



Institut
**Pierre
Simon
Laplace**

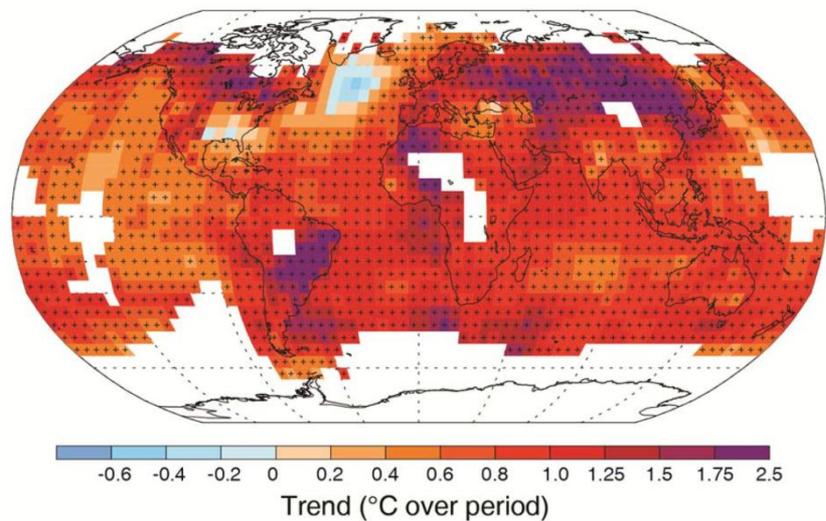


SCIENCES
SORBONNE
UNIVERSITÉ

La géo-ingénierie peut-elle sauver le climat ?

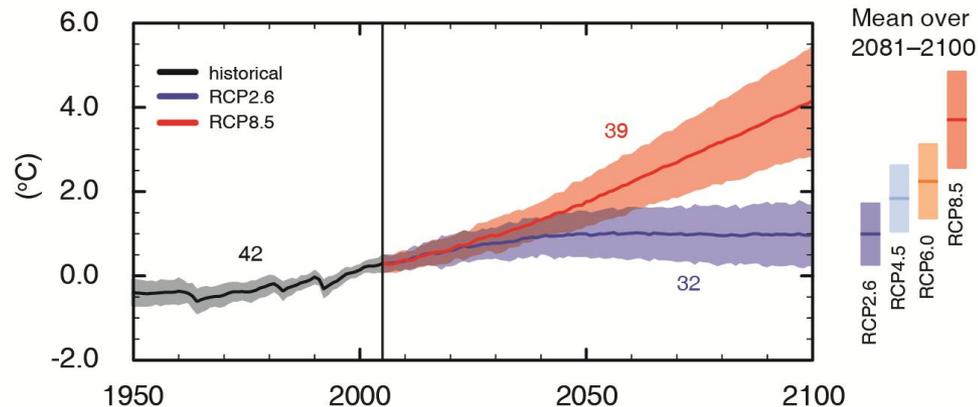
Olivier Boucher
Institut Pierre-Simon Laplace

SFP – 19 janvier 2018



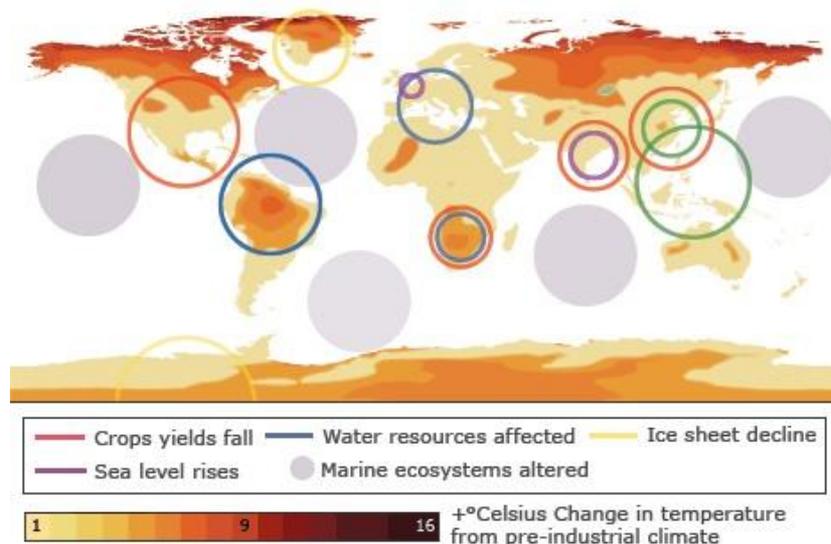
Le réchauffement concerne quasiment toutes les régions

(a) Global average surface temperature change



Le changement de la température moyenne du globe en surface pour la fin du XXI^e siècle dépassera +1.5 à +2°C par rapport à 1850-1900 pour tous les scénarios, sauf peut-être le RCP2.6

Impact of global temperature rise of 4C (7F)



Des impacts qui se manifestent déjà et vont s'accroître

Qu'est ce que la géo-ingénierie du climat aussi appelée ingénierie climatique planétaire ?

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**

Techniques de gestion du rayonnement solaire (*solar radiation management* ou *SRM*)

Miroir dans l'espace

Injection de SO₂ ou d'aérosols dans la stratosphère

Injection de sels marins dans la couche limite marine pour augmenter l'albédo des nuages

Augmentation artificielle de l'albédo des surfaces (cultures, bâtiments, désert, océan)

Captage du CO₂ atmosphérique (*carbon dioxide removal* ou *CDR*)

Séquestration dans la biosphère continentale

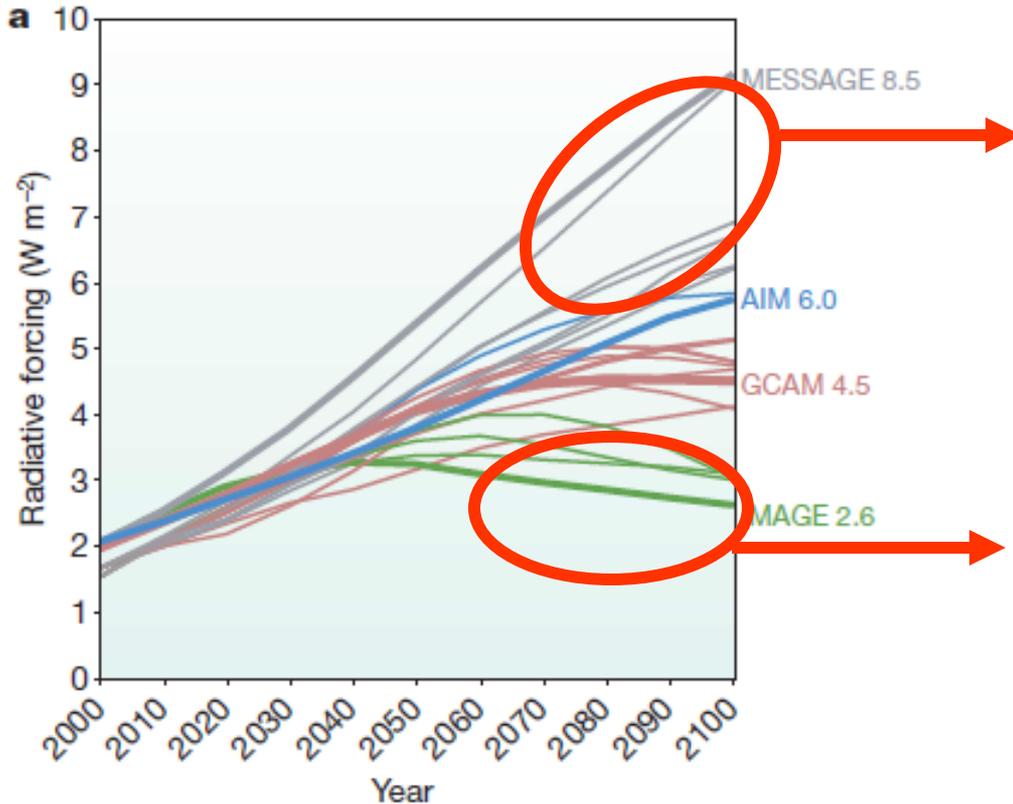
Bioénergie avec séquestration géologique du CO₂

Séquestration via la biosphère marine

Séquestration chimique dans l'océan

Captage chimique atmosphérique avec séquestration géologique

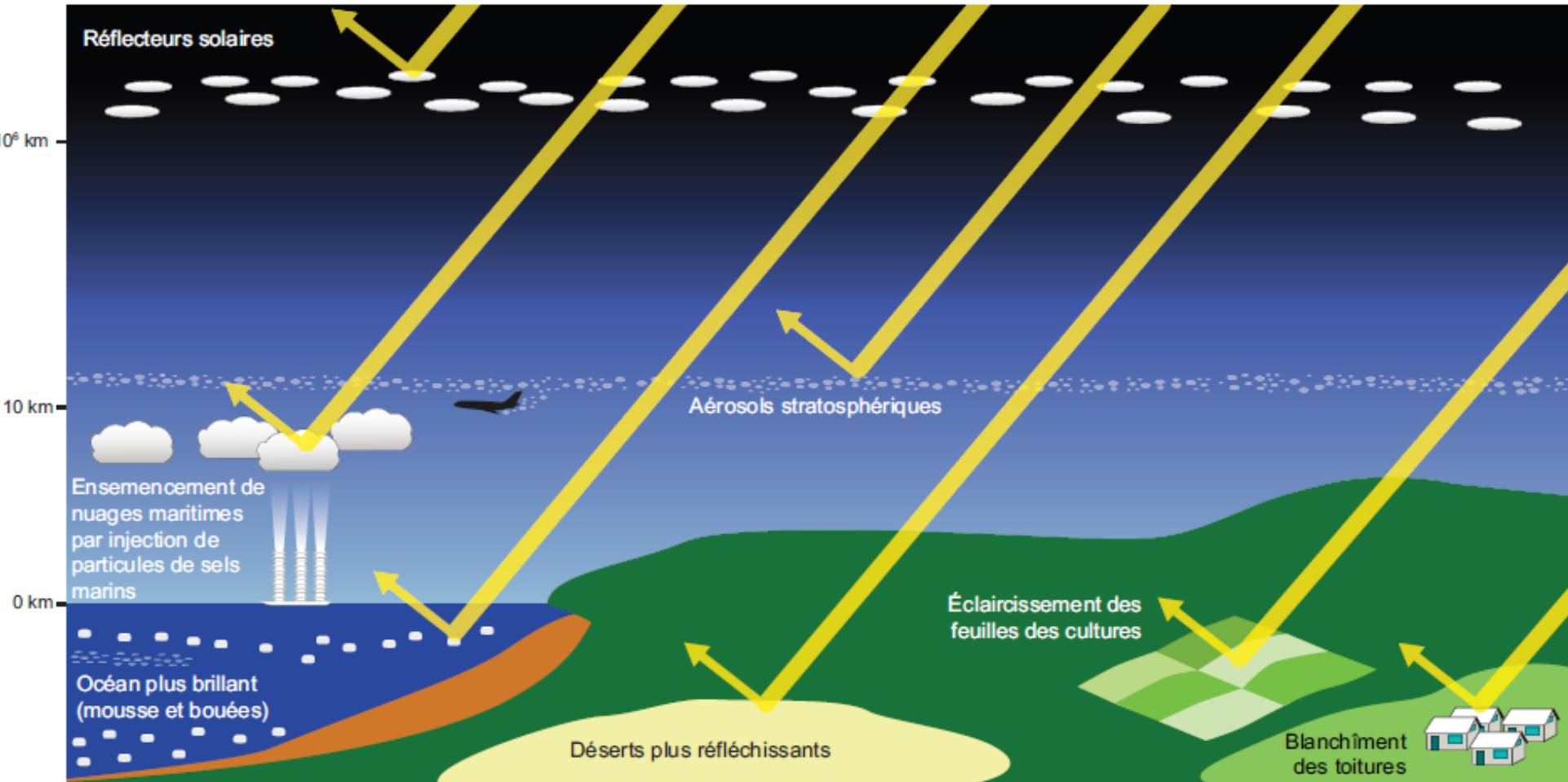
L'ingénierie du climat et les scénarios climatiques « classiques » dits RCP



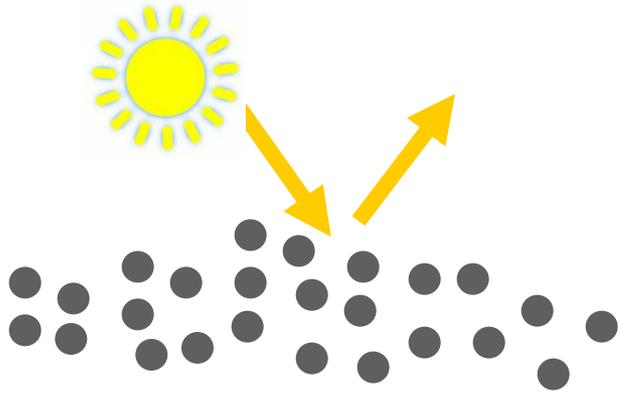
Besoin fort d'adaptation.
Tentation de développer
les techniques de gestion
de rayonnement solaire
pour réduire les impacts
du changement climatique

Techniques de captage du
CO₂ atmosphérique issu de
la combustion de la
biomasse (émissions
négatives)

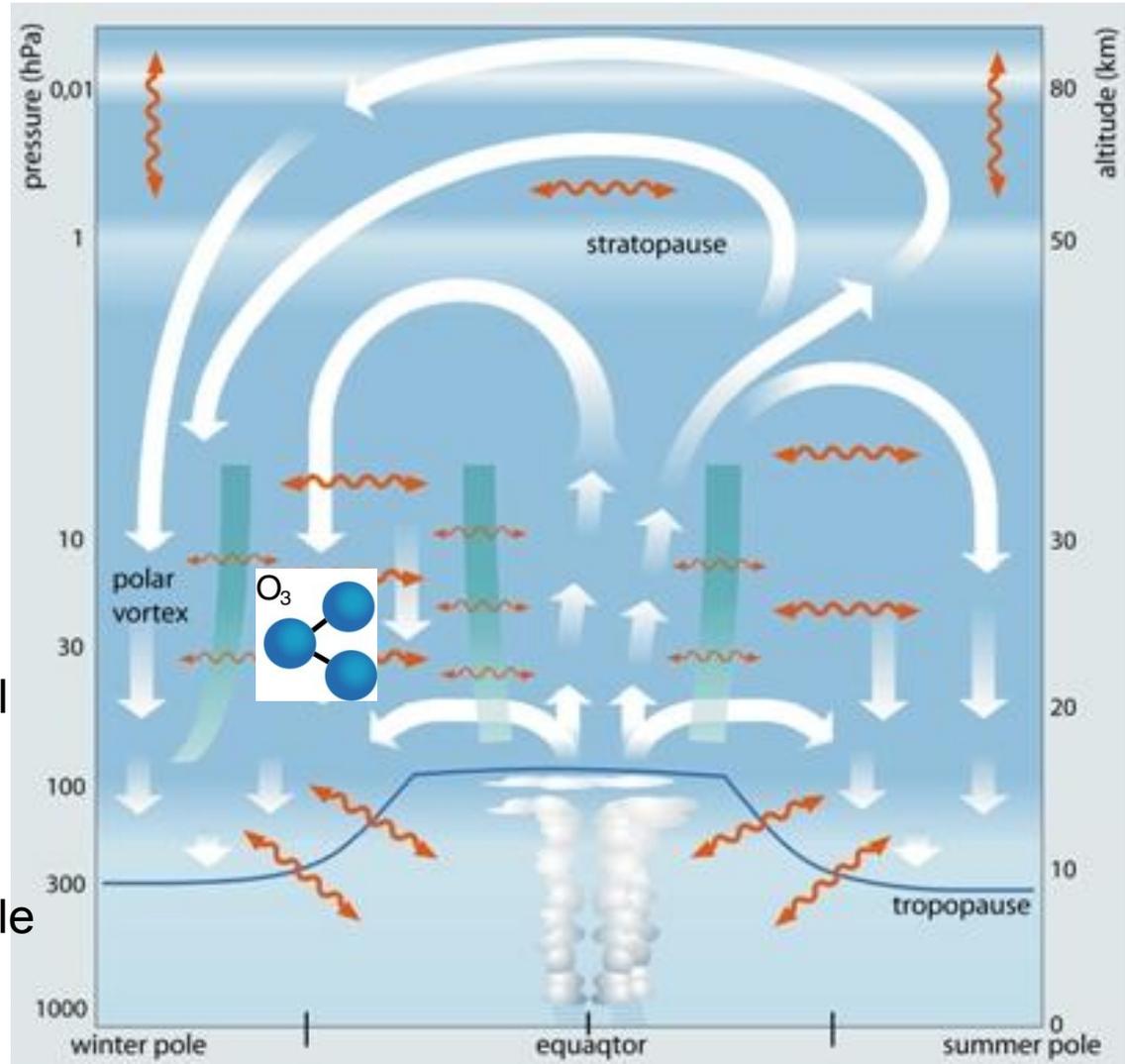
Gestion du rayonnement solaire



Premier exemple : injecter des particules dans la stratosphère



- La technique proposée consisterait à injecter du 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 (ozone, précipitation)



Effet de levier

aérosols stratosphériques

Energie minimum nécessaire pour lever 1 kg de S sur 20 km

$$E_i = m g \Delta z = 2 \cdot 10^5 \text{ J/kg} \quad (\text{majorant pris égal à } 10^7 \text{ J/kg})$$

Energie solaire perdue pour la planète

$$E_s = M_{\text{SO}_4} / M_S * ER_{\text{SO}_4} * \tau_{\text{SO}_4} = -10^{13} \text{ J/kg (minorant)}$$

$E_s / E_i > 10^6$ (minorant) \Rightarrow effet levier important

(combustion gaz-charbon $E_s/E_i=100-200$ en effet de serre)

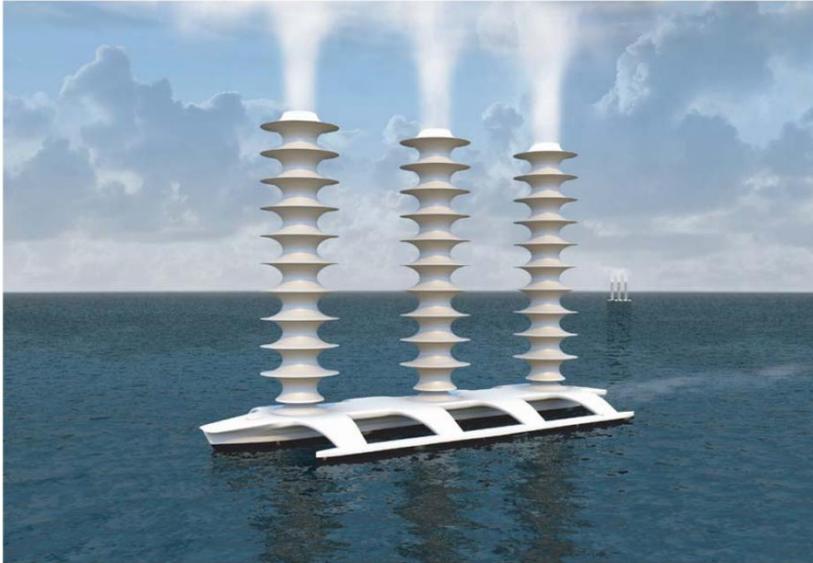
Puissance nécessaire pour maintenir un forçage de $\Delta F = -1 \text{ Wm}^{-2}$

$$P_i = E_i * \text{Flux}_S = E_i * \Delta F * S_T / E_s = 0,5 \text{ GW}$$

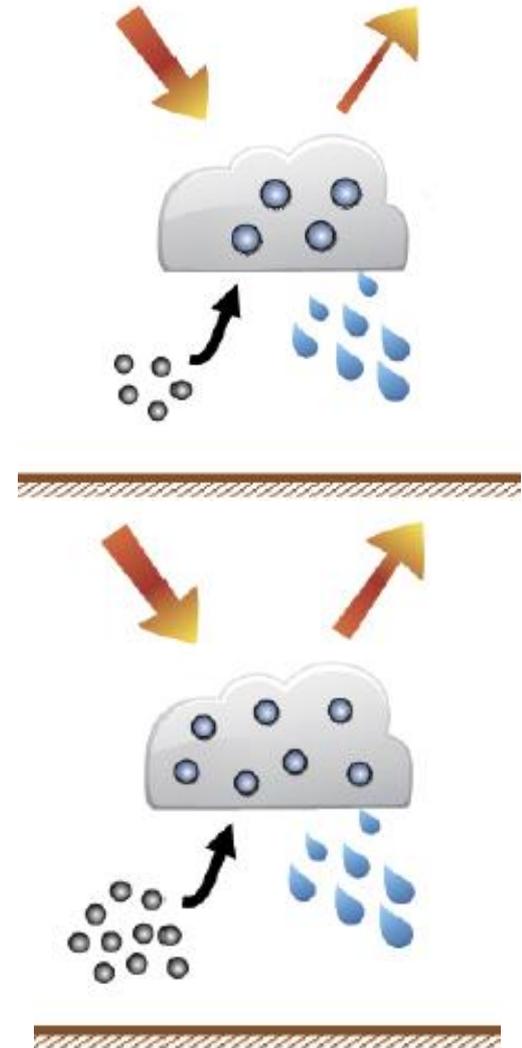
à comparer à l'énergie primaire mondiale consommée

$$P = 13000 \text{ Mtep/an} = 17000 \text{ GW}$$

Deuxième exemple: rendre les nuages maritimes plus réfléchissants



- 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



Effet de levier

aérosols de sels marins

Energie minimum nécessaire pour produire des sels marins

$$E_i = 3 \gamma / (\rho r) + 1/2 v^2 = 860 \text{ J/kg pour des particules de } 0,25 \mu\text{m}$$

$$E_i = 150 \text{ kW pour injecter } 30 \text{ kg s}^{-1} \text{ d'eau de mer, soit } 5 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$$

Energie solaire perdue pour la planète

$$E_s = M_{\text{sels}} / M_{\text{eau}} * \tau_{\text{sels}} * ER_{\text{sels}} = -10^9 \text{ J/kg}$$

$$E_s / E_i > 10^5 \text{ (minorant)} \Rightarrow \text{effet levier important}$$

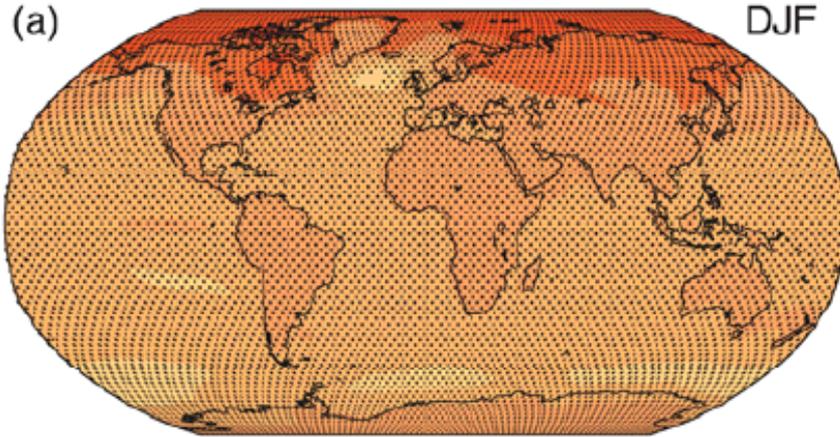
Energies renouvelables ?

Injection d'aérosols de sels marins de petite taille ?

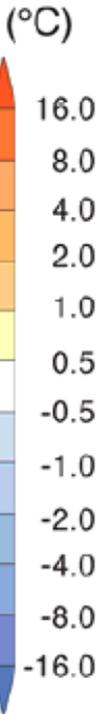
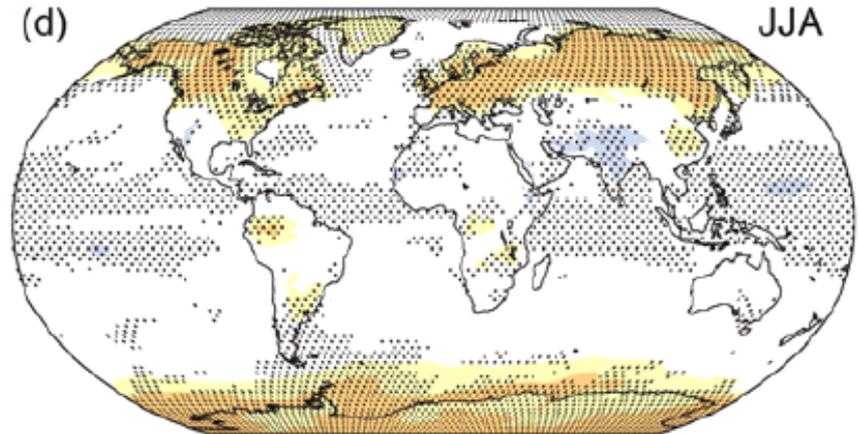
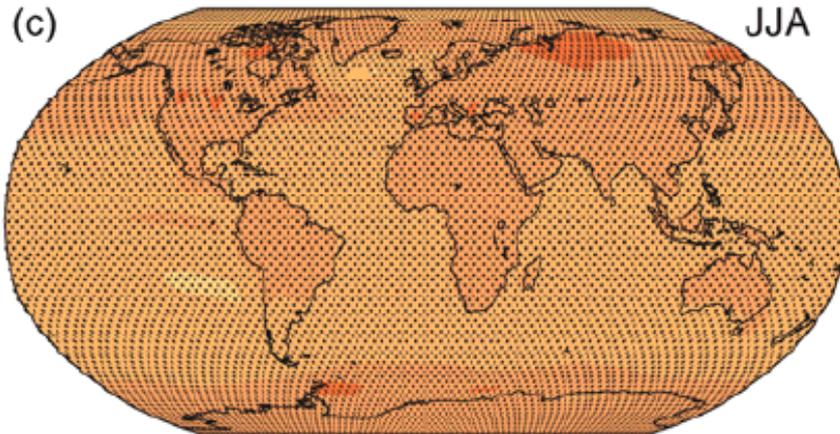
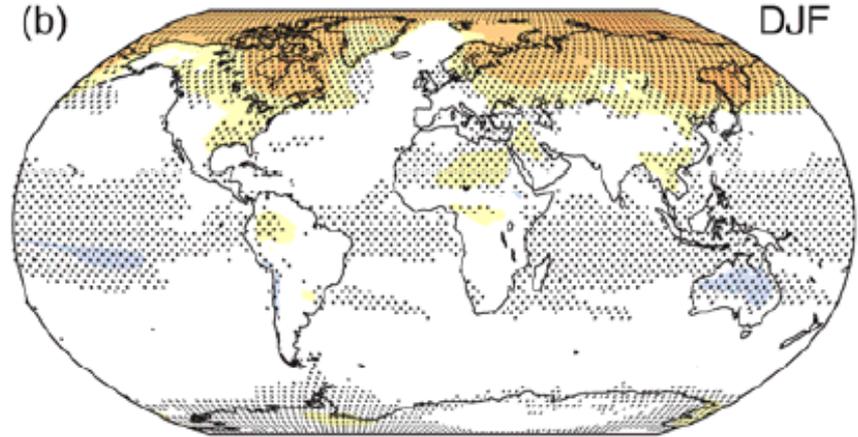
Interactions aérosols-nuages ?

Changement de température avec et sans ingénierie du climat

4xCO₂



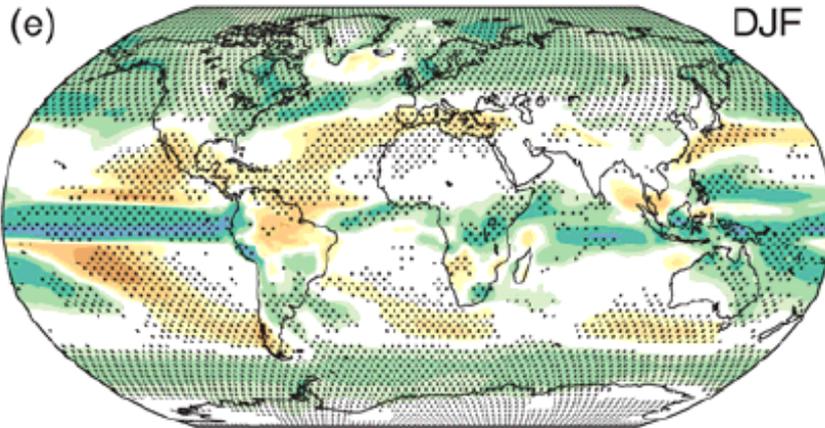
4xCO₂ + ingénierie du climat



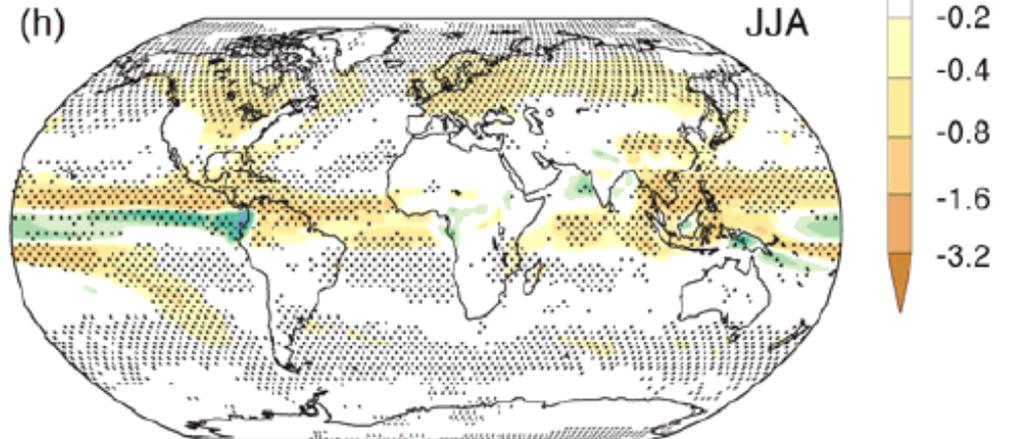
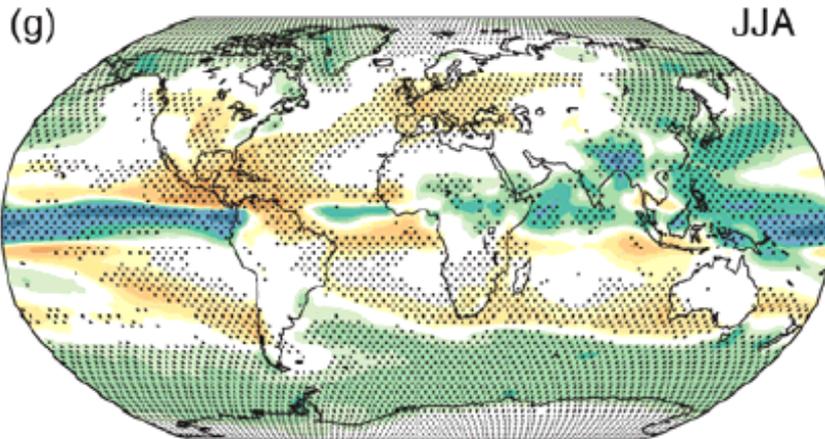
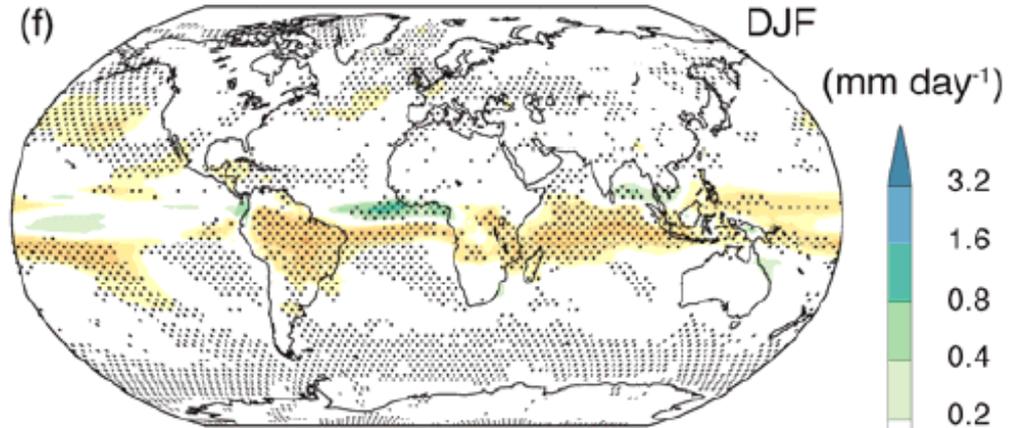
Source: Kravitz, ..., Boucher, et al. JGR 2013a

Changement de précipitations avec et sans ingénierie du climat

4xCO₂

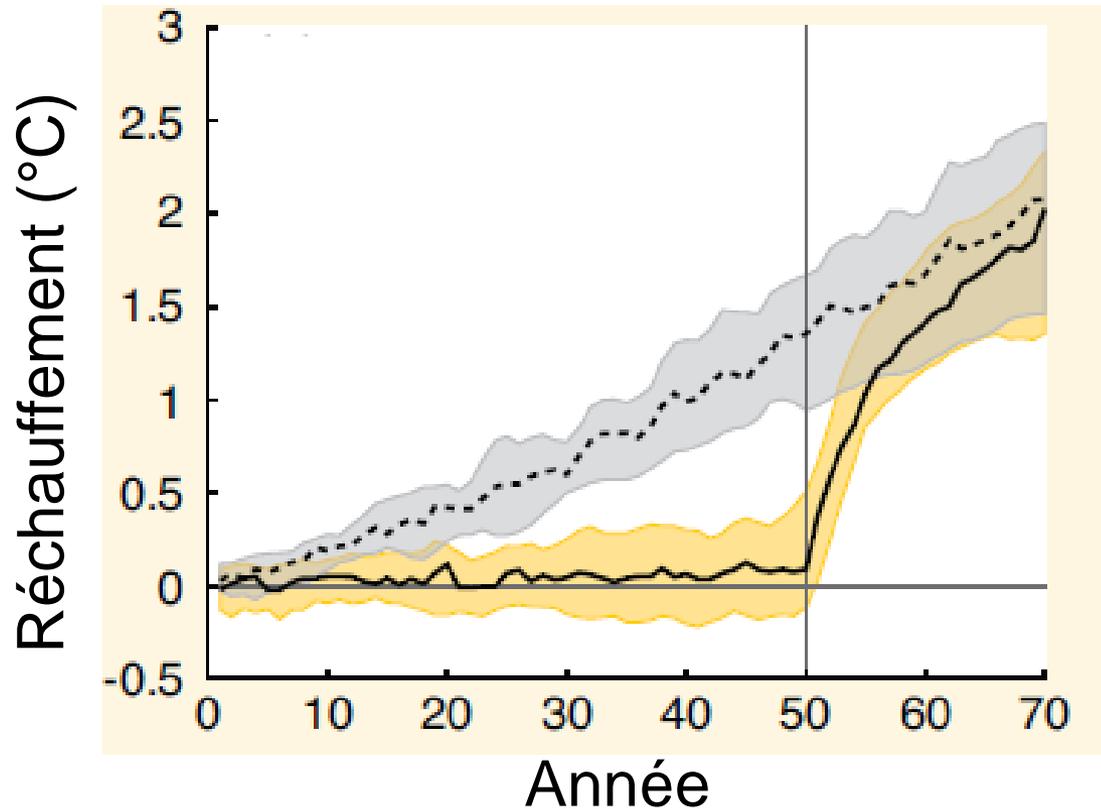


4xCO₂ + ingénierie du climat



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

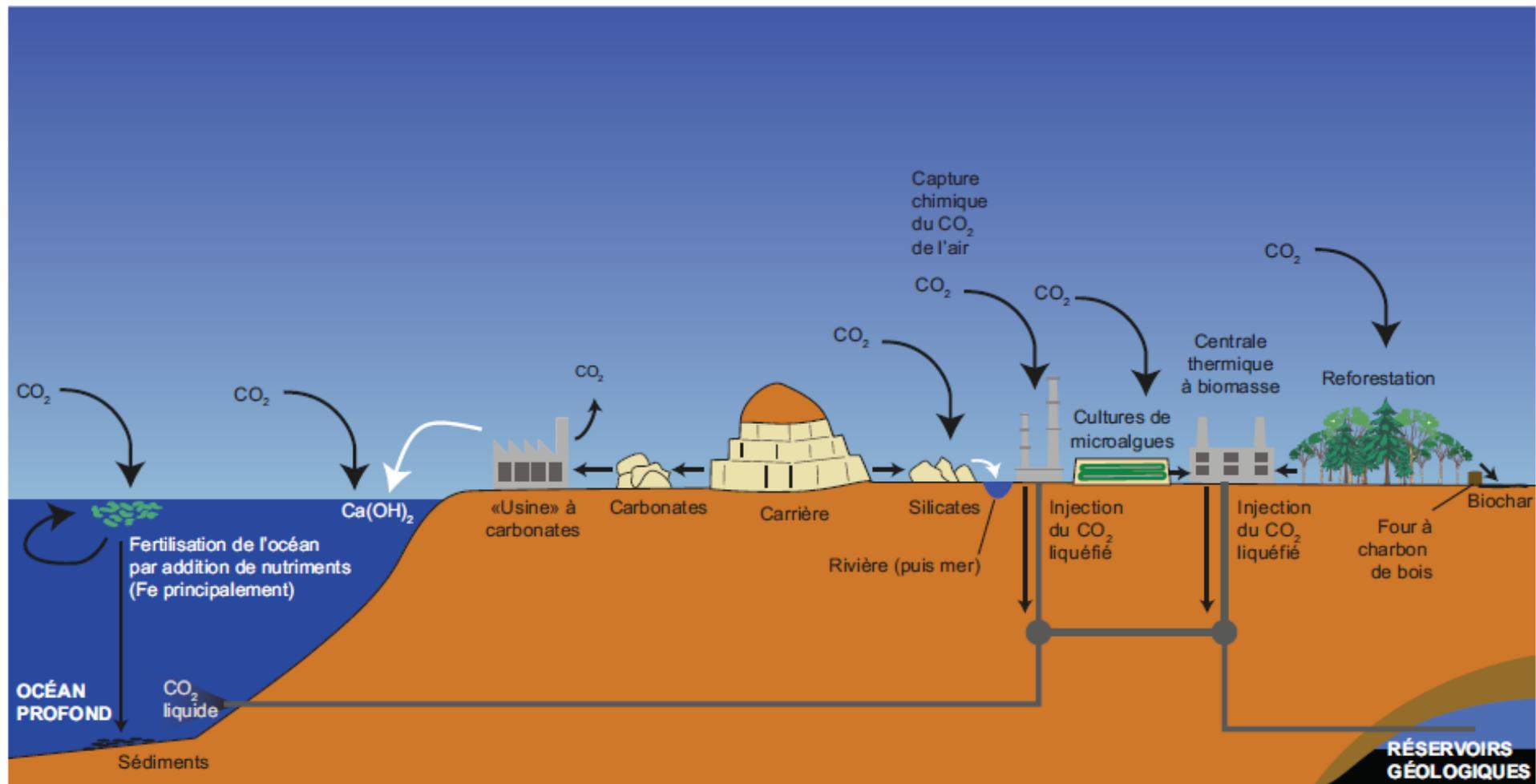
Problème de l'interruption du contrôle climatique



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 restent élevées entraînera un rattrapage climatique.

Captage du CO₂ atmosphérique



Capture atmosphérique du CO₂

Entropie du mélange de 2 gaz : $\Delta S = -n R (x_1 \ln x_1 + x_2 \ln x_2)$



Energie minimale pour séparer un gaz de fraction molaire x ($\ll 1$)

$$\Delta Q = R T / M * (1 + \ln 1/x)$$

$$\text{CO}_2 \quad x=380 \text{ ppmv} \quad \Delta Q = 0,49 \text{ MJ/kg} = 22 \text{ kJ/mol}$$

Il y a des limites sur le rendement (~30% ?) mais peut-être aussi la possibilité de “moissonner” des énergies renouvelables.

$$[\text{CH}_4 \quad x=1800 \text{ ppbv} \quad \Delta Q = 2,2 \text{ MJ/kg} = 35 \text{ kJ/mol}$$

Le rendement est probablement très inférieur pour le CH₄ que pour CO₂ mais la combustion du CH₄ fournit 55 MJ/kg]

Capture atmosphérique du CO₂

A l'heure actuelle, prototypes nécessitent $E = 500 \text{ kJ/mol}$

Supprimer 1 Wm^{-2} de forçage radiatif par le CO₂ requiert

- de baisser sa concentration de 400 à 330 ppm, soit 70 ppm ou $> 500 \text{ Pg CO}_2$ ou $1,1 \cdot 10^{16} \text{ mol CO}_2$

- une énergie de $6 \cdot 10^{21} \text{ J}$ ce qui implique de consacrer l'équivalent de la totalité de l'énergie primaire pendant ~ 10 ans ou $1/10$ de la totalité de l'énergie primaire pendant ~ 100 ans ($P = 17000 \text{ GW}$)

⇒ Peut-on augmenter le rendement ?

⇒ Peut-on utiliser les énergies renouvelables ?

⇒ Peut-on utiliser de l'énergie de mauvaise qualité ?

Capture atmosphérique du CO₂

Productivité

Bois (Europe)

10 t bois sec/ha/an=15 t CO₂/ha/an

Miscanthus

10-40 t CO₂/ha/an

Supprimer 1 Wm⁻² de forçage radiatif par le CO₂ requiert

- de baisser sa concentration de 400 à 330 ppm, soit 70 ppm ou 500 Pg CO₂ ou $1,2 \cdot 10^{16}$ mol CO₂
- d'y consacrer l'équivalent de 12 à 50 10^9 ha.an de surface

Pour comparaison

- forêts = 3 à 4 10^9 ha (~25% de la surface des continents)
- terres cultivées = 1,5 10^9 ha (~10% de la surface des continents)

Et la gouvernance ?





Géo-ingénierie vs. changement climatique
Géo-ingénierie vs. adaptation
Géo-ingénierie vs. atténuation
Adaptation vs. atténuation

Conclusions

Les techniques de captage du CO₂ 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

Les techniques de gestion du rayonnement solaire

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

L'ensemble pose des problèmes de gouvernance et d'éthique

Quel futur ?

