

Système Climatique IENM 8/10 (2A)

Changement climatique actuel : du pré-industriel à aujourd'hui

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

Un mot sur le contexte scientifique

- ▶ Depuis 1990, les scientifiques produisent régulièrement des **rapports de synthèse** (AR) des connaissances sur le changement climatique actuel.
- ▶ La coordination est assurée par le **Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat** (GIEC ou *IPCC*), créé en 1988 par l'ONU et l'OMM.
- ▶ Chaque rapport est divisé en 3 tomes : **physique**, impacts, mitigation.



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

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

—
N.B. Si la création du GIEC est une demande politique, ses rapports sont des synthèses des connaissances **scientifiques** faites par des **scientifiques** selon la procédure **scientifique** de publication *peer-reviewed*.

Évolution des forçages externes

Conséquences pour le système climatique

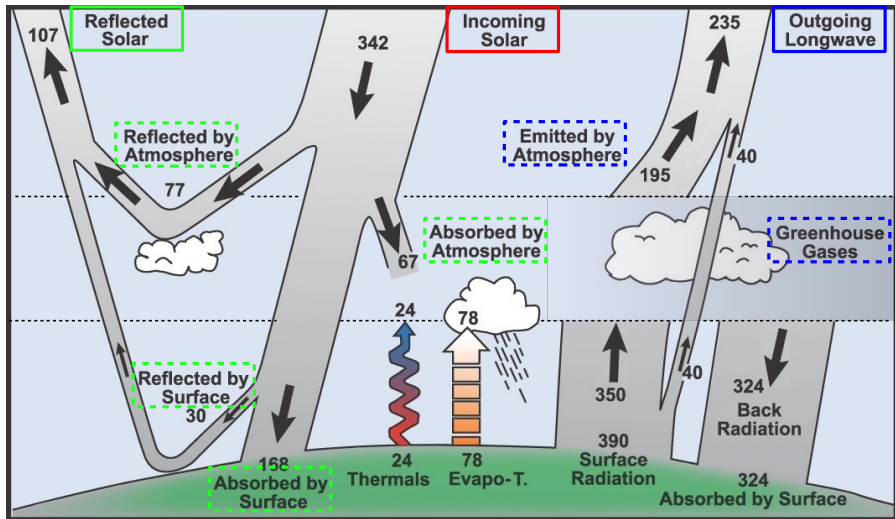
Homogénéisation

Détection et attribution

Comment perturber le climat ? – Rappel

► En perturbant l'équilibre énergétique !

À l'échelle de 10–100 a : **Activité solaire** – **GES** – **Aérosols** – **Land-use**.

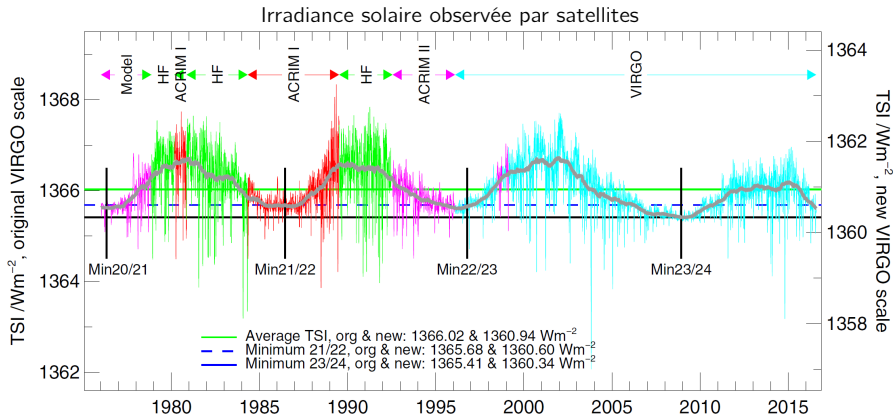


Adapté de l'IPCC AR4 (2007) FAQ 1.1 Fig. 1. Flux en W.m^{-2} .

Forçage solaire – 1/2

► À l'échelle de temps considérée (10–100 a)*, rayonnement entrant dominé par variations cycliques de l'activité solaire (S_0), de période ~ 11 ans.

Entre min et max : $\Delta S_0 \sim \pm 0.5 \text{ W.m}^{-2} \Rightarrow F = (1 - \alpha)S_0/4 \sim \pm 0.1 \text{ W.m}^{-2}$.



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

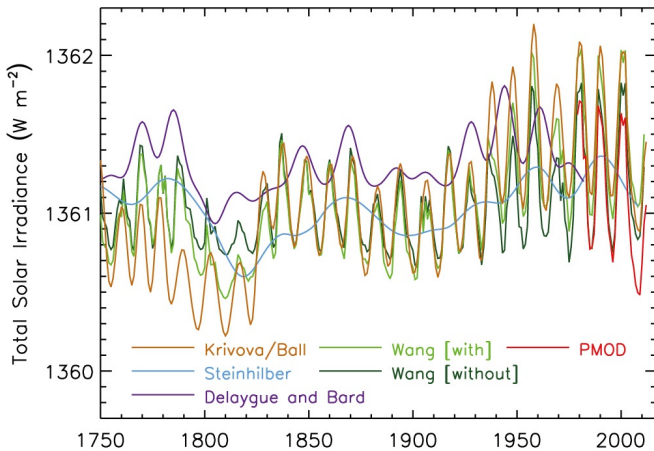
* La croissance du soleil ($t \sim 10^9$ a) et les cycles orbitaux ($t \sim 10^4 - 10^5$ a) sont ici trop lents.

Forçage solaire – 2/2

- Une **variabilité basse-fréquence** se superpose aux cycles à 11 ans.

Entre 1750 et 2019 : $F = 0.01$ $[-0.12 \text{ à } +0.15]$ W.m^{-2} . Estimation IPCC AR6 (2021).

Irradiance solaire reconstruite depuis 1750



Source : IPCC AR5 (2013) Fig. 8.11.

Forçage GES – Émissions

Rappel

- Principaux gaz concernés : CO₂, CH₄ et N₂O.
- Durée de vie dans l'atmosphère : $\sim 10 - 10^2$ a.
- Répartition homogène ; on parle de *Well-Mixed GHG*.

► À l'échelle de temps considérée, les **sources** potentielles de CO₂ sont les activités **volcanique** + **anthropiques** (combustion C fossile + *land-use*).

Entre 1750 et 2019, on* estime :

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

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

* IPCC AR6 (2021) et Global Carbon Project (2020) pour les sources anthropiques. Gerlach (2011) pour le volcanisme, à partir d'un taux annuel moyen de 0.15–0.45 GtCO₂/an (i.e. $\sim 6.8 \cdot 10^{12}$ mol/an).

** 1 GtC = 1 PgC = 10¹⁵ g de carbone \Leftrightarrow 3.664 GtCO₂.

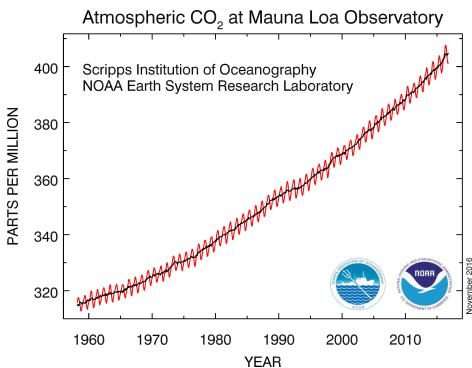
Forçage GES – Concentrations

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

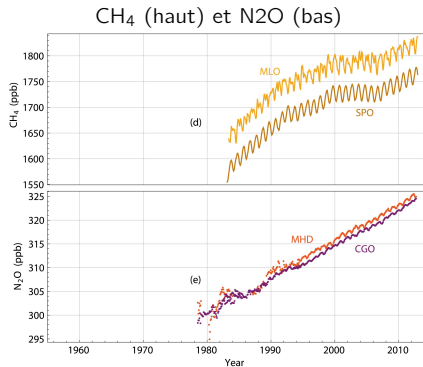
CO₂ : de 278 à 410 ppm. CH₄ : de 715 à 1866 ppb. N₂O : de 270 à 332 ppb.

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

Évolution observée des concentrations de GES



Source : Mesures à [Mauna Loa](#).



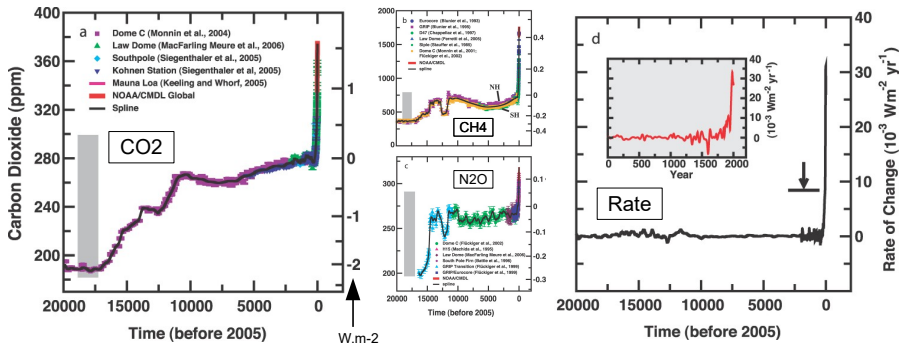
Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Fig. 6.3.

À voir aussi : [vidéo](#) de la NOAA sur l'évolution de [CO₂].

Forçage GES – Concentrations vs. paléo

- ▶ GES présents à l'état **naturel**, mais ↗ actuelle **anthropique** :
- [C] **actuelles** sans précédent dans les carottages glaciaires (e.g. CO₂ ~ 180–280 ppm depuis ~ 1 Ma) ;
- $\partial_t[C]$ **actuel** bien plus rapide que lors de la dernière déglaciation (~ 21 ka) .
- il faut remonter au **Pliocène (3.3–3.0 Ma)** pour retrouver un CO₂ à ~400 ppm (ΔT_s estimé à 1.9–3.6 K par rapport au pré-industriel).

Concentrations des GES (gauche) et taux de croissance du forçage associé (droite)



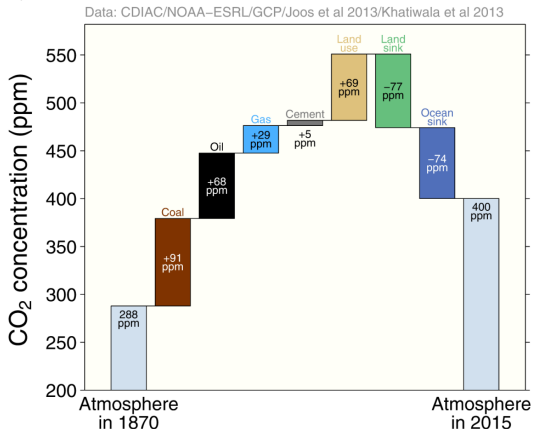
Adapté de l'IPCC AR4 (2007) Fig. 6.4.

Forçage GES – Concentrations vs. émissions

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

Détail des contributions des sources et puits de C à l'élévation de la [CO₂] depuis 1870.

Source : [Global Carbon Project](#).



Encore plus de détails (émissions par pays, etc.) dans les présentations annuelles [Global Carbon Budget](#).

Forçage GES – Synthèse en $W.m^{-2}$

► Forçages radiatifs en 2019 par rapport à 1750 :

$$F_{CO_2} = 2.16 \text{ W.m}^{-2} \sim 5.4 \ln(410/280)$$

$$F_{CH_4} = 0.54 \text{ W.m}^{-2} \sim 0.036(\sqrt{1866} - \sqrt{715})$$

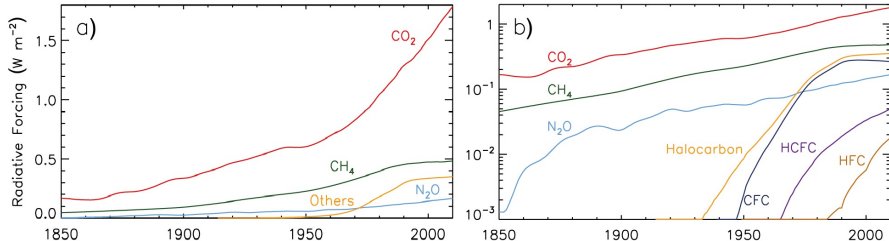
$$F_{N_2O} = 0.21 \text{ W.m}^{-2} \sim 0.11(\sqrt{332} - \sqrt{270})$$

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

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

Estimations IPCC AR6 (2021) et CDIAC.

Forçage radiatif induit par les différents WMGHG (à droite en échelle log)



Adapté de l'IPCC AR5 (2013) Fig. 8.6.

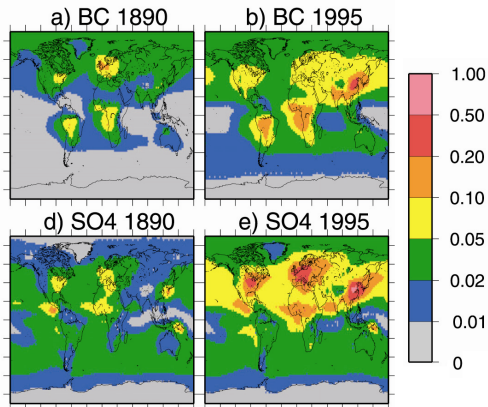
► Autres contributions mineures de GES non *well-mixed* :

- O₃ troposphérique + stratosphérique ($F = 0.47 \text{ W.m}^{-2}$) ;
 - H₂O stratosphérique issue de l'oxydation de CH₄ ($F = 0.05 \text{ W.m}^{-2}$).
- (Cette partie de la vapeur d'eau est considérée comme un forçage et non une rétroaction).

Forçage aérosols

Rappel

- Particules en suspension, durée de vie courte, répartition hétérogène (sauf volcans).
- Origines naturelle (poussières, volcans, feux de forêts) & anthropique (combustion).
- Principales espèces : sulphates (SO_4) & carbone-suies (BC).
- Effets radiatifs direct (absorption / diffusion) & indirects (nuages).



► Depuis le pré-industriel :

- **tendance long-terme anthropique** (relativement co-linéaire à l'augmentation des GES).
- **quelques pics volcaniques** lors des éruptions majeures.

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

Forçage aérosols – Anthropiques

- ▶ Entre 1750 et 2019 : $F = -1.1$ [-1.7 à -0.4] $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Estim. IPCC AR6 (2021).
 - 1/4 effet direct vs. 3/4 indirects, et récemment en diminution ($F_{2014} = -1.3$).

Détail du forçage direct (interaction aérosol-rayonnement) par espèce

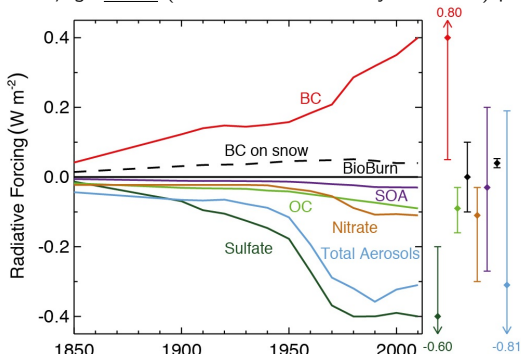


Figure adaptée de l'IPCC AR5 (2013) Fig. 8.8.

- ▶ Autres contributions mineures (mais potentiellement importantes localement) :
 - dépôt de particules absorbantes sur neige et glace ($F \sim 0.08 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) ;
 - traînées de condensation / cirrus induits par aviation ($F \sim 0.06 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$).

Forçage aérosols – Volcaniques

- ▶ **Éruptions massives** : pics ponctuels d'épaisseur optique (AOD)
+ **petites éruptions** : effet *background* \pm important.

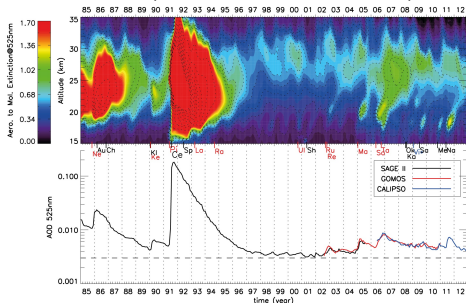
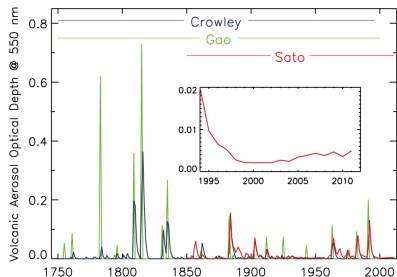
Volcans majeurs depuis le pré-industriel : Grimsvöten/Laki (1785), Tambora (1815), Cosigüina (1835), Krakatoa (1883), Agung (1964), Chichon (1982), Pinatubo (1991).

- ▶ **Lien AOD / forçage** : $F = -20 [\pm 5] \text{ W.m}^{-2}$ par unité d'AOD. IPCC AR6 (2021).

Ex. Pinatubo : pic à 0.2 unités d'AOD $\rightarrow F \sim -4 \text{ W.m}^{-2}$.

Ex. Période 2008–2011 (incl. Eyjafjallajökull de 2010) : $F \sim -0.11 \text{ W.m}^{-2}$.

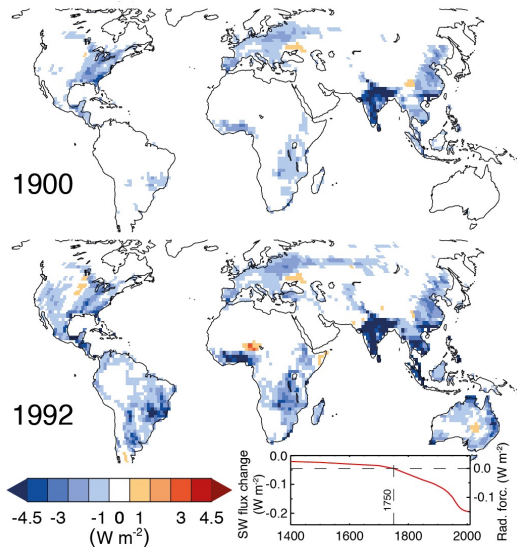
AOD globale 1750–2011 et AOD tropicale 1985–2013 (sur la verticale et intégrée)



Source : IPCC AR5 (2013), Figs 8.12 & 8.13.

Forçage *land-use*

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



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

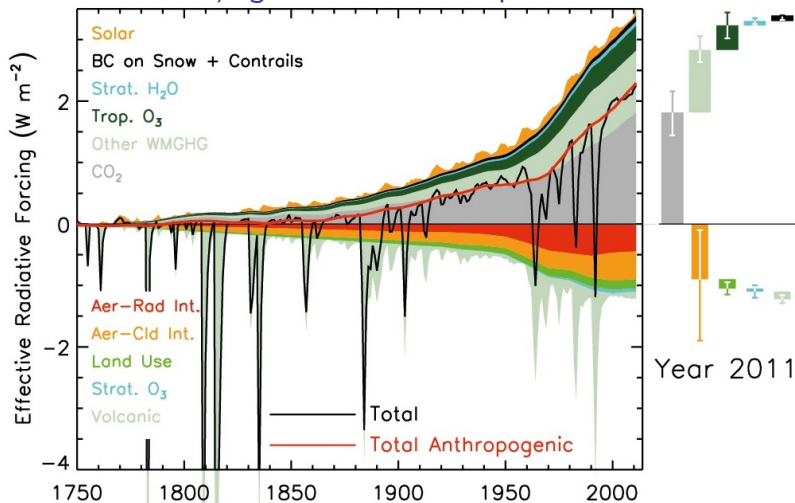
$$F = -0.2 [\pm 0.1] \text{ W.m}^{-2},$$

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

* IPCC AR6 (2021).

← Adapté de l'ICC AR5 (2013) Fig. 8.9

Synthèse des forçages externes depuis 1750



Source : IPCC AR5 (2013) Fig. 8.18.

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

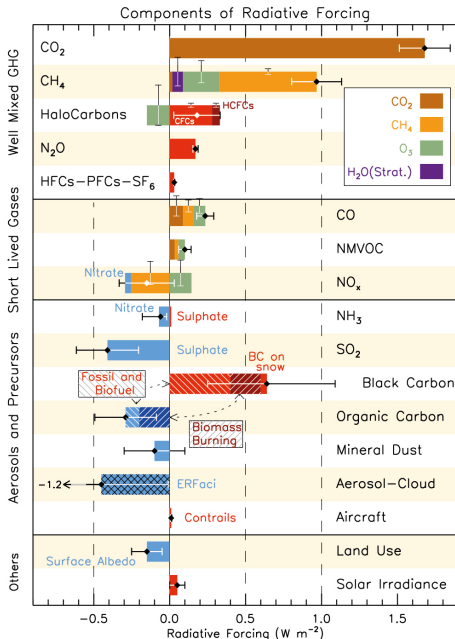
Estimation IPCC AR6 (2021).

Synthèse des forçages externes en 2011

► On peut aussi s'amuser à classer par source...

► L'incertitude majeure sur les forçages concerne les aérosols anthropiques.

Source : IPCC AR5 (2013) Fig. 8.17.



Rappel sur les rétroactions – cf. cours n°6

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).

Résumé

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

L'effet des **GES** est atténué par celui des **aérosols** anthropiques ; leur évolution temporelle est relativement colinéaire.

Certains forçages sont relativement **uniformes spatialement** (e.g. WMGHG), d'autres moins (e.g. O₃, aérosols), d'autres vraiment pas (e.g. BC sur neige).

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

—

Et donc... ?

Évolution des forçages externes

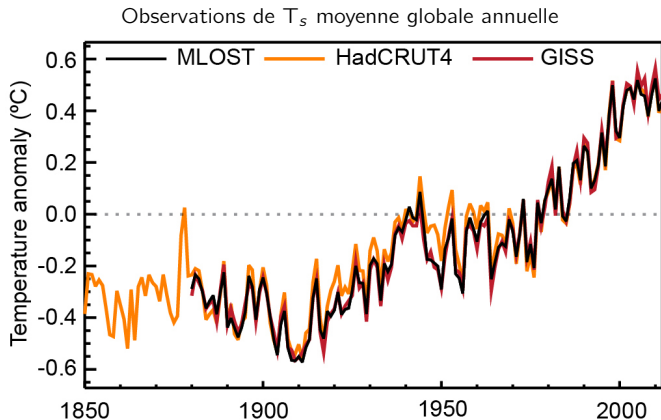
Conséquences pour le système climatique

Homogénéisation

Détection et attribution

Réchauffement global

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



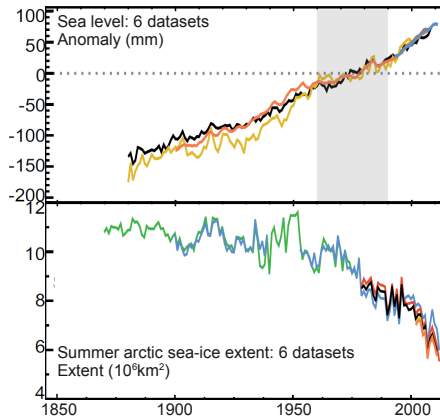
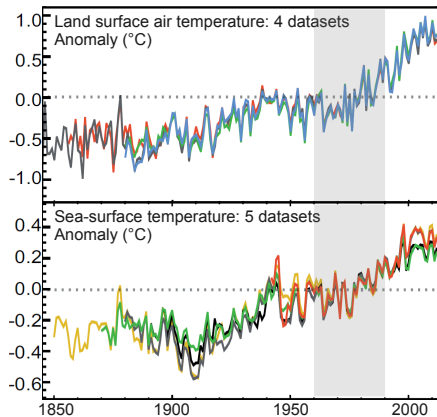
Source : IPCC AR5 (2013) Fig. 2.20.

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

* Estimation IPCC AR6 (2021).

Multiples indicateurs du réchauffement global

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



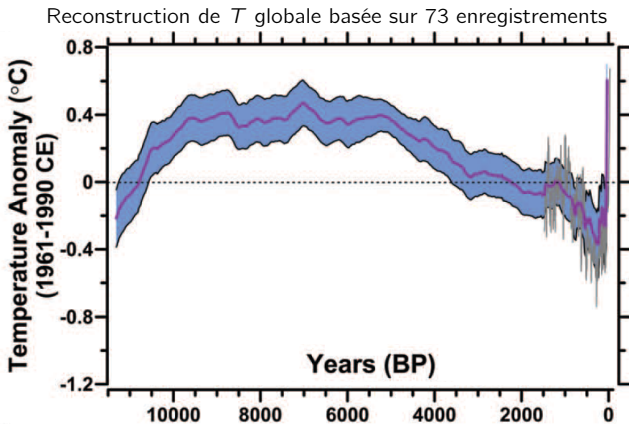
Adapté de l'IPCC AR5 (2013) FAQ 2.1 Fig. 1.

Réchauffement actuel vs. cycles g-ig

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

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

► Les modèles ne simulent pas d'**entrée en glaciation** durant les prochains 50 ka si la $[\text{CO}_2] > 300$ ppm, ou les émissions > 1000 GtC.

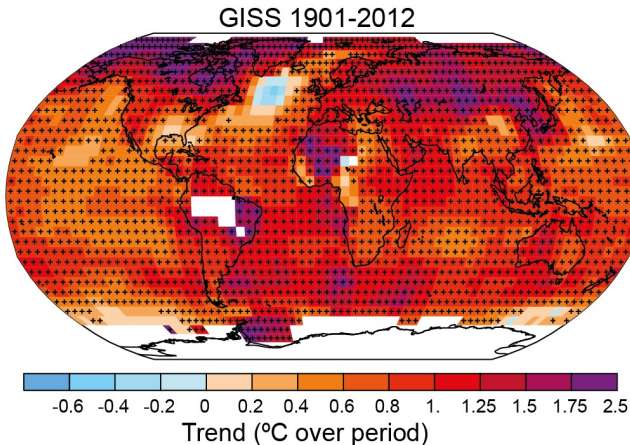


Source : Marcott et al. (2013).

Global mais pas uniforme – Structure horizontale

- ▶ Réchauffement plus fort sur continents que sur océans.
- ▶ Réchauffement plus fort aux hautes latitudes (e.g. Amplification Arctique).
- ▶ Léger refroidissement dans l'Atlantique Nord (variabilité ? THC ?).

Attention : l'observation du signal long-terme est bruité par la variabilité.



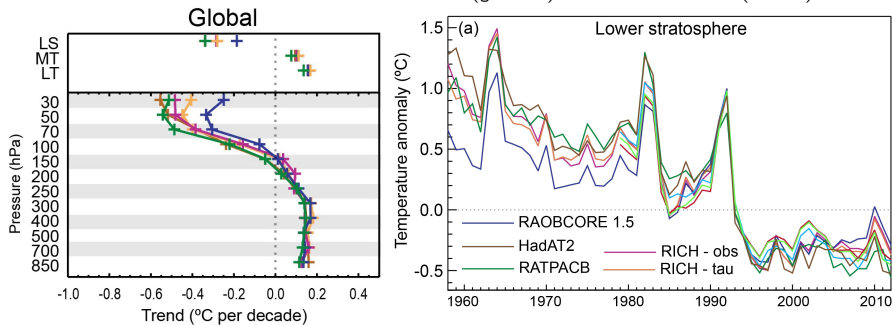
Source : IPCC AR5 (2013) Fig. 2.21.

Global mais pas uniforme – Structure verticale

N.B. Obs d'altitude : radiosondages (depuis 1950s) et satellites (depuis 1970s).

- ▶ Diminution du *lapse rate troposphérique* aux tropiques (et en global), augmentation aux hautes latitudes (amplification polaire de surface).
- ▶ *Refroidissement stratosphérique*, preuve d'un effet de serre accru.
- ▶ Signature marquée des *éruptions volcaniques* massives sur la T strato.

Profil vertical des tendances 1958–2012 (gauche) et T basse strato (droite).

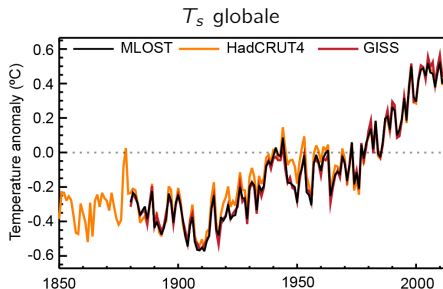


Source : IPCC AR5 (2013) Figs 2.24 & 2.26.

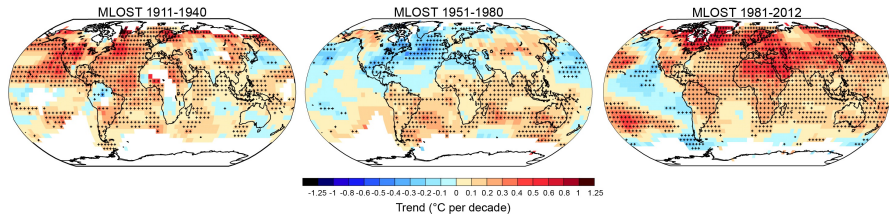
Réchauffement vs. variabilité

► La **variabilité interne basse fréquence** (multi-décennale) peut ponctuellement et localement masquer le réchauffement de long-terme (ou l'amplifier).

→ Sensibilité des **calculs de tendances** à la période ! (durée, années début/fin).



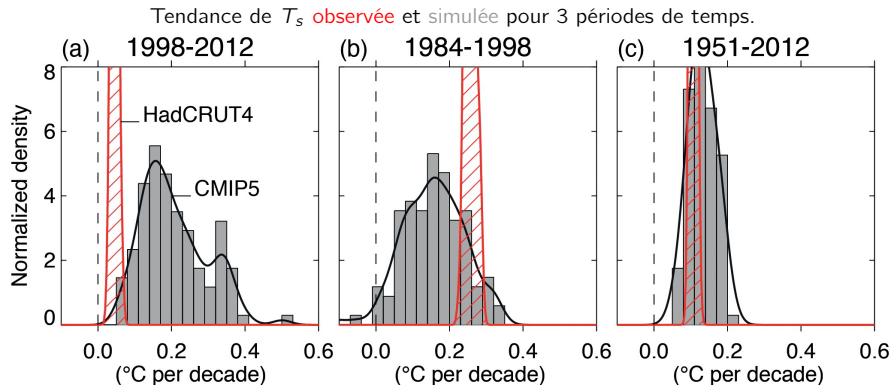
Exemple : tendances de T_s sur 30 ans pour 3 périodes de temps distinctes



Source : IPCC AR5 (2013) Fig. 2.20 et 2.22.

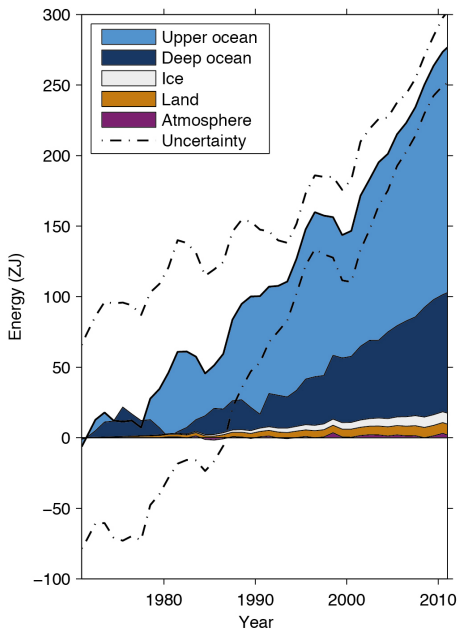
Réchauffement vs. variabilité – Le fameux plateau 1998–2012

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



Source : IPCC AR5 (2013) Fig. Box. TS.3.1.

Déséquilibre énergétique



La réponse transitoire en ΔT_s ne compense pas le forçage F .

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

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

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

* Estimations IPCC AR6 (2021).

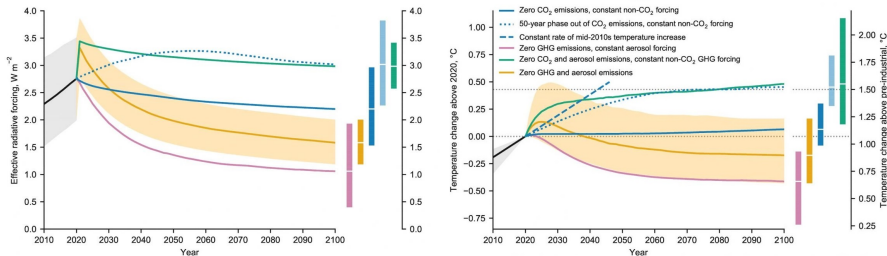
** 1 ZJ = 10^{21} J.

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

Notion de *committed warming*

- ▶ Le déséquilibre énergétique actuel *engage* à un réchauffement supplémentaire de ~ 0.5 K en cas de **stabilisation des [C]** (F constant).
→ Grosso modo $\Delta R_{actuel}/|\lambda|$ (inertie des océans).
- ▶ En cas d'**arrêt total des émissions**, la T ne revient pas à son niveau pré-industriel (ΔT estimé à 0.9 K à l'équilibre).
→ Nouvel équilibre atteint avec [C] de GES + élevées.

Estimations de F et T pour différents scénarios d'arrêts d'émissions



Source : IPCC SR1.5 (2018) Fig. 1.5.

Tout ceci n'est pas nouveau

By fuel combustion man has added about 150.000 million tons of carbon dioxide to the air during the past half century.

[...] the increase in mean temperature, due to the artificial production of carbon dioxide, is estimated to be at the rate of 0.003°C per year at the present time.



G. Callendar
(1898-1964)

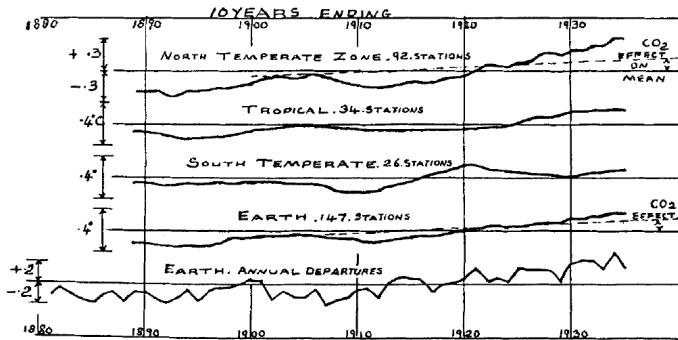
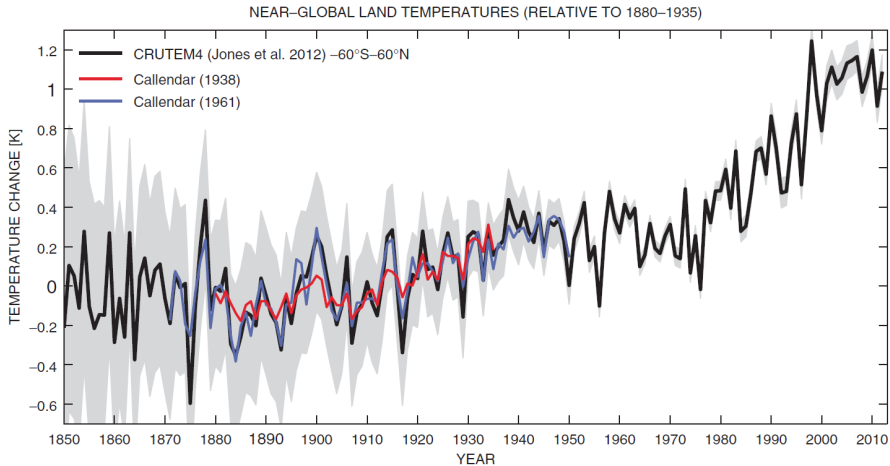


FIG. 4.—Temperature variations of the zones and of the earth. Ten-year moving departures from the mean, 1901-1930, $^{\circ}\text{C}$.

Extraits de [The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature](#) (QJRM, 1938).

Callendar, 75 ans après

- Callendar avait le bon ordre de grandeur des **tendances de T_s** ...
... et a eu un peu de chance avec la **variabilité interne**.



Source : Hawkins and Jones (2013).

Évolution des forçages externes

Conséquences pour le système climatique

Homogénéisation

Détection et attribution

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**

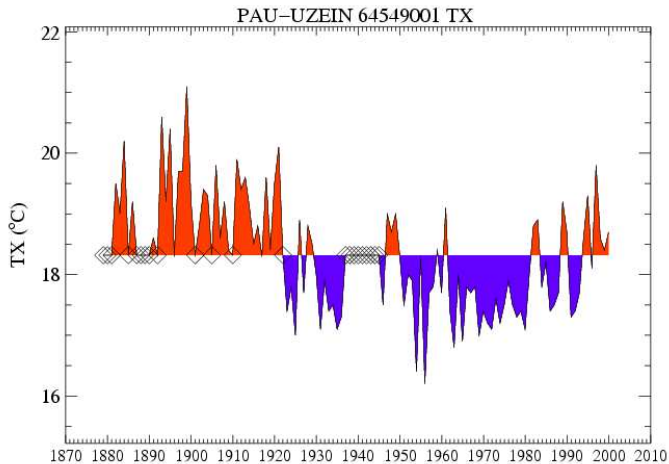


Source : Cours d'O. Mestre (Météo-France).

C'est la question de l'**homogénéisation de données**.

Homogénéisation de données – Le problème

- Possibles ruptures dans la série temporelle concaténée.

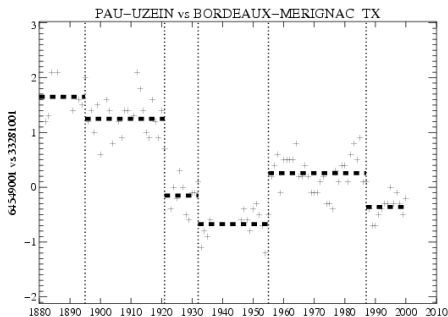
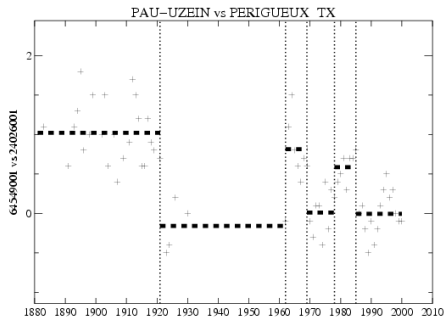


Source : Cours d'O. Mestre (Météo-France).

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.



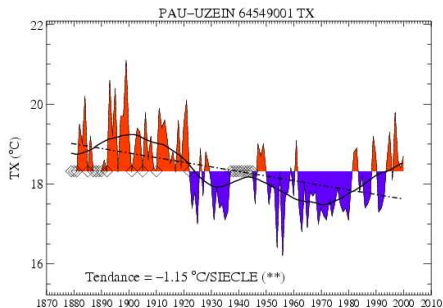
Source : Cours d'O. Mestre (Météo-France).

Homogénéisation de données – Exemple de résultat 1/2

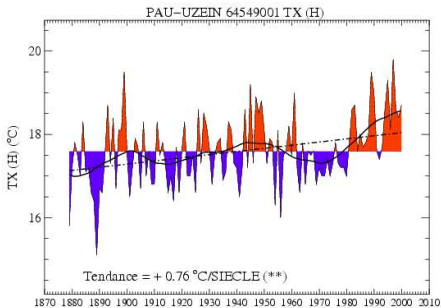
► Série de T à Pau-Uzein avant / après homogénéisation.

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

■ « AVANT »



■ « APRES »



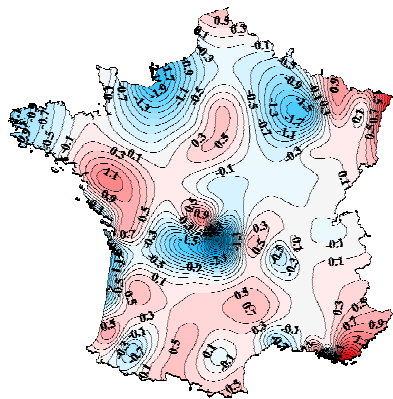
Source : Cours d'O. Mestre (Météo-France).

Homogénéisation de données – Exemple de résultat 2/2

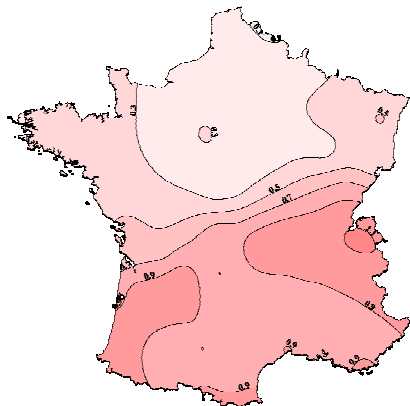
► Tendances 1901–2000 de T France avant / après homogénéisation.

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

■ « AVANT »



■ « APRES »



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

Évolution des forçages externes

Conséquences pour le système climatique

Homogénéisation

Détection et attribution

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**).

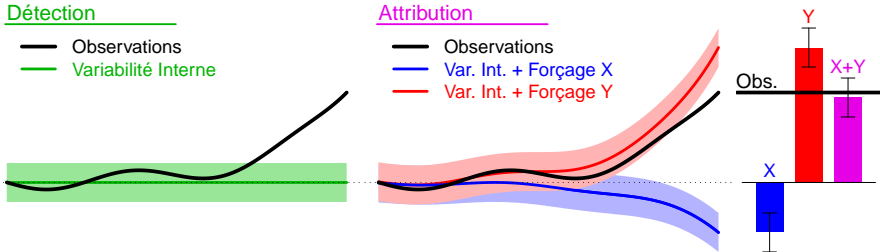
Exemple schématique d'un changement **détecté** et **attribué** aux 2 causes X et Y .

Détection

- Observations
- Variabilité Interne

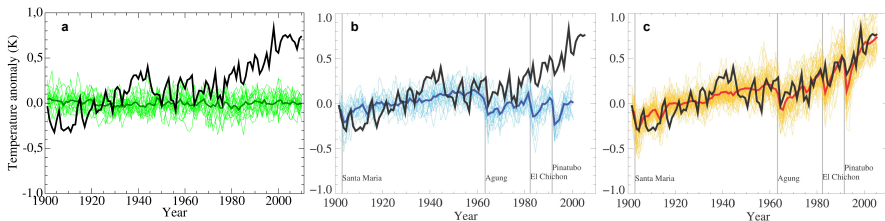
Attribution

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



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

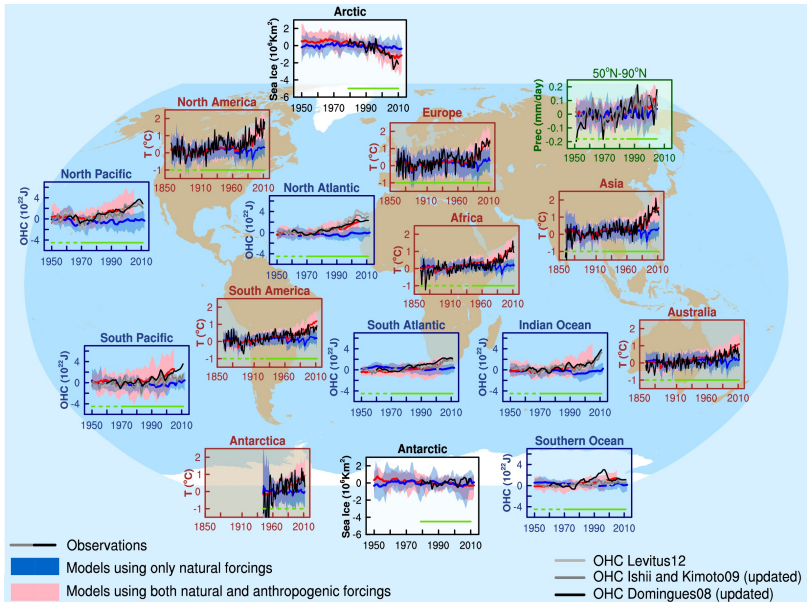
Le signal observé de T globale n'est pas expliqué par la **variabilité interne**, ni par le seul ajout des **causes naturelles** (solaire, volcans), mais le devient avec l'ajout des **causes anthropiques** (GES, aérosols) *.



Adapté de l'IPCC AR4 (2007) Fig. 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.

Hypothèse 1 : additivité.

→ On écrit que les observations Y_ℓ ($Y_{s,t}$)

= la moyenne m_ℓ

+ la variabilité interne ε_ℓ

+ la somme des vraies réponses $X_\ell^{*(i)}$ aux forçages externes i .

Remarque : en pratique on ne connaît pas X^* mais X , la réponse simulée par les modèles de climat.

Hypothèse 2 : les réponses vraies et simulées ne diffèrent qu'en amplitude.

Modèle statistique standard

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

Modèle statistique standard

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

→ Il suffit ensuite de tester les facteurs d'amplitude β_i .

1. Détection (*on cherche à rejeter H_0*):

$$H_0 : \beta = 0_N \text{ vs. } H_1 : \beta \neq 0_N .$$

2. Attribution, cohérence avec toutes causes (*on cherche à accepter H_0*) :

$$H_0 : \beta_i = 1_N \text{ vs. } H_1 : \beta \neq 1_N .$$

3. Attribution, incohérence sans i (*on cherche à rejeter H_0*) :

$$H_0 : \beta_i = 0 \text{ vs. } H_1 : \beta_i \geq 0 .$$

Modèle statistique standard

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

Hypothèse 3 : la distribution de ε_ℓ est connue (modèles de climat).

→ On estime les β_i par régression linéaire avec erreurs sur les variables (méthode dite *optimal fingerprinting*) à partir de X , Y et $C = \text{Cov}(\varepsilon_\ell)$.

◇ Cas $N = 1$:

$$\hat{\beta} = \frac{Y' C^{-1} X}{X' C^{-1} X} .$$

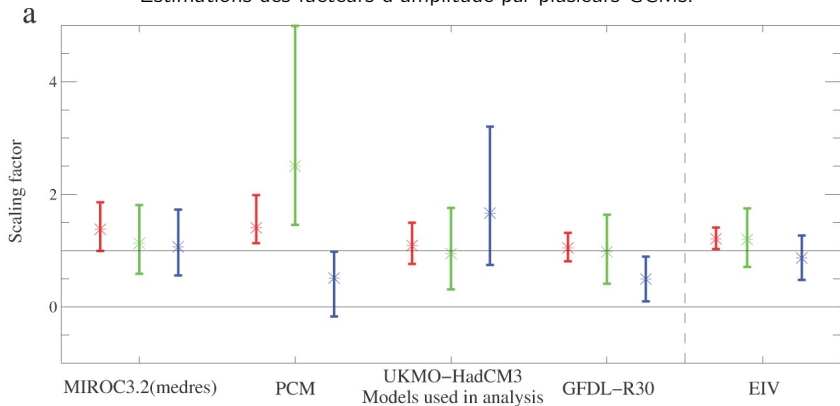
◇ Cas $N > 1$:

$$\hat{\beta} = (X' C^{-1} X)^{-1} X' C^{-1} Y .$$

D&A : exemple d'estimation des β_i

$$\text{Reconstruction } T_{\text{OBS}} = \beta_{\text{GES}} T_{\text{GES}} + \beta_{\text{OA}} T_{\text{OA}} + \beta_{\text{NAT}} T_{\text{NAT}} + \varepsilon$$

Estimations des facteurs d'amplitude par plusieurs GCMs.



Source : IPCC AR4 (2007) Fig. 9.9.

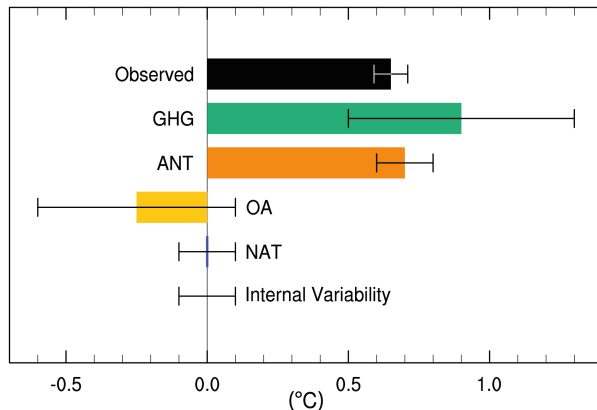
GES : Gaz à effet de serre – OA : Autres anthropiques (e.g. aérosols) – NAT : Naturels.

D&A : résultat majeur

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

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

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



Source : IPCC AR5 (2013) Fig. 10.5.

* La séparation GHG vs. Other Ant. (aérosols) est incertaine en raison de leur colinéarité.

Résumé

Les activités humaines induisent un **forçage** radiatif positif. L'effet des GES est atténué par celui des aérosols anthropiques.

La réponse du système à ce forçage est amplifiée par la présence de **rétroactions** positives, et s'illustre par des **tendances** observées dans toutes ses composantes, qui se superposent à la **variabilité interne**.

Certaines tendances observées ne peuvent pas être expliquées par la **variabilité naturelle** seule, et sont donc *attribuées* au **forçage anthropique**.

La *détection* du **signal** anthropique dans le **bruit** de la variabilité naturelle est limitée par la qualité des observations disponibles, la performance des modèles de climat, et la difficulté de séparer les effets des GES et des aérosols.

Références I

- ▶ G. S. Callendar, *The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature*, Q. J. R. Meteorol. Soc. **64** (1938), no. 275, 223–240.
- ▶ J.-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.
- ▶ T. Gerlach, *Volcanic versus anthropogenic carbon dioxide*, Eos, Transactions American Geophysical Union **92** (2011), no. 24, 201–202.
- ▶ K. Hasselmann, *On the signal-to-noise problem in atmospheric response studies*, Meteorology of tropical oceans (1979), 251–259.
- ▶ _____, *Multi-pattern fingerprint method for detection and attribution of climate change*, Clim. Dyn. **13** (1997), no. 9, 601–611.
- ▶ 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. 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.
- ▶ 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.