

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

Laurent Bopp

DR CNRS

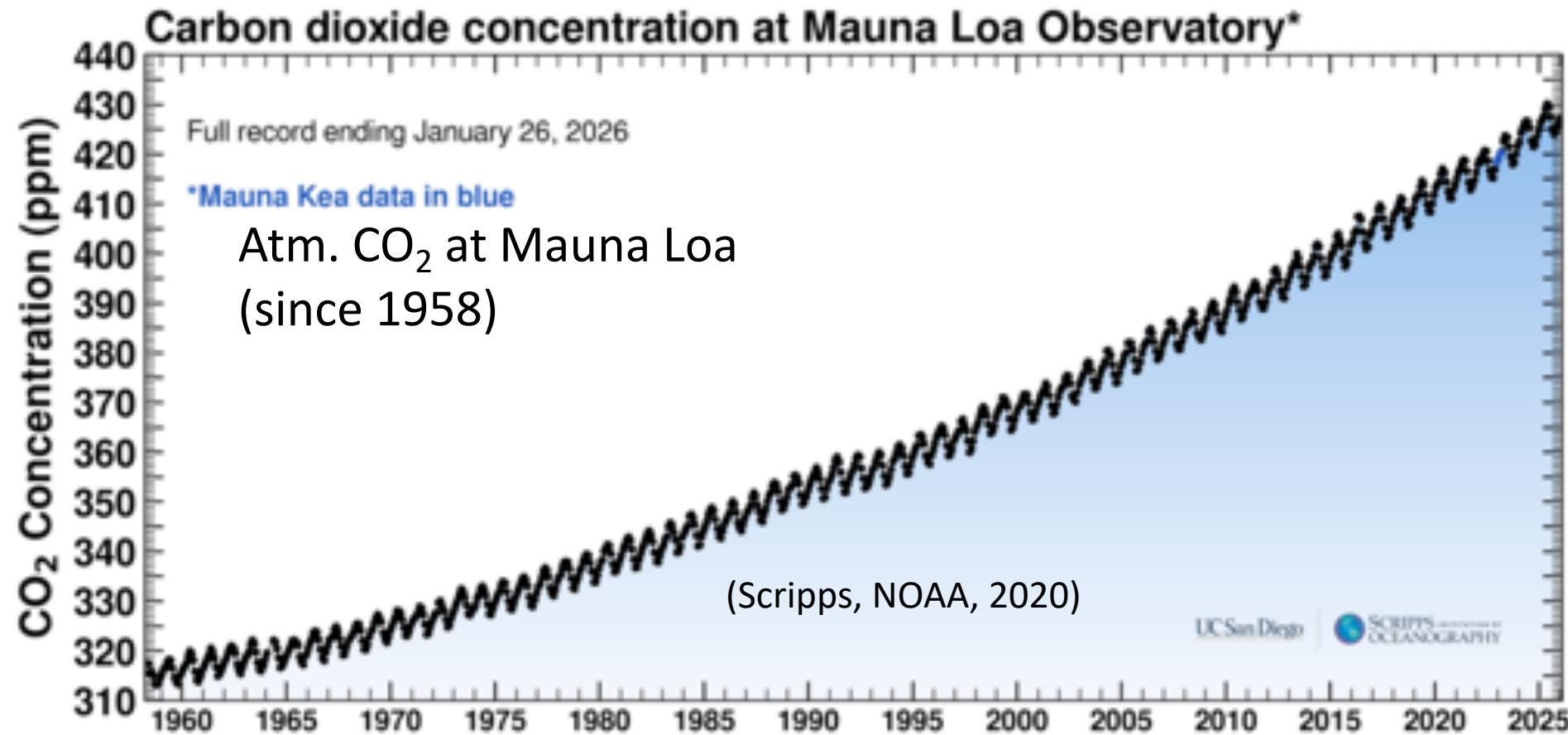
Directeur adj. Institut Pierre Simon Laplace
Dpt Géosciences - Ecole Normale Supérieure

Société Philomathique
26 Janvier 2026

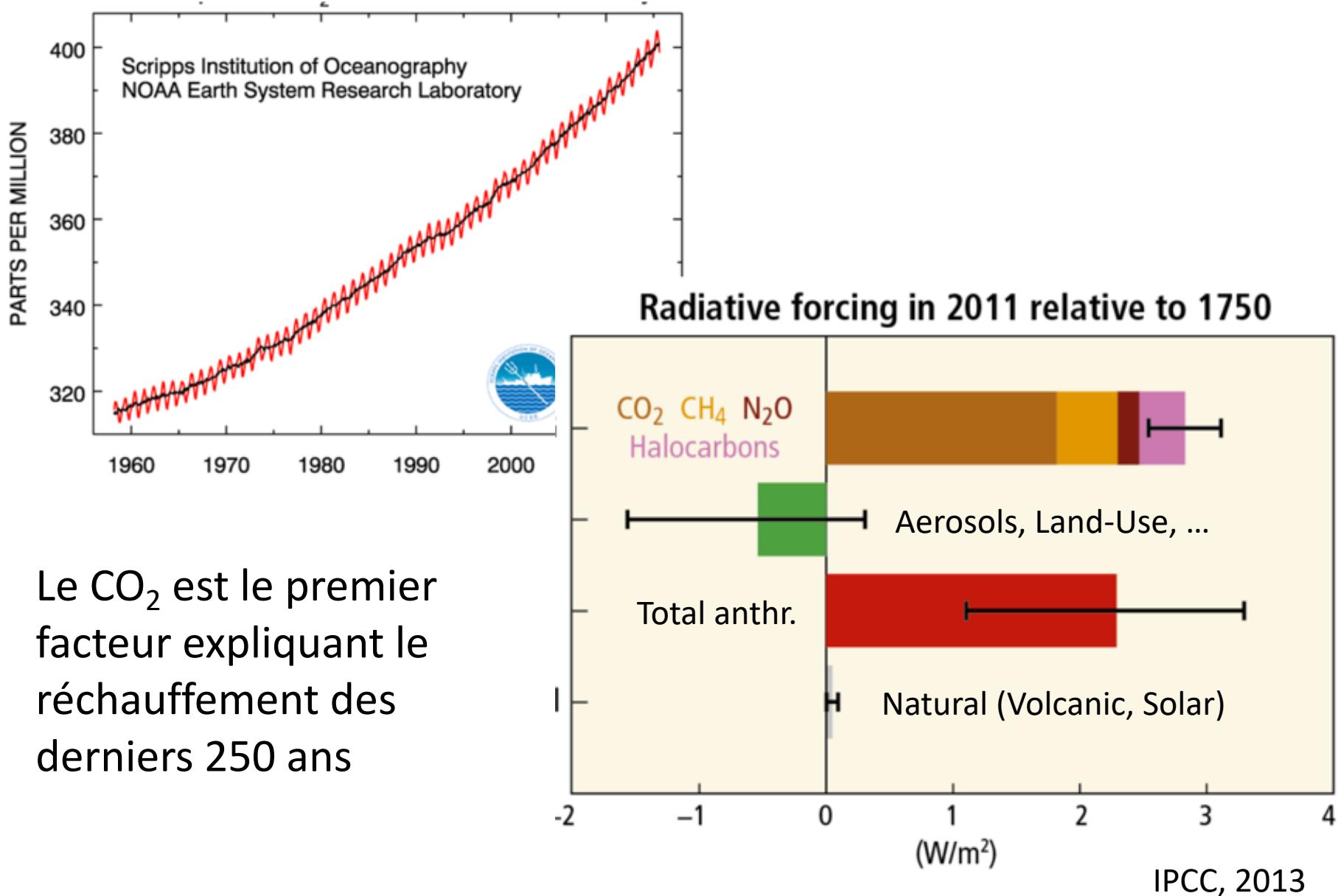
Le CO₂ atmosphérique a dépassé 430 ppm...

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

*Latest CO₂ reading: 428.27 ppm

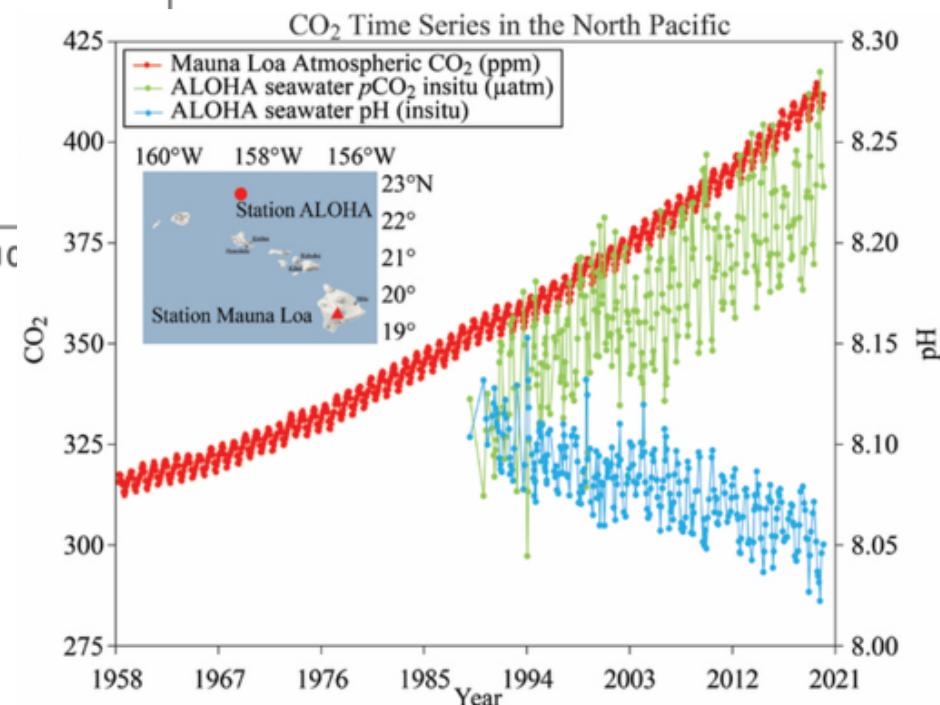
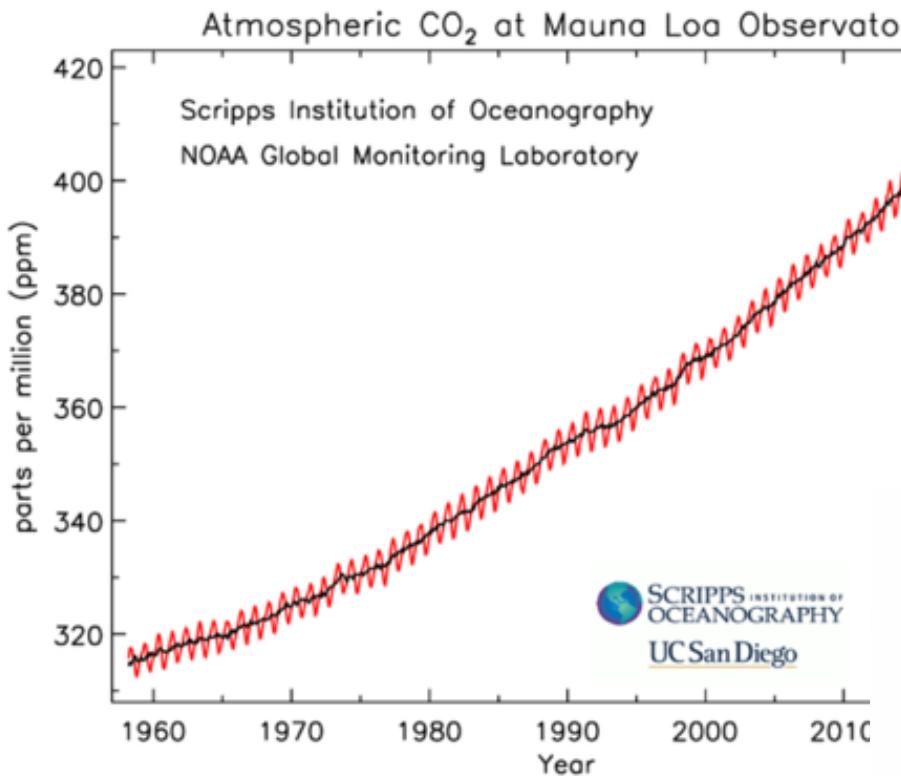


CO₂ et changement climatique



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



Bilan carbone des dernières décennies

Emissions anthropiques

Puits de carbone naturels



Projections pour le 21ème siècle

Rétroaction climat carbone

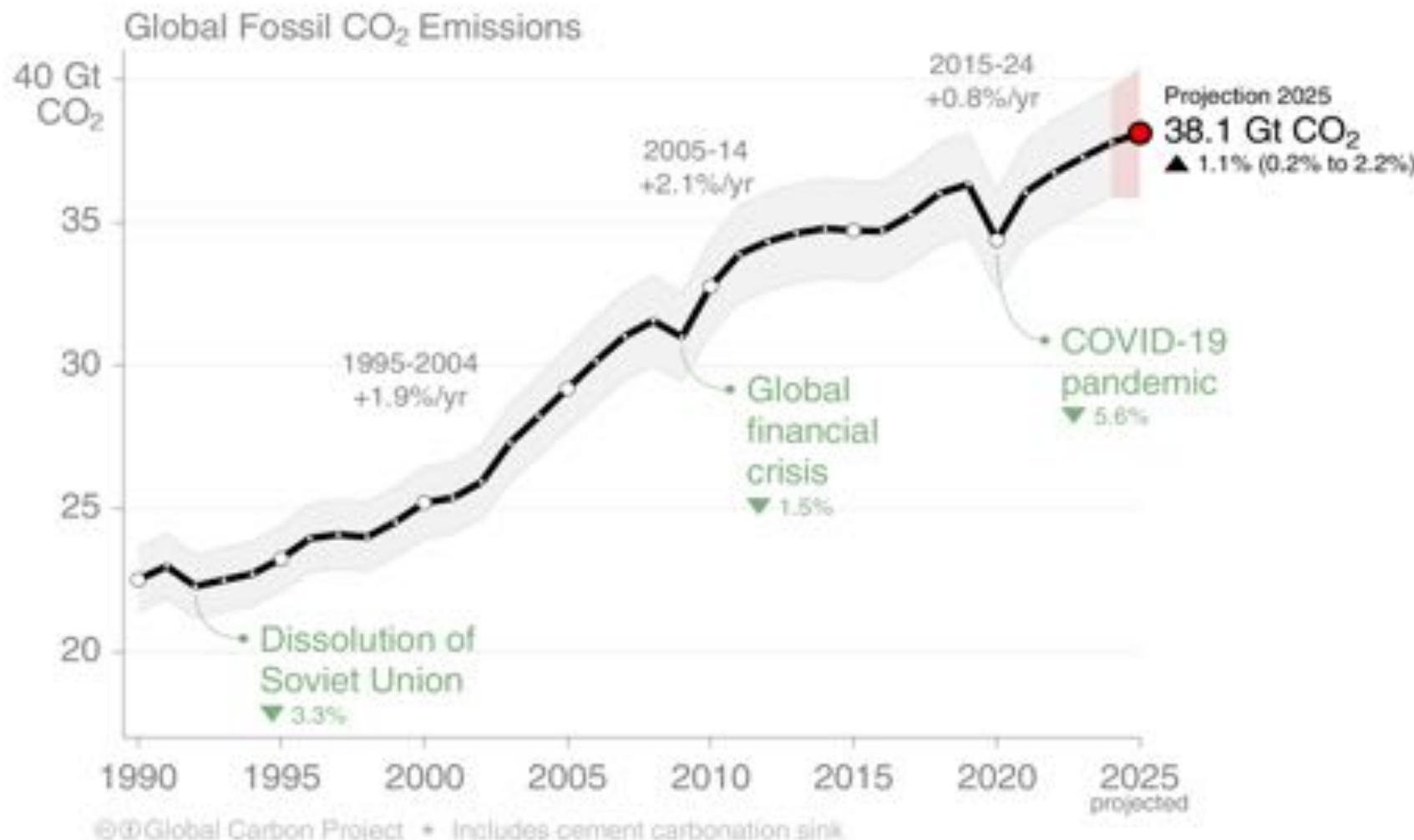
Emissions compatibles



Méthodes d'élimination du CO₂ atmosphérique

Emissions anthropiques

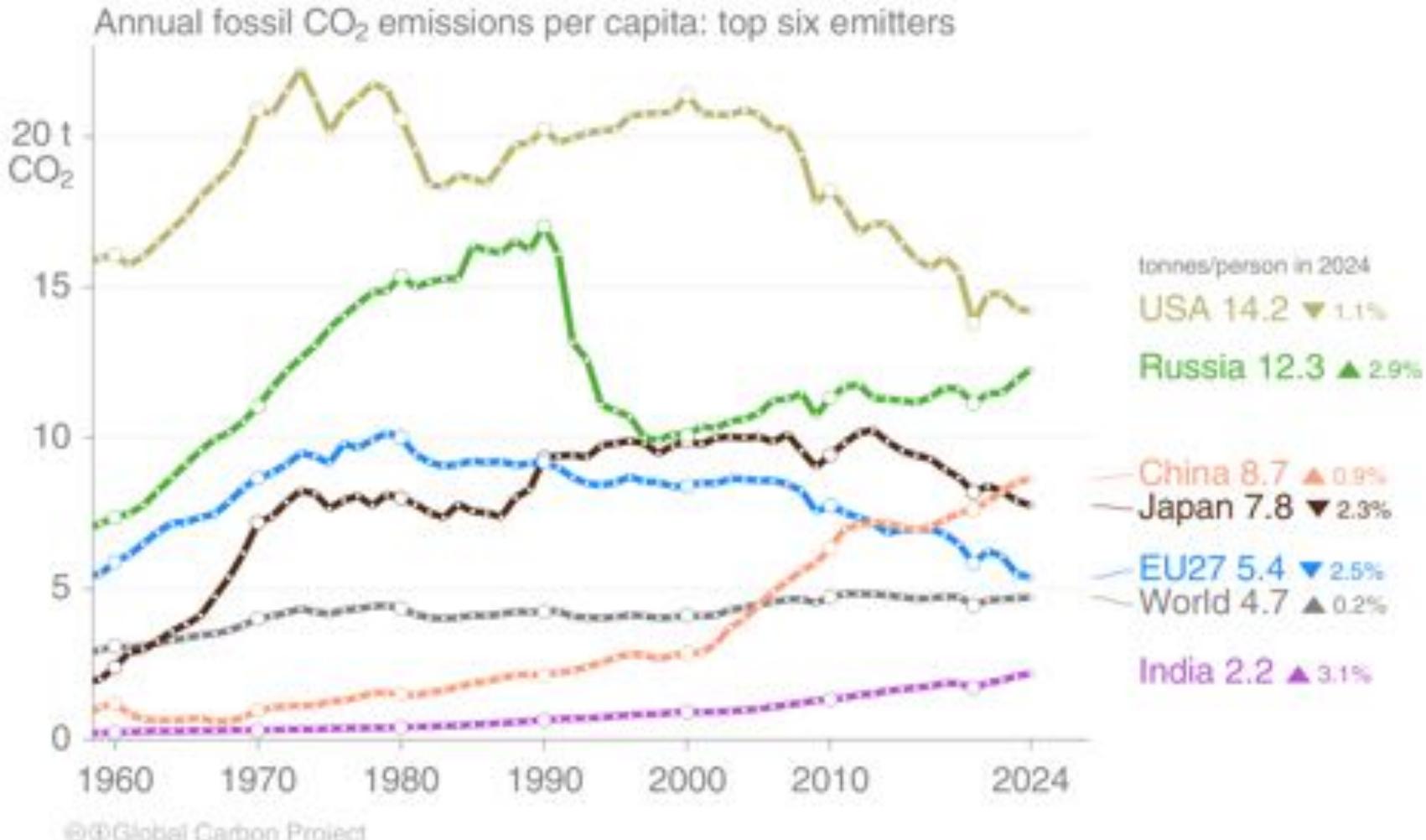
Fossil Fuel & Cement CO₂ Emissions



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

Emissions anthropiques

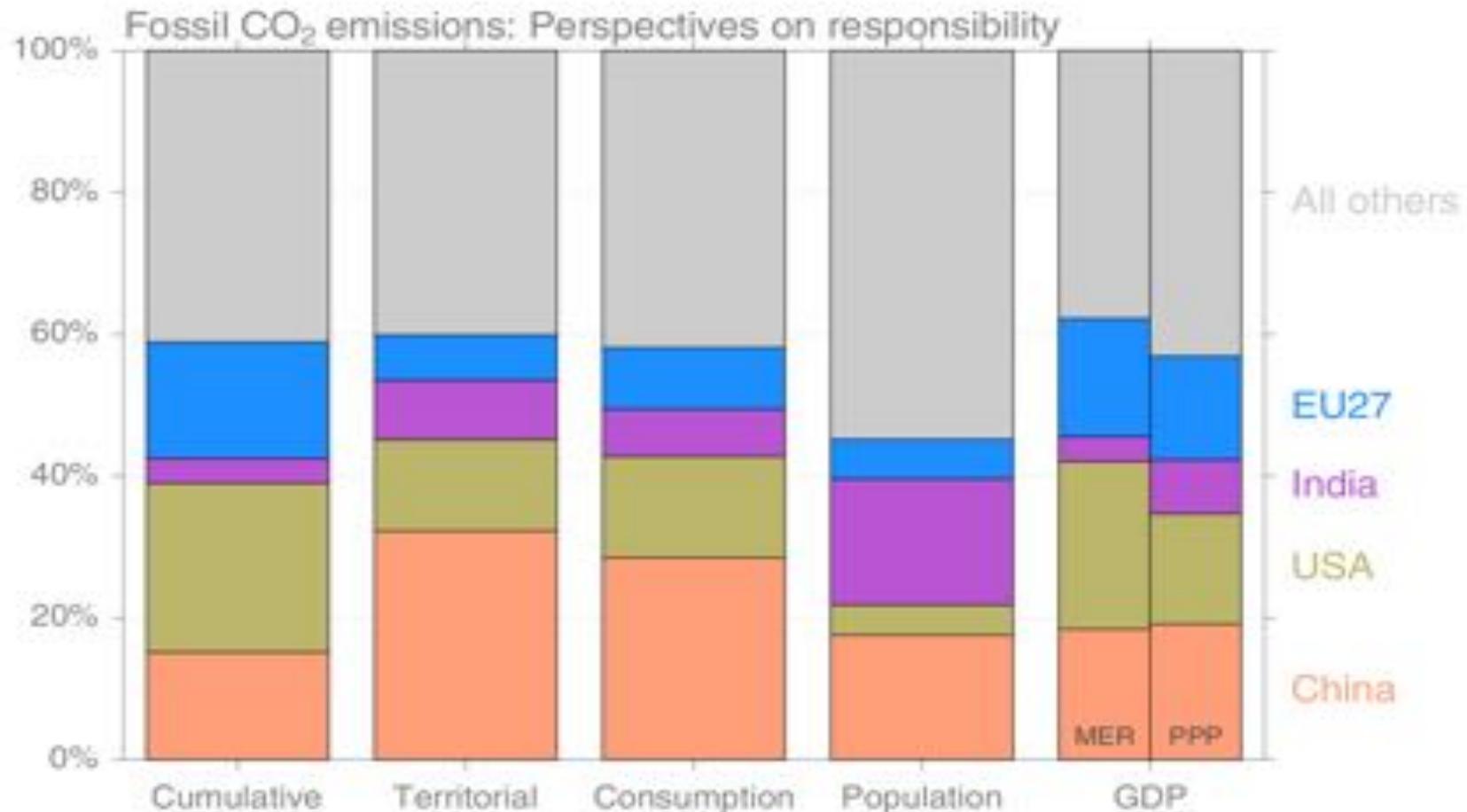
Fossil Fuel & Cement CO₂ Emissions



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

Emissions anthropiques

Emissions – responsabilités différencierées



© 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

Global greenhouse gas emissions and warming scenarios

Our World
in Data

- Each pathway comes with uncertainty, marked by the shading from low to high emissions under each scenario.
- Warming refers to the expected global temperature rise by 2100, relative to pre-industrial temperatures.

Annual global greenhouse gas emissions
in gigatonnes of carbon dioxide-equivalents

150 Gt

100 Gt

50 Gt

Greenhouse gas emissions
up to the present

0

1990 2000 2010 2020 2030 2040 2050 2060 2070 2080 2090 2100

No climate policies
4.1 – 4.8 °C

→ expected emissions in a baseline scenario if countries had not implemented climate reduction policies.

Current policies
2.5 – 2.9 °C

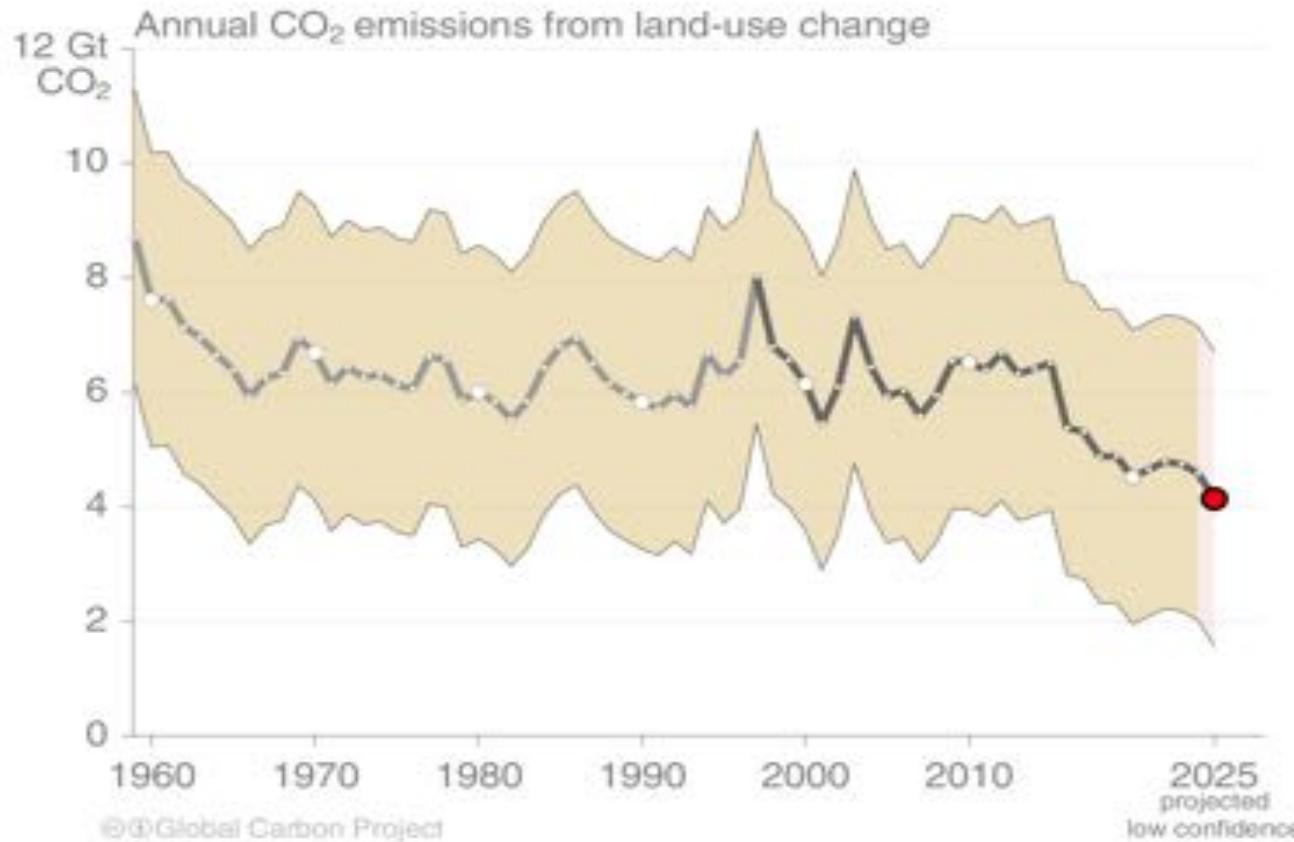
→ emissions with current climate policies in place result in warming of 2.5 to 2.9°C by 2100.

Pledges & targets (2.1 °C)
→ emissions if all countries delivered on reduction pledges result in warming of 2.1°C by 2100.

2°C pathways
1.5°C pathways

Emissions anthropiques

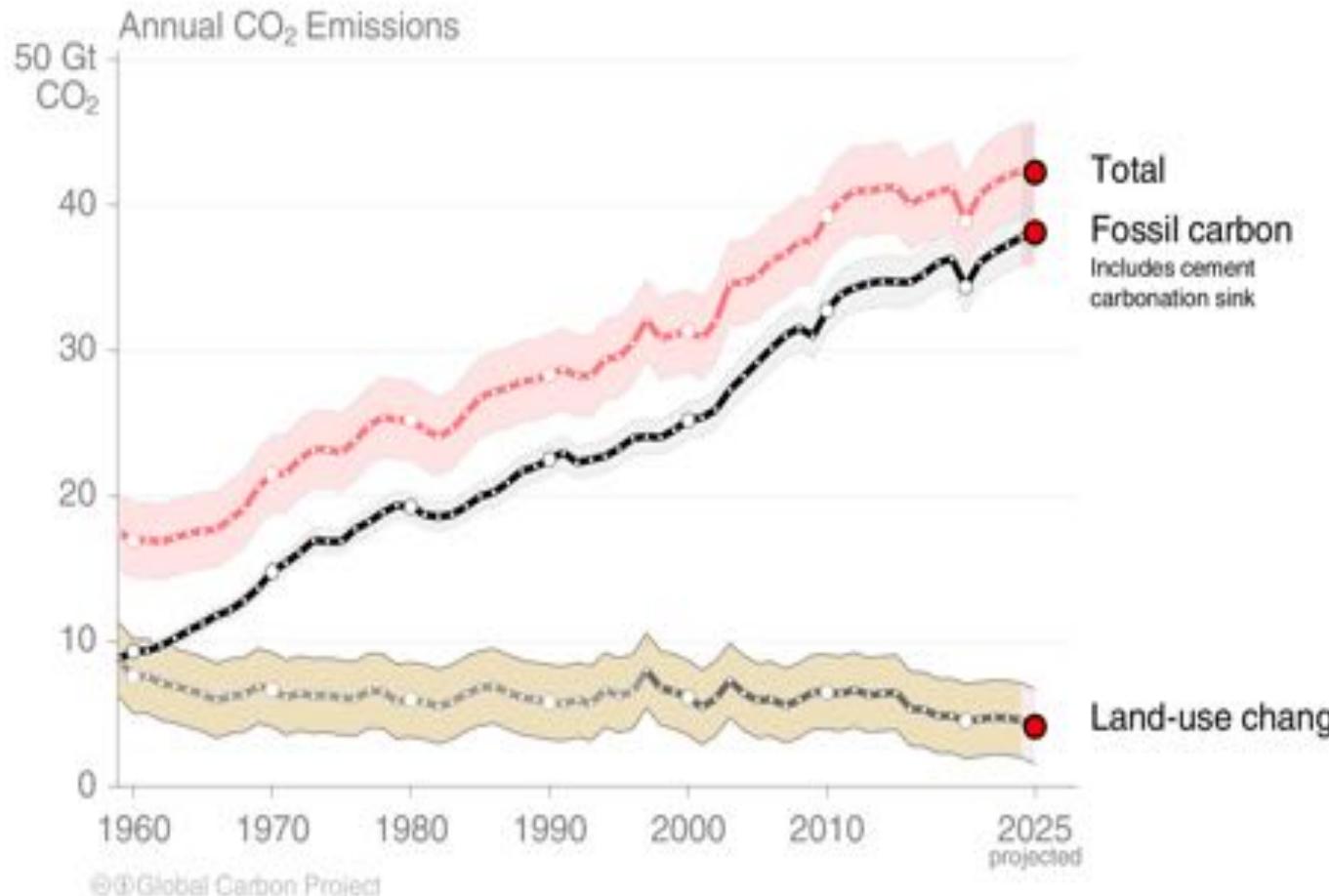
... liées aux changements d'utilisation des sols



Estimates from three bookkeeping models

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

Emissions anthropiques



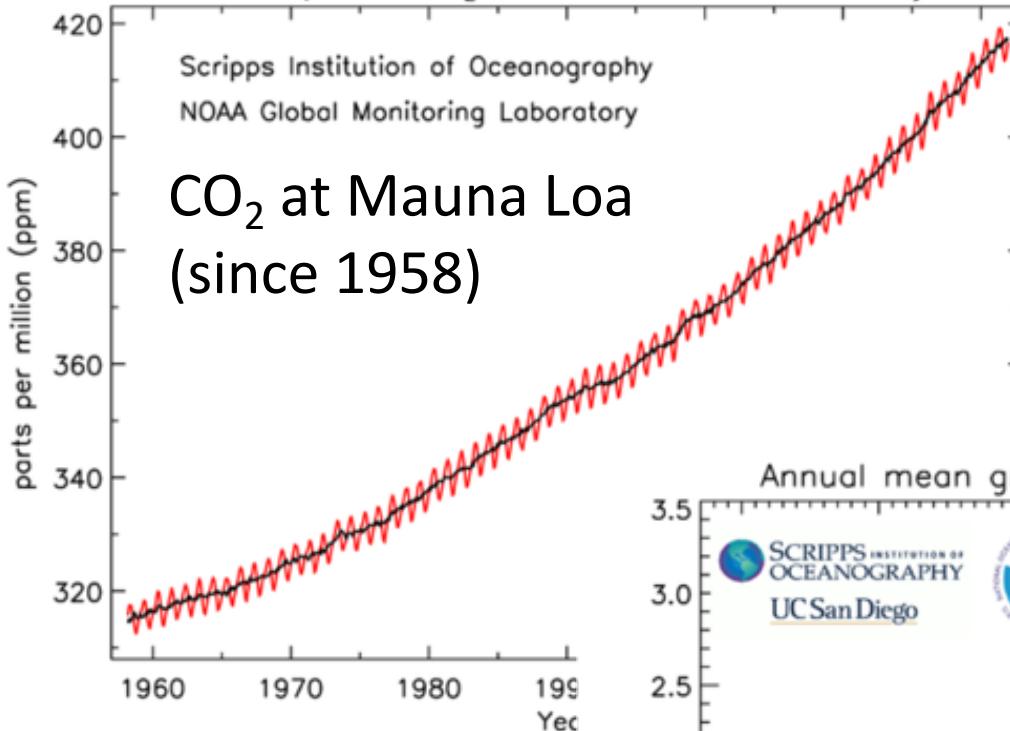
Source: Global Carbon Budget 2025

Depuis l'atmosphère...

Atmospheric CO₂ at Mauna Loa Observatory

Scripps Institution of Oceanography
NOAA Global Monitoring Laboratory

CO₂ at Mauna Loa
(since 1958)



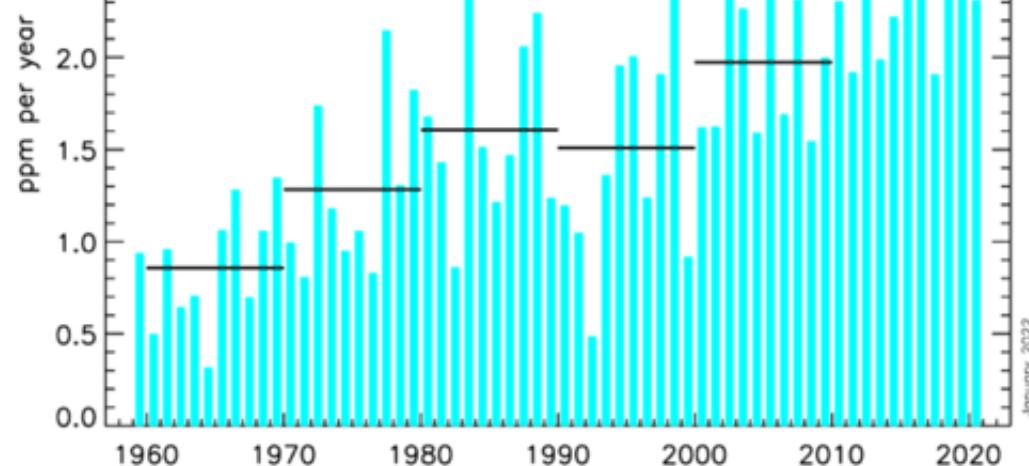
CO₂ growth rate

Annual mean growth rate of CO₂ at Mauna Loa

SCRIPPS INSTITUTION OF OCEANOGRAPHY
UC San Diego



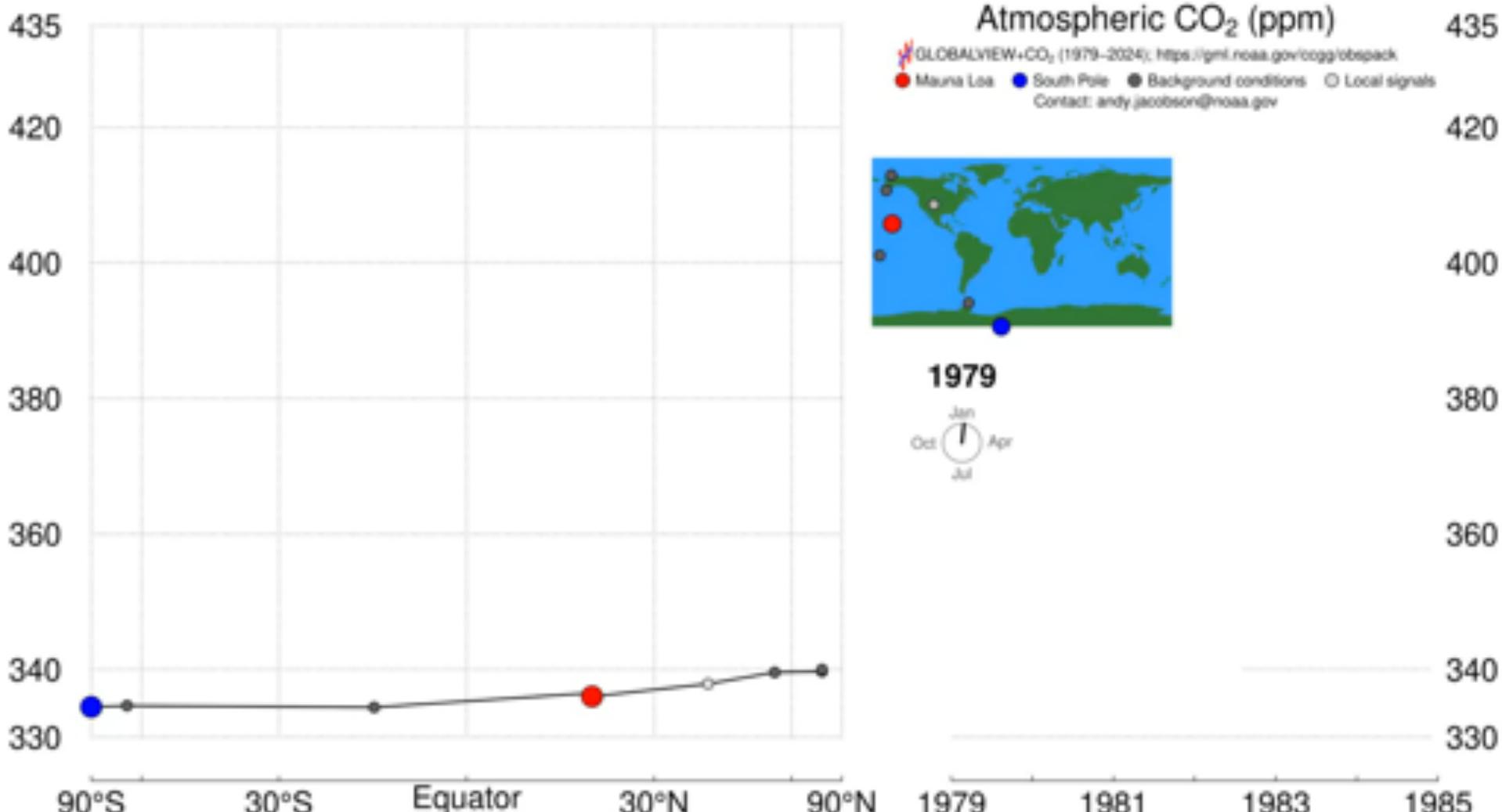
NOAA
NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION
U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE



January 2022

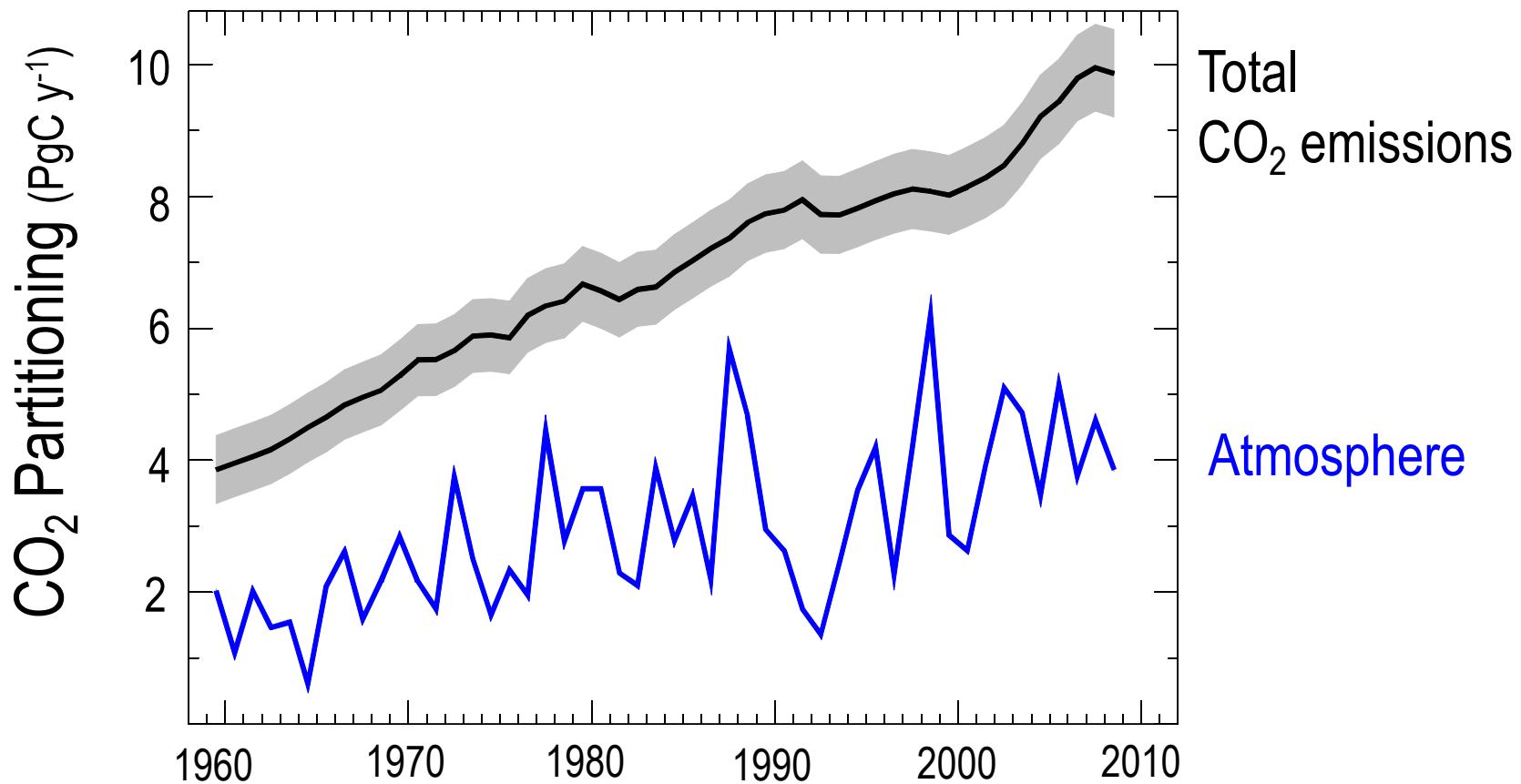
Depuis l'atmosphère...

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

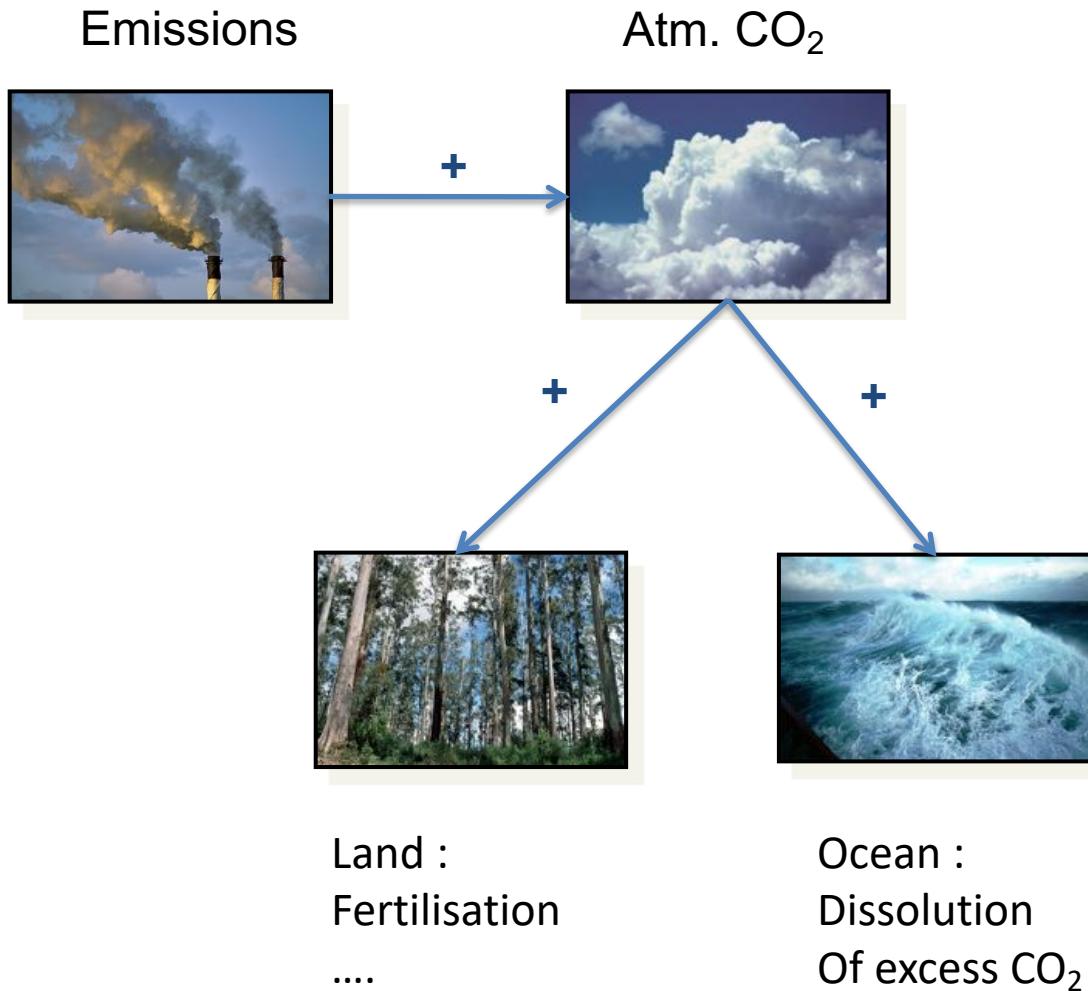


Emissions vs. Taux de croissance dans l'atm.

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



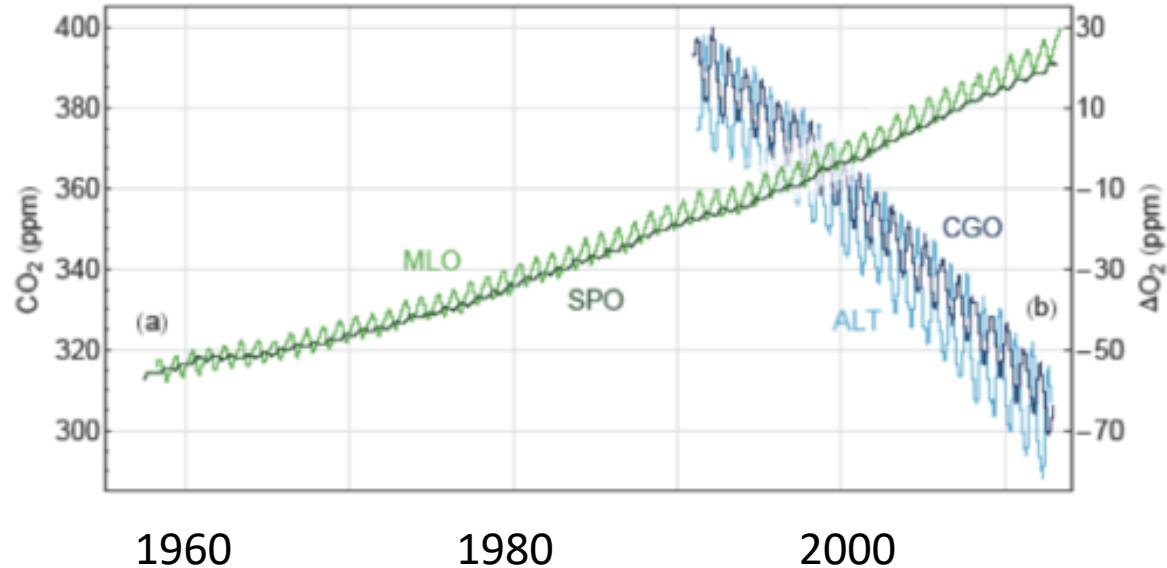
Les puits de carbone



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

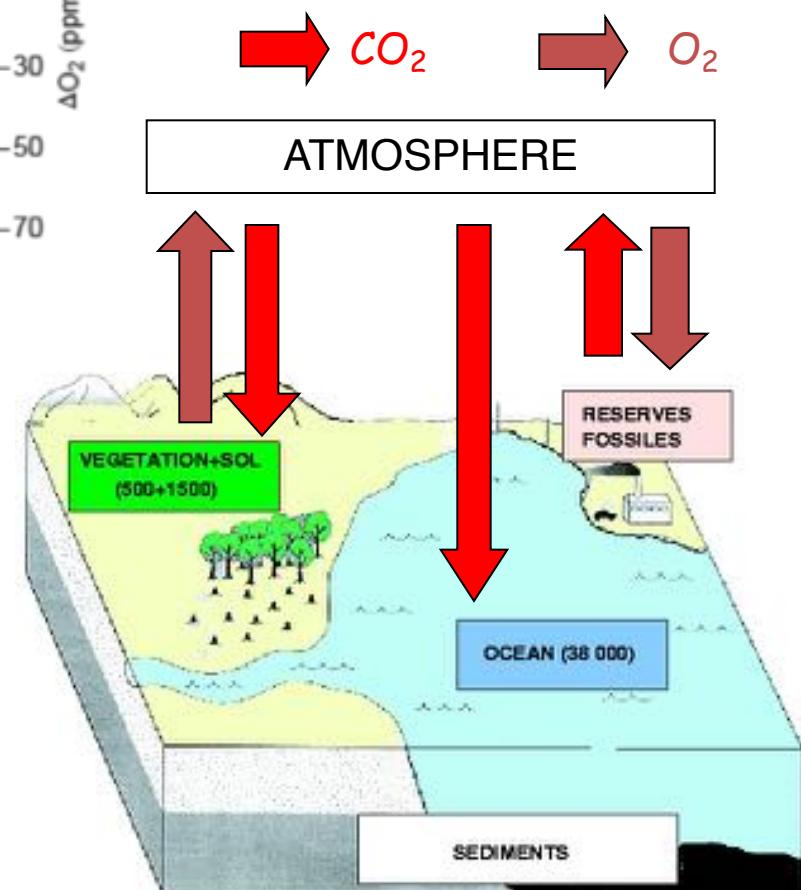
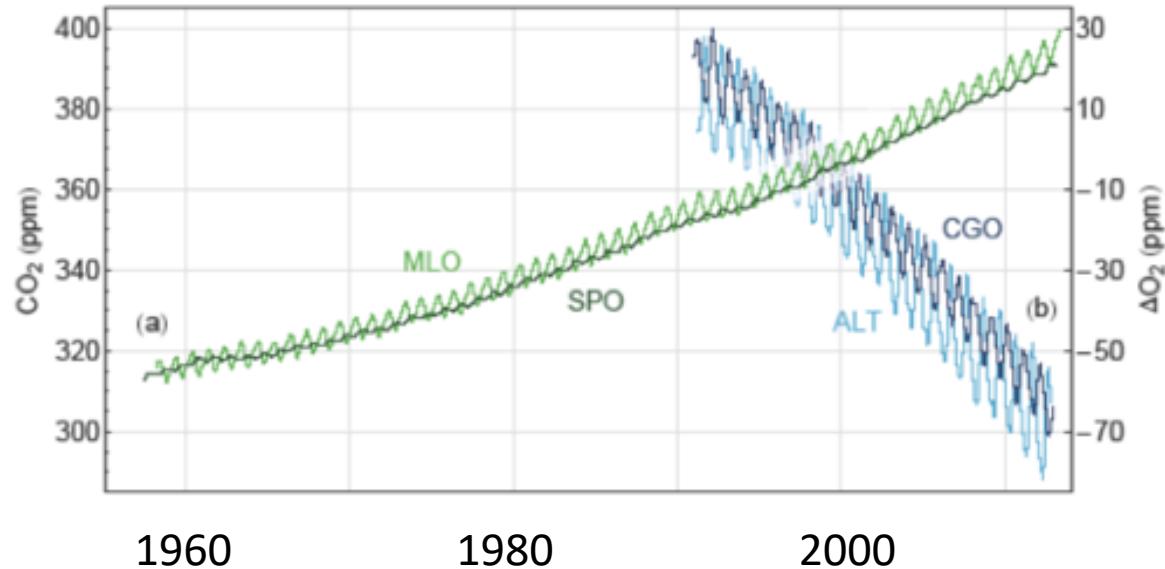
Partitionner les puits

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)

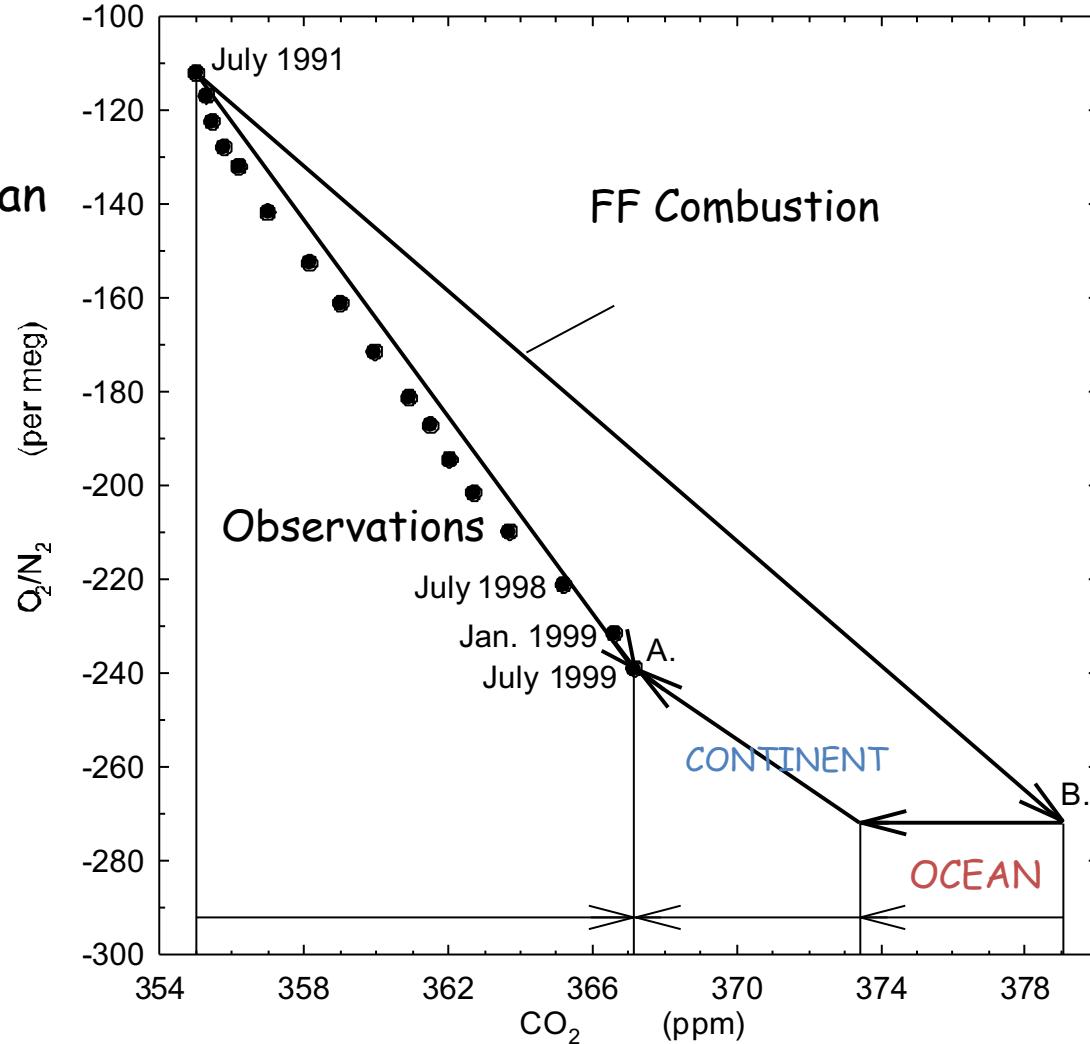


Partitionner les puits

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

$$\Delta CO_2 = FF - Cont. - Ocean$$

$$\Delta O_2 = \alpha FF - \beta Cont.$$



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

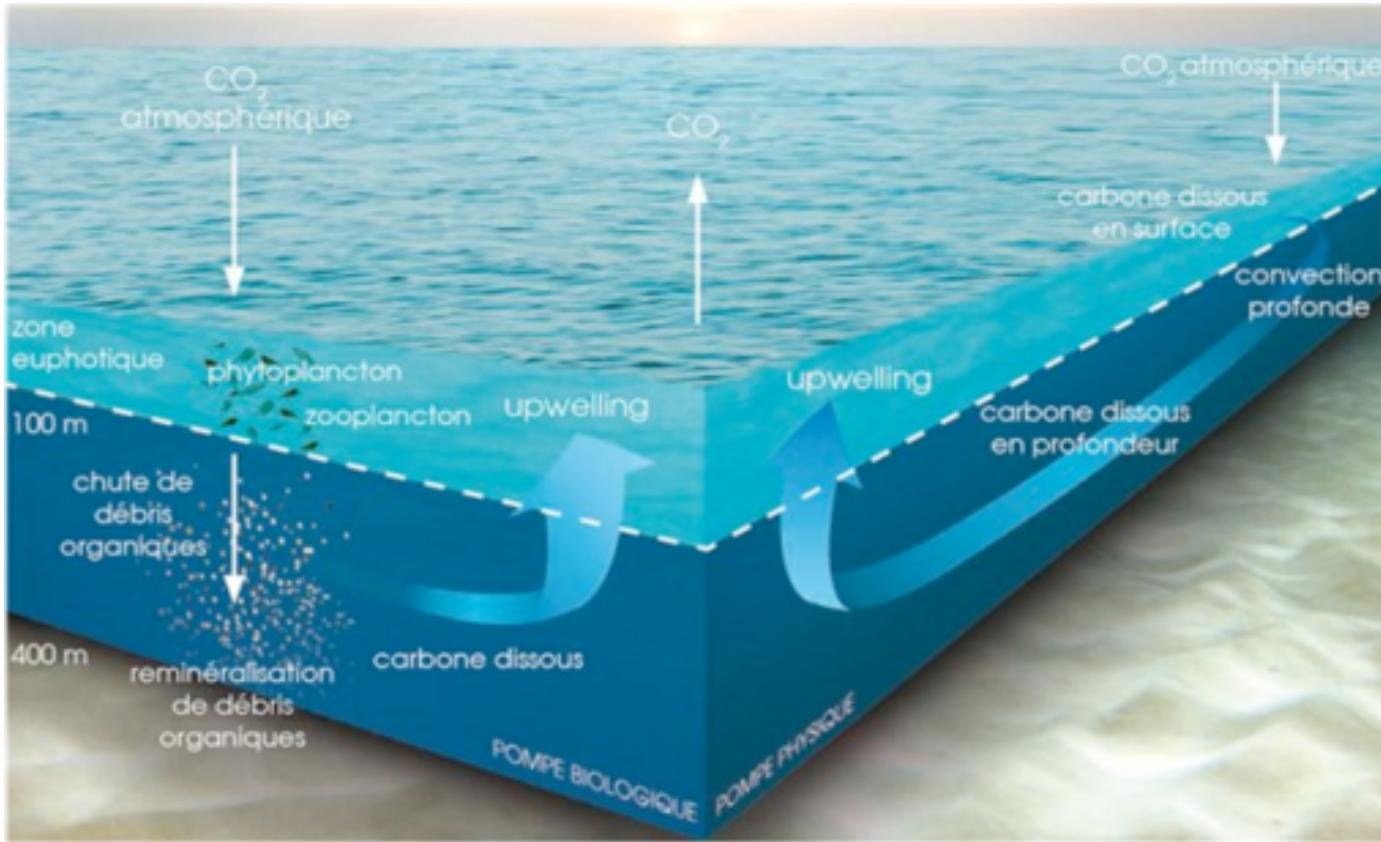
Source: [Friedlingstein et al 2025](#); [Global Carbon Project 2025](#)

Le puits de carbone océanique

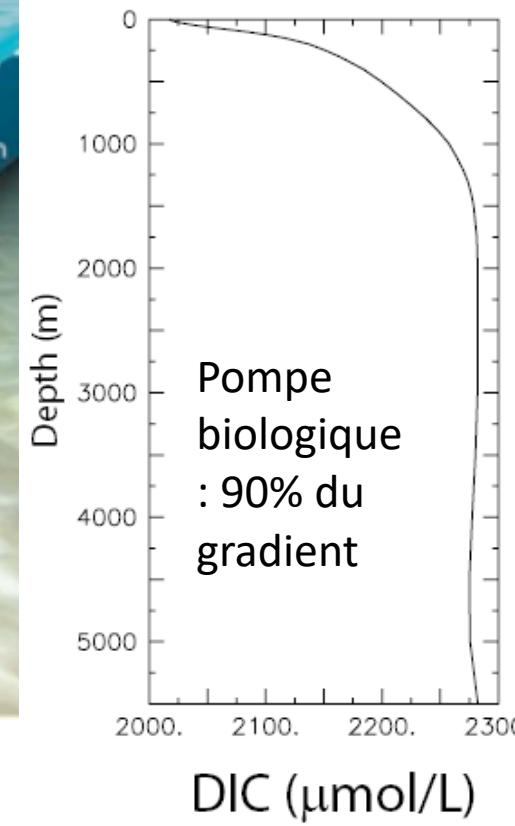
Cycle Naturel du Carbone

→ 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 CO₂ atm. (et de la ΔpCO₂ associée)

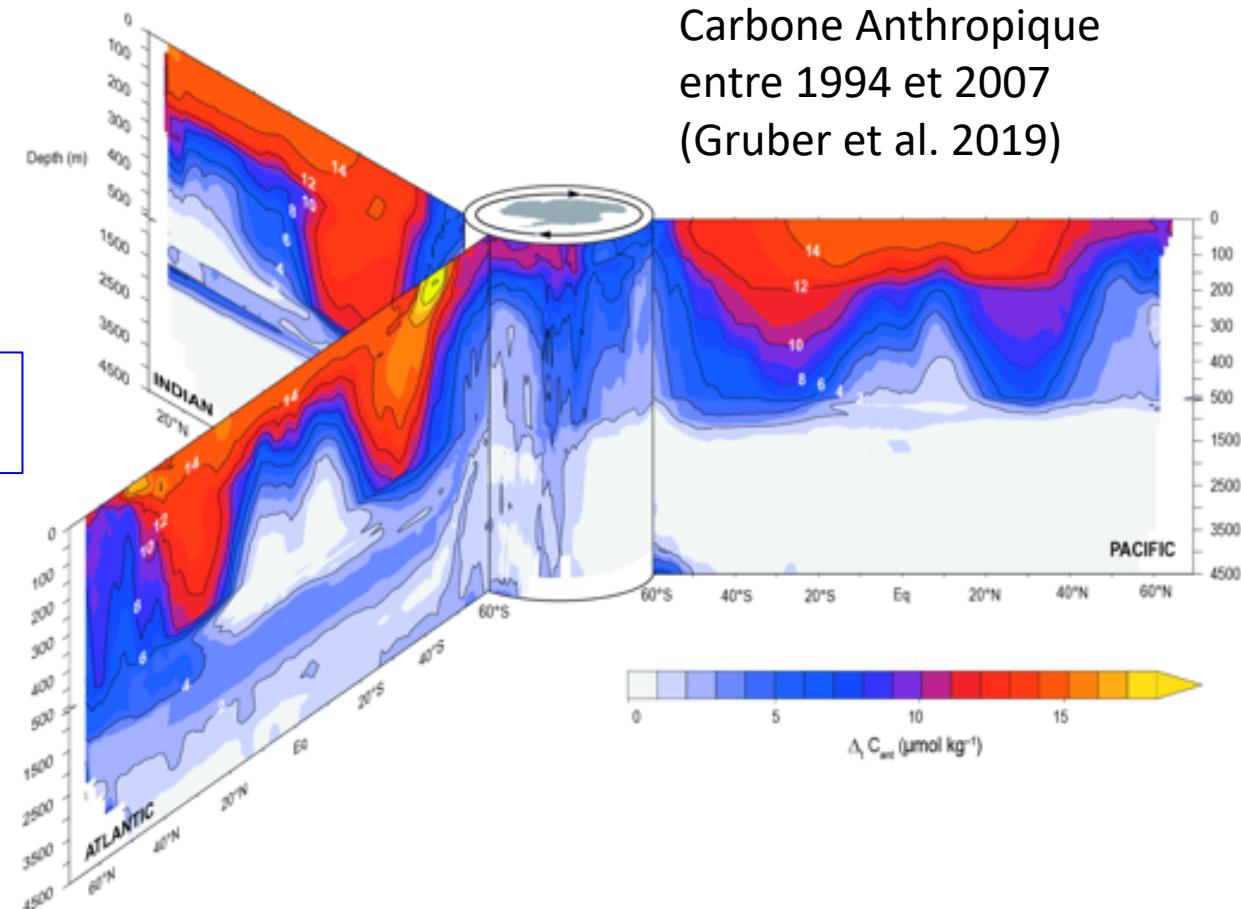
$$\text{Flux} = k_w S_{\text{CO}_2} \Delta p\text{CO}_2$$

Mais ce puits dépend :

- de la solubilité du CO₂
- de l'effet « tampon » / chimie des carbonates



- du transfert du CO₂ anthropique vers les eaux de subsurface / en profondeur





Bilan carbone des dernières décennies

Emissions anthropiques

Puits de carbone naturels



Projections pour le 21ème siècle

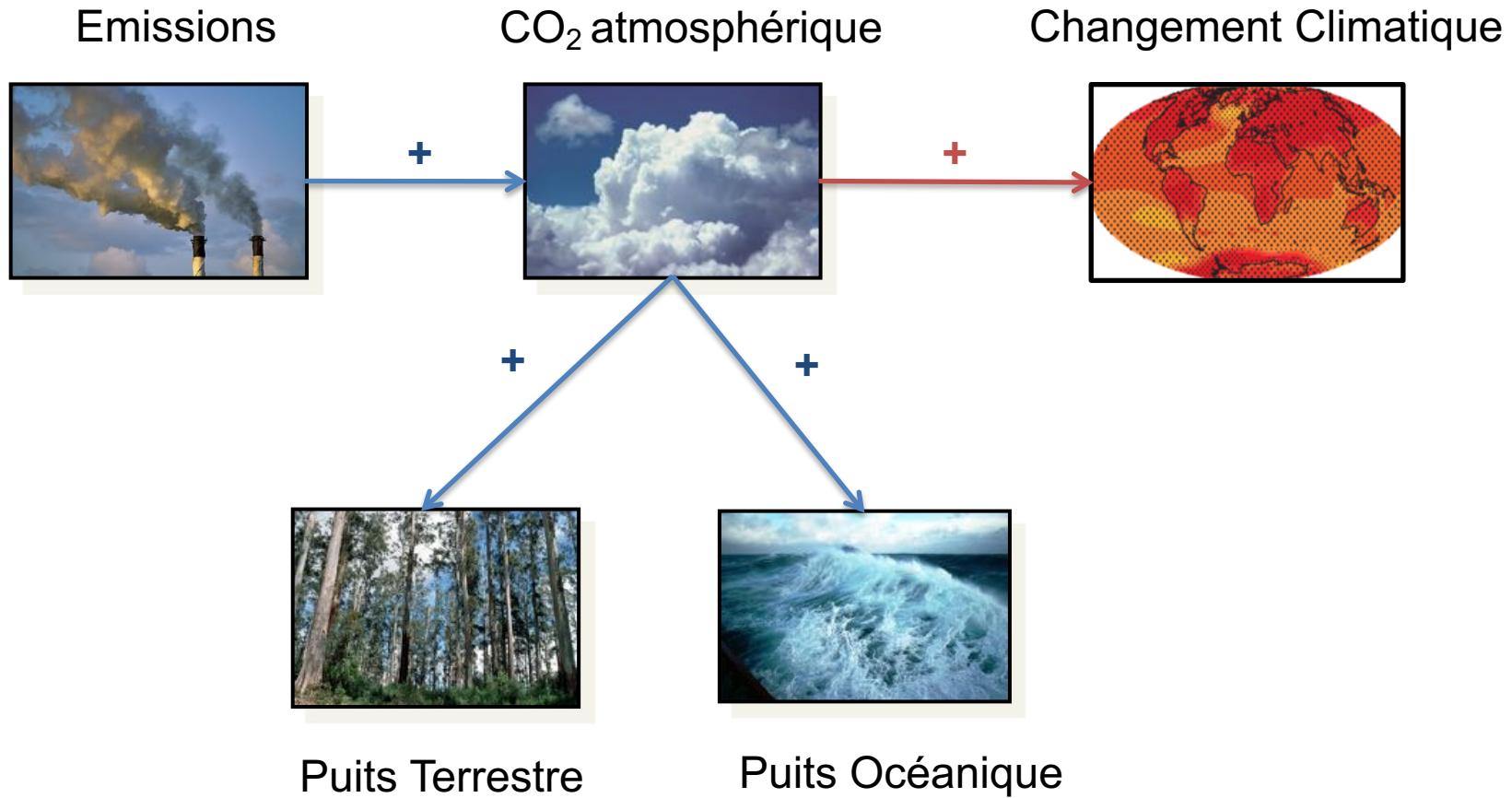
Couplage climat carbone

Emissions compatibles

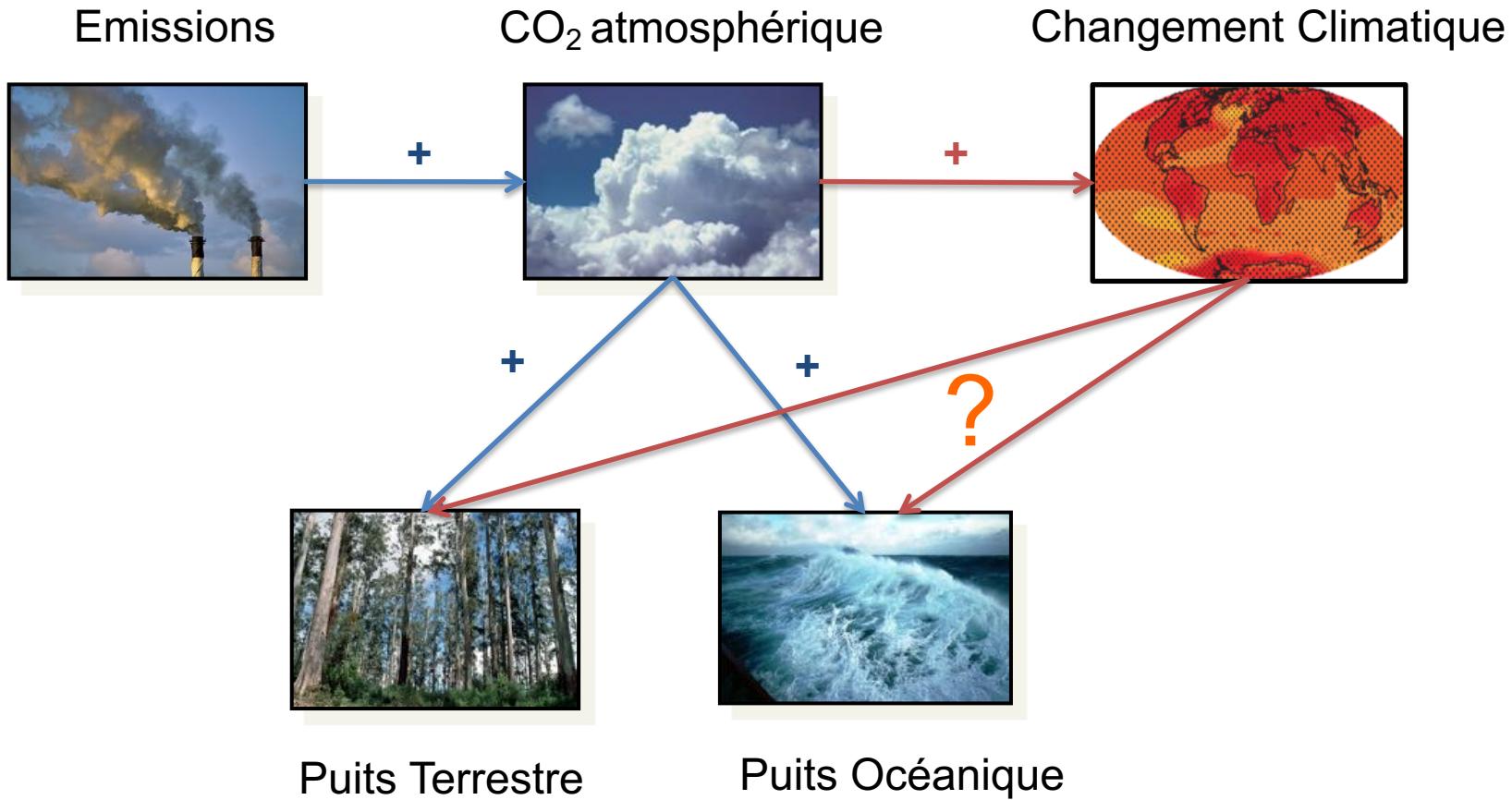


Méthodes d'élimination du CO₂ atmosphérique

Une rétroaction climat-carbone ?



Une rétroaction climat-carbone ?

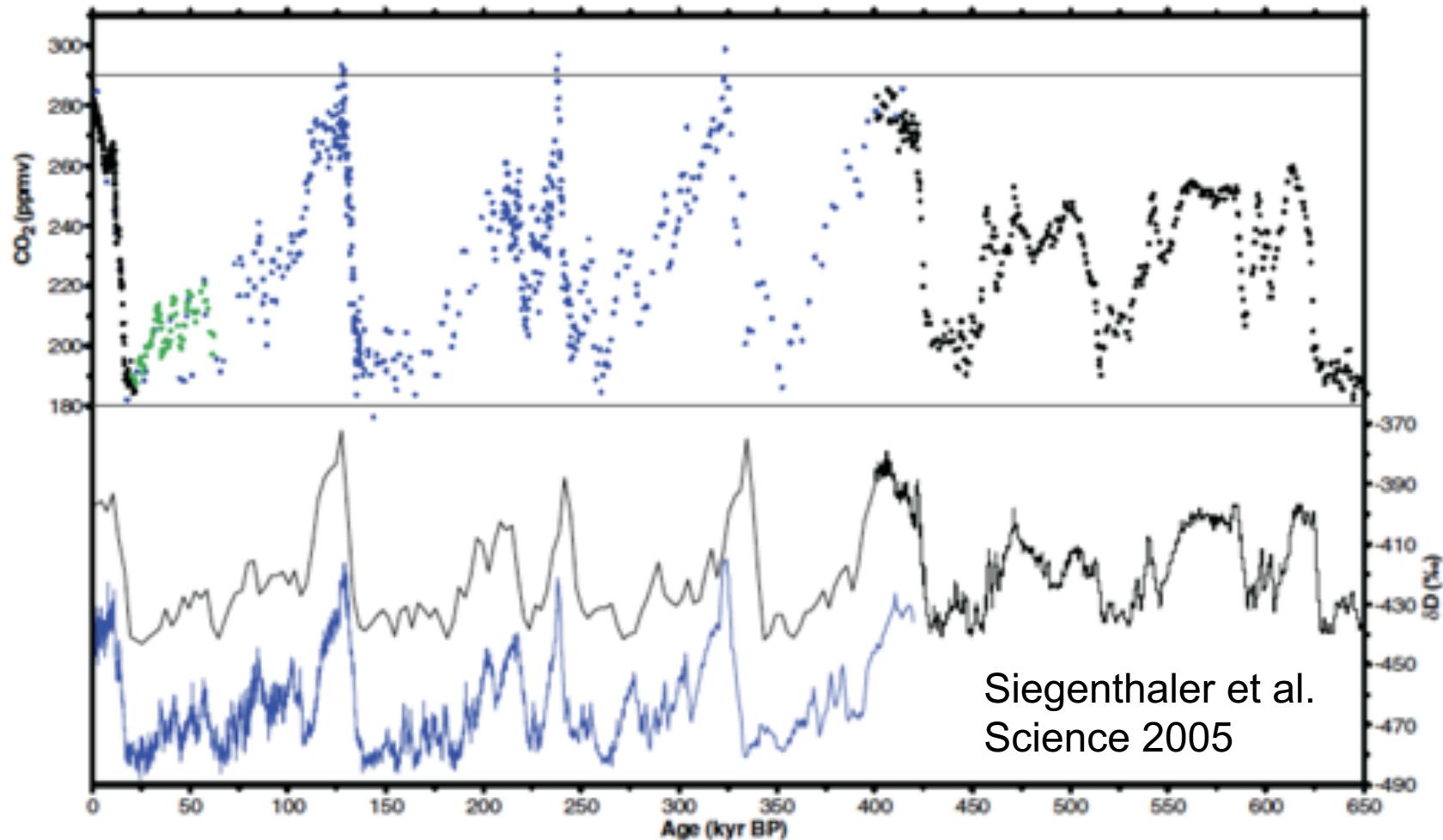


By altering the efficiency of carbon sinks, climate change affects the concentration of CO₂

Positive or negative feedback ?

Des indices sur de multiples échelles de temps

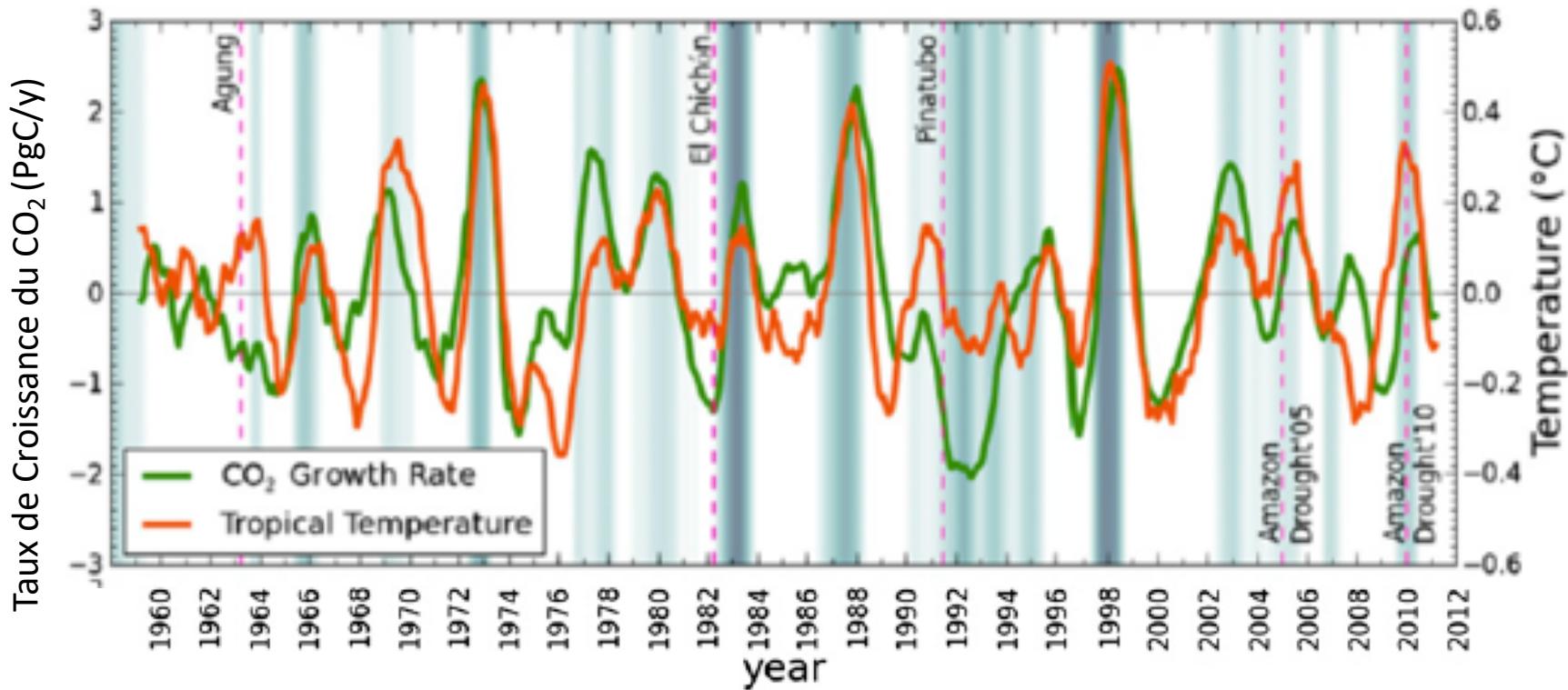
Glacial - Interglacial: CO₂ & Climate



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

Des indices sur de multiples échelles de temps

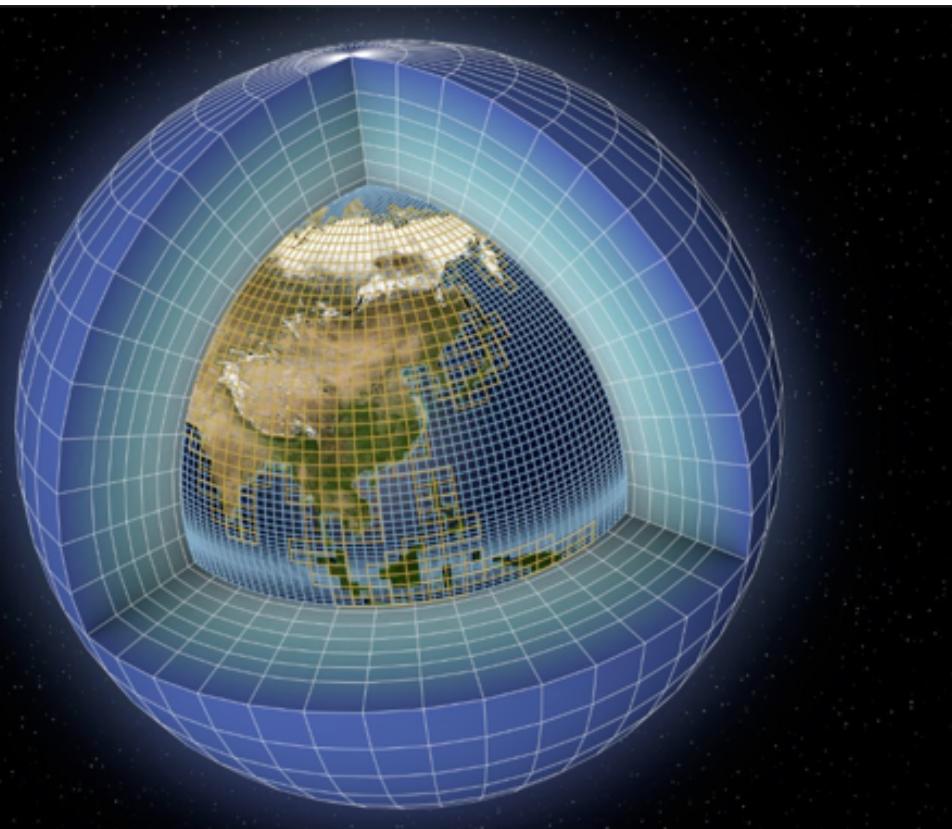
Interannual Variability: CO₂ & El Niño



Wang et al. PNAS 2013

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

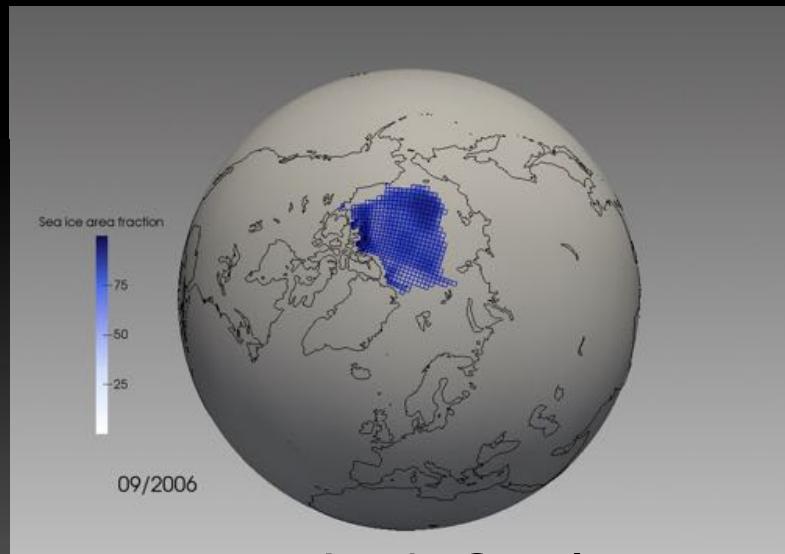
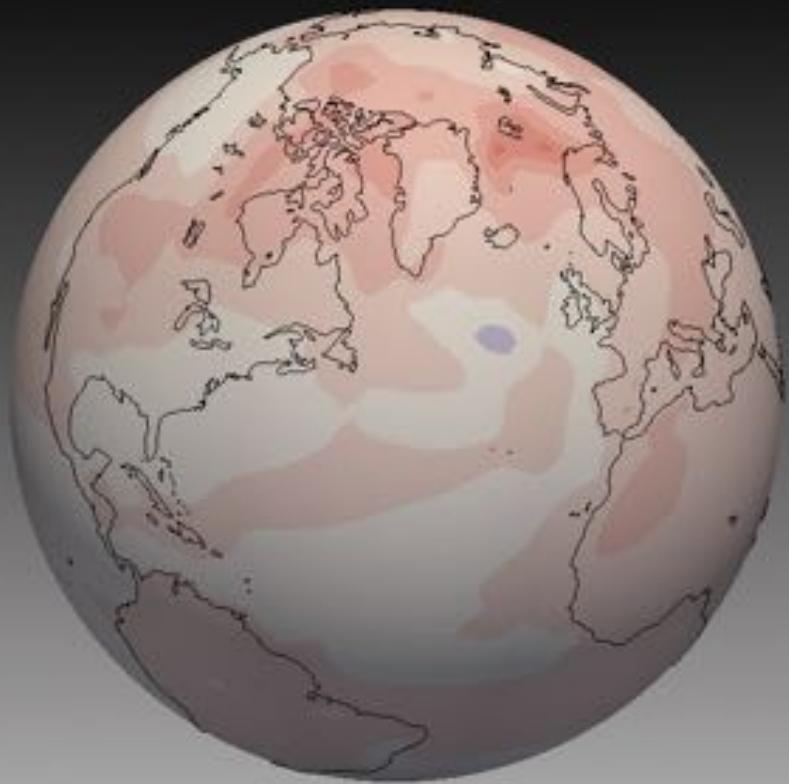
Projections couplées climat-carbone



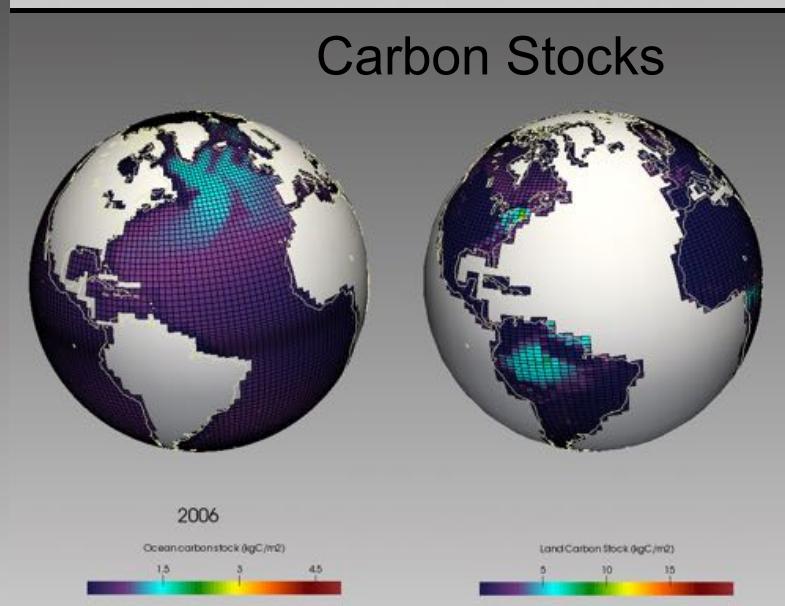
Modèles climatiques
et super-calculateurs



Projections Climatiques

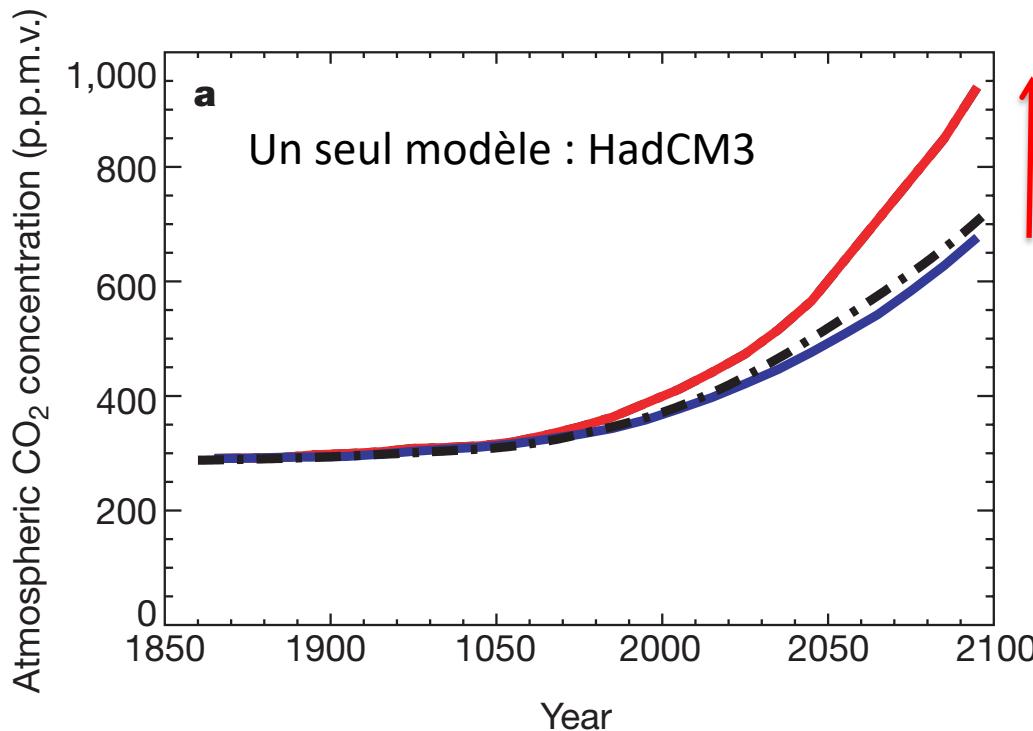
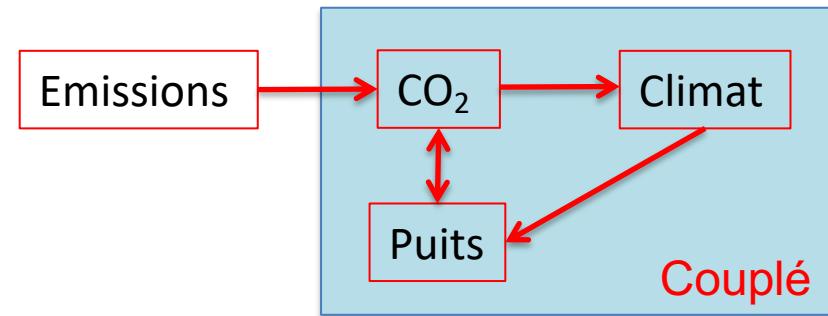
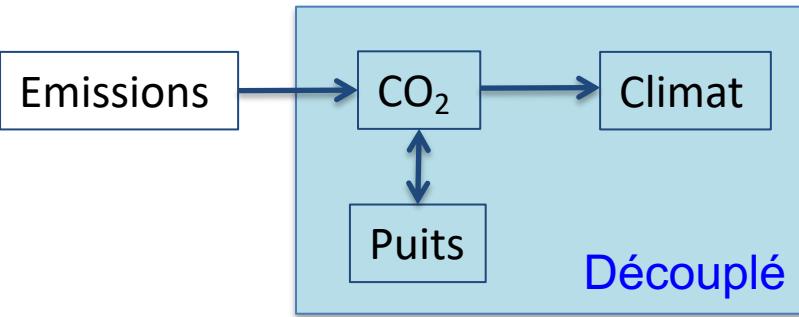


Arctic Sea Ice



Quelle amplitude pour la rétroaction climat-carbone ?

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

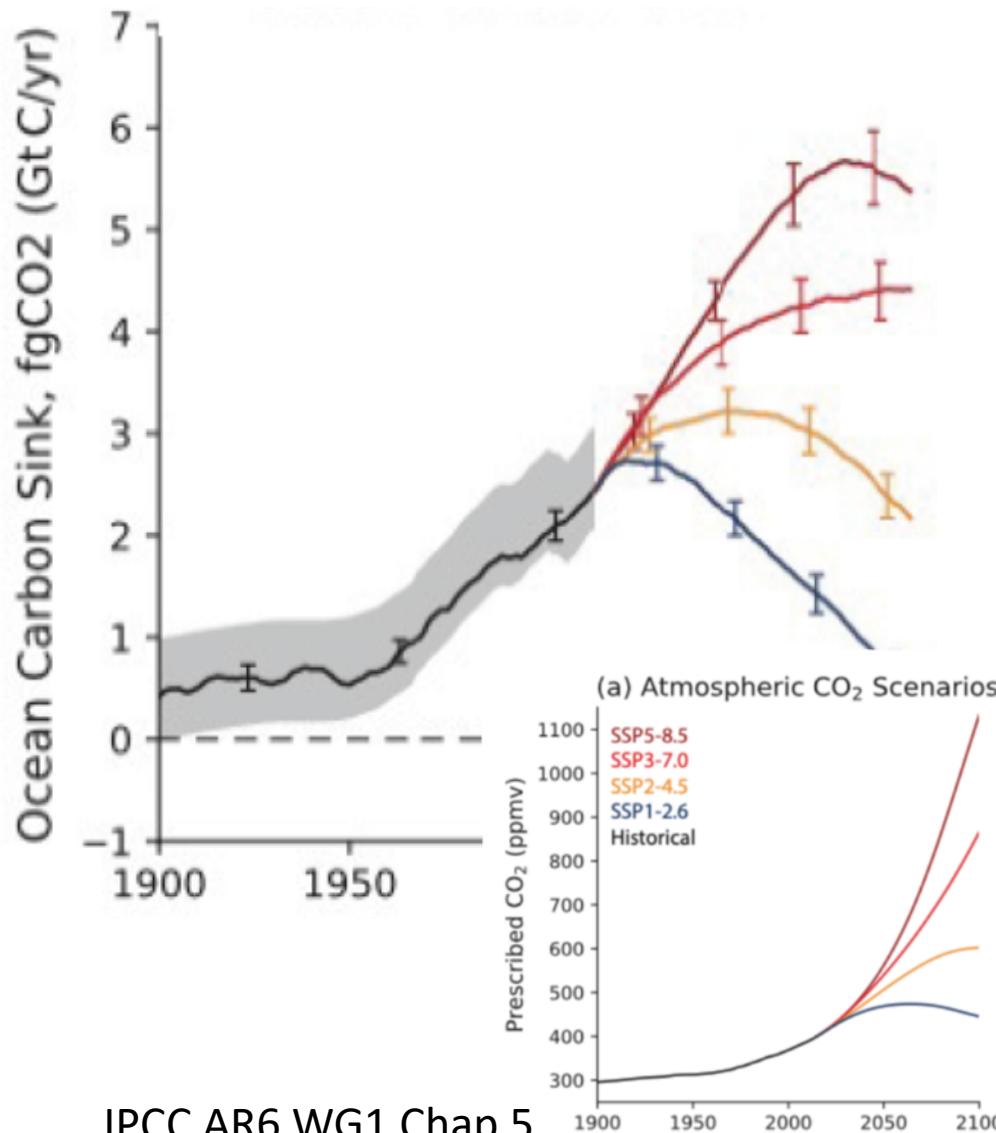


Rétroaction Positive !

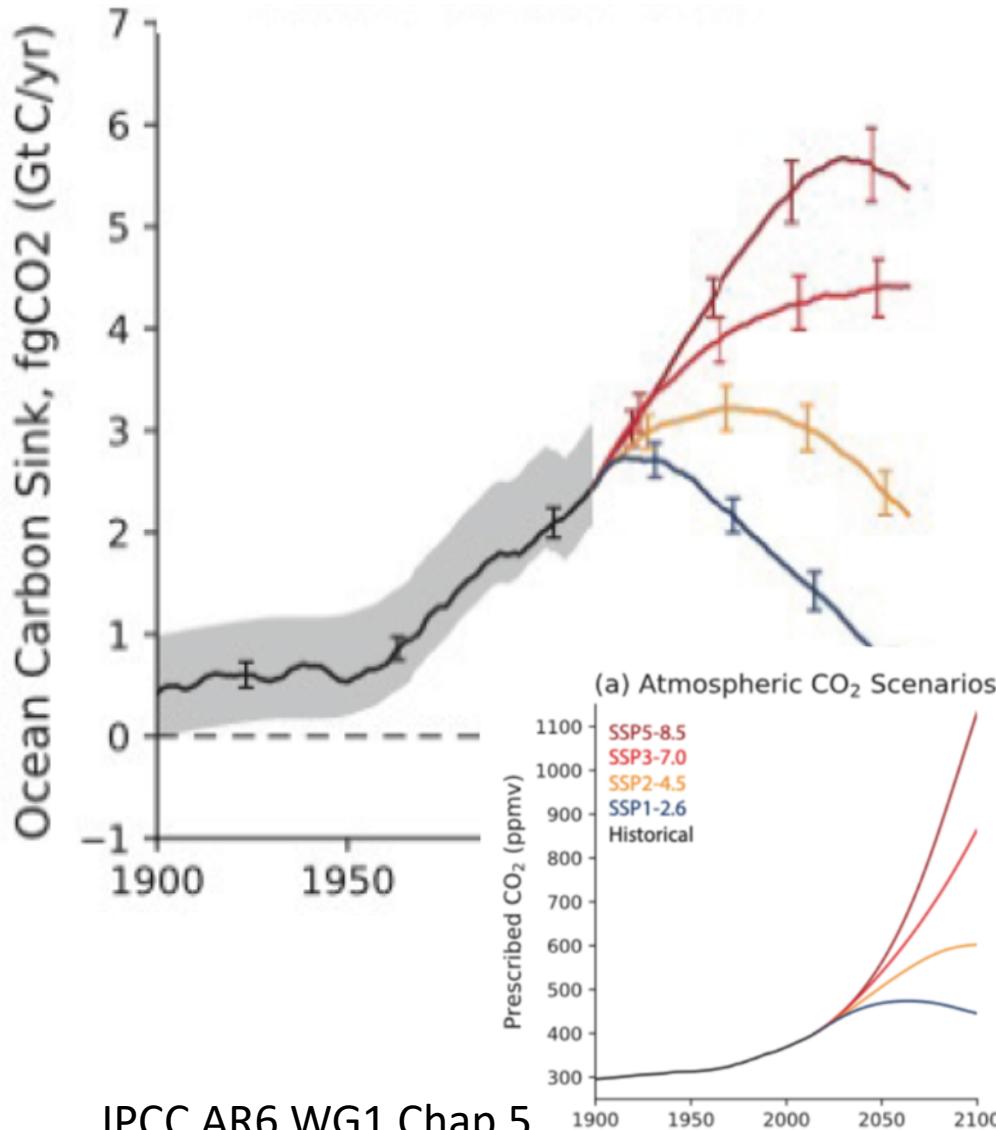
Le changement climatique conduit à une contraction de la forêt amazonienne et à une perte massive du carbone du sol.

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

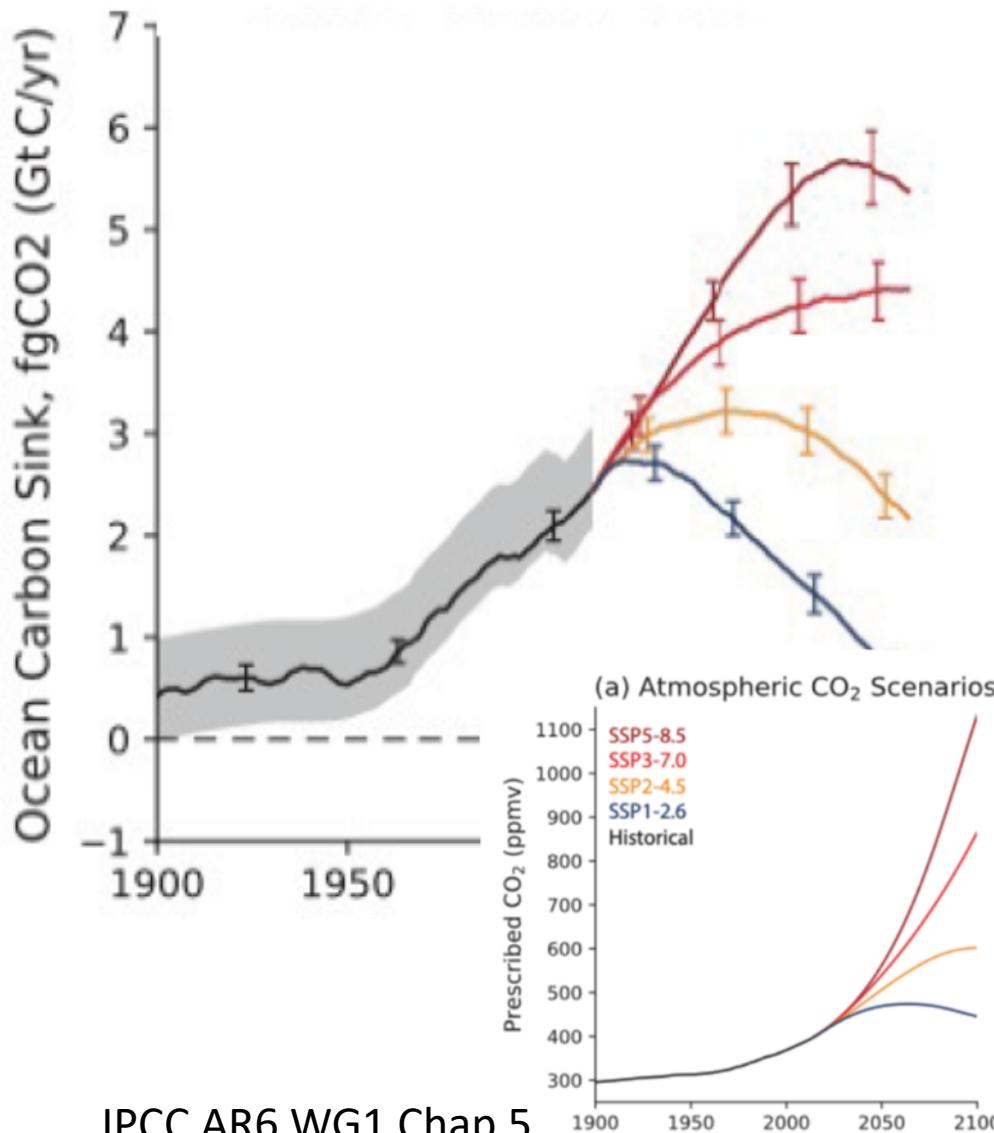


Ce que nous savons :

- ① Le puits futur dépend principalement de la trajectoire du CO₂ atmosphérique.

Quelle amplitude pour la rétroaction climat-carbone ?

→ Le puits de carbone océanique



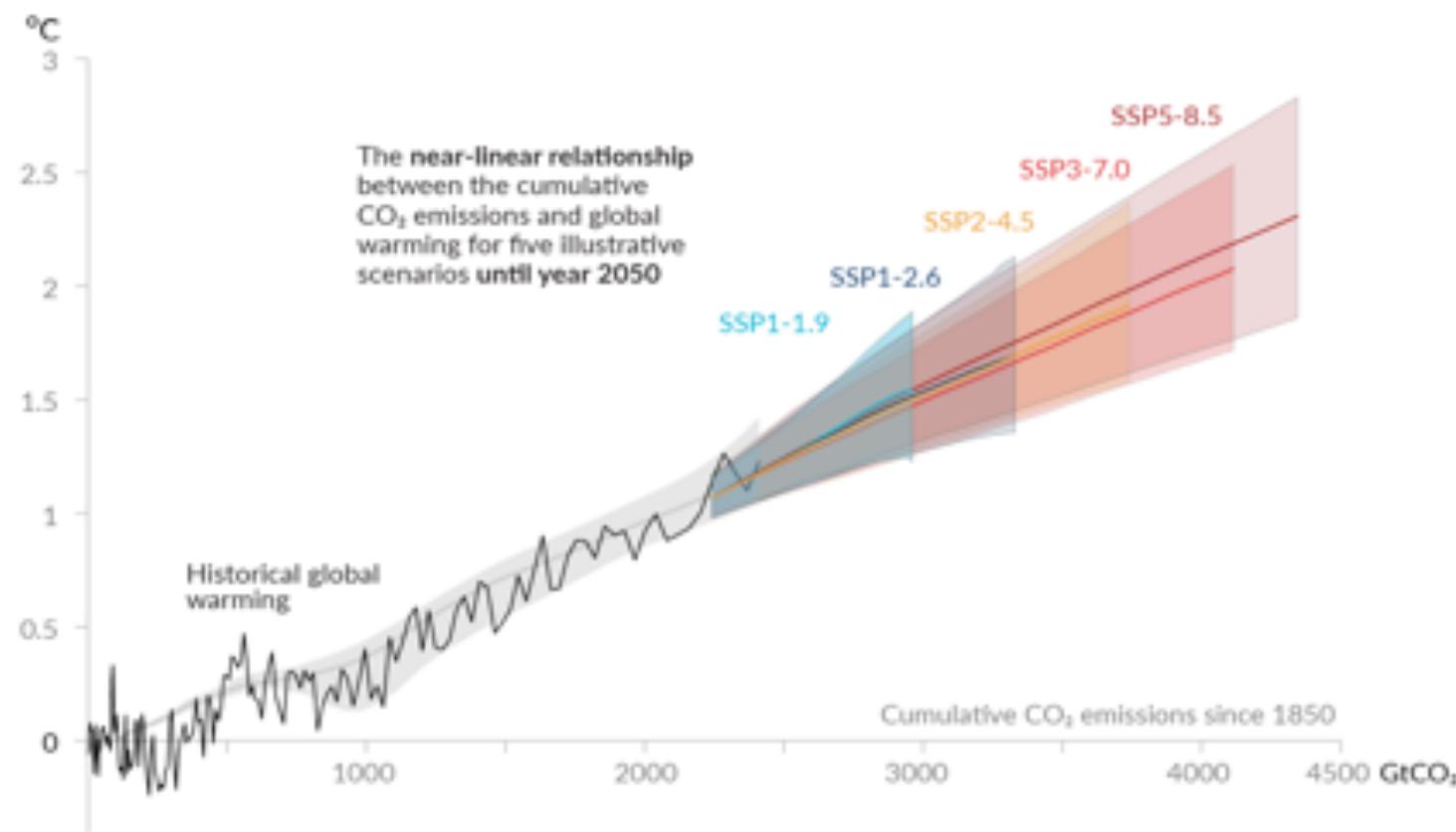
Ce que nous savons :

- ① Le puits futur dépend principalement de la trajectoire du CO₂ atmosphérique.
 - ② Mais avec une saturation en raison de la chimie des carbonates
 - 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...
- Revelle factor = $\frac{\Delta[\text{CO}_2]}{[\text{CO}_2]} / \frac{\Delta[\text{DIC}]}{[\text{DIC}]}$

Retour aux émissions – émissions compatibles

Every tonne of CO₂ emissions adds to global warming

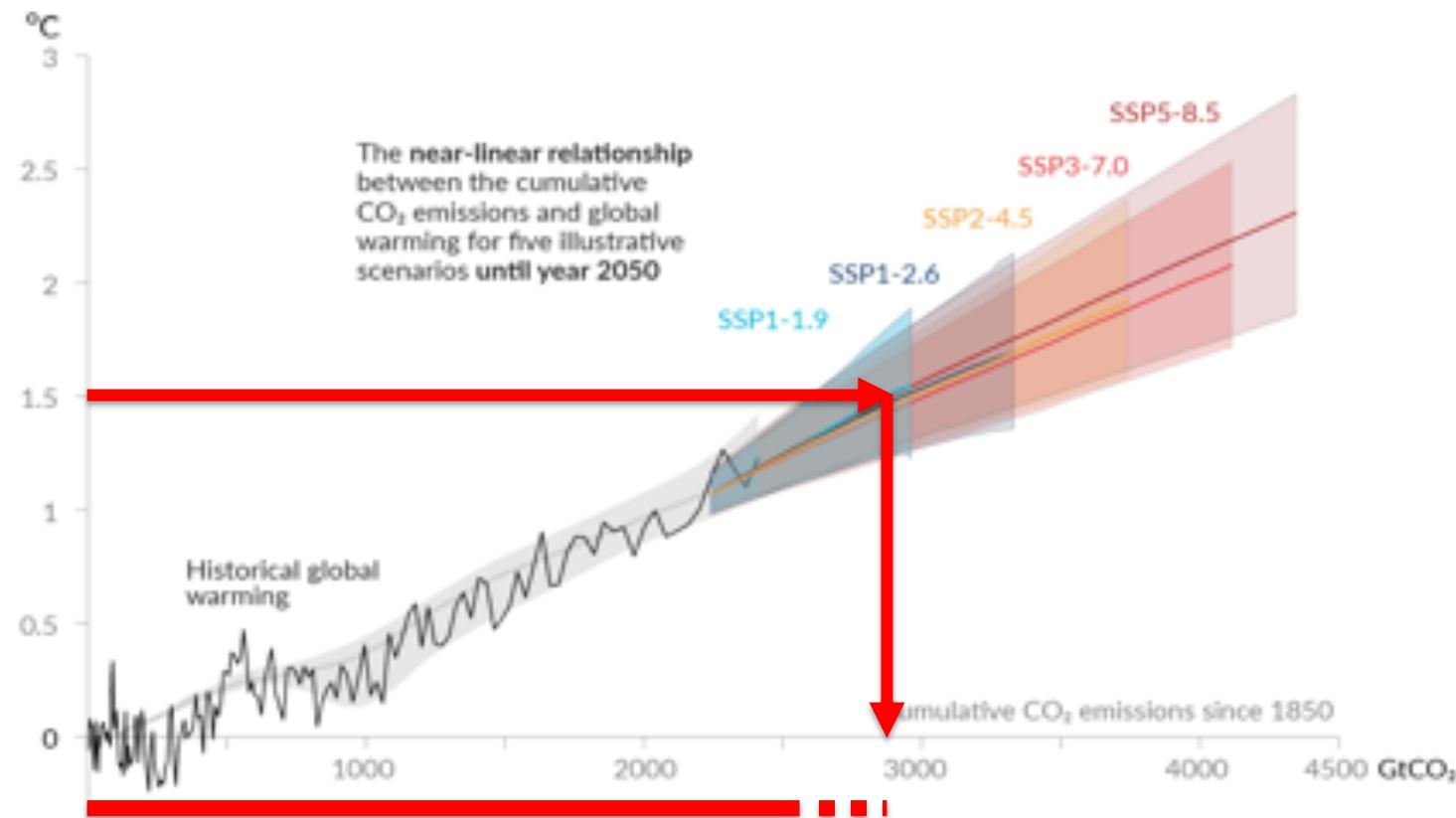
Global surface temperature increase since 1850–1900 (°C) as a function of cumulative CO₂ emissions (GtCO₂)



Retour aux émissions – émissions compatibles

Every tonne of CO₂ emissions adds to global warming

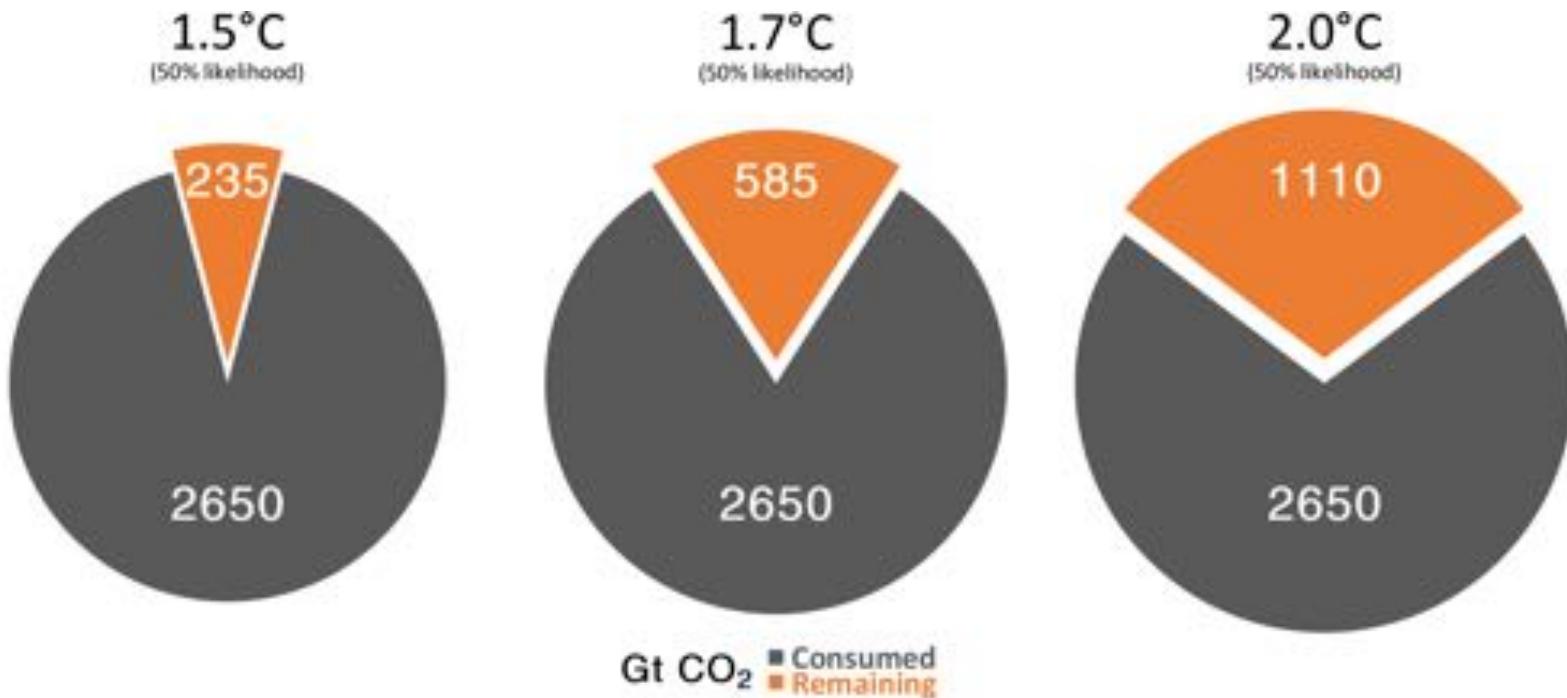
Global surface temperature increase since 1850–1900 (°C) as a function of cumulative CO₂ emissions (GtCO₂)



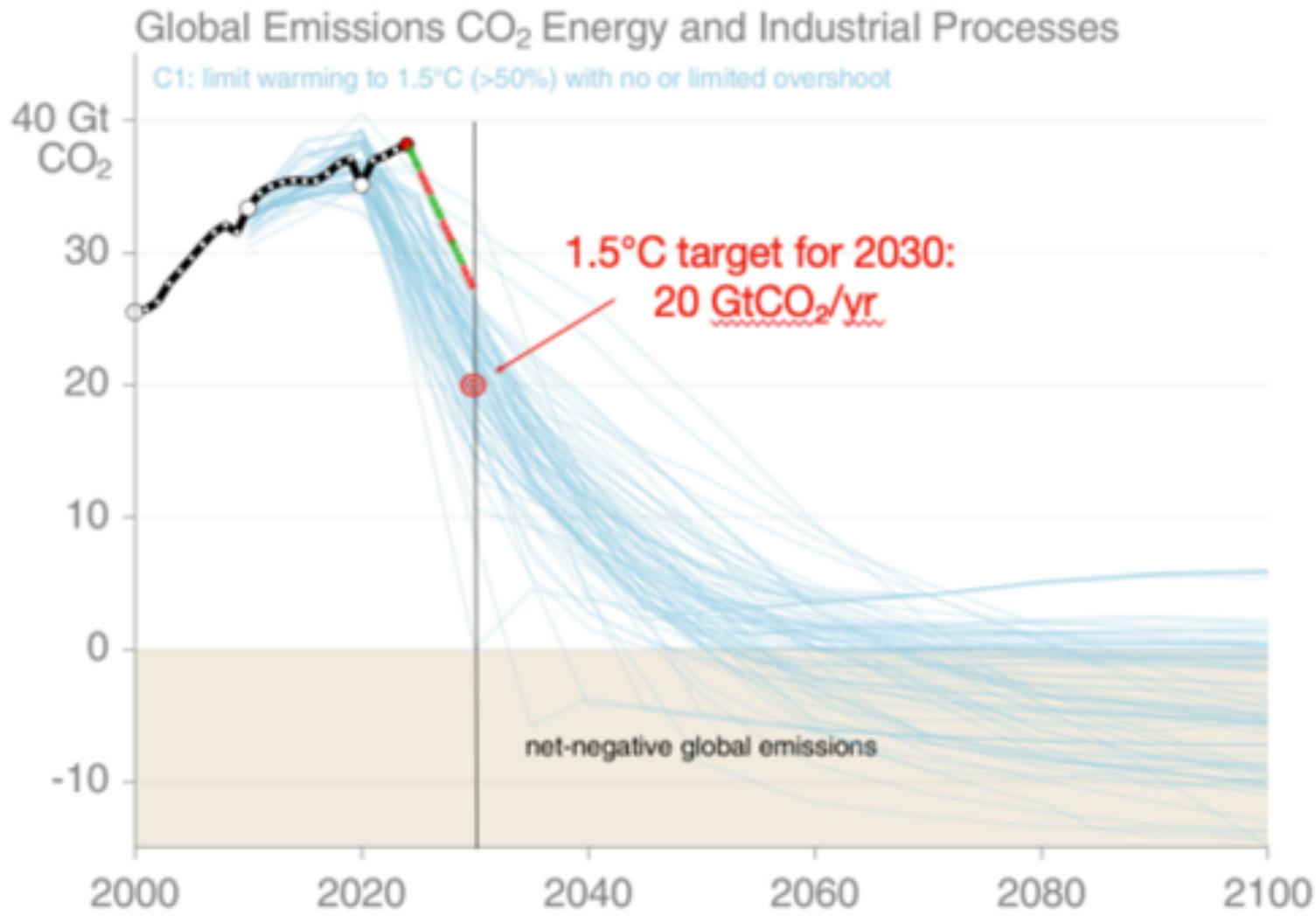
Budget Carbone Restant

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

Eliminer 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)

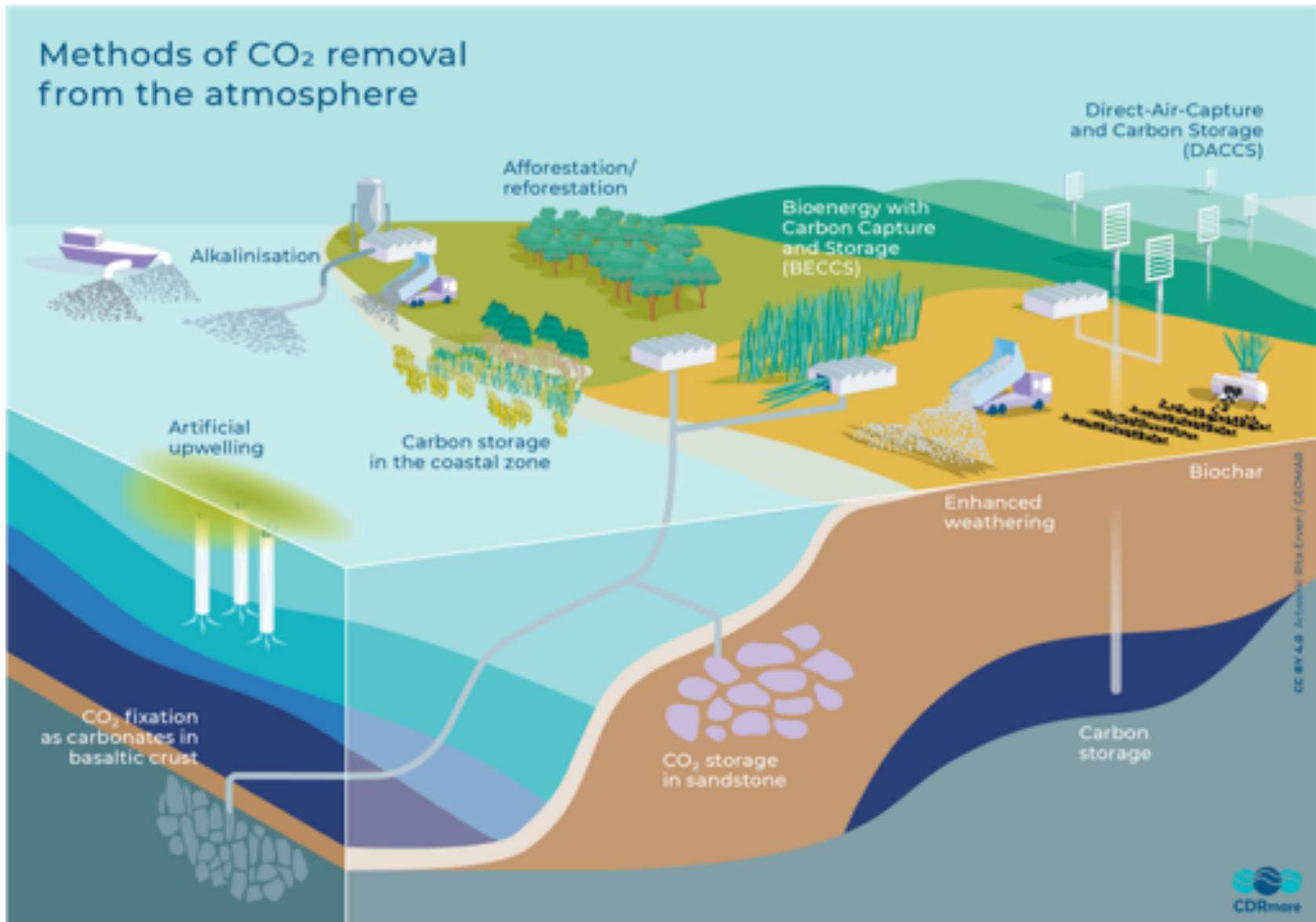
Leur intérêt :

- 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

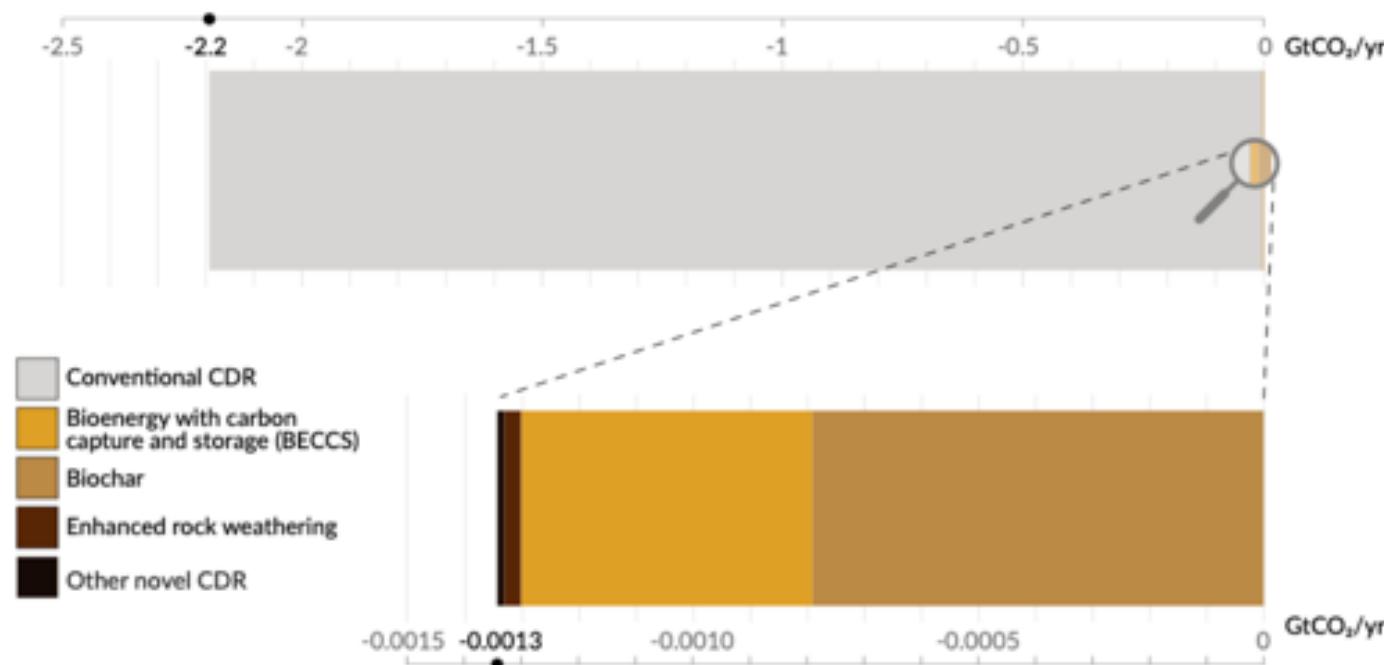
Eliminer du CO₂ déjà dans l'atmosphère ?



Éliminer du CO₂ déjà dans l'atmosphère ?

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

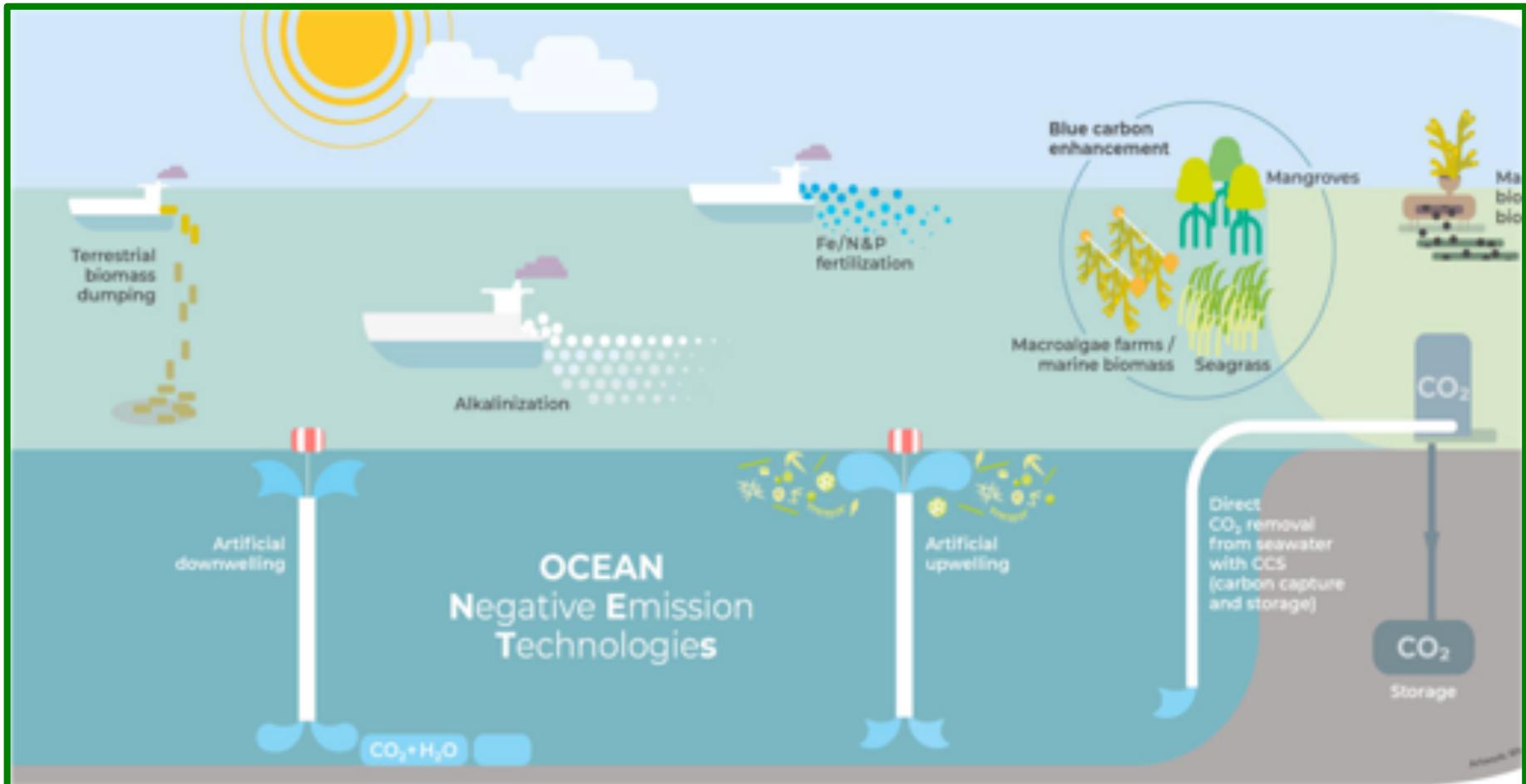
Total amount of carbon dioxide removal, split into conventional and **novel** methods (GtCO₂/yr)



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.

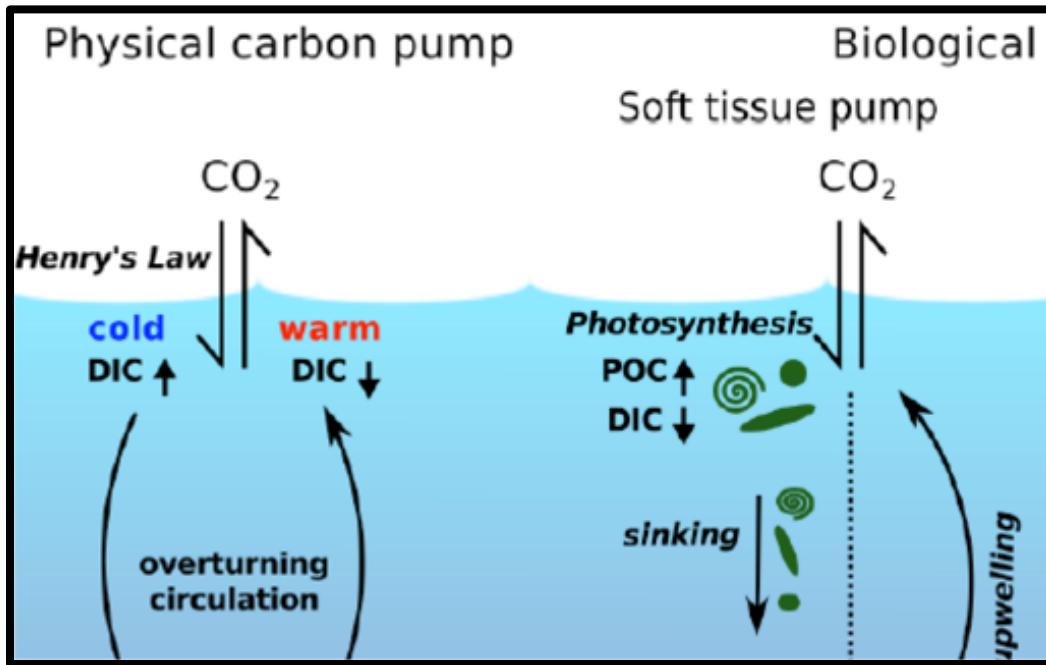
Les techniques océaniques d'élimination du CO₂ (*mCDR**)



mCDR = Marine Carbon Dioxide Removal

@OceanNET, GEOMAR

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



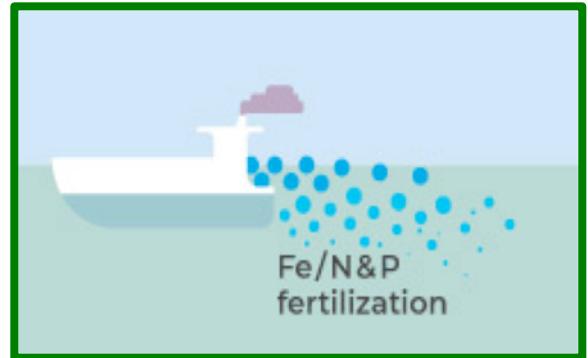
Méthodes « Inorganiques »
(Downwellings, Injection,
Alcalinisation, ...)

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 ?

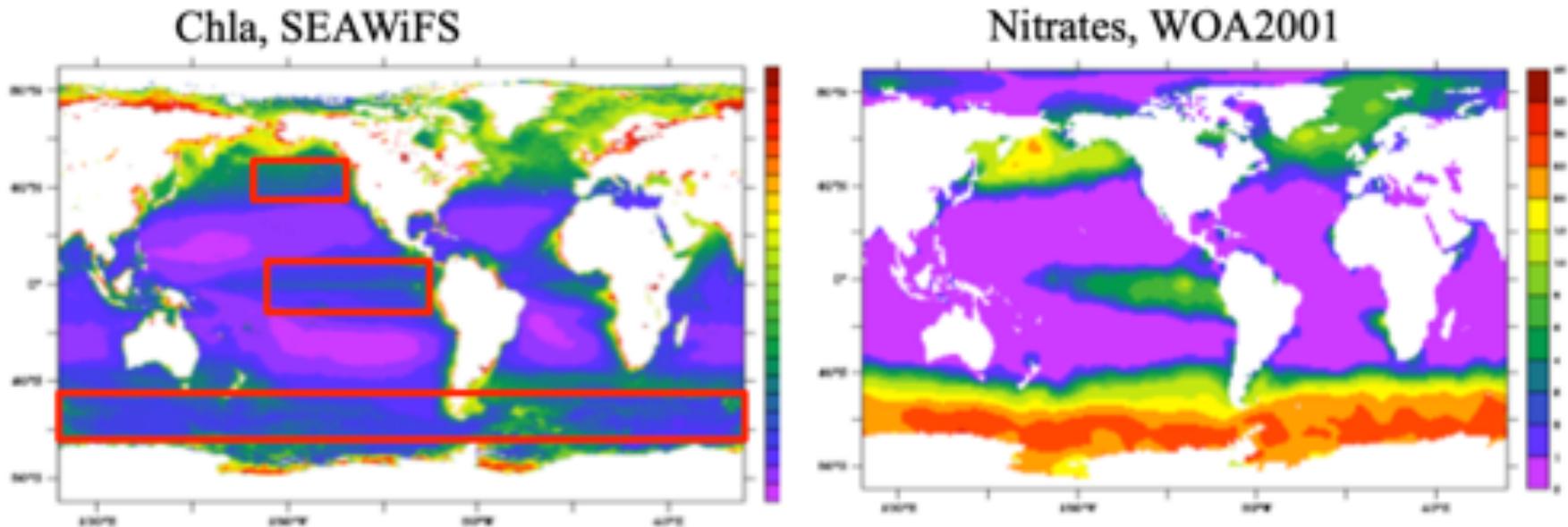
John Martin (1935-1993)

“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...

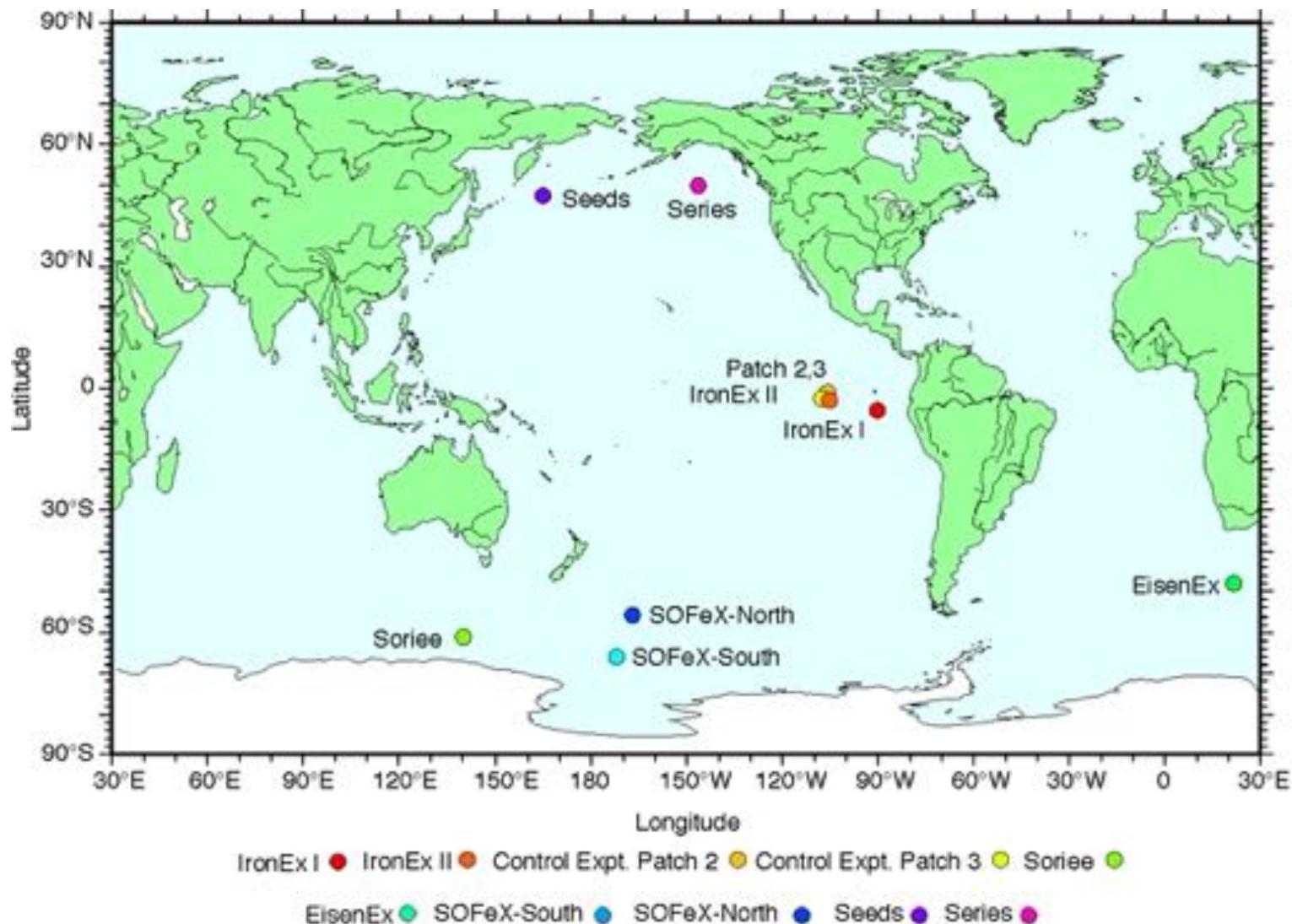
*if nutrient are abundant and light not limiting,
we should find high levels of phytoplankton*



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

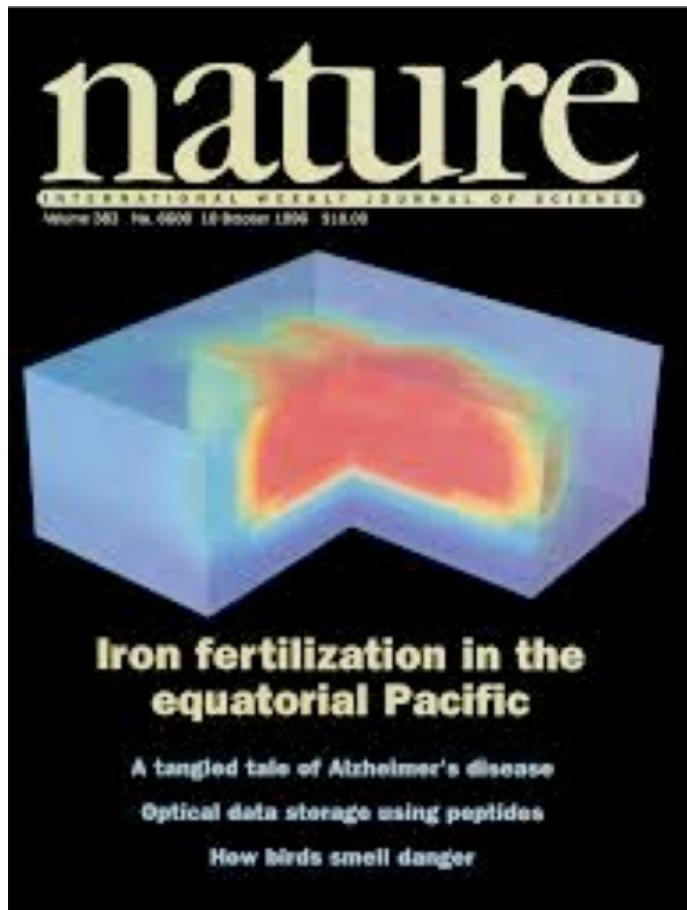
Dans les années 1990 et 2000, plusieurs expériences de fertilisation au fer ont été réalisées !



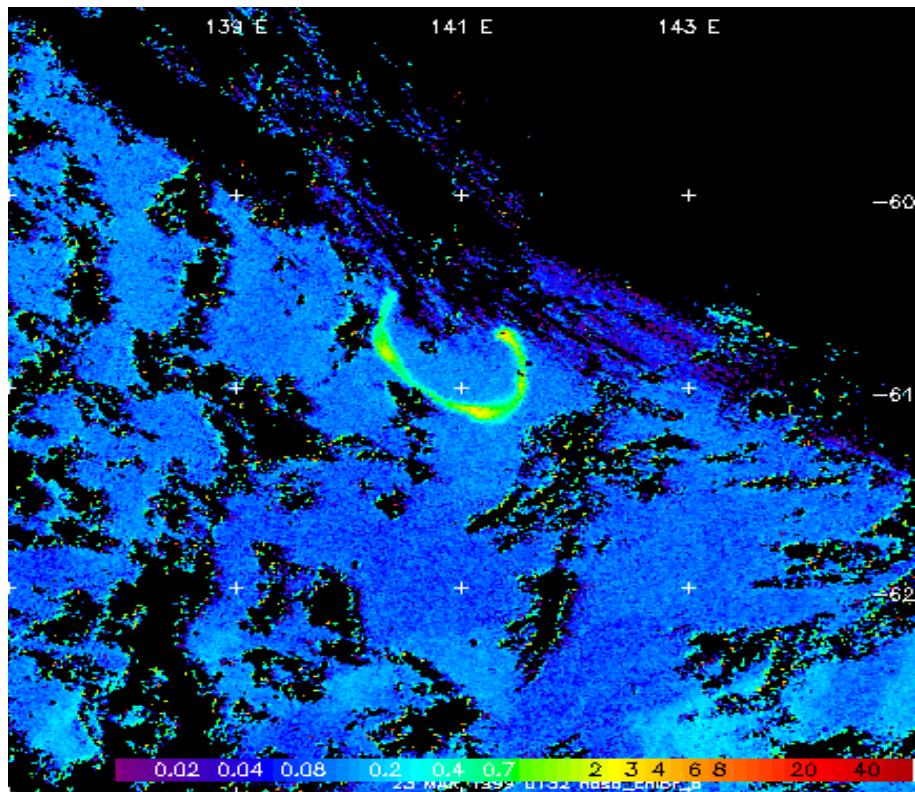
Les techniques organiques – la fertilisation par le fer

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

IRONEX2, Eq. pac, 1996



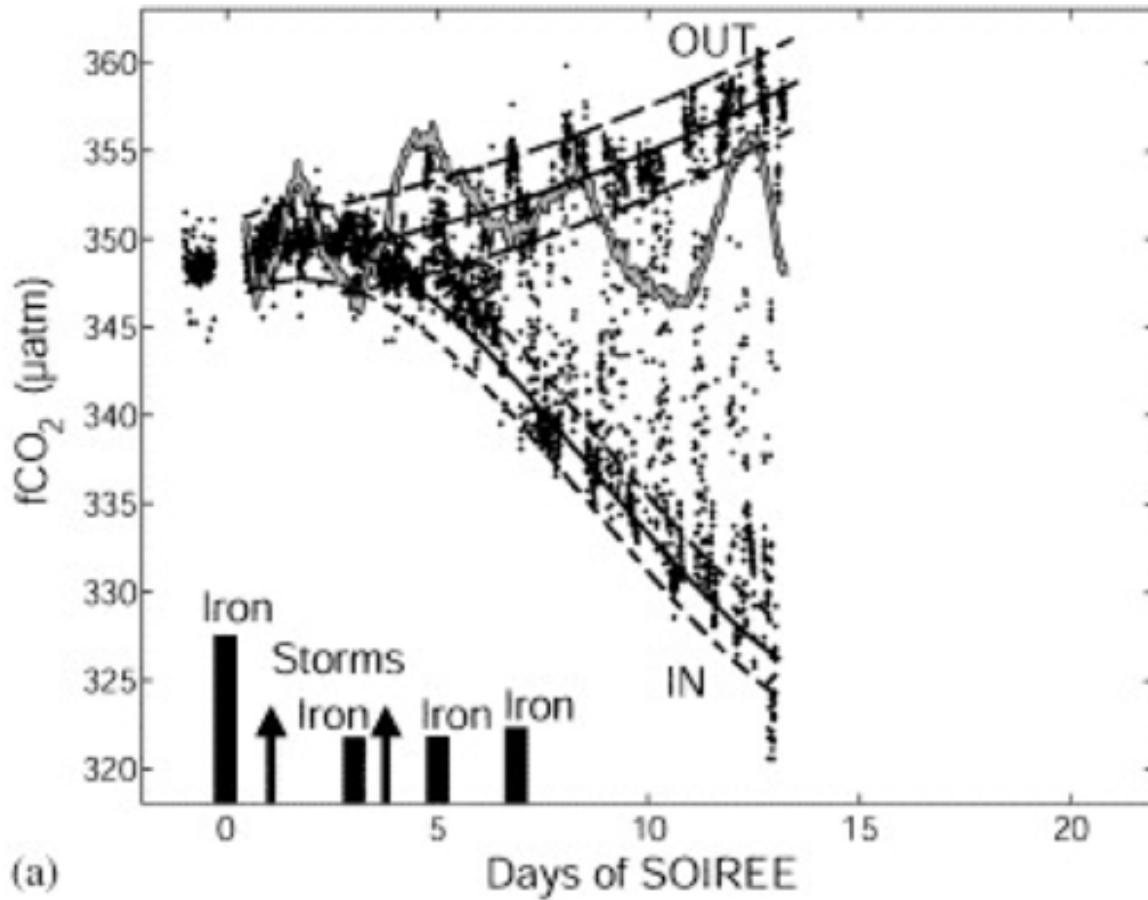
SOIREE, Southern Ocean, 1999



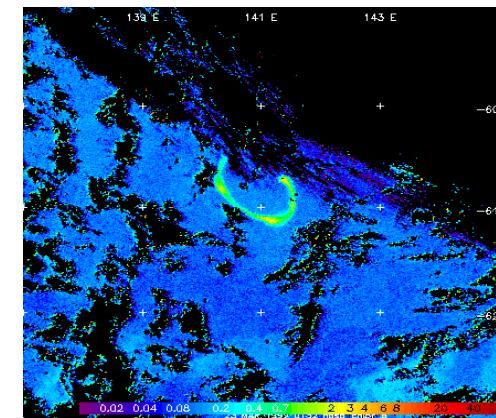
SOIREE after 42 days
Ocean Color from SeaWiFS
Abraham et al., 2000

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...

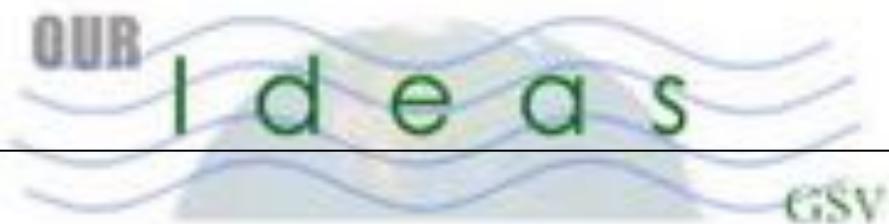
Plusieurs start-ups / Dépôts de brevets

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 Controlled 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...

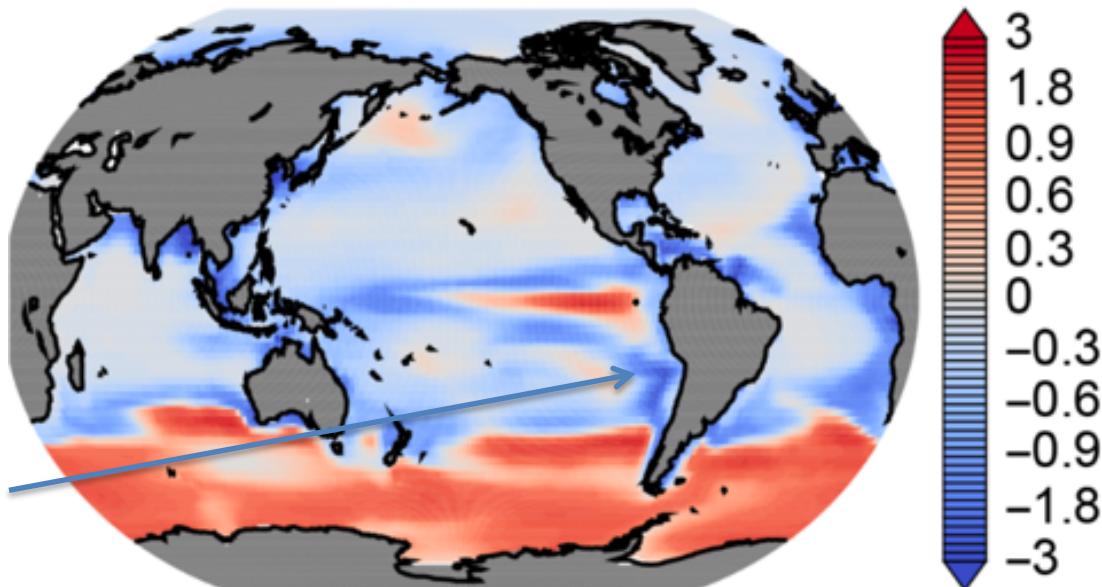
(effet max. : -30 ppm)

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...

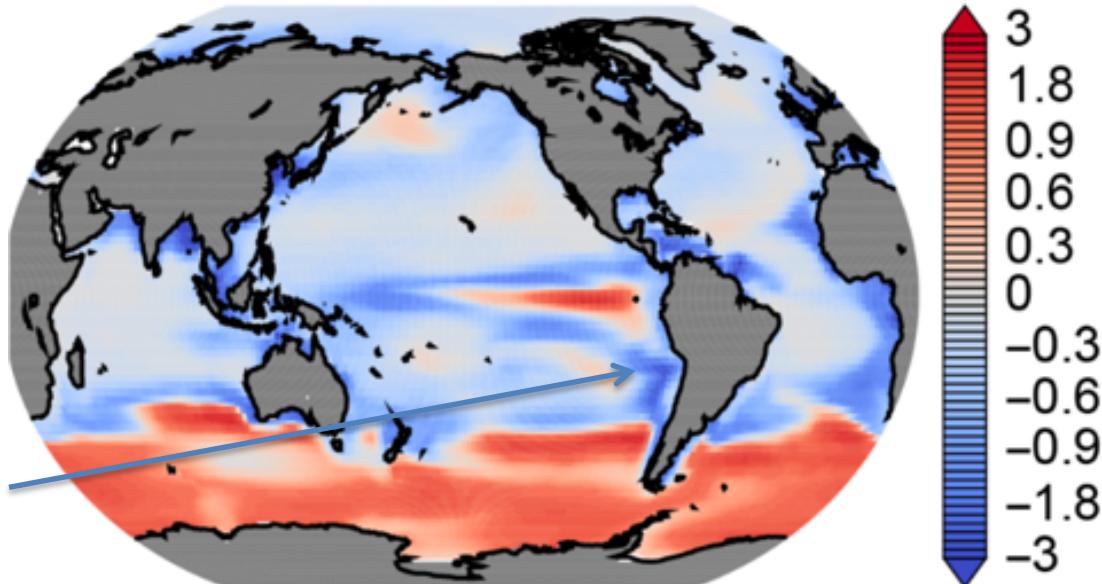
Bien moins efficaces que ce qui était initialement projeté...

(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)

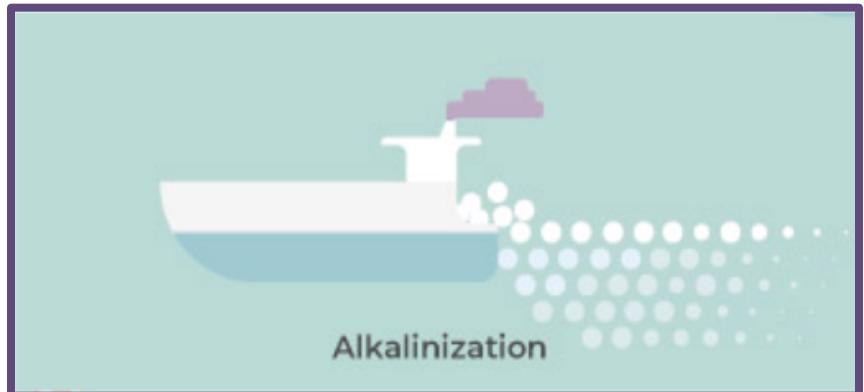


En 2008 : Moratoire / Convention de Londres pour stopper les entreprises commerciales qui se préparaient à utiliser cette technique pour des crédits carbone... exemption pour les études scientifiques si à petite échelle...

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 ?

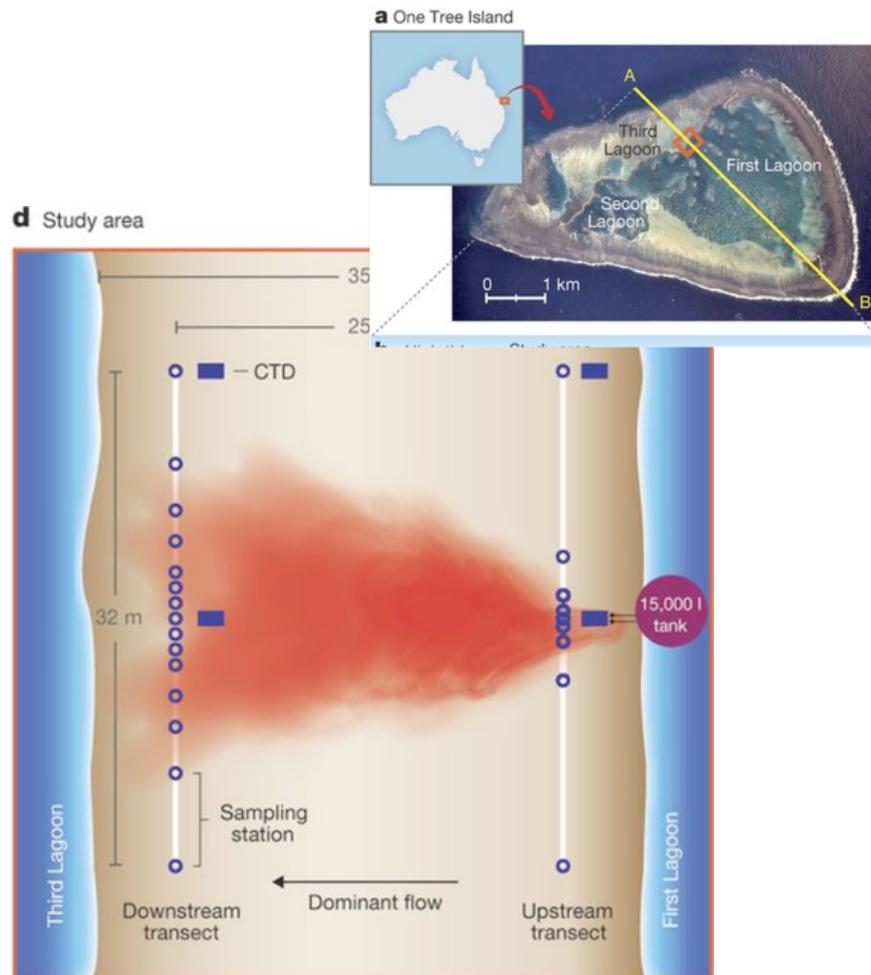
Déplacer l'équilibre des carbonates et favoriser l'absorption de CO₂

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 ?

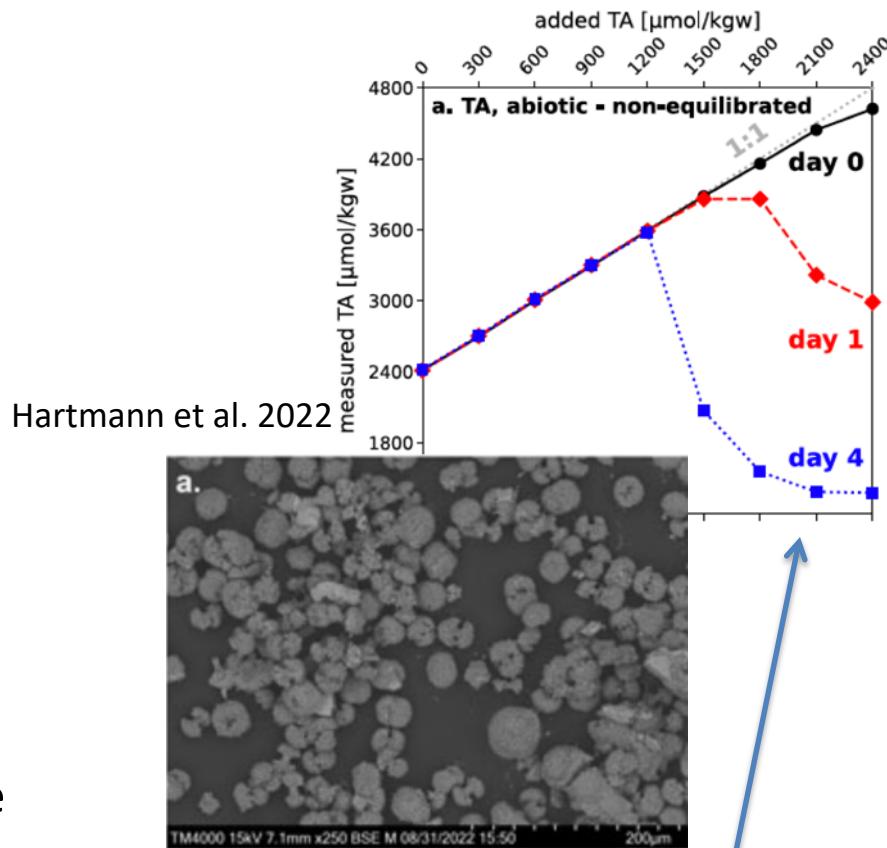
En ajoutant de l'alcalinité (roches silicatées, carbonatées, NaOH, chaux vive...)

Pour ?

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

Points positifs

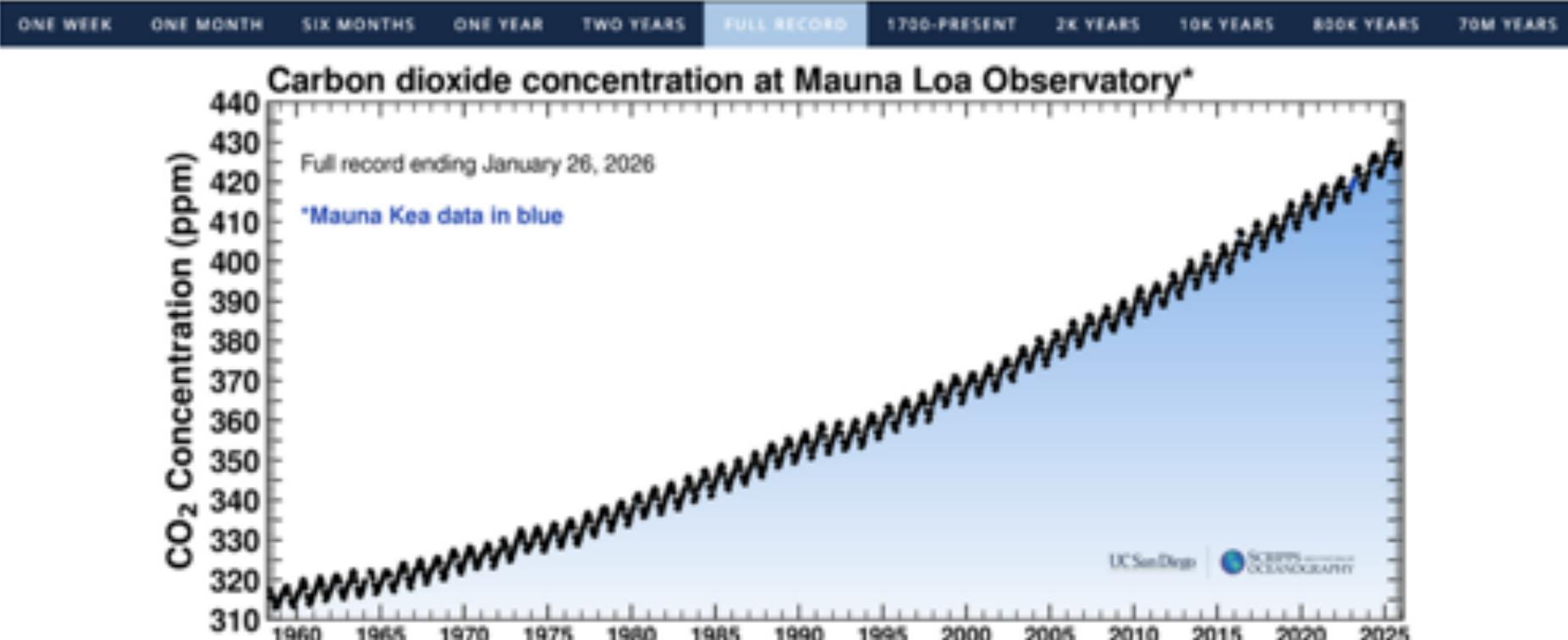
- Pas de limite géophysique / géochimique
- Durabilité du stockage de carbone
- **Co-bénéfices pour l'acidification**



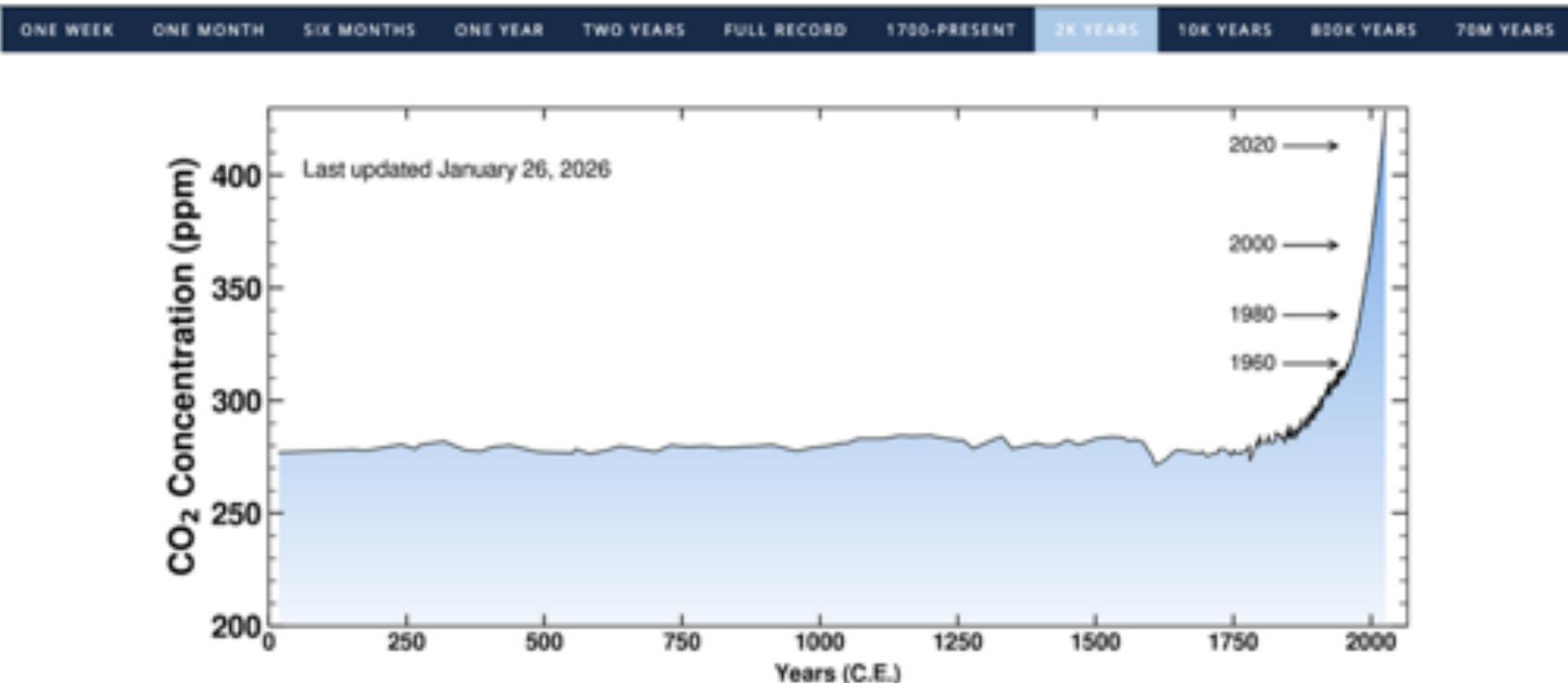
Points négatifs

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

Pour conclure...

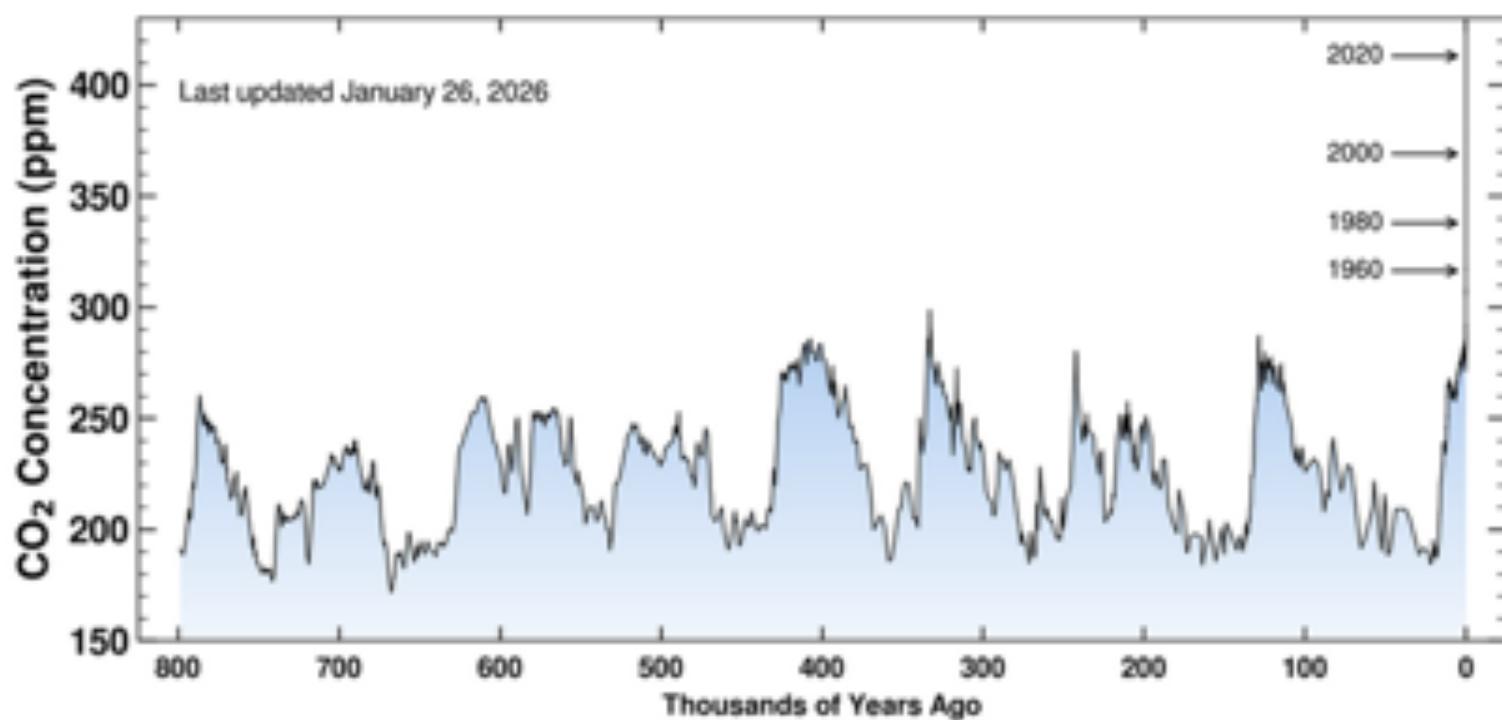


Pour conclure...



Pour conclure...

ONE WEEK ONE MONTH SIX MONTHS ONE YEAR TWO YEARS FULL RECORD 1700-PRESENT 2K YEARS 18K YEARS **500K YEARS** 70M YEARS



Pour conclure...

ONE WEEK ONE MONTH SIX MONTHS ONE YEAR TWO YEARS FULL RECORD 1700-PRESENT 2K YEARS 10K YEARS 80K YEARS 1M YEARS

