

Changement climatique observé

Projections futures et incertitudes

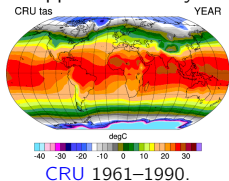
À quoi ressemble un climat plus chaud ?

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.

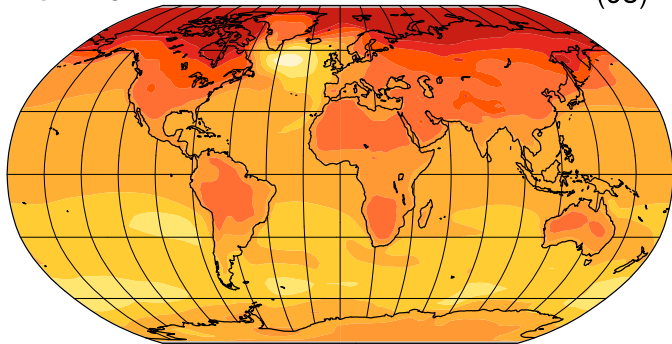
Rappel : état moyen



Changement normalisé par T globale

CMIP5

(93)



°C par °C de réchauffement global



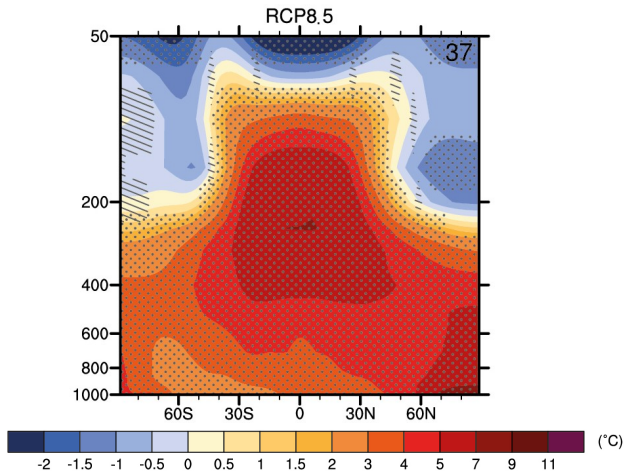
0 0.25 0.5 0.75 1 1.25 1.5 1.75 2

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

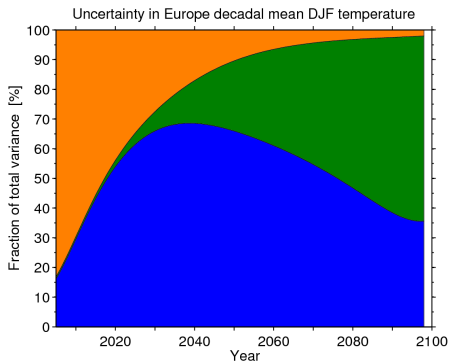
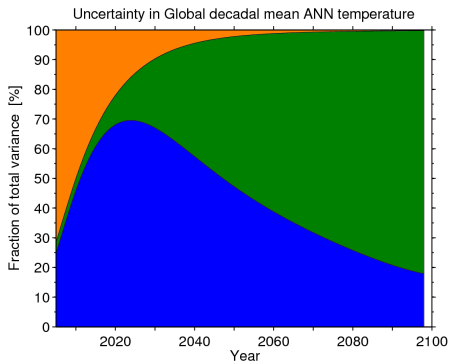
Tracé à partir d'une projection (par scénario) du modèle CNRM-CM5.

* 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 $\sim 7 \text{ \%}/\text{K}$.

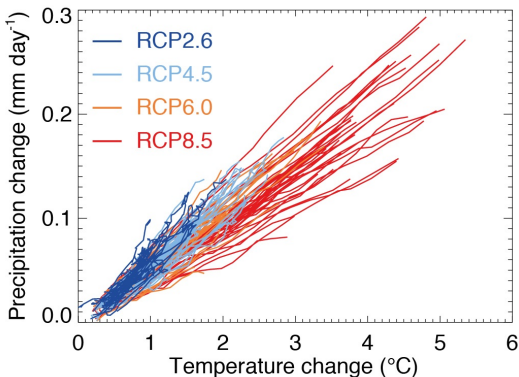
Conséquence 2 : Augmentations conjointes de l'évaporation et des précipits en global.

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

Exemple de ΔP vs. ΔT_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.



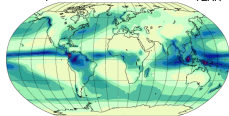
Géographie des changements de précipitations

► 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

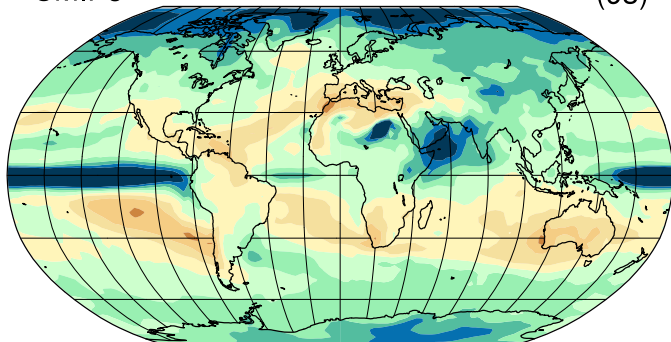


GPCP 1981–2010.

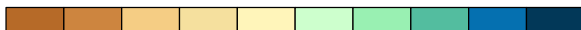
CMIP5

Changement normalisé par T globale

(93)



% par °C de réchauffement global



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

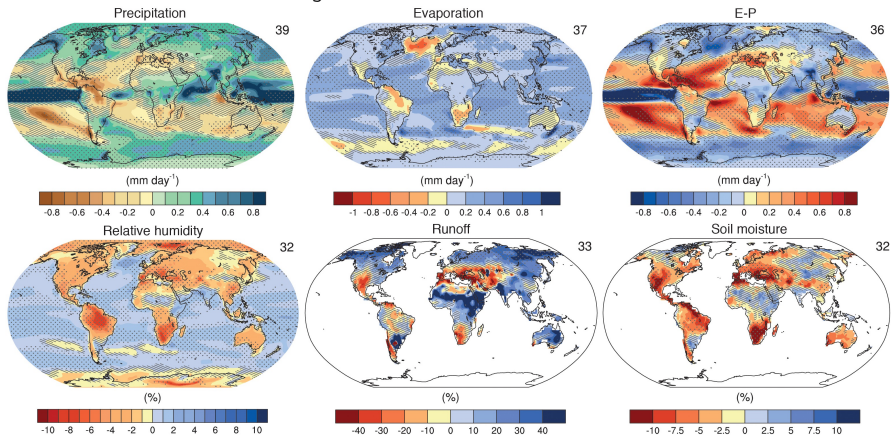
Tracé à partir de 93 projections CMIP5 (multi-modèle et multi-scénario).

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

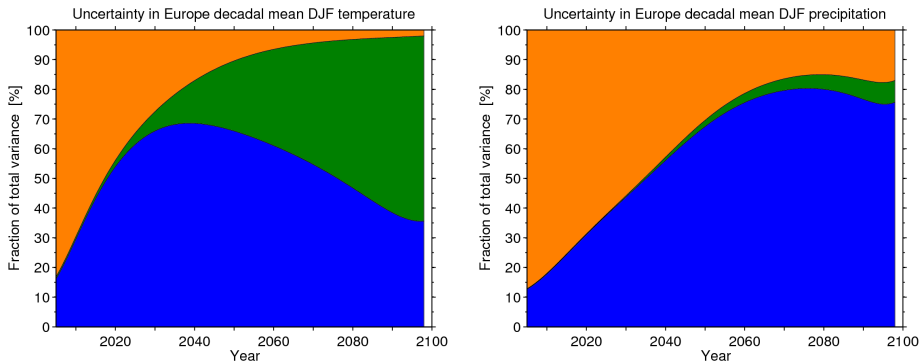
Tracé à partir d'une projection (par scénario) du modèle CNRM-CM5.

* 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).

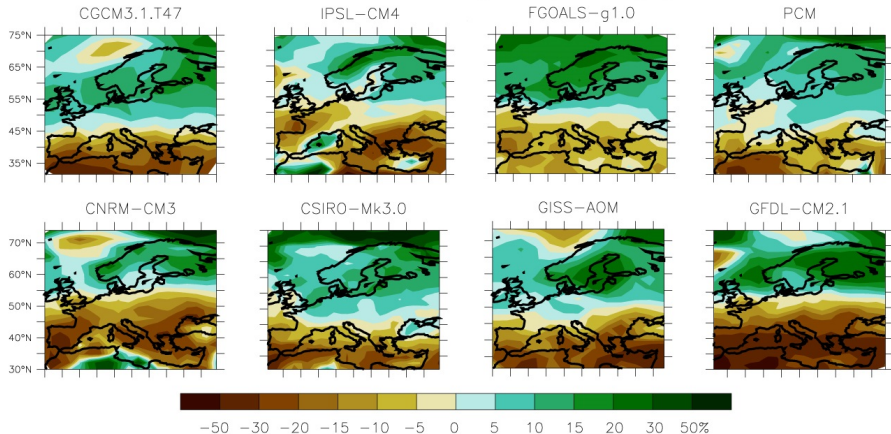


Figures de [E. Hawkins](#), à retrouver sur son [blog](#).

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).

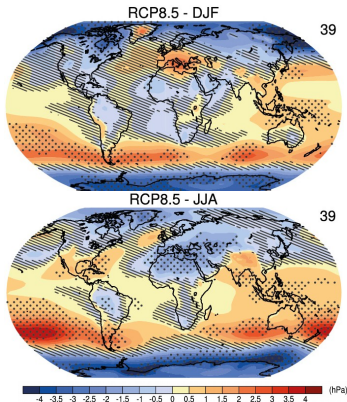
Changements de circulation atmosphérique

- ▶ **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.

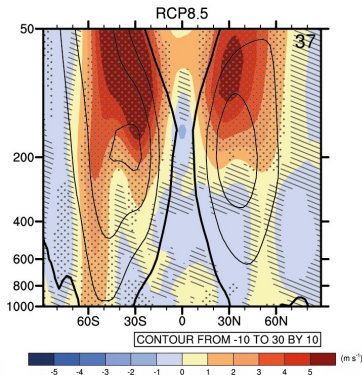
Δ Pression surface
et Δ Vent zonal

2081–2100
vs.
1986–2005

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



IPCC AR5 (2013)
Fig. 12.18 & 12.19.



Changements dans l'océan

► Acidification.

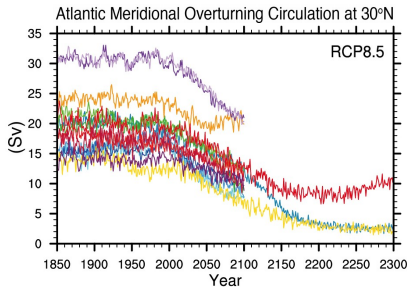
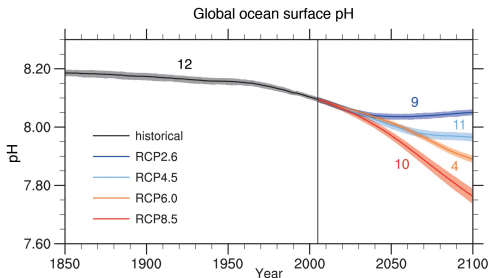
Dissolution du CO_2 atmosphérique : $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{CO}_3^{2-} + 2\text{H}^+$

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)



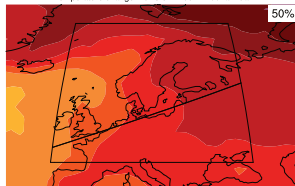
Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Fig. TS20 & 12.35.

Zoom sur l'Europe – Température RCP8.5

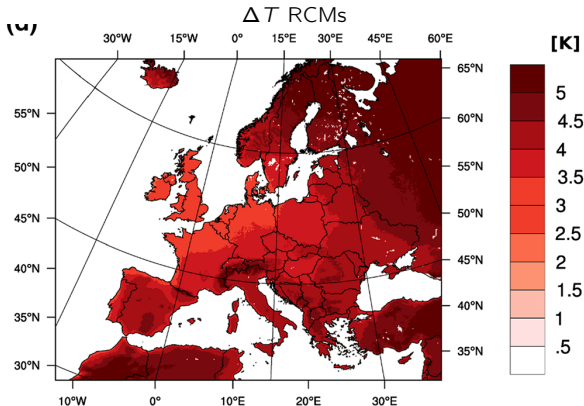
- **Régionalisation** des projections pour obtenir une résolution + fine.
Meilleure représentation du trait de côte ou des **reliefs** (ΔT + important).

Rappel : ΔT GCMs

Temperature change RCP8.5 in 2081-2100: annual



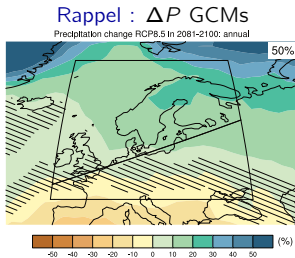
Source : IPCC AR5 (2013).
Médiane de 39 GCMs.
2081–2100 vs 1986–2005.



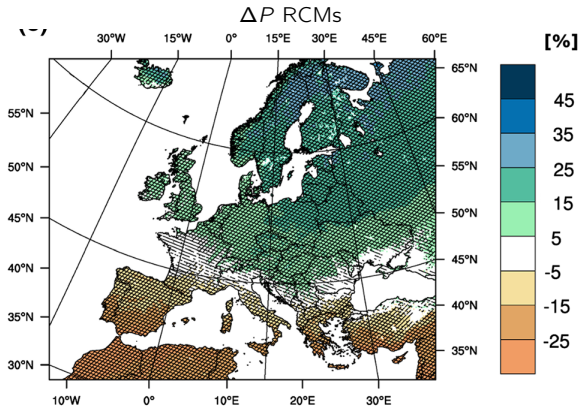
Source : Jacob et al. (2014).
Moyenne de 10 simulations basées sur 7 RCMs et 5 GCMs.
2071–2100 vs 1971–2000.

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.



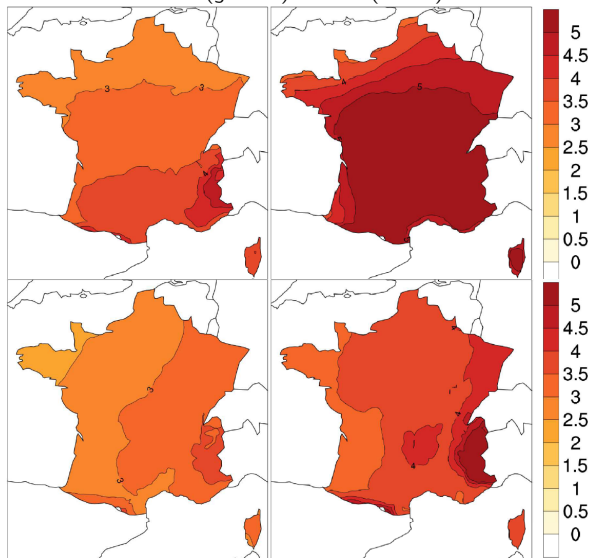
Source : Jacob et al. (2014).
Moyenne de 10 simulations basées sur 7 RCMs et 5 GCMs.
2071–2100 vs 1971–2000.

Zoom sur la France – Température RCP8.5

Été

P25 (gauche) et P75 (droite)

Hiver



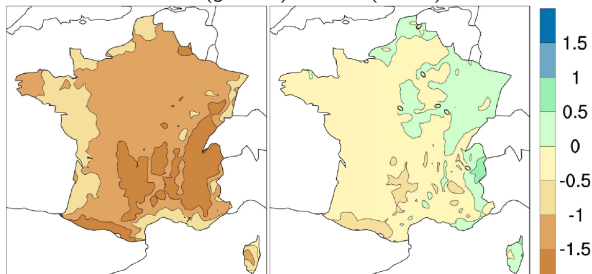
Source : Ouzeau et al. (2014).

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

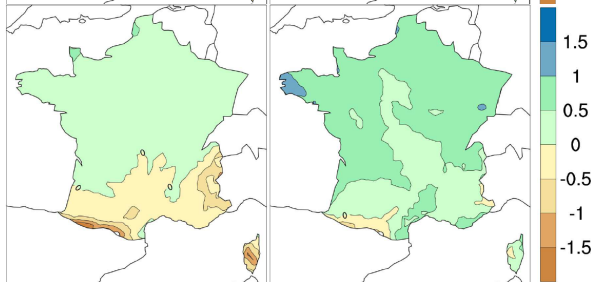
Zoom sur la France – Précipitations RCP8.5

Été

P25 (gauche) et P75 (droite)



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.

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

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

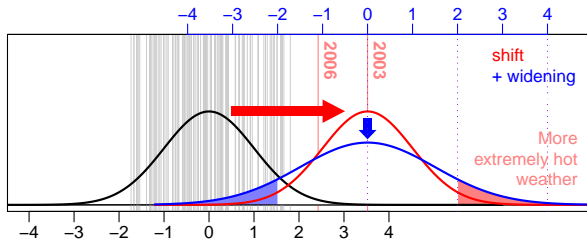
Rappel : le climat est la distribution de probabilité de la météo.

→ 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

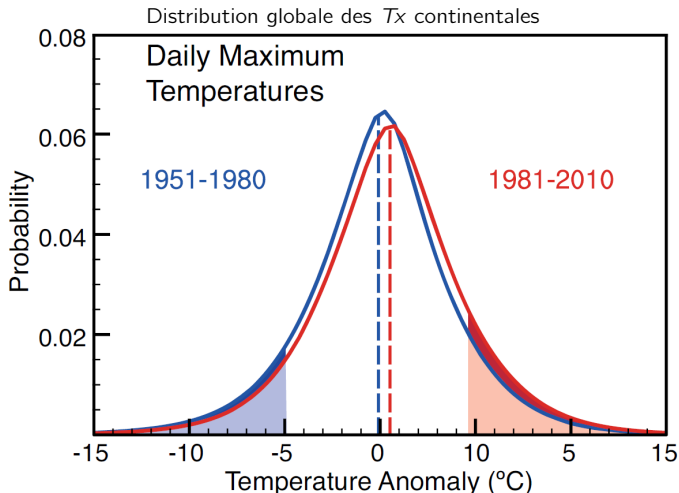


Tracé à partir des données CRU.

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** ↘).

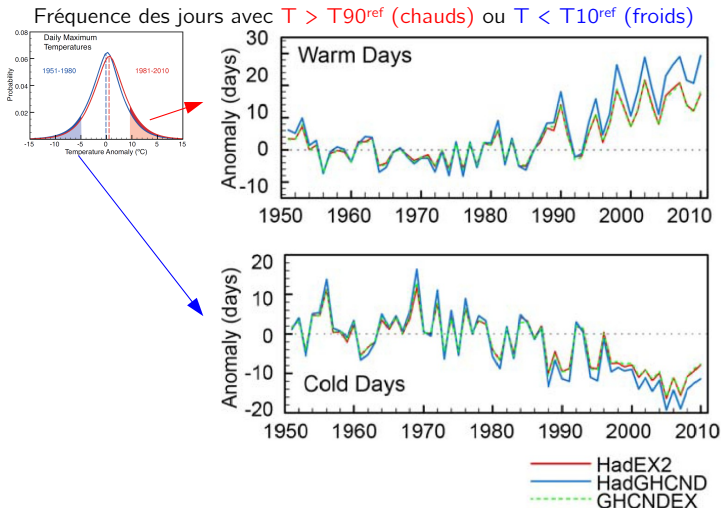


Source : IPCC AR5 (2013) FAQ 2.2 Fig. 1.

Extrêmes de température – Observations

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

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



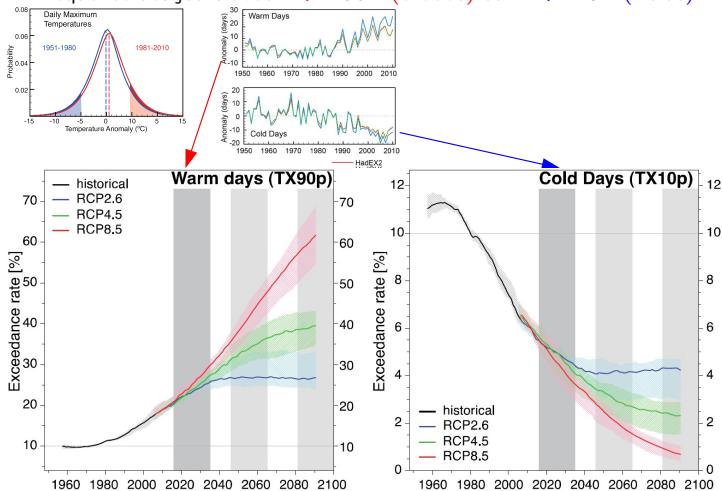
Source : IPCC AR5 (2013) FAQ 2.2 Fig. 1 & Fig. 2.32.

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)

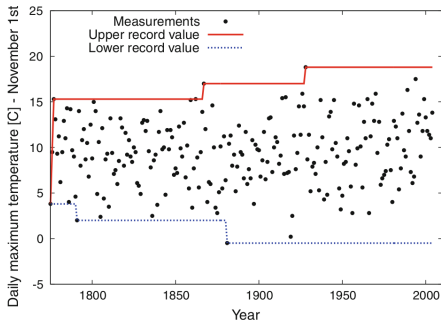


Source : IPCC AR5 (2013) FAQ 2.2 Fig. 1 & Fig. 2.32 & Fig. 11.17.

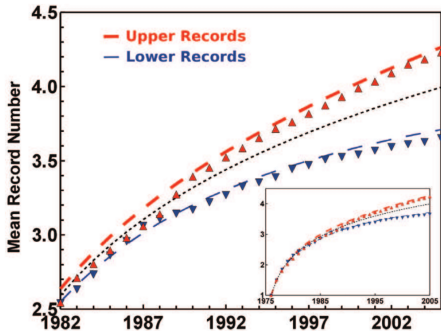
Records – Illustration

- ▶ La **probabilité** de battre le **record** l'année n vaut (en moyenne) $1/n$.
L'espérance du **nombre de records** battus entre l'année 1 et l'année n vaut donc : $e_n = \sum_{i=1}^n 1/i \rightarrow \ln(n) + \gamma$. (γ constante d'Euler).

Records de T le 1/11 à Prague



Moyenne européenne de e_n



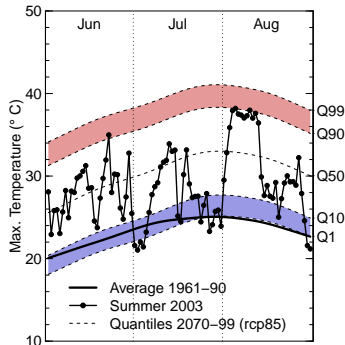
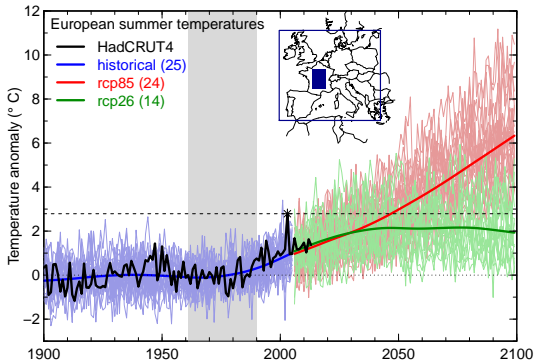
Source : Wergen and Krug (2010).

- ▶ On retrouve le comportement logarithmique sur e_n .
- ▶ On bat *significativement* plus de records **chauds** que **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 Spécial Climat* (2015).

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

Peut-on attribuer un événement singulier ?

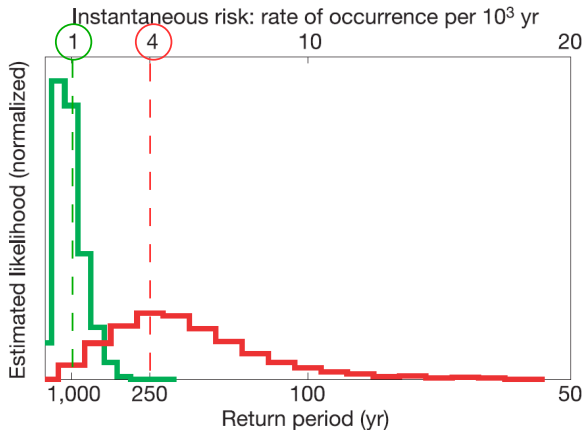
→ Dire qu'un événement météo est causé par le CC est un non-sens.
En revanche on peut estimer comment sa proba d'occurrence a changé.

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).

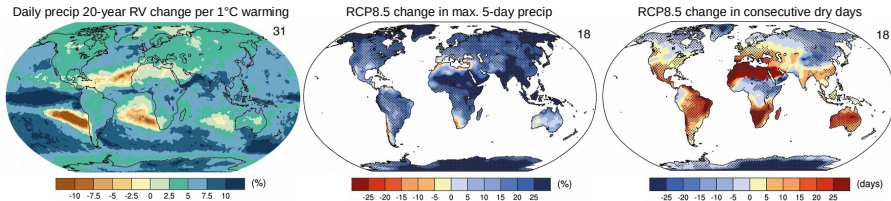


* Attention, ces chiffres dépendent de la définition de l'événement (JJA Europe dans cette étude).

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.

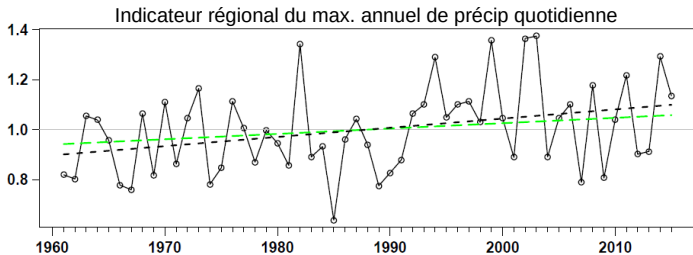
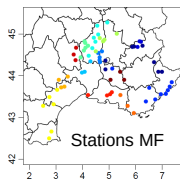
- ▶ **Précipitations intenses** : **augmentation** projetée & partiellement observée, empreinte anthropique détectée sur certains événements (e.g. Pall et al. (2011)). En revanche pas de signal clair sur les crues.
- ▶ **Sécheresses météorologiques** : **augmentation probable** dans certaines régions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

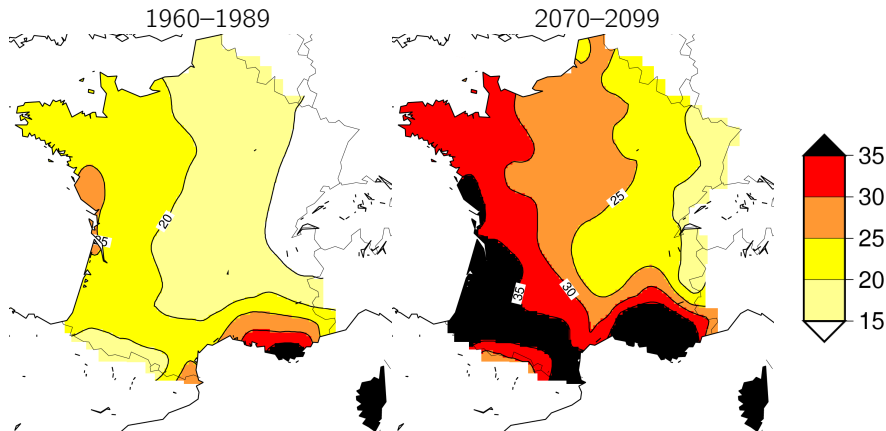
- ▶ On détecte une augmentation des extrêmes du SE de la France.
 - Tendence observée : ~ 22 [8 à 36] % depuis 1960, pour $\Delta T \sim 1.5$ K.
 - Supérieur au **taux de Clausius-Clapeyron** mais cohérent vue l'incertitude.



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.

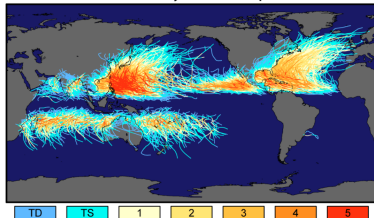
Cyclones et tempêtes

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

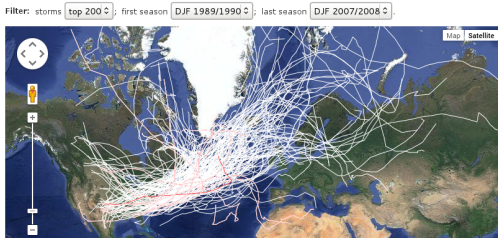
Tempêtes extra-tropicales : origine et énergie principalement atmosphérique.

—
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](#).

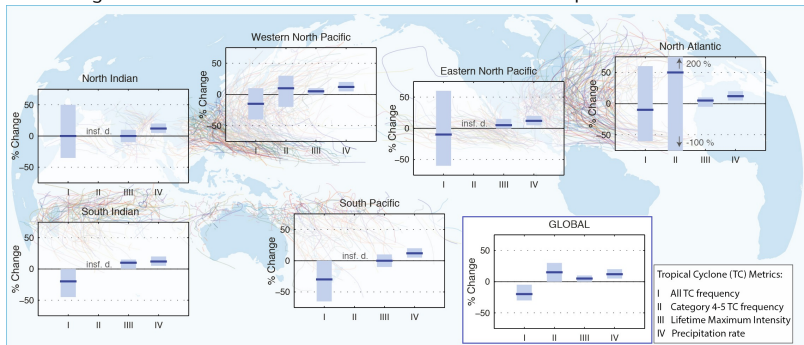


Source : [Atlas](#) de l'Université de Reading.

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 : précipis, 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.



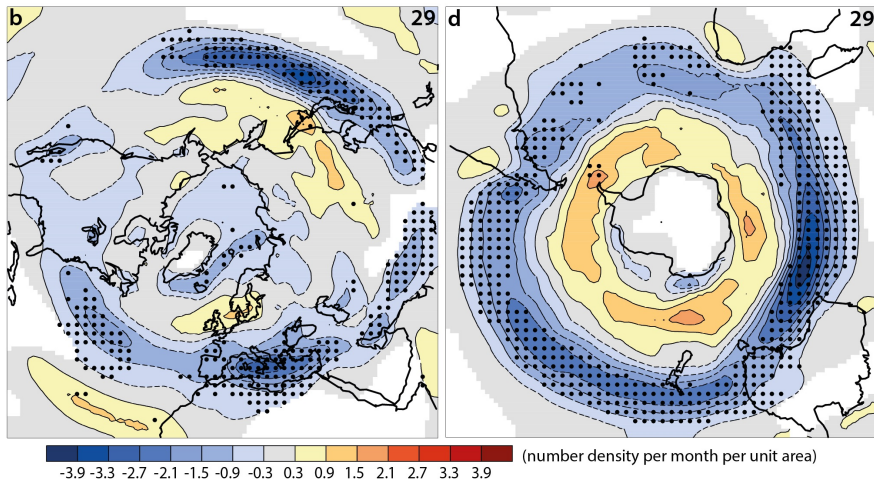
Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Fig. 14.17.

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 ⇒ + d'extrêmes chauds, – d'extrêmes froids.
- b) Déjà observé.

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

- a) Intensification cycle hydrologique ⇒ + 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

- ▶ 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.
- ▶ 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.
- ▶ 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.
- ▶ 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.

Références II

- ▶ D. Koch, M. Schulz, S. Kinne, C. McNaughton, J.R. Spackman, Y. Balkanski, S. Bauer, T. Berntsen, T.C. Bond, O. Boucher, et al., *Evaluation of black carbon estimations in global aerosol models*, *Atmos. Chem. Phys.* **9** (2009), no. 22, 9001–9026.
- ▶ M. Meinshausen, S.J. Smith, K. Calvin, J.S. Daniel, M.L.T. Kainuma, J.F. Lamarque, K. Matsumoto, S.A. Montzka, S.C.B. Raper, K. Riahi, A. Thomson, G.J.M. Velders, and D.P.P. van Vuuren, *The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300*, *Climatic Change* **109** (2011), no. 1, 213.
- ▶ 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.
- ▶ 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.
- ▶ 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.
- ▶ G. Wergen and J. Krug, *Record-breaking temperatures reveal a warming climate*, *Europhys. Lett.* **92** (2010), 30008.