

Système Climatique IENM 9/10 (2A)

# Changement climatique actuel : projections futures et incertitudes

Julien Cattiaux

Centre National de Recherches Météorologiques  
CNRS / Météo-France

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

Contact : [julien.cattiaux@meteo.fr](mailto:julien.cattiaux@meteo.fr)

2021-22

## Scénarii climatiques et sources d'incertitude

À quoi ressemble un climat plus chaud ?

# Quel climat pour le 21e siècle ?

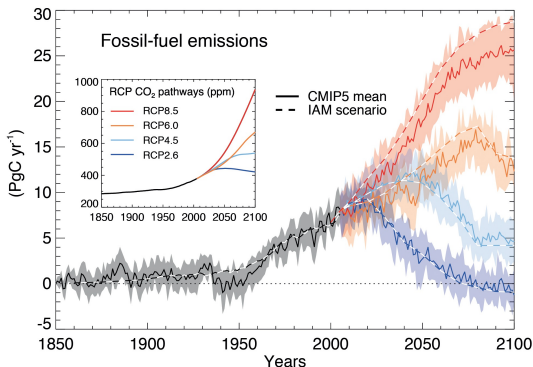
1. L'évolution future du **climat** dépend de la **composition de l'atmosphère**.  
À cette échelle, les forçages solaires et volcaniques sont mineurs (cours n°8).

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

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

Exemple des **Radiative Concentrations Pathways** utilisés pour CMIP5.

Les RCPs démarrent en 2006. Il y en a 4.



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

# Scénarii de forçage radiatif

► Les RCPs sont nommés selon la valeur du forçage en 2100 :

**RCP2.6** (valeurs en 2100)

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

**RCP4.5**

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

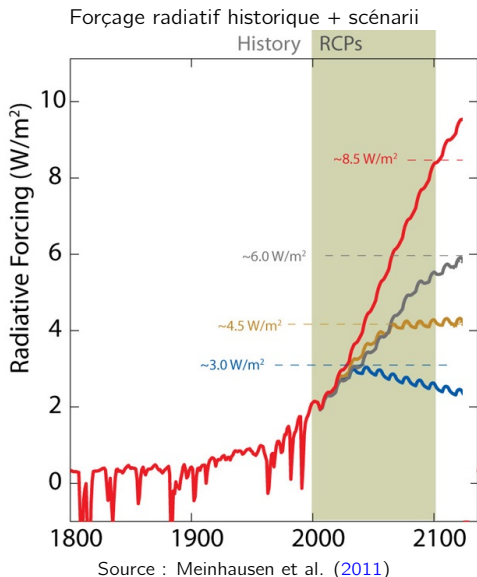
**RCP6.0**

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

**RCP8.5**

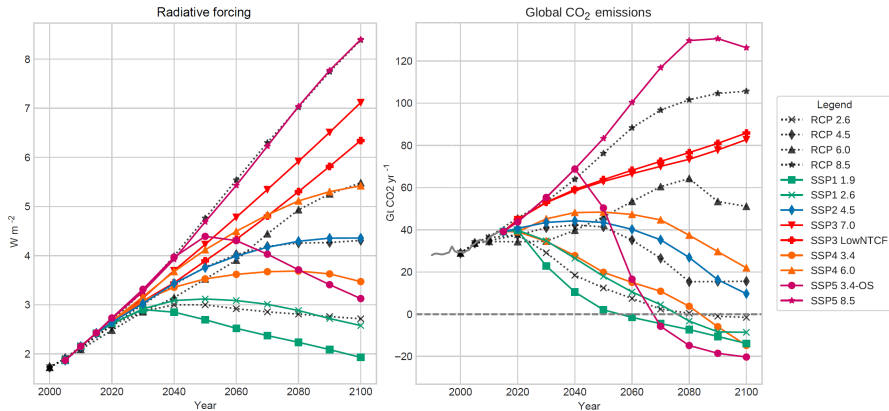
+1700 PgC,  $\text{CO}_2 = 936$  ppm,  $\text{CH}_4 \nearrow$

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



# Scénarii de forçage radiatif – Nouveautés IPCC AR6

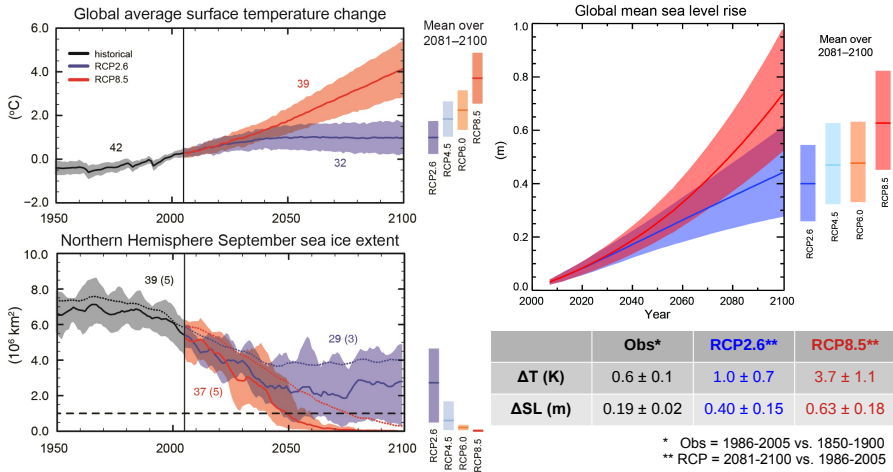
- ▶ Les projections CMIP6 utilisent les **Shared Socioeconomic Pathways**.
  - Les SSPs démarrent en 2015. Il y en a 9.
  - Il y a certaines similarités avec les RCPs, e.g. **RCP2.6 ~ SSP1-2.6**, **RCP8.5 ~ SSP5-8.5**.



Source : Gidden et al. (2019).

# Et selon le scénario, un climat à la carte

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

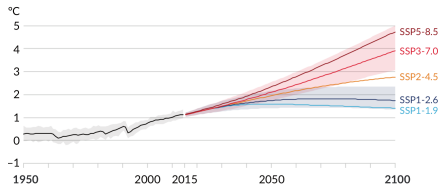


Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Figs. SPM7 & SPM9 et Table TS1.

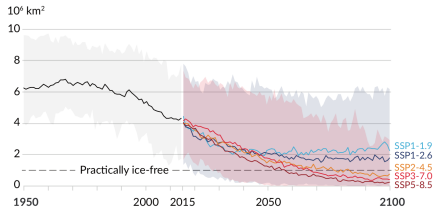
# Et selon le scénario, un climat à la carte – Update AR6

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

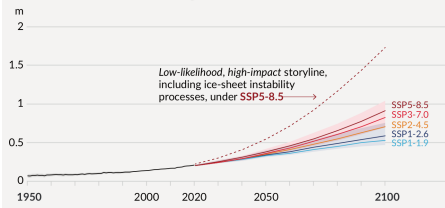
(a) Global surface temperature change relative to 1850–1900



(b) September Arctic sea ice area



(d) Global mean sea level change relative to 1900



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

\* Obs = 1995–2014 vs. 1850–1900

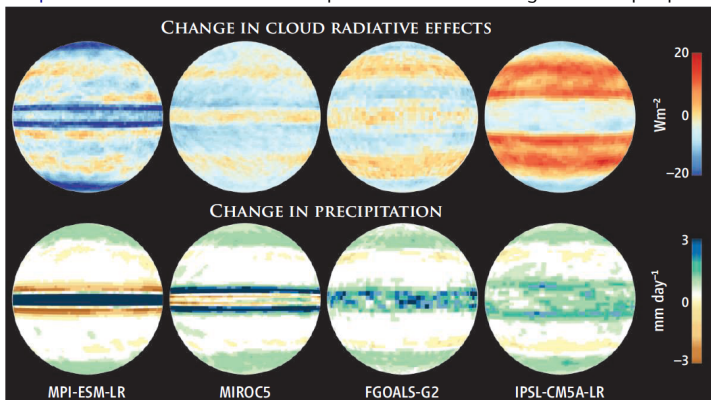
\*\* SSP = 2081–2100 vs. 1995–2014

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

# Incertitude de modélisation

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

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



Source : Stevens and Bony (2013).

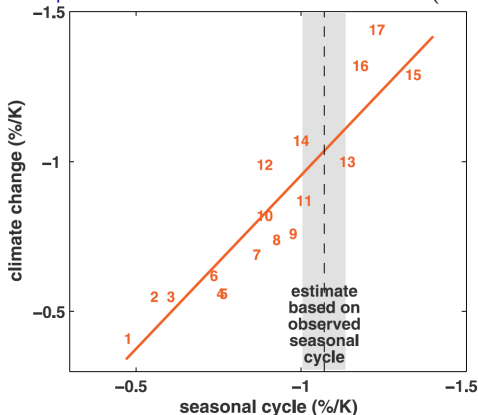


## Incertitude de modélisation – Contraindre les projections ?

Idée : pondérer les réponses futures en fonction du comportement des modèles en climat présent (cycle saisonnier, variabilité inter-annuelle, tendance, etc.).

→ nécessite une relation statistique inter-modèle, une compréhension du mécanisme physique, et une observation suffisamment fiable.

Exemple de la rétroaction albedo de surface (SAF)



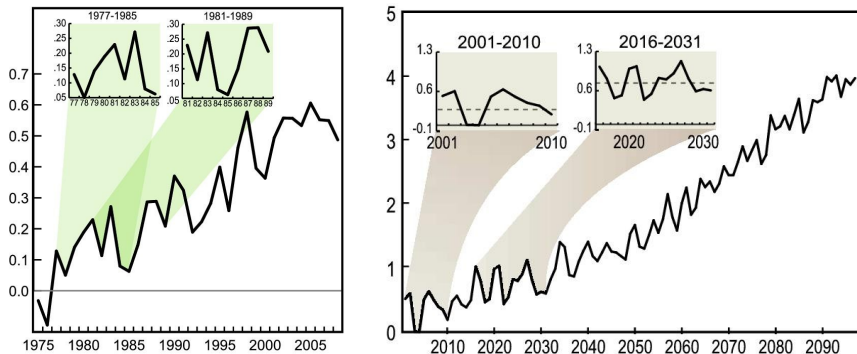
Source : Hall and Qu (2006).

# Incertitude de variabilité interne

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

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

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

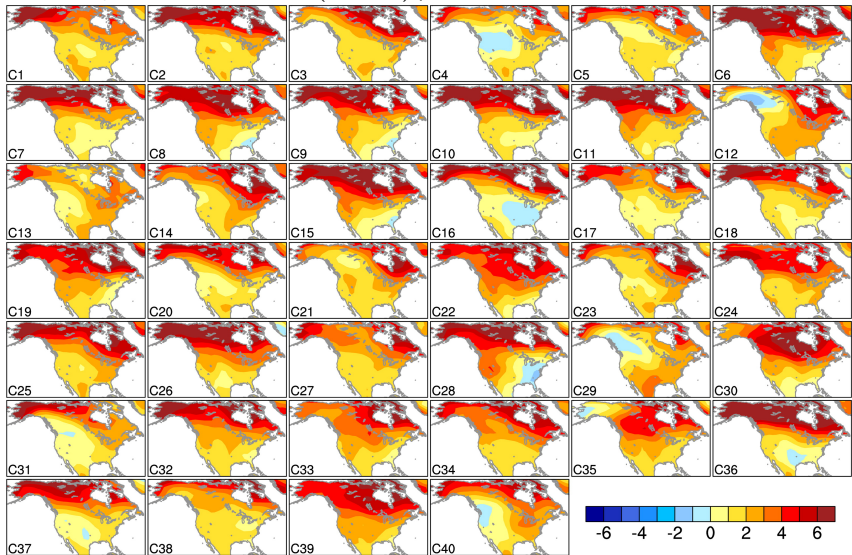


Température globale (anomalie en K). Source : Easterling and Wehner (2009).

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

# Incertitude de variabilité interne – Exemple de grand ensemble

$\Delta T_s$  DJF sur 2010–2050 (RCP8.5) pour 40 membres du modèle du NCAR



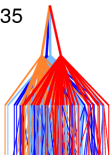
Source : Deser et al. (2014).

# Décomposition des incertitudes – Exemple de $T_s$

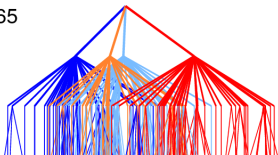
## Cascade of Uncertainty in CMIP5

Figure created by Ed Hawkins, 2014

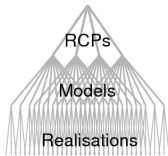
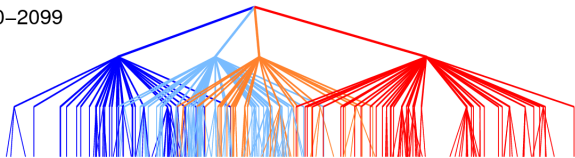
2016–2035



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.

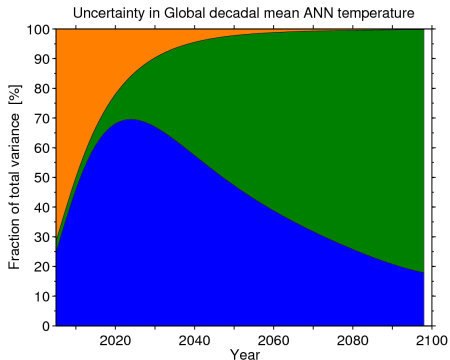
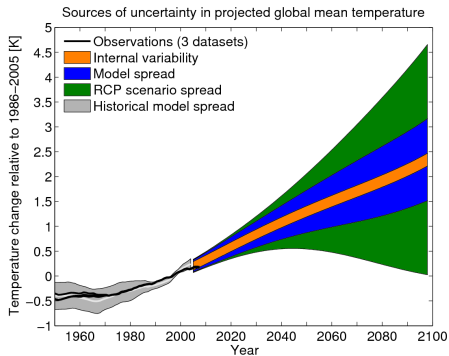
Figure de [E. Hawkins](#),  
à retrouver sur son [blog](#).

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

## 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.



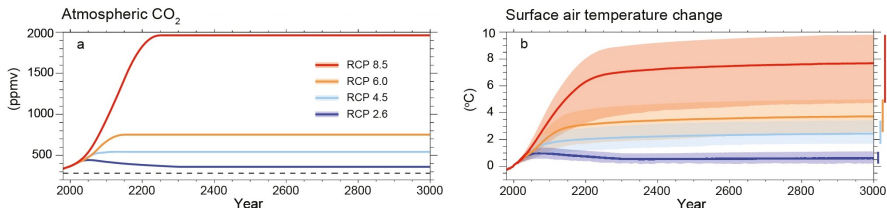
Figures de [E. Hawkins](#), à retrouver sur son [blog](#).

## 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).

## À plus long terme – Le niveau des mers

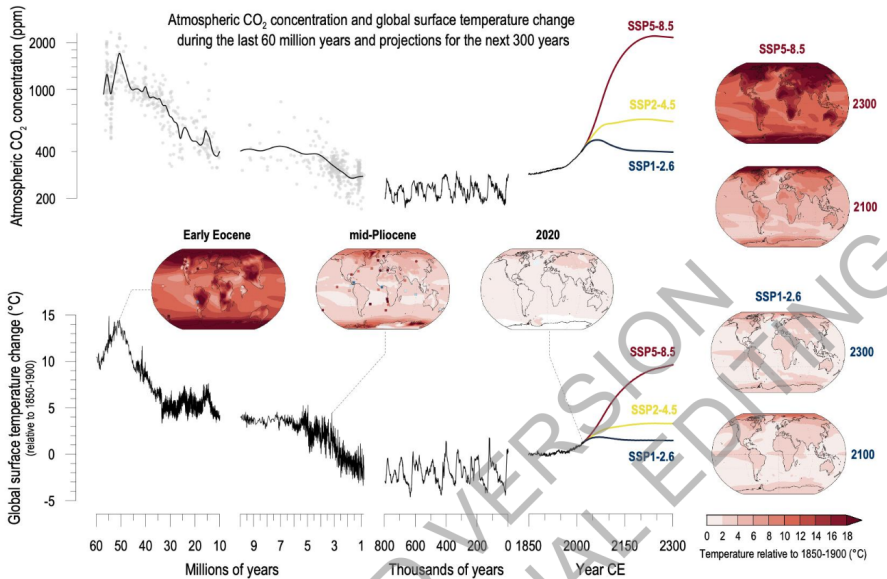
- ▶ Quelque soit le scénario, le **niveau marin** continue d'augmenter après 2100.
  - **Expansion thermique**, rythme de  $0.2\text{--}0.6 \text{ m.K}^{-1}$ .
  - Fonte des **glaciers** continentaux,  $\sim 0.5 \text{ m}$  de 'stock'.
  - Fonte de la **calotte groënlandaise**, potentiellement totale pour un  $\Delta T_s \geq 3 \text{ K}$  ( $\sim 7 \text{ m}$ , plusieurs ka).
  - Fonte de la **calotte antarctique** : potentiellement totale sur l'Ouest pour un  $\Delta T_s \geq 3 \text{ K}$  ( $\sim 4 \text{ m}$ ), incertaine pour l'Est ( $\sim 60 \text{ m}$ ).
- ▶ Estimations à **horizon 2 ka** : +4 à 10 m pour  $\Delta T_s = 3 \text{ K}$ , +12–16 m pour 4 K, +19–22 m pour 5 K.  
Cohérent avec reconstructions paléo.

Projections niveau marin 2300  
Source : IPCC AR6 (2021) Fig. SPM8.

(e) Global mean sea level change in 2300 relative to 1900



# Changement climatique anthropique vs. paléo



Source : IPCC AR6 (2021) Fig. TS1 (provisoire).

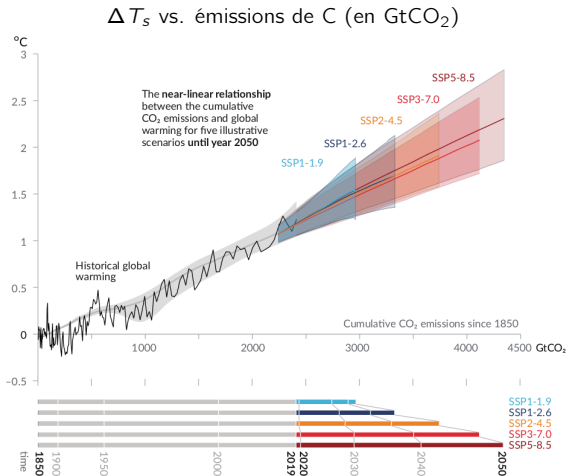


# Changement climatique anthropique – Vision politique 1/2

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

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

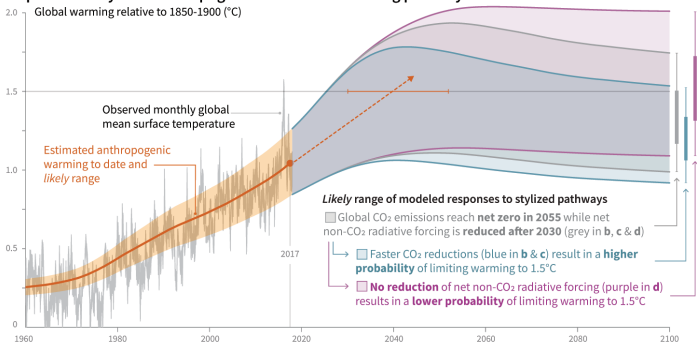
\* À l'issue de la COP21 (2015), l'Accord de Paris a ciblé 1.5 K.



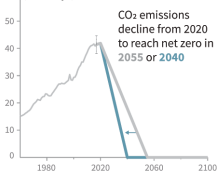
Source : IPCC AR6 (2021) Fig. SPM10.

# Changement climatique anthropique – Vision politique 2/2

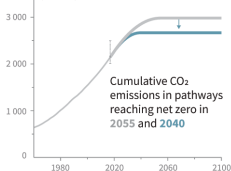
## a) Observed global temperature change and modeled responses to stylized anthropogenic emission and forcing pathways



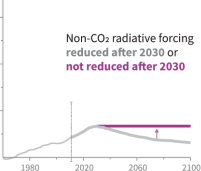
## b) Stylized net global CO<sub>2</sub> emission pathways (GtCO<sub>2</sub>/yr)



## c) Cumulative net CO<sub>2</sub> emissions (GtCO<sub>2</sub>)



## d) Non-CO<sub>2</sub> radiative forcing pathways (W/m<sup>2</sup>)



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

# Résumé

À l'échelle globale, l'incertitude majeure des projections climatiques pour 2100 est le **scénario socio-économique**.

Même dans un scénario haut, la **variabilité interne** est capable de masquer ponctuellement le réchauffement.

Pour les climatologues, reste encore beaucoup à faire et à préciser pour réduire l'**incertitude de modélisation** :

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

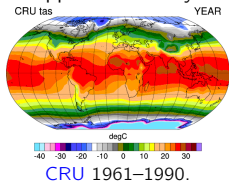
## Scénarii climatiques et sources d'incertitude

À quoi ressemble un climat plus chaud ?

# Géographie du réchauffement de surface

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

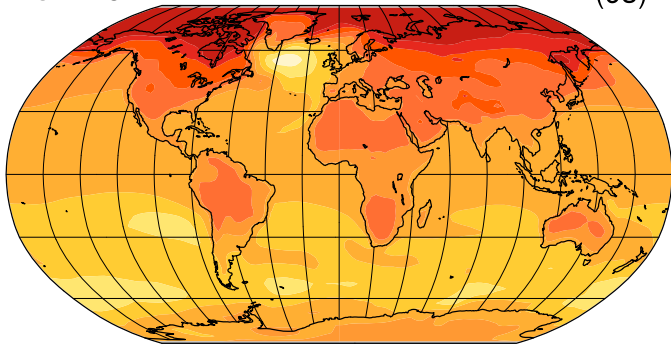
Rappel : état moyen



Changement normalisé par  $T$  globale

CMIP5

(93)



°C par °C de réchauffement global



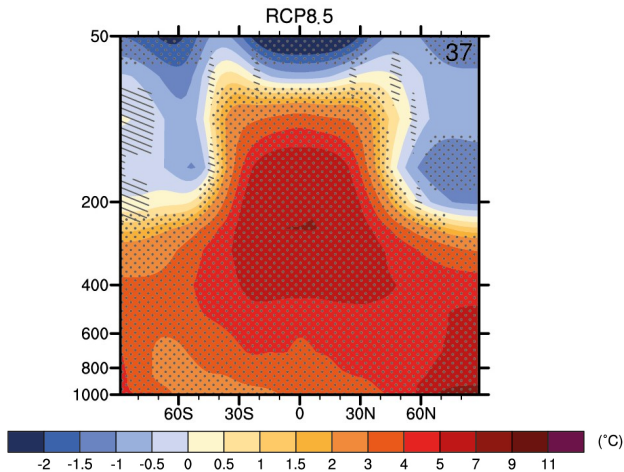
0 0.25 0.5 0.75 1 1.25 1.5 1.75 2

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.

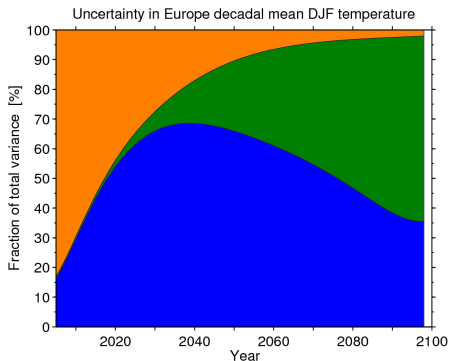
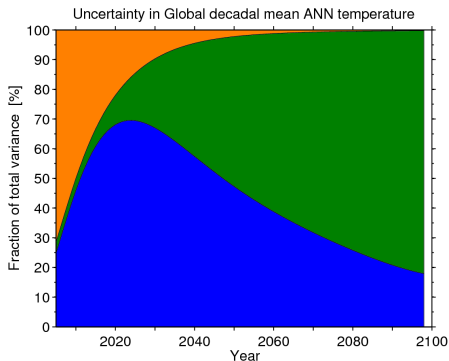
---

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

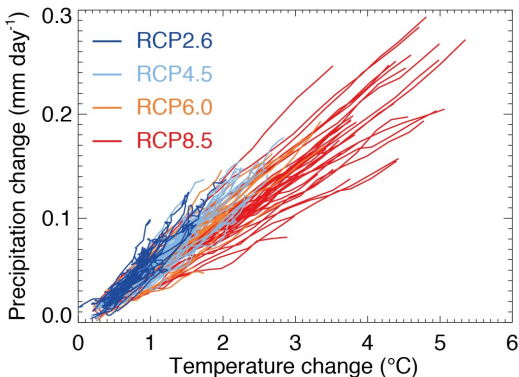
Conséquence 2 : Augmentations conjointes de l'évaporation et des précipits en global.

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

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

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

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



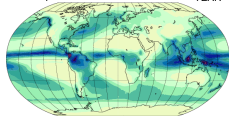
# Géographie des changements de précipitations

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

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

Rappel : état moyen

GPCP pr YEAR

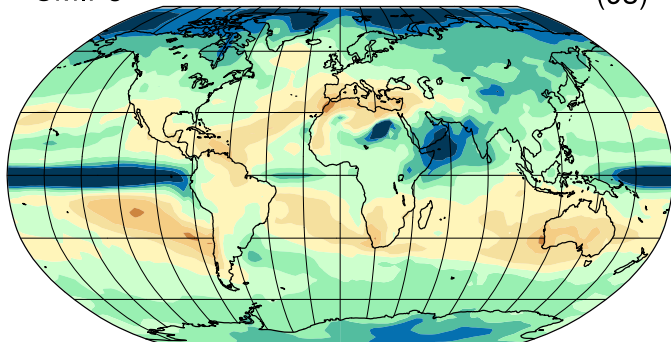


GPCP 1981–2010.

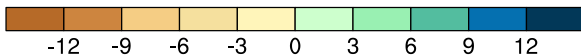
CMIP5

Changement normalisé par  $T$  globale

(93)



% par °C de réchauffement global



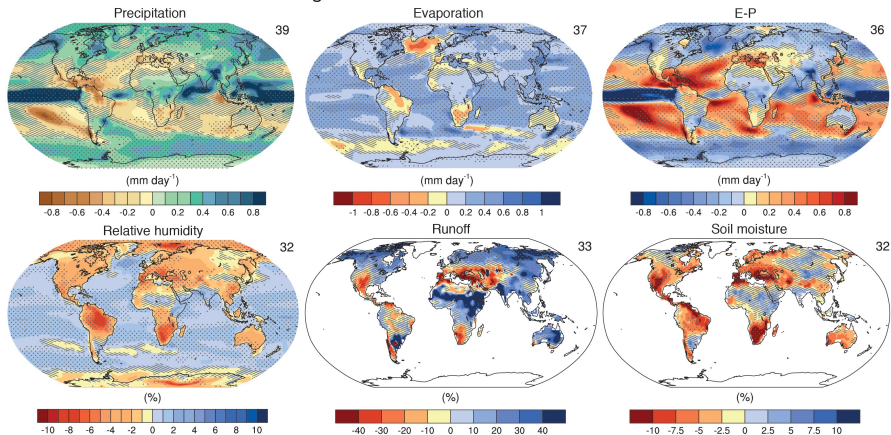
Tracé à partir de 93 projections CMIP5 (multi-modèle et multi-scénario).

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

# 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.

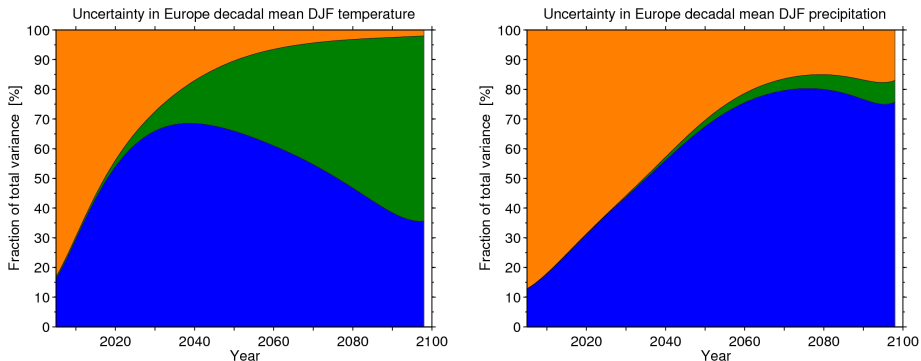
---

\* 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).

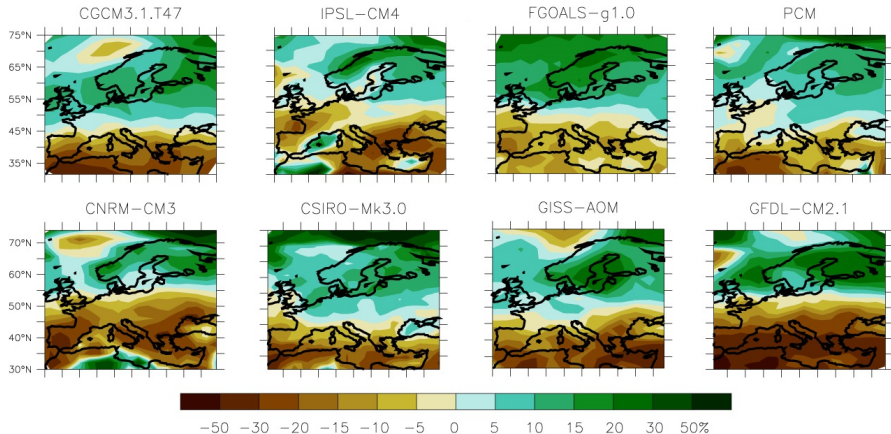


Figures de [E. Hawkins](#), à retrouver sur son [blog](#).

# 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).

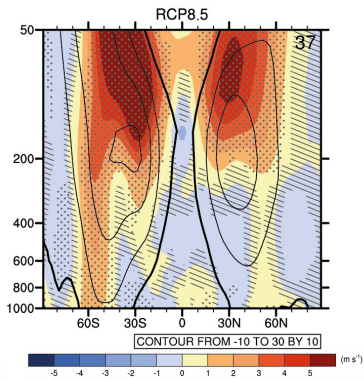
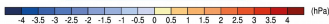
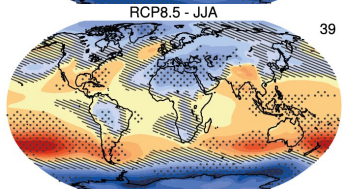
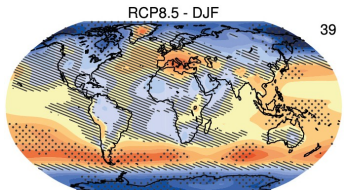
# Changements de circulation atmosphérique – Tropiques

- ▶ Ralentissement probable des cellules de Hadley et Walker.  
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.

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.

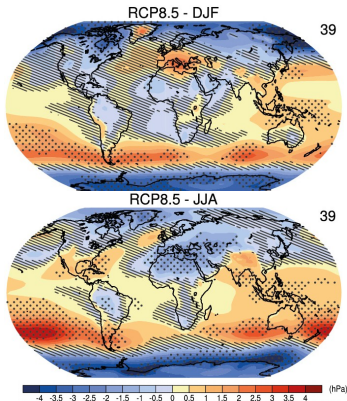
# Changements de circulation atmosphérique – Moyennes lats

- ▶ Décalage probable des courants-jets & rails dépressionnaires vers les pôles.  
En RCP8.5,  $\sim 1^\circ$  de latitude dans l'H.N., et  $\sim 2^\circ$  dans l'H.S.
- ▶ Lié à l'augmentation du gradient de  $T$  équateur-pôle en haute tropo.  
Contrebalancée par Amplification Arctique de surface dans l'H.N.

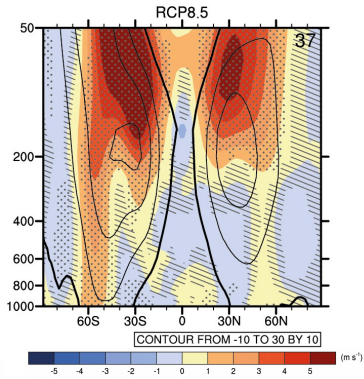
$\Delta$  Pression surface  
et  $\Delta$  Vent zonal

2081–2100  
vs.  
1986–2005

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



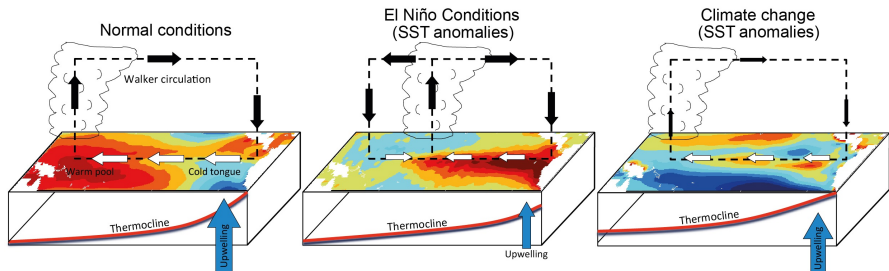
IPCC AR5 (2013)  
Fig. 12.18 & 12.19.





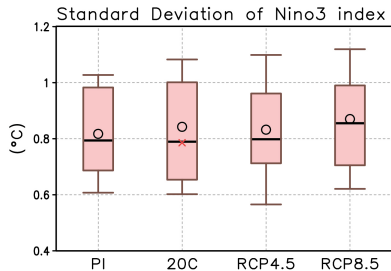
# Changements dans l'ENSO

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



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

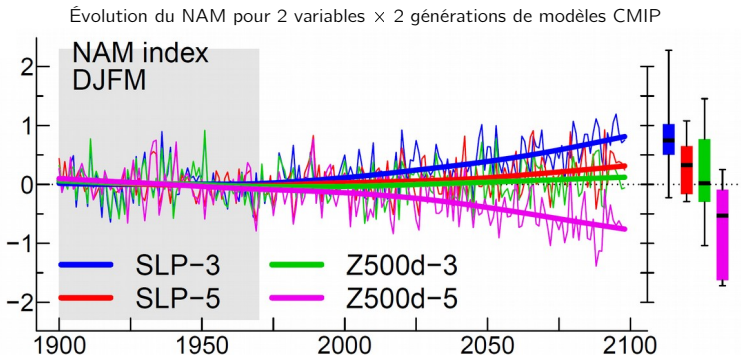
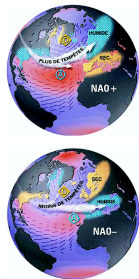
Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Fig. 14.12 et 14.14.



# Changements dans les modes annulaires

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

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



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

# Changements dans l'océan

## ► Acidification.

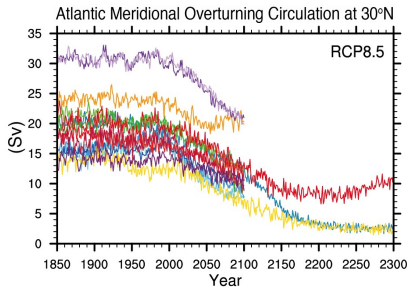
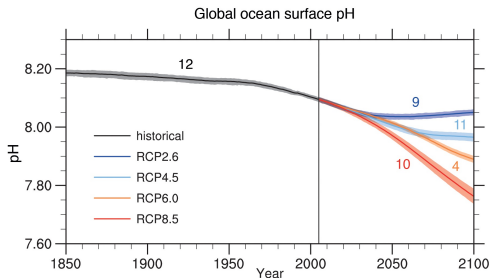
Dissolution du  $\text{CO}_2$  atmosphérique :  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{CO}_3^{2-} + 2\text{H}^+$

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

## ► Ralentissement très probable de la circulation thermohaline.

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

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



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

# Résumé

Réchauffement **global** ne signifie pas uniforme : **signature spatiale** de la réponse modulée par la **variabilité** spatio-temporelle.

Les changements de **variabilité** peuvent être plus importants que les changements **moyens** : exemple des précipitations et de l'intensification du cycle hydrologique.

—

## *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 le n° Spécial Climat de La Météorologie (2015)

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

(entre autres).

# Références I

- ▶ J. Cattiaux and C. Cassou, *Opposite CMIP3/CMIP5 trends in the wintertime Northern Annular Mode explained by combined local sea ice and remote tropical influences*, *Geophys. Res. Lett.* **40** (2013), no. 14, 3682–3687.
- ▶ C. Deser, A.S. Phillips, M.A. Alexander, and B.V. Smoliak, *Projecting North American Climate over the Next 50 Years: Uncertainty due to Internal Variability*, *J. Clim.* **27** (2014), no. 6, 2271–2296.
- ▶ D.R. Easterling and M.F. Wehner, *Is the climate warming or cooling?*, *Geophys. Res. Lett.* **36** (2009), no. 8.
- ▶ 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.
- ▶ A. Hall and X. Qu, *Using the current seasonal cycle to constrain snow albedo feedback in future climate change*, *Geophys. Res. Lett.* **33** (2006), no. 3, L03502.
- ▶ 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.
- ▶ B. Stevens and S. Bony, *What are climate models missing*, *Science* **340** (2013), no. 6136, 1053–1054.