

Système Climatique IENM 10/10 (2A)

Changement climatique actuel : conséquences « météo »

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

2021-22

Changement moyen en Europe (GCMs)

Descente d'échelle (régionalisation)

Variabilité « météo » et événements extrêmes

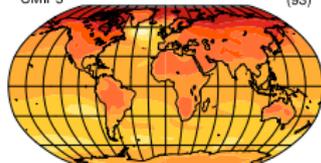
Projections GCMs en Europe – Température 1/2

- Réchauffement légèrement plus fort en Europe qu'en global.

Scaling entre 1 et 1.5 K/K.

Rappel : ΔT normalisé

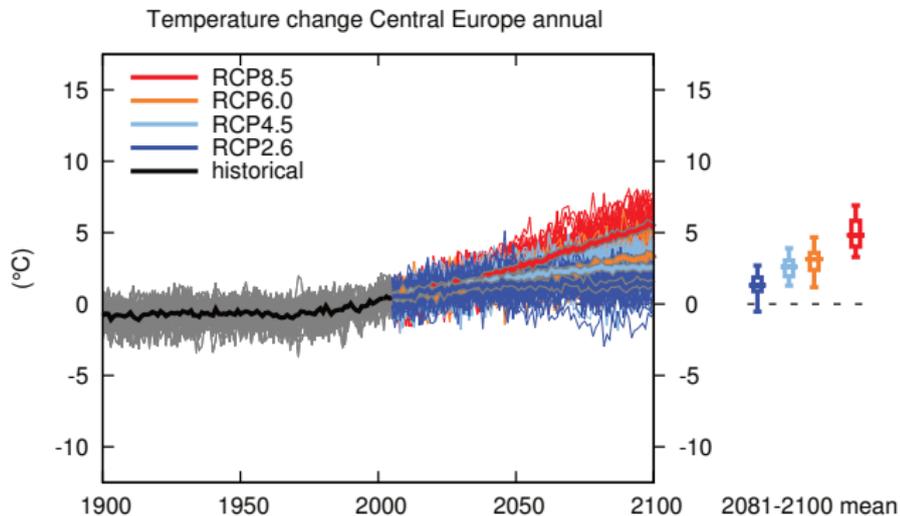
CMP5 (93)



°C par °C de réchauffement global



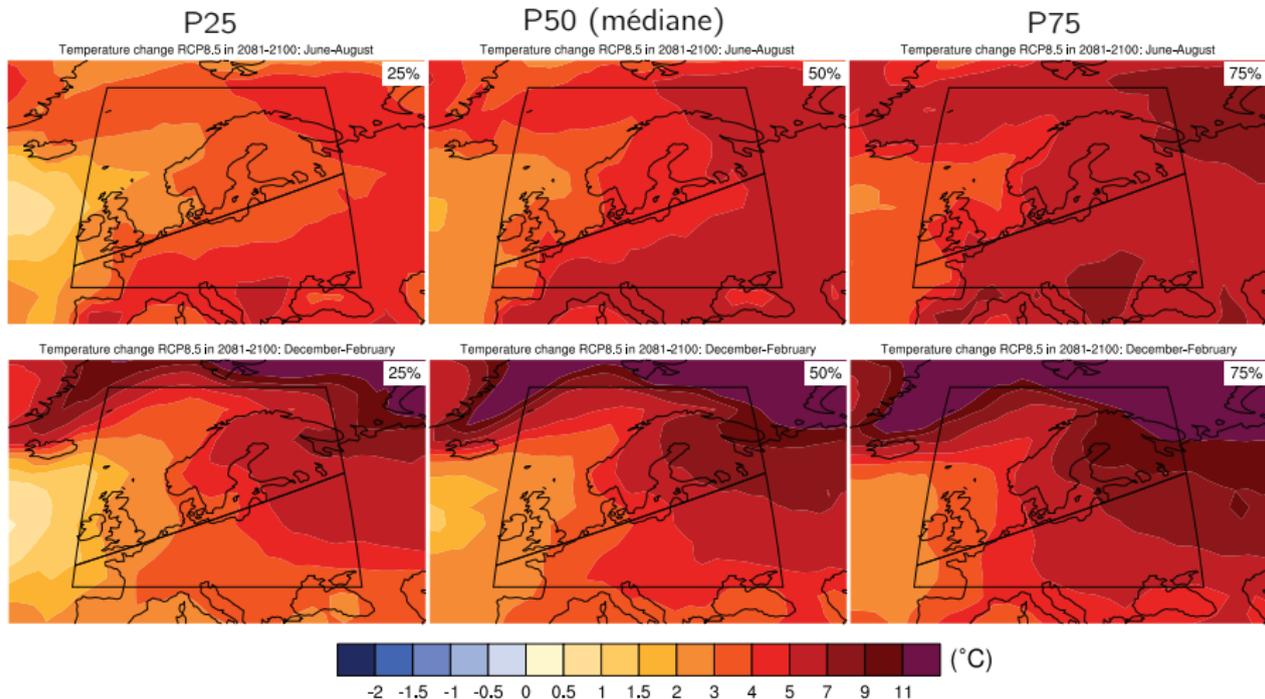
Boucher et al. (2015).



Source : Atlas régional IPCC AR5 (2013).

Projections GCMs en Europe – Température 2/2

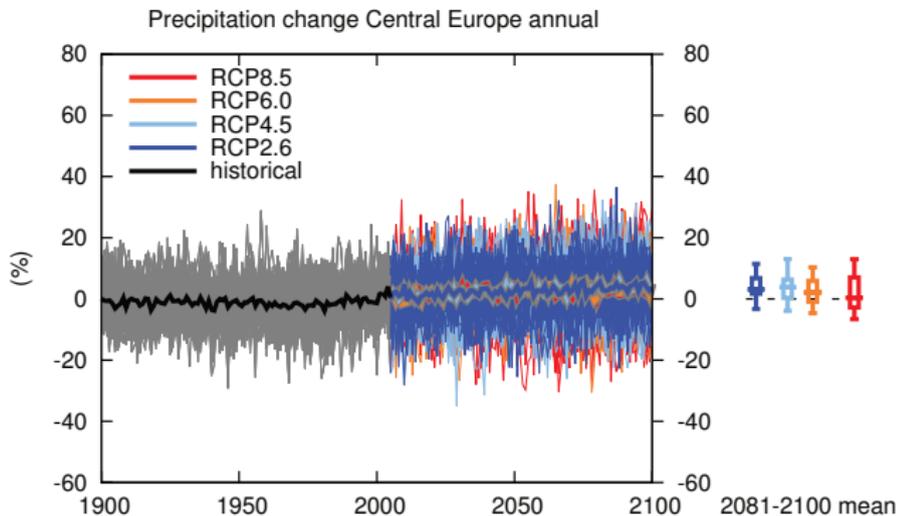
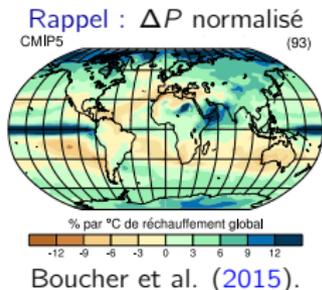
- ▶ *Pattern géographique* différent selon les saisons.
- ▶ France : réchauffement plus fort en **été** (haut) qu'en **hiver** (bas).



Source : Atlas régional IPCC AR5 (2013).

Projections GCMs en Europe – Précipitations 1/2

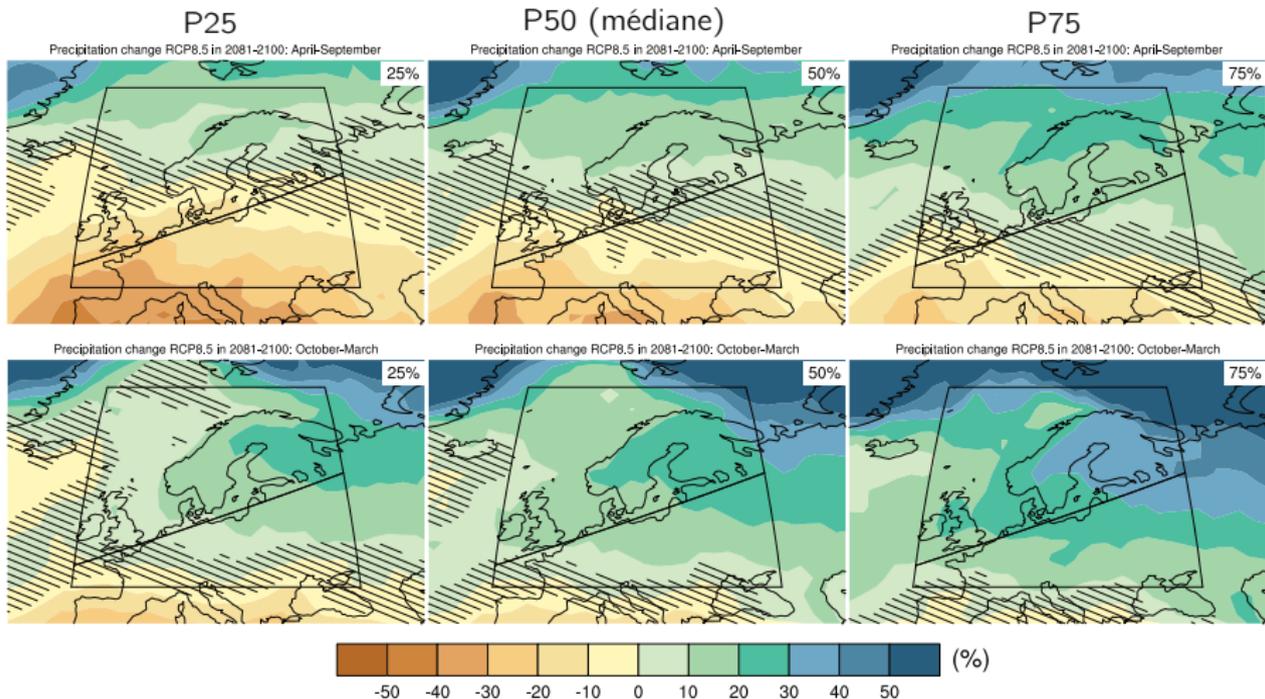
- Changements contrastés selon la saison / sous-région.
Compensation en moyenne sur l'année et l'Europe.



Source : Atlas régional IPCC AR5 (2013).

Projections GCMs en Europe – Précipitations 2/2

- ▶ Augmentation de P en hiver et au Nord ; diminution en été et au Sud.
- ▶ France ∈ zone de transition ; incertitude modèle importante (cf. cours n°9).



Source : Atlas régional IPCC AR5 (2013).

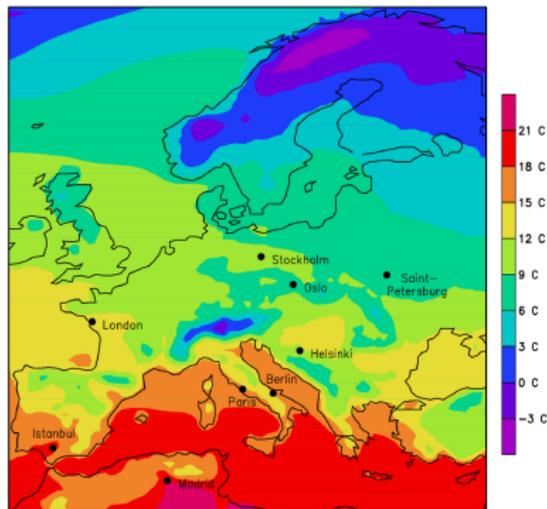
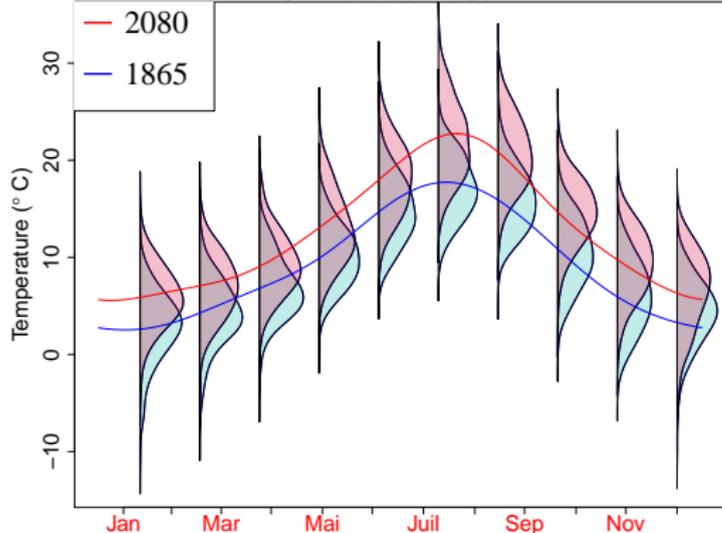
Réchauffement global vs. météo locale

- ▶ Au 1^{er} ordre, la distribution de T se décale (changement de **moyenne**).
- ▶ Au 2nd ordre, légers changements de **variance** (cf. suite).

→ On peut s'amuser à chercher des **analogues climatiques**, temporels (e.g. janvier devient mars) ou géographiques (e.g. Paris devient Rome)*.

* **Attention** : l'analogie demande de définir une distance, dont le résultat dépend fortement.

Climat toulousain



Gauche : PDF **pré-industrielle** et **future** (RCP8.5) des T quotidiennes au point de grille de Toulouse dans CNRM-CM5. Figure d'A. Rigal (CNRM). **Droite** : T actuelle et meilleurs analogues des climats (T & P) futurs (SRES A2) pour quelques métropoles dans CNRM-CM3. Source : Kopf et al. (2008).

Changement moyen en Europe (GCMs)

Descente d'échelle (régionalisation)

Variabilité « météo » et événements extrêmes

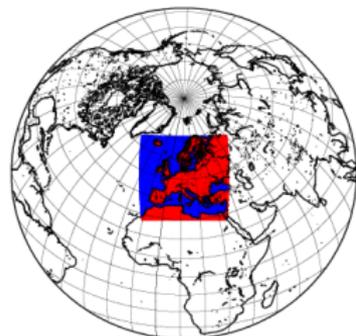
Régionalisation des projections

► Pour certaines applications, l'information du GCM ne suffit pas.

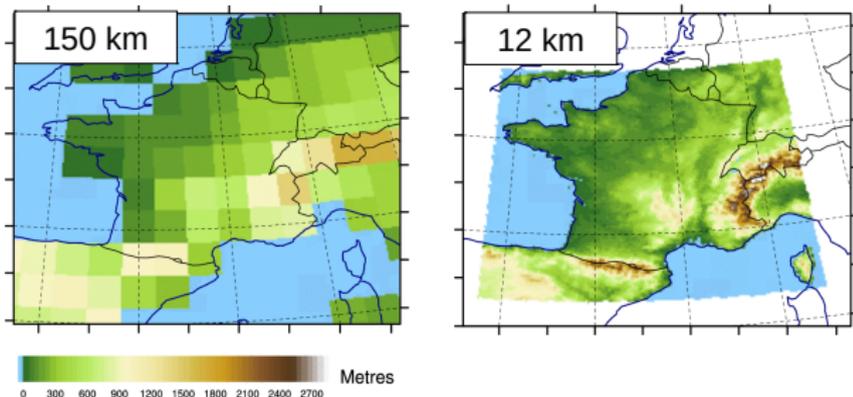
→ Plusieurs méthodes pour **régionaliser** les projections futures :

- utilisation de **GCMs zoomés** (e.g. ARPEGE basculé-étiré);
- utilisation de **RCMs** (e.g. ALADIN forcé au bord par ARPEGE);
- utilisation de **méthodes statistiques** (vs. dynamiques).

Exemple de domaine



Relief et trait de côte ARPEGE vs. ALADIN

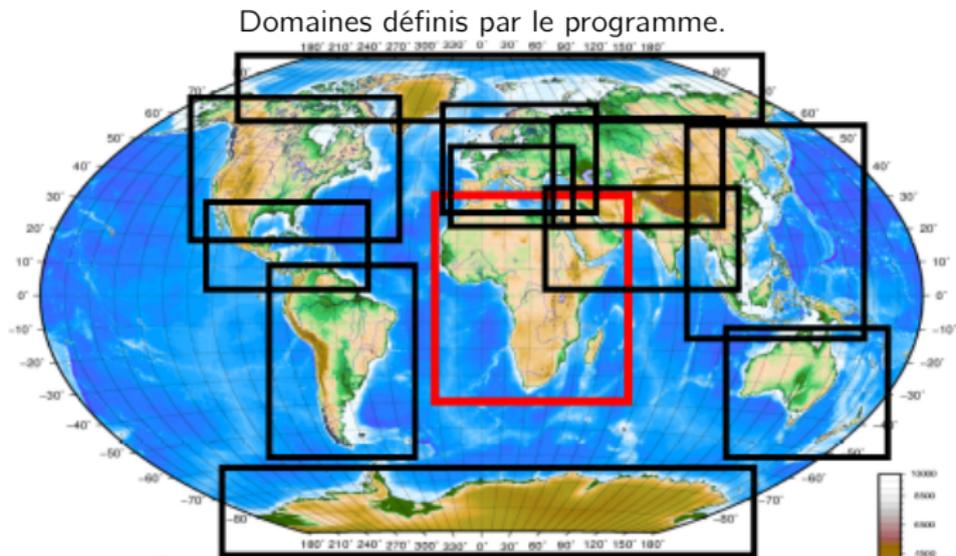


Figures empruntées à C. Cassou (CERFACS) et S. Somot (CNRM).

L'initiative CORDEX

Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment

- ▶ Projet d'intercomparaison des RCMs lancé en 2009 (similaire au CMIP des GCMs).
- ▶ Régionalisation dynamique des projections CMIP5 sur plusieurs domaines, via plusieurs couples GCM/RCM.
- ▶ Europe / France : Euro- et Med-CORDEX (50 et 12 km).

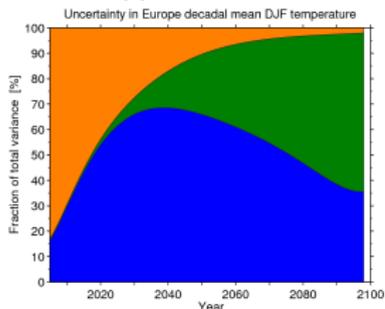


Source : <http://cordex.org/>

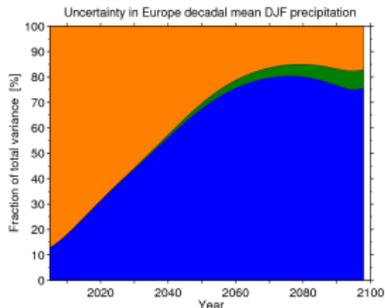
RCM = source d'incertitude supplémentaire

- ▶ Se rajoute à l'incertitude du scénario, du GCM et de la variabilité interne.

Rappel : T DJF



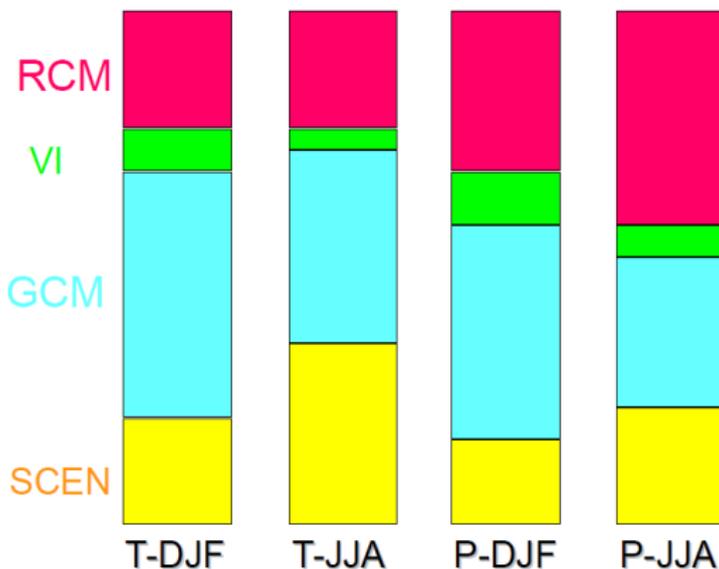
Rappel : P DJF



Source : E. Hawkins (blog).

Exemple : estimation des contributions à l'incertitude dans l'ensemble PRUDENCE (ancêtre CORDEX)

Attention : N'inclut pas tous les scénarii ni tous les GCMs de CMIP.



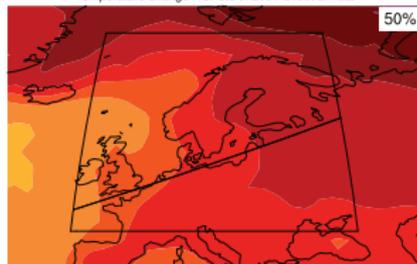
Source : Déqué et al. (2007).

Projections RCMs en Europe – Température RCP8.5

- ▶ Similaire aux GCMs, avec **détail géographique** plus fin (e.g. reliefs).

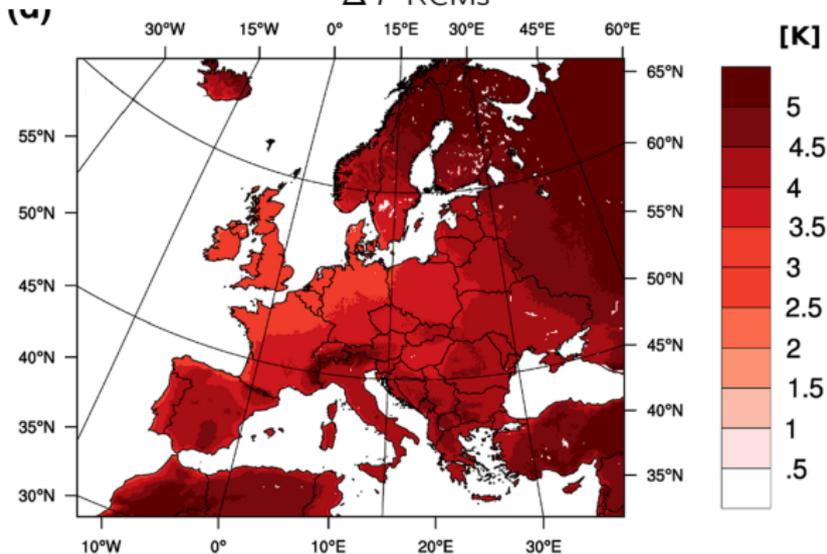
Rappel : ΔT GCMs

Temperature change RCP8.5 in 2081-2100: annual



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

ΔT RCMs

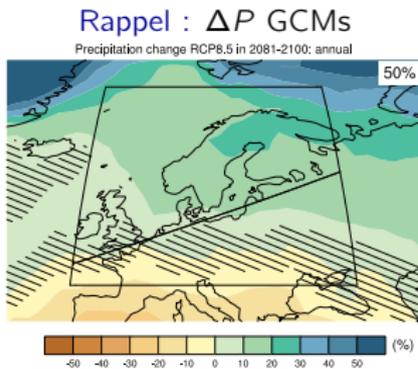


Source : Jacob et al. (2014).

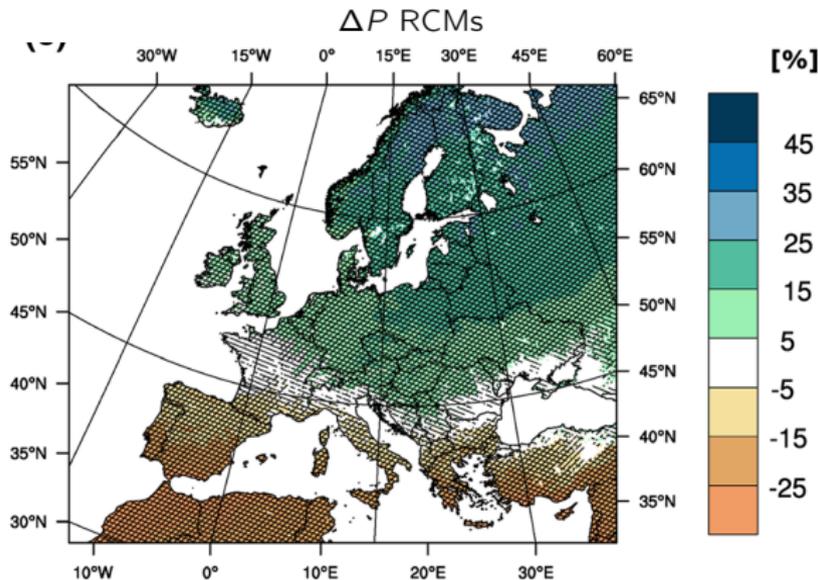
Moyenne de 10 simulations basées sur 7 RCMs et 5 GCMs.
2071–2100 vs 1971–2000.

Projections RCMs en Europe – Précipitations RCP8.5

- ▶ Similaire aux GCMs, malgré une meilleure représentation des 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.

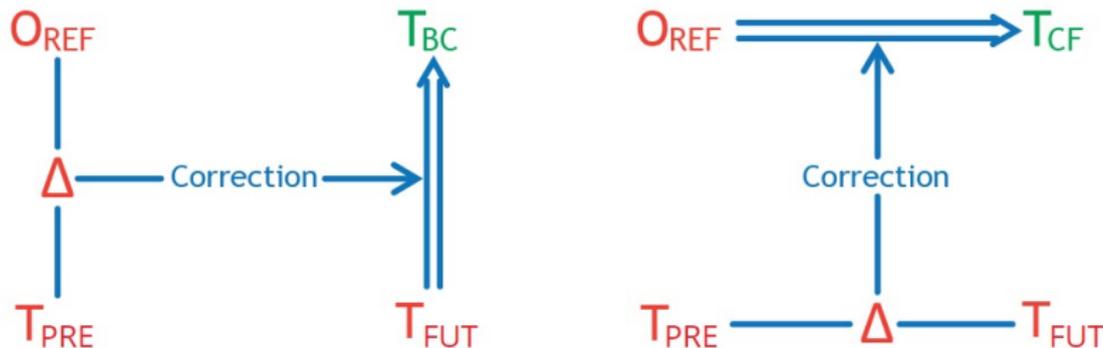
Adaptation statistique

- Pour certaines applications (e.g. modèles d'impacts), une étape supplémentaire de **correction des biais** du modèle peut être appliquée.

Idée : déterminer une fonction de transfert entre modèle et référence (observations) en climat présent, et l'appliquer au modèle en climat futur.

Alternative : déterminer une fonction de transfert entre présent et futur du modèle, et l'appliquer à la référence présent (observations).

Hypothèse forte : on considère que la fonction de transfert est stationnaire.



Inspiré de Hawkins et al. (2013).

Adaptation statistique – Méthodes

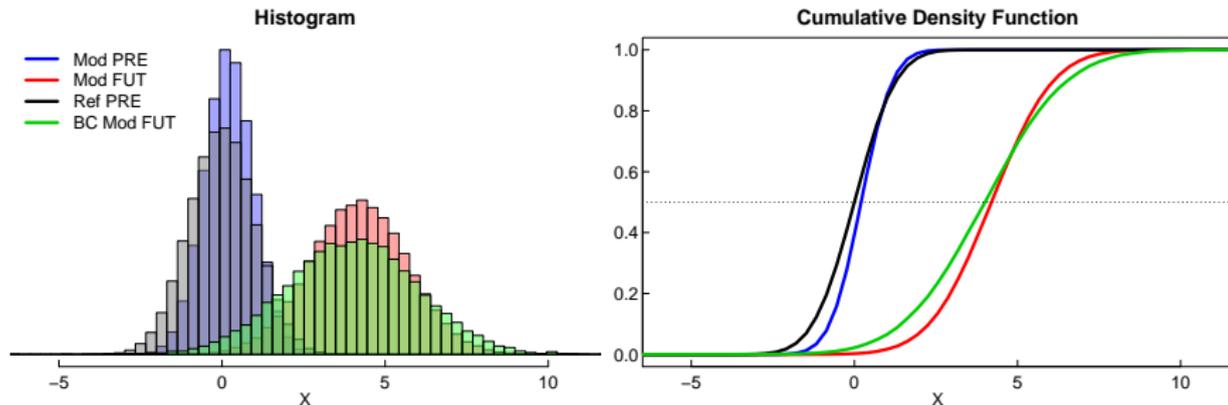
- ▶ A minima : correction du **biais moyen** (méthode des deltas).

Correction de biais : $\forall i, FUT_i^{corr} = FUT_i - (\overline{PRE} - \overline{REF})$.

Facteur de changement : $\forall i, FUT_i^{corr} = REF_i - (\overline{FUT} - \overline{PRE})$.

- ▶ Mieux : correction de la **distribution** complète (quantile mapping).

Exemple de correction de biais via la fonction de répartition (cdf)

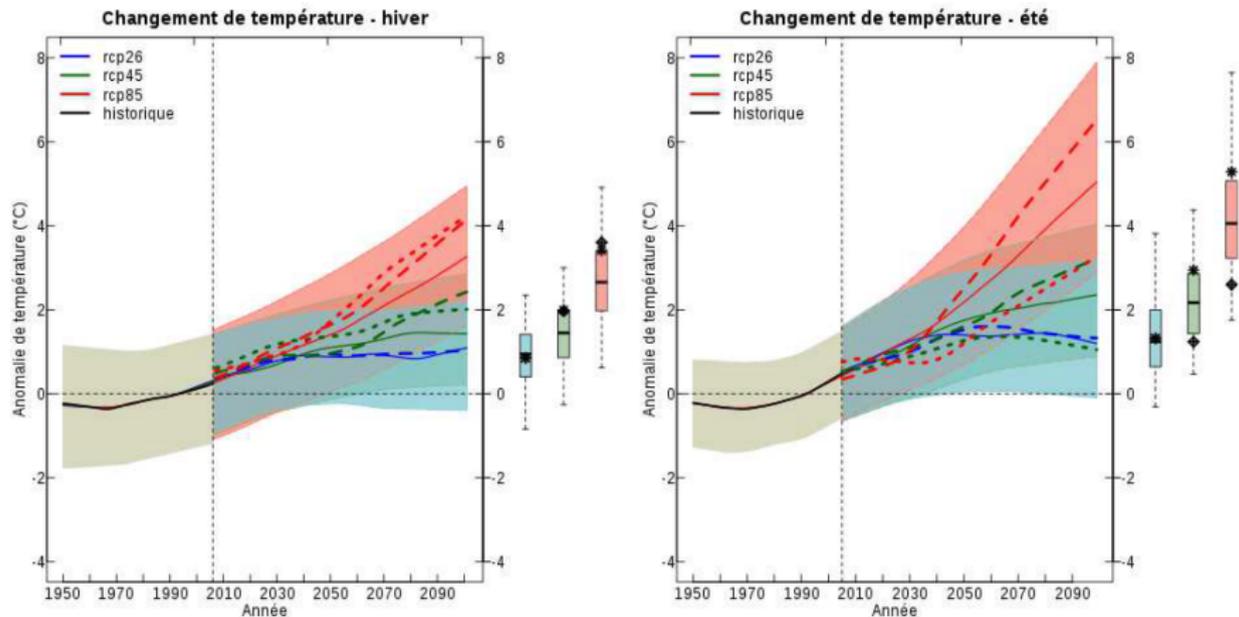


Tracé avec le [package R CDFt](#) développé par M. Vrac (LSCE),
avec $PRE \sim \mathcal{N}(0.2, 0.75)$, $FUT \sim \mathcal{N}(4.2, 1.5)$ et $REF \sim \mathcal{N}(0, 1)$ (donc $FUT^{corr} \sim \mathcal{N}(4, 2)$).

N.B. Peut être appliqué directement aux GCMs \rightarrow [downscaling statistique](#).

Zoom sur la France – Température 1/2

► GCMs + RCMs + A.S. = ...



11 simulations corrigées (CDFt) provenant de 7 RCMs et 5 GCMs par scénario.

Source : Ouzeau et al. (2014), [Le climat de la France au XXI^e siècle](#), Volume 4, rapport de la « mission Jean Jouzel » (MEDDE).

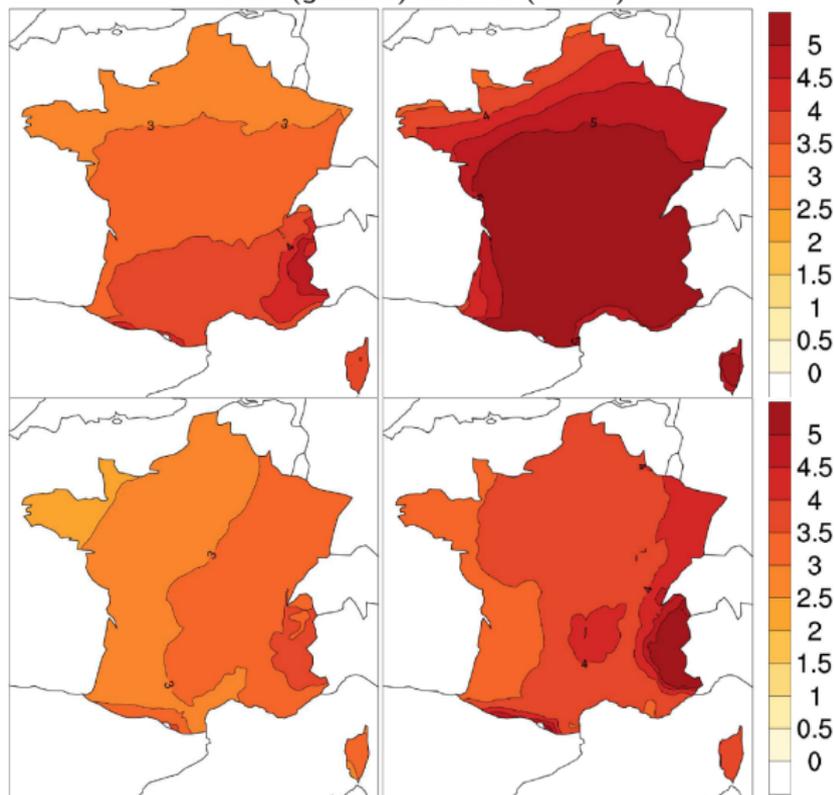
Voir aussi : le [portail DRIAS](#) pour plus d'informations sur les projections climatiques en France.

Zoom sur la France – Température 2/2

Été

P25 (gauche) et P75 (droite)

Hiver

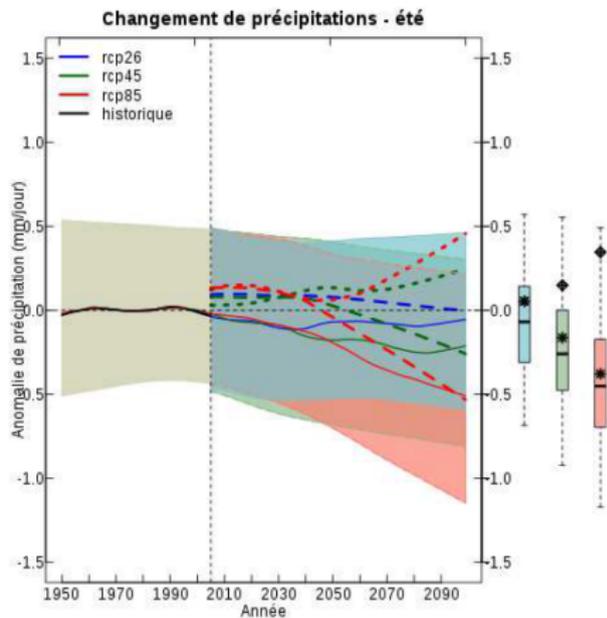
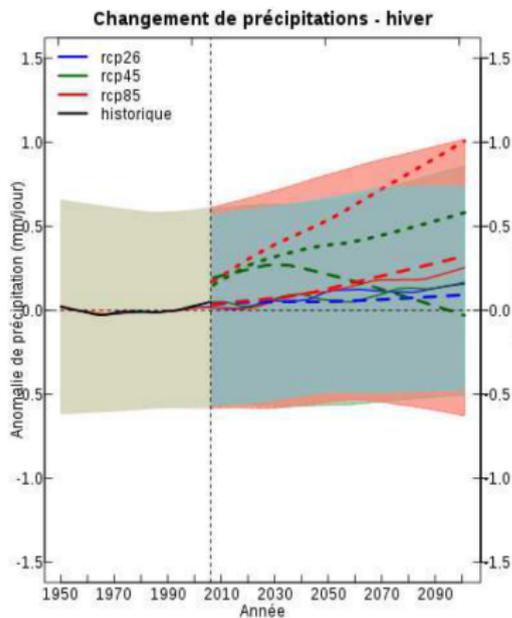


Source : Ouzeau et al. (2014).

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 1/2

► GCMs + RCMs + A.S. = ...



11 simulations corrigées (CDFt) provenant de 7 RCMs et 5 GCMs par scénario.

Source : Ouzeau et al. (2014), [Le climat de la France au XXI^e siècle](#), Volume 4, rapport de la « mission Jean Jouzel » (MEDDE).

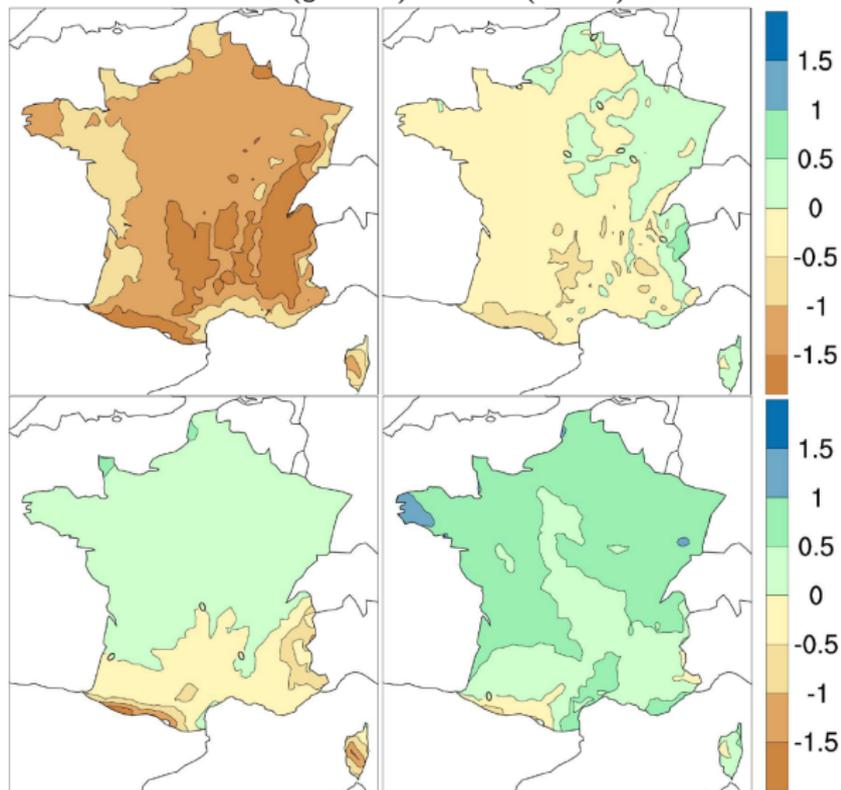
Voir aussi : le [portail DRIAS](#) pour plus d'informations sur les projections climatiques en France.

Zoom sur la France – Précipitations 2/2

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.

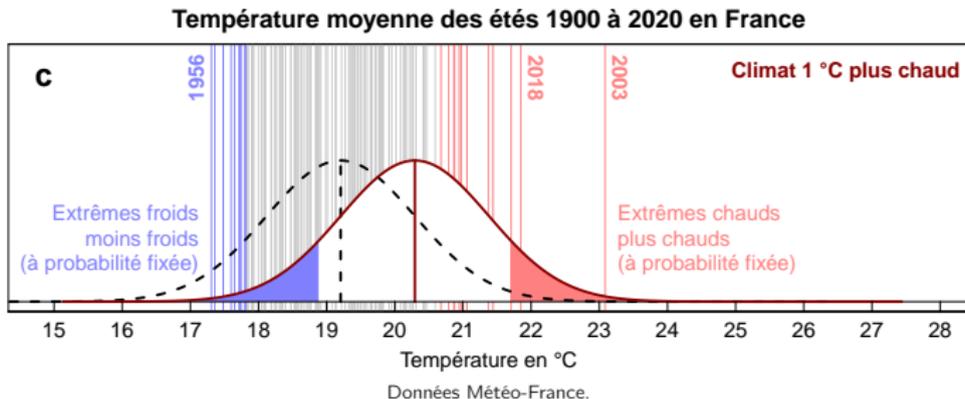
Changement moyen en Europe (GCMs)

Descente d'échelle (régionalisation)

Variabilité « météo » et événements extrêmes

Météo, climat, extrêmes

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



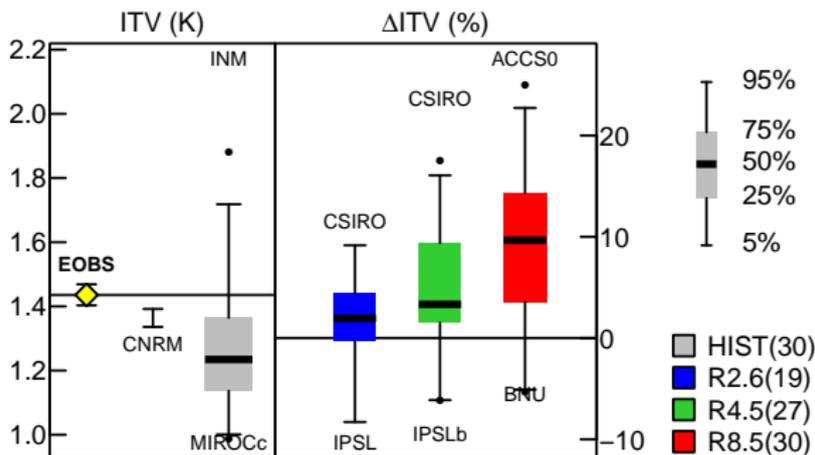
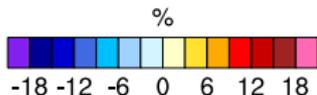
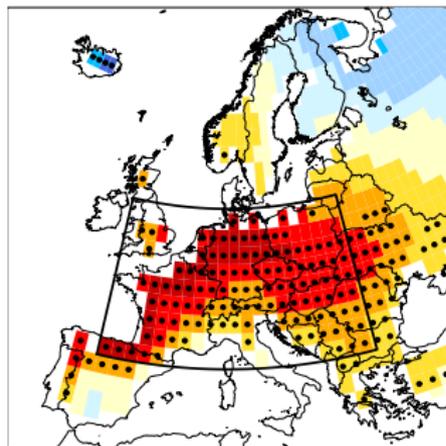
Changer de climat, c'est potentiellement modifier la probabilité de tous les événements météo, y compris celle des extrêmes.

- 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).

Changements de variabilité – Exemple T Europe été

- **En Europe**, les modèles projettent une **augmentation de la variabilité estivale** des T , liée à l'**assèchement projeté des sols** européens (rétroaction sol-atmosphère).

Exemple du Δ variabilité jour à jour (moyenne des $|T_{d+1} - T_d|$)
 Δ ITV R8.5



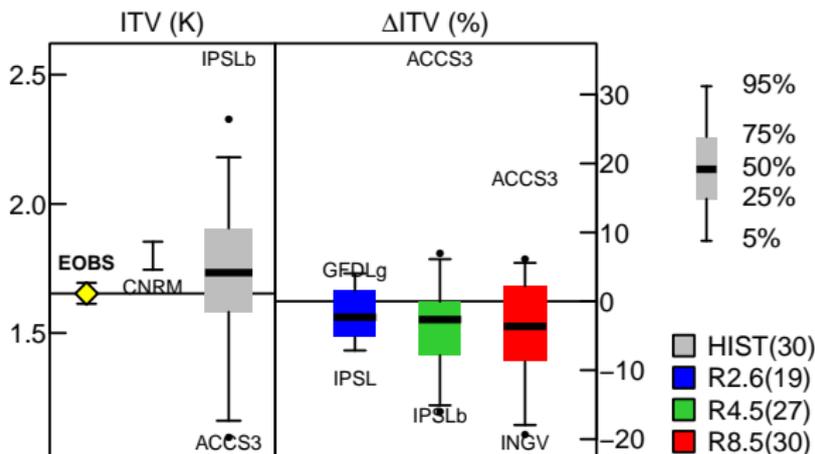
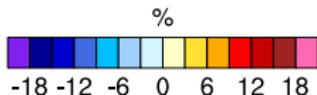
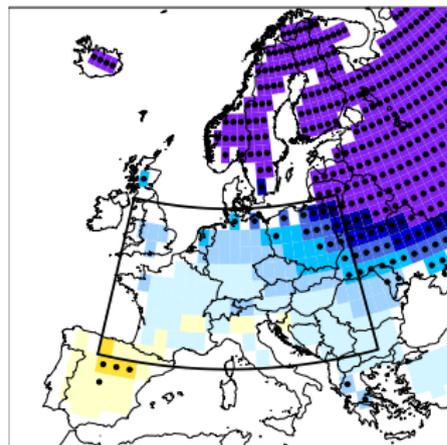
E-OBS & CMIP5 ensemble. JJAS 2070–2099 vs. 1979–2008.

Source : Cattiaux et al. (2015).

Changements de variabilité – Exemple T Europe hiver

- **En Europe**, les modèles projettent une **légère diminution de la variabilité hivernale** des T , liée à la diminution du **contraste océan/continent** et au déclin de **couverture de neige**.

Exemple du Δ variabilité jour à jour (moyenne des $|T_{d+1} - T_d|$)
 Δ ITV R8.5

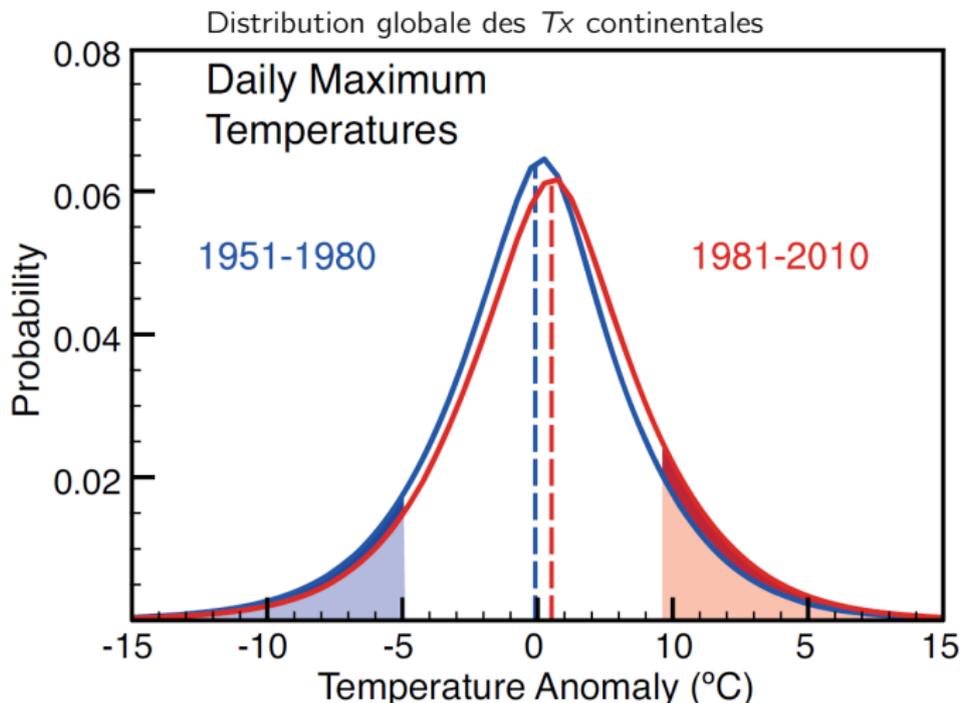


E-OBS & CMIP5 ensemble. DJFM 2070–2099 vs. 1979–2008.

Source : Cattiaux et al. (2015).

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** ↘).

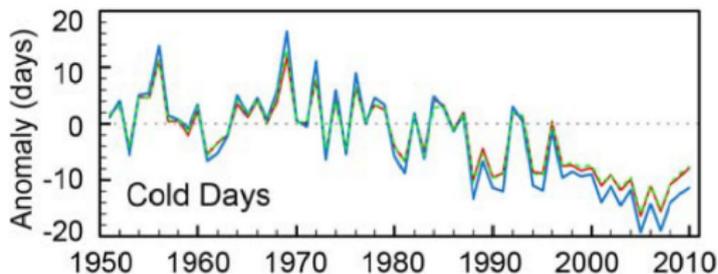
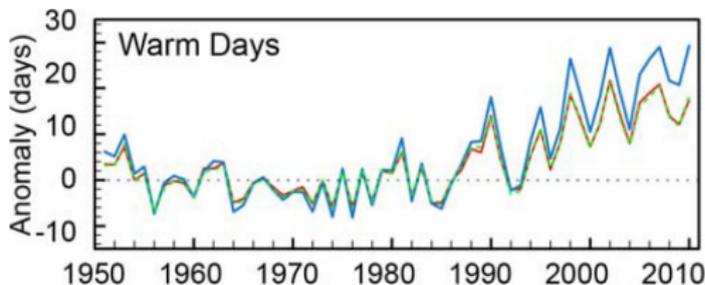
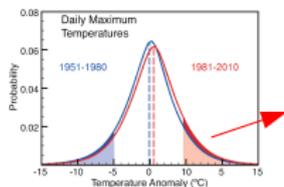


Source : IPCC AR5 (2013) FAQ 2.2 Fig. 1.

Extrêmes de température – Observations

- ▶ Le ΔT_{Globe} déjà observé (~ 1 K) se projette sur les extrêmes.

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



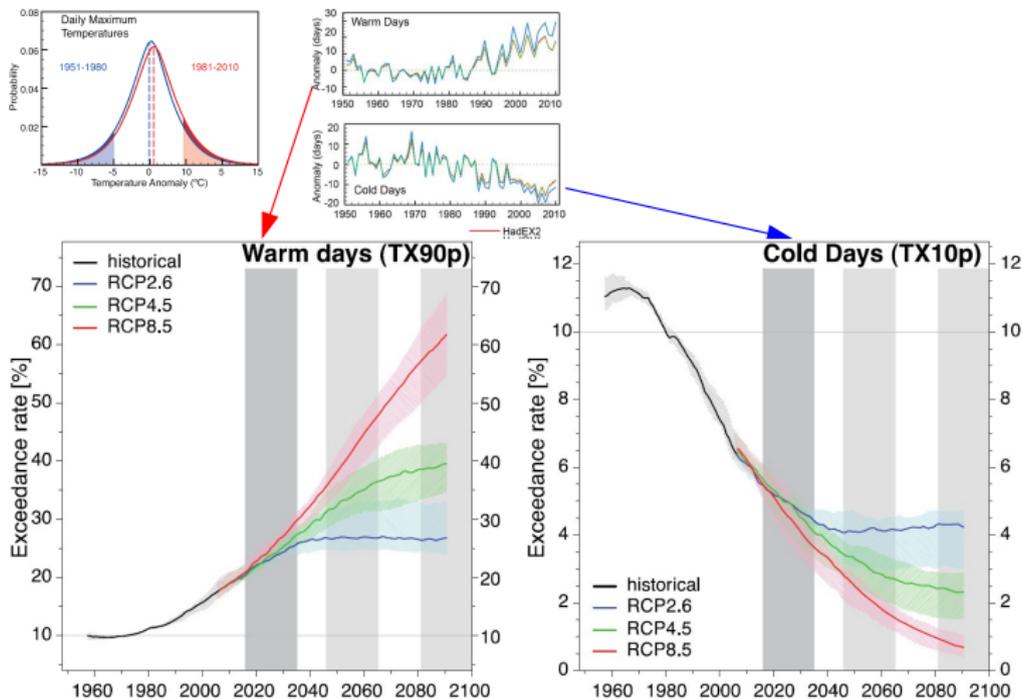
— HadEX2
— HadGHCND
- - - GHCNDEX

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)

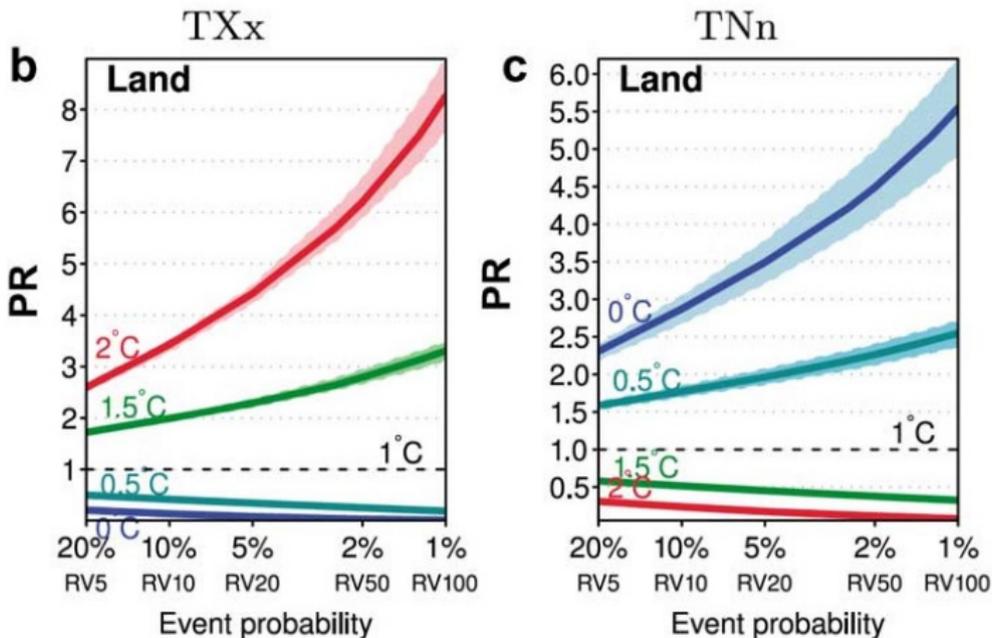


Source : IPCC AR5 (2013) FAQ 2.2 Fig. 1 & Fig. 2.32 & Fig. 11.17.

Extrêmes de température – Vision politique

- ▶ On peut s'amuser à estimer les changements de probabilité d'extrêmes de T pour différentes cibles de réchauffement global.

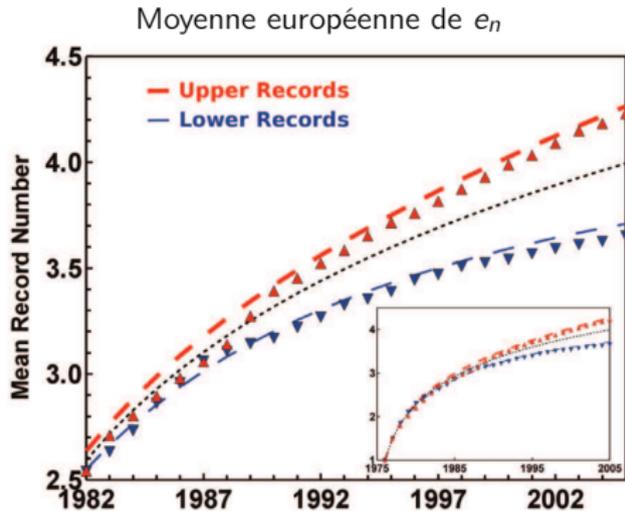
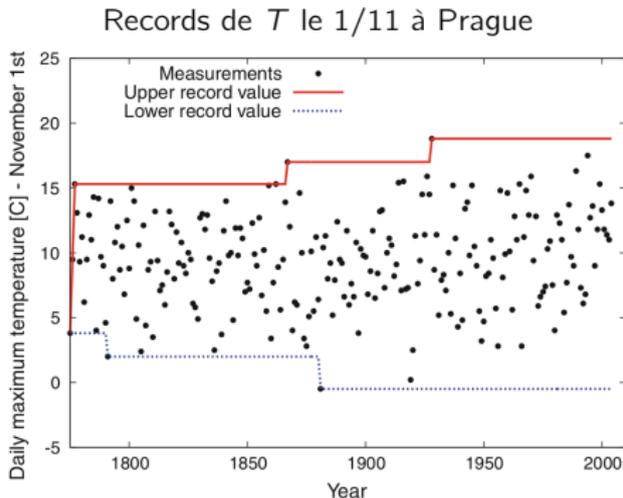
Ratios de proba. de dépassement du max (TXx) et min (TNn) annuels pour différents niveaux de retour (axe x) et différentes cibles de ΔT_s (couleurs)



Source : IPCC SR1.5 (2018) Fig. 3.6.

Records de température

- ▶ 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).



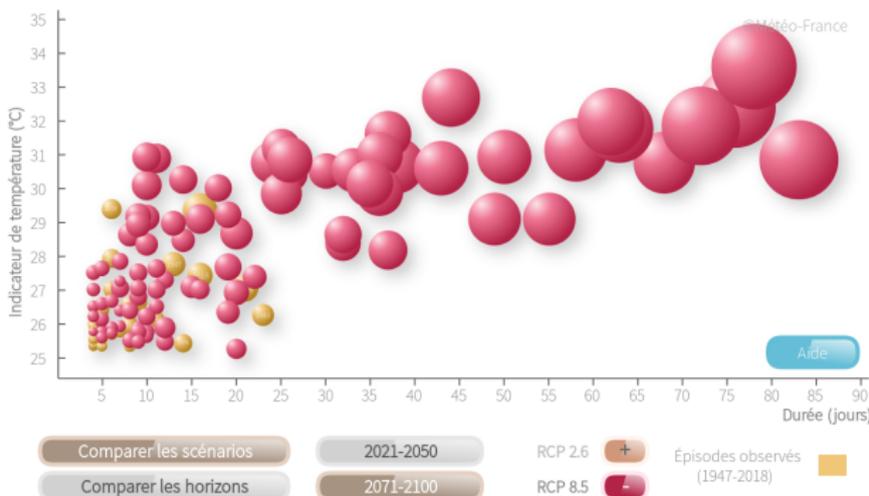
Source : Wergen and Krug (2010).

- ▶ On retrouve le comportement logarithmique sur e_n .
- ▶ On bat *significativement* 'trop' de records **chauds** et 'pas assez' de records **froids** (mais on en bat quand même).

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.

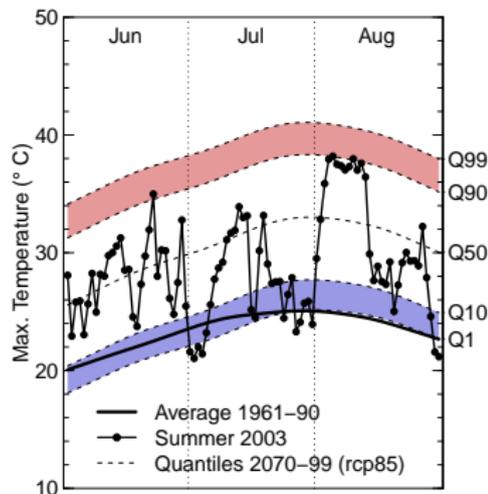
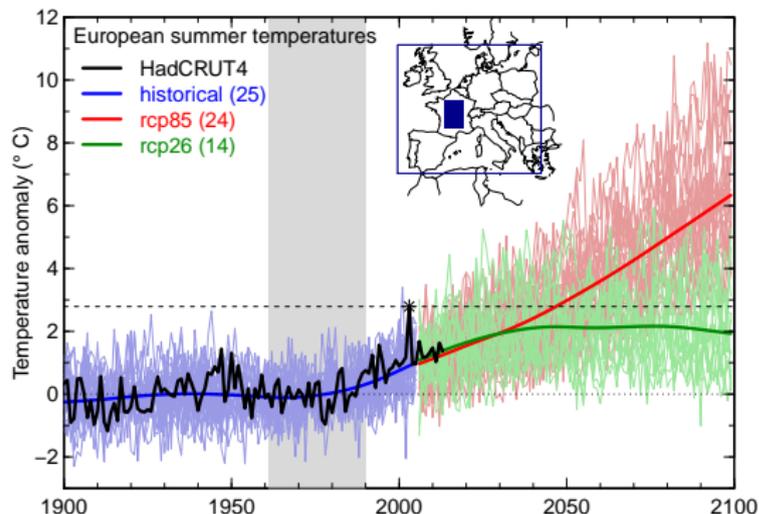
N.B. À l'inverse, **diminution** observée et projetée des vagues de froid.

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).

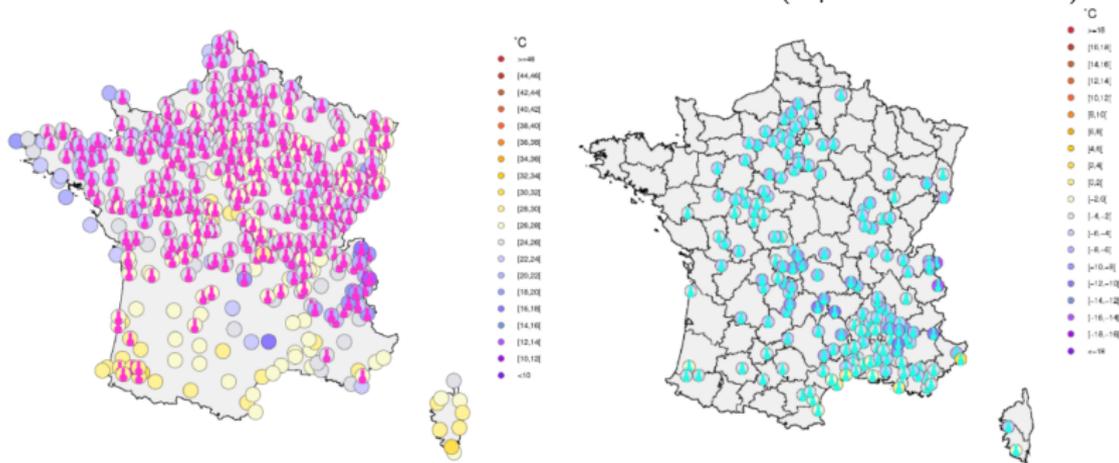
Il fait froid : preuve que le climat ne se réchauffe pas ?

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)



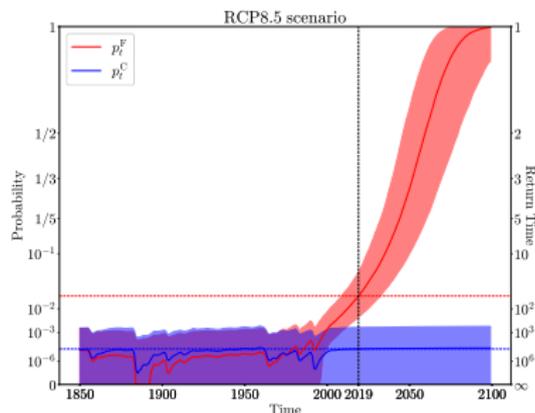
Source : Vautard et al. (2021), groupe 'World Weather Attribution'.

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).

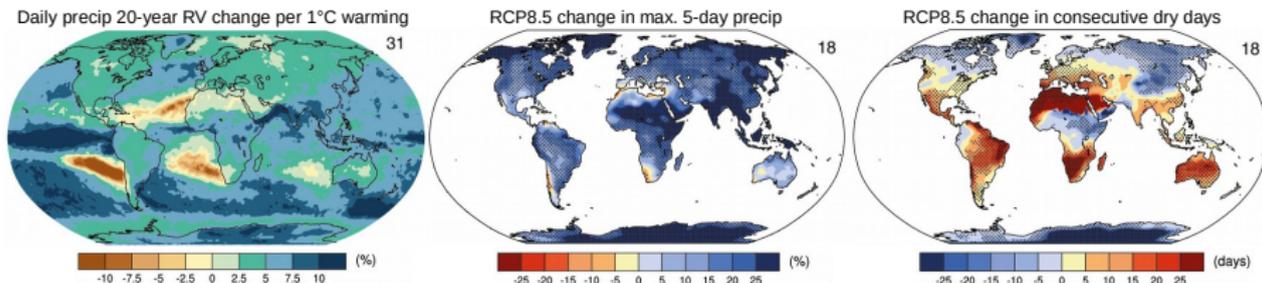
N.B. En 2100, en scénario RCP8.5 :

- 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^{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. 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.

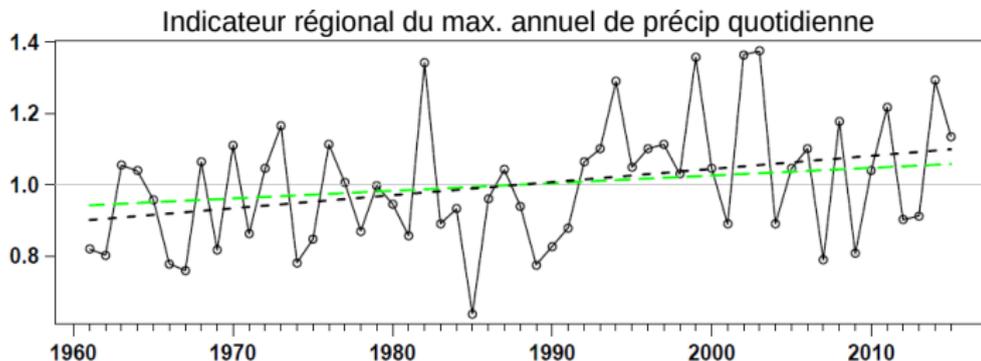
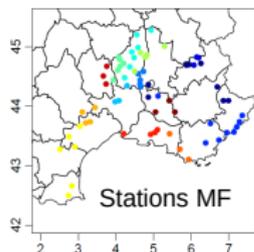
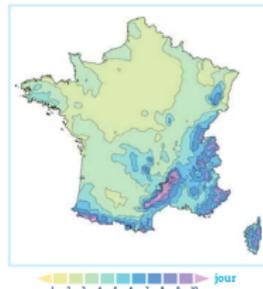
Précipitations intenses en France

- ▶ 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).

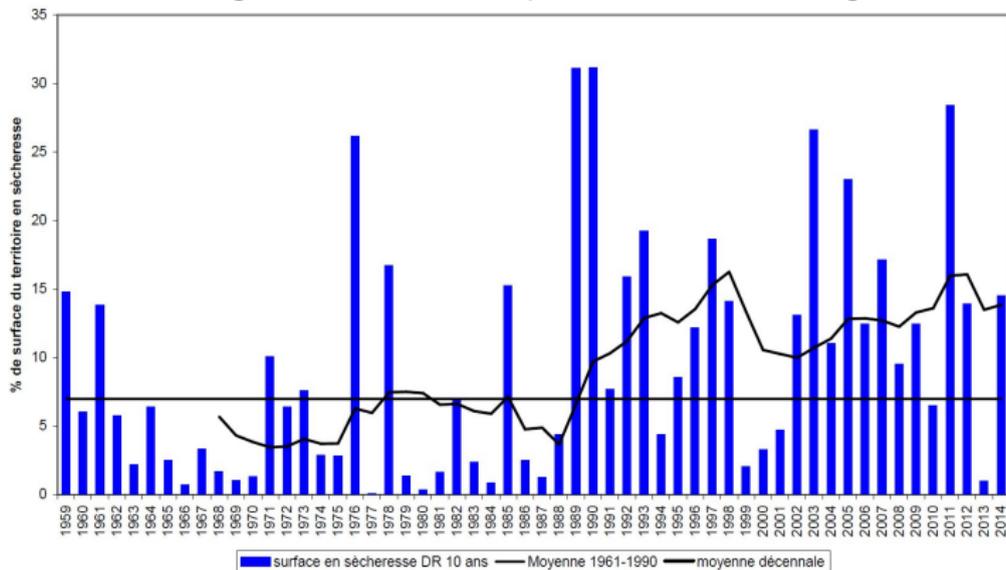
Sécheresses en France

- **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



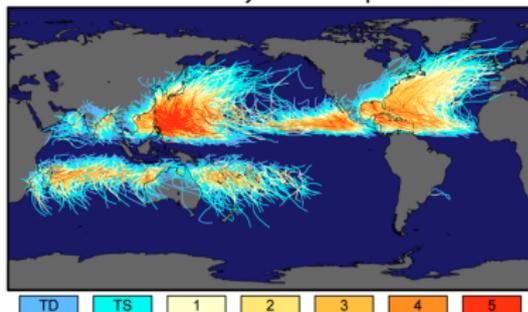
Critère = humidité du sol < 10e centile (1961-1990). Source : CLIMSEC (2011) et DRIAS (2021).

Cyclones et tempêtes

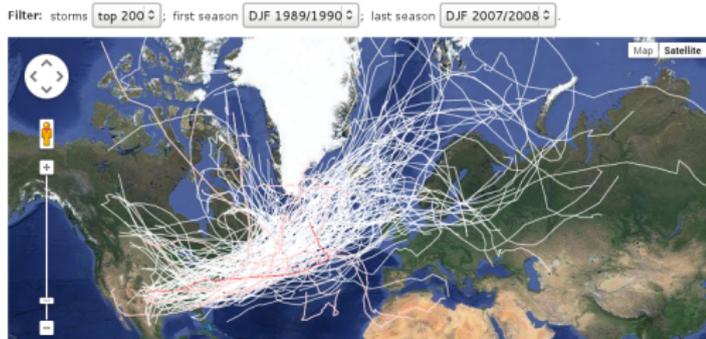
- ▶ **Cyclones tropicaux** : se forment sous certaines conditions atmosphériques et océaniques, puis puisent leur énergie de la surface océanique.
- ▶ **Tempêtes extra-tropicales** : phénomènes essentiellement atmosphériques.

—
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](#).

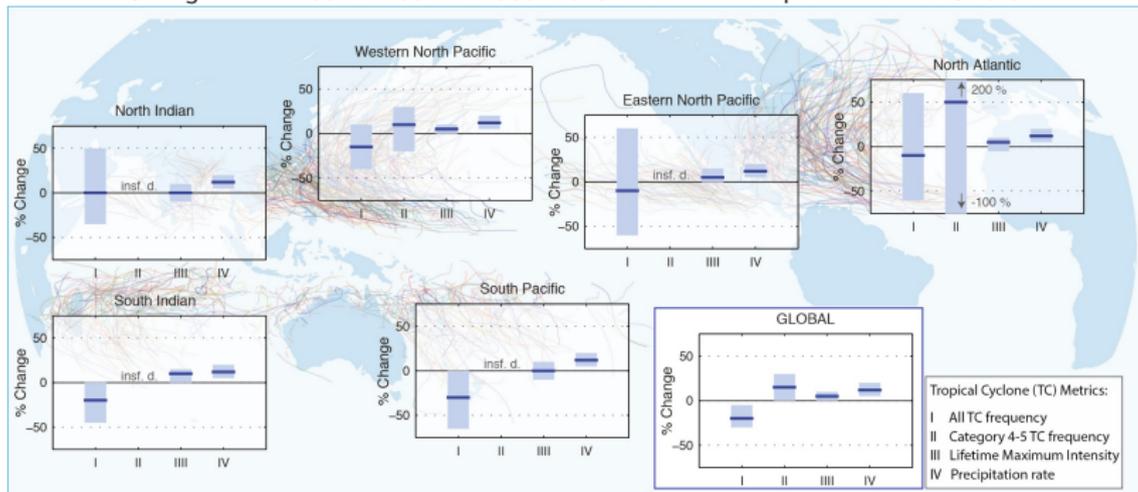


Source : [Atlas](#) de l'Université de Reading.

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.

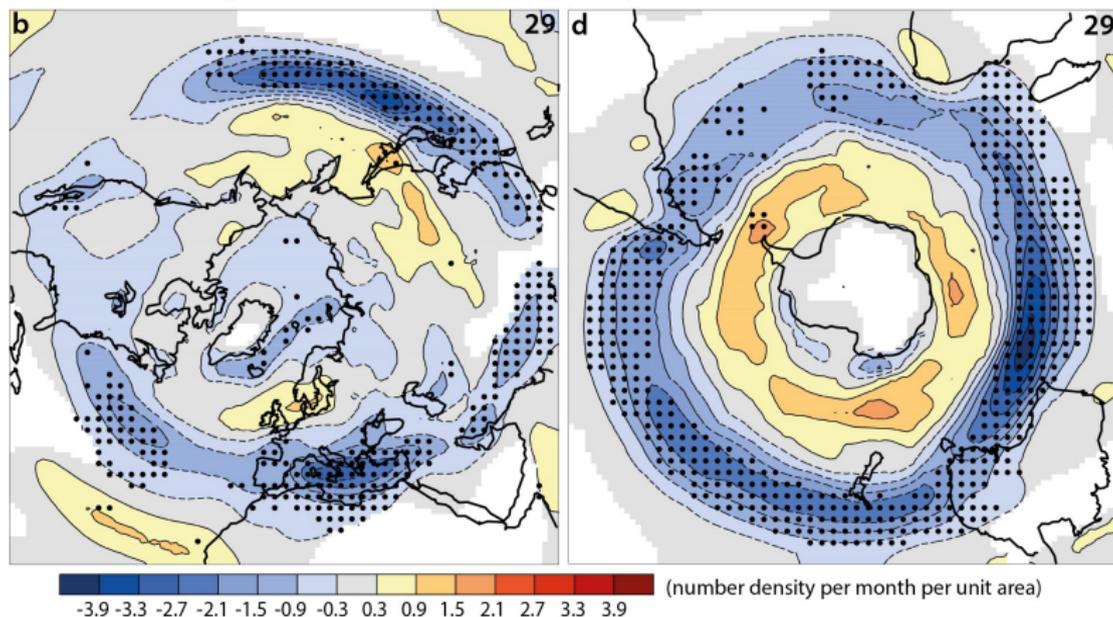


Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Fig. 14.17.

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

- ▶ J. Cattiaux, H. Douville, R. Schoetter, S. Parey, and P. Yiou, *Projected increase in diurnal and interdiurnal variations of European summer temperatures*, *Geophys. Res. Lett.* **42** (2015), no. 3, 899–907.
- ▶ M. Déqué, D.P. Rowell, D. Lüthi, F. Giorgi, J.H. Christensen, B. Rockel, D. Jacob, E. Kjellström, M. de Castro, and B. van den Hurk, *An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections*, *Climatic Change* **81** (2007), no. 1, 53–70.
- ▶ E. Hawkins, T.M. Osborne, C.K. Ho, and A.J. Challinor, *Calibration and bias correction of climate projections for crop modelling: An idealised case study over Europe*, *Agricultural and Forest Meteorology* **170** (2013), 19 – 31, Agricultural prediction using climate model ensembles.
- ▶ 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.
- ▶ G. Wergen and J. Krug, *Record-breaking temperatures reveal a warming climate*, *Europhys. Lett.* **92** (2010), 30008.