



Sciences de
l'environnement

*Institut
Pierre
Simon
Laplace*



cnrs

dépasser les frontières

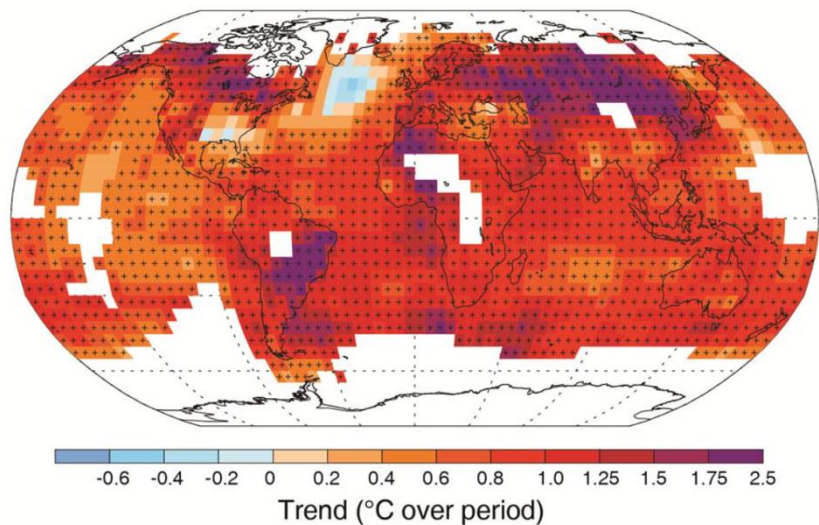


SCIENCES
SORBONNE
UNIVERSITÉ

La géo-ingénierie peut-elle sauver le climat ?

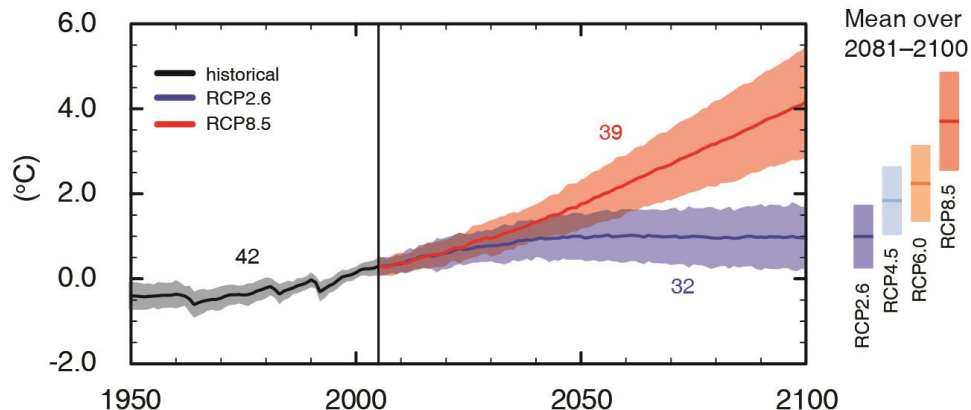
Olivier Boucher
Institut Pierre-Simon Laplace

EcoClim – 10 juin 2021



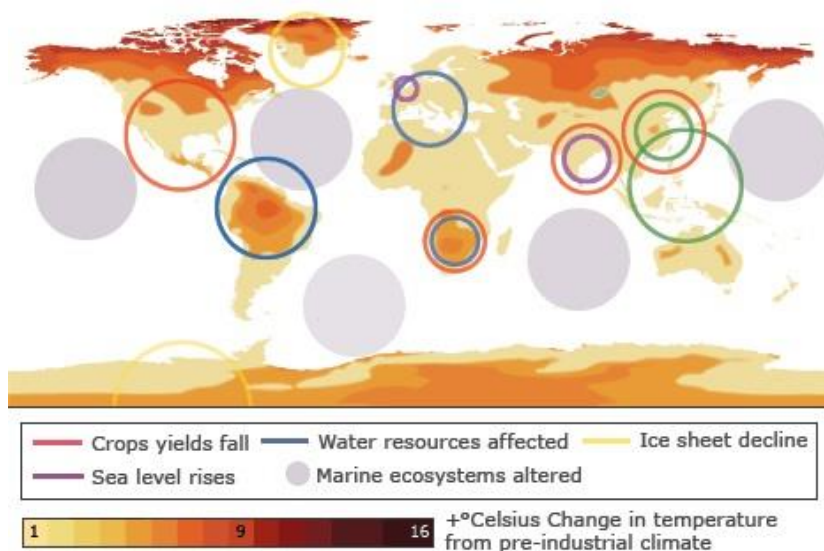
Le réchauffement concerne quasiment toutes les régions

(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

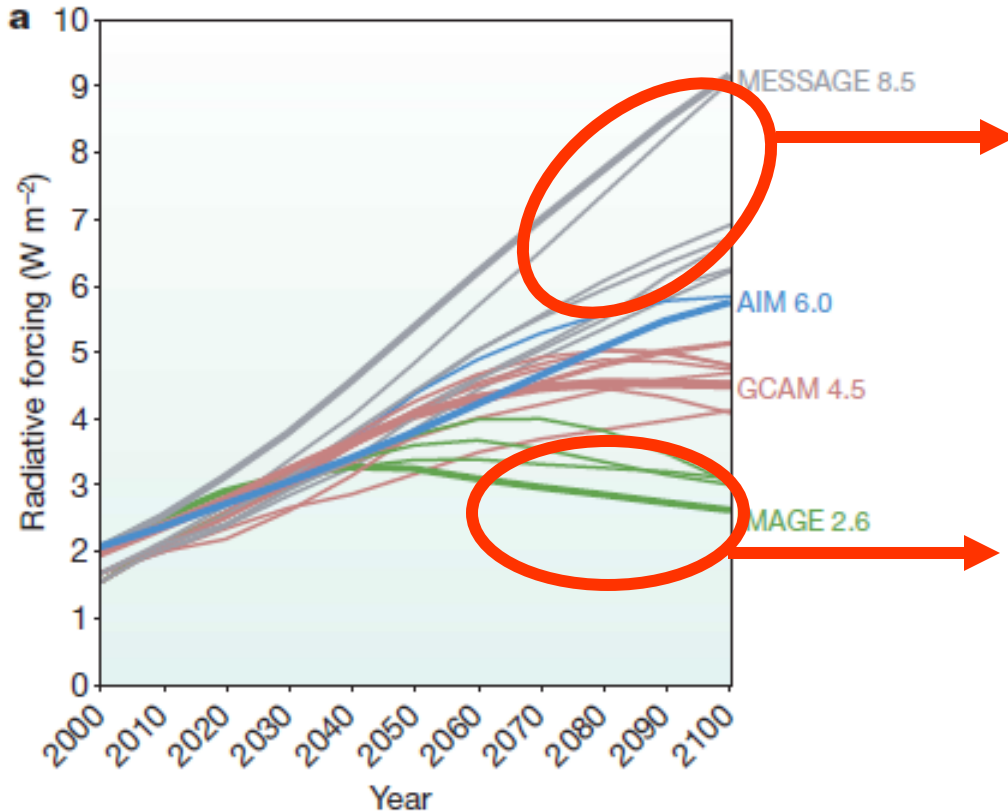
Bioénergie avec séquestration géologique du CO₂

Séquestration via la biosphère marine

Séquestration chimique dans l'océan

Captage chimique atmosphérique avec séquestration géologique

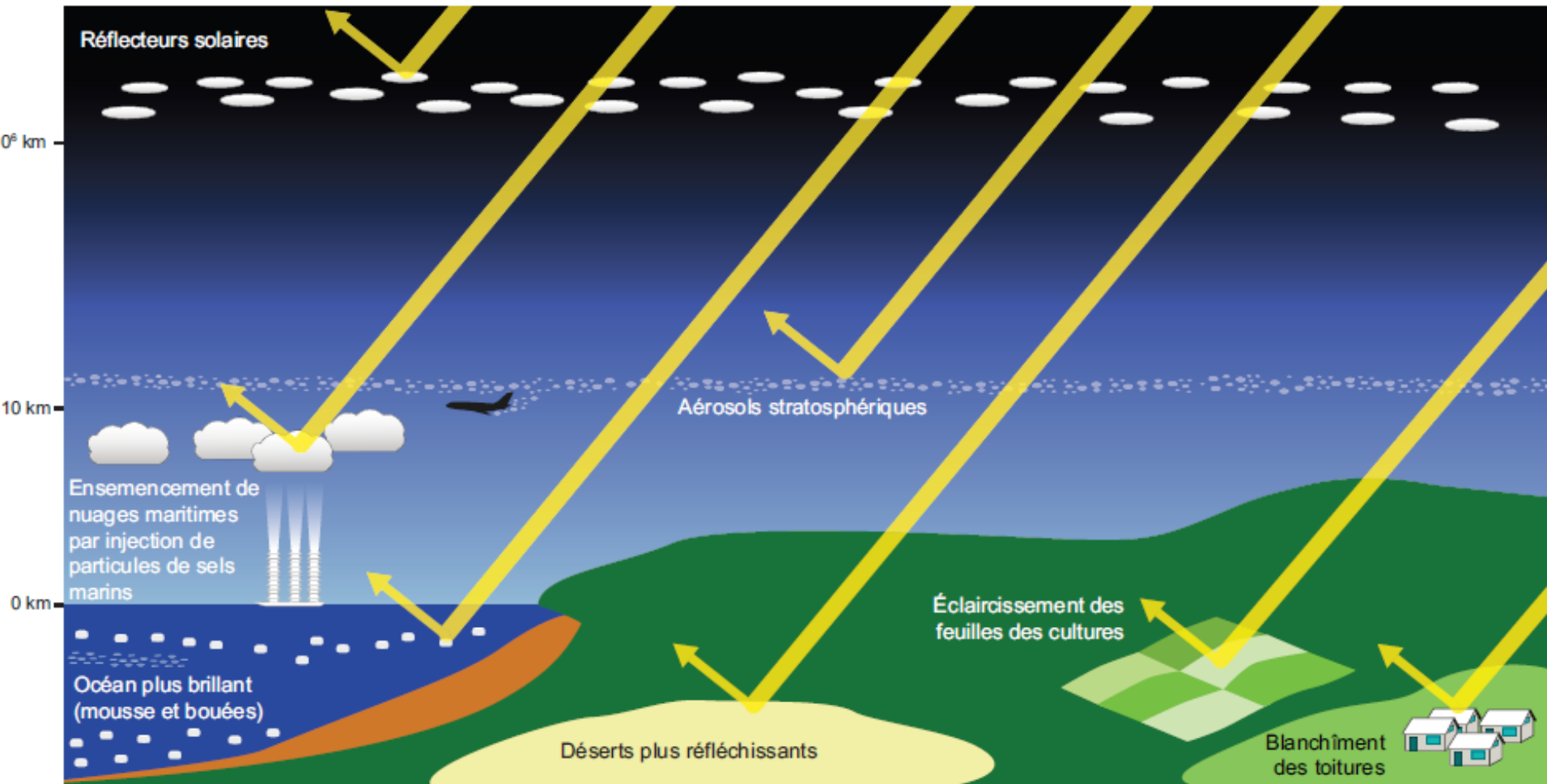
L'ingénierie du climat et les scénarios climatiques « classiques » dits RCP



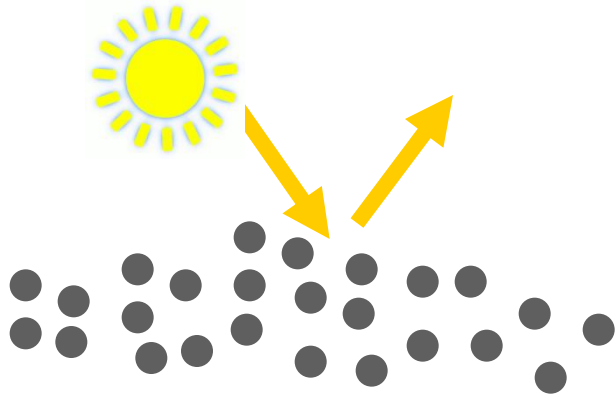
Besoin fort d'adaptation.
Tentation de développer
les techniques de gestion
de rayonnement solaire
pour réduire les impacts
du changement climatique

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

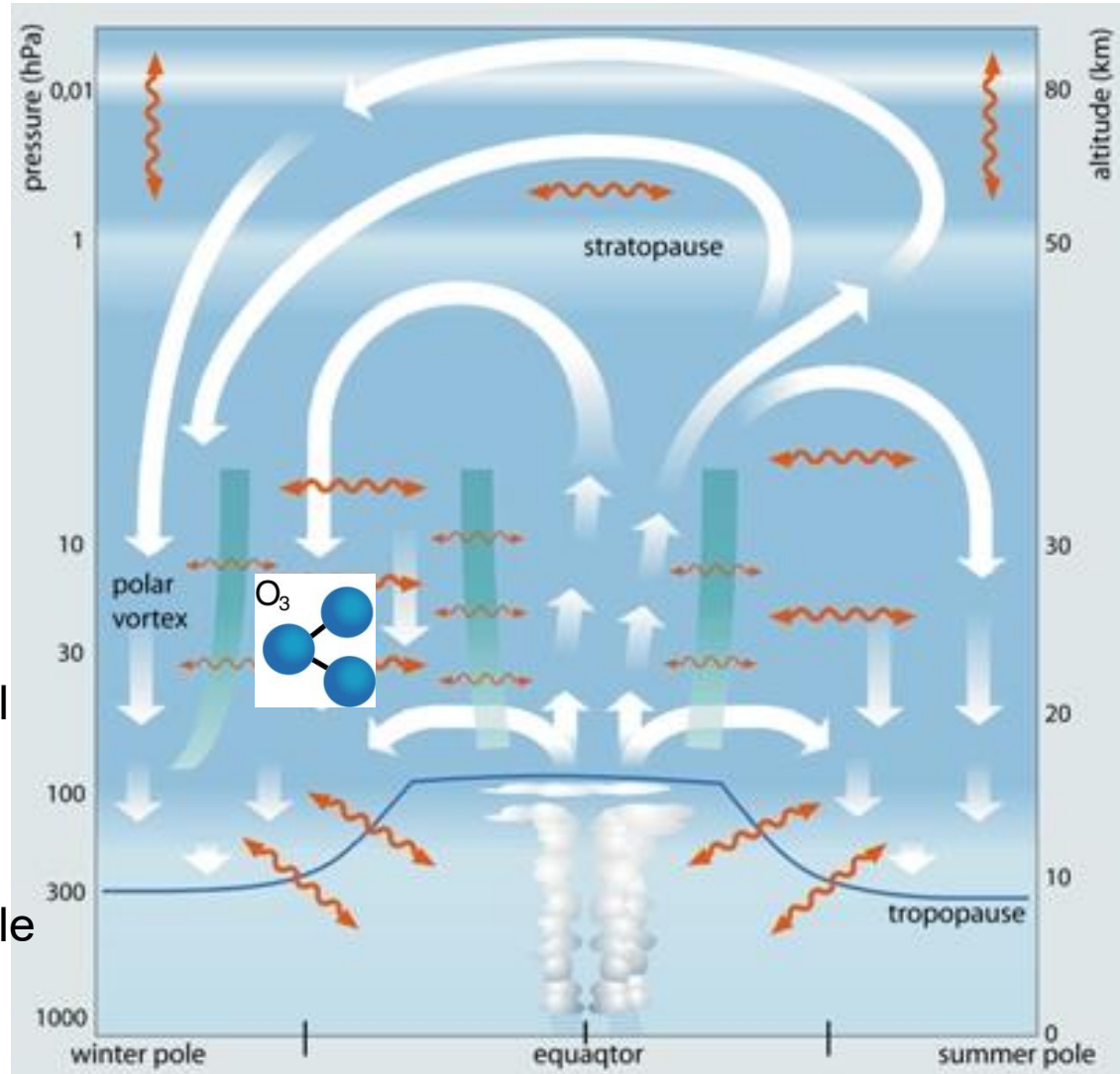
Gestion du rayonnement solaire



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)

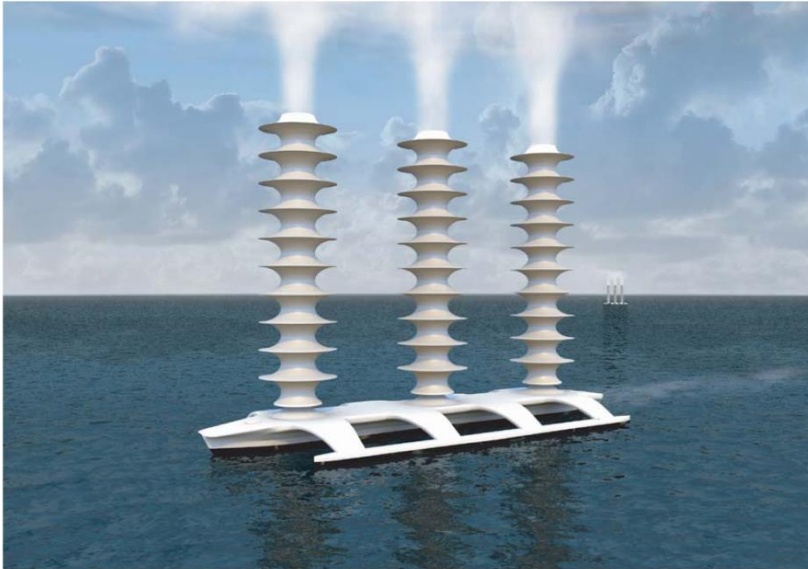
Puissance nécessaire pour maintenir un forçage de $\Delta F = -1 \text{ Wm}^{-2}$

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

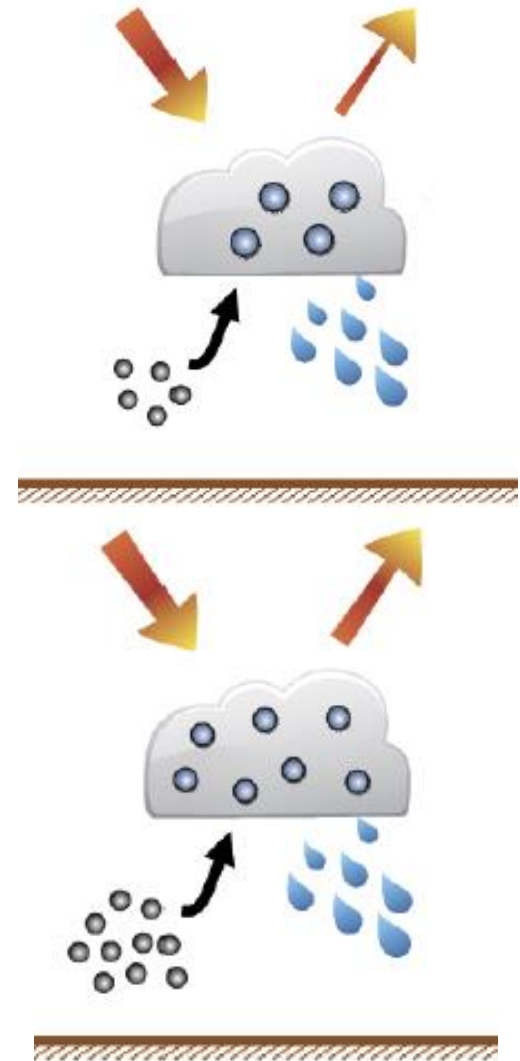
à comparer à l'énergie primaire mondiale consommée

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

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 kg s^{-1} d'eau de mer, soit $5 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$

Energie solaire perdue pour la planète

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

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

Energies renouvelables ?

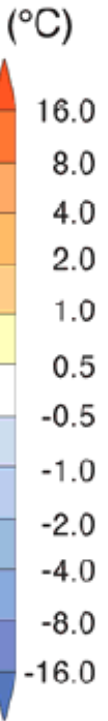
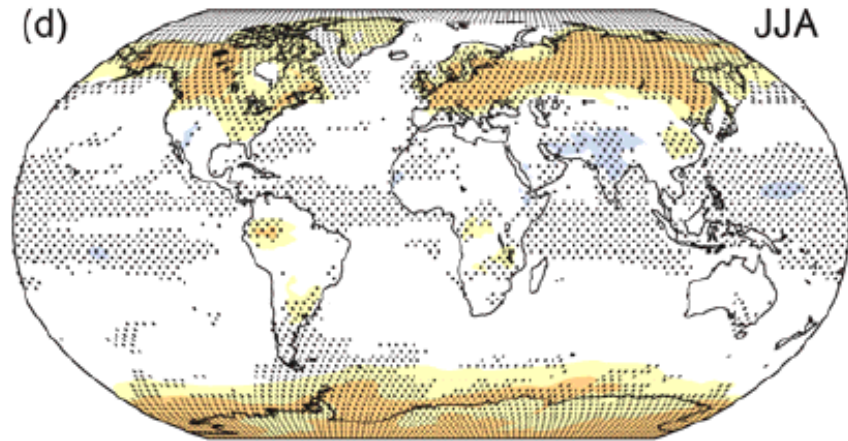
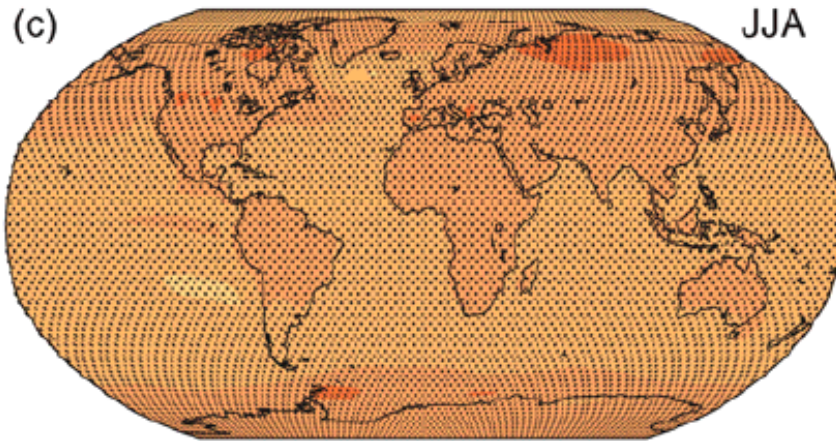
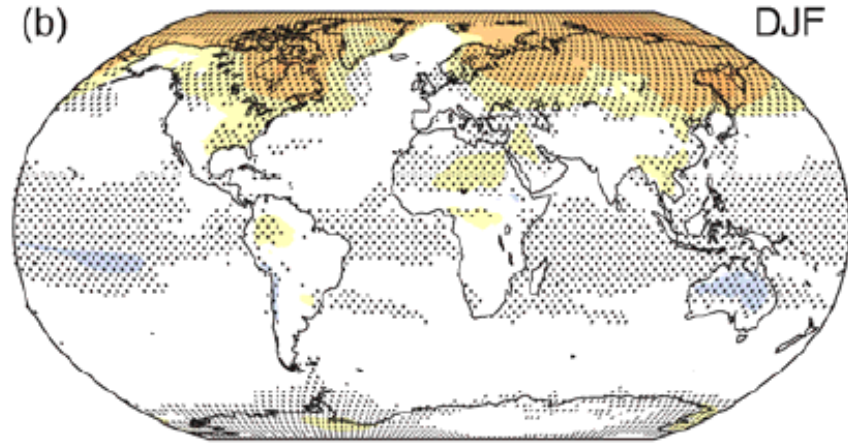
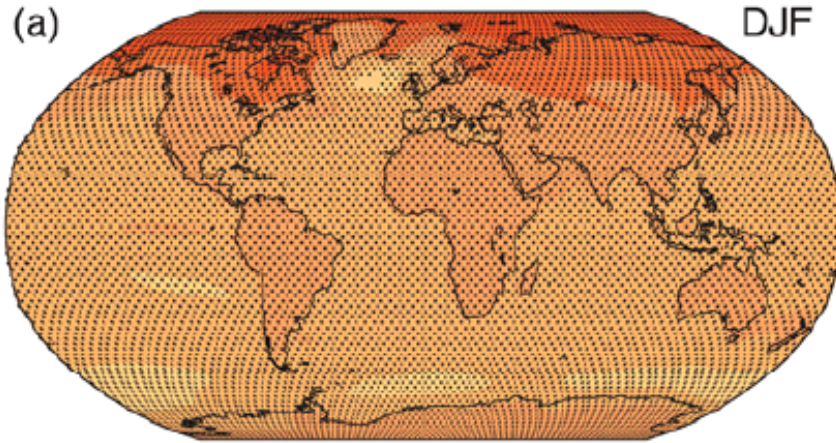
Injection d'aérosols de sels marins de petite taille ?

Interactions aérosols-nuages ?

Changement de température avec et sans ingénierie du climat

4xCO₂

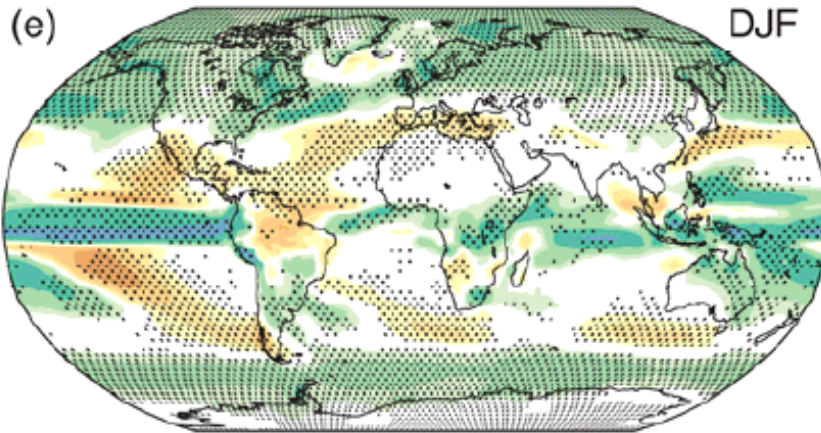
4xCO₂ + ingénierie du climat



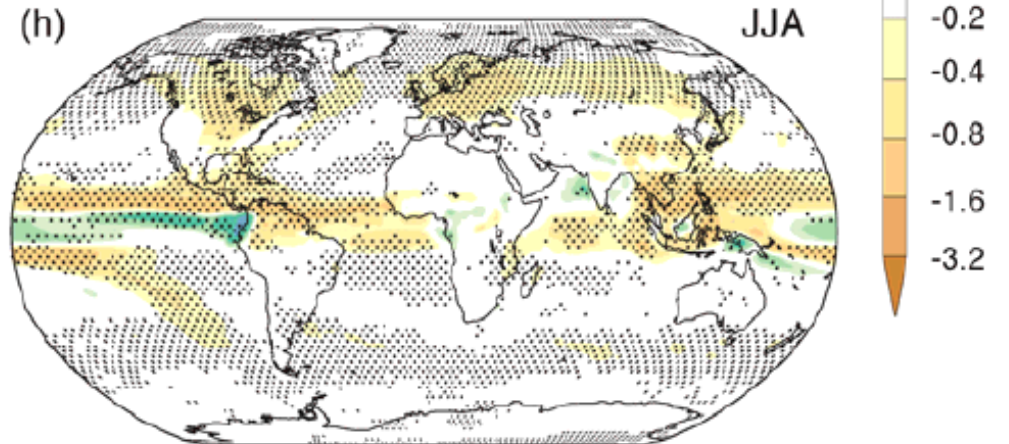
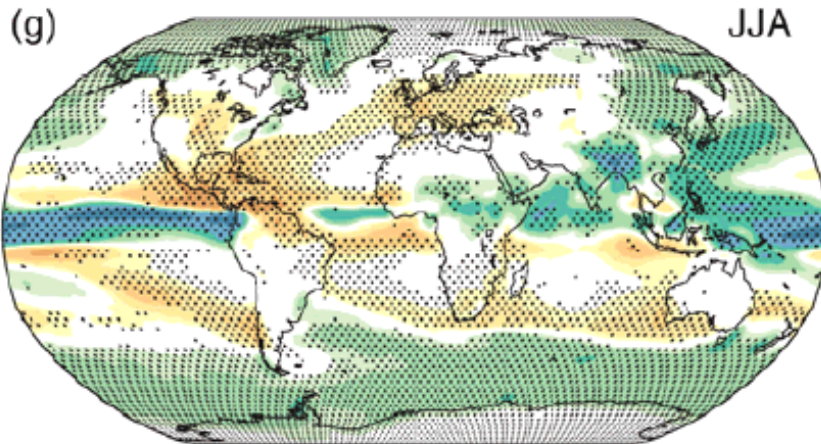
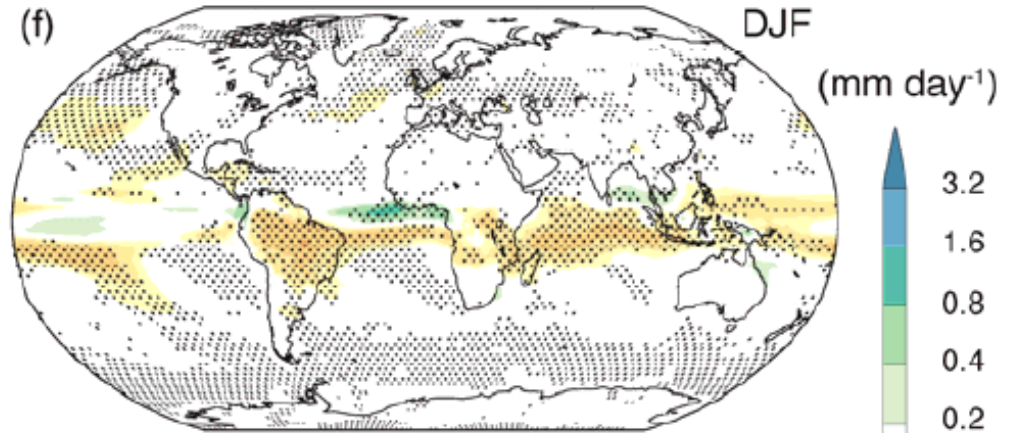
Source: Kravitz, ..., Boucher, et al. JGR 2013a

Changement de précipitations avec et sans ingénierie du climat

4xCO₂

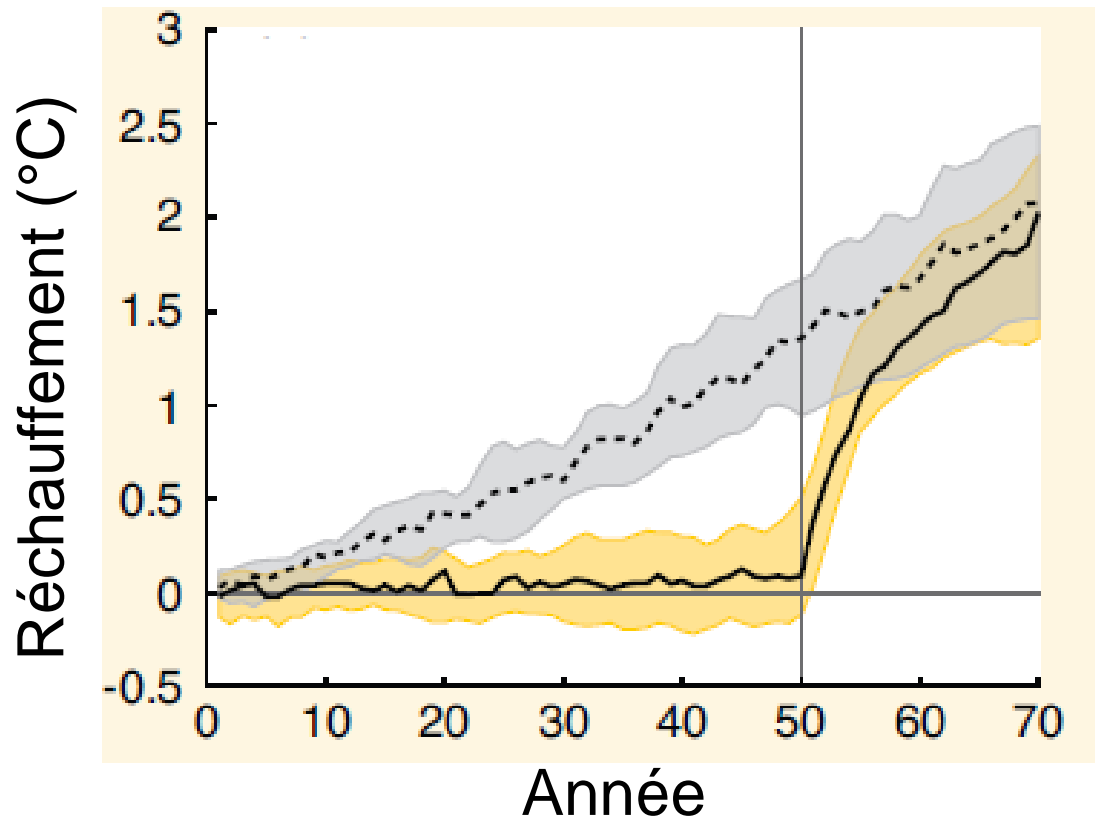


4xCO₂ + ingénierie du climat



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

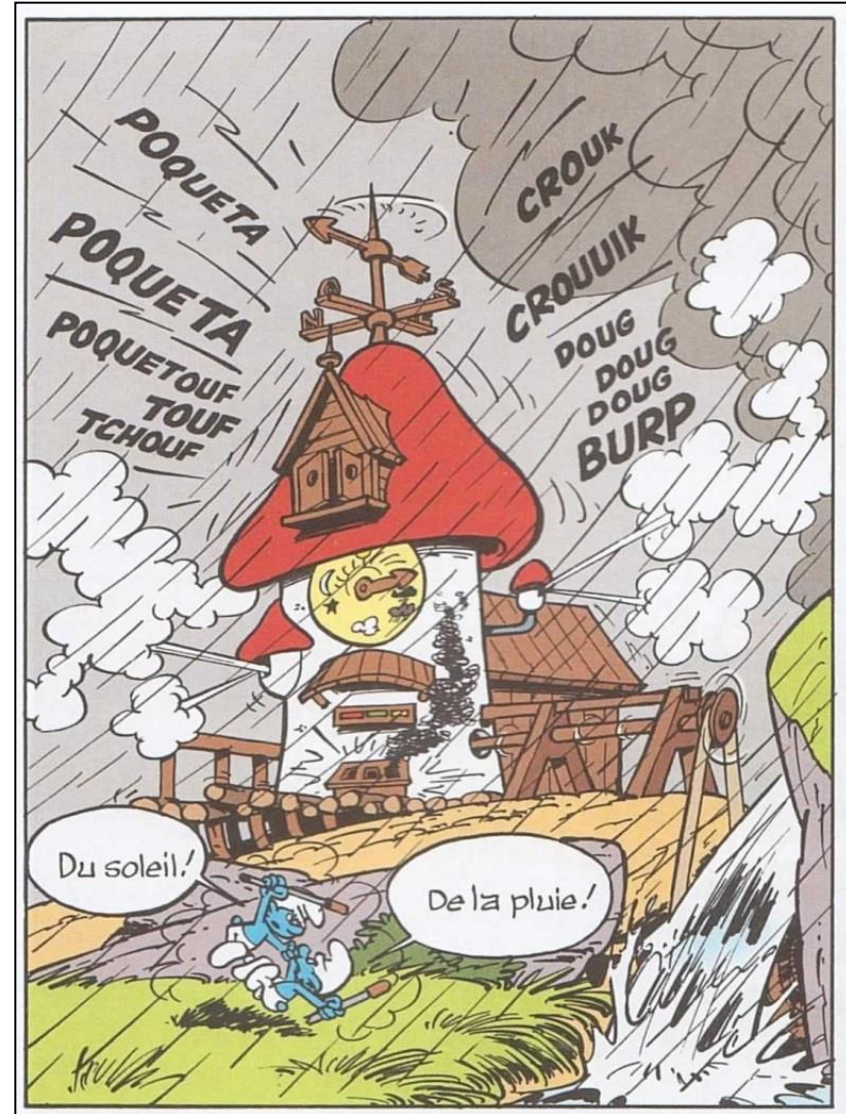
Problème de l'interruption du contrôle climatique



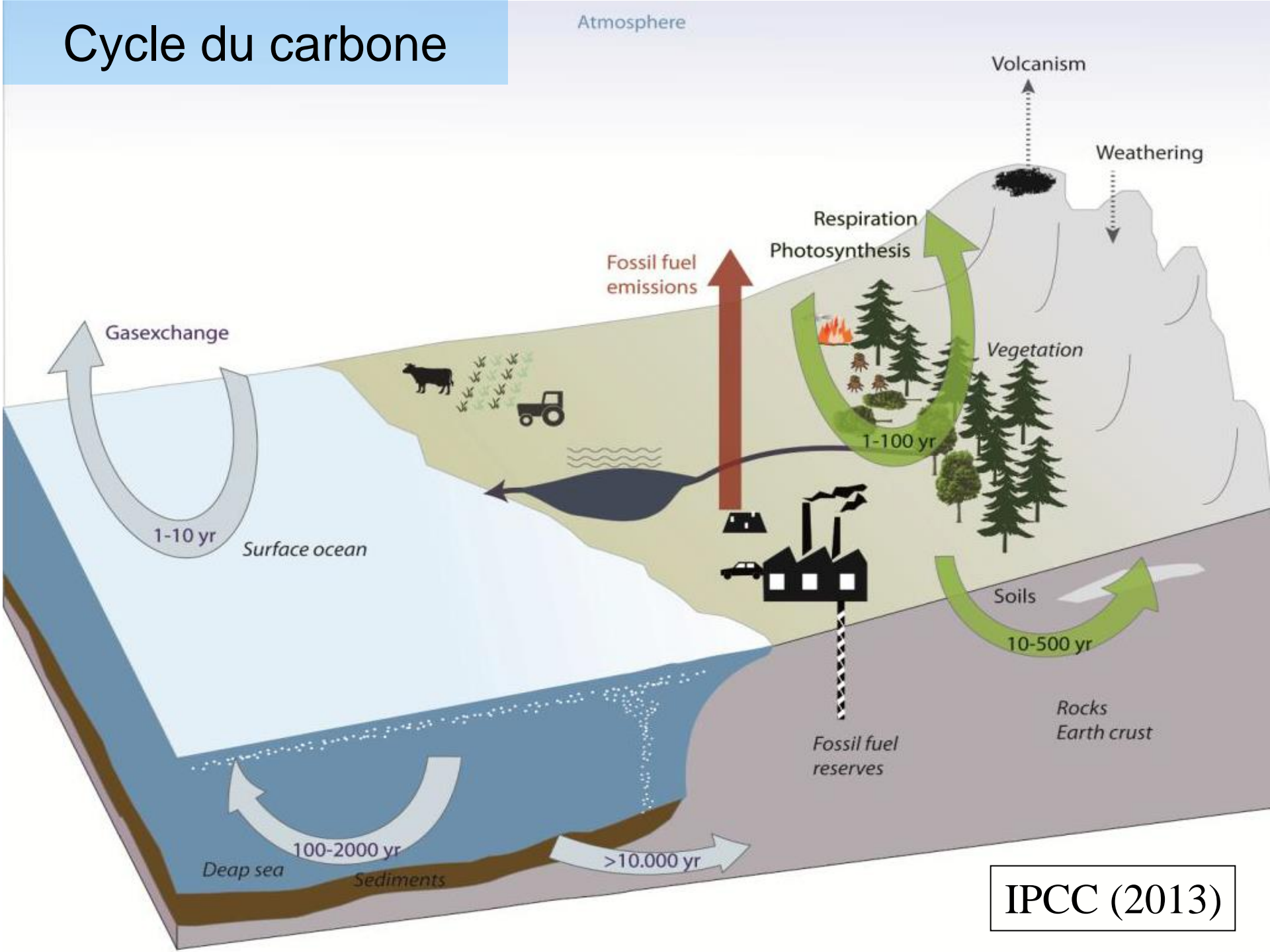
Le procédé doit être maintenu de manière permanente...

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.

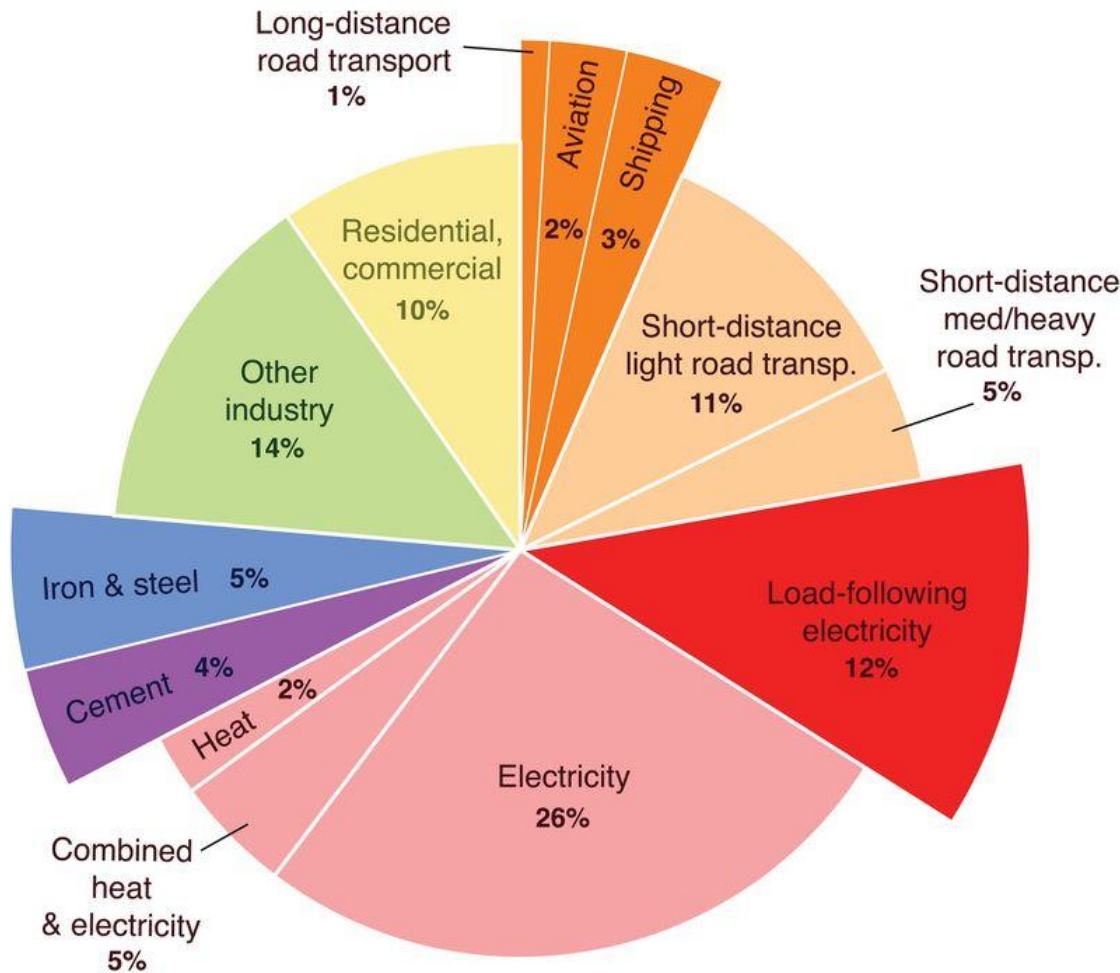
Et la gouvernance ?



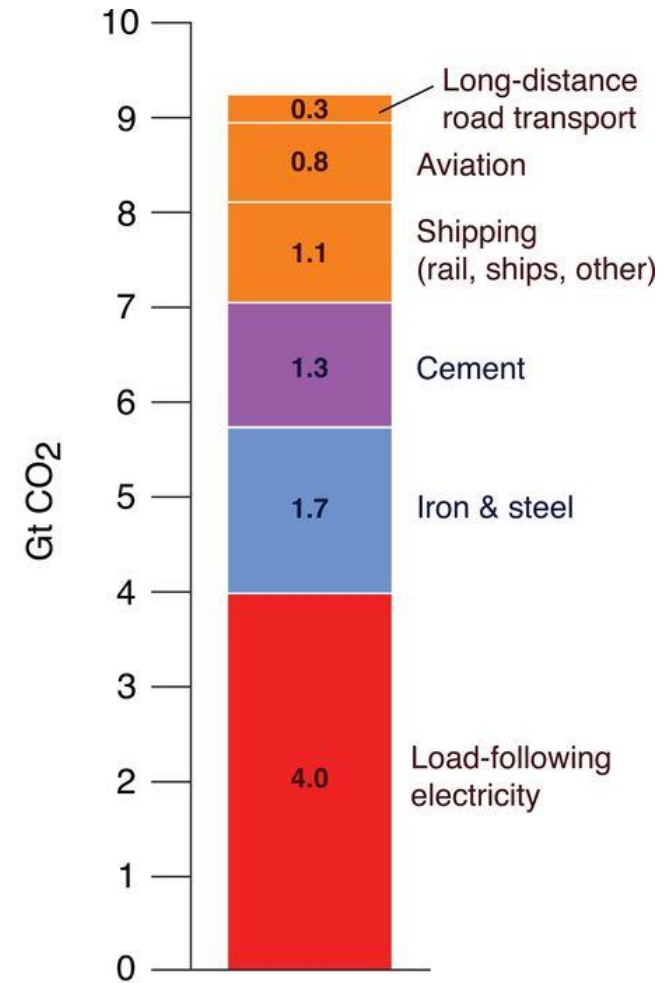
Cycle du carbone



Emissions de CO₂ qui seront difficiles à réduire

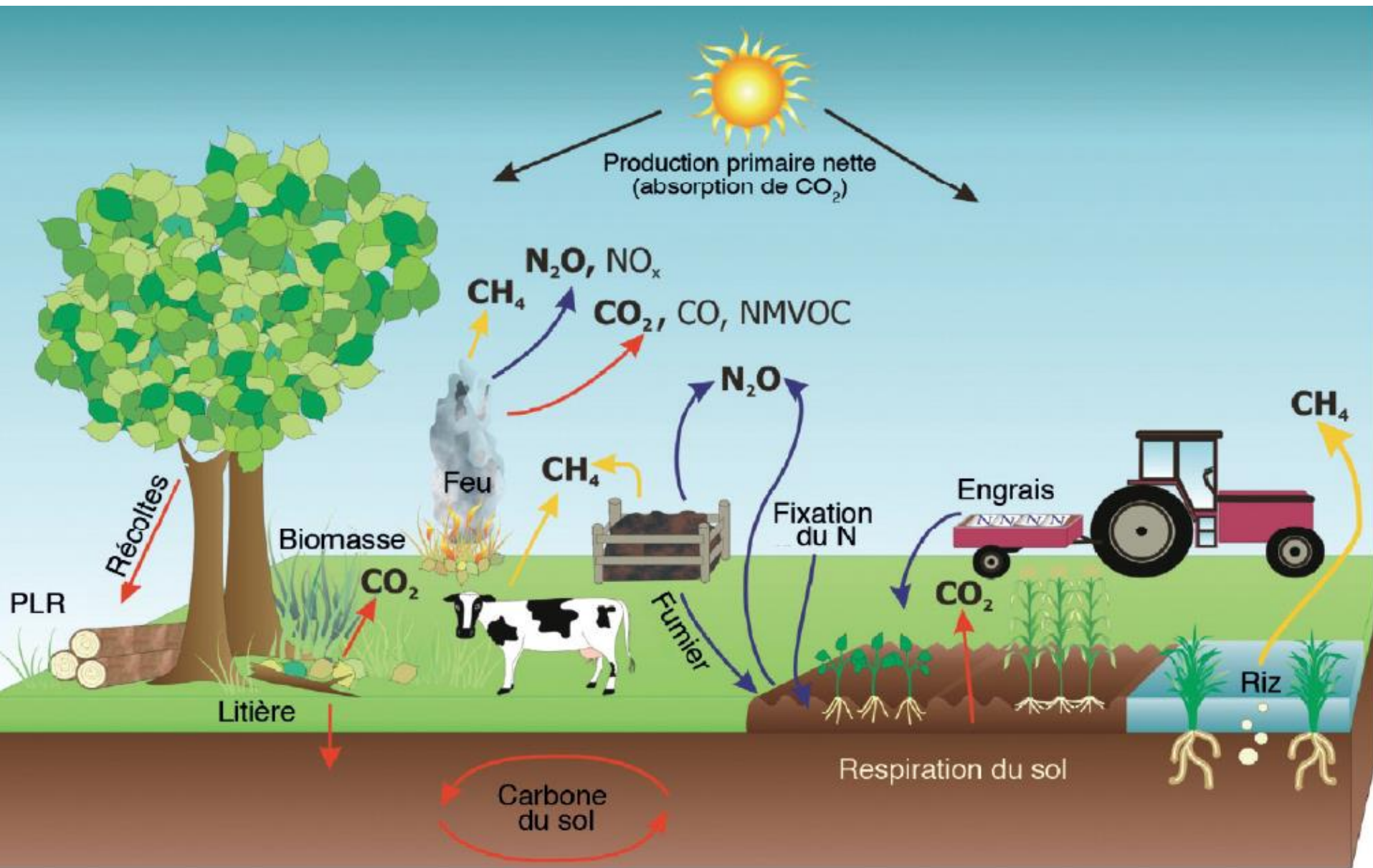


A Global fossil fuel & industry emissions, 2014 (33.9 Gt CO₂)

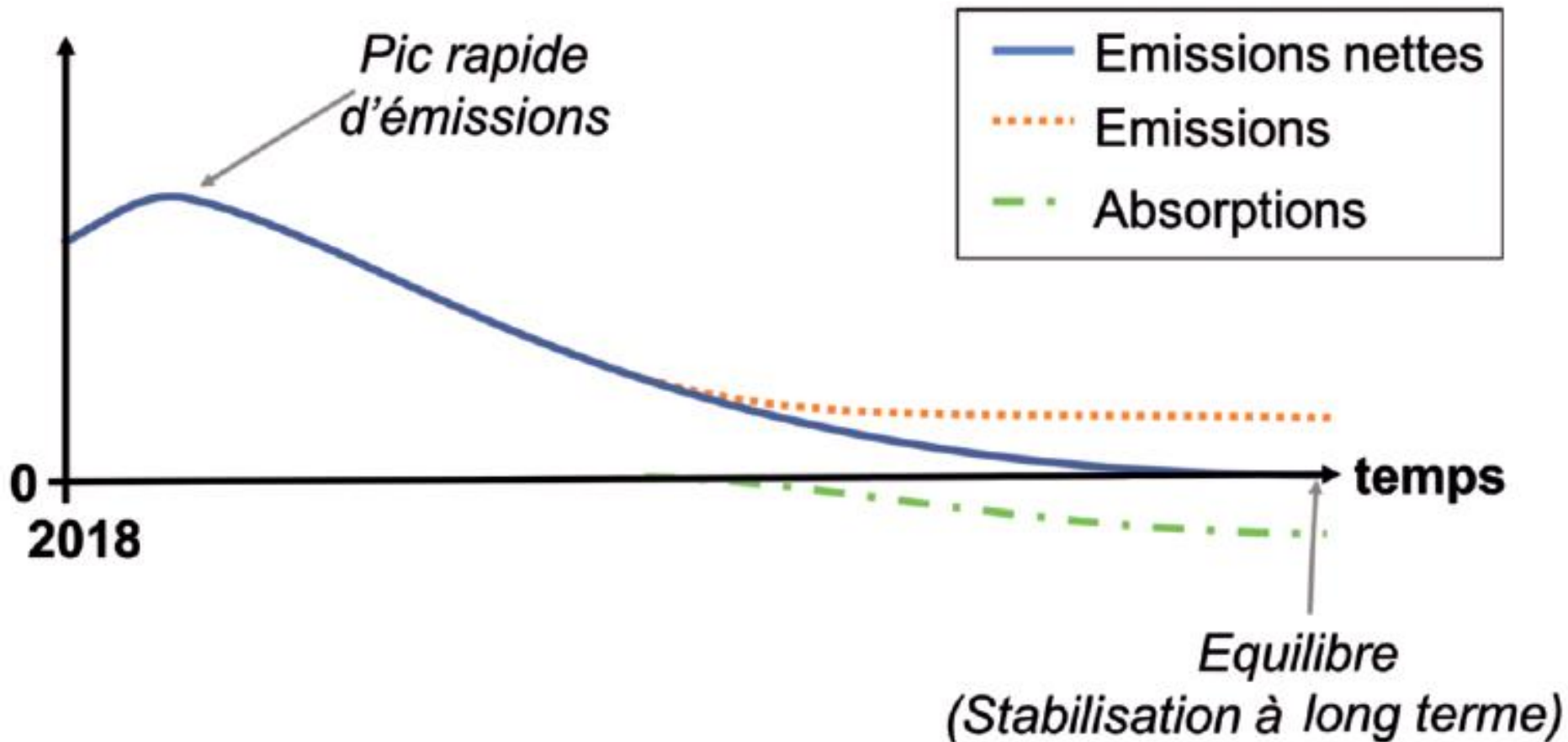


B Difficult-to-eliminate emissions, 2014 (9.2 Gt CO₂)

Emissions résiduelles de l'agriculture

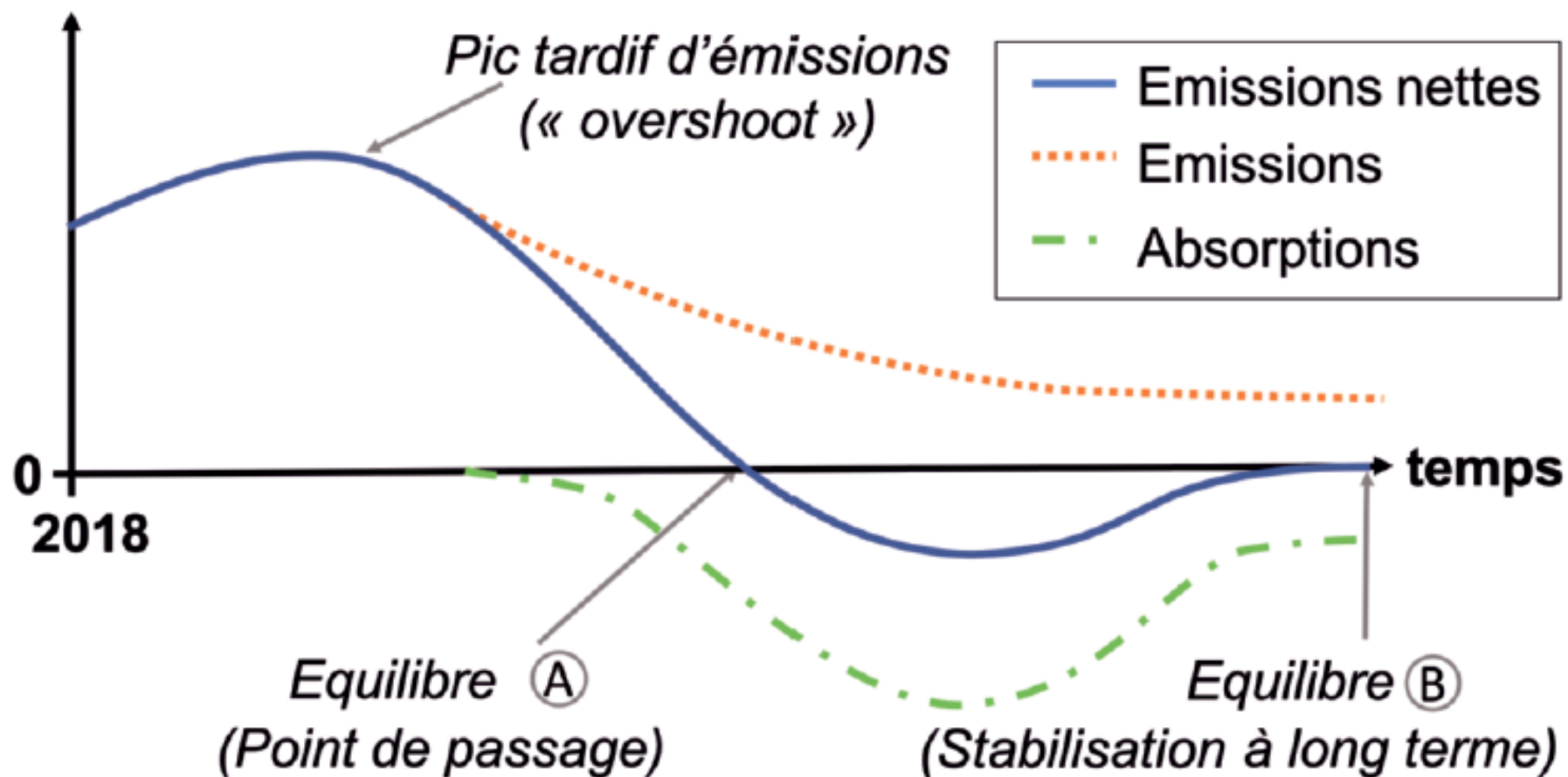


Scénario d'émissions compatible avec une stabilisation



Perrier et al., L'objectif « zéro émissions nettes » de l'Accord de Paris : signification et implications, *La Météorologie*, n°103, nov. 2018.

Scénario d'émissions compatible avec une stabilisation

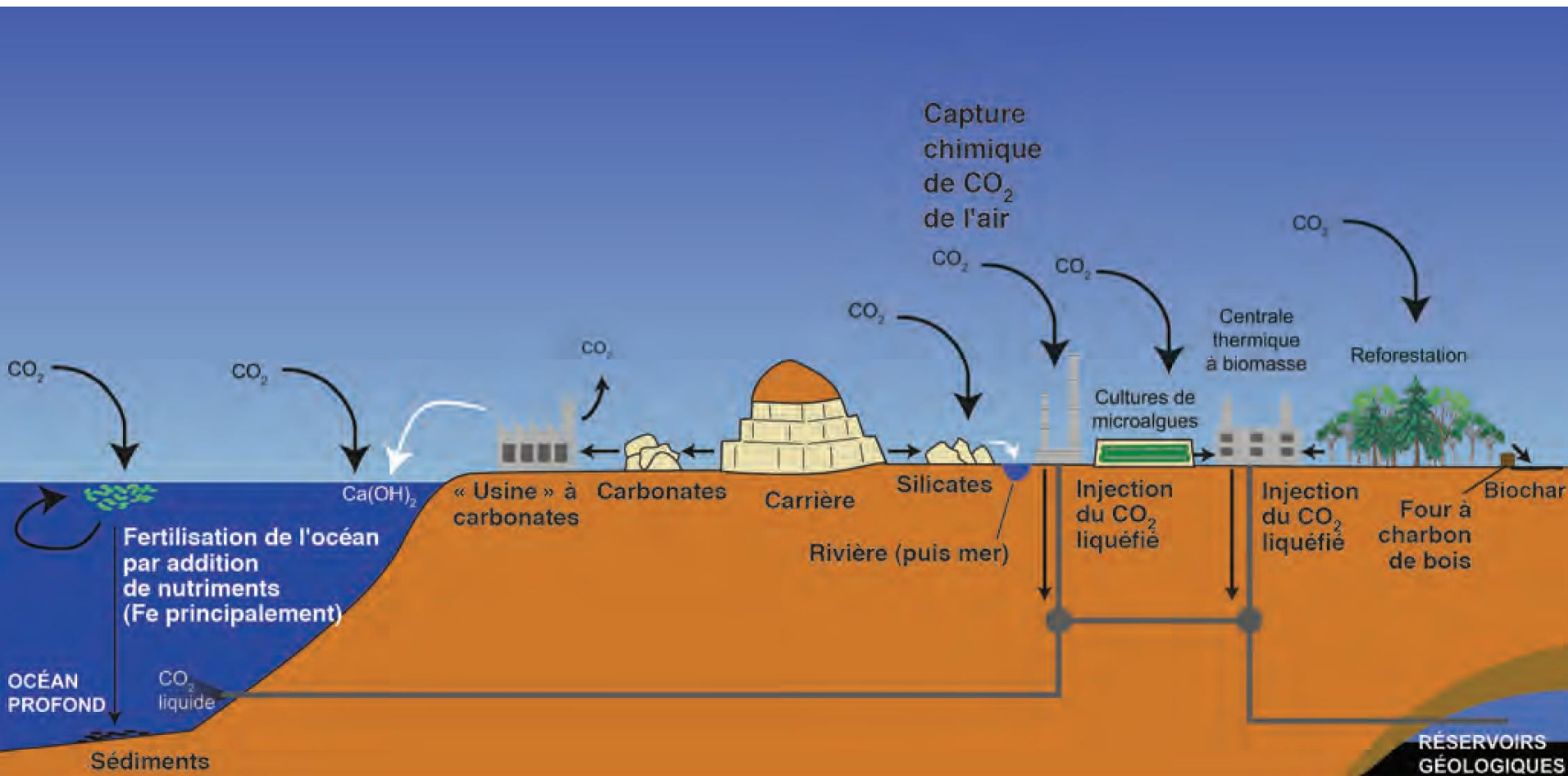


Perrier et al., L'objectif « zéro émissions nettes » de l'Accord de Paris : signification et implications, *La Météorologie*, n°103, nov. 2018.

Méthodes de captage du CO₂ atmosphérique

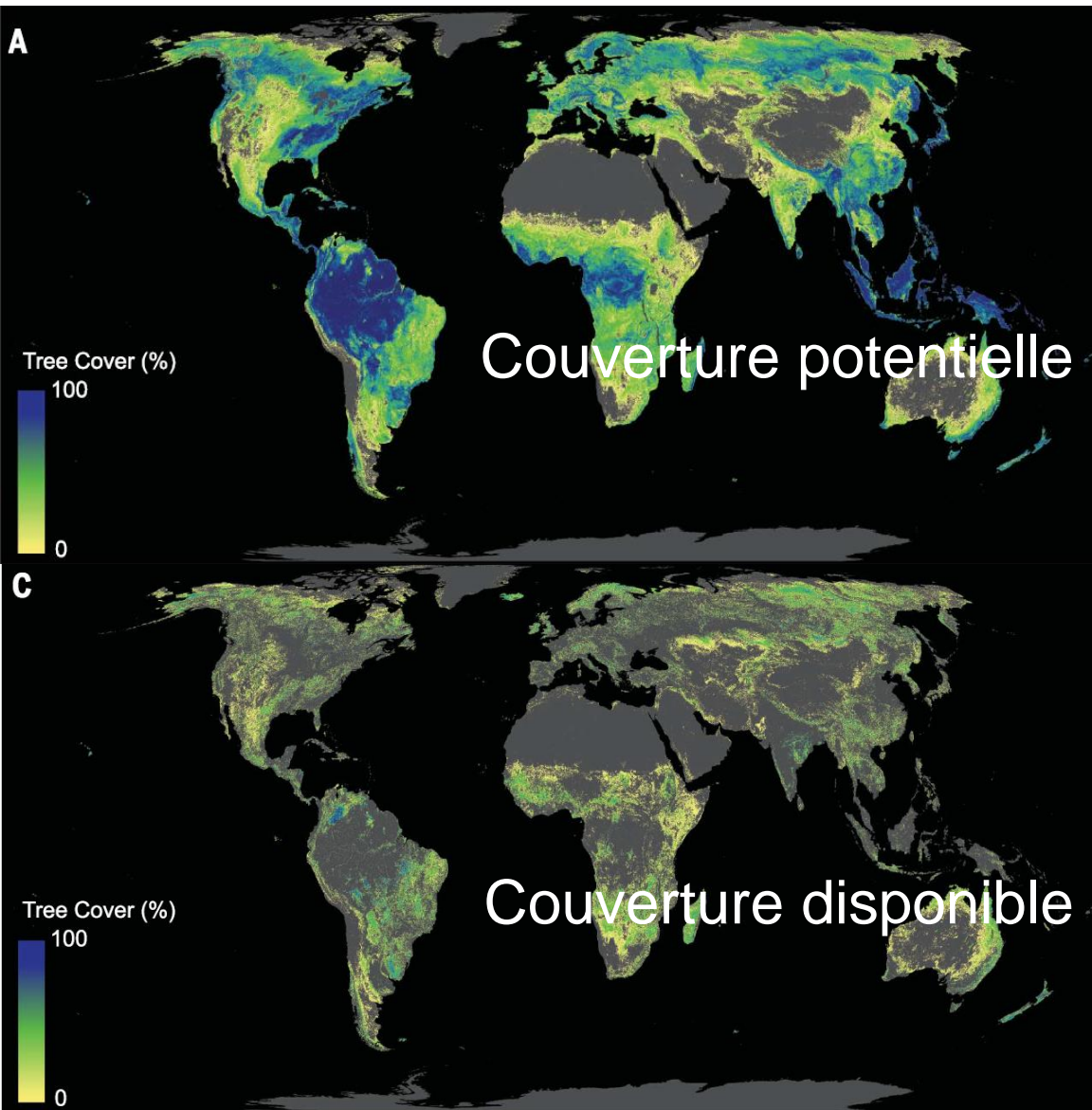
Biologique (continents, océans)

Chimique (océan, minéraux, industrie)



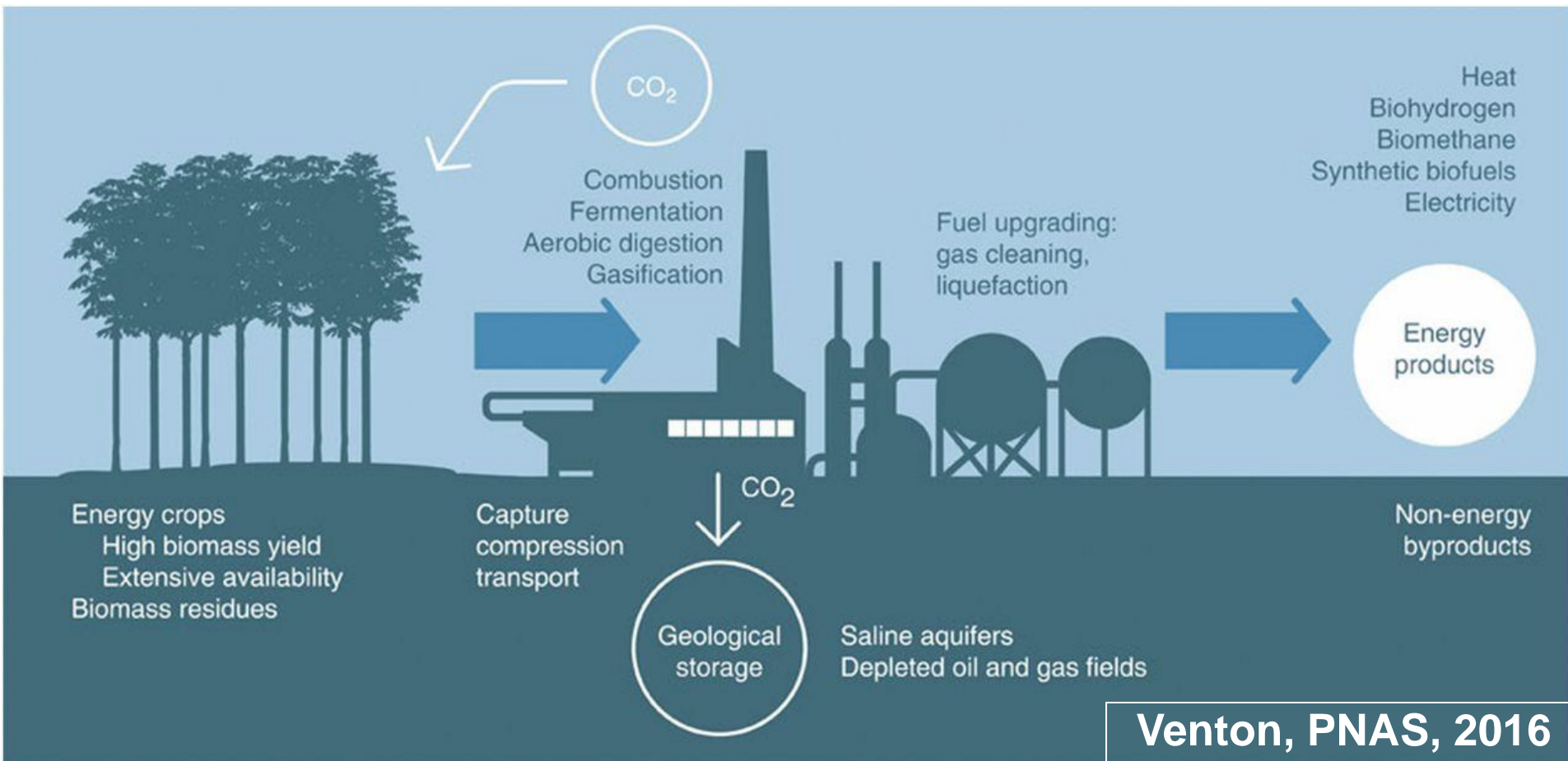
Reforestation / afforestation

Potentiel avéré mais



- À ne pas surestimer (le cas de cet article !)
- Croissance lente
- Non permanence des puits de carbone
- Compétition pour l'utilisation des sols
- Modifie le cycle hydrologique
- Diminue l'albédo
=> réchauffement

Bioénergie avec captage et stockage du CO₂



Venton, PNAS, 2016

Recyclage des nutriments ?

Compétition avec l'agriculture pour l'utilisation des sols

Mise à l'échelle ?

Petit calcul sur les surfaces...

Productivité

Bois (Europe) 10 t bois sec/ha/an=15 t CO₂/ha/an

Miscanthus 10-40 t CO₂/ha/an

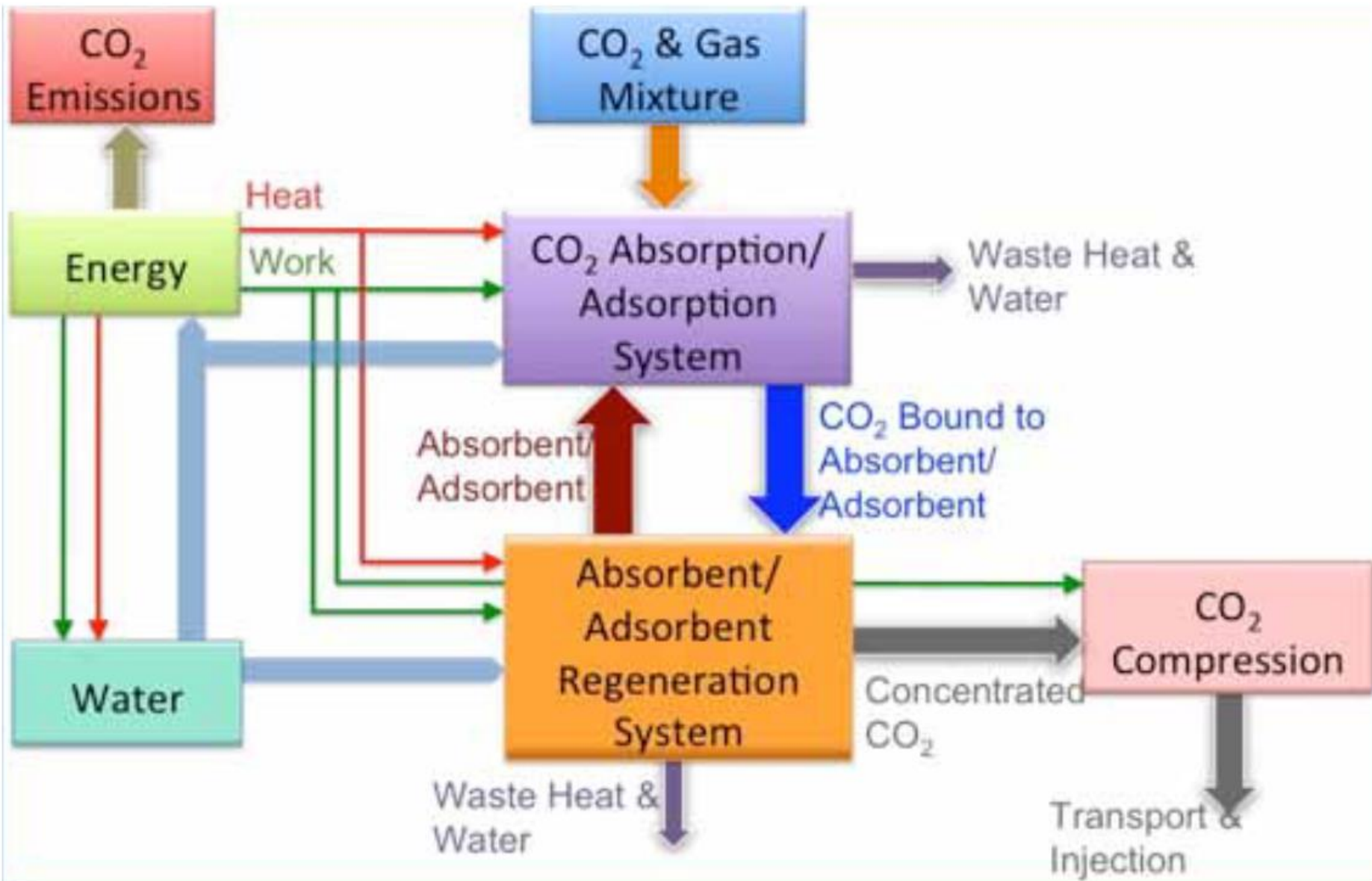
Supprimer 1 Wm⁻² de forçage radiatif par le CO₂ requiert

- de baisser sa concentration de 400 à 330 ppm, soit 70 ppm ou 500 Pg CO₂ ou 1,2 10¹⁶ mol CO₂
- d'y consacrer l'équivalent de 12 à 50 10⁹ ha.an de surface

Pour comparaison

- forêts = 3 à 4 10⁹ ha (~25% de la surface des continents)
- terres cultivées = 1,5 10⁹ ha (~10% de la surface des continents)

Principe du captage du CO₂



Que dit la thermodynamique sur le captage 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 ($\sim 30\%$?) 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]

Petit calcul sur l'énergie...

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

Supprimer 1 Wm^{-2} de forçage radiatif par le CO_2 requiert

- de baisser sa concentration de 400 à 330 ppm, soit 70 ppm ou $> 500 \text{ Pg CO}_2$ ou $1,2 \cdot 10^{16} \text{ mol CO}_2$

- 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 ?

Start-up sur le captage du CO₂

Global Thermostat, Etats-Unis

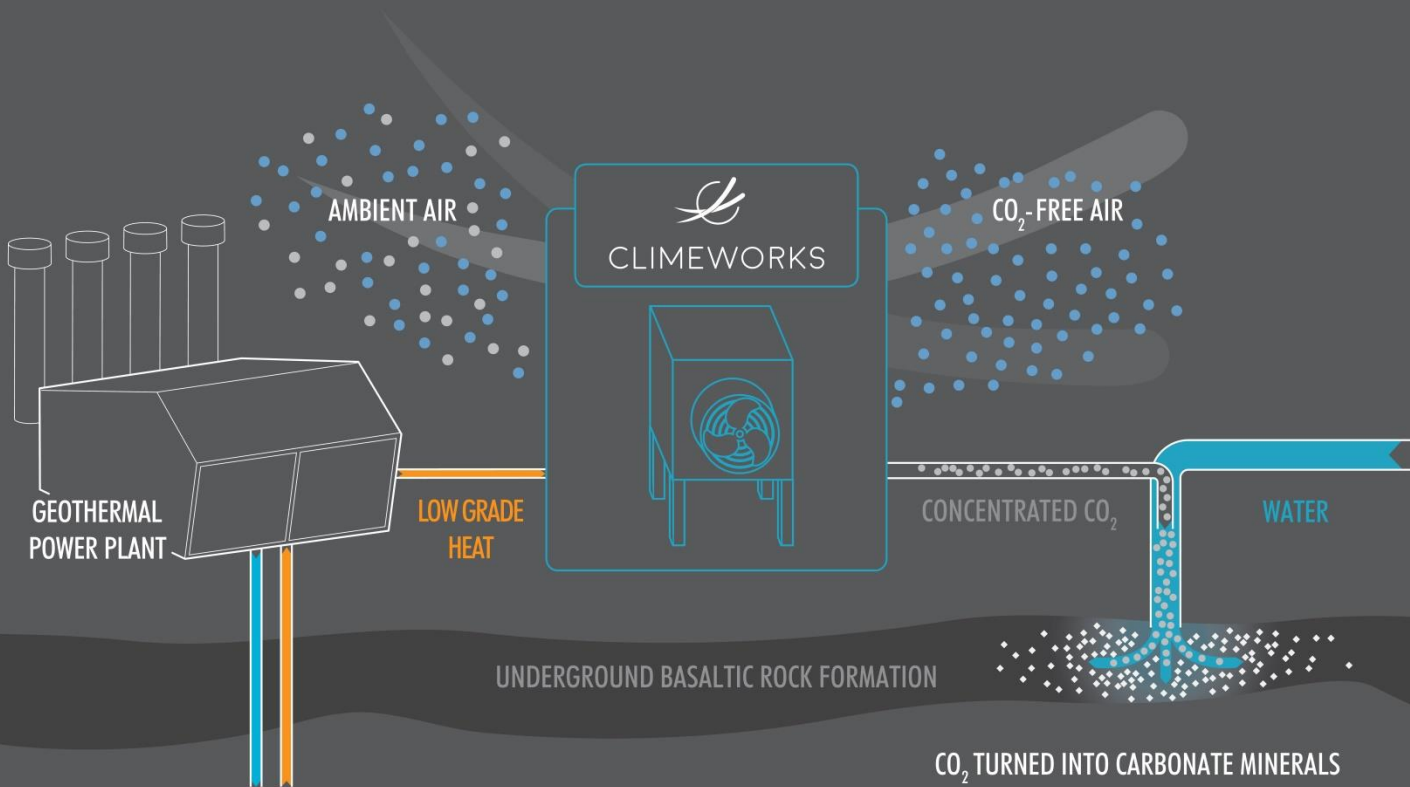
Silicon Kingdom Holdings, accord pour la commercialisation de la technique de Klaus Lackner, Arizona State University

Carbon engineering, Canada : 68 millions de US\$ de levée de fonds privés en mars 2019 et 25 millions de US\$ de levée de fonds public en juin 2019, technologie AIRTOFUELS®

C-capture, Royaume-Uni, centrale thermique de Drax avec biomasse mélangée au charbon, site pilote

Climeworks, Suisse, 30 millions de US\$ de levée de fonds en août 2018, plusieurs sites pilotes, première offre commerciale

THE WORLD'S FIRST CARBON NEGATIVE PLANT ENABLED BY DIRECT AIR CAPTURE OF CO₂



Special Expedition

If you're looking for that extra kick: approx. 100% of a global average footprint.

We turn 600 kg of CO₂ into stone each year in your name

49 EUR/month

Excluding applicable taxes, if any
Cancel any month

[Subscribe now](#)

 CLIMEWORKS

Now available: Our first ever product for individuals!

Turn your travel emissions into stone.

[Act now](#)

Vers une économie du CO₂?

Tournant observé vers l'utilisation du C du CO₂ plutôt que sur le stockage, les flux sont limités

Encore visionnaire mais on voit les premières applications

Ne résoudra pas seul le problème du changement climatique mais peut aider

Michele Aresta · Iftekhar Karimi ·
Sibudjing Kawi *Editors*

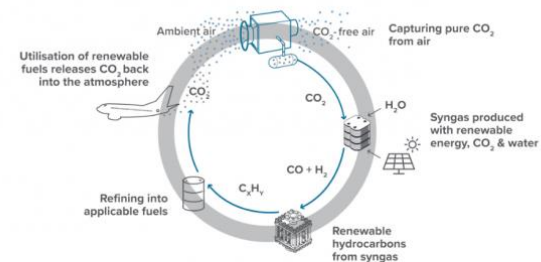
An Economy Based on Carbon Dioxide and Water

Potential of Large Scale Carbon Dioxide
Utilization

 Springer



CLOSING THE CARBON CYCLE



RENEWABLE FUELS FROM CO₂ AND WATER
ROTTERDAM THE HAGUE INNOVATION AIRPORT

Et en France ?

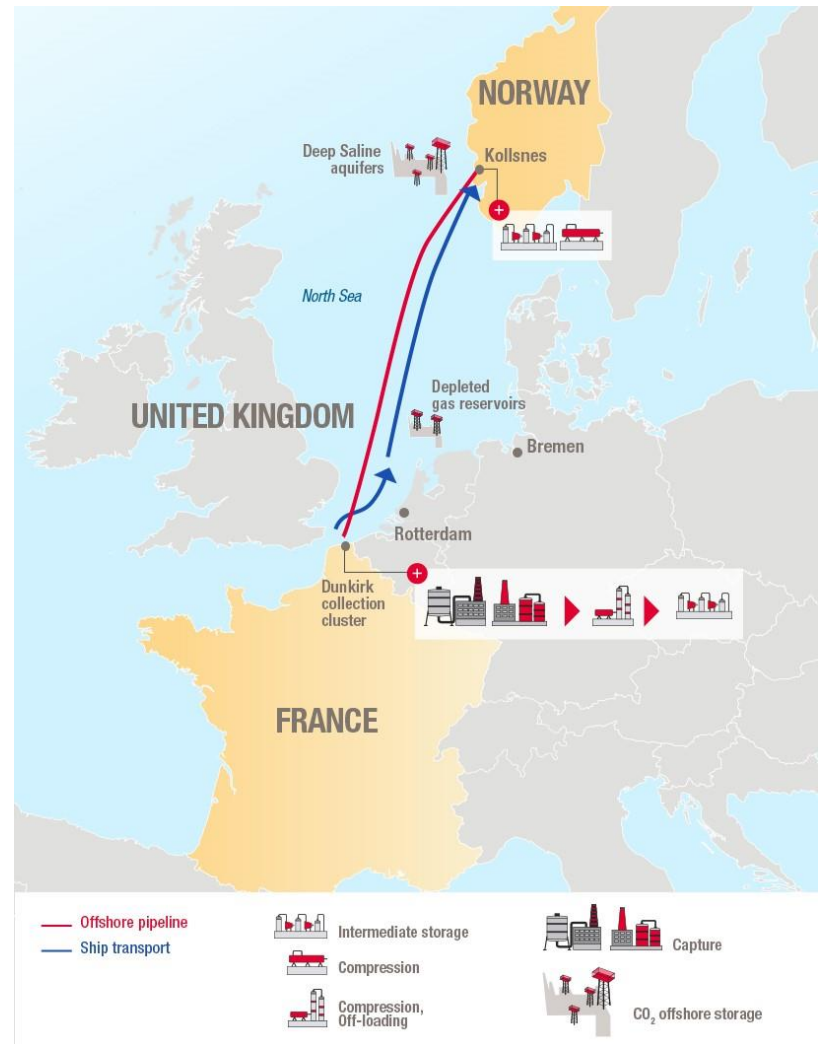
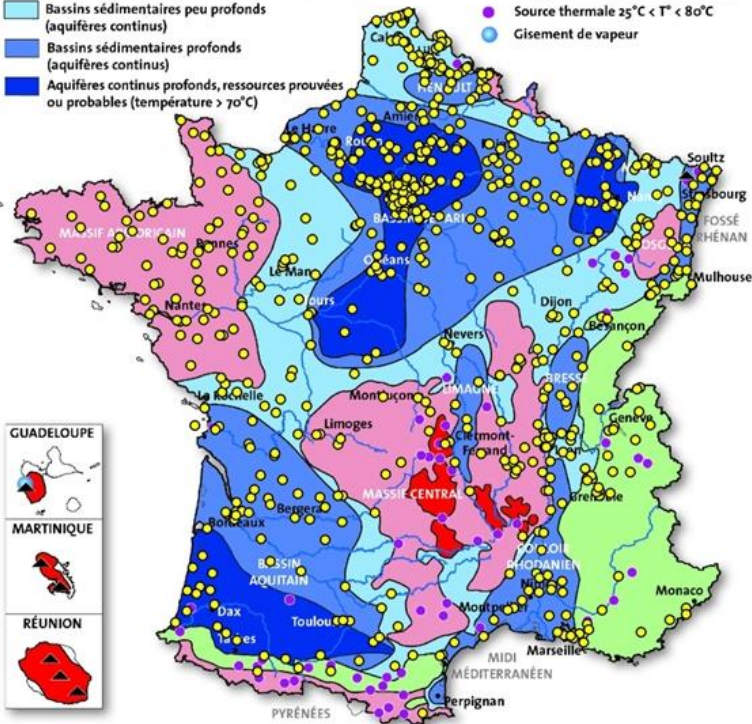
4 pour mille

Site pilote à Dunkerque
ArcelorMittal, Total, Axens, IFPEN



Legend:

- CO2 emission <= 150 kt (year 2011)
- Massifs cristallins : aquifères superficiels discontinus
- Chaines récentes : aquifères superficiels discontinus
- Bassins sédimentaires peu profonds (aquifères continus)
- Bassins sédimentaires profonds (aquifères continus)
- Aquifères continus profonds, ressources prouvées ou probables (température > 70°C)
- Massifs volcaniques récents
- ▲ Site géothermique en cours d'étude
- Source thermique 25°C < T° < 80°C
- Gisement de vapeur



← Travaux du BRGM

Conclusions (1/2)

Les techniques de captage du CO₂ atmosphérique

- couvrent un large spectre (échelles, impacts, risques)
- sont en général (très) longues à agir
- ont un potentiel de mise à l'échelle qui sera limité par des contraintes physiques, biologiques ou économiques fortes
- ne sont donc pas la panacée et ne peuvent venir qu'en complément des réductions d'émissions

Mais, elles

- ne doivent pas être ignorées
- pourraient devenir stratégiques
- doivent être étudiées, financées et encouragées

Conclusions (2/2)

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
- posent des problèmes de gouvernance et d'éthique

Elles doivent aussi être étudiées.

LES CHOSES
MOCHES
...

IL VAUT
MIEUX
...

LES REGARDER
PAR
DEUX

PARCE QU'IL
Y EN A
TOUJOURS
UNE ...

QUI EST
MOINS
MOCHE
QUE L'AUTRE

