

Système Climatique M2 SOAC UPS 5/5

# Changement climatique 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](mailto:julien.cattiaux@meteo.fr)

2021-22

# 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.



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

+ **rapports spéciaux** intermédiaires, e.g. SROCC (2019), SR15 (2018), SREX (2012) etc.

---

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

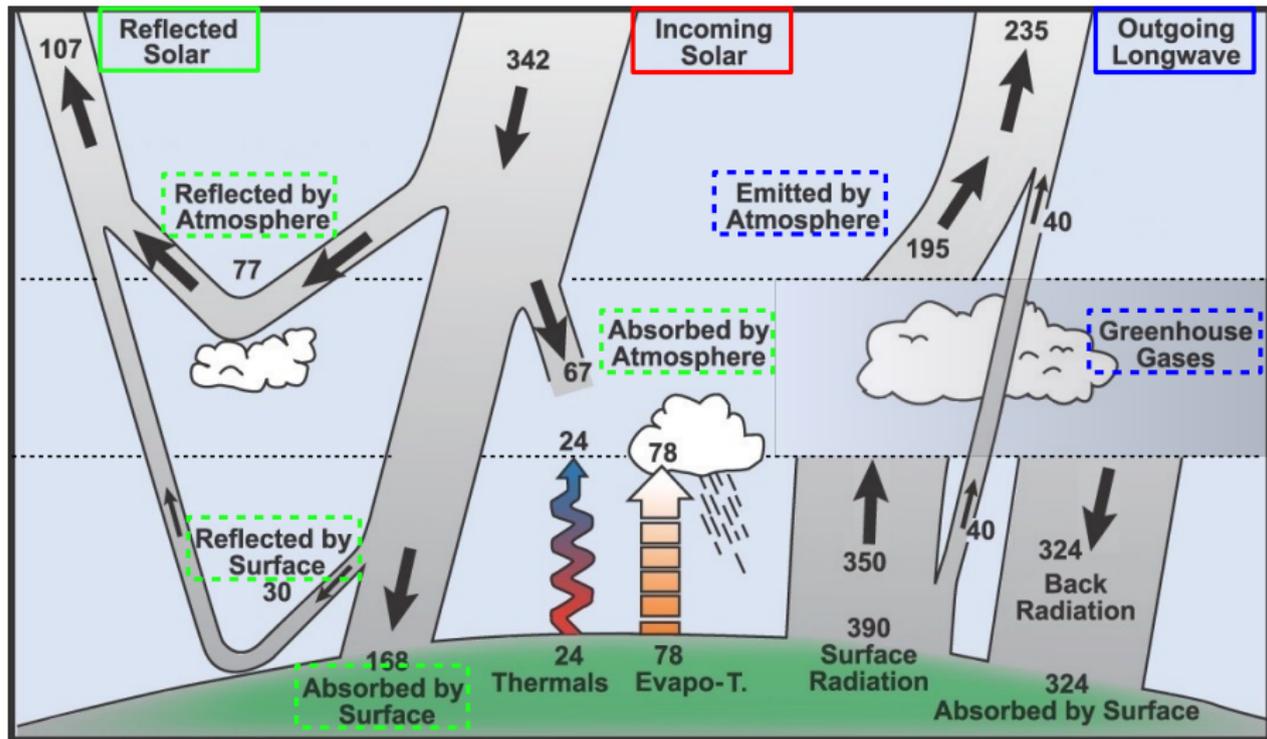
À quoi ressemble un climat plus chaud ?

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**.

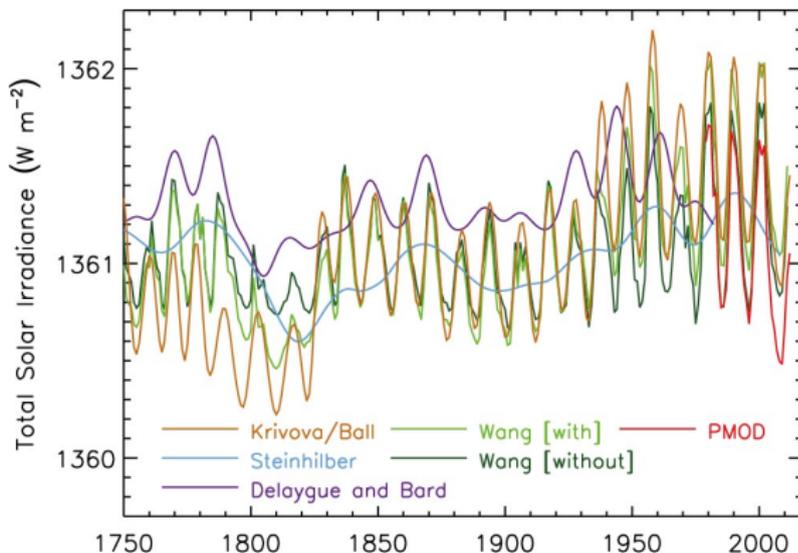


Adapté de l'IPCC AR4 (2007) FAQ 1.1 Fig. 1. Flux en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

## Forçage solaire (+)

- Variations de l'**activité solaire**, cycles à  $\sim 11$  ans + basse fréquence.
- Entre min et max d'un cycle :  $\Delta S_0 \sim \pm 0.5 \text{ W.m}^{-2} \implies F \sim \pm 0.1 \text{ W.m}^{-2}$ .
- Entre 1750 et 2019 :  $F = 0.01 [-0.12 \text{ à } +0.15] \text{ W.m}^{-2}$ . Estimation IPCC AR6 (2021).

Irradiance solaire reconstruite depuis 1750



Source : 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 : CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O.
- 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 CO<sub>2</sub> sont les activités **volcanique** + **anthropiques** (combustion C fossile + *land-use*).

Entre 1750 et 2019, on\* estime :

- émissions **anthropiques** = 655 [±65] GtC\*\* (taux 2010–2019  $\sim 10.9$  GtC/an) ;
- émissions **volcaniques** = 20 [±10] GtC (taux moyen  $\sim 0.08$  GtC/an).

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

\* IPCC AR6 (2021) 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 GtCO<sub>2</sub>/an (i.e.  $\sim 6.8 \cdot 10^{12}$  mol/an).

\*\* 1 GtC = 1 PgC = 10<sup>15</sup> g de carbone  $\Leftrightarrow$  3.664 GtCO<sub>2</sub>.

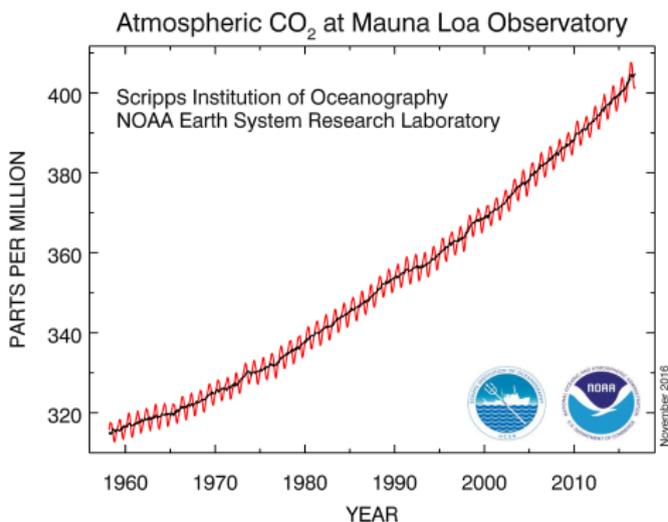
# Forçage GES (+) – Concentrations

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

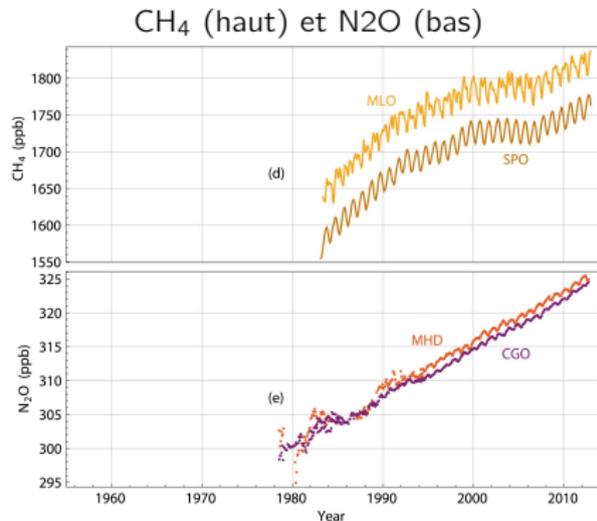
CO<sub>2</sub> : de 278 à 410 ppm. CH<sub>4</sub> : de 715 à 1866 ppb. N<sub>2</sub>O : de 270 à 332 ppb.

Estimations IPCC AR6 (2021) et WMO entre 1750 et 2019.

## Évolution observée des concentrations de GES



Source : Mesures à [Mauna Loa](#).



Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Fig. 6.3.

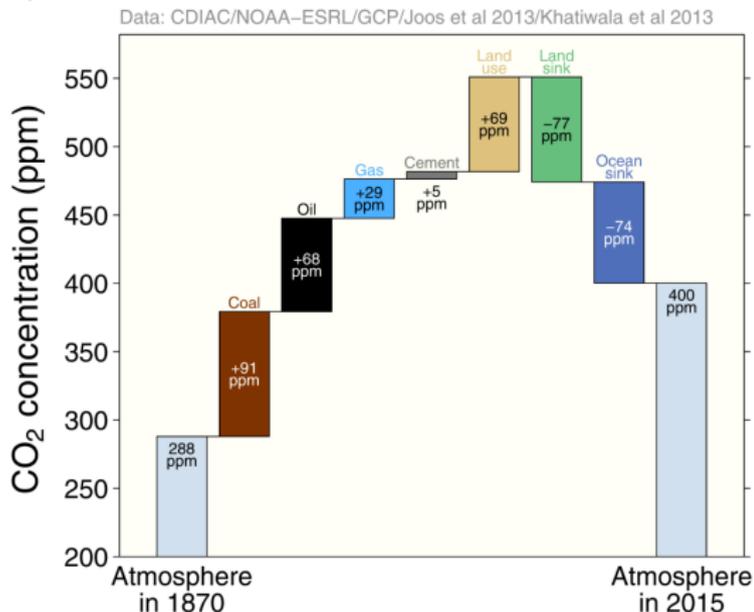
À voir aussi : [vidéo](#) de la NOAA sur l'évolution de [CO<sub>2</sub>].

## Forçage GES (+) – Concentrations vs. émissions

- Sur les 655 GtC émises entre 1750 et 2019, ~ 370 GtC ont été absorbées (puits océ. et continental), et 285 GtC restent dans l'atmosphère (45 %).  
Estimations IPCC AR5 (2013) + AR6 (2021).

Détail des contributions des sources et puits de C à l'élévation de la [CO<sub>2</sub>] depuis 1870.

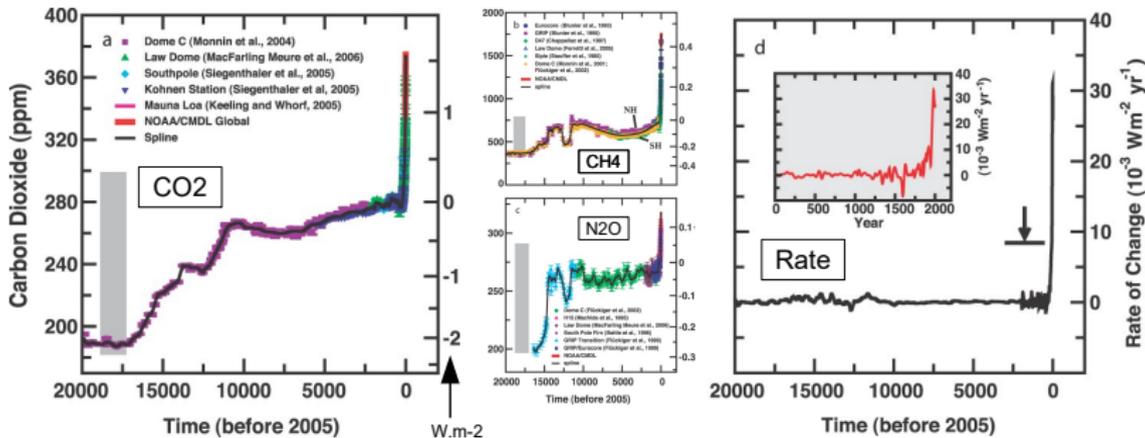
Source : [Global Carbon Project](#).



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] (gauche) &  $\partial_t[C]$  (droite) sans précédent dans les carottages glaciaires ( $\sim 1$  Ma).
- Il faut remonter au Pliocène (3.3–3.0 Ma) pour retrouver un  $\text{CO}_2$  à  $\sim 400$  ppm



Adapté de l'IPCC AR4 (2007) Fig. 6.4.

- Forçages radiatifs en 2019 par rapport à 1750 :

$$F_{\text{CO}_2} = 2.16 \text{ W.m}^{-2} \sim 5.4 \ln(410/280)$$

$$F_{\text{CH}_4} = 0.54 \text{ W.m}^{-2} \sim 0.036(\sqrt{1866} - \sqrt{715})$$

$$F_{\text{N}_2\text{O}} = 0.21 \text{ W.m}^{-2} \sim 0.11(\sqrt{332} - \sqrt{270})$$

$$F_{\text{Halo}} = 0.41 \text{ W.m}^{-2}$$

$$\longrightarrow \text{Total : } F_{\text{WMGHG}} = 3.3 [\pm 0.3] \text{ W.m}^{-2}$$

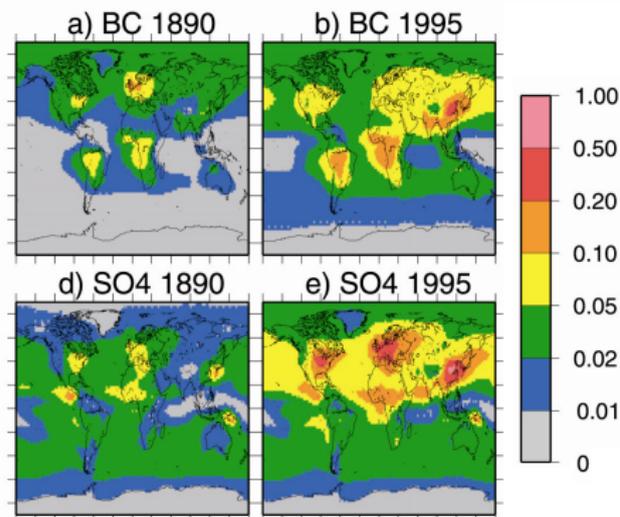
$$+ F_{\text{O}_3} = 0.5 [\pm 0.2] \text{ W.m}^{-2}$$

Estimations IPCC AR6 (2021) et CDIAC.

# 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 ( $\text{SO}_4$ ) & carbone-suies (BC).
- Effets radiatifs direct (absorption / diffusion) & indirects (nuages).



► Forçage radiatif en 2019 par rapport à 1750 estimé\* à :

$$F = -1.1 [-1.7 \text{ à } -0.4] \text{ W.m}^{-2},$$

1/4 effet direct vs. 3/4 indirects, et récemment en diminution ( $F_{2014} = -1.3$ ).

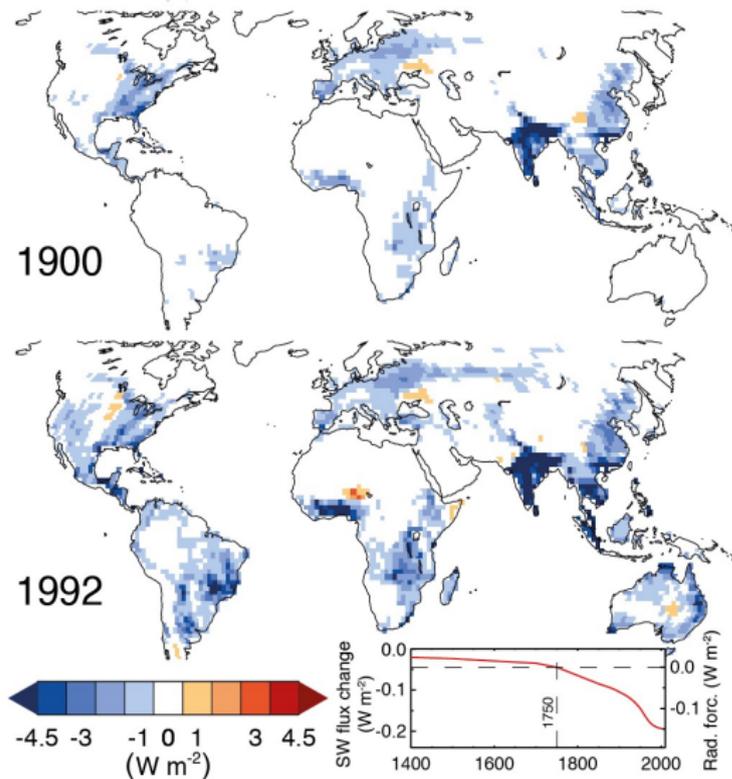
► Évolution anthropique de long terme + pics ponctuels éruptions volcaniques (e.g. Pinatubo 1991  $\sim -3 \text{ W.m}^{-2}$  sur 1 an).

\* IPCC AR6 (2021).

← Épaisseurs optiques BC ( $\times 10$ ) &  $\text{SO}_4$ .  
Source : Koch et al. (2009).

## Forçage *land-use* (-)

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



Forçage radiatif en 2019 par rapport à 1750\* estimé à :

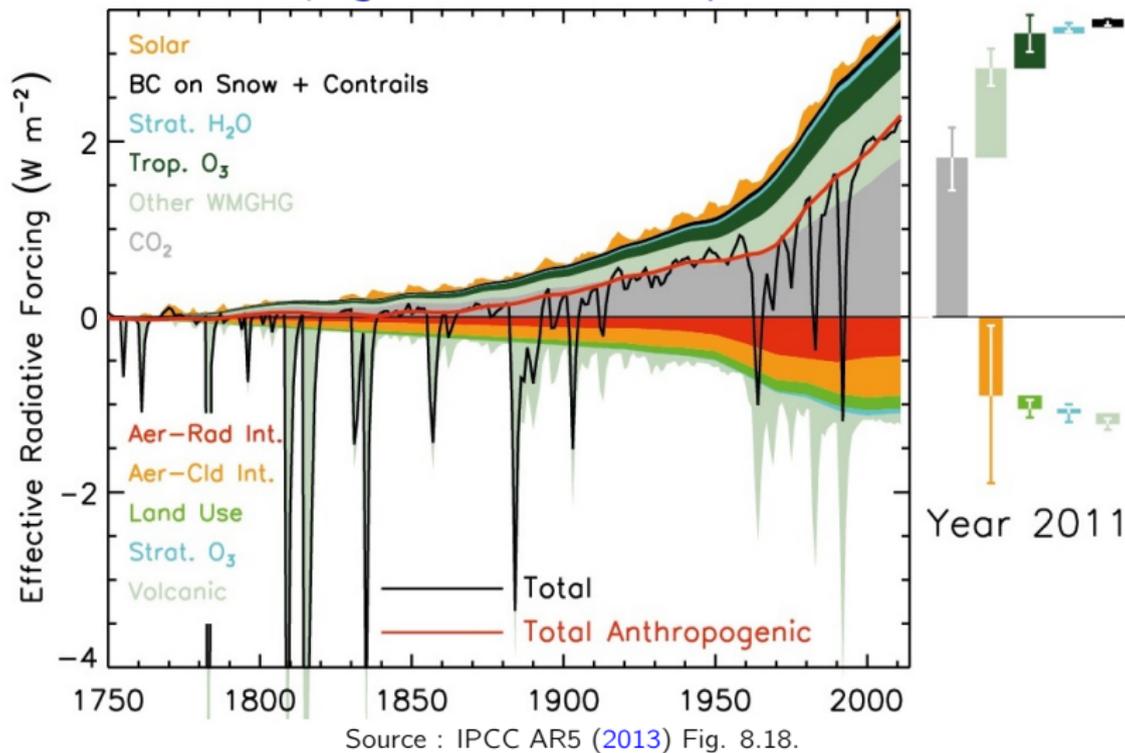
$$F = -0.2 [\pm 0.1] \text{ W.m}^{-2},$$

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

\* IPCC AR6 (2021).

← Adapté de l'ICC AR5 (2013) Fig. 8.9

# Synthèse des forçages externes depuis 1750



Les activités humaines induisent un forçage positif :  $F_{2019} \sim 2.7 [\pm 0.7] W.m^{-2}$ .

Estimation IPCC AR6 (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<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).

# Résumé

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

L'effet des **GES** est atténué par celui des **aérosols** anthropiques ; leur évolution temporelle a été relativement colinéaire (cela devient moins vrai).

Certains forçages sont relativement **uniformes spatialement** (e.g. WMGHG), d'autres moins (e.g. O<sub>3</sub>, aérosols), d'autres vraiment pas (e.g. BC sur neige).

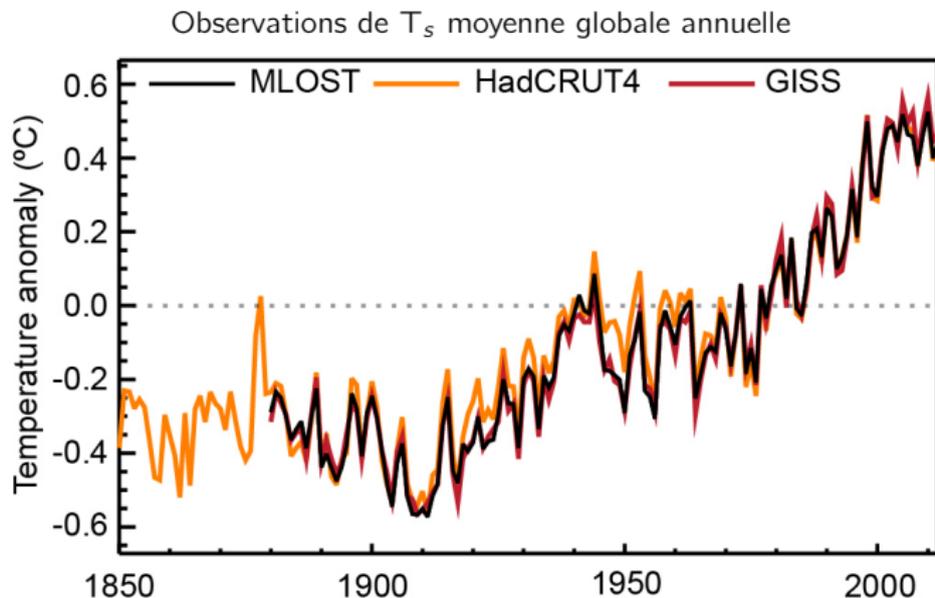
À l'échelle de temps considérée ici, les principales **rétroactions** radiatives sont positives : elles amplifient un forçage initial.

—

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**.



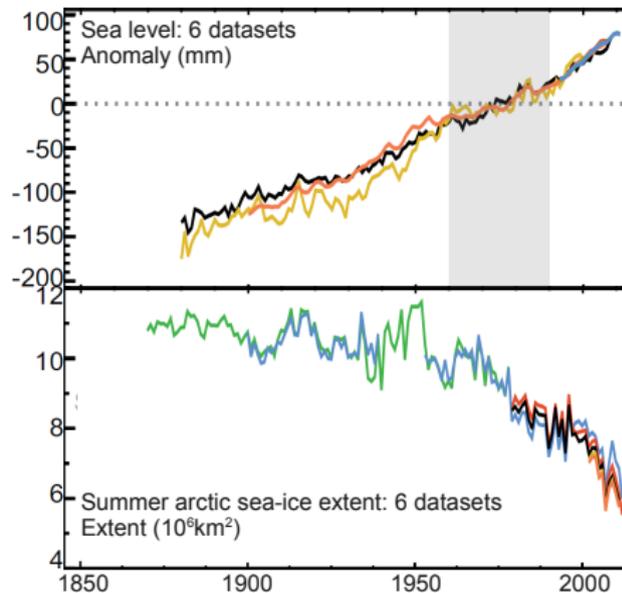
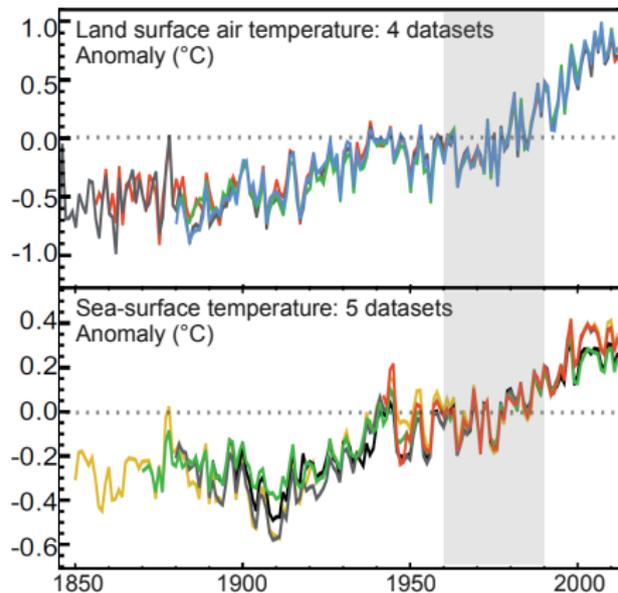
Source : IPCC AR5 (2013) Fig. 2.20.

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

\* Estimation IPCC AR6 (2021).

# Multiples indicateurs du réchauffement global

- Le réchauffement est observé dans toutes les **composantes du système**.
  - **Réchauffement** sur continents (1.59) & océans (0.88 K entre 1850–1900 et 2011–2020).
  - Élévation du **niveau marin** : 0.2 m sur 1901–2020, taux  $\sim 3$  mm/yr depuis 2000.
  - Fonte de la **cryosphère** (glace de mer, calottes, glaciers, neige cont.) *etc.*



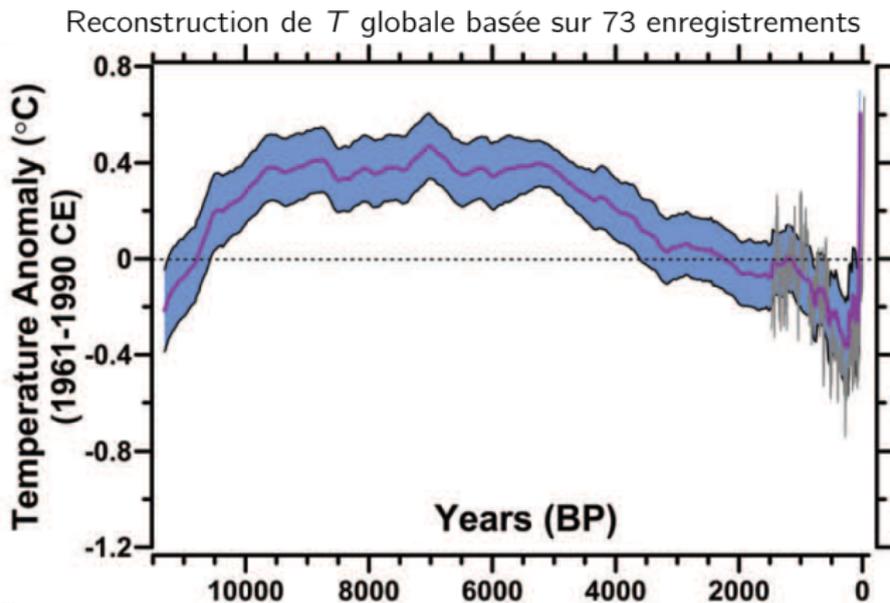
Adapté de l'IPCC AR5 (2013) FAQ 2.1 Fig. 1.

## Réchauffement actuel vs. cycles g-ig

► Le réchauffement de  $\sim 1$  K depuis le pré-industriel compense le refroidissement orbital observé depuis le **moyen Holocène**.

La période actuelle est la + chaude depuis (au moins) 125 ka (LIG).

► 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.



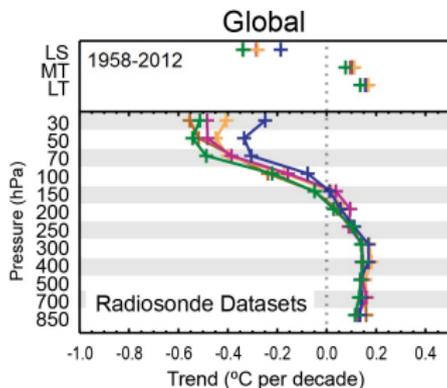
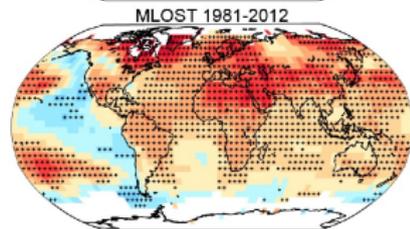
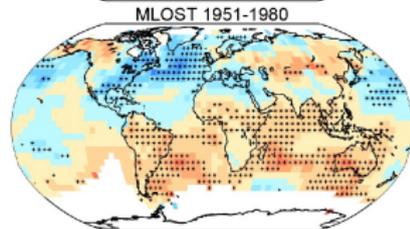
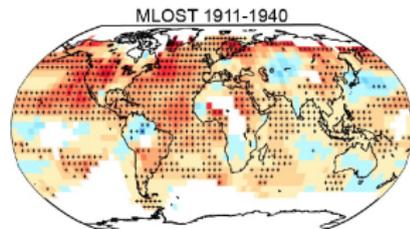
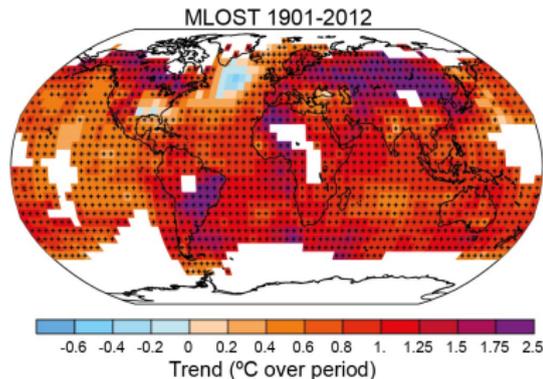
Source : Marcott et al. (2013).

# Global ne signifie ni constant ni uniforme

Structures :

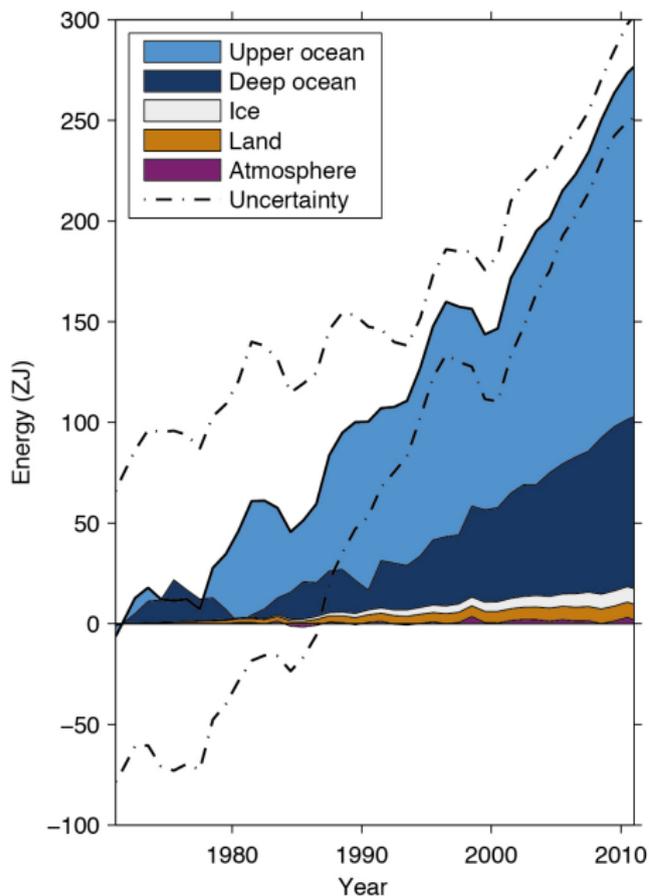
- horizontale  
(continents/océans),
- verticale  
(tropo/strato),
- temporelle.

On y reviendra...



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

# Déséquilibre énergétique



La réponse transitoire en  $\Delta T_s$  ne compense pas le forçage  $F$ .

Entre 1971 et 2018, on\* estime que le système a accumulé  $435 \pm 75 \text{ ZJ}^{**}$ , répartis comme suit :

- Océans : 91%
- Continents : 5%
- Cryosphère : 3%
- Atmosphère : 1%

Cela correspond à un déséquilibre radiatif de  $\Delta R = 0.57 \pm 0.15 \text{ W.m}^{-2}$ .

\* Estimations IPCC AR6 (2021).

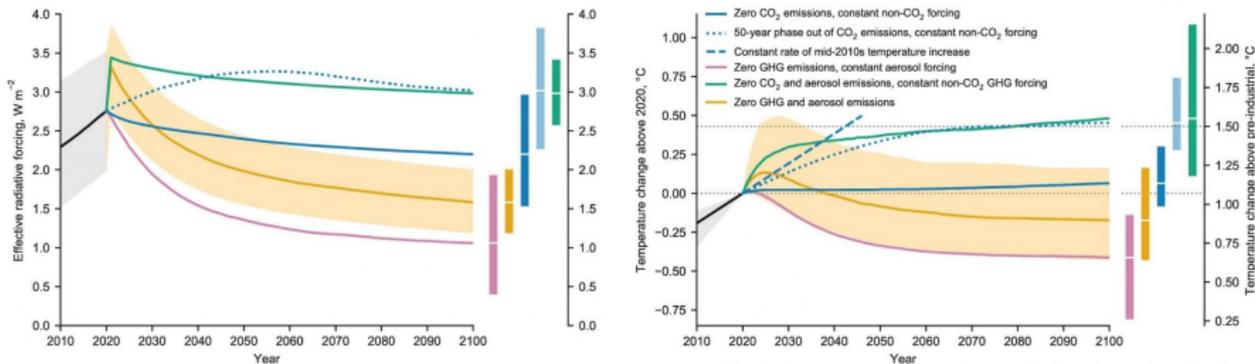
\*\* 1 ZJ =  $10^{21}$  J.

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

# Notion de *committed warming*

- ▶ Le déséquilibre énergétique actuel *engage* à un réchauffement supplémentaire de  $\sim 0.5$  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 ( $\Delta T$  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  $0.003^{\circ}\text{C}$  per year at the present time.



G. Callendar  
(1898-1964)

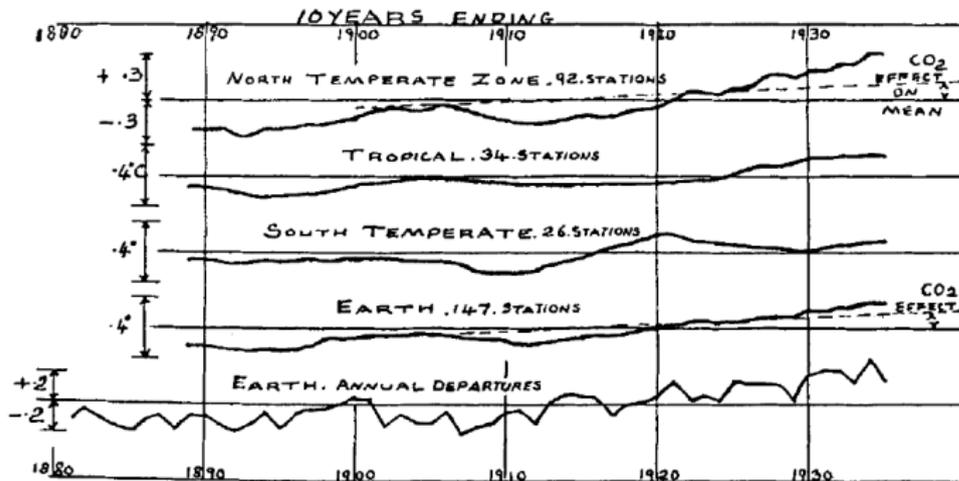
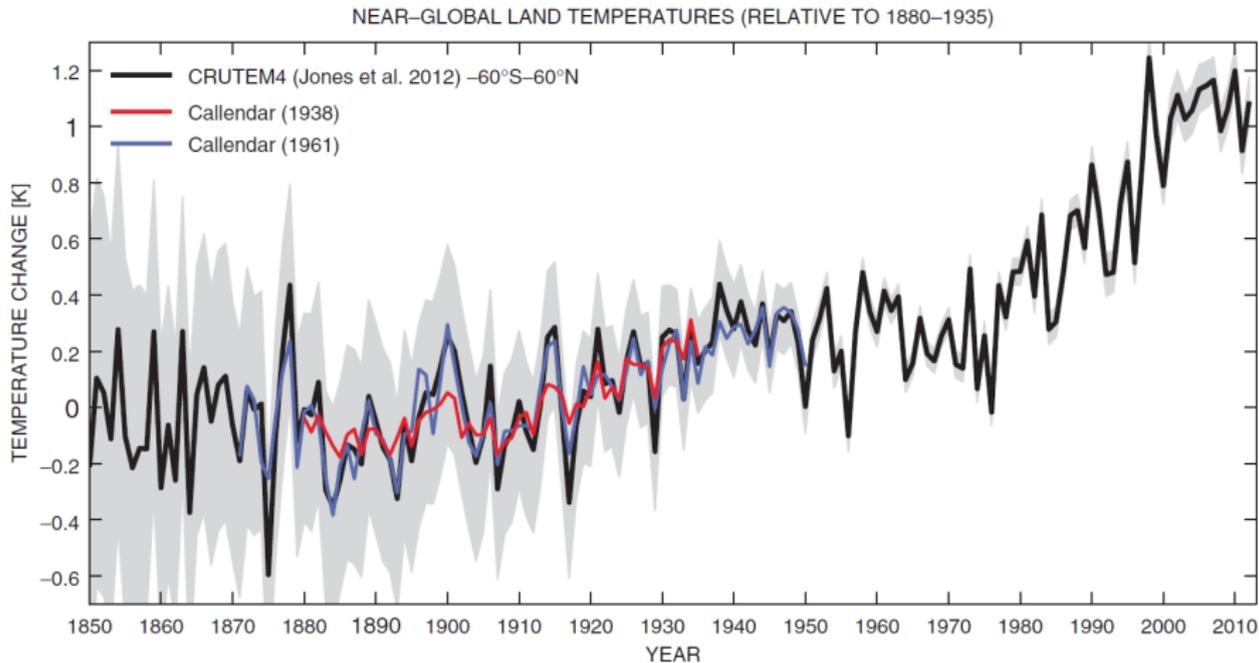


FIG. 4.—Temperature variations of the zones and of the earth. Ten-year moving departures from the mean, 1901-1930,  $^{\circ}\text{C}$ .

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**



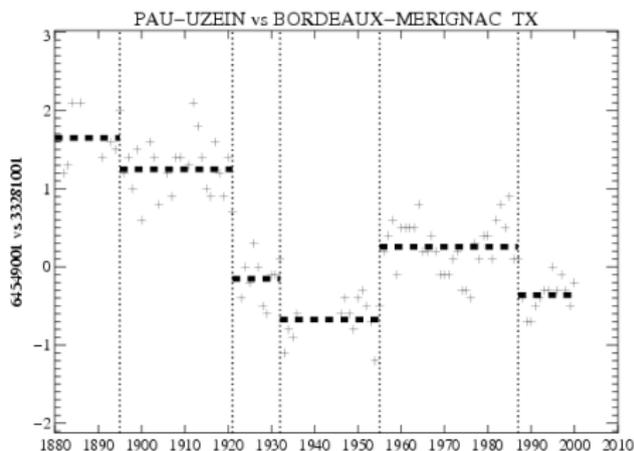
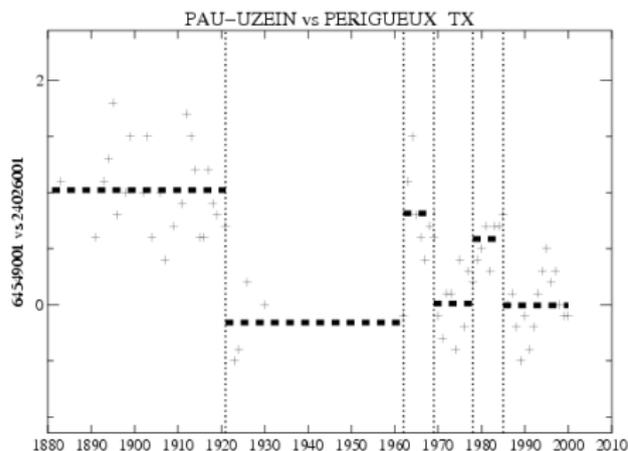
Source : Cours d'O. Mestre (Météo-France).

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.



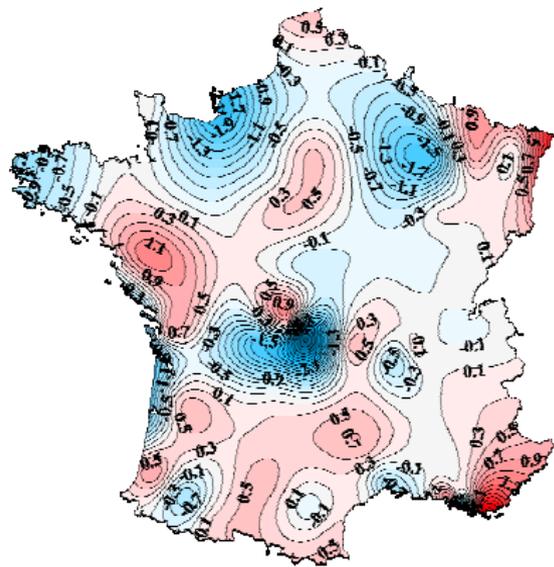
Source : Cours d'O. Mestre (Météo-France).

# Homogénéisation de données – Exemple de résultat

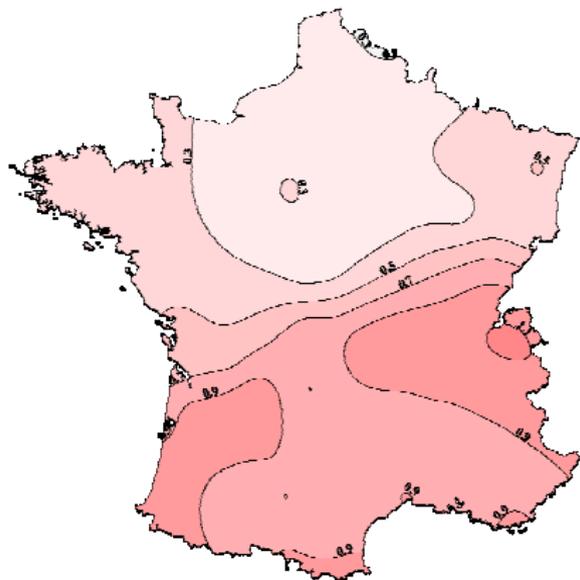
► Tendances 1901–2000 de  $T$  France avant / après homogénéisation.

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

■ « AVANT »



■ « APRES »



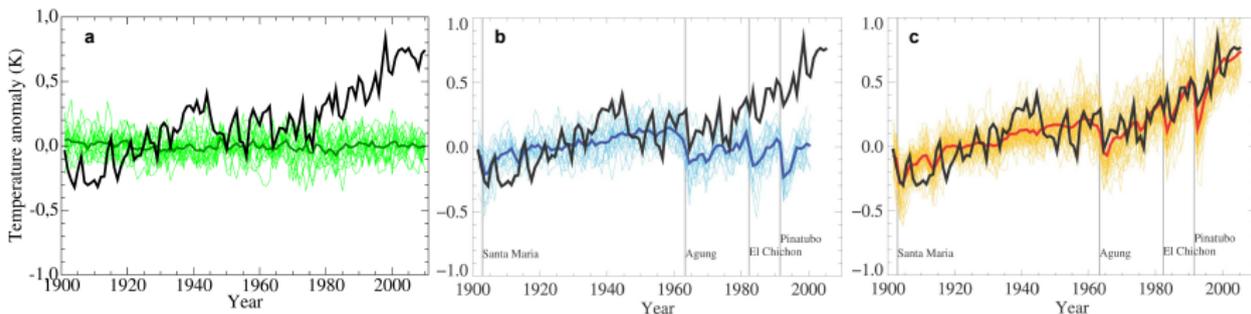
Source : Cours d'O. Mestre (Météo-France).

# 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.

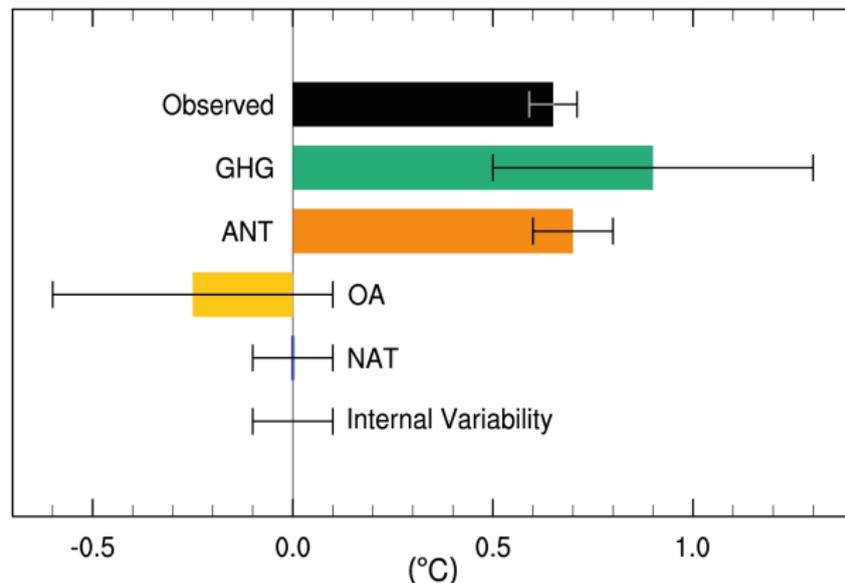
\* La **variabilité interne** et les réponses aux forçages **naturels** et **anthropiques** sont estimées à partir de multiples simulations de modèles de climat, et la cohérence avec les observations est évaluée via des **tests d'hypothèse statistiques**, cf. Hasselmann (1979, 1997).

# D&A : résultat majeur

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

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

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



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

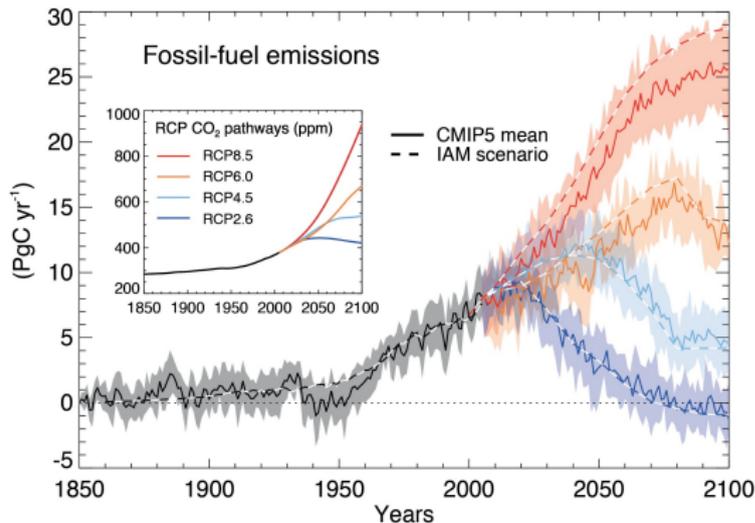
# Quel climat pour le 21e siècle ?

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

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

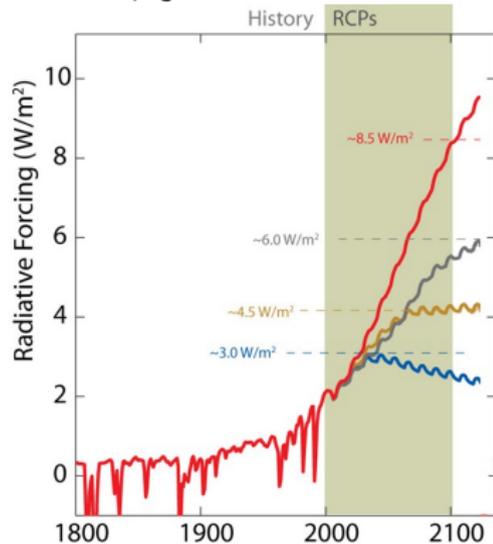
Ex. RCPs CMIP5 : **2.6**:  $\text{CO}_2 < 450 \text{ ppm}$  (+270 PgC), **4.5**, 6.0 et **8.5**:  $\text{CO}_2 > 900 \text{ ppm}$  (+1700 PgC).

## Radiative [C] Pathways & émissions compatibles



Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Figs. TS19.  
Les RCPs démarrent en 2006. Il y en a 4.

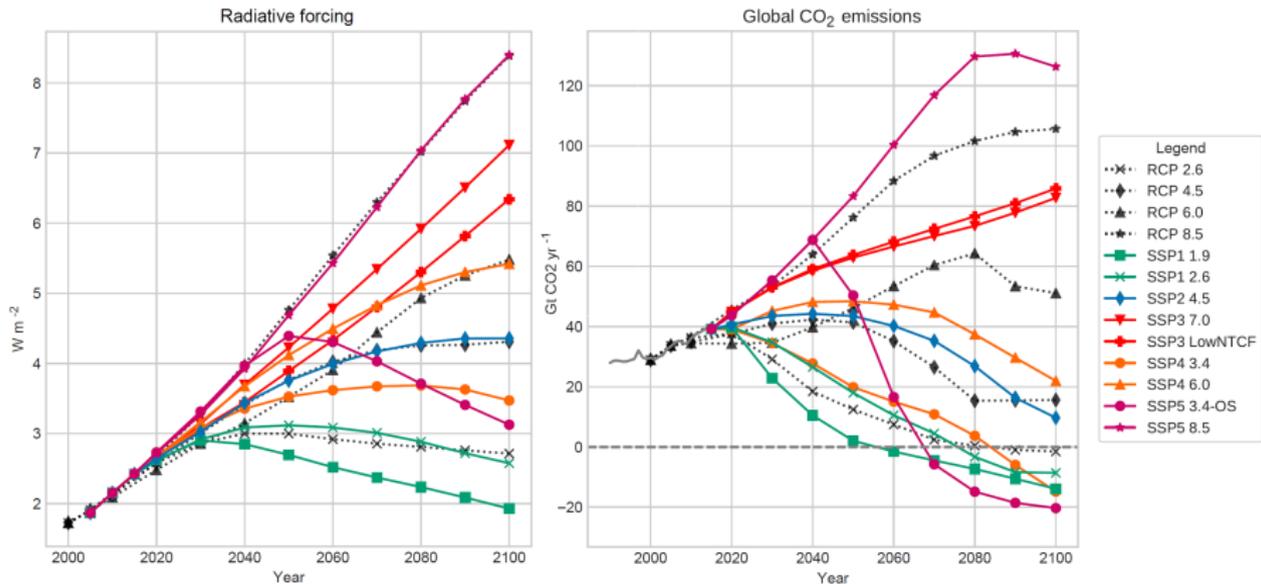
## Forçage radiatif résultant



Source : Meinhausen et al. (2011).

# Quel climat pour le 21e siècle ? – Nouveautés IPCC AR6

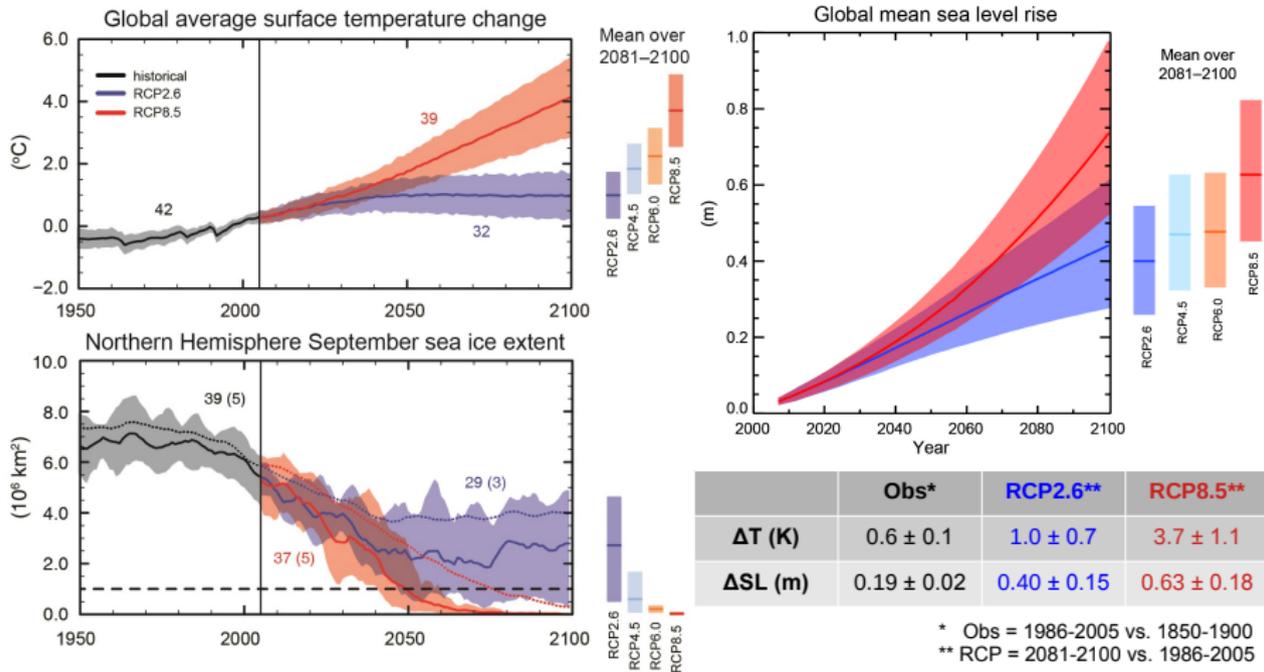
- ▶ Les projections CMIP6 utilisent les **Shared Socioeconomic Pathways**.
  - Les SSPs démarrent en 2015. Il y en a 9.
  - Il y a certaines similarités avec les RCPs, e.g. **RCP2.6 ~ SSP1-2.6**, **RCP8.5 ~ SSP5-8.5**.



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**.

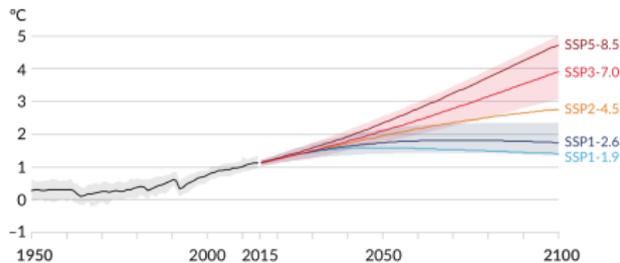


Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Figs. SPM7 & SPM9 et Table TS1.

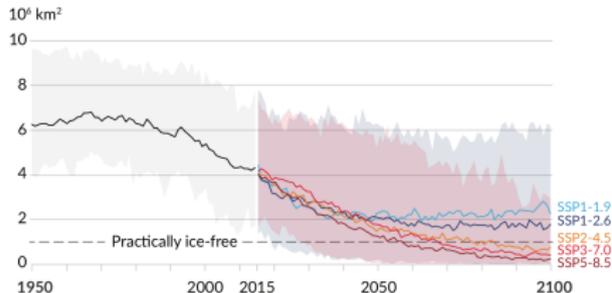
# Et selon le scénario, un climat à la carte – Update AR6

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

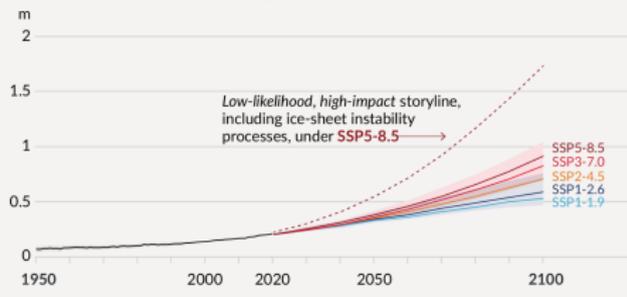
(a) Global surface temperature change relative to 1850–1900



(b) September Arctic sea ice area



(d) Global mean sea level change relative to 1900



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

\* Obs = 1995–2014 vs. 1850–1900

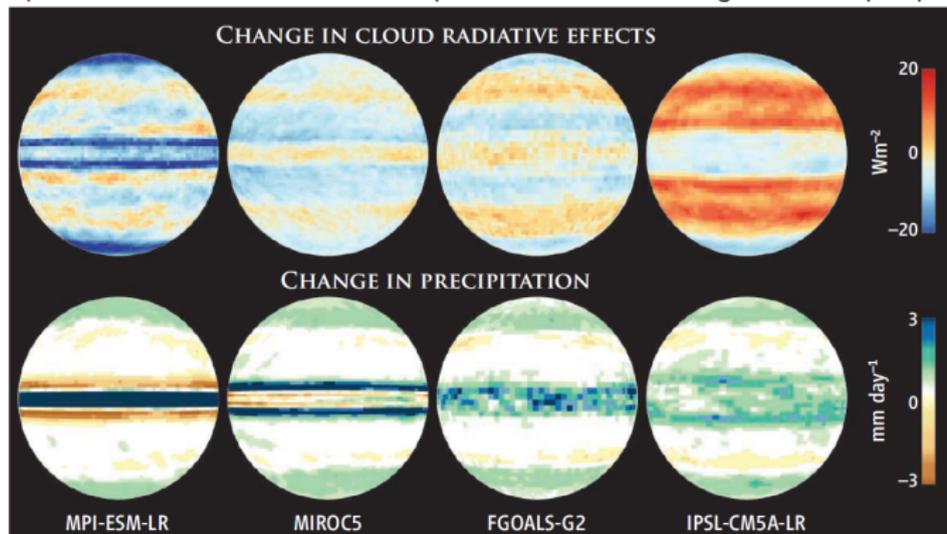
\*\* SSP = 2081–2100 vs. 1995–2014

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

# Incertitude de modélisation

- ▶ Les GCMs partagent les mêmes équations de base, mais pas nécessairement les mêmes approximations ni paramétrisations.
- ▶ Leur estimation de la sensibilité climatique va de 2 à 4.5 K (CMIP5). Une source importante de dispersion est la rétroaction nuageuse.
- ▶ Qq tentatives de contraindre les projections en fct du climat présent.

Exemple des  $\Delta$ CRE et  $\Delta$ P simulés par 4 GCMs en configuration aqua-planète



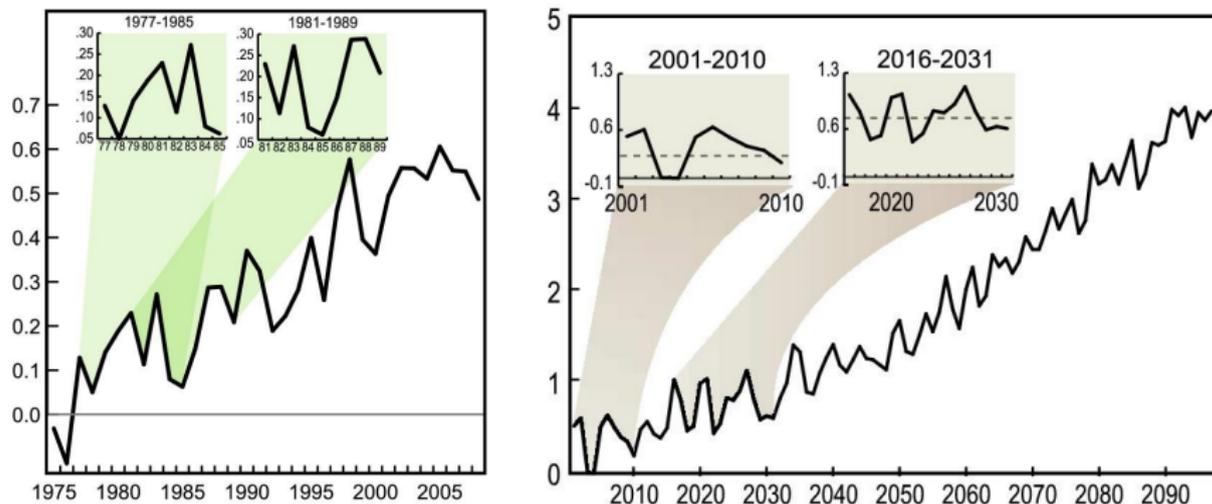
Source : Stevens and Bony (2013).

# Incertitude de variabilité interne

► Lorsque l'on regarde une seule réalisation, le **bruit** de la variabilité interne peut masquer temporairement le **signal** du réchauffement global.

Nécessité de **grands ensembles de simulations** pour isoler le signal du bruit.

Exemple des **observations sur 1998–2012\*** et d'une projection de modèle en scénario fort.



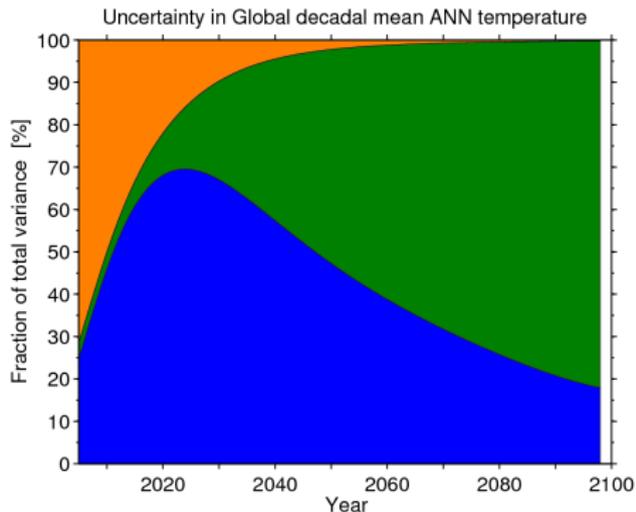
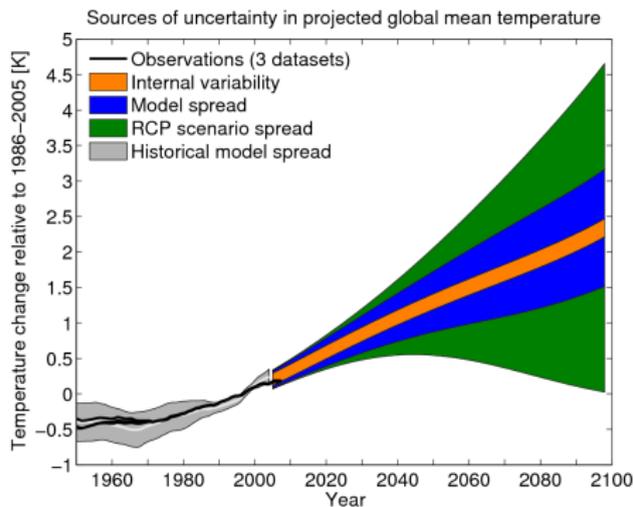
Température globale (anomalie en K). Source : Easterling and Wehner (2009).

\* Sur cette période la tendance de  $T_s$  est estimée à  $+0.05$   $[-0.05$  à  $+0.15]$  °C/décennie. Elle est donc cohérente avec 0, mais aussi avec la tendance 1951–2012 ( $+0.12$   $[+0.08$  à  $+0.14]$ ).

## 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.



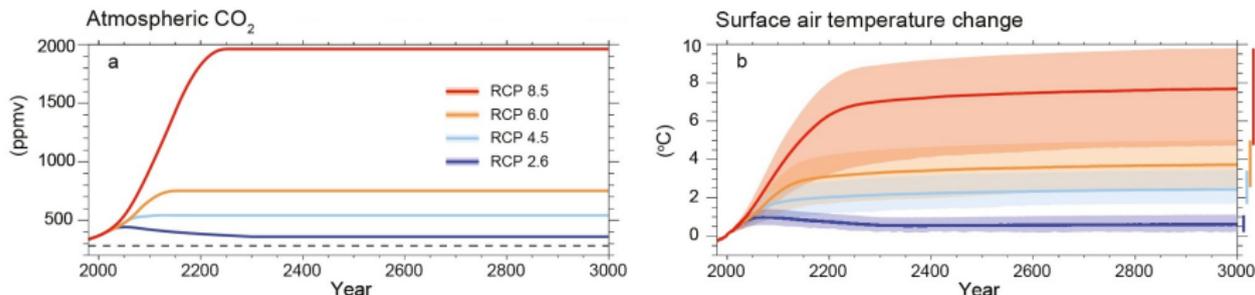
Figures de [E. Hawkins](#), à retrouver sur son [blog](#).

## À plus long terme

- ▶ Il ne suffit pas de stabiliser les émissions de GES pour stabiliser leurs concentrations.

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  $[CO_2]$  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.



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

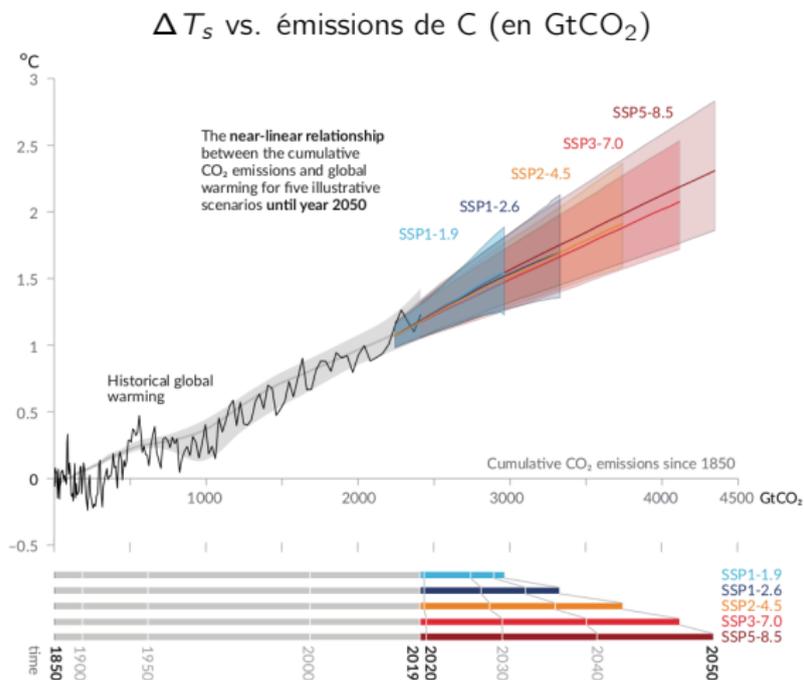
**Conséquence :** même si l'on rétablissait les concentrations de GES à leurs niveaux pré-industriels, on ne reviendrait pas immédiatement au climat pré-industriel, cf. *The recalcitrant component of global warming*, sur le blog d'I. Held (GFDL).

# Vision politique : cibles de réchauffement

► Relation linéaire entre émissions cumulées et  $\Delta T_s$  → on peut estimer les émissions permises pour différentes cibles\*.

Exemple : encore ~110 GtC (315) permises pour limiter à 1.5 K (2) avec une probabilité de 66 %. IPCC AR6 (2021).

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



Source : IPCC AR6 (2021) Fig. SPM10.

# 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.

Changement climatique observé

Projections futures et incertitudes

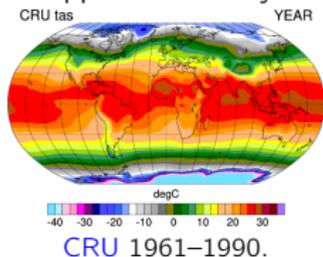
À quoi ressemble un climat plus chaud ?

Un mot sur les événements extrêmes

# Géographie du réchauffement de surface

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

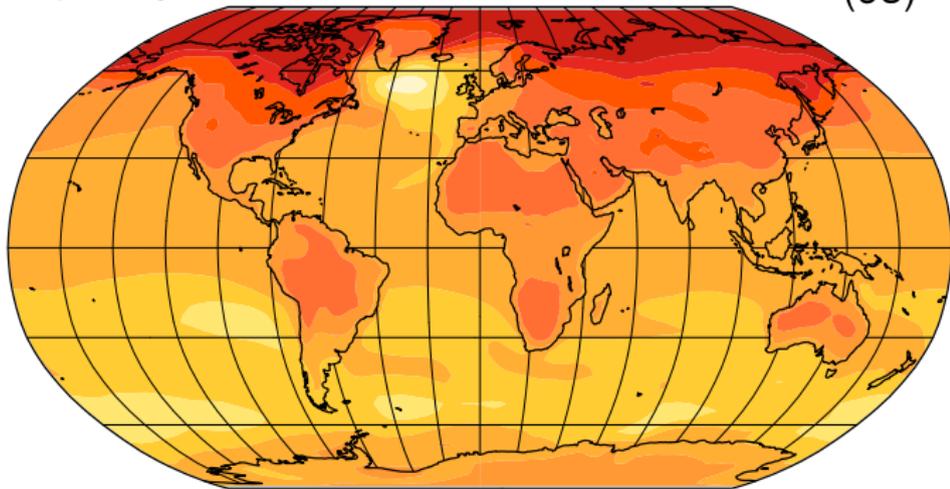
Rappel : état moyen



Changement normalisé par  $T$  globale

CMIP5

(93)



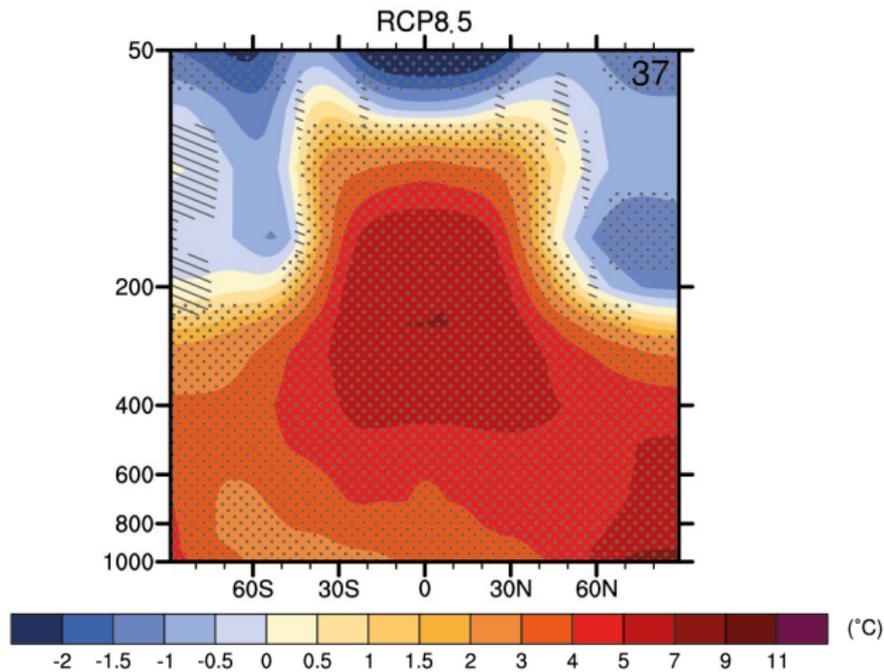
°C par °C de réchauffement global



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

# Structure verticale du réchauffement

- ▶ Réchauffement plus fort en **haute troposphère** (surtout aux tropiques).
- ▶ **Refroidissement stratosphérique**, signature d'un effet de serre accru.



Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Fig. 12.12.  
Changements 2081–2100 vs. 1986–2005, correspondant à  $\Delta T_s \sim 4$  K.

# 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.

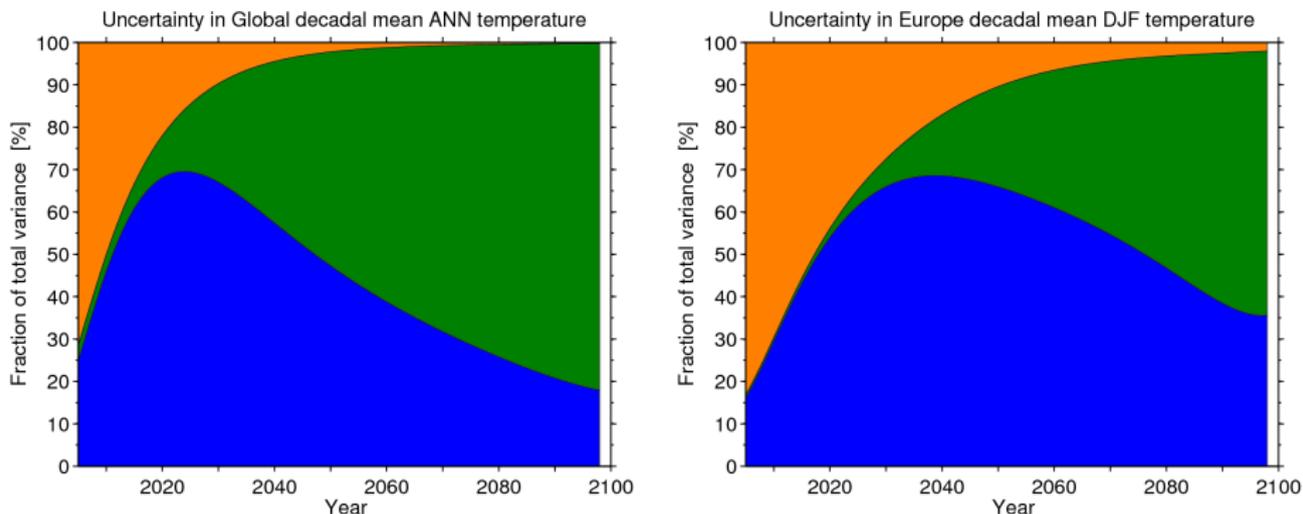
---

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

## Poids des différentes incertitudes – 2/3 : l'échelle

- ▶ Quand on affine l'échelle spatio-temporelle, le poids relatif des incertitudes de **variabilité interne**, **modélisation** et **scénario** change.

Exemple des projections de  $T$  globale annuelle (gauche) vs.  $T$  Europe hiver (droite).



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

# Changements dans le cycle hydrologique

Rappel : un air plus chaud peut contenir plus de vapeur d'eau (Clausius-Clapeyron).

Conséquence 1 : Augmentation de l'humidité spécifique.

Projeté, et déjà observé au taux de  $\sim 7 \text{ \%}/\text{K}$ .

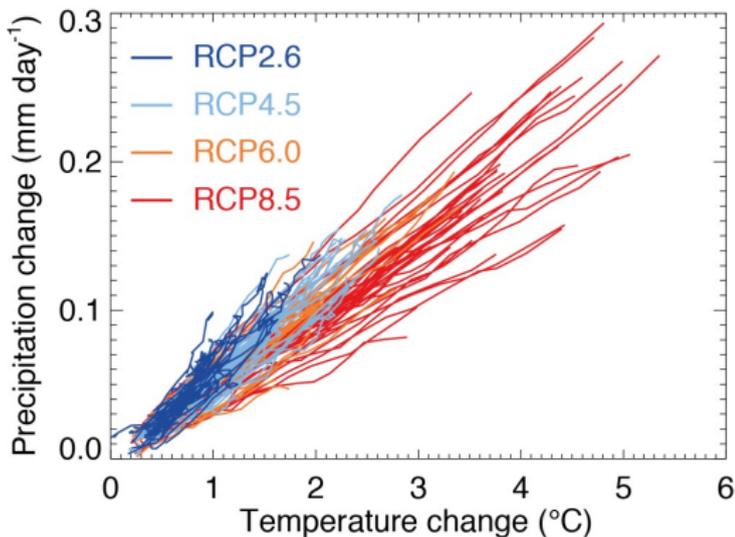
Conséquence 2 : Augmentations conjointes de l'évaporation et des précipits en global.

Projeté, et déjà observé partiellement (e.g. P continents moyennes latitudes NH) et/ou indirectement (e.g. via la salinité de surface).

Exemple de  $\Delta P$  vs.  $\Delta T_s$

$$\begin{aligned}\text{Taux} &= 0.05 [\pm 0.025] \text{ mm.day}^{-1}.\text{K}^{-1} \\ &= 2 [\pm 1] \text{ \%}.\text{K}^{-1}.\end{aligned}$$

Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Fig. 12.6.



# Géographie des changements de précipitations

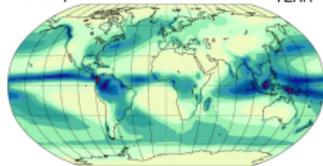
► Au premier ordre, *wet get wetter, dry get drier*.

Vrai spatialement et saisonnièrement (e.g. intensification probable des moussons).

Rappel : état moyen

GPCP pr

YEAR



mm.day-1

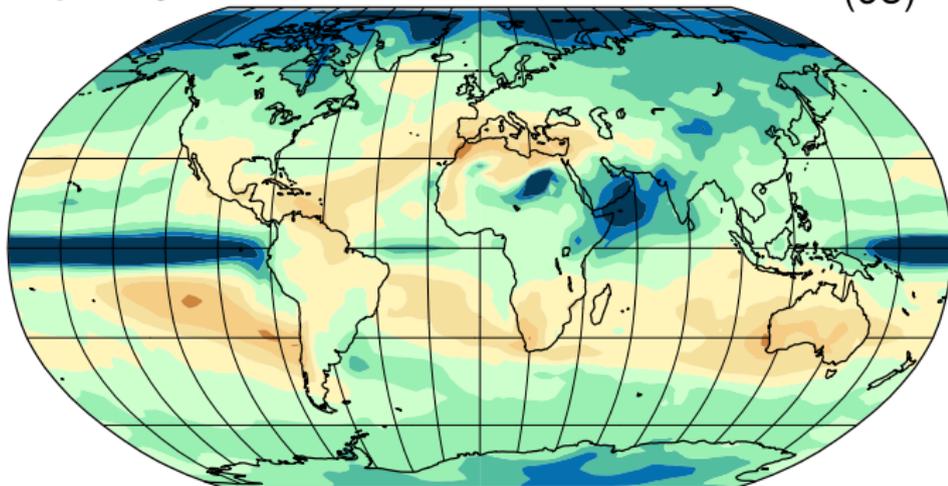


GPCP 1981–2010.

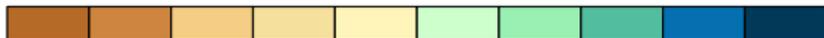
CMIP5

Changement normalisé par  $T$  globale

(93)



% par °C de réchauffement global



-12 -9 -6 -3 0 3 6 9 12

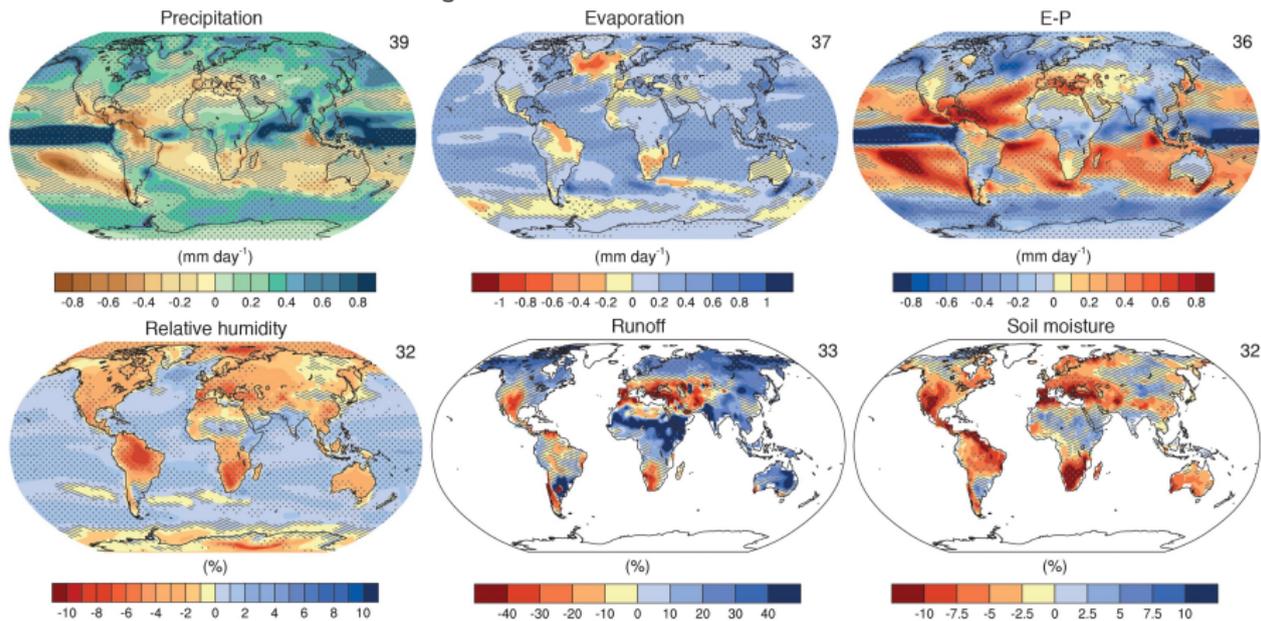
Tracé à partir de 93 projections CMIP5 (multi-modèle et multi-scénario).

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

# Intensification générale du cycle hydrologique

- ▶ Les changements de **précipitations** dominent le bilan  $E - P$ .
- ▶ **Assèchement** des sols projeté sur de nombreuses régions (e.g. Méditerranée).

Changements dans le scénario RCP8.5



Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Fig. TS-TFE1.3.

Changements 2081–2100 vs. 1986–2005, correspondant à  $\Delta T_s \sim 4$  K.

# Changements de précipitations vs. variabilité interne

- Quelque soit le scénario, le **signal** du changement moyen de précipitations a du mal à émerger 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.

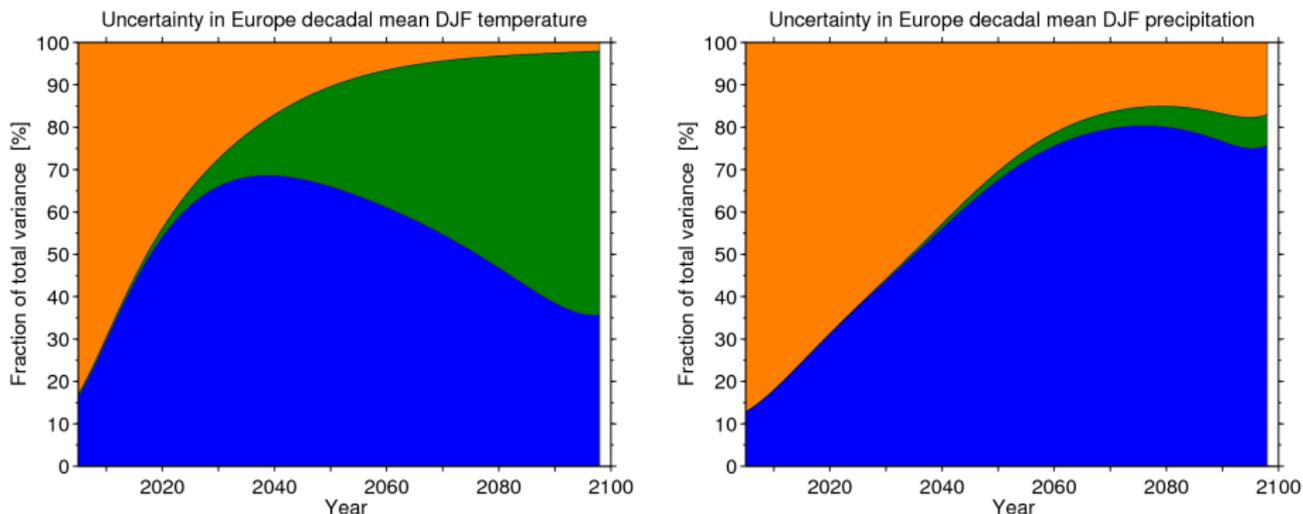
---

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

## Poids des différentes incertitudes – 3/3 : la variable

- ▶ Quand on change de variable, le poids relatif des incertitudes de **variabilité interne**, **modélisation** et **scénario** change.

Exemple des projections de  $T$  Europe hiver (gauche) vs.  $P$  Europe hiver (droite).

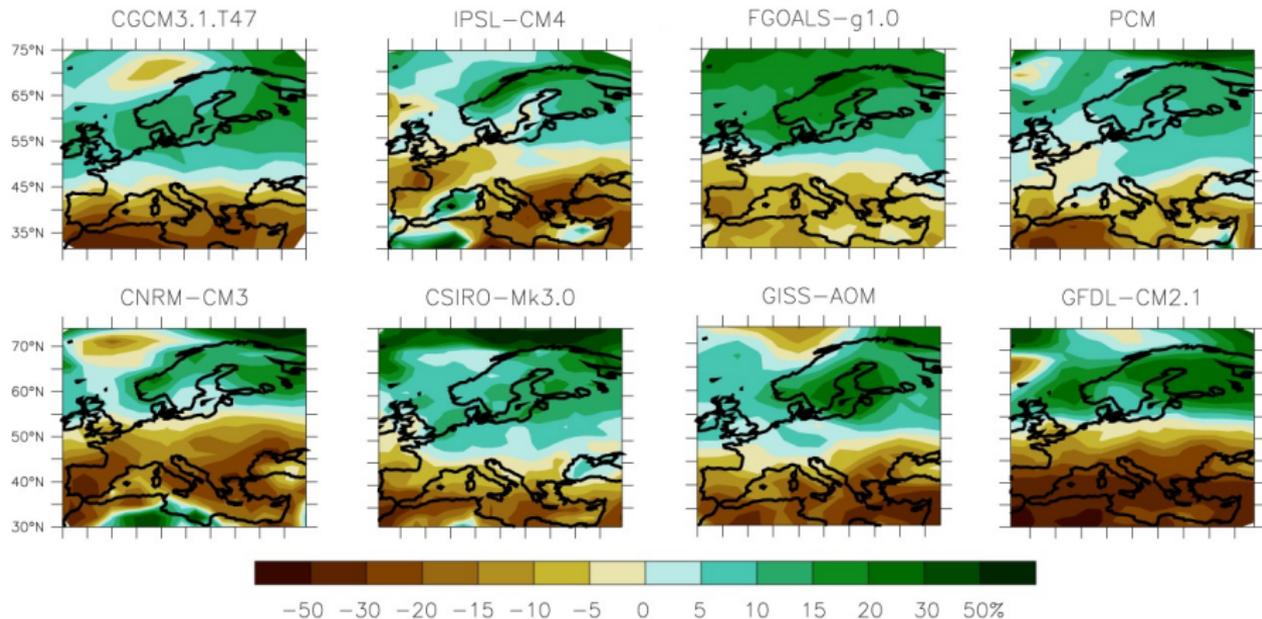


Figures de [E. Hawkins](#), à retrouver sur son [blog](#).

# Illustration de l'incertitude à scénario donné

- **Accord général** sur une ↗ de précips au Nord de l'Europe et une ↘ au Sud, mais **incertitudes** locales, y compris sur le signe du changement.

## Annual Mean Precip Response (%)



Adapté de l'IPCC AR4 (2007) Fig. S11.14.  
Changements 2080–99 vs. 1980–99 dans le scénario SRES A1B (équivalent RCP6.0).

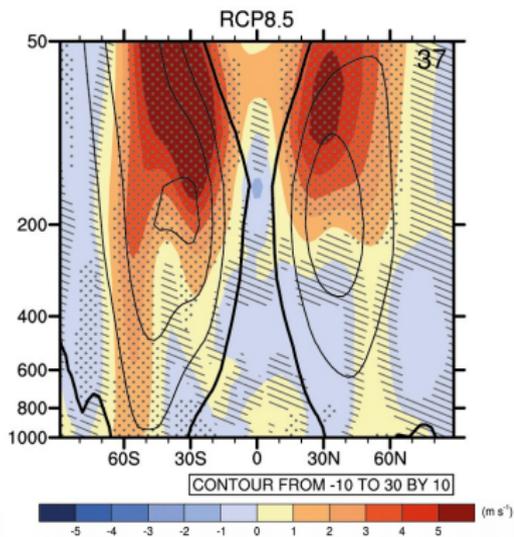
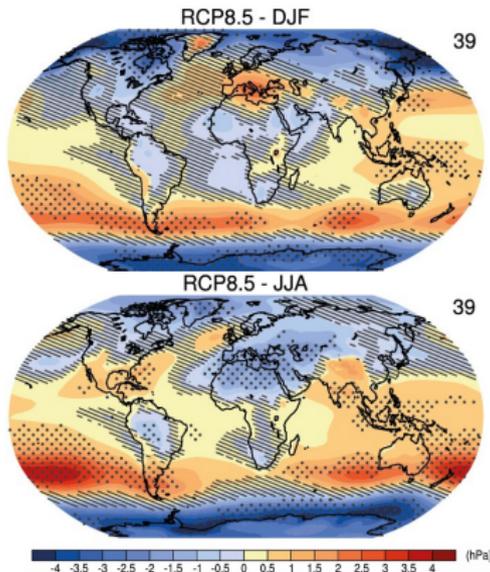
# Changements de circulation atmosphérique

- ▶ **Ralentissement probable des cellules de Hadley et Walker tropicales.**  
Convection moins intense, notamment dû au profil vertical du réchauffement.
- ▶ **Élargissement probable des cellules de Hadley vers les pôles.**  
2–5 ° de latitude. Lié à l'élévation de la tropopause ; déjà observé.
- ▶ **Décalage probable des courants-jets & rails dépressionnaires vers les pôles.**  
1–2 °. Conséquence de Hadley. Moins clair dans NH car contrebalancé par Amplification Arctique.

$\Delta$  Pression surface  
et  $\Delta$  Vent zonal

2081–2100  
vs.  
1986–2005

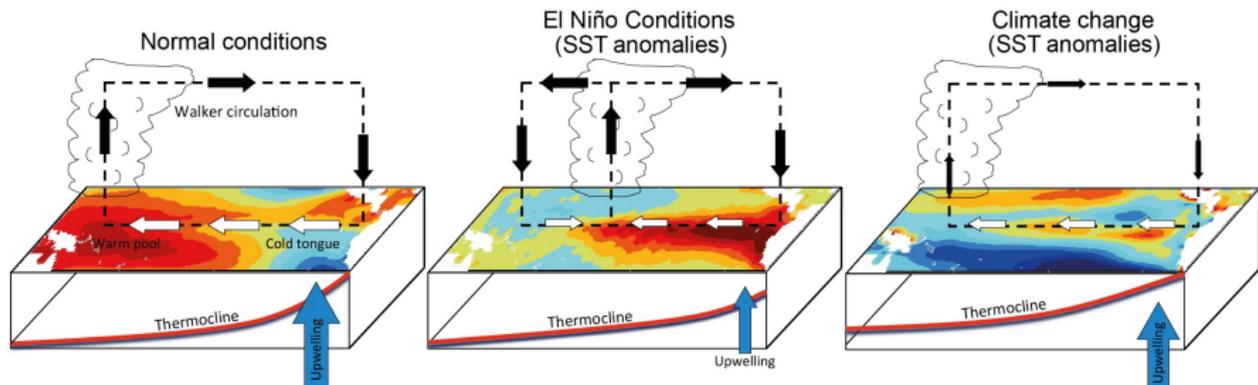
RCP8.5  
( $\Delta T_s \sim 4$  K)



IPCC AR5 (2013)  
Fig. 12.18 & 12.19.

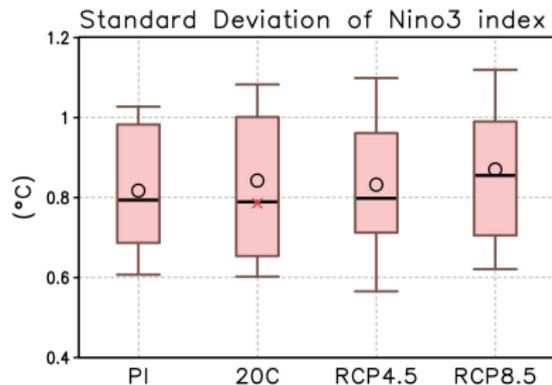
# Changements dans l'ENSO

Rappel : ENSO 1<sup>er</sup> mode de variabilité inter-annuelle globale.



► Pas de changement drastique, mais intensification des précipitations associées aux épisodes Niño.

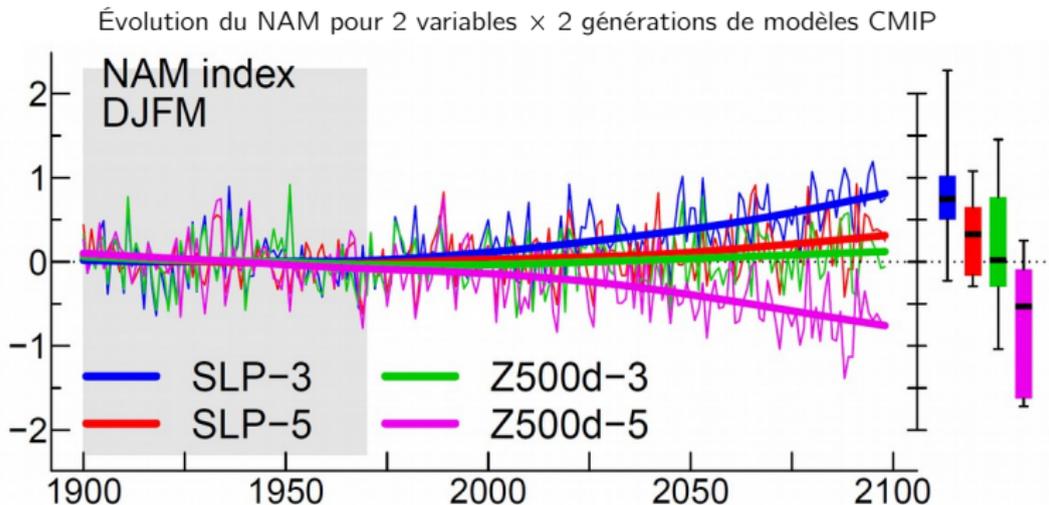
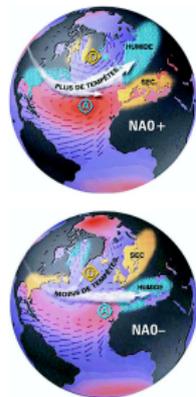
Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Fig. 14.12 et 14.14.



# Changements dans les modes annulaires

Rappel : NAM/SAM 1<sup>ers</sup> modes de variabilité inter-annuelle hémisphériques.

- Probable projection du réchauffement global sur leurs phases positives, en lien avec le décalage des jets vers les pôles.
  - SAM : robuste, même si signal déjà observé principalement lié à la déplétion d'ozone.
  - NAM : moins clair, réponse perturbée par l'effet de l'Amplification Arctique.



Moyennes de 13 GCMs, scénario RCP8.5 (ou équivalent). Source : Cattiaux and Cassou (2013).

# Changements dans l'océan

## ► Acidification.

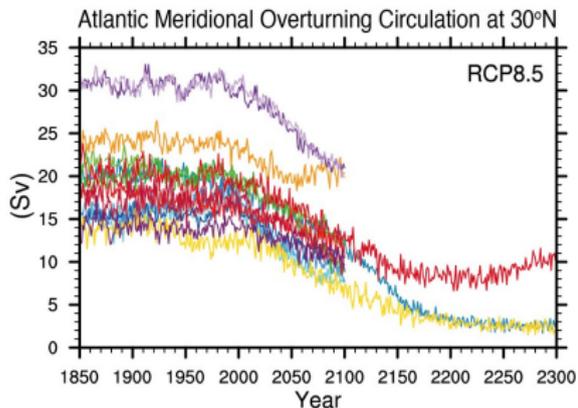
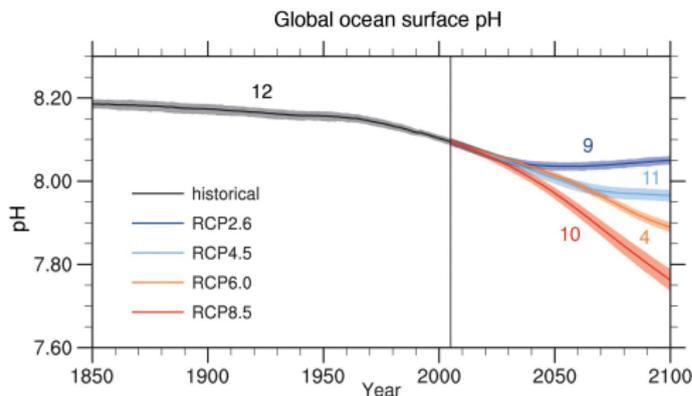
Dissolution du  $\text{CO}_2$  atmosphérique :  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{CO}_3^{2-} + 2\text{H}^+$

et rappel :  $\text{pH} = -\log_{10}[\text{H}^+]$ .

## ► Ralentissement très probable de la circulation thermohaline.

Via l'augmentation de stratification de l'océan. Pas de signal encore observé.

Évolution du pH global (gauche) et de l'AMOC (droite, RCP8.5)



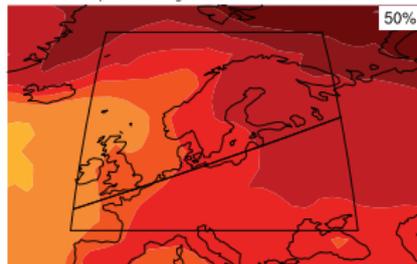
Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Fig. TS20 & 12.35.

# Zoom sur l'Europe – Température RCP8.5

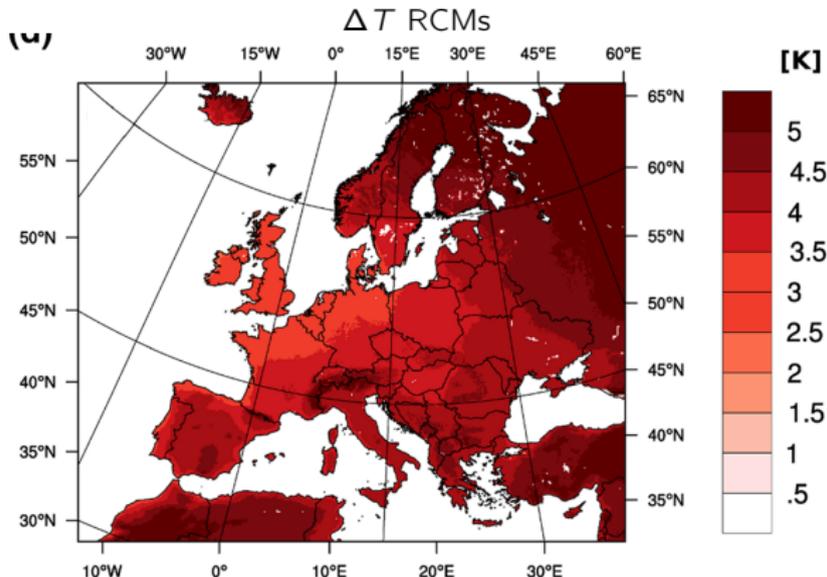
- **Régionalisation** des projections pour obtenir une résolution + fine.  
Meilleure représentation du trait de côte ou des **reliefs** ( $\Delta T$  + important).

## Rappel : $\Delta T$ GCMs

Temperature change RCP8.5 in 2081-2100: annual



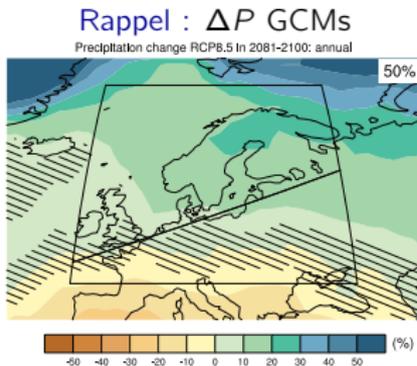
Source : IPCC AR5 (2013).  
Médiane de 39 GCMs.  
2081–2100 vs 1986–2005.



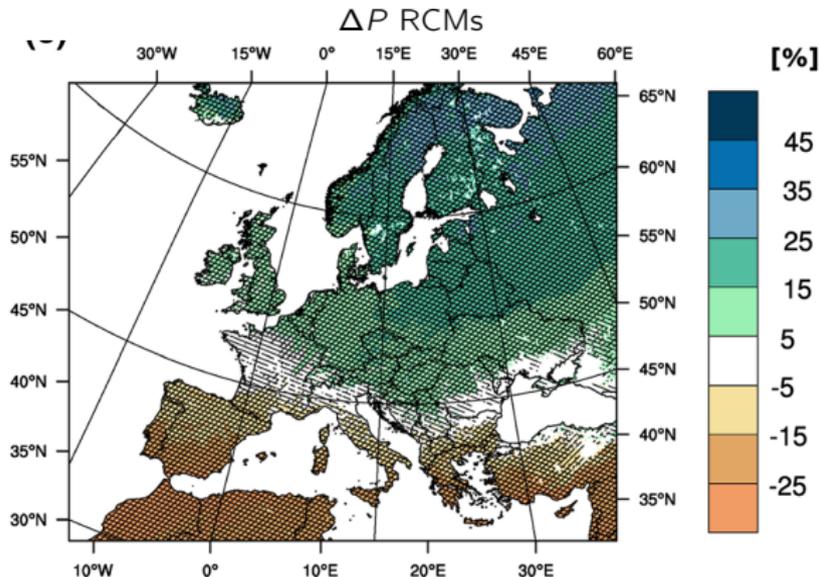
Source : Jacob et al. (2014).  
Moyenne de 10 simulations basées sur 7 RCMs et 5 GCMs.  
2071–2100 vs 1971–2000.

# Zoom sur l'Europe – Précipitations RCP8.5

- **Régionalisation** des projections pour obtenir une résolution + fine.  
Meilleure représentation du trait de côte ou des **reliefs** (important pour fortes  $P$ ).



Source : IPCC AR5 (2013).  
Médiane de 39 GCMs.  
2081–2100 vs 1986–2005.



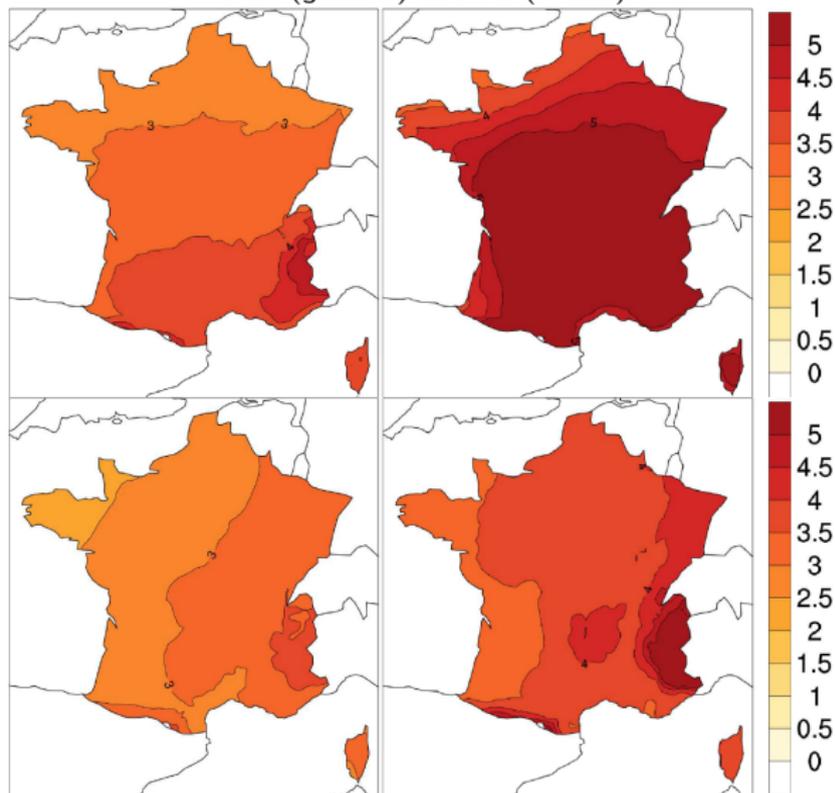
Source : Jacob et al. (2014).  
Moyenne de 10 simulations basées sur 7 RCMs et 5 GCMs.  
2071–2100 vs 1971–2000.

# Zoom sur la France – Température RCP8.5

Été

P25 (gauche) et P75 (droite)

Hiver



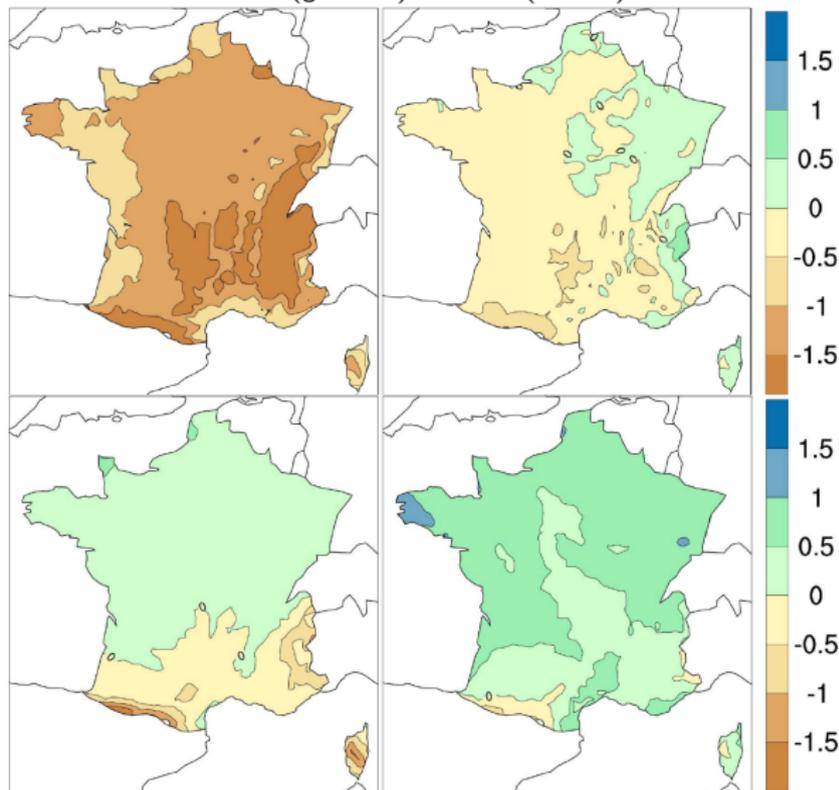
Source : Ouzeau et al. (2014).

11 simulations corrigées (CDFt) provenant de 7 RCMs et 5 GCMs.  
2071–2100 vs 1976–2005 en scénario RCP8.5.

# Zoom sur la France – Précipitations RCP8.5

Été

P25 (gauche) et P75 (droite)



Source : Ouzeau et al. (2014).

11 simulations corrigées (CDFt) provenant de 7 RCMs et 5 GCMs.  
2071–2100 vs 1976–2005 en scénario RCP8.5.

# Encore plus de changements ?

La description des changements associés au réchauffement global peut se décliner à l'infini. . .

Pour en savoir plus sur les changements à échelle globale :

– Le résumé technique et les chapitres 12 et 14 de l'IPCC AR5

<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

– L'article de Boucher et al. dans ce n° de La Météorologie (2015)

<http://meteoetclimat.fr/numero-special-climat/>

Et plus près de chez nous :

– L'outil ClimatHD de visualisation du changement climatique en France

<http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd>

– Le portail DRIAS des projections climatiques régionales en France

<http://www.drias-climat.fr/>

Changement climatique observé

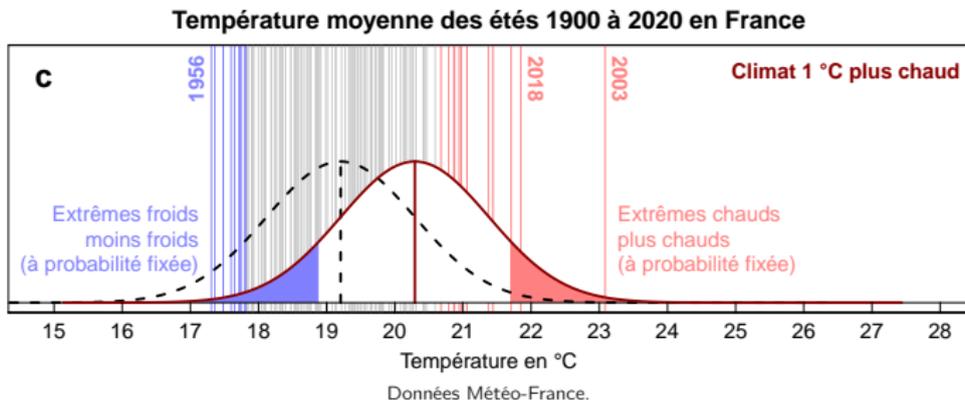
Projections futures et incertitudes

À quoi ressemble un climat plus chaud ?

Un mot sur les événements extrêmes

# Météo, climat, extrêmes

- ▶ Le **climat** est la distribution de probabilité de la **météo**.
- ▶ Les **extrêmes** sont aux *extrémités* de la distribution.



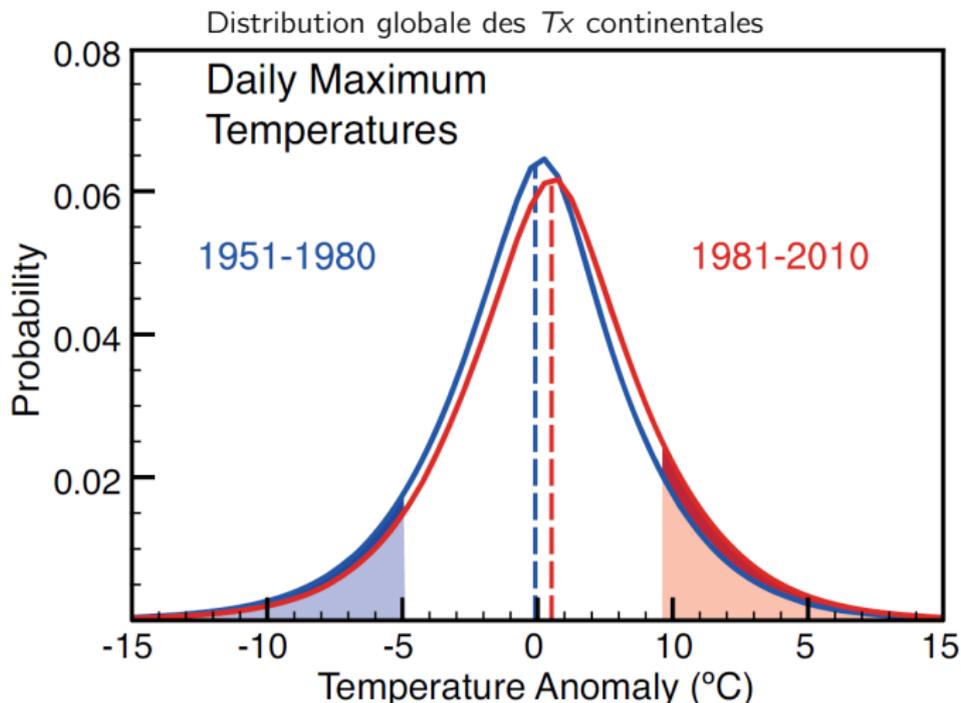
Changer de climat, c'est potentiellement modifier la probabilité de tous les événements météo, y compris celle des extrêmes.

**Exemple.** Un décalage vers un climat + chaud rend les extrêmes **chauds** + probables.

**N.B.** L'effet "décalage" peut être modulé par des changements de forme (variabilité).

## Extrêmes de température – Distribution

- ▶ Au 1<sup>er</sup> ordre, la distribution se décale (changement de **moyenne**).
- ▶ Au 2<sup>nd</sup> ordre, légers changements de **variance** (ex. Europe : **été** ↗, **hiver** ↘).

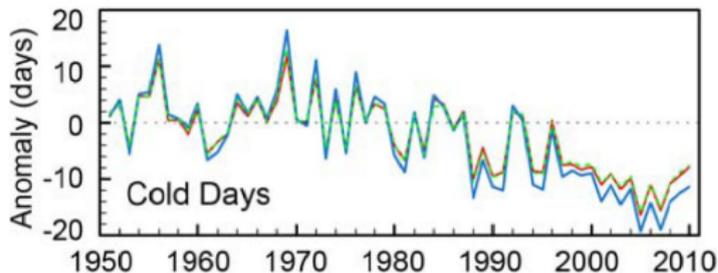
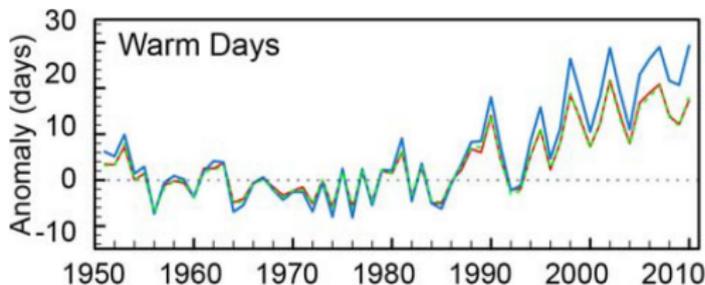
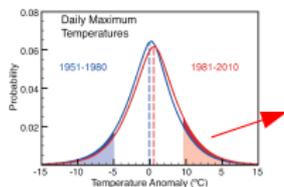


Source : IPCC AR5 (2013) FAQ 2.2 Fig. 1.

# Extrêmes de température – Observations

- ▶ Le  $\Delta T_{Globe}$  déjà observé ( $\sim 1$  K) se projette sur les extrêmes.

Exemple. Fréquence des jours avec  $T > T_{90}^{ref}$  (chauds) ou  $T < T_{10}^{ref}$  (froids)



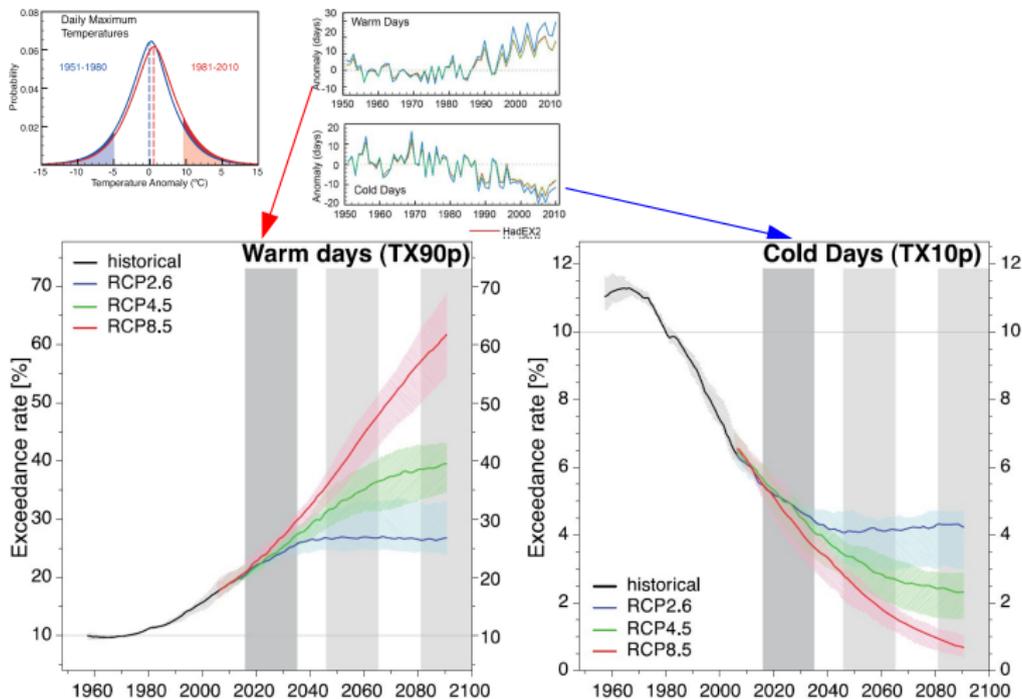
— HadEX2  
— HadGHCND  
— GHCNDEX

Source : IPCC AR5 (2013) FAQ 2.2 Fig. 1 & Fig. 2.32.

# Extrêmes de température – Projections futures

- L'évolution future des extrêmes de T dépend du scénario de GES.

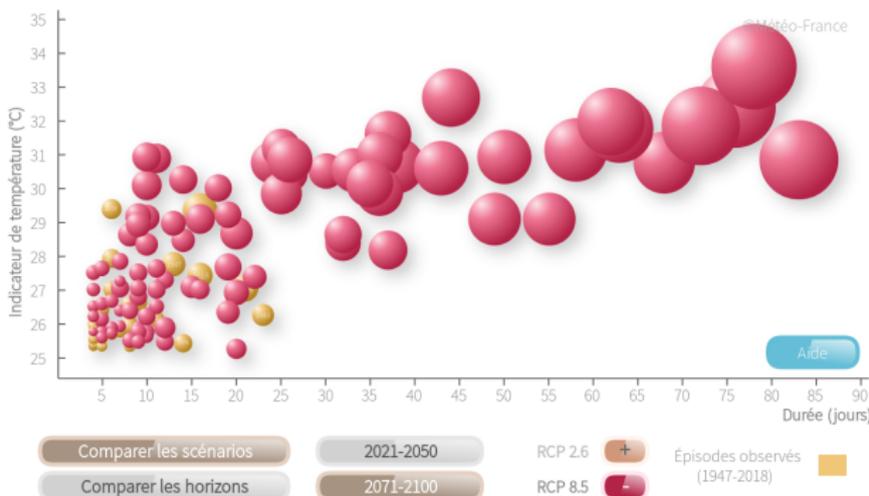
Exemple. Fréquence des jours avec  $T > T_{90}^{ref}$  (chauds) ou  $T < T_{10}^{ref}$  (froids)



Source : IPCC AR5 (2013) FAQ 2.2 Fig. 1 & Fig. 2.32 & Fig. 11.17.

# En France

- On observe déjà une **augmentation** en fréquence / intensité des canicules.  
1947–1986 (40 ans) : 7 épisodes — 2000–2019 (20 ans) : 20 épisodes.



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

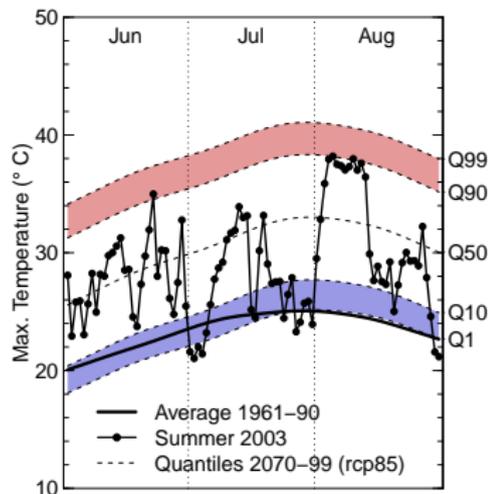
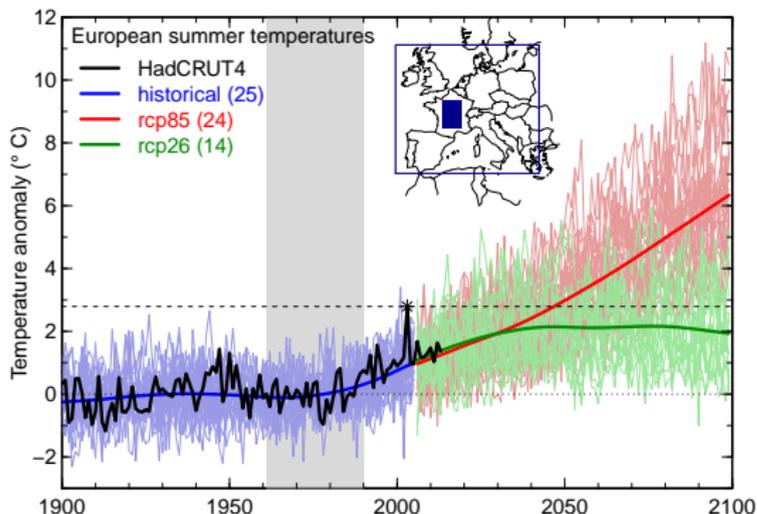
- **Futur** : selon le scénario, des événements (beaucoup) plus forts.  
N.B. À l'inverse, **diminution** observée et projetée des vagues de froid.

# Canicules récentes : analogues du climat futur ?

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

Exemple de l'été 2003 :

- T saisonnière Europe *typique* de 2050 en RCP8.5 , mais élevée en RCP2.6.
- T quotidiennes France août 2003 encore *anormales* en 2100, même en RCP8.5.



Source : Boucher et al., *La Météorologie Spécial Climat* (2015), Cattiaux and Ribes (2018).

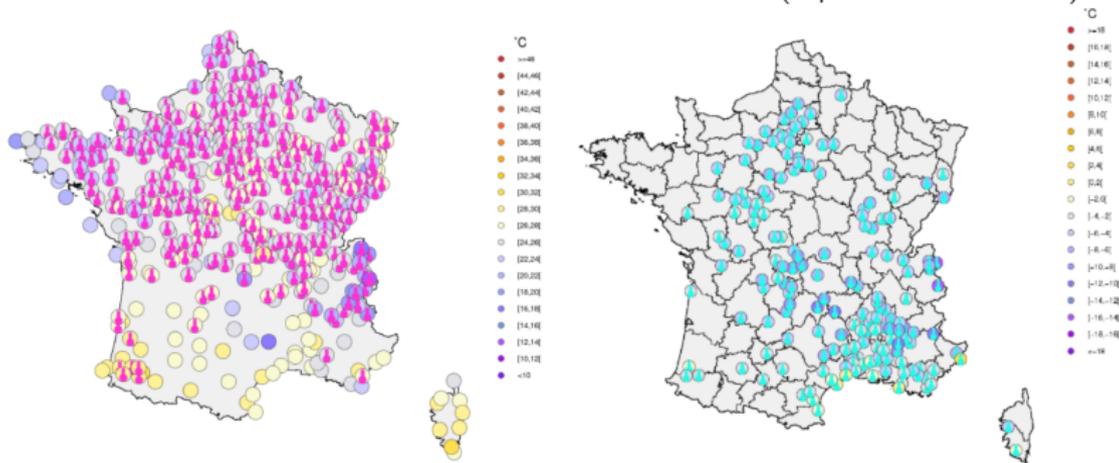
# Il fait froid : preuve que le climat ne se réchauffe pas ?

Extrêmes froids moins probables ne veut pas dire 'impossibles'.

- Probable que les **vagues de froid historiques** ne se reproduisent plus d'ici 2100 (e.g. proba 80 % pour épisode février 2012 en France, Robin et al. [2021]).
- Des **records** froids ponctuels toujours possibles (moins que records chauds).
- Des **impacts** potentiellement importants pour des froids devenus 'modérés'.

**Exemple** : épisode de gelées tardives en France en avril 2021.

Stations avec records chauds en mars et froids en avril 2021 (depuis au moins 20 ans)



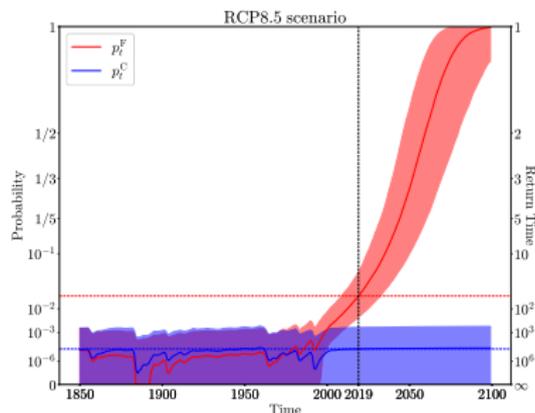
Source : Vautard et al. (2021), groupe 'World Weather Attribution'.

# Peut-on attribuer un événement singulier ?

On quantifie l'effet du CC sur la probabilité ou l'intensité de l'événement.

Exemple de la canicule du 23–25 juillet 2019 :

- probabilité en climat 'factuel' (durée de retour) estimée à  $p \sim \frac{1}{40}$  ( $\frac{1}{13}$  à  $\frac{1}{150}$ ) .
- probabilité  $600\times$  (20 à  $+\infty$ ) plus grande que sans influence humaine.
- température  $2.1 (\pm 0.6) ^\circ\text{C}$  plus élevée que sans influence humaine.



Source :  
Robin and Ribes (2020),  
Vautard et al. (2020).

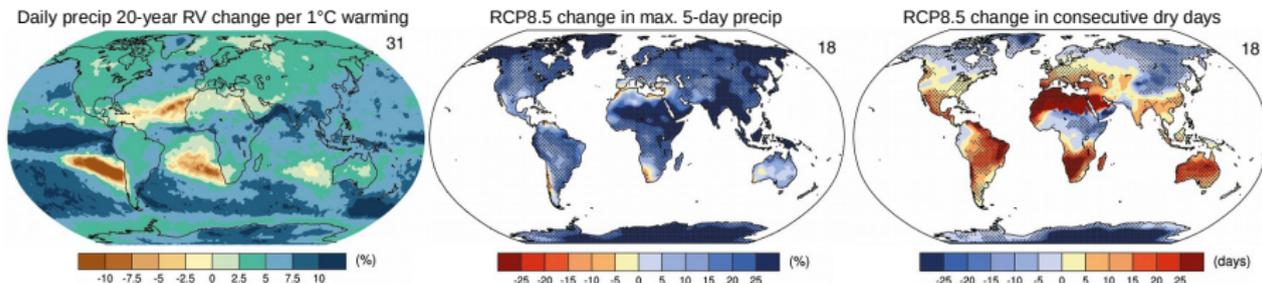
N.B. En 2100, en scénario RCP8.5 :

- un événement aussi intense se produit au moins une fois chaque été ( $p = 1$ ) ;
- un événement aussi rare est  $7 (\pm 2) ^\circ\text{C}$  plus chaud (approchant  $50 ^\circ\text{C}$ ).

# Extrêmes hydrologiques

- ▶ Au 1<sup>er</sup> ordre, les extrêmes suivent l'intensification du cycle hydrologique.

Changements projetés de pluies intenses et de jours secs



2081–2100 vs. 1986–2005. Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Figs. 12.26 et 12.27.

- ▶ **Précipitations intenses** : **augmentation** projetée & partiellement observée, empreinte anthropique détectée sur certains événements. Se transpose aux inondations, mais + difficilement aux crues.
- ▶ **Sécheresses météorologiques** (précip.) : **augmentation probable** dans certaines régions (dont Europe méridionale), pas de signal détecté.
- ▶ **Sécheresses agricoles** (humid. sols) : **augmentation** projetée & partiellement observée.

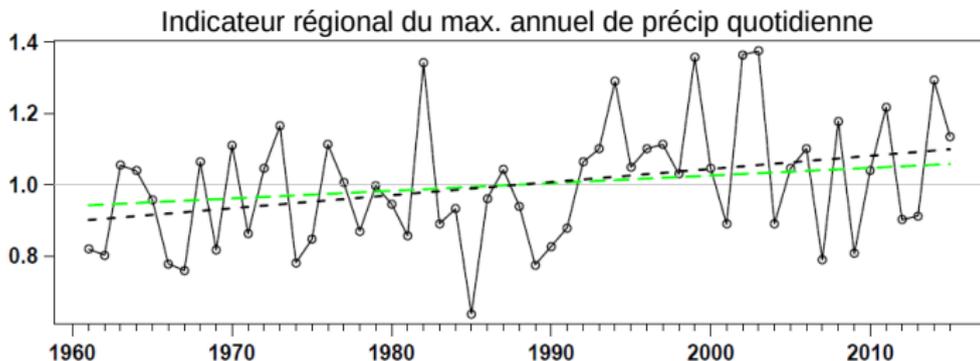
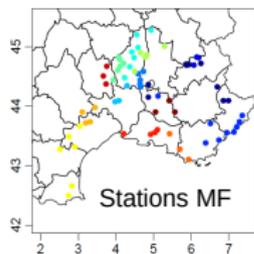
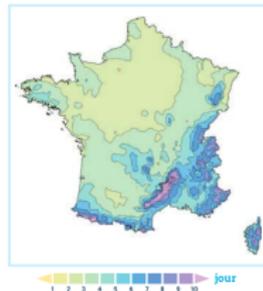
# Précipitations intenses en France

- ▶ Forte hétérogénéité spatiale, petites échelles, relief.

Exemple. 99e centile de la P quotidienne en climat actuel →

- ▶ **Augmentation** observée des 'épisodes méditerranéens'.

- Tendance :  $\sim 15 [\pm 10]$  % par K de réchauffement.
- Cohérent avec le **taux de Clausius-Clapeyron**.



Source : DRIAS (2021) et Ribes et al. (2018).

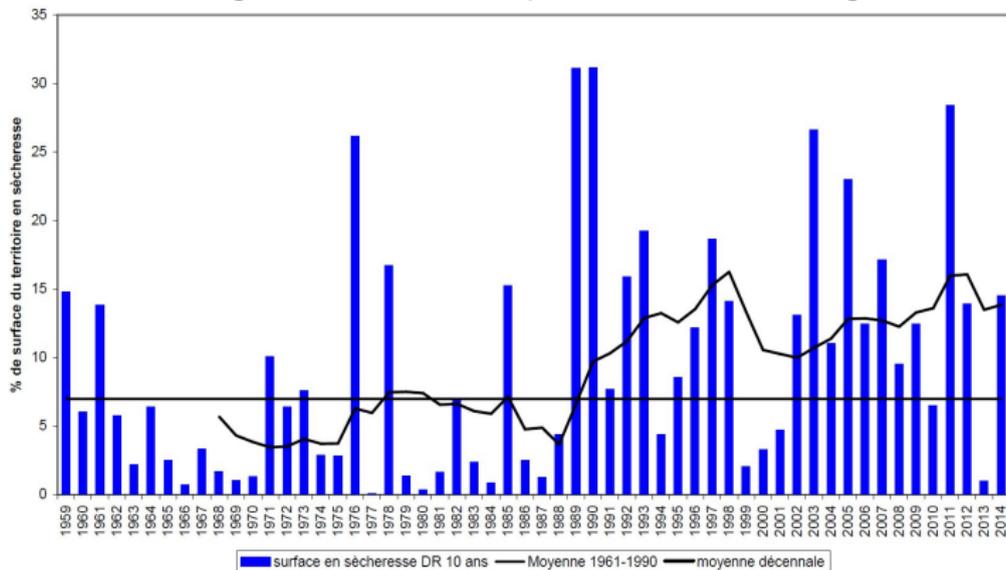
# Sécheresses en France

- **Augmentation** des sécheresses météorologiques (période sans pluie).

Exemple. En RCP8.5, le nombre maximal de jours secs consécutifs en été passe de 15 à 22 en moyenne (25 à 35 sur pourtour Méd.).

- **Augmentation** des sécheresses agricoles (humidité des sols).

Pourcentage du territoire métropolitain en sécheresse agricole



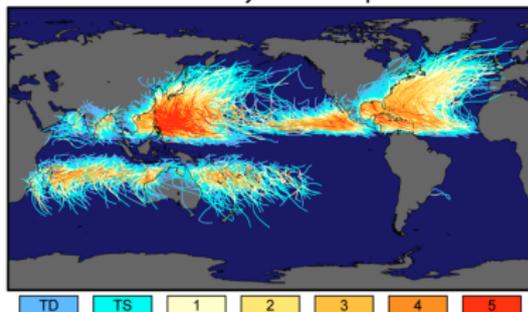
Critère = humidité du sol < 10e centile (1961-1990). Source : CLIMSEC (2011) et DRIAS (2021).

# Cyclones et tempêtes

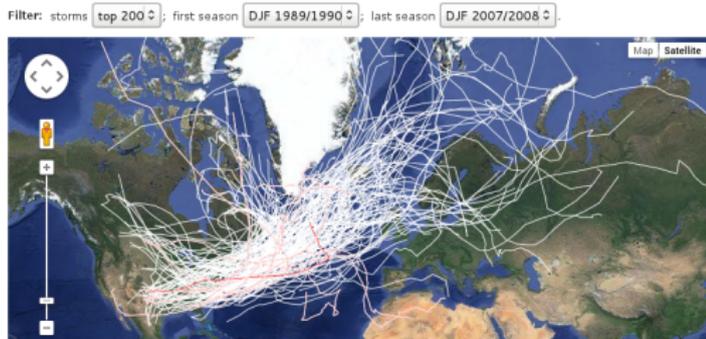
- ▶ **Cyclones tropicaux** : se forment sous certaines conditions atmosphériques et océaniques, puis puisent leur énergie de la surface océanique.
- ▶ **Tempêtes extra-tropicales** : phénomènes essentiellement atmosphériques.

—  
On les détecte via des algorithmes de *tracking* et on étudie leur trajectoire, fréquence, intensité, etc.

Tracks and Intensity of All Tropical Storms



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

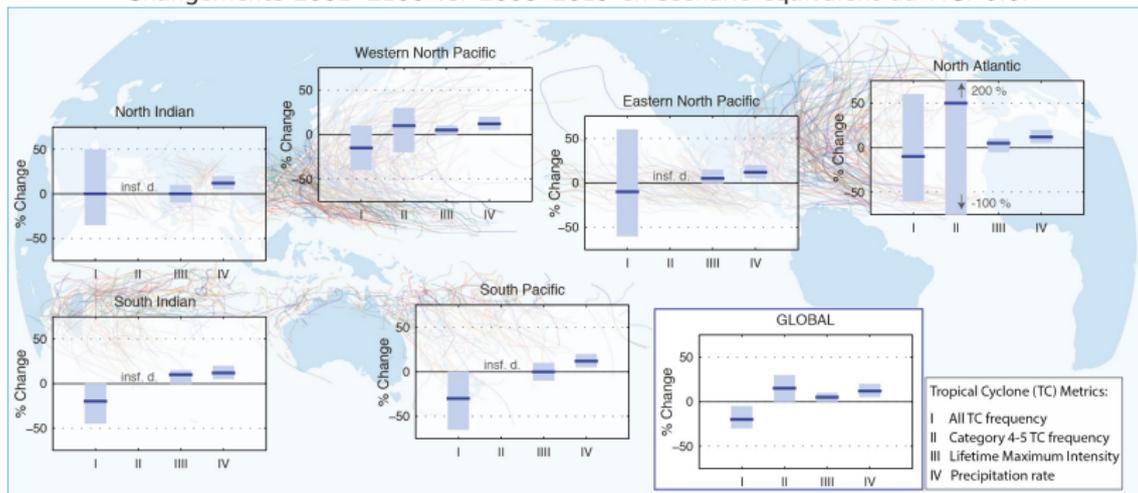


Source : [Atlas](#) de l'Université de Reading.

# Cyclones tropicaux

- ▶ Dans les projections climatiques (modélisation) :
  - **Diminution** probable de la fréquence globale des cyclones (I).
  - **Augmentation** probable de la fréquence des cyclones les plus forts (II, III).
  - **Augmentation** probable des phénomènes associés : précipitations, surcôtes (IV).
  - **Extension vers les pôles** du 'terrain de jeu' des cyclones.
- ▶ Mais pas de tendance observée à l'heure actuelle.  
Forte variabilité, hétérogénéité des observations, etc.

Changements 2081–2100 vs. 2000–2019 en scénario équivalent au RCP6.0.

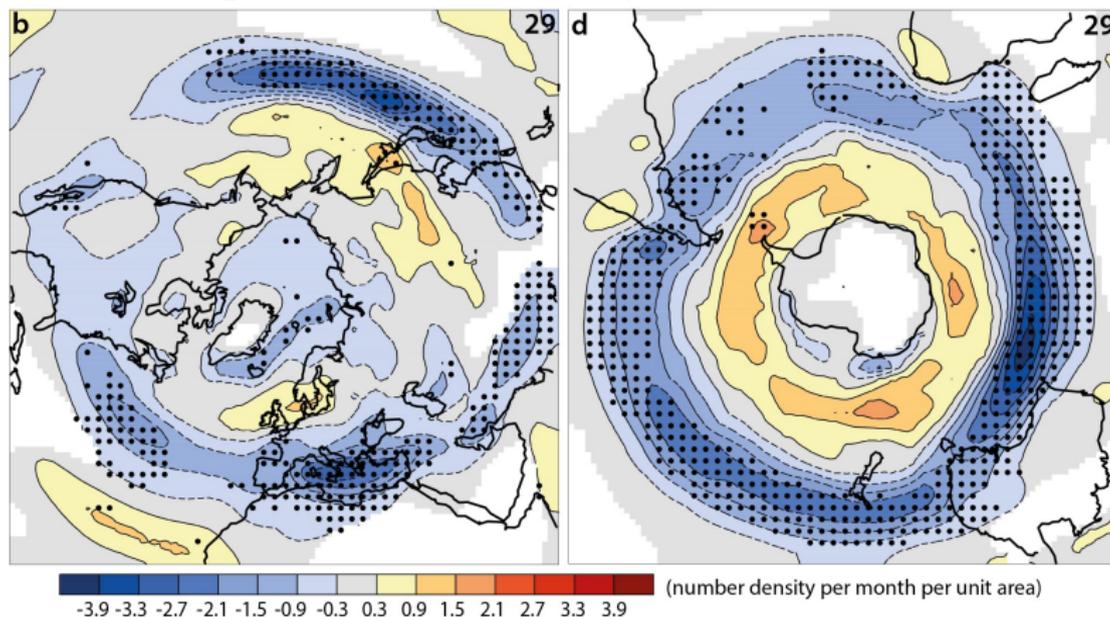


Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Fig. 14.17.

# Tempêtes extra-tropicales

- ▶ **Décalage probable vers les pôles**, en lien avec les courants-jets.  
Signal partiellement observé à échelle globale.
- ▶ Pas de tendance observée en France à l'heure actuelle.

Changements de fréquence de tempêtes en scénario RCP8.5.



2081–2100 vs. 1986–2005. Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Fig. 12.20.

# Résumé

Le changement climatique modifie (déjà) les probabilités associées aux aléas météorologiques.

Certains phénomènes extrêmes sont rendus plus fréquents et/ou intenses (canicules, pluies intenses, sécheresses), d'autres moins (vagues de froid).

Pour d'autres, le message scientifique est plus compliqué (cyclones), incertain (tempêtes), voire inexistant (phénomènes non abordés ici).

—

**Attention aux messages trop simplificateurs (#CafeDuCommerce) :**

- 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.

# Références I

- ▶ G. S. Callendar, *The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature*, Q. J. R. Meteorol. Soc. **64** (1938), no. 275, 223–240.
- ▶ J. Cattiaux and C. Cassou, *Opposite CMIP3/CMIP5 trends in the wintertime Northern Annular Mode explained by combined local sea ice and remote tropical influences*, Geophys. Res. Lett. **40** (2013), no. 14, 3682–3687.
- ▶ J.-L. Dufresne and S. Bony, *An Assessment of the Primary Sources of Spread of Global Warming Estimates from Coupled Atmosphere–Ocean Models.*, J. Clim. **21** (2008), no. 19.
- ▶ D.R. Easterling and M.F. Wehner, *Is the climate warming or cooling?*, Geophys. Res. Lett. **36** (2009), no. 8.
- ▶ T. Gerlach, *Volcanic versus anthropogenic carbon dioxide*, Eos, Transactions American Geophysical Union **92** (2011), no. 24, 201–202.
- ▶ M.J. Gidden, K. Riahi, S.J. Smith, S. Fujimori, G. Luderer, E. Kriegler, D.P. van Vuuren, M. van den Berg, L. Feng, D. Klein, K. Calvin, J.C. Doelman, S. Frank, O. Fricko, M. Harmsen, T. Hasegawa, P. Havlik, J. Hilaire, R. Hoesly, J. Horing, A. Popp, E. Stehfest, and K. Takahashi, *Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century*, Geoscientific Model Development **12** (2019), no. 4, 1443–1475.
- ▶ K. Hasselmann, *On the signal-to-noise problem in atmospheric response studies*, Meteorology of tropical oceans (1979), 251–259.
- ▶ \_\_\_\_\_, *Multi-pattern fingerprint method for detection and attribution of climate change*, Clim. Dyn. **13** (1997), no. 9, 601–611.

## Références II

- ▶ E. Hawkins and P.D. Jones, *On increasing global temperatures: 75 years after Callendar*, Q. J. R. Meteorol. Soc. **139** (2013), no. 677, 1961–1963.
- ▶ D. Jacob and co authors, *EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research*, Regional Environmental Change **14** (2014), no. 2, 563–578.
- ▶ S.A. Marcott, J.D. Shakun, P.U. Clark, and A.C. Mix, *A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years*, Science **339** (2013), no. 6124, 1198–1201.
- ▶ B. Stevens and S. Bony, *What are climate models missing*, Science **340** (2013), no. 6136, 1053–1054.