

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

Julien Cattiaux

Centre National de Recherches Météorologiques
CNRS / Météo-France | Toulouse

julien.cattiaux@meteo.fr

ISAE | Février 2022

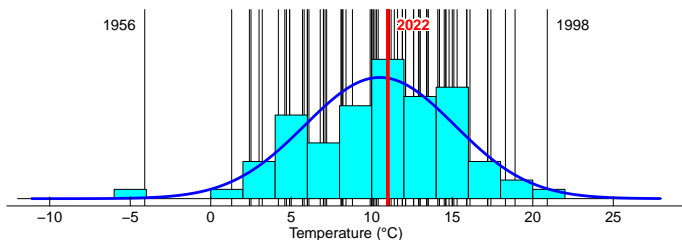
1. Introduction : météo et climat

Une définition du climat

Aujourd'hui, à Toulouse, il fait **11°C** : c'est la **météo**.

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

Température à Toulouse le 15 février



Tracé à partir des données Météo-France (1947–2022).

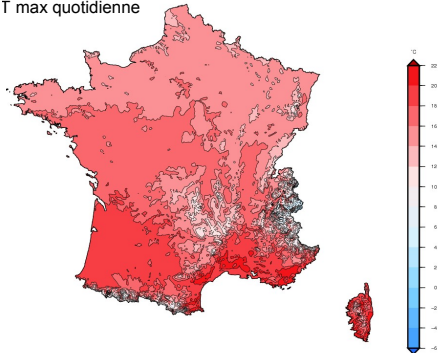
Le **climat** est la distribution de probabilité de la **météo**.
Au premier ordre, il peut être décrit par sa moyenne : les fameuses **normales**.

Normales France

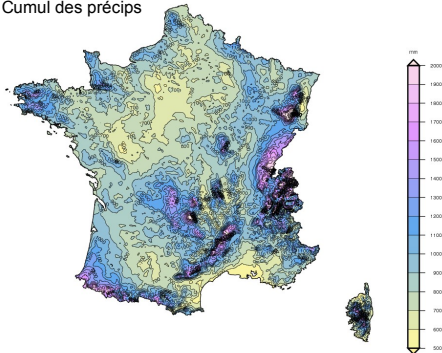
Il fait plus **chaud** au sud qu'au nord.

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

T max quotidienne



Cumul des précip



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

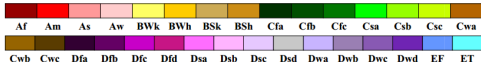
Précipitations

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

Classification des climats

World Map of Köppen–Geiger Climate Classification

updated with CRU TS 2.1 temperature and VASCLimO v1.1 precipitation data 1951 to 2000



Main climates

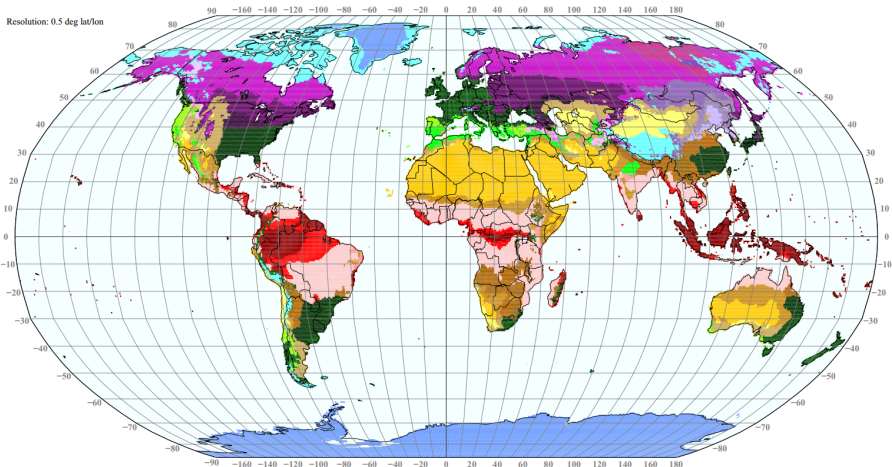
- A: equatorial
- B: arid
- C: warm temperate
- D: snow
- E: polar

Precipitation

- W: desert
- S: steppe
- f: fully humid
- s: summer dry
- w: winter dry
- m: monsoonal

Temperature

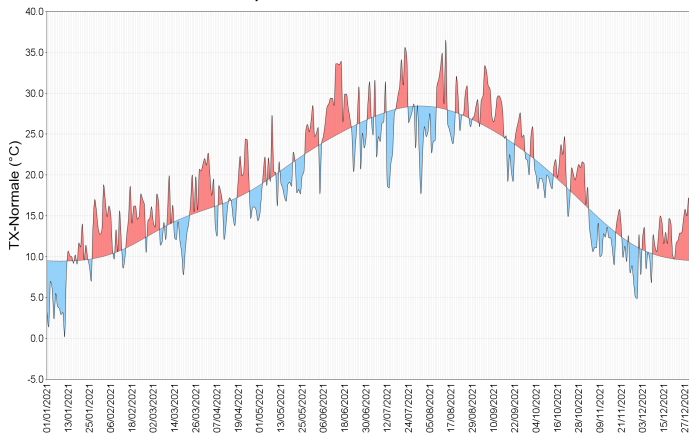
- h: hot arid
- k: cold arid
- a: hot summer
- b: warm summer
- c: cool summer
- d: extremely continental
- F: polar frost
- T: polar tundra



Source : Kottek et al. (2006) sur la base de Köppen and Geiger (1954).

C'est pas normal, cette météo !

T max quotidienne à Toulouse en 2021



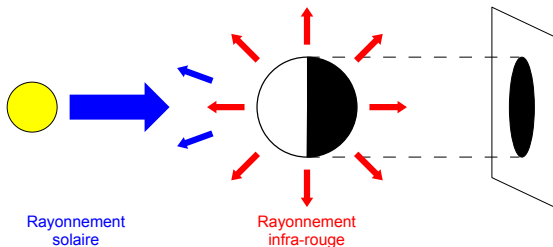
Source : Météo-France.

À la normale se superpose la **variabilité climatique**.
Parfois, cette variabilité génère des **événements extrêmes**.

2. Physique du climat

Système climatique et bilan d'énergie

Système : Atmosphère ↔ Océans ↔ Cryosphère ↔ Continents ↔ Biosphère



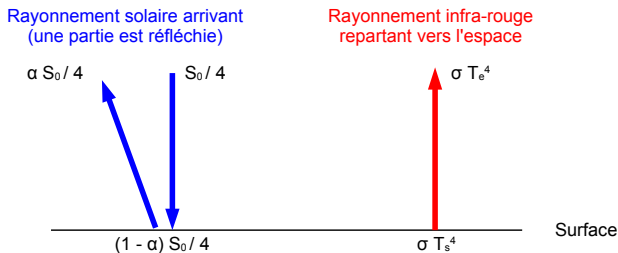
Énergie entrante : rayonnement solaire S_0 réparti sur un disque (πR^2).
Une fraction α est réfléchi (albédo planétaire).

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

$$\text{À l'équilibre : } E_{\text{solaire}} = (1 - \alpha) S_0 / 4 = E_{\text{infra-rouge}} = \sigma T_e^4$$

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

Un premier bilan d'énergie



La Terre émet à $T_e = 255 \text{ K}$ ($-18 \text{ }^\circ\text{C}$) vers l'espace.

Sans atmosphère, T_e serait la température de surface : $T_s = T_e$.

En réalité on observe $T_s \sim 288 \text{ K}$ ($15 \text{ }^\circ\text{C}$).

La différence est due à l'**effet de serre**.

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)

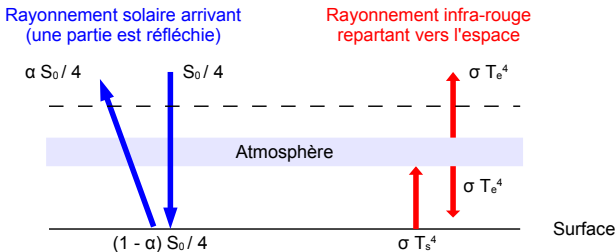


J. Tyndall
(1820–1893)

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 type vitre*



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

Dans ce modèle, on trouve : $T_s^4 = 2T_e^4 \Rightarrow T_s = 1.19T_e = 303 \text{ K (} 30 \text{ }^\circ\text{C)}$.

En réalité on a $T_s \sim 1.12T_e$ (le modèle à 1 vitre est trop simple).

La **température globale** de surface est pilotée par le bilan d'énergie global.

Géographie du bilan d'énergie

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

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

Flux net d'énergie au
sommet de
l'atmosphère

Tracé à partir des données [CERES](#) 2001–2014.

Le système climatique met en mouvement l'atmosphère et l'océan pour redistribuer l'énergie (**dynamique** des fluides).

Et nous y revoilà

Le climat est le résultat du **bilan d'énergie** et de la **dynamique** du système.

On sait décrire ces lois **physiques** par des équations **mathématiques** (cf. suite).

T observée

P observée

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

Modéliser le climat

À quoi ça sert ?

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

Comment on fait ?

1. On décrit les composantes du système, et leurs échanges, par des **équations**.
2. On renseigne les **conditions aux limites**, et les **conditions initiales**.
3. On **résout** les équations ; cela est fait numériquement, sur une **grille**.

T **simulée**

P **simulée**

Tracé à partir des données **CMIP5** (ensemble de 38 modèles) 1981–2010.

Résumé à la mi-temps

Le climat est la distribution de probabilité de la météo.

Il est piloté par de grands équilibres physiques.

On sait l'observer et le modéliser.

—

*Pff. Avec vos modèles vous ne savez même pas prévoir la météo...
Alors le climat n'en parlons pas !*

La météo (réalisation) est un problème de conditions initiales.

Le climat (distribution) est un problème de conditions aux limites.

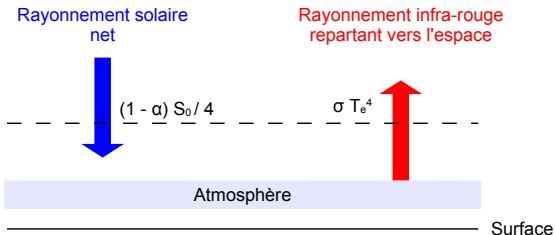
Alors parlons-en :-)

3. Évolution récente du climat

Perturbations théoriques du bilan d'énergie

Rappel

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

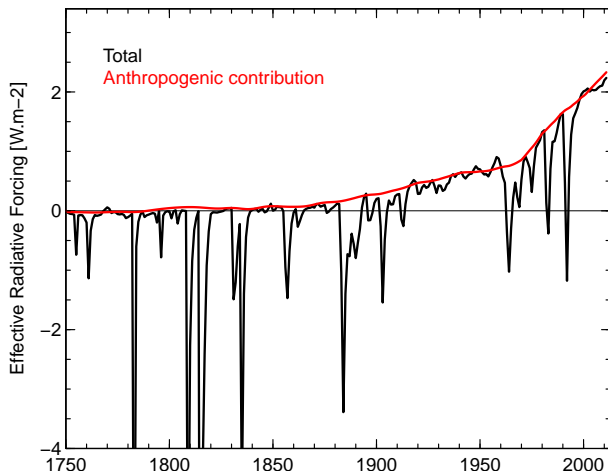


Si S_0 augmente (irradiance solaire), $\Delta R > 0$ et $T_s \nearrow$.

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

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

Perturbations *observées* depuis 1750



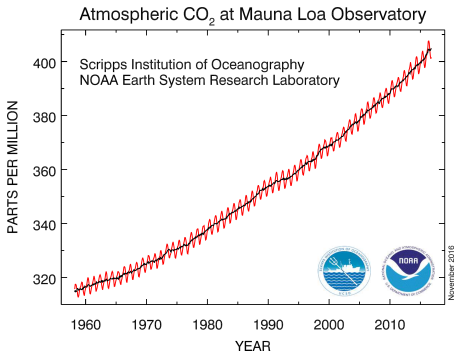
Tracé à partir des données fournies par F.M. Bréon (LSCE).

Les activités humaines induisent un excès d'énergie ($\sim 2.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ auj.).

Évolution observée de la concentration de CO₂

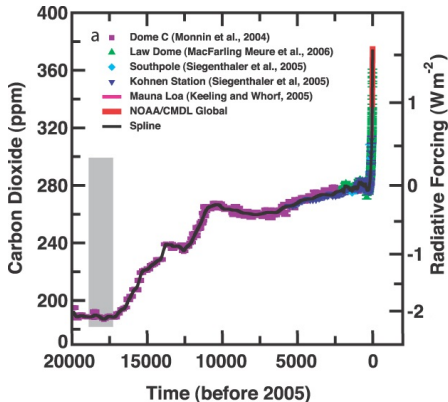
Le CO₂ est présent à l'état **naturel**, sa teneur a toujours varié, mais son augmentation récente de 280 à 400 ppm est **anthropique**.

Depuis 60 ans



Source : Mesures à [Mauna Loa](#).

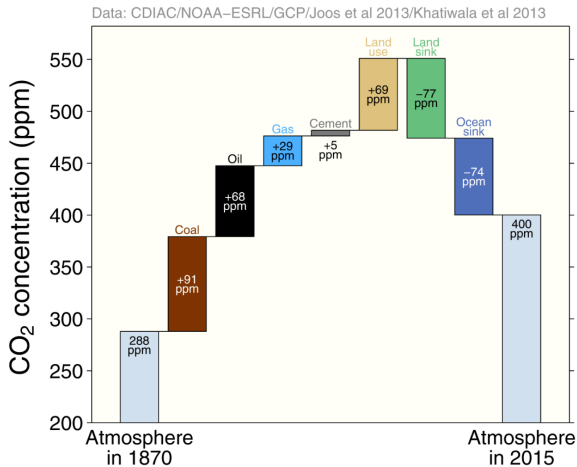
Depuis 20 000 ans



Adapté de l'IPCC AR4 (2007) Fig. 6.4.

Concentration vs. émissions

Environ 60 % des **émissions** anthropiques de l'ère industrielle ont été absorbées par les océans et continents (~ 370 GtC sur 655 GtC depuis 1750).

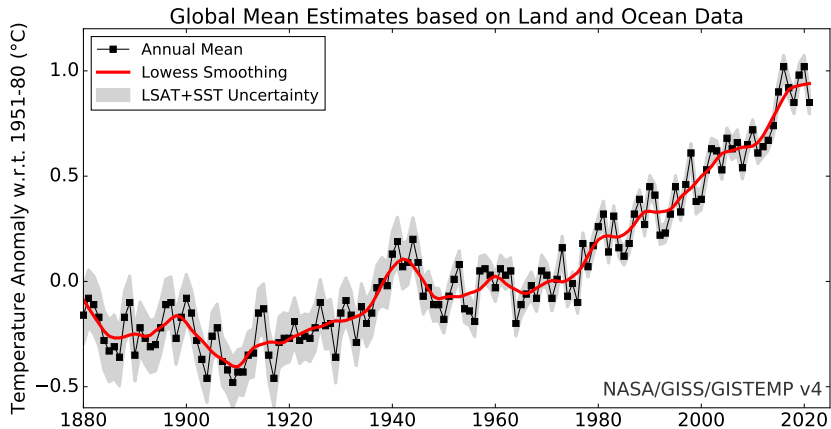


Source : Présentation [Global Carbon Budget 2016](#) (contient émissions par pays, etc.).

Conséquence : un réchauffement global

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

Entre 1850–1900 et 2011–2020, on estime $\Delta T_s = 1.09$ [0.95 à 1.20] K.

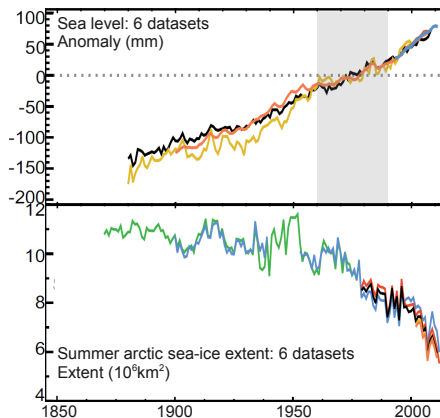
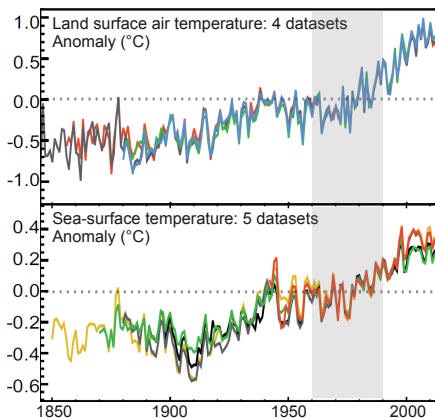


Source : IPCC AR6 (2021) et [NASA GISS](#).

De multiples indicateurs

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

- Les continents se réchauffent plus vite que les océans.
- Le niveau marin monte, la cryosphère fond.

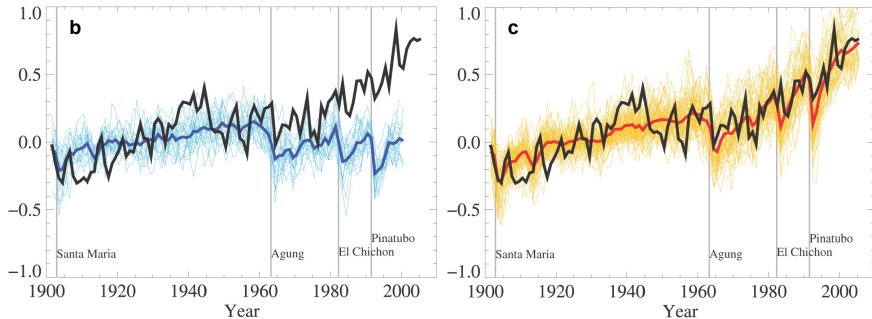


Adapté de l'IPCC AR5 (2013) FAQ 2.1 Fig. 1.

Est-on *vraiment* 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)

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).



S. Arrhenius
(1859–1927)

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).



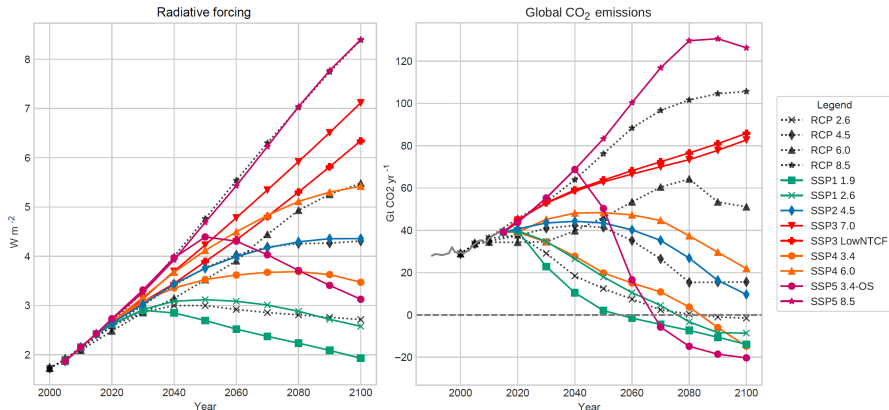
G. Callendar
(1898–1964)

4. Projections climatiques futures

Le monde s d'après

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 SSP de forçages radiatifs & émissions compatibles

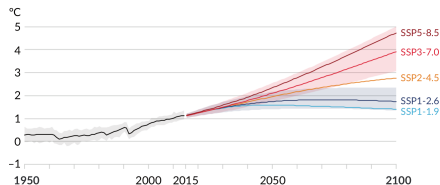


Source : Gidden et al. (2019).

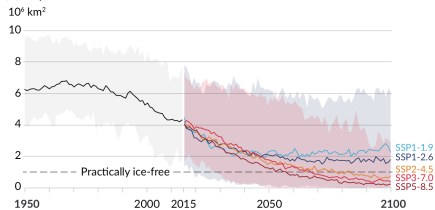
Selon le scénario, un climat à la carte

À scénario donné, incertitude due à la modélisation + variabilité interne.

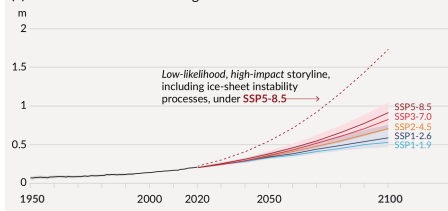
(a) Global surface temperature change relative to 1850–1900



(b) September Arctic sea ice area



(d) Global mean sea level change relative to 1900



	Obs*	SSP1-2.6**	SSP5-8.5**
ΔT (K)	0.8 ± 0.1	1.0 ± 0.5	3.6 ± 1.2
ΔSL (m)	0.20 ± 0.05	0.47 ± 0.15	0.82 ± 0.19

* Obs = 1995–2014 vs. 1850–1900

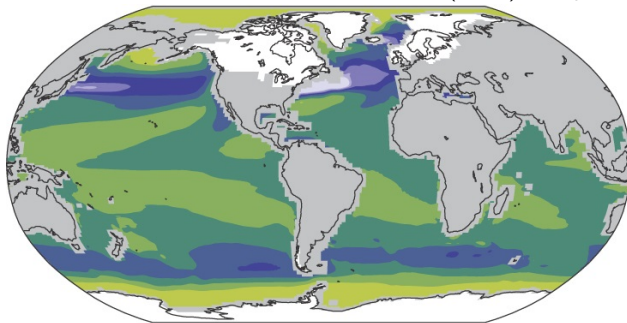
** SSP = 2081–2100 vs. 1995–2014

Adapté de l'IPCC AR6 (2021) Fig. SPM8 et Table SPM1.

4 degrés, c'est beaucoup ?

C'est à peu près ce qui sépare une période **glaciaire** (e.g. il y a 20 000 ans) d'une période **inter-glaciaire** (actuelle).

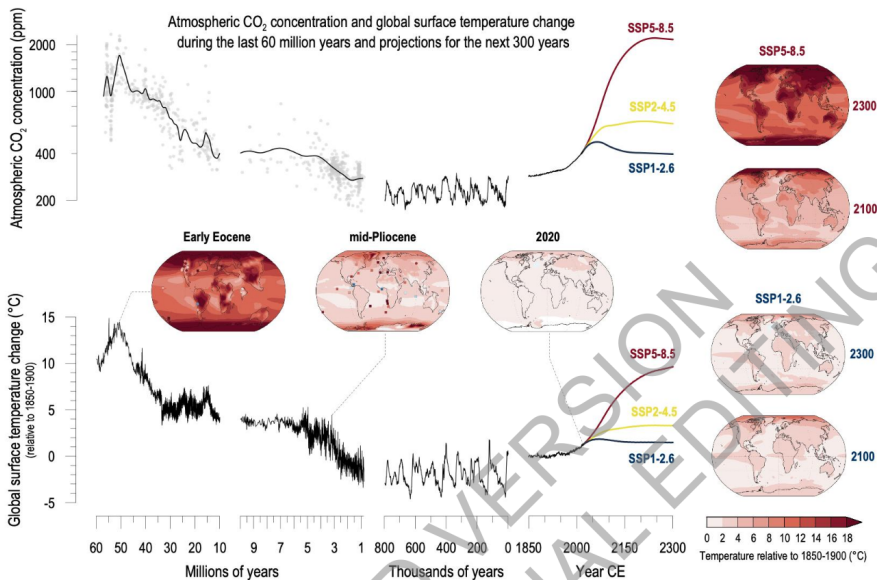
Exemple du ΔT entre le **Dernier Maximum Glaciaire** (21 ka) et le pré-industriel



Sea Surface Temperature Change (°C)

Source : IPCC AR4 (2007) Fig. 6.5.

Vision géo-logique



Source : IPCC AR6 (2021) Fig. TS1 (provisoire).

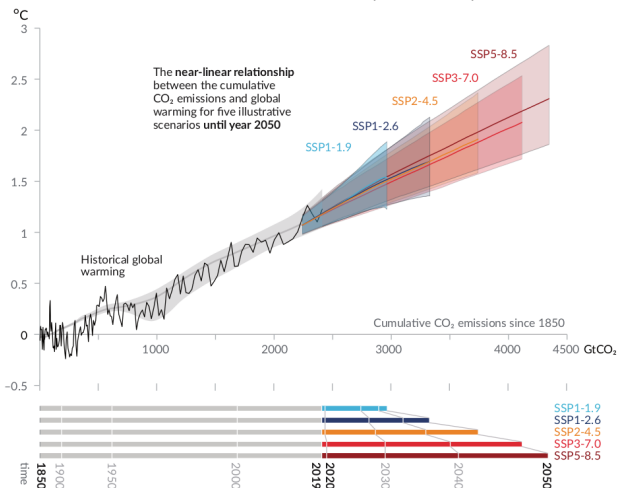
Vision géo-politique

On peut estimer les **émissions permises** pour différentes **cibles** de réchauffement global.

Exemple : encore ~ 110 GtC permises pour limiter à 1.5 K (avec une proba de 66 %).

Source : IPCC AR6 (2021) Fig. SPM10.

ΔT_s vs. émissions de C (en GtCO₂)

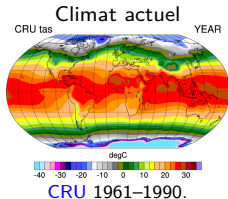


5. À quoi ressemble un climat plus chaud ?

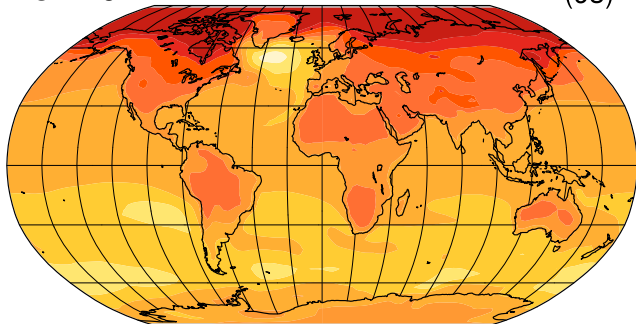
Géographie du réchauffement

Plus fort sur continents et aux hautes latitudes.

N.B. Facteur 1 (hiver) à 1.5 (été) en France.



CMIP5 Changement normalisé (93)



°C par °C de réchauffement global



0 0.25 0.5 0.75 1 1.25 1.5 1.75 2

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

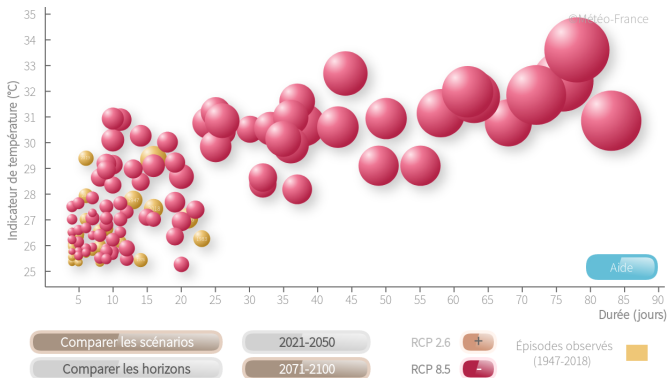
Extrêmes de température

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** → amplifie l'effet "décalage".

Exemple : épisodes de vagues de chaleur en France métropolitaine

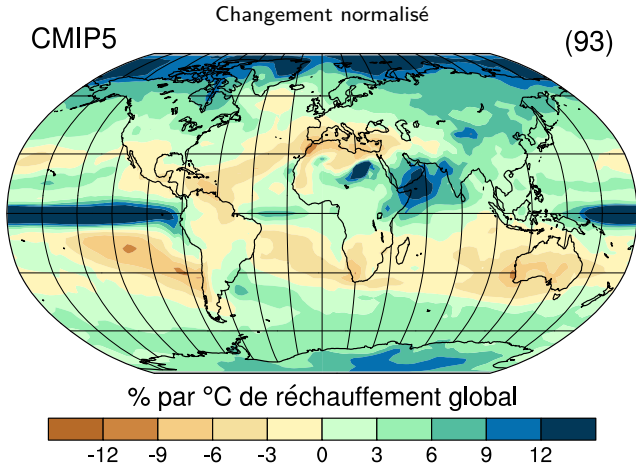
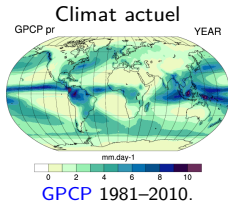


Source : [ClimatHD](#) + dossier canicules [Météo-France](#).

Géographie des changements de précipitations

Au premier ordre, **intensification** du cycle hydrologique actuel.

N.B. En France, contrastes nord/sud et été/hiver.



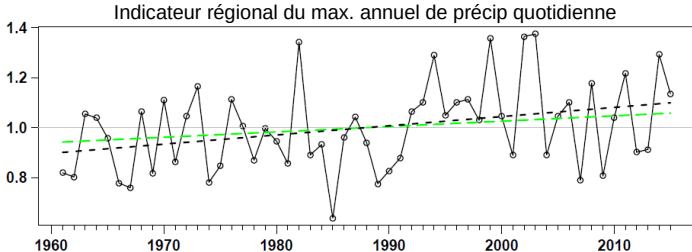
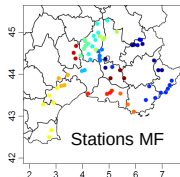
Source : Boucher et al., *La Météorologie Spécial Climat* (2015).

Extrêmes hydrologiques

Précipitations intenses : **augmentation** projetée & partiellement observée, empreinte anthropique détectée sur certains événements.

Sécheresses météorologiques : **augmentation** projetée dans certaines régions (dont Europe méridionale), mais pas de signal détecté.

Exemple : intensification observée des "épisodes méditerranéens"
($\sim 15 [\pm 10]$ % par degré de réchauffement)



Source : Ribes et al. (2018).

Cyclones et tempêtes

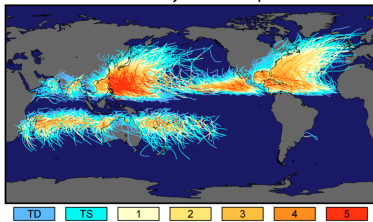
Cyclones tropicaux

- se forment sous certaines conditions atmosphériques et océaniques, puis puisent leur énergie du contenu de chaleur de la surface océanique.
- probablement **moins fréquents**, mais **plus intenses** (vents, précips, submersions).
- extension de leur "terrain de jeu" vers les moyennes latitudes.

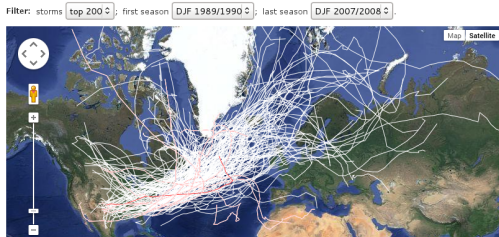
Tempêtes extra-tropicales

- 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 **rappports**, 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**.



+ **1er tome du 6e rapport (AR6)** sorti en août 2021.

Résumé

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 plus fort qu'en global (surtout en été), augmentation des précipitations en hiver, assèchement des sols en été.

Associé à des changements de probabilité des événements météo extrêmes.

—

Deux remarques :

1. Attention aux messages trop simplificateurs :

- une vague de froid ponctuelle ne prouve pas que le climat ne se réchauffe pas ;
- tout événement météorologique n'est pas 'causé' par le changement climatique ;
- etc..

2. Il y a bientôt un vote.

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), ed. 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](#))
Rapport DRIAS (2021), pour les projections climatiques en France.

Extrêmes météo en changement climatique

Cattiaux, J., F. Chauvin, H. Douville and A. Ribes (2018), Événements météorologiques extrêmes et changement climatique, Encyclopédie de l'Environnement. ([en ligne](#))

Des BDs

Saison Brune, P. Squarzoni, ed. Delcourt. ([en ligne](#))
Le Monde sans Fin, C. Blain et J.-M. Jancovici, ed. Dargaud.
Le Droit du Sol, E. Davodeau, ed. Futuropolis.

