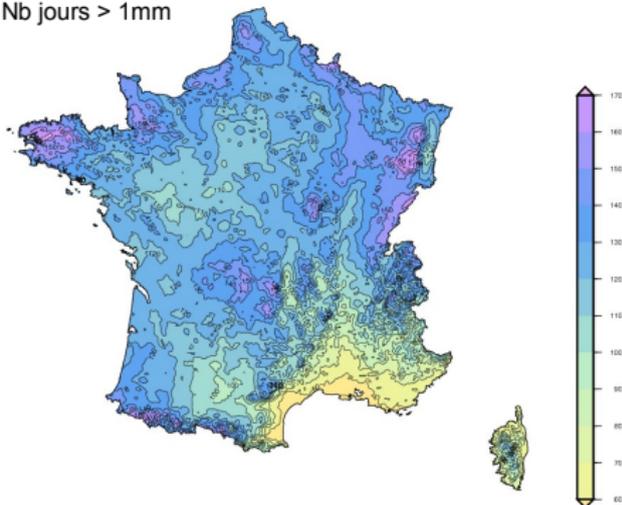
Il fait plus **chaud** au sud qu'au nord.

Il **pleut** autant à Nice qu'à Brest ! Mais moins souvent.

T max quotidienne



Nb jours > 1mm



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

Normales Monde

Il fait plus **chaud** à l'équateur qu'aux pôles.

Il **pleut** plus aux tropiques qu'ailleurs : c'est l'**ITCZ**.

Température

Précipitations

Tracé à partir des données **CRU** 1961–1990 et **GPCP** 1981–2010.

Normales Monde

Il fait plus **chaud** à l'équateur qu'aux pôles.

Il **pleut** plus aux tropiques qu'ailleurs : c'est l'**ITCZ**.

Il y a des **saisons** (chaudes/froides, sèches/humides).

Température

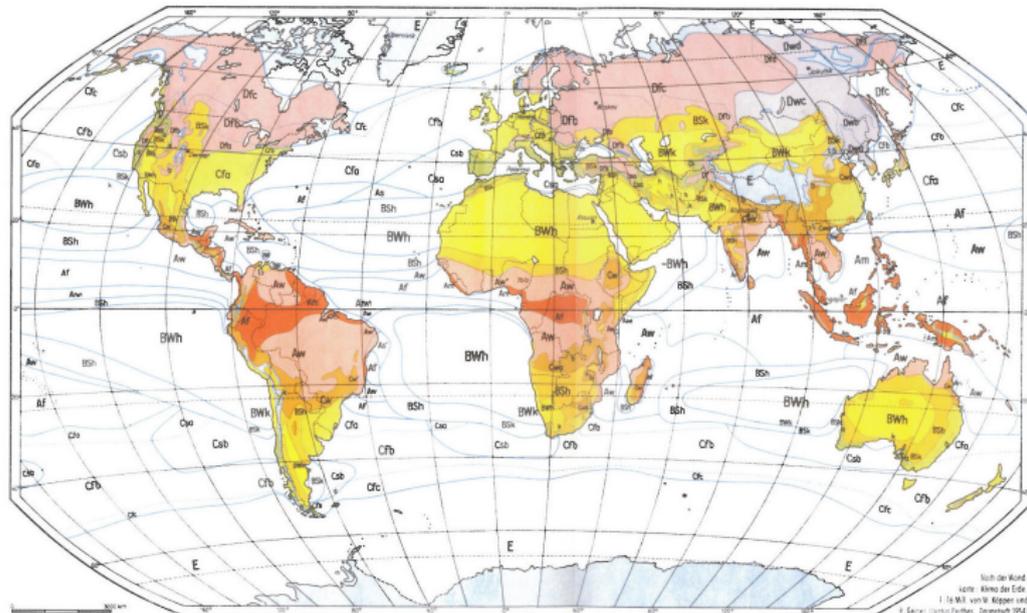
Précipitations

Tracé à partir des données **CRU** 1961–1990 et **GPCP** 1981–2010.

Classification des climats



W.-P. Köppen
(1846–1940)



Nach der World
Karte: Klima der Erde
1. Teil, 8. Aufl. von W. Köppen und
K. Geiger (Stuttgart/Paris, Deutscher 1954)

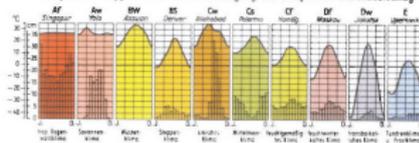
KLIMAGEBIETE (Erläuterungen der Klimaformel)

Erster Buchstabe:	Zweiter Buchstabe:	Dritter Buchstabe:
A, C, G: gemäßigtes/Weitläs. Niederschlag (in hochgelegenen Gebirgsnischen)	S: Steppenklima: r weniger als 2x bei Winter- regen, unter $21^{\circ} + 10^{\circ}$ bei Sommerregen	h: heißer Sommer w: wärmer Monat unter 22° k: kühler Sommer w: weniger als 4 Monate über 10° etwa bestimmt
A: Tropische Klimate: alle Monate über 10° Mitteltemperatur ($^{\circ}\text{C}$)	W: Wüstenklima: weniger als 1/4 bei Sommerregen alle Monate ausreichende Niederschlag	h: heißer Monat unter 22° w: wärmerer Monat unter 22° k: kühler Monat w: weniger als 4 Monate über 10° etwa bestimmt
B: Trockenklima: die Vegetation hat bei einer Wassermenge	U: Umeiseln Klima: trotz Trocken. (z. B. Monsunregen)	h: heißer Sommer w: weniger als 4 Monate über 10° etwa bestimmt
C: Warmgemäßigte Klimate: kühler Monat 10° bis -3°	T: Trockenzeit im Winter & heißer. Halbtagel dageg., auf die andere Halbtagel übergeleitet	h: heißer Monat unter 22° w: wärmerer Monat unter 22° k: kühler Monat unter 10°
D: Schneeklima: wärmerer Monat über 10° : kühlerer Monat unter -3°	e: einjährige Regenzeit zum Herbst verschoben	h: heißer Monat unter 22° w: wärmerer Monat unter 22° k: kühler Monat unter 10°
E: Eisklima: wärmerer Monat unter 10°	w: große Trockenzeit im Winter, klein im Sommer	h: heißer Monat unter 22° w: wärmerer Monat unter 22° k: kühler Monat unter 10°

Klimogruppierung:

Klimogruppierung:
Grenzen von a, b, c,
d im Bereich der A-,
C- und D-Klimate
Grenzen von h und k
im Bereich der
Trockenklimate

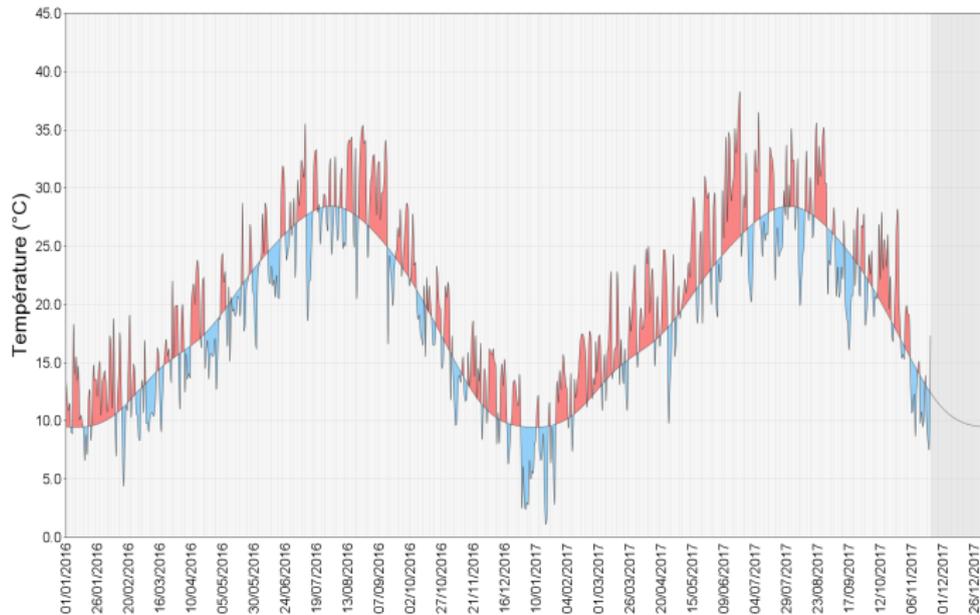
Beispiele für Köppens Klimazonen: Jahresgang von Temperatur und Niederschlag



Source : Klima der Erde, Köppen und Geiger (1954).

La météo n'est jamais normale

T max quotidienne à Toulouse en 2016–2017



Source : Météo-France.

À la normale se superpose la **variabilité** climatique.

Prévision météo vs. projection climatique

► **Prévision météo** : déterminer une *réalisation*.

Importance des **conditions initiales** (effet papillon, limite théorique à qq jours).

Prévision météo vs. projection climatique

- ▶ **Prévision météo** : déterminer une *réalisation*.

Importance des **conditions initiales** (effet papillon, limite théorique à qq jours).

- ▶ **Projection climatique** : estimer une *distribution*.

Importance des **grands équilibres physiques** (conservation énergie, masse, etc.).

Prévision météo vs. projection climatique

- **Prévision météo** : déterminer une *réalisation*.

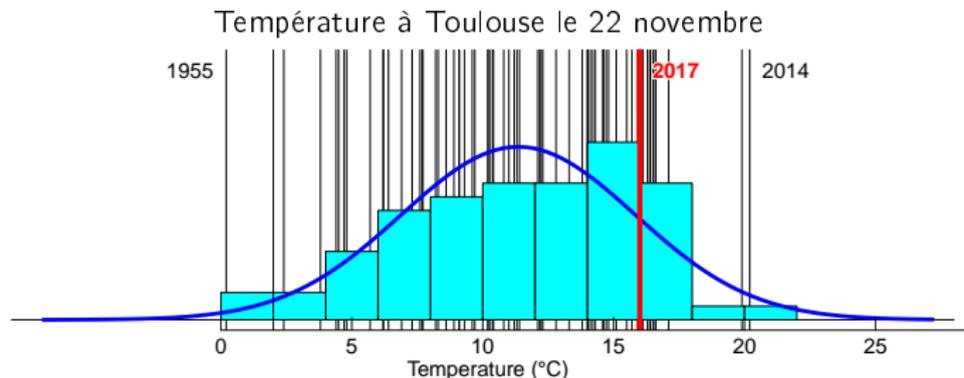
Importance des **conditions initiales** (effet papillon, limite théorique à qq jours).

- **Projection climatique** : estimer une *distribution*.

Importance des **grands équilibres physiques** (conservation énergie, masse, etc.).

Exemple : Quelle T fera-t-il le 22 novembre 2018 ? *Aucune idée.*

À quelle T peut-on s'attendre le 22 novembre 2018 ? Cf. *distribution bleue.*



Tracé à partir des données Météo-France (1947–2017).

Météo et climat

Physique du système climatique

Évolution récente du climat et projections futures

Rayonnement et énergie : généralités

Rayonnement et énergie : généralités

1. Tout corps émet de l'énergie sous forme de rayonnement.

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 de l'énergie sous forme de rayonnement.

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. La quantité d'énergie émise par un corps dépend de sa température.

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 de l'énergie sous forme de rayonnement.

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. La quantité d'énergie émise par un corps dépend de sa température.

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 émet, sa température augmente.

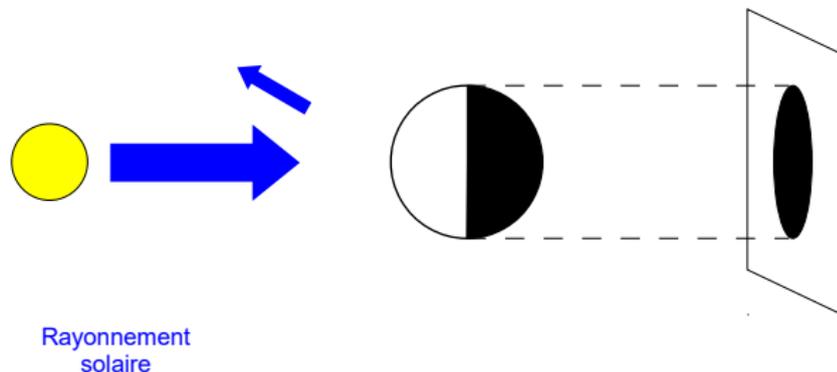
S'il reçoit moins d'énergie qu'il n'en émet, sa température diminue.

Système climatique et bilan d'énergie

Atmosphère ↔ Océans ↔ Cryosphère ↔ Continents ↔ Biosphère

Système climatique et bilan d'énergie

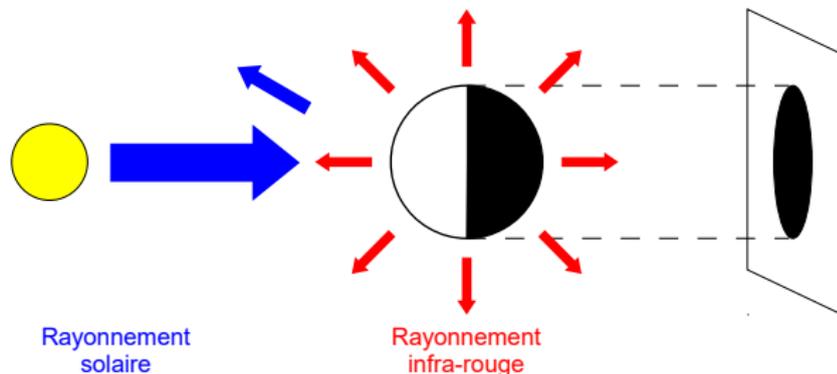
Atmosphère ↔ Océans ↔ Cryosphère ↔ Continents ↔ Biosphère



- **Énergie entrante** : rayonnement solaire arrivant sur un disque (πR^2). Une fraction est réfléchi (albédo planétaire).

Système climatique et bilan d'énergie

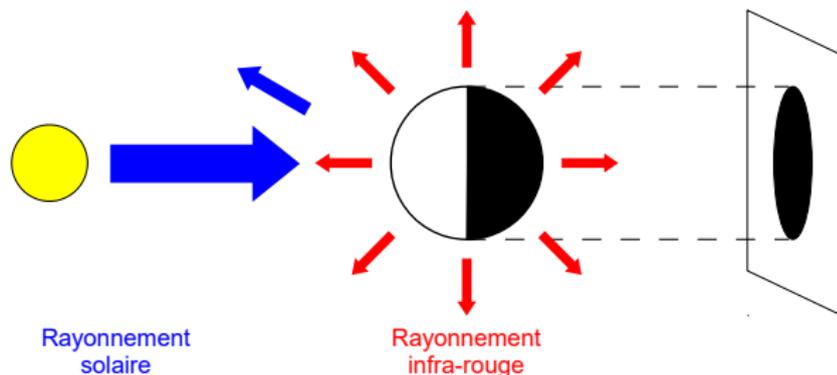
Atmosphère ↔ Océans ↔ Cryosphère ↔ Continents ↔ Biosphère



- ▶ **Énergie entrante** : **rayonnement solaire** arrivant sur un disque (πR^2). Une fraction est réfléchié (**albédo** planétaire).
- ▶ **Énergie sortante** : **rayonnement infra-rouge** émis par une sphère ($4\pi R^2$).

Système climatique et bilan d'énergie

Atmosphère ↔ Océans ↔ Cryosphère ↔ Continents ↔ Biosphère



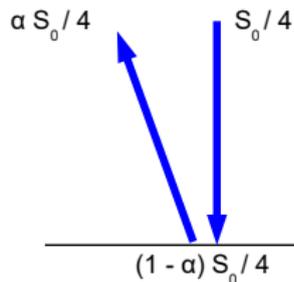
- ▶ **Énergie entrante** : **rayonnement solaire** arrivant sur un disque (πR^2). Une fraction est réfléchié (**albédo** planétaire).
- ▶ **Énergie sortante** : **rayonnement infra-rouge** émis par une sphère ($4\pi R^2$).

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

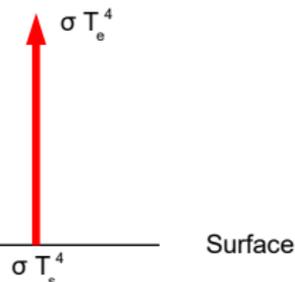
N.B. On néglige le flux géothermique ($\sim 1000 \times$ plus petit).

Un premier bilan d'énergie

Rayonnement solaire arrivant
(une partie est réfléchiée)



Rayonnement infra-rouge
repartant vers l'espace



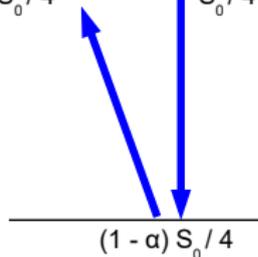
$$E_{\text{solaire}} = (1 - \alpha) S_0 / 4 = E_{\text{infra-rouge}} = \sigma T_e^4,$$

avec α albédo planétaire (0.3), S_0 constante solaire (1368 W.m^{-2})
et σ constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$).

Un premier bilan d'énergie

Rayonnement solaire arrivant
(une partie est réfléchié)

$$\alpha S_0 / 4 \quad S_0 / 4$$



Rayonnement infra-rouge
repartant vers l'espace

$$\sigma T_e^4$$

$$\sigma T_s^4$$

Surface

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

avec α albédo planétaire (0.3), S_0 constante solaire (1368 W.m^{-2})
et σ constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$).

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

Un premier bilan d'énergie

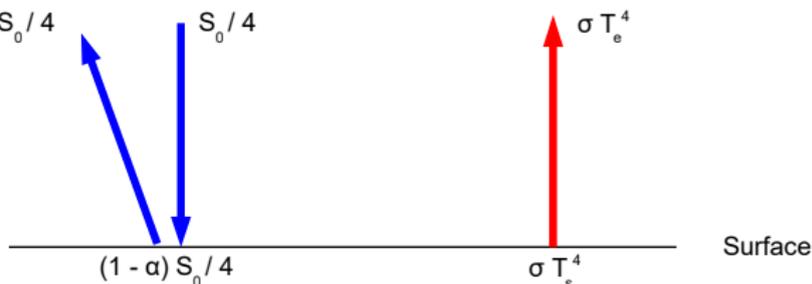
Rayonnement solaire arrivant
(une partie est réfléchié)

$$\alpha S_0 / 4$$

$$S_0 / 4$$

Rayonnement infra-rouge
repartant vers l'espace

$$\sigma T_e^4$$



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

avec α albédo planétaire (0.3), S_0 constante solaire (1368 W.m^{-2})
et σ constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$).

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

En réalité on observe $\sim 288 \text{ K}$. La différence est due à l'**effet de serre**.

L'effet de serre



J.-B.-J. Fourier
(1768–1830)



J. Tyndall
(1820–1893)

L'effet de serre

La température [de surface] peut être augmentée par l'interposition de l'atmosphère, parce que la chaleur trouve moins d'obstacle pour pénétrer l'air, étant à l'état de lumière, qu'elle n'en trouve pour repasser dans l'air lorsqu'elle est convertie en chaleur obscure.

Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires (Annales de Chimie et de Physique, 1824).



J.-B.-J. Fourier
(1768–1830)



J. Tyndall
(1820–1893)

L'effet de serre

La température [de surface] peut être augmentée par l'interposition de l'atmosphère, parce que la chaleur trouve moins d'obstacle pour pénétrer l'air, étant à l'état de lumière, qu'elle n'en trouve pour repasser dans l'air lorsqu'elle est convertie en chaleur obscure.

Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires (Annales de Chimie et de Physique, 1824).



J.-B.-J. Fourier
(1768–1830)

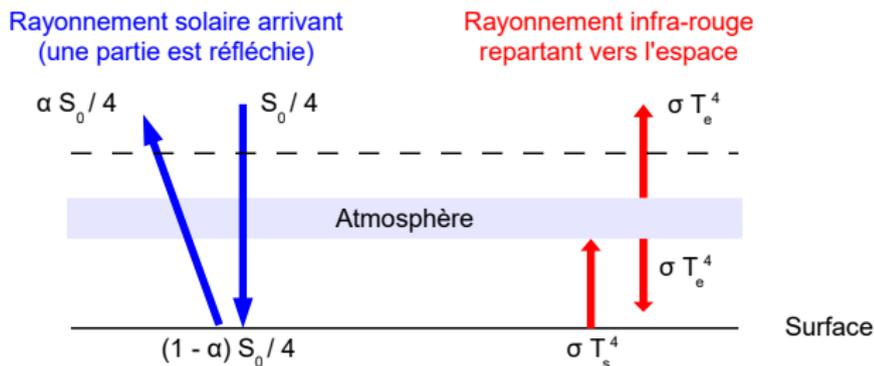


J. Tyndall
(1820–1893)

Aqueous vapour is an invisible gas [but] no doubt can exist on the extraordinary opacity of this substance to the rays of obscure heat. [...] Similar remarks would apply to the carbonic acid diffused through the air [and] any of the stronger hydrocarbon vapours.

On the Absorption and Radiation of Heat by Gases and Vapours (1859)
et On radiation through the Earth's atmosphere (1863).

Bilan d'énergie avec atmosphère simplifiée*

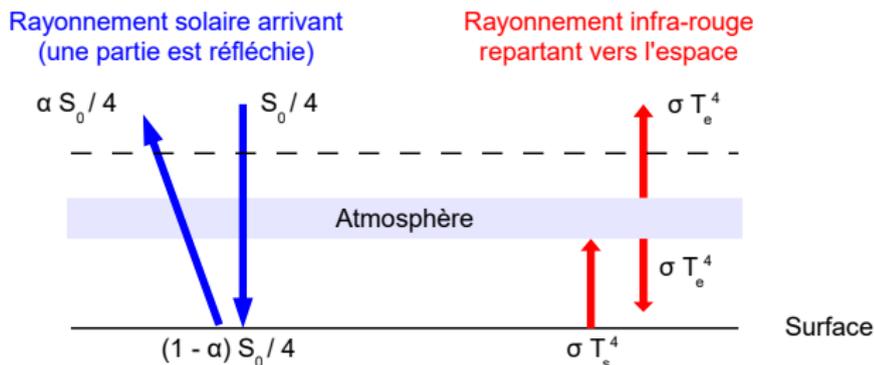


* i.e. transparente au **solaire**, opaque à l'**infra-rouge**, et de T uniforme.

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

$$T_s^4 = 2T_e^4 \Rightarrow T_s = 1.19T_e = 303 \text{ K.}$$

Bilan d'énergie avec atmosphère simplifiée*



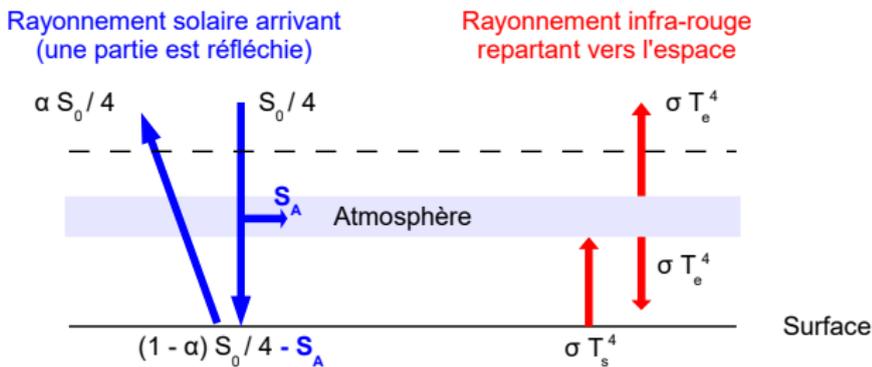
* i.e. transparente au **solaire**, opaque à l'**infra-rouge**, et de T uniforme.

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

$$T_s^4 = 2T_e^4 \Rightarrow T_s = 1.19T_e = 303 \text{ K.}$$

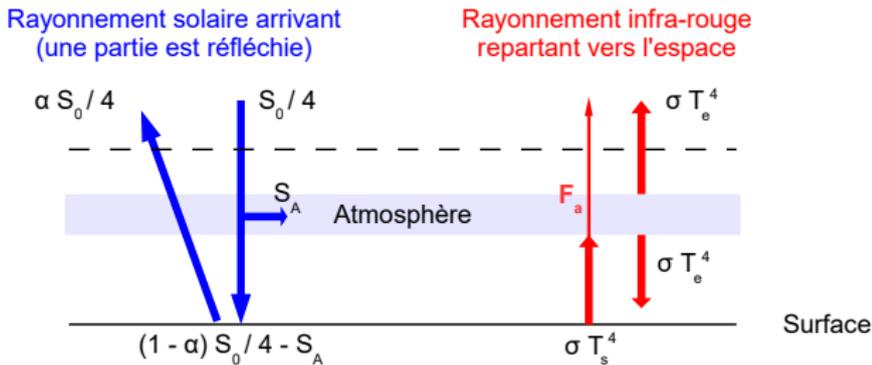
En réalité, c'est un peu moins simple...

Bilan d'énergie avec atmosphère *moins* simplifiée



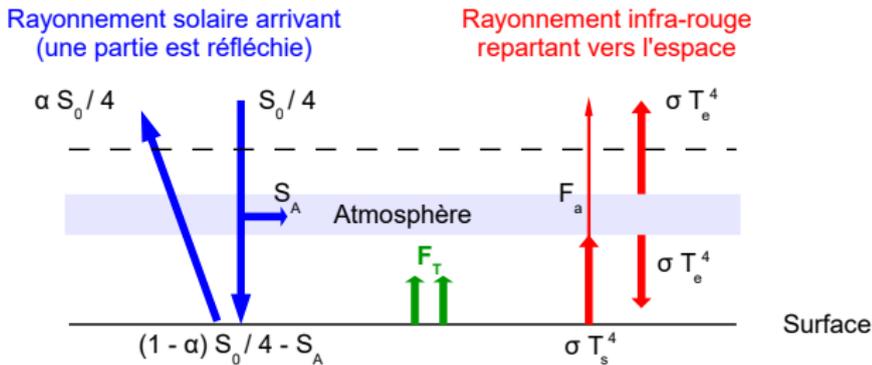
- Atmosphère pas complètement transparente au rayonnement solaire.

Bilan d'énergie avec atmosphère *moins* simplifiée



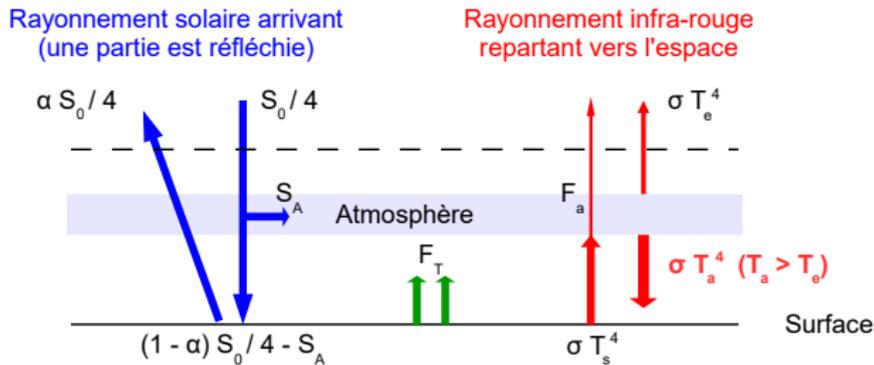
- ▶ Atmosphère pas complètement transparente au **rayonnement solaire**.
- ▶ Atmosphère pas complètement opaque au **rayonnement terrestre**.

Bilan d'énergie avec atmosphère *moins* simplifiée



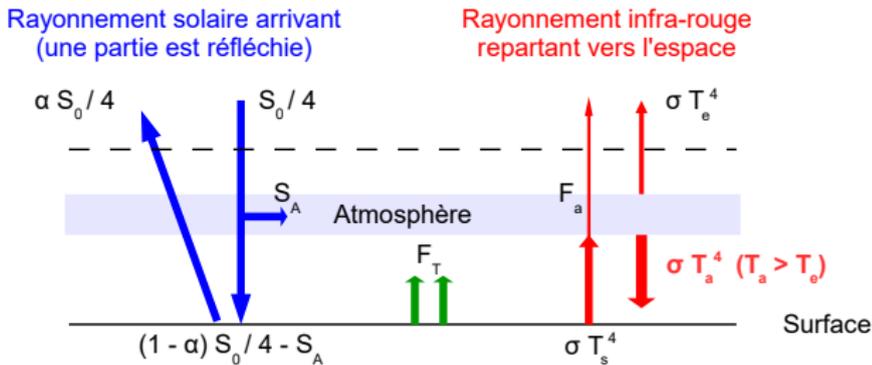
- ▶ Atmosphère pas complètement transparente au **rayonnement solaire**.
- ▶ Atmosphère pas complètement opaque au **rayonnement terrestre**.
- ▶ En surface, une partie de l'énergie est convertie en **flux de chaleur**.

Bilan d'énergie avec atmosphère *moins* simplifiée



- ▶ Atmosphère pas complètement transparente au **rayonnement solaire**.
- ▶ Atmosphère pas complètement opaque au **rayonnement terrestre**.
- ▶ En surface, une partie de l'énergie est convertie en **flux de chaleur**.
- ▶ Température de l'atmosphère non-uniforme sur la verticale.
Dans la troposphère, la température décroît avec l'altitude (crucial !).

Bilan d'énergie avec atmosphère *moins* simplifiée



- ▶ Atmosphère pas complètement transparente au rayonnement solaire.
- ▶ Atmosphère pas complètement opaque au rayonnement terrestre.
- ▶ En surface, une partie de l'énergie est convertie en flux de chaleur.
- ▶ Température de l'atmosphère non-uniforme sur la verticale.
Dans la troposphère, la température décroît avec l'altitude (crucial !).

En définissant τ_a t.q. $T_e^4 = \tau_a T_s^4$, l'équilibre s'écrit : $(1 - \alpha) S_0/4 = \tau_a \sigma T_s^4$.

τ_a est appelée **transmissivité** de l'atmosphère et vaut ~ 0.64 en conditions actuelles.

Comportement du système autour de l'équilibre

- En réponse à une perturbation $F(t)$, la température de surface $T(t)$ répond selon :

$$C_E \frac{dT(t)}{dt} = F(t) + (1 - \alpha) \frac{S_0}{4} - \tau_a \sigma T(t)^4$$

avec C_E capacité calorifique effective.

Comportement du système autour de l'équilibre

- En réponse à une perturbation $F(t)$, la température de surface $T(t)$ répond selon :

$$C_E \frac{dT(t)}{dt} = F(t) + (1 - \alpha) \frac{S_0}{4} - \tau_a \sigma T(t)^4$$

avec C_E capacité calorifique effective.

- En linéarisant autour de l'équilibre ($T \rightarrow T_{eq} + T$), cela devient :

$$C_E \frac{dT(t)}{dt} + \lambda T(t) = F(t)$$

avec $\lambda = 4\tau_a \sigma T_{eq}^3$ paramètre de sensibilité du système.

Comportement du système autour de l'équilibre

- ▶ En réponse à une perturbation $F(t)$, la température de surface $T(t)$ répond selon :

$$C_E \frac{dT(t)}{dt} = F(t) + (1 - \alpha) \frac{S_0}{4} - \tau_a \sigma T(t)^4$$

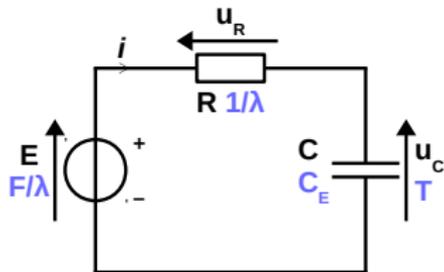
avec C_E capacité calorifique effective.

- ▶ En linéarisant autour de l'équilibre ($T \rightarrow T_{eq} + T$), cela devient :

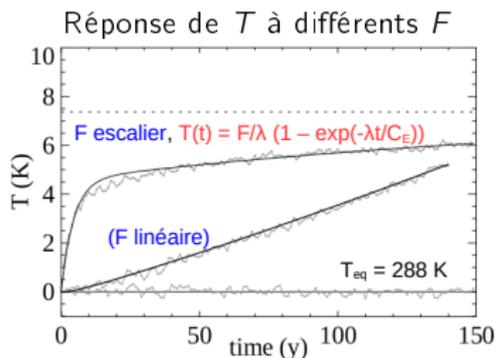
$$C_E \frac{dT(t)}{dt} + \lambda T(t) = F(t)$$

avec $\lambda = 4\tau_a \sigma T_{eq}^3$ paramètre de sensibilité du système.

- ▶ En première approximation, le système climatique est un dipôle $(R, C) = (1/\lambda, C_E)$.



Source : Geoffroy et al. (2013).



Géographie du bilan d'énergie

Géographie du bilan d'énergie

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

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

Le système climatique met en place une **redistribution de l'énergie** : c'est l'origine des **dynamiques** atmosphérique et océanique.

Flux net d'énergie au sommet de l'atmosphère

Tracé à partir des données **CERES** 2001–2014.

Et nous y revoilà

Le climat est le résultat du **bilan d'énergie** du système.

Il est ensuite redessiné par la **dynamique** et la **géographie**.

C'est aussi la dynamique qui explique la variabilité climatique.

Exemple de l'alternance aléatoire d'**anticyclones** et **dépressions** à nos latitudes.

Température

Précipitations

Tracé à partir des données **CRU** 1961–1990 et **GPCP** 1981–2010.

Modéliser le climat

Modéliser le climat

Qu'est-ce que ça veut dire ?

Représenter **mathématiquement** le climat sur la base de principes **physiques**.

Modéliser le climat

Qu'est-ce que ça veut dire ?

Représenter **mathématiquement** le climat sur la base de principes **physiques**.

À quoi ça sert ?

À faire des **expériences** pour comprendre le climat (et chercher à le prévoir).

Modéliser le climat

Qu'est-ce que ça veut dire ?

Représenter **mathématiquement** le climat sur la base de principes **physiques**.

À quoi ça sert ?

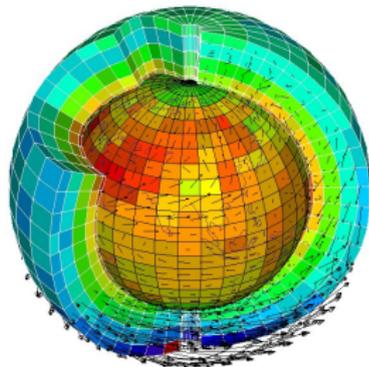
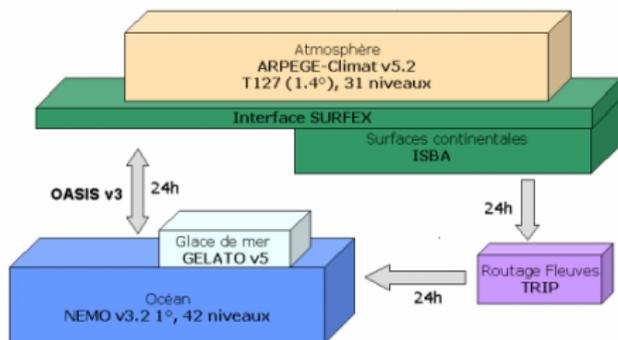
À faire des **expériences** pour comprendre le climat (et chercher à le prévoir).

Comment on fait ?

1. On décrit les composants du système, et leurs échanges, par des **équations**.
2. On renseigne les **conditions aux limites**, et les **conditions initiales**.
3. On **résout** les équations et on **compare** le résultat à la réalité.

N.B. La résolution des équations se fait numériquement, sur une grille.

Exemples de structure (CNRM) et de grille atmosphérique (IPSL)



Mise en équations – Exemple de l'atmosphère

+ Approximations
e.g. hydrostatique.

+ Paramétrisations
phénomènes sous-maîles
(effet relief, nuages, etc.)

Mise en équations – Exemple de l'atmosphère

Équations du mouvement ($\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$)

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p - \vec{g} - 2\vec{\Omega} \times \vec{v} + \vec{F}_{fric}$$

Conservation de la masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v})$$

Conservation de l'eau

$$\frac{\partial \rho q}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} (\rho q) = \rho (E - C)$$

Conservation de l'énergie

$$c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T \right) = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} + Q$$

Équation d'état

$$p = \rho R_g T$$

Système d'**équations primitives**

7 équations, 7 **inconnues**
Bjerknes (1904).

Mise en équations – Exemple de l'atmosphère

Équations du mouvement ($\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$)

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \vec{g} - 2\vec{\Omega} \times \vec{v} + \vec{F}_{fric}$$

Conservation de la masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \vec{v})$$

Conservation de l'eau

$$\frac{\partial \rho q}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla (\rho q) = \rho (E - C)$$

Conservation de l'énergie

$$c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} + Q$$

Équation d'état

$$p = \rho R_g T$$

Système d'équations primitives

7 équations, 7 inconnues
Bjerknes (1904).

+ Approximations
e.g. hydrostatique.

Mise en équations – Exemple de l'atmosphère

Équations du mouvement ($\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$)

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \vec{g} - 2\vec{\Omega} \times \vec{v} + \vec{F}_{fric}$$

Conservation de la masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \vec{v})$$

Conservation de l'eau

$$\frac{\partial \rho q}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla (\rho q) = \rho (E - C)$$

Conservation de l'énergie

$$c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} + Q$$

Équation d'état

$$p = \rho R_g T$$

Système d'équations primitives

7 équations, 7 inconnues
Bjerknes (1904).

+ Approximations
e.g. hydrostatique.

+ Paramétrisations
phénomènes sous-mailles
(effet relief, nuages, etc.)

Démarche d'évaluation

Confrontation permanente des **modèles** aux **observations** disponibles.
(état moyen + variabilité, climats actuel et passés)

Exemple des normales de température et de précipitations :

Observations

Modèles

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

Démarche d'évaluation

Confrontation permanente des **modèles** aux **observations** disponibles.
(état moyen + variabilité, climats actuel et passés)

Exemple des normales de température et de précipitations :

Observations

Modèles

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

Démarche d'évaluation

Confrontation permanente des **modèles** aux **observations** disponibles.
(état moyen + variabilité, climats actuel et passés)

Exemple des normales de température et de précipitations :

Observations

Modèles

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

Météo et climat

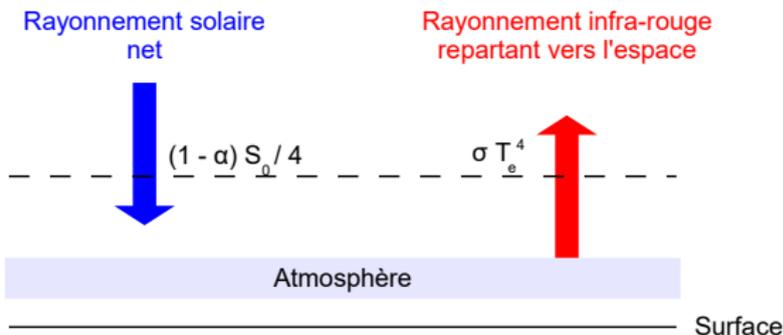
Physique du système climatique

Évolution récente du climat et projections futures

Comment perturber le bilan d'énergie ?

Rappel

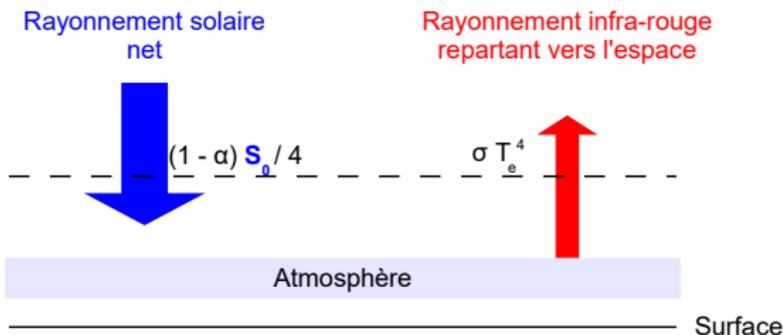
$$\Delta R = (1 - \alpha)S_0/4 - \sigma T_e^4 \quad (\Delta R = 0 \text{ à l'équilibre}).$$



Comment perturber le bilan d'énergie ?

Rappel

$$\Delta R = (1 - \alpha)S_0/4 - \sigma T_e^4 \quad (\Delta R = 0 \text{ à l'équilibre}).$$



Si S_0 augmente (irradiance solaire), $\Delta R > 0$ et $T_s \nearrow$.

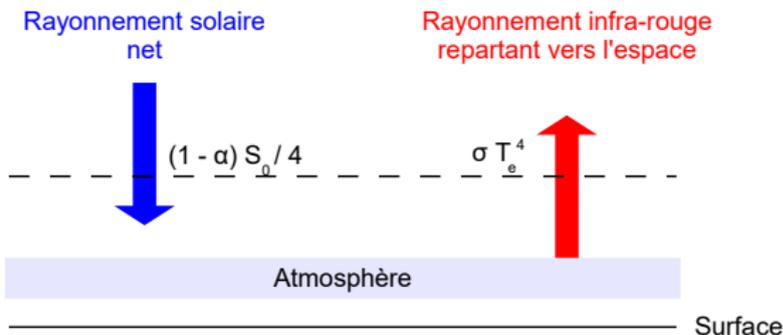
$\sim 10^4 - 10^6$ a : variations de l'**orbite terrestre** (cycles glaciaires - inter-glaciaires).

$\sim 10^0 - 10^2$ a : variations de l'**activité solaire** (cycles à 11 ans, $\pm 0.1 \text{ W.m}^{-2}$).

Comment perturber le bilan d'énergie ?

Rappel

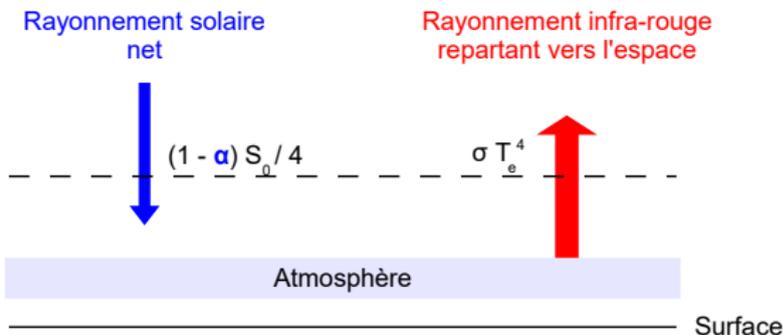
$$\Delta R = (1 - \alpha)S_0/4 - \sigma T_e^4 \quad (\Delta R = 0 \text{ à l'équilibre}).$$



Comment perturber le bilan d'énergie ?

Rappel

$$\Delta R = (1 - \alpha)S_0/4 - \sigma T_e^4 \quad (\Delta R = 0 \text{ à l'équilibre}).$$



Si α augmente (e.g. aérosols*, déforestation), $\Delta R < 0$ et $T_s \searrow$.

* particules en suspension dans l'atmosphère.

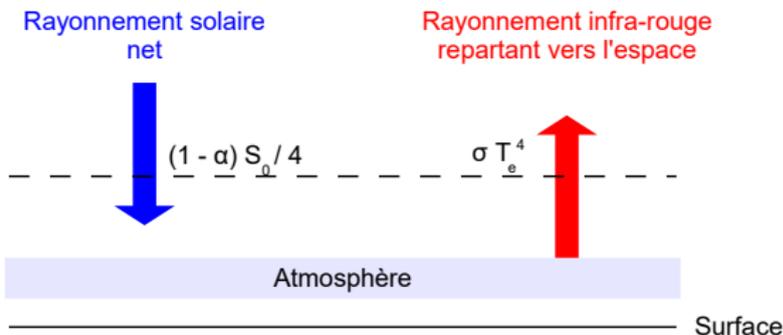
→ Naturels : poussières volcaniques, désertiques, feux de forêts, etc.

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

Comment perturber le bilan d'énergie ?

Rappel

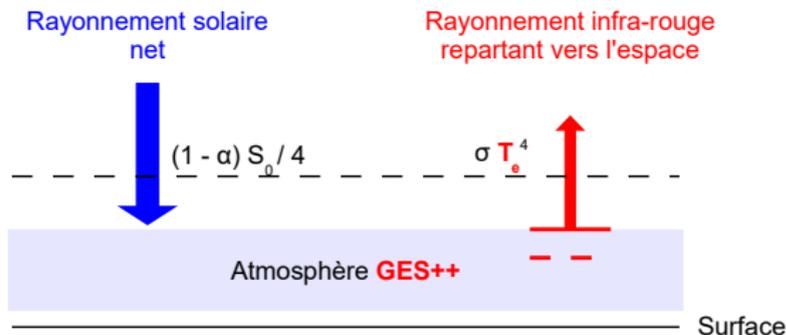
$$\Delta R = (1 - \alpha)S_0/4 - \sigma T_e^4 \quad (\Delta R = 0 \text{ à l'équilibre}).$$



Comment perturber le bilan d'énergie ?

Rappel

$$\Delta R = (1 - \alpha)S_0/4 - \sigma T_e^4 \quad (\Delta R = 0 \text{ à l'équilibre}).$$



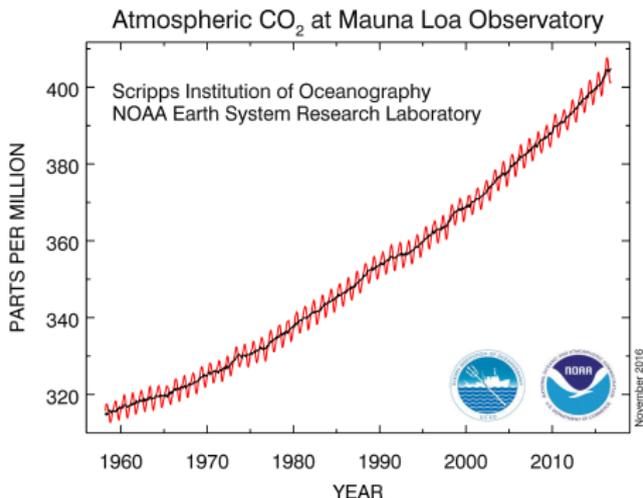
Si les concentrations de GES augmentent, T_e diminue, $\Delta R > 0$ et $T_s \nearrow$.

Or elles augmentent...

Évolution observée de la concentration de CO₂

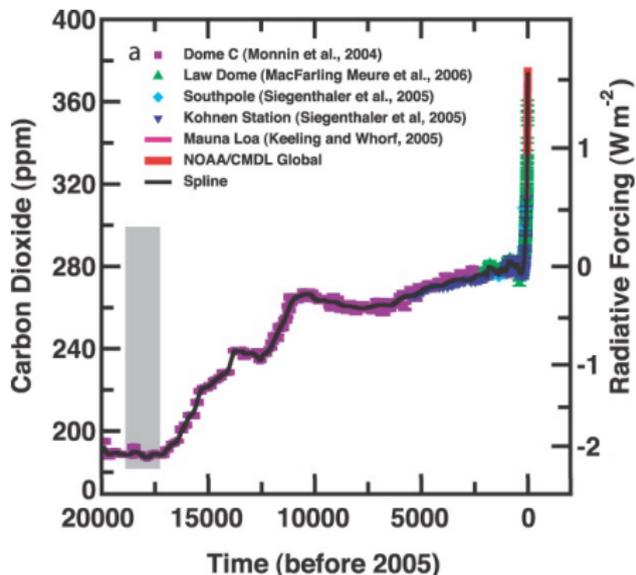
Le CO₂ est présent à l'état **naturel**, sa teneur a toujours varié, mais son augmentation récente de 280 à 400 ppm est **anthropique**.

Depuis 60 ans



Source : Mesures à [Mauna Loa](#).

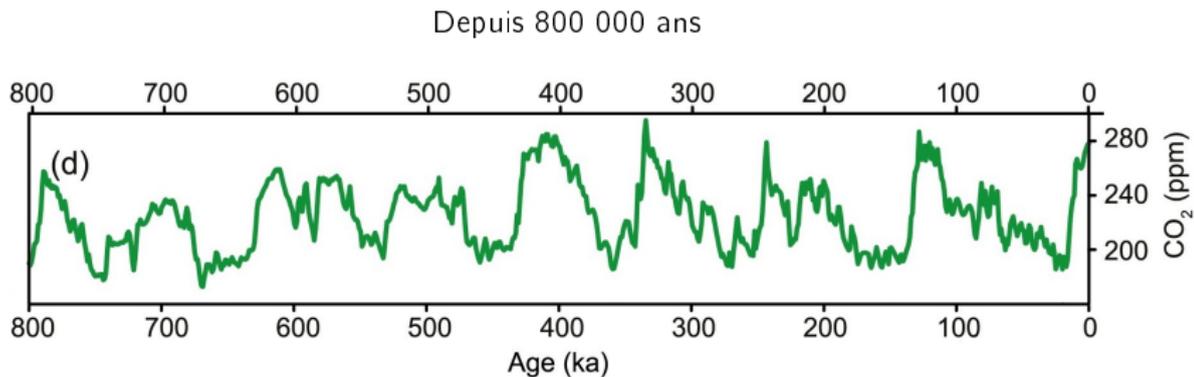
Depuis 20 000 ans



Adapté de l'IPCC AR4 (2007) Fig. 6.4.

Évolution observée de la concentration de CO₂

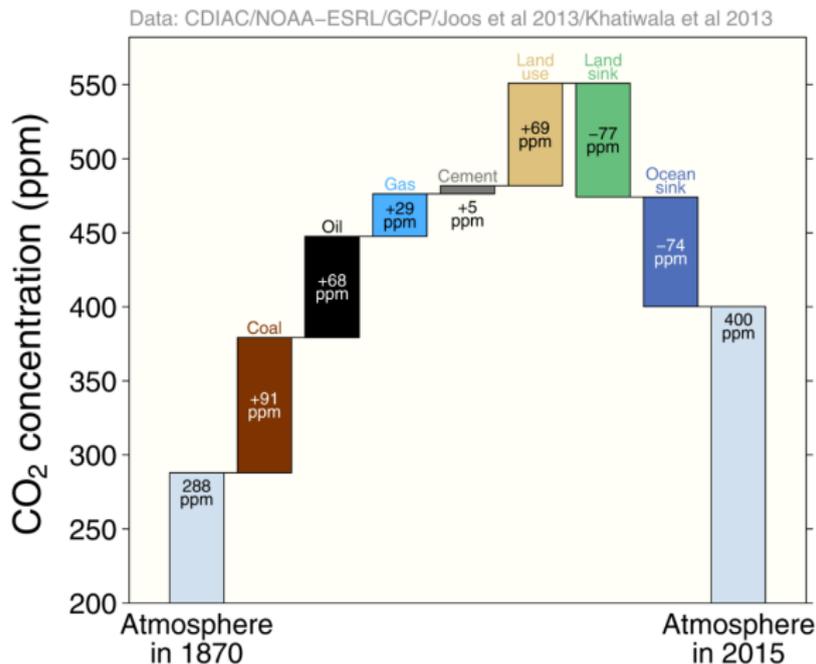
Le CO₂ est présent à l'état **naturel**, sa teneur a toujours varié, mais son augmentation récente de 280 à 400 ppm est **anthropique**.



Source : IPCC AR5 (2013) Fig. 5.3.

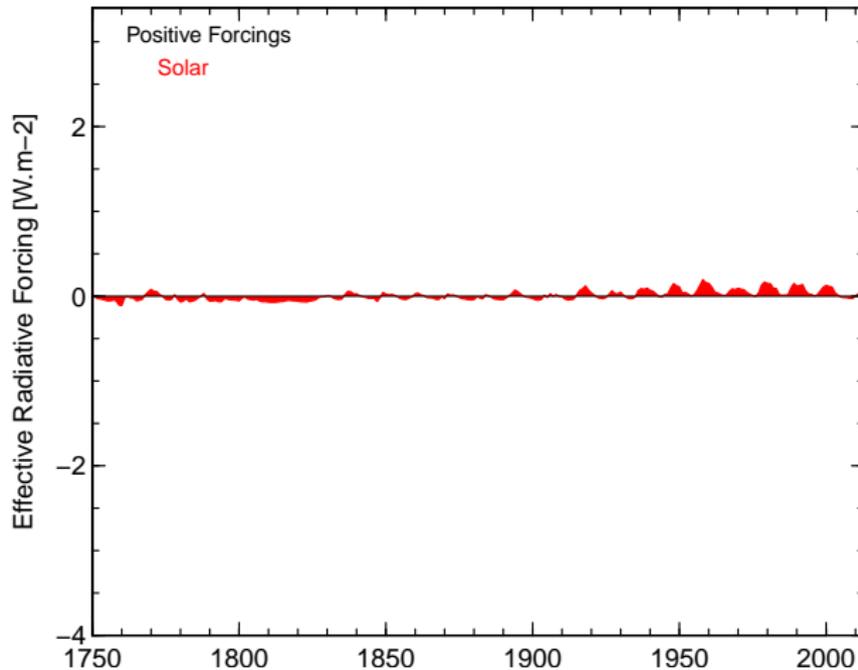
Émissions vs. concentrations

Environ 60 % des émissions anthropiques de l'ère industrielle ont été absorbées par les océans et continents.



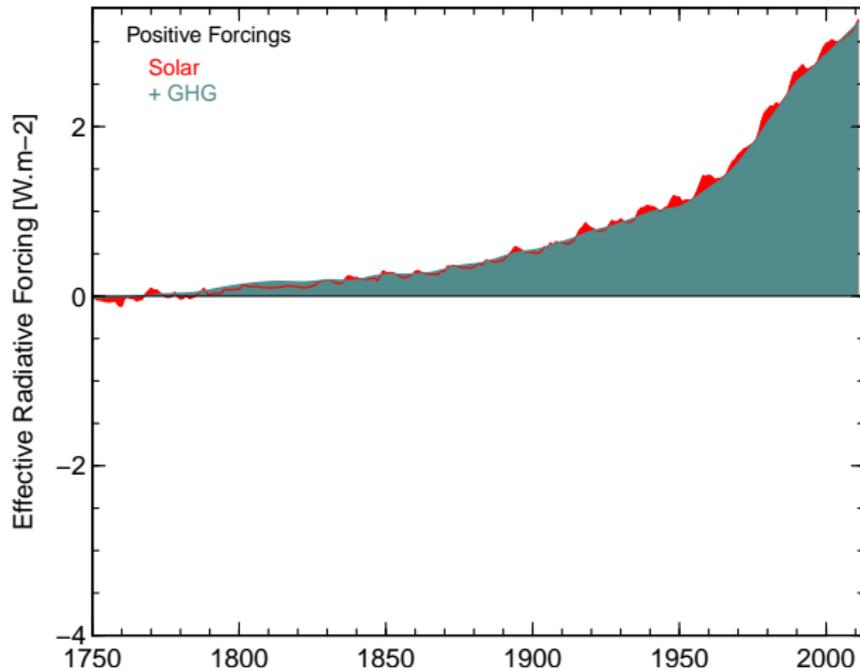
Source : Présentation [Global Carbon Budget 2016](#) (contient émissions par pays, etc.).

Synthèse des perturbations depuis 1750



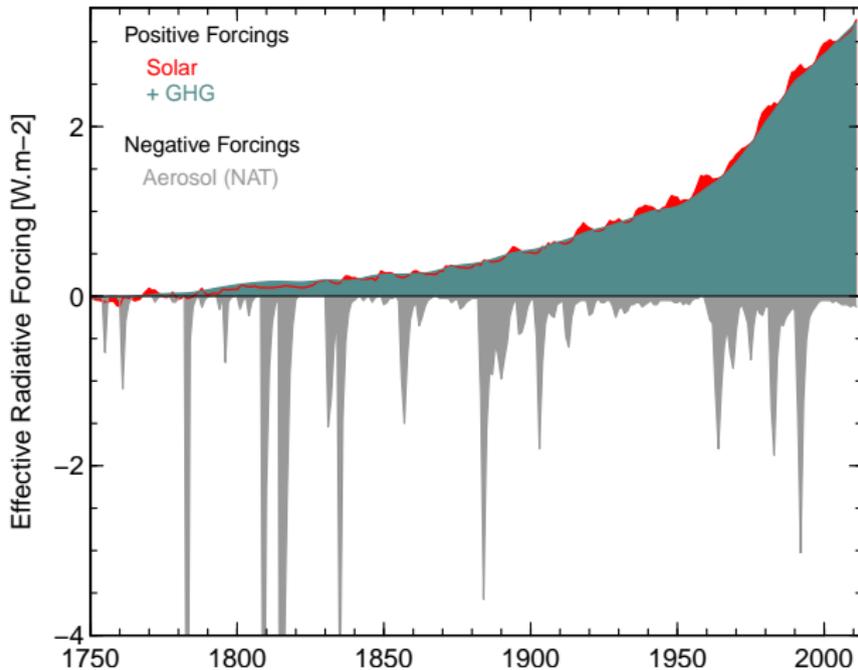
Tracé à partir des données fournies par F.M. Bréon (LSCE).

Synthèse des perturbations depuis 1750



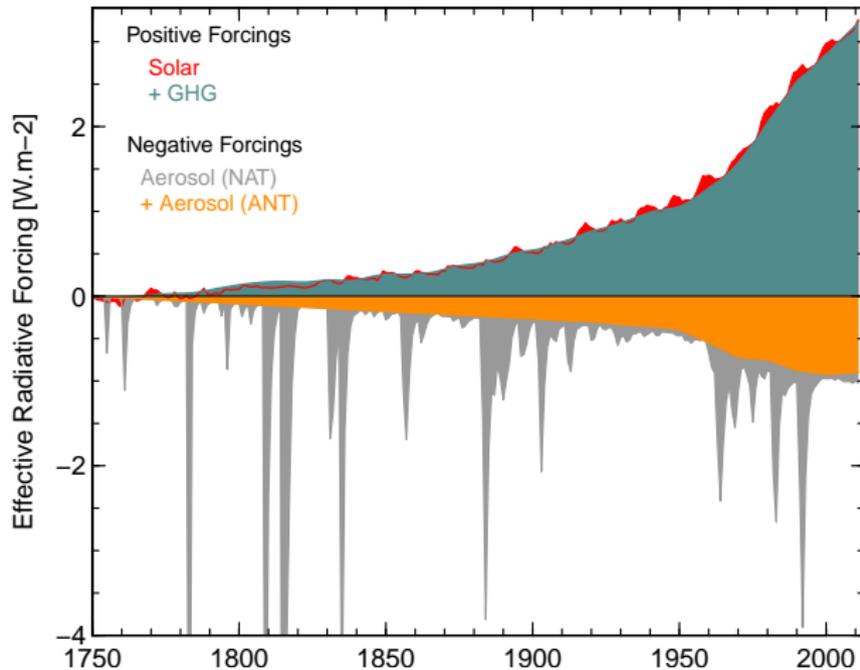
Tracé à partir des données fournies par F.M. Bréon (LSCE).

Synthèse des perturbations depuis 1750



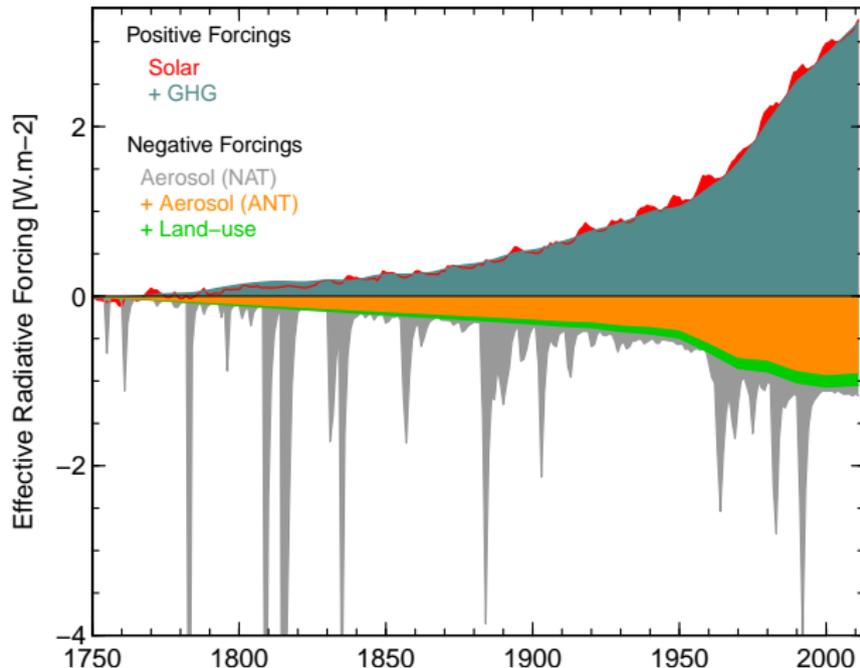
Tracé à partir des données fournies par F.M. Bréon (LSCE).

Synthèse des perturbations depuis 1750



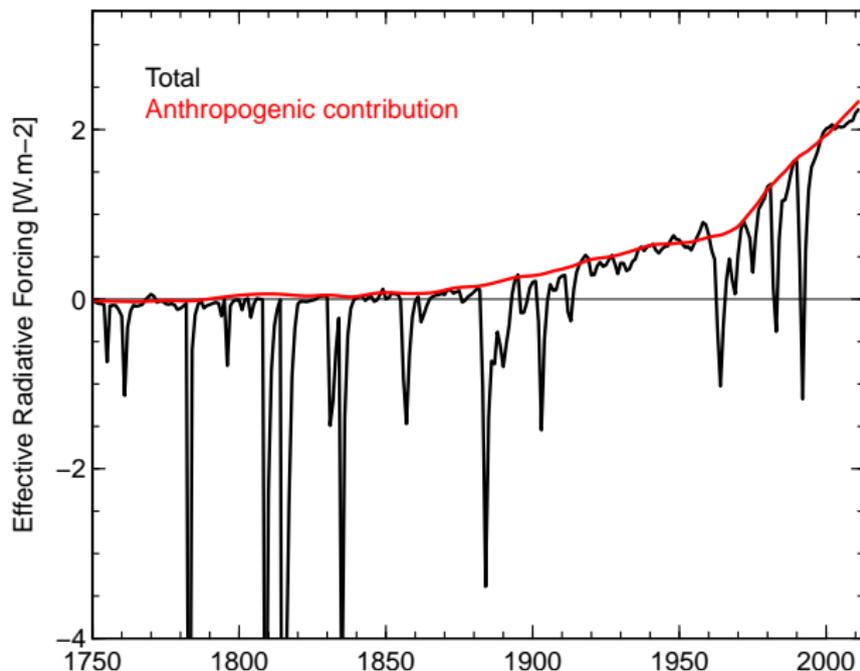
Tracé à partir des données fournies par F.M. Bréon (LSCE).

Synthèse des perturbations depuis 1750



Tracé à partir des données fournies par F.M. Bréon (LSCE).

Synthèse des perturbations depuis 1750



Tracé à partir des données fournies par F.M. Bréon (LSCE).

Les activités humaines induisent un excès d'énergie ($\sim 2.3 \text{ W.m}^{-2}$ auj.).

Rétroactions

Principe

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

Rétroactions

Principe

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

Une perturbation initiale peut donc être *amplifiée* (rétroaction **positive**)
ou *atténuée* (rétroaction **négative**).

Rétroactions

Principe

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

Une perturbation initiale peut donc être *amplifiée* (rétroaction **positive**) ou *atténuée* (rétroaction **négative**).

À notre échelle, les principales rétroactions sont toutes **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.

Rétroactions

Principe

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

Une perturbation initiale peut donc être *amplifiée* (rétroaction **positive**) ou *atténuée* (rétroaction **négative**).

À notre échelle, les principales rétroactions sont toutes **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 doublée :

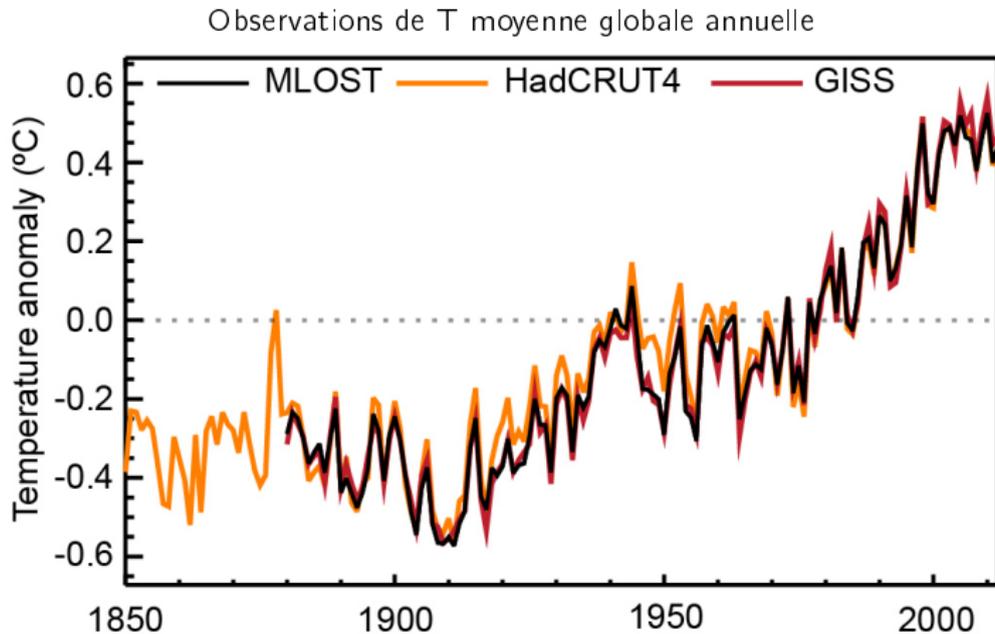
- La perturbation initiale induit un réchauffement de ~ 1 °C (réponse de Planck).
- Les rétroactions ajoutent ~ 2 °C (± 1.5) supplémentaires*.

* Estimations tirées de Dufresne and Bony (2008).

Conséquence : un réchauffement global

Ce **réchauffement** est observé et se superpose à la **variabilité interne**.

→ Entre 1850–1900 et 2003–2012, on estime $\Delta T_s = 0.78 \pm 0.07$ K.

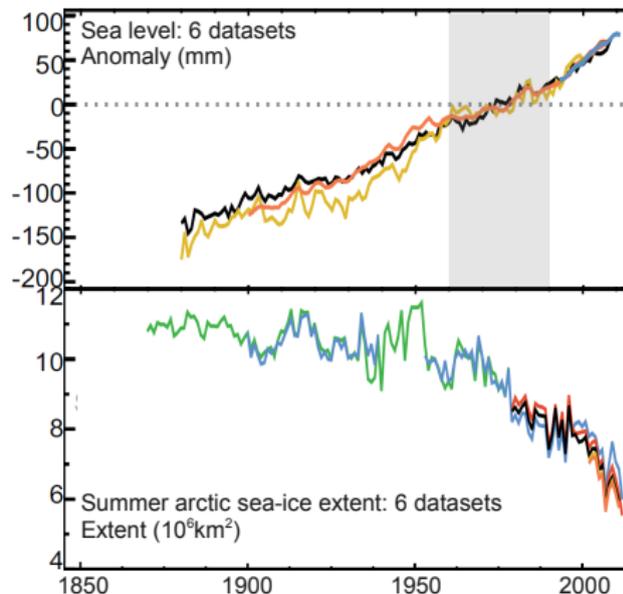
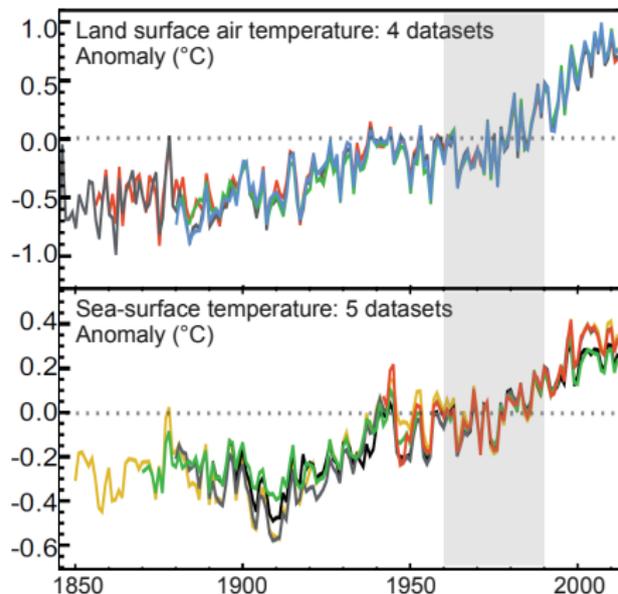


Source : IPCC AR5 (2013) Fig. 2.20.

De multiples indicateurs

L'excès d'énergie se retrouve dans toutes les composantes.

→ Réchauffement de surface, élévation du niveau marin, fonte de la cryosphère, etc.

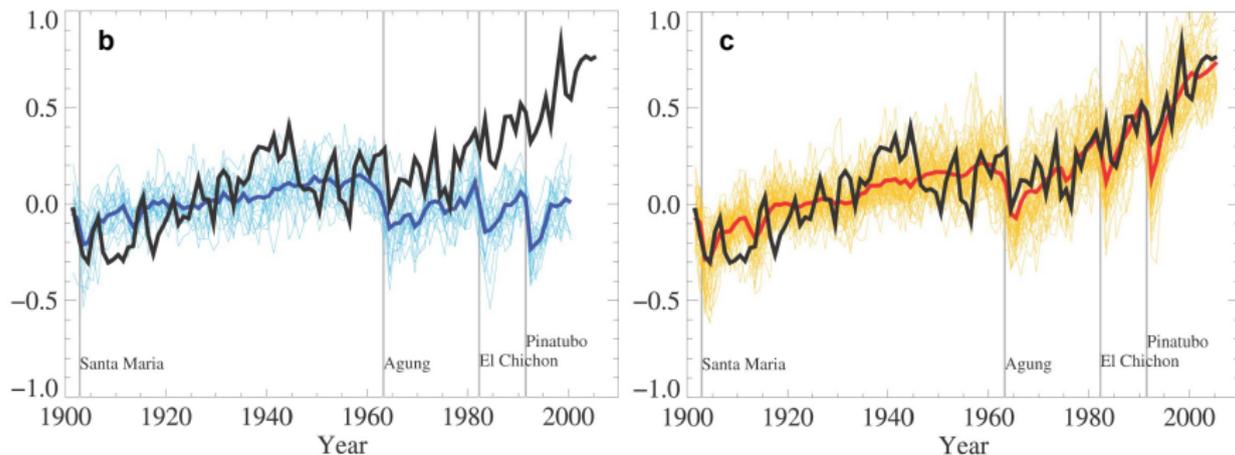


Adapté de l'IPCC AR5 (2013) FAQ 2.1 Fig. 1.

Est-on sûr que c'est l'Homme ?

Avec les modèles de climat, on peut rejouer le climat de l'ère industrielle **avec** et **sans** les perturbations anthropiques (GES, aérosols, etc.).

Exemple : T moyenne globale annuelle (obs en noir)



Adapté de l'IPCC AR4 (2007) Figure 9.5.

Tout ceci n'est pas nouveau. . .

Every variation of these constituents (aqueous vapour, carbonic acid, hydrocarbon vapours) must produce a change of climate.

On the Absorption and Radiation of Heat by Gases and Vapours (1859)
et On radiation through the Earth's atmosphere (1863).



J. Tyndall
(1820–1893)



S. Arrhenius
(1859–1927)

If the quantity of carbonic acid increases in geometric progression, the augmentation of the temperature will increase nearly in arithmetic progression.

On the Influence of Carbonic Acid in the Air Upon the Temperature of the Ground
(Philosophical Magazine and Journal of Science, 1896).

By fuel combustion man has added about 150,000 million tons of carbon dioxide to the air during the past half century [...] world temperatures have increased at a rate of 0.005 °C. per year.

The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature (1938).



G. Callendar
(1898–1964)

Et dans le futur ?

Et dans le futur ?

1. L'évolution future du climat dépend de la composition de l'atmosphère.

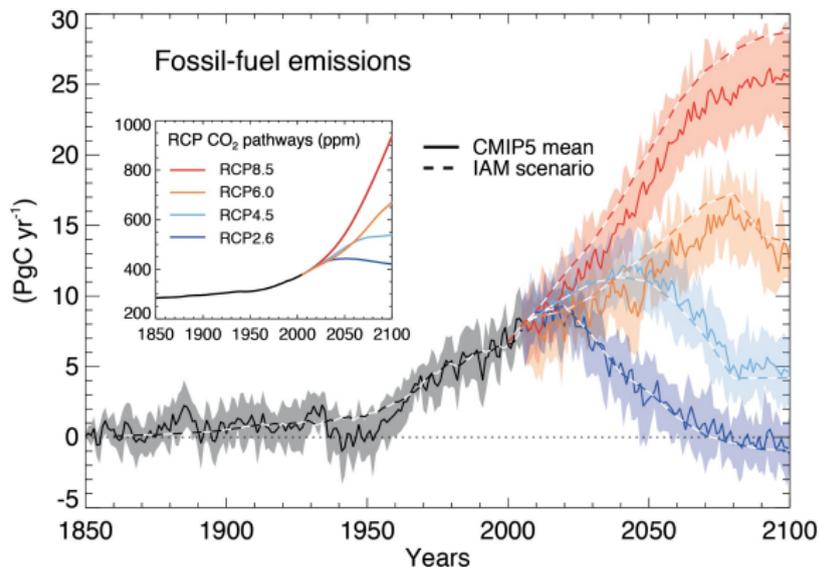
Et dans le futur ?

1. L'évolution future du climat dépend de la composition de l'atmosphère.
2. La composition de l'atmosphère dépend des activités humaines.

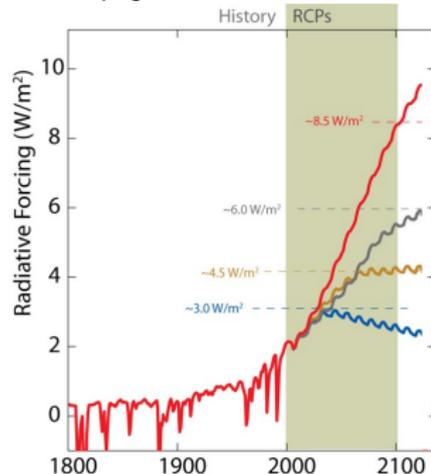
Et dans le futur ?

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

Scénarii de concentrations & émissions compatibles

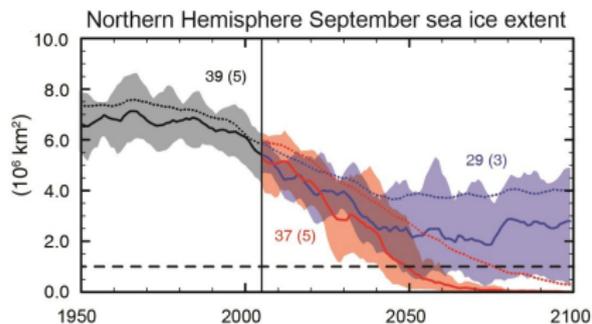
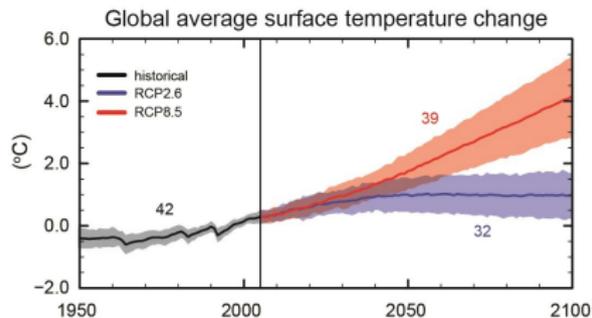


Forçage radiatif résultant

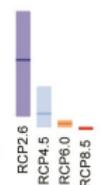
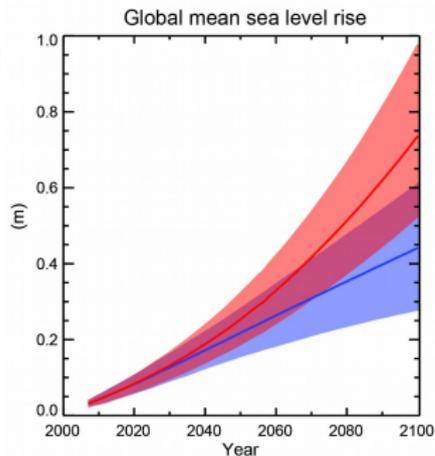
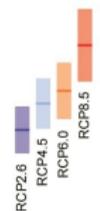


Source : IPCC AR5 (2013) Fig. TS19 & Meinhausen et al. (2011).

Selon le scénario, un climat à la carte



Mean over 2081–2100



	Obs*	RCP 2.6**	RCP 8.5**
ΔT (K)	0.61 ± 0.06	1.0 ± 0.7	3.7 ± 1.1
ΔSL (m)	0.19 ± 0.02	0.40 ± 0.15	0.63 ± 0.18

* Δ Obs : 1986–2005 vs. 1850–1900.

** Δ RCP : 2081–2100 vs. 1986–2005.

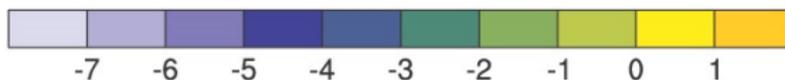
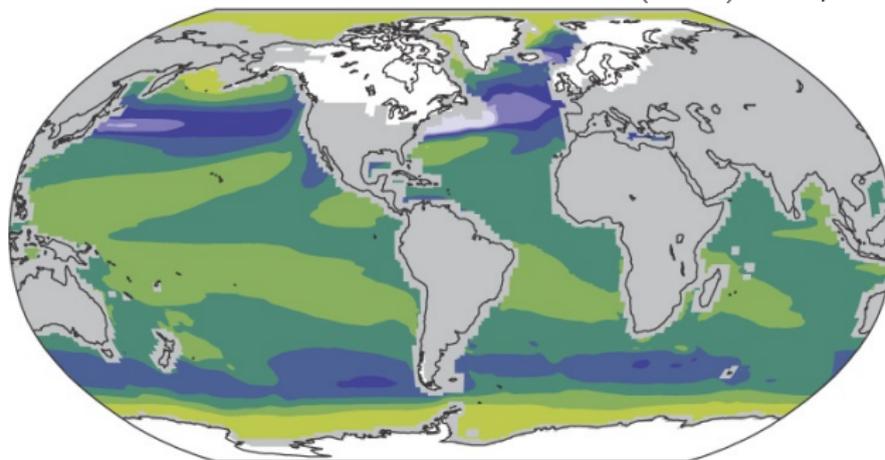
Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Figs. SPM7 & SPM9 et Table TS1.

4 degrés, c'est beaucoup ?

Pour nous, non, il y a plus d'écart entre cette pièce et dehors.

Pour la planète, c'est à peu près ce qui sépare une période **glaciaire** d'une période **inter-glaciaire** (actuelle).

Exemple du ΔT entre le **Dernier Maximum Glaciaire** (21 ka) et le pré-industriel



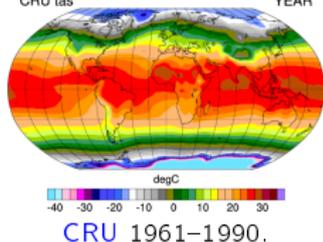
Sea Surface Temperature Change (°C)

Source : IPCC AR4 (2007) Fig. 6.5.

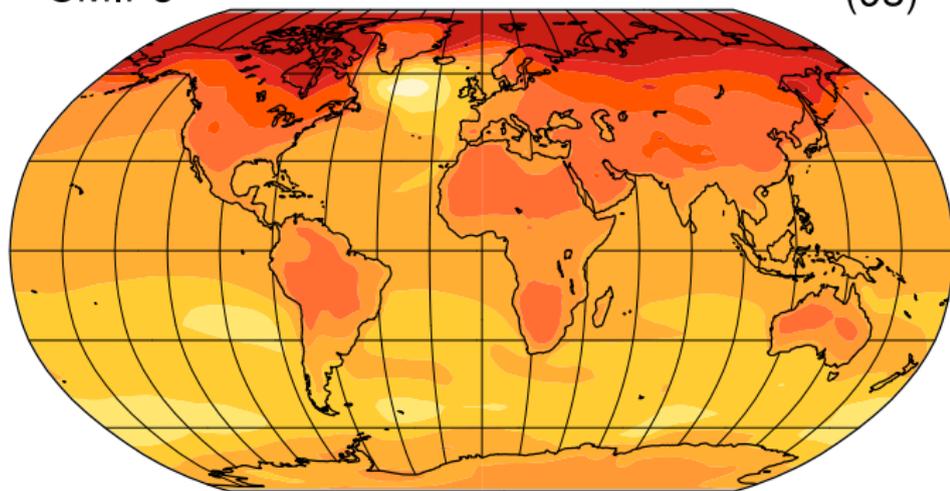
À quoi ressemble un climat plus chaud ?

Réchauffement plus fort sur continents, et aux pôles.

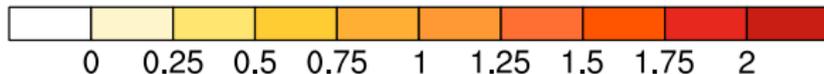
Rappel : état moyen
CRU tas YEAR



CMIP5 Changement normalisé par T globale (93)



°C par °C de réchauffement global



Tracé à partir de 93 projections CMIP5 (multi-modèle et multi-scénario).
Source : Boucher et al., *La Météorologie Spécial Climat* (2015).

Réchauffement global vs. variabilité interne

Selon le scénario, le **signal** du réchauffement émerge plus ou moins tôt du **bruit** de la variabilité interne.

RCP2.6 | $\Delta T_s \sim 1 \text{ K}^*$

RCP8.5 | $\Delta T_s \sim 4 \text{ K}^*$

Tracé à partir d'une projection (par scénario) du modèle CNRM-CM5.

* Entre 1986–2005 et 2081–2100. À ajouter aux $\sim 0.6 \text{ K}$ entre 1850–1900 et 1986–2005.

Extrêmes de température

Au premier ordre, toute la distribution se décale vers un climat plus chaud.
→ Extrêmes **chauds** plus probables, extrêmes **froids** moins probables.

Extrêmes de température

Au premier ordre, toute la distribution se décale vers un climat plus chaud.

→ Extrêmes chauds plus probables, extrêmes froids moins probables.

Au second ordre, légers changements de variabilité.

→ En Europe, augmentation en été, diminution en hiver.

Extrêmes de température

Au premier ordre, toute la distribution se décale vers un climat plus chaud.

→ Extrêmes chauds plus probables, extrêmes froids moins probables.

Au second ordre, légers changements de variabilité.

→ En Europe, augmentation en été, diminution en hiver.

Vers un été 2003 tous les ans ?

Extrêmes de température

Au premier ordre, toute la distribution se décale vers un climat plus chaud.

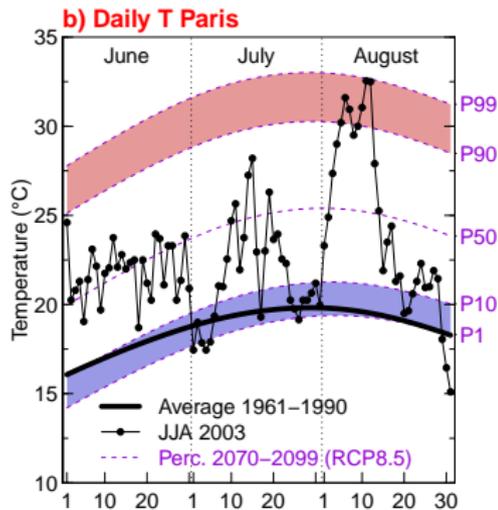
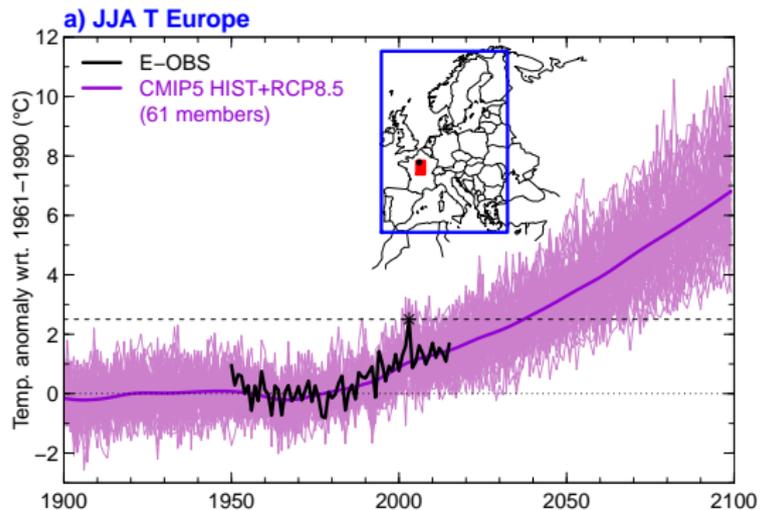
→ Extrêmes **chauds** plus probables, extrêmes **froids** moins probables.

Au second ordre, légers changements de **variabilité**.

→ En Europe, augmentation en **été**, diminution en **hiver**.

Vers un été 2003 tous les ans ?

La réponse dépend du scénario et de la définition de l'événement.

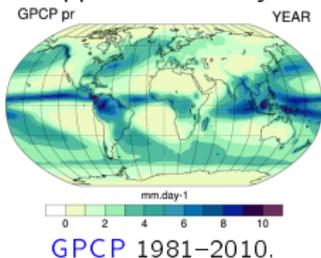


Source : Cattiaux and Ribes (submitted).

Géographie des changements de précipitations

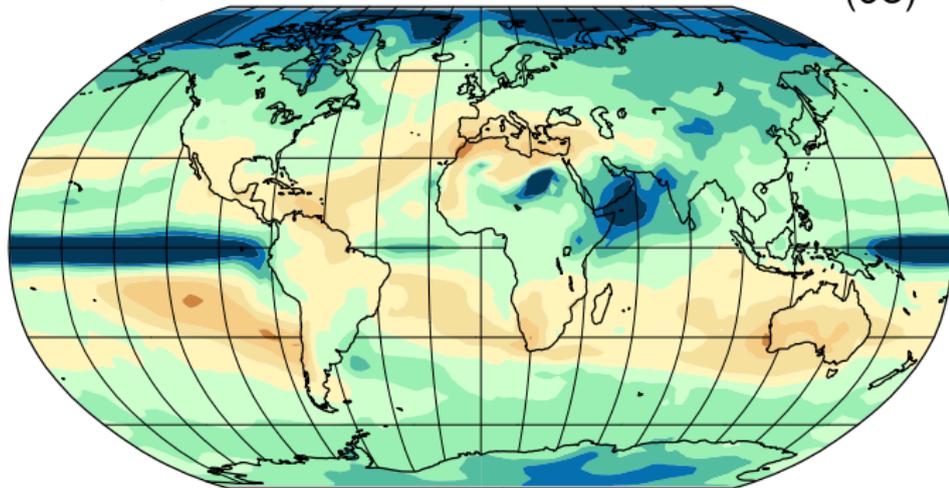
Au premier ordre, *wet get wetter, dry get drier*. $\partial_T \ln(e_s) = L/RT^2$.

Rappel : état moyen



CMIP5 Changement normalisé par T globale

(93)



% par °C de réchauffement global



Tracé à partir de 93 projections **CMIP5** (multi-modèle et multi-scénario).

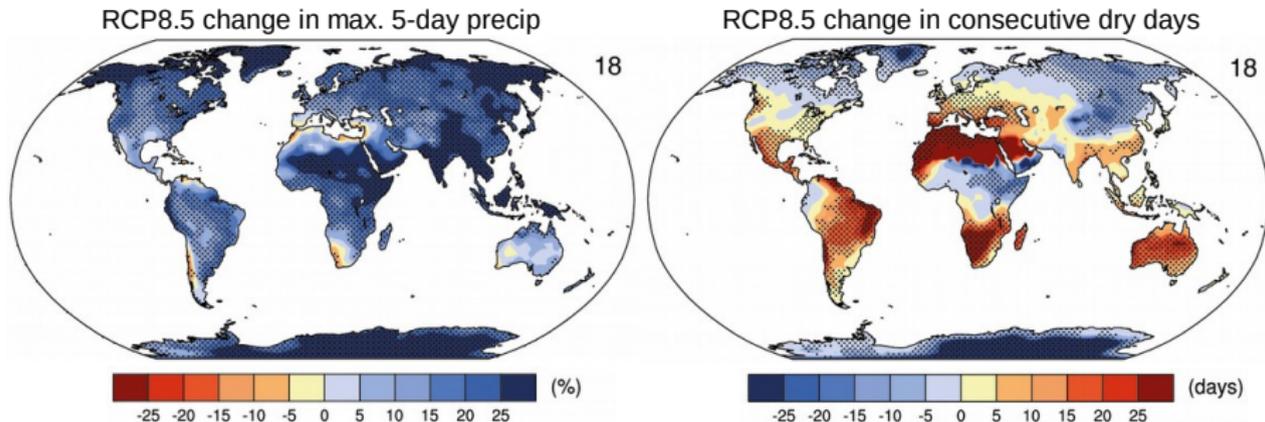
Source : Boucher et al., *La Météorologie Spécial Climat* (2015).

Extrêmes hydrologiques

Les extrêmes suivent l'intensification du cycle hydrologique.

→ Augmentation probable des épisodes de **précip intenses** et de **sécheresse** (e.g. épisodes cévenols [Ribes et al. (2017)], sécheresses méditerranéennes).

Changements projetés de pluies intenses et de jours secs



2081–2100 vs. 1986–2005. Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Fig. 12.26.

Cyclones et tempêtes

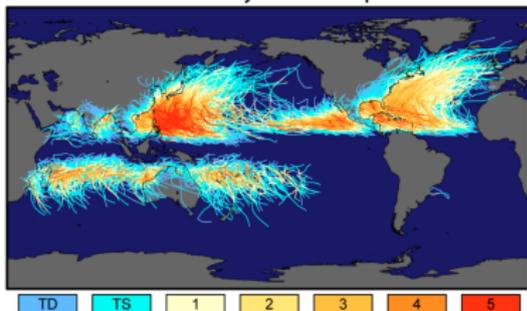
Cyclones tropicaux

- se forment sous certaines conditions atmosphériques et océaniques, puis puisent leur énergie de la surface océanique.
- probablement moins fréquents, mais plus intenses (vents, précipis, surcôtes).

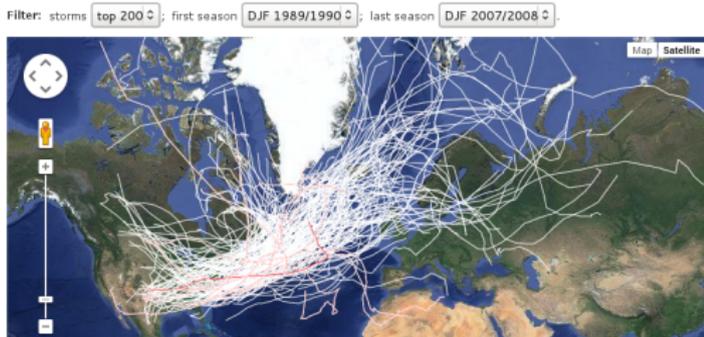
Tempêtes extra-tropicales

- origine et énergie principalement atmosphérique.
- probable décalage vers les pôles, incertitudes sur fréquence/intensité.

Tracks and Intensity of All Tropical Storms



Saffir-Simpson Hurricane Intensity Scale
Source : [NASA Earth Observatory](#).



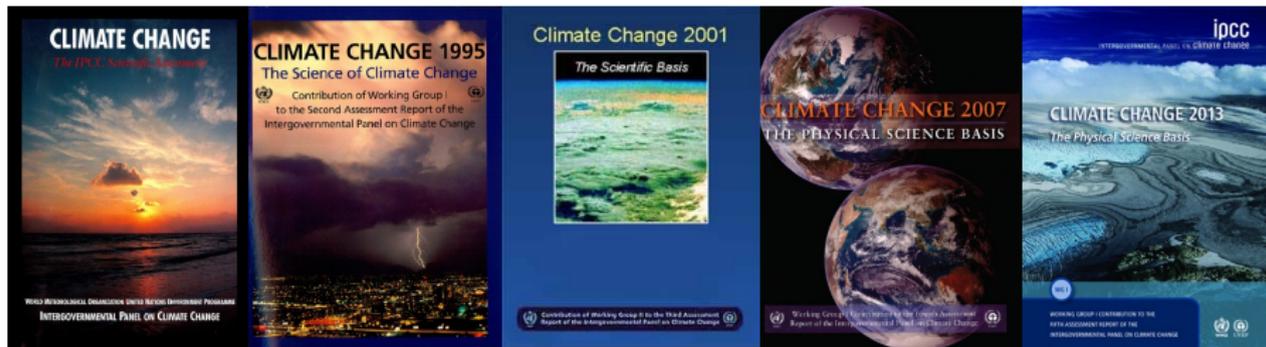
Source : [Atlas](#) de l'Université de Reading.

Tout ceci *non plus* n'est pas nouveau...

Depuis 1990 les scientifiques produisent régulièrement des **rapports**, dont la coordination est assurée par le **GIEC**, créé en 1988 par l'ONU et l'OMM.

Ces rapports sont des synthèses des **connaissances scientifiques** faites selon la procédure de publication habituelle (peer-review).

Ils contiennent 3 volets : **physique**, **impacts** et **adaptation/mitigation**.



Résumé

La planète se réchauffe-t-elle ?

La planète se réchauffe-t-elle ?

Oui, sous l'action des GES émis par l'Homme.

La planète se réchauffe-t-elle ?

Oui, sous l'action des **GES** émis par l'Homme.

Le climat futur dépend du **scénario socio-économique** (choix politique).

À la carte entre $\Delta T_s \sim 4 \text{ K}$ (scénario courant) et $\sim 1 \text{ K}$ (scénario optimiste).

La planète se réchauffe-t-elle ?

Oui, sous l'action des **GES émis par l'Homme**.

Le climat futur dépend du **scénario socio-économique** (choix politique).

À la carte entre $\Delta T_s \sim 4 \text{ K}$ (scénario courant) et $\sim 1 \text{ K}$ (scénario optimiste).

En France, réchauffement légèrement plus fort qu'en global, augmentation des précipitations en hiver, assèchement des sols en été.

Associé à des changements de probabilité des **événements météo extrêmes**.

La planète se réchauffe-t-elle ?

Oui, sous l'action des **GES émis par l'Homme**.

Le climat futur dépend du **scénario socio-économique** (choix politique).

À la carte entre $\Delta T_s \sim 4 \text{ K}$ (scénario courant) et $\sim 1 \text{ K}$ (scénario optimiste).

En France, réchauffement légèrement plus fort qu'en global, augmentation des précipitations en hiver, assèchement des sols en été.

Associé à des changements de probabilité des **événements météo extrêmes**.

—

Deux remarques :

La planète se réchauffe-t-elle ?

Oui, sous l'action des **GES émis par l'Homme**.

Le climat futur dépend du **scénario socio-économique** (choix politique).

À la carte entre $\Delta T_s \sim 4 \text{ K}$ (scénario courant) et $\sim 1 \text{ K}$ (scénario optimiste).

En France, réchauffement légèrement plus fort qu'en global, augmentation des précipitations en hiver, assèchement des sols en été.

Associé à des changements de probabilité des **événements météo extrêmes**.

—

Deux remarques :

1. Ce n'est pas une raison pour tout attribuer au changement climatique.

La planète se réchauffe-t-elle ?

Oui, sous l'action des **GES émis par l'Homme**.

Le climat futur dépend du **scénario socio-économique** (choix politique).

À la carte entre $\Delta T_s \sim 4 \text{ K}$ (scénario courant) et $\sim 1 \text{ K}$ (scénario optimiste).

En France, réchauffement légèrement plus fort qu'en global, augmentation des précipitations en hiver, assèchement des sols en été.

Associé à des changements de probabilité des **événements météo extrêmes**.

—

Deux remarques :

1. Ce n'est pas une raison pour tout attribuer au changement climatique.
2. Vous arrivez en âge de voter.

Un peu de lecture

Effet de serre

Dufresne, J.L. and J. Treiner (2011), L'effet de serre atmosphérique : plus subtil qu'on ne le croit !, *La Météorologie*, 72, 31-41. ([pdf](#))

Modélisation du climat

Jeandel, C., R. Mosseri et al., Le Climat à Découvert (2011), ed. CNRS. ([en ligne](#))
Climat, modéliser pour comprendre et anticiper (2013), *Plaquette CNRS*. ([pdf](#))

Changement climatique récent et futur

Planton, S. et al. (2015), Evolution du climat depuis 1850, *La Météorologie*, 88, 48-55. ([pdf](#))
Boucher, O. et al. (2015), Projection des changements climatiques futurs, *La Météorologie*, 88, 56-68. ([pdf](#))

Extrêmes météo en changement climatique

Cattiaux, J., F. Chauvin, H. Douville and A. Ribes (2016), Des bulletins météo extrêmes à prévoir, *La Recherche*, 517. ([en ligne](#))

Une super BD

Saison Brune, par Philippe Squarzoni, ed. Delcourt. ([en ligne](#))

