

Le cycle global du carbone perturbé par les émissions anthropiques : *état des lieux, projections et méthodes d'élimination du CO₂*

Laurent Bopp

DR CNRS

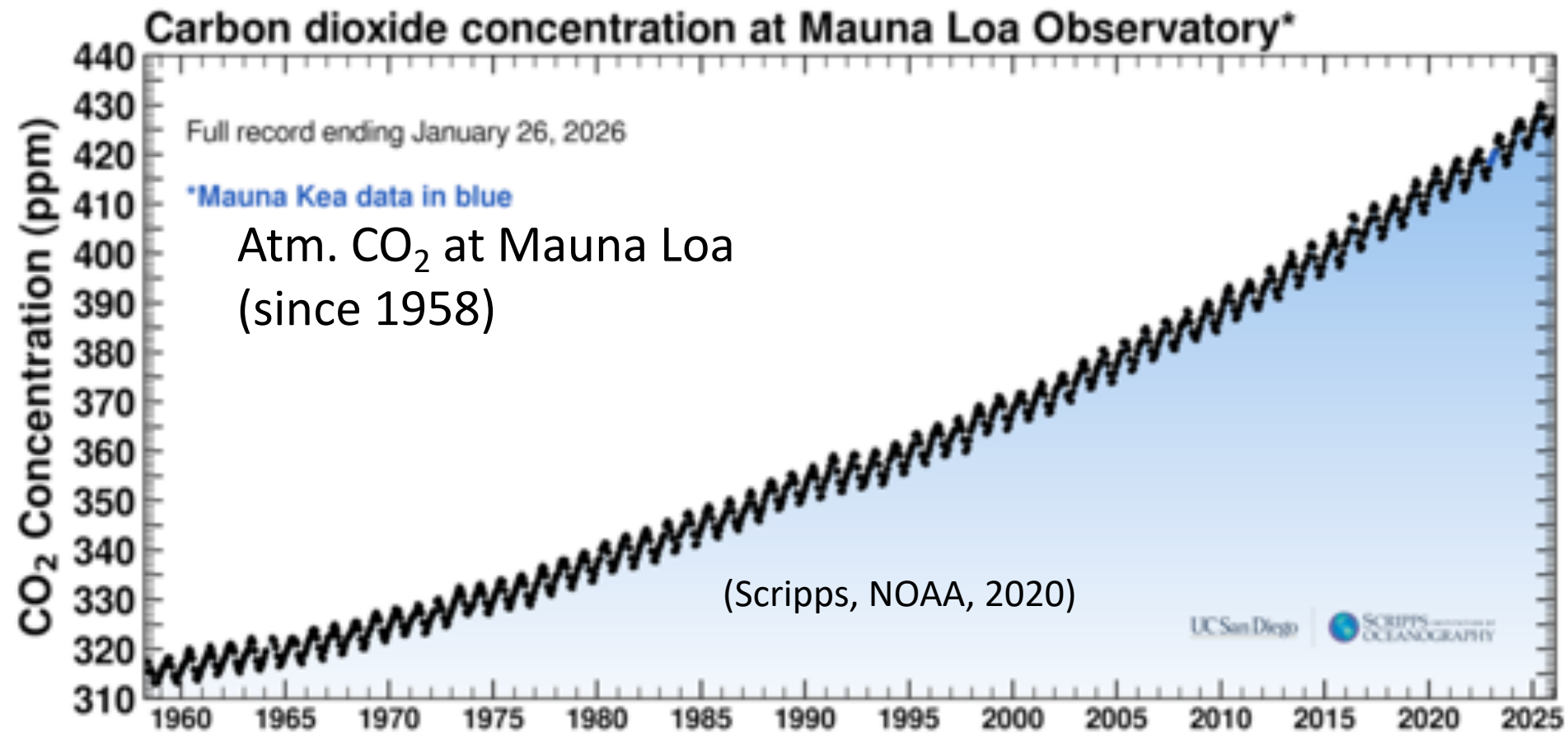
Directeur adj. Institut Pierre Simon Laplace
Dpt Géosciences - Ecole Normale Supérieure

Société Philomathique
26 Janvier 2026

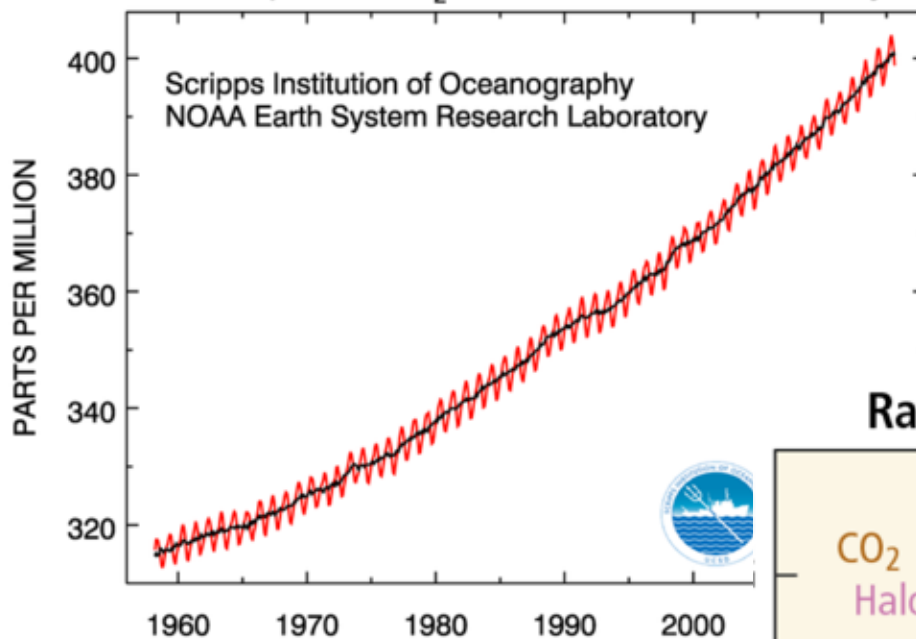
Le CO₂ atmosphérique a dépassé 430 ppm...

La courbe de Keeling (<https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/>)

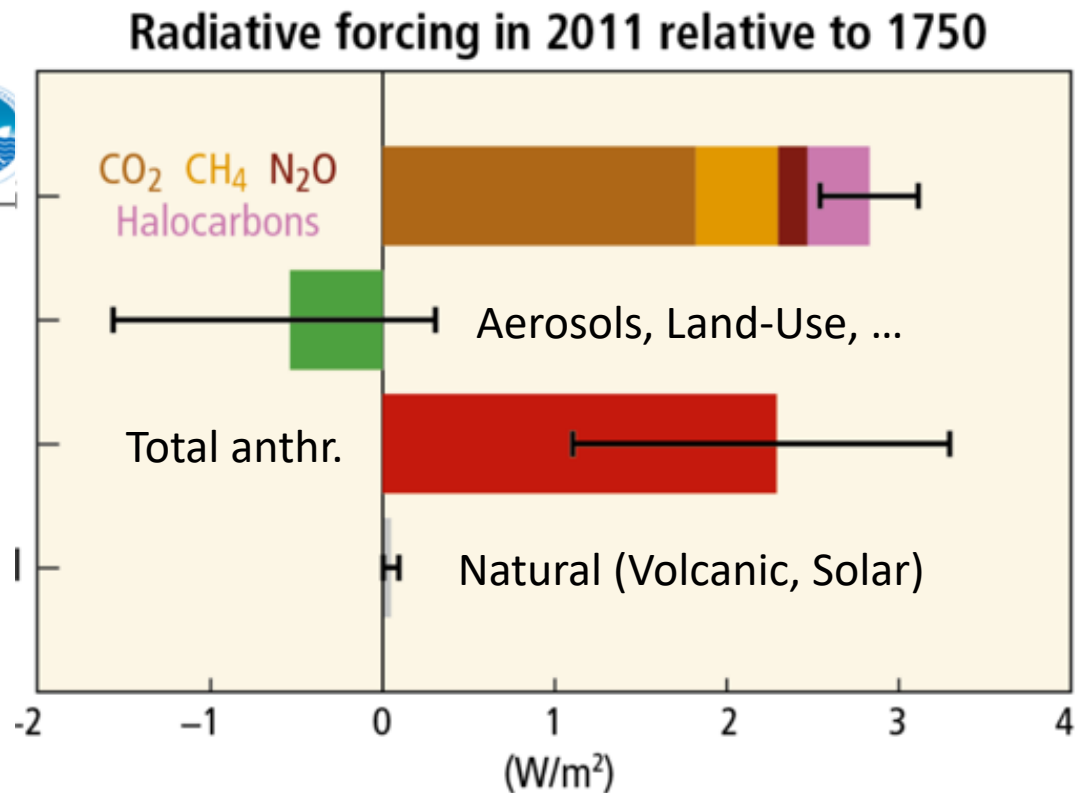
*Latest CO₂ reading: 428.27 ppm



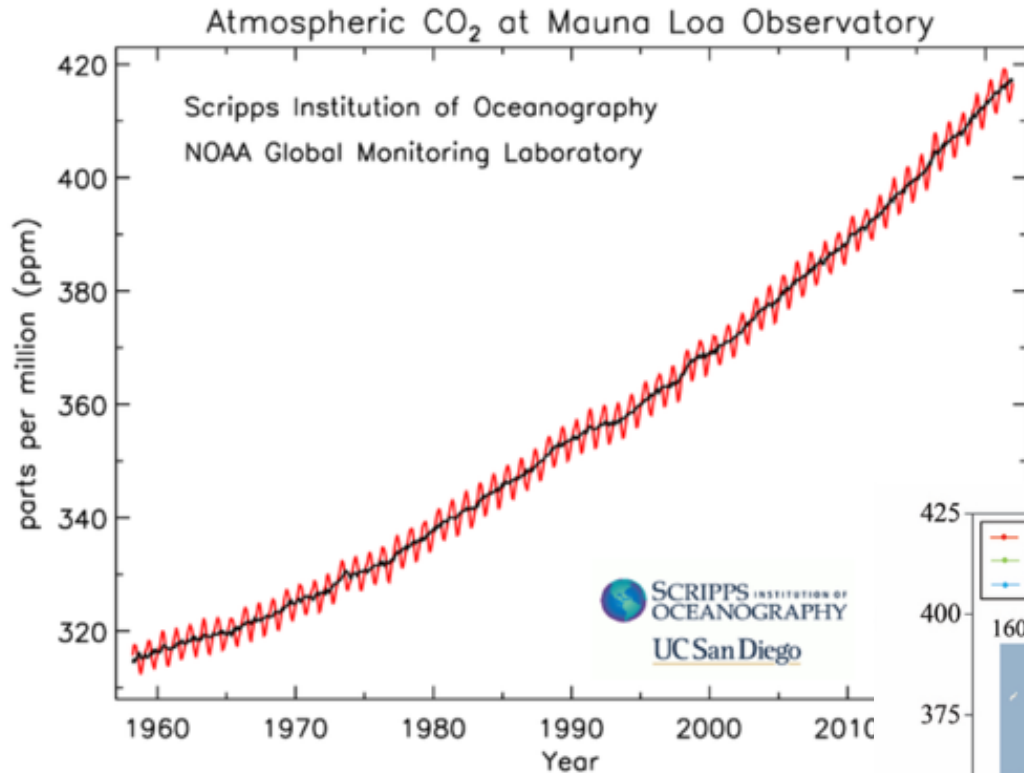
CO₂ et changement climatique



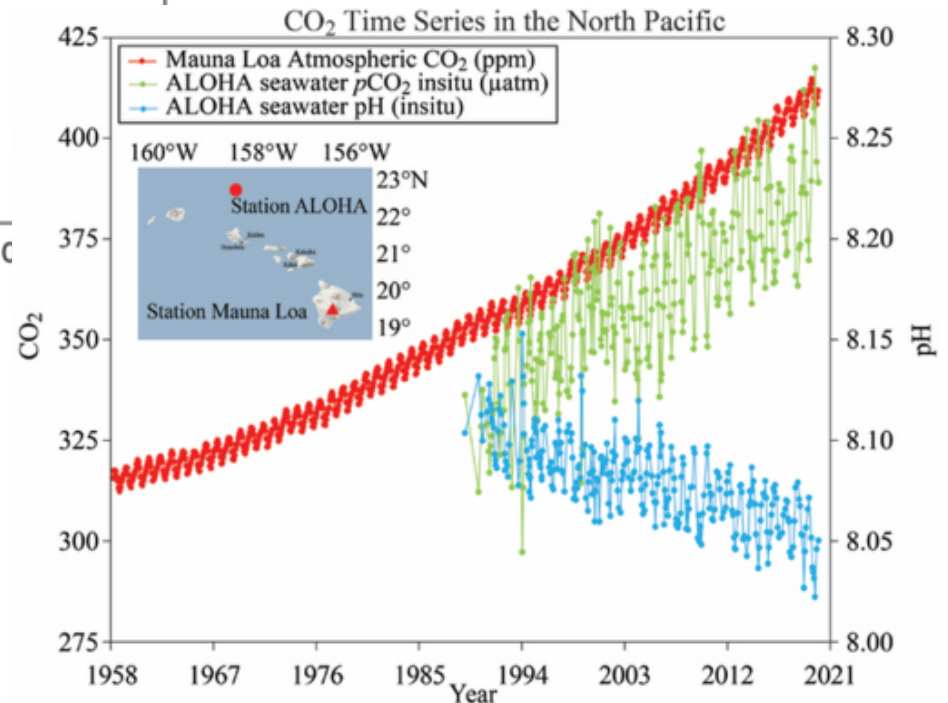
Le CO₂ est le premier facteur expliquant le réchauffement des derniers 250 ans



CO₂ et acidification des océans



L'augmentation du CO₂
est la principale cause
de l'acidification des
océans



Data: Mauna Loa (http://ftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/co2_mm_mlo.txt) ALOHA (<http://hawaii.soest.hawaii.edu/hot-hot-dogs/bxtraction.html>)
ALOHA pH & pCO₂ are calculated at in-situ temperature from DIC & TA (measured from samples collected on Hawaii Ocean Times-series (HOT) cruises)
using co2sys (Pelletier, v25b06) with constants: Lueker et al. 2000, KSO4: Dickson, Total boron: Lee et al. 2010, & KF: seacarb



Bilan carbone des dernières décennies

Emissions anthropiques

Puits de carbone naturels



Projections pour le 21ème siècle

Rétroaction climat carbone

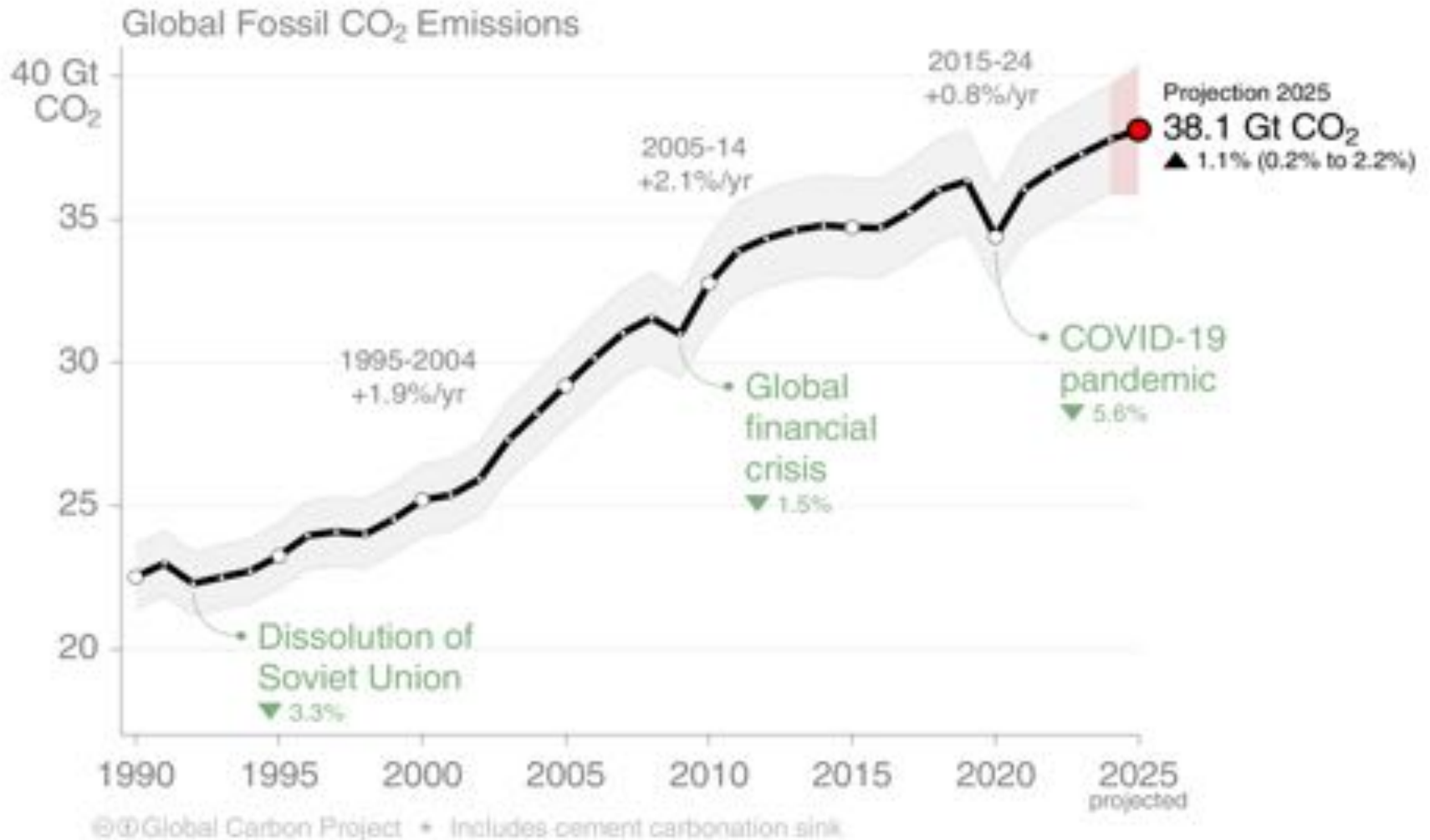
Emissions compatibles



Méthodes d'élimination du CO₂ atmosphérique

Emissions anthropiques

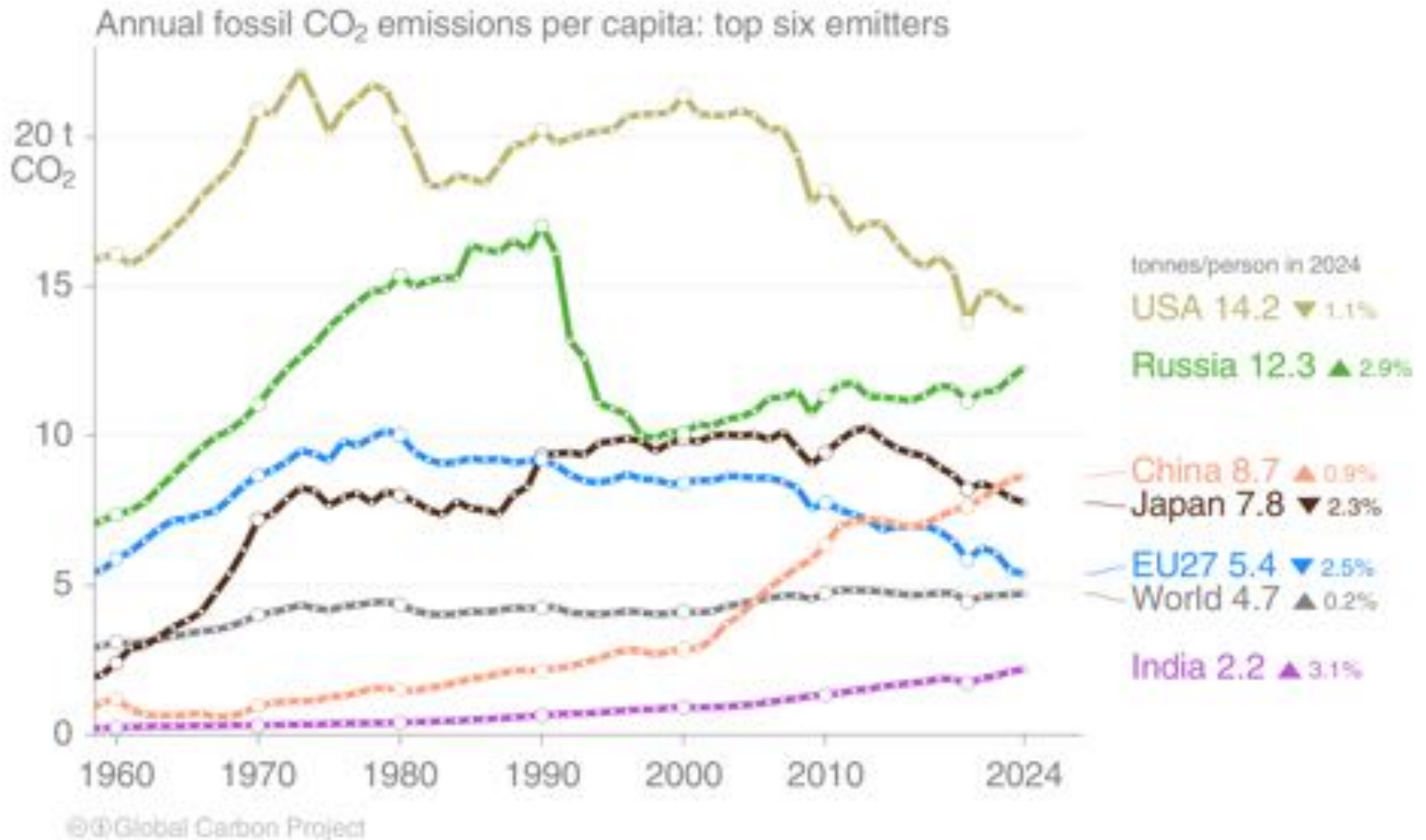
Fossil Fuel & Cement CO₂ Emissions



Source: Friedlingstein et al. 2025 ; Global Carbon Budget 2025

Emissions anthropiques

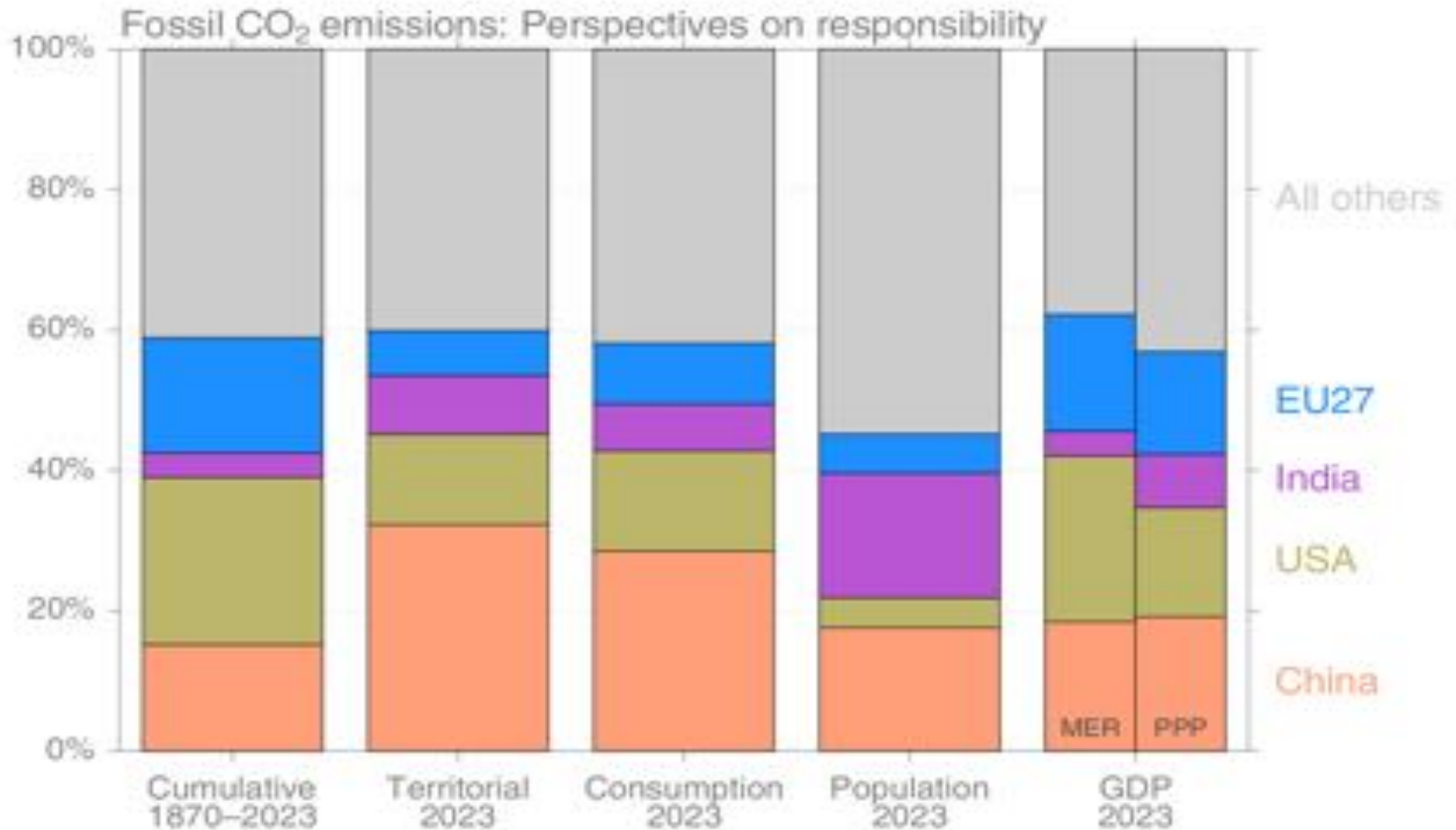
Fossil Fuel & Cement CO₂ Emissions



Source: Friedlingstein et al. 2025 ; Global Carbon Budget 2025

Emissions anthropiques

Emissions – responsabilités différenciées



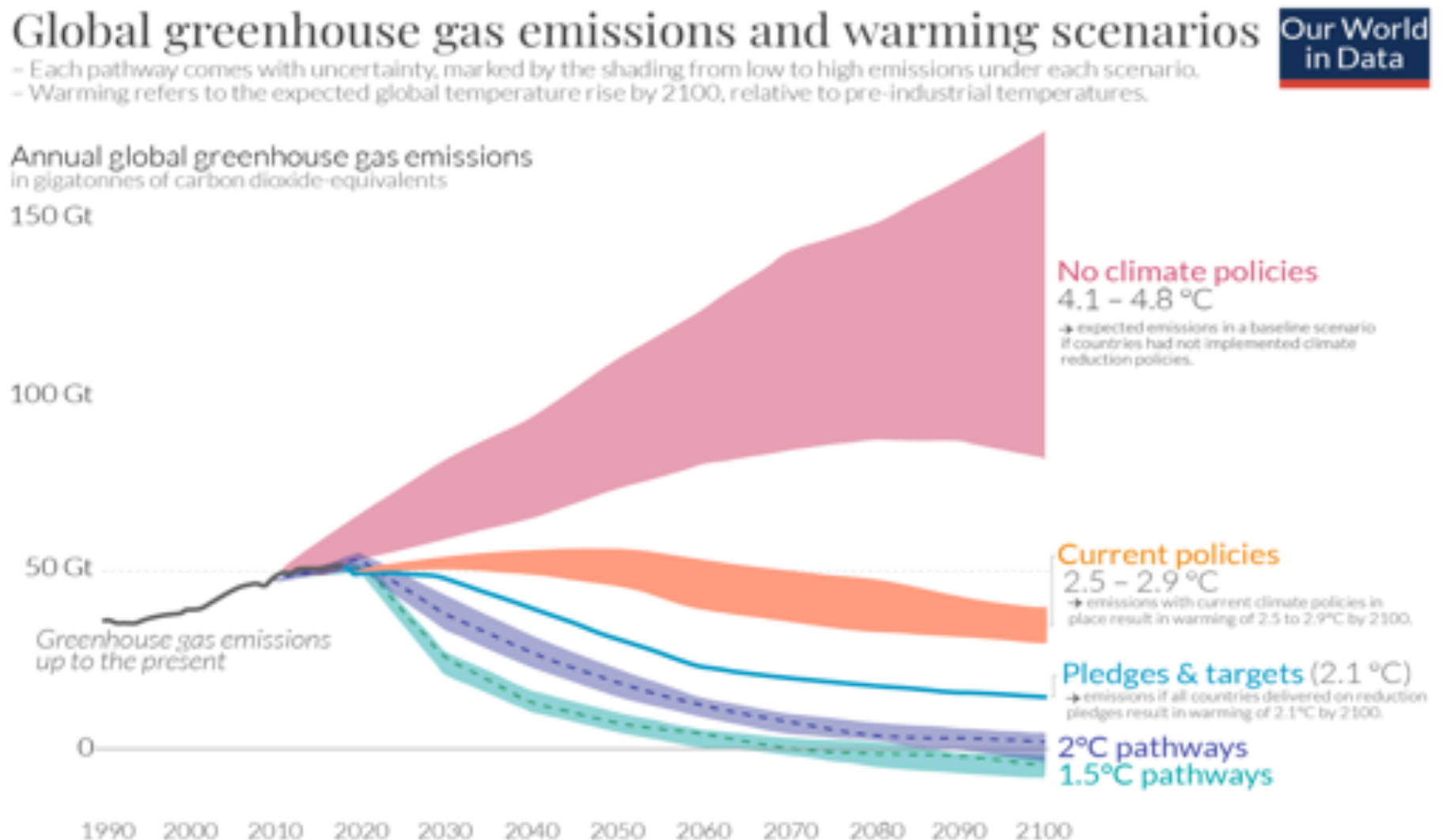
© Global Carbon Project

GDP: Gross Domestic Product in Market Exchange Rates (MER) and Purchasing Power Parity (PPP)

Source: [United Nations](#); [Friedlingstein et al 2023](#); [Global Carbon Project 2023](#)

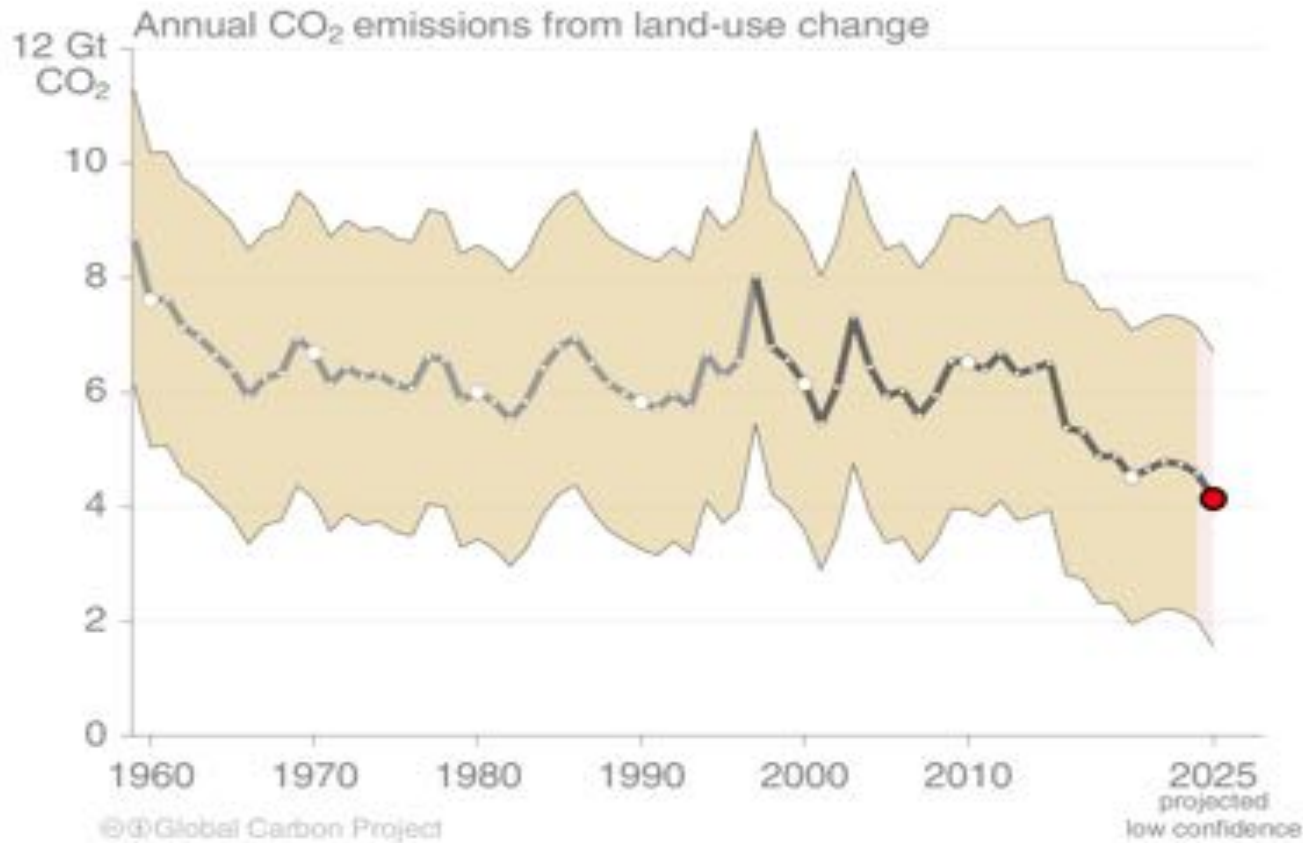
Emissions anthropiques

Emissions : comparison to scenarios



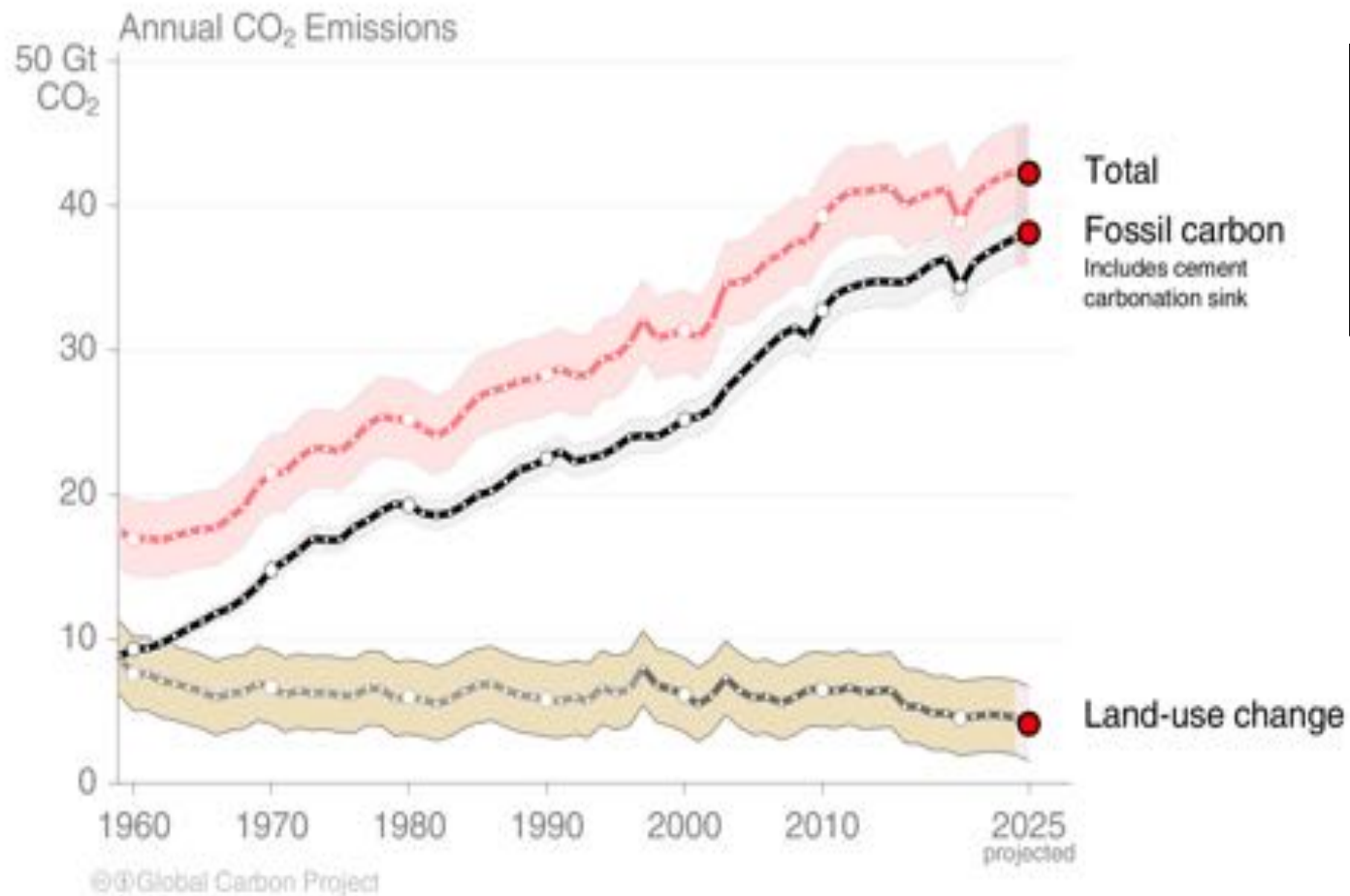
Emissions anthropiques

... liées aux changements d'utilisation des sols



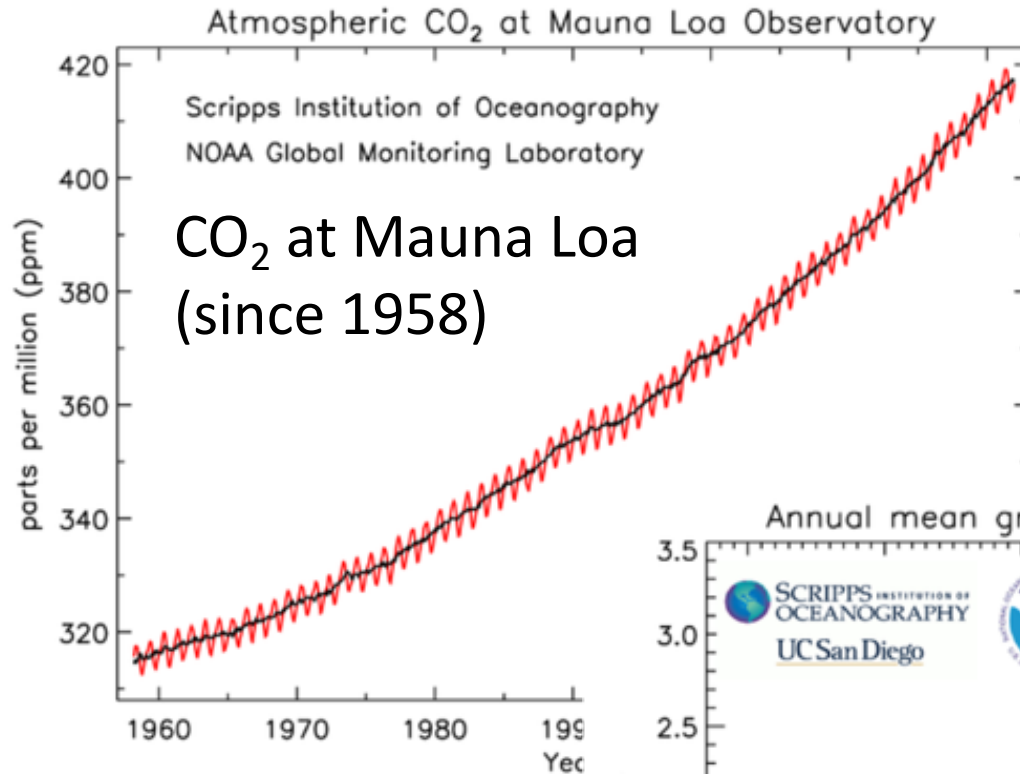
Estimates from three bookkeeping models
Source: [Friedlingstein et al 2025](#); [Global Carbon Project 2025](#)

Emissions anthropiques

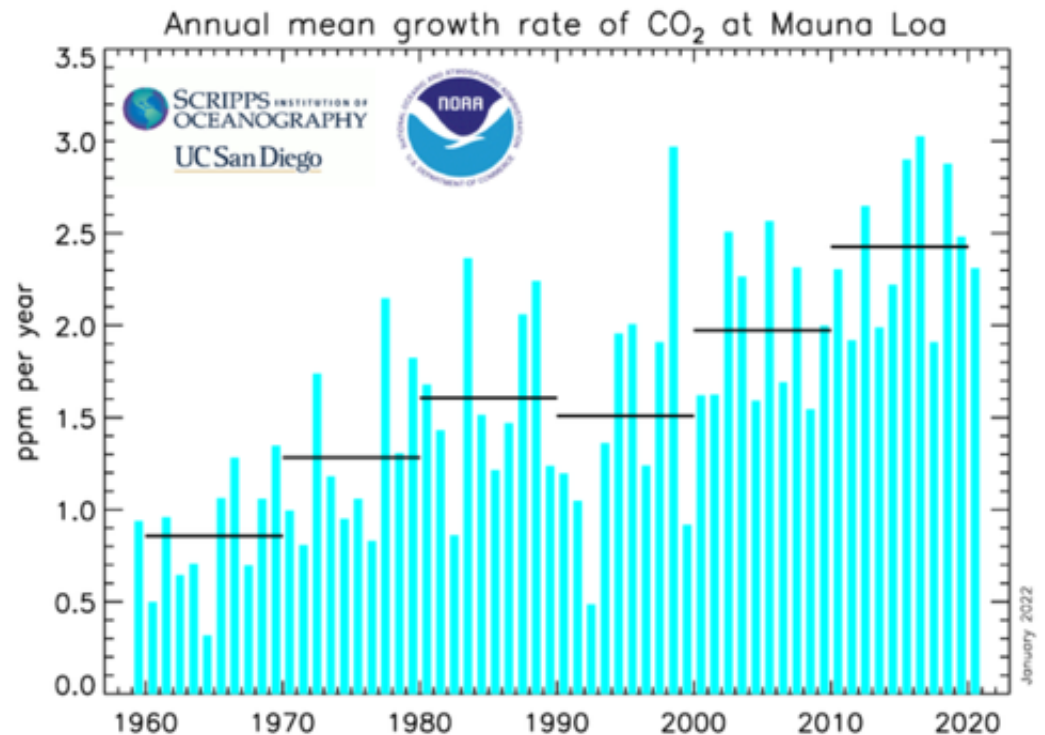


Source:; Global Carbon Budget 2025

Depuis l'atmosphère...

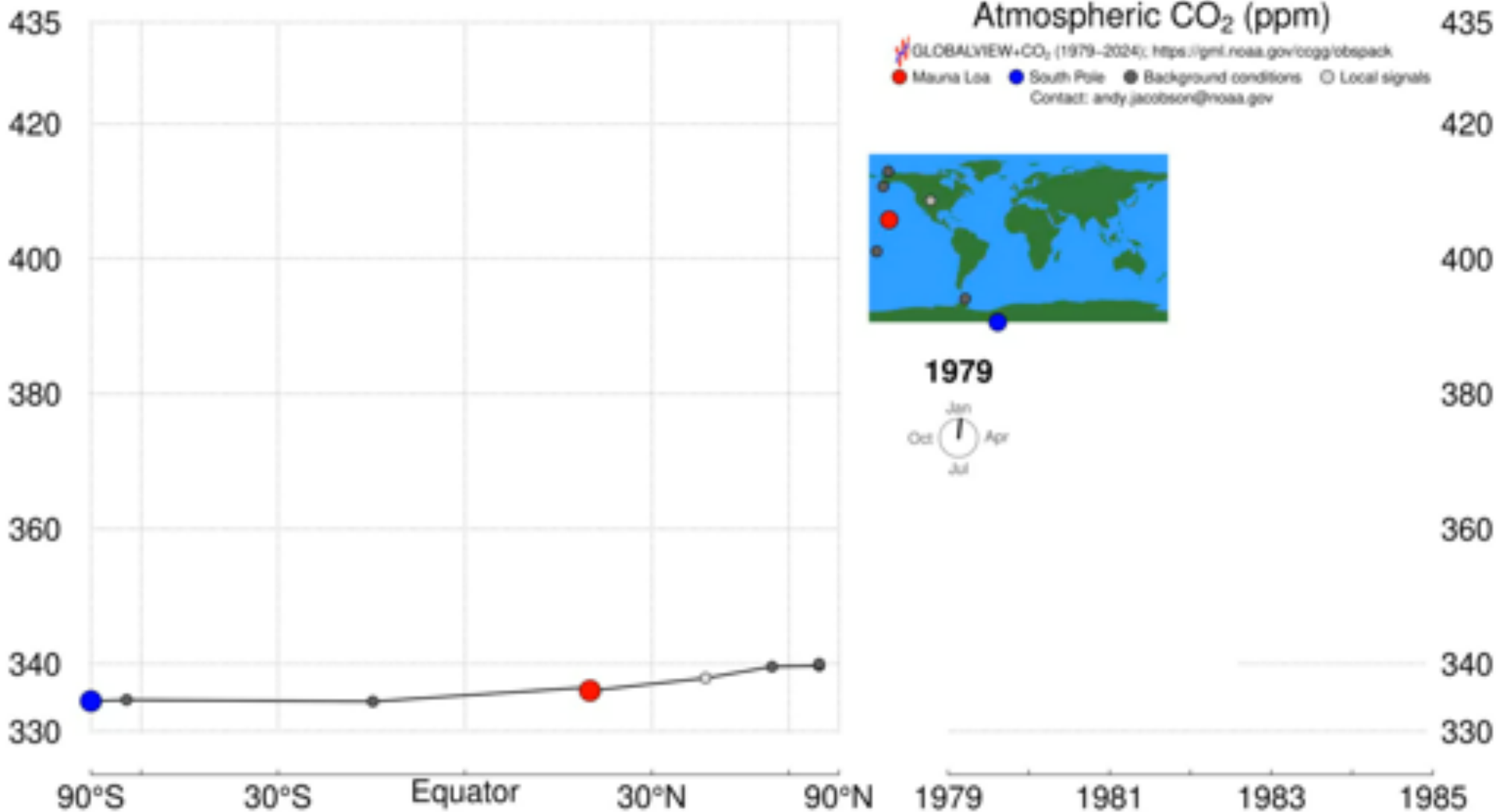


CO₂ growth rate



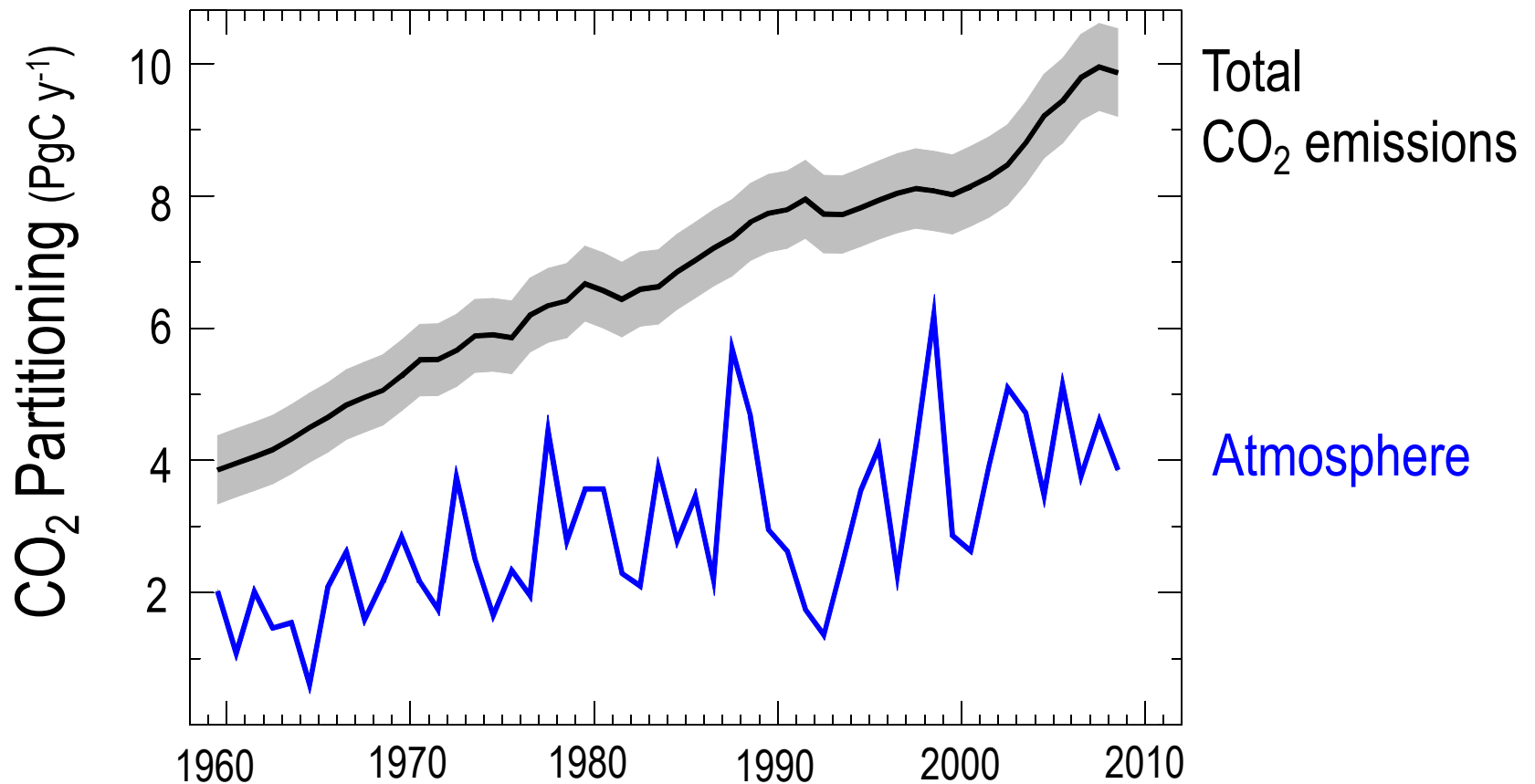
Depuis l'atmosphère...

<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/globalview/>

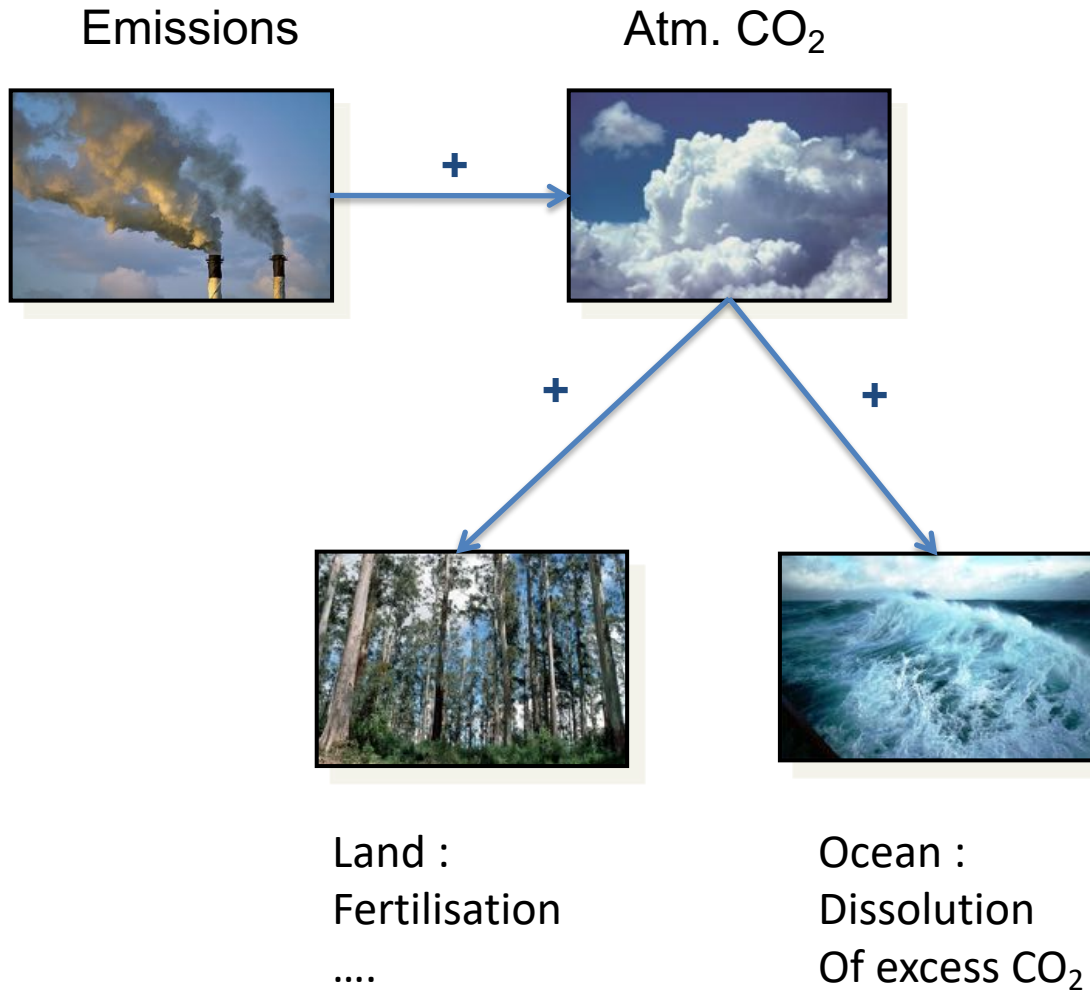


Emissions vs. Taux de croissance dans l'atm.

Seule la moitié des émissions s'accumulent dans l'atmosphère



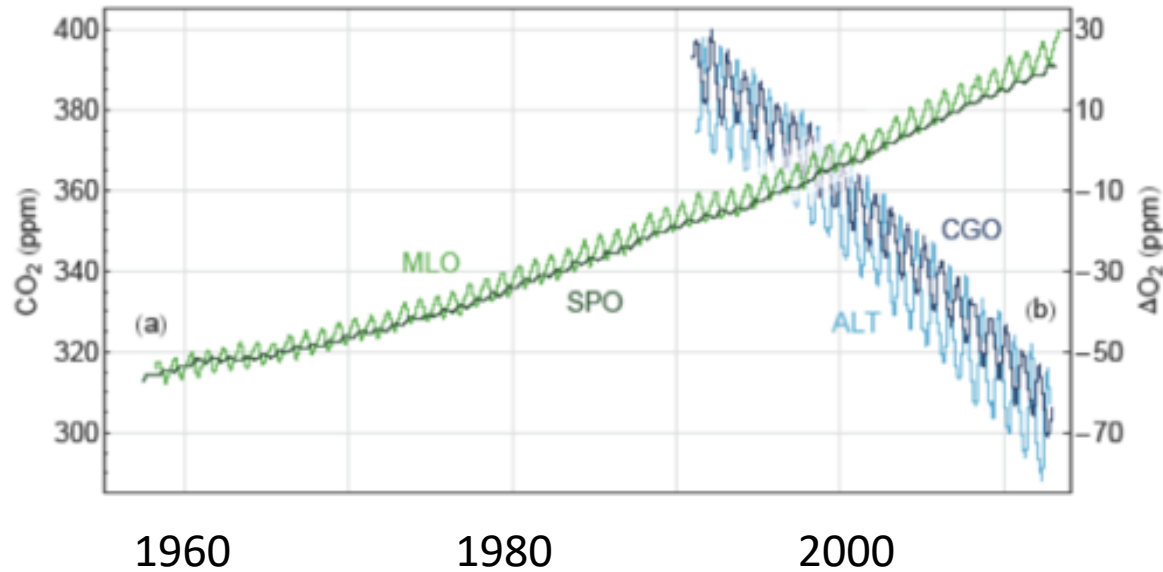
Les puits de carbone



$$\Delta\text{CO}_2 = \text{Emissions} - F_{\text{ocean}} - F_{\text{land}}$$

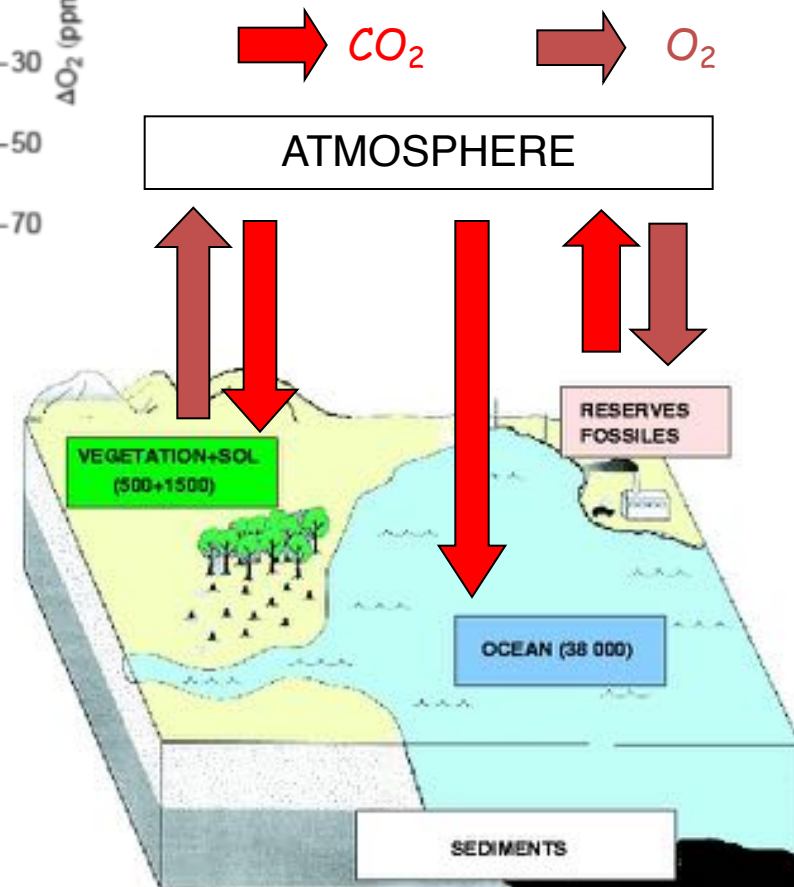
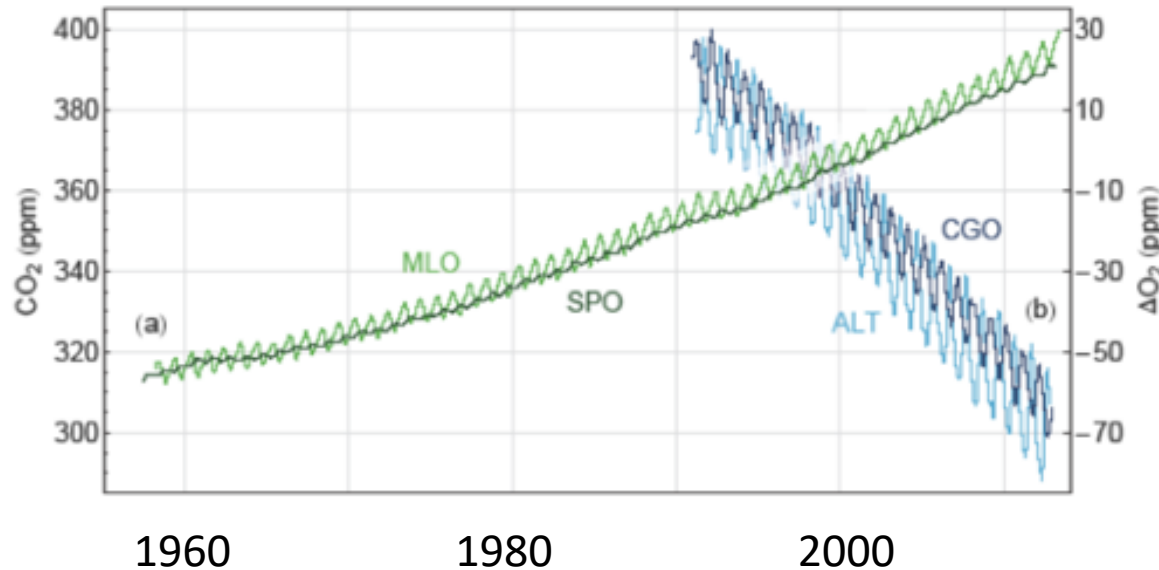
Partitionner les puits

Use of O₂ atm. observations to constrain the carbon cycle (Keeling and Shertz, 1992)



Partitionner les puits

Use of O₂ atm. observations to constrain the carbon cycle (Keeling and Shertz, 1992)

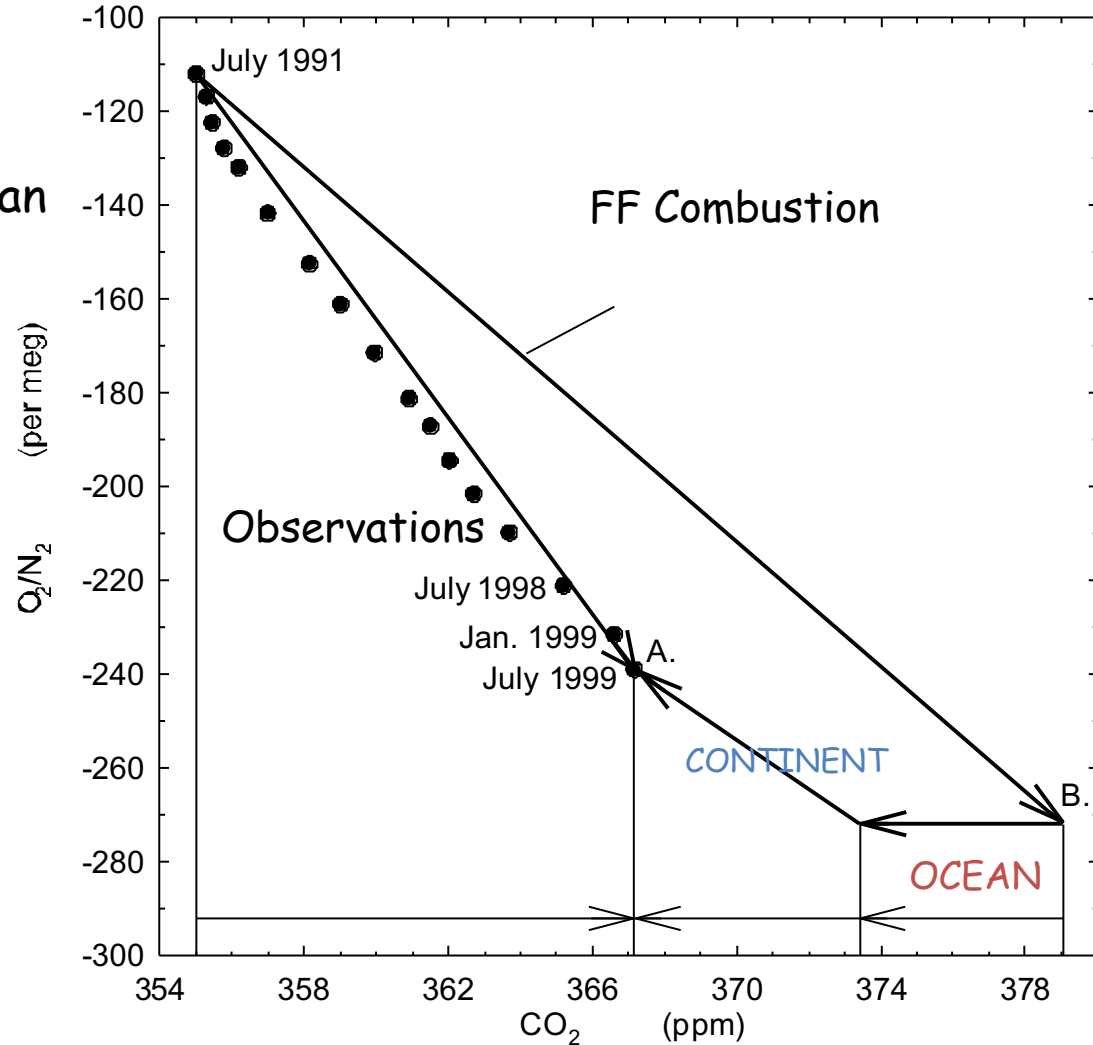


Partitionner les puits

Use of O₂ atm. observations to constrain the carbon cycle (Keeling and Shertz, 1992)

$$\Delta\text{CO}_2 = \text{FF} - \text{Cont.} - \text{Ocean}$$

$$\Delta\text{O}_2 = \alpha \text{FF} - \beta \text{Cont.}$$



Le bilan carbone de la dernière décennie (2015-2024)

Sources = Sinks

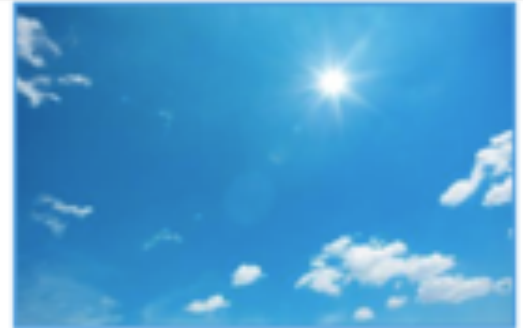


35.9 GtCO₂/yr
88%



12%
5.0 GtCO₂/yr

20.4 GtCO₂/yr
50%



21%
8.7 GtCO₂/yr



29%
11.8 GtCO₂/yr



Budget Imbalance:

(the difference between estimated sources & sinks)

<1%

0.1 GtCO₂/yr

Source: [Friedlingstein et al 2025](#); [Global Carbon Project 2025](#)

Le puits de carbone océanique

Cycle Naturel du Carbone

→ Largement piloté par la biologie

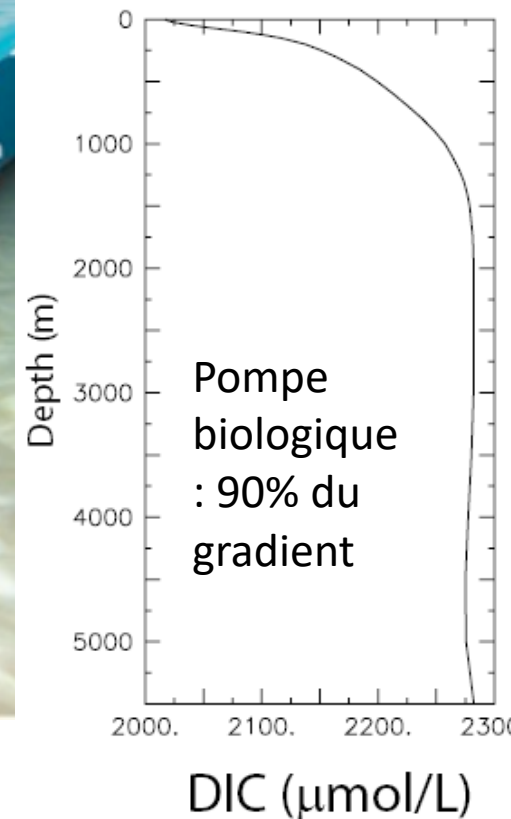
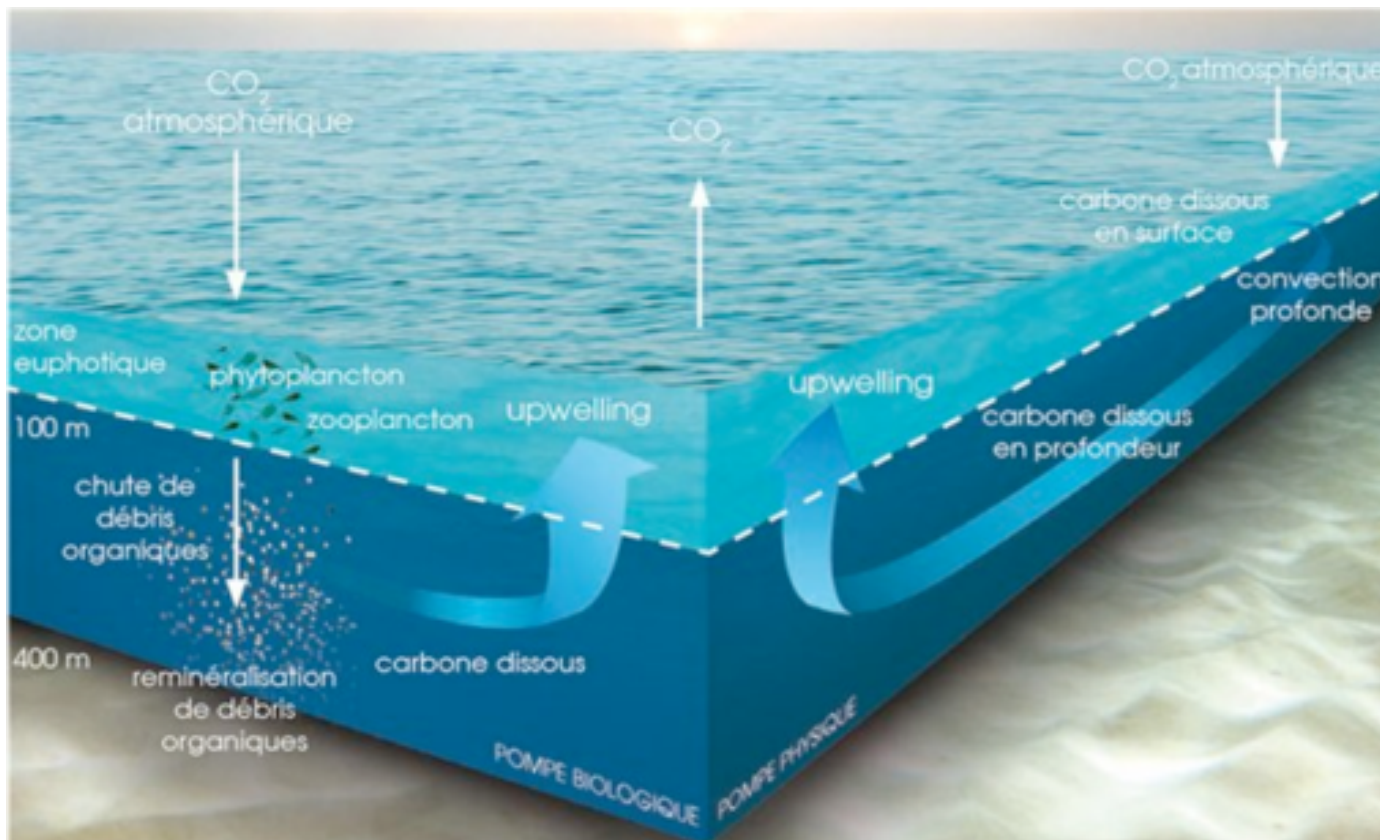
Chimie des carbonates, Pompe biologique / Pompe physique

Dissolved
Inorganic
Carbon (DIC)

H_2CO_3 : 0.5 %

HCO_3^- : 88.6 %

CO_3^{2-} : 10.9 %



Le puits de carbone océanique

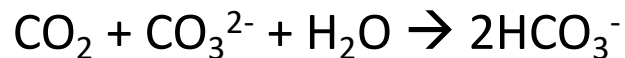
→ s'explique par des processus physico-chimiques

Le principal moteur du **puits** est l'augmentation du CO_2 atm. (et de la $\Delta p\text{CO}_2$ associée)

$$\text{Flux} = k_w S_{\text{CO}_2} \Delta p\text{CO}_2$$

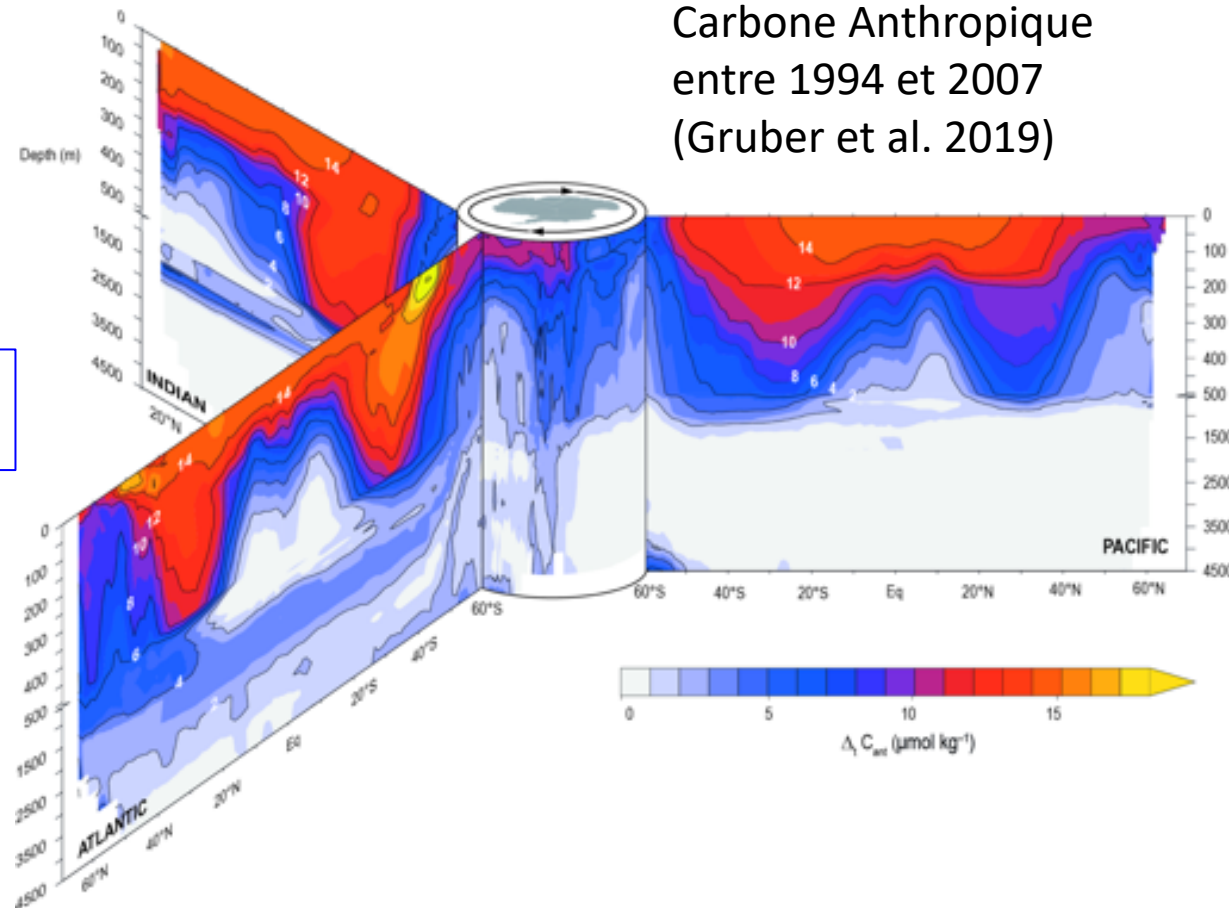
Mais ce puits dépend :

- de la solubilité du CO_2
- de l'effet « tampon » / chimie des carbonates



- du transfert du CO_2 anthropique vers les eaux de subsurface / en profondeur

Carbone Anthropique
entre 1994 et 2007
(Gruber et al. 2019)





Bilan carbone des dernières décennies
Emissions anthropiques
Puits de carbone naturels

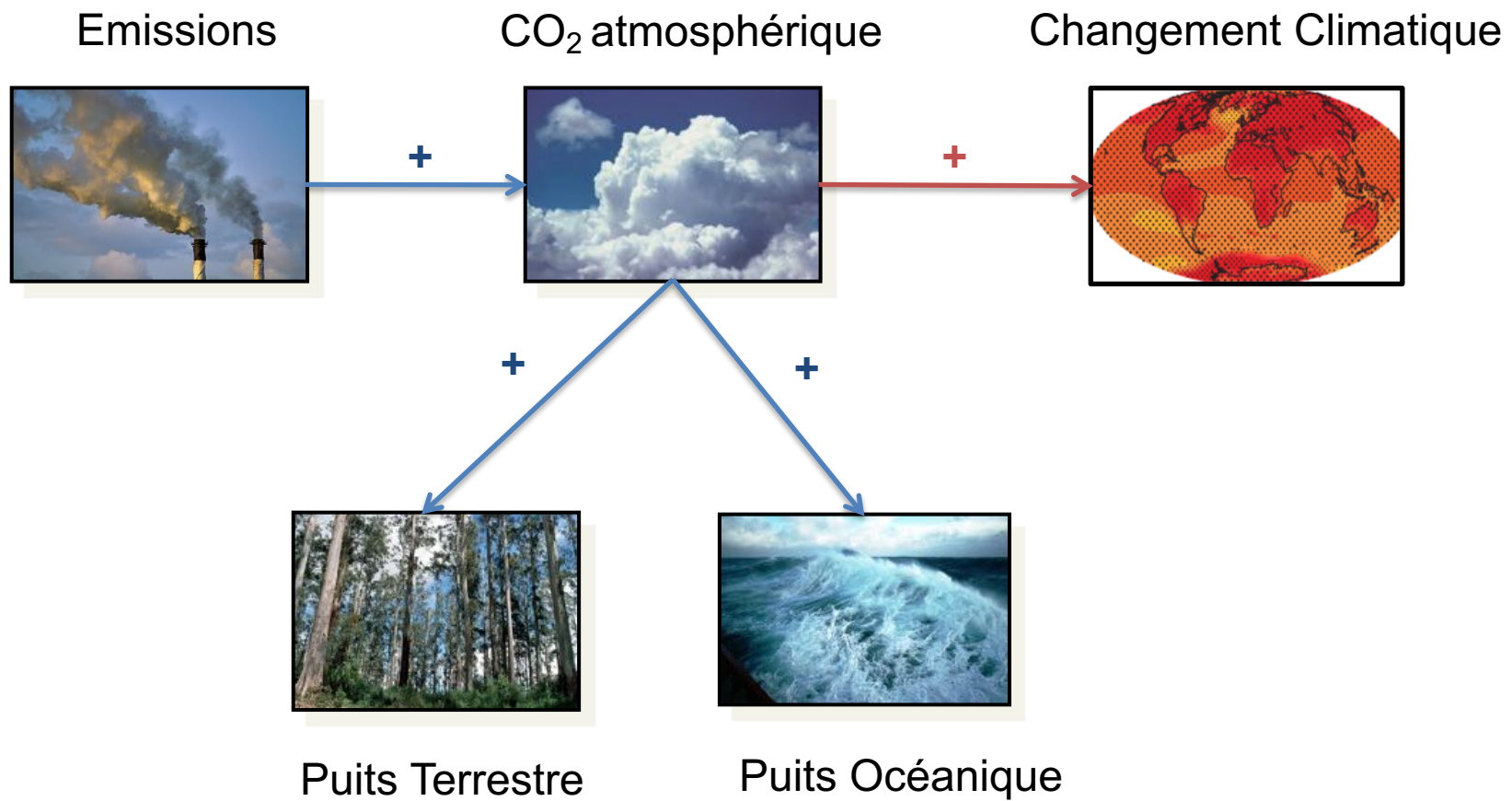


Projections pour le 21ème siècle
Couplage climat carbone
Emissions compatibles

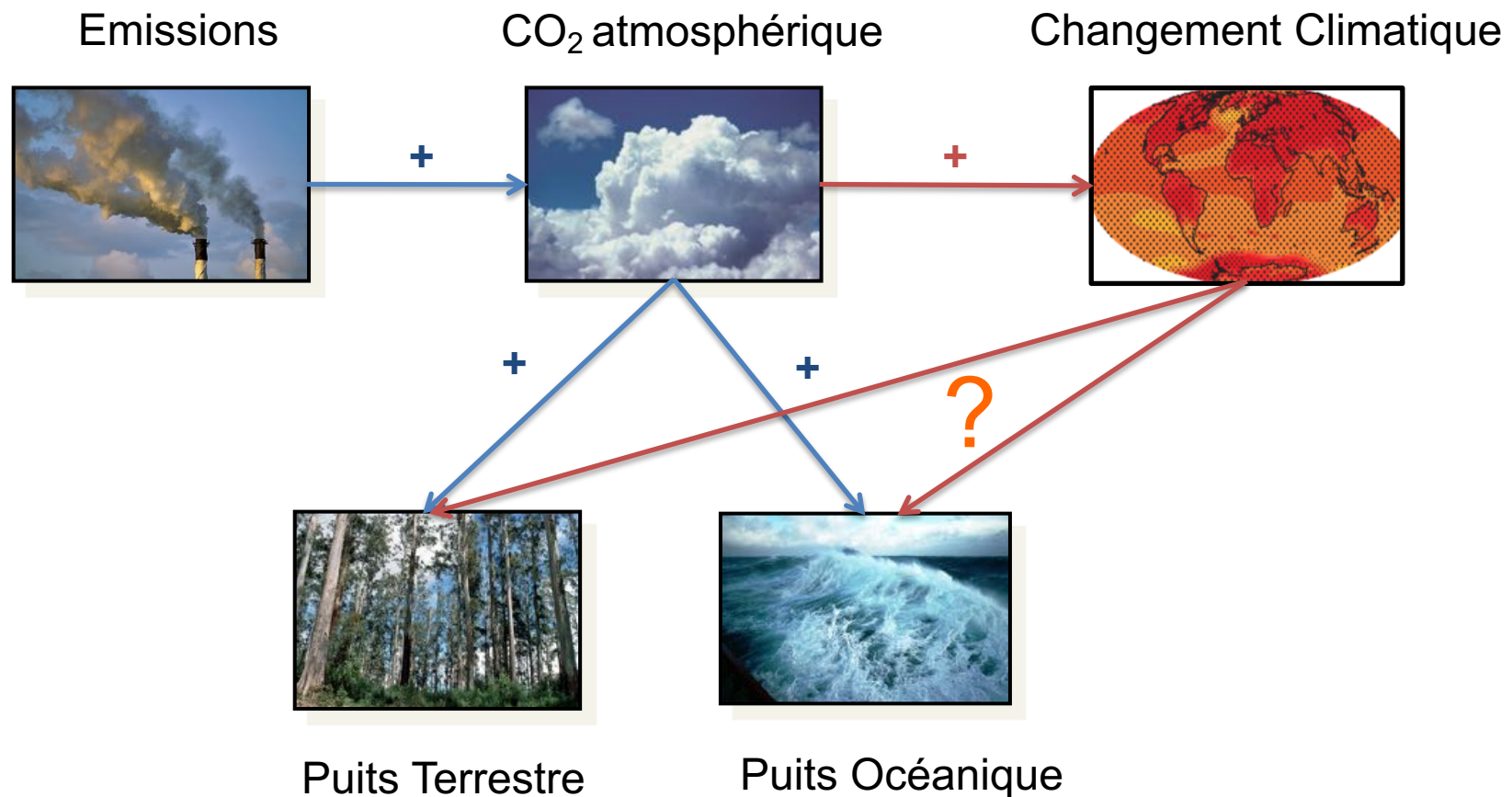


Méthodes d'élimination du CO₂ atmosphérique

Une rétroaction climat-carbone ?



Une rétroaction climat-carbone ?

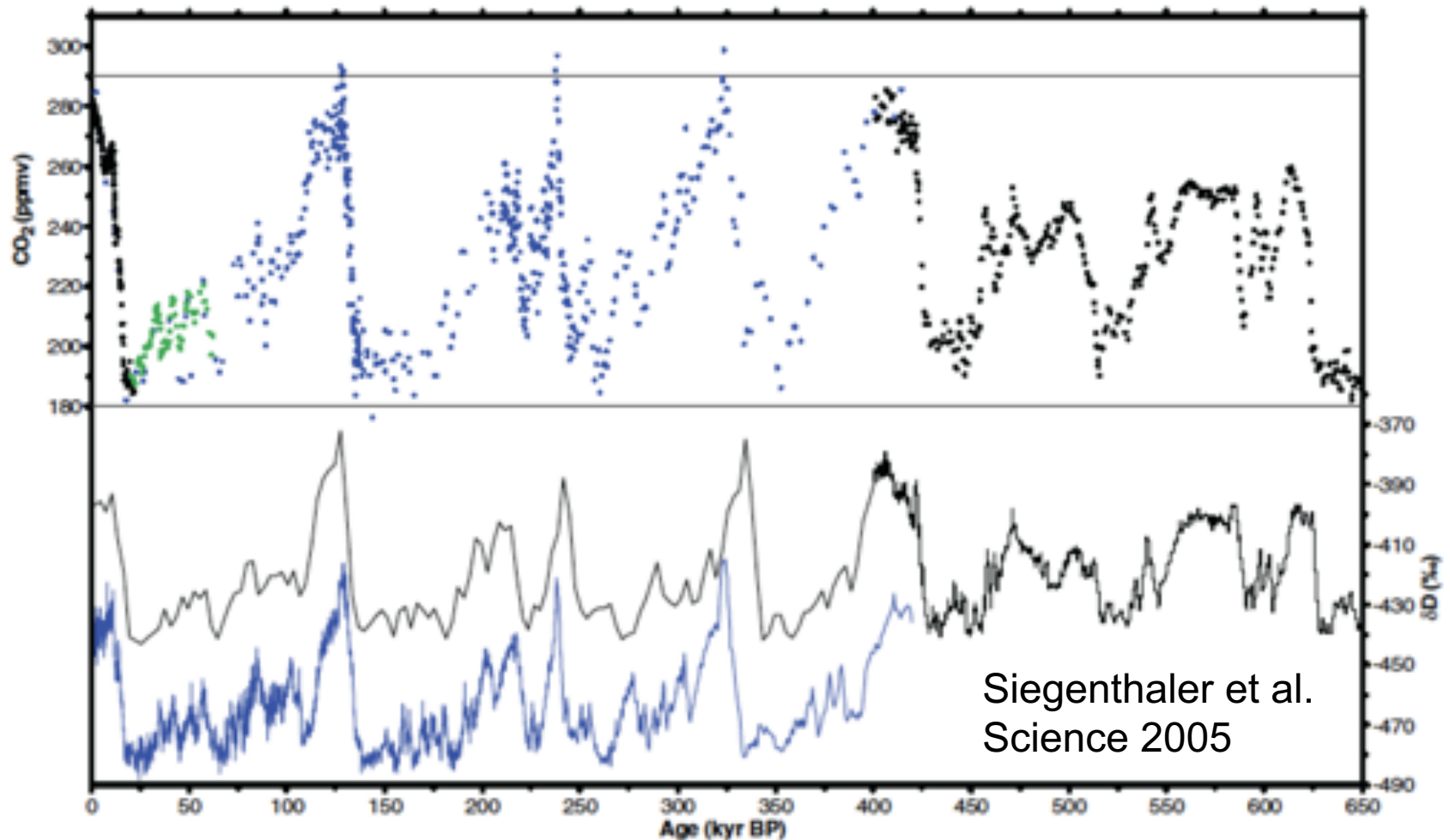


By altering the efficiency of carbon sinks, climate change affects the concentration of CO₂

Positive or negative feedback ?

Des indices sur de multiples échelles de temps

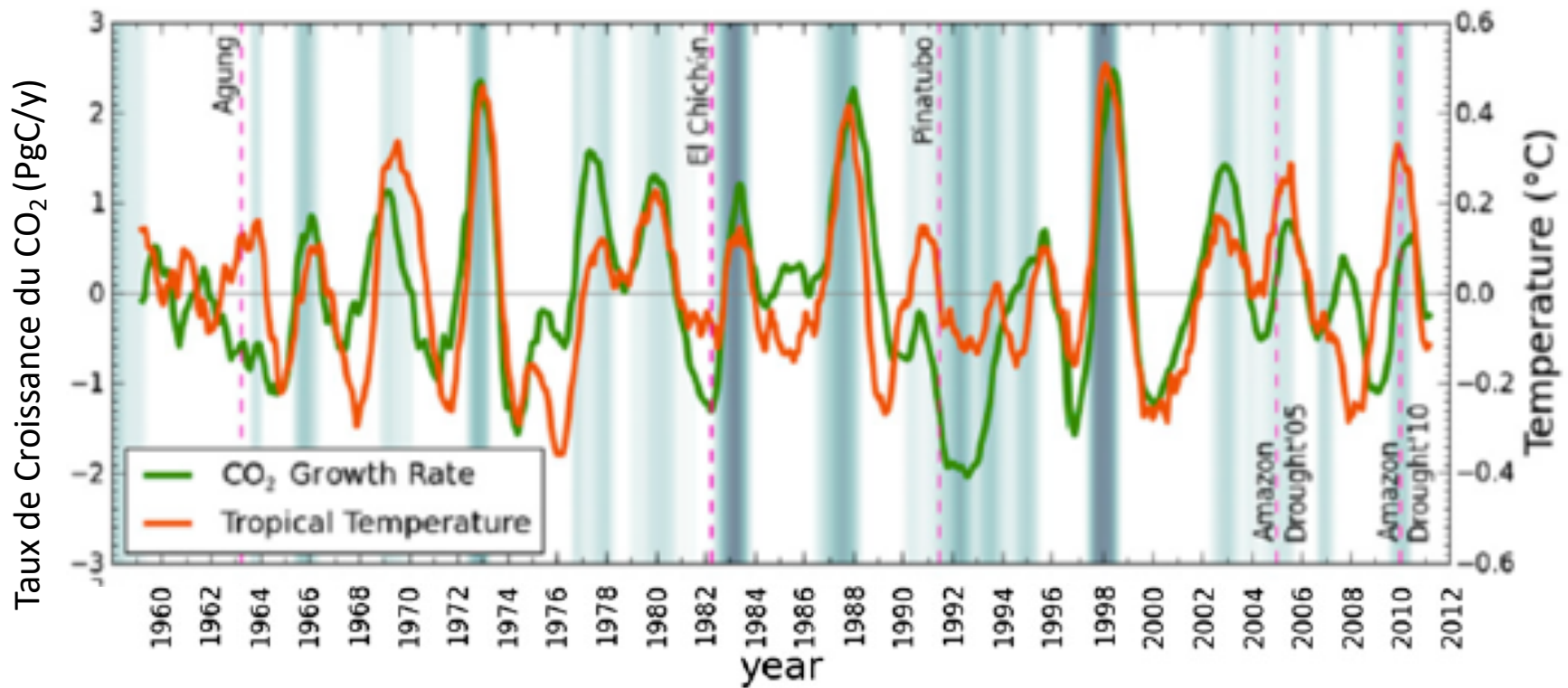
Glacial - Interglacial: CO₂ & Climate



→ Cycles G-IG, Variabilité des échanges avec l'océan, CO₂ atmosphérique

Des indices sur de multiples échelles de temps

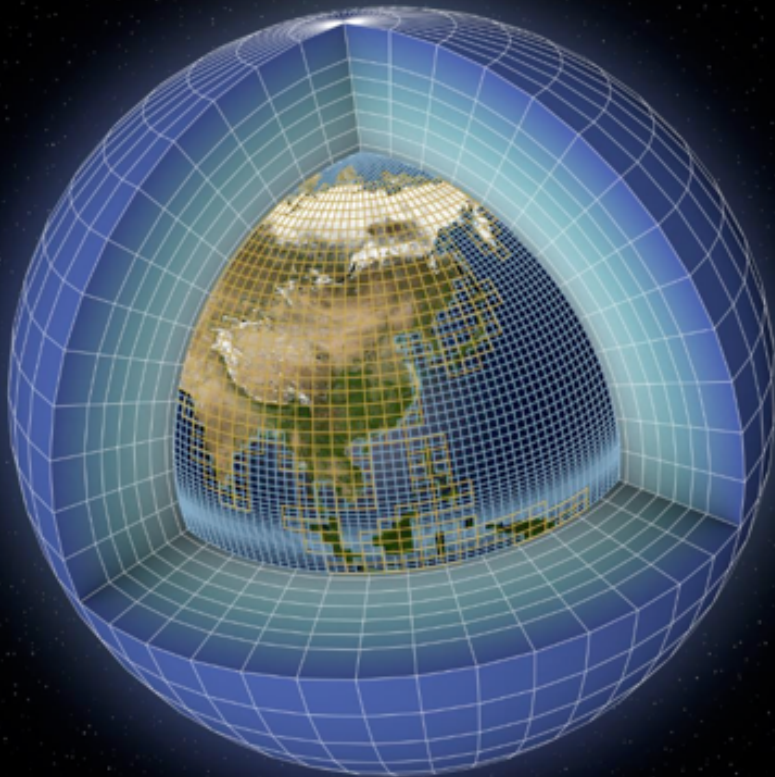
Interannual Variability: CO₂ & El Niño



Wang et al. PNAS 2013

→ ENSO, Variabilité des échanges avec la biosphère terrestre, CO₂ atmosphérique

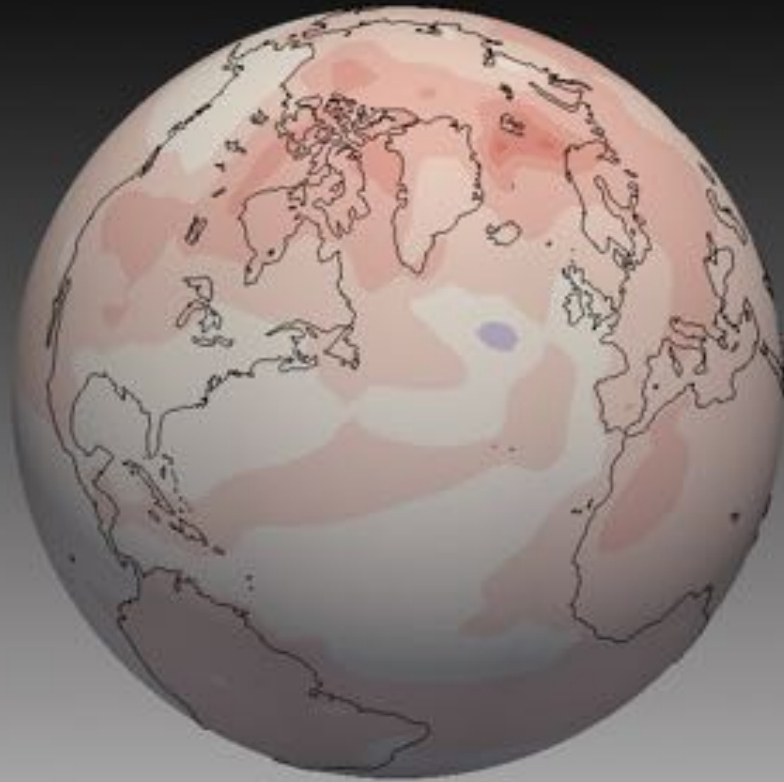
Projections couplées climat-carbone



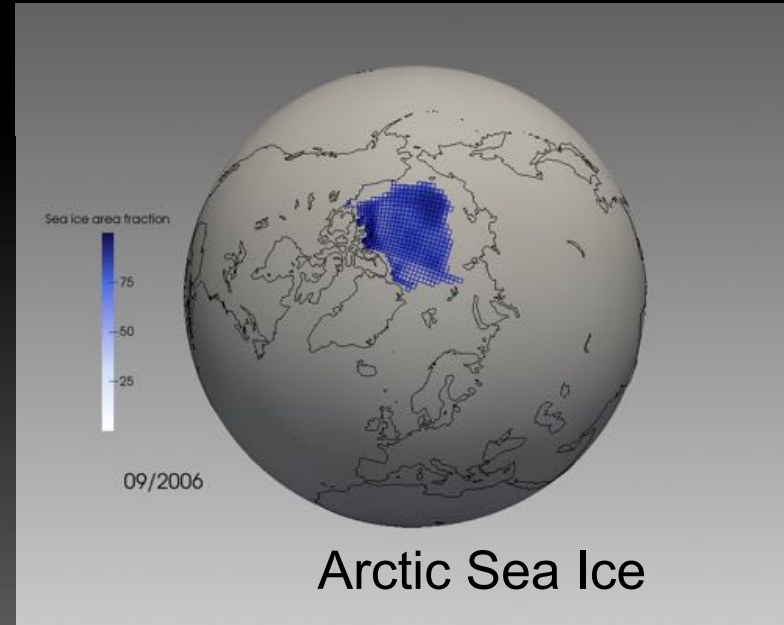
Modèles climatiques
et super-calculateurs



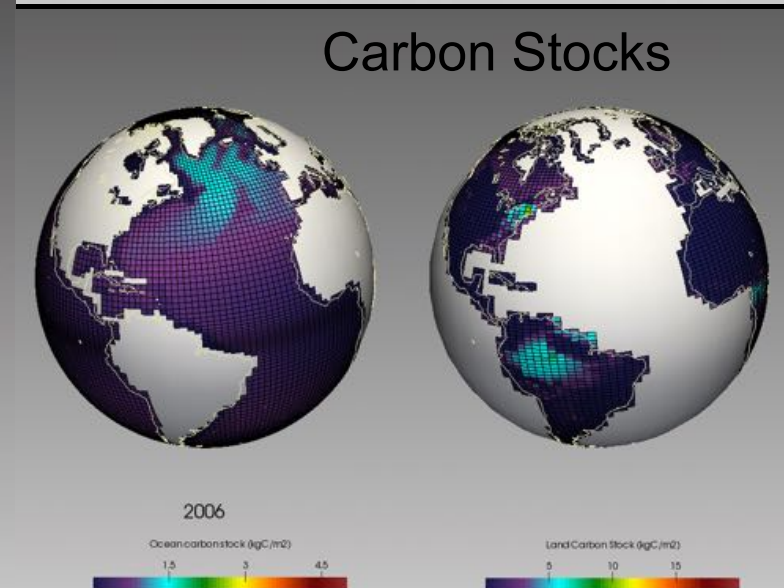
Projections Climatiques



Anomalies
Température de Surface



Arctic Sea Ice



Carbon Stocks

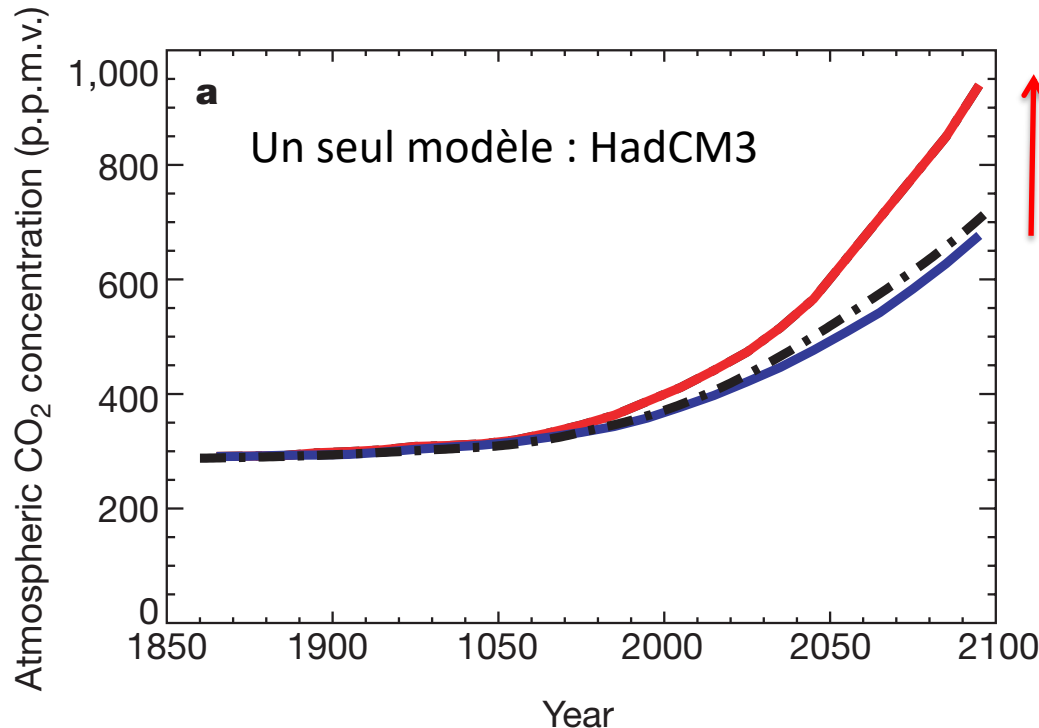
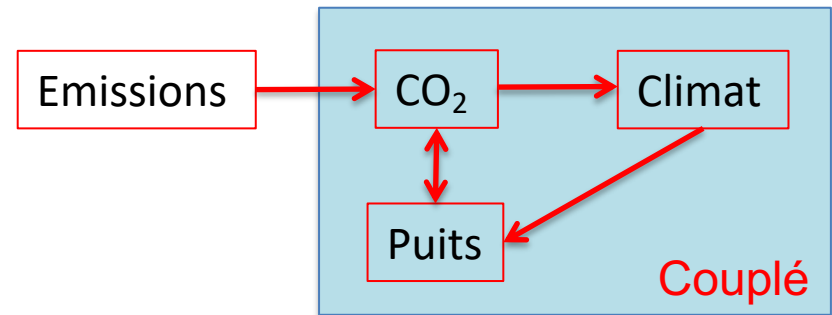
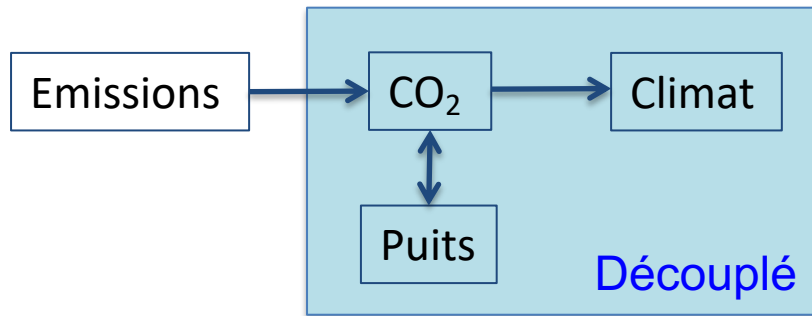
2006

Ocean carbon stock (kgC/m2)

Land Carbon Stock (kgC/m2)

Quelle amplitude pour la rétroaction climat-carbone ?

Les premières simulations couplées climat-carbone : Cox et al. Nature 2000



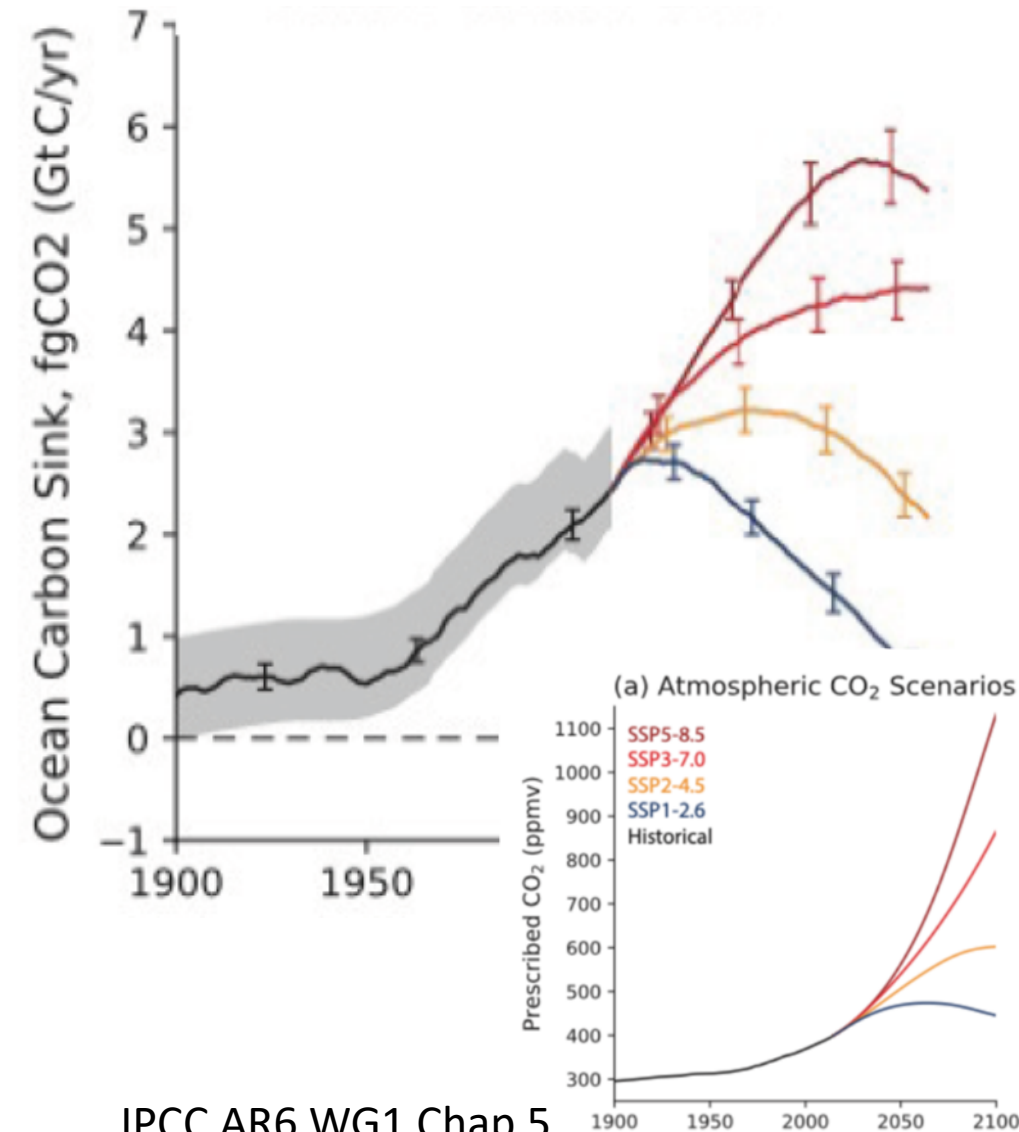
Rétroaction Positive !

Le changement climatique conduit à une contraction de la forêt amazonienne et à une perte massive du carbone du sol.

La rétroaction conduit à un CO₂ additionnel de **200 ppm** en 2100 !

Quelle amplitude pour la rétroaction climat-carbone ?

→ Le puits de carbone océanique

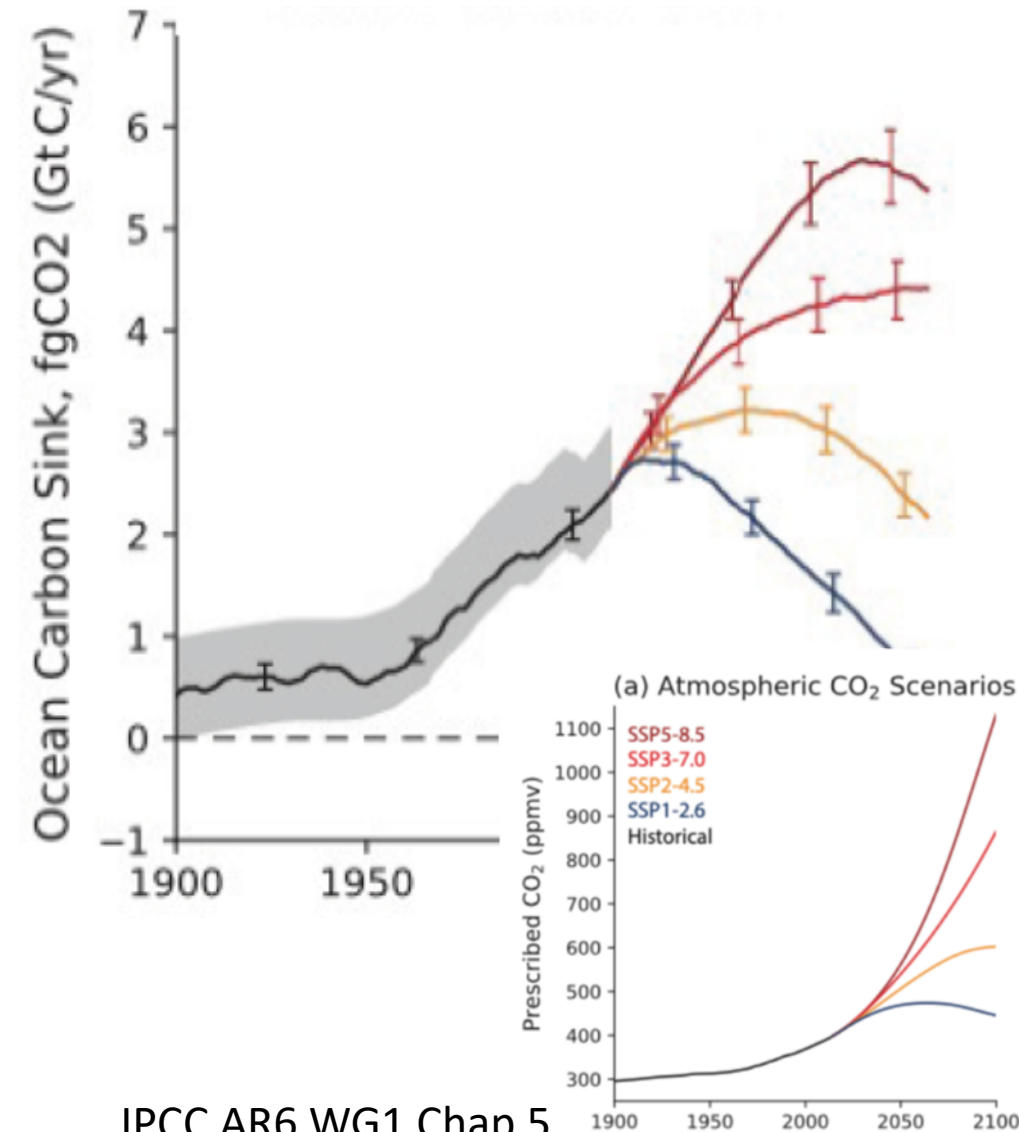


Quelle amplitude pour la rétroaction climat-carbone ?

→ Le puits de carbone océanique

Ce que nous savons :

- ① Le puits futur dépend principalement de la trajectoire du CO_2 atmosphérique.



Quelle amplitude pour la rétroaction climat-carbone ?

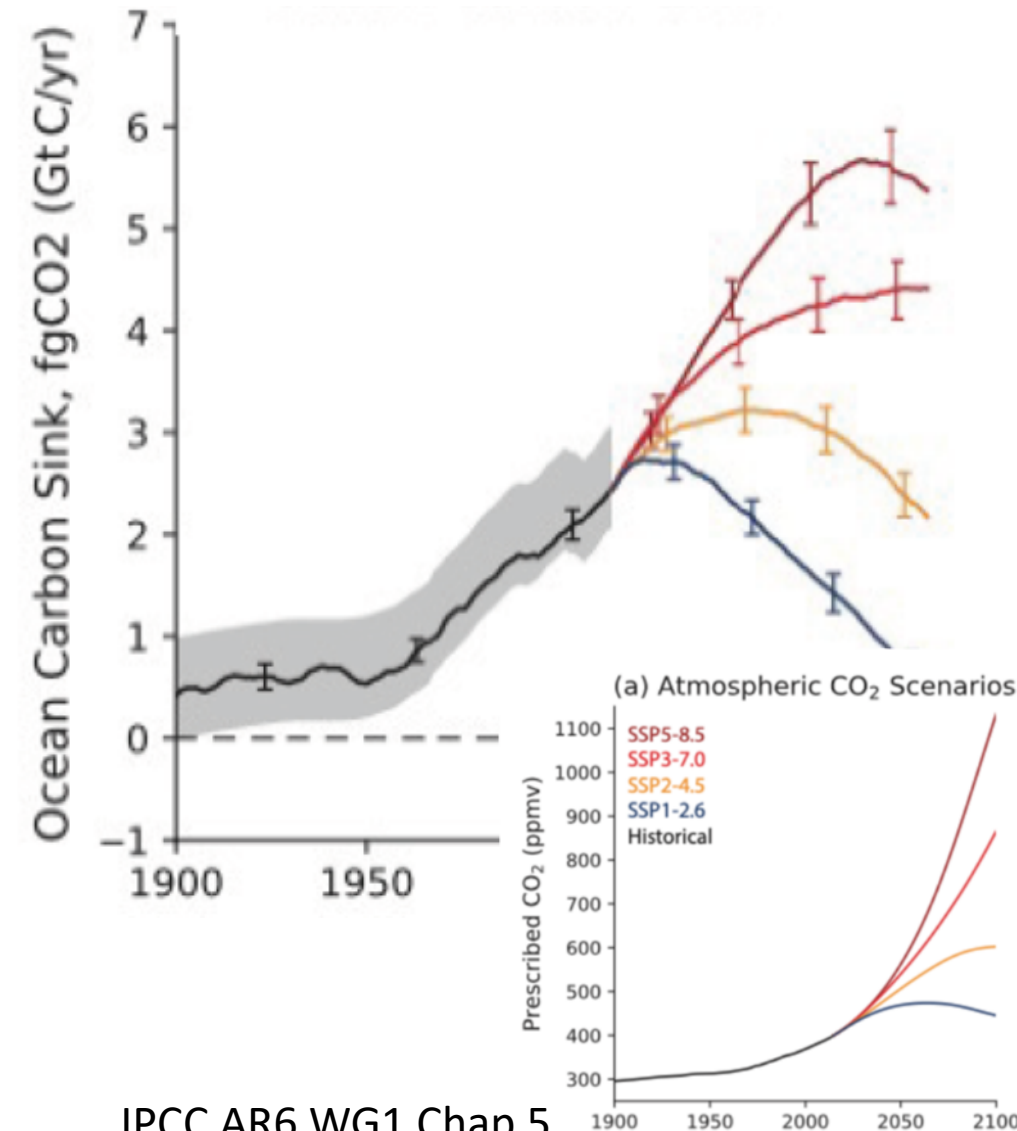
→ Le puits de carbone océanique

Ce que nous savons :

- ① Le puits futur dépend principalement de la trajectoire du CO₂ atmosphérique.
- ② Mais avec une saturation en raison de la chimie des carbonates

$$\text{Revelle factor} = \frac{\Delta[\text{CO}_2]}{[\text{CO}_2]} / \frac{\Delta[\text{DIC}]}{[\text{DIC}]}$$

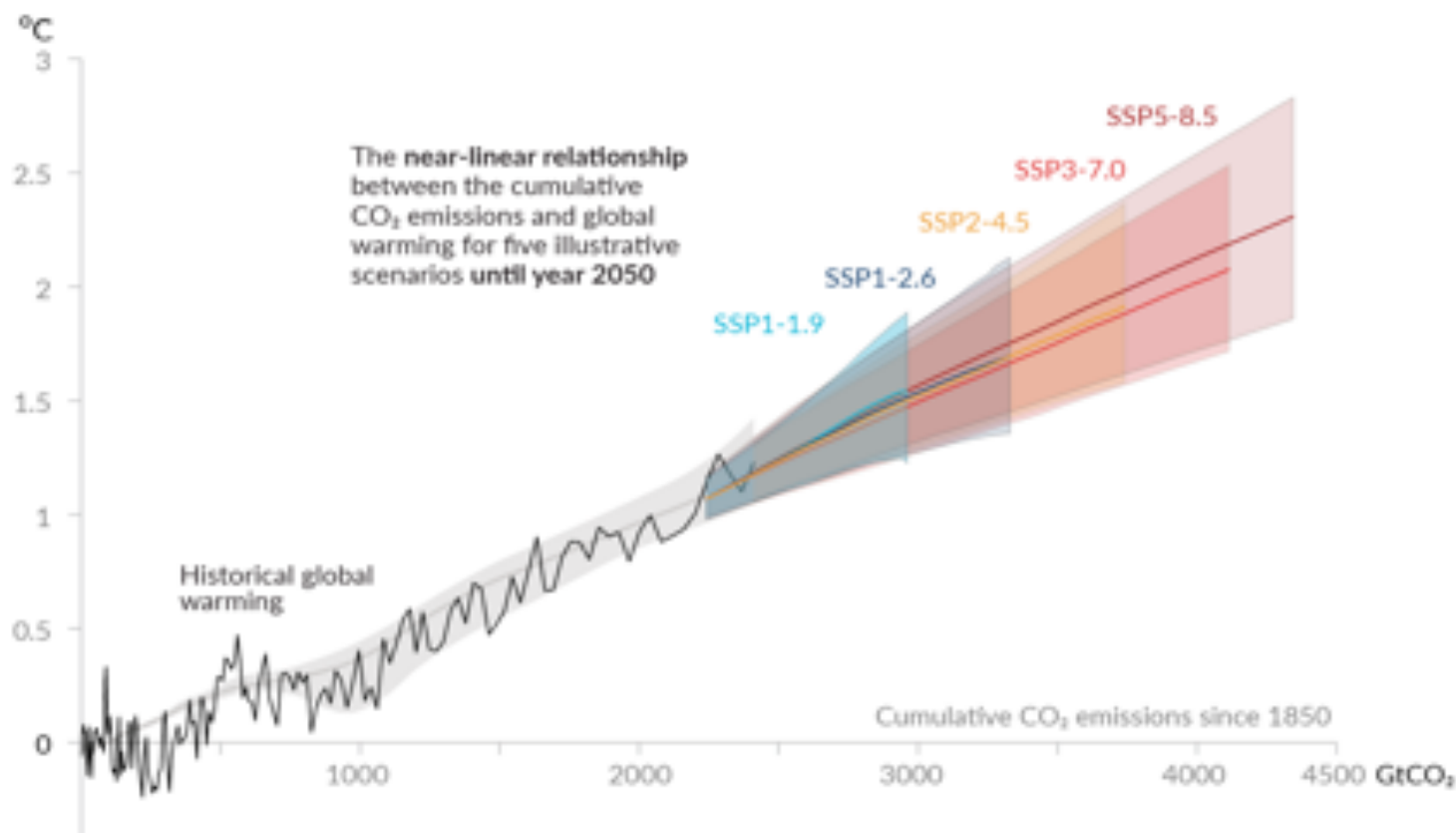
- ③ Le changement climatique réduit l'efficacité du puits de carbone océanique (diminution de la solubilité, océan plus stratifié).
- ④ Le puits de carbone océanique tend vers zéro lorsque le CO₂ se stabilise...



Retour aux émissions – émissions compatibles

Every tonne of CO₂ emissions adds to global warming

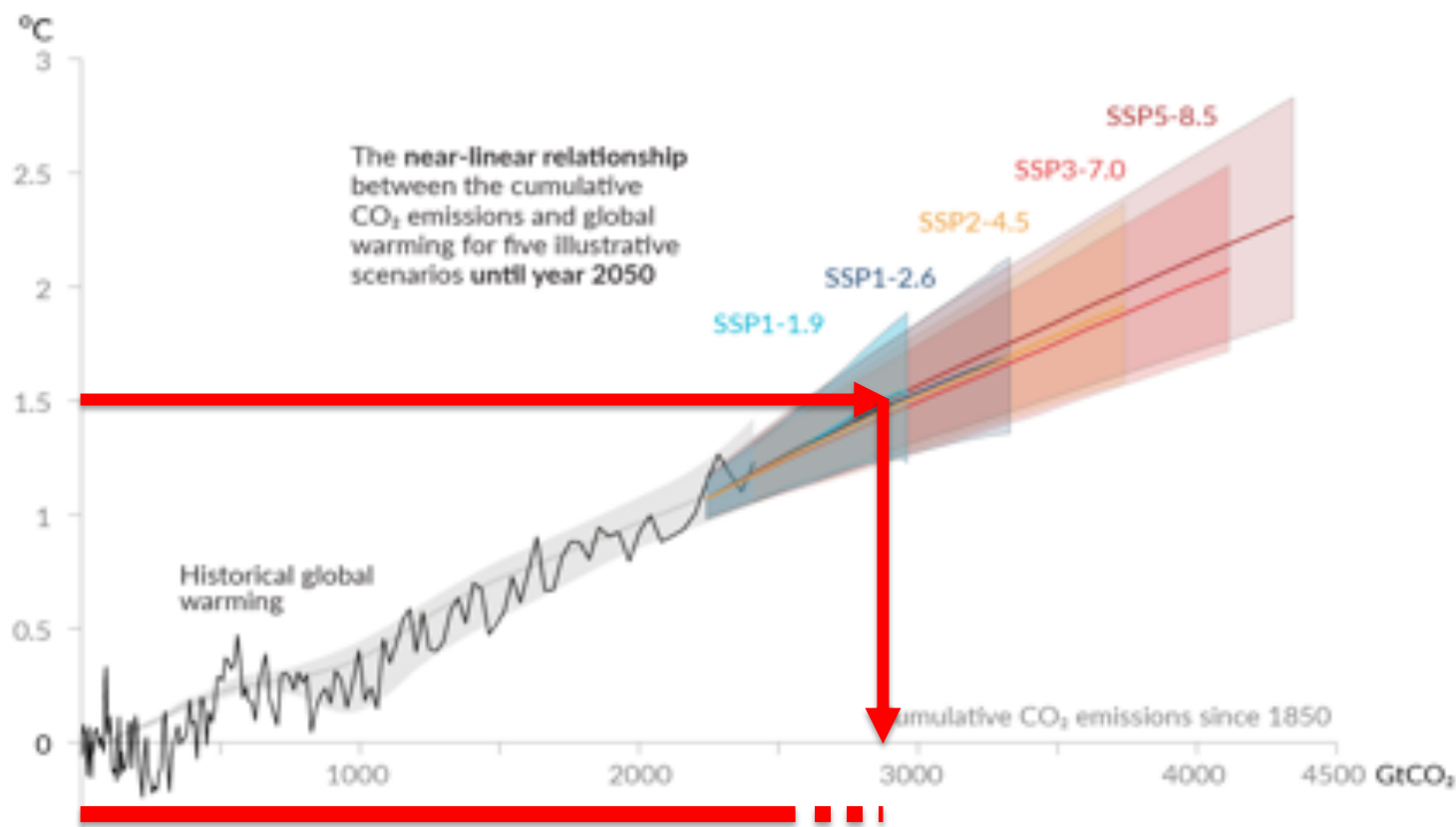
Global surface temperature increase since 1850–1900 (°C) as a function of cumulative CO₂ emissions (GtCO₂)



Retour aux émissions – émissions compatibles

Every tonne of CO₂ emissions adds to global warming

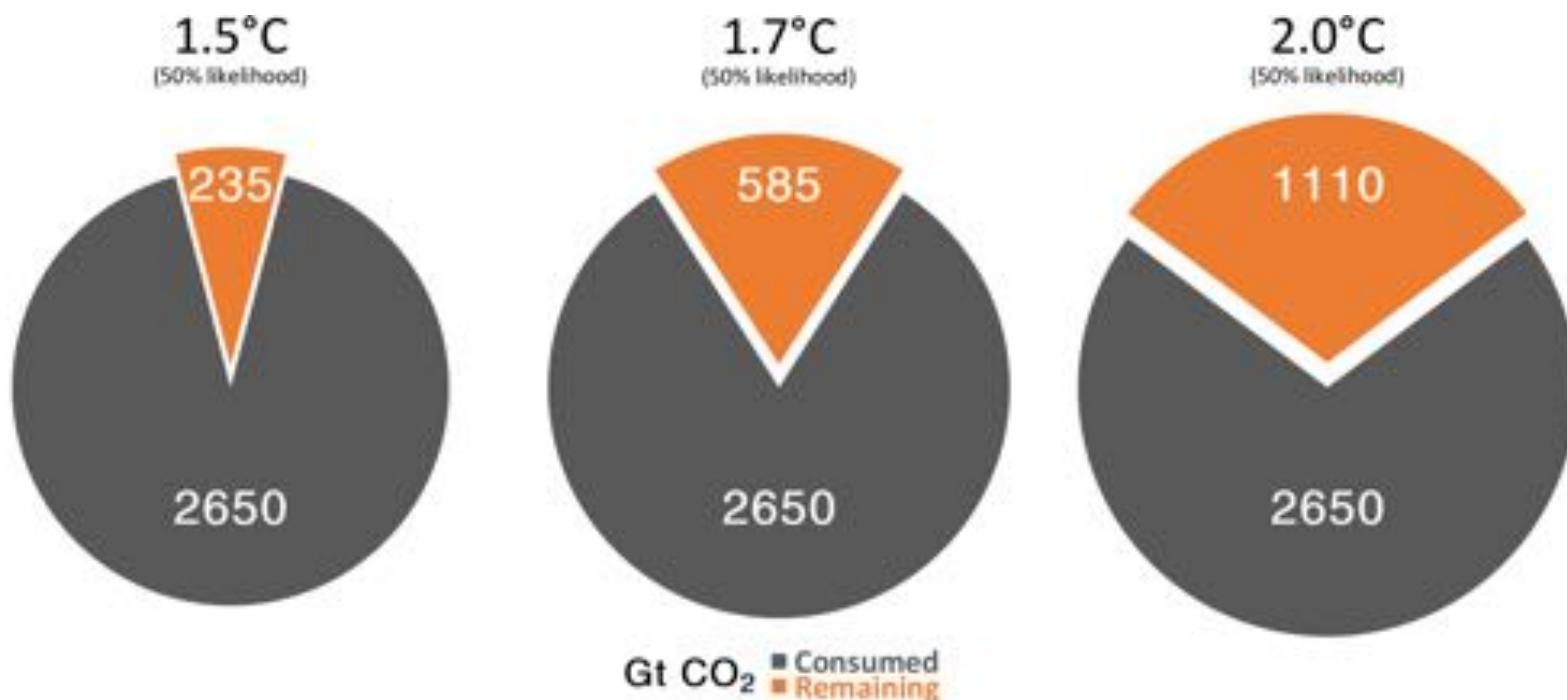
Global surface temperature increase since 1850–1900 (°C) as a function of cumulative CO₂ emissions (GtCO₂)



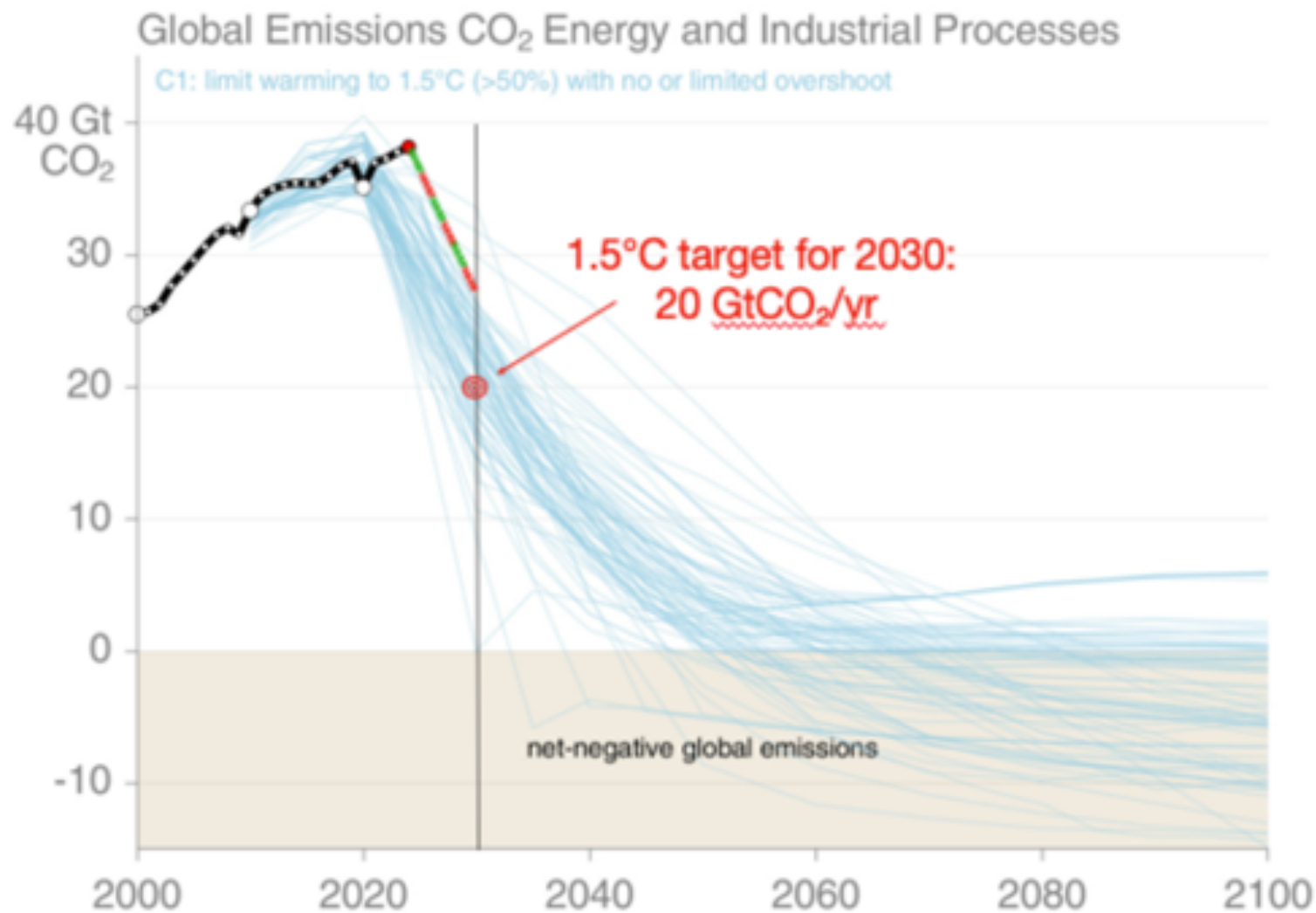
Budget Carbone Restant

Retour aux émissions – émissions compatibles

Le **budget carbone restant** pour limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C, 1,7 °C, 2 °C est respectivement de 235, 585 et 1110 GtCO₂, ce qui correspond à **6, 14 et 27 ans** à partir de 2025.



Retour aux émissions – émissions compatibles





Bilan carbone des dernières décennies

Emissions anthropiques

Puits de carbone naturels



Projections pour le 21ème siècle

Couplage climat carbone

Emissions compatibles



Méthodes d'élimination du CO₂ atmosphérique

Éliminer du CO₂ déjà dans l'atmosphère ?

Une définition :

- Retirer du **CO₂ de l'atmosphère** pour le stocker **durablement** dans différents types de réservoirs (CDR – Carbon Dioxide Removal)
- Considérées comme de la géo-ingénierie, mais pas pour toutes. La distinction est liée à leur ampleur, leur échelle d'application et leurs effets (GIEC, 2021)

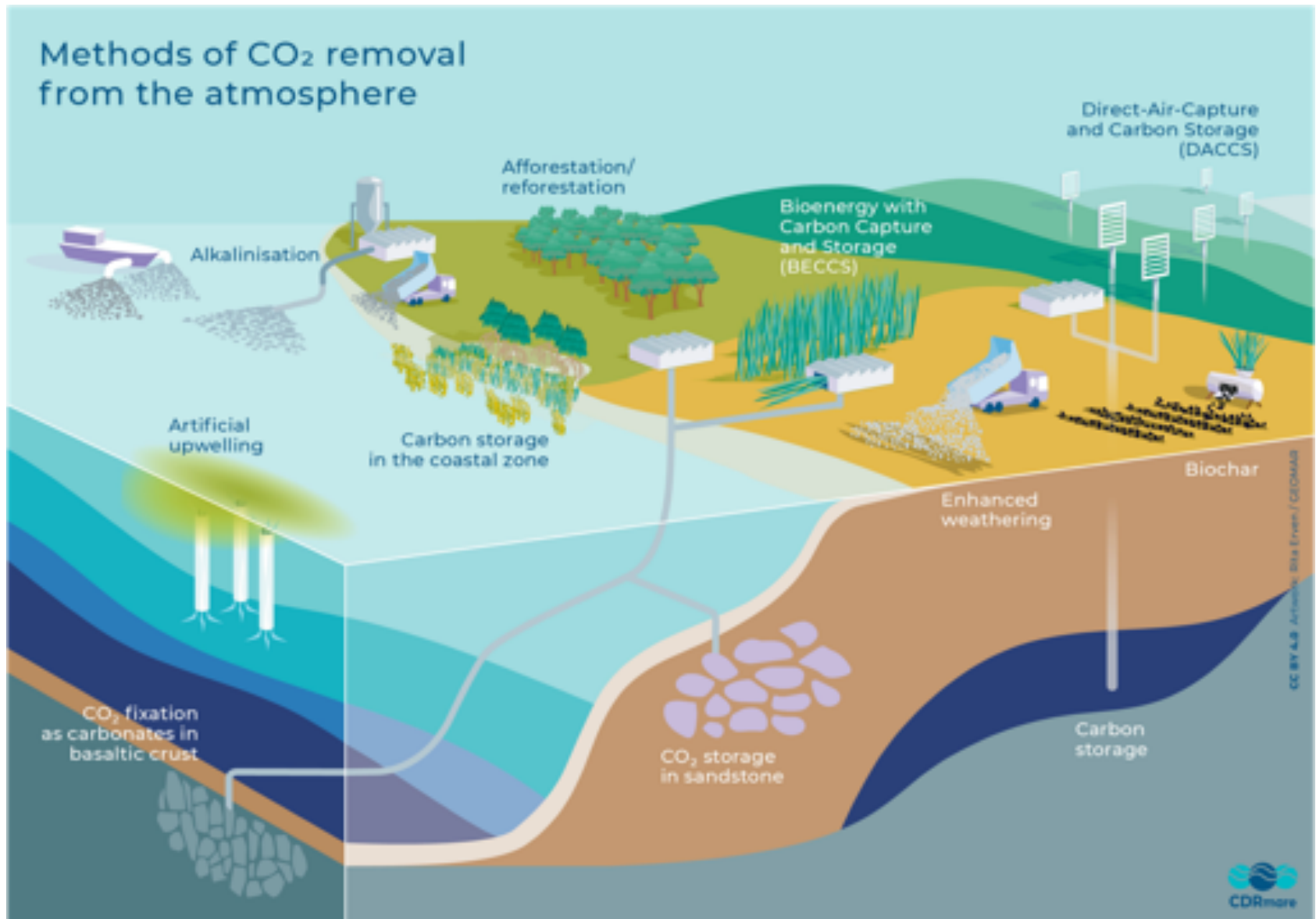
Leur intérêt :

- Nécessaires pour atteindre **la neutralité carbone** afin de contrebalancer les émissions résiduelles de certains secteurs ; d'atteindre des émissions nettes négatives
- Pourraient permettre de faire diminuer de quelques dixièmes de degrés la température de surface planétaire après un dépassement ; et aider à contre-balancer des rétroactions amplificatrices climat-carbone (ex : émissions liées au dégel de sols gelés)

Et des questions ?

- Efficacité, coût, faisabilité à grande échelle, et des répercussions environnementales très variables selon les techniques considérées

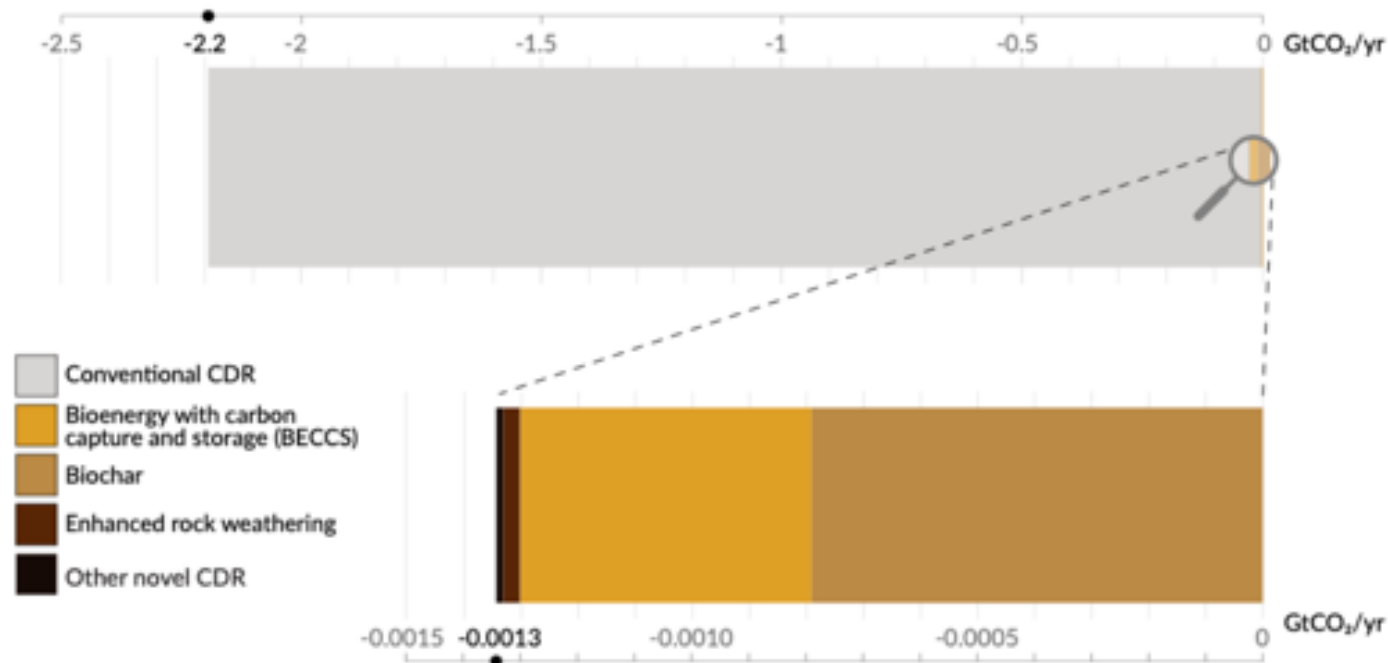
Eliminer du CO₂ déjà dans l'atmosphère ?



Eliminer du CO₂ déjà dans l'atmosphère ?

Only a tiny fraction of all carbon dioxide removal results from **novel methods**

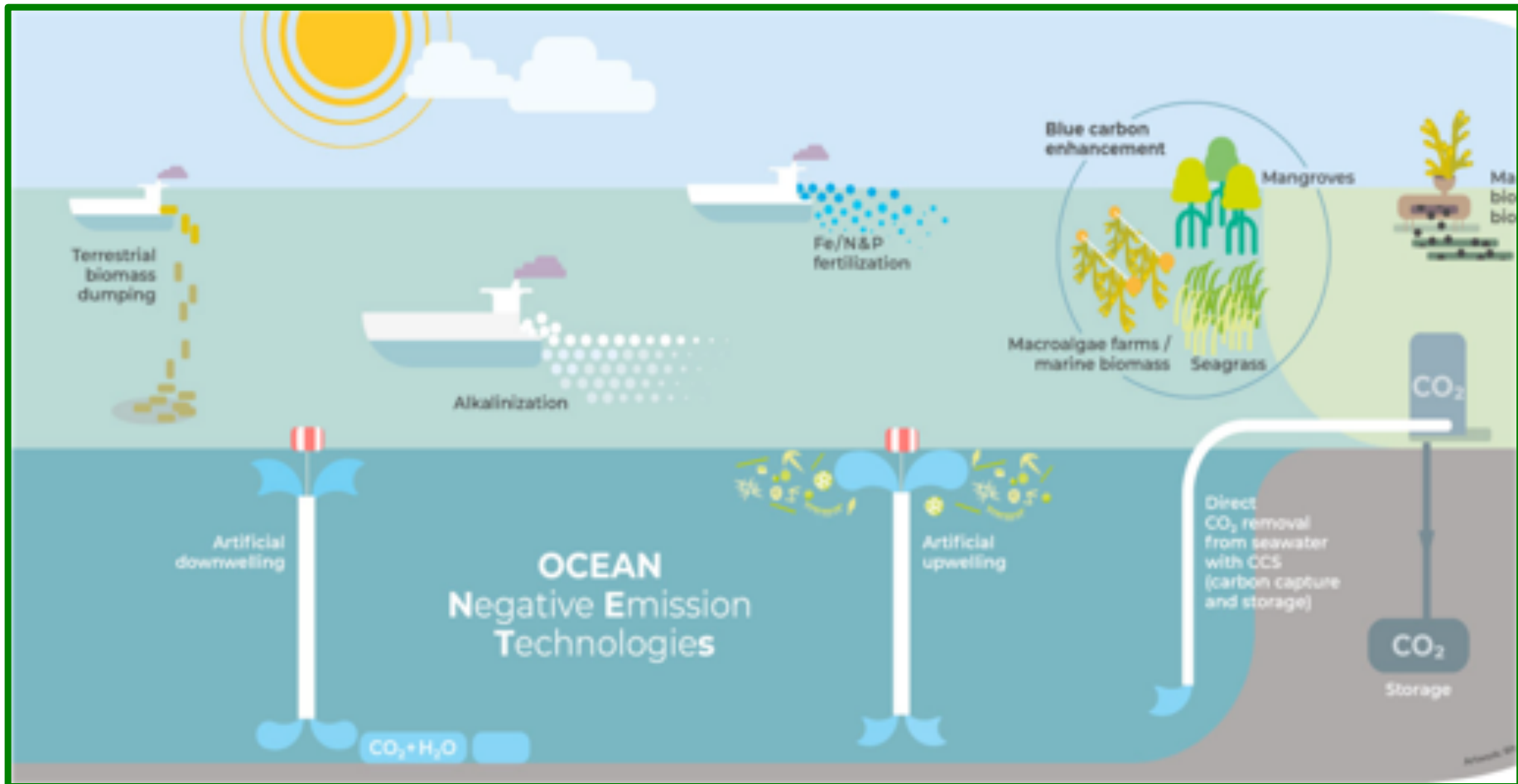
Total amount of carbon dioxide removal, split into conventional and **novel** methods (GtCO₂/yr)



CDR auj. : ~2,2 GtCO₂ par an, principalement par des méthodes conventionnelles comme l'afforestation et la reforestation.

Nouvelles méthodes de CDR : 1,3 MtCO₂ par an, soit moins de 0,1 % du total.

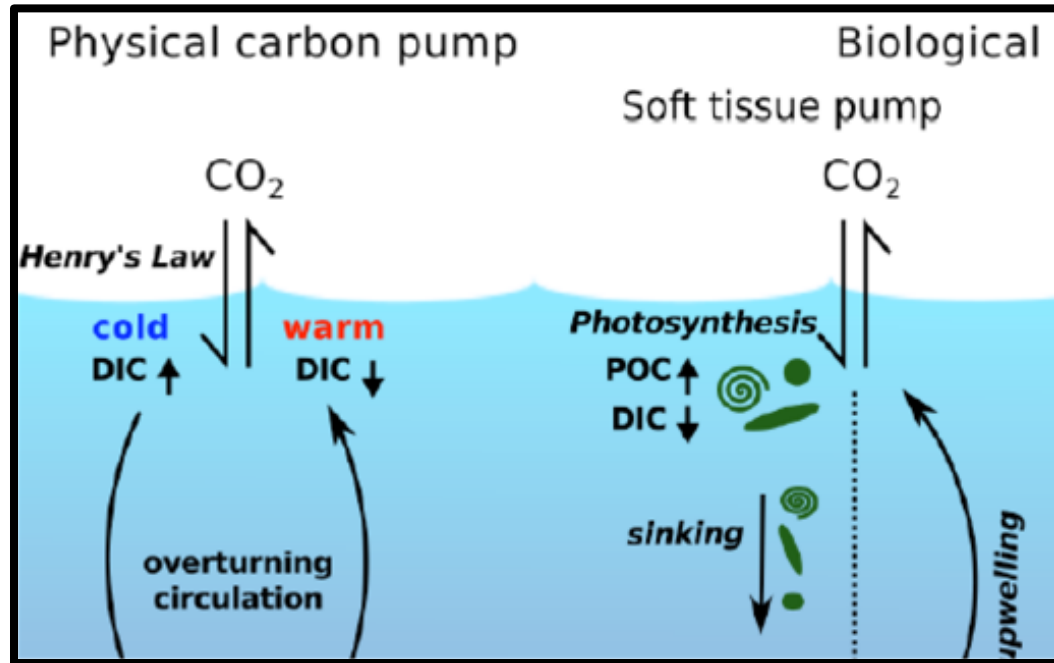
Les techniques océaniques d'élimination du CO₂ (mCDR*)



mCDR = Marine Carbon Dioxide Removal

@OceanNET, GEOMAR

Les techniques océaniques d'élimination du CO₂ (*mCDR**)



Méthodes « Inorganiques »
(Downwellings, Injection,
Alcalinisation, ...)

Méthodes « Organiques »
(Fertilisation, Upwellings,
Macroalgues, ...)

Les techniques organiques – la fertilisation par le fer

Comment ?

En ajoutant un nutriment limitant pour fertiliser le phytoplancton marin

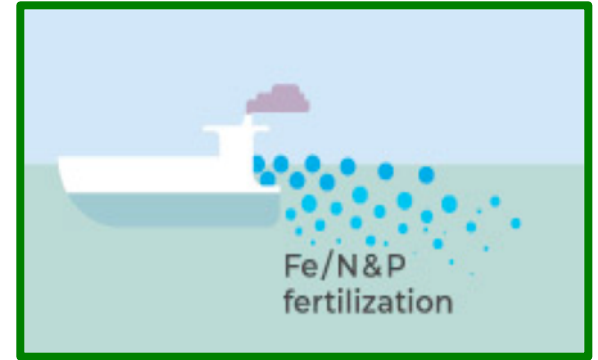
Pour ?

Augmenter l'export de carbone organique vers les profondeurs où le carbone est séquestré > 100 à 1000 ans.

Qui ?

John Martin (1935-1993)

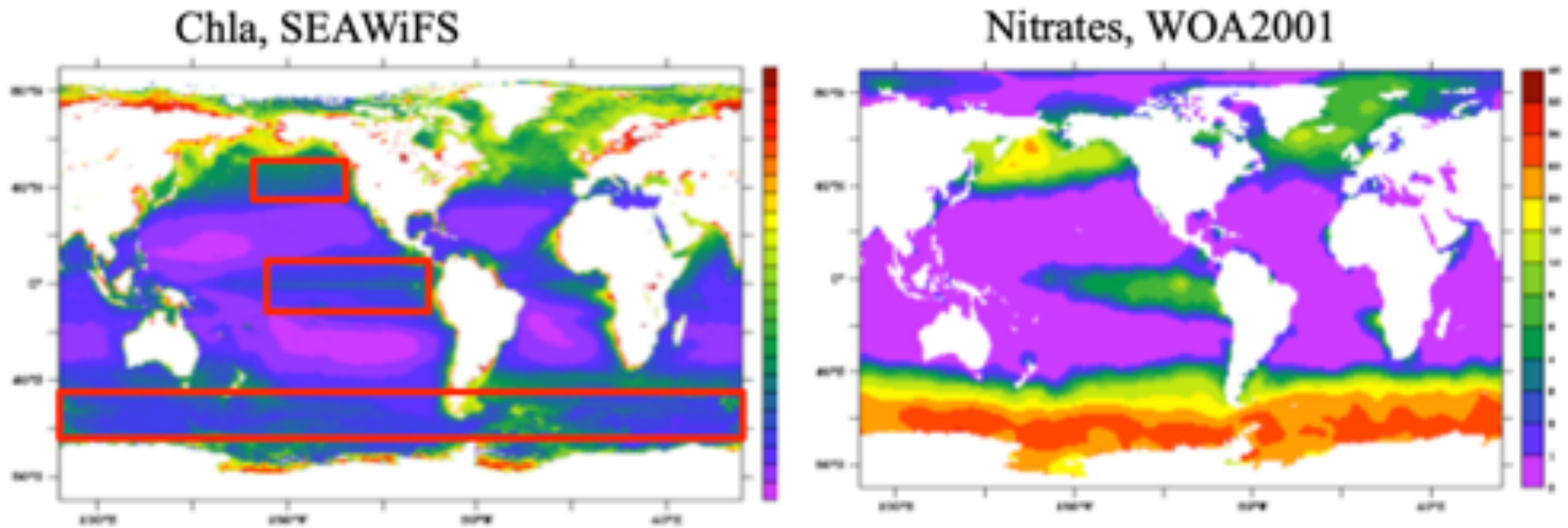
“Give me a half tanker of iron, and I will give you an ice age.”



Les techniques organiques – la fertilisation par le fer

Un paradigme de longue date...

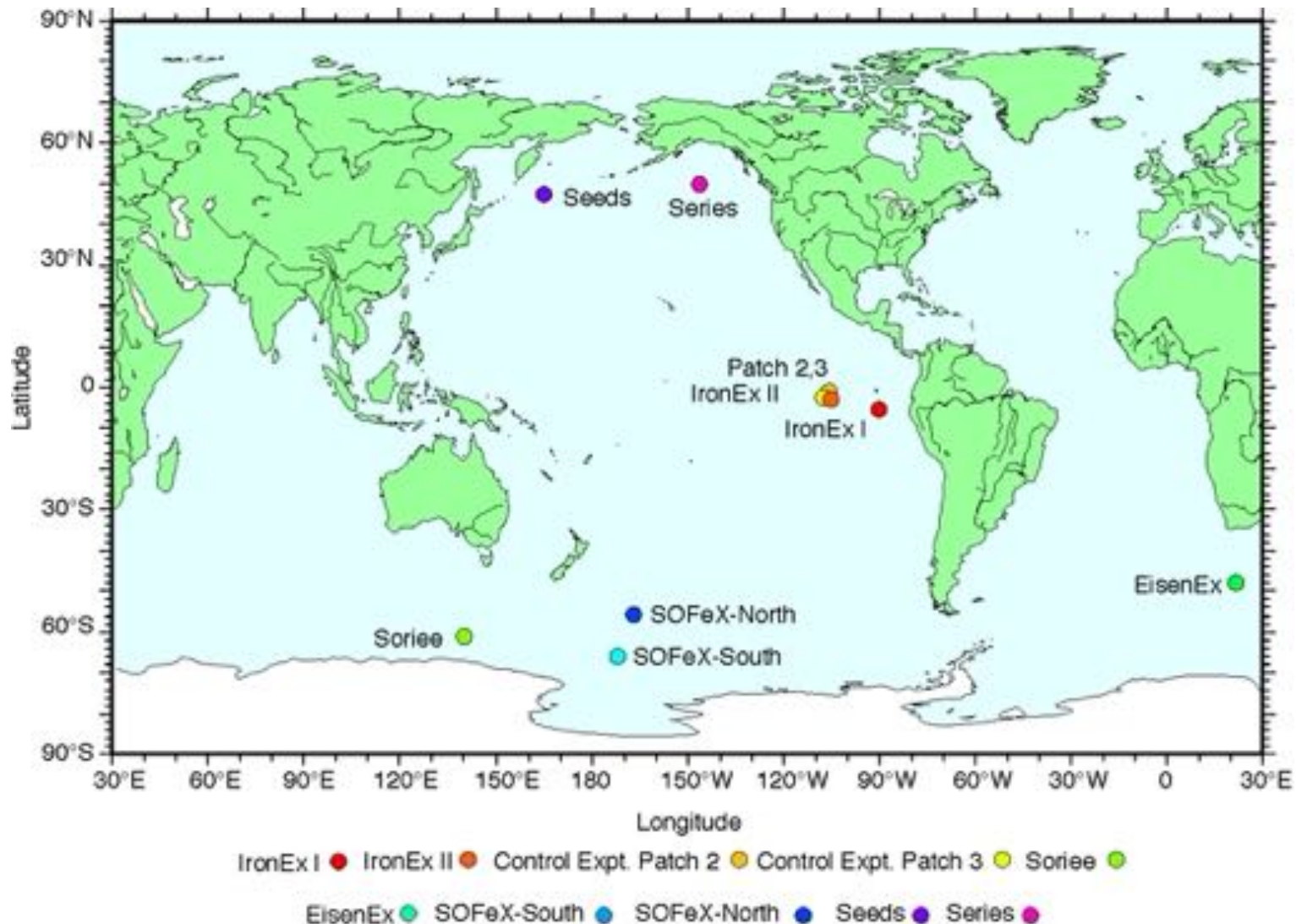
*if nutrient are abundant and light not limiting,
we should find high levels of phytoplankton*



Mais présence d'eaux dites High Nutrient, Low Chlorophyll (HLNC)
eg. North Pacific, Equatorial Pacific, Southern Ocean

Les techniques organiques – la fertilisation par le fer

Dans les années 1990 et 2000, plusieurs expériences de fertilisation au fer ont été réalisées !



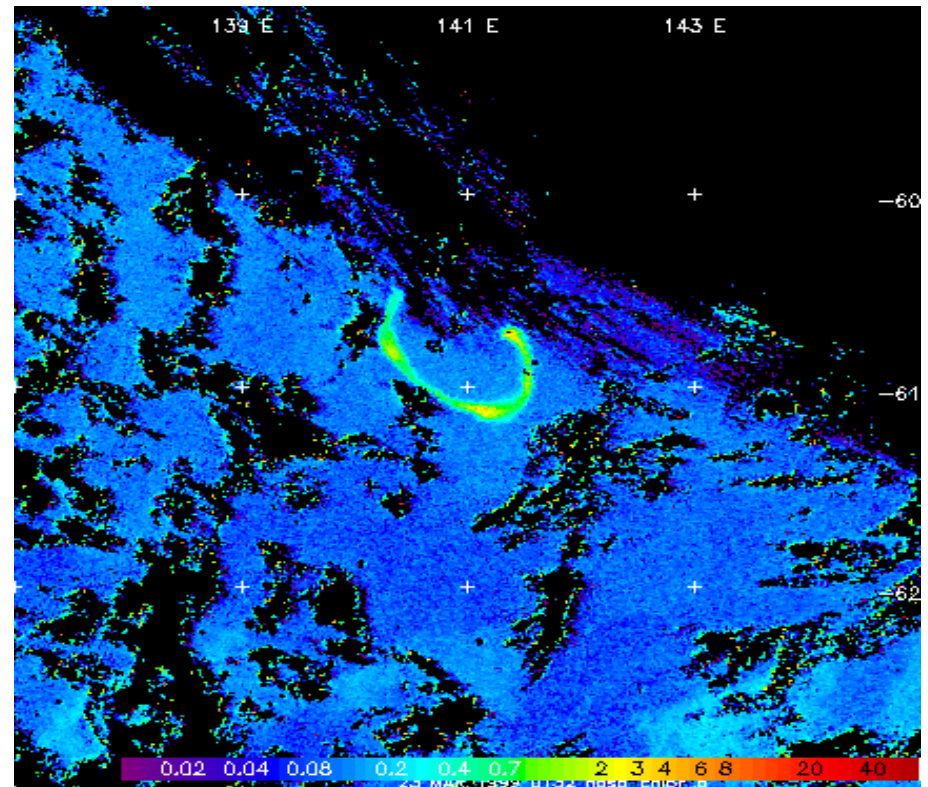
Les techniques organiques – la fertilisation par le fer

Dans les années 1990 et 2000, plusieurs expériences de fertilisation au fer ont été réalisées !

IRONEX2, Eq. pac, 1996



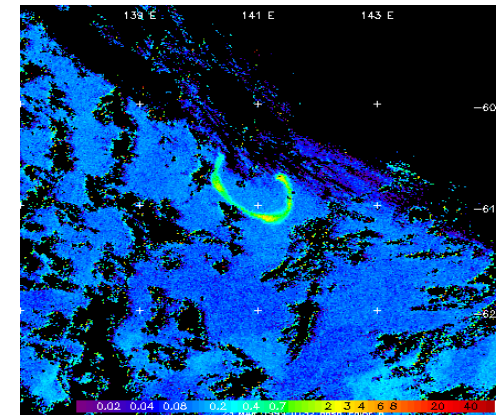
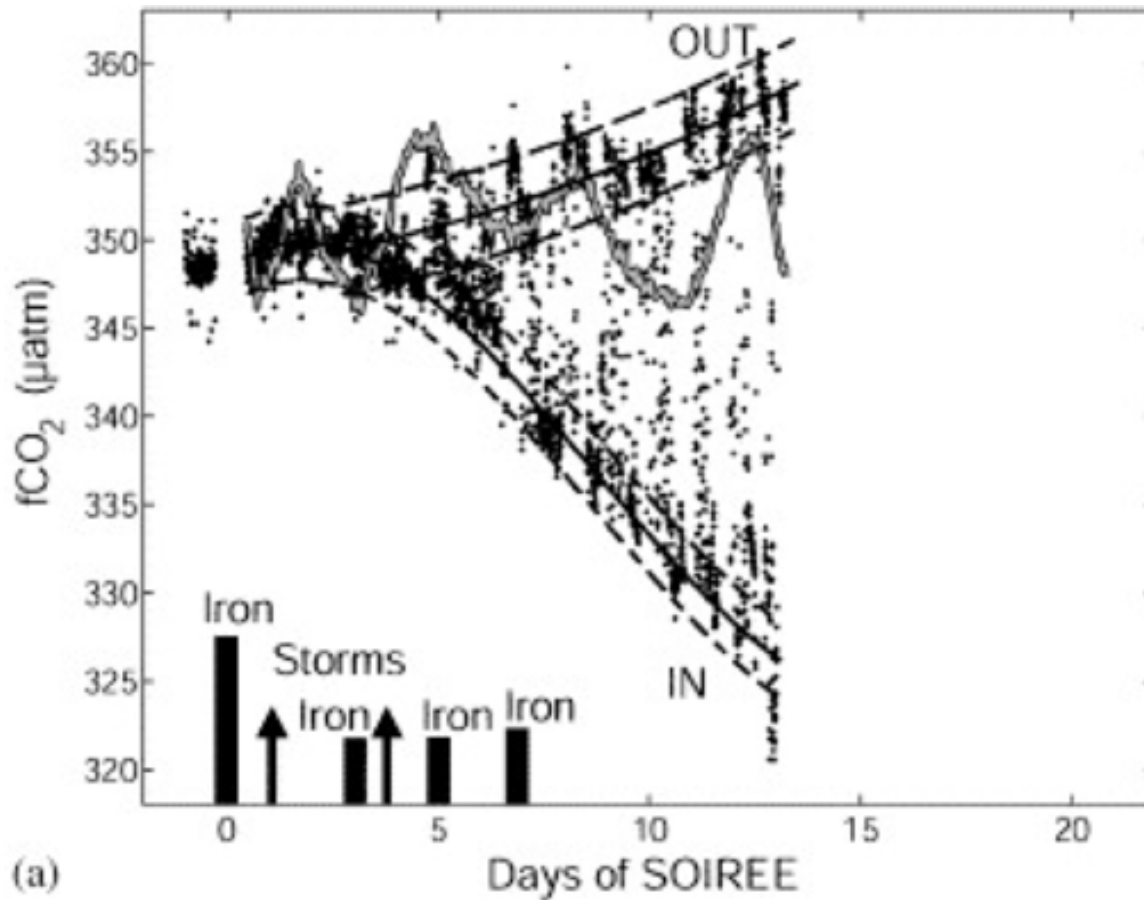
SOIREE, Southern Ocean, 1999



SOIREE after 42 days
Ocean Color from SeaWiFS
Abraham et al., 2000

Les techniques organiques – la fertilisation par le fer

In-situ iron fertilization experiments: effects on pCO₂ (SOIREE Exp.)



(Watson et al. 2000)

Les techniques organiques – la fertilisation par le fer

Au début des années 2000...

Plusieurs start-ups / Dépôts de brevets

Planktos

Ocean Farming Inc.

GreenSea Venture Inc ...

<http://www.greenseaventure.com/>



- [Iron Fertilization Science](#)
- [Development of Iron Fertilization Science](#)
- [GreenSea Development Agenda](#)
- [Questions and Concerns](#)
- [The Case For Iron Fertilization As a Control Technology](#)

GreenSea Mission

GreenSea's mission is to develop iron fertilization of marine phytoplankton as a means of managing atmospheric carbon dioxide. GreenSea believes that iron fertilization of marine phytoplankton is a needed and promising means of managing atmospheric carbon, provided that:

- The effects on ecosystems are benign or beneficial;
- Carbon flux at the ocean surface can be reliably measured;
- Long-term carbon flux and storage can be reasonably approximated; and
- A comprehensive, rigorous, and transparent system for monitoring

Les techniques organiques – la fertilisation par le fer

Mais aussi au début des années 2000...

Bien moins efficaces que ce qui était initialement projeté...

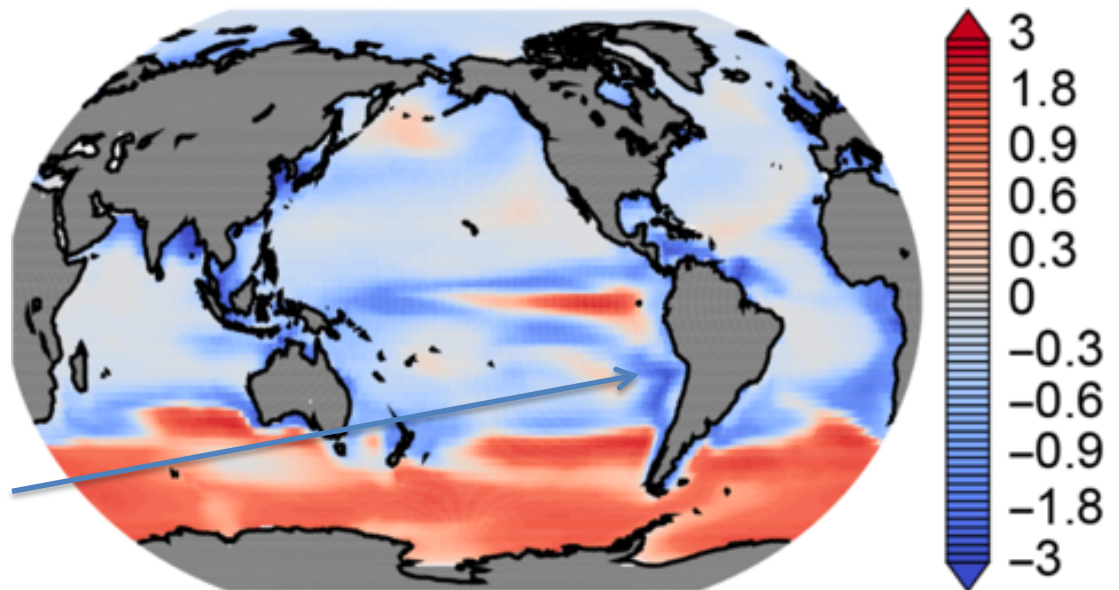
(effet max. : -30 ppm)

Non « permanence » - si arrêt de la fertilisation, les effets sont perdus après quelques décennies.

D'importants effets collatéraux ailleurs (par exemple, une diminution de la productivité)

Et des émissions probables d'autres gaz à effet de serre.

Impact de la fertilisation par le fer sur la biomasse animale (en 2090-2100, t/m²)



Tagliabue et al. 2023

Les techniques organiques – la fertilisation par le fer

Mais aussi au début des années 2000...

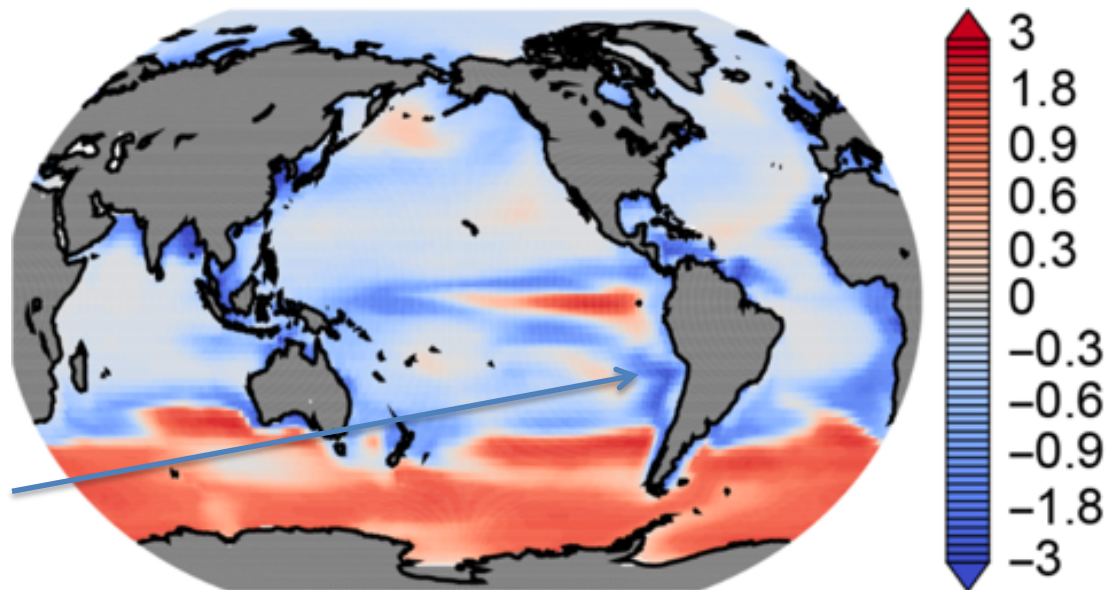
Bien moins efficaces que ce qui était initialement projeté...

(effet max. : -30 ppm)

Non « permanence » - si arrêt de la fertilisation, les effets sont perdus après quelques décennies.

D'importants effets collatéraux ailleurs (par exemple, une diminution de la productivité)

Impact de la fertilisation par le fer sur la biomasse animale (en 2090-2100, t/m²)



En 2008 : Moratoire / Convention de Londres pour stopper les entreprises commerciales qui se préparaient à utiliser cette technique pour des crédits carbone... exemption pour les études scientifiques si à petite échelle...

Les techniques inorganiques – Alcalinisation

Comment ?

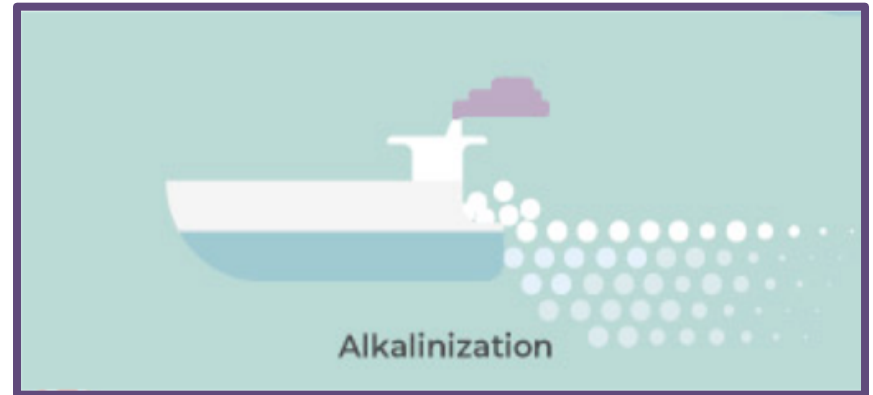
En ajoutant de l'alcalinité (roches silicatées, carbonatées, NaOH, chaux vive...)

Pour ?

Déplacer l'équilibre des carbonates et favoriser l'absorption de CO₂

Qui ?

Kheshgi (1995),



Pergamon

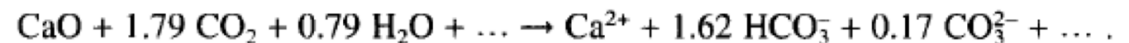
0360-5442(95)00035-6

Energy Vol. 20, No. 9, pp. 915-922, 1995
Copyright © 1995 Elsevier Science Ltd
Printed in Great Britain. All rights reserved
0360-5442/95 \$9.50 + 0.00

SEQUESTERING ATMOSPHERIC CARBON DIOXIDE BY INCREASING OCEAN ALKALINITY

HAROON S. KHESHGI

Corporate Research Laboratories, Exxon Research and Engineering Company, Annandale, NJ 08801, U.S.A.



Les techniques inorganiques – Alcalinisation

Comment ?

En ajoutant de l'alcalinité (roches silicatées, carbonatées, NaOH, chaux vive...)

Pour ?

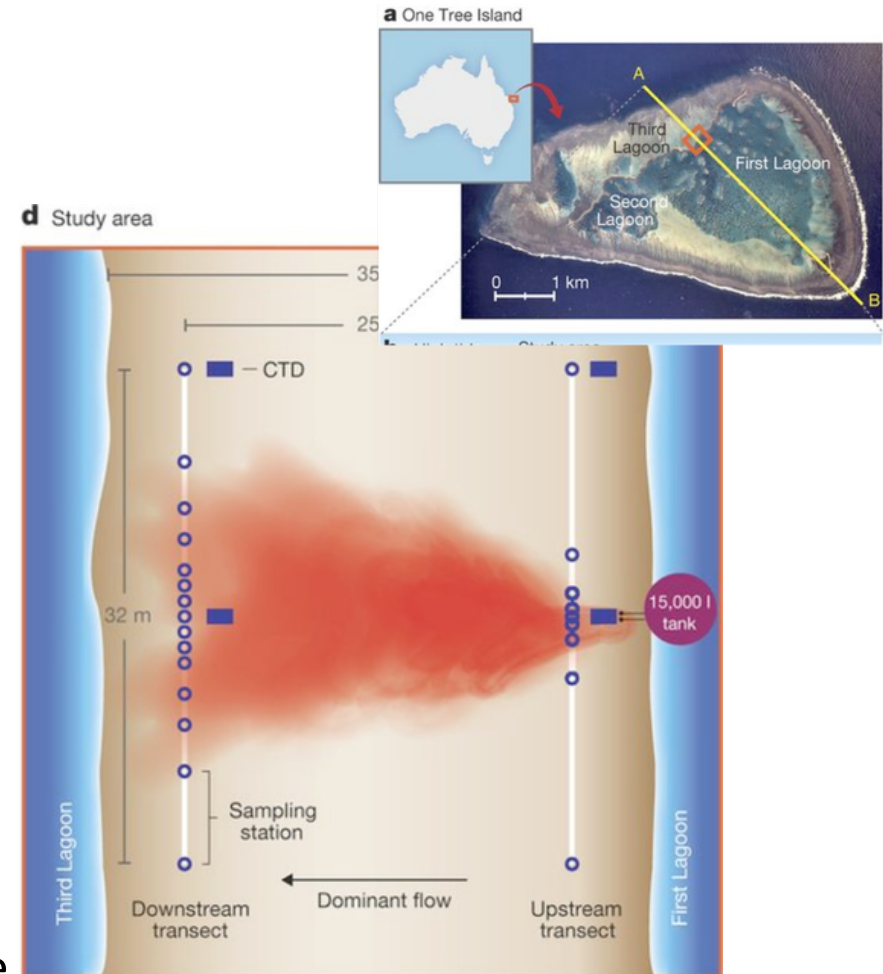
Déplacer l'équilibre des carbonates et favoriser l'absorption de CO_2

Qui ?

Kheshgi (1995),

Points positifs

- Pas de limite géophysique / géochimique
- Durabilité du stockage de carbone
- **Co-bénéfices pour l'acidification**



Expériences d'alcalinisation..
(ici augmentation de la calcification du corail)
(Albright et al. Nature 2016)

Les techniques inorganiques – Alcalinisation

Comment ?

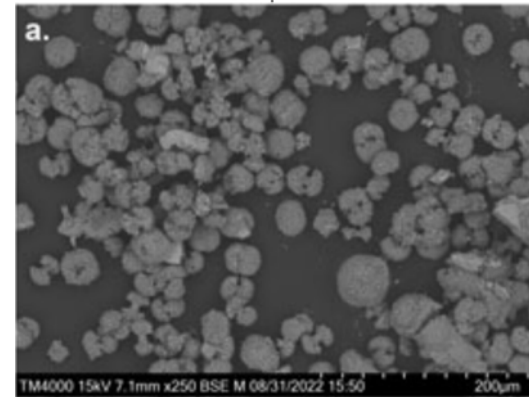
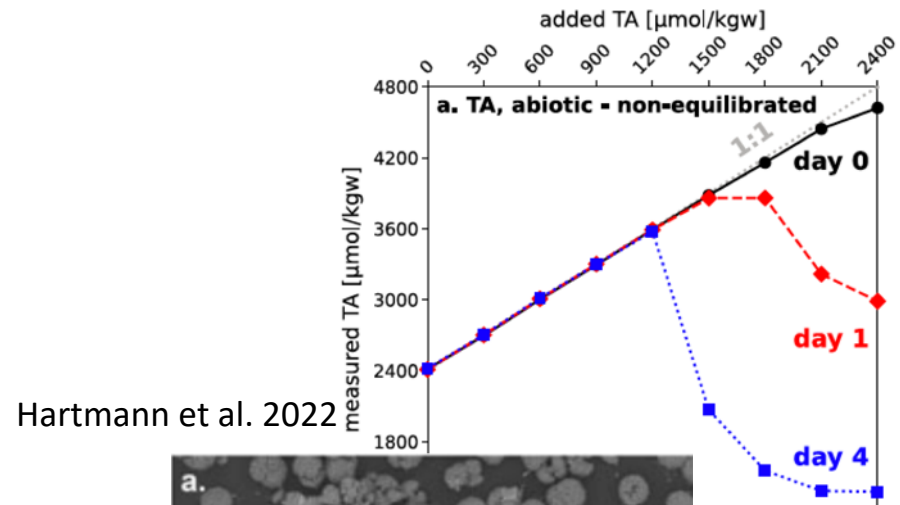
En ajoutant de l'alcalinité (roches silicatées, carbonatées, NaOH, chaux vive...)

Pour ?

Déplacer l'équilibre des carbonates et favoriser l'absorption de CO₂

Points positifs

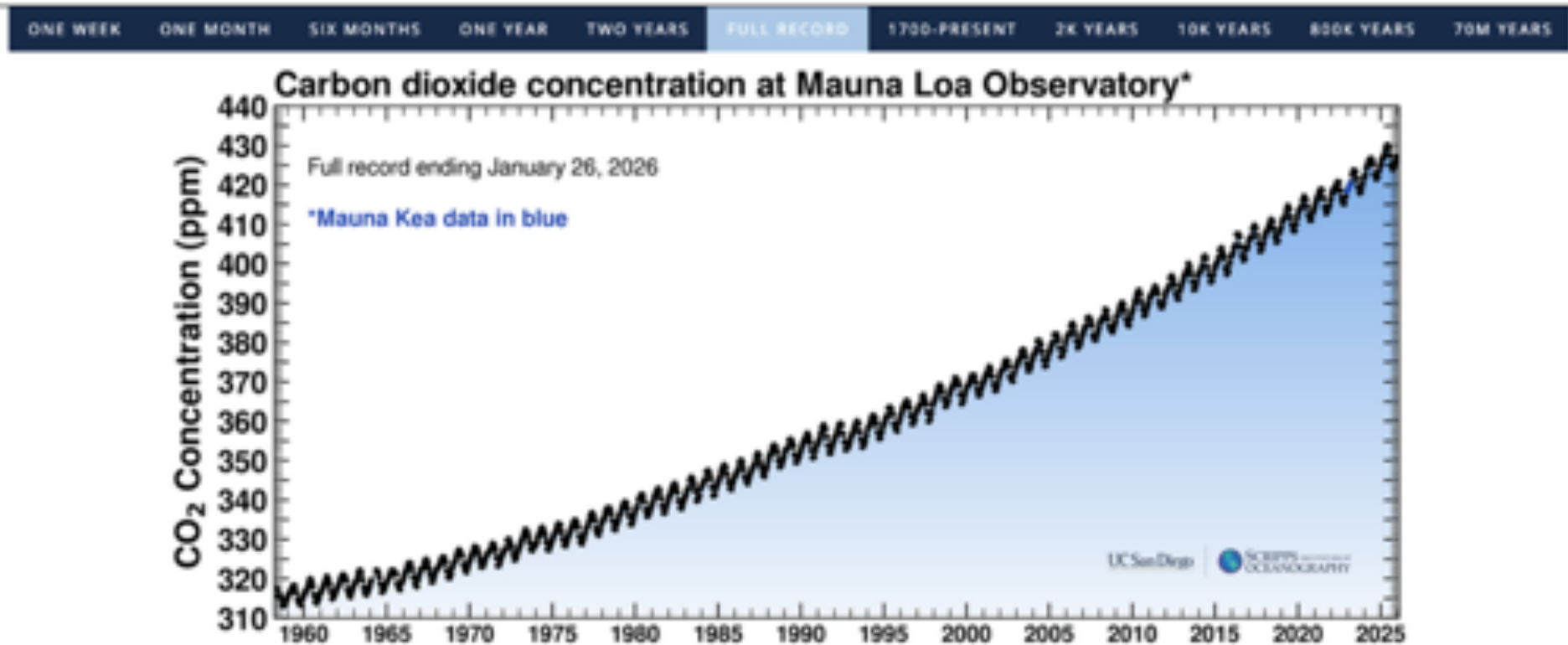
- Pas de limite géophysique / géochimique
- Durabilité du stockage de carbone
- **Co-bénéfices pour l'acidification**



Points négatifs

- **Précipitation de carbonates et réduction de l'efficacité**
- Impact sur les écosystèmes
- Difficulté à « monitorer », coût ?

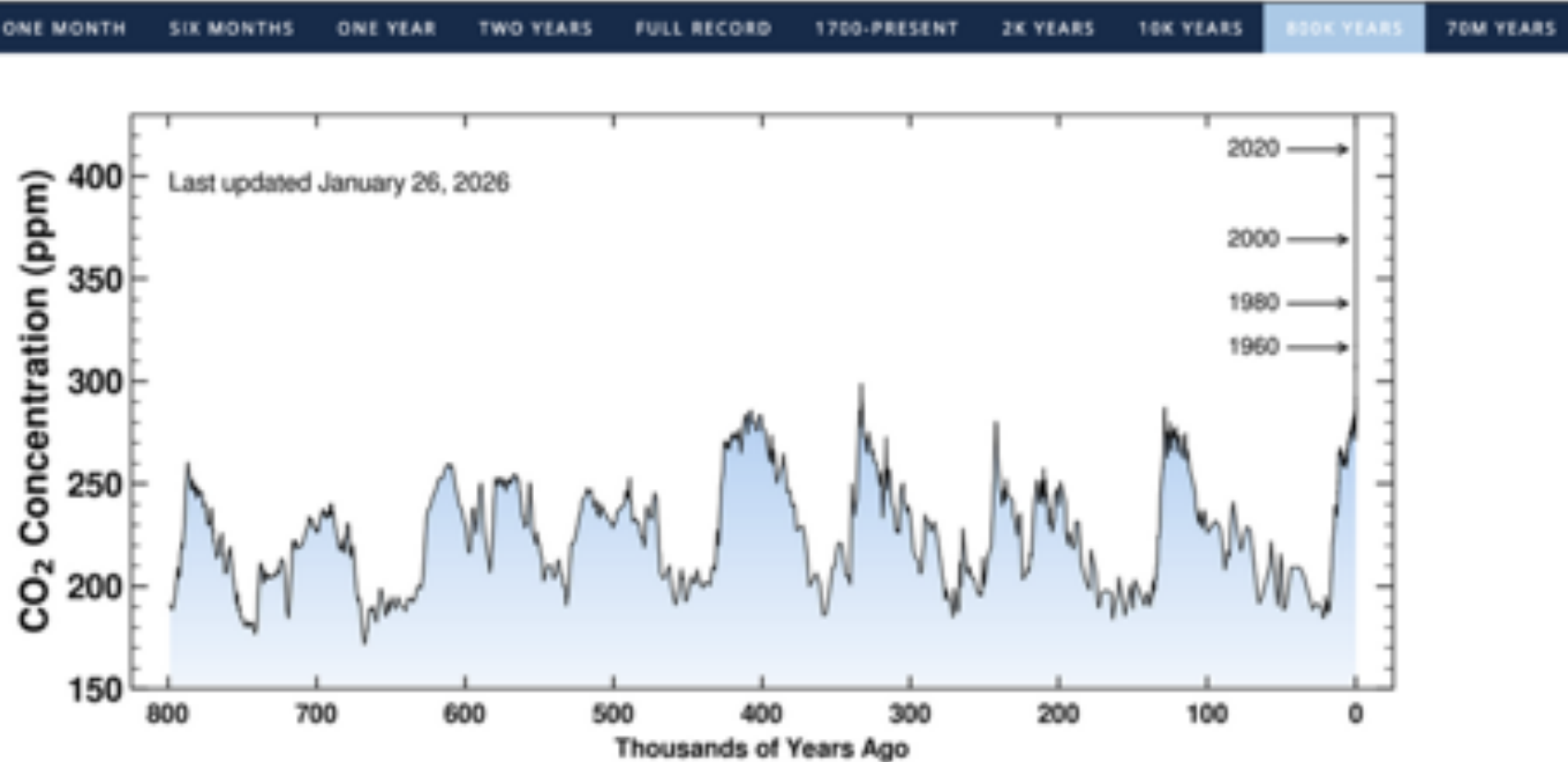
Pour conclure...



Pour conclure...



Pour conclure...



Pour conclure...

