

# Quel temps fera-t-il dans 59 ans ?

Julien Cattiaux

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

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

Toulouse | 8 juin 2017

# Préambule

# Préambule

Arnaud

Cela nous ferait énormément plaisir, et plus encore à ton père, que tu sois présent et nous donnes un exposé sur tes travaux.

# Préambule

Arnaud

Cela nous ferait énormément plaisir, et plus encore à ton père, que tu sois présent et nous donnes un exposé sur tes travaux.

Moi

J'y participerai avec plaisir, même si j'ai un peu peur de parler climat devant des matheux.. on fait les choses avec les mains en physique tu sais !

# Préambule

Arnaud

Cela nous ferait énormément plaisir, et plus encore à ton père, que tu sois présent et nous donnes un exposé sur tes travaux.

Moi

J'y participerai avec plaisir, même si j'ai un peu peur de parler climat devant des matheux.. on fait les choses avec les mains en physique tu sais !

Arnaud

Aucun souci à te faire, tu ne peux pas imaginer le nombre de trucs qu'on fait avec les mains aussi !

# Préambule

Arnaud

Cela nous ferait énormément plaisir, et plus encore à ton père, que tu sois présent et nous donnes un exposé sur tes travaux.

Moi

J'y participerai avec plaisir, même si j'ai un peu peur de parler climat devant des matheux.. on fait les choses avec les mains en physique tu sais !

Arnaud

Aucun souci à te faire, tu ne peux pas imaginer le nombre de trucs qu'on fait avec les mains aussi ! (bon, pas ton père.. quoique..)

Météo et climat

Modélisation du système climatique

Évolution récente du climat et projections futures

Météo et climat

Modélisation du système climatique

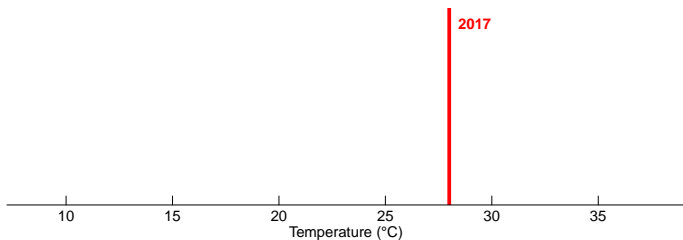
Évolution récente du climat et projections futures



# Météo et climat : une définition

Aujourd'hui, à Toulouse, il fait **28 °C** : c'est la **météo**.

Température à Toulouse le 8 juin

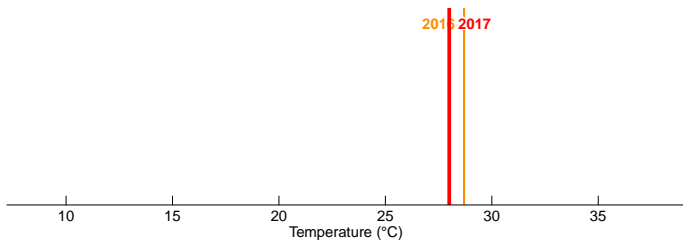


Tracé à partir des données Météo-France (1947–2017).

# Météo et climat : une définition

Aujourd'hui, à Toulouse, il fait **28 °C** : c'est la **météo**.  
Mais d'autres T auraient été possibles (cf. **le passé**).

Température à Toulouse le 8 juin

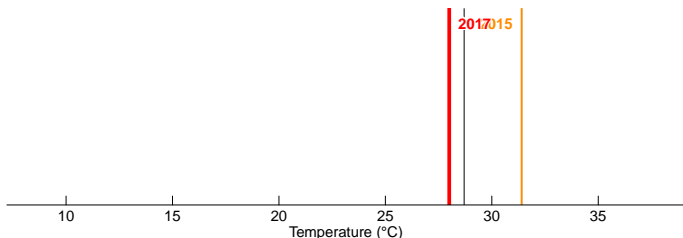


Tracé à partir des données Météo-France (1947–2017).

# Météo et climat : une définition

Aujourd'hui, à Toulouse, il fait **28 °C** : c'est la **météo**.  
Mais d'autres T auraient été possibles (cf. **le passé**).

Température à Toulouse le 8 juin

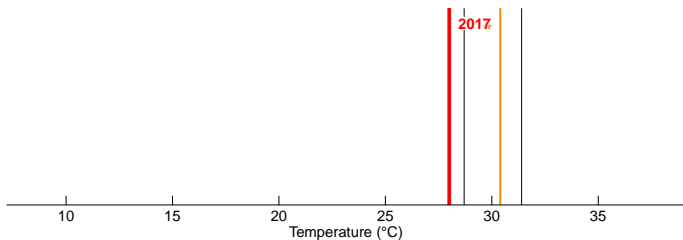


Tracé à partir des données Météo-France (1947–2017).

# Météo et climat : une définition

Aujourd'hui, à Toulouse, il fait **28 °C** : c'est la **météo**.  
Mais d'autres T auraient été possibles (cf. **le passé**).

Température à Toulouse le 8 juin

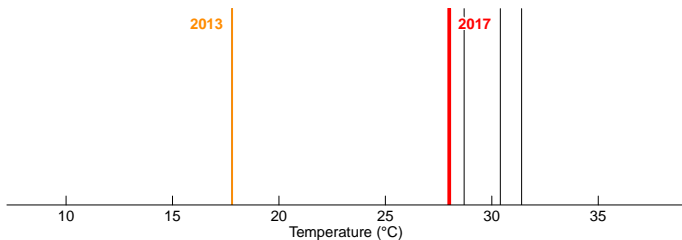


Tracé à partir des données Météo-France (1947–2017).

# Météo et climat : une définition

Aujourd'hui, à Toulouse, il fait **28 °C** : c'est la **météo**.  
Mais d'autres T auraient été possibles (cf. **le passé**).

Température à Toulouse le 8 juin

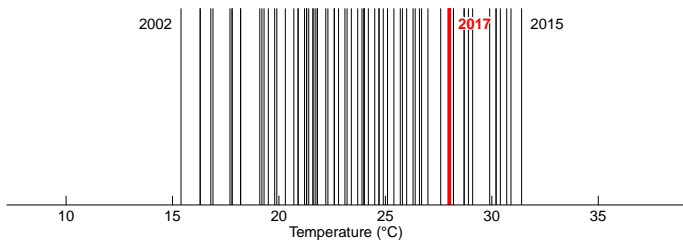


Tracé à partir des données Météo-France (1947–2017).

# Météo et climat : une définition

Aujourd'hui, à Toulouse, il fait **28 °C** : c'est la **météo**.  
Mais d'autres T auraient été possibles (cf. **le passé**).

Température à Toulouse le 8 juin

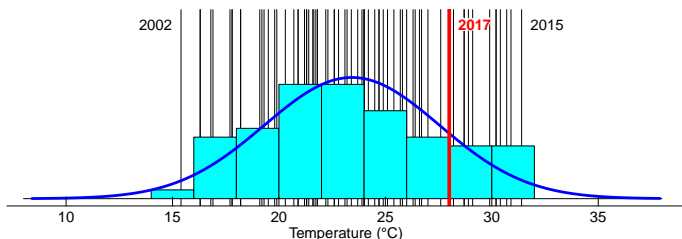


Tracé à partir des données Météo-France (1947–2017).

# Météo et climat : une définition

Aujourd'hui, à Toulouse, il fait  $28^{\circ}\text{C}$  : c'est la **météo**.  
Mais d'autres T auraient été possibles (cf. **le passé**).

Température à Toulouse le 8 juin



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

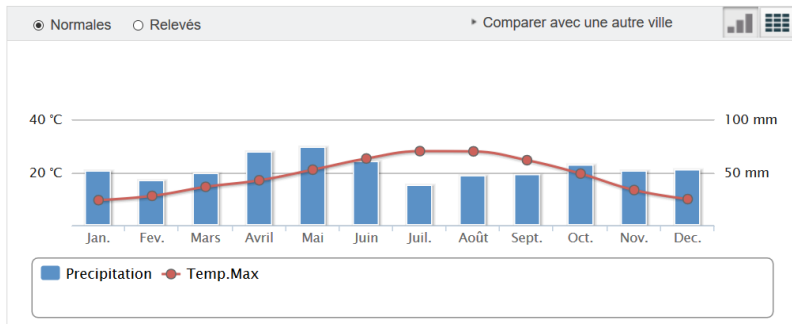
Le climat est la distribution de proba de la **météo**.

# Les fameuses normales de saison

Au premier ordre, 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

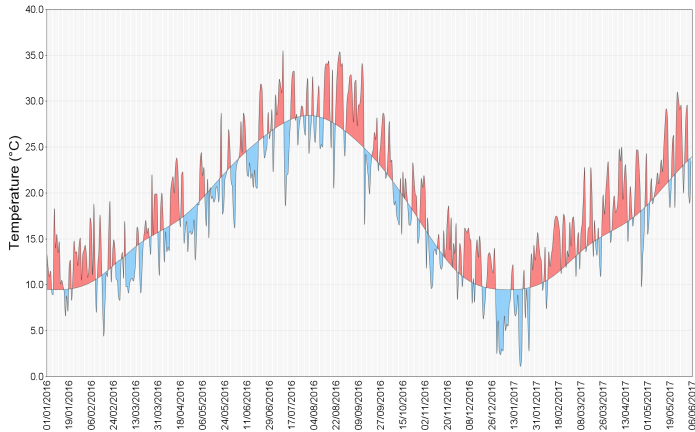


Source : site public de Météo-France, onglet [climat](#).



# 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 et projection climatique

Prévision météo : déterminer une trajectoire.

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

# Prévision météo et projection climatique

**Prévision météo** : déterminer une trajectoire.

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 et projection climatique

Prévision météo : déterminer une trajectoire.

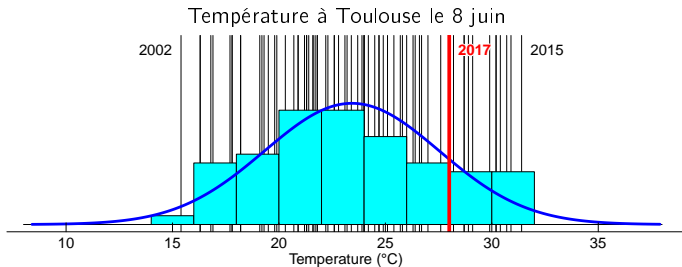
Importance des **conditions initiales** (effet papillon, limite théorique à qq jours).

Projection climatique : estimer une distribution.

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

Exemple : Quelle T fera-t-il le 8 juin 2018 ? *Aucune idée.*

À quelle T peut-on s'attendre le 8 juin 2018 ? Cf. *distribution bleue.*



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

Météo et climat

Modélisation du système climatique

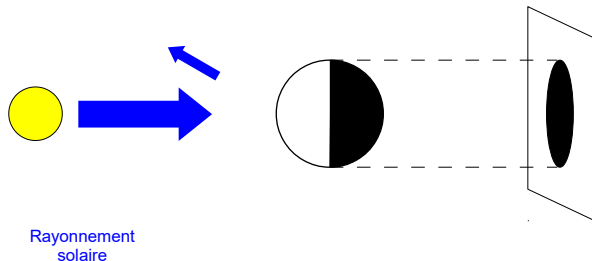
Évolution récente du climat et projections futures

# Système climatique et bilan d'énergie

Atmosphère ↔ Océans ↔ Cryosphère ↔ Continents ↔ Biosphère

# Système climatique et bilan d'énergie

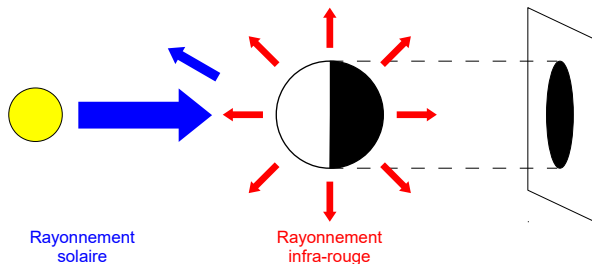
Atmosphère ↔ Océans ↔ Cryosphère ↔ Continents ↔ Biosphère



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

# Système climatique et bilan d'énergie

Atmosphère ↔ Océans ↔ Cryosphère ↔ Continents ↔ Biosphère

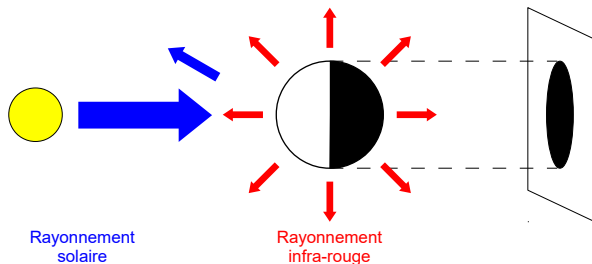


- ▶ **Énergie entrante** : **rayonnement solaire** arrivant sur un disque ( $\pi R^2$ ).  
Une fraction est réfléchi (**albédo** planétaire).
- ▶ **Énergie sortante** : **rayonnement infra-rouge** émis par une sphère ( $4\pi R^2$ ).



# Système climatique et bilan d'énergie

Atmosphère ↔ Océans ↔ Cryosphère ↔ Continents ↔ Biosphère



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

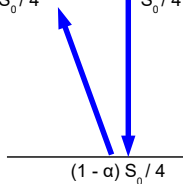
À l'équilibre :  $E_{\text{solaire}} = E_{\text{infra-rouge}}$

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

# Un premier modèle de $T_s$

Rayonnement solaire arrivant  
(une partie est réfléchie)

$\alpha S_0/4$        $S_0/4$



Rayonnement infra-rouge  
repartant vers l'espace

$\sigma T_e^4$

$\sigma T_s^4$

Surface

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

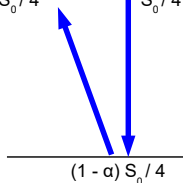
avec  $\alpha$  albédo planétaire (0.3),  $S_0$  constante solaire ( $1368 \text{ W.m}^{-2}$ )  
et  $\sigma$  constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ ).

# Un premier modèle de $T_s$

Rayonnement solaire arrivant  
(une partie est réfléchie)

$\alpha S_0/4$

$S_0/4$



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  $\alpha$  albédo planétaire (0,3),  $S_0$  constante solaire ( $1368 \text{ W.m}^{-2}$ )  
et  $\sigma$  constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ ).

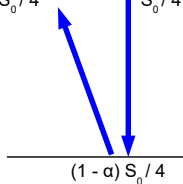
$$T_s = T_e = 255 \text{ K.}$$

# Un premier modèle de $T_s$

Rayonnement solaire arrivant  
(une partie est réfléchiée)

$$\alpha S_0/4$$

$$S_0/4$$



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

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

(C'est froid.)

# L'effet de serre



J.-B.-J. Fourier  
(1768–1830)

# 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.



J.-B.-J. Fourier  
(1768–1830)

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

# Les gaz à effet de serre (GES)

Aqueous vapour is an invisible gas [...] [but] no doubt can exist on the extraordinary opacity of this substance to the rays of obscure heat.

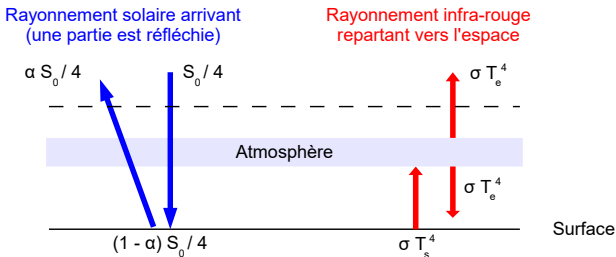
Similar remarks would apply to the carbonic acid diffused through the air [and] any of the stronger hydrocarbon vapours.



J. Tyndall  
(1820–1893)

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

# Un modèle avec atmosphère simplifiée\*



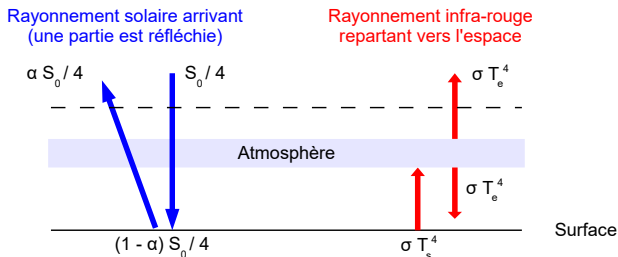
\* i.e. transparente au **solaire**, opaque à l'**infra-rouge**, et de  $T$  uniforme.

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

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



# Un modèle avec atmosphère simplifiée\*



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

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

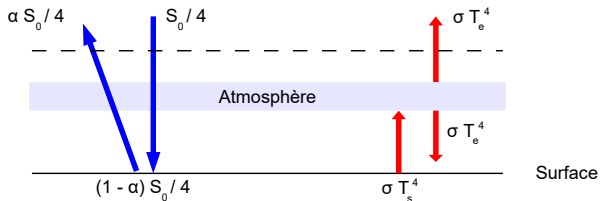
$$T_s^4 = 2 T_e^4 \Rightarrow T_s = 1.19 T_e = 303 \text{ K.}$$

(C'est chaud.)

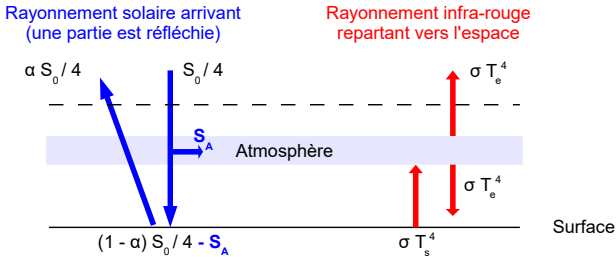
# Limites du modèle à une vitre

Rayonnement solaire arrivant  
(une partie est réfléchié)

Rayonnement infra-rouge  
repartant vers l'espace

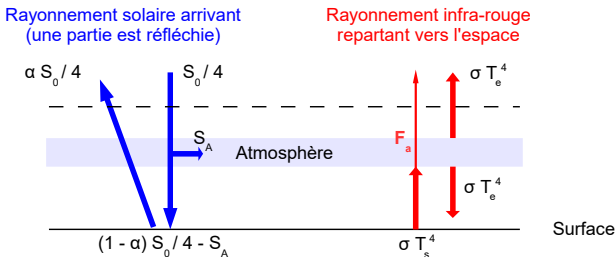


# Limites du modèle à une vitre



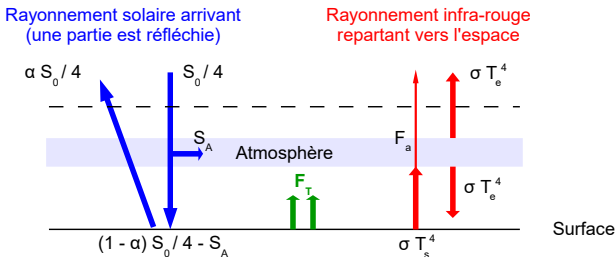
- Atmosphère pas complètement transparente au rayonnement solaire.  
*Absorption* ( $S_A \sim 70 \text{ W.m}^{-2}$ ).

# Limites du modèle à une vitre



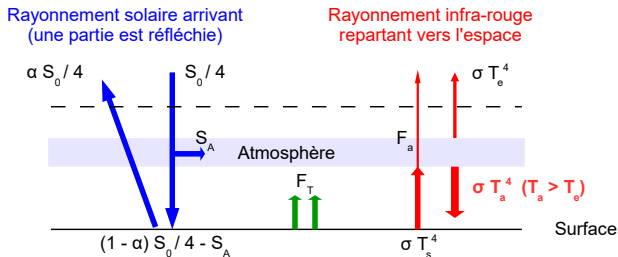
- ▶ Atmosphère pas complètement transparente au rayonnement solaire.  
*Absorption* ( $S_A \sim 70 \text{ W.m}^{-2}$ ).
- ▶ Atmosphère pas complètement opaque au rayonnement terrestre.  
*Fenêtre atmosphérique* ( $F_a \sim 40 \text{ W.m}^{-2}$ ).

# Limites du modèle à une vitre



- ▶ Atmosphère pas complètement transparente au rayonnement solaire.  
*Absorption* ( $S_A \sim 70 \text{ W.m}^{-2}$ ).
- ▶ Atmosphère pas complètement opaque au rayonnement terrestre.  
*Fenêtre atmosphérique* ( $F_a \sim 40 \text{ W.m}^{-2}$ ).
- ▶ Surface ne fait pas qu'émettre du rayonnement.  
*Flux de chaleur latente et sensible* ( $F_T \sim 100 \text{ W.m}^{-2}$ ).

# Limites du modèle à une vitre



- ▶ Atmosphère pas complètement transparente au rayonnement solaire.  
*Absorption ( $S_A \sim 70 \text{ W.m}^{-2}$ ).*
- ▶ Atmosphère pas complètement opaque au rayonnement terrestre.  
*Fenêtre atmosphérique ( $F_a \sim 40 \text{ W.m}^{-2}$ ).*
- ▶ Surface ne fait pas qu'émettre du rayonnement.  
*Flux de chaleur latente et sensible ( $F_T \sim 100 \text{ W.m}^{-2}$ ).*
- ▶ Température de l'atmosphère non-homogène.  
*Dans la troposphère, la température décroît avec l'altitude.*

# Modèles 1D de climat

## Energy Balance Model

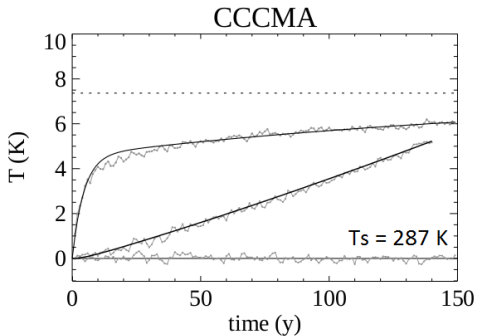
$$C_E \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \alpha_p) \frac{S_0}{4} - \tau_a \sigma T_s^4$$

avec  $C_E$  capacité calorifique effective et  $\tau_a$  transmissivité de l'atmosphère, paramètres estimés empiriquement à partir des observations disponibles.

Exemple de réponse en  $T_s$  à :

- un quadruplement abrupt de  $[\text{CO}_2]$
- un scénario "1 %  $[\text{CO}_2]$ ".

Source : Geoffroy et al. (2013).



# Tout ceci n'est pas nouveau. . .

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

TABLE VII.—Variation of Temperature caused by a given Variation of Carbonic Acid.

Latitude.	Carbonic Acid=0.07.					Carbonic Acid=1.5.					Carbonic Acid=2.0.					Carbonic Acid=2.5.					Carbonic Acid=3.0.				
	Dec.-Feb.	March-May.	June-Aug.	Sept.-Nov.	Mean of the year.	Dec.-Feb.	March-May.	June-Aug.	Sept.-Nov.	Mean of the year.	Dec.-Feb.	March-May.	June-Aug.	Sept.-Nov.	Mean of the year.	Dec.-Feb.	March-May.	June-Aug.	Sept.-Nov.	Mean of the year.	Dec.-Feb.	March-May.	June-Aug.	Sept.-Nov.	Mean of the year.
70	-2.9	-3.0	-3.4	-3.1	-3.1	3.3	3.4	3.8	3.6	3.52	6.0	6.1	6.0	6.1	6.03	7.9	8.0	7.9	8.0	7.95	9.1	9.3	9.4	9.4	9.3
60	-3.0	-3.2	-3.4	-3.3	-3.22	3.4	3.7	3.6	3.8	3.62	6.1	6.1	5.8	6.1	6.02	8.0	8.0	7.6	7.9	7.87	9.3	9.5	8.9	9.5	9.3
50	-3.2	-3.3	-3.3	-3.4	-3.3	3.7	3.8	3.4	3.7	3.65	6.1	6.1	5.5	6.0	5.92	8.0	7.9	7.0	7.9	7.7	9.5	9.4	8.6	9.2	9.17
40	-3.4	-3.4	-3.2	-3.3	-3.32	3.7	3.6	3.3	3.5	3.52	6.0	5.8	5.4	5.6	5.7	7.9	7.6	6.9	7.3	7.42	9.3	9.0	8.2	8.8	8.82
30	-3.3	-3.2	-3.1	-3.1	-3.17	3.5	3.3	3.2	3.5	3.47	5.6	5.4	5.0	5.2	5.3	7.2	7.0	6.6	6.7	6.87	8.7	8.3	7.5	7.9	8.1
20	-3.1	-3.1	-3.0	-3.1	-3.07	3.5	3.2	3.1	3.2	3.25	5.2	5.0	4.9	5.0	5.02	6.7	6.6	6.3	6.6	6.52	7.9	7.5	7.2	7.5	7.52
10	-3.1	-3.0	-3.0	-3.0	-3.02	3.2	3.1	3.1	3.1	3.13	5.0	5.0	4.9	4.9	4.95	6.6	6.4	6.3	6.4	6.42	7.4	7.3	7.2	7.3	7.3
0	-3.0	-3.0	-3.1	-3.0	-3.02	3.1	3.1	3.2	3.2	3.13	4.9	4.9	5.0	5.0	4.95	6.4	6.4	6.6	6.5	6.5	7.3	7.3	7.4	7.4	7.35
-10	-3.1	-3.1	-3.2	-3.1	-3.12	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	5.0	5.0	5.2	5.1	5.07	6.6	6.6	6.7	6.7	6.62	7.4	7.5	8.0	7.6	7.62
-20	-3.1	-3.2	-3.3	-3.2	-3.2	3.2	3.2	3.4	3.3	3.27	5.2	5.3	5.5	5.4	5.33	6.7	6.8	7.0	7.0	6.87	7.9	8.1	8.6	8.3	8.32
-30	-3.3	-3.3	-3.4	-3.4	-3.35	3.4	3.5	3.7	3.5	3.52	5.5	5.6	5.8	5.6	5.62	7.0	7.2	7.7	7.4	7.32	8.6	8.7	9.1	8.8	8.8
-40	-3.4	-3.4	-3.3	-3.4	-3.37	3.6	3.7	3.8	3.7	3.7	5.8	6.0	6.0	6.0	5.93	7.7	7.9	7.9	7.9	7.82	9.1	9.2	9.4	9.3	9.25
-50	-3.2	-3.3	-	-	-	-	-	-	-	-	6.0	6.1	-	-	-	7.9	8.0	-	-	-	9.4	9.5	-	-	-
-60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

266 Prof. S. Arrhenius on the Influence of Carbonic Acid



S. Arrhenius  
(1859–1927)

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

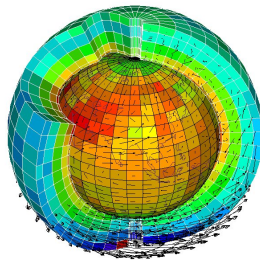
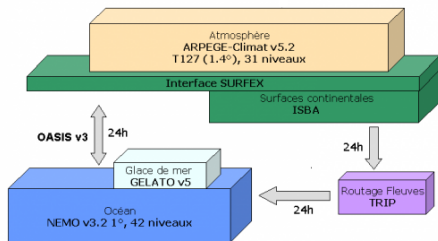


# Modèles 3D de climat

# Modèles 3D de climat

1. On sépare et discrétise les composantes du système.

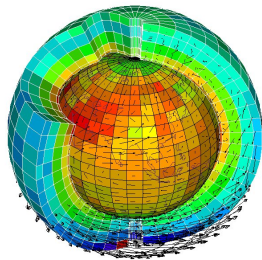
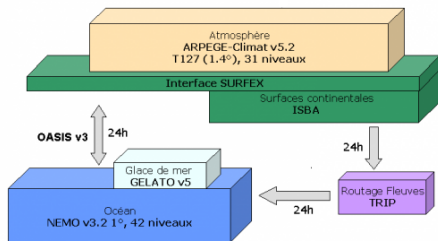
Exemples de structure (CNRM) et de grille atmosphérique (IPSL)



# Modèles 3D de climat

1. On sépare et discrétise les composantes du système.
2. On décrit les composantes et leurs interactions par des équations physiques.

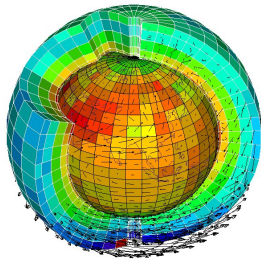
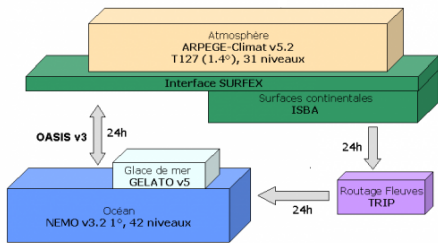
Exemples de structure (CNRM) et de grille atmosphérique (IPSL)



# Modèles 3D de climat

1. On sépare et discrétise les composantes du système.
2. On décrit les composantes et leurs interactions par des équations physiques.
3. Selon l'utilisation, on donne  $\pm$  d'information en entrée du modèle.  
Topographie/bathymétrie, irradiance solaire, composition de l'atmosphère, etc.

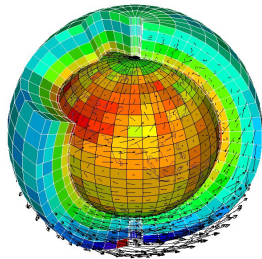
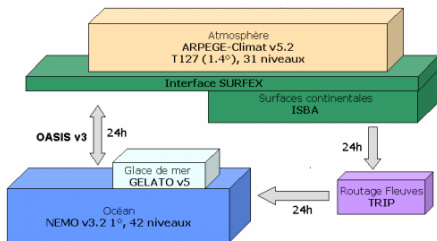
Exemples de structure (CNRM) et de grille atmosphérique (IPSL)



# Modèles 3D de climat

1. On sépare et discrétise les composantes du système.
2. On décrit les composantes et leurs interactions par des équations physiques.
3. Selon l'utilisation, on donne  $\pm$  d'information en entrée du modèle.  
Topographie/bathymétrie, irradiance solaire, composition de l'atmosphère, etc.
4. On résout le tout numériquement.

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



# Mise en équations – Exemple de l'atmosphère

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

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

Conservation de la masse

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

Conservation de l'eau

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

Conservation de l'énergie

$$Q = C_p \frac{dT}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt}$$

Équation d'état

$$p = \rho R_g T$$

+ Approximations  
e.g. hydrostatique.

+ Paramétrisations  
phénomènes sous-maillles.

# 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 [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).

Météo et climat

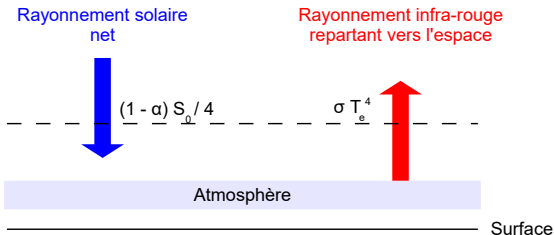
Modélisation du système climatique

Évolution récente du climat et projections futures

# Comment perturber le bilan d'énergie ?

## Rappel

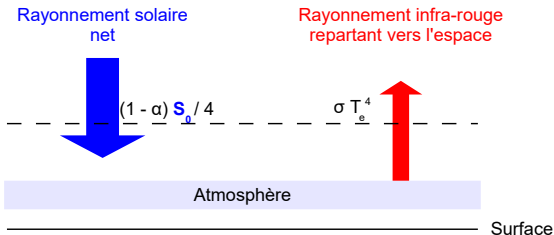
$$\Delta R = (1 - \alpha)S_0/4 - \sigma T_e^4 \quad (\Delta R = 0 \text{ à l'équilibre}).$$



# 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  $T_s \nearrow$ .

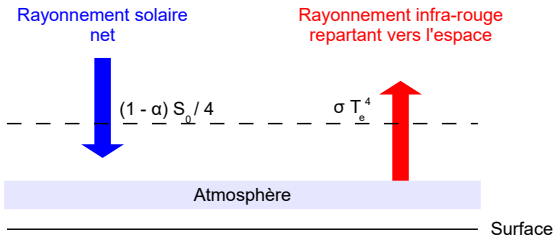
$\sim 10^4 - 10^6$  a : variations de l'orbite terrestre (cycles glaciaires).

$\sim 10^0 - 10^2$  a : variations de l'activité solaire (cycles à 11 ans).

# Comment perturber le bilan d'énergie ?

## Rappel

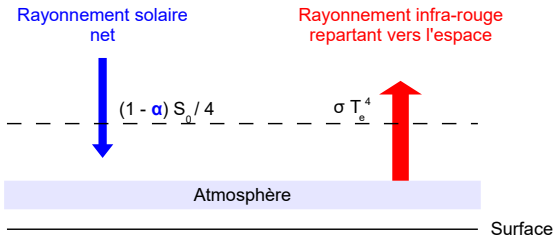
$$\Delta R = (1 - \alpha)S_0/4 - \sigma T_e^4 \quad (\Delta R = 0 \text{ à l'équilibre}).$$



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

\* particules en suspension dans l'atmosphère.

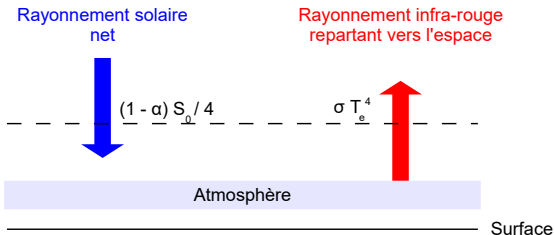
→ Naturels : poussières volcaniques, désertiques, feux de forêts, etc.

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

# Comment perturber le bilan d'énergie ?

## Rappel

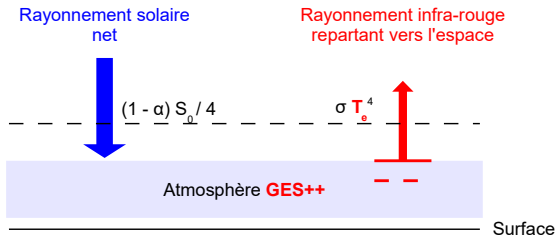
$$\Delta R = (1 - \alpha)S_0/4 - \sigma T_e^4 \quad (\Delta R = 0 \text{ à l'équilibre}).$$



# 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  $T_s \nearrow$ .

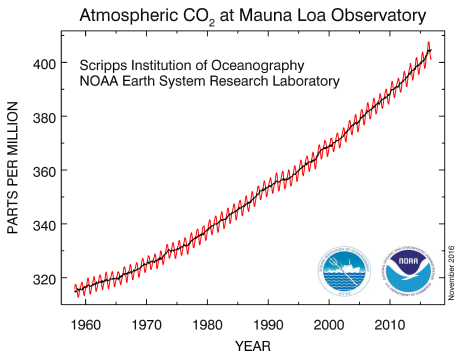
Or elles augmentent...



# Évolution observée de la concentration de CO<sub>2</sub>

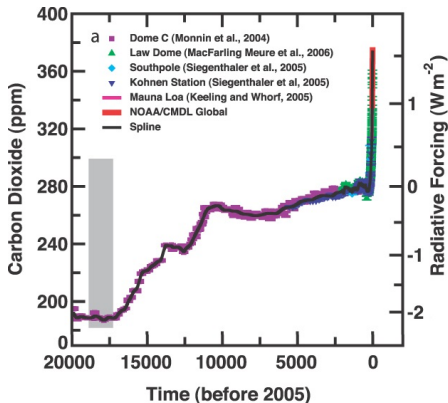
Le CO<sub>2</sub> est présent à l'état **naturel**, mais son augmentation récente de 280 à 400 ppm est **anthropique**.

Depuis 59 ans



Source : Mesures à [Mauna Loa](#).

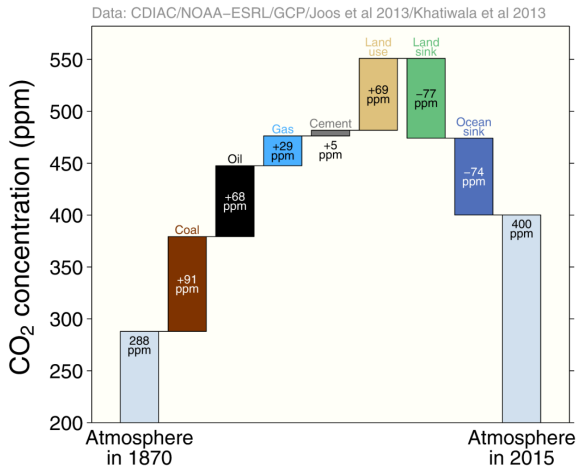
Depuis 20 000 ans



Adapté de l'IPCC AR4 (2007) Fig. 6.4.

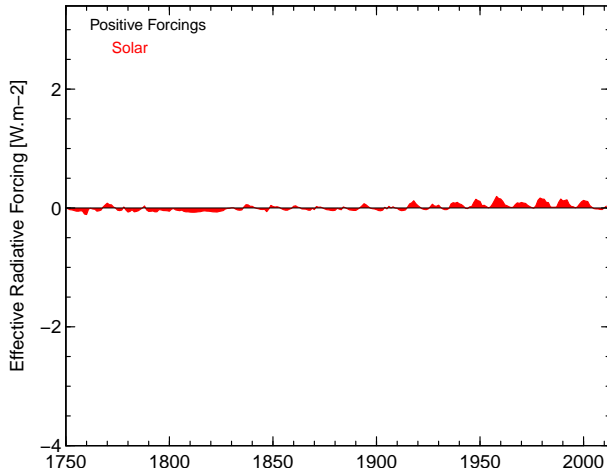
# Émissions vs. concentrations

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



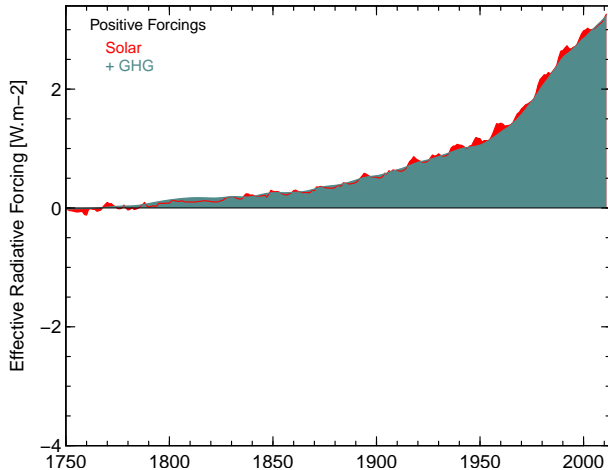
Source : Présentation [Global Carbon Budget 2016](#) (contient émissions par pays, etc.).

# Synthèse des perturbations depuis 1750



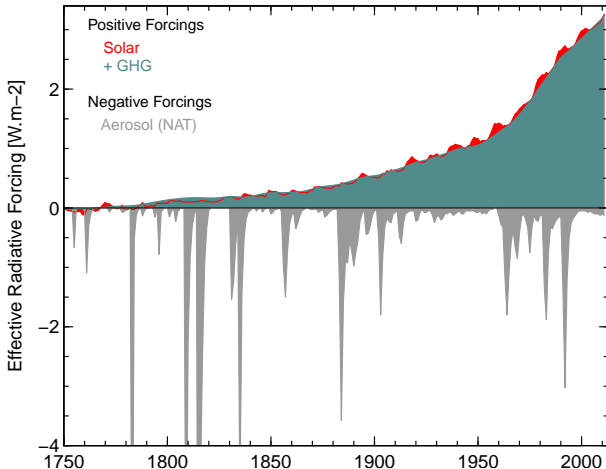
Tracé à partir des données fournies par F.M. Bréon (LSCE).

# Synthèse des perturbations depuis 1750



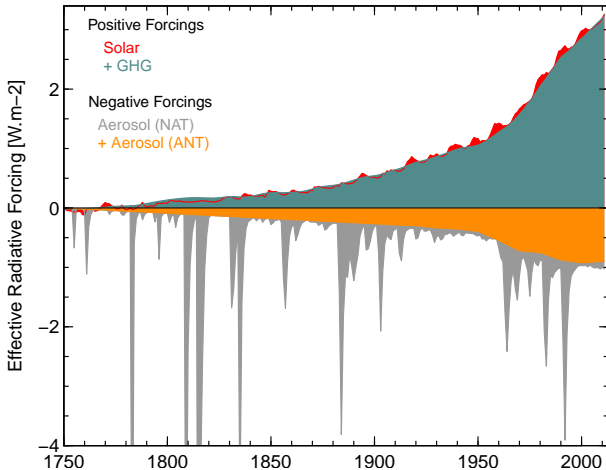
Tracé à partir des données fournies par F.M. Bréon (LSCE).

# Synthèse des perturbations depuis 1750



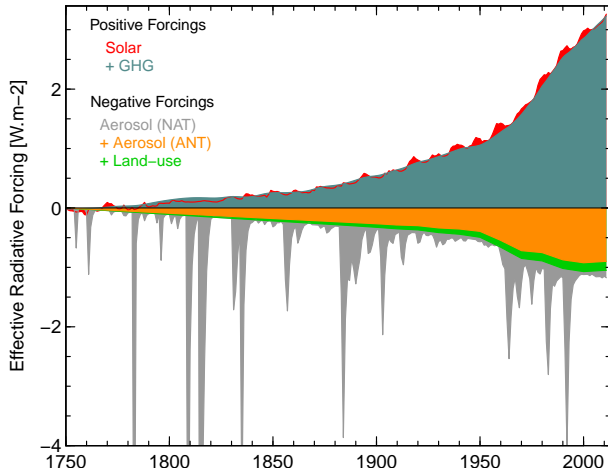
Tracé à partir des données fournies par F.M. Bréon (LSCE).

# Synthèse des perturbations depuis 1750



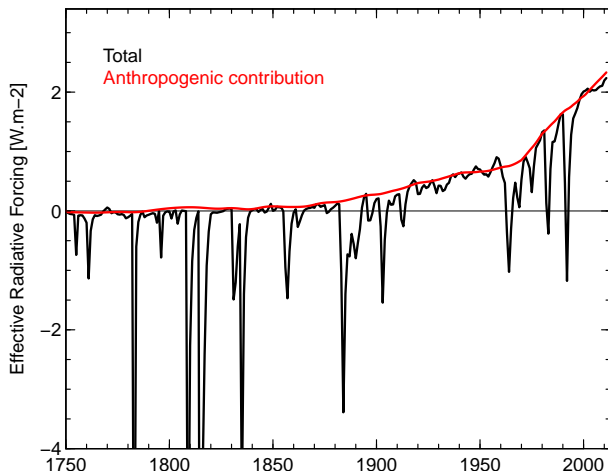
Tracé à partir des données fournies par F.M. Bréon (LSCE).

# 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 ( $\sim 2.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  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.

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 CO<sub>2</sub> est brusquement doublée :

- La température s'élève rapidement de  $\sim 1.1^\circ\text{C}$  (réponse de Planck).
- Puis les rétroactions ajoutent  $\sim 1.9^\circ\text{C}$  ( $\pm 1.5$ ) supplémentaires\*.

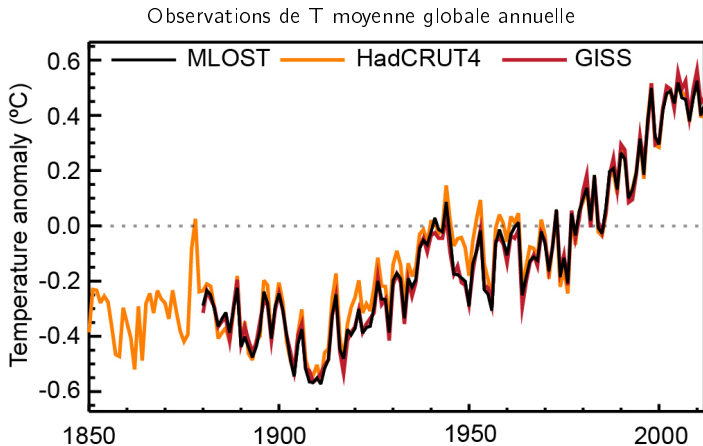
---

\* 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.

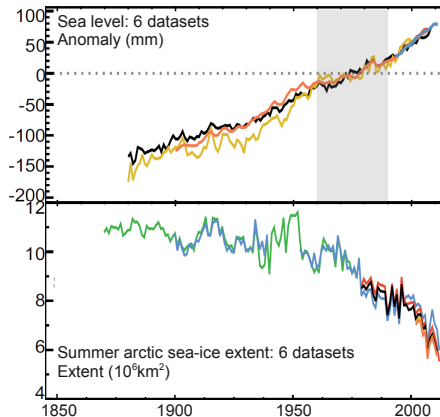
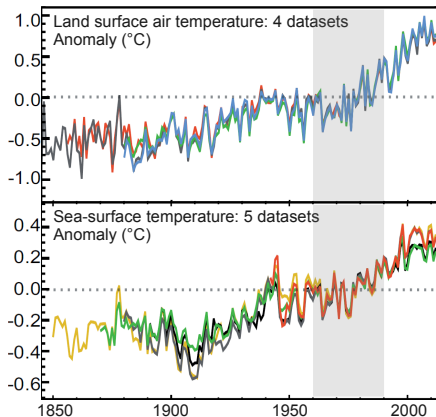


Source : IPCC AR5 (2013) Fig. 2.20.

# 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.

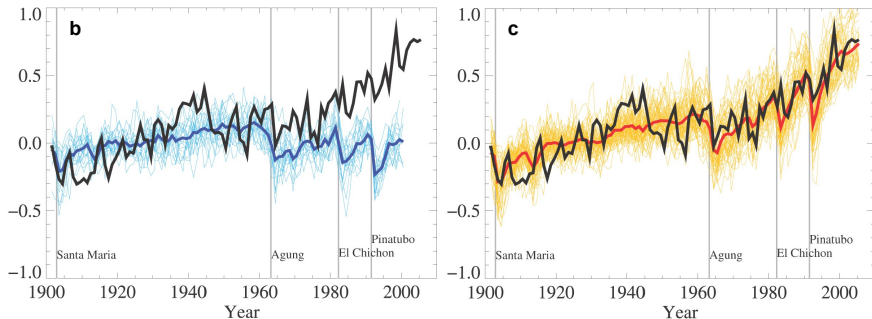


Adapté de l'IPCC AR5 (2013) FAQ 2.1 Fig. 1.

# Planète B

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

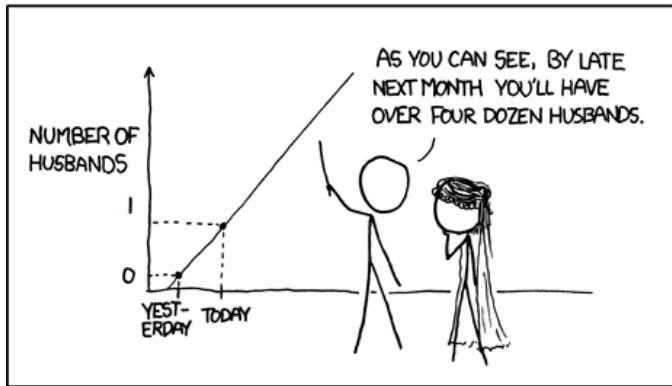
Exemple : T moyenne globale annuelle (obs en noir)



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

Et dans le futur ?

### MY HOBBY: EXTRAPOLATING



© xkcd.com

Et dans le futur ?

# Et dans le futur ?

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



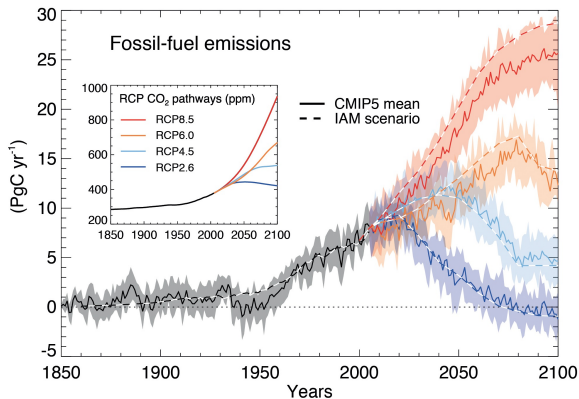
## Et dans le futur ?

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

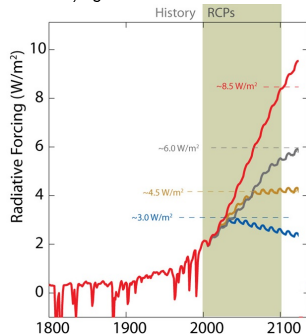
# Et dans le futur ?

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

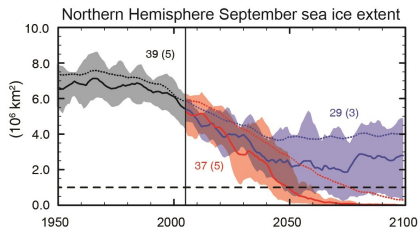
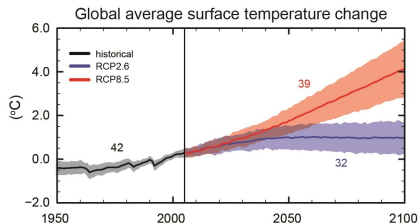


Forçage radiatif résultant

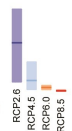
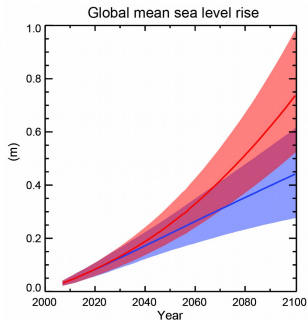
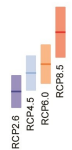


Source : IPCC AR5 (2013) Fig. TS19 & Meinhausen et al. (2011).

# Selon le scénario, un climat à la carte



Mean over 2081–2100



	Obs*	RCP 2.6**	RCP 8.5**
$\Delta T$ (K)	$0.61 \pm 0.06$	$1.0 \pm 0.7$	$3.7 \pm 1.1$
$\Delta SL$ (m)	$0.19 \pm 0.02$	$0.40 \pm 0.15$	$0.63 \pm 0.18$

\*  $\Delta$  Obs : 1986–2005 vs. 1850–1900.

\*\*  $\Delta$  RCP : 2081–2100 vs. 1986–2005.

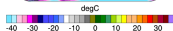
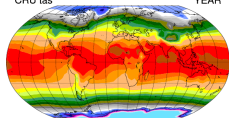
Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Figs. SPM7 & SPM9 et Table TS1.

# À quoi ressemble un climat plus chaud ?

Réchauffement plus fort sur continents, et aux pôles.

Rappel : état moyen

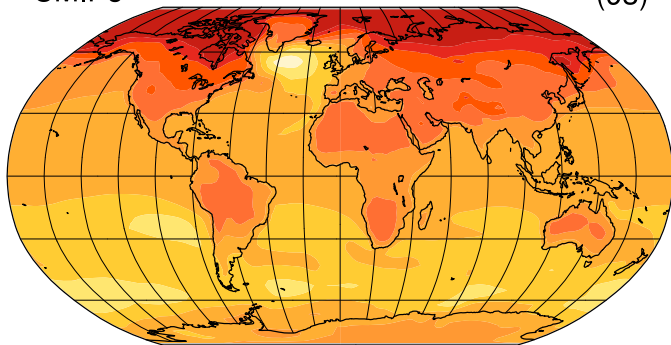
CRU tas YEAR



CRU 1961-1990.

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.

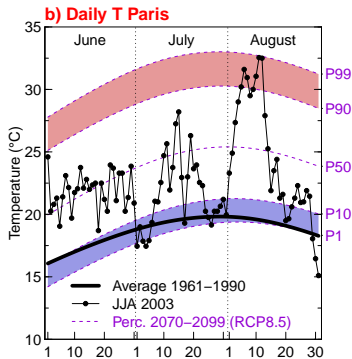
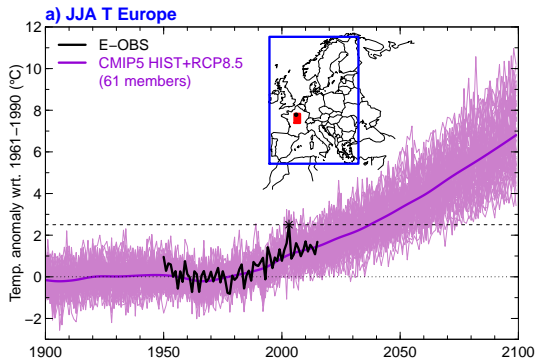
→ Extrêmes **chauds** plus probables, extrêmes **froids** moins probables.

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.

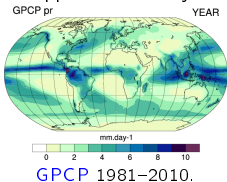


Source : Cattiaux and Ribes (submitted).

# Géographie des changements de précipitations

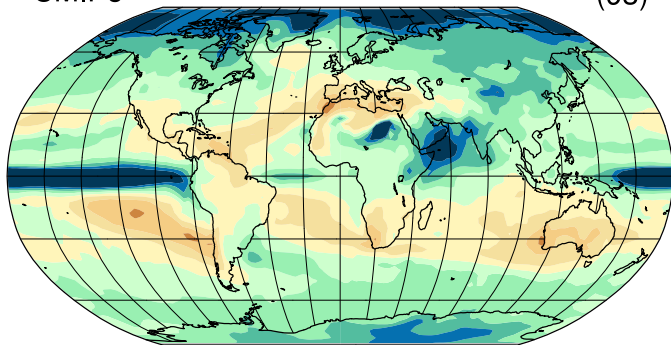
Au premier ordre, *wet get wetter, dry get drier*.  $\partial_T \ln(e_s) = L/RT^2$ .

Rappel : état moyen

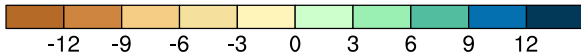


CMIP5 Changement normalisé par  $T$  globale

(93)



% par °C de réchauffement global



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

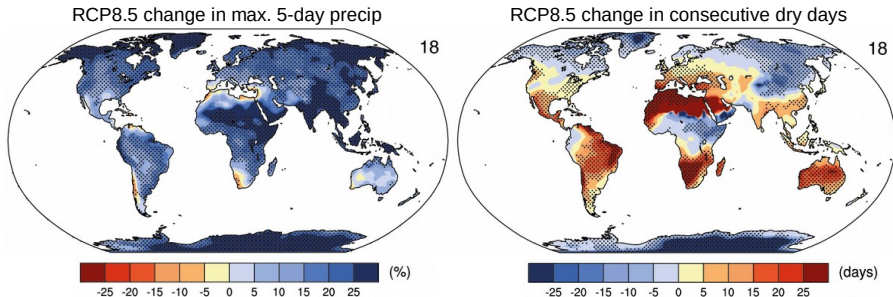
Source : Boucher et al., *La Météorologie Spécial Climat* (2015).

# 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

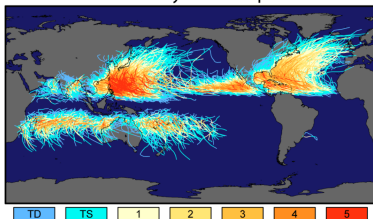
## Cyclones tropicaux

- 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

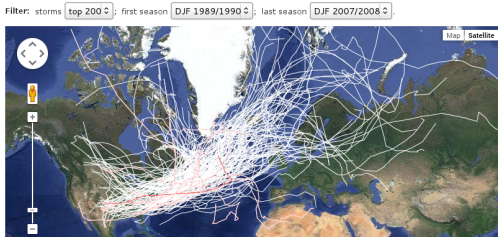
- origine et énergie principalement atmosphérique.
- probable décalage vers les pôles, incertitudes sur fréquence/intensité.

Tracks and Intensity of All Tropical Storms



Saffir-Simpson Hurricane Intensity Scale

Source : [NASA Earth Observatory](#).



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

# Résumé

Quel temps fera-t-il dans 59 ans ?

# Quel temps fera-t-il dans 59 ans ?

(ou plutôt : à quel temps peut-on s'attendre d'ici la fin du siècle ?)

# Quel temps fera-t-il dans 59 ans ?

(ou plutôt : à quel temps peut-on s'attendre d'ici la fin du siècle ?)

La réponse dépend du **scénario socio-économique** (choix politique).

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



# Quel temps fera-t-il dans 59 ans ?

(ou plutôt : à quel temps peut-on s'attendre d'ici la fin du siècle ?)

La réponse dépend du **scénario socio-économique** (choix politique).

Climat 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 proba des **événements météo extrêmes**.

# Quel temps fera-t-il dans 59 ans ?

(ou plutôt : à quel temps peut-on s'attendre d'ici la fin du siècle ?)

La réponse dépend du **scénario socio-économique** (choix politique).

Climat 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 proba des **événements météo extrêmes**.

—

Deux remarques :

# Quel temps fera-t-il dans 59 ans ?

(ou plutôt : à quel temps peut-on s'attendre d'ici la fin du siècle ?)

La réponse dépend du **scénario socio-économique** (choix politique).

Climat 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 proba des **événements météo extrêmes**.

—

Deux remarques :

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

# Quel temps fera-t-il dans 59 ans ?

(ou plutôt : à quel temps peut-on s'attendre d'ici la fin du siècle ?)

La réponse dépend du **scénario socio-économique** (choix politique).

Climat 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 proba des **événements météo extrêmes**.

—

Deux remarques :

1. Ce n'est pas une raison pour tout attribuer au changement climatique.
2. Il y a un vote dans 3 jours.

# 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

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](#))

