Changement climatique : le certain, le probable, le possible et l'inconnu

François-Marie Bréon

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement

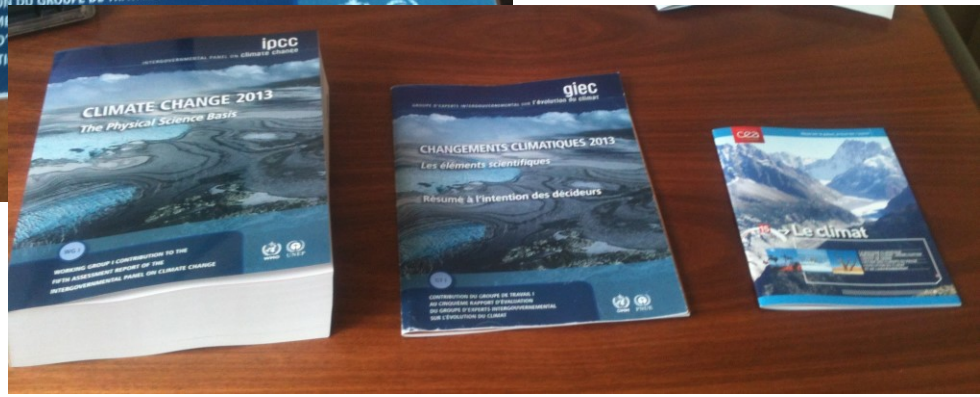
CEA-CNRS-UVSQ

Le travail du GIEC

On part de la littérature scientifique

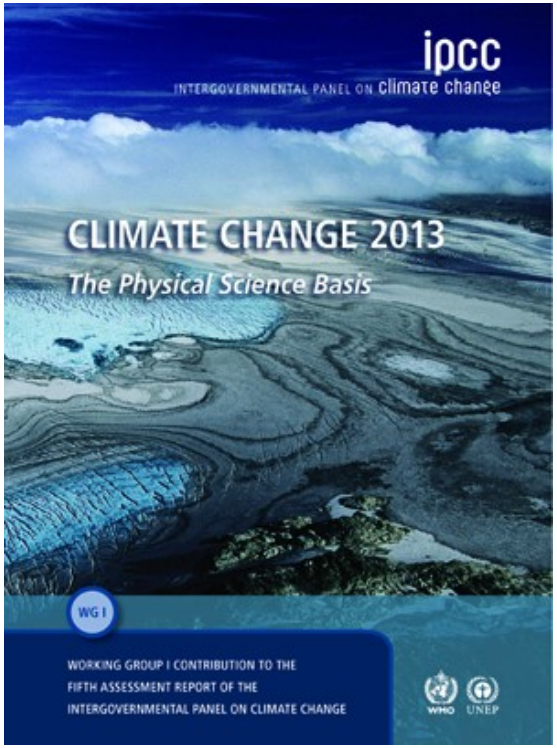
Rapport complet (500-1000 pages)

"Résumé pour les décideurs" (20-30 pages)

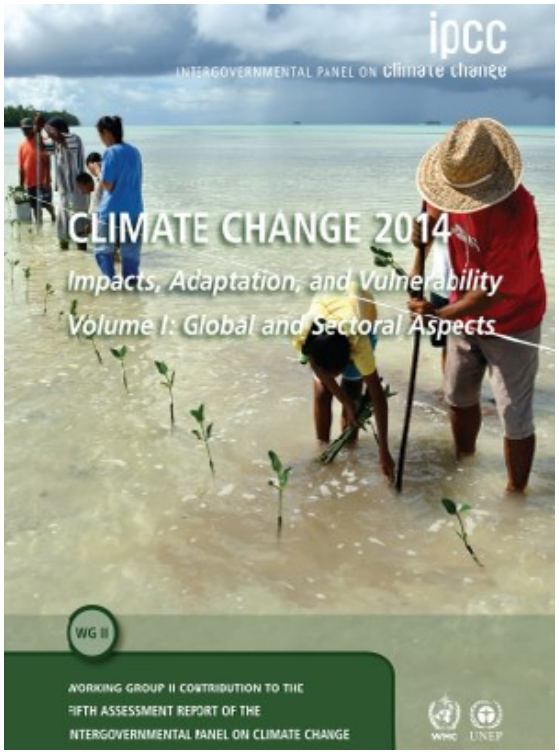


Et la communication grand public qui va avec…

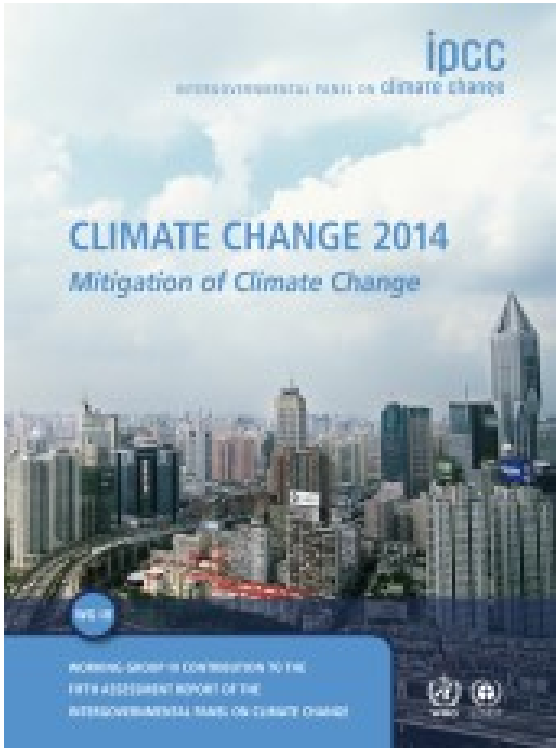
GIEC : Trois Groupes



Groupe 1
Science du climat



Groupe 2
Impact et vulnérabilité



Groupe 3
Atténuation du CC

Le GIEC a été établi en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale (WMO) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (UNEP)

Le Groupe 1 en chiffres

Messages clés

19 points

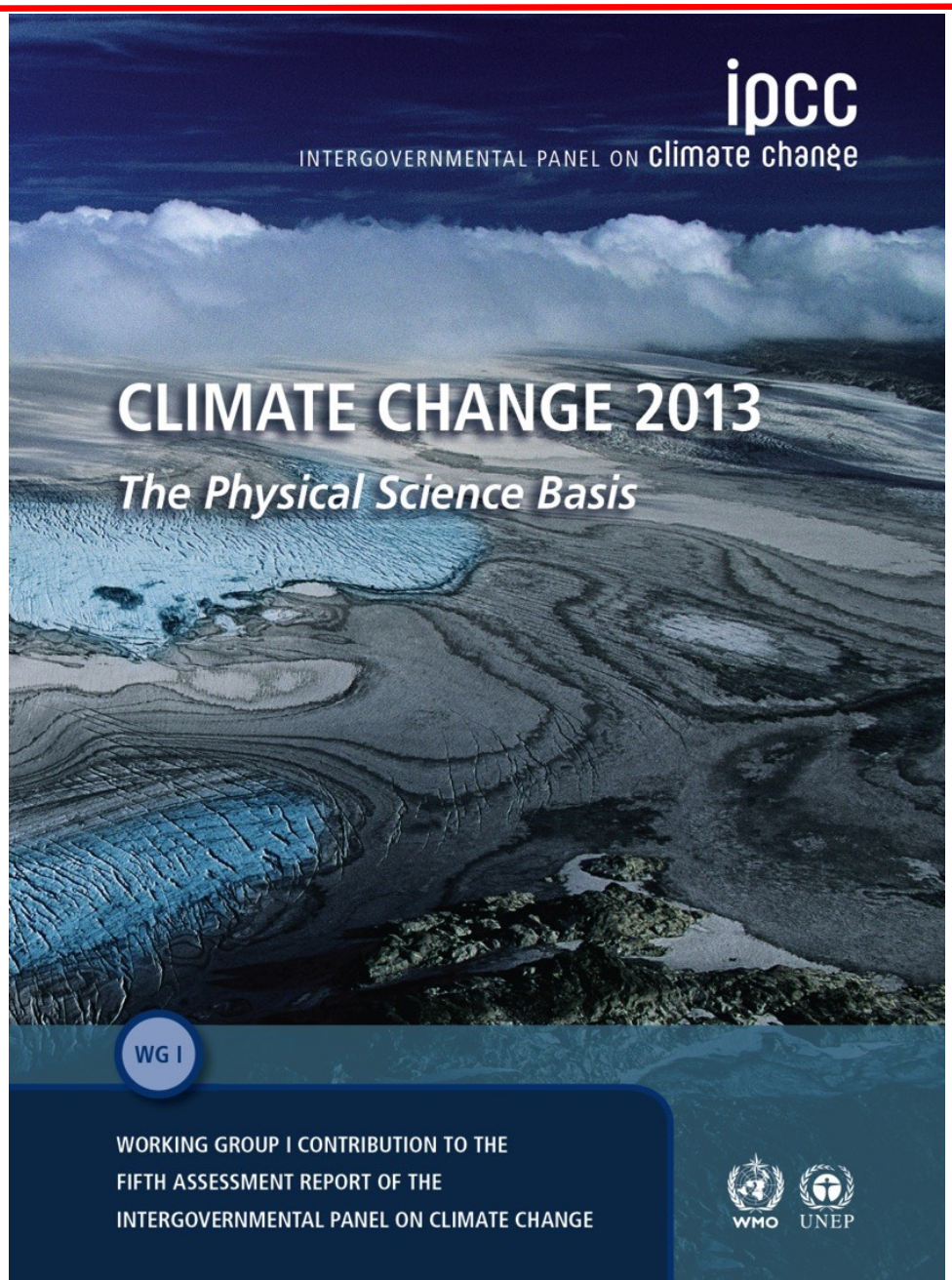
Résumé pour Décideurs
~14,000 mots

14 Chapitres
Atlas des projections

54,677 commentaires
de 1089 experts

259 auteurs
et 600 contributeurs

9200 publications citées



Titres des chapitres

Observations

Chapter 1: Introduction

Chapter 2: Observations: Atmosphere and Surface

Chapter 3: Observations: Ocean

Chapter 4: Observations: Cryosphere

Chapter 5: Information from Paleoclimate Archives

Interprétation

Chapter 6: Carbon and Other Biogeochemical Cycles

Chapter 7: Clouds and Aerosols

Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing

Chapter 9: Evaluation of Climate Models

Chapter 10: Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional

Projections

Chapter 11: Near-term Climate Change: Projections and Predictability

Chapter 12: Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility

Chapter 13: Sea Level Change

Chapter 14: Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change

Des rapports truffés d'erreurs ?

megadeltas, particularly the Zhujiang delta, Changjiang delta and Huanghe delta, are also economically important, accounting for a substantial proportion of China's total GDP (Niou, 2002; She, 2004). Ecologically, the Asian megadeltas are critical diverse ecosystems of unique assemblages of plants and animals located in different climatic regions (IUCN, 2003b; ACIA, 2005; Macintosh, 2005; Sanlaville and Prieur, 2005). However, the megadeltas of Asia are vulnerable to climate change and sea-level rise that could increase the frequency and level of inundation of megadeltas due to storm surges and floods from river drainage (Nicholls, 2004; Woodroffe et al., 2006) putting communities, biodiversity and infrastructure at risk of being damaged. This impact could be more pronounced in megacities located in megadeltas where natural ground subsidence is enhanced by human activities, such as in Bangkok in the Chao Phraya delta, Shanghai in the Changjiang delta, Tianjin in the old Huanghe delta (Nguyen et al., 2000; Li et al., 2004a; Jiang, 2005; Li et al., 2005; Woodroffe et al., 2006). Climate change together with human activities could also enhance erosion that has, for example, caused the Lena delta to retreat at a rate of 3.6 to 4.5 m/yr (Leont'yev, 2004) and has affected the progradation and retreat of megadeltas fed by rivers originating from the Tibetan Plateau (Li et al., 2004b; Thanh et al., 2004; Shi et al., 2005; Woodroffe et al., 2006). The adverse impacts of salt-water intrusion on water supply in the Changjiang delta and Zhujiang delta, mangrove forests, agriculture production and freshwater fish catch, resulting in a loss of US$125x$10^6$ per annum in the Indus delta could also be aggravated by climate change (IUCN, 2003a, b; Shen et al., 2003; Huang and Zhang, 2004).

Externally, the sediment supplies to many megadeltas have been reduced by the construction of dams and there are plans

glaciers form a unique reservoir which supports perennial rivers such as the Indus, Ganga and Brahmaputra which, in turn, are the lifeline of millions of people in South Asian countries (Pakistan, Nepal, Bhutan, India and Bangladesh). The Gangetic basin alone is home to 500 million people, about 10% of the total human population in the region.

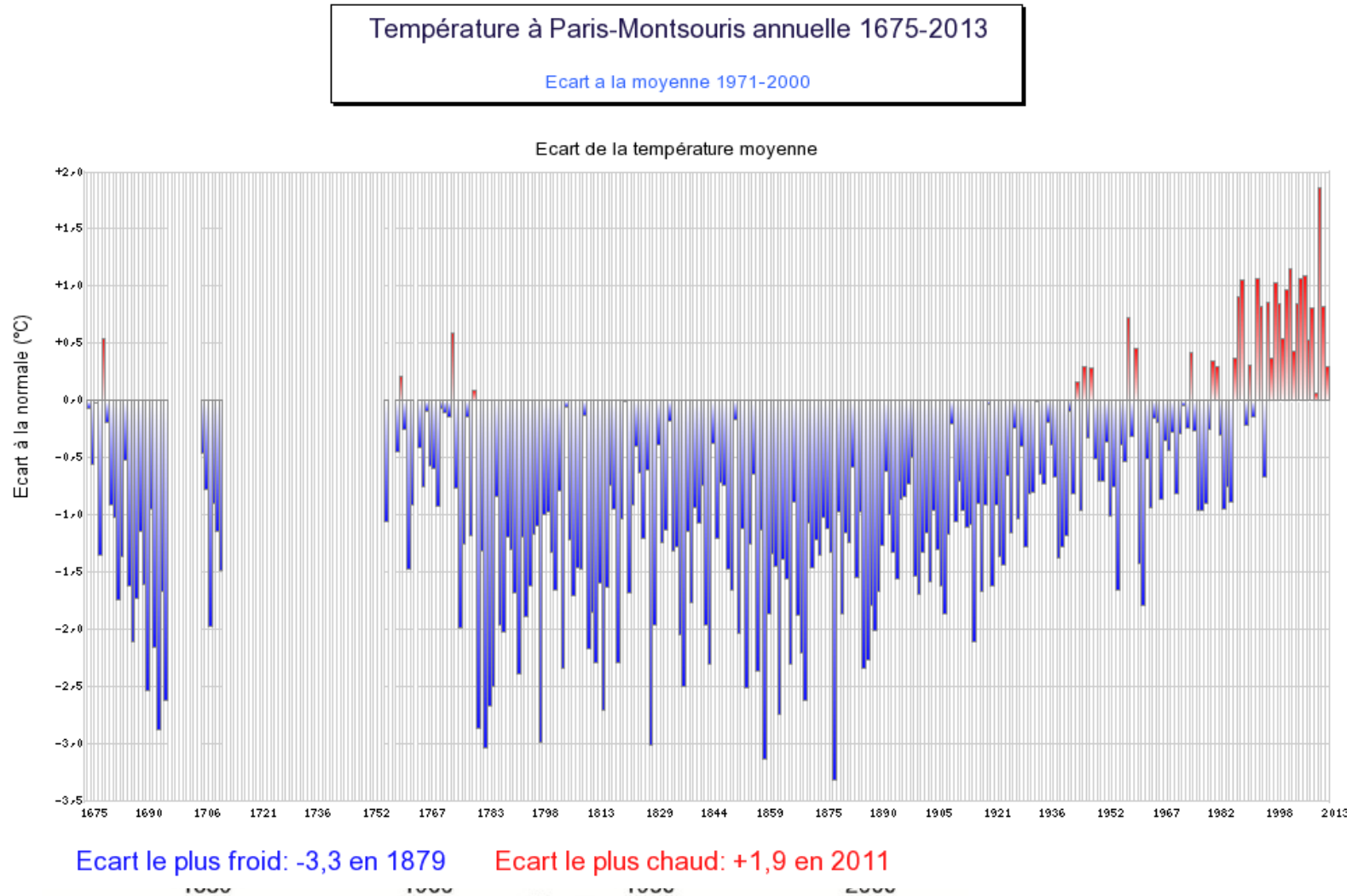
Glaciers in the Himalaya are receding faster than in any other part of the world (see Table 10.9) and, if the present rate continues, the likelihood of them disappearing by the year 2035 and perhaps sooner is very high if the Earth keeps warming at the current rate. Its total area will likely shrink from the present 500,000 to 100,000 km^2 by the year 2035 (WWF, 2005).

The receding and thinning of Himalayan glaciers can be attributed primarily to the global warming due to increase in anthropogenic emission of greenhouse gases. The relatively high population density near these glaciers and consequent deforestation and land-use changes have also adversely affected these glaciers. The 30.2 km long Gangotri glacier has been receding alarmingly in recent years (Figure 10.6). Between 1842 and 1935, the glacier was receding at an average of 7.3 m every year; the average rate of recession between 1985 and 2001 is about 23 m per year (Hasnain, 2002). The current trends of glacial melts suggest that the Ganga, Indus, Brahmaputra and other rivers that criss-cross the northern Indian plain could likely become seasonal rivers in the near future as a consequence of climate change and could likely affect the economies in the region. Some other glaciers in Asia – such as glaciers shorter than 4 km length in the Tibetan Plateau – are projected to disappear and the glaciated areas located in the headwaters of the Changjiang River will likely decrease in area by more than 60% (Shen et al., 2002).

493

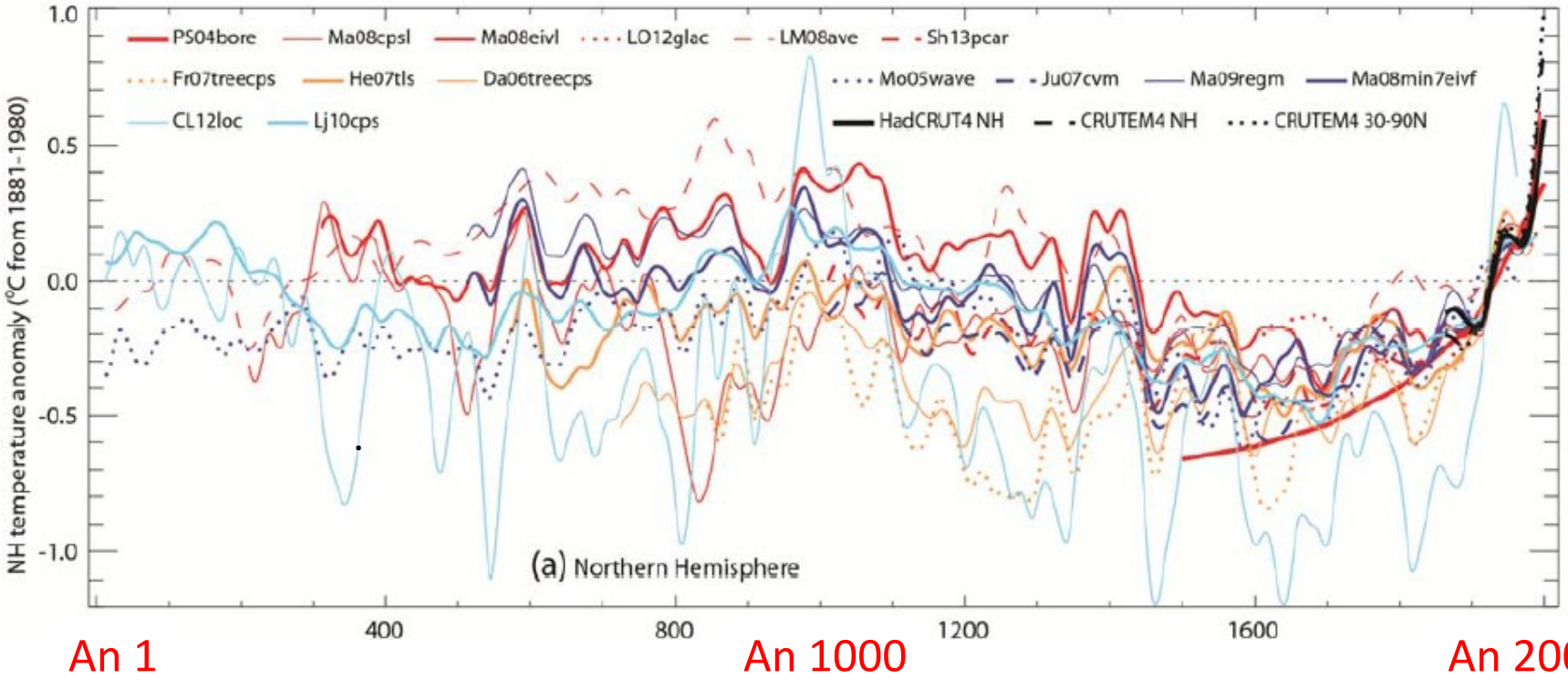
L'affaire des glaciers de l'Himalaya. 6 lignes dans un texte de 800 pages…

Température des derniers 150 ans



Chacune des trois dernières décennies a été successivement plus chaude à la surface de la Terre que toutes les décennies précédentes depuis 1850.

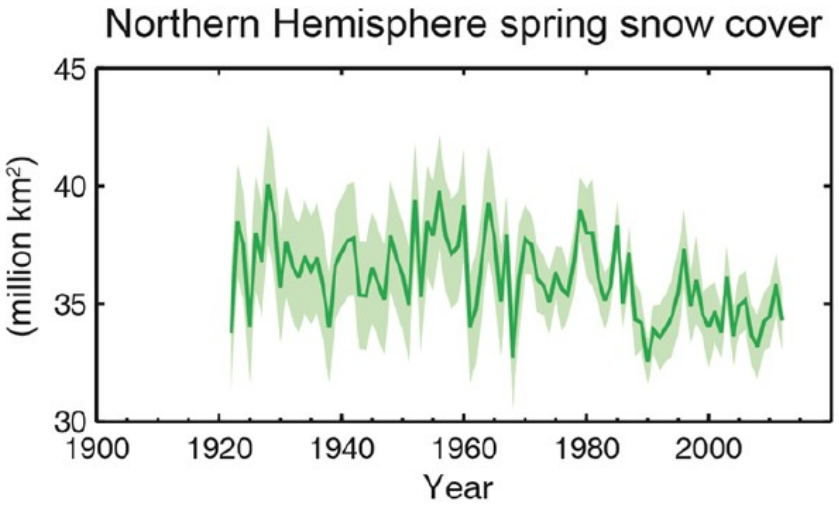
Température du dernier millénaire

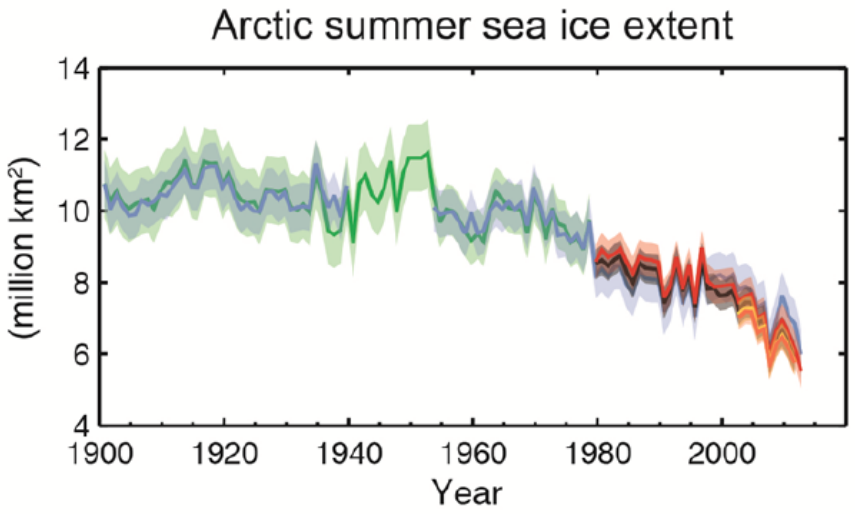


An 1 An 1000 An 2000

Dans l'hémisphère nord, la période 1983–2012 a *probablement* été la période de 30 ans la plus chaude des 1400 dernières années *(confiance moyenne)*

Cryosphère

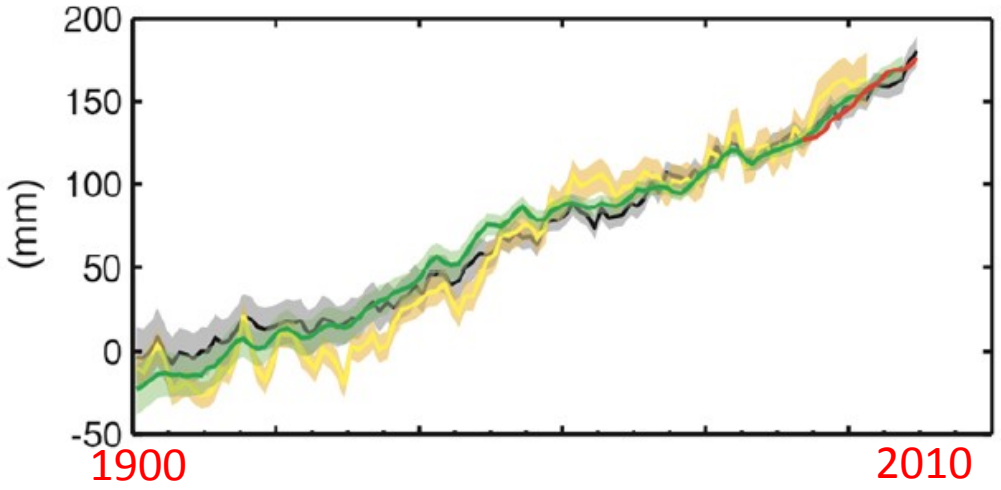




Sur les deux dernières décennies, la masse des calottes glaciaires a diminué, les glaciers de pratiquement toutes les régions du monde ont continué à reculer, et les étendues de la banquise arctique et du manteau neigeux de printemps de l'hémisphère nord ont diminué (*degré de confiance élevé*)

De multiples éléments indiquent que l'Arctique connaît un réchauffement important depuis le milieu du XX^{e} siècle.

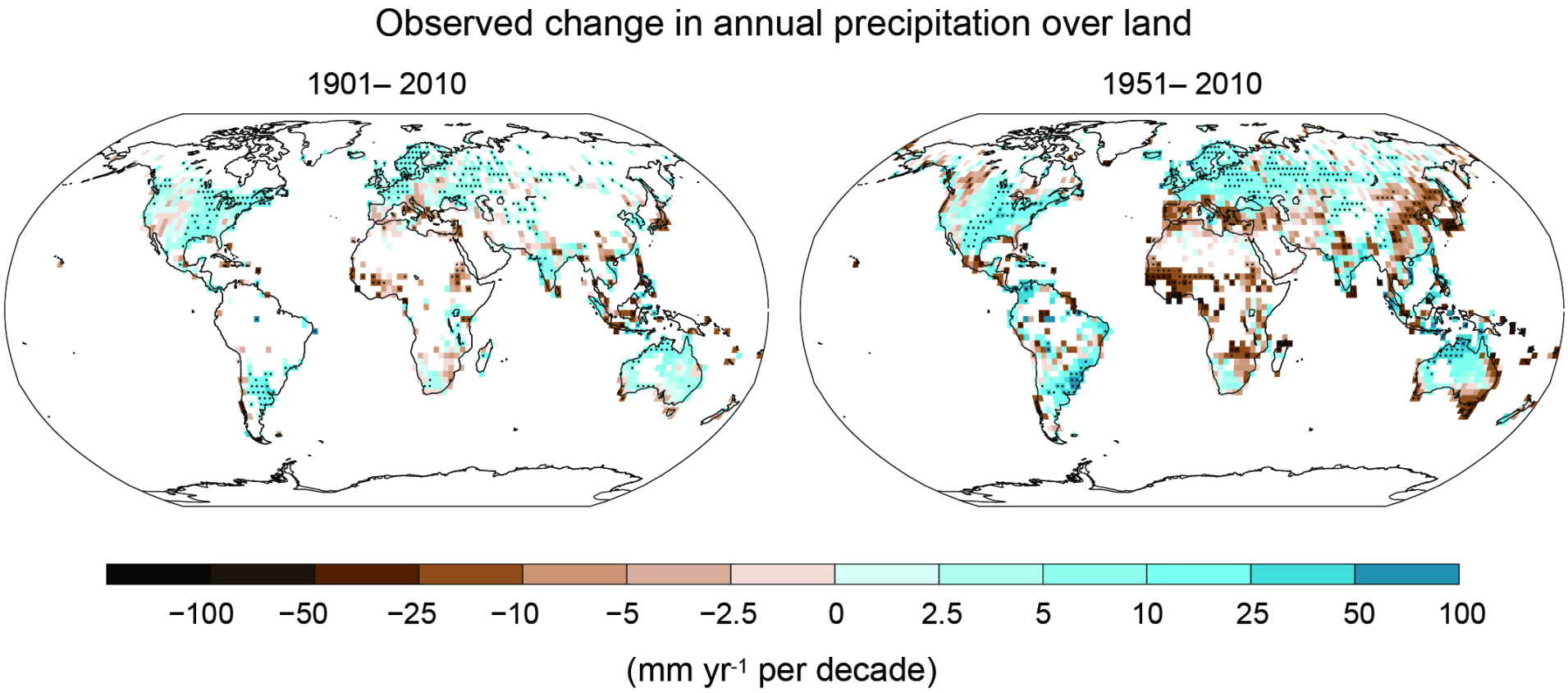
Niveau des mers



≈18 cm en un siècle
Tendance à accélération

Depuis le milieu du XIX^{ème} siècle, le taux d'élévation du niveau moyen des mers est supérieur au taux moyen des deux derniers millénaires (*degré de confiance élevé*). Le niveau moyen des mers s'est élevé de 0,19 [0,17 à 0,21] m au cours de la période 1901–2010.

Cycle de l'eau



Des relevés incomplets montrent des tendances variables et non-significatives des précipitations globales. Les précipitations ont augmenté sur les terres des moyennes latitudes de l'hémisphère Nord depuis 1901 (*faible fiabilité* avant 1950, *fiabilité moyenne* après).

Changement climatique

Aujourd'hui

Période glaciaire

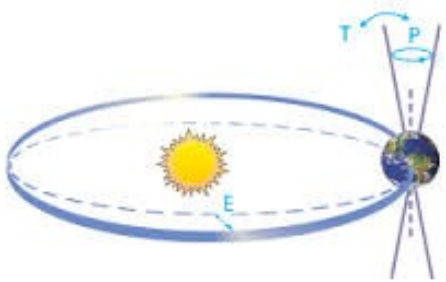
Il y a 20 000 ans, période glaciaire. 3 km de glace sur Scandinavie et Canada, océan 100 m plus bas que aujourd'hui.

Température 5° C plus froide que aujourd'hui

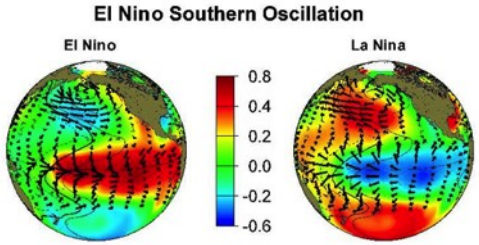
Changement climatique attendu équivalent, mais en 100 ans (pas pour le niveau des mers)

Pourquoi le climat varie ?

Orbite de la Terre



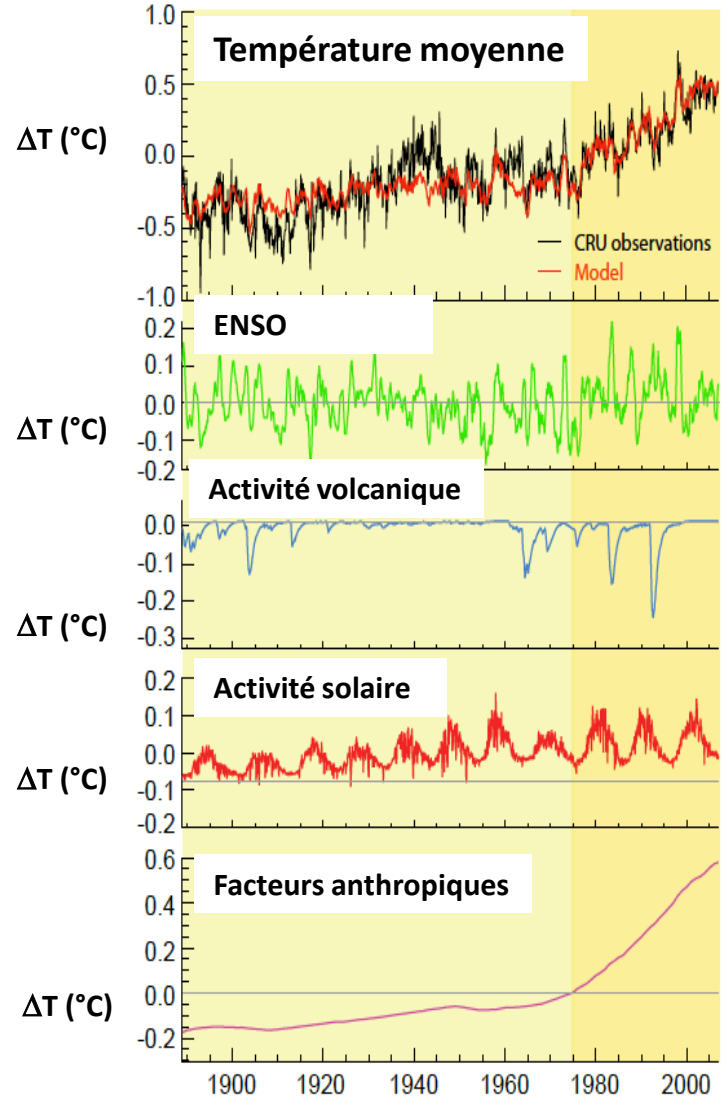
Variabilité interne



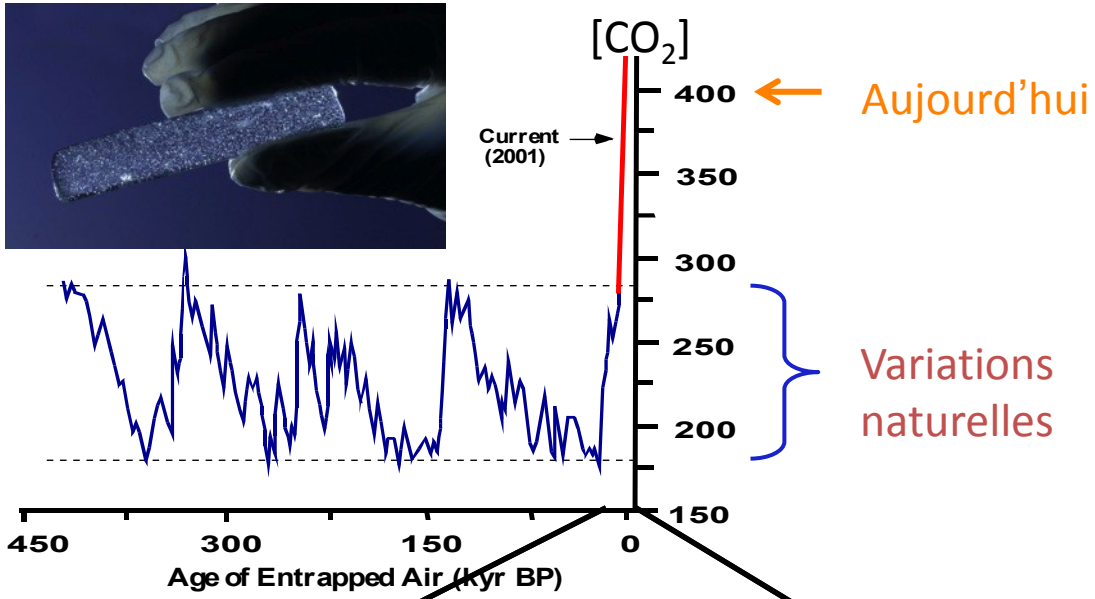
Activité volcanique

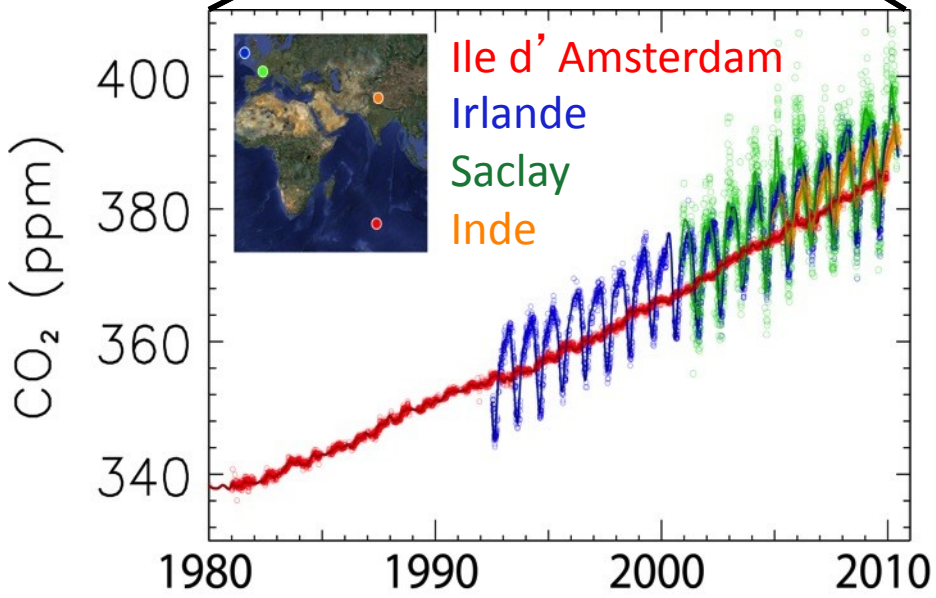
Activité solaire

Facteurs anthropiques



Activité humaines et CO_2





+

≈ 10 Milliards Tonnes C /an

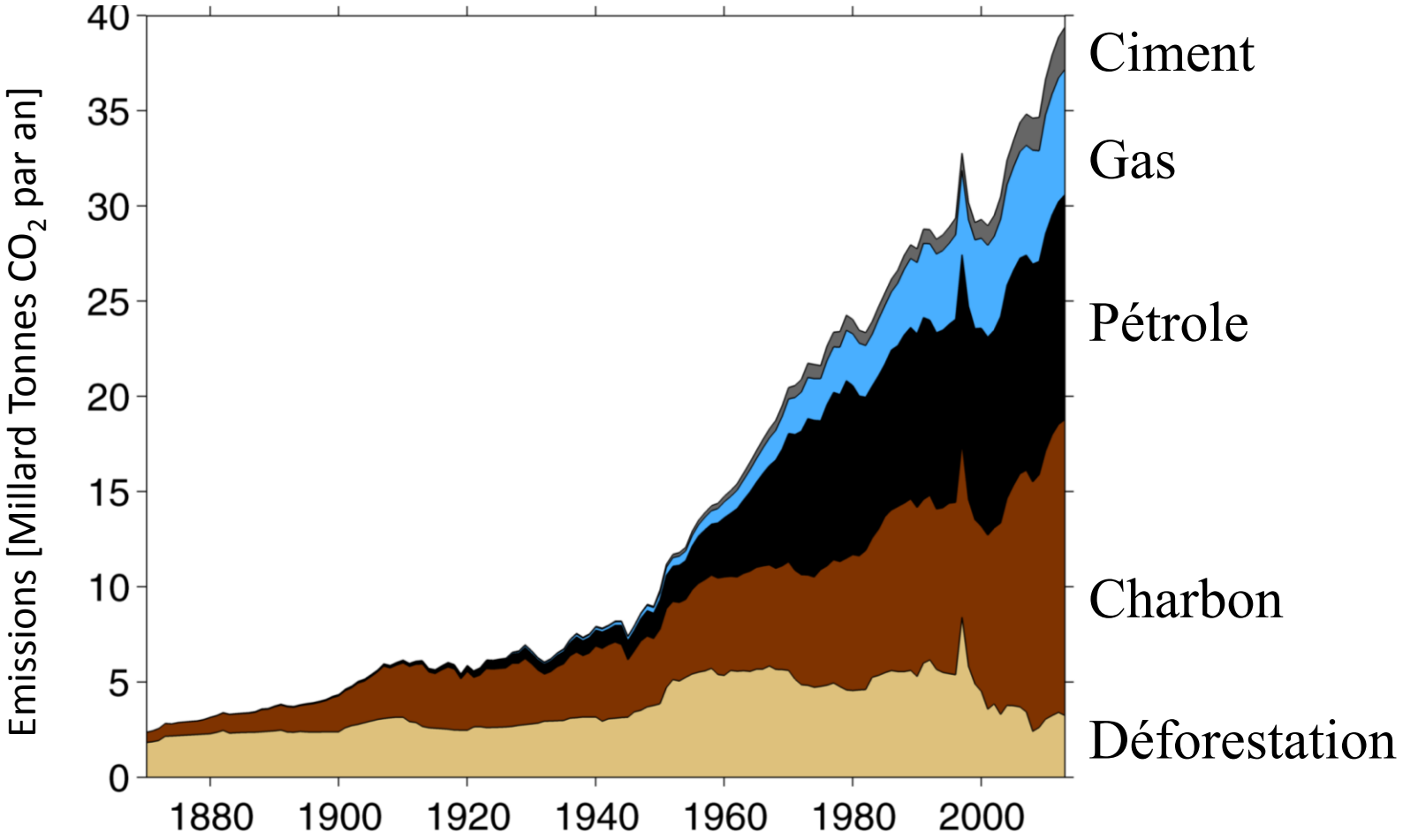
Effet de Serre: Principe

L' effet de serre est provoqué par les gaz transparents au rayonnement solaire mais qui absorbent partiellement le rayonnement infrarouge par lequel la Terre se refroidit.

Principaux gaz: Vapeur d' eau, Gaz Carbonique, Méthane

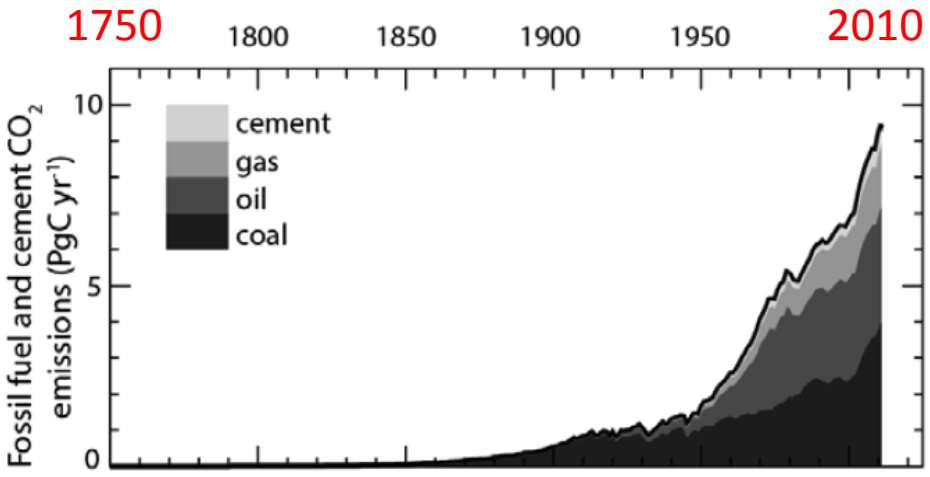
C' est un effet naturel, sans lequel la vie ne serait pas possible sur Terre

Emissions de CO_2

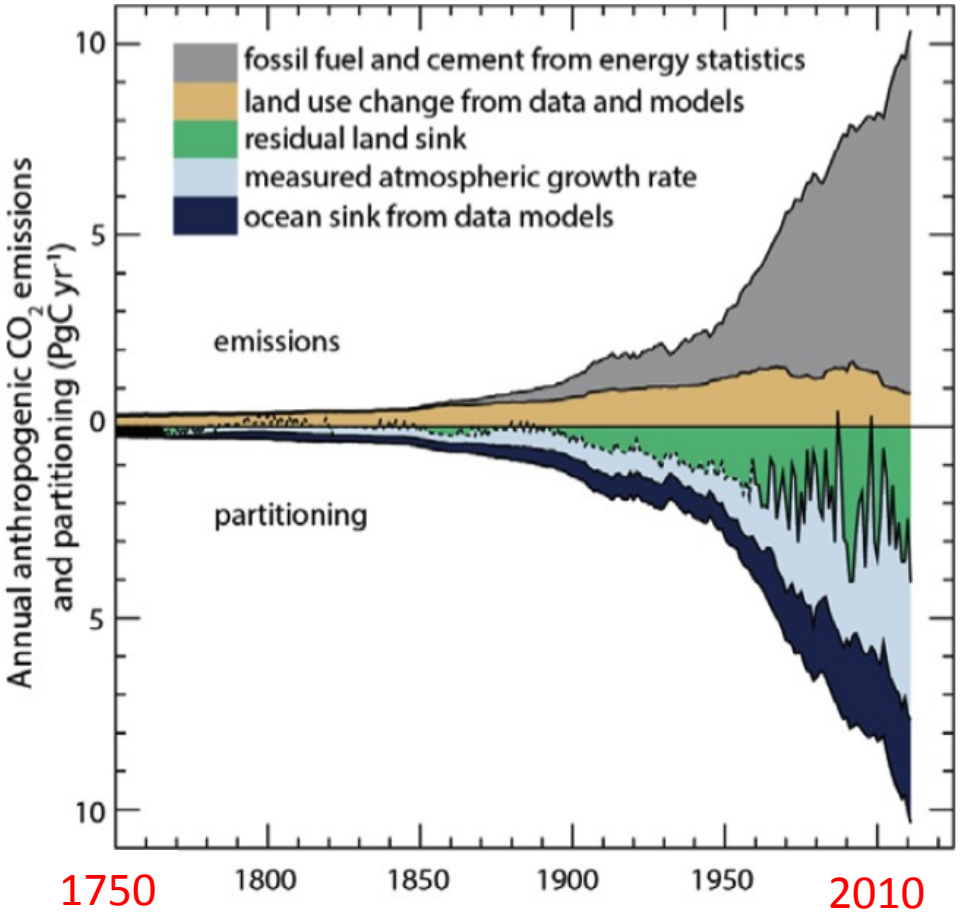


Les émissions de CO2 par les activités humaines sont en augmentation rapide.

Sources et puits de Carbone (1/2)



Emissions de Carbone Fossile



Les concentrations de CO_2 ont augmenté de 40% depuis la période préindustrielle. Cette augmentation s'explique en premier lieu par l'utilisation de combustibles fossiles, et en second lieu par des émissions nettes dues à des changements d'utilisation des sols.

Sources et Puits de Carbone (2/2)

8.3±0.4 PgC/yr 90%

+

1.0±0.5 PgC/yr 10%

4.3±0.1 PgC/yr
46%

2.6±0.8
PgC/yr
28%

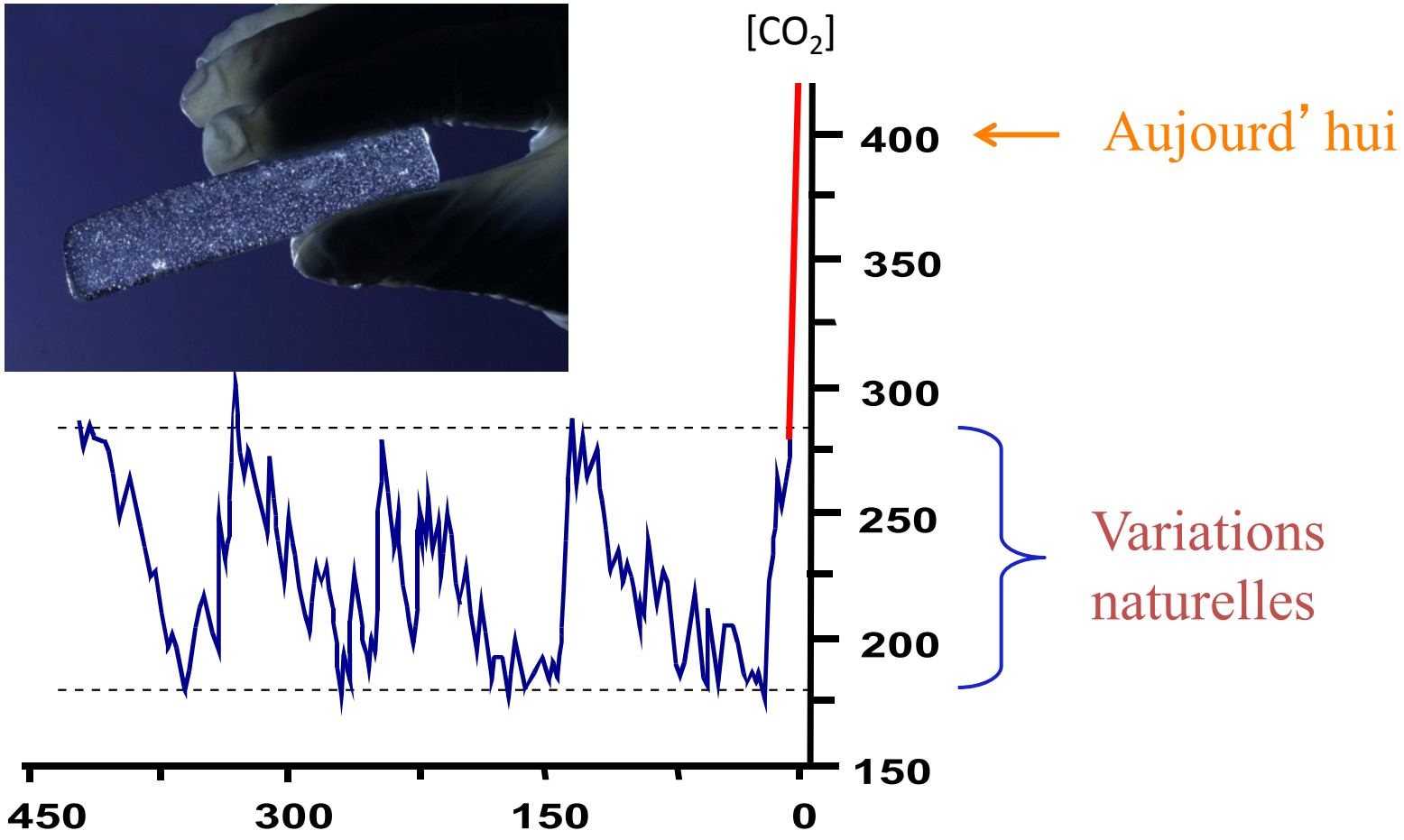
Calculé par différences des autres termes, du blian

26%
2.5±0.5 PgC/yr

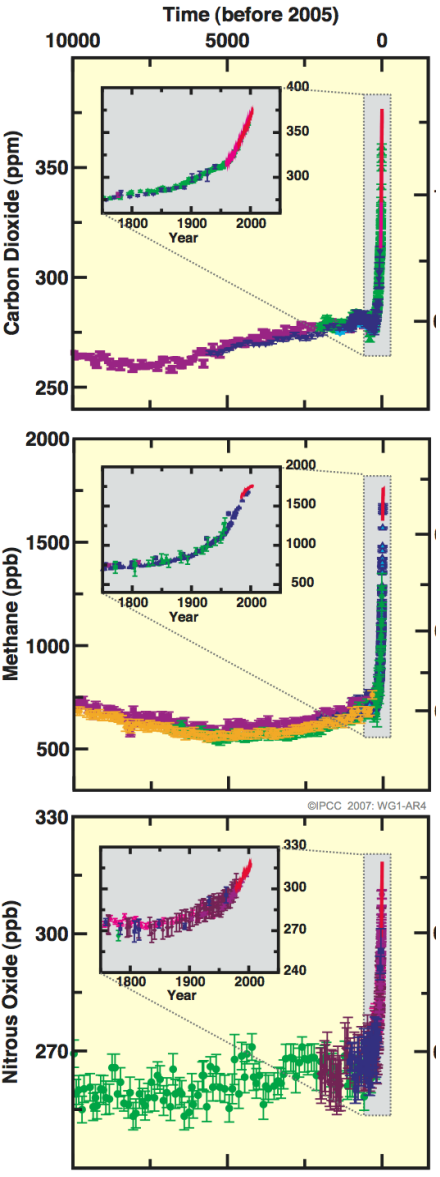
Source: Le Quéré et al. 2012; Global Carbon Project 2012

Des modifications sans précédent

Les mesures (directes ou carottes de glace) démontrent le caractère très inhabituel de l'évolution récente



Autres GES: CH_4, N_2O



- Gaz carbonique (CO_2) +35%
- Méthane (CH_4) X 2,5
- Protoxyde d'azote (N_2O) +15%

Depuis le début de l'ère industrielle la quantité d'énergie disponible pour « chauffer » les basses couches de l'atmosphère a augmenté de 2,5 Watts/m² (de 240 à 242,5) dont :

* 60% pour le gaz carbonique
* 20% pour le méthane
* Longue durée de vie pour CO_2

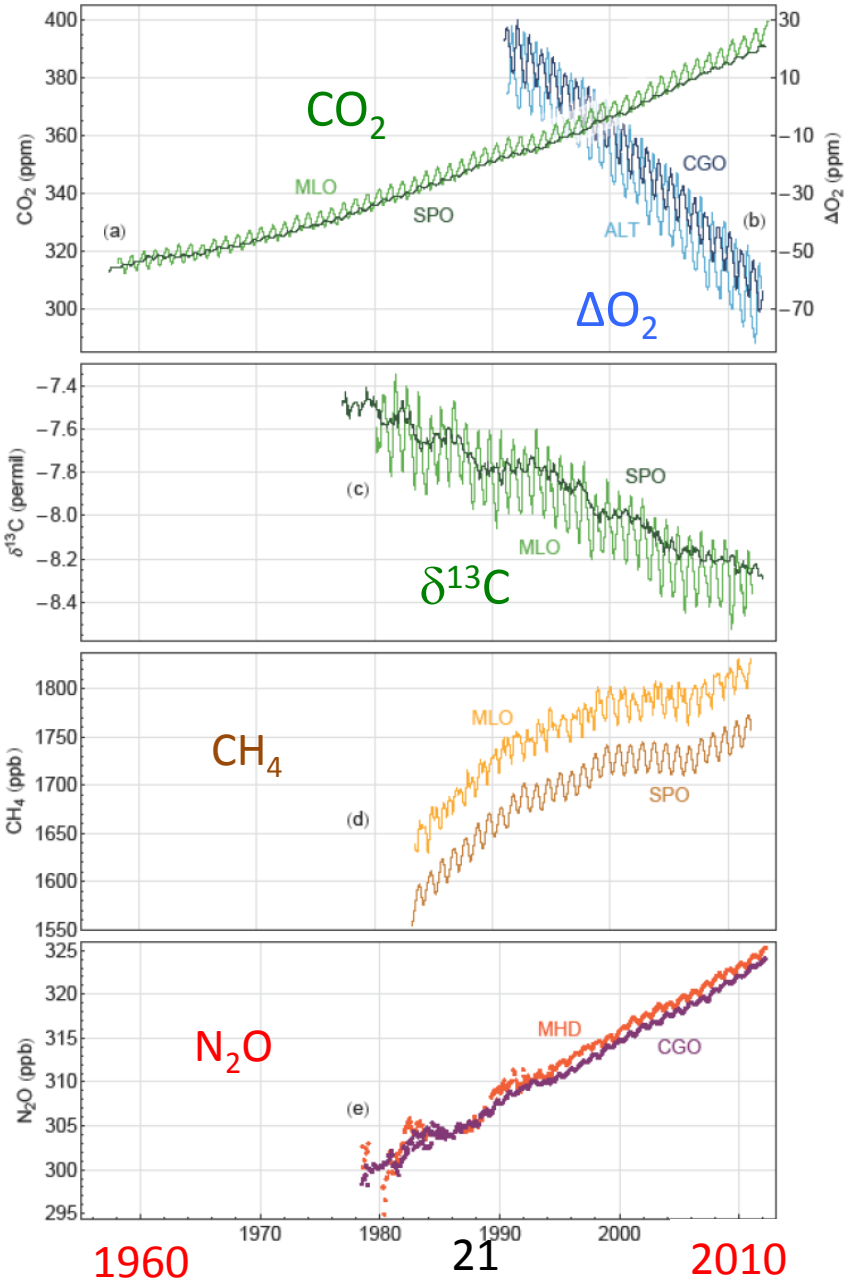
Variations sur 10 000 ans

Evolution récente des concentrations

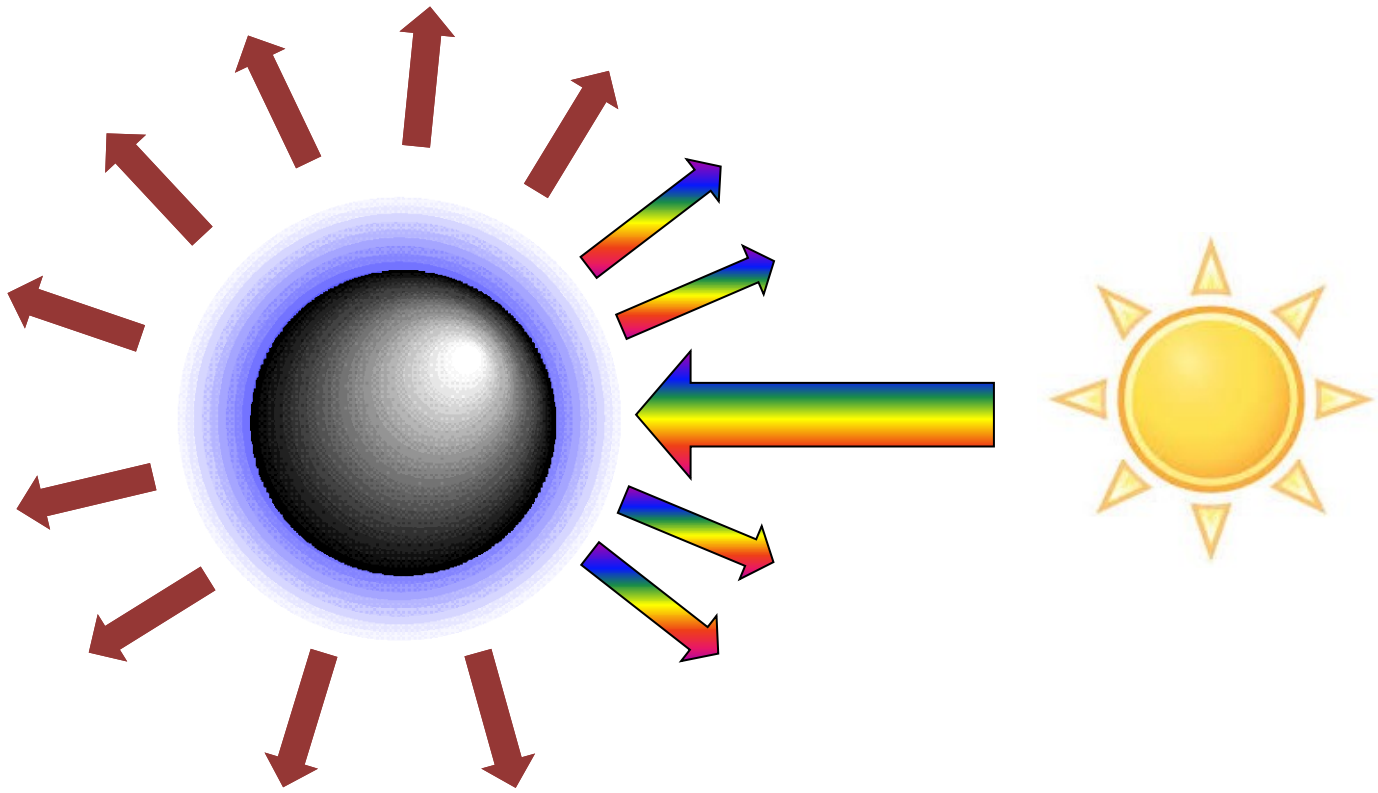
Les concentrations en GES (CO_2, CH_4, N_2O) ont augmenté de manière continue depuis le début de la période préindustrielle.

L'augmentation du CO_2 s'explique en premier lieu par l'utilisation de combustibles fossiles comme le montre les mesures isotopiques du CO_2 et celle de la concentration en oxygène.

Les variations des autres GHG s'explique par les activités humaines (agriculture)



Le bilan radiatif de la Terre

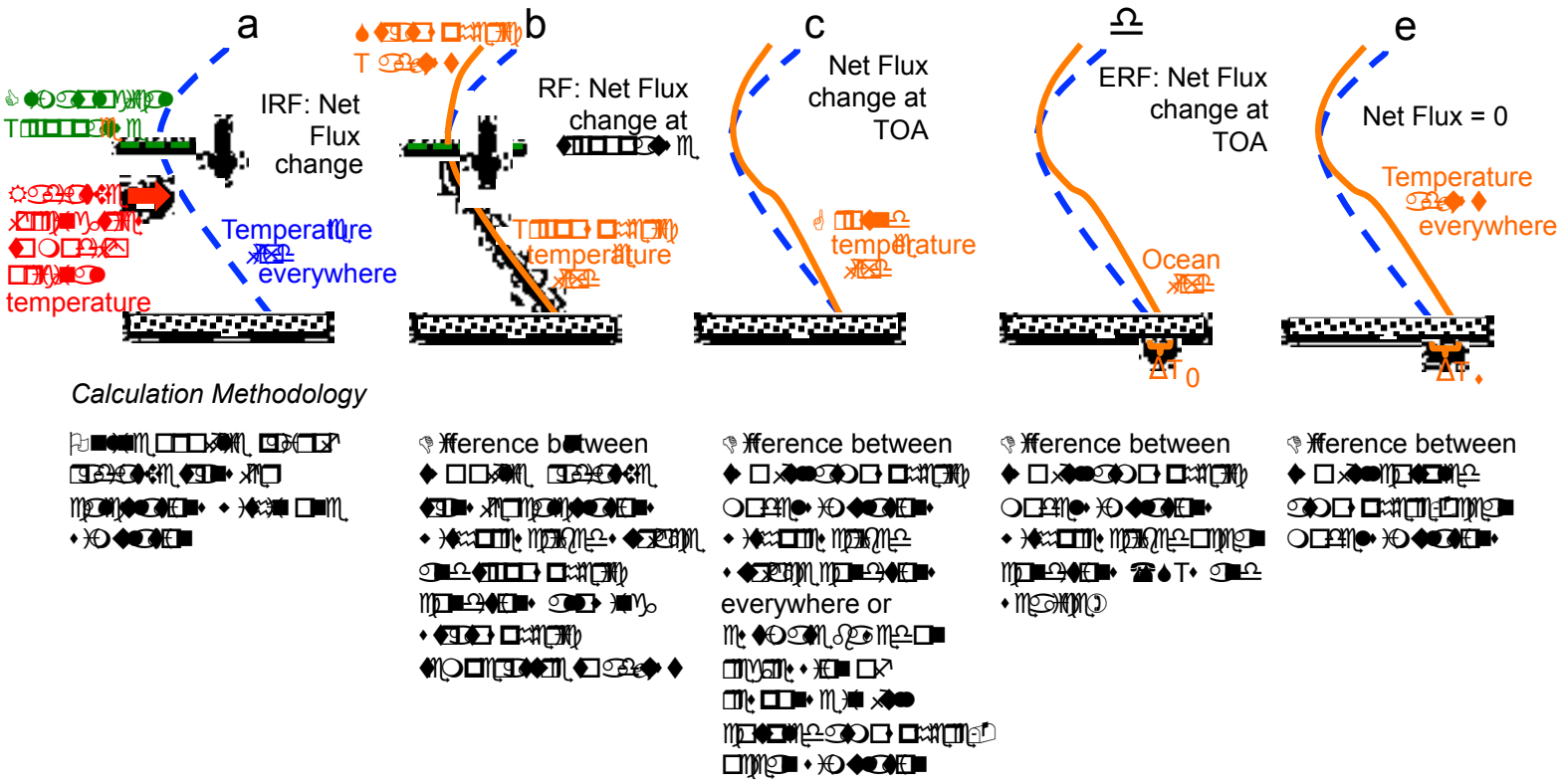


- L'énergie "moteur" du climat provient essentiellement du soleil
- Une partie est renvoyée directement vers l'espace (réflexion, diffusion)
- La Terre se refroidit en émettant du rayonnement infrarouge (invisible)
- Les activités humaines peuvent modifier et

Concept de Forçage Radiatif…

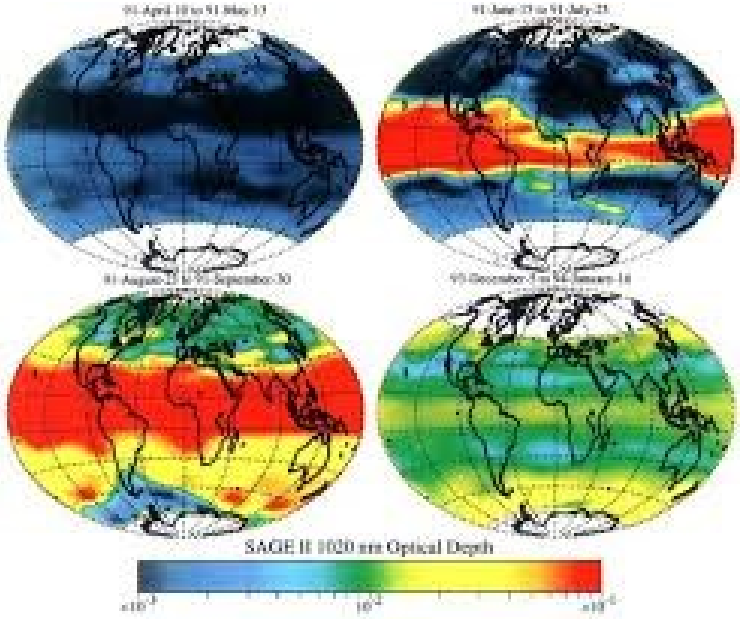
Le forçage radiatif quantifie la modification des flux radiatif (solaire et infrarouge) calculé à la tropopause, induite par une perturbation.

Difficulté : Qu'est ce que on suppose fixe ou variable ?

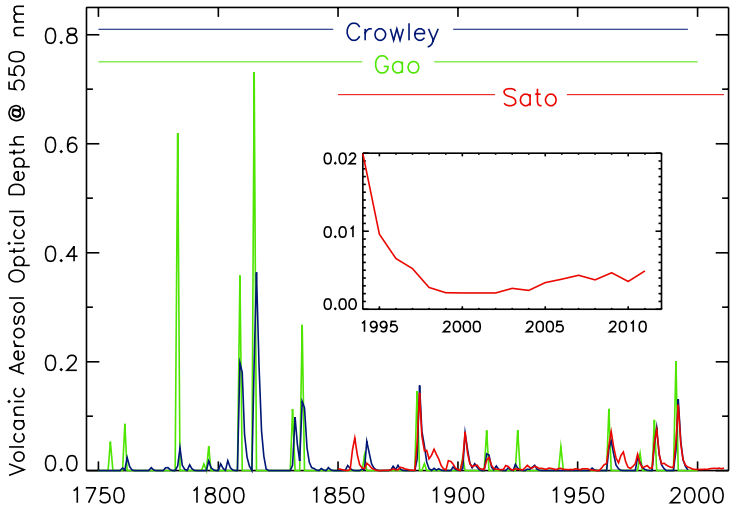


Volcanisme

Pinatubo
(1991)

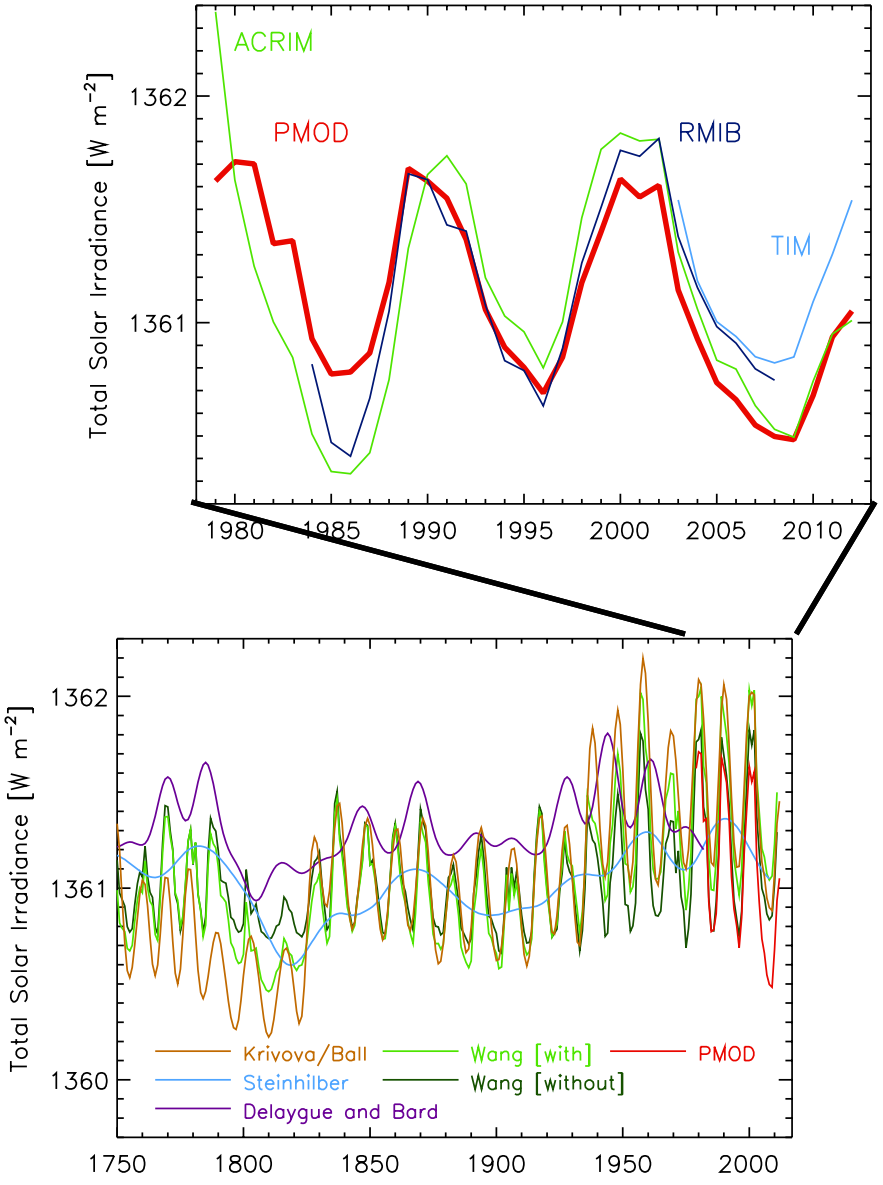


Les grosses éruptions volcaniques injectent dans la stratosphère des particules qui y restent plusieurs années.
Ces particules réfléchissent une partie du rayonnement solaire, ce qui conduit à refroidir le climat pendant quelques années.
La contribution du volcanisme au forçage radiatif est très variable.



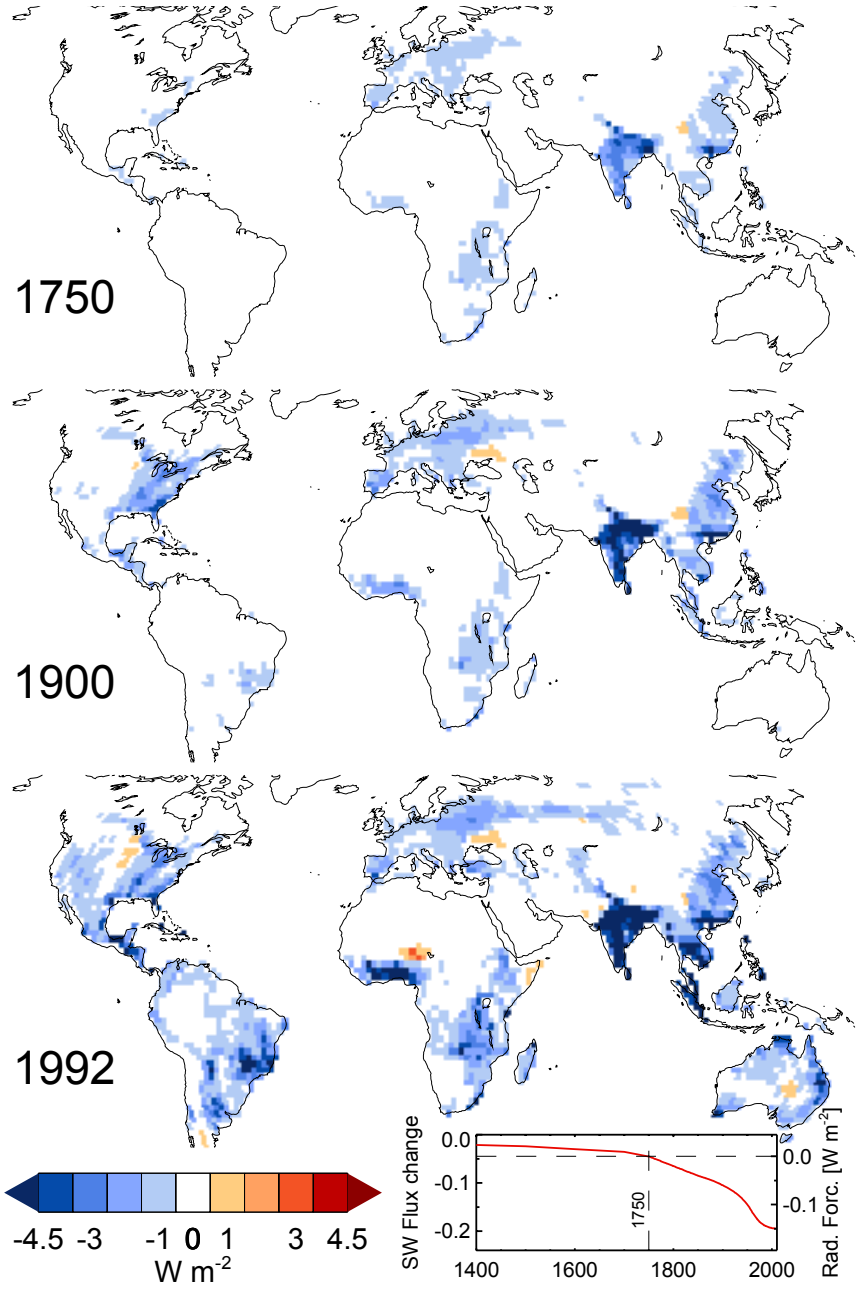
Le soleil

Les variations du flux solaire sont très faibles. Le cycle de ≈11 ans est de moins de 1‰ et les variations d'un cycle à l'autre encore plus faible.
Les mécanismes très indirects d'amplification proposés par certains climato-sceptiques ne sont ni quantifiés ni supportés par les observations

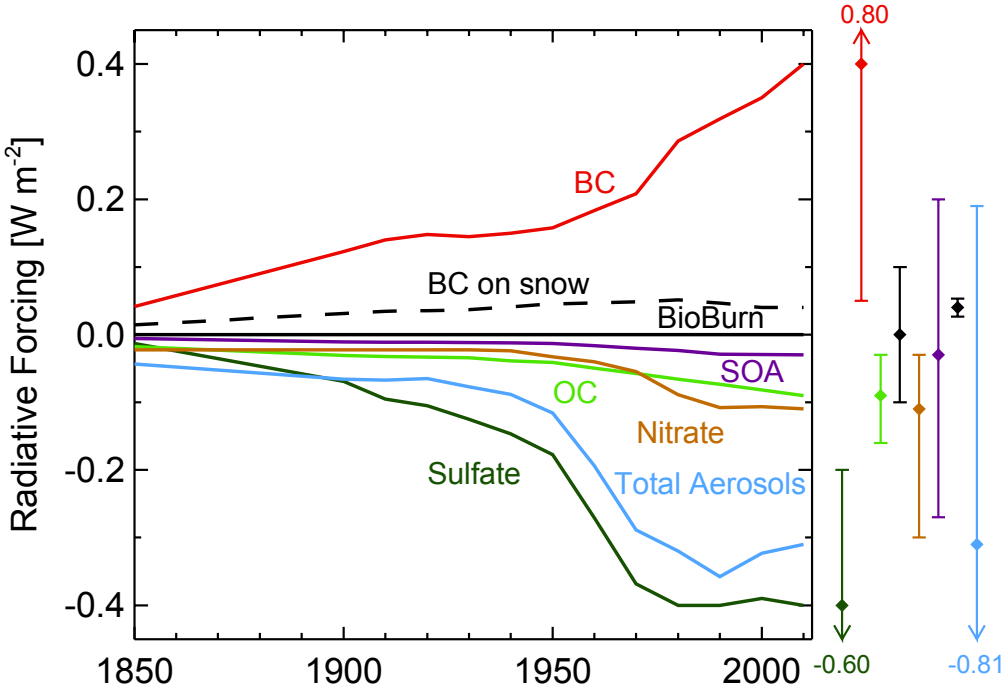


Modification des surfaces

L'albédo est la fraction de rayonnement solaire non absorbé par la surface. Il dépend du type de surface. Le changement d'occupation des sols (déforestation) conduit à une augmentation de l'albédo, ce qui tend à refroidir le climat. L'impact via l'hydrologie est plus complexe et tend à contrebalancer cet effet.

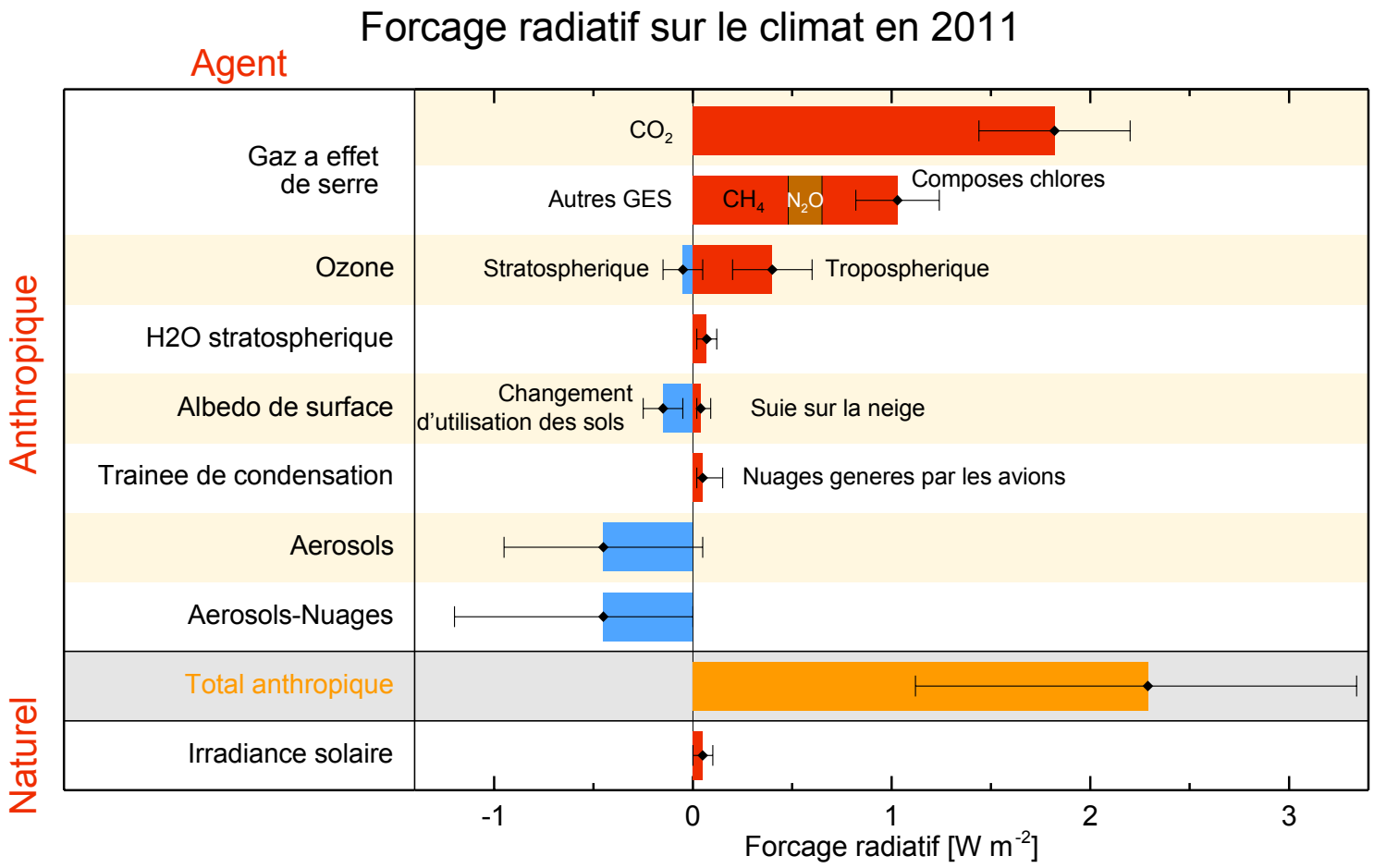


Aérosols



L'impact des aérosols est difficile à quantifier du fait des distributions très hétérogènes, de la multiplicité des types d'aérosols, et des effets indirects sur les nuages.

Les différentes perturbations



Gaz à Effet de Serre

Ozone

H_2O Strato.

Albédo

Trainées avion

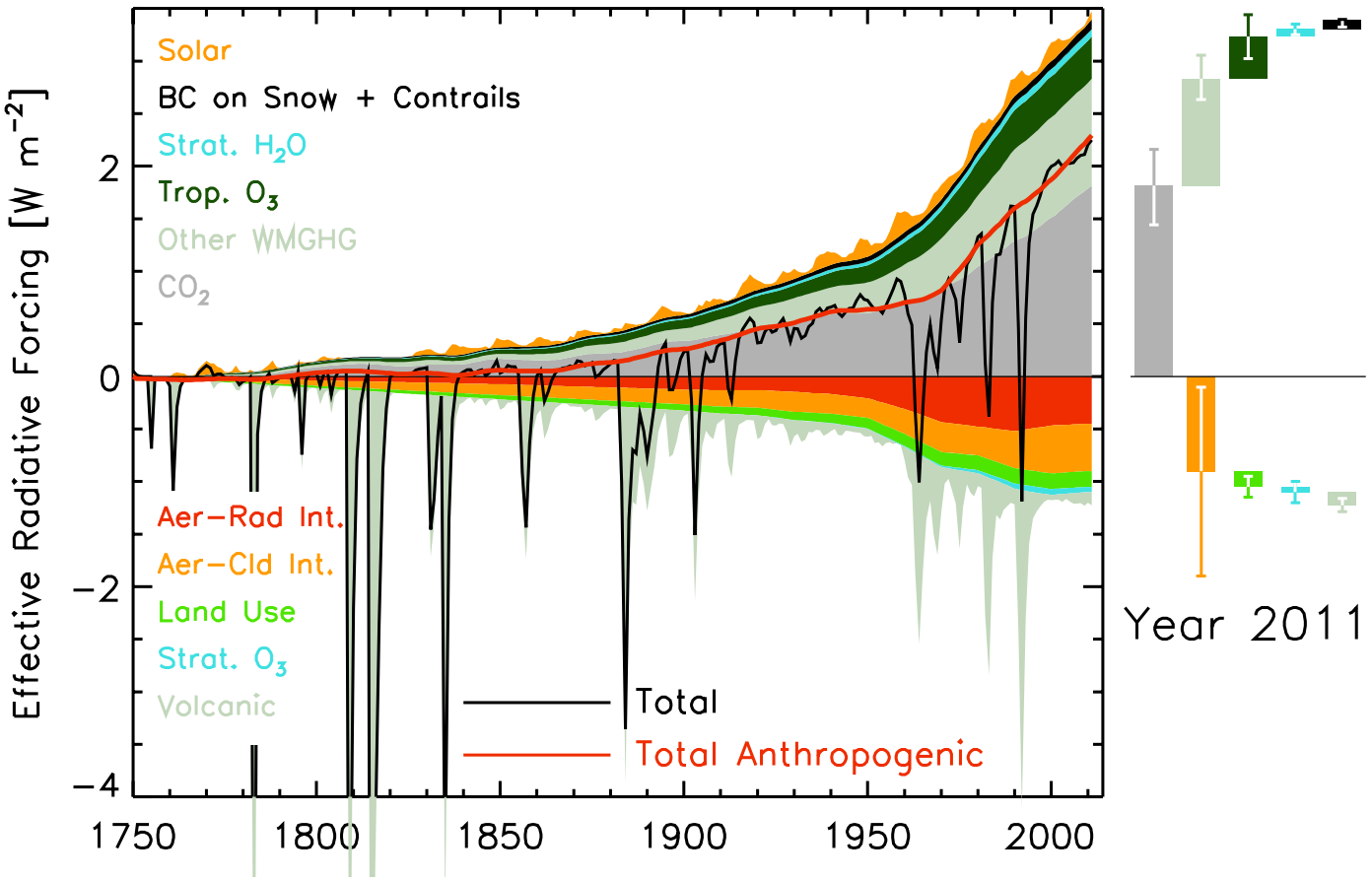
Aérosols

Total anthrop.

Soleil

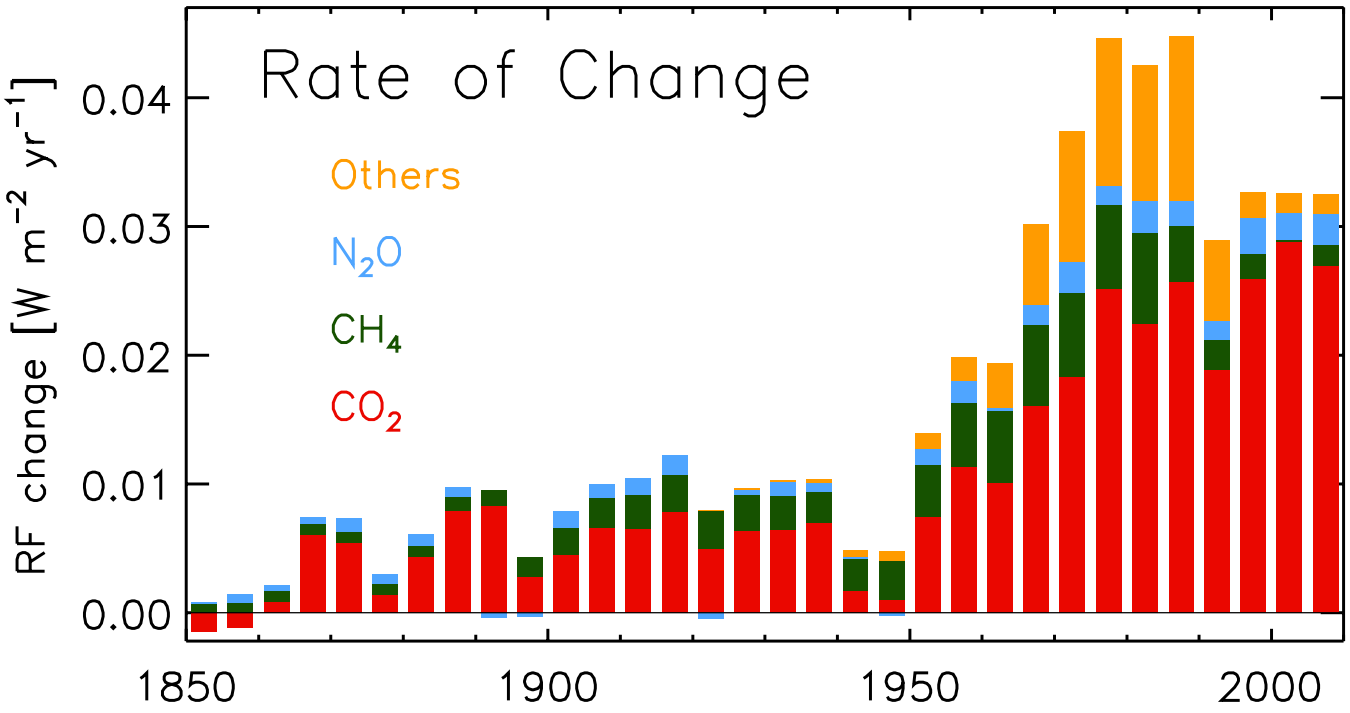
Le CO_2 est le principal moteur de la perturbation humaine sur le climat, mais ce n'est pas la seule. Les aérosols ont un effet refroidissant mais qui reste mal quantifié.

Evolution des forçages



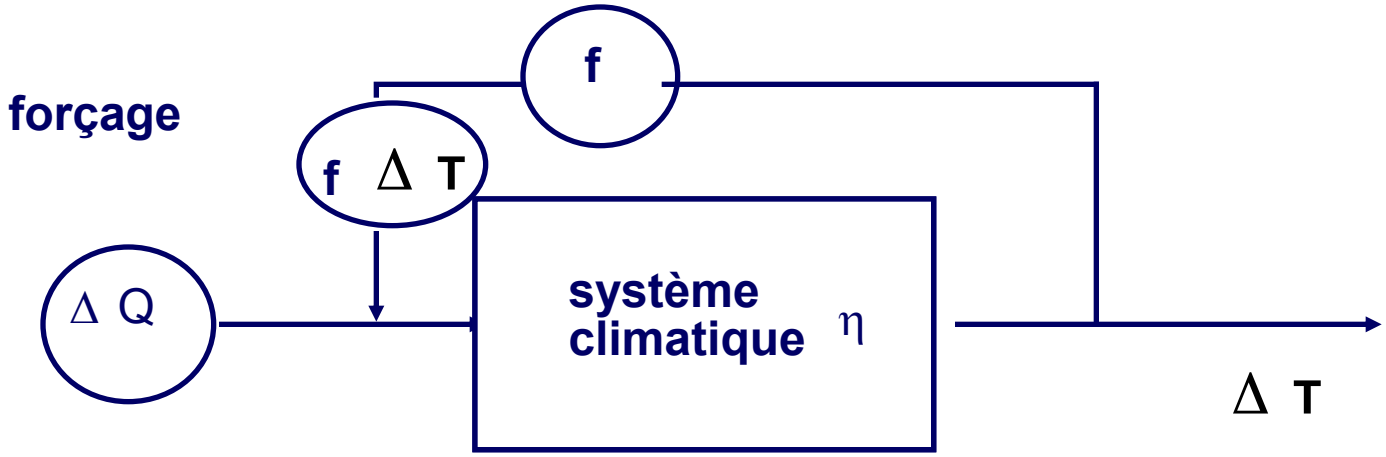
Le forçage du climat augmente plus rapidement depuis les années 60.
On note l'effet des éruptions volcaniques : intense mais de courte durée (≈1-2 ans)

Vitesse d'augmentation par gaz



Le méthane et les CFCs ont contribué à l'augmentation de l'effet de serre. Depuis une quinzaine d'année, c'est le CO_2 qui domine nettement l'augmentation supplémentaire

Les rétroactions



$$\Delta T = \eta(\Delta Q + f\Delta T) \longrightarrow \Delta T = \frac{\eta \Delta Q}{1 - \eta f}$$

La réaction initiale à un forçage (effet de serre, soleil) est relativement facile à estimer. MAIS, le système va varier (nuages, neige…) et donner lieu à des rétroactions, positives ou négatives. L'incertitude est là.

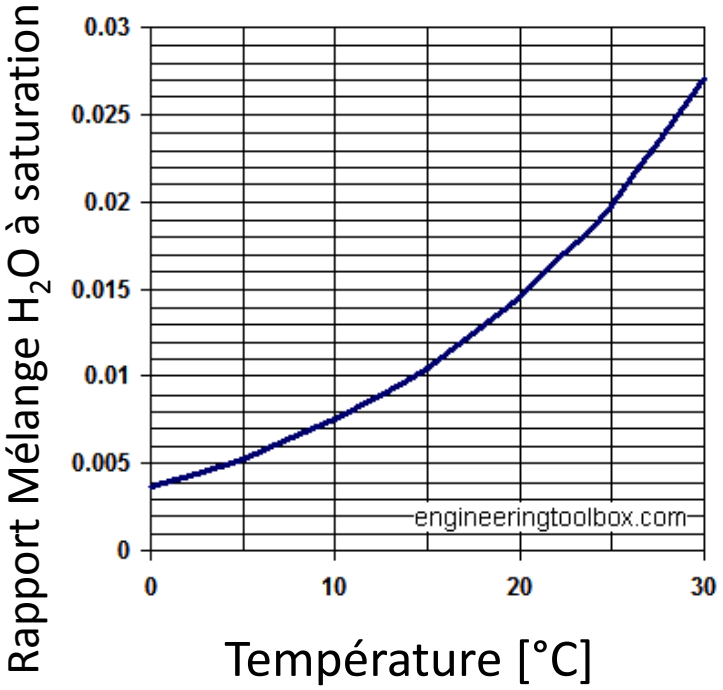
Rétroaction vapeur d' eau

Lorsque la température augmente, la pression de vapeur saturante augmente très rapidement

A taux d' humidité constante, le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère va donc augmenter

Puisque H_2O est un puissant gaz à effet de serre, c'est une rétroaction positive très forte

Les émissions humaines d'eau (irrigation, centrales thermiques…) retombent sous forme de pluie. Les activités humaines n'ont pas d'impact direct sur la concentration atmosphérique en vapeur d'eau. C'est pourquoi la vapeur d'eau n'est pas traitée comme un "forçage" mais comme une "rétroaction".



Rétroaction neige-albédo

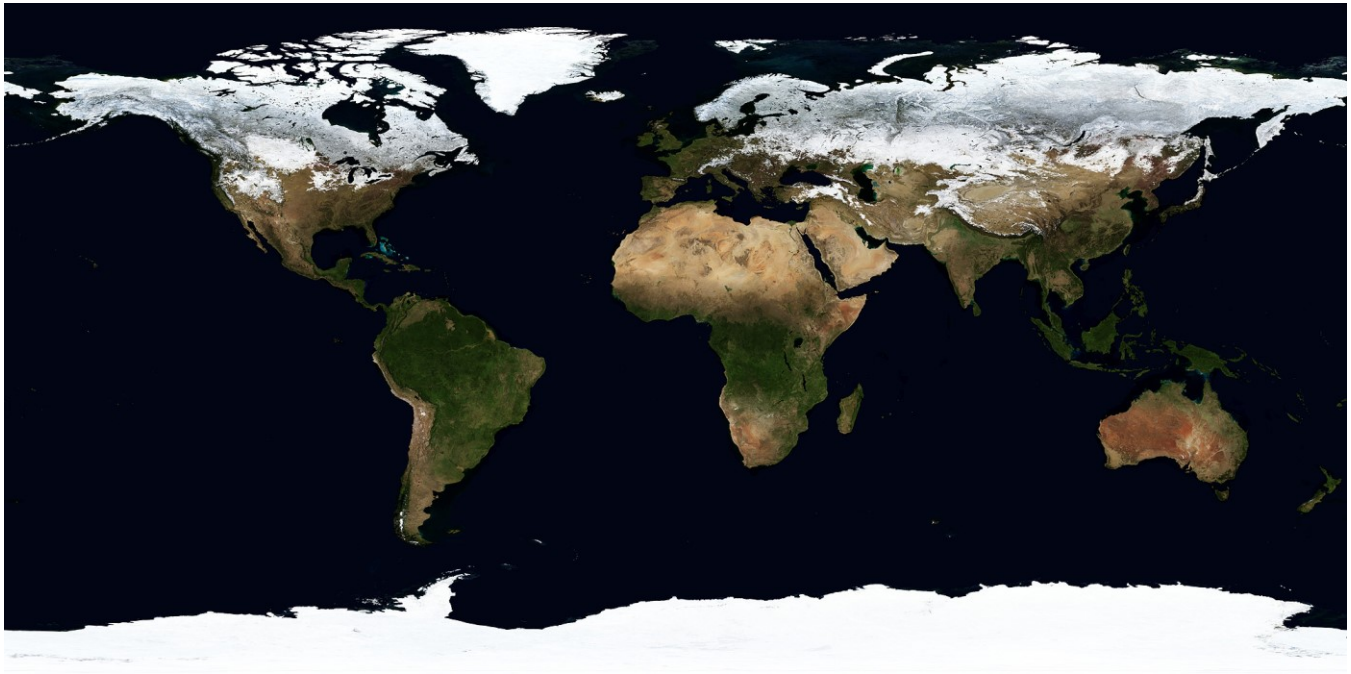
A priori, un climat plus chaud conduit à une fonte des neige plus rapide (effet déjà observé)

L'albédo de la Terre va donc diminuer

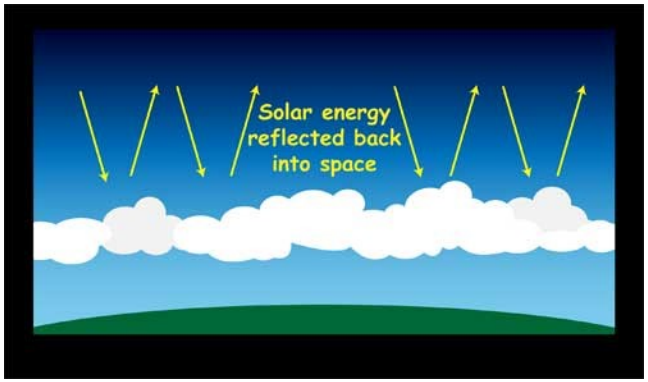
Le flux solaire absorbé va donc augmenter

Cela conduit à une hausse supplémentaire des températures

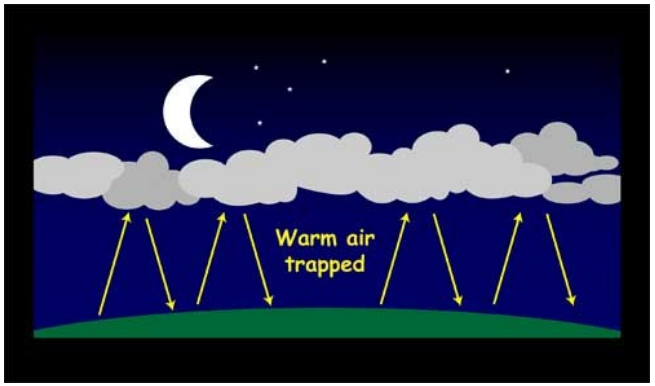
C' est une des causes du réchauffement plus important aux hautes latitudes, et de la fonte accélérée de la banquise



Rétroaction des nuages



Augmentation de l'albédo



Augmentation de l'effet de serre

Les nuages ont le pouvoir de moduler fortement Albédo et Effet de Serre

Le signe de la rétroaction des nuages est matière à débat.

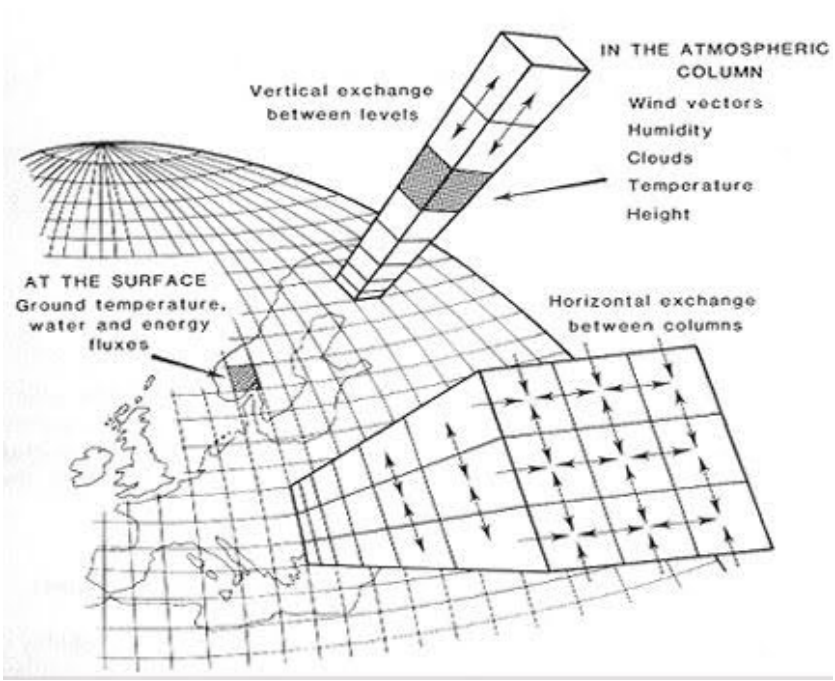
C'est l'incertitude principale pour l'estimation du changement climatique

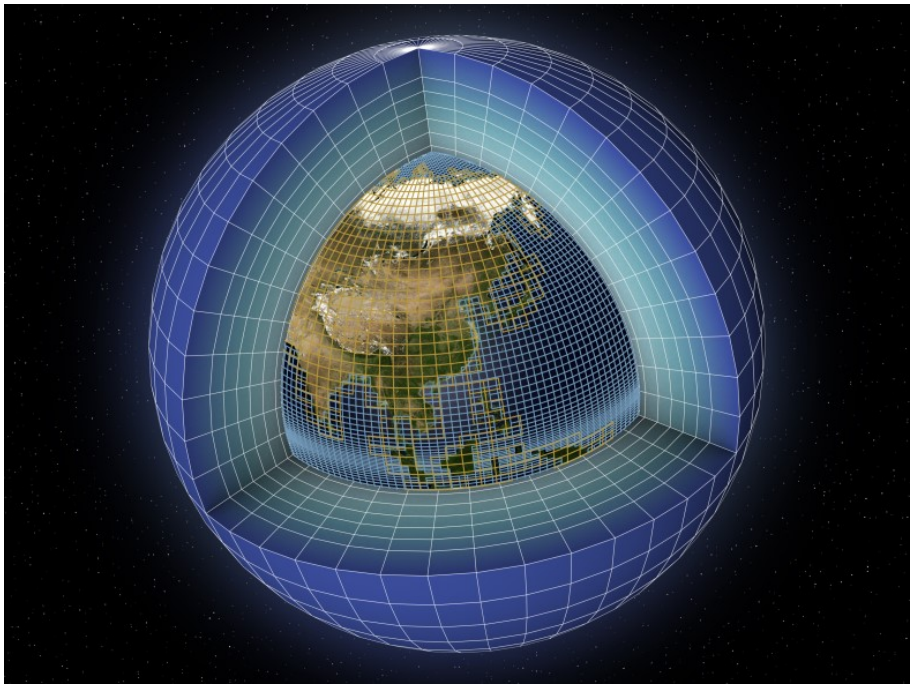
Pas de signe clair d' une modification globale de la couverture de nuageuse

Les processus et interactions sont complexes.

Une projection du changement climatiques passe nécessairement par la modélisation

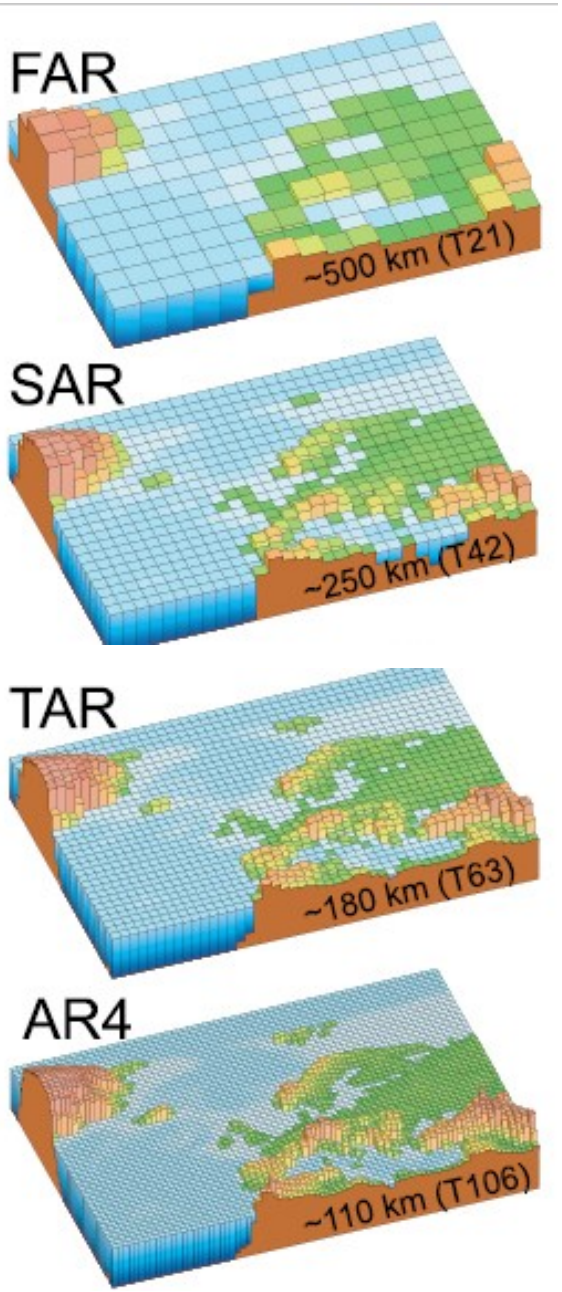
Des modèles de climat plus complets

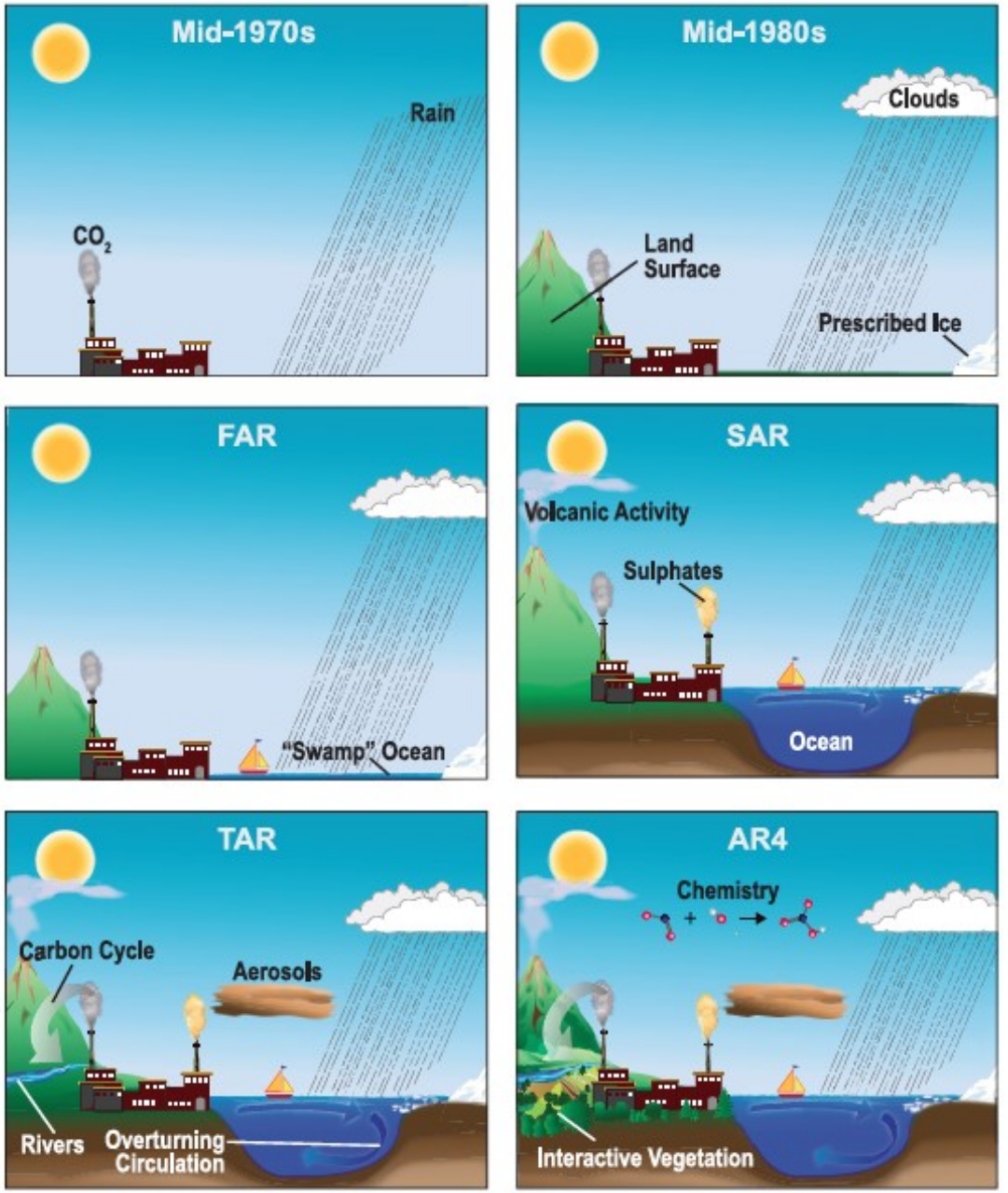




Les modèles offrent une représentation 3D de l'atmosphère, de l'océan, des glaces de mer et surfaces continentales (couplages de différents modèles) et des couplages entre le climat et le cycle du carbone, les aérosols et l'usage des terres. Ils permettent de reproduire les conditions climatiques et les tendances de température observées à l'échelle des continents sur plusieurs décennies

Modélisation + fine et + complexe

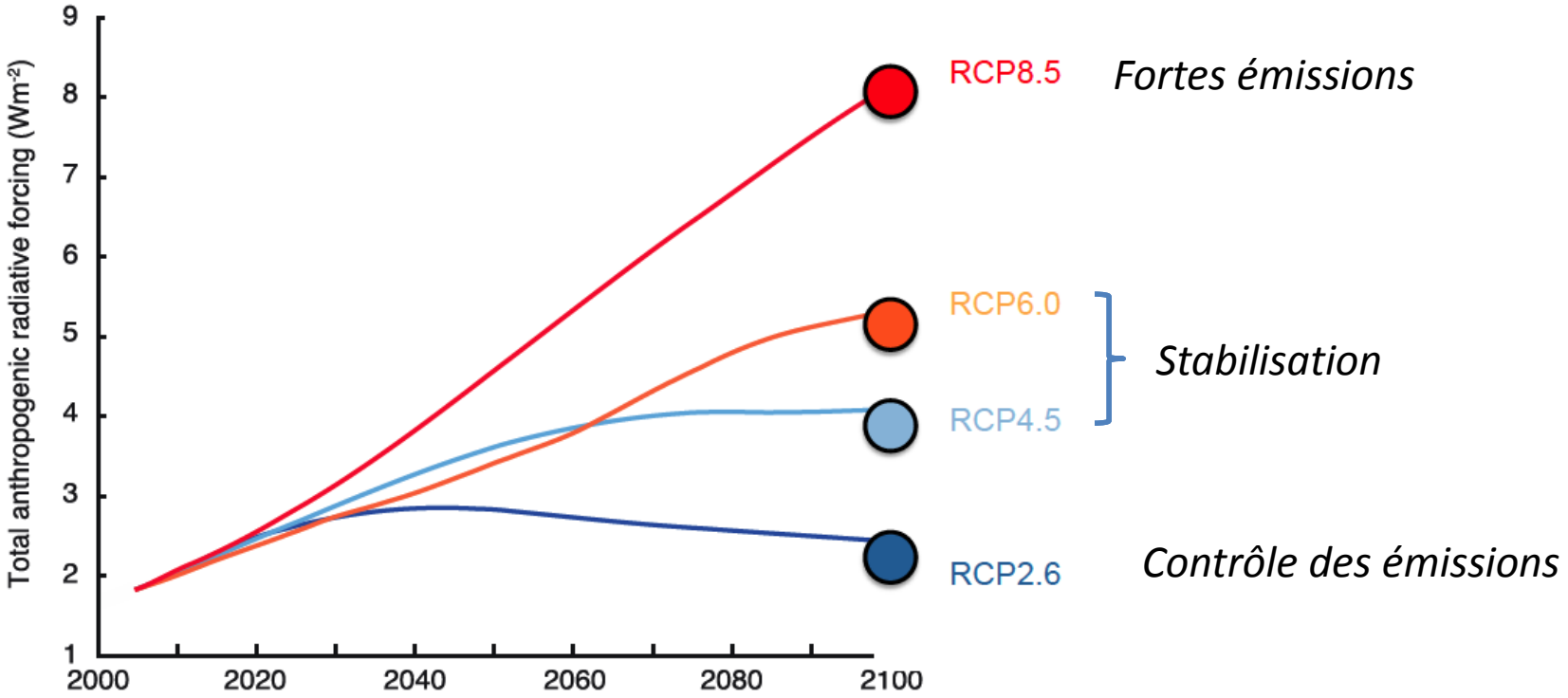




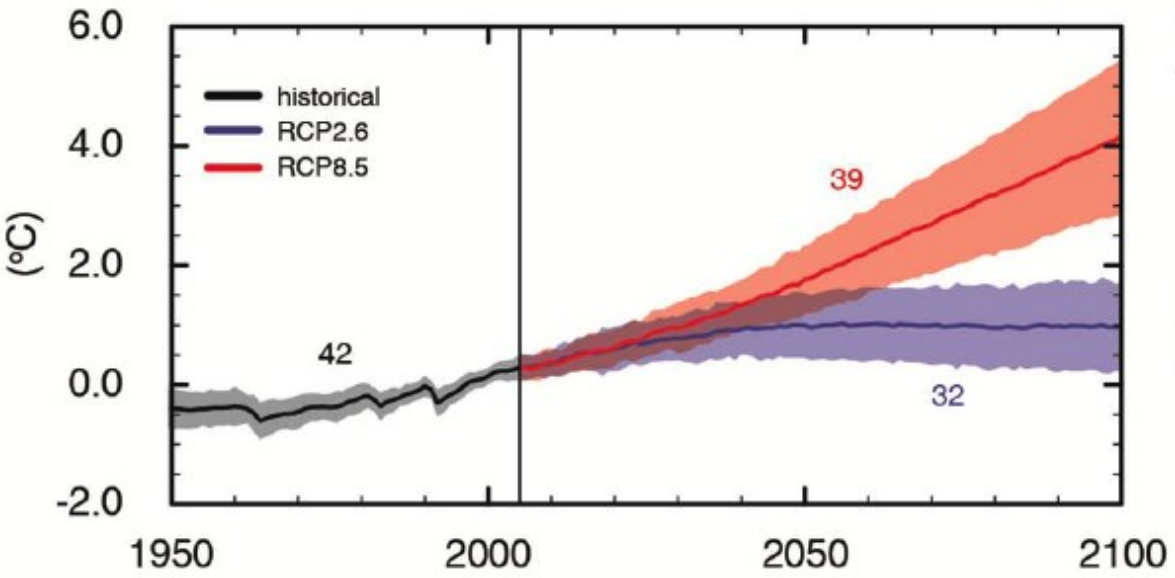
Projection pour le 21ème siècle: RCPs

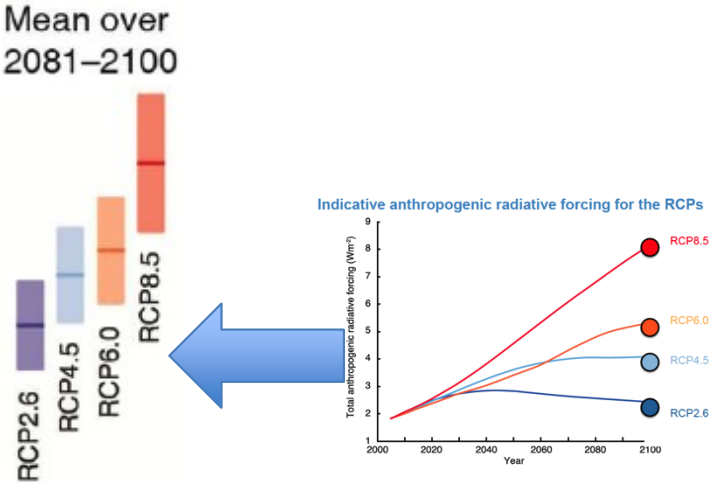
RCP (Representative concentration pathways) [W m^{-2}] donnent des scénarii d'évolution de la perturbation anthropique au cours du 21ème siècle.

Ces forçages sont utilisés en entrée des modèles de climat pour simuler l'évolution du climat au 21ème siècle



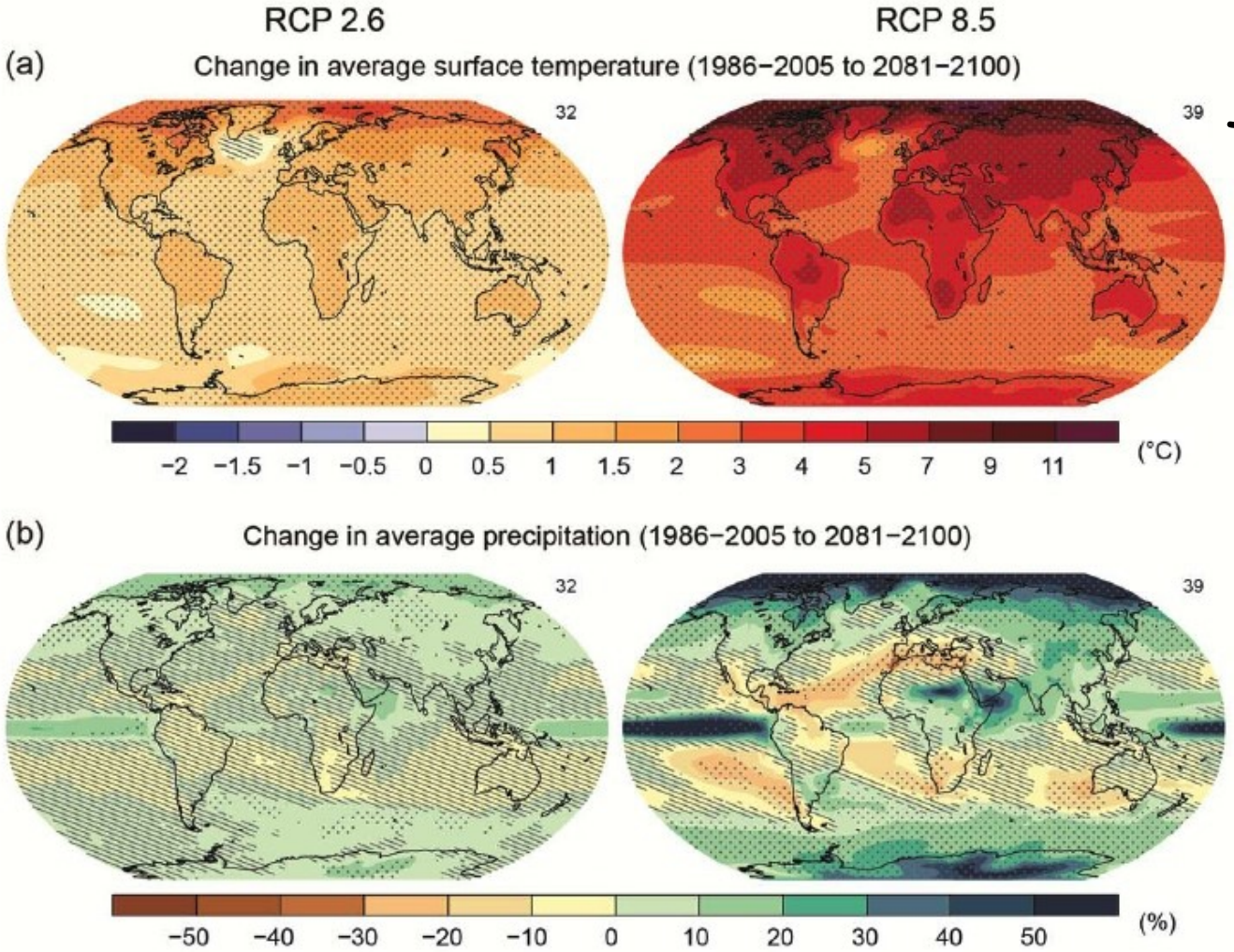
Evolution de la température moyenne





Le changement de la température moyenne du globe en surface pour la fin du XXI^{e} siècle dépassera *probablement* 1,5°C par rapport à 1850-1900 pour tous les scénarios RCP, sauf pour le scénario RCP2.6. Il est *probable* qu'il dépassera 2°C pour les scénarios RCP6.0 et RCP8.5.

Des contrastes régionaux



Température

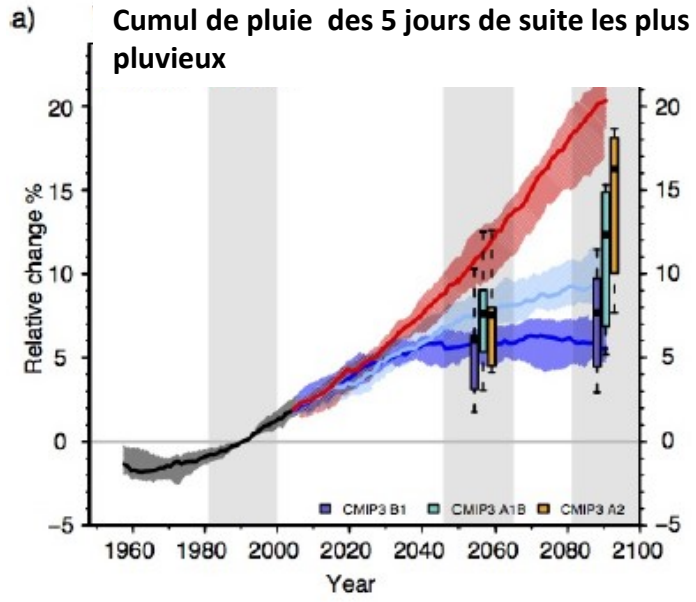
Signal/bruit élevé

Signal/bruit faible

Précipitation

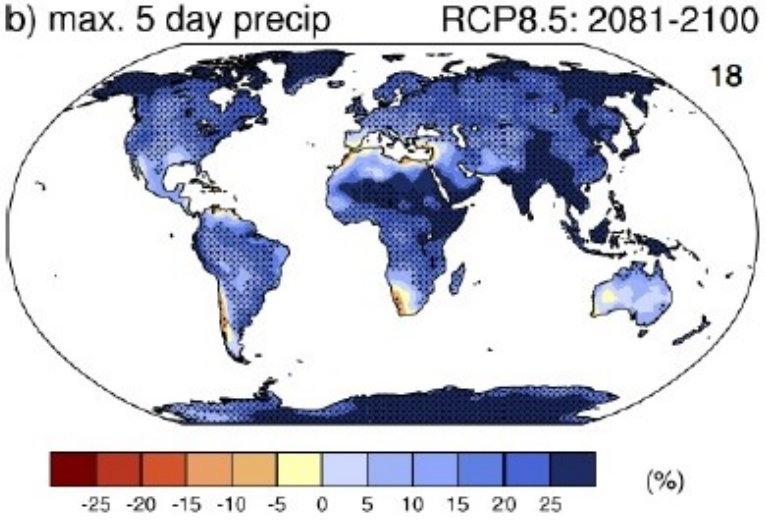
Le contraste de précipitation entre régions humides et régions sèches, et entre saisons humides et saisons sèches augmentera, bien qu'il puisse exister des exceptions régionales (*degré de confiance élevé*).

Le devenir des extrêmes

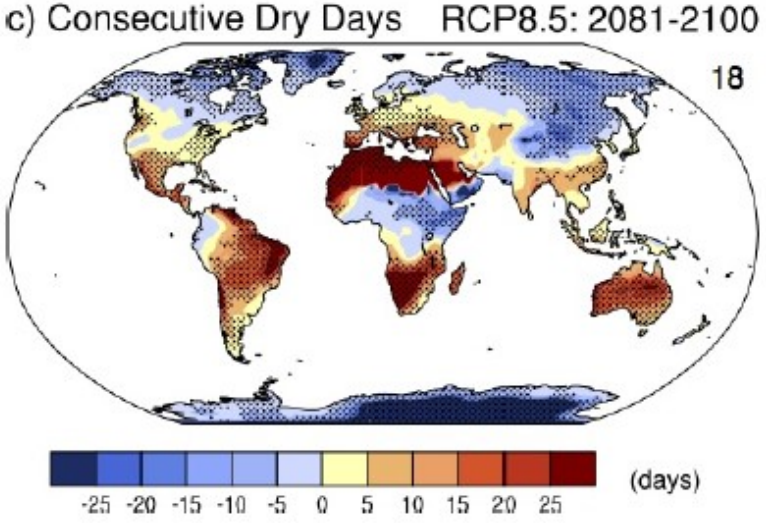


Les événements de précipitations extrêmes deviendront très probablement plus intenses et fréquents sur les continents des moyennes latitudes et les régions tropicales humides d'ici la fin de ce siècle, en lien avec l'augmentation de la températures moyenne en surface

Précipitations maximales

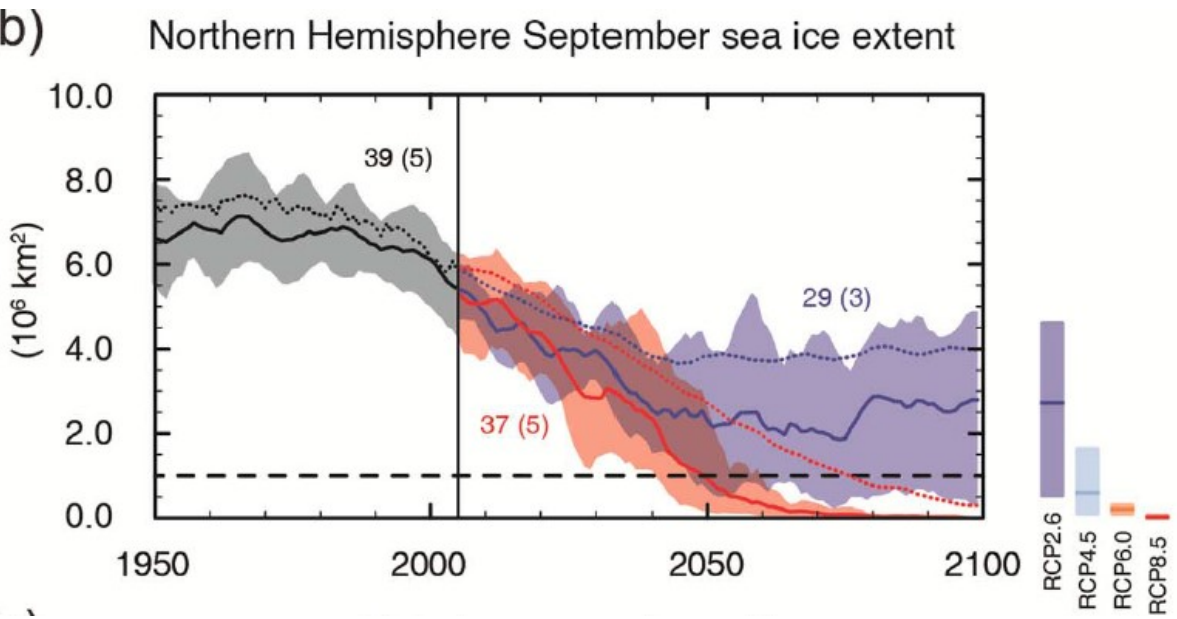


Nombre jours secs consécutifs

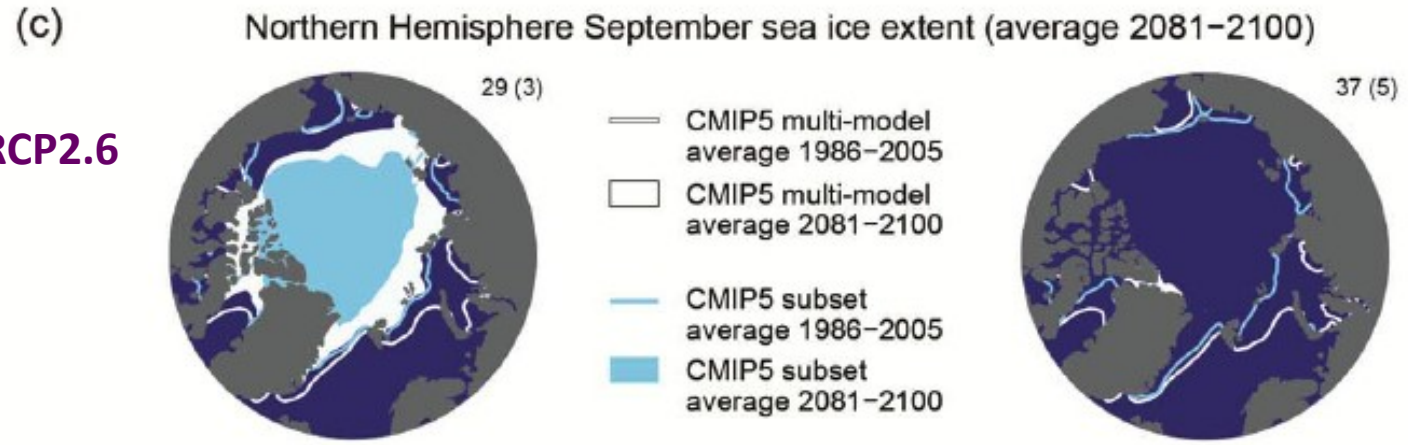


Cf Tableau SPM1 : 7 indicateurs liés à température, pluies ou vent

La banquise…



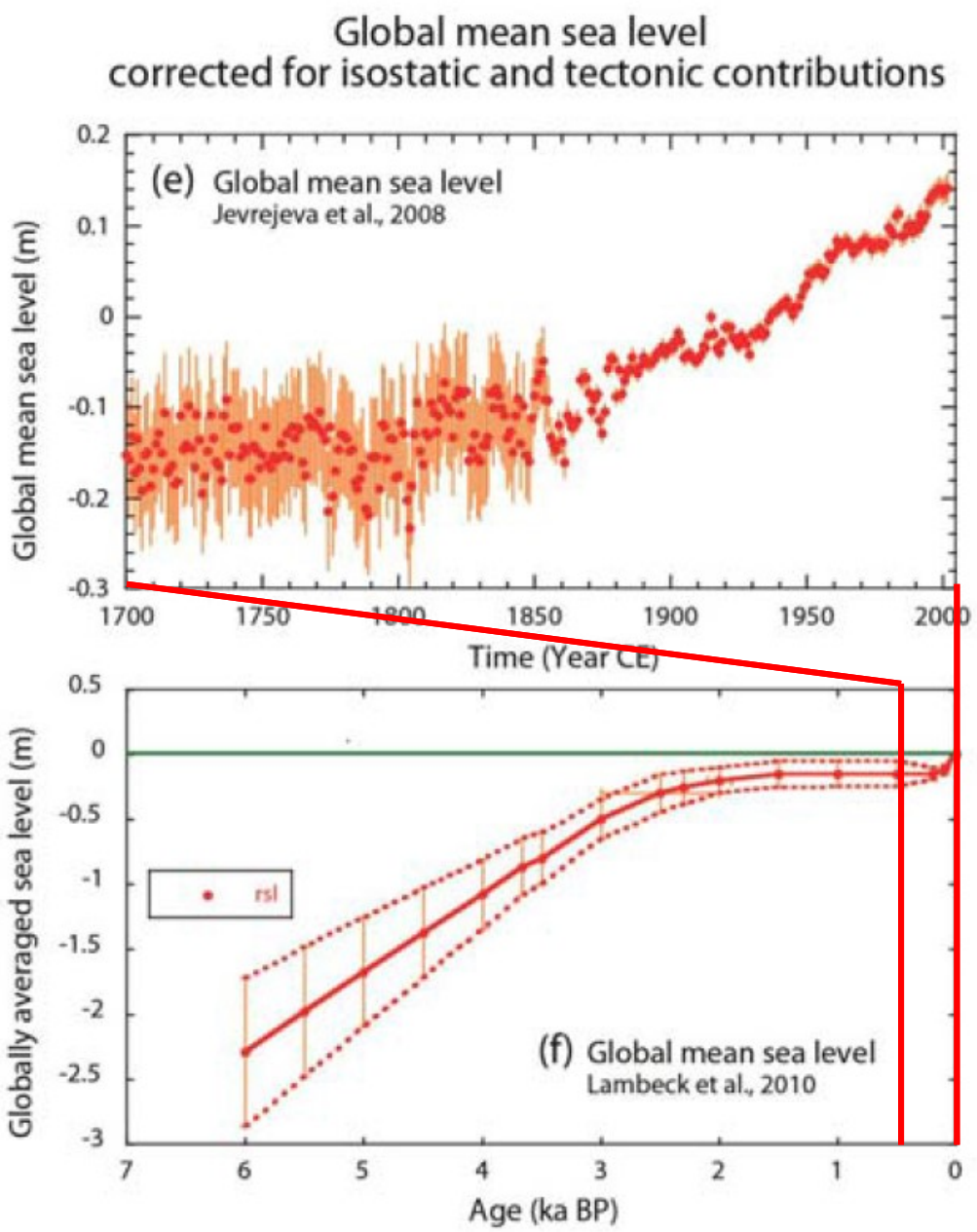
Selon une évaluation d'un sous-ensemble de modèles qui reproduisent le plus fidèlement la moyenne climatologique et la tendance de l'étendue de la banquise arctique sur la période 1979-2012, un océan Arctique pratiquement sans glace en septembre avant le milieu du siècle est *probable* d'après le scénario RCP8.5 (*degré de confiance moyen*).



RCP2.6

RCP8.5

Niveau des mers : passé

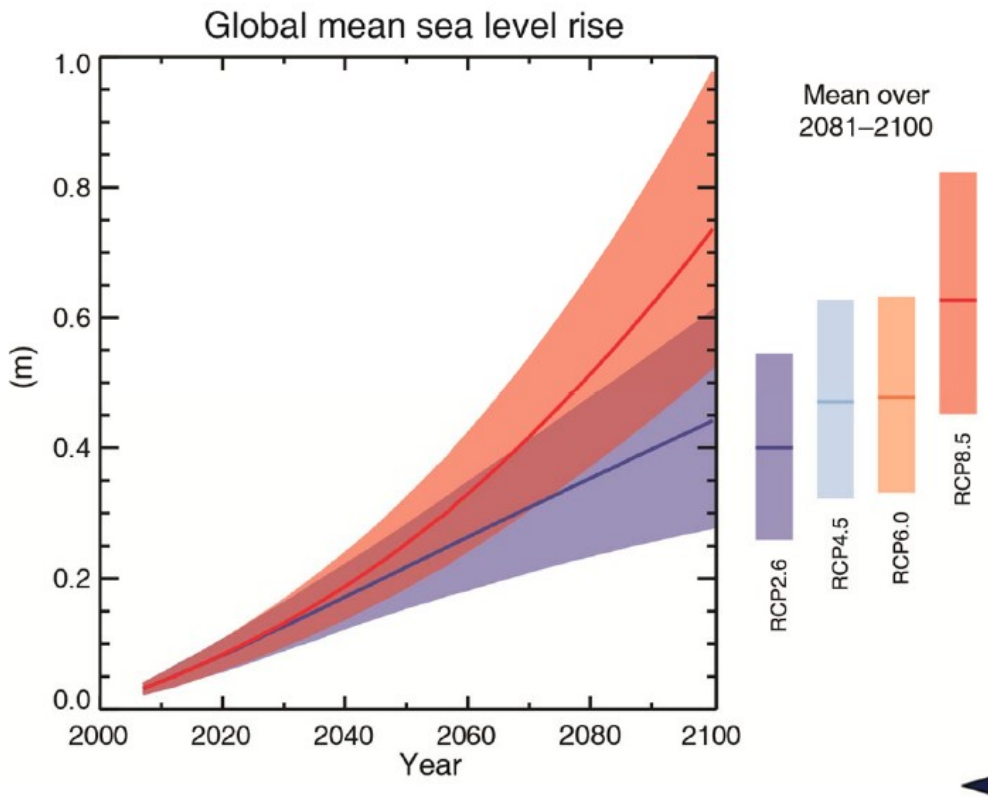


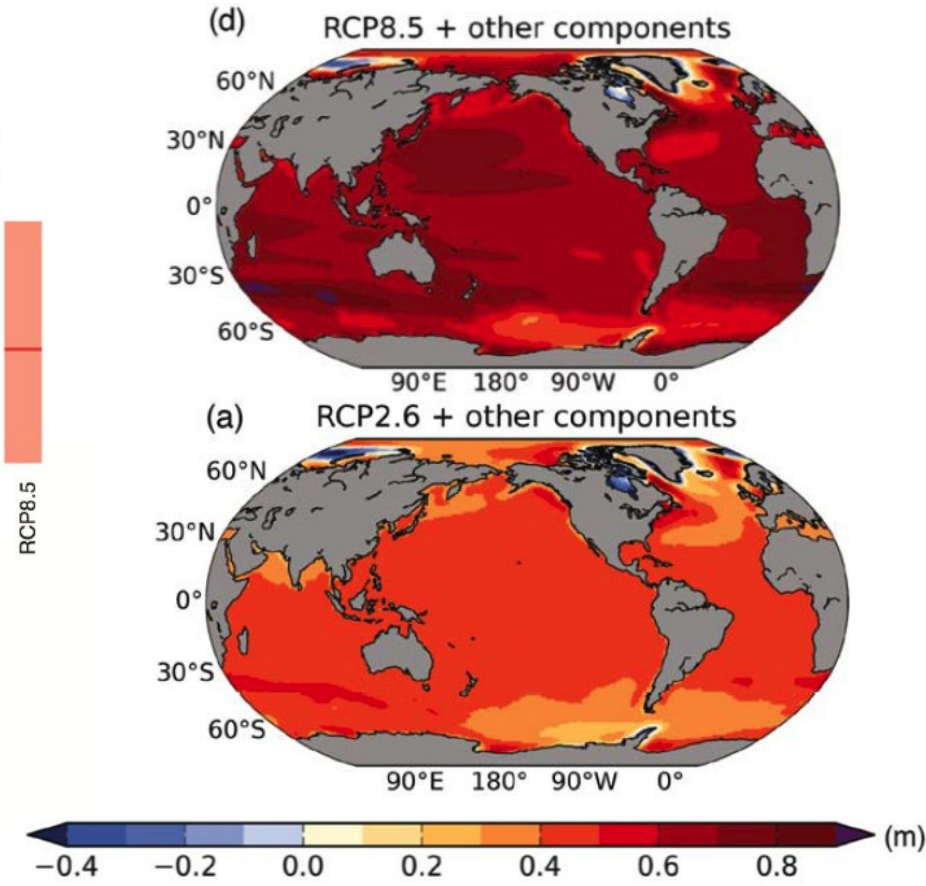
Période: 300 ans

Une transition a eu lieu entre la fin du XIX^{e} et le début du XX^{e} siècle, où l'on est passé de taux d'élévation du niveau moyen des mers relativement faibles des deux derniers millénaires à des taux plus importants (*degré de confiance élevé*).

Période: 7000 ans

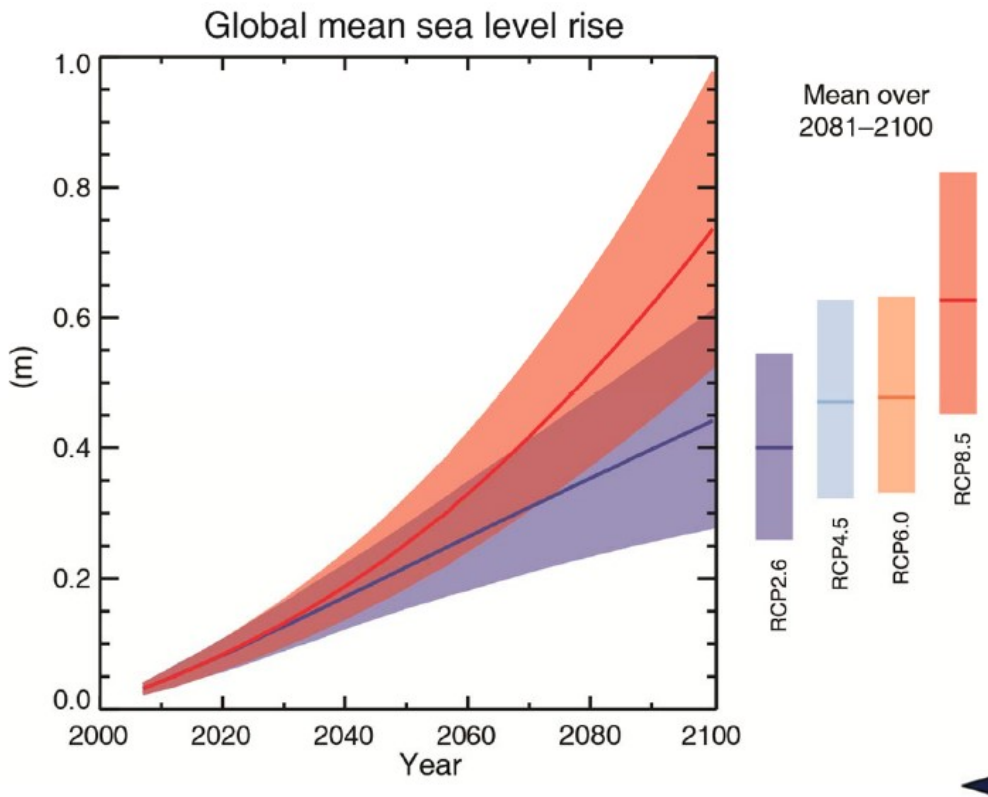
Niveau des mers : Futur

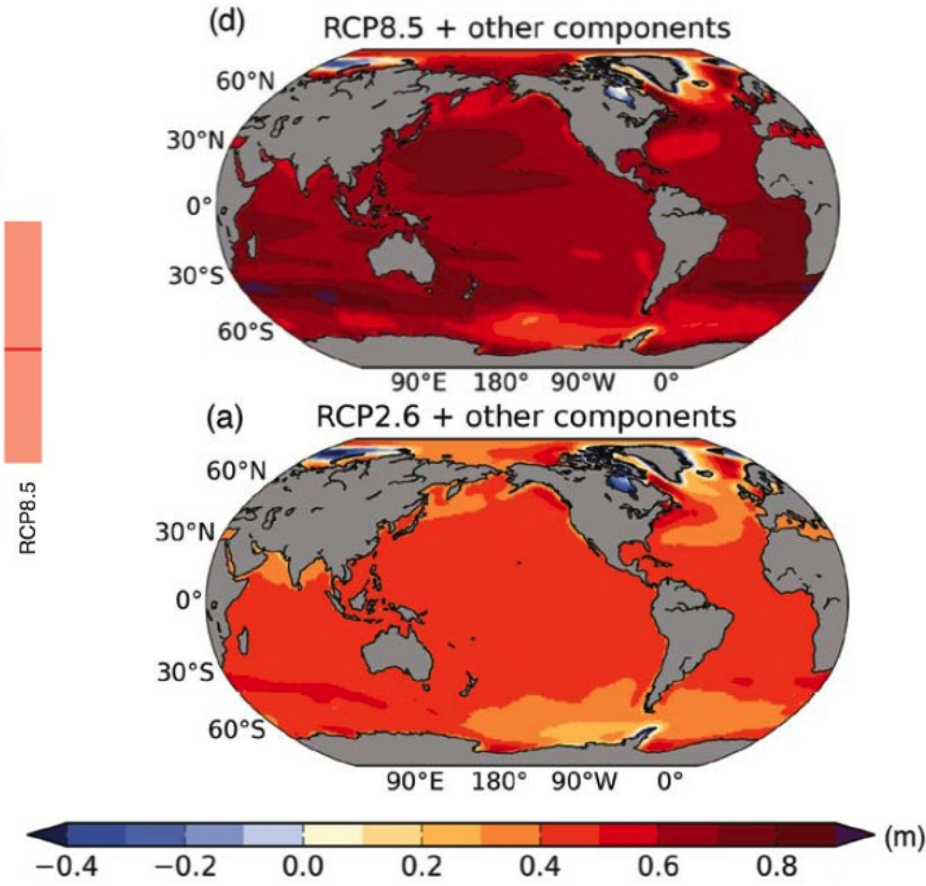




Le niveau moyen des mers continuera à s'élever au cours du XXI^{e} siècle. La vitesse d'élévation du niveau des mers dépassera *très probablement* la vitesse observée sur la période 1971–2010 pour tous les scénarios RCP, en raison du réchauffement accru des océans et de l'augmentation de la perte de masse des glaciers et des calottes glaciaires.

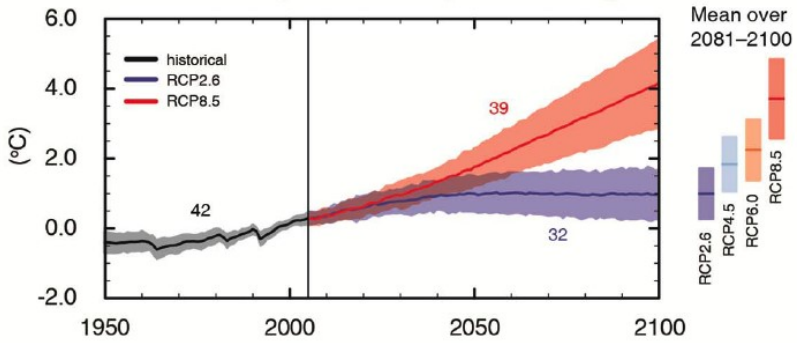
Niveau des mers : Futur





Le niveau moyen des mers continuera à s'élever au cours du XXI^{e} siècle. La vitesse d'élévation du niveau des mers dépassera *très probablement* la vitesse observée sur la période 1971–2010 pour tous les scénarios RCP, en raison du réchauffement accru des océans et de l'augmentation de la perte de masse des glaciers et des calottes glaciaires.

Emissions compatibles avec les RCPs

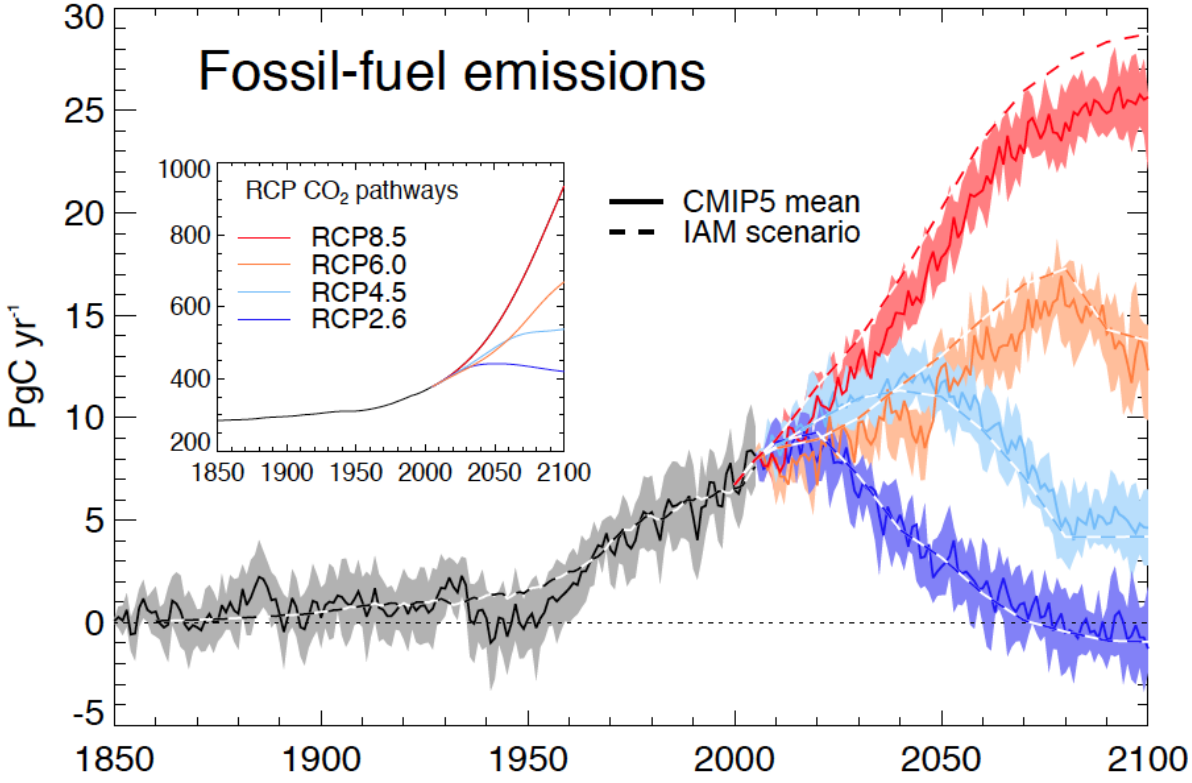


Estimation à partir des simulations incluant un couplage entre le climat et le cycle du carbone

Les émissions compatibles pour 2013-2100 sont estimées à

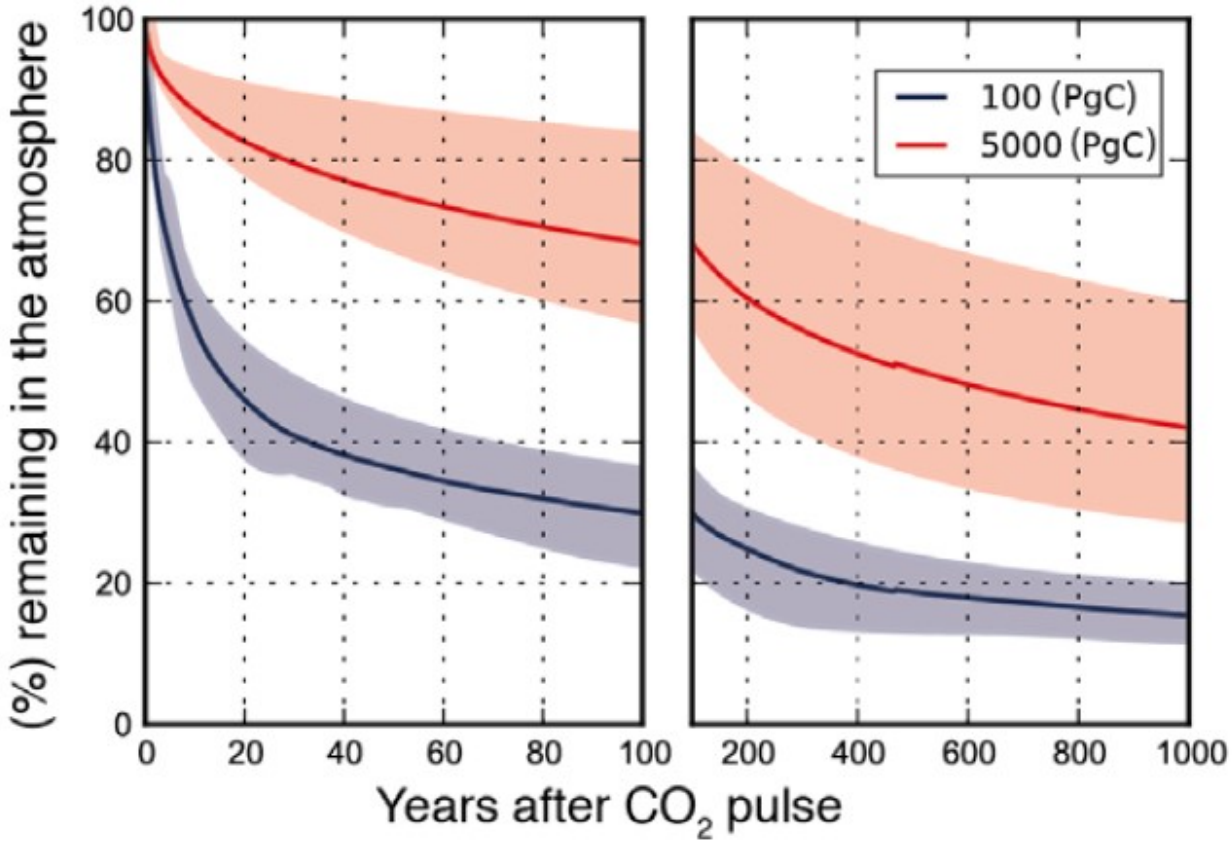
270 PgC pour RCP2.6 ,
780 PgC pour RCP4.5,
1060 PgC pour RCP6.0,
1685 PgC pour RCP8.5.

365 PgC déjà émis…



CO_2 atmosphérique : long terme

Il est *très probable* que plus de 20% du CO_2 émis par les activités humaines restera dans l'atmosphère plus de 1000 ans après l'arrêt des émissions. Cette très longue durée nécessaire aux puits de carbone pour éliminer le CO_2 anthropique rend le changement climatique irréversible à l'échelle humaine.



Conclusions

- Le CO_2 est le principal moteur du changement climatique mais d'autres contributions non négligeables
- Les principales incertitudes pour la quantification du forçage actuel est lié à l'impact des aérosols
- Les aérosols ont très probablement un effet refroidissant.
- Dans le futur, le forçage radiatif va très probablement augmenter, avec une contribution relative du CO_2 encore plus forte
- La rétroaction due aux nuages est la principale source d'incertitude pour le lien entre forçage et changement climatique
- Les changements climatiques annoncés sont considérables