

# Réchauffement climatique, Prévisions et dernier rapport du GIEC

François-Marie  
Bréon



**Chercheur** au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (CEA-CNRS-UVSQ)



**Auteur** du 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC (2014) mais pas du 6<sup>ème</sup> (2021)



**Président** de l'AFIS depuis 2020

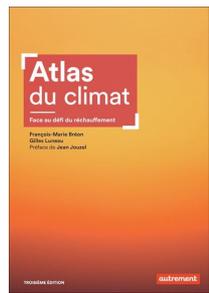


**Membre** du CA des *Voix du Nucléaire*



**Actif** sur Tweeter : @fmbreon

**Auteur** de 2 livres "grand public"



Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Intergovernmental Panel on Climate Change)

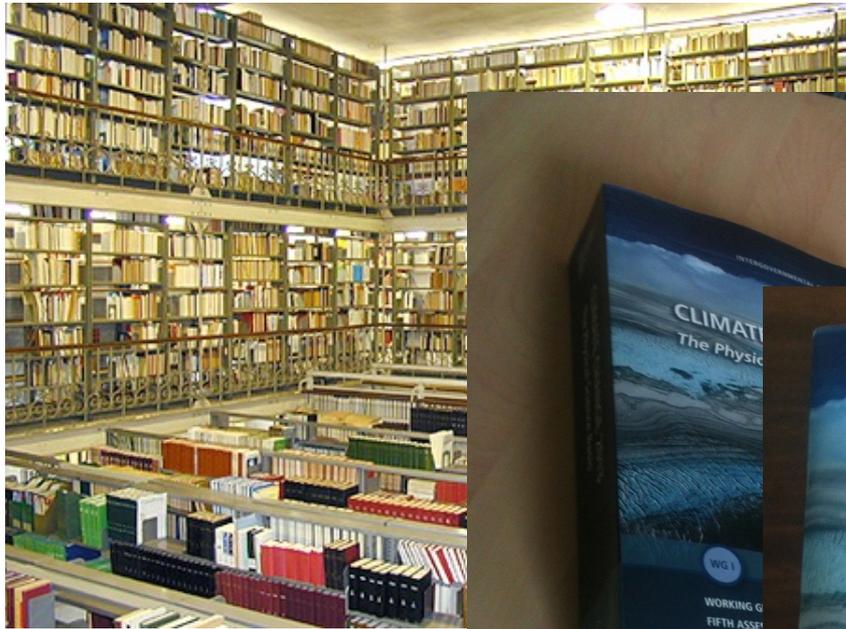
Créé par l'ONU en 1988

Premier rapport en 1990; sixième en 2022

Quelques rapports spéciaux en plus

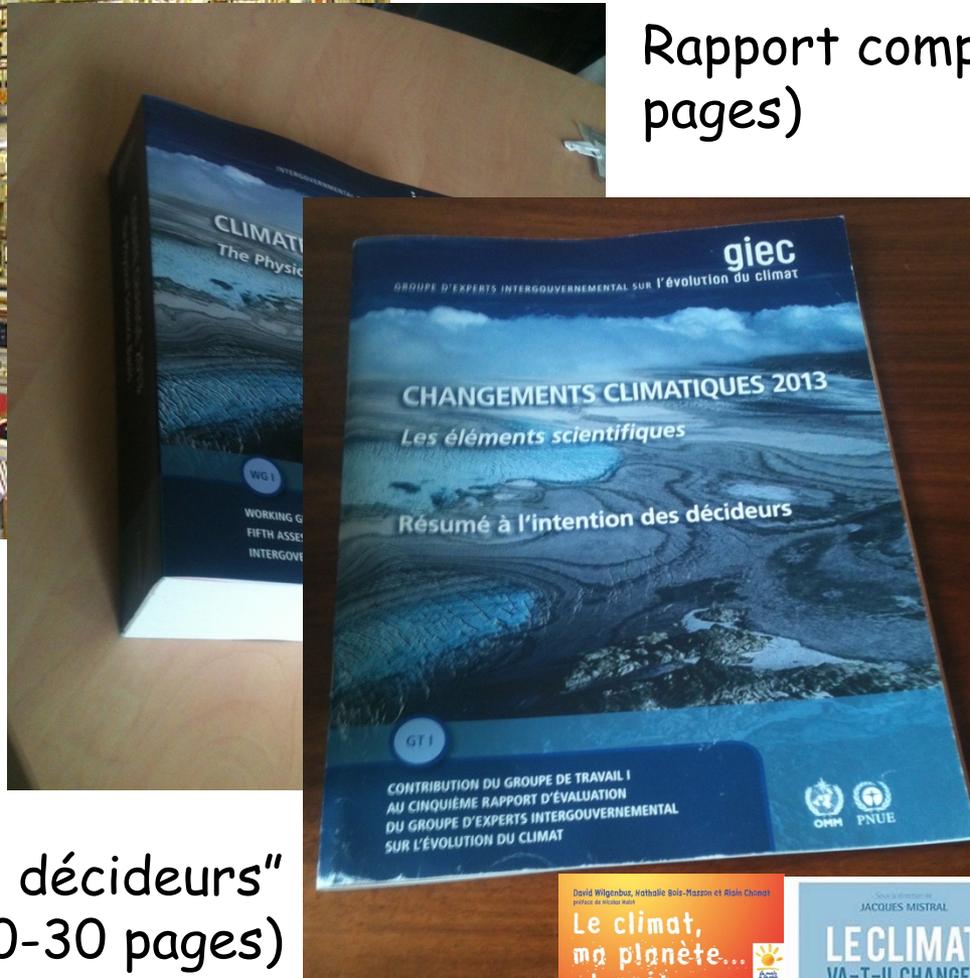
Rapports écrits par les experts. Le "*résumé pour les décideurs*" est négocié et approuvé par les représentants des états

Les auteurs ne sont pas rémunérés par le GIEC. Ils consacrent une partie de leur temps de travail à cette activité



On part de la littérature scientifique

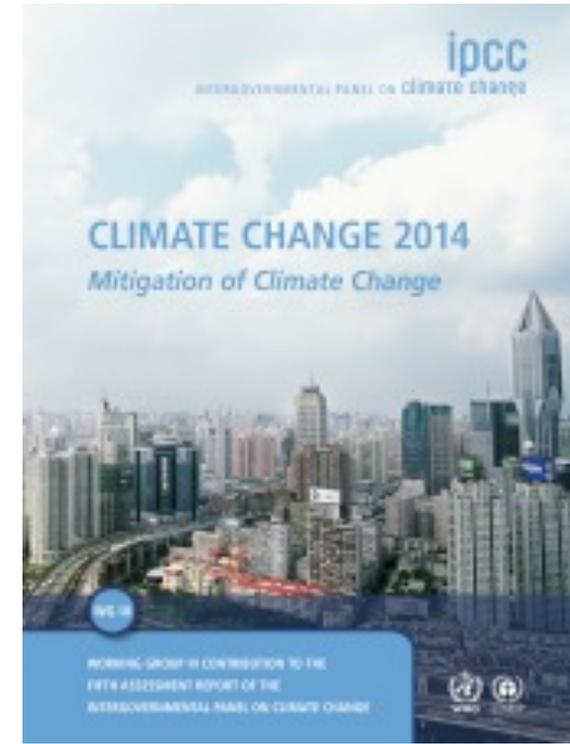
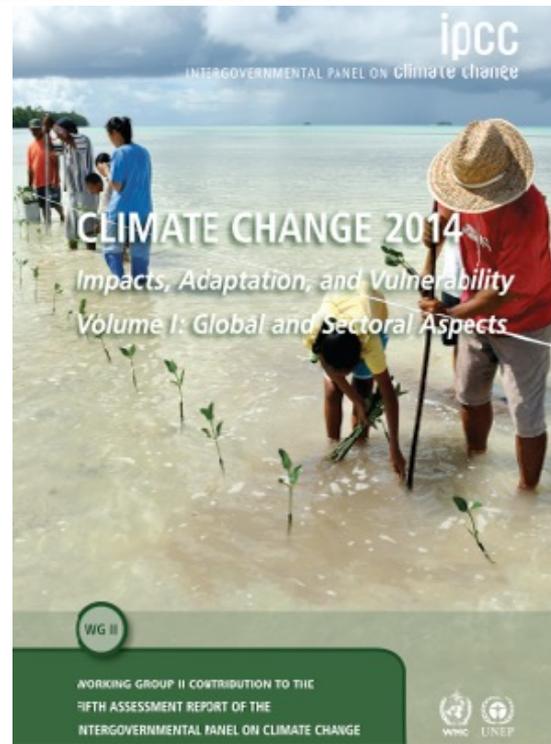
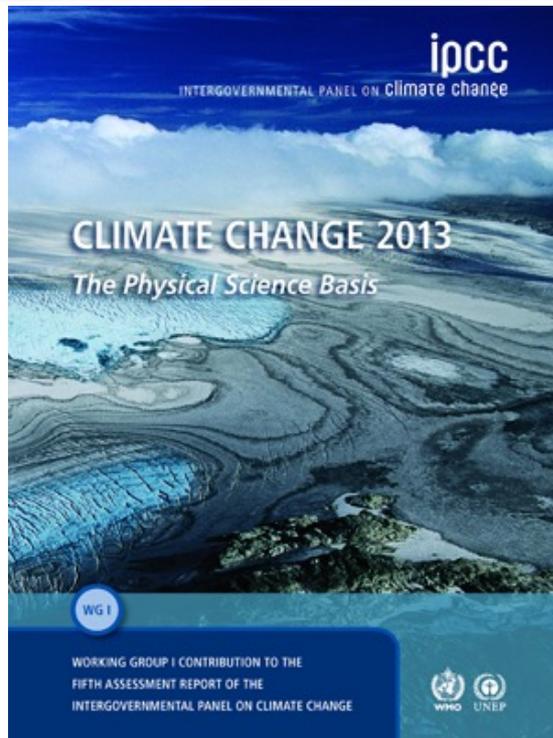
Rapport complet (500-1000 pages)



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

Et la communication grand public suit (sans contrôle)...





**Groupe 1**  
Science du climat

**Groupe 2**  
Impact et vulnérabilité

**Groupe 3**  
Atténuation du CC

200-250 auteurs par groupe, organisés par chapitres (avec 2-3 coordinateurs)

Dans le groupe 1, TOUS les auteurs sont des académiques (chercheurs et enseignants-chercheurs) travaillant sur la thématique du climat.

Les profils sont plus divers dans les autres groupes



**14 000** publications scientifiques évaluées

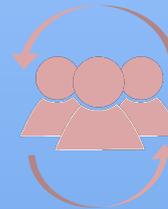


## Auteurs

**234** auteurs de **65** pays

**28%** femmes, **72%** hommes

**63%** nouveaux auteurs principaux

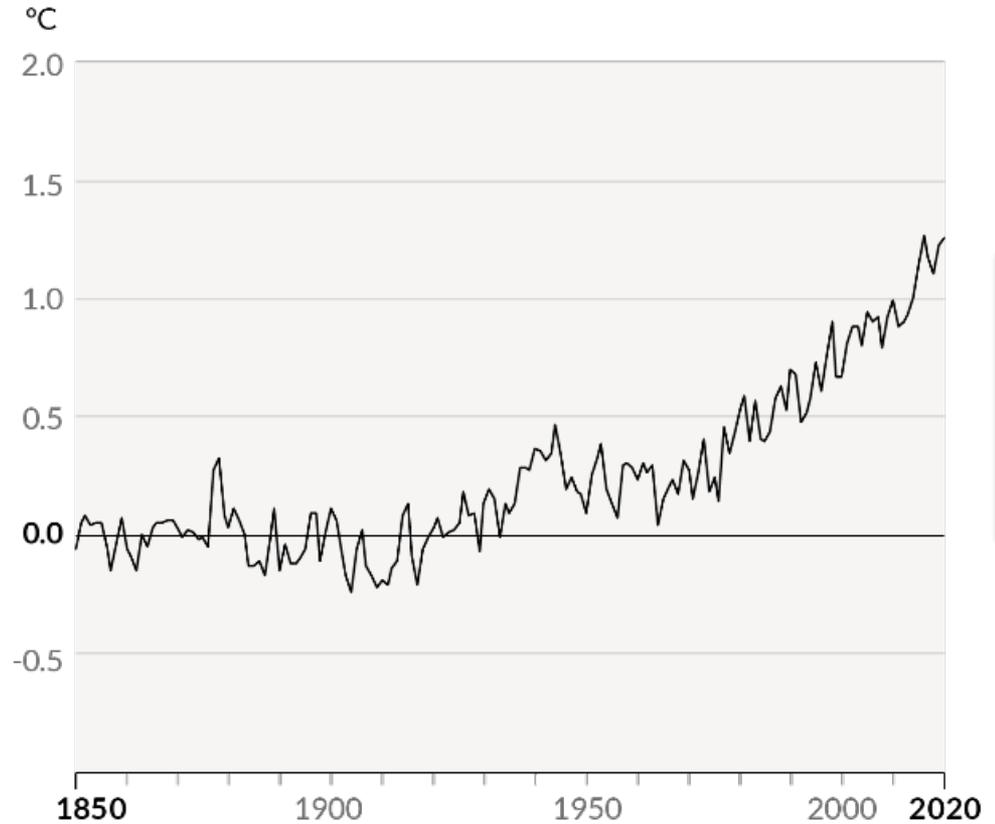
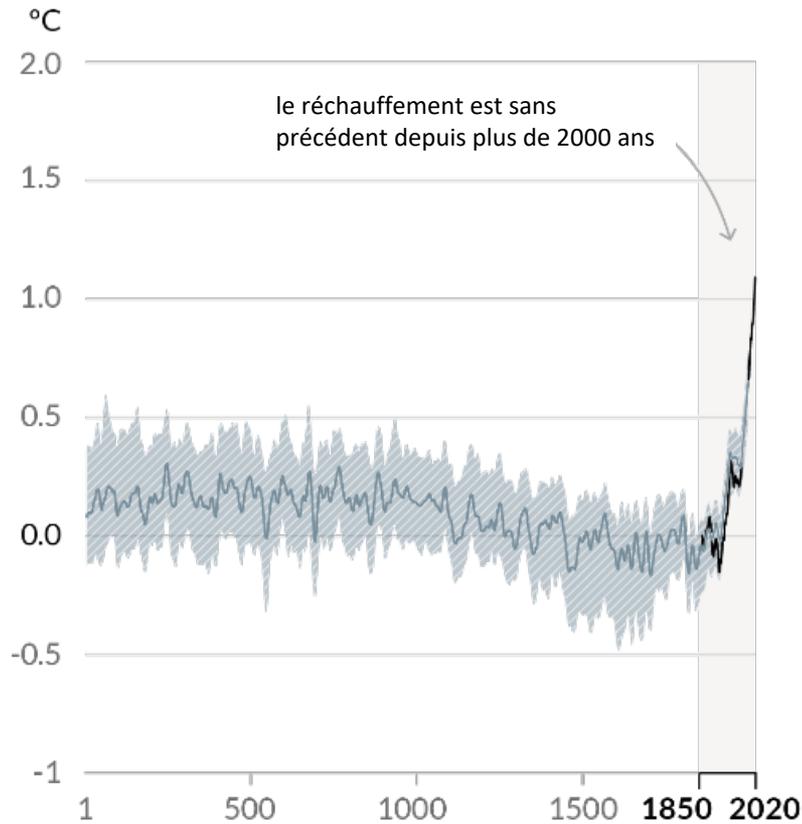


## Processus de Relecture

**78,000+** commentaires

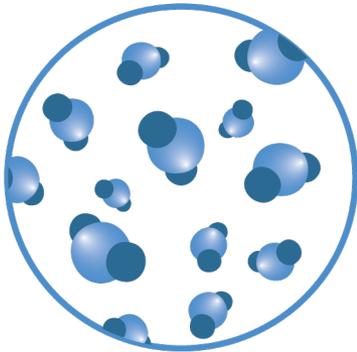
**46** pays ont participé à la relecture  
par les gouvernements

Le climat de la Terre s'est réchauffé à un rythme sans précédent depuis au moins 2000 ans



augmentation de  
1.1 °C

Concentration  
**CO<sub>2</sub>**

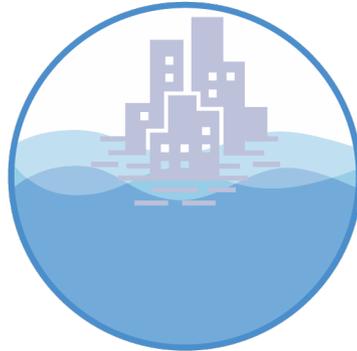


**la plus élevée**

depuis au moins

**2 millions d'années**

Montée du  
**niveau des mers**

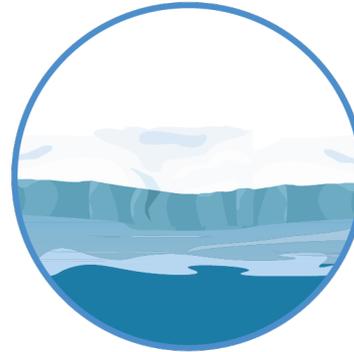


**la plus rapide**

depuis au moins

**3000 ans**

surface de la  
**banquise arctique**



**la plus réduite**

depuis au moins

**1000 ans**

recul des  
**glaciers**



**sans précédent**

depuis au moins

**2000 ans**

Ce sont là des estimations prudentes. Il est probable que le caractère "exceptionnel" s'applique sur des périodes plus longues



## Chaleur extrême

plus fréquente  
plus intense



## Fortes précipitations

plus fréquentes  
plus intenses



## Sécheresse

augmentation  
dans certaines  
régions



## Conditions météorologiques propices aux incendies

plus fréquentes



## Océans

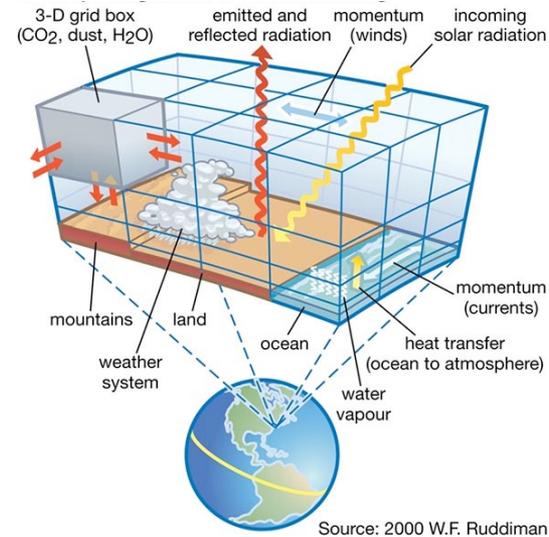
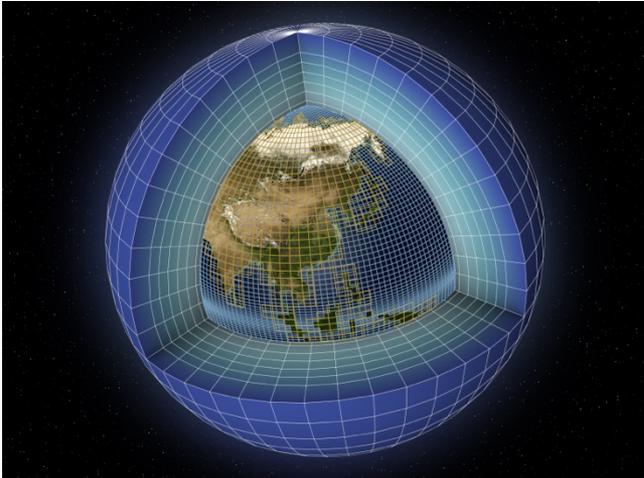
réchauffement  
acidification  
perte d'oxygène



[Credit: NASA]

“

Les changements climatiques récents sont généralisés, rapides et s'intensifient. Ils sont sans précédent depuis des milliers d'années.

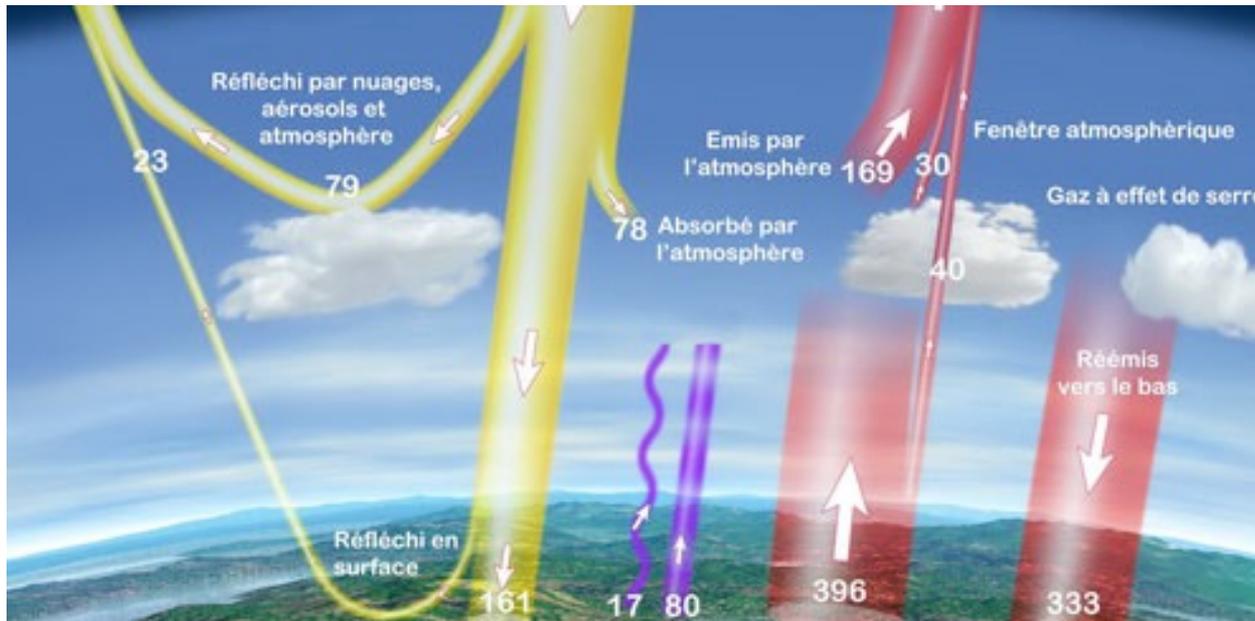


Pour interpréter les changements et anticiper le futur, on utilise des modèles

Modèles climatiques similaires aux modèles météo, mais avec des modules qui prennent en compte les processus lents (courants marins, calottes polaires, distribution de végétation)

Solaire ( $\lambda < 3 \mu\text{m}$ )

InfraRouge ( $\lambda > 4 \mu\text{m}$ )



Flux radiatifs moyens  
donnés sur la figure en  
 $\text{W m}^{-2}$

L'atmosphère est pratiquement transparente au rayonnement solaire ( $\lambda < 3 \mu\text{m}$ )  
 Elle est largement opaque au rayonnement infra-rouge ( $\lambda > 4 \mu\text{m}$ )  
 Principe bien compris depuis plusieurs siècles

Principaux gaz: Vapeur d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ), Dioxyde de Carbone ( $\text{CO}_2$ ), Méthane ( $\text{CH}_4$ ), protoxyde d'Azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ). 99% de l'atmosphère ( $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ) n'y participe pas.

**FAR 1990:** The size of this warming is broadly consistent with predictions of climate models, but it is also of the same magnitude as natural climate variability. Thus the observed increase could be largely due to this natural variability ; (Peut être)

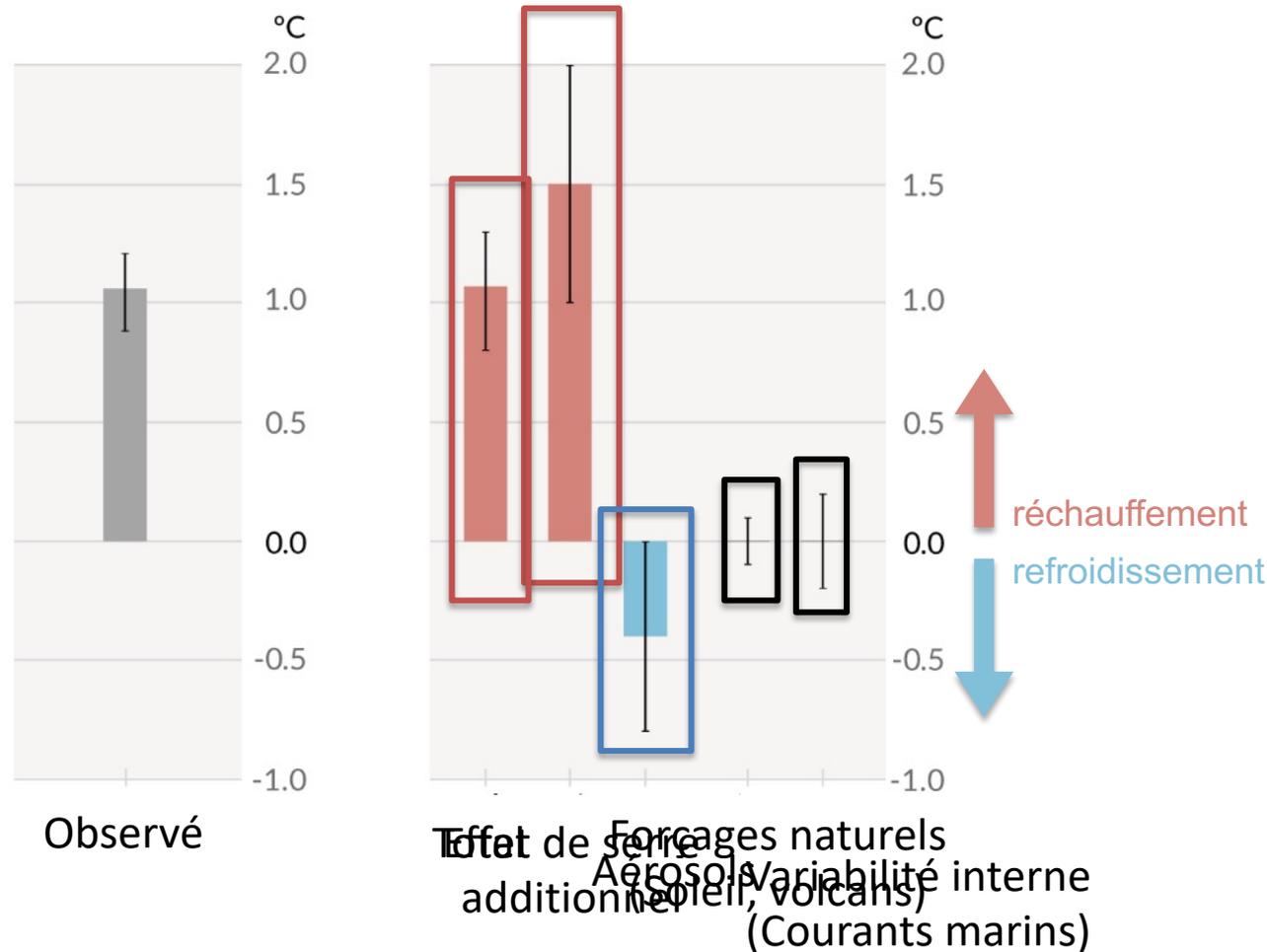
**SAR 1995 :** The balance of evidence suggests a discernible influence on global climate. (Il semble bien que oui)

**TAR 2001 :** There is new and stronger evidence that most of the warming observed over the last 50 years is attributable to human activities. (Probablement)

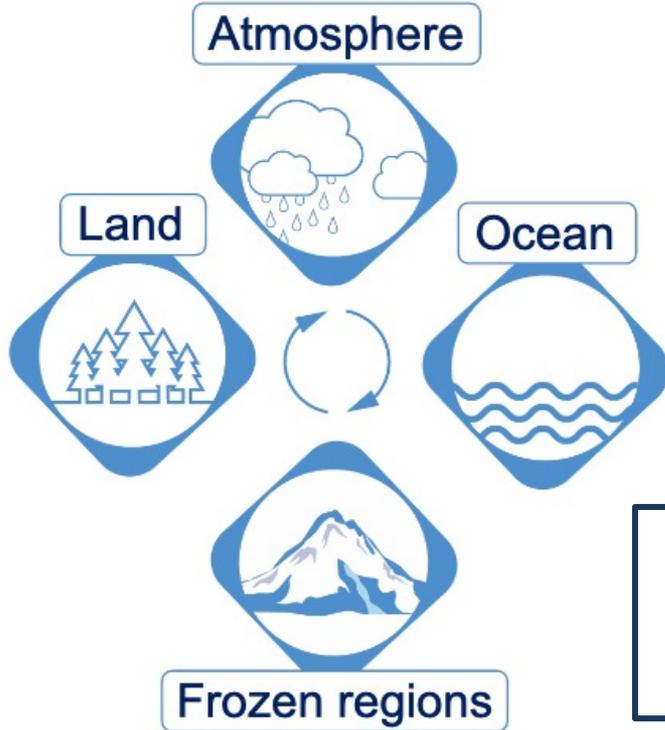
**AR4 2007 :** Most of the observed increase in global averaged temperature [] is very likely due to the increase in anthropogenic greenhouse gas concentrations. (Très probablement)

**AR5 2013 :** Human influence on the climate system is clear. This is evident from the increasing greenhouse gas concentrations in the atmosphere, [...] and understanding of the climate system. (On comprend bien)

**AR6 2021 :** It is unequivocal that human influence has warmed the atmosphere, ocean and land (Aucun doute)



Le réchauffement observé est dû aux émissions issues **des activités humaines**, le réchauffement dû **aux gaz à effet de serre** étant partiellement masqué par le refroidissement dû aux **aérosols**



Une atmosphère plus chaude peut contenir plus de vapeur d'eau



Avec le réchauffement climatique, l'évaporation est plus intense et rapide



Augmentation de la fréquence des sécheresses



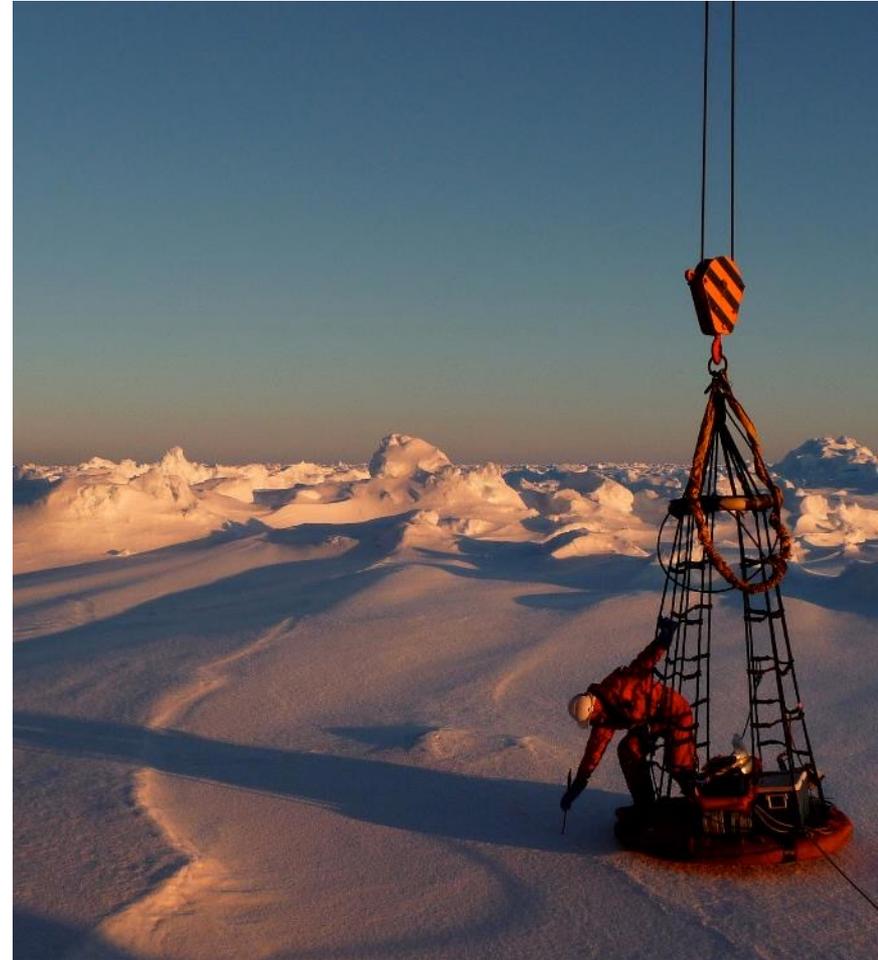
Augmentation des précipitations intenses

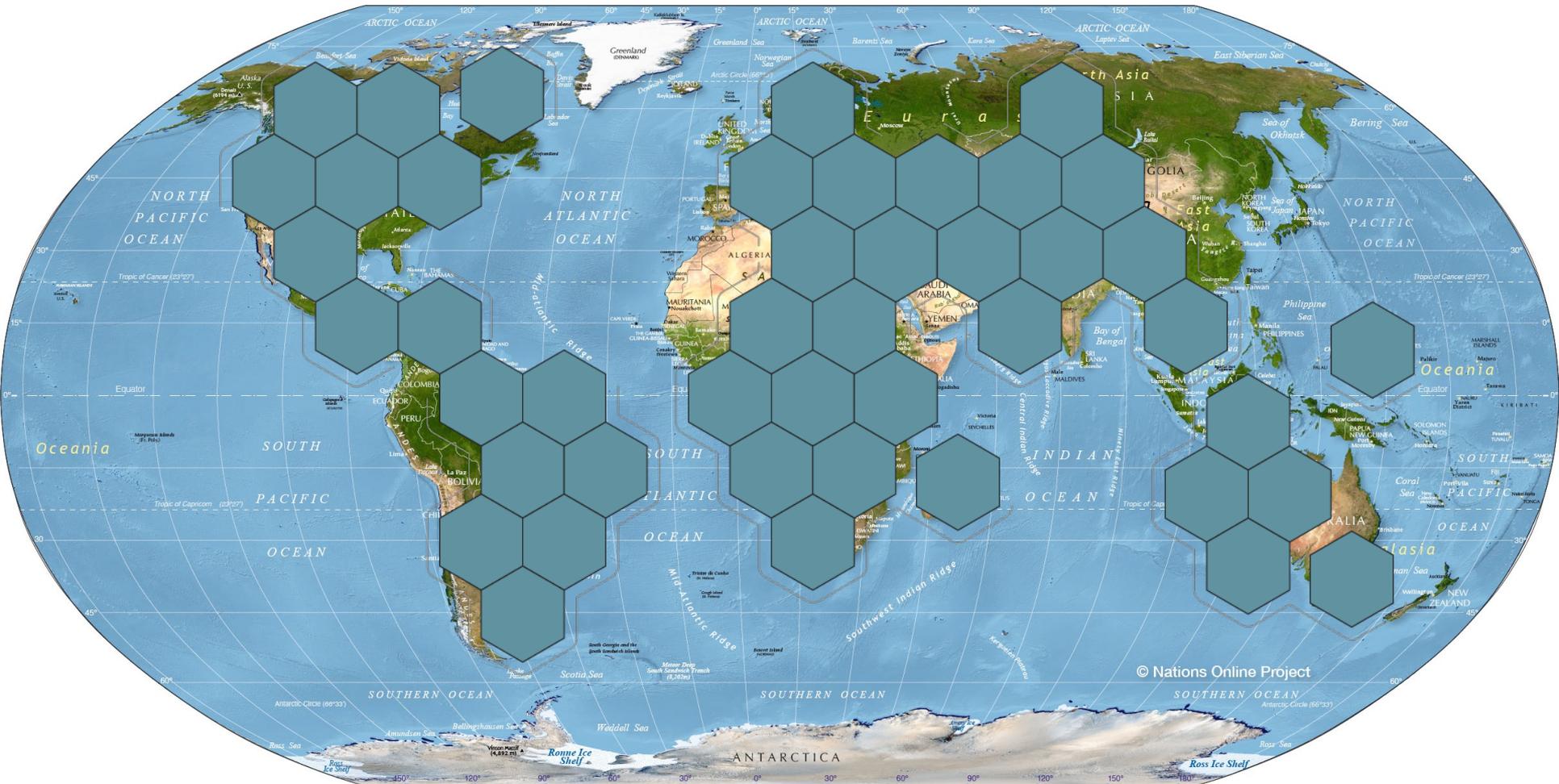


L'influence humaine est le principal facteur ...

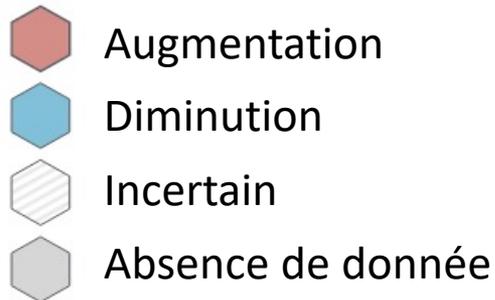
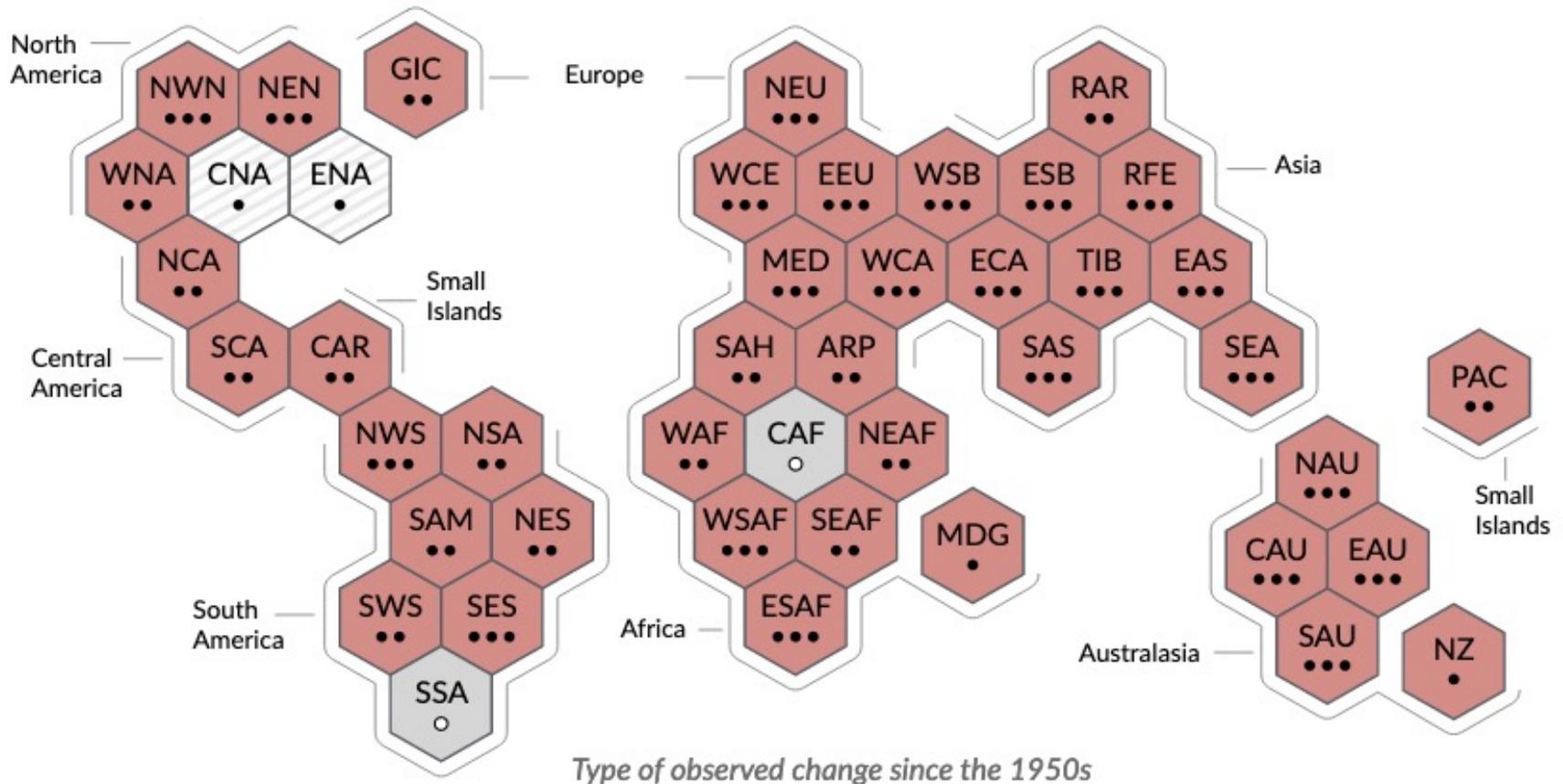
de l'augmentation de la **fréquence** et de l'**intensité** des **extrêmes chauds** du **réchauffement de l'océan** depuis les années 1970, et de son **acidification** des changements visibles dans les **zones gelées** de la planète :

- recul global des glaciers depuis les années 1990
- baisse de 40% de la banquise arctique depuis 1979
- diminution du manteau neigeux de printemps depuis les années 1950

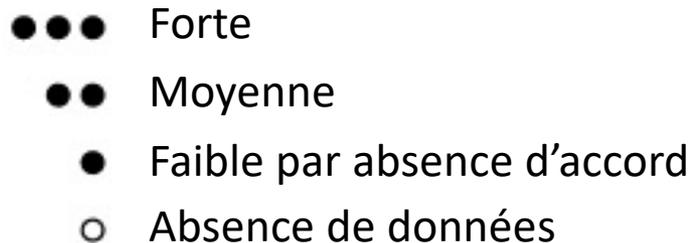


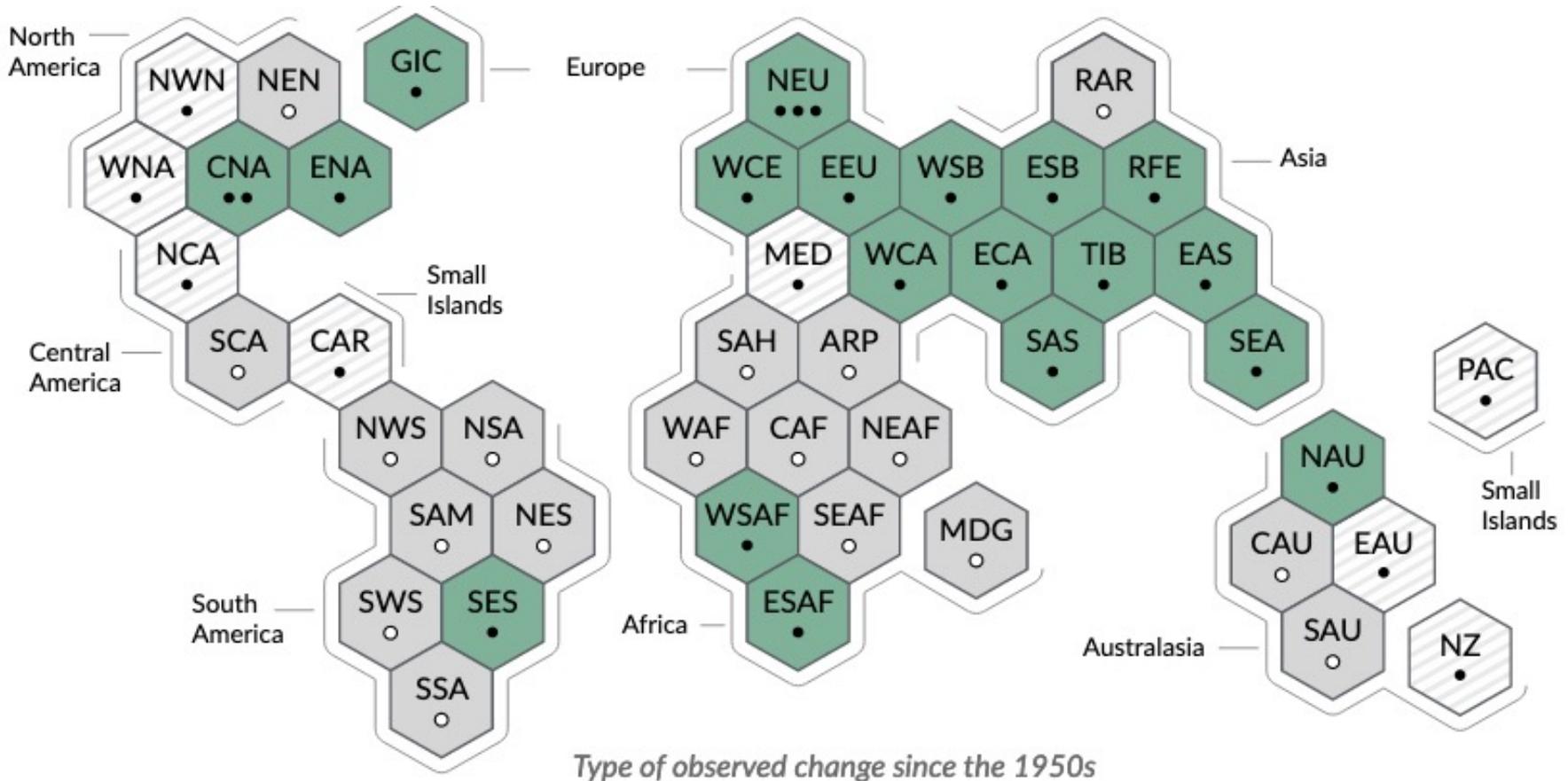


La Terre a été divisée en 45 régions. Le changement climatique et ses impacts est analysé sur chacune



## Confiance en une cause anthropique

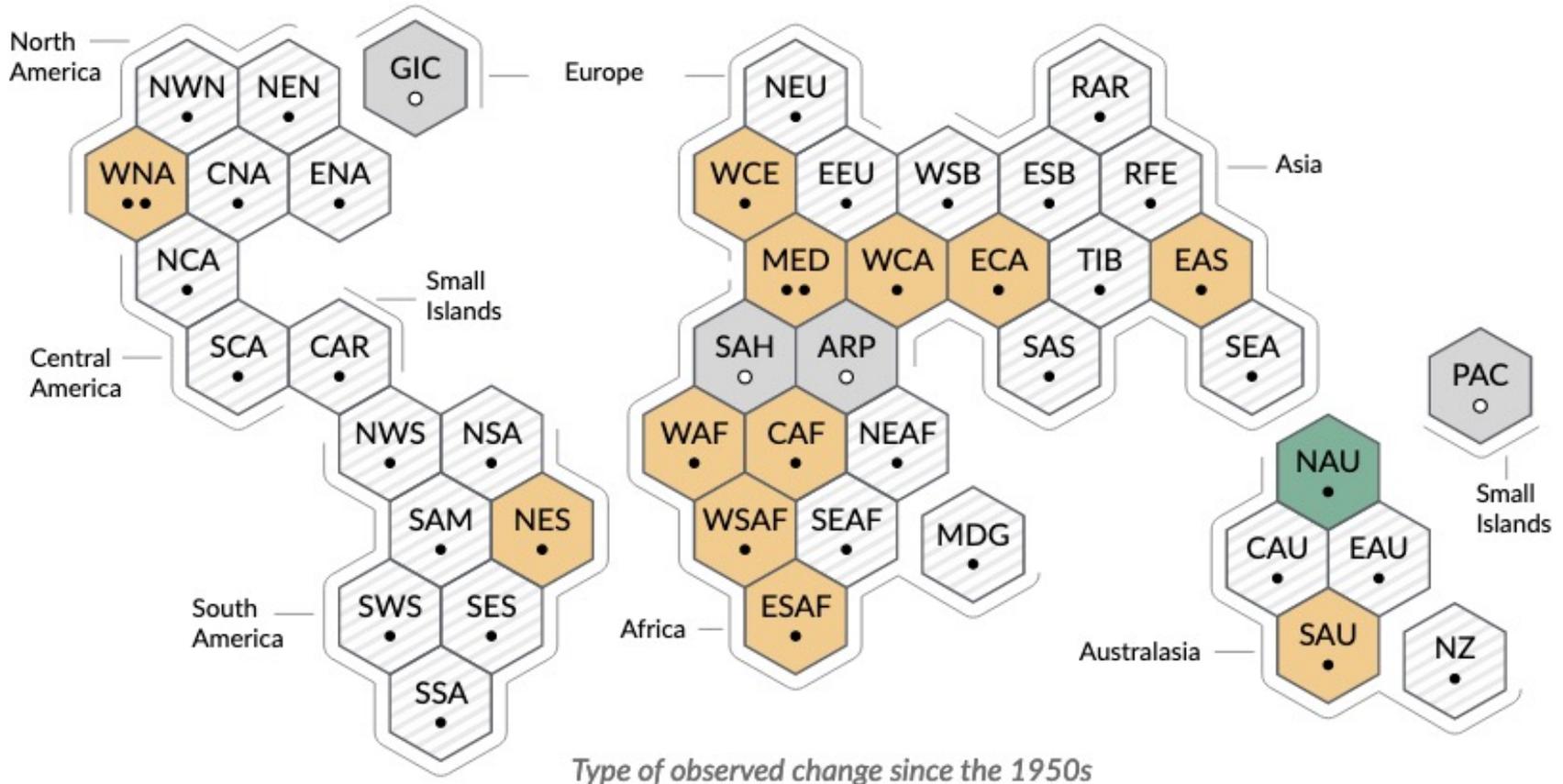




-  Augmentation
-  Diminution
-  Incertain
-  Absence de donnée

## Confiance en une cause anthropique

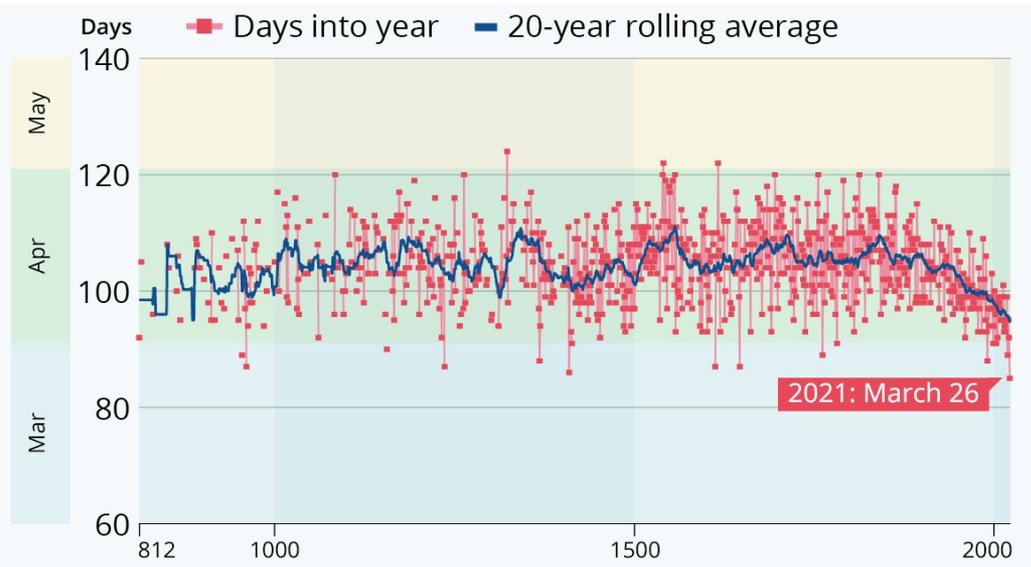
- ● ● Forte
- ● Moyenne
- Faible par absence d'accord
- Absence de données



-  Augmentation
-  Diminution
-  Incertain
-  Absence de donnée

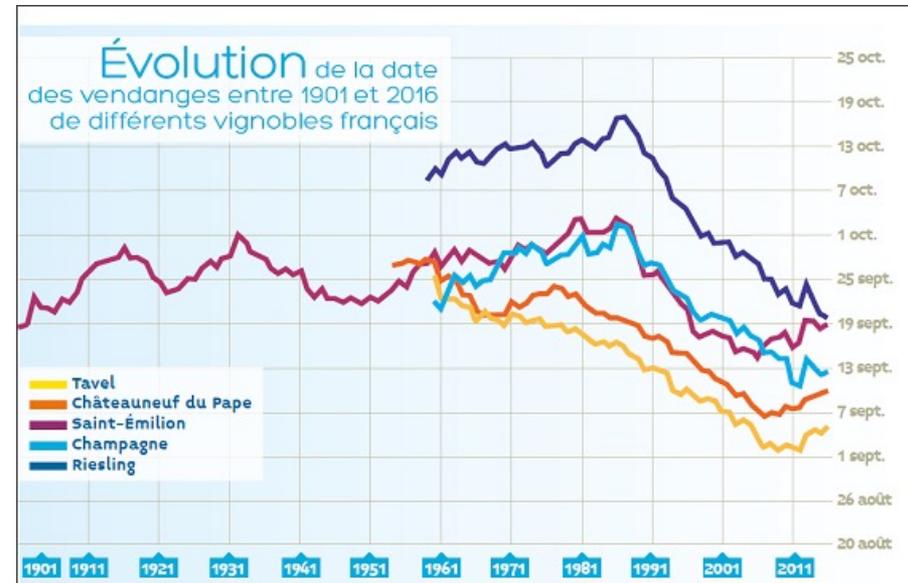
## Confiance en une cause anthropique

- ● ● Forte
- ● Moyenne
- Faible par absence d'accord
- Absence de données

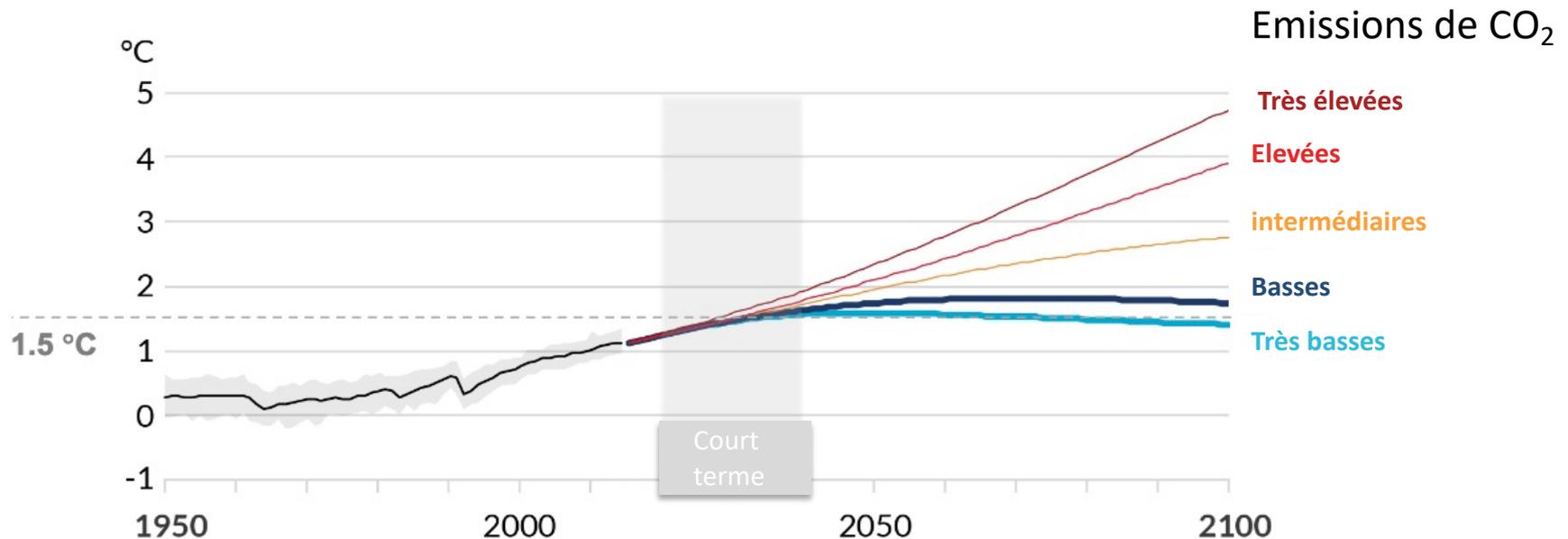


Date de floraison des Cerisiers à Kyoto  
 — Moyenne sur 20 ans

Date de vendange des vignobles français  
 (valeur moyenne sur la décennie précédant la date indiquée)



Les émissions à venir entraînent un réchauffement supplémentaire



1.5 degrés sera dépassé avant 2040

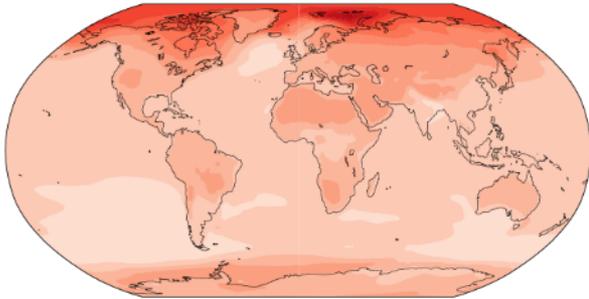
Possibilité de repasser dessous avec des efforts très importants et rapides

Le 2 degrés (fixé par les états lors des accords de Paris) est encore "possible"

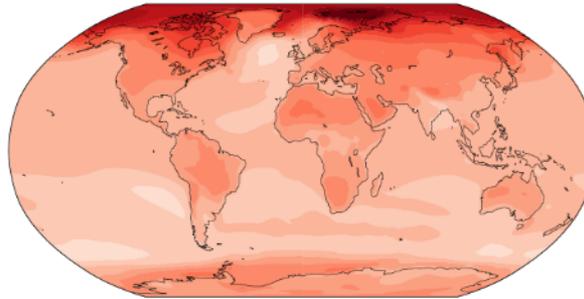
Le réchauffement n'est pas homogène : + fort sur les terres et sur les régions polaires

Changements simulés ...

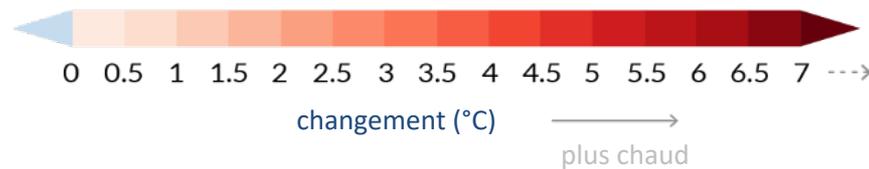
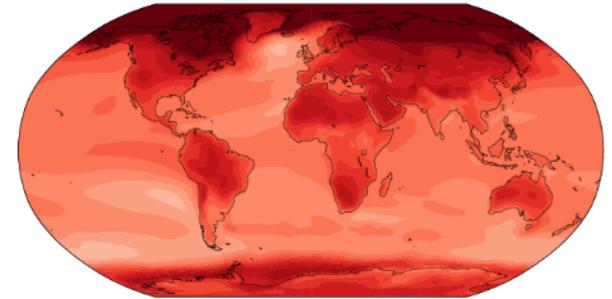
... pour 1.5°C



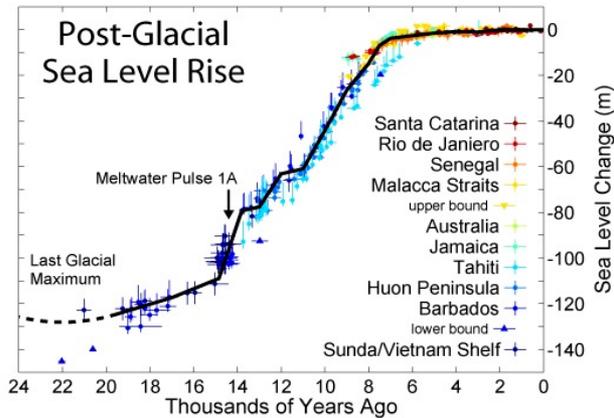
... pour 2°C



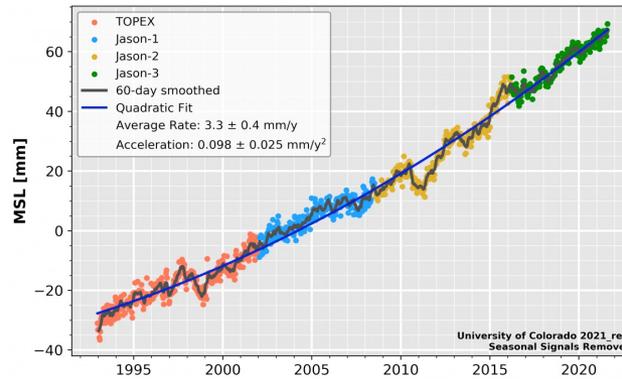
... pour 4°C



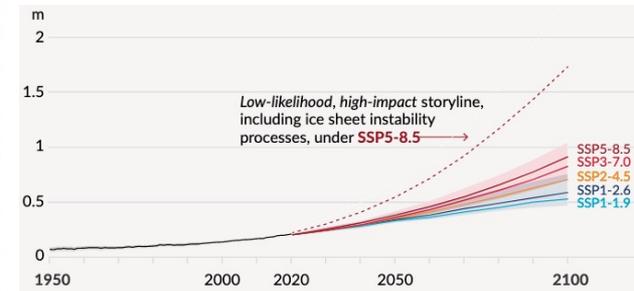
Pour chaque fraction de réchauffement planétaire supplémentaire, les changements sont amplifiés



Passé (24 000 ans)



Présent (30 ans)



Futur (100 ans)

L'élévation du niveau des mers est due à

- L'expansion thermique des océans
- La fonte des glaces

Même si on stabilise le climat, ces processus vont continuer durant les prochains siècles conduisant à une hausse continue du niveau des mers

Il y a de fortes incertitudes sur la dynamique des calottes glaciaire. Une déstabilisation n'est pas exclue

## Extrait Fact sheet Europe

- Quels que soient les niveaux futurs de réchauffement climatique, les **températures augmenteront** dans toutes les régions européennes à un rythme dépassant les changements de température moyenne mondiale, similaires aux observations passées.
- La fréquence et l'intensité des **extrêmes de chaleur**, y compris les vagues de chaleur marines, ont augmenté au cours des dernières décennies et devraient **continuer d'augmenter** quel que soit le scénario d'émissions de GES. Les seuils critiques pertinents pour les écosystèmes et les humains devraient être dépassés pour un réchauffement planétaire de 2 °C et plus.
- La **fréquence des vagues de froid et des jours de gel diminuera** dans tous les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et à tous les horizons temporels, à l'instar des observations passées
- Les observations ont un schéma saisonnier et régional cohérent avec **l'augmentation prévue des précipitations en hiver en Europe du Nord**. Une **diminution des précipitations est projetée en été en Méditerranée** s'étendant aux régions du nord. **Les précipitations extrêmes et les inondations pluviales devraient augmenter** à des niveaux de réchauffement planétaire dépassant 1,5 °C dans toutes les régions, à l'exception de la Méditerranée.
- Quel que soit le niveau de réchauffement climatique, le **niveau relatif de la mer augmentera** dans toutes les zones européennes à l'exception de la mer Baltique, à un rythme proche ou supérieur au niveau moyen mondial de la mer. Les changements devraient se poursuivre au-delà de 2100. Les événements extrêmes du niveau de la mer deviendront plus fréquents et plus intenses, entraînant davantage d'inondations côtières. Les **rivages le long des côtes sablonneuses reculeront** tout au long du 21e siècle.
- De fortes **baisses des glaciers**, du pergélisol, de l'étendue de la couverture neigeuse et de la **durée saisonnière de la neige** aux latitudes/altitudes élevées sont observées et se poursuivront dans un monde en réchauffement.
- De multiples facteurs d'impact climatique ont déjà changé simultanément au cours des dernières décennies. Le nombre de changements de facteurs d'impact climatiques devrait augmenter avec l'augmentation du réchauffement climatique

## Europe occidentale et centrale (WCE)

- **Augmentation projetée des inondations** pluviales avec un réchauffement global de 1,5°C (degré de confiance moyen) et de 2°C et plus (degré de confiance élevé).
- Tendance à la **hausse observée des crues des rivières** et augmentation prévue à 2°C et plus du réchauffement climatique (degré de confiance élevé).
- **Augmentations prévues des sécheresses hydrologiques, agricoles et écologiques** à des niveaux de réchauffement au milieu du siècle de 2 °C ou plus, quel que soit le scénario d'émissions de GES (degré de confiance moyen).

## Méditerranée (MED)

- **Augmentation observée des sécheresses hydrologiques, agricoles et écologiques** (degré de confiance moyen), **augmentation prévue de l'aridité et des conditions météorologiques de feu** lors d'un réchauffement global de 2°C et plus (degré de confiance élevé).
- **Combinaison prévue de changements climatiques** (réchauffement, températures extrêmes, augmentation des sécheresses et de l'aridité, diminution des précipitations, augmentation des incendies, niveaux moyens et extrêmes de la mer, diminution de la couverture neigeuse et diminution de la vitesse du vent) d'ici le milieu du siècle et à réchauffement global d'au moins 2°C et plus (degré de confiance élevé).

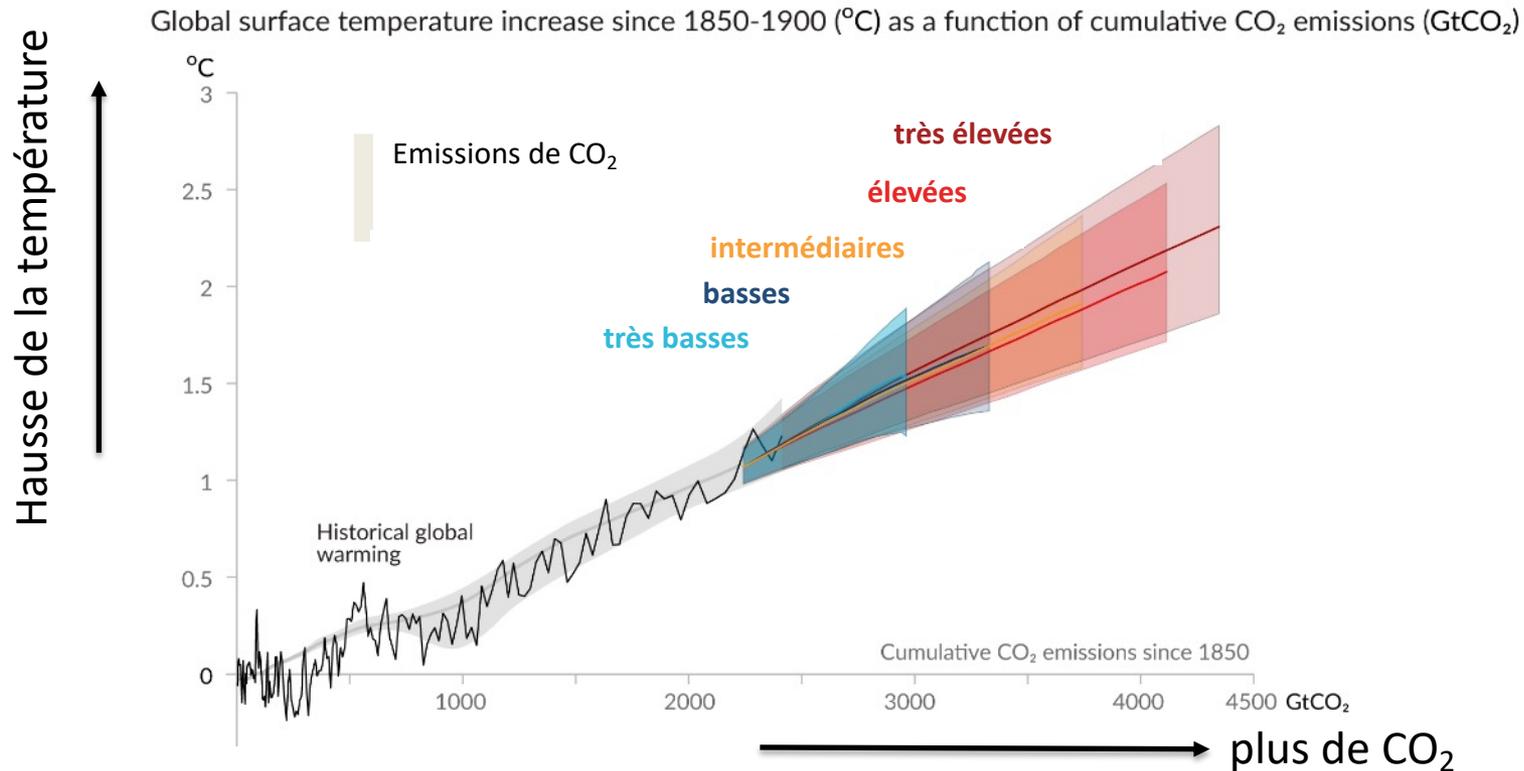


[Credit: Peter John Maridable]

“

À moins d'une réduction immédiate, rapide et à grande échelle des émissions de gaz à effet de serre, limiter le réchauffement à 1,5°C sera hors de portée.

Chaque tonne d'émissions de CO<sub>2</sub> contribue au réchauffement de la planète



Le paramètre important est le total des émissions de CO<sub>2</sub>;  
 le rythme a une influence mineure

Les rapports du GIEC montrent que le changement climatique va avoir des impacts graves sur la santé, l'agriculture, les écosystèmes...

Mais, la lutte contre le changement climatique peut aussi avoir des impacts grave sur l'économie, le niveau de vie, le développement au sens large

La lutte contre le CC a des impacts négatifs assez rapides, et des bénéfiques lointains (en temps).

On est donc face à un choix politique qui revient à privilégier les générations actuelles ou les générations futures

Il y a aussi un aspect géographique : Les dommages (dus au CC) ne sont pas sur les lieux de l'émission; certains pays sont plus vulnérables que d'autres. Clairement, on n'est pas dans un cadre pollueur-payeur.

Cela rend les négociations internationales (qui doit faire les efforts) particulièrement difficile

Pour lutter contre le changement climatique, il faut diminuer nos émissions de  $\text{CO}_2$  (prioritairement), méthane et  $\text{N}_2\text{O}$  (aussi)

Méthane lié à fuites de gaz naturel, décharges, et agriculture

$\text{N}_2\text{O}$  essentiellement lié à agriculture

$\text{CO}_2$  lié à l'utilisation des combustibles fossiles : Charbon, pétrole, gaz naturel.

La diminution de ces usages passe par

- **Sobriété** (Moins de viande, de  $\text{m}^2$ , de km parcourus, d'objets, d'eau chaude...)
- **Efficacité** (isolation, meilleurs rendements des moteurs, co-génération...)
- **Electrification** (non carbonée) des usages énergétiques

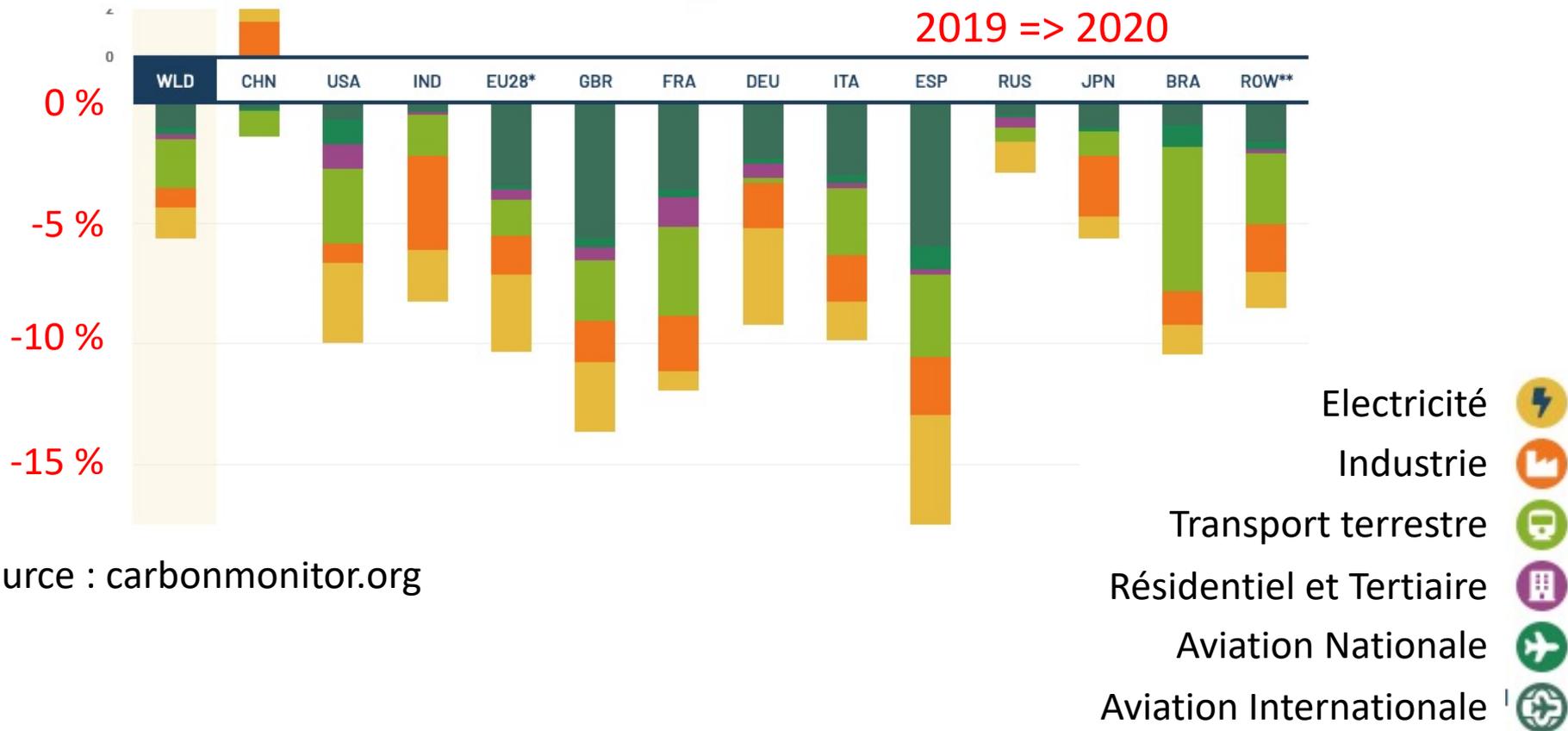
On peut aussi compter sur la **géo-ingénierie** pour limiter le réchauffement

La contribution relative de ces différents leviers relève de choix politiques. La science est muette pour arbitrer entre un scénario de type NegaWatt (forte sobriété) ou une transition massive vers une électricité nucléaire.

## CO<sub>2</sub> EMISSIONS VARIATION (%)

January 1<sup>st</sup> → December 31<sup>st</sup>, 2020 vs January 1<sup>st</sup> → December 31<sup>st</sup>, 2019

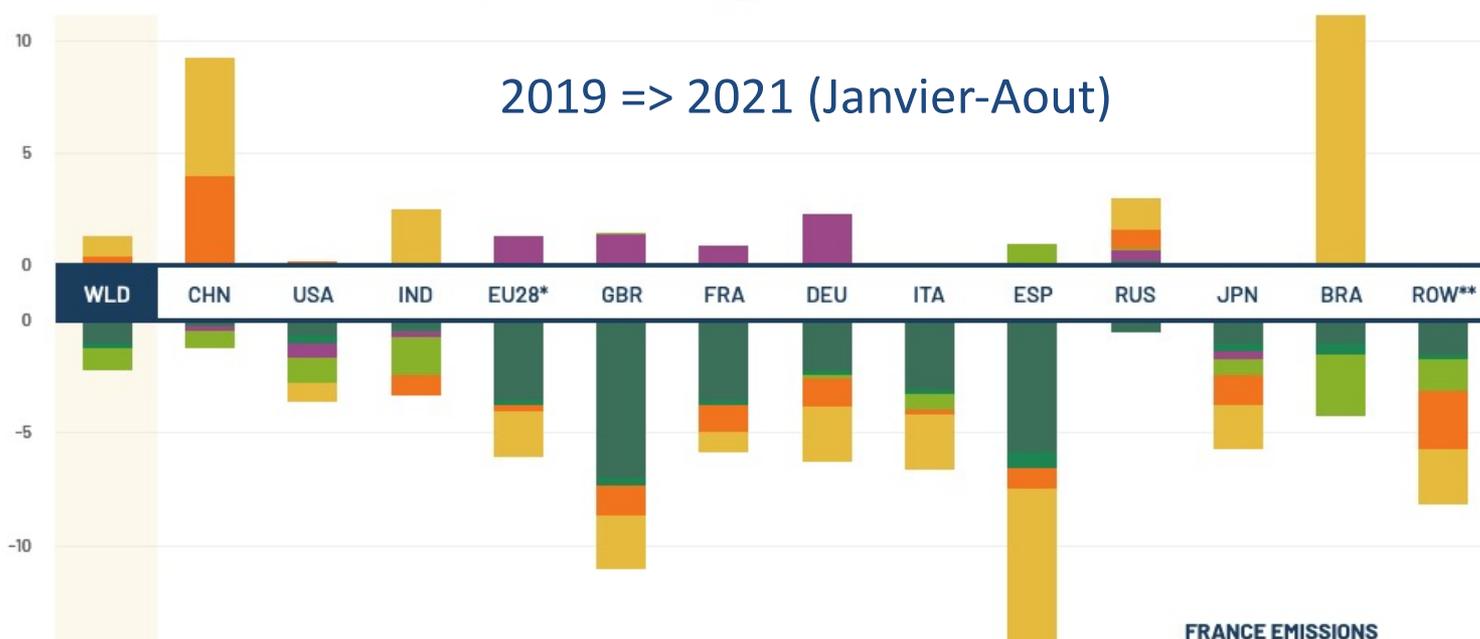
2019 => 2020



Source : carbonmonitor.org

Entre 2019 et 2020, les émissions mondiales ont diminué de ≈5,5%  
 Réduction des transports terrestres était la première cause  
 Variable suivant les pays. Notez la contribution de l'aviation dans les pays occidentaux

January 1<sup>st</sup> → August 31<sup>st</sup>, 2021 vs January 1<sup>st</sup> → August 31<sup>st</sup>, 2019



### WORLD EMISSIONS

Jan 1<sup>st</sup> → Aug 31<sup>st</sup>, 2021 / Jan 1<sup>st</sup> → Aug 31<sup>st</sup>, 2019

All sectors	-1.0%	2.2%	(-221.3 MtCO <sub>2</sub> )
Power	+0.9%	2.2%	(+201.7 MtCO <sub>2</sub> )
Industry	+0.4%	1.3%	(+82.5 MtCO <sub>2</sub> )
Ground Transport	-1.0%	-5.4%	(-232.6 MtCO <sub>2</sub> )
Residential	+0.0%	-0.3%	(-6.0 MtCO <sub>2</sub> )
Domestic Aviation	-0.2%	-15.3%	(-36.8 MtCO <sub>2</sub> )
International Aviation	-1.0%	-54.3%	(-230.1 MtCO <sub>2</sub> )

### FRANCE EMISSIONS

Jan 1<sup>st</sup> → Aug 31<sup>st</sup>, 2021 / Jan 1<sup>st</sup> → Aug 31<sup>st</sup>, 2019

All sectors	-4.8%	-9.6%	(-9.8 MtCO <sub>2</sub> )
Power	-0.9%	-9.6%	(-1.7 MtCO <sub>2</sub> )
Industry	-1.2%	-6.0%	(-2.5 MtCO <sub>2</sub> )
Ground Transport	+0.0%	0.1%	(+0.1 MtCO <sub>2</sub> )
Residential	+0.9%	3.7%	(+1.9 MtCO <sub>2</sub> )
Domestic Aviation	-0.2%	-31.9%	(-0.5 MtCO <sub>2</sub> )
International Aviation	-3.5%	-51.5%	(-7.0 MtCO <sub>2</sub> )

Diminution de ≈1% en mondial

En France, la diminution 2019=>2021 est essentiellement liée au transport aérien international

Le changement climatique est bien là. Il a déjà des impacts sur le bien être, les infrastructures et les écosystèmes

Il est clair que les impacts du changement climatique vont aller en s'amplifiant, avec l'augmentation des températures. La production agricole sera impactée avec des conséquences graves si des mesures compensatoires ne sont pas prises

limiter le réchauffement climatique à 1,5 degrés (1,1 aujourd'hui) est virtuellement hors de portée du fait de l'inertie sociétale

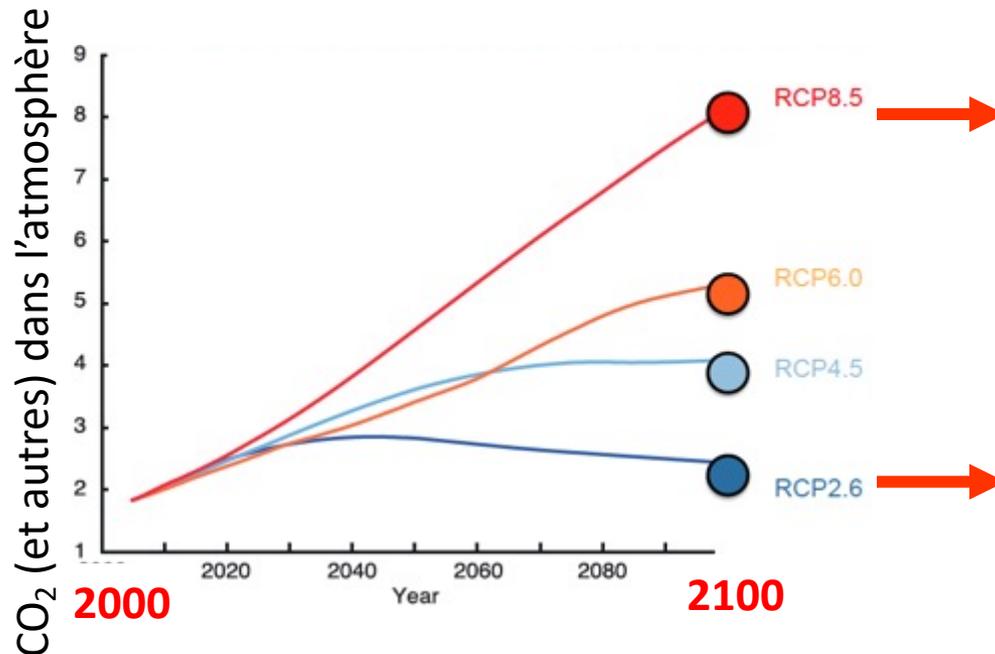
Certains impacts sont irréversibles et le niveau des mers va même s'élever pendant plusieurs siècles quelque soient les mesures prises

D'autres impacts peuvent être limités si des mesures adéquates sont prises

Lutter (ou non) contre le changement climatique, et surtout les mesures à adopter (sobriété, efficacité, électrification, géo-ingénierie...) relèvent de choix politiques, et un arbitrage entre différentes contraintes

FIN

- Aussi appelée géo-ingénierie du climat
- **L'ingénierie climatique planétaire** désigne toute technique de **manipulation délibérée** et **à grande échelle** de l'environnement dont le but est de **contrecarrer le changement climatique ou ses impacts**
- Définition restant ambiguë et mélangeant des propositions très diverses, ce qui complique le débat.



Plusieurs futurs possibles

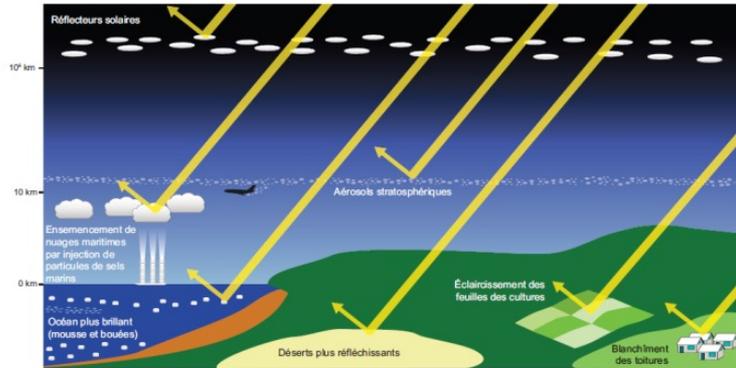
Besoin fort d'adaptation.  
Tentation de refroidir la planète artificiellement pour réduire les impacts du changement climatique

Besoin complémentaire de techniques de captage du CO<sub>2</sub> atmosphérique pour réduire les concentrations atmosphériques (émissions négatives)

## S'attaquer aux symptômes

Diminuer le rayonnement solaire incident.

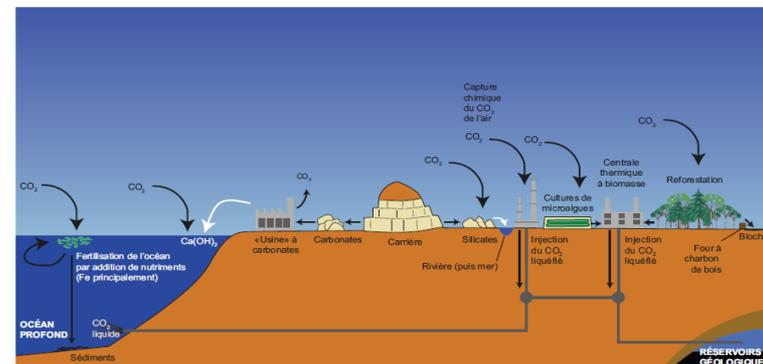
Méthodes « rapides », mais aucun effet sur l'acidification des océans

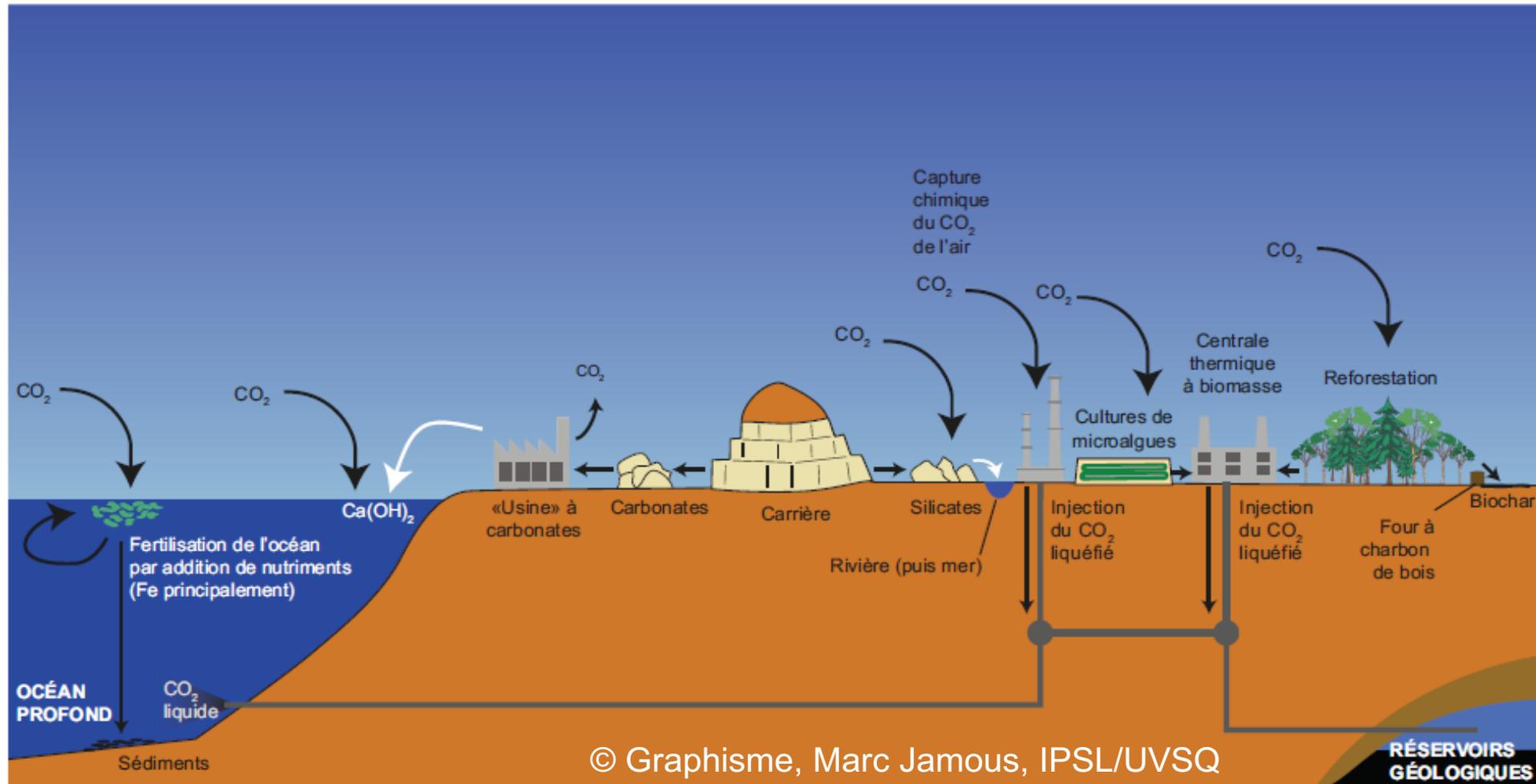


## S'attaquer aux causes

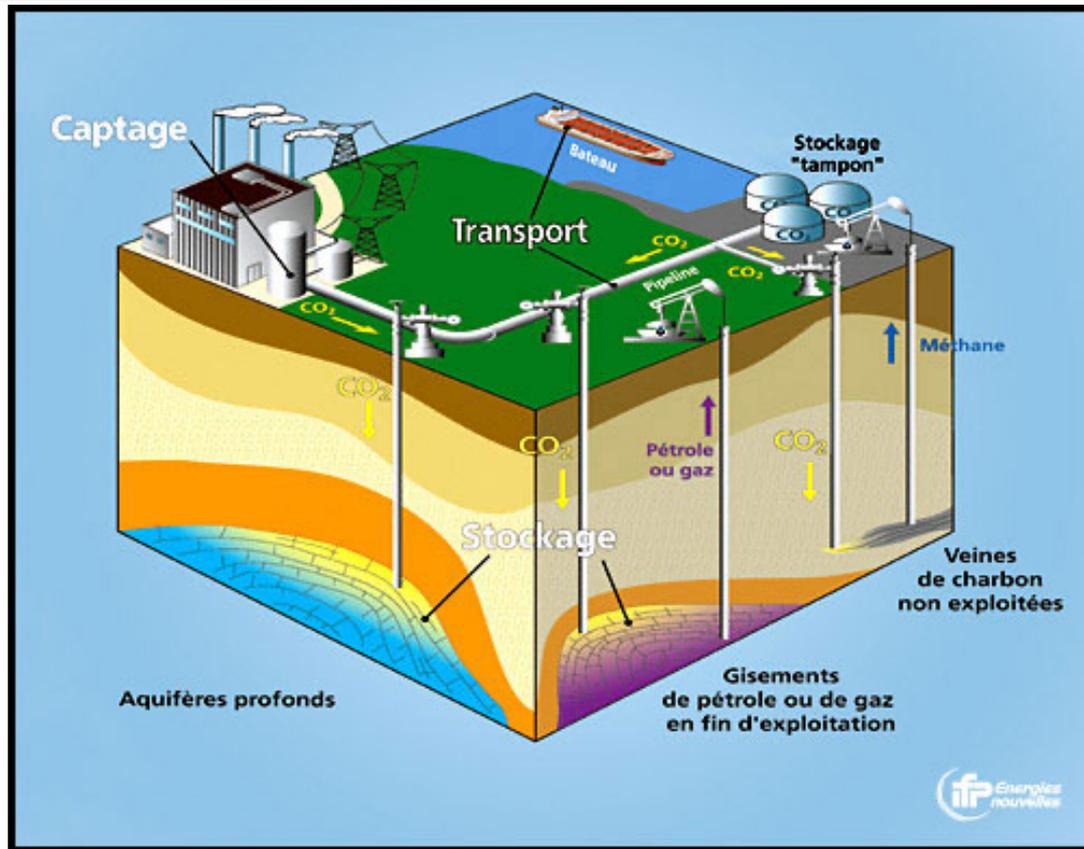
Augmenter l'absorption du CO<sub>2</sub> atmosphérique

Méthodes « lentes », besoin de nombreuses décennies pour extraire une quantité significative de CO<sub>2</sub>





Il existe de nombreuses méthodes potentielles pour capter le CO<sub>2</sub>, en stimulant les processus naturels, par des méthodes entièrement artificielles, ou en sortie des usines



Captage et stockage du CO<sub>2</sub> en sortie de centrale.

Technologiquement possible, mais

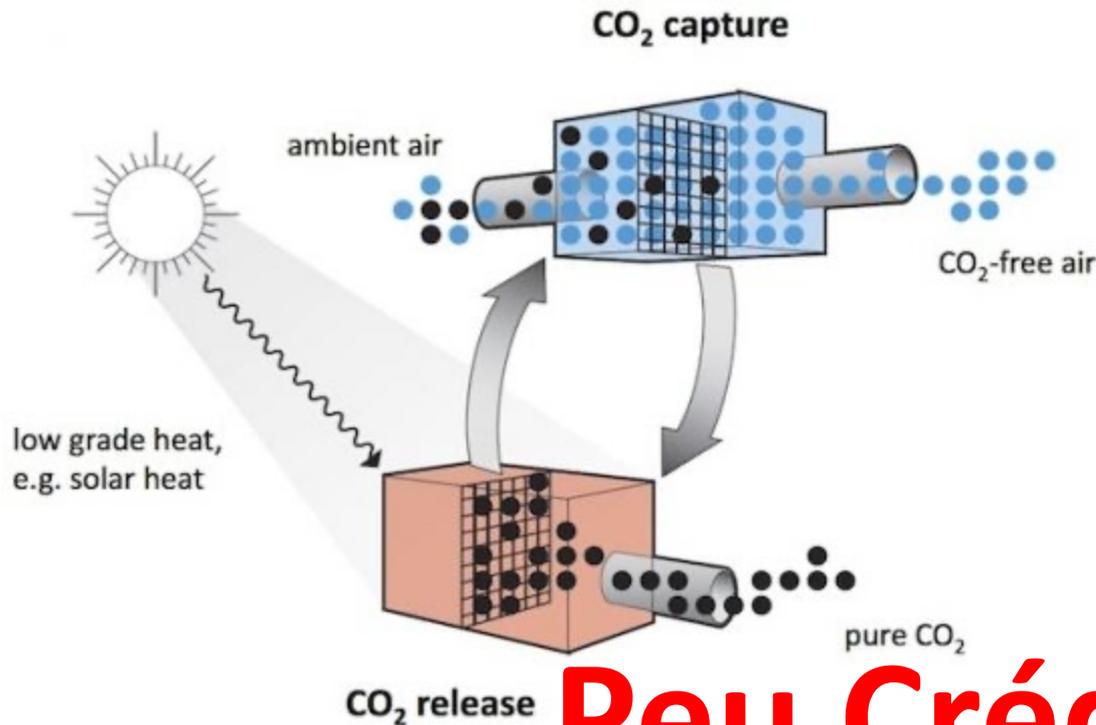
- coûteux en énergie (+20% pour une centrale)
- incertitude sur le potentiel et la pérennité du stockage

Planter une forêt est, potentiellement, un moyen efficace de stocker du Carbone. Mais

- Conflit d'usage des sols (agriculture)
- Stockage uniquement pendant la phase de croissance
- Il faut conserver la forêt sur le très long terme
- Potentiel limité



Adsorption sur des solides, absorption par des solutions plus ou moins alcalines (CaO, NaOH, ...), avec ou sans catalyseur...

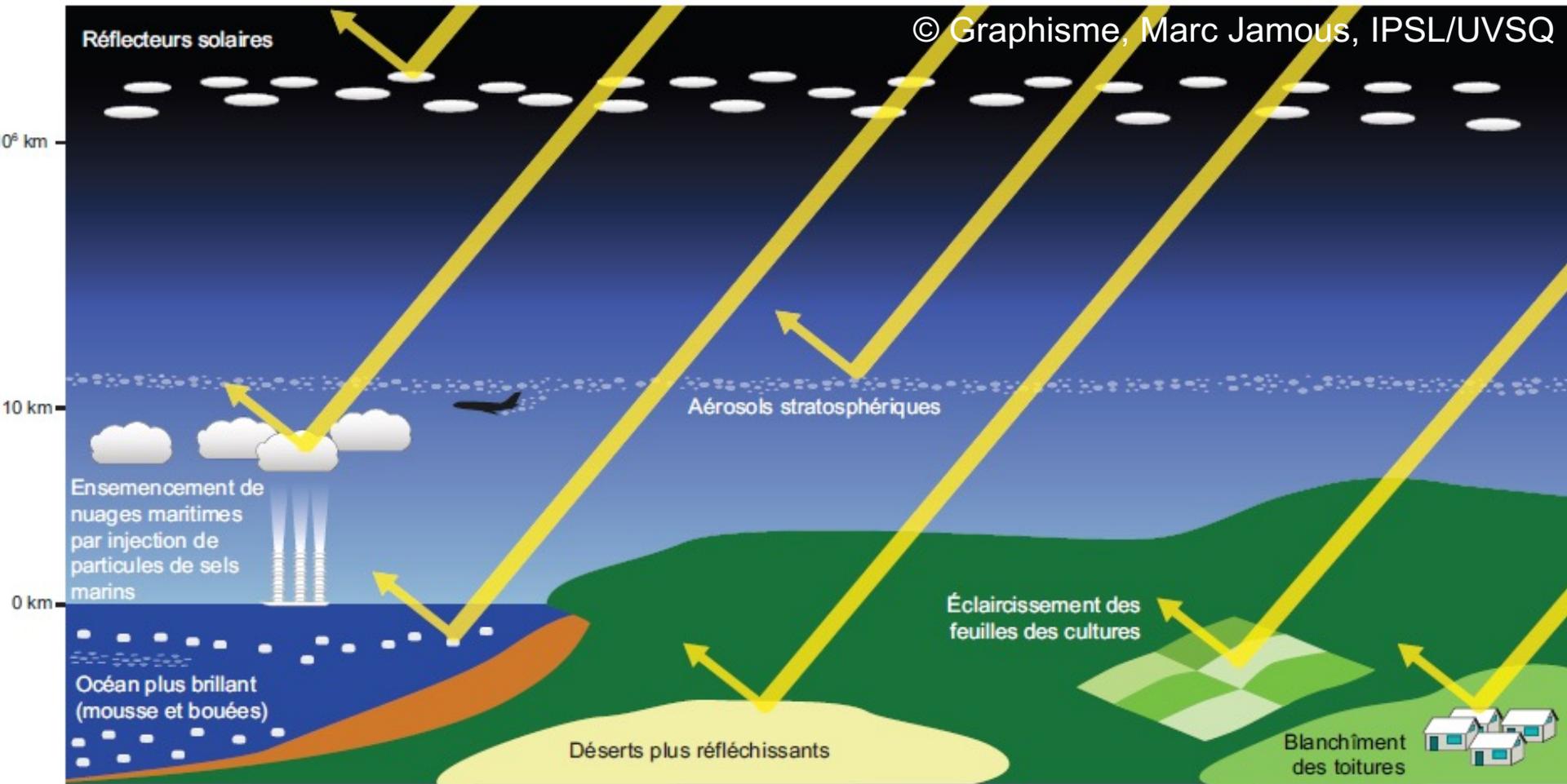


## Peu Crédible

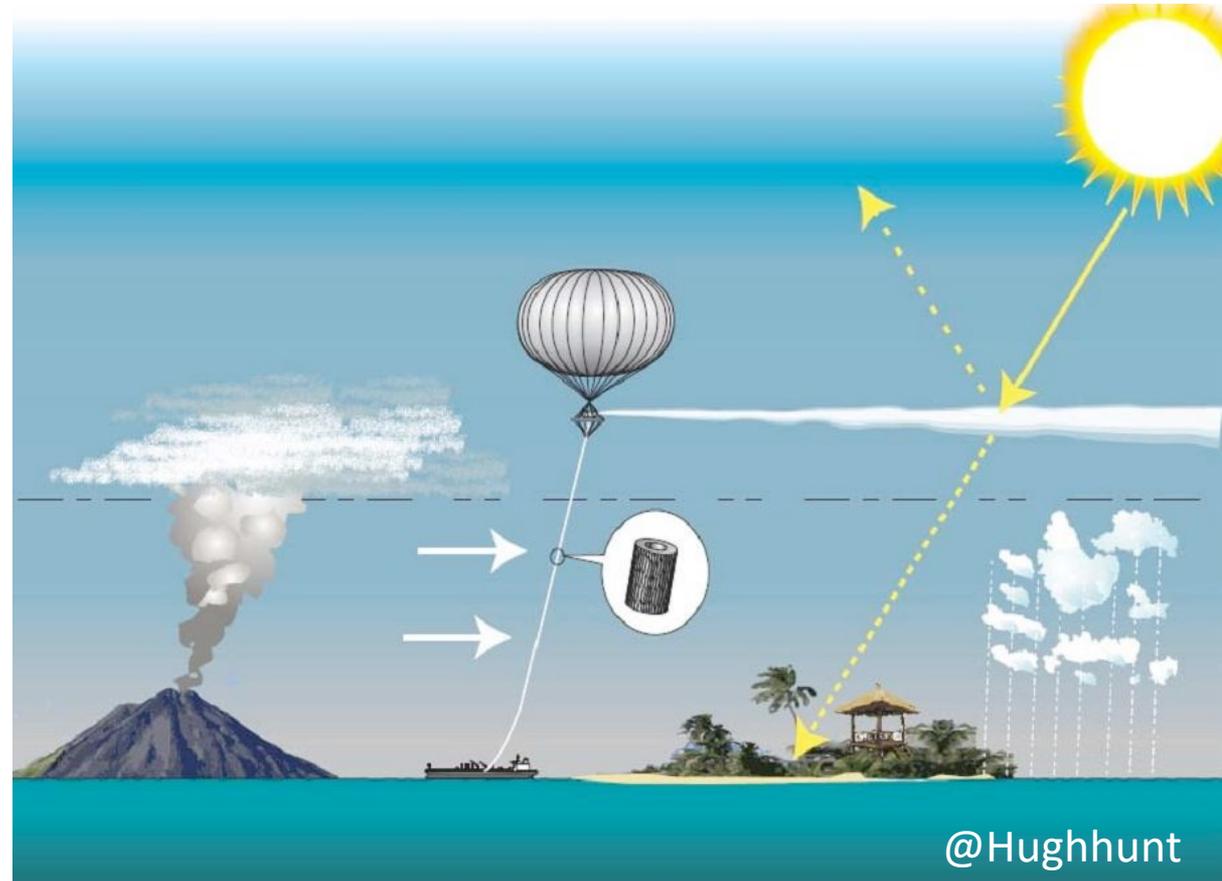
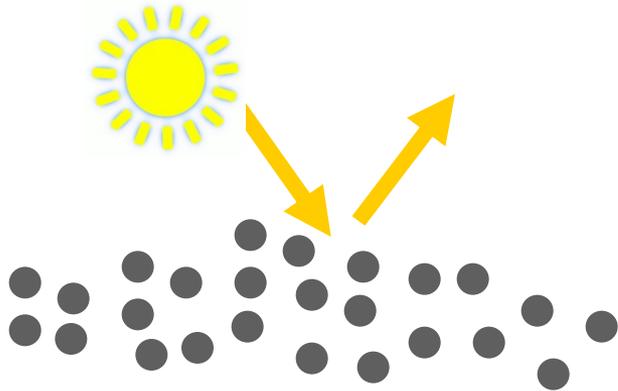
Faibles concentrations => Coût énergétique important

Energie minimale ~22 kJ / mol CO<sub>2</sub> capté. Pour le moment: ~500 kJ / mol CO<sub>2</sub>

Supprimer 1 Wm<sup>-2</sup> de forçage radiatif nécessiterait une quantité d'énergie correspondant à 10 années de notre consommation d'énergie primaire.

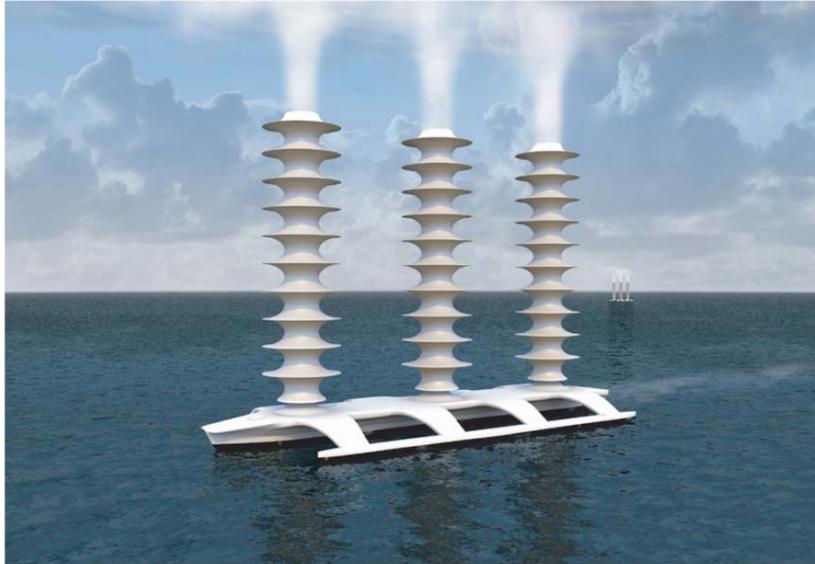


L'objectif est d'augmenter la capacité de la Terre à renvoyer le rayonnement solaire vers l'espace (effet Parasol) en modifiant l'atmosphère, les nuages, ou les surfaces

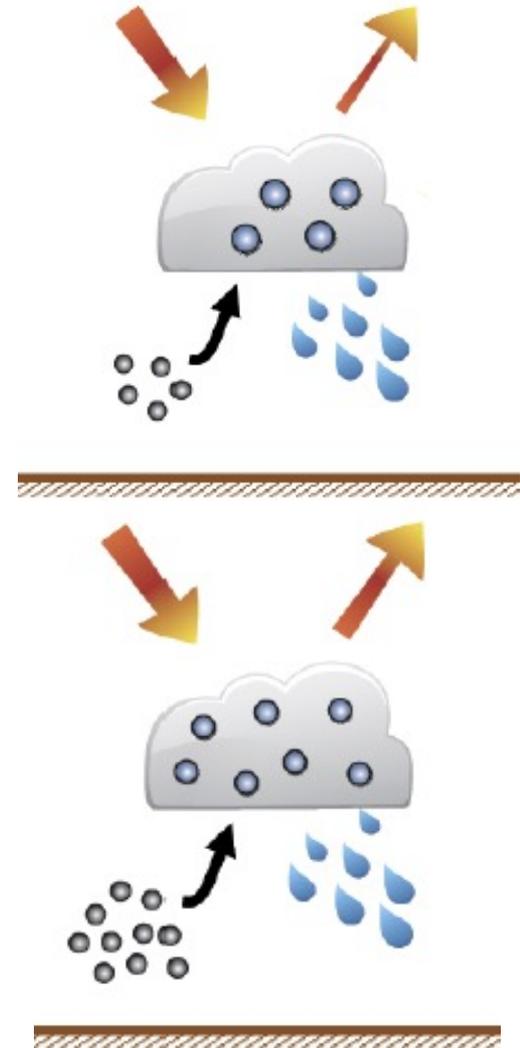


@Hughhunt

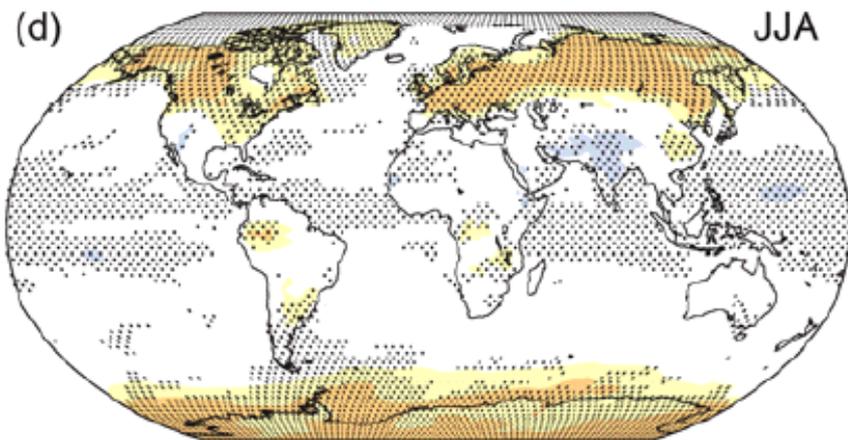
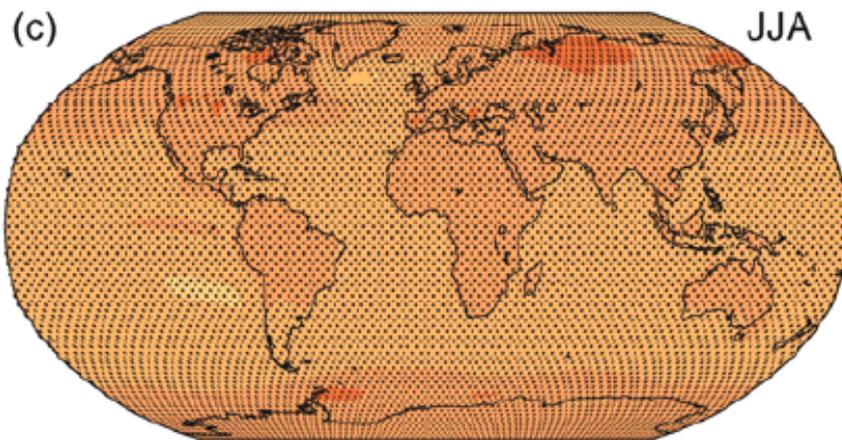
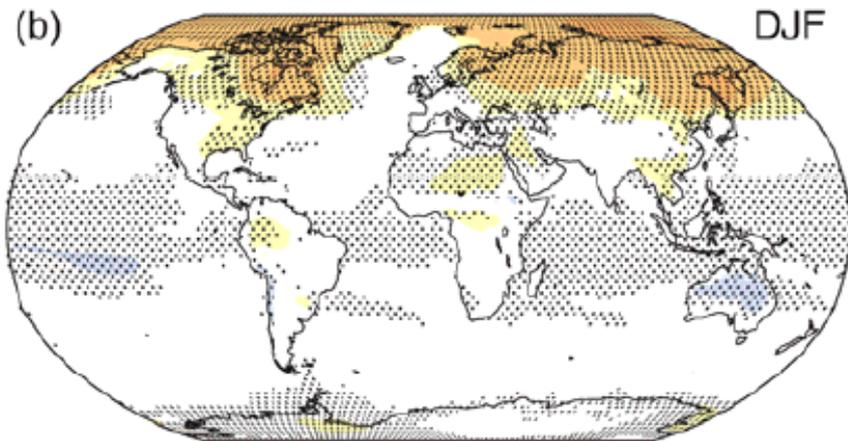
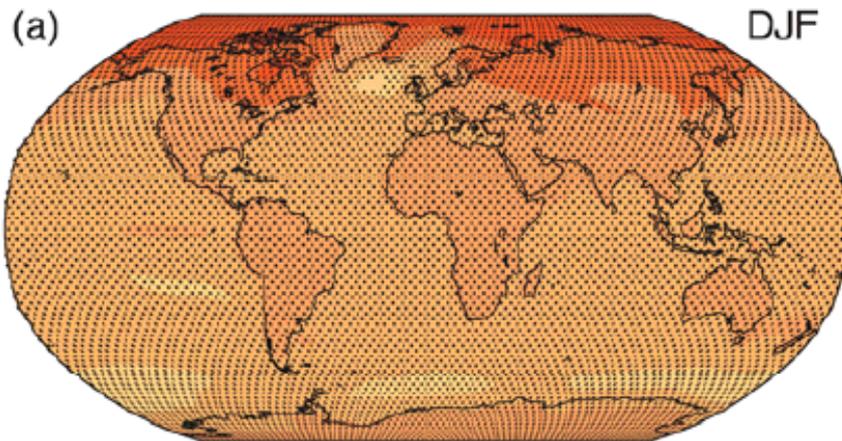
- La technique proposée consisterait à injecter du  $\text{SO}_2$  dans la basse stratosphère
- Les éruptions volcaniques fournissent un analogue naturel (par exemple le Pinatubo en 1991)
- L'injection doit être continue. Elle refroidirait la planète mais induirait aussi des effets collatéraux (précipitation)



- La pulvérisation d'eau de mer augmenterait la concentrations de particules de sels marins qui modifieraient la structure des nuages
- L'effet de la pollution ambiante fournit un analogue, mais montre aussi la difficulté de la méthode puisque ce phénomène reste très mal compris
- Les aspects technologiques ne sont pas maîtrisés



4xCO<sub>2</sub>

 4xCO<sub>2</sub> + ingénierie du climat


(°C)

16.0

8.0

4.0

2.0

1.0

0.5

-0.5

-1.0

-2.0

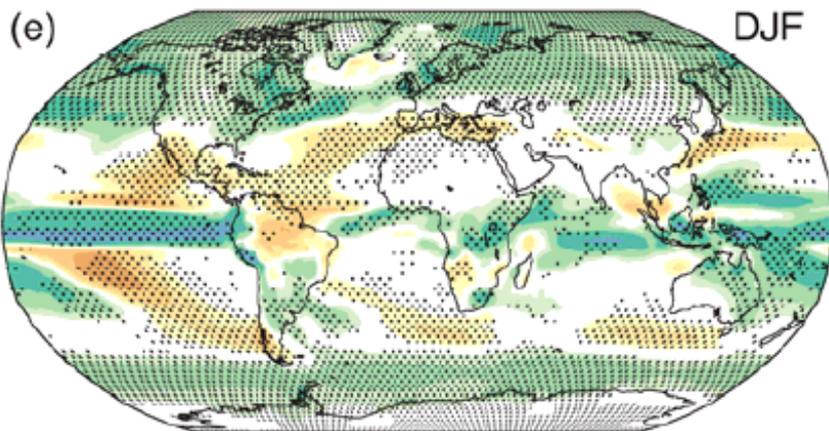
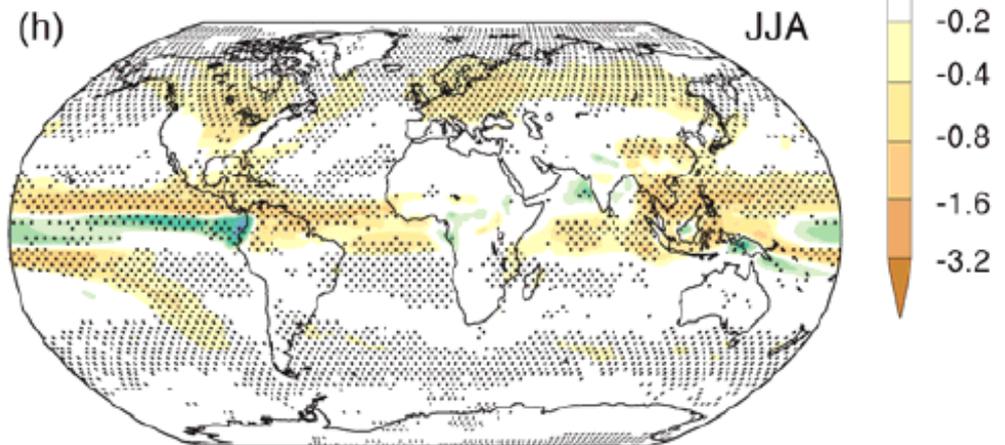
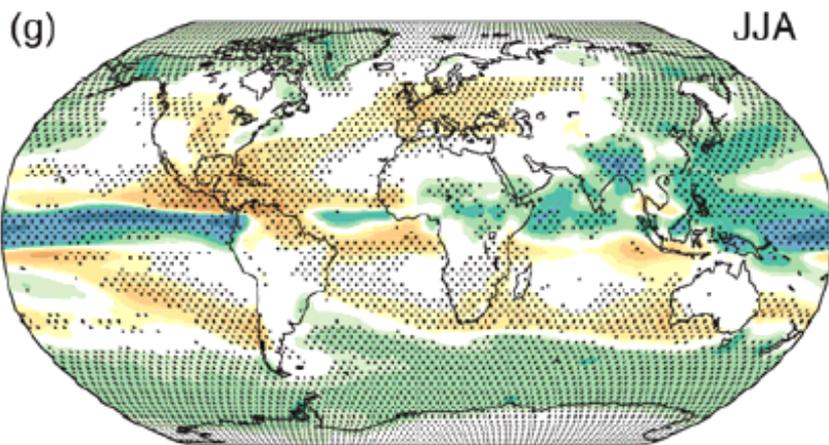
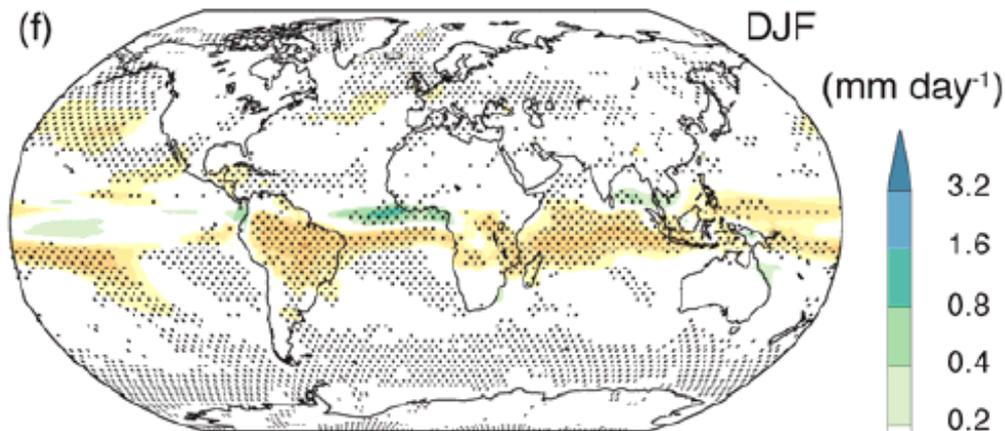
-4.0

-8.0

-16.0

Expériences de modélisation avec (très) forte hausse du CO<sub>2</sub> et géo-ingénierie. Permet de stabiliser la température, sauf aux moyennes/hautes latitudes

Source: Kravitz, ..., Boucher, et al. JGR 2013a

4xCO<sub>2</sub>

 4xCO<sub>2</sub> + ingénierie du climat

 (mm day<sup>-1</sup>)

3.2

1.6

0.8

0.4

0.2

-0.2

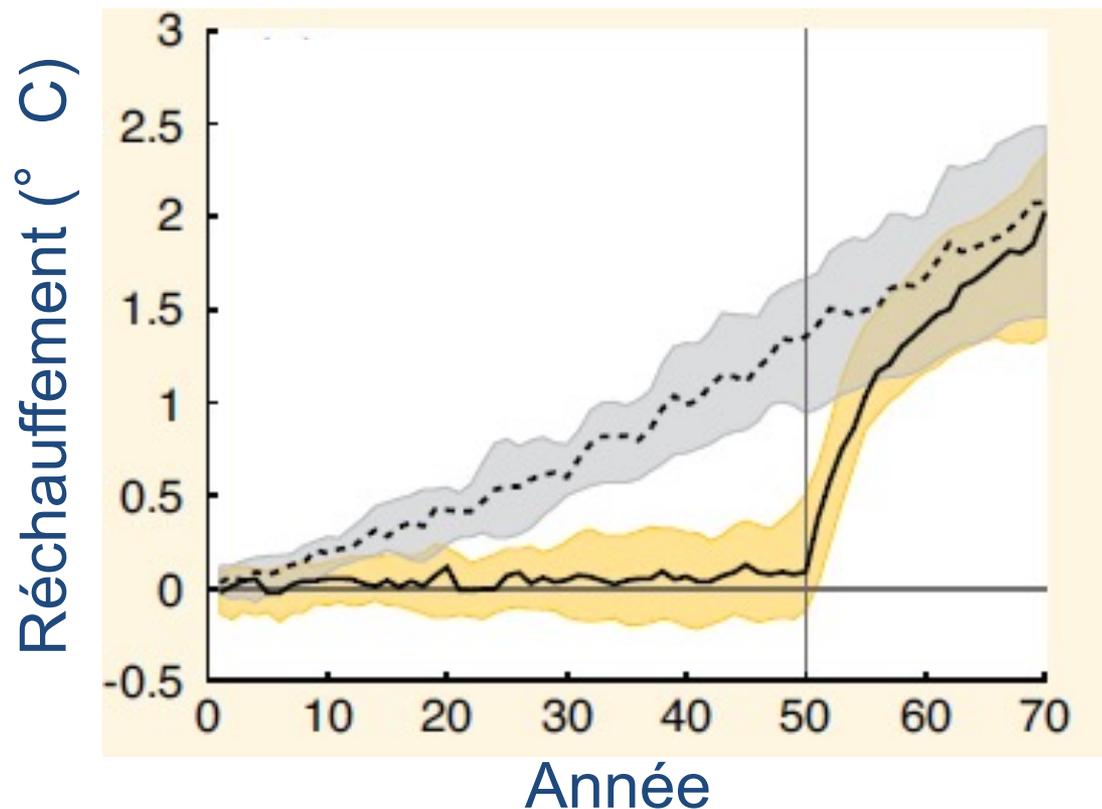
-0.4

-0.8

-1.6

-3.2

MAIS, il y a aussi un **fort impact, non désiré**, sur les précipitations. La stabilisation des températures n'est pas le seul paramètre important



Le procédé doit être maintenu de manière permanente...

L'interruption d'une technique de gestion du rayonnement solaire alors que les concentrations de gaz à effet de serre sont élevées entraînera un rattrapage climatique rapide.

## Les techniques de captage du CO<sub>2</sub> atmosphérique

- couvrent un large spectre (échelles, impacts, risques)
- sont (très) longues à agir ou ont un potentiel limité par des contraintes physiques ou économiques fortes

Certaines peuvent peut-être « servir d'appoint » aux autres technologies et sont à étudier

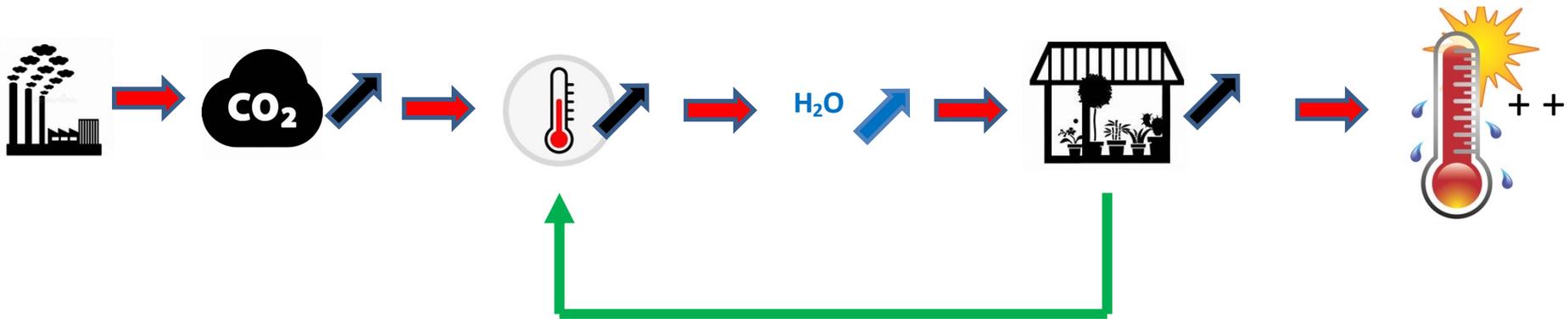
## Les techniques de gestion du rayonnement solaire

- permettent un refroidissement rapide et substantiel
- modifient le climat régional (précipitations)
- sont réversibles mais doivent être maintenues (très) longtemps
- introduisent un risque énorme si interrompues
- ne résolvent pas le problème d'acidification des océans

# Planches supplémentaires

Tout excès de vapeur d'eau est éliminé par précipitation => Les émissions de vapeur d'eau n'ont pas d'impact significative sur la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère

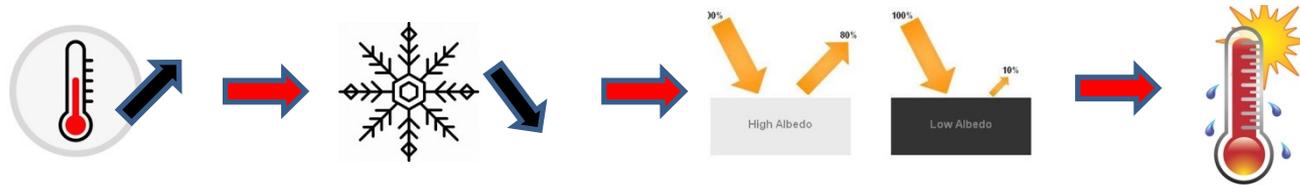
La capacité de l'air à contenir de la vapeur d'eau dépend fortement de la Température



La vapeur d'eau est donc le vecteur d'une "rétroaction positive". Elle amplifie l'effet du  $CO_2$  sur la température de la Terre d'un facteur 2 à 3

## Neige / Glace :

La neige réfléchit les rayons du soleil



**Nuages.** Ils ont un effet d'albédo ET un effet de serre

Le premier refroidit

Le second réchauffe

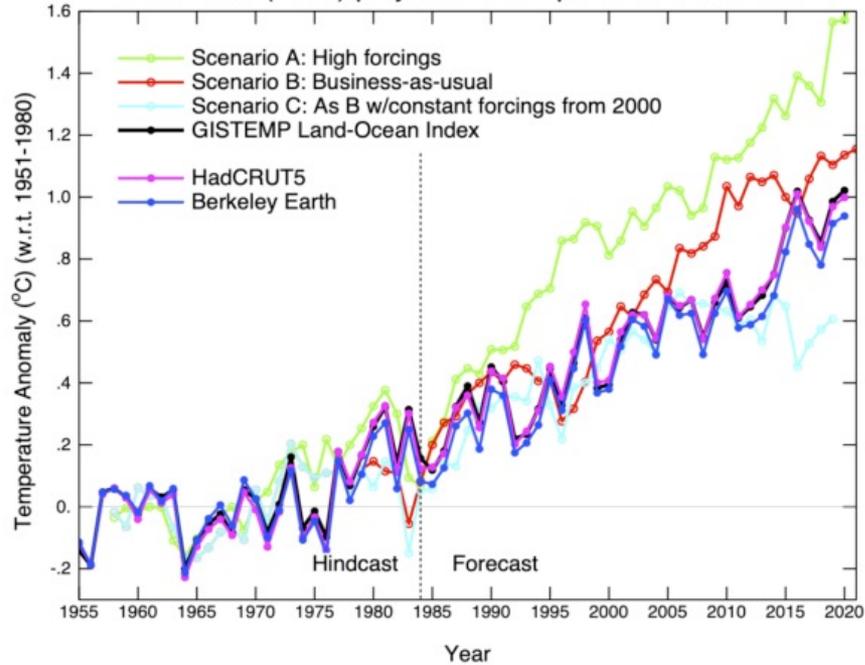
Dans un climat + chaud, y a t-il plus ou moins de nuages, plus de nuages bas ou plus de nuages élevés ?

## Cycle du Carbone

Aujourd'hui, la nature absorbe  $\approx$  la moitié des émissions de  $CO_2$ , limitant l'augmentation de l'effet de serre. Cette part va t-elle augmenter ou diminuer dans le futur

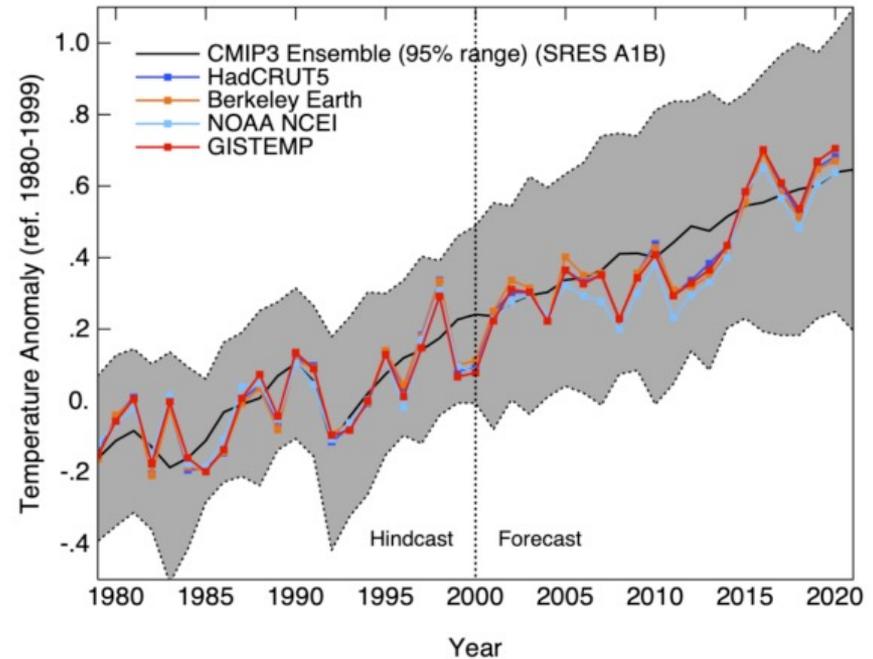
Ce sont là les causes principales des incertitudes sur le changement climatique

Hansen et al (1988) projections compared to Observations



Dés 1988, James Hansen (NASA GISS) réalise des projections de la température de surface avec 3 scénarios d'évolution des GES. Accord assez correct avec l'évolution constatée sur les 30 dernières années

How are climate model projections doing?



De même, les simulations réalisées en préparation au quatrième rapport du GIEC (début des années 2000) sont cohérentes à ce qui a été observé depuis