

Climat & Changement Climatique | ISAE-Supaero 3/3

Changement climatique actuel (anthropique)

Julien Cattiaux

Centre National de Recherches Météorologiques
CNRS / Météo-France

Retrouver ce cours sur ma page web : <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article629>

Contact : julien.cattiaux@meteo.fr | [@julienc4ttiaux](#)

2020-21

Un mot sur le contexte scientifique

- ▶ Depuis 1990, les scientifiques produisent régulièrement des **rapports de synthèse** (AR) des connaissances sur le changement climatique actuel.
- ▶ La coordination est assurée par le **Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat** (GIEC ou *IPCC*), créé en 1988 par l'ONU et l'OMM.
- ▶ Chaque rapport est divisé en 3 tomes : **physique**, impacts, mitigation.



N.B. Si la création du GIEC est une demande politique, ses rapports sont des synthèses des connaissances **scientifiques** faites par des **scientifiques** selon la procédure **scientifique** de publication *peer-reviewed*.

Changement climatique observé

Projections futures et incertitudes

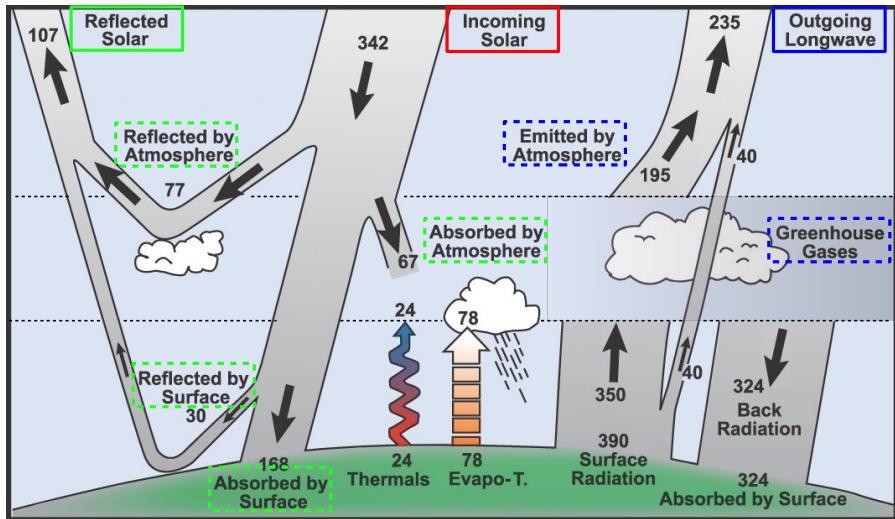
À quoi ressemble un climat plus chaud ?

Un mot sur les événements extrêmes

Comment perturber le climat ? – Rappel

► En perturbant l'équilibre énergétique !

À l'échelle de 10–100 a : **Activité solaire** – **GES** – **Aérosols** – **Land-use**.

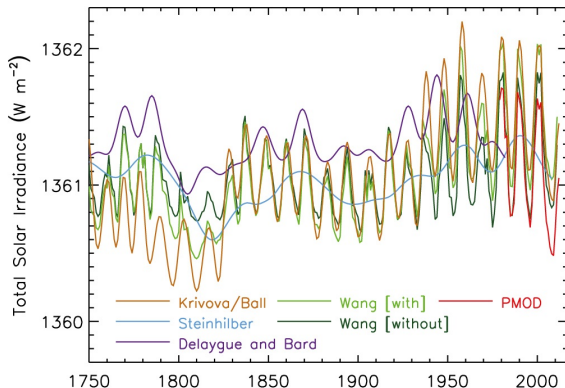


Adapté de l'IPCC AR4 (2007) FAQ 1.1 Fig. 1. Flux en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Forçage solaire (+)

- Variations de l'**activité solaire**, cycles à ~ 11 ans + basse fréquence.
- Entre min et max d'un cycle : $\Delta S_0 \sim \pm 0.5 \text{ W.m}^{-2} \implies F \sim \pm 0.12 \text{ W.m}^{-2}$.
- Entre 1750 et 2011, on* estime : $\Delta S_0 \sim 0.2 \text{ W.m}^{-2} \implies F = 0.05 [\pm 0.05] \text{ W.m}^{-2}$.

Irradiance solaire reconstruite depuis 1750



*Source estimation + figure : IPCC AR5 (2013) Fig. 8.11.

N.B. La croissance du soleil ($t \sim 10^9$ a) et les cycles orbitaux ($t \sim 10^4 - 10^5$ a) sont hors-sujet à l'échelle de temps qui nous intéresse ici.

Forçage GES (+) – Émissions

Rappel

- Principaux gaz concernés : CO₂, CH₄ et N₂O.
- Durée de vie dans l'atmosphère : $\sim 10 - 10^2$ a.
- Répartition homogène ; on parle de *Well-Mixed GHG*.

► À l'échelle de temps considérée, les **sources** potentielles de CO₂ sont les activités **volcanique** + **anthropiques**.

Entre 1750 et **2011**, on* estime :

- émissions **C fossile** = 375 [±30] GtC** (taux 2011–2020 ~ 9.6 GtC/an) ;
- émissions **land-use** = 180 [±80] GtC (taux 2011–2020 ~ 1.6 GtC/an) ;
- émissions **volcanisme** = 20 [±10] GtC (taux moyen ~ 0.08 GtC/an).

► Les puits **continental** et **océanique** ne compensent pas cette source additionnelle \rightarrow **les concentrations atmosphériques de GES augmentent**.

* IPCC AR5 (2013) et [Global Carbon Project \(2020\)](#) pour les sources anthropiques. Gerlach (2011) pour le volcanisme, à partir d'un taux annuel moyen de 0.15–0.45 GtCO₂/an (i.e. $\sim 6.8 \cdot 10^{12}$ mol/an).

** 1 GtC = 1 PgC = 10¹⁵ g de carbone \leftrightarrow 3.664 GtCO₂.

Forçage GES (+) – Concentrations

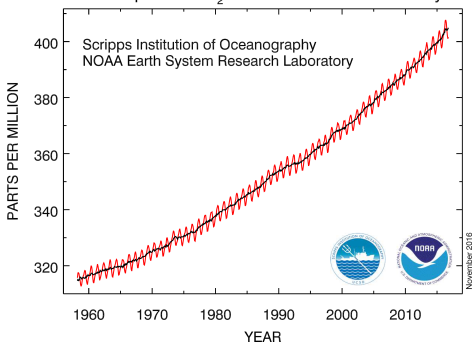
► Augmentation des concentrations de GES depuis le pré-industriel.

CO₂ : de 278 à 410 ppm. CH₄ : de 715 à 1870 ppb. N₂O : de 270 à 330 ppb.

(Estimations du WMO en 2019).

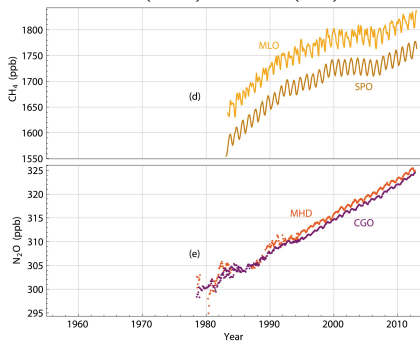
Évolution observée des concentrations de GES

Atmospheric CO₂ at Mauna Loa Observatory



Source : Mesures à [Mauna Loa](#).

CH₄ (haut) et N₂O (bas)



Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Fig. 6.3.

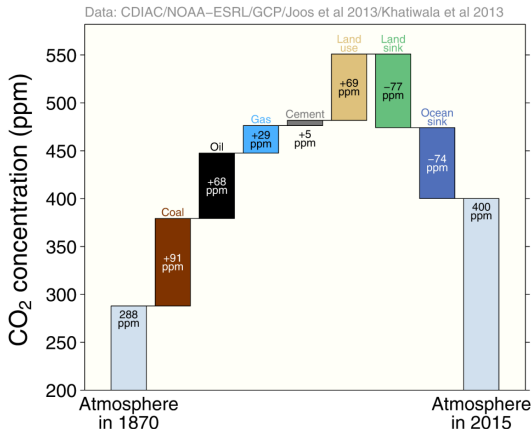
À voir aussi : [vidéo](#) de la NOAA sur l'évolution de [CO₂].

Forçage GES (+) – Concentrations vs. émissions

- Sur les 555 GtC émises entre 1750 et **2011**, 315 GtC ont été absorbées (puits océ. et continental), et 240 GtC restent dans l'atmosphère (45 %).
Estimations IPCC AR5 (2013).

Détail des contributions des sources et puits de C à l'élévation de la [CO₂] depuis 1870.

Source : [Global Carbon Project](#).



Encore plus de détails (émissions par pays, etc.) dans les présentations annuelles [Global Carbon Budget](#).

Forçage GES (+) – Synthèse

- ▶ GES présents à l'état **naturel**, mais ↗ actuelle **anthropique** :
 - [C] **actuelles** sans précédent dans les carottages glaciaires (e.g. $\text{CO}_2 \sim 180\text{--}280$ ppm depuis ~ 1 Ma) ;
 - $\partial_t[C]$ **actuel** bien plus rapide que lors de la dernière déglaciation (~ 21 ka) .
 - il faut remonter au **Pliocène (3.3–3.0 Ma)** pour retrouver un CO_2 à ~ 400 ppm (ΔT_s estimé à 1.9–3.6 K par rapport au pré-industriel).

- ▶ **Forçages radiatifs** en **2016** par rapport au pré-industriel* :

$$F_{\text{CO}_2} = 5.4 \ln(400/280) = 1.9 \text{ W.m}^{-2}$$

$$F_{\text{CH}_4} = 0.036(\sqrt{1835} - \sqrt{715}) = 0.6 \text{ W.m}^{-2}$$

$$F_{\text{N}_2\text{O}} = 0.11(\sqrt{330} - \sqrt{270}) = 0.2 \text{ W.m}^{-2}.$$

→ Total incluant les HC, CFC, etc. :

$$F_{\text{WMGHG}} = 3.0 [\pm 0.3] \text{ W.m}^{-2}$$

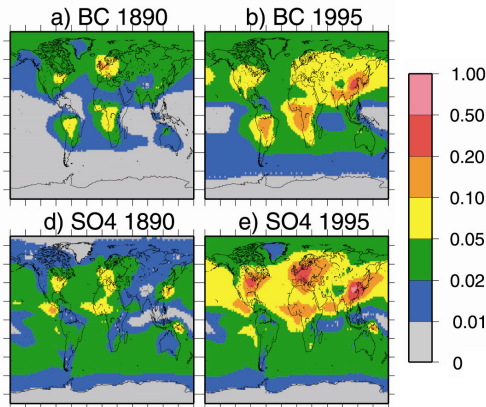
* Estimations du **CDIAC**.

—
N.B. GES aviation : act. 0.3 GtC/an (2.5 % du total). $F \sim 0.034 \text{ W.m}^{-2}$ en 2018.
Estimations Lee et al. (2021).

Forçage aérosols (–)

Rappel

- Particules en suspension, durée de vie courte, répartition hétérogène (sauf volcans).
- Origines naturelle (poussières, volcans, feux de forêts) & anthropique (combustion).
- Principales espèces : sulphates (SO_4) & carbone-suies (BC).
- Effets radiatifs direct (absorption / diffusion) & indirects (nuages).



► Depuis le pré-industriel :

- tendance long-terme anthropique (co-linéaire à l'augmentation des GES).
- quelques pics volcaniques lors des éruptions majeures.

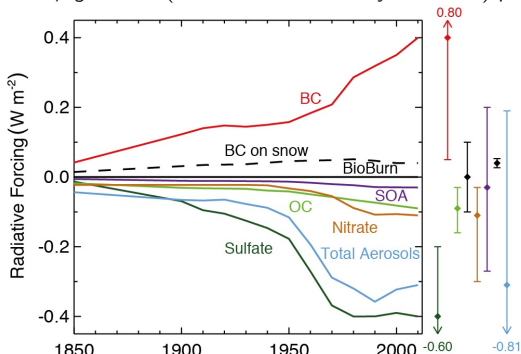
← Épaisseurs optiques BC ($\times 10$) & SO_4 .
Source : Koch et al. (2009).

Forçage aérosols (–) – Anthropiques

- ▶ En **2011**, on* estime pour les aérosols atmosphériques :

$$F = -0.9 \text{ } [-1.9 \text{ à } -0.1] \text{ W.m}^{-2}, \text{ dont } F_{direct} = -0.35 \text{ } [\pm 0.50] \text{ W.m}^{-2}.$$

Détail du forçage direct (interaction aérosol-rayonnement) par espèce



* Estimations IPCC AR5 (2013). Figure adaptée de la Fig. 8.8.

N.B. Traînée de condensation + cirrus induits : $F \sim 0.055 \text{ W.m}^{-2}$ en 2018.
Estimations Lee et al. (2021).

Forçage aérosols (–) – Volcaniques

- ▶ **Éruptions massives** : pic ponctuel de concentration / forçage.

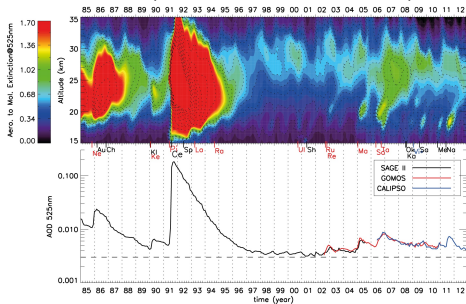
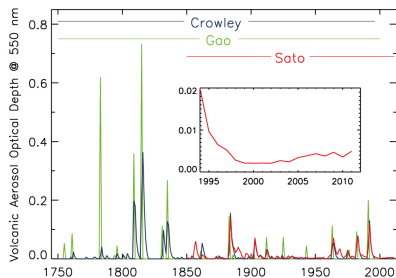
Volcans majeurs depuis le pré-industriel : Grimsvöten/Laki (1785), Tambora (1815), Cosigüina (1835), Krakatoa (1883), Agung (1964), Chichon (1982), Pinatubo (1991).

Ex. Pinatubo : $F \sim -3 \text{ W.m}^{-2}$ sur 1 an*.

- ▶ Effet *background* \pm important des **petites éruptions**.

Ex. Période 2008–2011 (incl. Eyjafjallajökull de 2010) : $F \sim -0.11 \text{ W.m}^{-2}$.

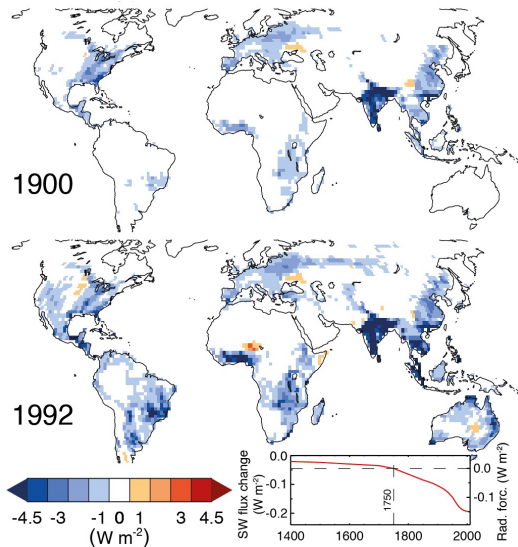
AOD globale 1750–2011 et AOD tropicale 1985–2013 (sur la verticale et intégrée)



* Source estimations et figures : IPCC AR5 (2013), Figs 8.12 & 8.13.

Forçage *land-use* (-)

- ▶ Principalement une augmentation de l'albédo (α) suite à la déforestation.



Forçage radiatif en 2011 par rapport au pré-industriel* :

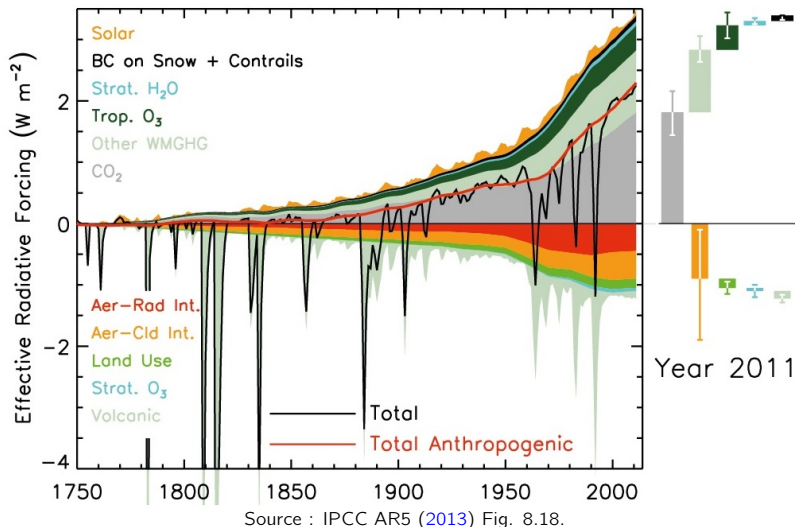
$$F = -0.15 [\pm 0.10] W.m^{-2},$$

Attention : la déforestation n'a pas qu'un effet refroidissant, cf. émissions de carbone associées !

* Estimations IPCC AR5 (2013).

← Adapté de l'ICC AR5 (2013) Fig. 8.9

Synthèse des forçages externes depuis 1750



Les activités humaines induisent un forçage positif : $F_{2011} \sim 2.3 \text{ W.m}^{-2}$.

Synthèse des forçages externes en 2011

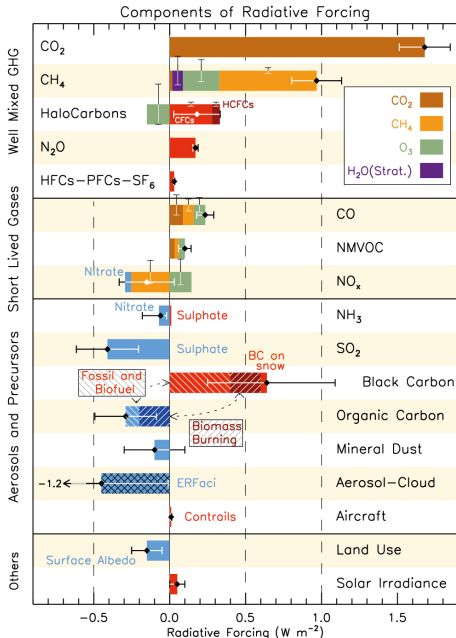
► On peut aussi s'amuser à classer par source...

► L'incertitude majeure sur les forçages concerne les aérosols anthropiques.

Source : IPCC AR5 (2013) Fig. 8.17.

— Aviation : $F \sim 0.1 \text{ W.m}^{-2}$ en 2018 (3.5 % du total).

Lee et al. (2021).



Rappel sur les rétroactions – cf. cours n°3

Principe

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

Les principales rétroactions radiatives 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_2 est brusquement doublée :

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

* Estimations tirées de Dufresne and Bony (2008).

Résumé

Les activités humaines induisent un **forçage** radiatif positif.

L'effet des **GES** est atténué par celui des **aérosols** anthropiques ; leur évolution temporelle est relativement colinéaire.

Certains forçages sont relativement **uniformes spatialement** (e.g. WMGHG), d'autres moins (e.g. O₃, aérosols), d'autres vraiment pas (e.g. BC sur neige).

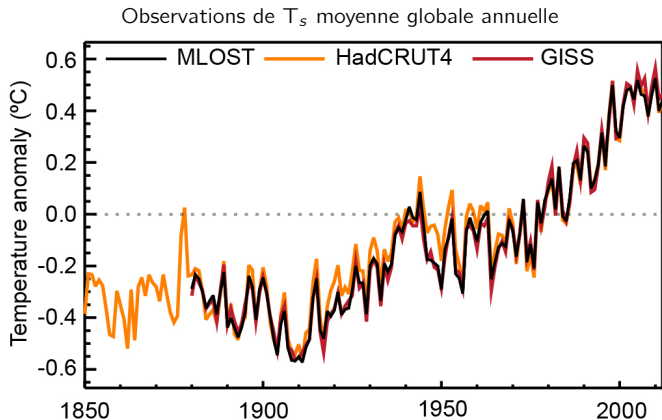
À l'échelle de temps considérée ici, les principales **rétroactions** radiatives sont positives : elles amplifient un forçage initial.

—

Et donc... ?

Réchauffement global

- ▶ Le système s'échauffe en réponse aux **forçages externes** & **rétroactions**.
- ▶ Ce **réchauffement** est observé et se superpose à la **variabilité interne**.



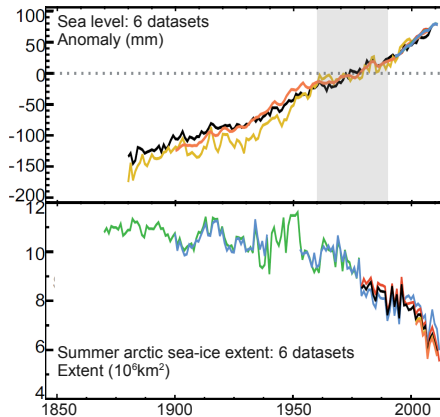
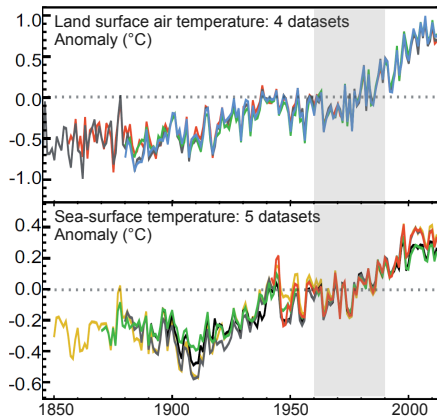
Source : IPCC AR5 (2013) Fig. 2.20.

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

* Estimation IPCC AR5 (2013).

Multiples indicateurs du réchauffement global

- Le réchauffement est observé dans toutes les **composantes du système**.
 - Réchauffement de surface cont. & océ. : 0.08 (0.15) K/dec sur 1901–2012 (1979–2012).
 - Élévation du **niveau marin** : 1.7 (3.2) mm/yr sur 1901–2010 (2003–2010).
 - Fonte de la **cryosphère** (glace de mer, calottes, glaciers, neige cont.) *etc.*



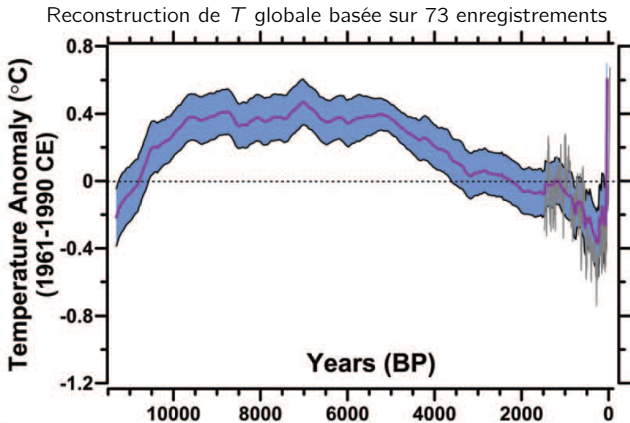
Adapté de l'IPCC AR5 (2013) FAQ 2.1 Fig. 1.

Réchauffement actuel vs. paléo

- ▶ Le réchauffement de ~ 0.8 K depuis le pré-industriel compense le refroidissement orbital observé depuis le **moyen Holocène**.

La période 1983–2012 est la période de 30 ans la + chaude depuis (au moins) 1400 ans.

- ▶ Les modèles ne simulent pas d'**entrée en glaciation** durant les prochains 50 ka si la $[\text{CO}_2] > 300$ ppm, ou les émissions > 1000 GtC.



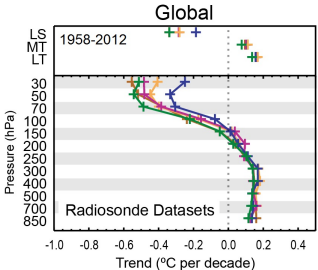
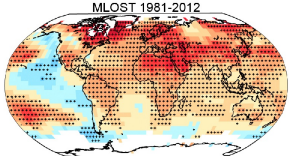
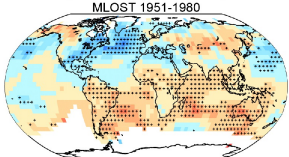
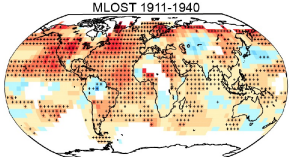
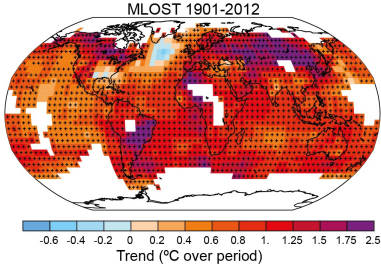
Source : Marcott et al. (2013).

Global ne signifie ni constant ni uniforme

Structures :

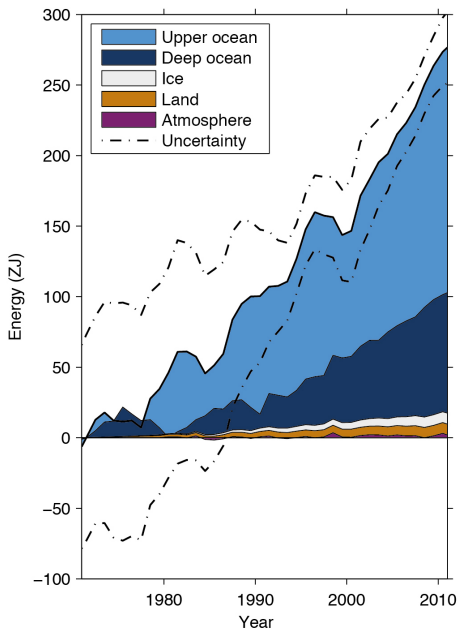
- horizontale
(continents/océans),
- verticale
(tropo/strato),
- temporelle.

On y reviendra...



Source : IPCC AR5 (2013) Figs. 2.21, 2.22 et 2.26.

Déséquilibre énergétique



La réponse transitoire en ΔT_s ne compense pas le forçage F .

Entre 1971 et 2010, on* estime que le système a accumulé $275 \pm 75 \text{ ZJ}^{**}$, répartis comme suit :

- Océans : 93%
- Cryosphère : 3%
- Continents : 3%
- Atmosphère : 1%

Cela correspond à un déséquilibre radiatif de $\Delta R = 0.42 \pm 0.11 \text{ W.m}^{-2}$.

* Estimations IPCC AR5 (2013).

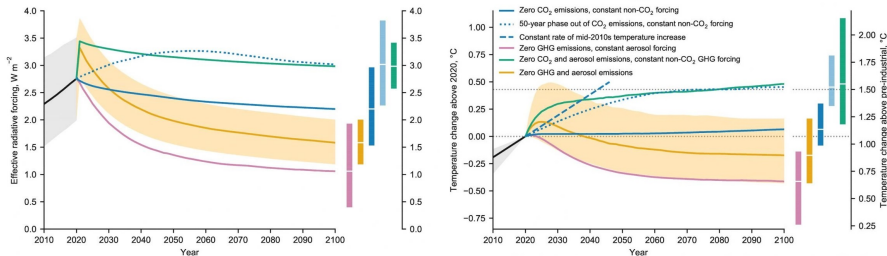
** 1 ZJ = $10^{21} \text{ J} \sim 10^8$ Hiroshima.

← Source : IPCC AR5 (2013) Box 3.1 Fig. 1.

Notion de *committed warming*

- ▶ Le déséquilibre énergétique actuel *engage* à un réchauffement supplémentaire de ~ 0.5 K en cas de **stabilisation des [C]** (F constant).
→ Grosso modo $\Delta R_{actuel}/|\lambda|$ (inertie des océans).
- ▶ En cas d'**arrêt total des émissions**, la T ne revient pas à son niveau pré-industriel (ΔT estimé à 0.9 K à l'équilibre).
→ Nouvel équilibre atteint avec [C] de GES + élevées.

Estimations de F et T pour différents scénarios d'arrêts d'émissions



Source : IPCC SR1.5 (2018) Fig. 1.5.

Tout ceci n'est pas nouveau

By fuel combustion man has added about 150.000 million tons of carbon dioxide to the air during the past half century.

[...] the increase in mean temperature, due to the artificial production of carbon dioxide, is estimated to be at the rate of 0.003°C per year at the present time.



G. Callendar
(1898-1964)

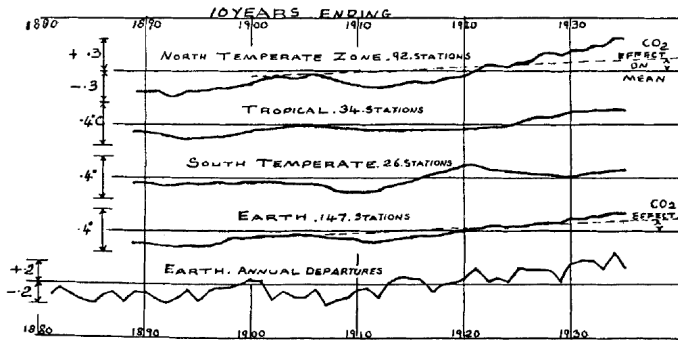
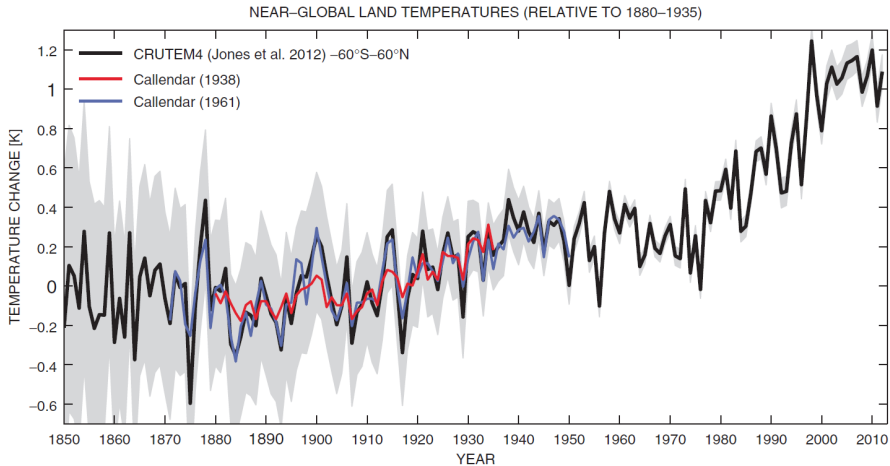


FIG. 4.—Temperature variations of the zones and of the earth. Ten-year moving departures from the mean, 1901-1930, $^{\circ}\text{C}$.

Extraits de [The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature](#) (QJRM, 1938).

Callendar, 75 ans après

- Callendar avait le bon ordre de grandeur des **tendances de T_s** ...
... et a eu un peu de chance avec la **variabilité interne**.



Source : Hawkins and Jones (2013).

Peut-on avoir confiance dans les tendances observées ?

- Les **mesures** sont sujettes à l'évolution des instruments, aux déplacements de stations, aux changements d'environnement, etc.

Exemple du thermomètre de la station Pau-Uzein.

- **1912 : Ecole Normale de Lescar**

- **2006 : Aéroport de Pau-Uzein**



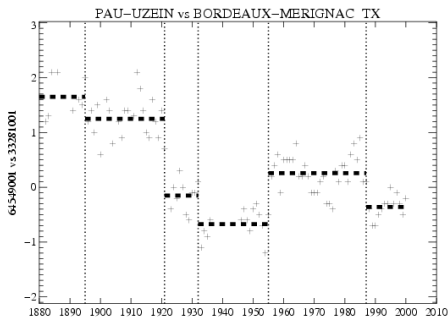
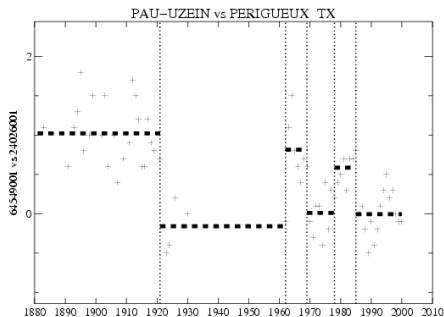
Source : Cours d'O. Mestre (Météo-France).

C'est la question de l'**homogénéisation de données**.

Homogénéisation de données – Méthode

- ▶ Détection statistique des ruptures par comparaison aux voisins.
 - Algorithme de programmation dynamique + vraisemblance pénalisée.
 - Documentation historique des stations.

Exemple pour la série de Pau-Uzein.



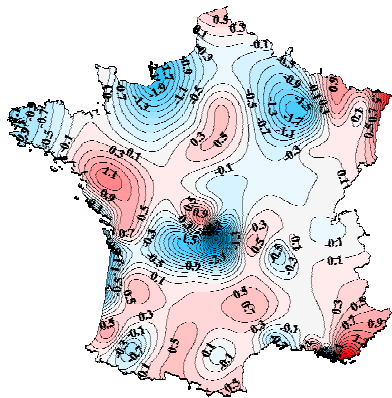
Source : Cours d'O. Mestre (Météo-France).

Homogénéisation de données – Exemple de résultat

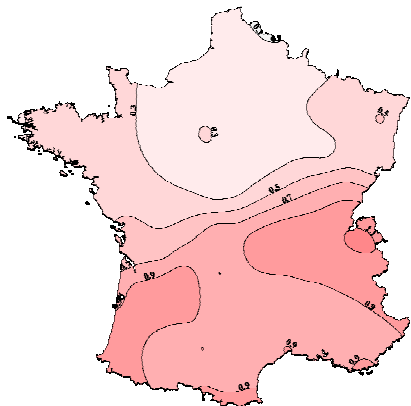
► Tendances 1901–2000 de T France avant / après homogénéisation.

Aucune hypothèse n'est faite *a priori* sur le signe !

■ « AVANT »



■ « APRES »



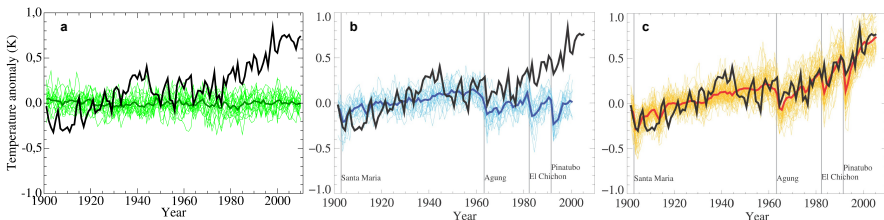
Source : Cours d'O. Mestre (Météo-France).

Peut-on détecter l'empreinte anthropique *a posteriori* ?

C'est la question de la **détection** et de l'**attribution** (du changement climatique).

Exemple de la T globale :

Le signal observé de T globale n'est pas expliqué par la **variabilité interne**, ni par le seul ajout des **causes naturelles** (solaire, volcans), mais le devient avec l'ajout des **causes anthropiques** (GES, aérosols) *.



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

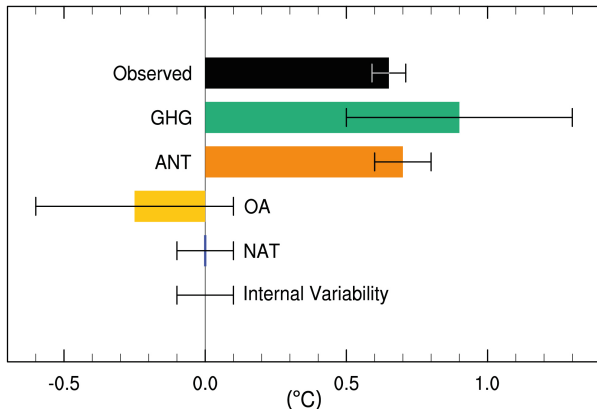
* La **variabilité interne** et les réponses aux forçages **naturels** et **anthropiques** sont estimées à partir de multiples simulations de modèles de climat, et la cohérence avec les observations est évaluée via des **tests d'hypothèse statistiques**.

D&A : résultat majeur

Tendance T_s observée sur 1951–2010 [0.6 à 0.7 °C en 60 a]

$$= \text{ANT} [0.6 \text{ à } 0.8] + \text{NAT} [-0.1 \text{ à } 0.1] + \varepsilon [-0.1 \text{ à } 0.1]$$

$$= \text{GHG} [0.5 \text{ à } 1.3]^* + \text{OA} [-0.6 \text{ à } 0.1]^* + \text{NAT} [-0.1 \text{ à } 0.1] + \varepsilon [-0.1 \text{ à } 0.1]$$



Source : IPCC AR5 (2013) Fig. 10.5.

* La séparation GHG vs. Other Ant. (aérosols) est incertaine en raison de leur colinéarité.

Résumé

Les activités humaines induisent un **forçage** radiatif positif. L'effet des GES est atténué par celui des aérosols anthropiques.

La réponse du système à ce forçage est amplifiée par la présence de **rétroactions** positives, et s'illustre par des **tendances** observées dans toutes ses composantes, qui se superposent à la **variabilité interne**.

Certaines tendances observées ne peuvent pas être expliquées par la **variabilité naturelle** seule, et sont donc *attribuées* au **forçage anthropique**.

La *détection* du **signal** anthropique dans le **bruit** de la variabilité naturelle est limitée par la qualité des observations disponibles, la performance des modèles de climat, et la difficulté de séparer les effets des GES et des aérosols.

Changement climatique observé

Projections futures et incertitudes

À quoi ressemble un climat plus chaud ?

Un mot sur les événements extrêmes

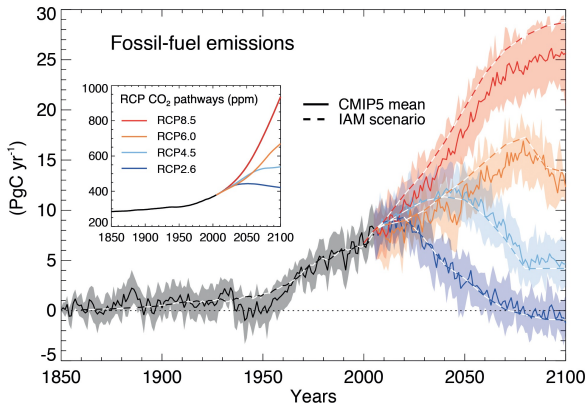
Quel climat pour le 21e siècle ?

1. L'évolution future du **climat** dépend de la **composition de l'atmosphère**.
À cette échelle, les forçages solaires et volcaniques sont mineurs (cours n°8).

2. La composition de l'atmosphère dépend des **activités humaines**.
Démographie, politique, technologie, etc.

→ Les projections climatiques reposent sur des **scénarii socio-économiques**.

Exemple des **Radiative Concentrations Pathways** & émissions compatibles



Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Figs. TS19.

Scénarii de forçage radiatif

► Dans le dernier exercice CMIP, scénarii nommés selon la **valeur du forçage** en 2100 :

RCP2.6 (valeurs en 2100)

+270 PgC, $\text{CO}_2 < 450$ ppm, $\text{CH}_4 \searrow$
(inclut géo-ingénierie, i.e. captage CO_2)

RCP4.5

+780 PgC, $\text{CO}_2 = 538$ ppm, $\text{CH}_4 \sim$

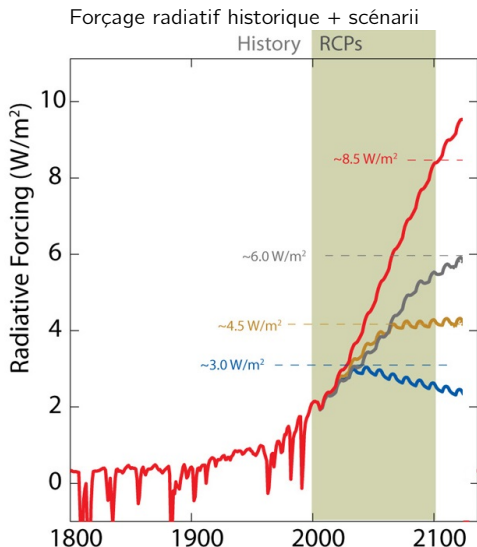
RCP6.0

+1060 PgC, $\text{CO}_2 = 670$ ppm, $\text{CH}_4 \sim$

RCP8.5

+1700 PgC, $\text{CO}_2 = 936$ ppm, $\text{CH}_4 \nearrow$

—
Plus de détails sur les concentrations de GES et aérosols dans les différents scénarii : [site de M. Meinshausen](#).

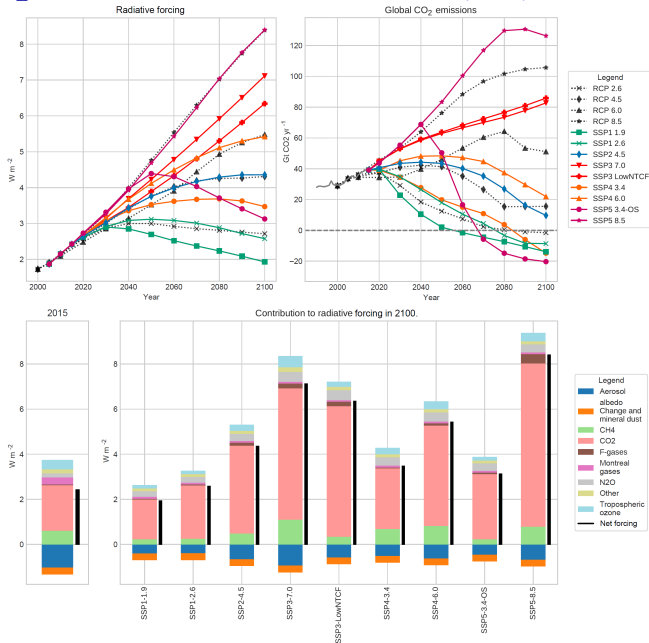


Source : Meinshausen et al. (2011)

Scénarii de forçage radiatif – Nouveautés IPCC AR6 (2020)

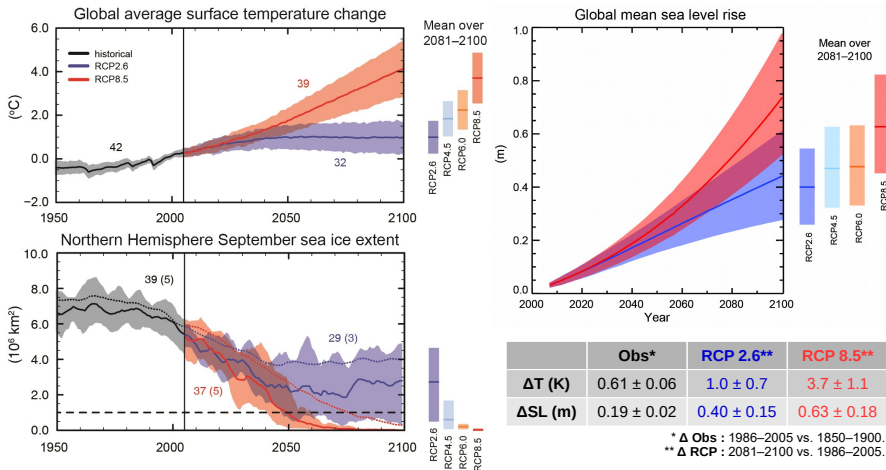
► Les projections CMIP6 utiliseront les **Shared Socioeconomic Pathways**.

Source : Gidden et al. (2019).



Et selon le scénario, un climat à la carte

- ▶ Le choix du scénario est l'**incertitude** majeure des projections climatiques.
- ▶ À scénario donné, incertitude due à **modélisation** + **variabilité interne**.

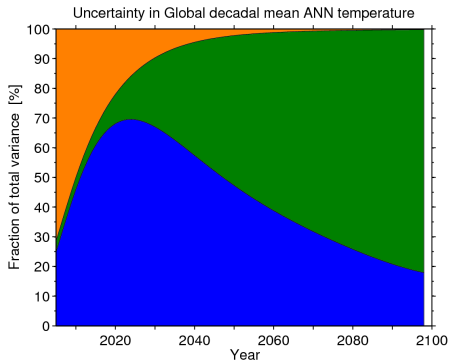
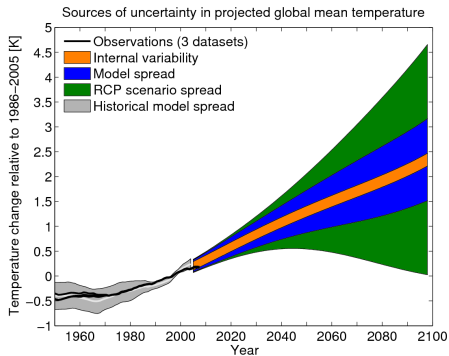


Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Figs. SPM7 & SPM9 et Table TS1.

Poids des différentes incertitudes – 1/3 : l'échéance

Pour les projections de température globale :

- à courte échéance, l'incertitude de **variabilité interne** domine.
- à moyenne échéance, l'incertitude de **modélisation** domine.
- à longue échéance, l'incertitude du **scénario socio-économique** domine.



Figures de [E. Hawkins](#), à retrouver sur son [blog](#).

À plus long terme

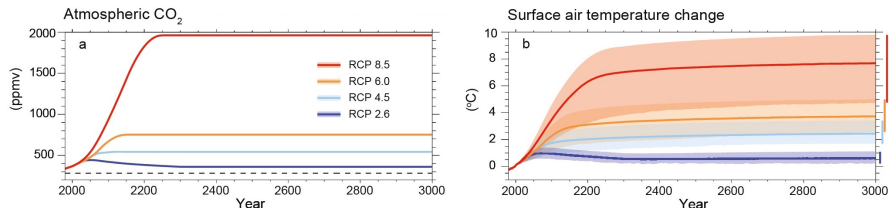
- ▶ Il ne suffit pas de stabiliser les émissions de GES pour stabiliser leurs [C].

Seulement la moitié des émissions actuelles de C est absorbée par les puits océanique et continental, et l'efficacité de ces puits diminue avec la [CO₂] atmosphérique (rétroaction climat-carbone à 100 a – 1 ka).

- ▶ Même après stabilisation des concentrations, le réchauffement se poursuit.

Lente inertie du système due notamment au contenu de chaleur des océans profonds.

+ Fonte des calottes glaciaires sur plusieurs ka (potentiellement totale pour Groenland).



Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Fig. 12.43.

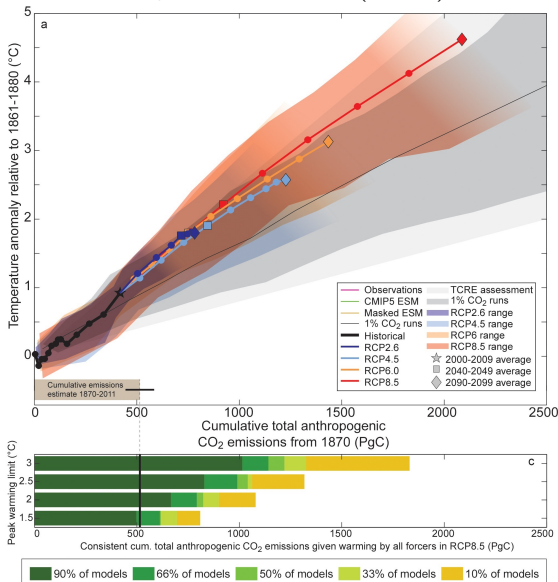
Conséquence : même si l'on rétablissait les concentrations de GES à leurs niveaux pré-industriels, on ne reviendrait pas immédiatement au climat pré-industriel, cf. *The recalcitrant component of global warming*, sur le blog d'I. Held (GFDL).

Changement climatique anthropique – Vision politique 1/2

ΔT_s vs. émissions de C (en GtC)

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

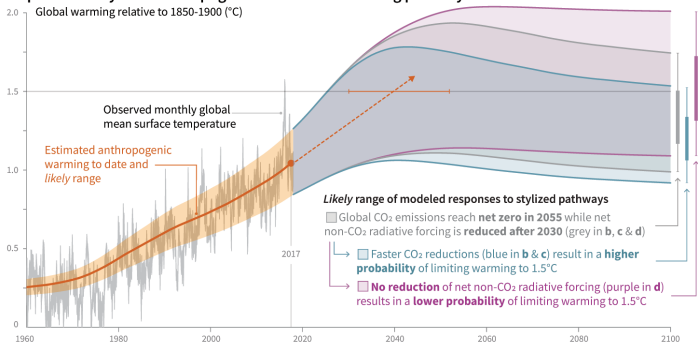
À l'issue de la **COP21** (2015), l'**Accord de Paris** a ciblé 1.5 K.



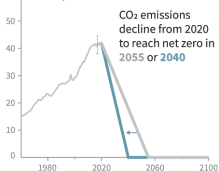
Source : IPCC AR5 (2013) Fig. TS. TFE.8.1.

Changement climatique anthropique – Vision politique 2/2

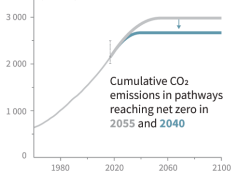
a) Observed global temperature change and modeled responses to stylized anthropogenic emission and forcing pathways



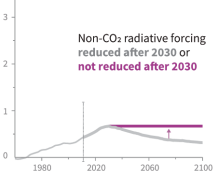
b) Stylized net global CO₂ emission pathways (GtCO₂/yr)



c) Cumulative net CO₂ emissions (GtCO₂)



d) Non-CO₂ radiative forcing pathways (W/m²)



Source : IPCC SR1.5 (2018) Fig. SPM1.

Résumé

À l'échelle globale, l'incertitude majeure des projections climatiques pour 2100 est le [scénario socio-économique](#).

Même dans un scénario haut, la [variabilité interne](#) est capable de masquer ponctuellement le réchauffement.

Pour les climatologues, reste encore beaucoup à faire et à préciser pour réduire l'[incertitude de modélisation](#) :

- sensibilité climatique* & réponse des nuages,
- niveau de la mer & fonte des calottes glaciaires,
- changements aux échelles régionales et/ou des événements extrêmes (cf. suite),
- ... etc.

—

* La fourchette 1.5–4.5°C de l'IPCC AR5 (2013) était déjà l'estimation donnée par le rapport Charney (1979, [disponible ici](#)).