

ENERGIES FOSSILES

STOCKAGE DE CO₂

HYDROGÈNE

François Guyot

Université Paris Diderot (7)

Institut de Physique du Globe de Paris

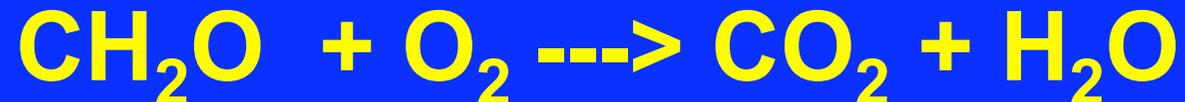
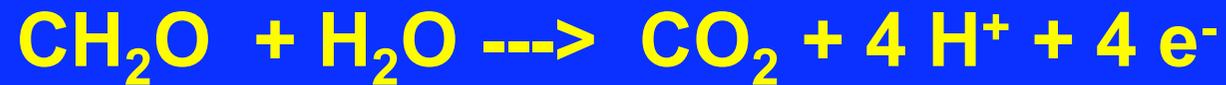
guyot@impmc.upmc.fr

- **1. La combustion des matières carbonées; énergie « naturelle » et « non naturelle »**
- **2. Le risque CO₂ et sa « remédiation »**
- **3. Quelques réflexions sur l'utilisation du pouvoir réducteur du sous-sol et l'hydrogène.**

- 1. La combustion des matières carbonées; énergie « naturelle » et « non naturelle »
- 2. Le risque CO₂ et sa « remédiation »
- 3. Quelques réflexions sur l'utilisation du pouvoir réducteur du sous-sol et l'hydrogène.

LA RESPIRATION

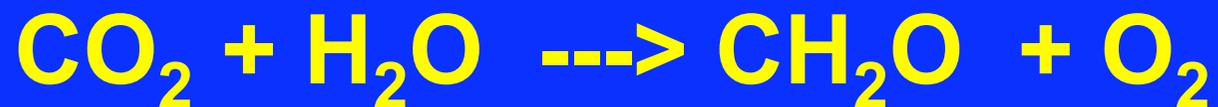
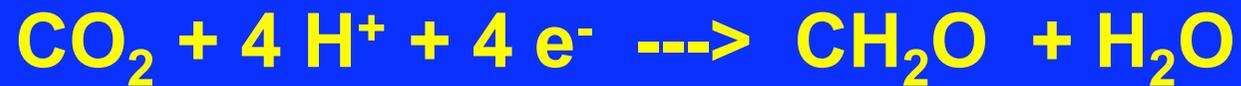
Notre première source d'énergie



10^{16} moles of C/an (à l'échelle de la biosphère)

LA PHOTOSYNTHÈSE

Conversion d'énergie solaire en « énergie biomasse »



10^{16} moles of C/an (à l'échelle de la biosphère)

Le cycle du carbone

ATMOSPHERE
 $6 \cdot 10^{16}$ mol

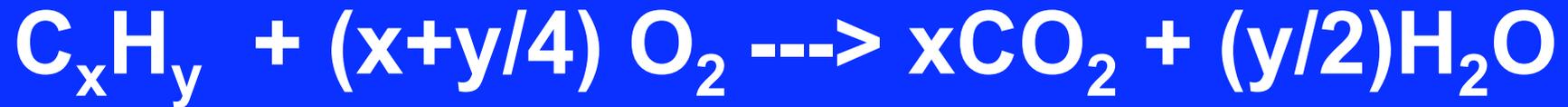
Énergie solaire \dashrightarrow \downarrow 10^{16} mol C/an \uparrow \dashrightarrow Energie « du vivant »

BIOMASSE
 10^{17} mol

La révolution industrielle

- **Machines : multiplier l'énergie animale**
- **Alimenter les machines**
- **Besoin d'énergie concentrée**
- **La nature le fait pour nous : énergies fossiles**

Combustion des matières carbonées



libère de l'énergie (et du CO_2)

Biomasse $x=1, y \approx 2, +1\text{O}$

Biomasse fossile et déshydratée

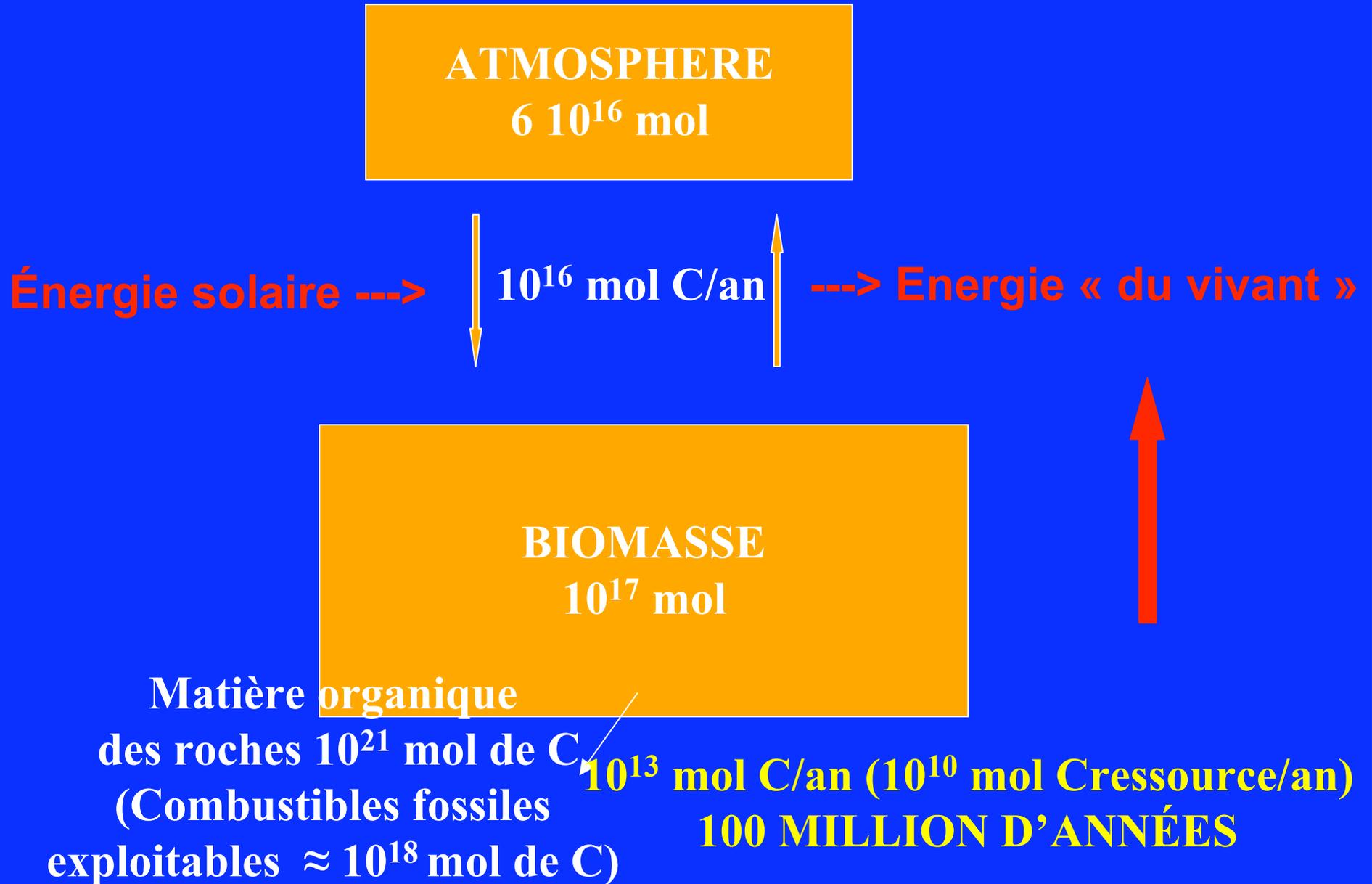
Charbon, pétrole, gaz y/x de 1 à 4

TRANSFORMATION DE BIOMASSE EN COMBUSTIBLES FOSSILES

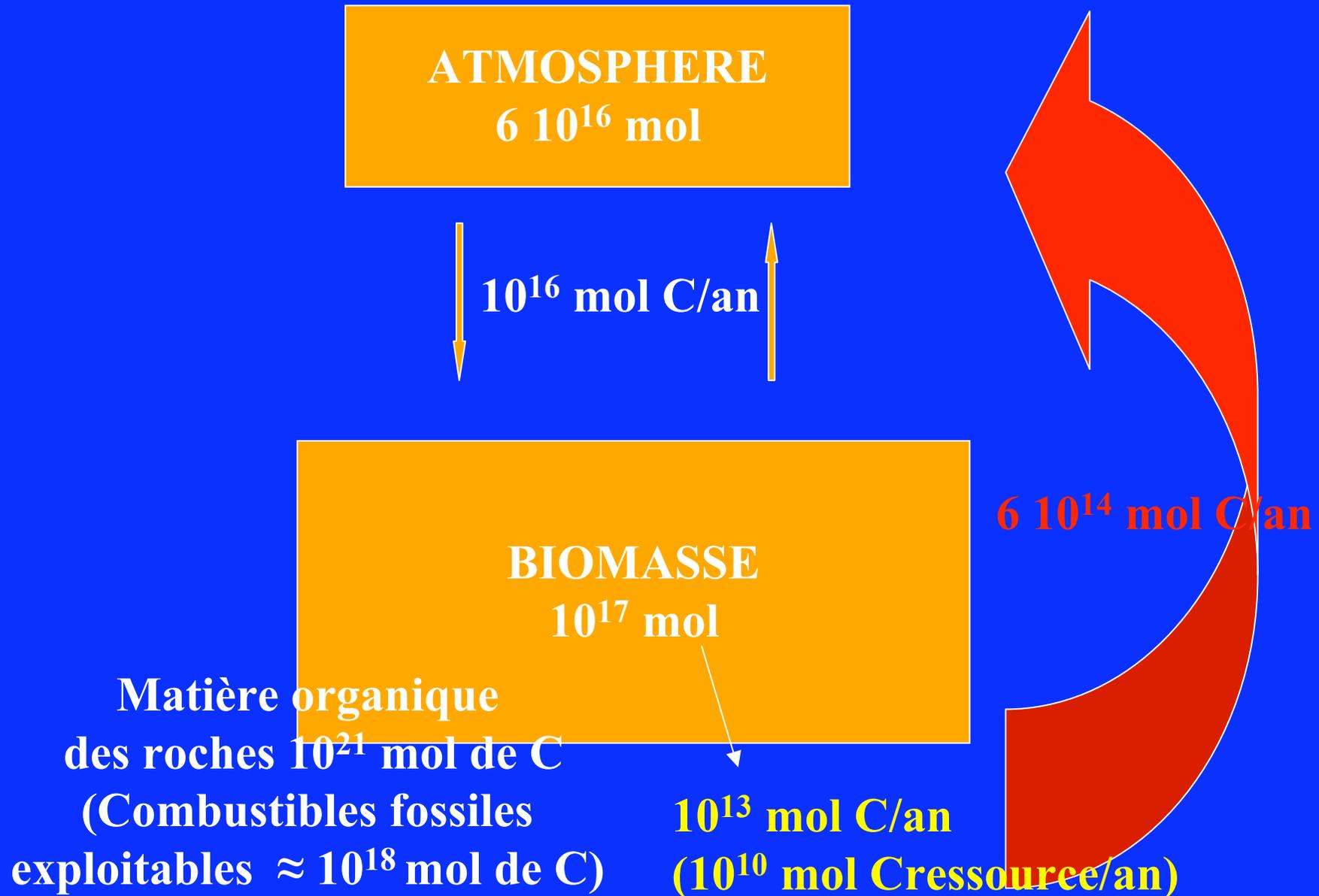


10^{13} moles de C/an
dont 1/1000 à 1/10000 seront des ressources utilisables

Le cycle du carbone (avec les énergies fossiles)



Le problème géologique de la consommation humaine des combustibles fossiles



- **1. La combustion des matières carbonées; énergie « naturelle » et « non naturelle »**
- **2. Le risque CO₂ et sa « remédiation »**
- **3. Quelques réflexions sur l'utilisation du pouvoir réducteur du sous-sol et l'hydrogène.**

2. Le risque CO₂ et sa « remédiation »

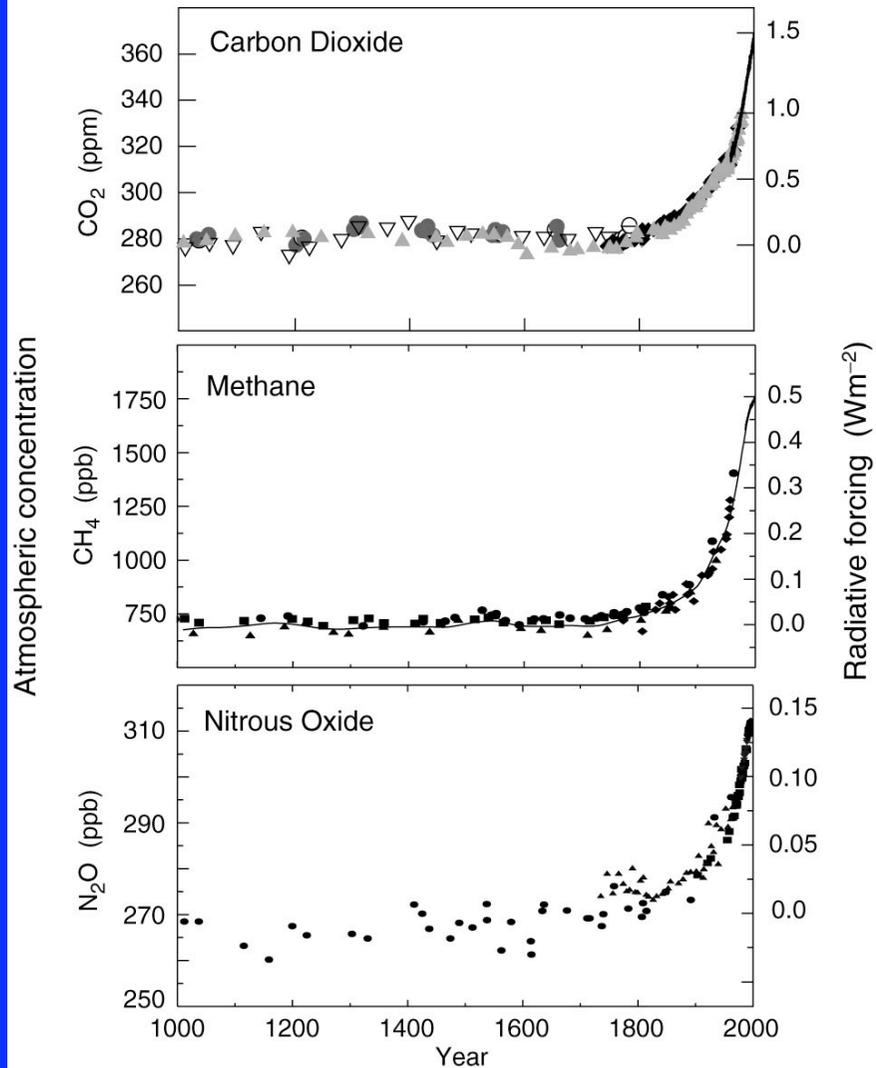
- **2.a. Faut-il réguler le CO₂?**
- **2.b. CCS (Carbon Capture and Storage)**
- **2.c. CO₂ évité et biomasse**

2. Le risque CO₂ et sa « remédiation »

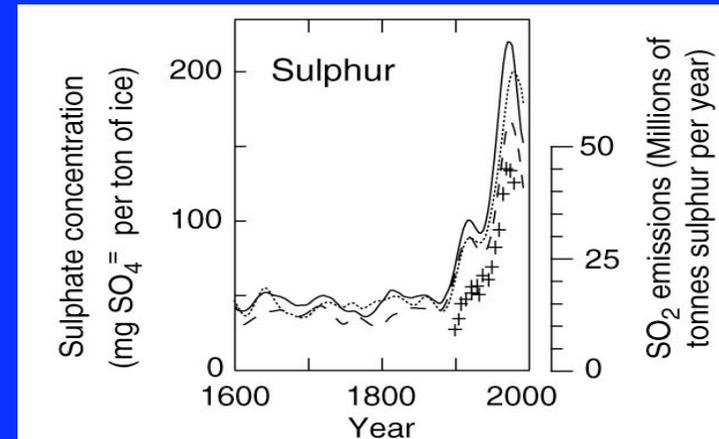
- 2.a. Faut-il réguler le CO₂?
- 2.b. CCS (Carbon Capture and Storage)
- 2.c. CO₂ évité et biomasse

Un changement important de chimie de l'atmosphère....

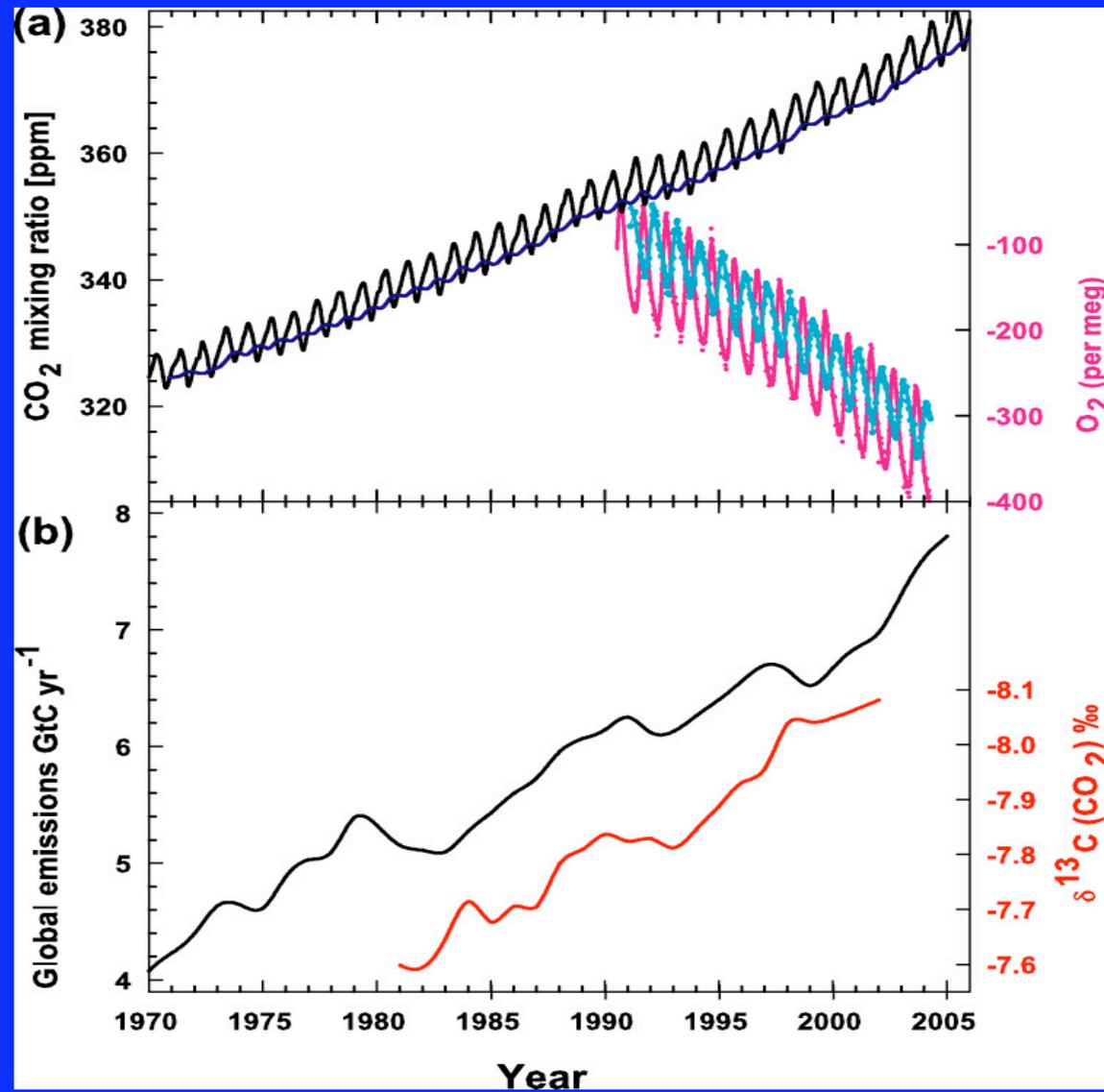
(a) Global atmospheric concentrations of three well mixed greenhouse gases



(b) Sulphate aerosols deposited in Greenland ice



...qui résulte bien de la combustion des combustibles fossiles

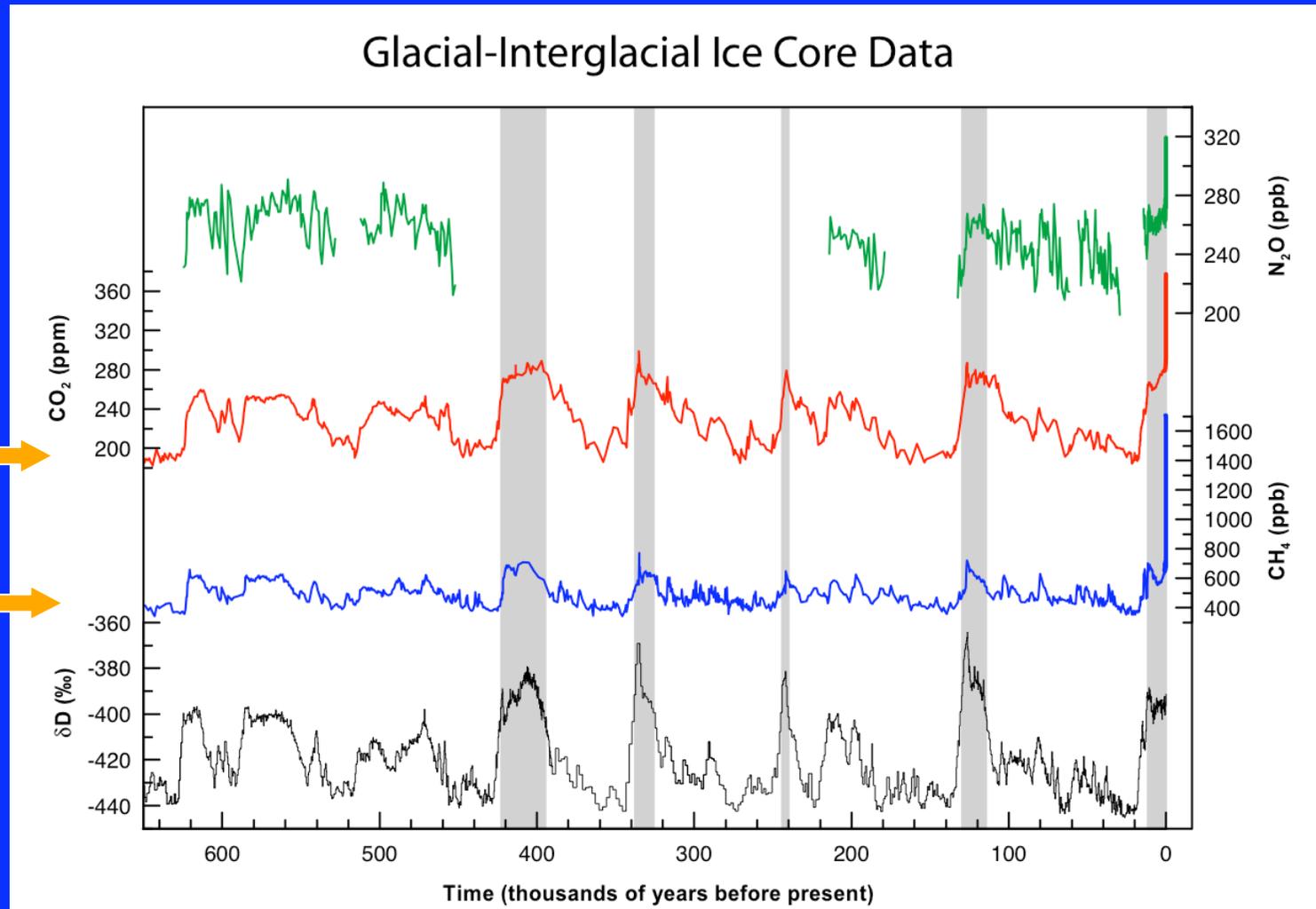


Un événement majeur à l'échelle géologique

CO₂



CH₄



Jusqu'où risquons nous d'aller?

ATMOSPHERE

$6 \cdot 10^{16}$ mol

10^{16} mol C/an
(440 Gtons CO₂/an)

BIOMASSE

10^{17} mol

$6 \cdot 10^{14}$ mol C/an
(26 Gtons CO₂/an)

Matière organique des roches 10^{21} mol de C

$\approx 4 \cdot 10^7$ eqGtons CO₂/an)(Combustibles fossiles exploitables $\approx 10^{18}$
mol de C) ≈ 40000 eqGtons CO₂)

1 ppm \approx 2.1 GtC \approx 7.7 Gt CO₂.
(injection mécanique)

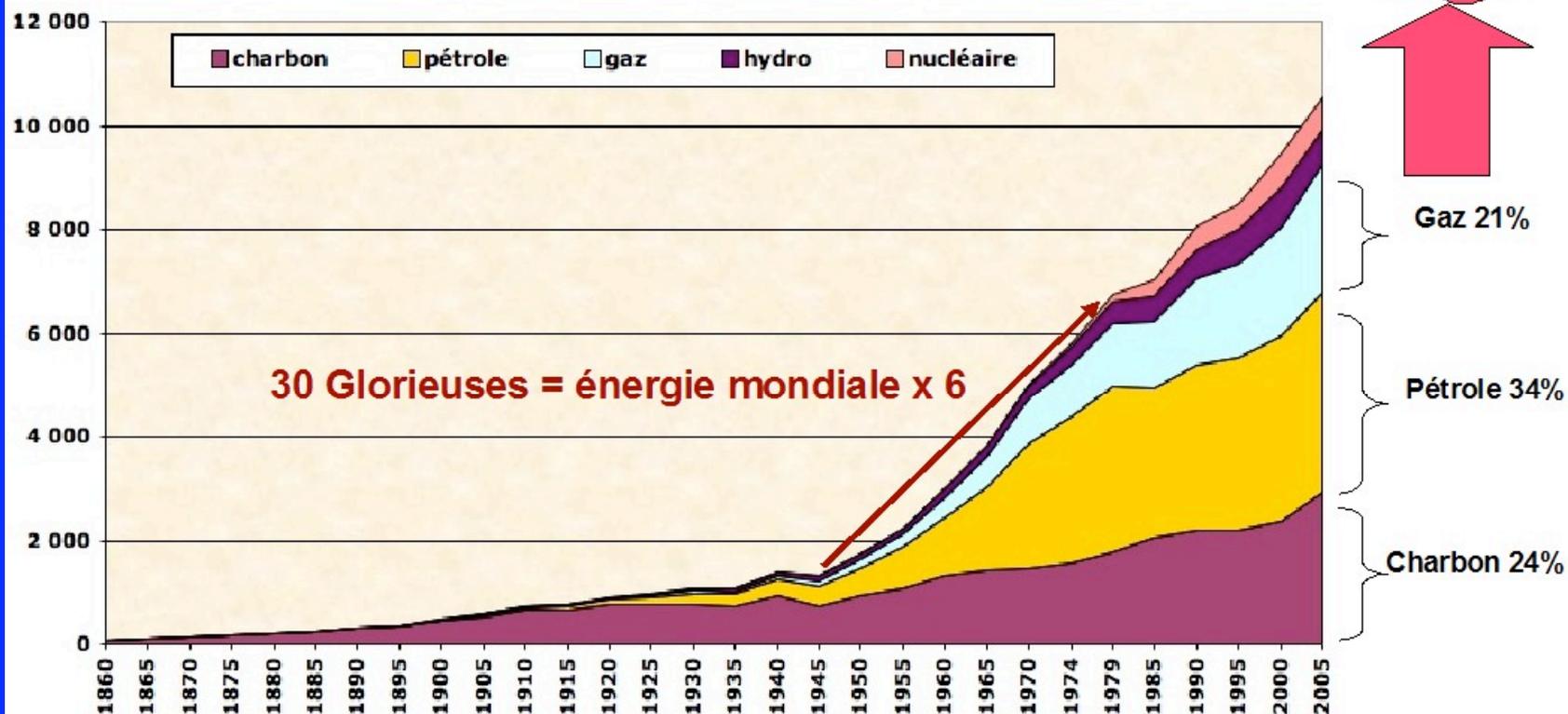
30 Gt CO₂/an \approx 4 ppm CO₂/an

800 ppm \approx 2100

On a assez de combustible fossile pour y arriver

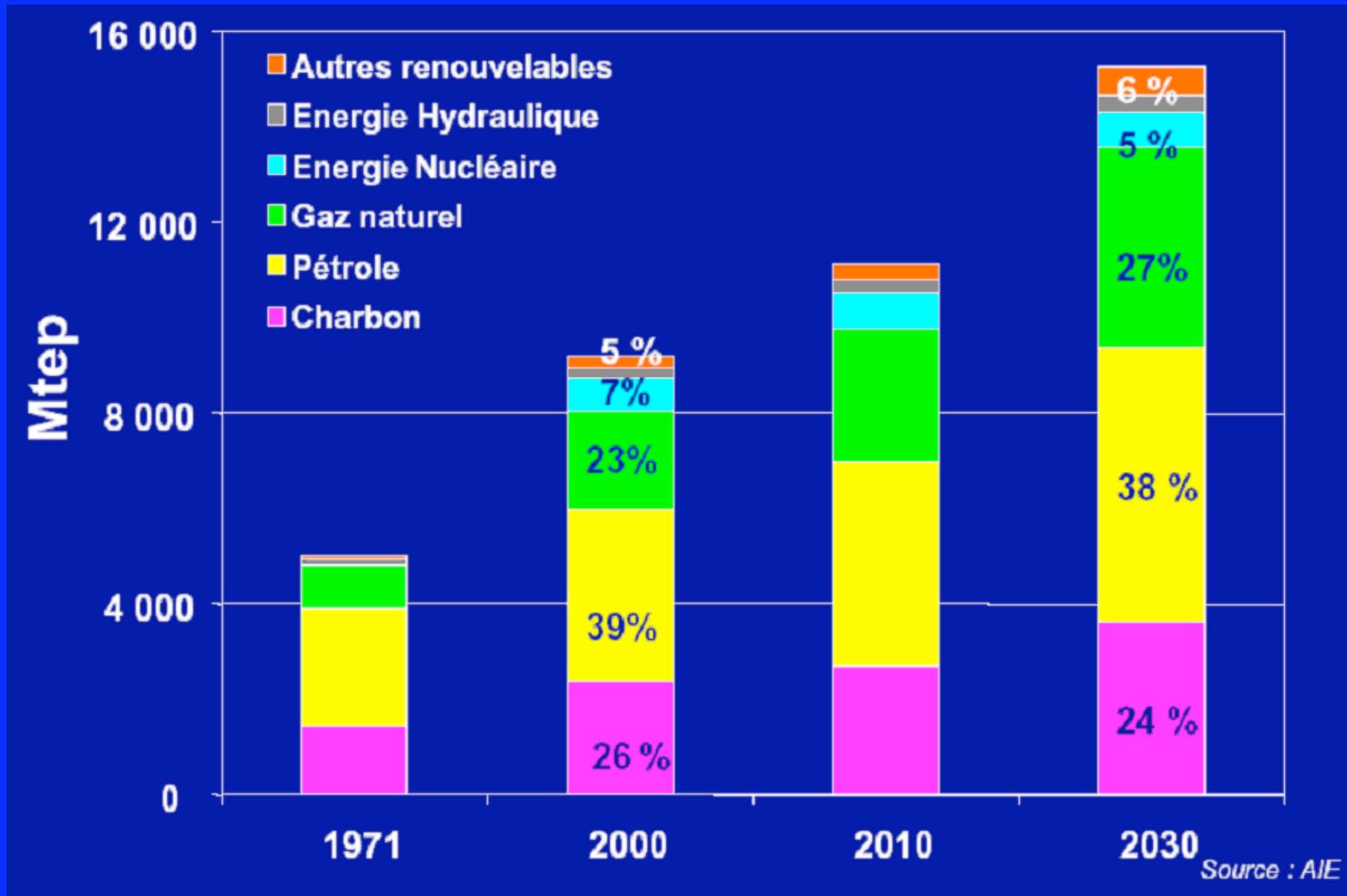
Nous brûlons les énergies fossiles tant qu'elles sont là

80 % de l'énergie dans le monde vient du carbone fossile



Consommation mondiale en Mtep (millions de tonnes équivalent pétrole)
depuis 1860 -hors biomasse-

Données Schilling & al ; Observatoire énergie ; AIE ; BP stat, compilation JM Jancovici



Evolution prévisible

Arrhénius (1908)

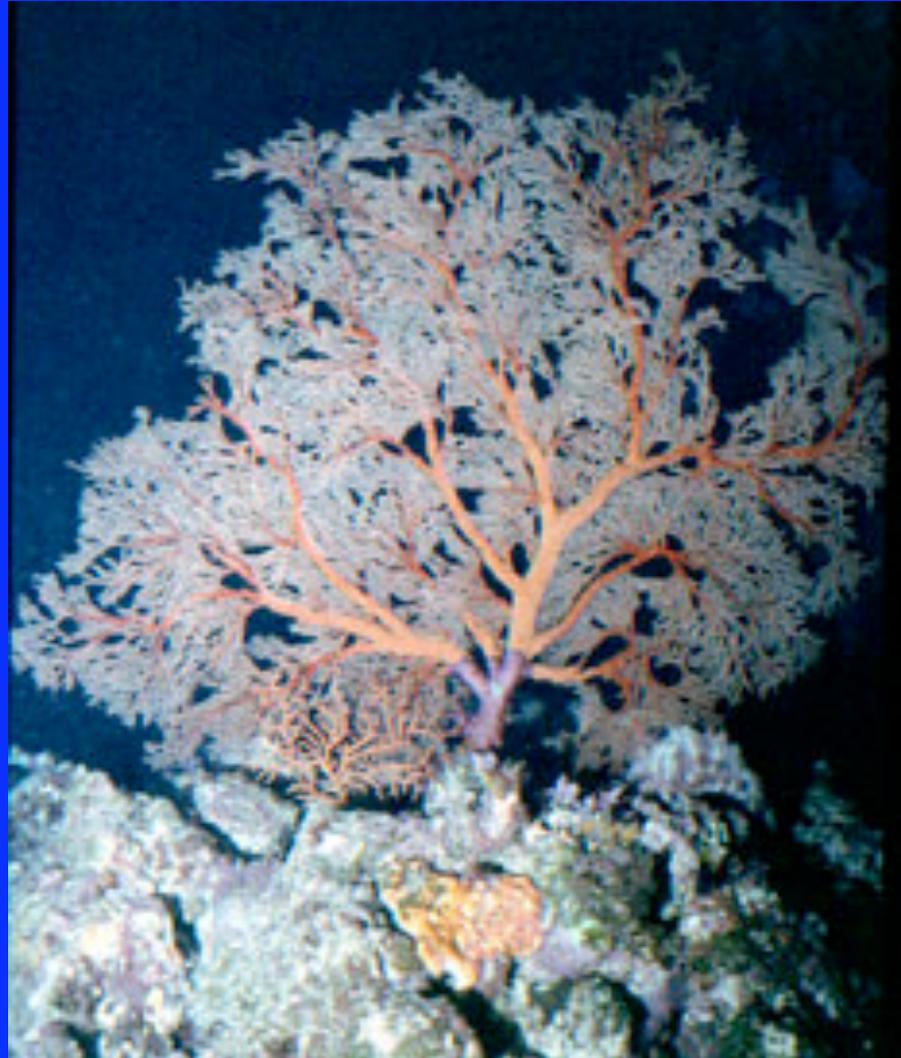
Une vision positiviste

" By the influence of the increasing percentage of carbonic acid in the atmosphere, we may hope to enjoy ages with more equable and better climates, especially as regards the colder regions of the Earth, ages when the Earth will bring forth much more abundant crops than at present, for the benefit of rapidly propagating mankind" (Arrhenius, 1908).

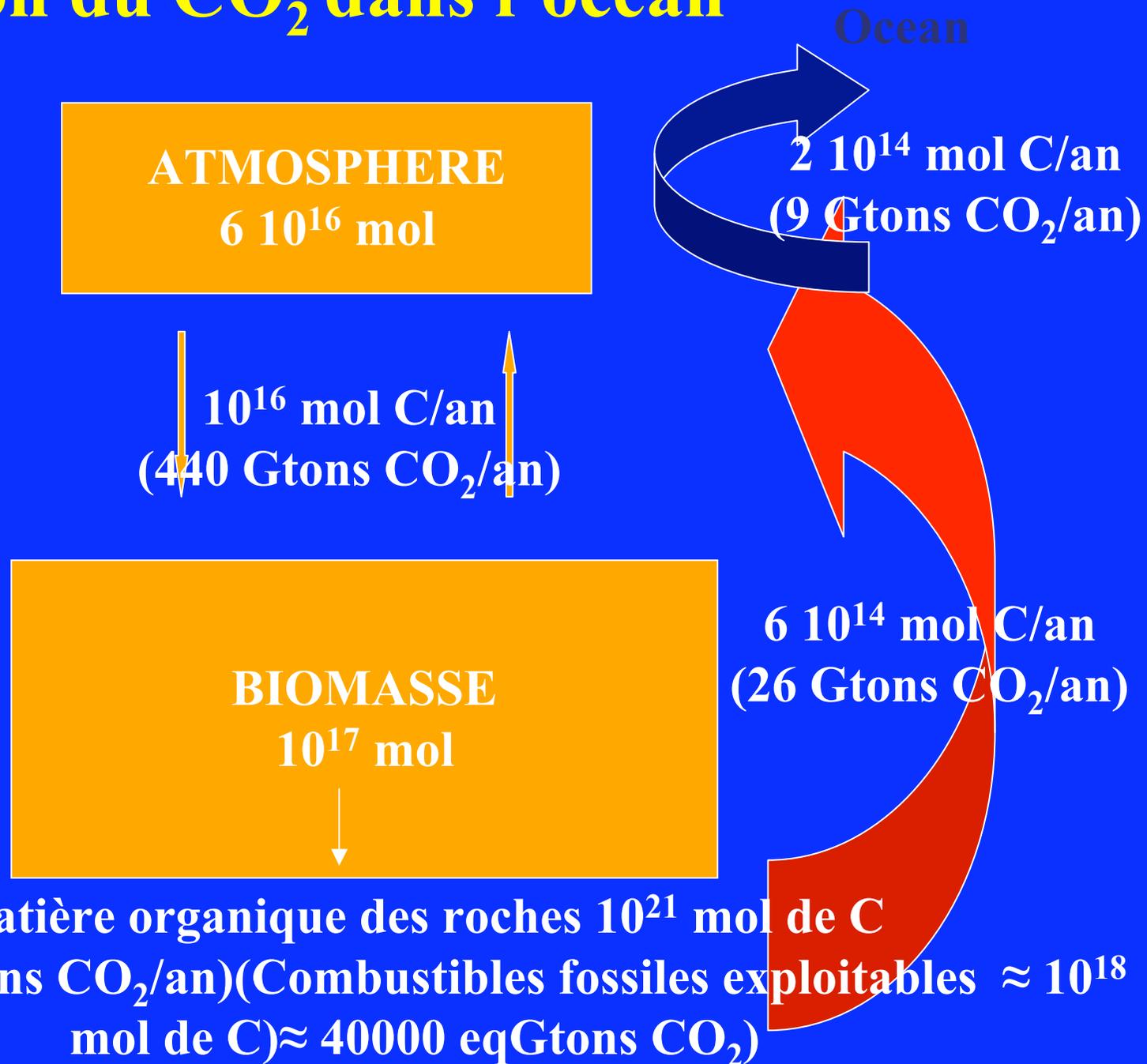
2011.

Inquiétude et principe de précaution

Exemple :
le problème potentiel de l'acidification de l'océan



Dissolution du CO₂ dans l'océan



Vers une dissolution des organismes calcaires?



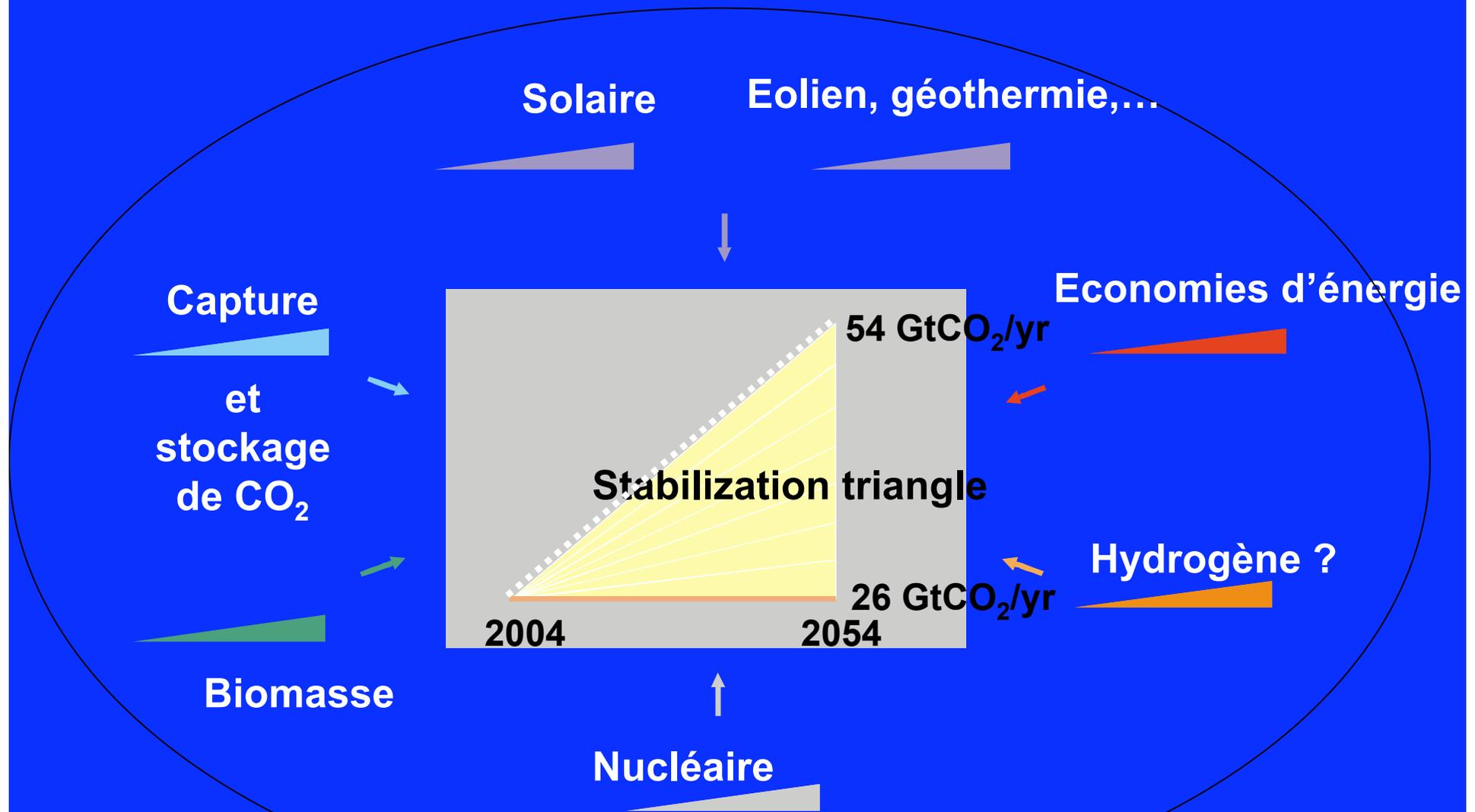
$\approx 50 \mu\text{m}$

Coccolithus Pelagicus

Interactions CO₂/calcaires



Stratégies pour stabiliser CO₂ (d'après Pacala et Soccolow, 2004)

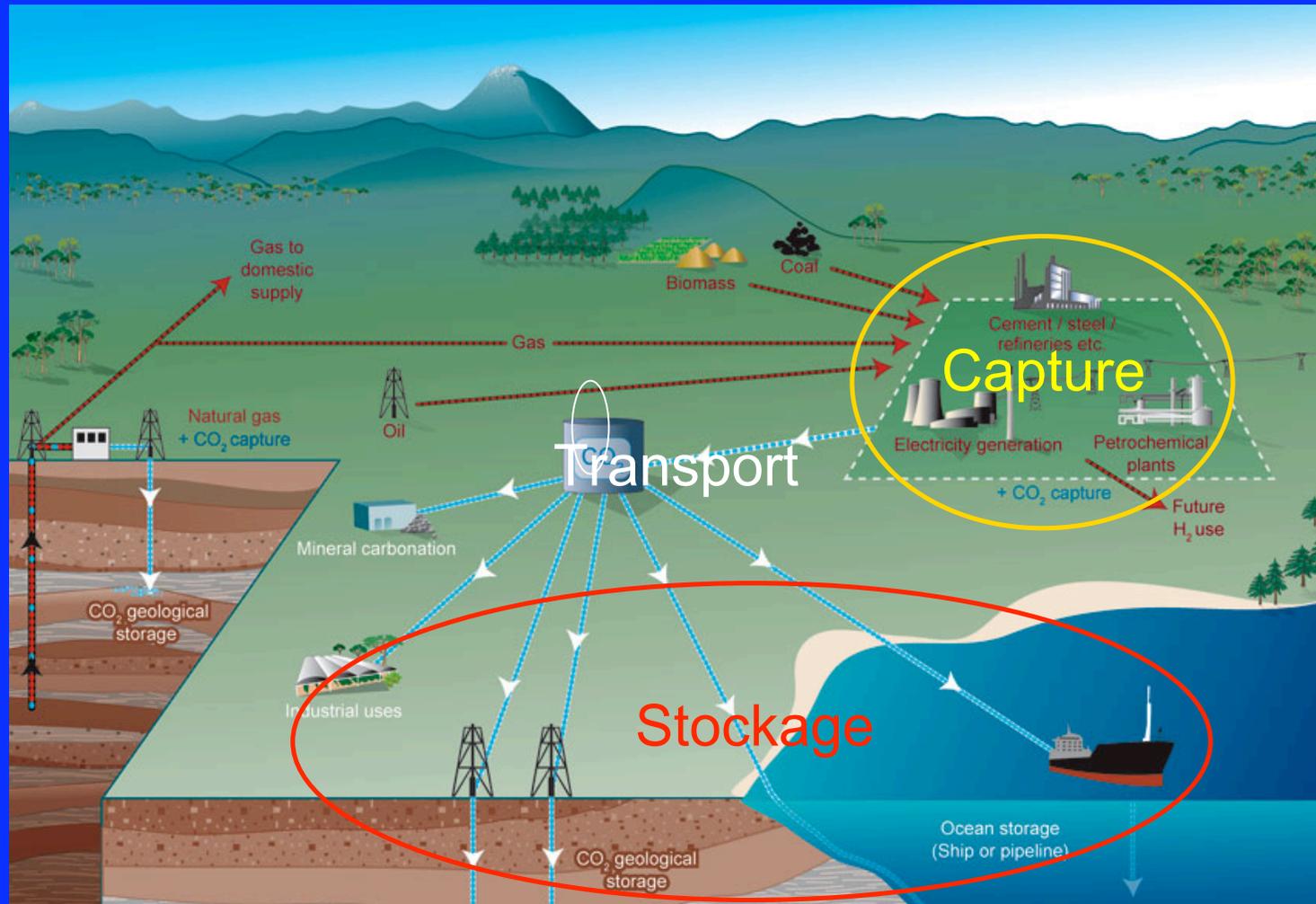


1 triangle élémentaire : 4 Gtons of CO₂ par an

2. Le risque CO₂ et sa « remédiation »

- **2.a. Faut-il réguler le CO₂?**
- **2.b. CCS (Carbon Capture and Storage)**
- **2.c. CO₂ évité et biomasse**

CCS (Carbon capture and Storage)

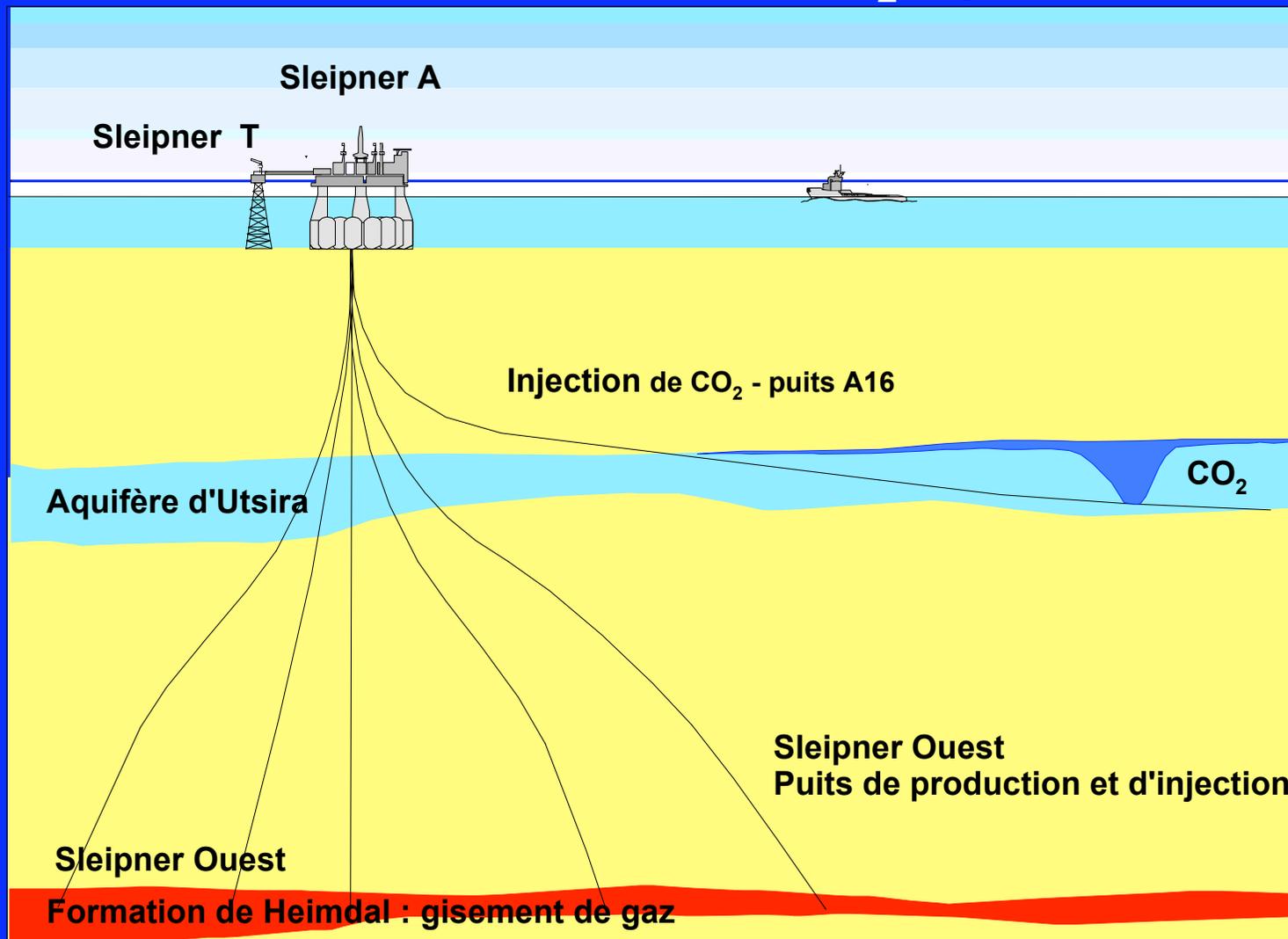


Le problème du stockage n'est pas (seulement) une question de réduction des coûts. C'est avant tout un problème de fiabilité et de compréhension fine du devenir du CO₂.

Exemple : Sleipner, Norvège



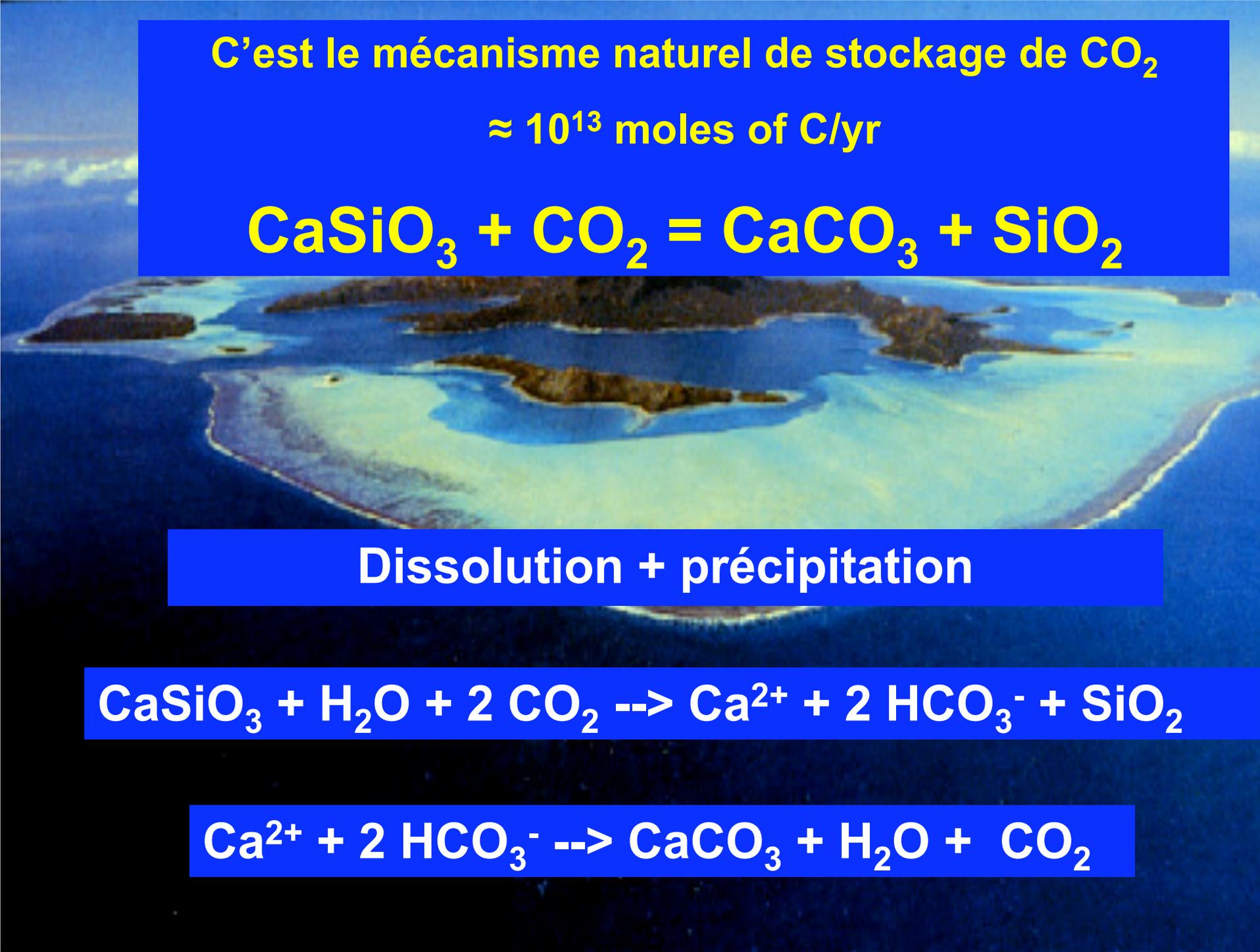
Sleipner. 3000 tonnes de CO₂/jour 20 millions tonnes de CO₂ injectées



**Objectif : 200 Gtons of CO₂/50 ans
≈ 10000 Sleipner**

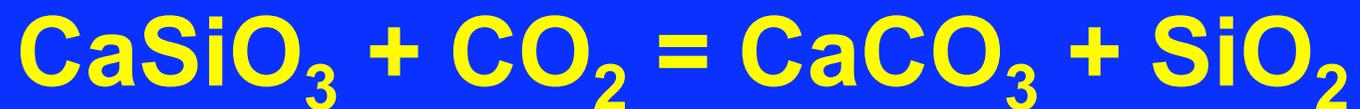
Un exemple d'enjeu technologique : la conversion of CO₂ en carbonates

- CO₂ --> supercritical CO₂
- CO₂ --> dissolution H₂CO₃
- CO₂ --> dissolution/neutralization HCO₃⁻
- CO₂ --> solid carbonates MCO₃
- CO₂ --> Reduction into « organic » carbon



C'est le mécanisme naturel de stockage de CO₂

≈ 10¹³ moles of C/yr



Dissolution + précipitation

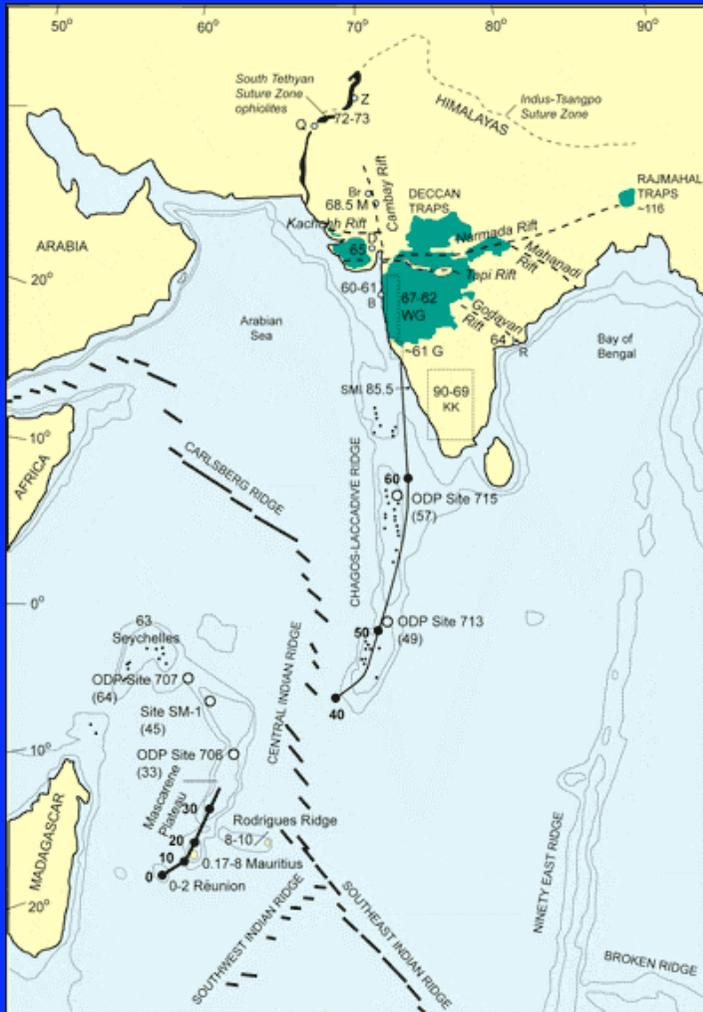




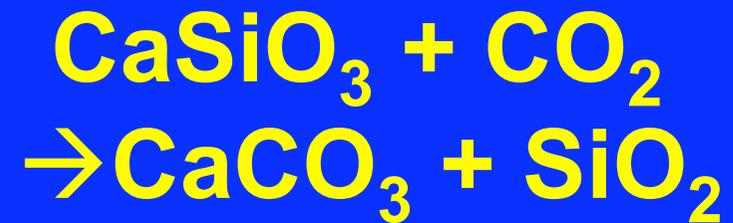
**Comment l'accélérer
d'un facteur 10?**



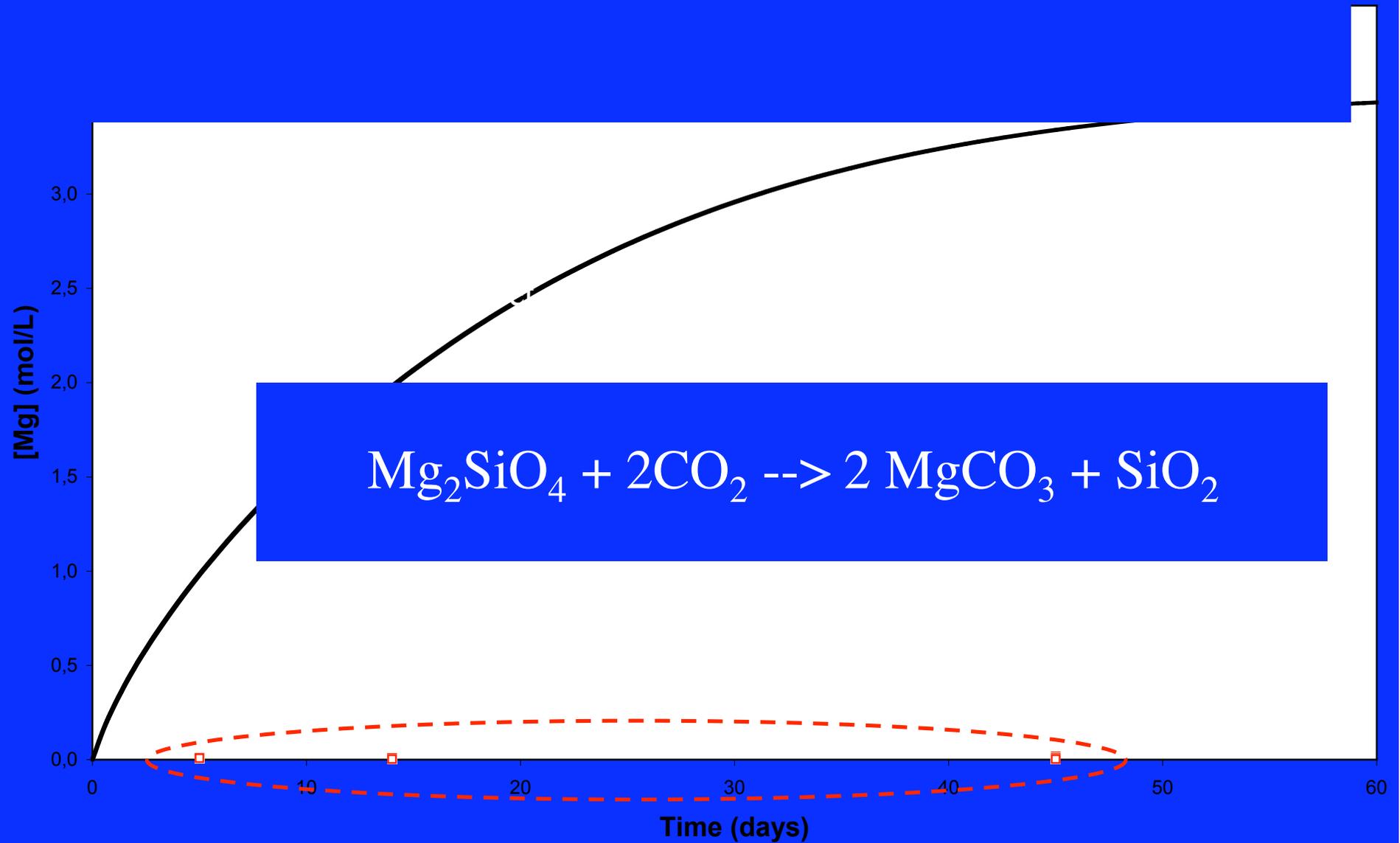
Injection dans des roches basiques ou ultrabasiques



- 2 km depth basalt layers on large area
- area

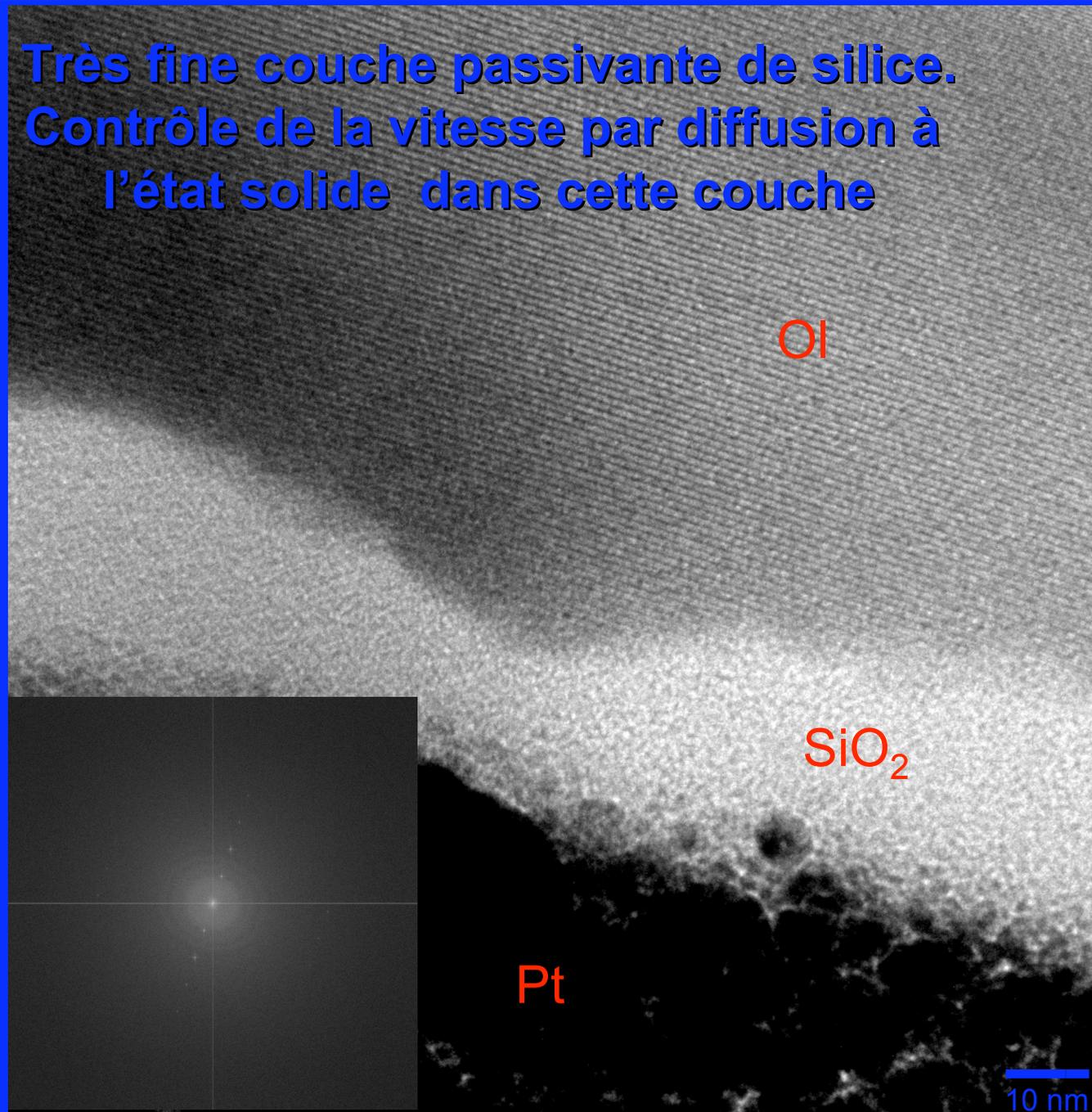


Exemple de verrou : carbonatation de l'olivine



Damien Daval et al. 2011

Très fine couche passivante de silice.
Contrôle de la vitesse par diffusion à
l'état solide dans cette couche

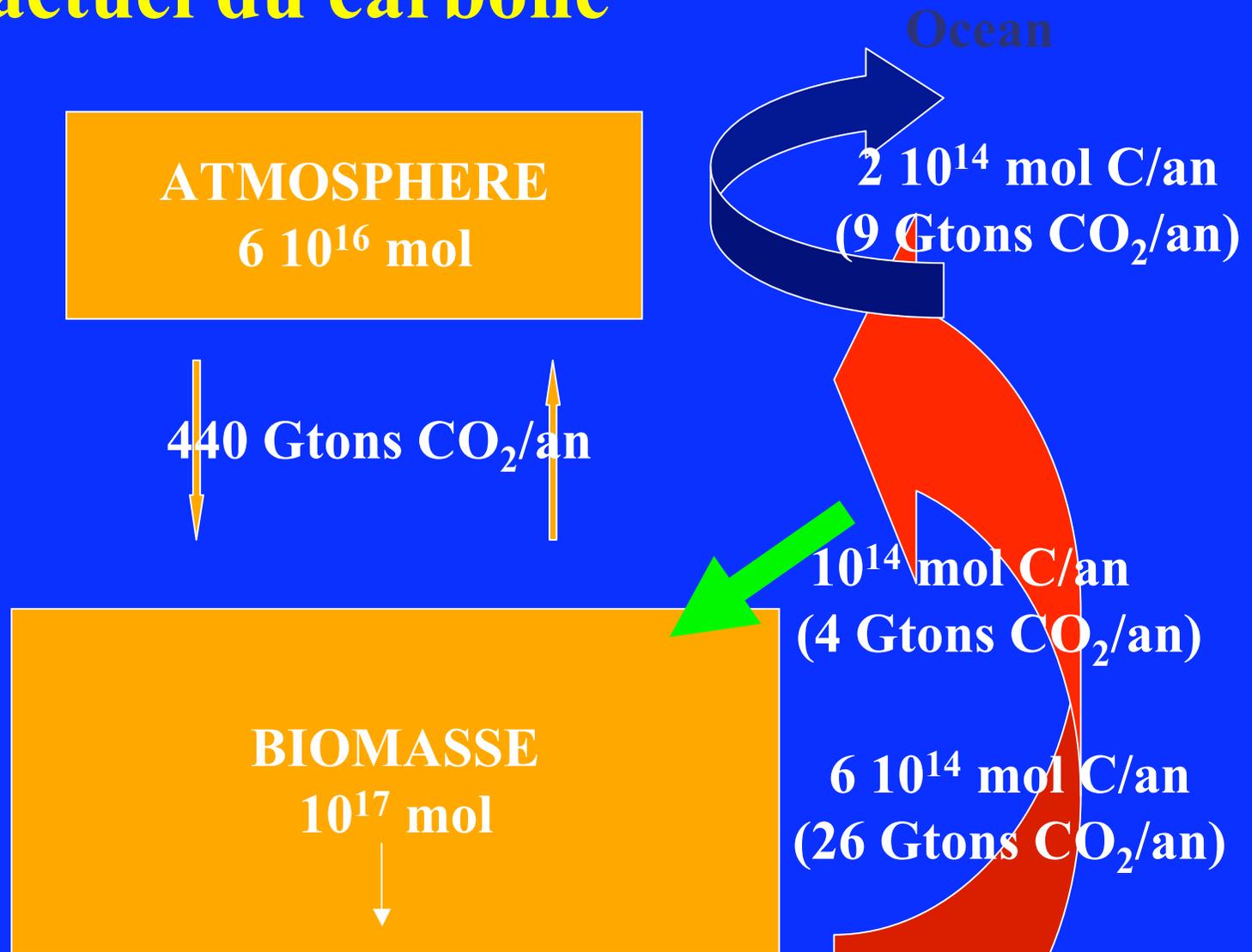


Damien Daval et al. 2011

2. Le risque CO₂ et sa « remédiation »

- **2.a. Faut-il réguler le CO₂?**
- **2.b. CCS (Carbon Capture and Storage)**
- **2.c. CO₂ évité et biomasse**

Cycle actuel du carbone



Matière organique des roches 10^{21} mol de C
 $\approx 4 \times 10^7$ eqGtons CO_2/an (Combustibles fossiles exploitables $\approx 10^{18}$
mol de C) ≈ 40000 eqGtons CO_2)

Cycle futur du carbone? Economie biomasse

ATMOSPHERE
 $6 \cdot 10^{16}$ mol

480 Gtons CO_2/an

BIOMASSE
 10^{17} mol

Matière organique des roches 10^{21} mol de C

- **1. La combustion des matières carbonées; énergie « naturelle » et « non naturelle »**
- **2. Le risque CO₂ et sa « remédiation »**
- **3. Quelques réflexions sur l'utilisation du pouvoir réducteur du sous-sol et l'hydrogène.**



Combustion de H_2

Piles à combustible

Charge de batteries

Remarque : évolution des combustibles



**H₂ actuellement vecteur d'énergie plutôt
que source primaire.**

Production industrielle actuelle

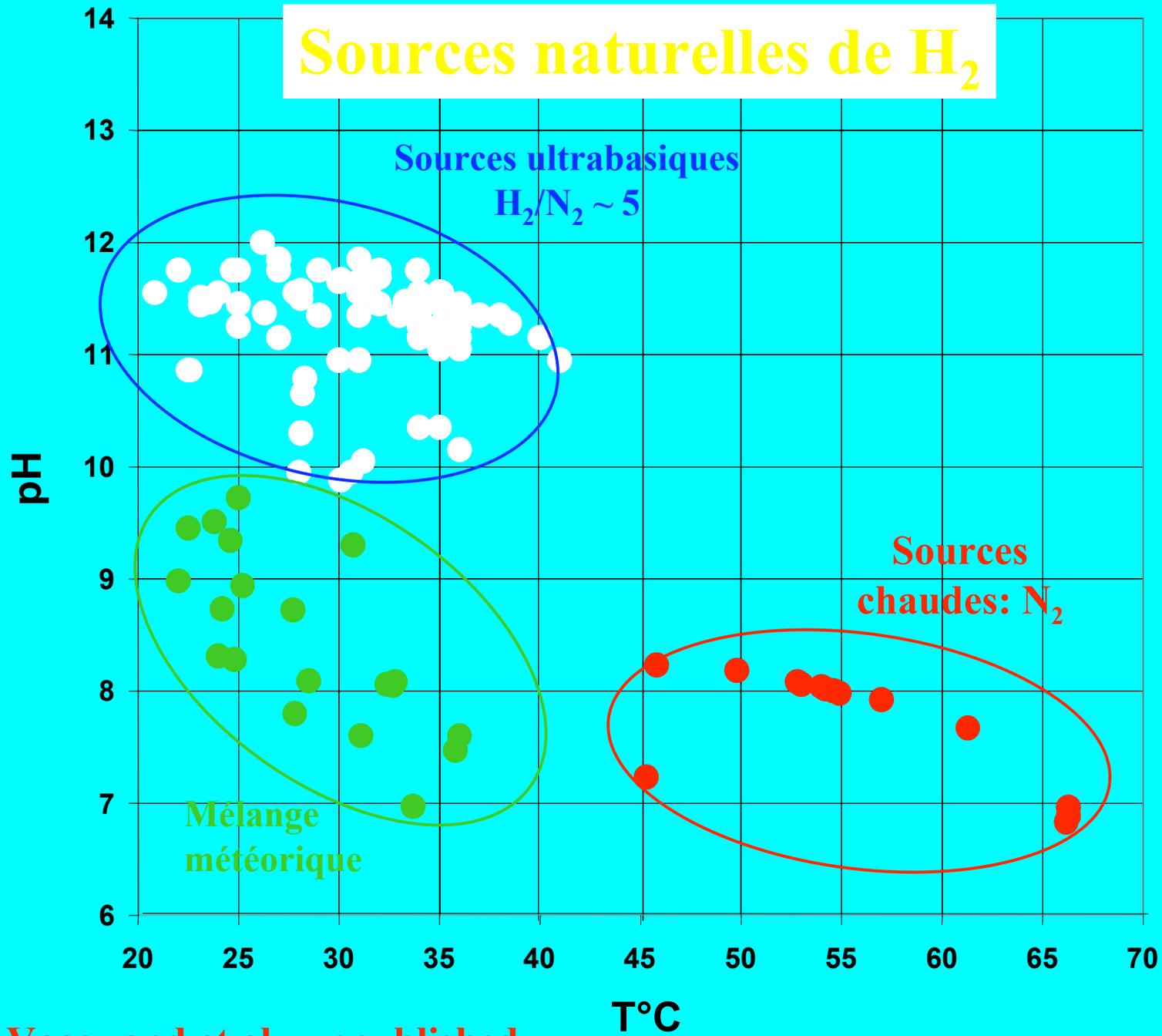


**Mais H₂ peut dans certaines conditions
être une source primaire d'énergie**

Génération de H₂ dans le sous-sol



Sources naturelles de H₂



C. Vacquand et al., unpublished

Relations CO_2 - H_2 dans le sous-sol

Archae Methanotrophes
Bactéries sulfato-réductrices



Ca^{2+}

SO_4^{2-}

Archae Methanogènes



H_2

CO_2

Relations CO_2 - H_2 dans le sous-sol

Archae Methanotrophes
Bactéries ferri-réductrices



Archae Methanogènes



Combustibles carbonés renouvelables?

Une recherche à très long terme

