

Système Climatique M2 SOAC 5/5

Changement climatique anthropique

Julien Cattiaux

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

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

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

2017-18

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

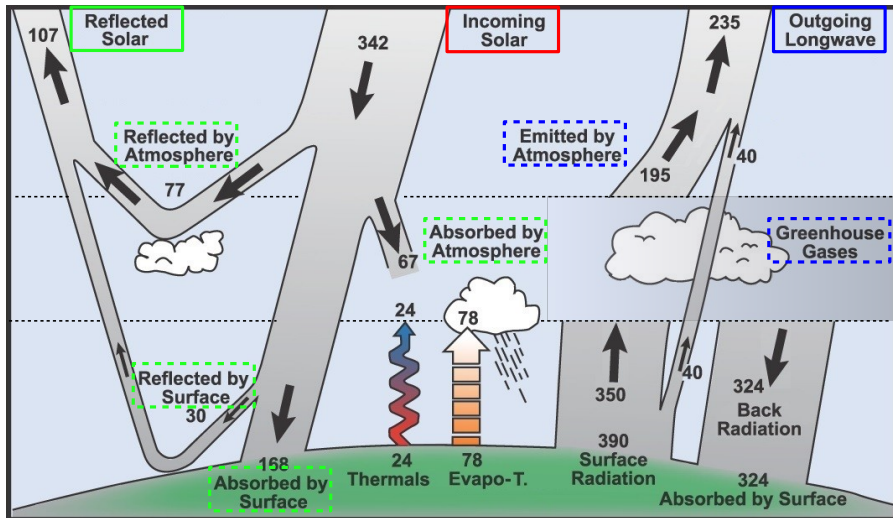
À quoi ressemble un climat plus chaud ?

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**.

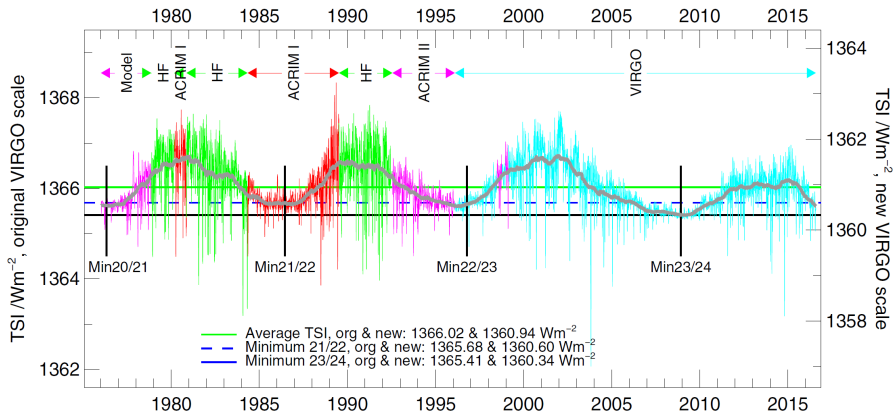


Adapté de l'IPCC AR4 (2007) FAQ 1.1 Fig. 1. Flux en $W.m^{-2}$.

Forçage solaire (+)

► Variations de l'activité solaire, cycles à ~ 11 ans.

Variations du forçage radiatif : $\Delta S_0 \sim 0.5 \text{ W.m}^{-2} \Rightarrow F \sim 0.1 \text{ W.m}^{-2}$.



Données : satellites ACRIM, HF & VIRGO. Figure de C. Fröhlich, détails [ici](#).

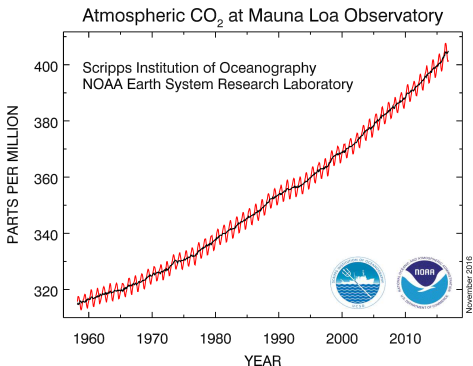
N.B. La croissance du soleil ($t \sim 10^9$ a) et les cycles orbitaux ($t \sim 10^4 - 10^5$ a) sont hors-sujet à l'échelle de temps qui nous intéresse ici.

Forçage GES (+)

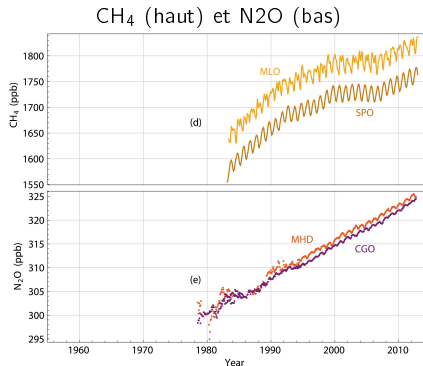
Rappels :

- Principaux gaz concernés : CO_2 , CH_4 et N_2O .
- Durée de vie : $\sim 10 - 10^2$ a. Répartition homogène (on parle de *well-mixed GHG*).

Évolution observée des concentrations de GES



Source : Mesures à [Mauna Loa](#).

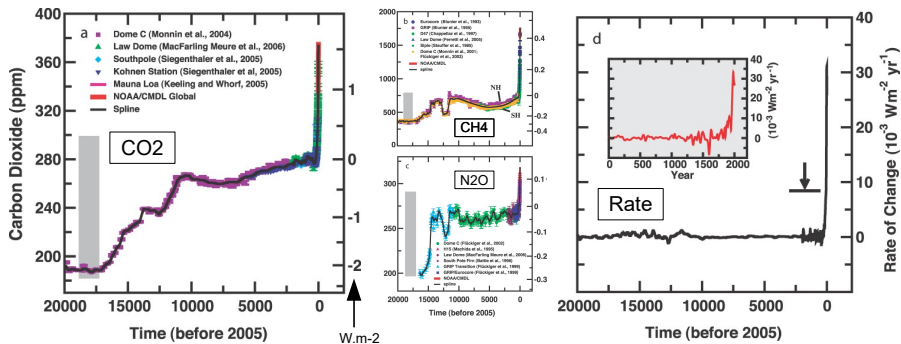


Adapté de l'ICC AR5 (2013) Fig. 6.3.

À voir aussi : [vidéo](#) de la NOAA sur l'évolution de $[\text{CO}_2]$.

Forçage GES (+) – Augmentation sans précédent

- GES présents à l'état naturel, mais ↗ actuelle anthropique.
- [C] (gauche) & $\partial_t[C]$ (droite) sans précédent dans les carottages glaciaires (~ 1 Ma).



Adapté de l'IPCC AR4 (2007) Fig. 6.4.

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

$$F_{CO_2} = 5.4 \ln(400/280) = 1.9 \text{ W.m}^{-2}$$

$$F_{CH_4} = 0.036(\sqrt{1835} - \sqrt{715}) = 0.6 \text{ W.m}^{-2}$$

$$F_{N_2O} = 0.11(\sqrt{330} - \sqrt{270}) = 0.2 \text{ W.m}^{-2}$$

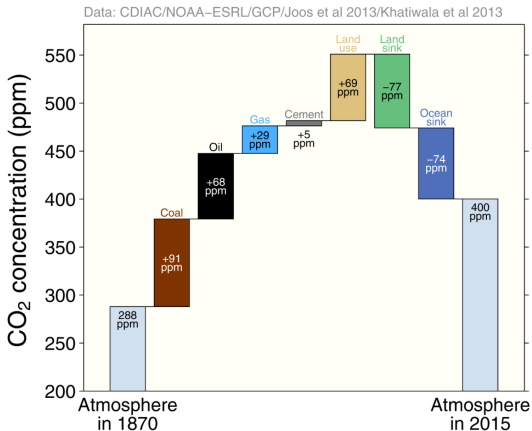
$$\rightarrow \text{Total : } F_{WMGHG} = 3.0 [\pm 0.3] \text{ W.m}^{-2}$$

* Estimations du CDIAC.

Forçage GES (+) – Détail des contributions anthropiques

► Sur les 555 GtC¹ émises entre 1750 et 2011, 315 GtC ont été absorbées (puits océanique et continental), et 240 GtC sont dans l'atmosphère².

¹ 1 GtC = 10¹⁵ g de carbone ⇔ 3.664 GtCO₂. ² Estimations IPCC AR5 (2013).



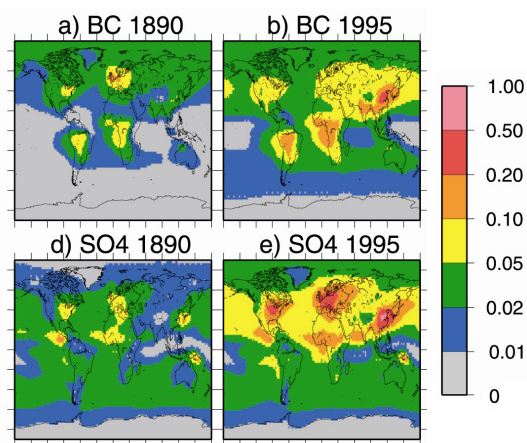
Source : [Global Carbon Project](#).

—
Voir détails (émissions par pays, etc.) dans la présentation [Global Carbon Budget 2016](#).

Forçage aérosols (–)

Rappels :

- 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).



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

$$F = -0.9 [-1.9 \text{ à } -0.1] \text{ W.m}^{-2},$$

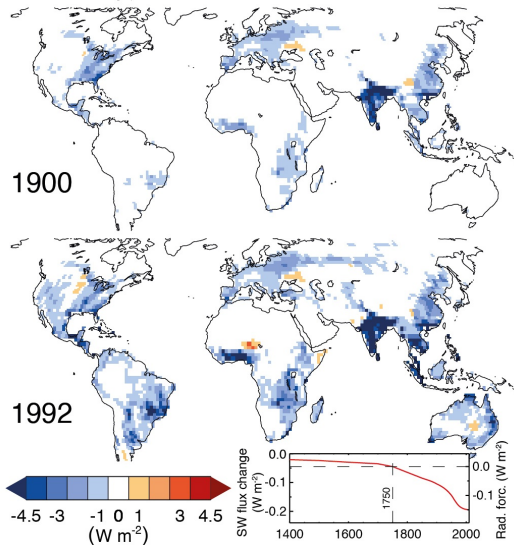
dont $F_{\text{direct}} = -0.45 [\pm 0.5] \text{ W.m}^{-2}$.

* Estimations IPCC AR5 (2013).

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

Forçage *land-use* (-)

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



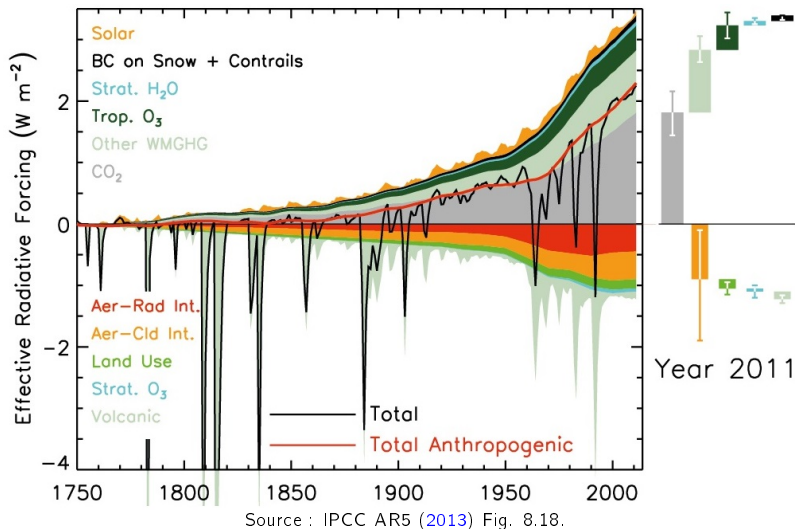
Forçage radiatif en 2011 par rapport au pré-industriel* :

$$F = -0.15 [\pm 0.1] \text{ W.m}^{-2},$$

* 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 : $F_{2011} \sim 2 \text{ W.m}^{-2}$.

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.

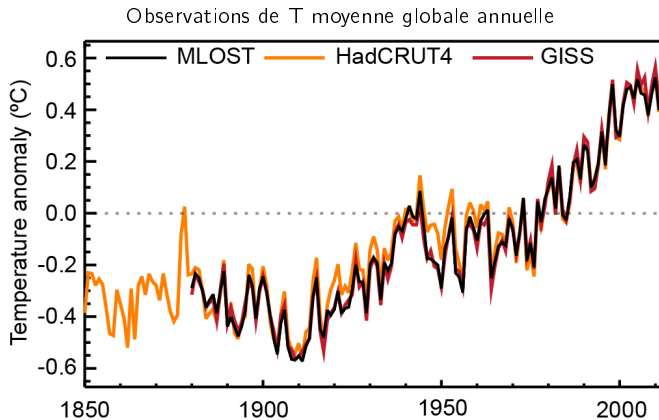
Par exemple, si la concentration de CO₂ est brusquement doublée :

- 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).

Conséquence : un réchauffement global

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

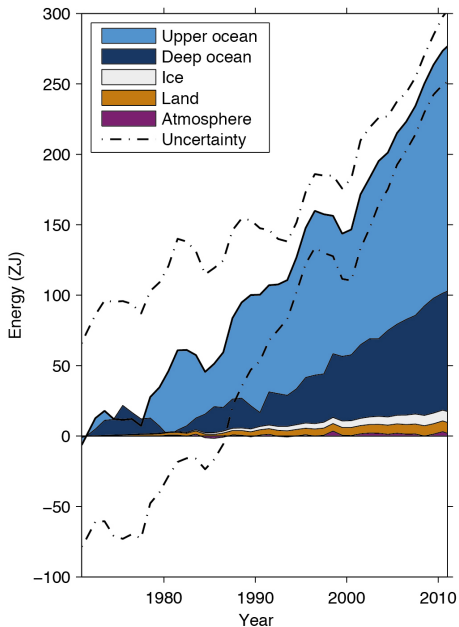


Source : IPCC AR5 (2013) Fig. 2.20.

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

* Estimation IPCC AR5 (2013).

Et un 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 ± 75 ZJ**, répartis comme suit :

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

Cela correspond à un déséquilibre radiatif de $\Delta R = 0.42 \pm 0.11$ W.m⁻².

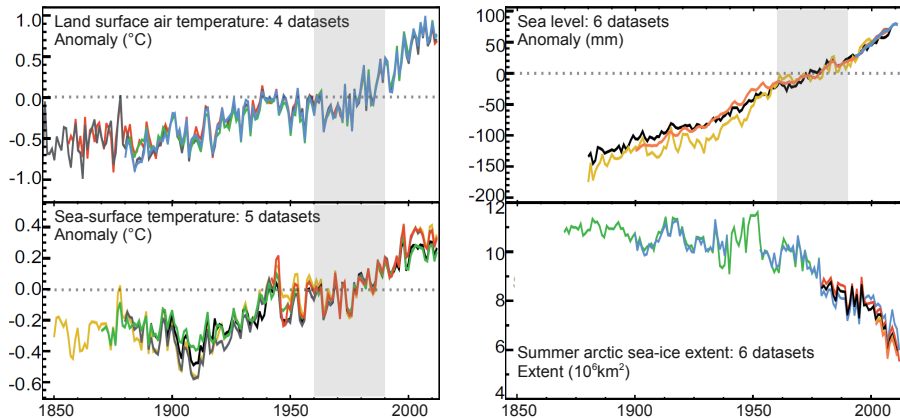
* Estimations IPCC AR5 (2013).
** 1 ZJ = 10²¹ J ~ 10⁸ Hiroshima.

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

Multiple indicateurs du réchauffement global

► Cette accumulation d'énergie dans toutes les composantes du système climatique est observée via de multiples indicateurs.

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

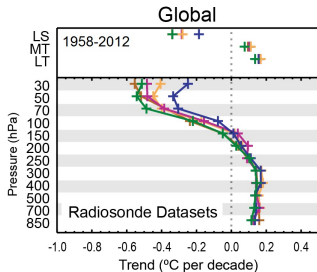
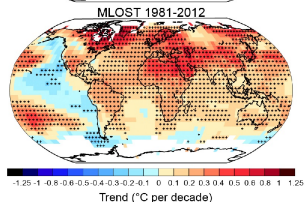
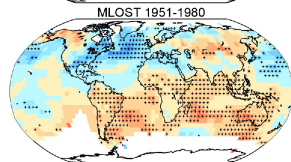
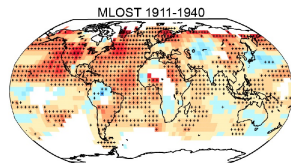
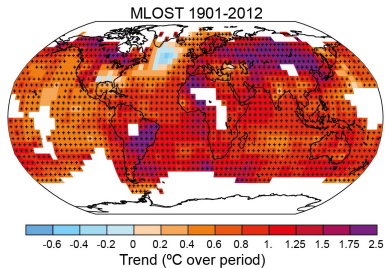


Adapté de l'IPCC AR5 (2013) FAQ 2.1 Fig. 1.

Global ne signifie ni constant ni uniforme

► Structures :

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



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

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**



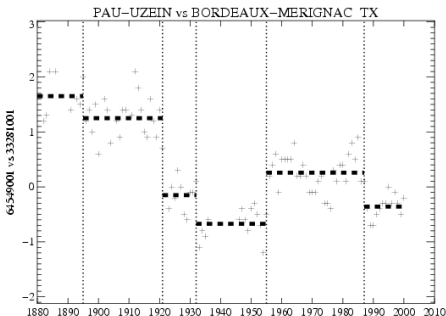
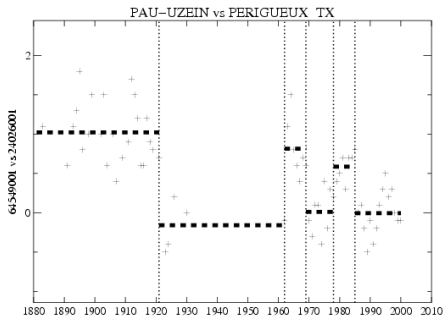
Source : Cours d'O. Mestre (Météo-France).

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.



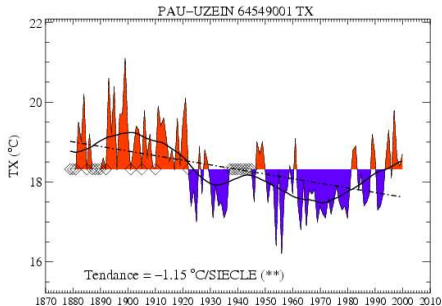
Source : Cours d'O. Mestre (Météo-France).

Homogénéisation de données – Exemple de résultat 1/2

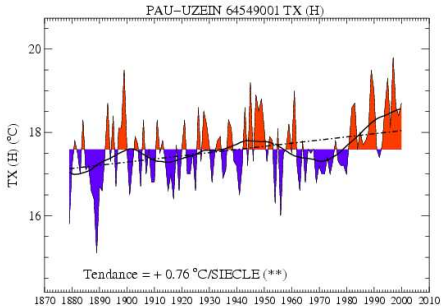
► Série de T à Pau-Uzein avant / après homogénéisation.

Aucune hypothèse n'est faite *a priori* sur la tendance long-terme !

■ « AVANT »



■ « APRES »



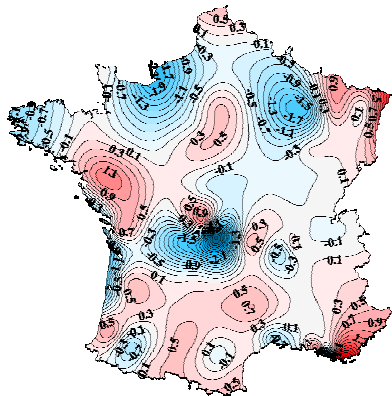
Source : Cours d'O. Mestre (Météo-France).

Homogénéisation de données – Exemple de résultat 2/2

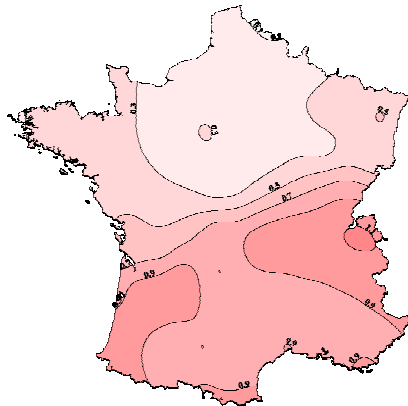
► Tendances 1901–2000 de T France avant / après homogénéisation.

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).

Détection : montrer que le signal ne peut être expliqué par la **variabilité interne**.

Attribution (à une cause i) : montrer que le signal peut être expliqué par un ensemble de causes contenant i (**condition suffisante**), mais qu'il ne l'est plus si on retire la cause i (**condition nécessaire**).

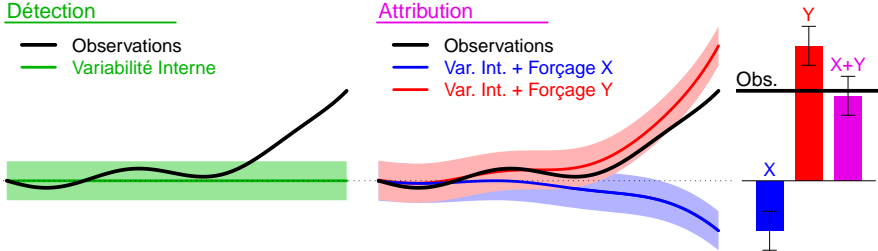
Exemple schématique d'un changement **déTECTÉ** et **attribué** aux 2 causes X et Y.

Détection

— Observations
— Variabilité Interne

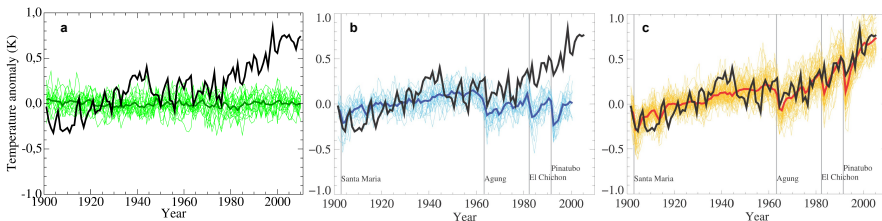
Attribution

— Observations
— Var. Int. + Forçage X
— Var. Int. + Forçage Y



D&A “qualitative” – Exemple de la T globale

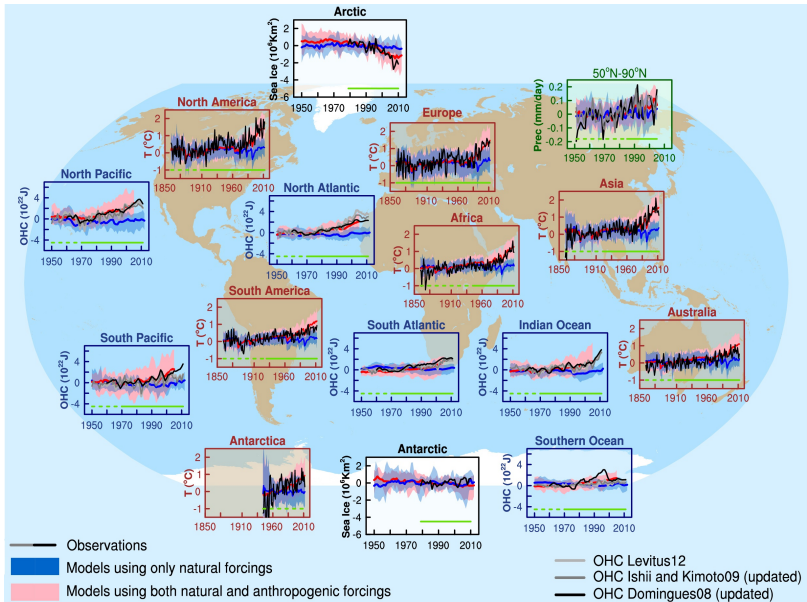
Le signal observé de T globale n'est pas expliqué par la **variabilité interne**, ni par le seul ajout des **causes naturelles** (solaire, volcans), mais le devient avec l'ajout des **causes anthropiques** (GES, aérosols) *.



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.

D&A “qualitative” – Exemples régionaux



Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Fig. 10.21.

D&A : formalisme statistique traditionnel

Hypothèse 1 (additivité) : on écrit que l'observation Y_ℓ ($Y_{s,t}$) est égale à sa moyenne m_ℓ + la variabilité interne ε_ℓ + la somme des réponses $X_\ell^{(i)}$ aux forçages externes i .

Hypothèse 2 : on considère les $X_\ell^{(i)}$ connues* à un facteur d'amplitude β_i près.

Hypothèse 3 : on considère la matrice de covariance C de ε_ℓ connue*.

Modèle statistique standard (régression linéaire généralisée)

$$Y_\ell = m_\ell + \sum_{i=1}^N \beta_i X_\ell^{(i)} + \varepsilon_\ell$$

→ On estime les β_i par *Optimal Fingerprinting* : $\hat{\beta} = (X' C^{-1} X)^{-1} X' C^{-1} Y$.

→ On teste les β_i :

Détection → $H_0 : \beta = 0_N$ vs. $H_1 : \beta \neq 0_N$ (on cherche à **rejeter H_0**).

Attribution, cond. suffisante → $H_0 : \beta = 1_N$ vs. $H_1 : \beta \neq 1_N$ (on cherche à **accepter H_0**).

Attribution, cond. nécessaire → $H_0 : \beta_i = 0$ vs. $H_1 : \beta_i \geq 0$ (on cherche à **rejeter H_0**).

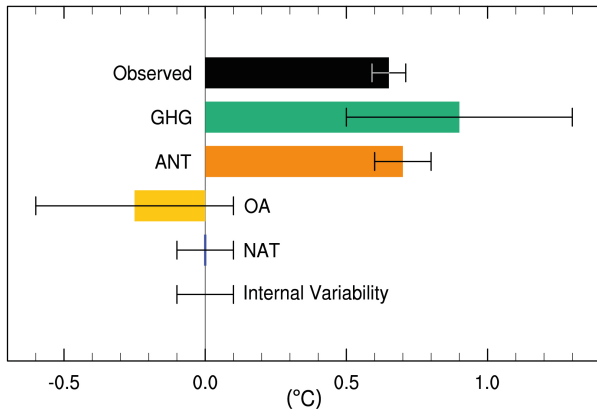
* i.e. donnée(s) par les modèles de climat.

D&A : résultat majeur

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

= ANT [0.6 à 0.8] + NAT [-0.1 à 0.1] + ε [-0.1 à 0.1]

= GHG [0.5 à 1.3]* + OA [-0.6 à 0.1]* + NAT [-0.1 à 0.1] + ε [-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

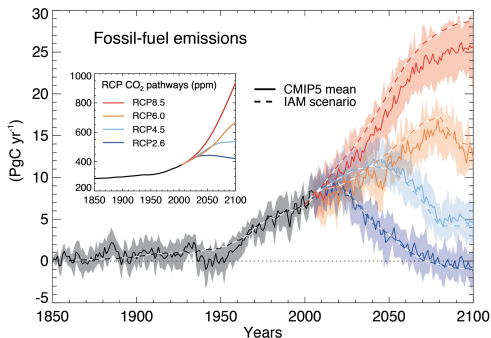
À quoi ressemble un climat plus chaud ?

Un mot sur les événements extrêmes

Quels scénarii 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**.

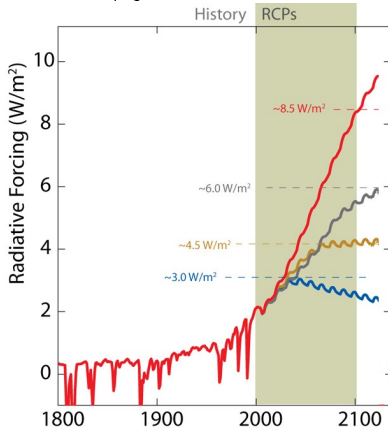
Scénarii de concentrations & émissions compatibles



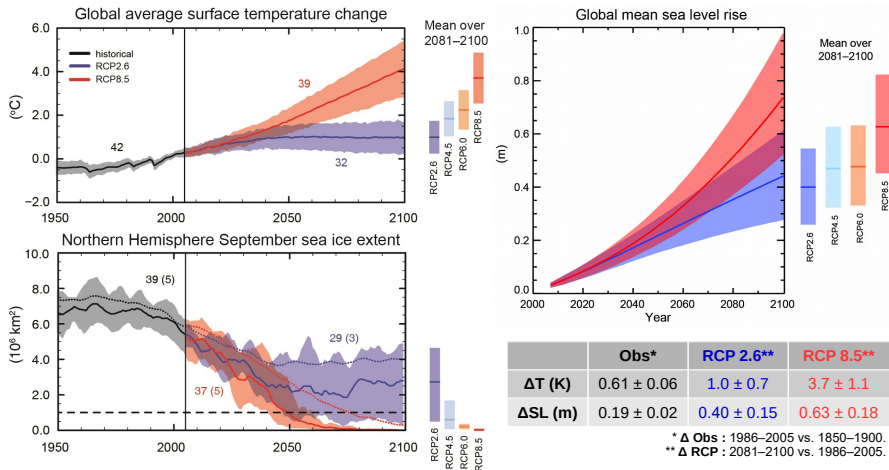
Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Figs. TS19.

Source : Meinhausen et al. (2011). →

Forçage radiatif résultant



Et selon le scénario, un climat à la carte



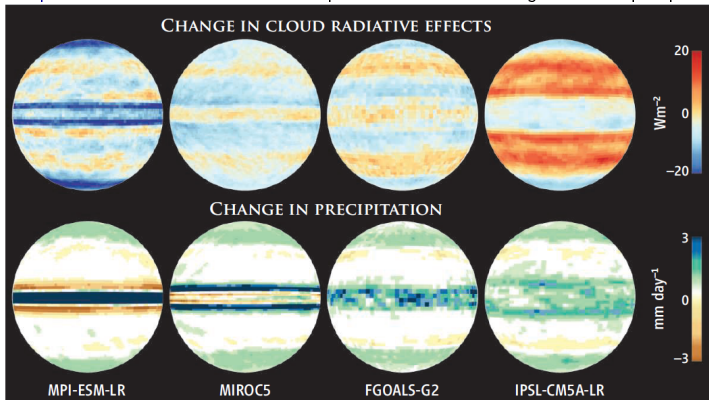
Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Figs. SPM7 & SPM9 et Table TS1.

Pour un scénario donné, la fourchette est due à deux choses :
 l'incertitude de **modélisation** et la **variabilité interne**.

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**.

Exemple des Δ CRE et Δ P simulés par 4 GCMs en configuration aqua-planète

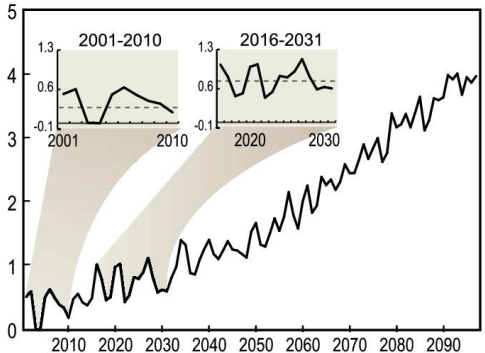
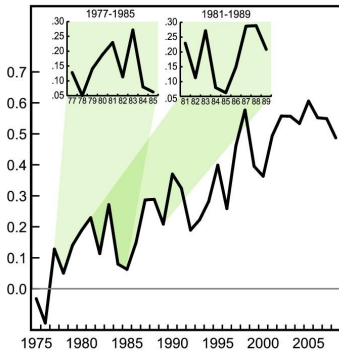


Source : Stevens and Bony (2013).

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.

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).

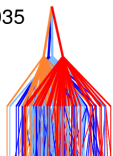
* Sur cette période la tendance de T_s est estimée à $+0.05$ $[-0.05$ à $+0.15]$ °C/décennie. Elle est donc cohérente avec 0, mais aussi avec la tendance 1951–2012 ($+0.12$ $[+0.08$ à $+0.14]$).

Décomposition des incertitudes – Exemple de T_s

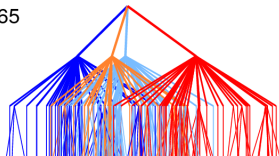
Cascade of Uncertainty in CMIP5

Figure created by Ed Hawkins, 2014

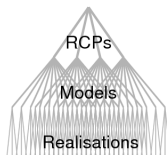
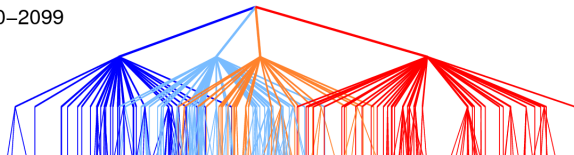
2016–2035



2046–2065



2080–2099



RCP 8.5
RCP 6.0
RCP 4.5
RCP 2.6

Le poids relatif
des 3 sources
d'incertitude
dépend de
l'échéance.

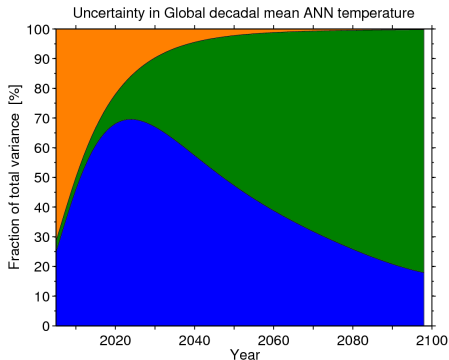
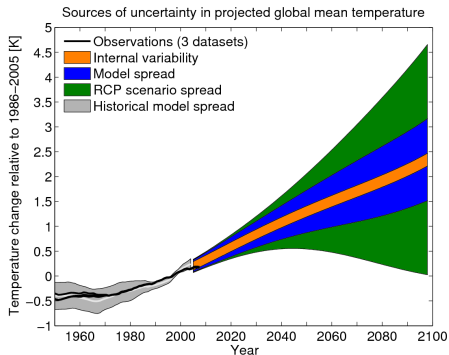
Global temperature change (relative to pre-industrial) [°C]

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

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.



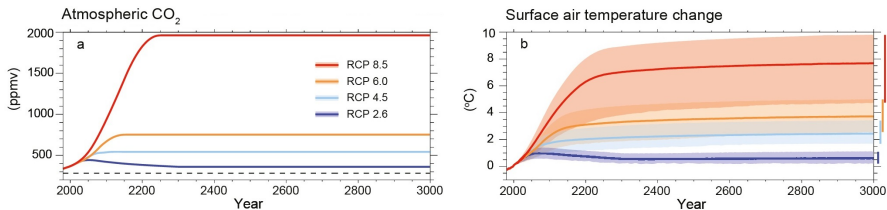
Figures de [E. Hawkins](#), à retrouver sur son [blog](#).

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).

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, [pdf](#)).

Changement climatique observé

Projections futures et incertitudes

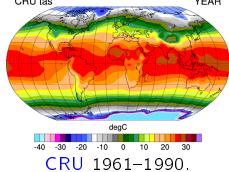
À quoi ressemble un climat plus chaud ?

Un mot sur les événements extrêmes

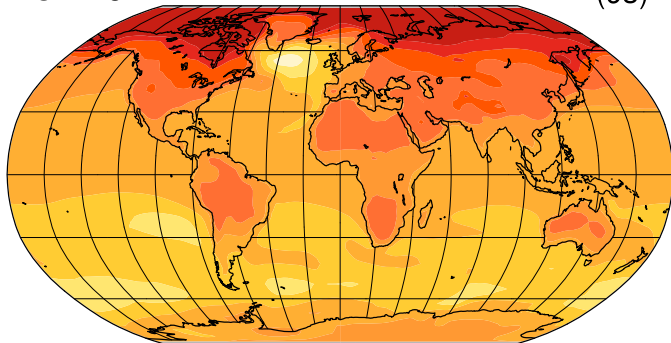
Géographie du réchauffement de surface

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

Rappel : état moyen
CRU tas YEAR



CMIP5 Changement normalisé par T globale (93)



°C par °C de réchauffement global



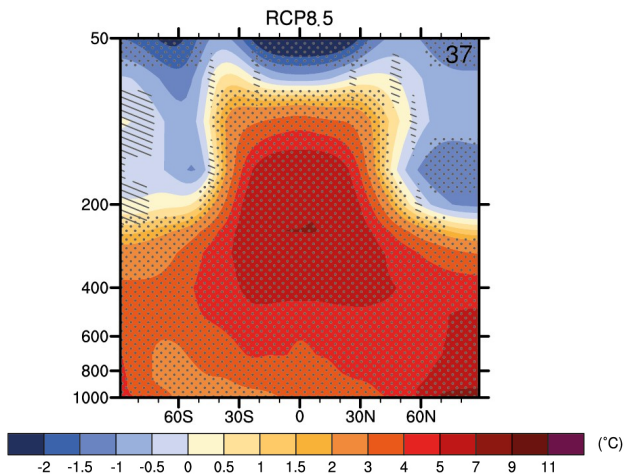
0 0.25 0.5 0.75 1 1.25 1.5 1.75 2

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

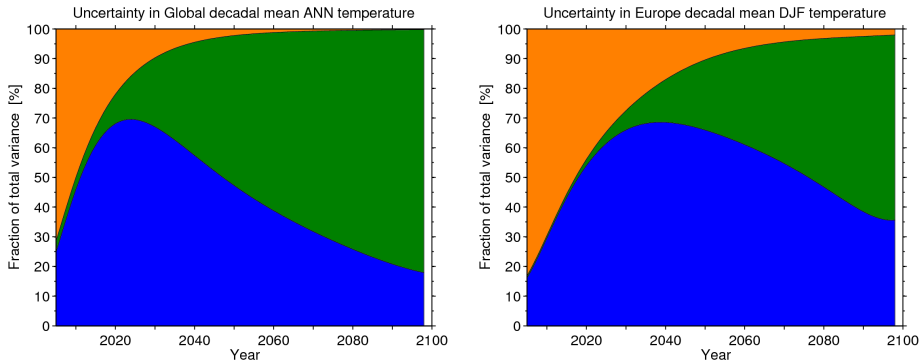
Tracé à partir d'une projection (par scénario) du modèle CNRM-CM5.

* 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 $\sim 7\%/K$.

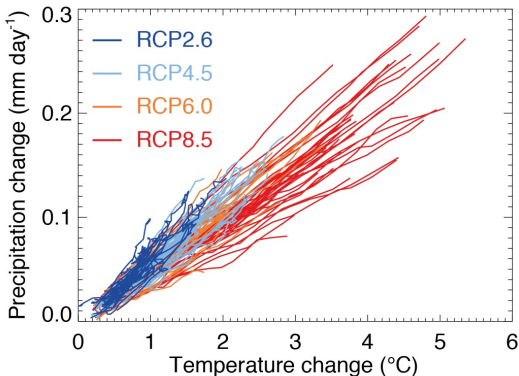
Conséquence 2 : Augmentations conjointes de l'évaporation et des précips en global.

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

Exemple de ΔP vs. ΔT_s

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

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



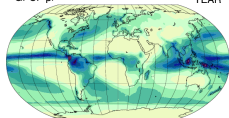
Géographie des changements de précipitations

► 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



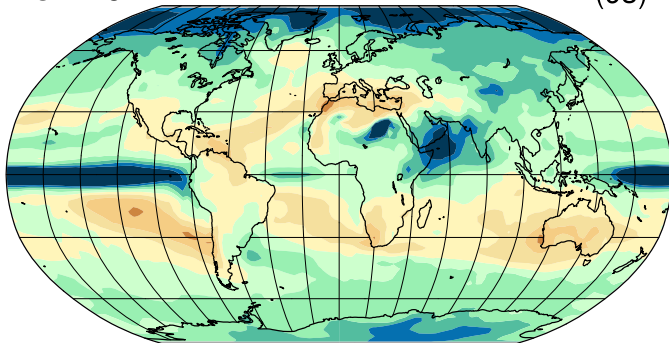
mm.day-1

GPCP 1981-2010.

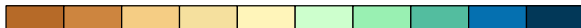
Changement normalisé par T globale

CMIP5

(93)



% par °C de réchauffement global



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

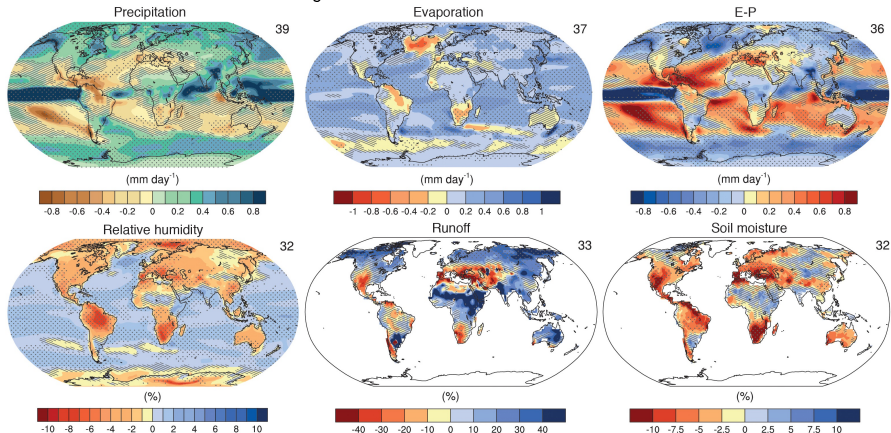
Tracé à partir de 93 projections CMIP5 (multi-modèle et multi-scénario).

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

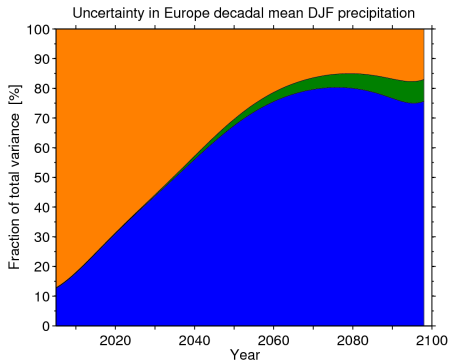
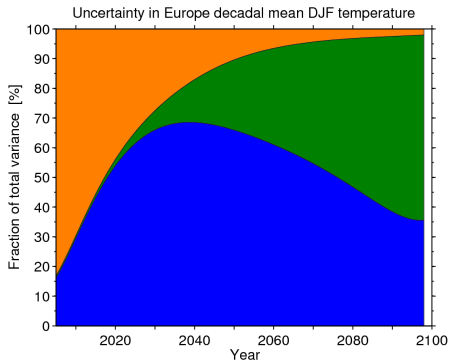
Tracé à partir d'une projection (par scénario) du modèle CNRM-CM5.

* 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).

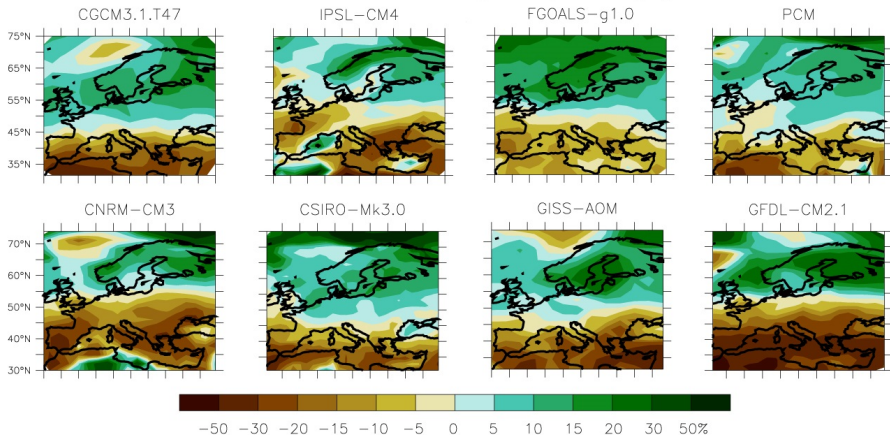


Figures de [E. Hawkins](#), à retrouver sur son [blog](#).

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).

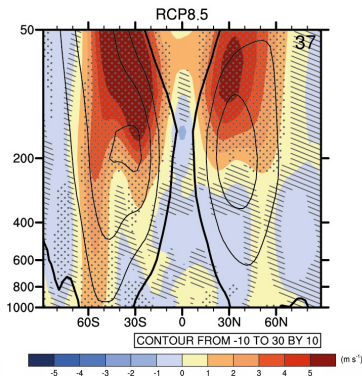
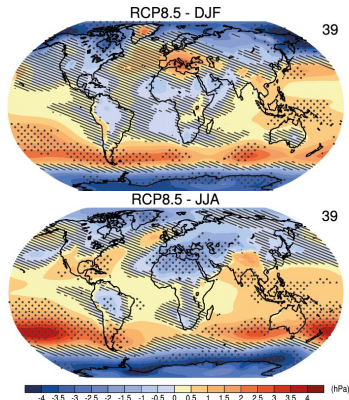
Changements de circulation atmosphérique

- ▶ **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.**
Lié à l'élévation de la tropopause ; déjà observé.
- ▶ **Décalage probable des courants-jets & rails dépressionnaires vers les pôles.**
Conséquence de Hadley. Moins clair dans NH car contrebalancé par Amplification Arctique.

Δ Pression surface
et Δ Vent zonal

2081–2100
vs.
1986–2005

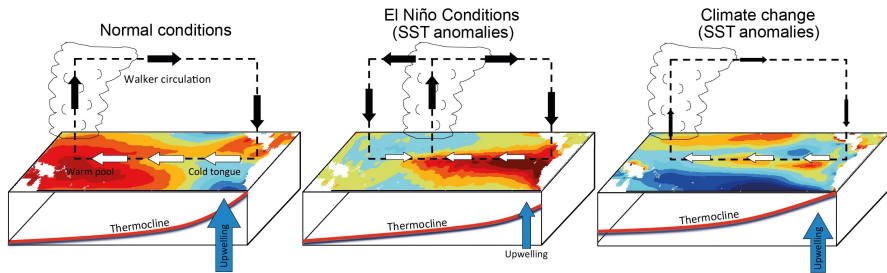
RCP8.5
($\Delta T_s \sim 4$ K)



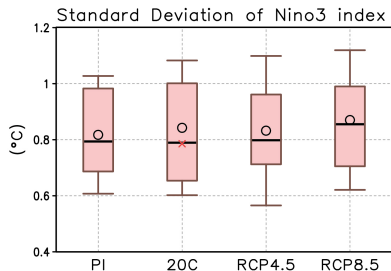
IPCC AR5 (2013)
Fig. 12.18 & 12.19.

Changements dans l'ENSO

Rappel : ENSO 1^{er} 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 l'océan

► Acidification.

Dissolution du CO_2 atmosphérique : $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{CO}_3^{2-} + 2\text{H}^+$

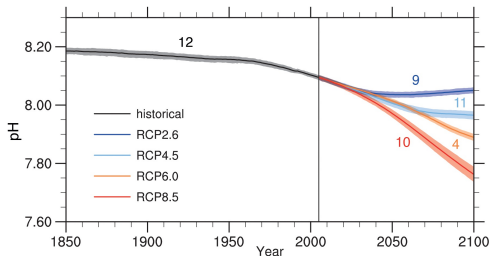
et rappel : $\text{pH} = -\log_{10}[\text{H}^+]$.

► Ralentissement très probable de la circulation thermohaline.

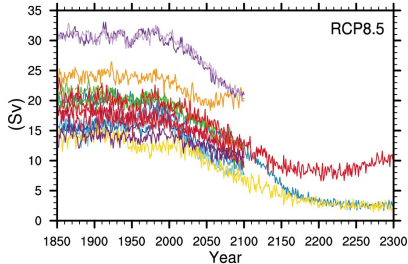
Via l'augmentation de stratification de l'océan. Pas de signal encore observé.

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

Global ocean surface pH



Atlantic Meridional Overturning Circulation at 30°N



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

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

Les questions qu'on nous pose

Y a-t-il de plus en plus d'événements extrêmes ?

Sont-ils de plus en plus intenses ?

Est-ce la faute du réchauffement climatique ? De l'Homme ?

Comment est-ce que tout ça va évoluer ?

—

Il n'existe pas de "mesure globale" des événements extrêmes.

→ Il faut s'interroger par **type d'événements** (ex. *les canicules, les cyclones, etc.*), voire par **événement singulier** (ex. *la canicule 2003 en France, l'ouragan Sandy, etc.*).

Les questions qu'on se pose

À quoi s'attend-t-on pour tel type d'événement ?

Fréquence, intensité, caractéristiques spatio-temporelles.

Qu'observe-t-on déjà ?

—

Quelle est la probabilité d'occurrence de tel événement ?

Comment a-t-elle évolué ? Comment va-t-elle évoluer ?

Comment aurait-elle évolué dans un monde sans forçage anthropique ?

Qu'est-ce qu'un changement de climat ?

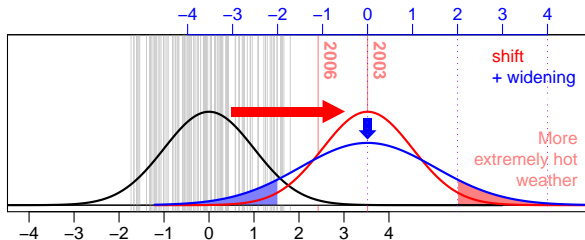
Rappel : le climat est la distribution de probabilité de la météo.

→ Changer de climat, c'est modifier la proba de tous les évé. météo.

Extrêmes de température

Un décalage vers un climat + chaud rend les **extrêmes chauds + probables/chauds**, et les **extrêmes froids – probables/froids**.

Exemple des T été en Europe

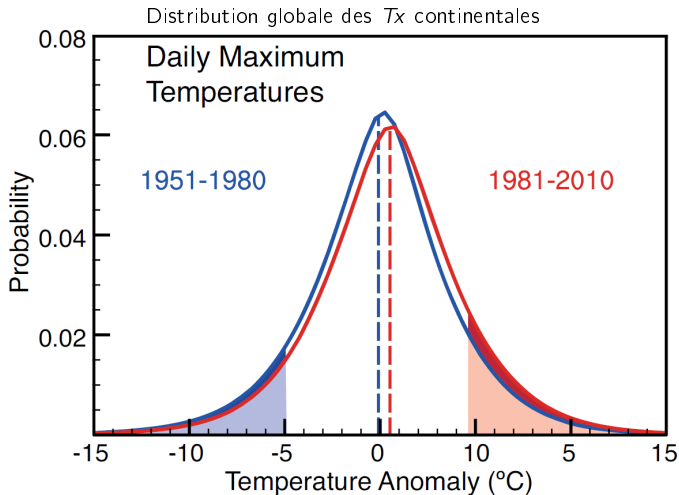


Tracé à partir des données CRU.

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

Extrêmes de température – Distribution

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

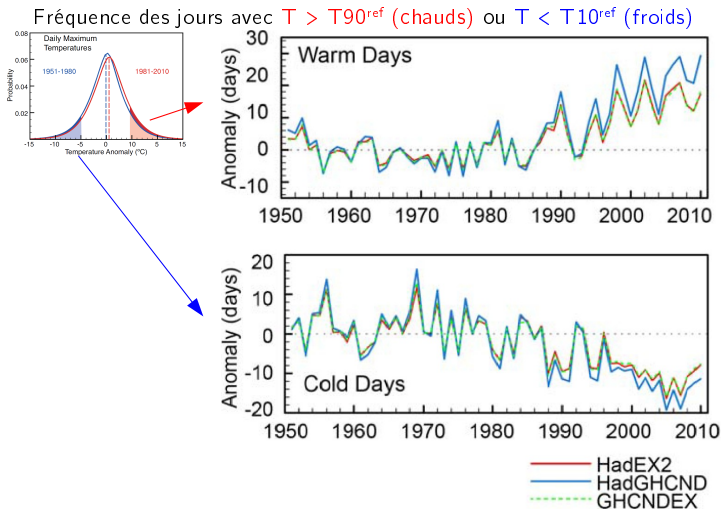


Source : IPCC AR5 (2013) FAQ 2.2 Fig. 1.

Extrêmes de température – Observations

► **Jours chauds** plus probables, **jours froids** moins probables.

Transposable aux records, aux vagues de chaleur, aux vagues de froid, etc.

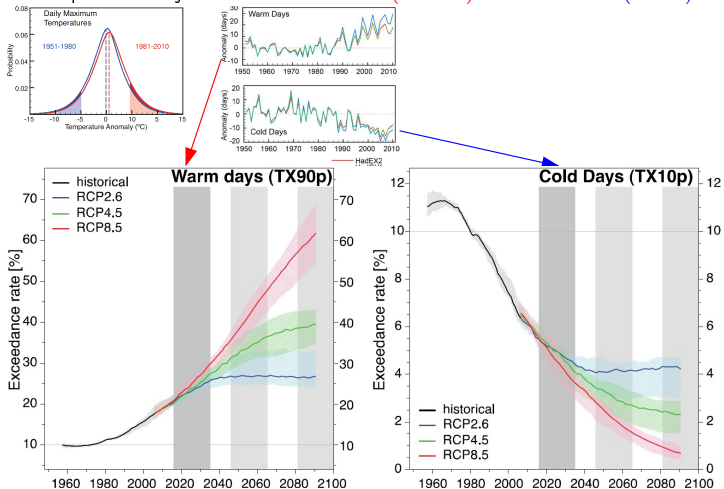


Source : IPCC AR5 (2013) FAQ 2.2 Fig. 1 & Fig. 2.32.

Extrêmes de température – Projections

- **Jours chauds** plus probables, **jours froids** moins probables..
Transposable aux records, aux vagues de chaleur, aux vagues de froid, etc.

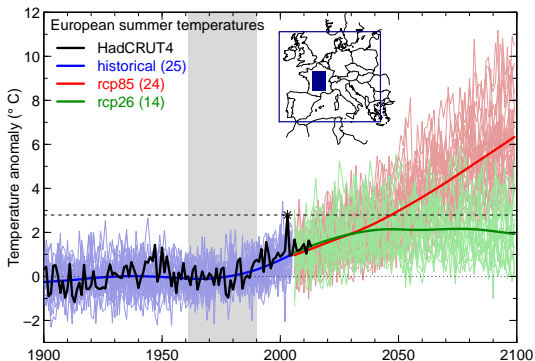
Fréquence des jours avec $T > T_{90}^{ref}$ (chauds) ou $T < T_{10}^{ref}$ (froids)



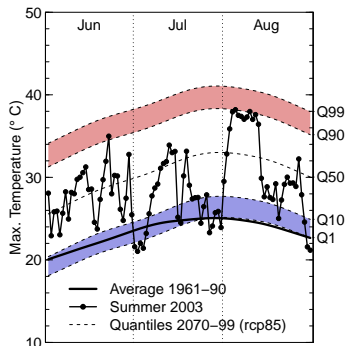
Un été 2003 tous les ans ?

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

- ▶ Une T saisonnière Europe dans la moyenne d'ici 2050 en **scénario haut**.
MAIS toujours élevée en 2100 en **scénario bas**.
- ▶ Certaines T quotidiennes FR encore *anormales* en 2100 en scénario haut.



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



Voir aussi : [ClimatHD](#), outil de visualisation de Météo-France.

Peut-on attribuer un événement singulier ?

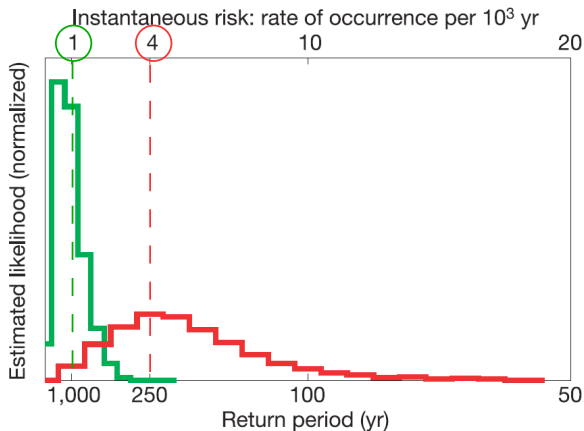
→ Dire qu'un événement météo est causé par le CC est un non-sens.
En revanche on peut estimer comment sa proba d'occurrence a changé.

Exemple de l'été 2003

Méthode : estimer la proba d'une canicule type 2003 via un modèle **avec** et **sans** forçages anthropiques.

Résultat : proba **naturelle** multipliée par 4 [2–10]* par **facteurs anthropiques**.

Source : Stott et al. (2004).

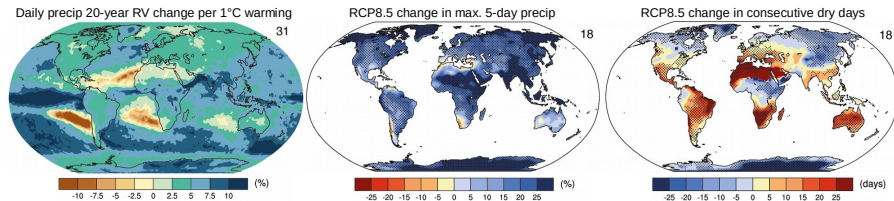


* Attention, ces chiffres dépendent de la définition de l'événement (JJA Europe dans cette étude).

Extrêmes hydrologiques

- ▶ Au 1^{er} 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.

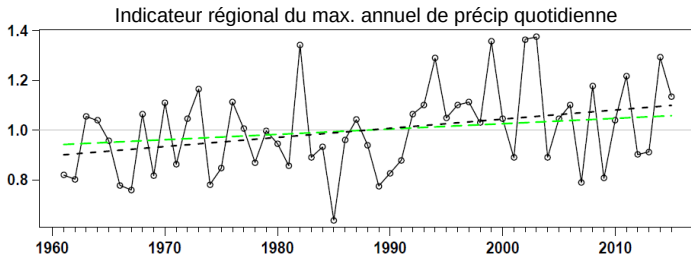
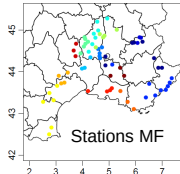
- ▶ **Précipitations intenses** : **augmentation** projetée & partiellement observée, empreinte anthropique détectée sur certains événements (e.g. Pall et al. (2011)). En revanche pas de signal clair sur les crues.
- ▶ **Sécheresses météorologiques** : **augmentation probable** dans certaines régions (dont Europe méridionale), mais pas de signal détecté (Dai et al. (2011 vs. 2004)).

Exemple des précips intenses en France

- ▶ Vu le caractère petite échelle de la précip, il est nécessaire d'agréger spatialement l'information pour chercher d'éventuelles tendances.

Méthodes statistiques d'agrégation \pm intelligentes.

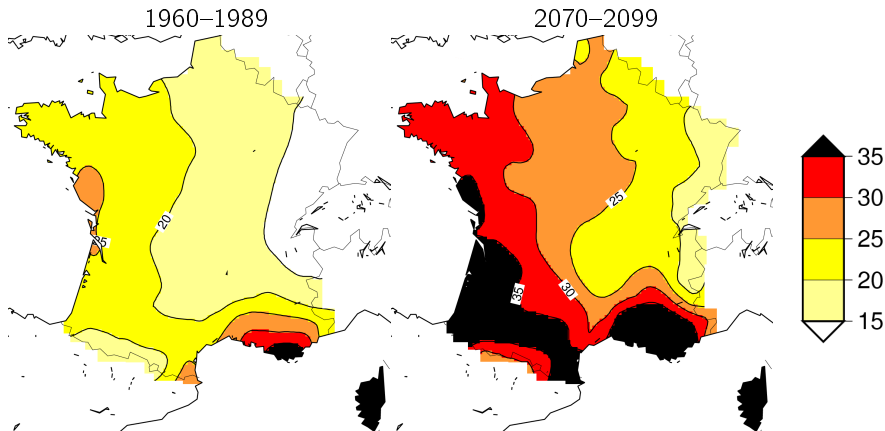
- ▶ On détecte une augmentation des extrêmes du SE de la France.
 - Tendence observée : ~ 22 [8 à 36] % depuis 1960, pour $\Delta T \sim 1.5$ K.
 - Supérieur au **taux de Clausius-Clapeyron** mais cohérent vue l'incertitude.



Source : Ribes et al. (in prep.).

Exemple des sécheresses météo en France

- Augmentation du nombre maximum de jours secs consécutifs en été.



Simulation du modèle du CNRM après calibration statistique en scénario équivalent au RCP8.5.
Source : [Rapport final](#) du projet IMFREX.

—
Voir aussi le [rapport final](#) du projet CLIMSEC, et le [portail DRIAS](#) pour plus d'informations sur les projections climatiques en France.

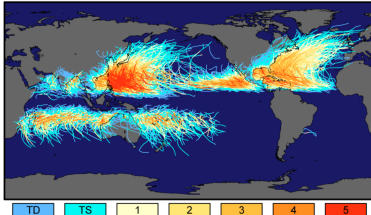
Cyclones et tempêtes

Cyclones tropicaux : se forment sous certaines conditions atmosphériques et océaniques, puis puisent leur énergie de la surface océanique.

Tempêtes extra-tropicales : origine et énergie principalement atmosphérique.

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

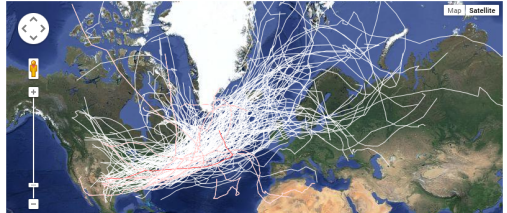
Tracks and Intensity of All Tropical Storms



Saffir-Simpson Hurricane Intensity Scale

Source : [NASA Earth Observatory](#).

Filter: storms : first season : last season

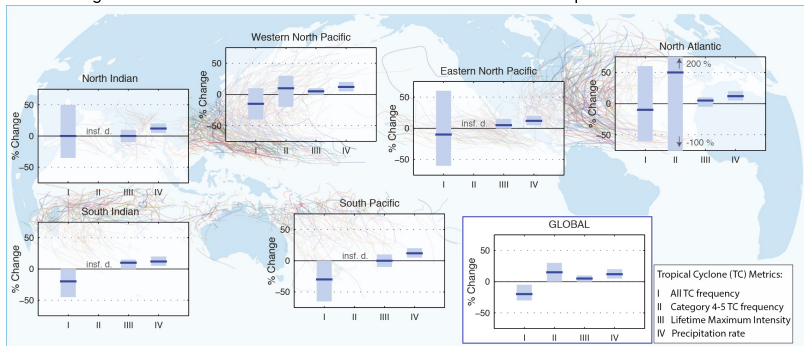


Source : [Atlas](#) de l'Université de Reading.

Cyclones tropicaux

- ▶ **Diminution** probable de la fréquence globale des cyclones.
- ▶ **Augmentation** probable de la fréquence des cyclones les plus forts.
- ▶ **Augmentation** probable des phénomènes associés : précip, surcôtes.
Exemple : probabilité inondations Sandy multipliée par 2 (Sweet et al. (2012)).
- ▶ Pas de tendance détectée à l'heure actuelle.
Forte variabilité, hétérogénéité des observations, insuffisances des modèles.

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



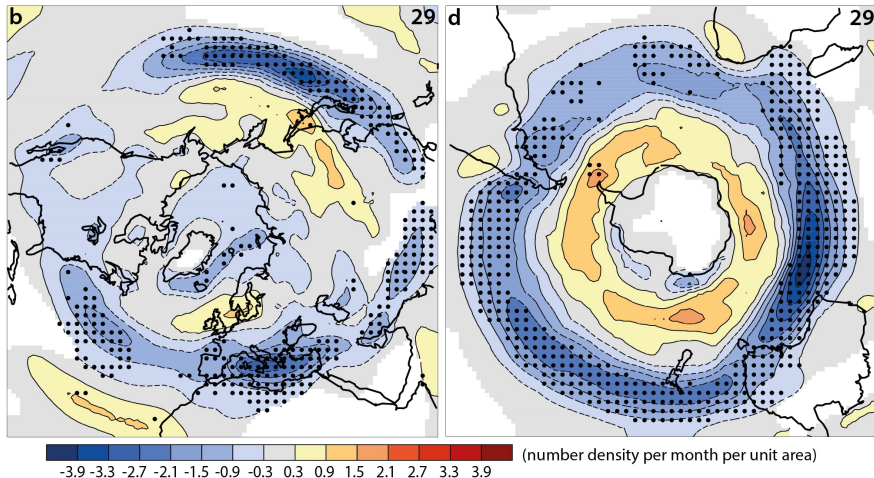
Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Fig. 14.17.

Tempêtes extra-tropicales

- Décalage probable vers les pôles, en lien avec les jets.

Signal observé mais pas d'attribution formelle aux forçages anthropiques (variabilité interne ?).

Changements de fréquence de tempêtes en scénario RCP8.5.



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

Résumé

Café du Commerce

Avec le réchauffement, il y aura plus d'extrêmes !

→ Vrai pour certains types d'événements, faux pour d'autres.

a) À quoi peut-on s'attendre ? b) Qu'observe-t-on déjà ?

1. Extrêmes de température (canicules, vagues de froid)

- a) Décalage vers un climat + chaud \Rightarrow + d'extrêmes chauds, - d'extrêmes froids.
- b) Déjà observé.

2. Extrêmes du cycle hydrologique (précipitations intenses, sécheresses)

- a) Intensification cycle hydrologique \Rightarrow + d'extrêmes pluvieux et secs.
- b) Partiellement observé pour précipitations intenses, pas de signal pour sécheresses.

3. Cyclones tropicaux (ouragans, typhons)

- a) Probablement - fréquents, mais + intenses (vents, précipitations, surcotes).
- b) Pas de tendance observée.

4. Tempêtes nord-atlantiques (cf. Xynthia)

- a) Probable décalage vers les pôles, incertitudes sur fréquence/intensité.
- b) Pas de tendance observée.

Références I

- ▶ J. Cattiaux, H. Douville, and Y. Peings, *European temperatures in CMIP5: origins of present-day biases and future uncertainties*, *Clim. Dyn.* **41** (2013), no. 11-12, 2889–2907.
- ▶ A. Dai, *Drought under global warming: a review*, *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change* **2** (2011), no. 1, 45–65.
- ▶ 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.
- ▶ A. Dai, K.E. Trenberth, and T. Qian, *A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming*, *J. Hydrometeor.* **5** (2004), no. 6, 1117–1130.
- ▶ D.R. Easterling and M.F. Wehner, *Is the climate warming or cooling?*, *Geophys. Res. Lett.* **36** (2009), no. 8.
- ▶ P. Pall, T. Aina, D.A. Stone, P.A. Stott, T. Nozawa, A.G.J. Hilberts, D. Lohmann, and M.R. Allen, *Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000*, *Nature* **470** (2011), no. 7334, 382–385.
- ▶ B. Stevens and S. Bony, *What are climate models missing*, *Science* **340** (2013), no. 6136, 1053–1054.
- ▶ P.A. Stott, D.A. Stone, and M.R. Allen, *Human contribution to the European heatwave of 2003*, *Nature* **432** (2004), no. 7017, 559–60.
- ▶ W. Sweet, C. Zervas, S. Gill, and J. Park, *Hurricane Sandy inundation probabilities today and tomorrow*, in *“Explaining Extreme Events of 2012 from a Climate Perspective”*, *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **94** (2013), no. 9, S17–S20.