



**ACADÉMIE
DE NICE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Géologie et Climats

LE CYCLE DU CARBONE

PAF – Académie de Nice - 24 janvier 2024

Chrystèle Verati – Enseignant-Chercheur - Université Côte d'Azur
Béatrice Lecourt-Capdeville – IA IPR SVT

1 – Introduction / Généralités

2 - Les réservoirs et les transferts de carbone

Rappel effet de serre

Les réservoirs impliqués

Echange Océan / Atmosphère

Echange Biomasse marine / océan

Echange Sédiments / Océan

Rôle de la biomasse

Echange Lithosphère-Manteau / Atmosphère

3 – Le cycle du Carbone pré-anthropique : état stationnaire – équilibre

Flux entre réservoirs – Temps de résidence

4 - Le cycle du Carbone pré-anthropique en déséquilibre

Evolution de l'atmosphère en C depuis 4.5 Ga – Long terme

5 – Le cycle du Carbone perturbé par l'activité humaine

Evolution de l'atmosphère depuis 100 ans – Court terme

Cycle complexe !!!!

- Importance dans les cycles biologiques et géologiques
- Multitude de réservoirs
- Transferts interviennent à plusieurs échelles de temps
- Carbone prend plusieurs formes : CO_2 , CH_4 , CaCO_3 , MO, C dissous...
- CO_2 : gaz à effet de serre → variations climatiques
- Influence sur le cycle des effets anthropiques

Un cycle doit toujours être équilibré pour un climat stabilisé

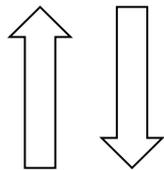
- **tendance à négliger la géologie et les paramètres avec des échelles de temps longues**
- **tendance à sous ou surestimer l'action de l'homme**

Activité anthropique est-il en train de déséquilibrer le cycle du C terrestre?

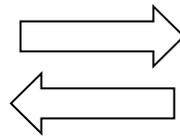
GIEC – Transition écologique - Climatoscepticisme

Quand on parle de **cycle** → **réservoir, flux, temps de résidence**

Réservoir 1



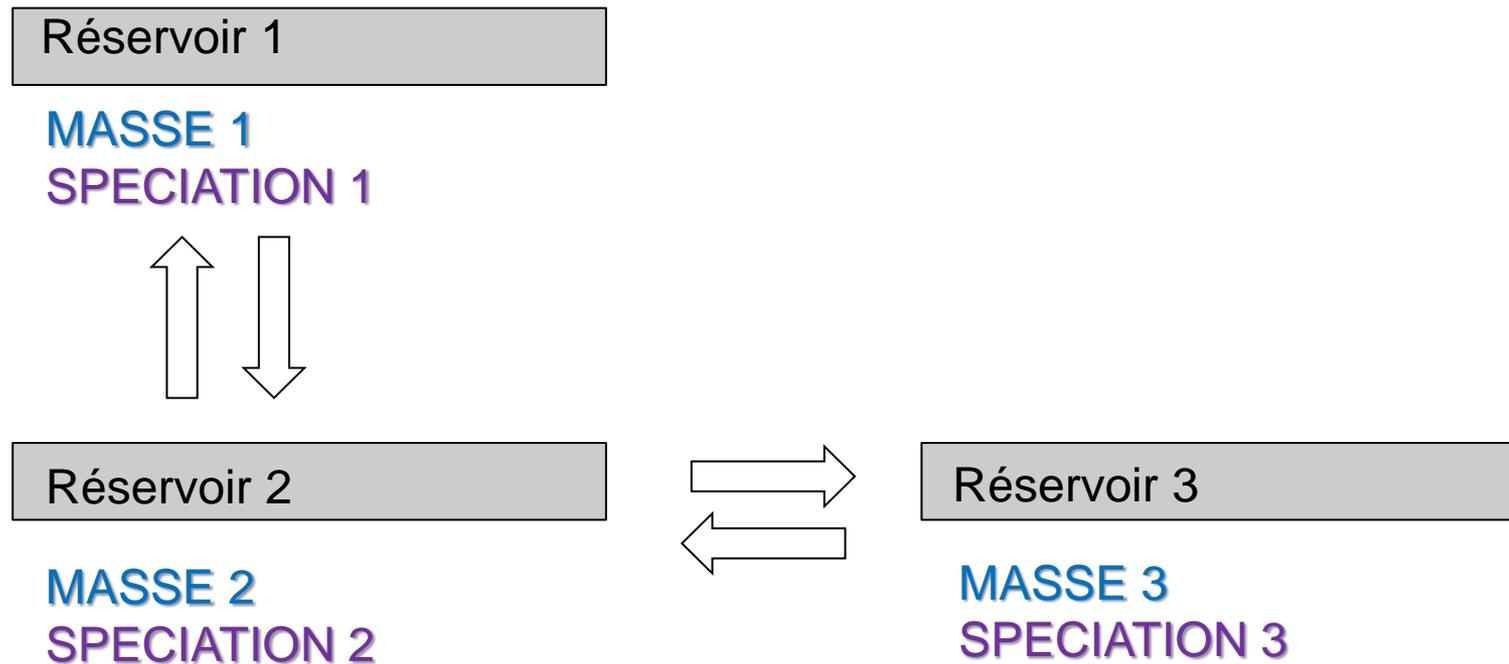
Réservoir 2



Réservoir 3

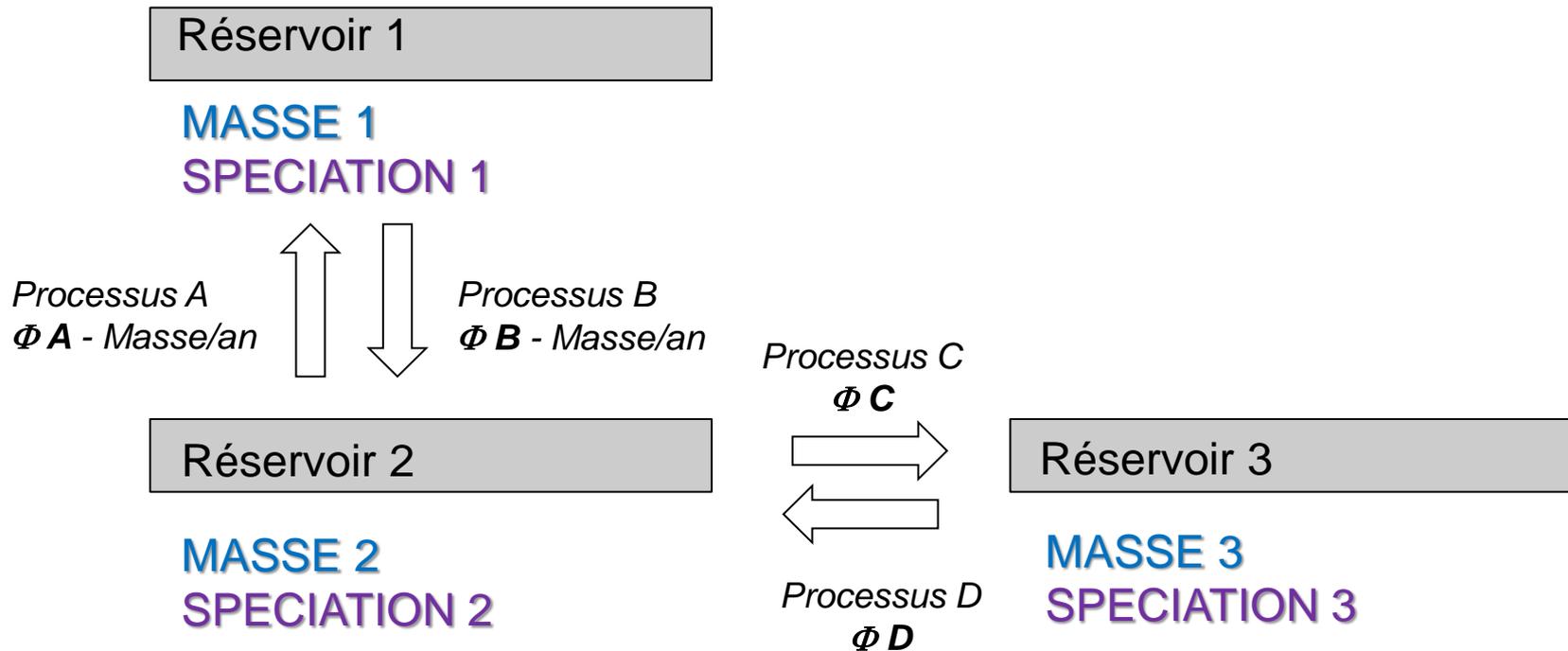
1 - Introduction	2 – Réservoirs et Transferts	3 – Cycle C préanthropique à l'équilibre
4 – Cycle C préanthropique en déséquilibre		5 – Cycle C perturbé par l'homme

Quand on parle de **cycle** → **réservoir, flux, temps de résidence**



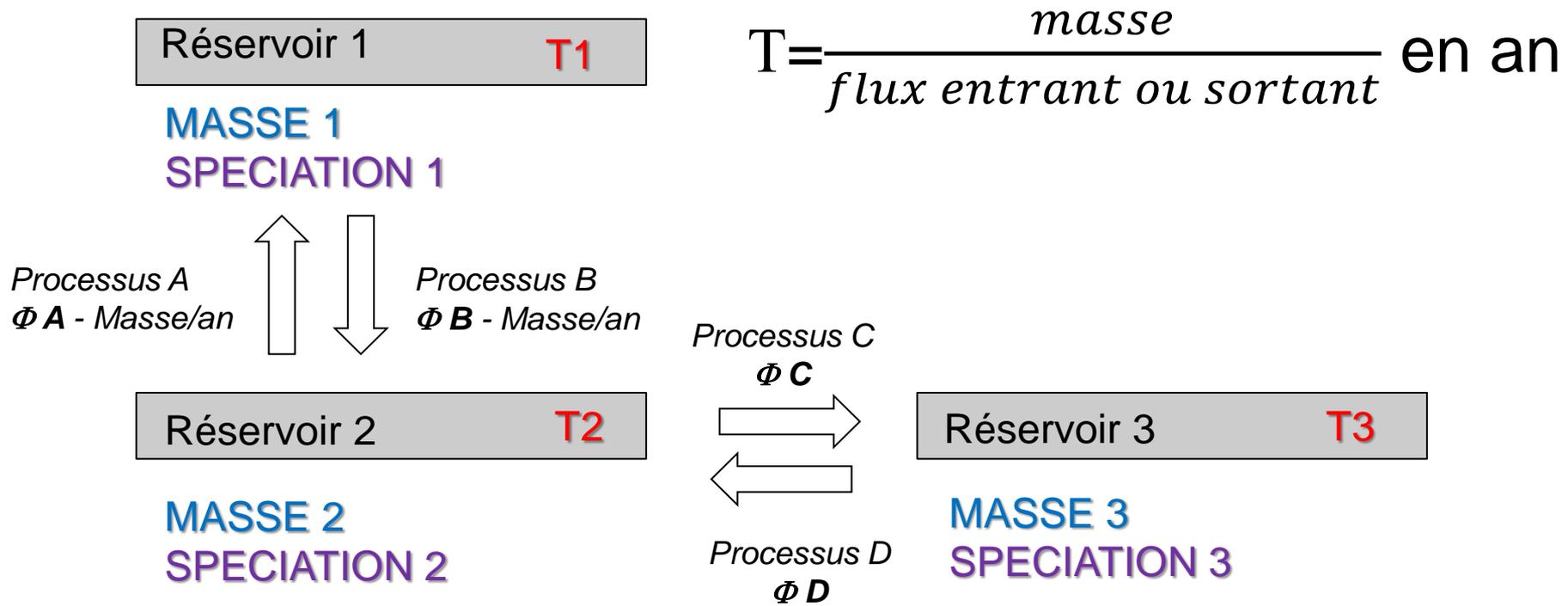
1 - Introduction	2 – Réservoirs et Transferts	3 – Cycle C préanthropique à l'équilibre
4 – Cycle C préanthropique en déséquilibre		5 – Cycle C perturbé par l'homme

Quand on parle de **cycle** → **réservoir, flux, temps de résidence**



1 - Introduction	2 – Réservoirs et Transferts	3 – Cycle C préanthropique à l'équilibre
4 – Cycle C préanthropique en déséquilibre		5 – Cycle C perturbé par l'homme

Quand on parle de **cycle** → **réservoir, flux, temps de résidence**



Rappel sur les unités pour le C

- ppm v : partie par million / volume d'air – 300 ppmv = 0,03%

- masse : GT de C (*scientifique*)

- masse : PgC (10^{15}) = GT (*scientifique*)

/12 x (12+2x16)
= x 3,7

- masse : en GT CO₂ (*économiste - atmosphère*)

1 ppm \approx 2.12 Gt de C

1 Gigatone (Gt) = 1×10^{15} g = 1 Petagram (Pg)

1 – Introduction / Généralités

2 - Les réservoirs et les transferts de carbone

Rappel effet de serre ★

Les réservoirs impliqués

Echange Océan / Atmosphère

Echange Biomasse marine / océan

Echange Sédiments / Océan

Rôle de la biomasse

Echange Lithosphère-Manteau / Atmosphère

3 – Le cycle du Carbone pré-anthropique : état stationnaire – équilibre

Flux entre réservoirs – Temps de résidence

4 - Le cycle du Carbone pré-anthropique en déséquilibre

Evolution de l'atmosphère en C depuis 4.5 Ga – Long terme

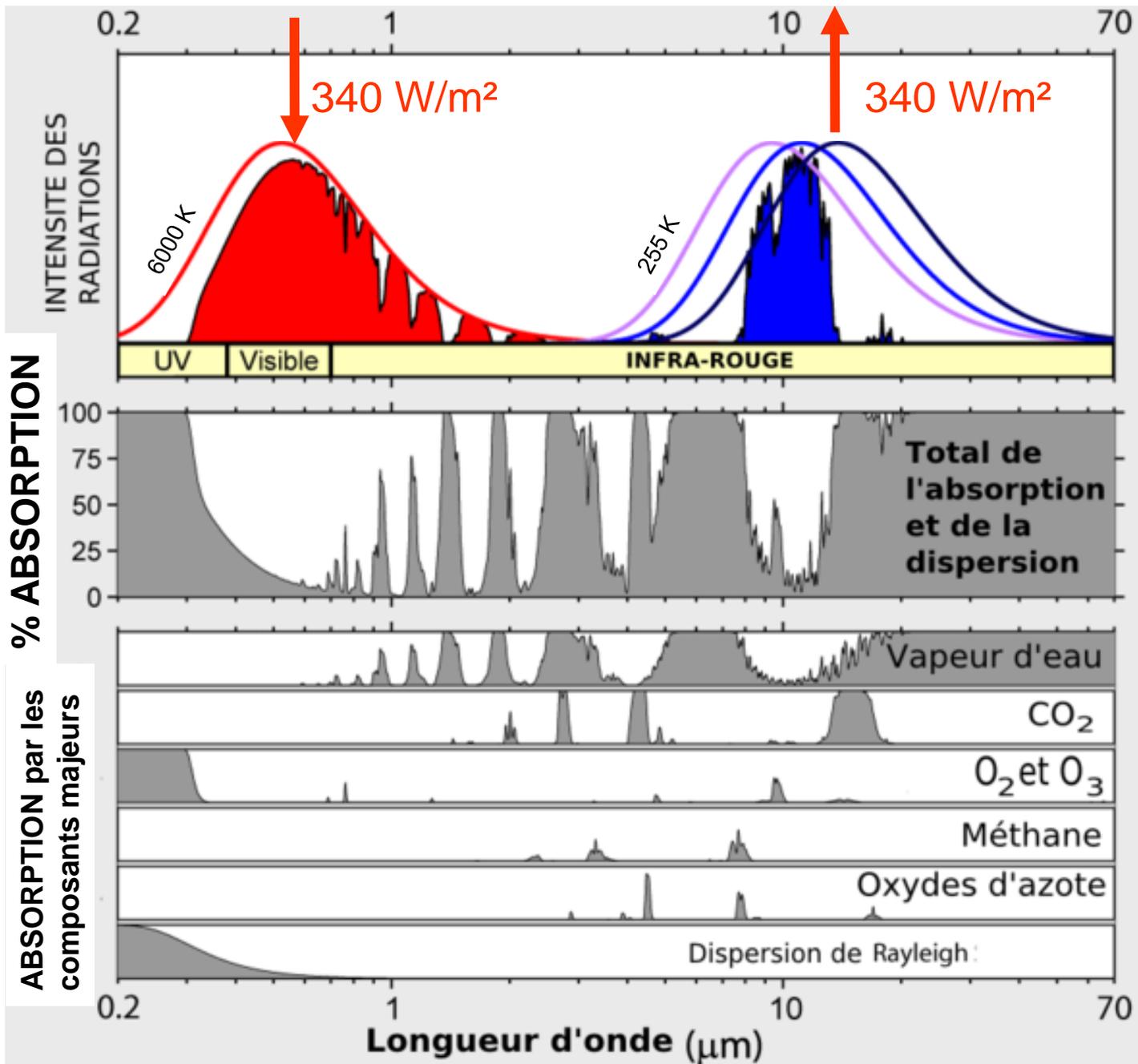
5 – Le cycle du Carbone perturbé par l'activité humaine

Evolution de l'atmosphère depuis 100 ans – Court terme

EFFET DE SERRE

comment concilier deux réalités apparemment inconciliables ?

- La vitre d'une serre (ou une atmosphère riche en GES) arrête et retient la chaleur et le rayonnement IR qui ne peuvent pas s'échapper
- La Terre renvoie vers l'extérieur autant d'énergie qu'elle en reçoit du soleil (équilibre thermodynamique obligatoire pour un climat stable)



Simplification du principe de l'effet de serre

Atmosphère = vitre infiniment mince, infiniment transparent au visible, infiniment opaque aux IR
Sol assimilé à un corps noir, infiniment absorbant pour toutes les λ

Quantité émise
par le soleil

100

100

SOL

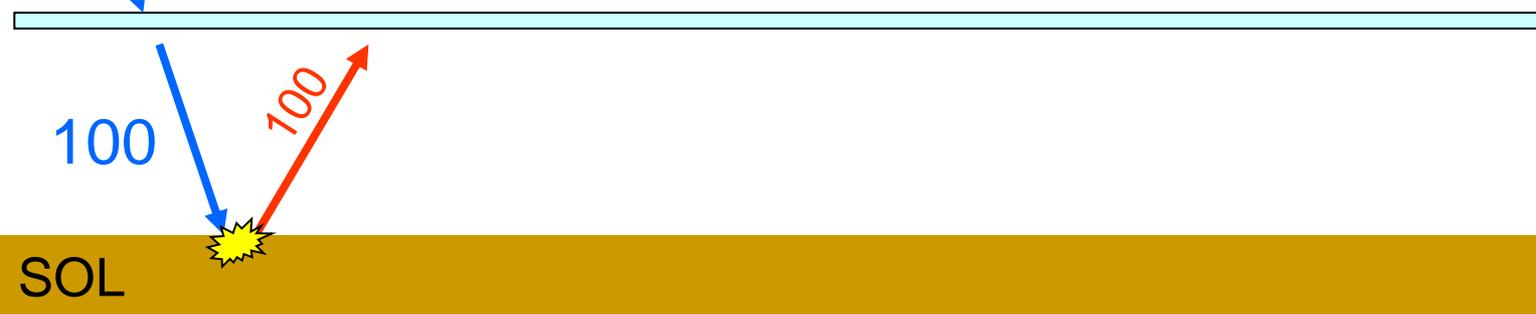


Simplification du principe de l'effet de serre

Atmosphère = vitre infiniment mince, infiniment transparent au visible, infiniment opaque aux IR
Sol assimilé à un corps noir, infiniment absorbant pour toutes les λ

Quantité émise
par le soleil

100



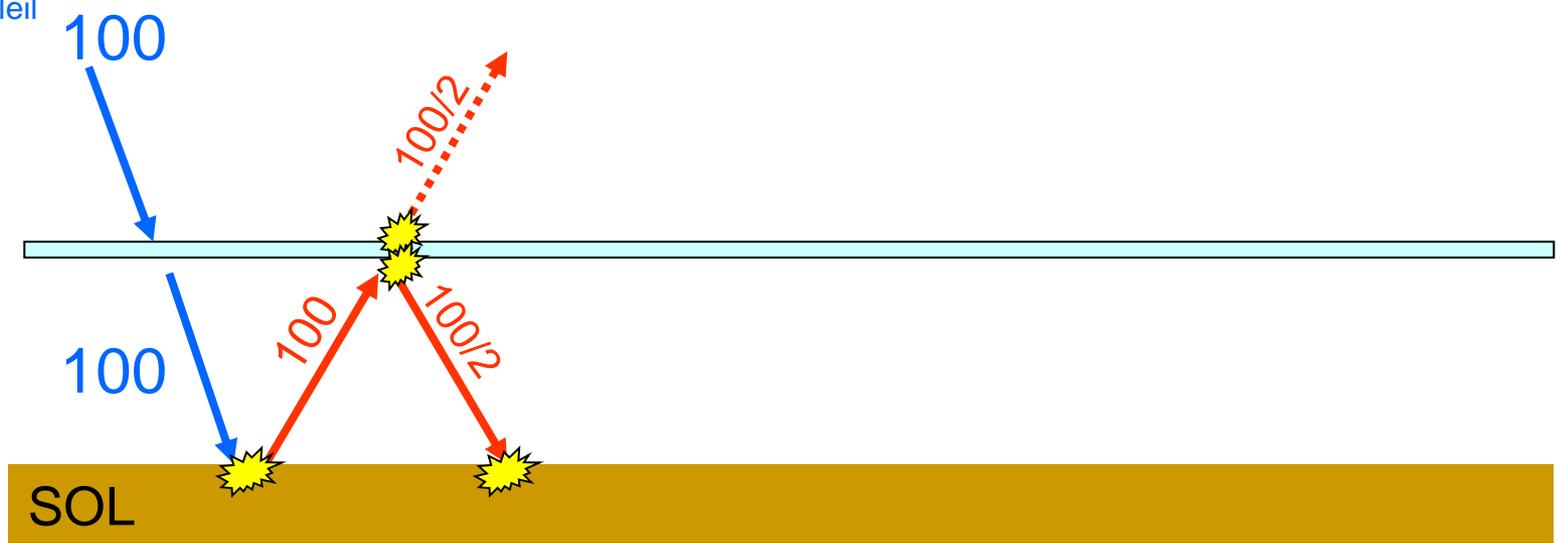
SOL

- Rayonnement en λ visible
- Rayonnement en λ IR
- ☀ Absorption - réchauffement, émission IR

Simplification du principe de l'effet de serre

Atmosphère = vitre infiniment mince, infiniment transparent au visible, infiniment opaque aux IR
Sol assimilé à un corps noir, infiniment absorbant pour toutes les λ

Quantité émise par le soleil

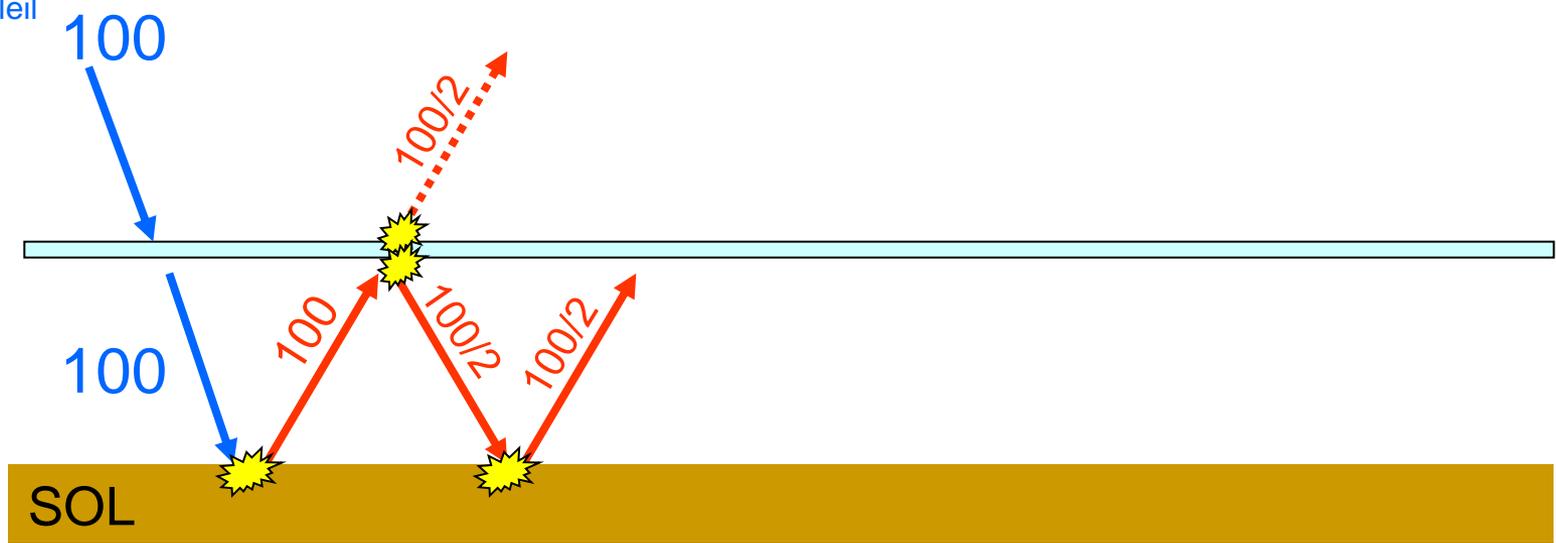


- Rayonnement en λ visible
- Rayonnement en λ IR
- ☀ Absorption - réchauffement, émission IR

Simplification du principe de l'effet de serre

Atmosphère = vitre infiniment mince, infiniment transparent au visible, infiniment opaque aux IR
Sol assimilé à un corps noir, infiniment absorbant pour toutes les λ

Quantité émise par le soleil

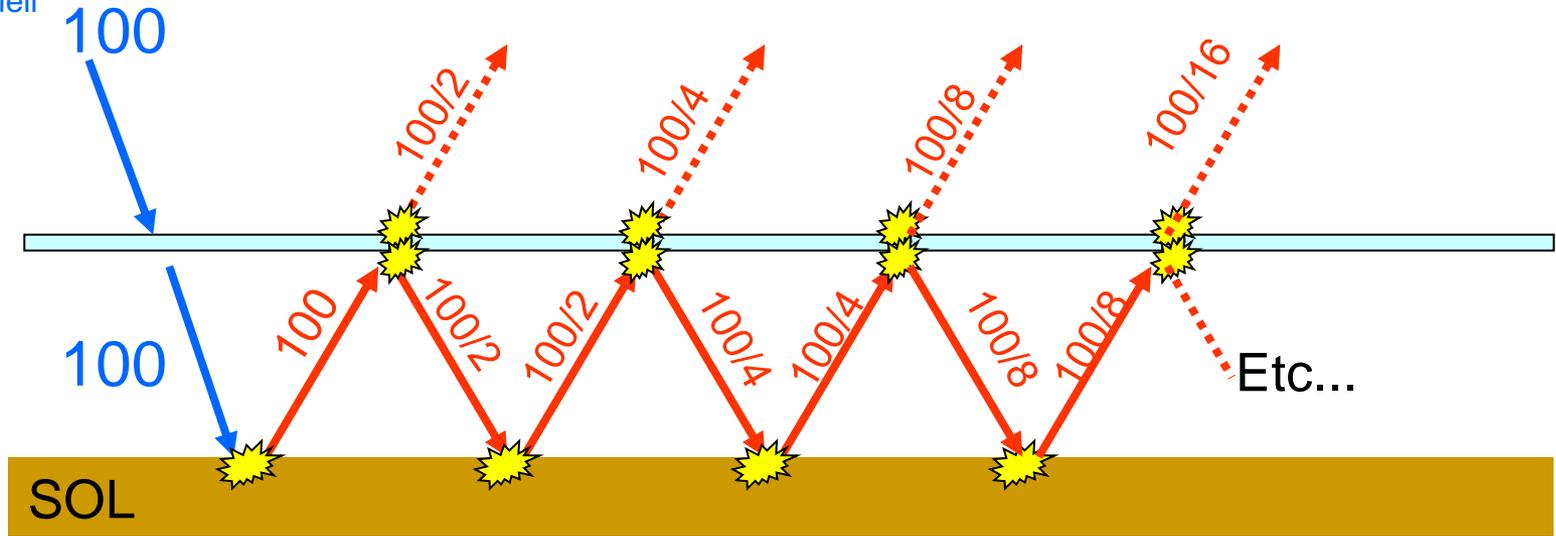


- Rayonnement en λ visible
- Rayonnement en λ IR
- Absorption - réchauffement, émission IR

Simplification du principe de l'effet de serre

Atmosphère = vitre infiniment mince, infiniment transparent au visible, infiniment opaque aux IR
Sol assimilé à un corps noir, infiniment absorbant pour toutes les λ

Quantité émise par le soleil

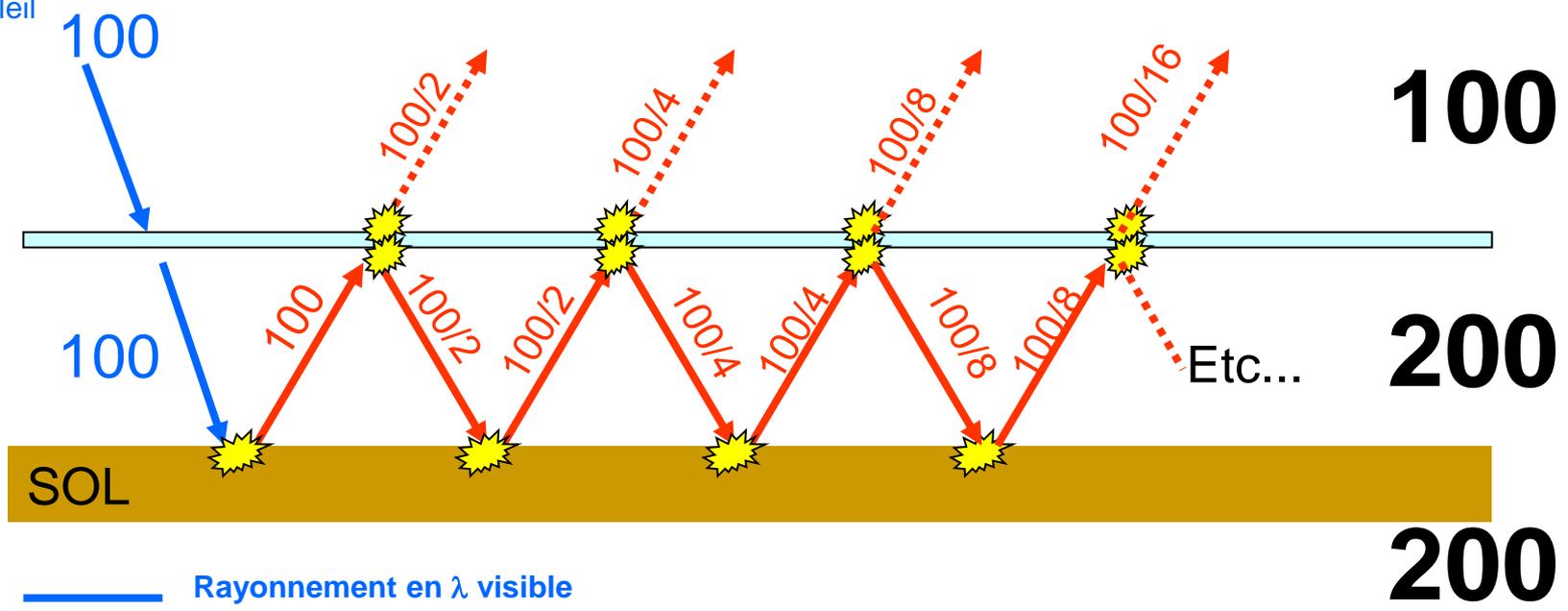


- Rayonnement en λ visible
- Rayonnement en λ IR
- Absorption - réchauffement, émission IR

Simplification du principe de l'effet de serre

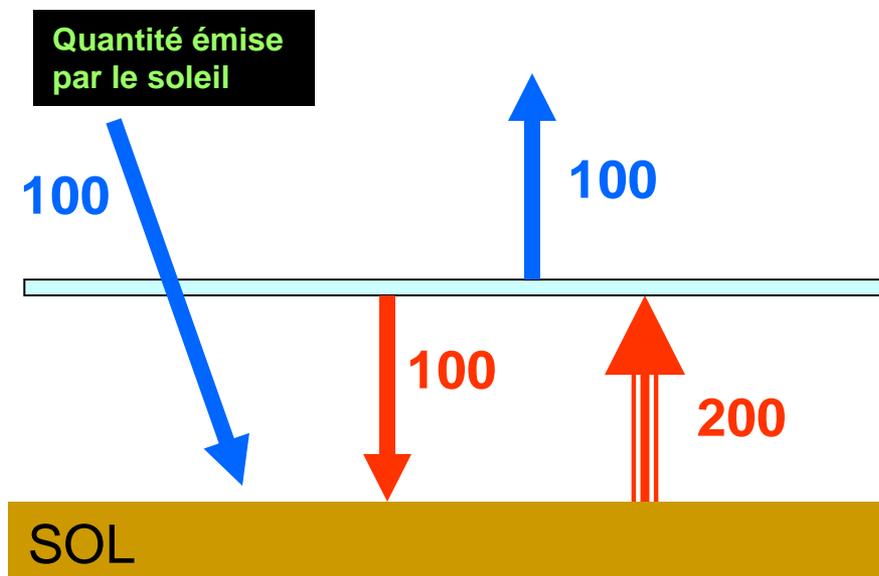
Atmosphère = vitre infiniment mince, infiniment transparent au visible, infiniment opaque aux IR
Sol assimilé à un corps noir, infiniment absorbant pour toutes les λ

Quantité émise par le soleil



- Rayonnement en λ visible
- Rayonnement en λ IR
- Absorption - réchauffement, émission IR

Simplification du principe de l'effet de serre

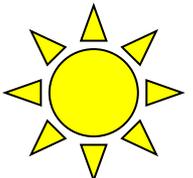


Au niveau du sol :

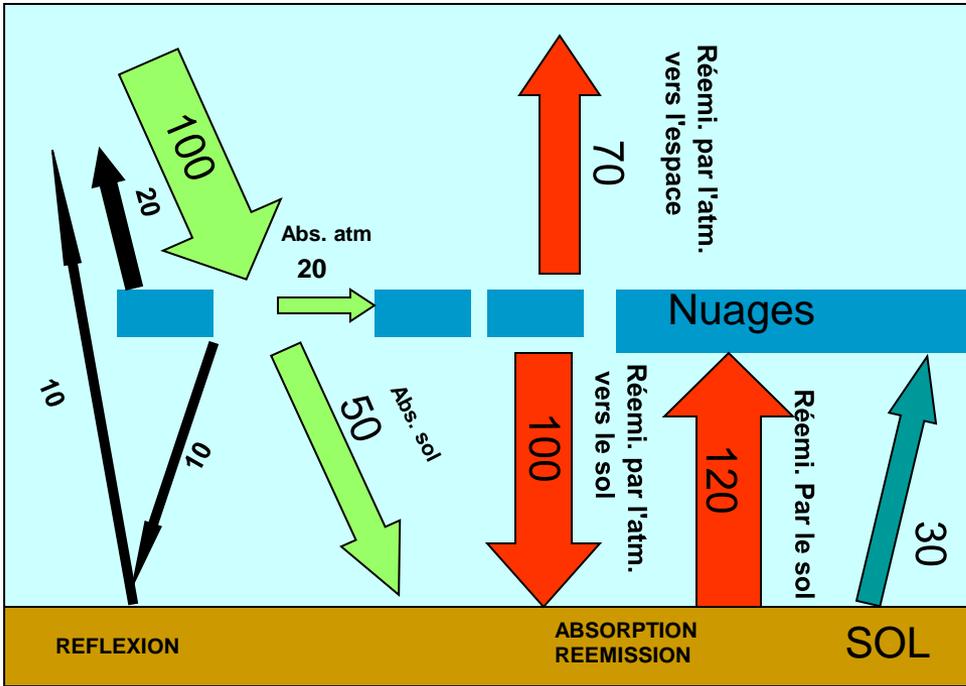
- Sans serre et à l'équilibre, il en arrive 100 et en repart 100
- Avec serre, à l'équilibre, il en arrive et en repart 200

EFFET DE SERRE

La réalité terrestre : plus complexe qu'une serre idéale et corps noir



100% = 340 w/m²



La Terre reçoit : **100**

La Terre renvoie : $20+10+70 = 100$

L'atm reçoit et absorbe : $20+120+30 = 170$

L'atm réémet : $100+70 = 170$

Le sol reçoit et absorbe : $50+100 = 150$

Que réémet le sol : $120+30 = 150$

EQUILIBRE !!

T° moyenne = 15°C

Rayonnement IR
 Rayonnement Visible
 Evaporation : chaleur latente

1 – Introduction / Généralités

2 - Les réservoirs et les transferts de carbone

Rappel effet de serre

Les réservoirs impliqués ★

Echange Océan / Atmosphère

Echange Biomasse marine / océan

Echange Sédiments / Océan

Rôle de la biomasse

Echange Lithosphère-Manteau / Atmosphère

3 – Le cycle du Carbone pré-anthropique : état stationnaire – équilibre

Flux entre réservoirs – Temps de résidence

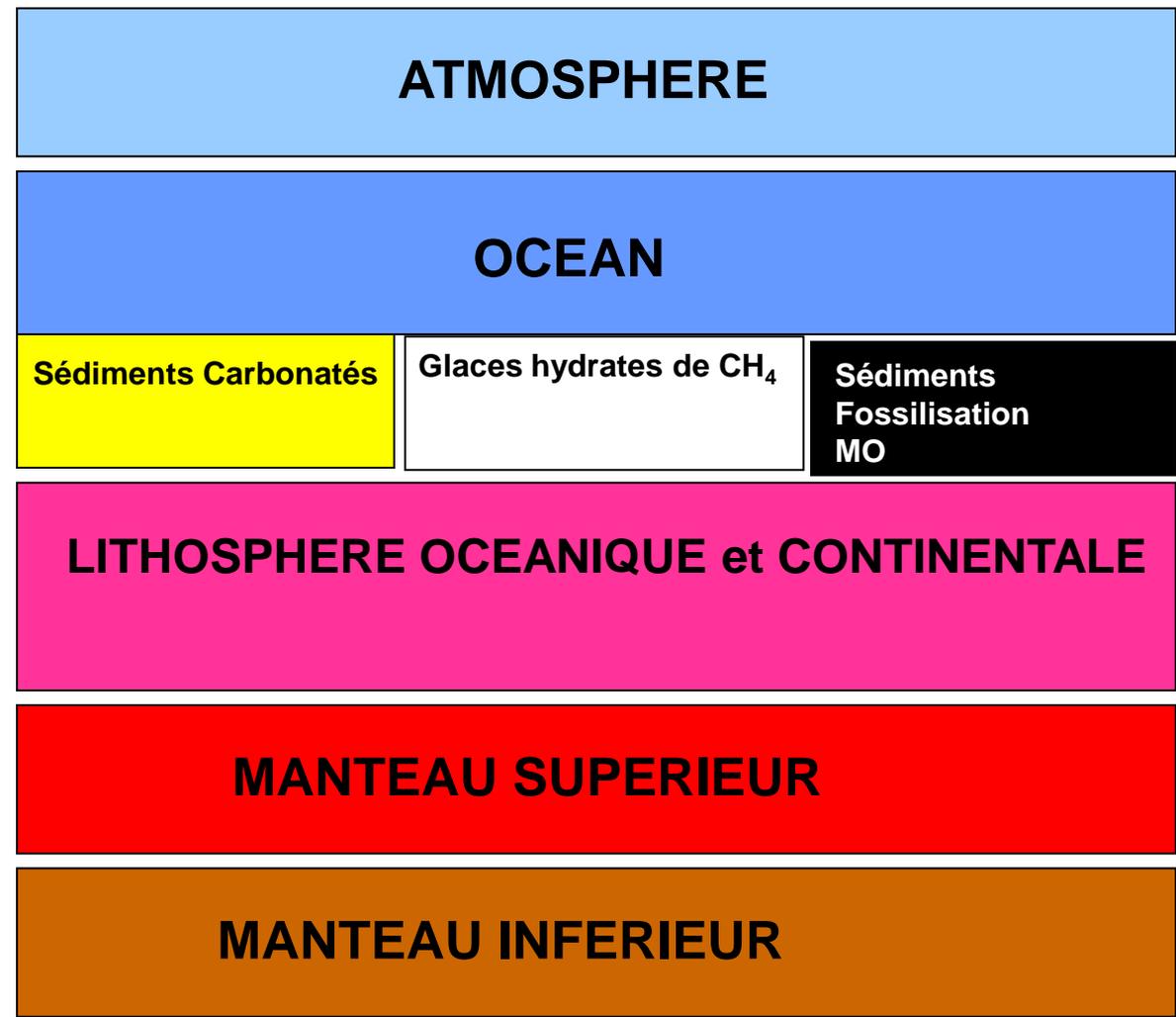
4 - Le cycle du Carbone pré-anthropique en déséquilibre

Evolution de l'atmosphère en C depuis 4.5 Ga – Long terme

5 – Le cycle du Carbone perturbé par l'activité humaine

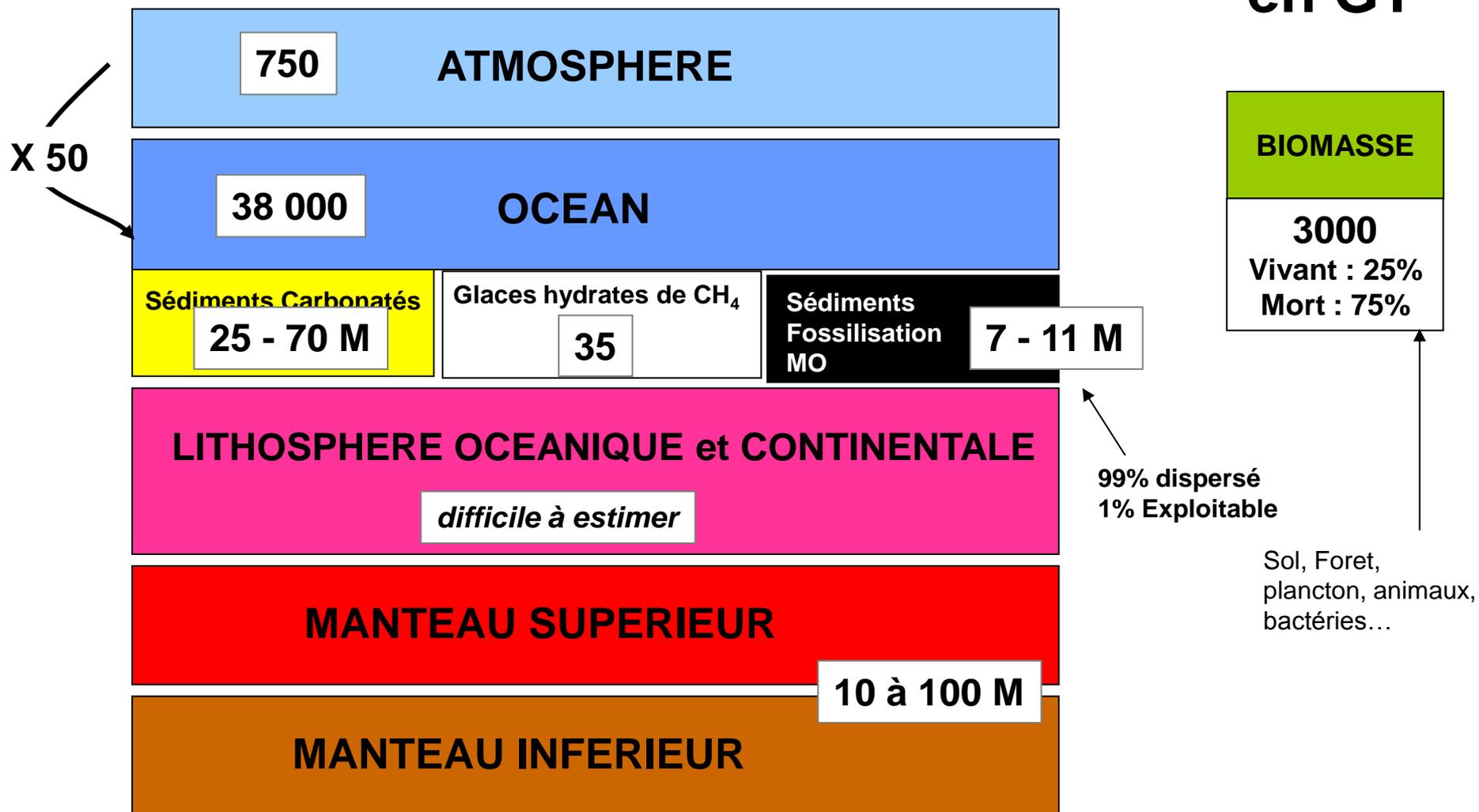
Evolution de l'atmosphère depuis 100 ans – Court terme

**Masse de C
en GT**

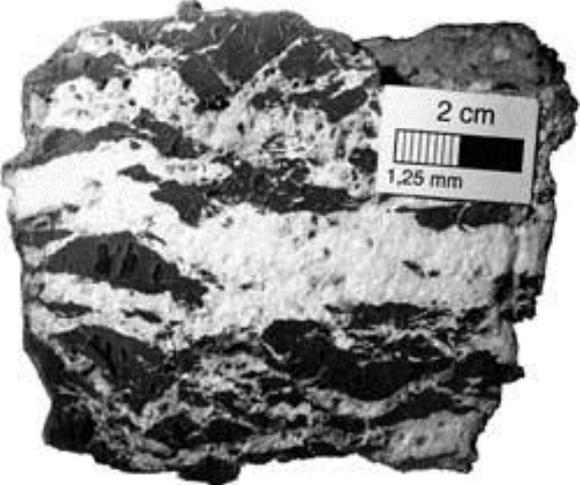


BIOMASSE

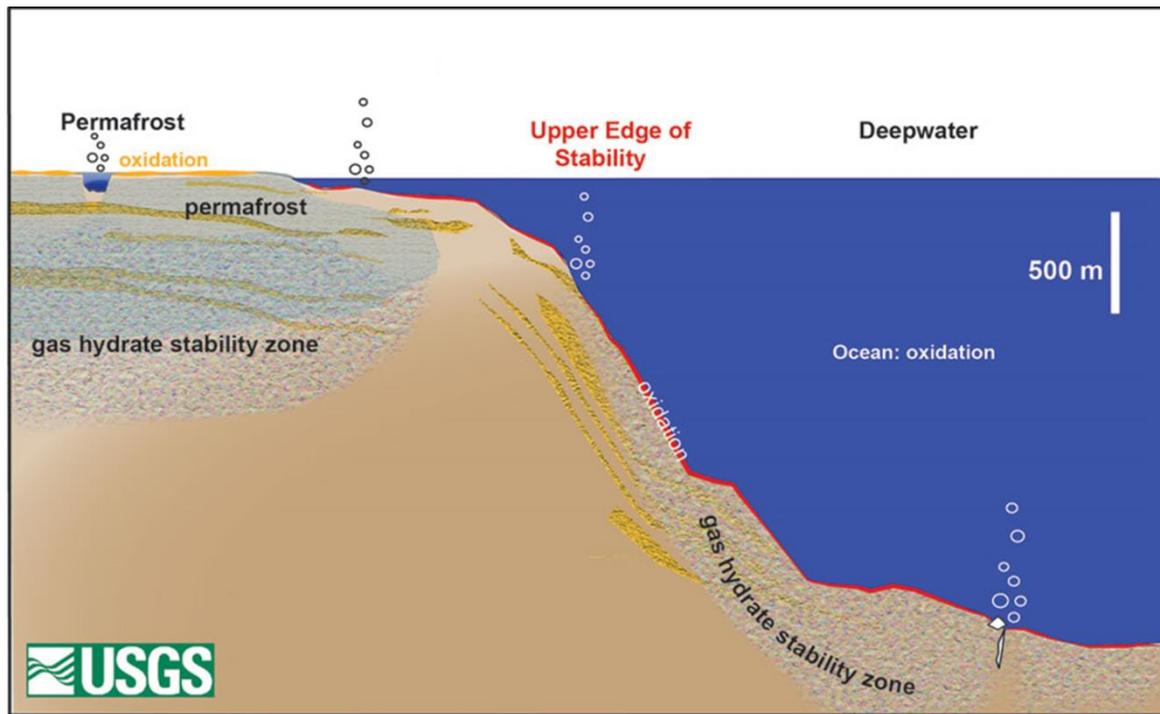
Masse de C en GT

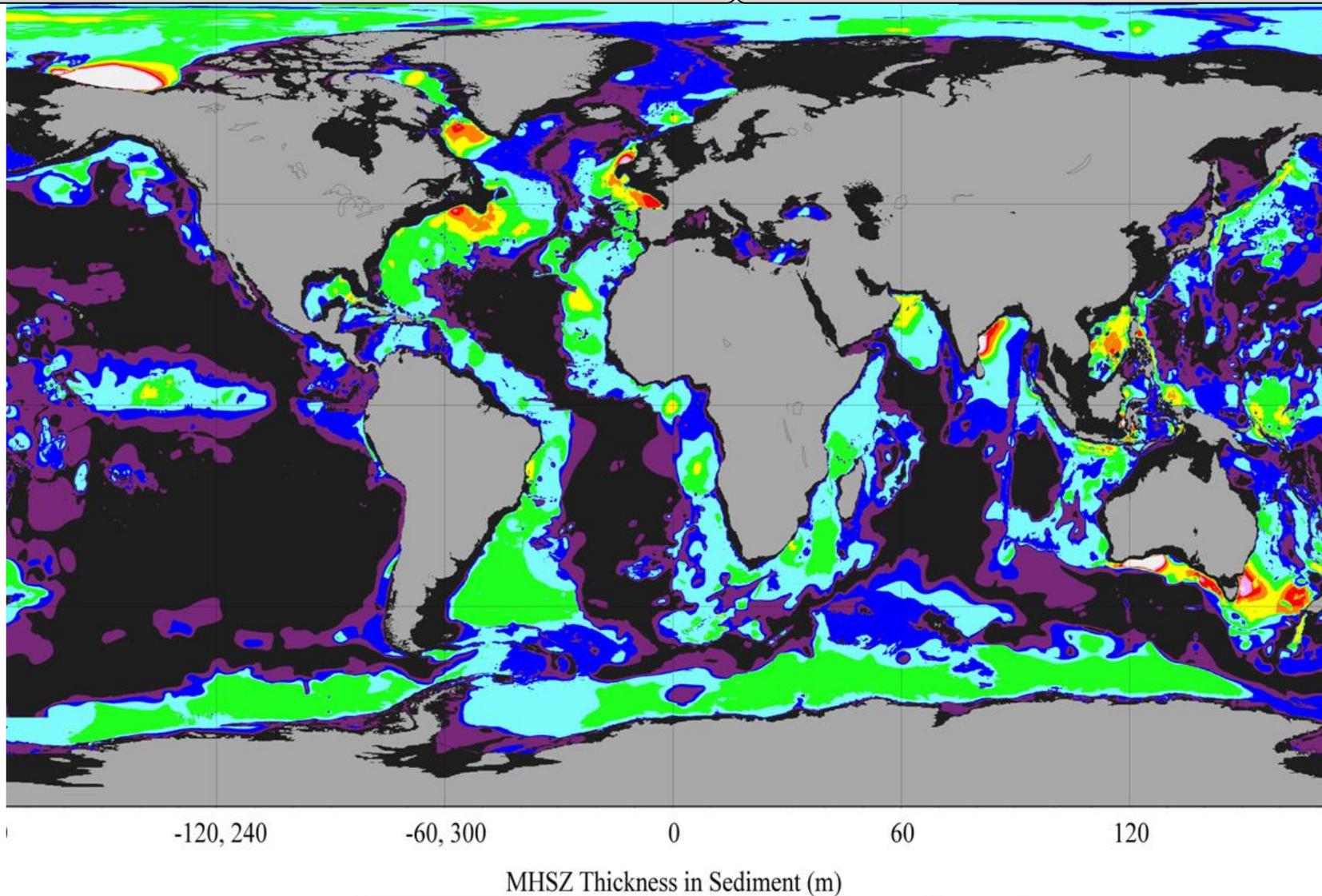


Glaces d'hydrates de Méthane



- Stable dans les sédiments dans les conditions P-T des marges passives (500 – 1000 m)
- Formation : origine bactérienne à partir du CO₂ (CO₂ → CH₄)





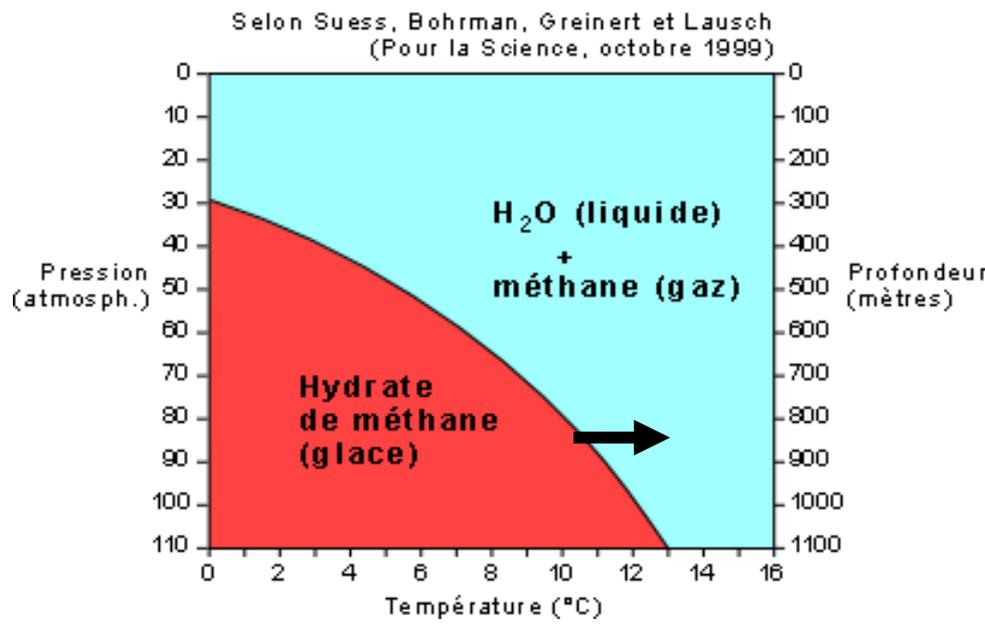
Estimation de l'épaisseur de la zone de stabilité des hydrates de méthane dans les sédiments océaniques. The methane hydrate stability zone (MHSZ) indique où l'on peut trouver les conditions P-T° pour la formation des hydrates.

Une bombe écologique en puissance !!

GLACES HYDRATES DE METHANE

Masse estimé en C : **35 GT**

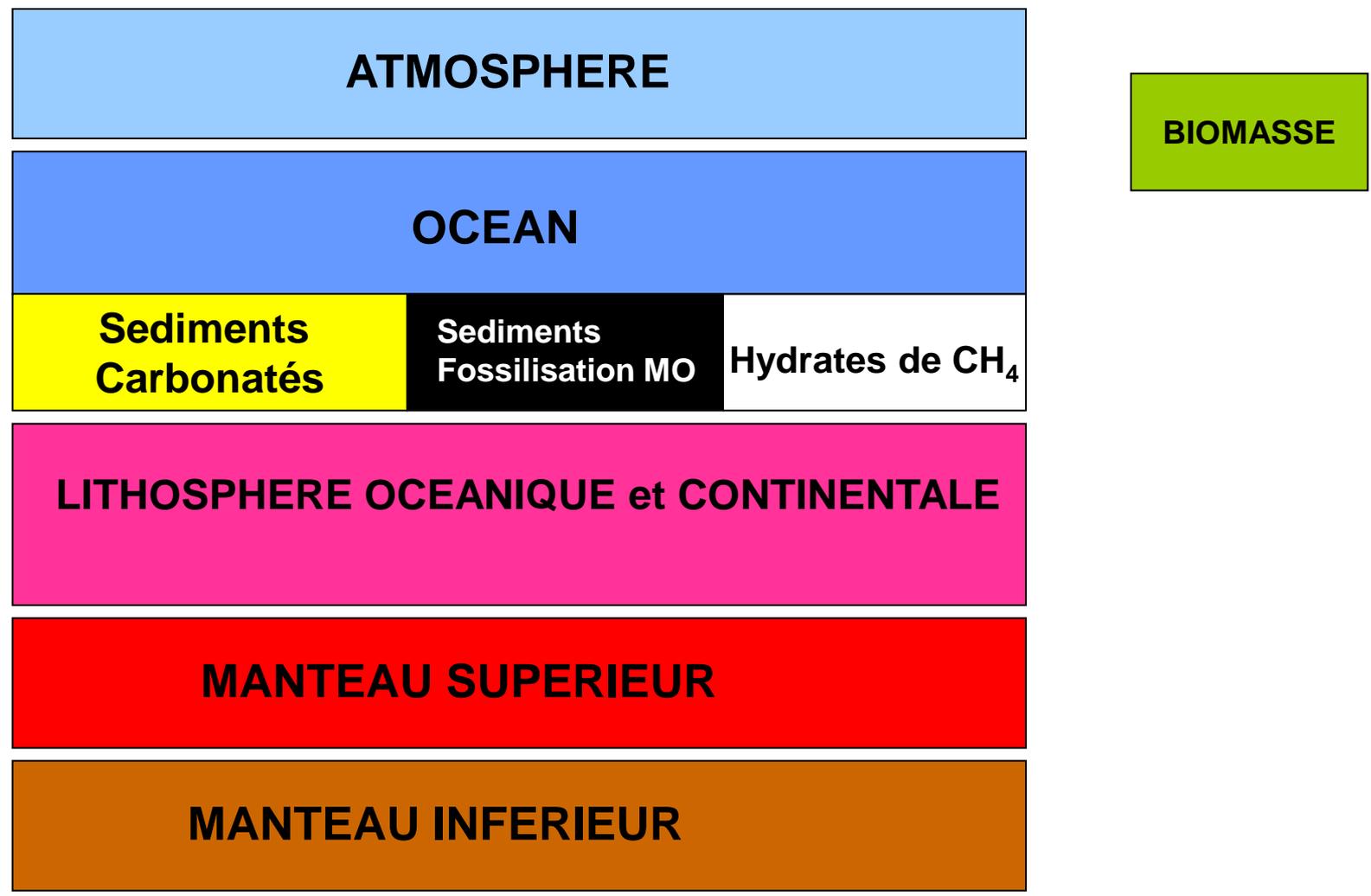
(= 3 à 5 fois le C fossile anthropique)



Hausse de 1-2°C : ES ++

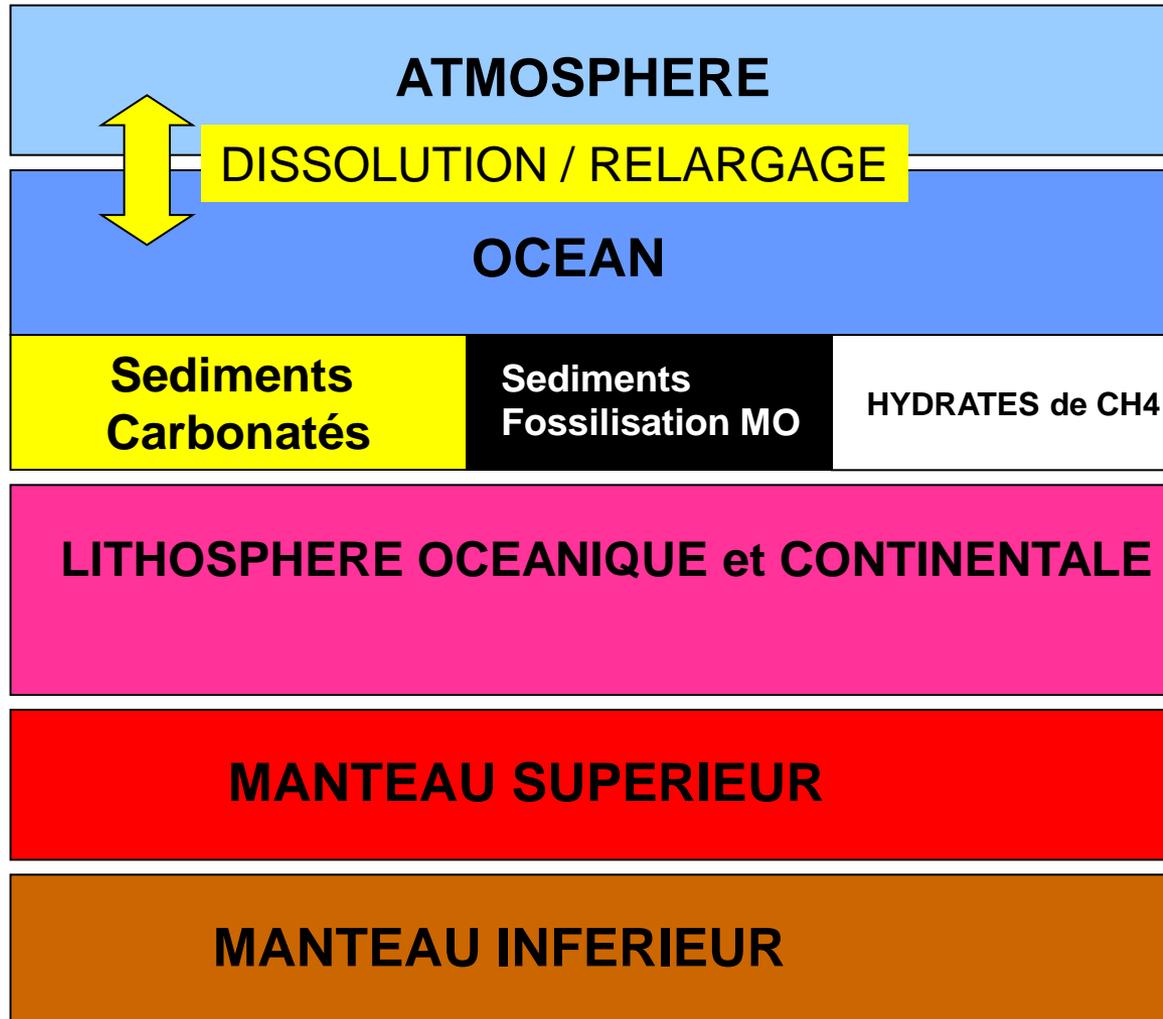
1 cm³ de gaz d'hydrates de méthane libère 164 cm³ de méthane

MODES DE TRANSFERT : réversible vs irréversible



MODES DE TRANSFERT

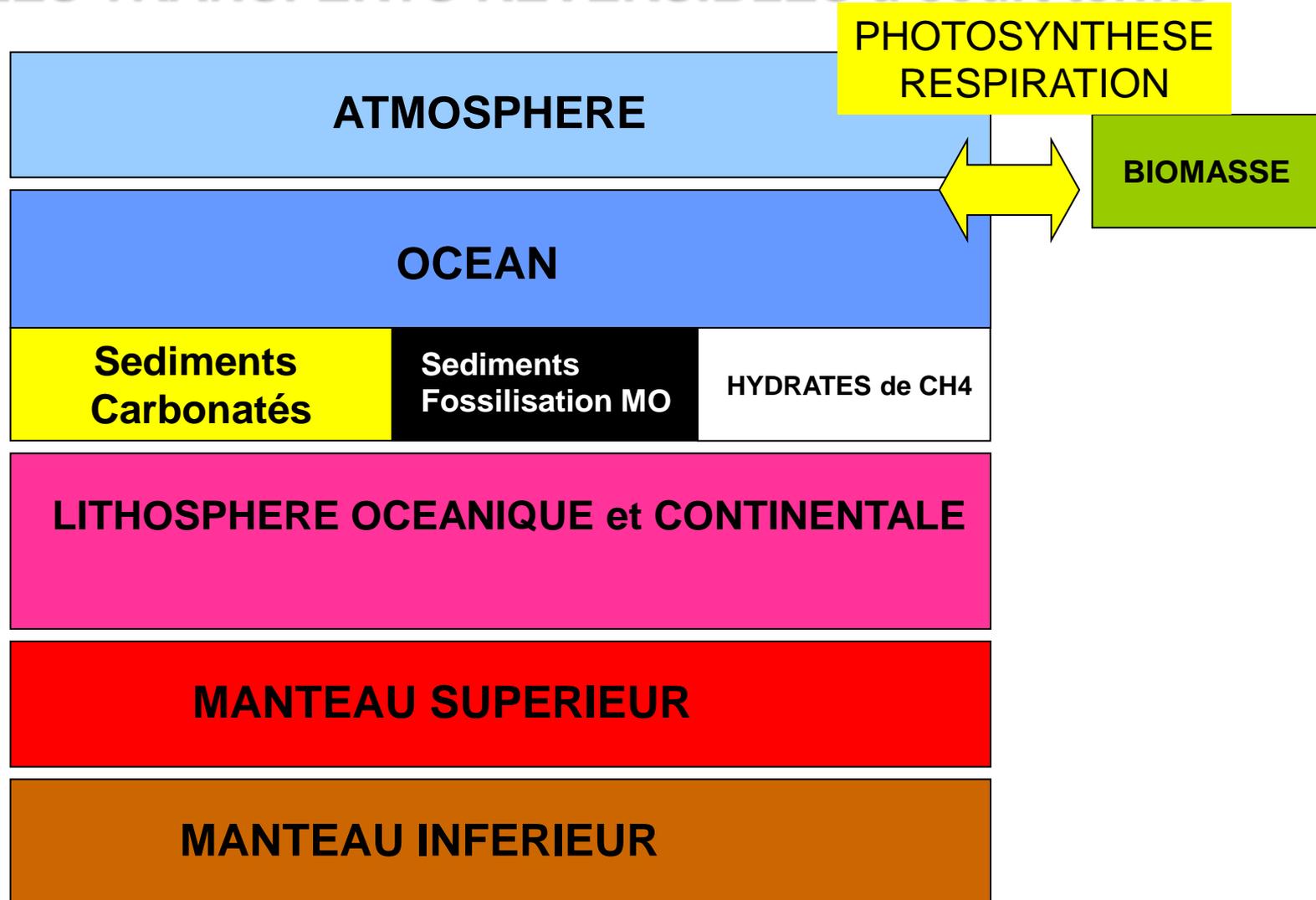
LES TRANSFERTS REVERSIBLES à court terme



BIOMASSE

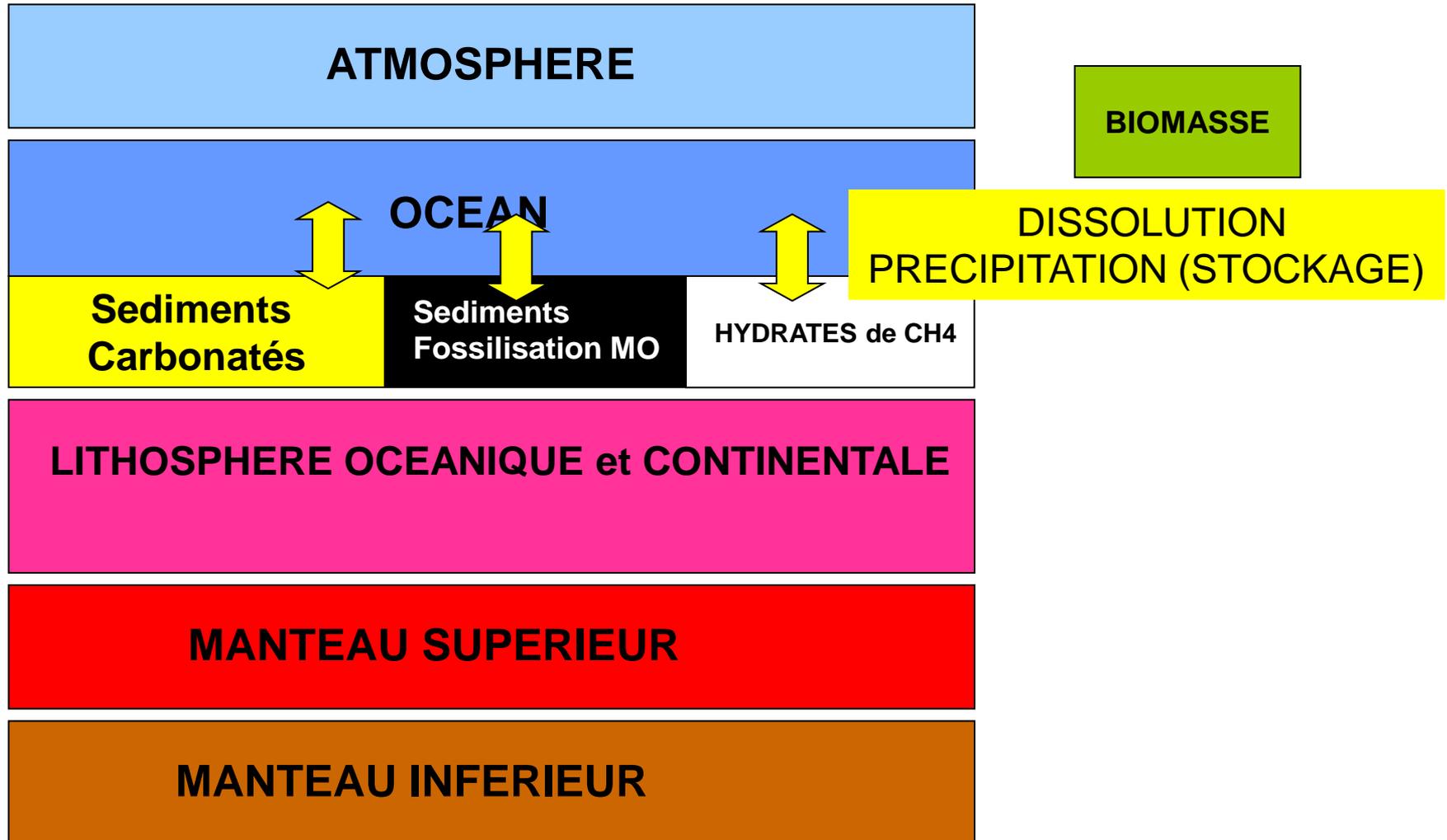
MODES DE TRANSFERT

LES TRANSFERTS REVERSIBLES à court terme



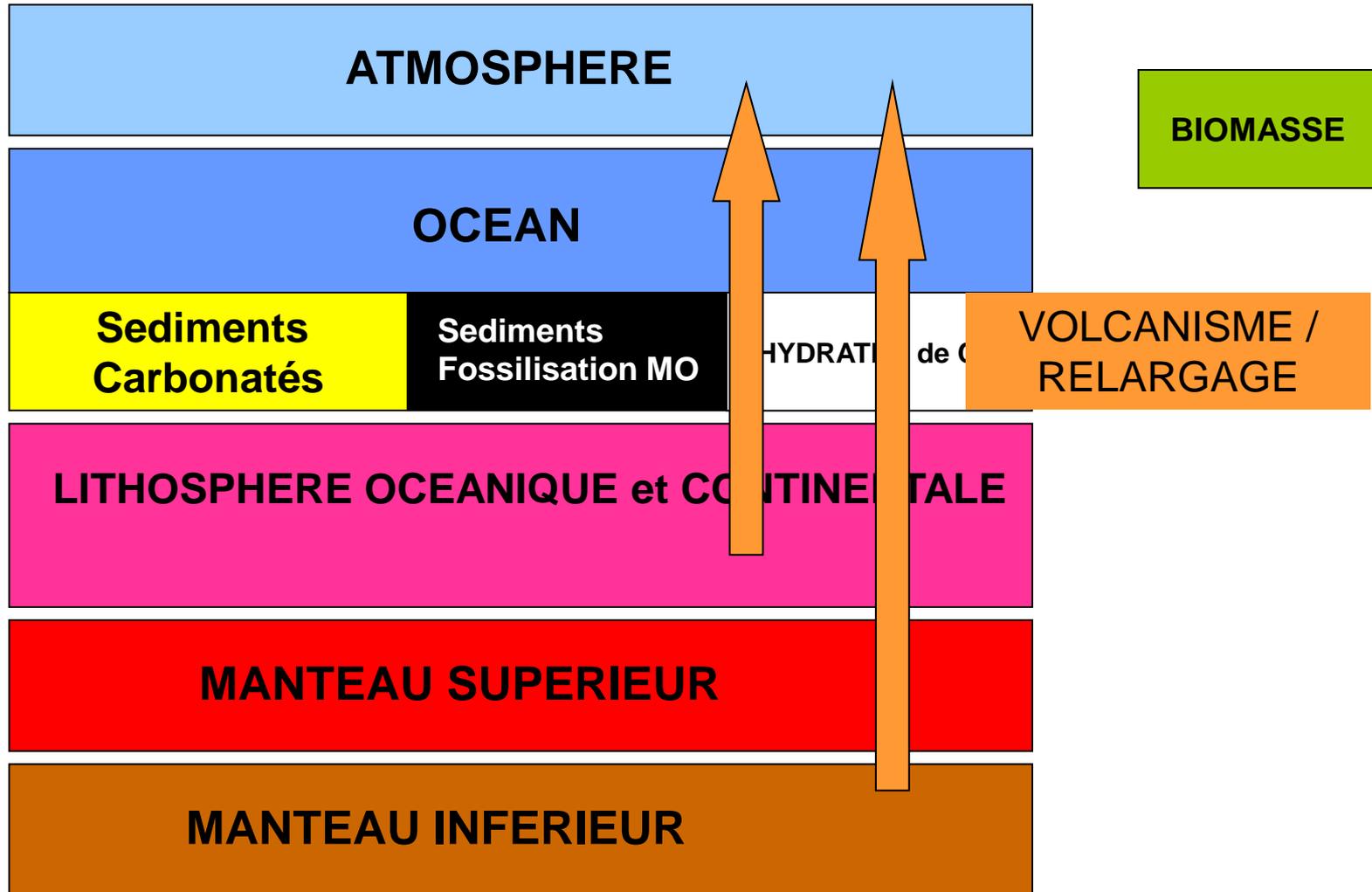
MODES DE TRANSFERT

LES TRANSFERTS REVERSIBLES à court terme



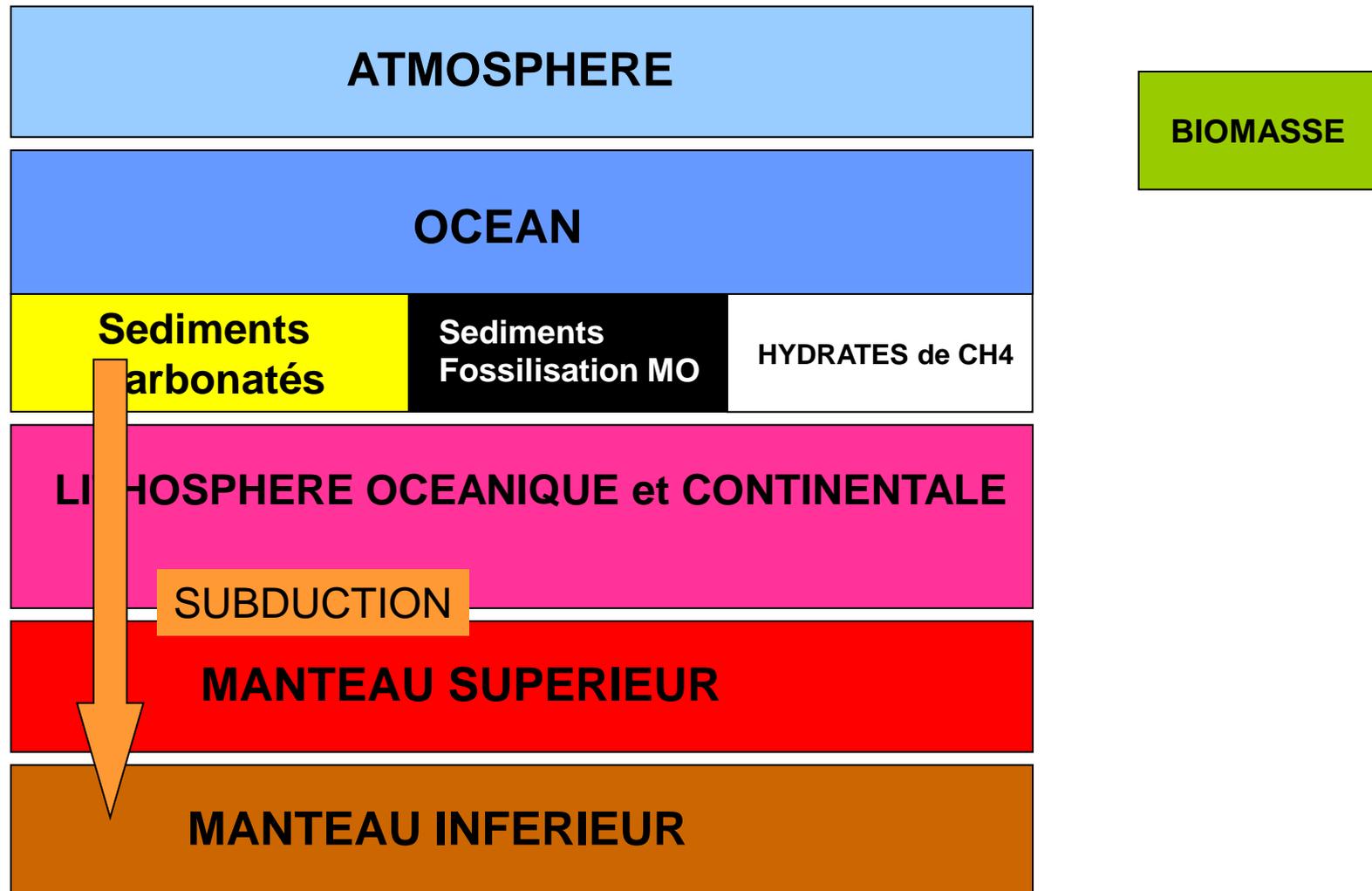
MODES DE TRANSFERT

LES TRANSFERTS IRREVERSIBLES à court terme



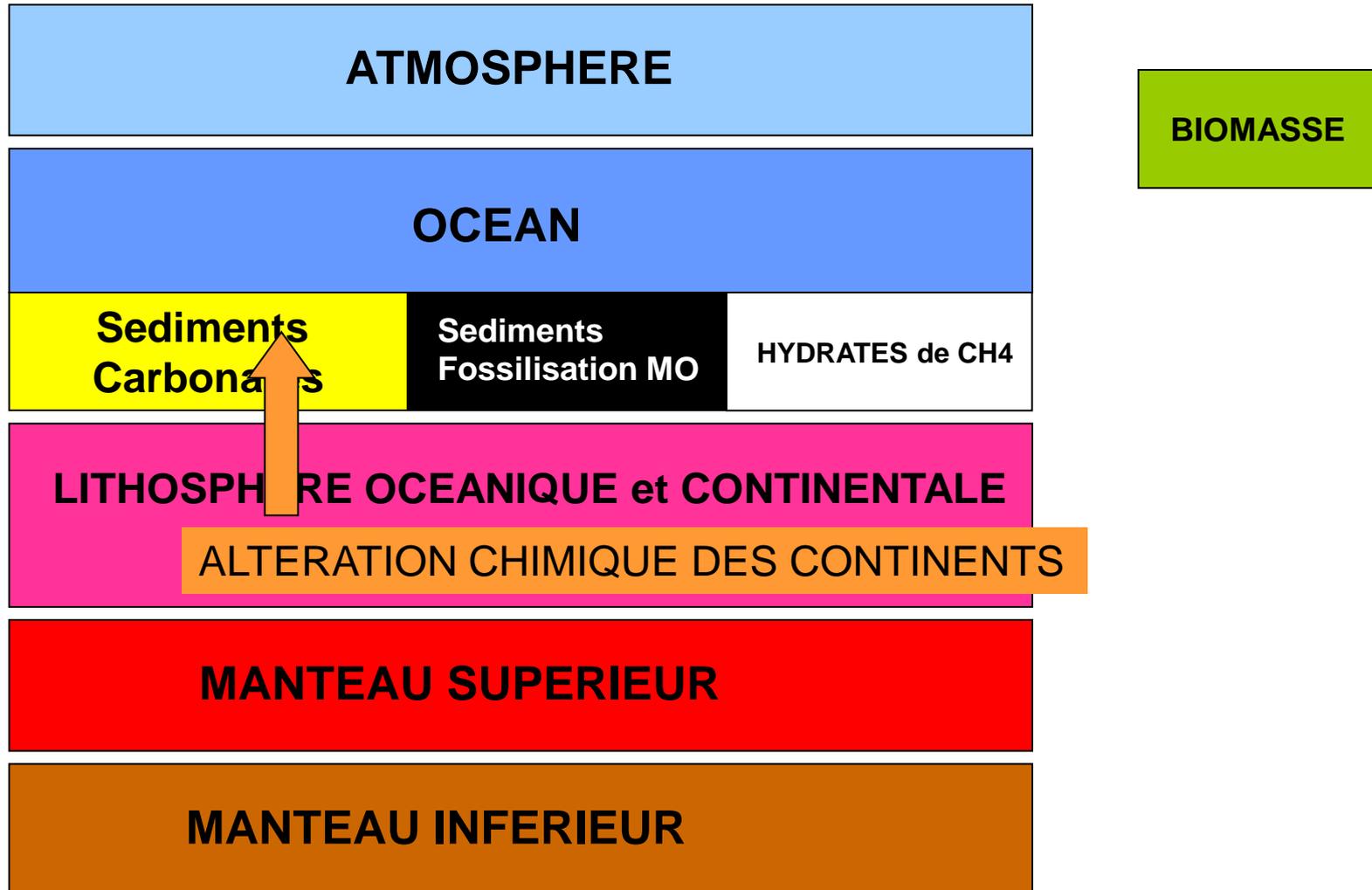
MODES DE TRANSFERT

LES TRANSFERTS IRREVERSIBLES à court terme



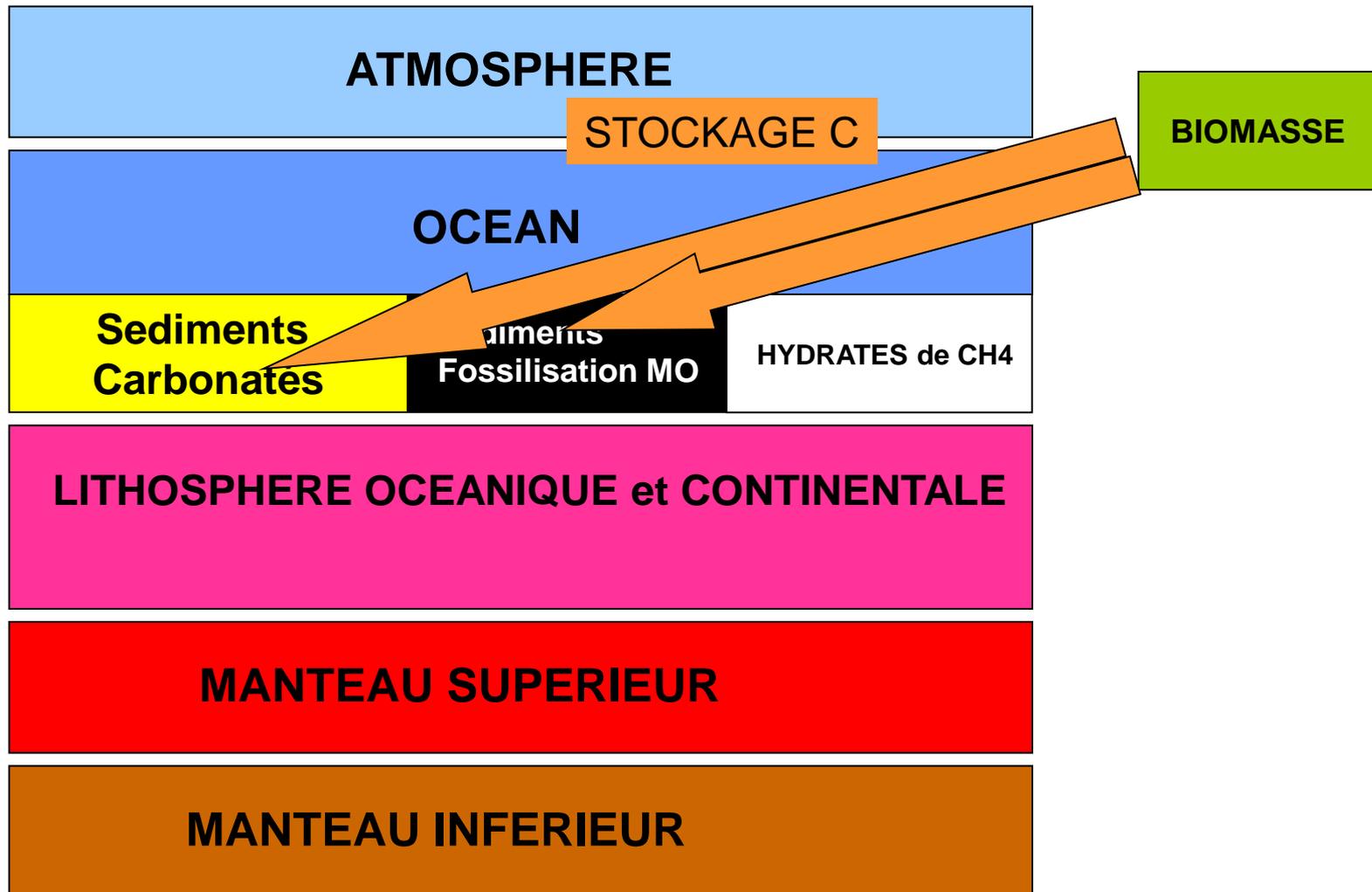
MODES DE TRANSFERT

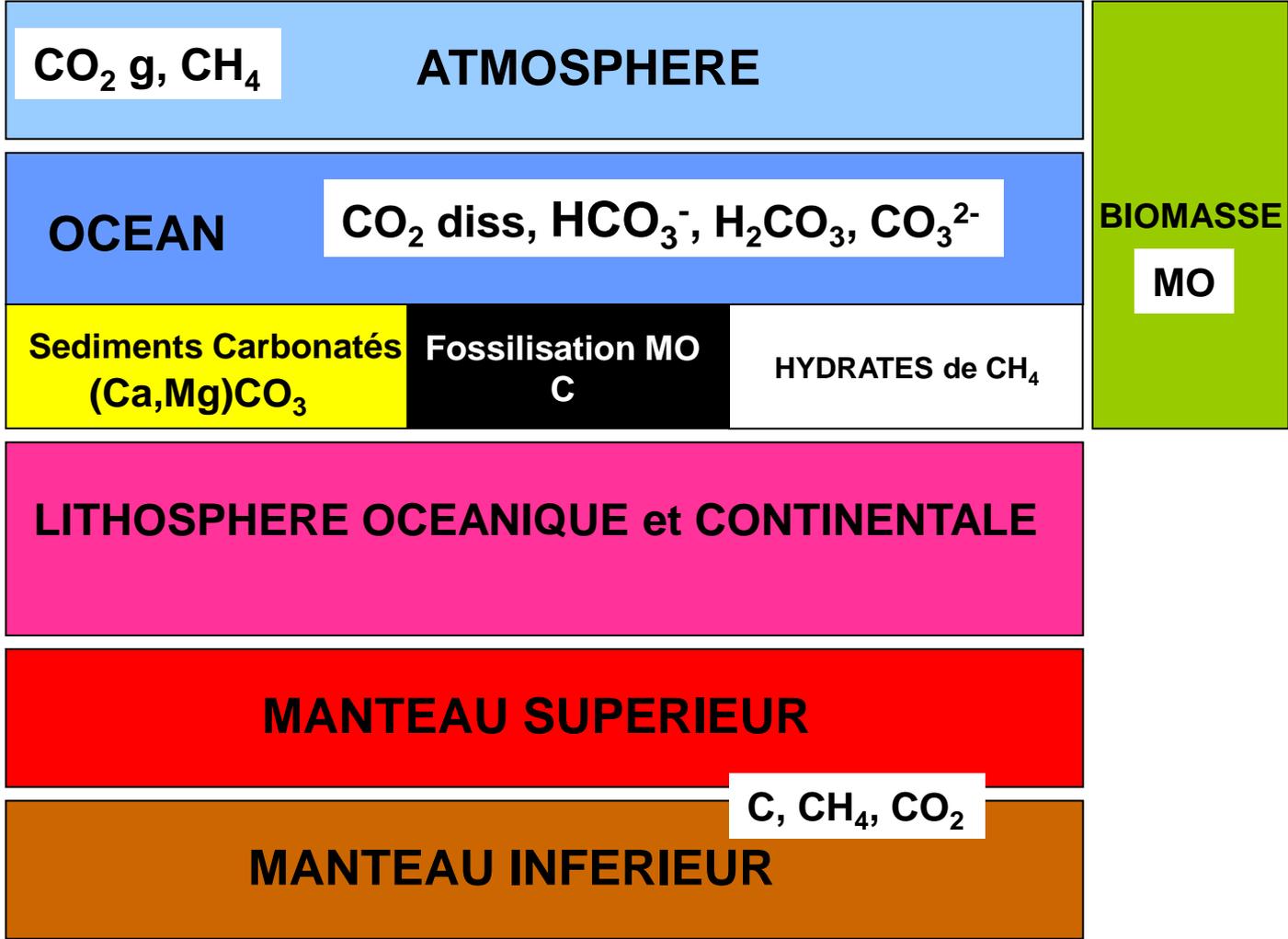
LES TRANSFERTS IRREVERSIBLES à court terme



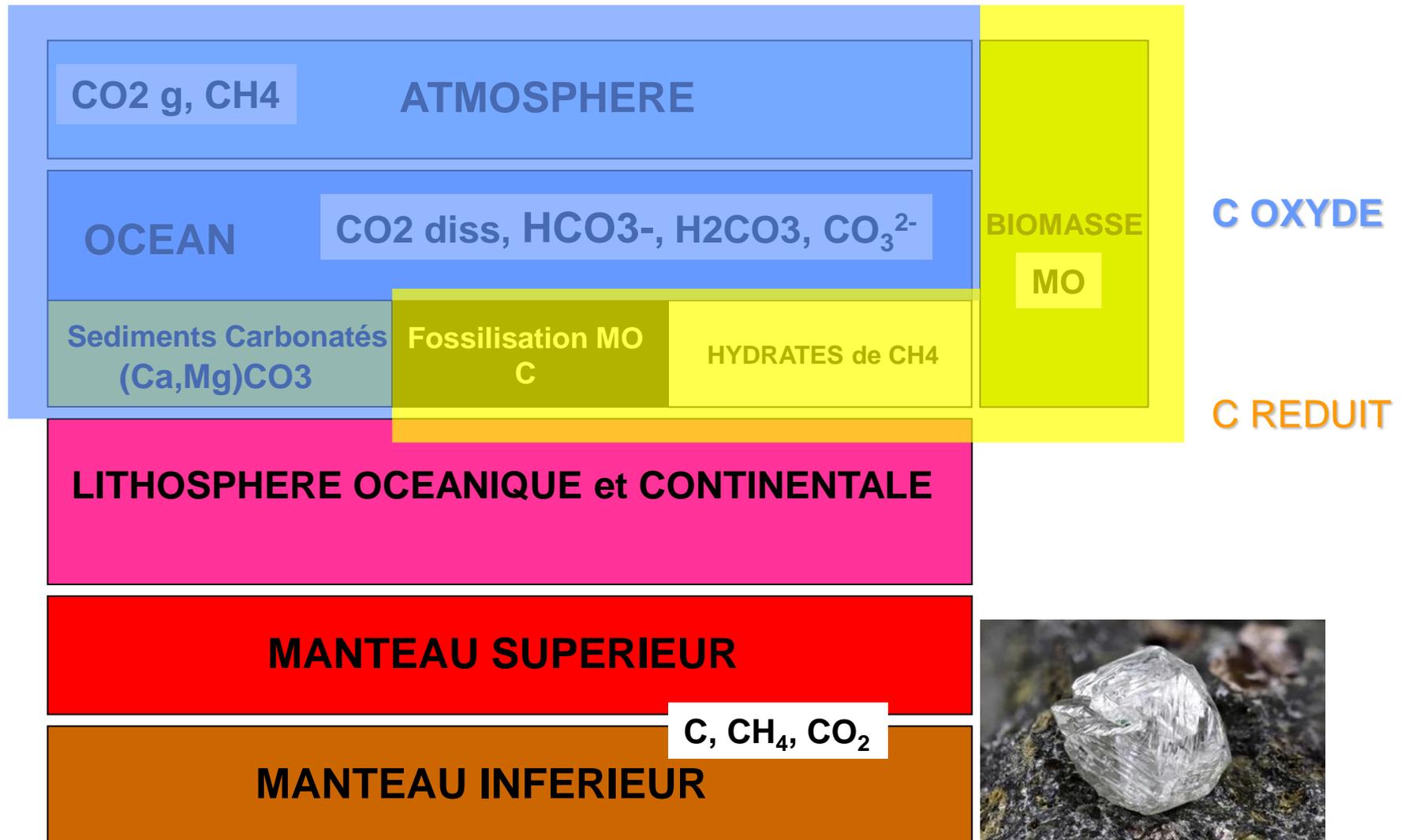
MODES DE TRANSFERT

LES TRANSFERTS IRREVERSIBLES à court terme





2 Les réservoirs impliqués : Formes et spéciation du C



1 – Introduction / Généralités

2 - Les réservoirs et les transferts de carbone

Rappel effet de serre

Les réservoirs impliqués

Echange Océan / Atmosphère ★

Echange Biomasse marine / océan

Echange Sédiments / Océan

Rôle de la biomasse

Echange Lithosphère-Manteau / Atmosphère

3 – Le cycle du Carbone pré-anthropique : état stationnaire – équilibre

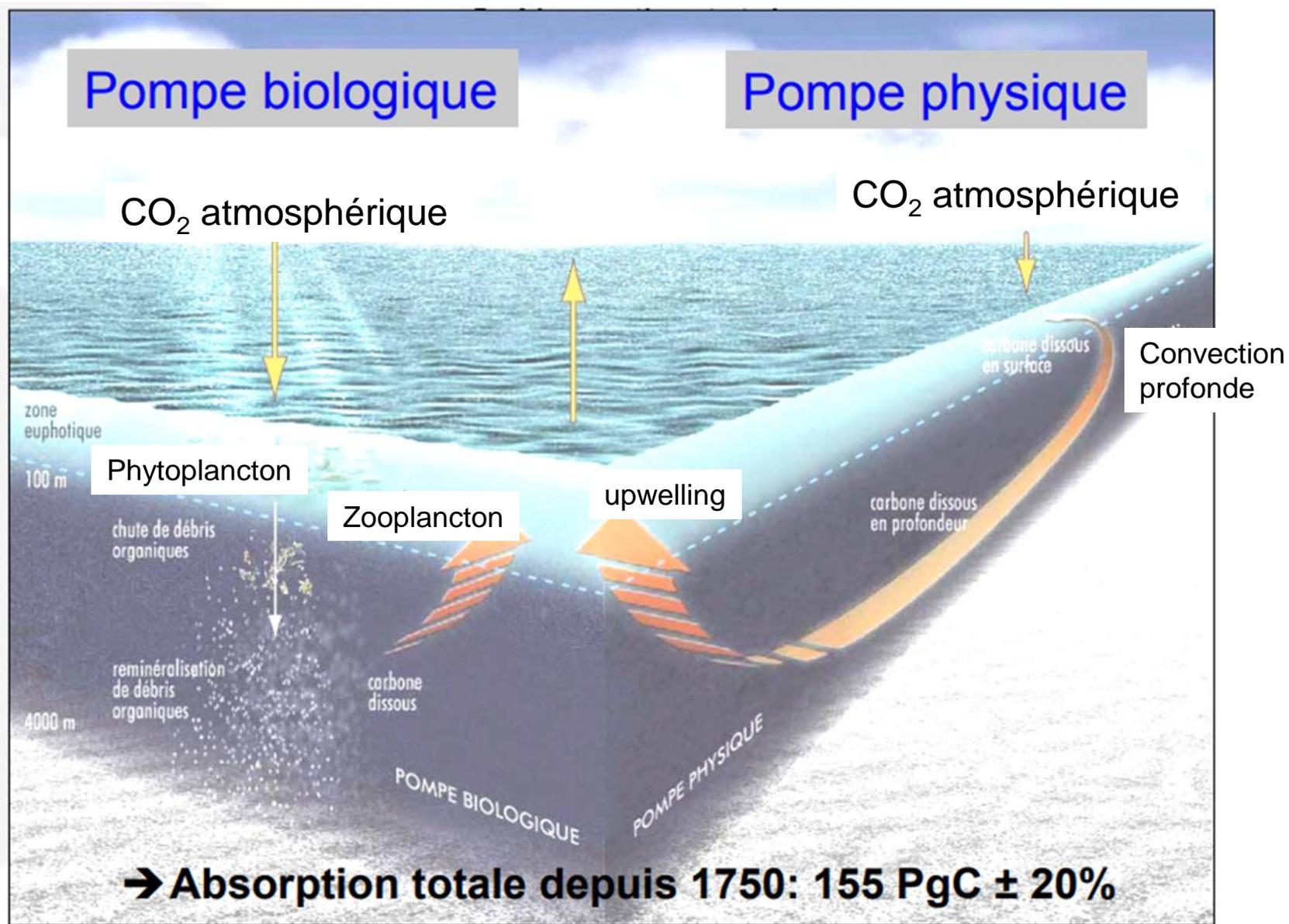
Flux entre réservoirs – Temps de résidence

4 - Le cycle du Carbone pré-anthropique en déséquilibre

Evolution de l'atmosphère en C depuis 4.5 Ga – Long terme

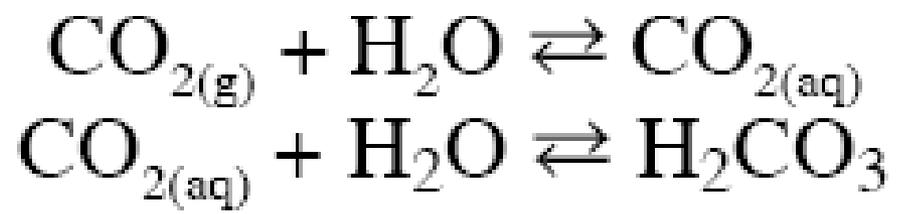
5 – Le cycle du Carbone perturbé par l'activité humaine

Evolution de l'atmosphère depuis 100 ans – Court terme



LA POMPE PHYSIQUE du CO₂

COUPLAGE OCEAN / ATM

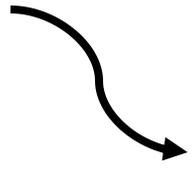


$$[\text{H}_2\text{CO}_3] = \alpha \text{PCO}_2$$

Alpha = solubilité du CO₂ dans l'eau

Dans le cas du CO₂ : alpha décroît avec la T°

SOLUBILITE DU CO₂ ATM AUGMENTE AVEC BAISSSE de la T°



Plus (+) de Carbone dissous dans les eaux polaires que dans les eaux équatoriales

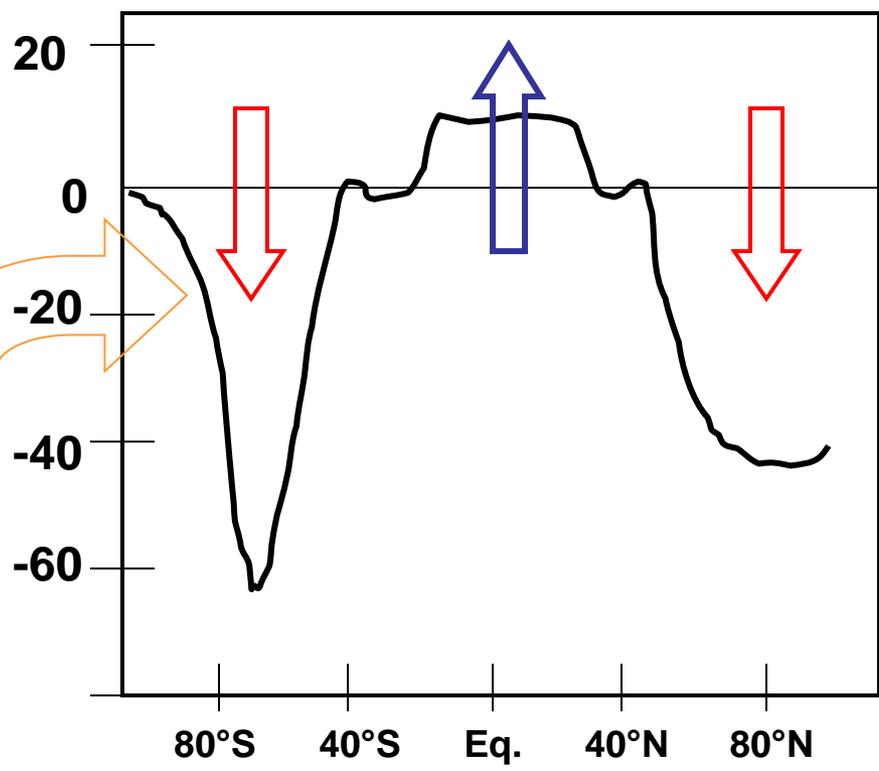
Échange gazeux océan - atmosphère : Équilibre POMPE PHYSIQUE aux Hautes latitudes

ATLANTIQUE

Flux de C (g de C/m²/an)

Upwelling
du NADW

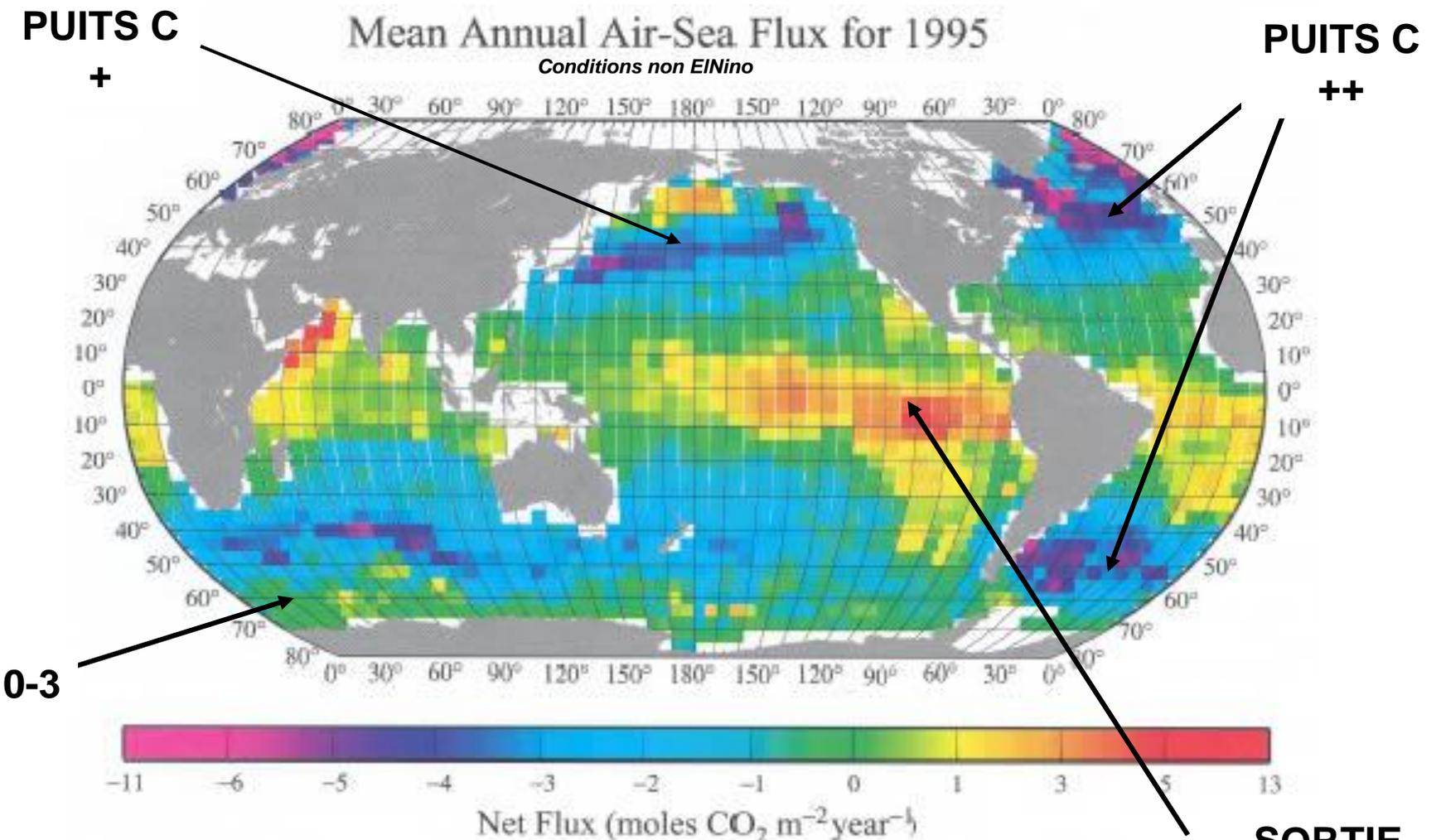
?



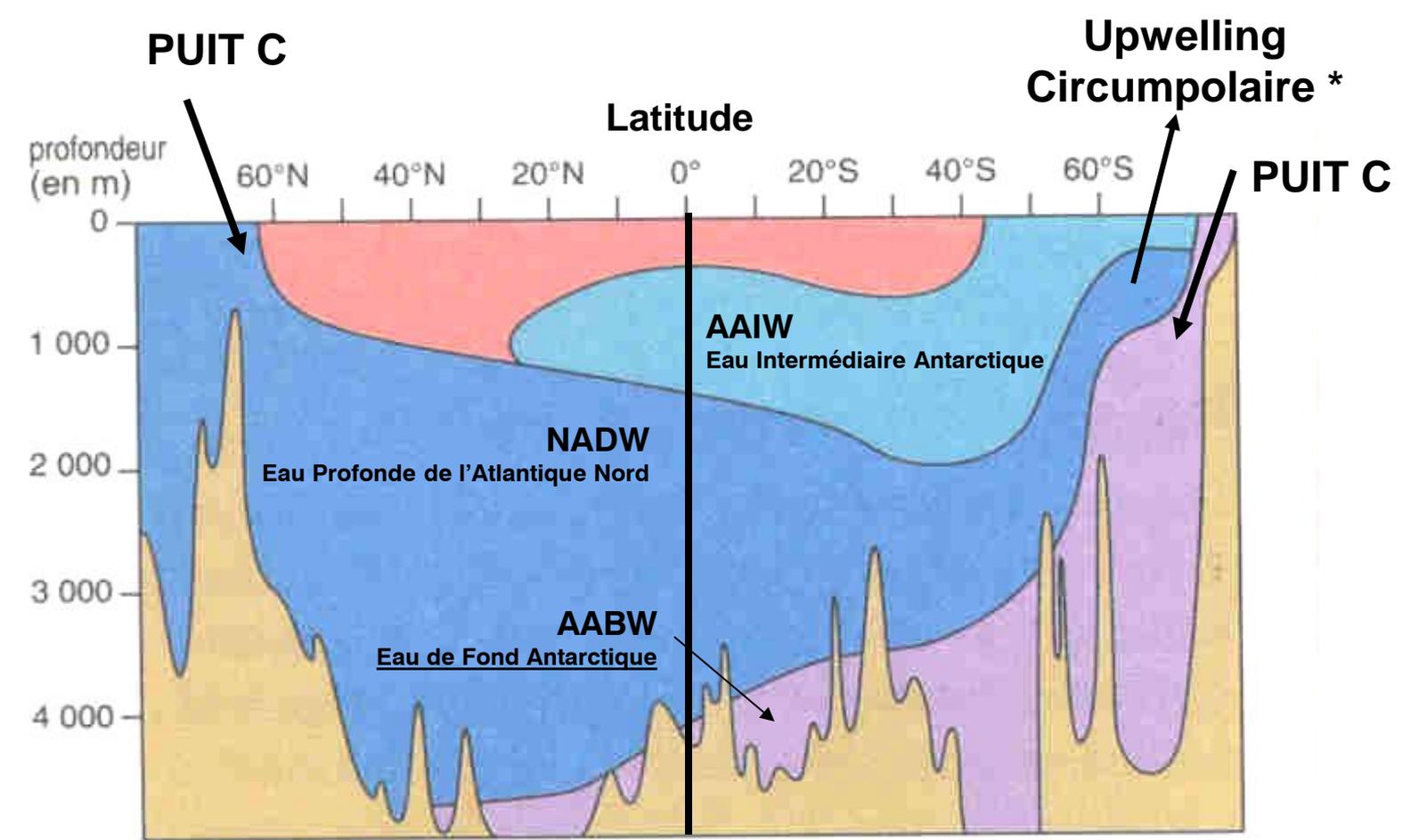
DEGAZAGE

ABSORPTION

PUIT : Passage du CO₂ atm vers Océan : Haute Latitude
RELARGAGE : Passage du CO₂ marin vers Atmosphère : Equateur

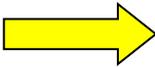


Haute Latitude: FLUX CO₂ = (ATM → OCEAN)
 Basse Latitude: FLUX CO₂ = (OCEAN → ATM)



- eau Antarctique de fond
- eau Nord-Atlantique profonde
- eau Antarctique intermédiaire
- eaux chaudes et salées de surface
- soubassement rocheux

* augmentation de la productivité
car augmentation nutriments

 Mais pourquoi les eaux profondes qui remontent sont-elles plus riches en C ?

 Pompe Biologique + CCD

1 – Introduction / Généralités

2 - Les réservoirs et les transferts de carbone

Rappel effet de serre

Les réservoirs impliqués

Echange Océan / Atmosphère

Echange Biomasse marine / océan ★

Echange Sédiments / Océan

Rôle de la biomasse

Echange Lithosphère-Manteau / Atmosphère

3 – Le cycle du Carbone pré-anthropique : état stationnaire – équilibre

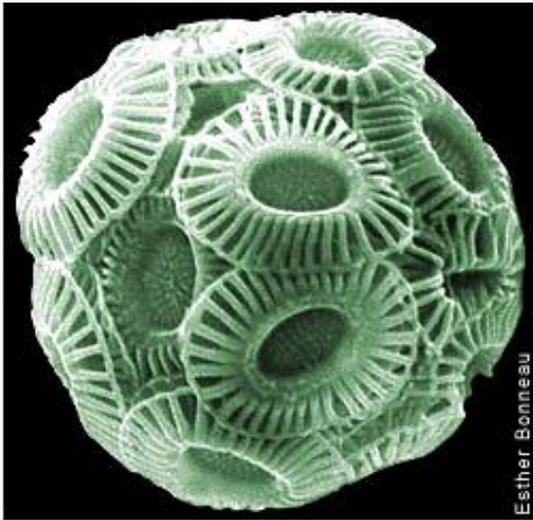
Flux entre réservoirs – Temps de résidence

4 - Le cycle du Carbone pré-anthropique en déséquilibre

Evolution de l'atmosphère en C depuis 4.5 Ga – Long terme

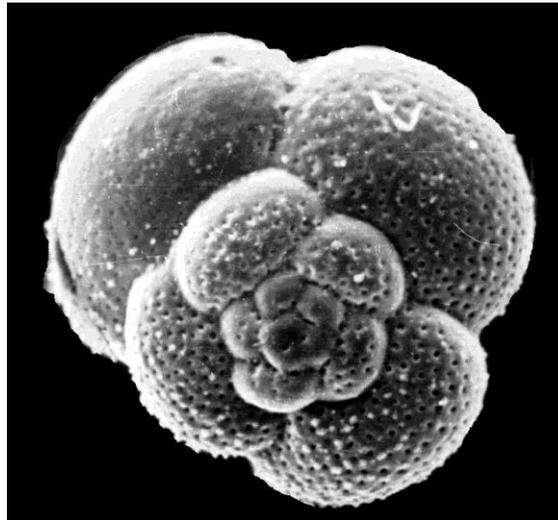
5 – Le cycle du Carbone perturbé par l'activité humaine

Evolution de l'atmosphère depuis 100 ans – Court terme



Esther Bonneau

Le coccolithophore Emiliania huxleyi,
Phytoplancton



Foraminifères (test calcaire)



Phytoplancton



Zooplancton : copépodes

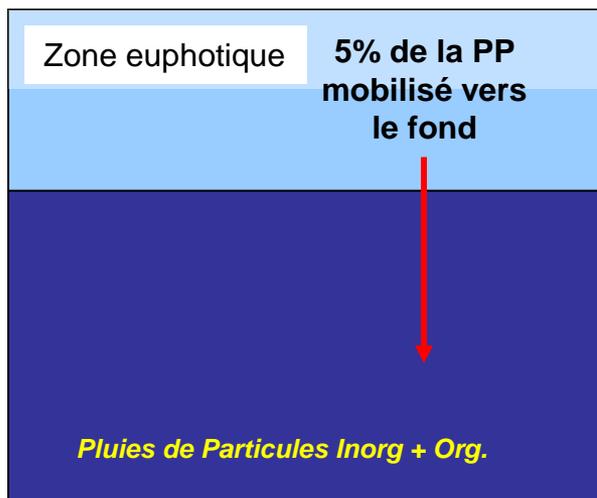
LA POMPE BIOLOGIQUE du CO₂

**COUPLAGE OCEAN /
BIOMASSE**

BIOMASSE OCEANIQUE = PLANCTON

Responsable de la production de **C organique** = **Production PRIMAIRE**
= (photosynthèse dans la zone euphotique)

Responsable de la production du **C inorganique** (CaCO₃ dans les squelettes)



ZONE PRODUCTION PRIMAIRE
Photosynthèse / Respiration

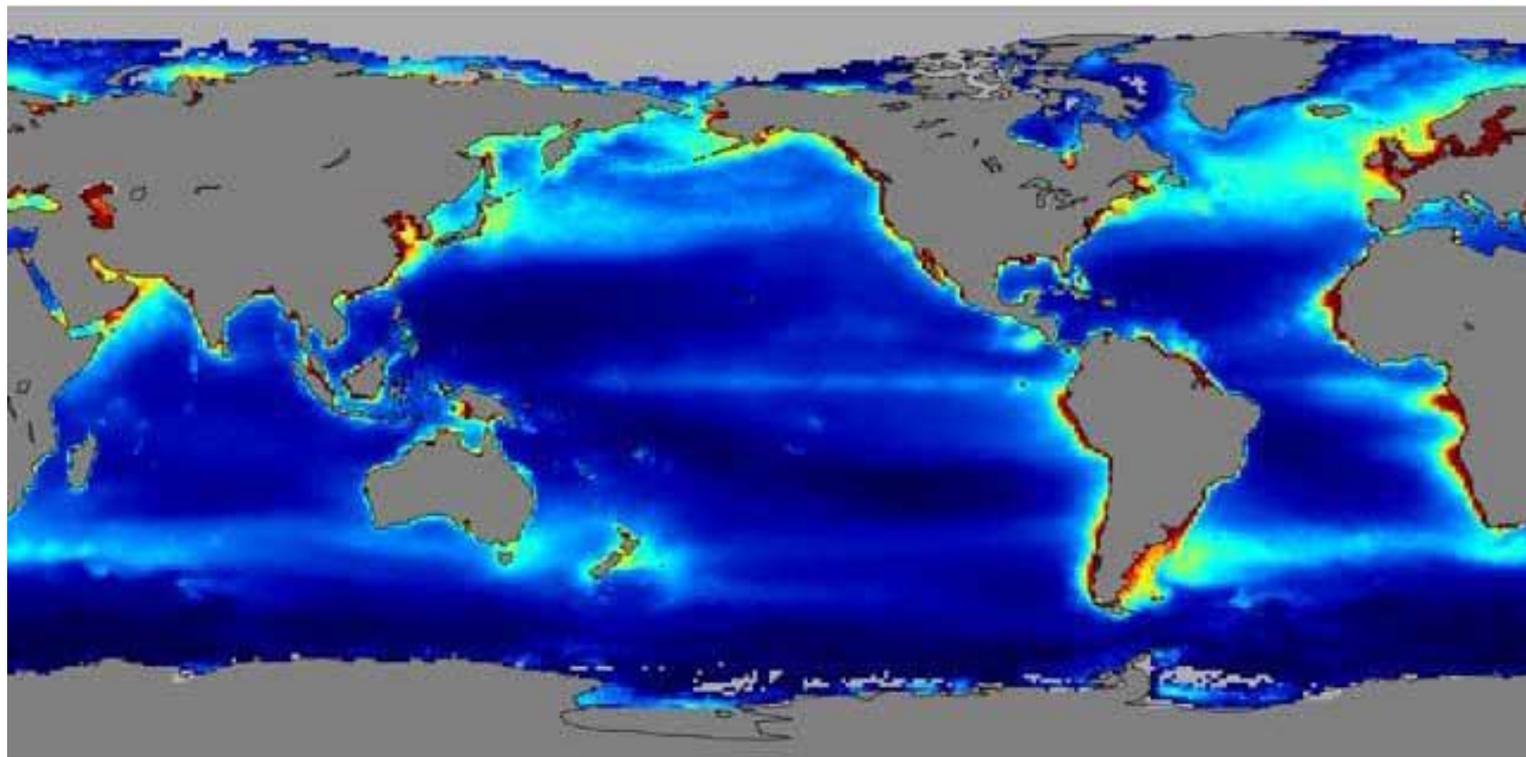
Equilibre
Phytoplancton /
Zooplancton
(Photosynthèse -
Respiration)

ZONE PRODUCTION C INORGANIQUE
Retombée intégrale des squelettes au fond
des océans

ACCUMULATION C Org + C inorg.

PRODUCTIVITE PRIMAIRE NETTE : les 100 premiers mètres

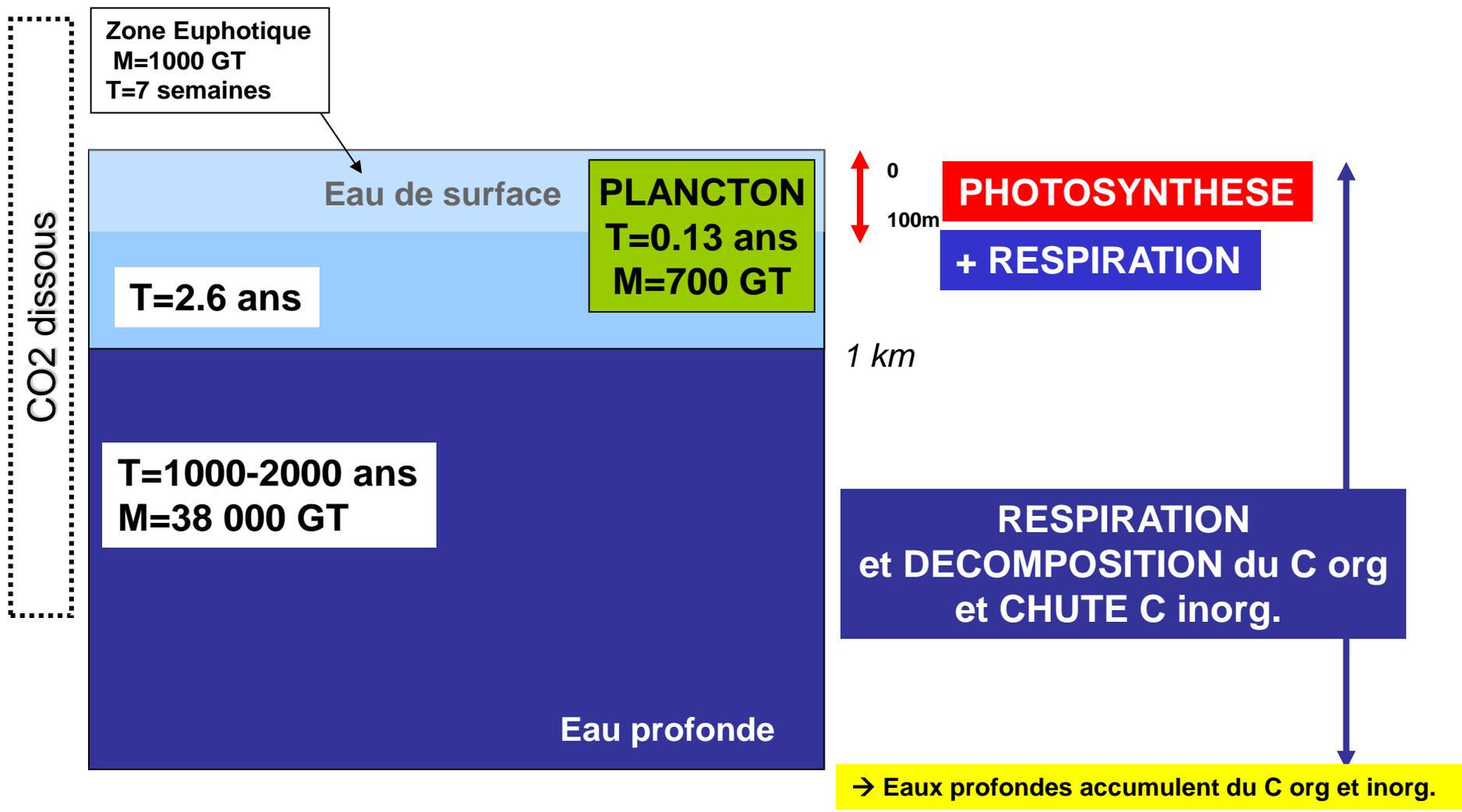
Nette = CO₂ consommé par photosynthèse – CO₂ libéré par respiration



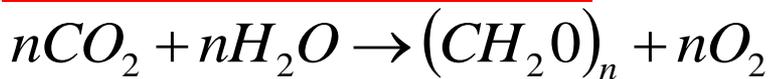
Net Primary Productivity (grams Carbon per m² per year)



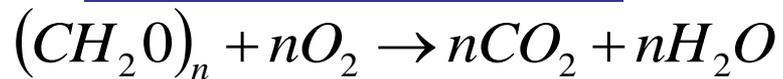
Productivité primaire plus importante dans régions froides et surtout dans région de upwelling



PHOTOSYNTHESE : production MO



RESPIRATION : Dégradation MO



1 – Introduction / Généralités

2 - Les réservoirs et les transferts de carbone

Rappel effet de serre

Les réservoirs impliqués

Echange Océan / Atmosphère

Echange Biomasse marine / océan

Echange Sédiments / Océan ★

Rôle de la biomasse

Echange Lithosphère - Manteau / Atmosphère

3 – Le cycle du Carbone pré-anthropique : état stationnaire – équilibre

Flux entre réservoirs – Temps de résidence

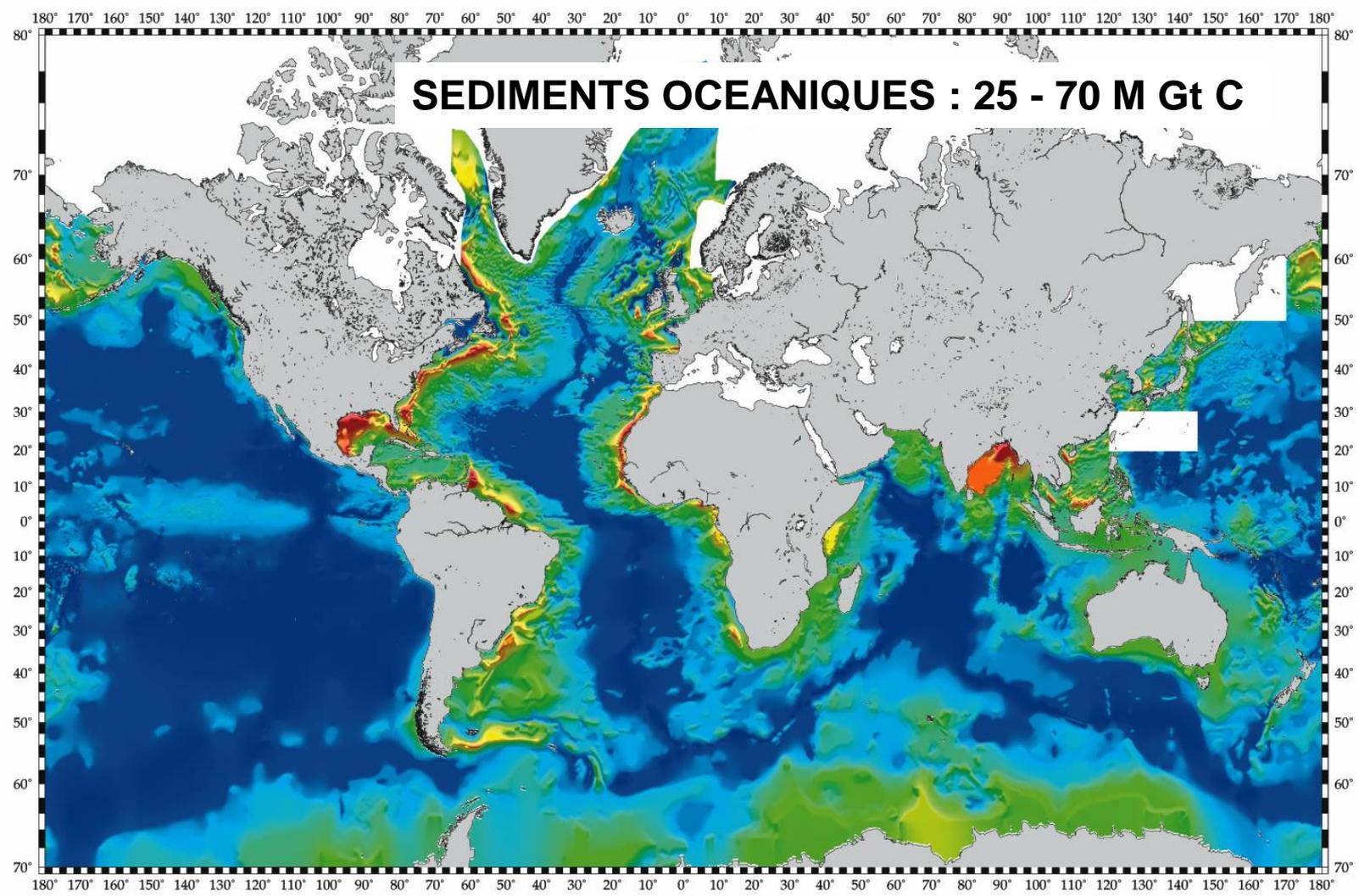
4 - Le cycle du Carbone pré-anthropique en déséquilibre

Evolution de l'atmosphère en C depuis 4.5 Ga – Long terme

5 – Le cycle du Carbone perturbé par l'activité humaine

Evolution de l'atmosphère depuis 100 ans – Court terme

Total Sediment Thickness of the World's Oceans & Marginal Seas



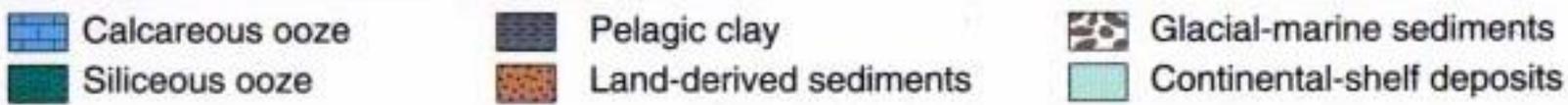
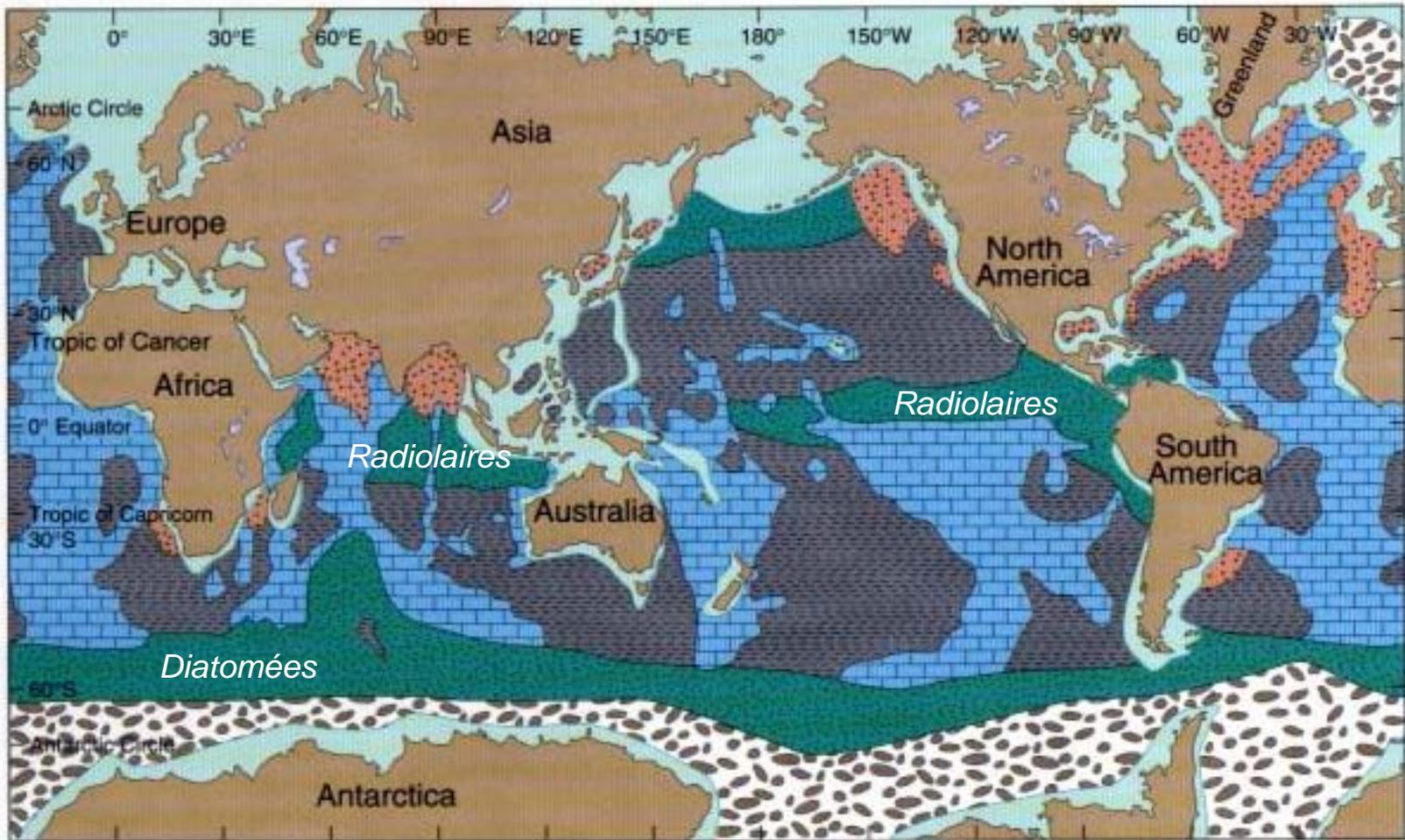
1 - Introduction

2 – Réservoirs et Transferts

3 – Cycle C préanthropique à l'équilibre

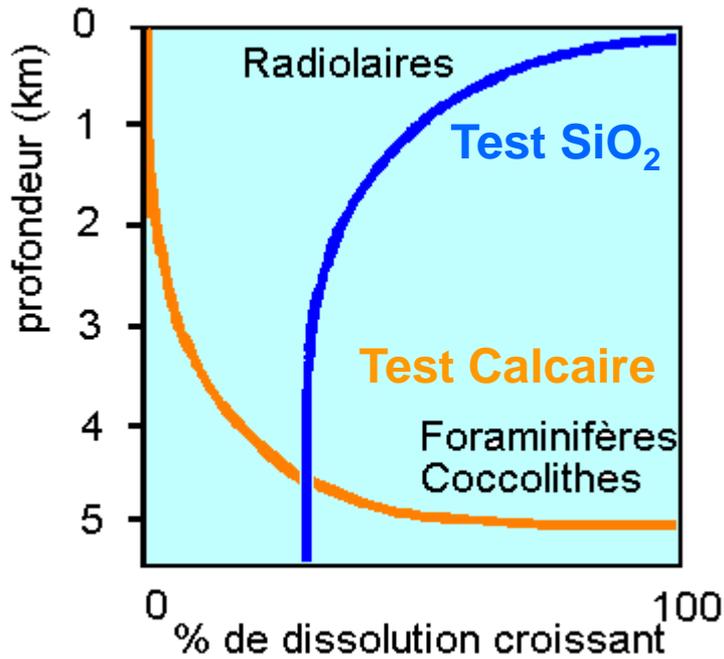
4 – Cycle C préanthropique en déséquilibre

5 – Cycle C perturbé par l'homme

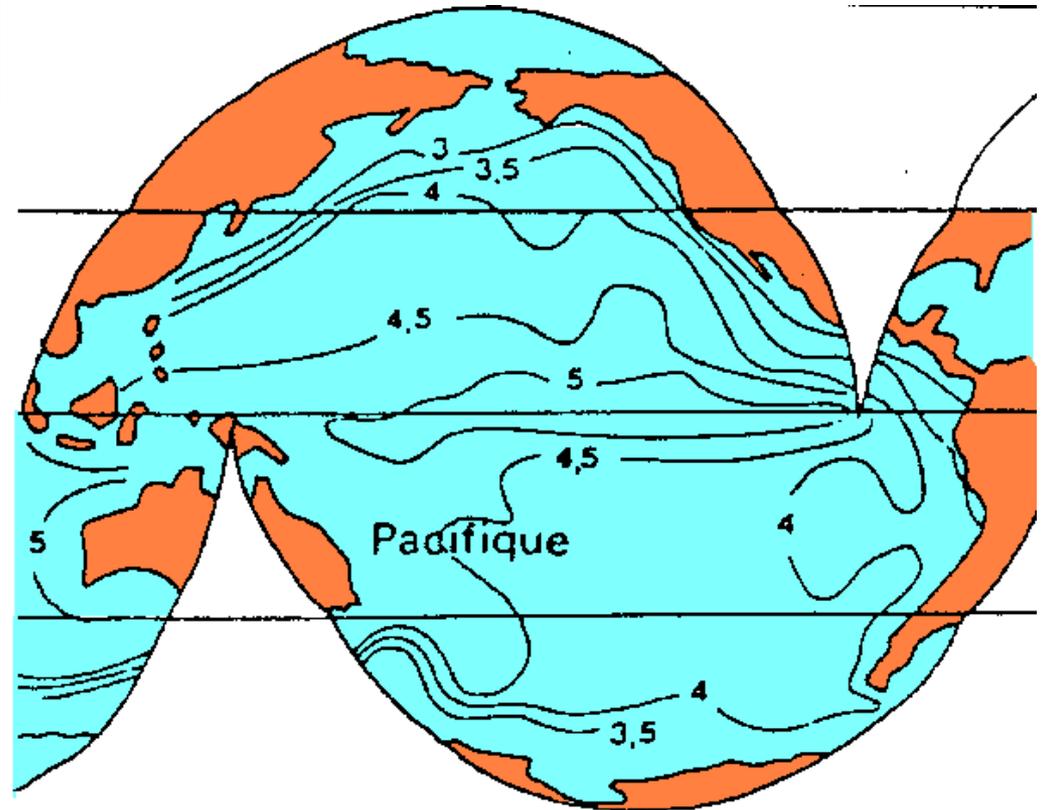




CDD
Compensation Carbonate Depth)



Pourquoi les carbonates se dissolvent ?

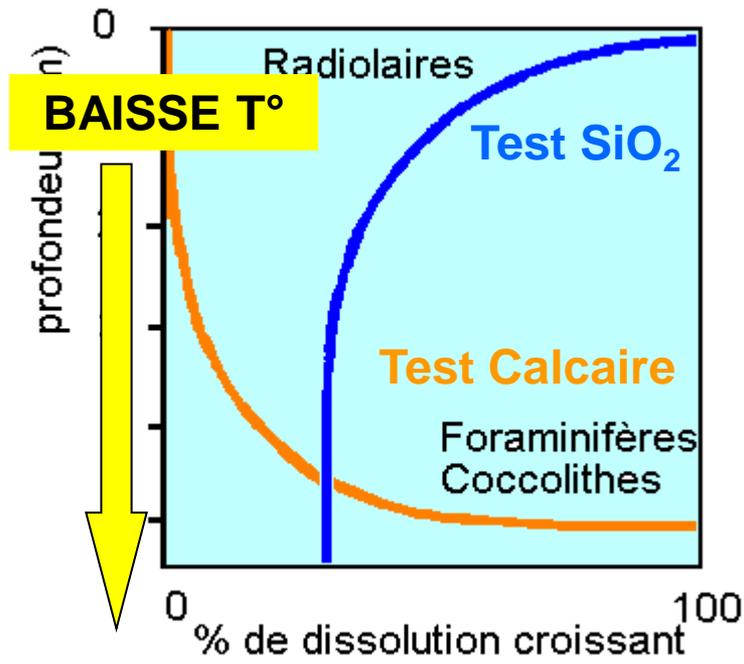


Variation de profondeur de la CCD dans le Pacifique

Atlantique : CDD ~ 5 km



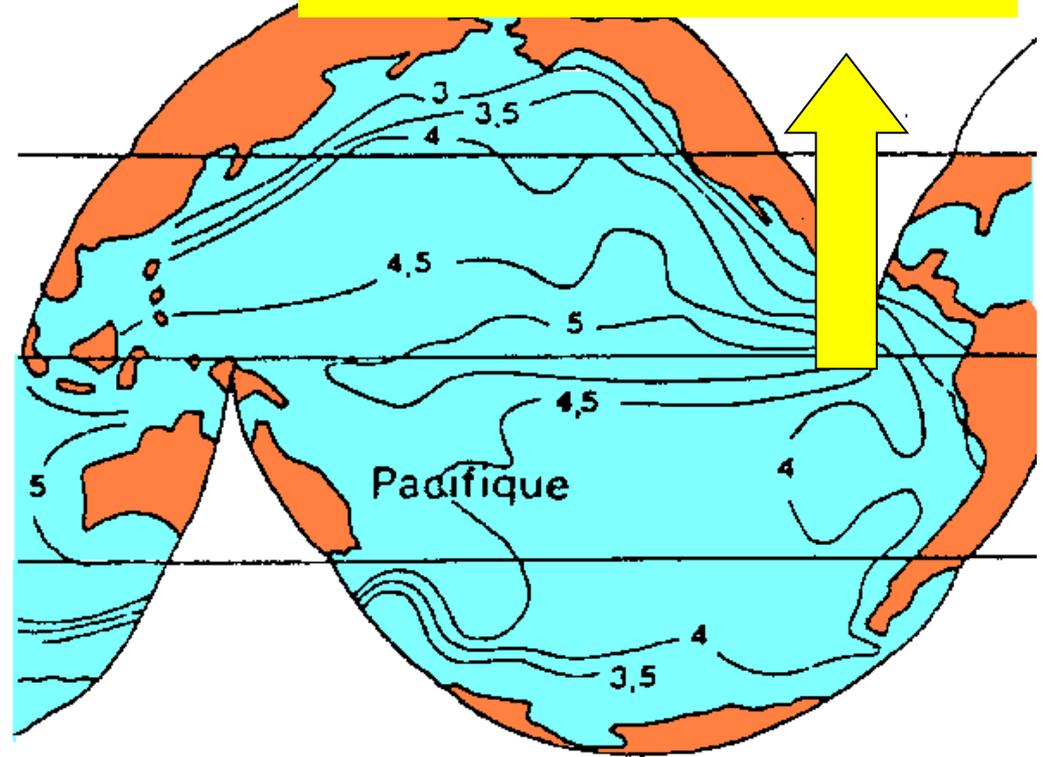
CDD
Compensation Carbonate Depth)



Pourquoi les carbonates se dissolvent ?

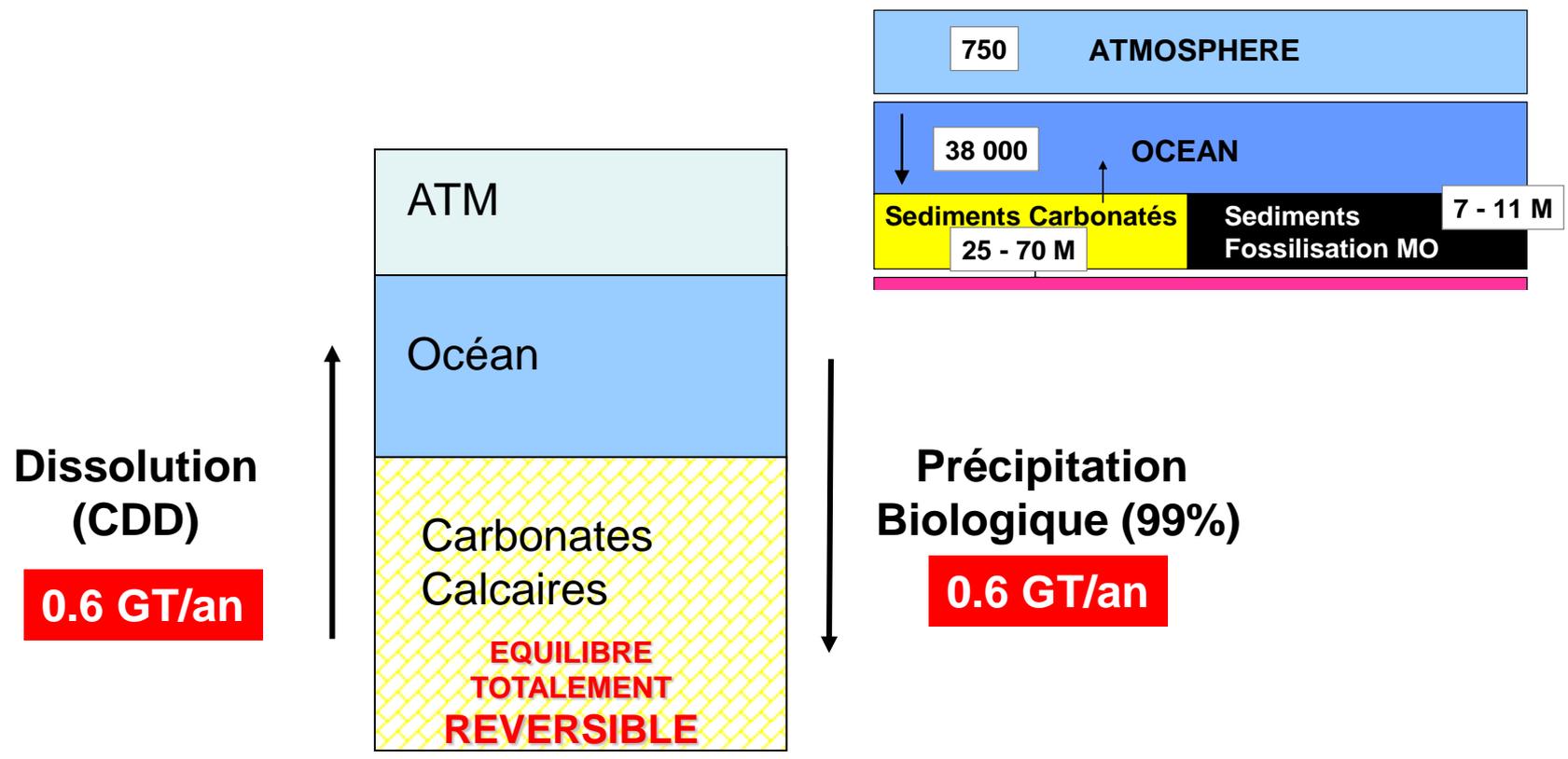
Quand T° eau baisse, la solubilité des carbonates augmente

Eaux des hautes altitudes sont plus froides, donc hausse de la solubilité des carbonates et remontée de la CCD



Variation de profondeur de la CCD dans le Pacifique

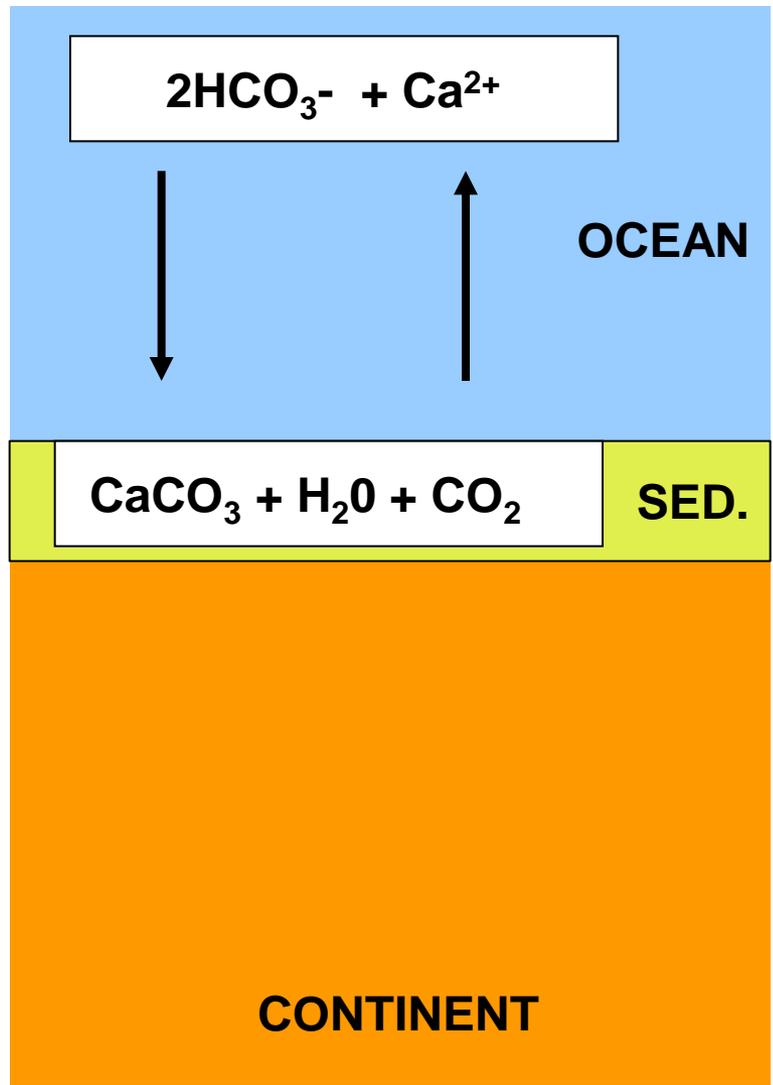
Atlantique : CDD ~ 5 km



Temps de résidence du C dans le calcaire : $50/0.6 = 83$ Ma

En 83 millions d'années tout le calcaire du monde est statistiquement recyclé

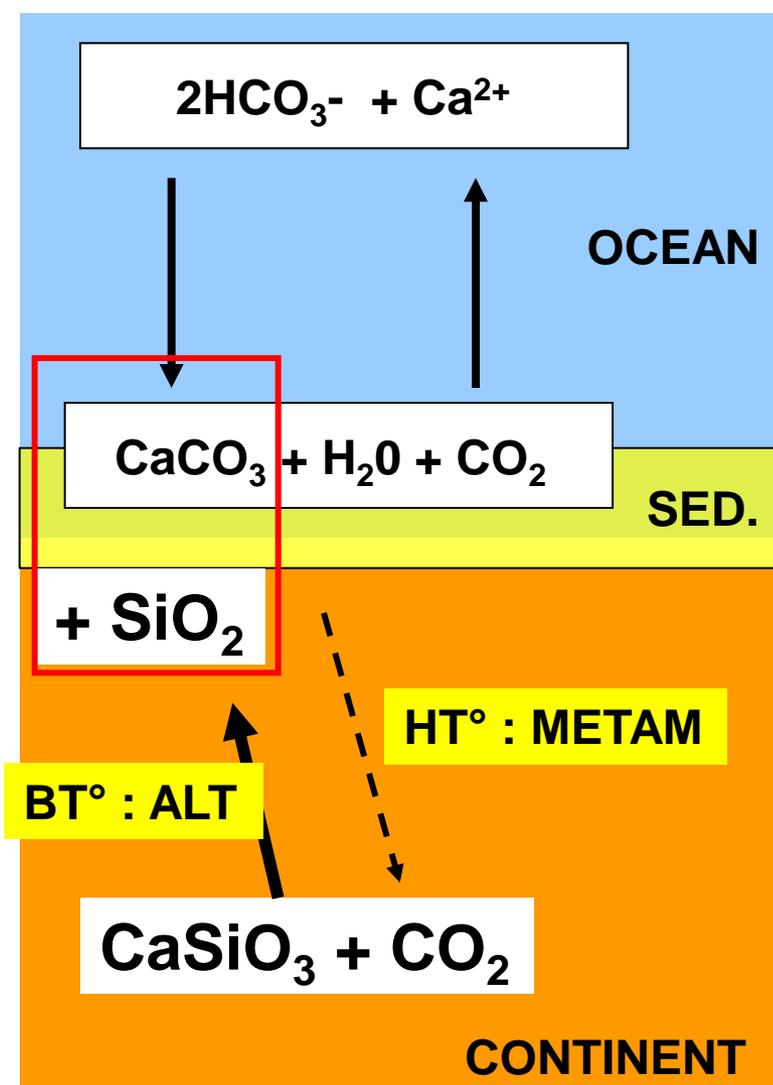
Au rythme actuel le calcaire aurait déjà été recyclé au moins $4500/83 = 54$ fois



**EQUILIBRE TOTALEMENT
REVERSIBLE**

DEPEND de T°, pH, Vie, CDD

CONSTANT à long TERME



EQUILIBRE TOTALEMENT
REVERSIBLE

DEPEND de T°, pH, Vie, CDD

CONSTANT à long TERME

Altération des silicates de Ca

EQUILIBRE TOTALEMENT
IRREVERSIBLE à BT°

Consommation irréversible de CO_2

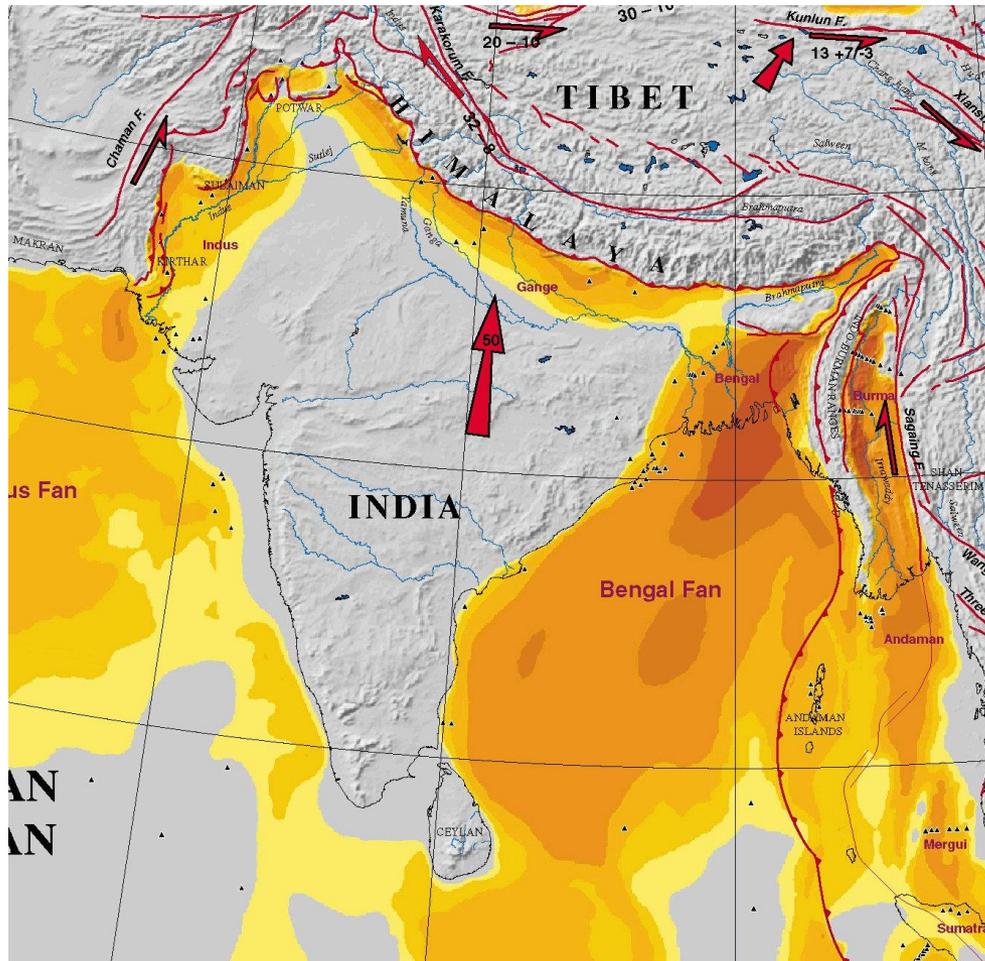
1 - Introduction

2 – Réservoirs et Transferts

3 – Cycle C préanthropique à l'équilibre

4 – Cycle C préanthropique en déséquilibre

5 – Cycle C perturbé par l'homme



Hausse de l'Erosion chimique des silicates : augmentation de l'influx sédimentaire aux océans

Altération Cont. = absorption de CO₂ à long terme

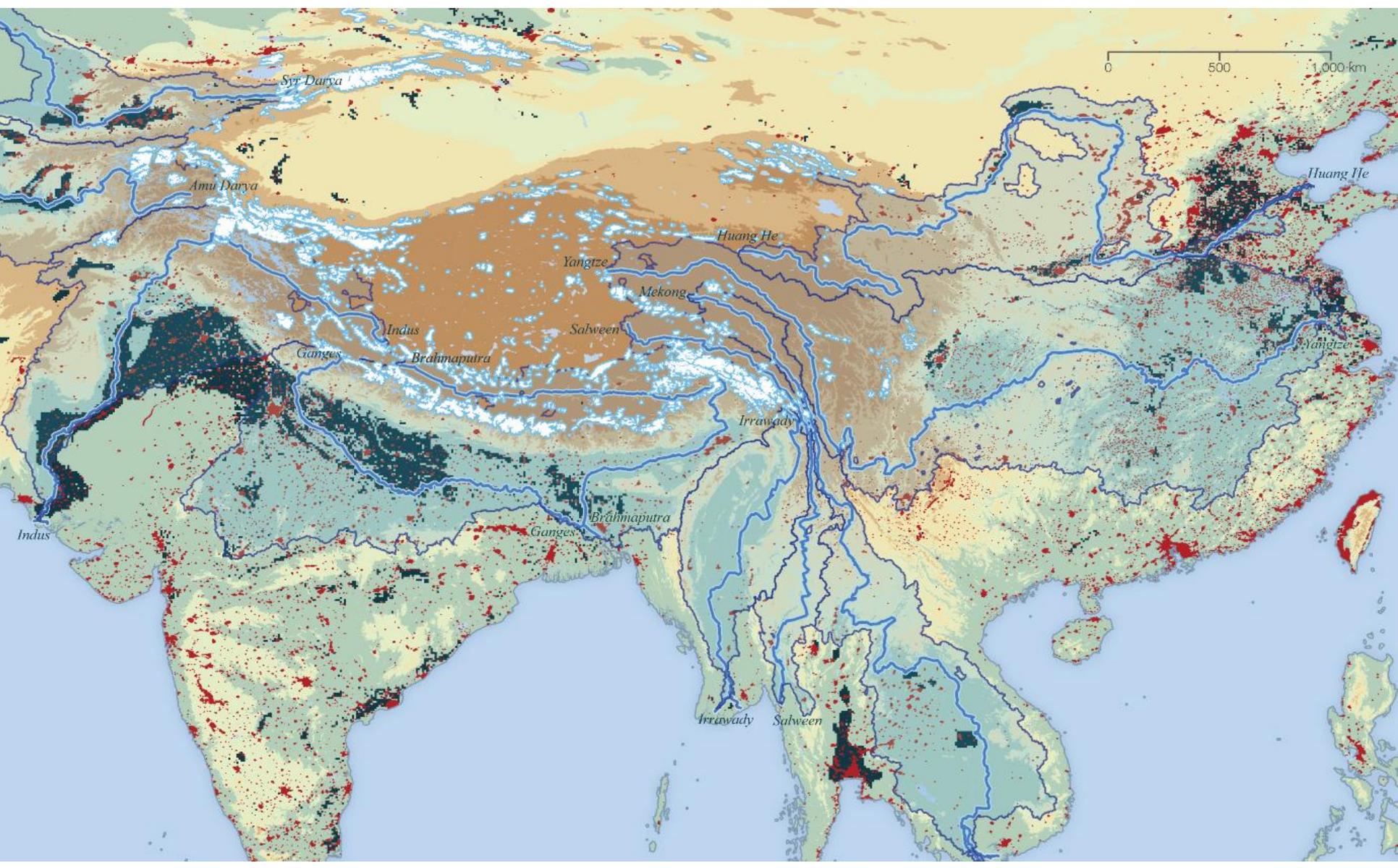
1 - Introduction

2 – Réservoirs et Transferts

3 – Cycle C préanthropique à l'équilibre

4 – Cycle C préanthropique en déséquilibre

5 – Cycle C perturbé par l'homme



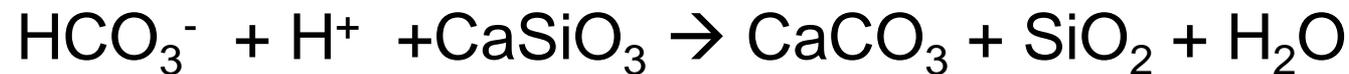
-DELTA DU GANGE au BANGLADESH

-image radar ENVISAT 2009 –

-Couleurs non réalistes



Altération des silicates contenant du Ca par les eaux acides, transport des ions vers les océans et précipitation de carbonates :



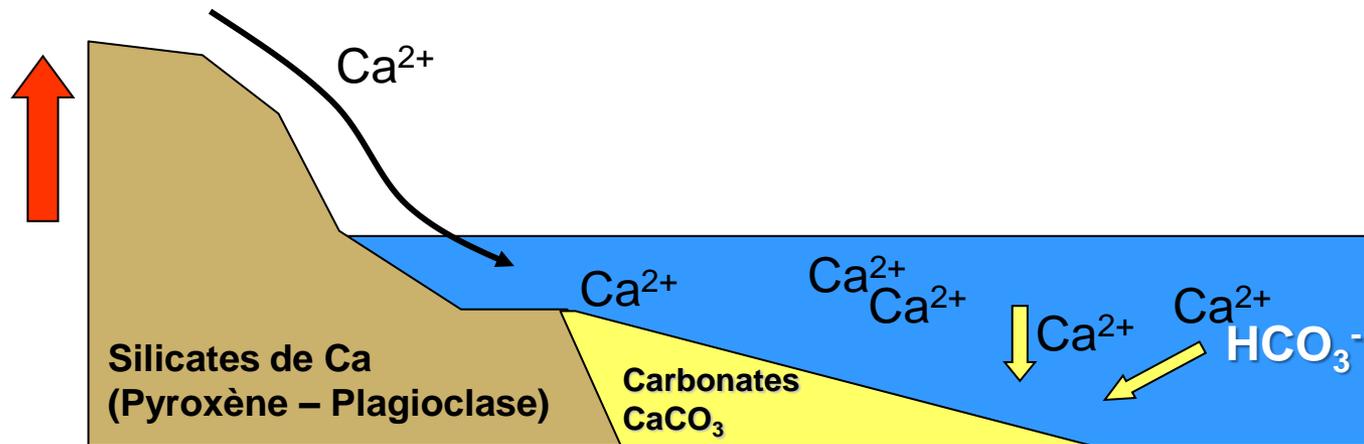
Réaction irréversible dans les conditions de surface
Masse de CO_2 absorbée l'est définitivement

1 mole de silicate calcique (116 g) consomme 1 mole de CO_2 atm (44 g)
1 kg de silicate calcique consomme donc 0.380 kg de CO_2 atm

ALTERATION CHIMIQUE des continents (roches endogènes ou roches volcaniques)



Consommation irréversible de CO₂ atmosphérique



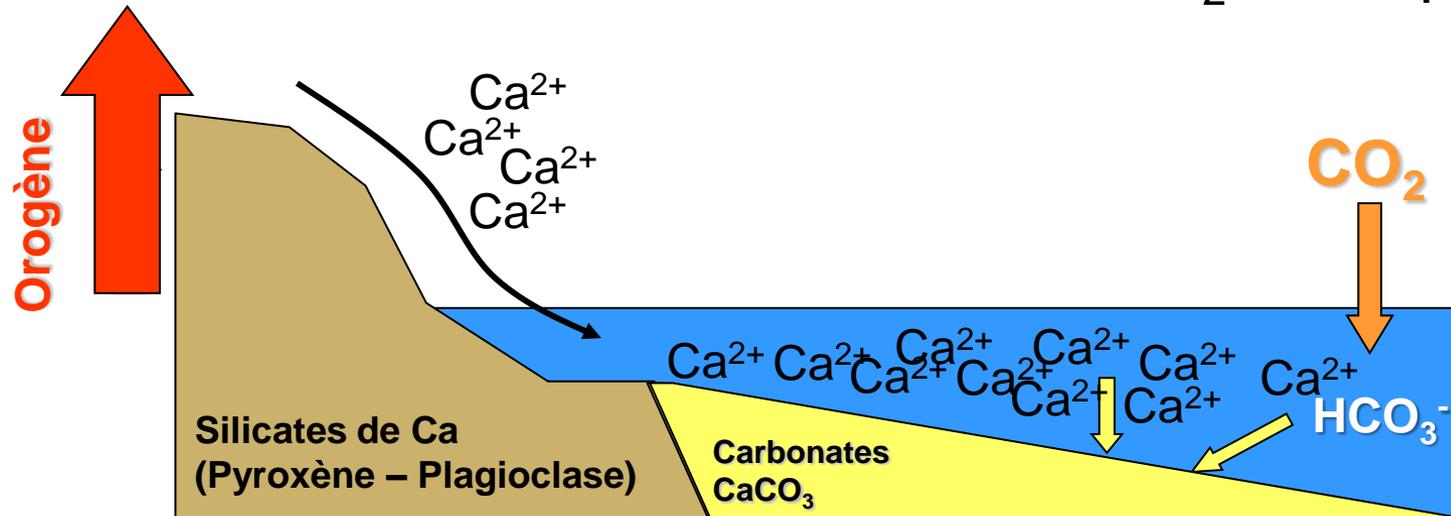
En Bilan :



Réaction irréversible dans les conditions de surface
Masse de CO₂ absorbée l'est définitivement

ALTERATION CHIMIQUE des continents (roches endogènes ou roches volcaniques)

Consommation irréversible de CO_2 atmosphérique



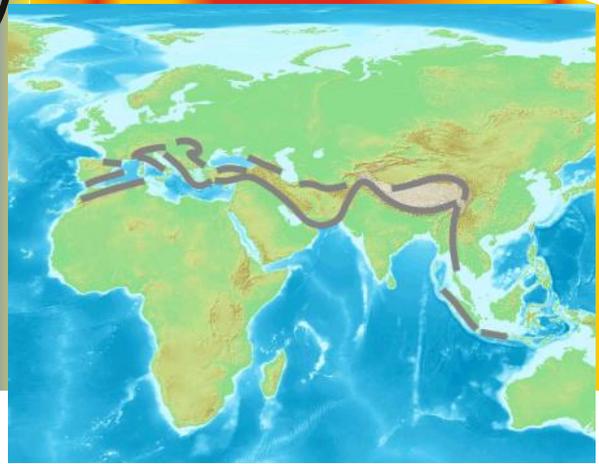
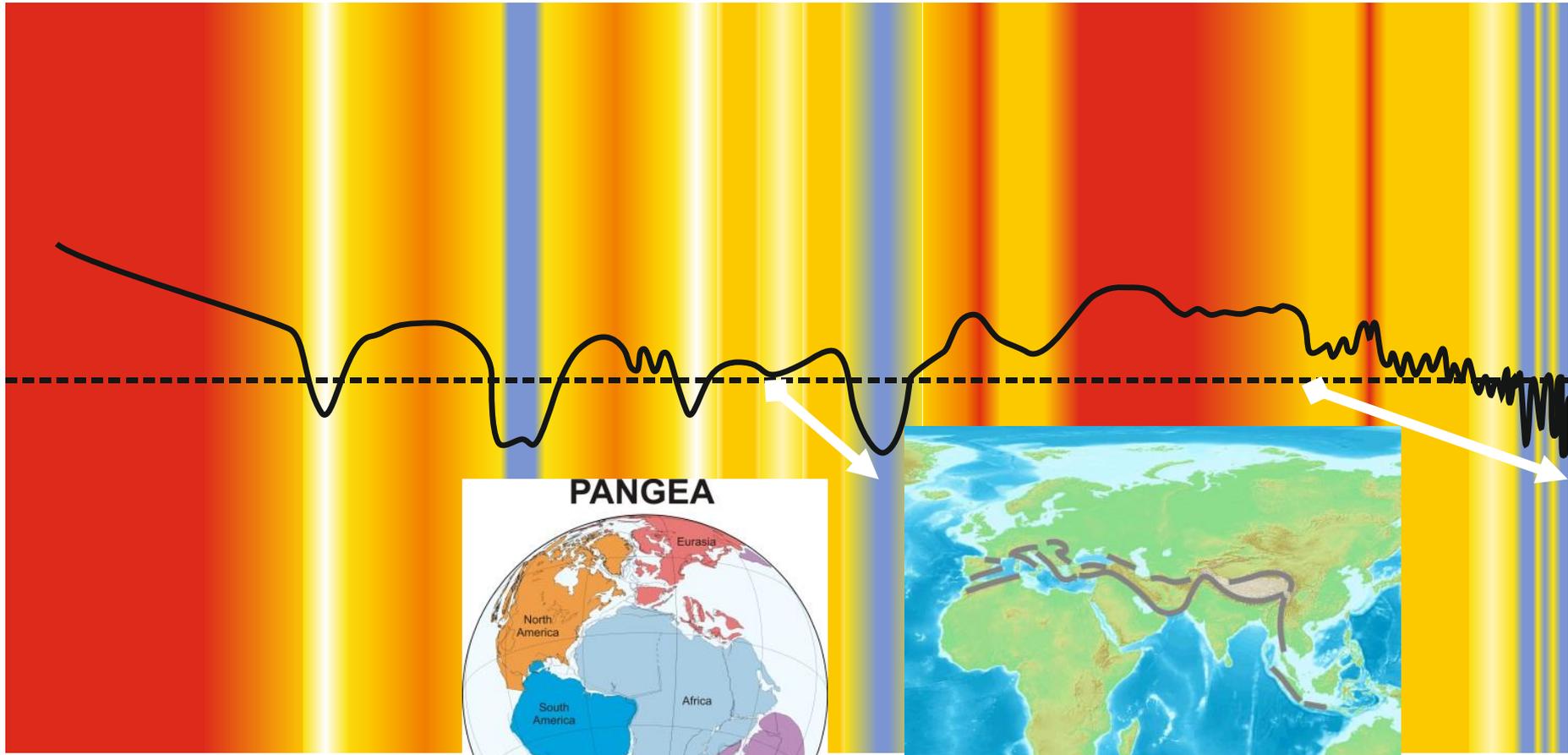
En Bilan :



Réaction irréversible dans les conditions de surface
Masse de CO_2 absorbée l'est définitivement

- 1 - Introduction
- 2 – Réservoirs et Transferts
- 3 – Cycle C préanthropique à l'équilibre
- 4 – Cycle C préanthropique en déséquilibre
- 5 – Cycle C perturbé par l'homme

4 600 Ma	2 500 Ma	570 Ma	245 Ma	65 Ma	2 Ma
ARCHEEN	PROTEROZOIQUE	PALEOZOIQUE <small>Primaire</small>	MESOZOIQUE <small>Secondaire</small>	CENOZOIQUE <small>Tertiaire</small>	IV



Petit calcul simple

Himalaya : formation depuis 20 Ma (2000 x 100 x 10 km)

Volume de roches érodées : 2 M Km³ = 2 x 10¹⁵ m³

Densité ~ 3000 kg/m³

Masse altérée = 6 x 10¹⁸ kg

2% de silicates calciques = 6 x 10¹⁸ kg x 0.02 = 1.2 x 10¹⁷ kg

En 20 Ma : 1.2 x 10¹⁷ kg de silicates calciques altérés

En 20 Ma : 50 000 GT de CO₂ absorbé

Rappel quantité CO₂ atmosphérique = 2 750 GT

Rappel quantité CO₂ océanique = 140 000 GT

**Formation de l'Himalaya (au maximum):
consommation de 18 x le CO₂ atm actuel ou
de 35% du CO₂ océanique**

1 – Introduction / Généralités

2 - Les réservoirs et les transferts de carbone

Rappel effet de serre

Les réservoirs impliqués

Echange Océan / Atmosphère

Echange Biomasse marine / océan

Echange Sédiments / Océan

Rôle de la biomasse ★

Echange Lithosphère-Manteau / Atmosphère

3 – Le cycle du Carbone pré-anthropique : état stationnaire – équilibre

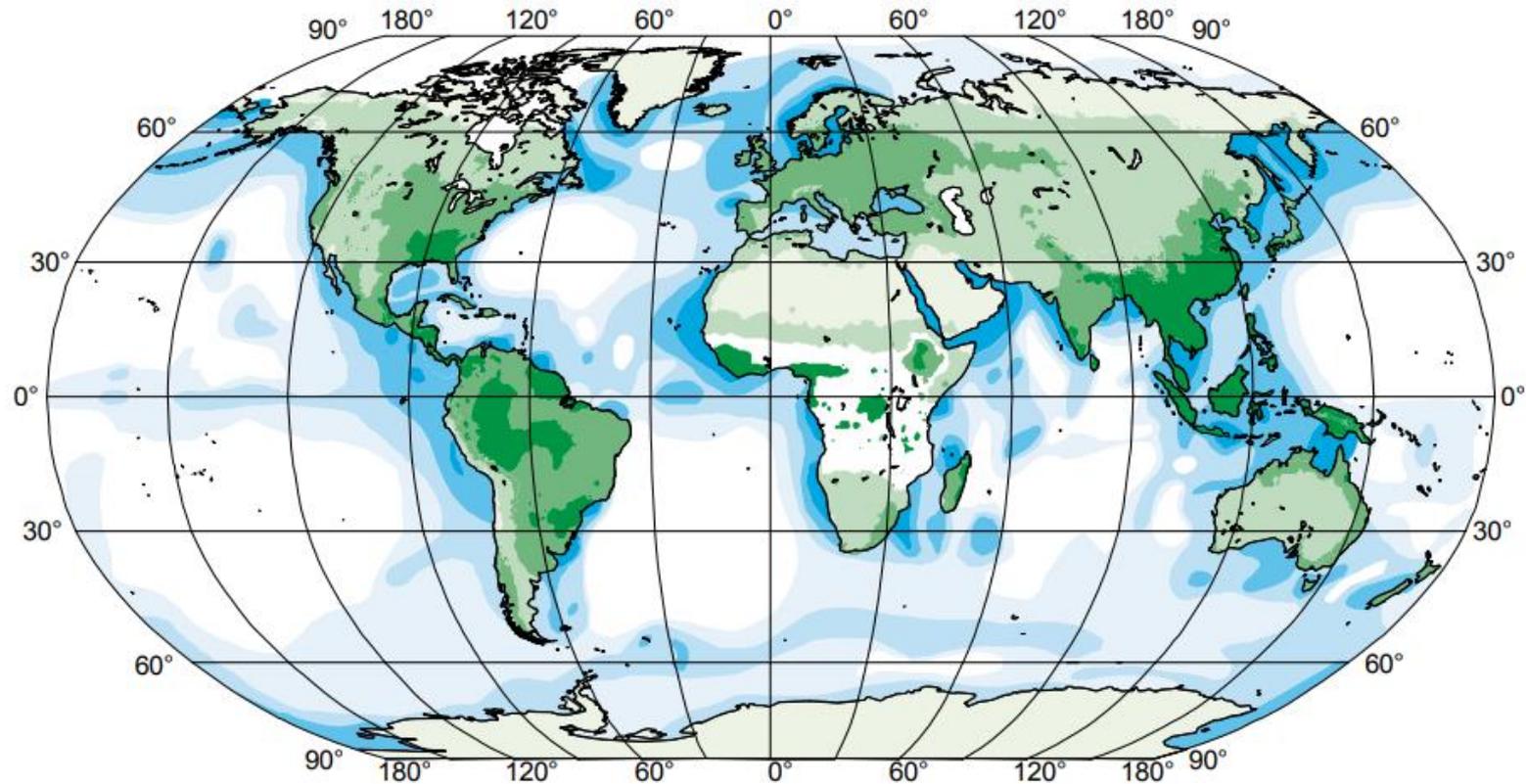
Flux entre réservoirs – Temps de résidence

4 - Le cycle du Carbone pré-anthropique en déséquilibre

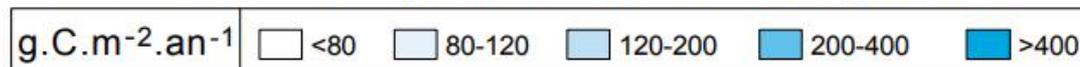
Evolution de l'atmosphère en C depuis 4.5 Ga – Long terme

5 – Le cycle du Carbone perturbé par l'activité humaine

Evolution de l'atmosphère depuis 100 ans – Court terme



Productivité primaire de l'océan global



Productivité primaire sur les terres émergées

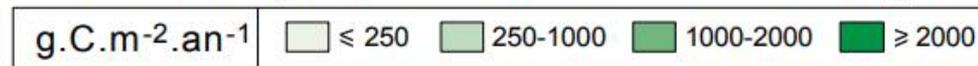


Fig. 3 – Carte de répartition de la productivité primaire dans l'océan et sur les terres émergées (en $\text{g.C.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$)



Temps de résidence
 $38\ 750/110 = 361 \text{ ans}$

En 361 ans, le cycle photosynthétique /respiration a statistiquement recyclé tout le CO₂ Atm+Océan

1 – Introduction / Généralités

2 - Les réservoirs et les transferts de carbone

Rappel effet de serre

Les réservoirs impliqués

Echange Océan / Atmosphère

Echange Biomasse marine / océan

Echange Sédiments / Océan

Rôle de la biomasse

Echange Lithosphère-Manteau / Atmosphère ★

3 – Le cycle du Carbone pré-anthropique : état stationnaire – équilibre

Flux entre réservoirs – Temps de résidence

4 - Le cycle du Carbone pré-anthropique en déséquilibre

Evolution de l'atmosphère en C depuis 4.5 Ga – Long terme

5 – Le cycle du Carbone perturbé par l'activité humaine

Evolution de l'atmosphère depuis 100 ans – Court terme

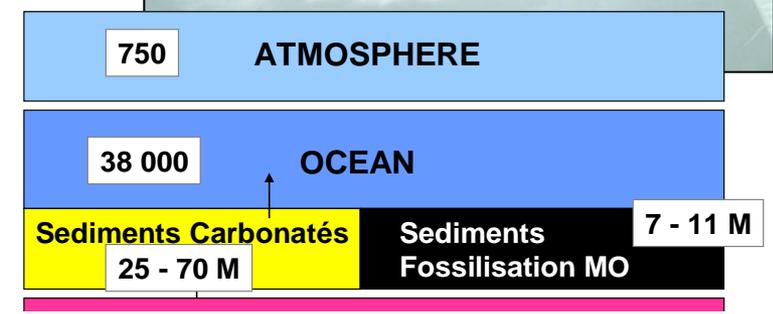
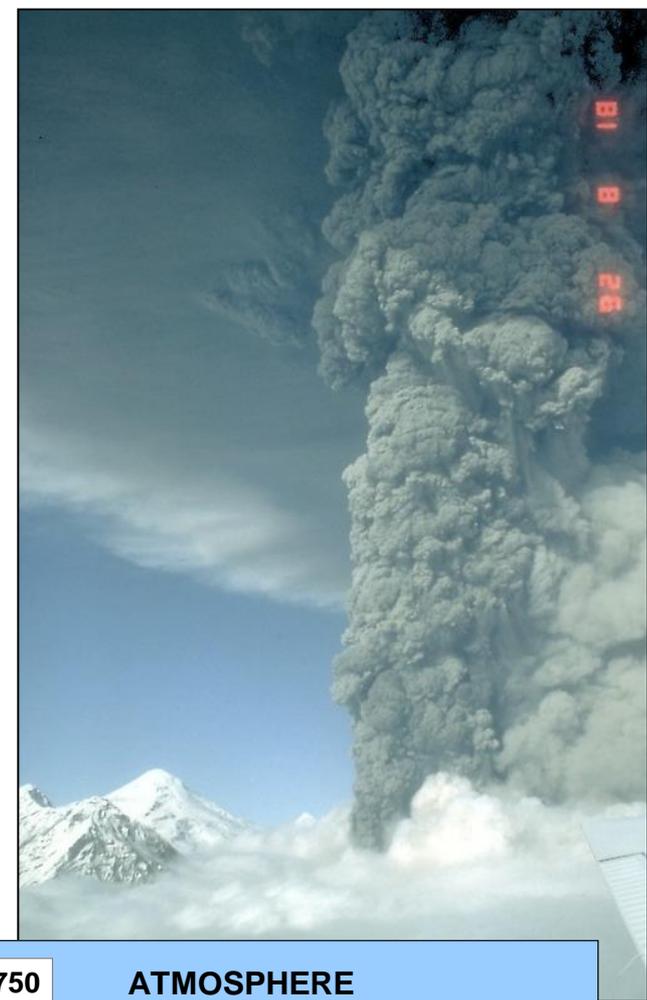
Rejet C par le volcanisme : 0.1 GT /an

C atm : 700 GT : 7 000 ans suffisent pour libérer tout le CO₂ atm via volcanisme

C Océans : 38 000 GT : 380 000 ans suffisent au volcanisme pour libérer tout le CO₂ océanique

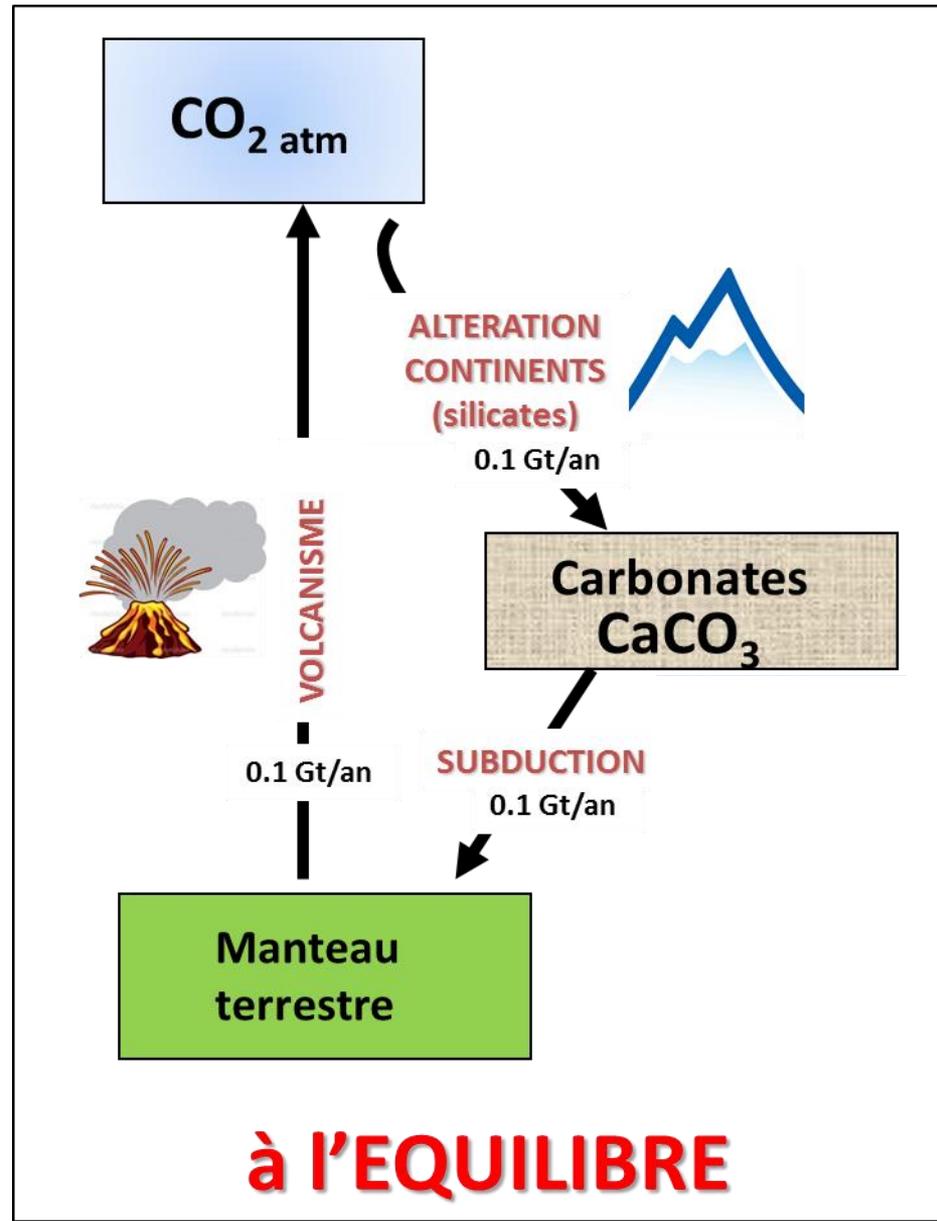
C Calcaires : 50 M GT : 500 Ma pour fabriquer tout le calcaire du monde

Il faut donc un processus d'équilibre pour recycler le CO₂ volcanique à long – moyen terme (*loin d'être négligeable comme dans les manuels scolaires*)



Transferts irréversibles → altération silicates, volcanisme...et ?

CYCLE LONG TERME DU C



à l'EQUILIBRE

Proposition des **ordres de grandeurs**

*Détails : voir un autre cours, ou d'autres sources....
(attention aux sources !!!)*



44g

ATMOSPHERE

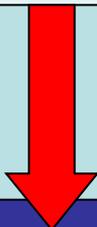
M= 750

T = 50 - 200

Relâchement
F=100



Dissolution
F=100



OCEAN

M = 38 000

T = 1000 - 2000

1.6%



98.4%

CYCLE PRE-ANTHROPIQUE SIMPLIFIE DU CARBONE

M = Masse en GT de C ou O
F=Flux annuel en GT/an
T=temps de résidence en années
Flèche grise: négligeable

44g

ATMOSPHERE

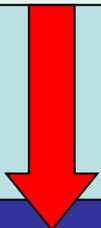
M= 750

T = 50 - 200

Relâchement
F=100



Dissolution
F=100



OCEAN

M = 38 000

T = 1000 - 2000

Précipitation
F = 0.6



Dissolution
F = 0.6



CALCAIRES et DOLOMIES

M = 50 Millions

T= 140 Millions

CYCLE PRE-ANTHROPIQUE SIMPLIFIE DU CARBONE

M = Masse en GT de C ou O

F=Flux annuel en GT/an

T=temps de résidence en années

Flèche grise: négligeable

44g

ATMOSPHERE

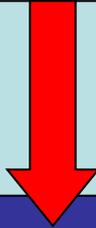
M= 750

T = 50 - 200

Relâchement
F=100



Dissolution
F=100



OCEAN

M = 38 000

T = 1000 - 2000

1.6%

98.4%

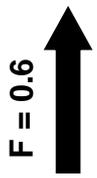
Altération
silicates
F = 0.1



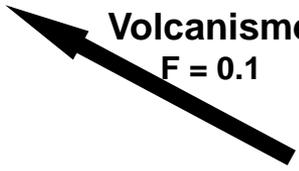
Précipitation
F = 0.6



Dissolution
F = 0.6



Volcanisme
F = 0.1



CALCAIRES et DOLOMIES

M = 50 Millions

T = 140 Millions

SUBDUCTION
F=0.1



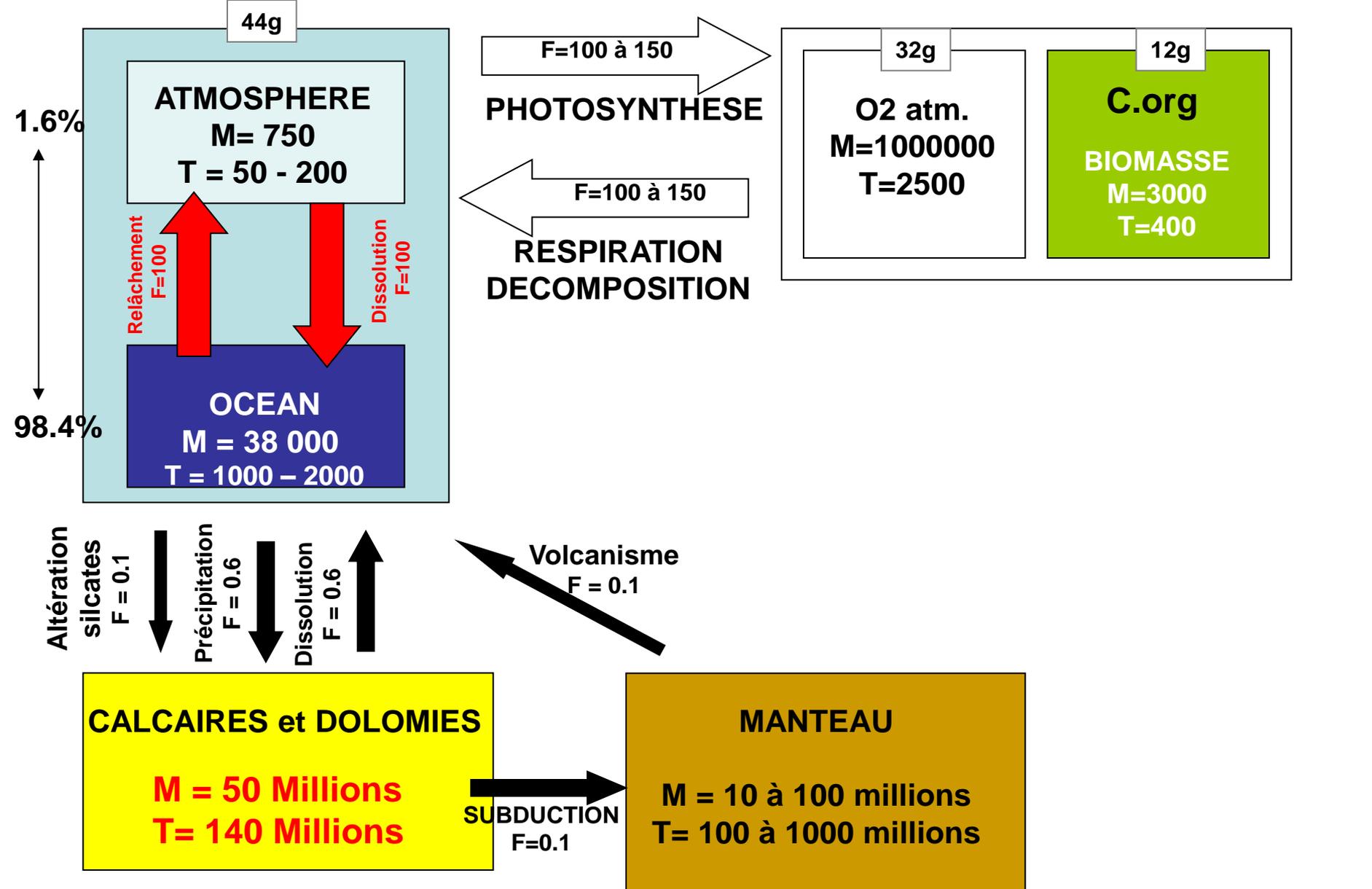
MANTEAU

M = 10 à 100 millions

T = 100 à 1000 millions

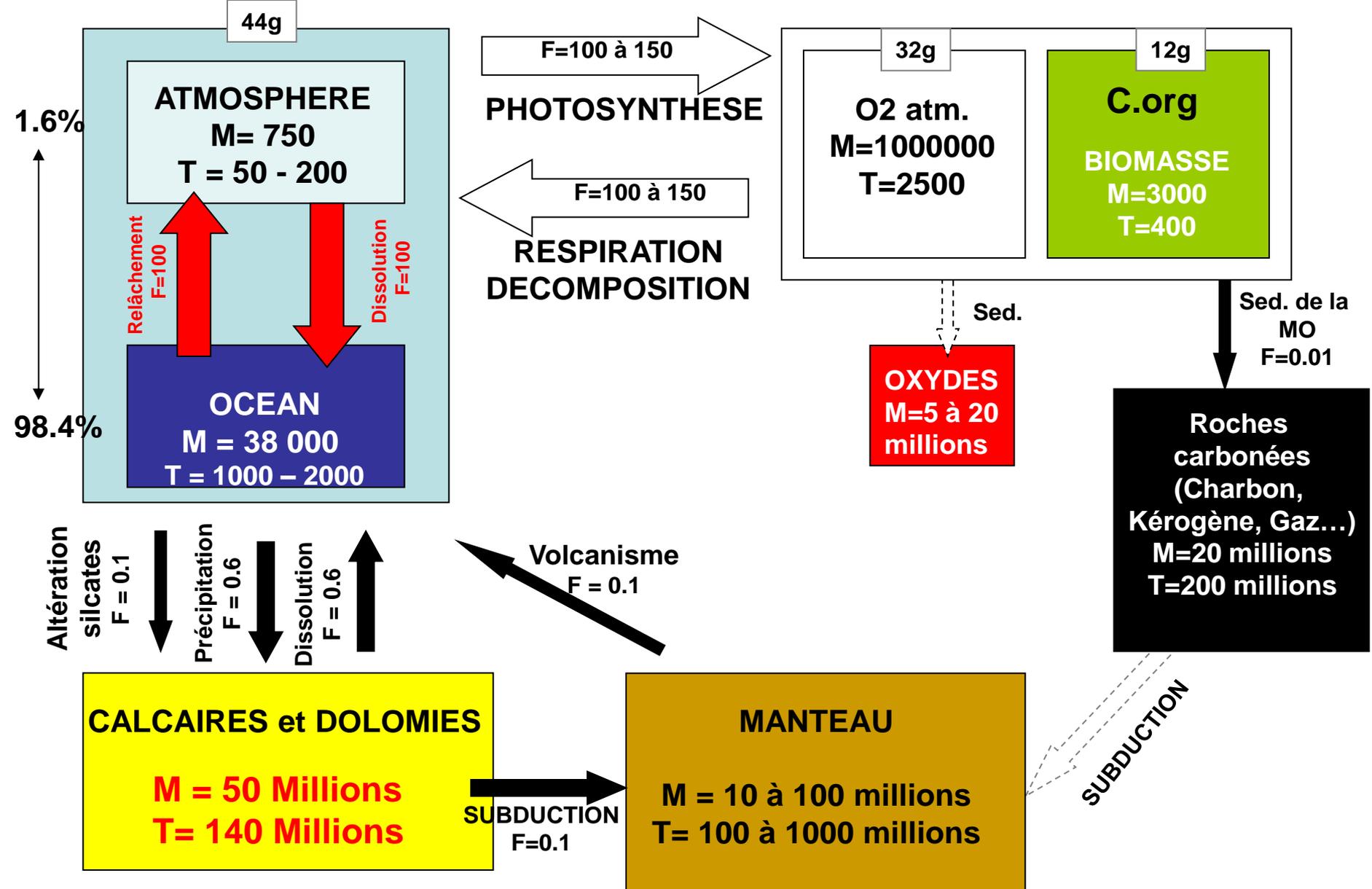
CYCLE PRE-ANTHROPIQUE SIMPLIFIE DU CARBONE

M = Masse en GT de C ou O
F=Flux annuel en GT/an
T=temps de résidence en années
Flèche grise: négligeable



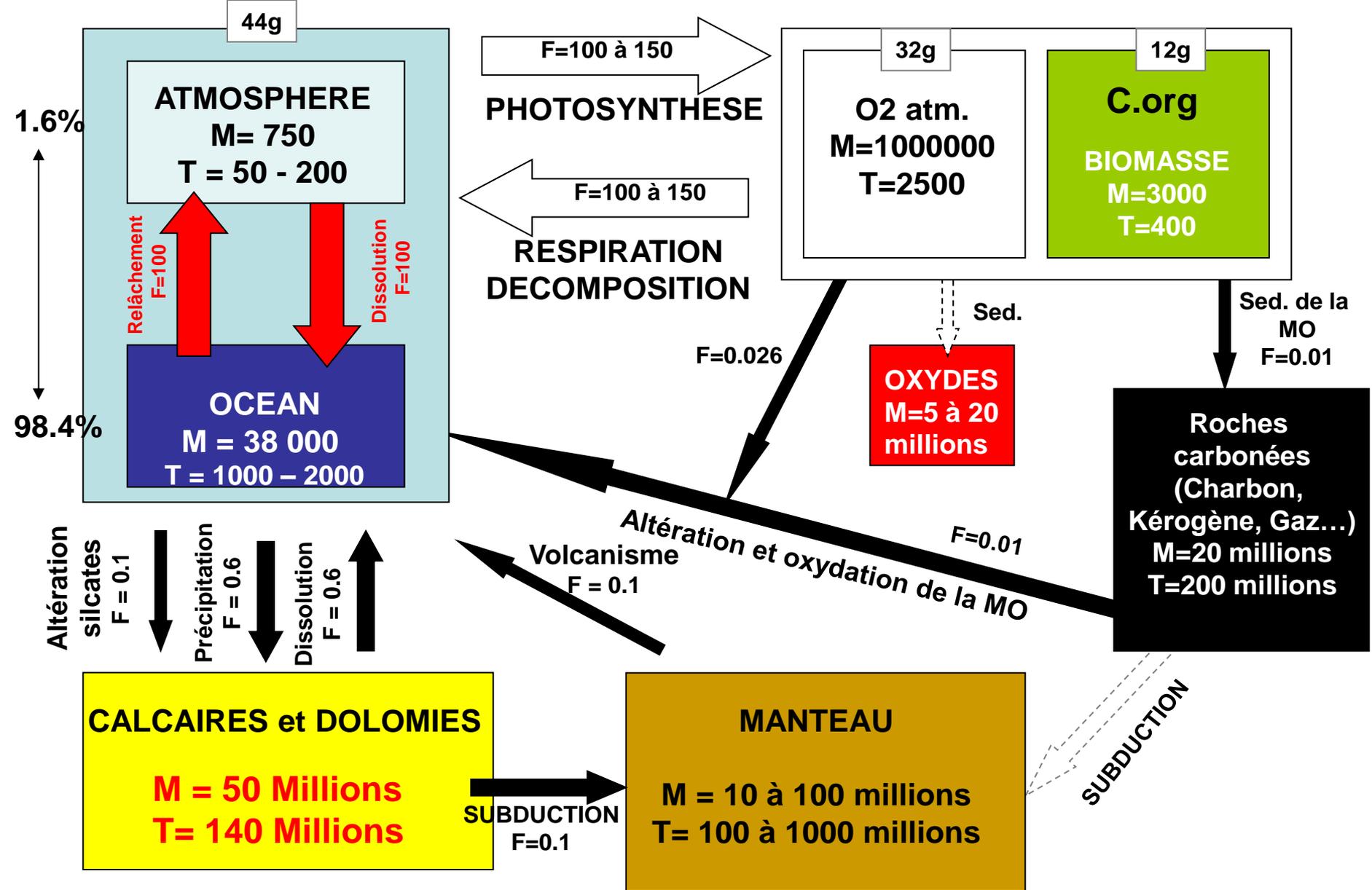
CYCLE PRE-ANTHROPIQUE SIMPLIFIE DU CARBONE

M = Masse en GT de C ou O
 F=Flux annuel en GT/an
 T=temps de résidence en années
 Flèche grise: négligeable



CYCLE PRE-ANTHROPIQUE SIMPLIFIE DU CARBONE

M = Masse en GT de C ou O
 F=Flux annuel en GT/an
 T=temps de résidence en années
 Flèche grise: négligeable



CYCLE PRE-ANTHROPIQUE SIMPLIFIE DU CARBONE

M = Masse en GT de C ou O
 F=Flux annuel en GT/an
 T=temps de résidence en années
 Flèche grise: négligeable

1 – Introduction / Généralités

2 - Les réservoirs et les transferts de carbone

Rappel effet de serre

Les réservoirs impliqués

Echange Océan / Atmosphère

Echange Biomasse marine / océan

Rôle de la biomasse

Echange Lithosphère-Manteau / Atmosphère

3 – Le cycle du Carbone pré-anthropique : état stationnaire – équilibre

Flux entre réservoirs – Temps de résidence

4 - Le cycle du Carbone pré-anthropique en déséquilibre

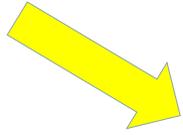
Evolution de l'atmosphère en C depuis 4.5 Ga – Long terme 

5 – Le cycle du Carbone perturbé par l'activité humaine

Evolution de l'atmosphère depuis 100 ans – Court terme

Les facteurs influençant le climat terrestre pré-anthropique

Soleil



Influx solaire :
ne fait
qu'augmenter
depuis 4.6 Ga

Composition de
l'atmosphère
en gaz à effet de
serre



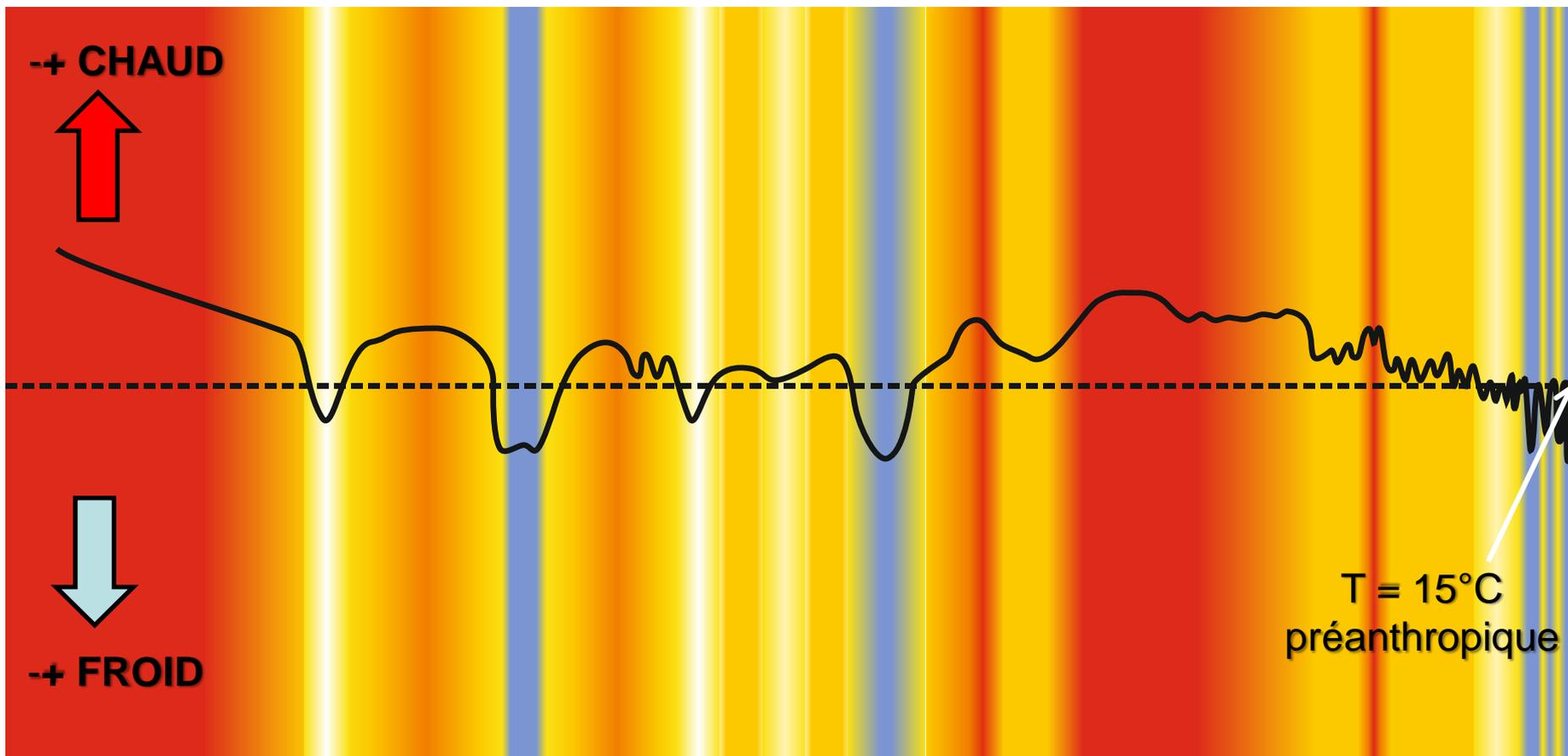
**Activité interne
de la Terre**

**Paramètres
Orbitaux**

Cyclicité de ~10 ka à 400 ka

VARIATION COURTE et PERIODIQUE

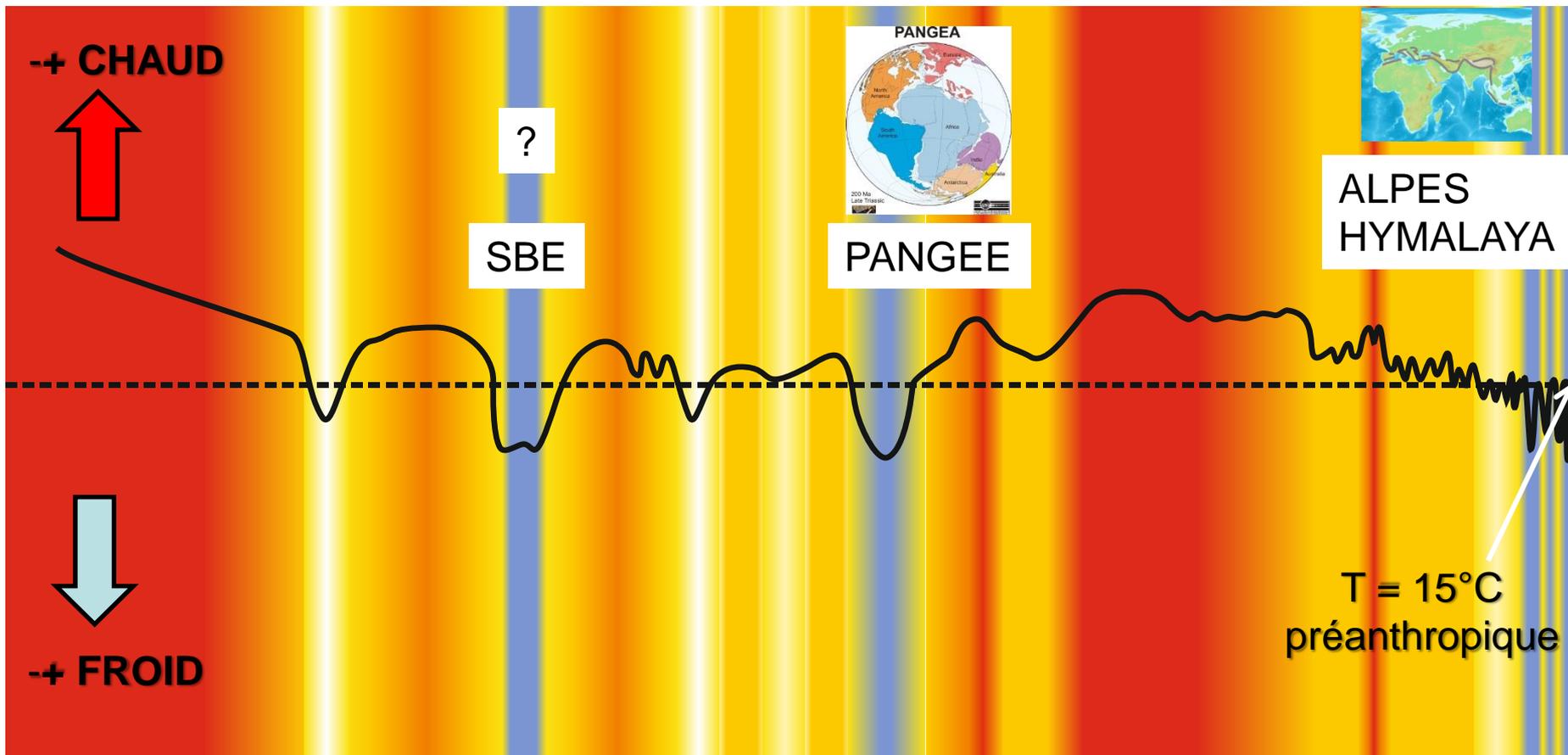
Les variations climatiques **lentes** à l'échelle des temps géologiques



Luminosité du soleil plus faible
Mais ES ++

Incertitude scientifique baisse

Les variations climatiques **lentes** à l'échelle des temps géologiques



*Luminosité du soleil plus faible
Mais ES ++*

Incertitude scientifique baisse

1 - Introduction

2 – Réservoirs et Transferts

3 – Cycle C préanthropique à l'équilibre

4 – Cycle C préanthropique en déséquilibre

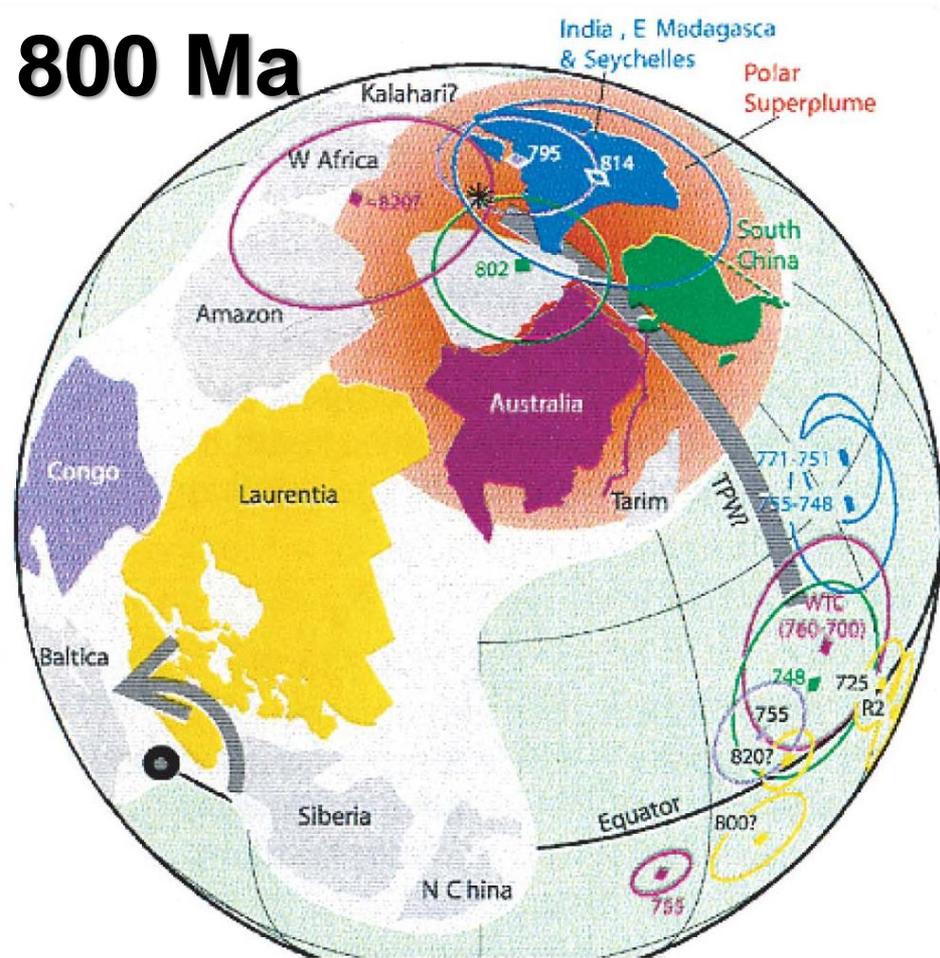
5 – Cycle C perturbé par l'homme

Era	Period	Epoch	Russian Stage	Approx. Base
Paleozoic	Cambrian	Lower Cambrian	Toyonian	513.0 ±2.0
			Botomian	undefined
			Ardabanian	undefined
			Tommotian	undefined
Neo-proterozoic	Ediacaran		Nemakit-Daldynian	542.0 ±1.0
				~630
				850
				1000

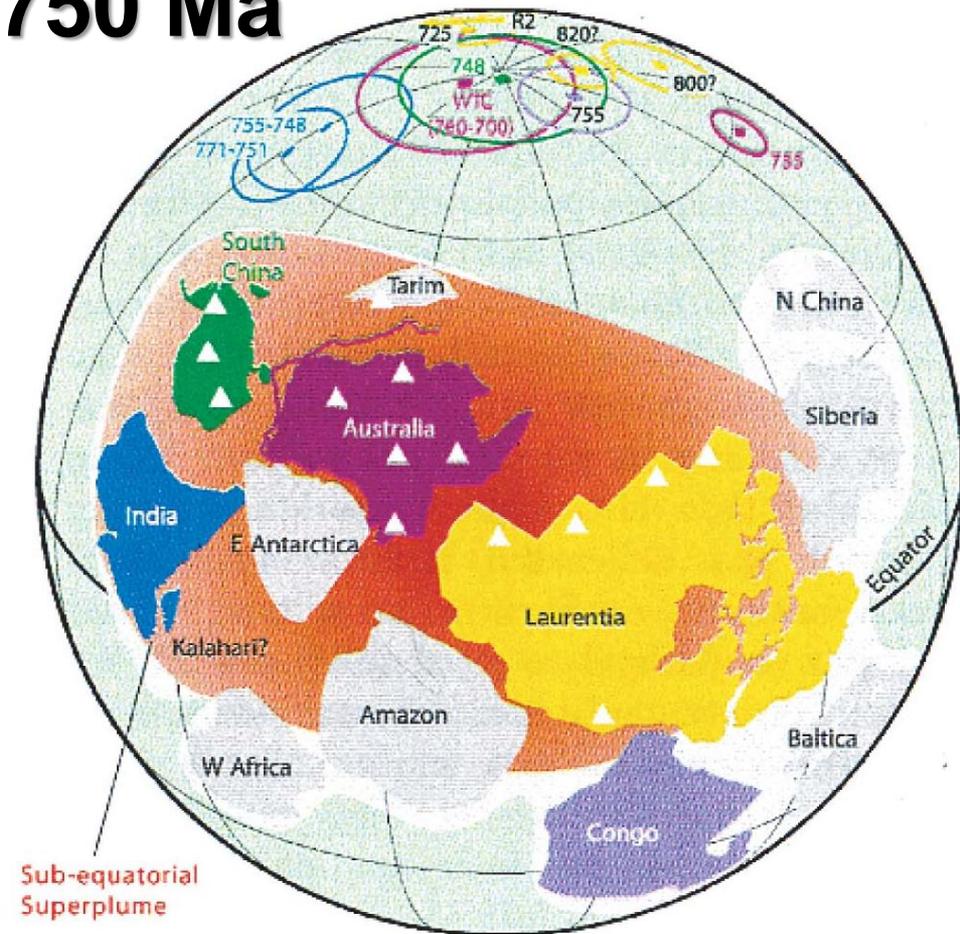


"Snowball Earth"
 Copyright © Walter Myers
<http://www.arcadiastreet.com>

800 Ma



750 Ma



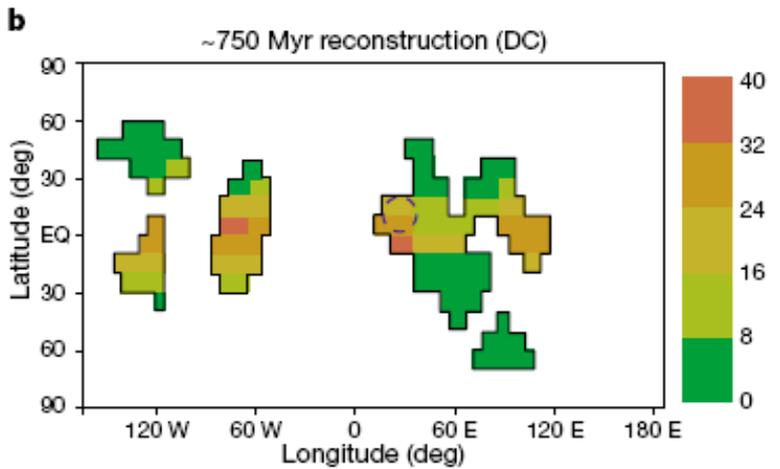
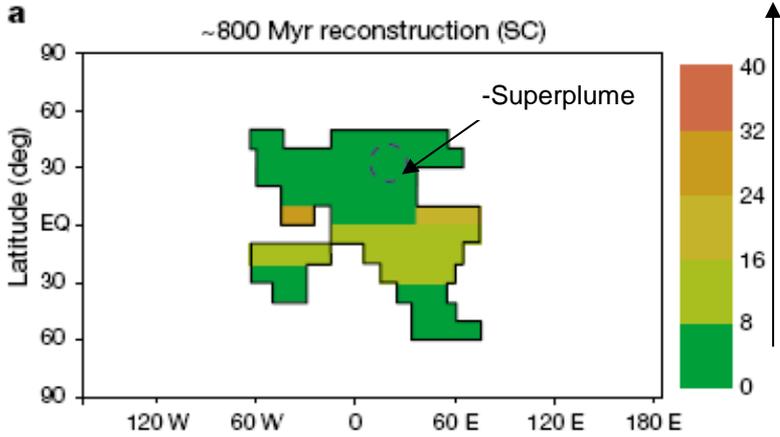
Li, Evans & Zhang (2004) EPSL 220, 409-421.

Un super continent = RODINIA à 800 Ma
Fragmentation et migration vers l'équateur à 750 Ma
→ Augmentation de l'altération chimique

SCENARIO d'ENTREE DANS LA TERRE BOULE DE NEIGE

(d'après Donnadieu et al.)

Taux d'altération

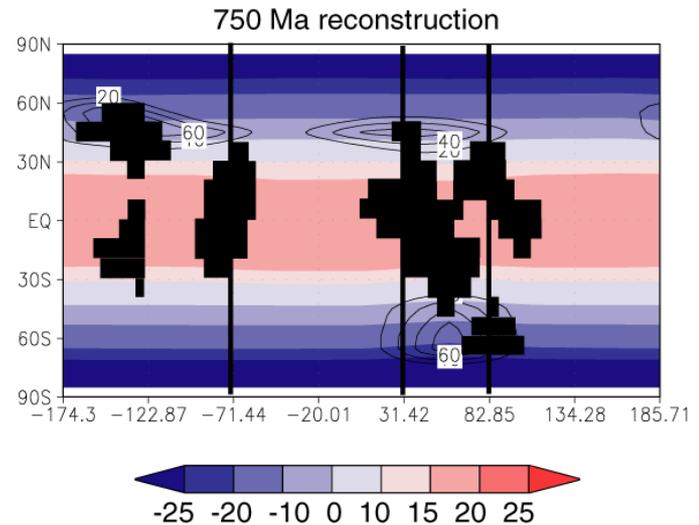
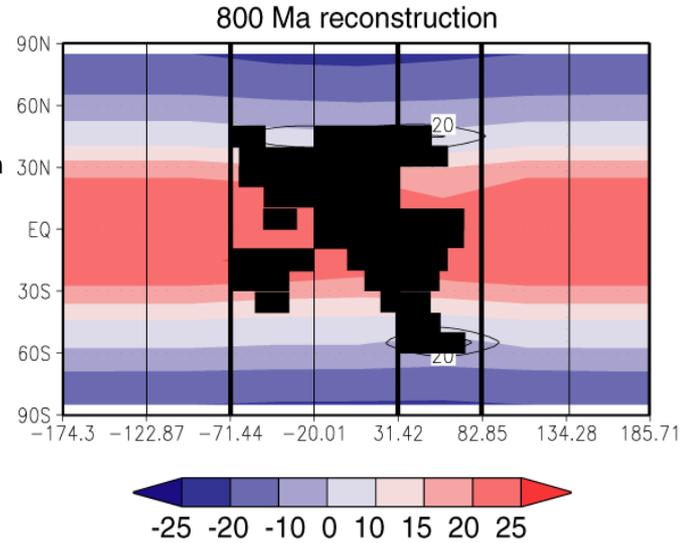


T° moyenne = 10°C
 T° continentale = 16°C
 Taux de CO2 = 1800 ppm

Fragmentation
 -par un volcanisme
 -fortement répandu

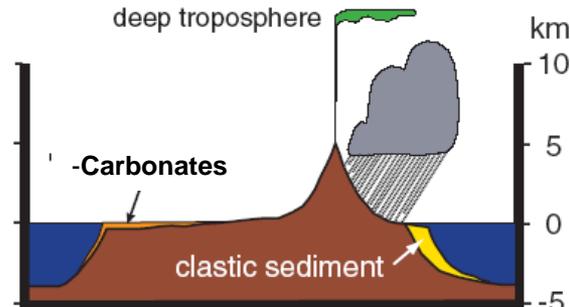
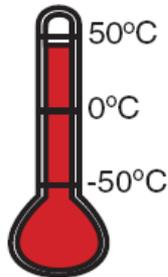
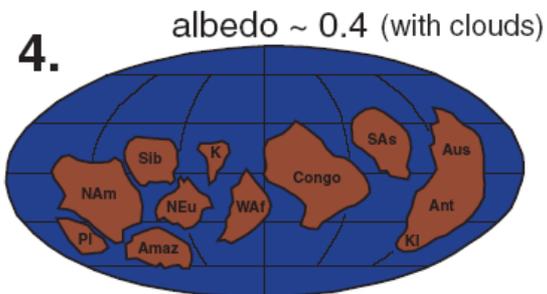
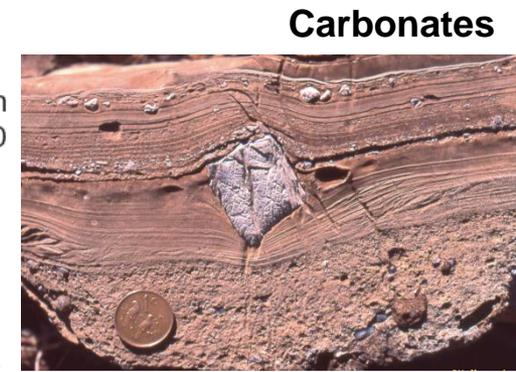
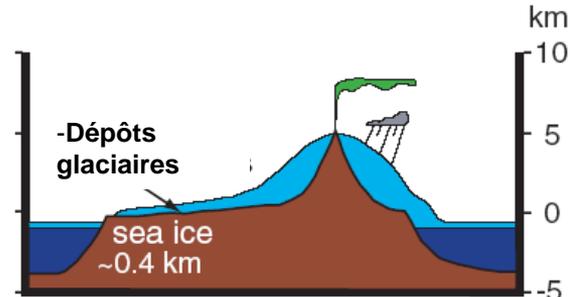
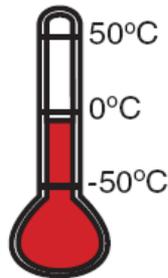
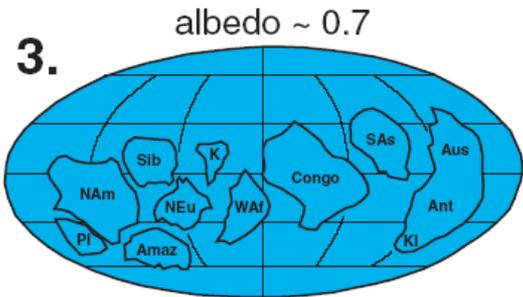
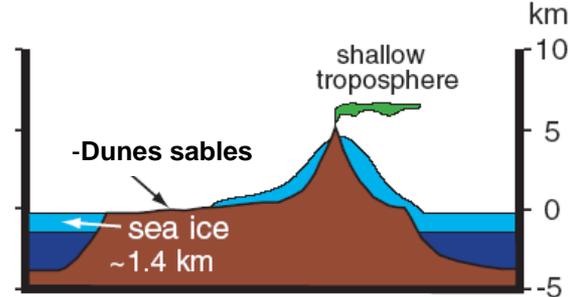
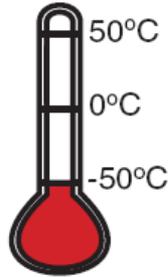
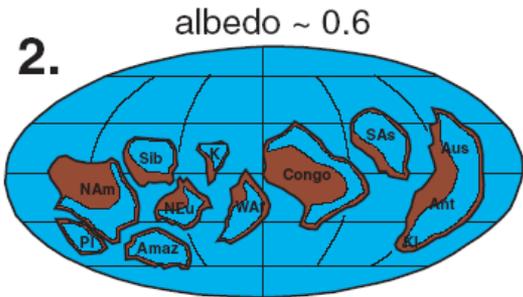
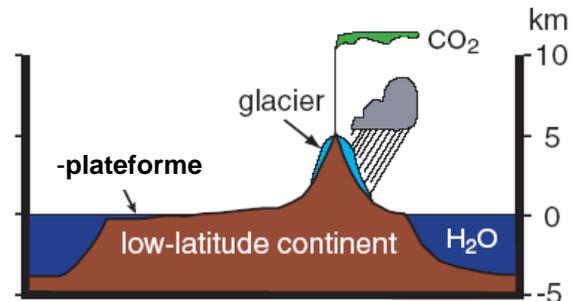
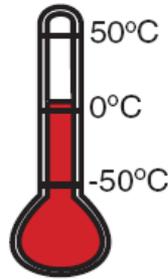
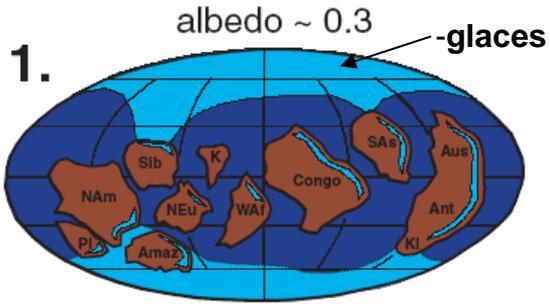
T° moyenne < 2°C
 Taux de CO2 = 500 ppm

TX = Taux d'altération ($10^4 \text{ mol. km}^{-2}\text{yr}^{-1}$)
 SC = supercontinent configuration
 DC = dispersion configuration



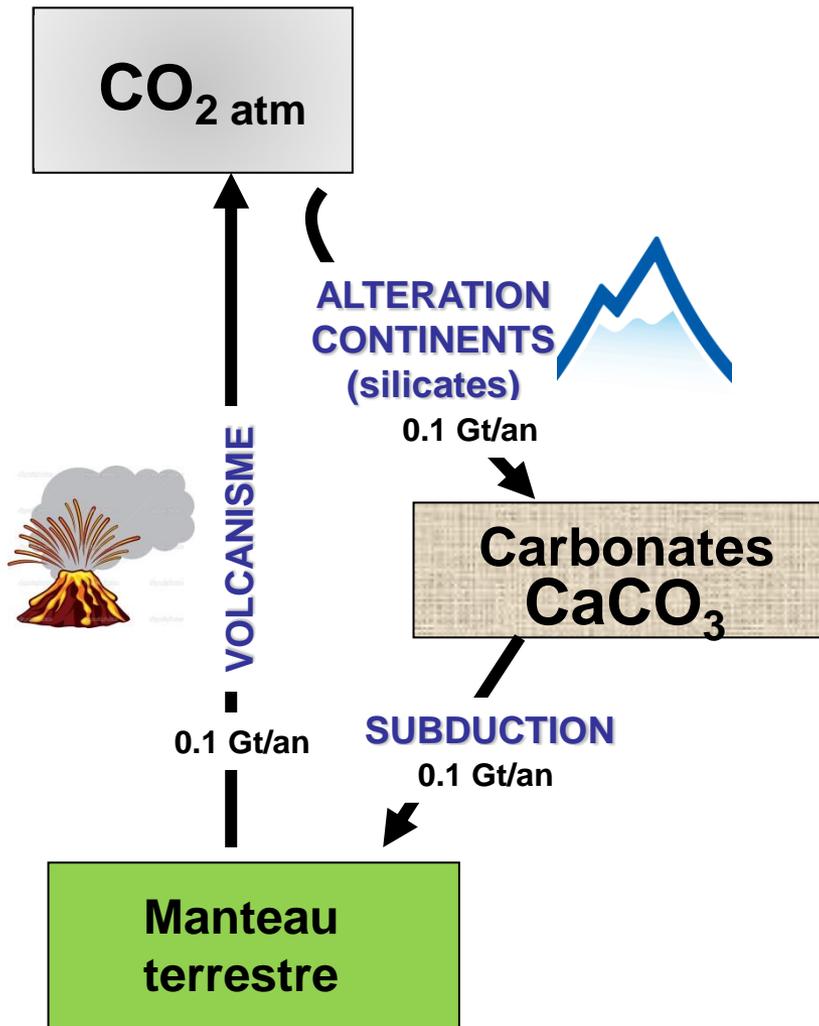
-T°

SCENARIO DU SBE (d'après Hofmann)

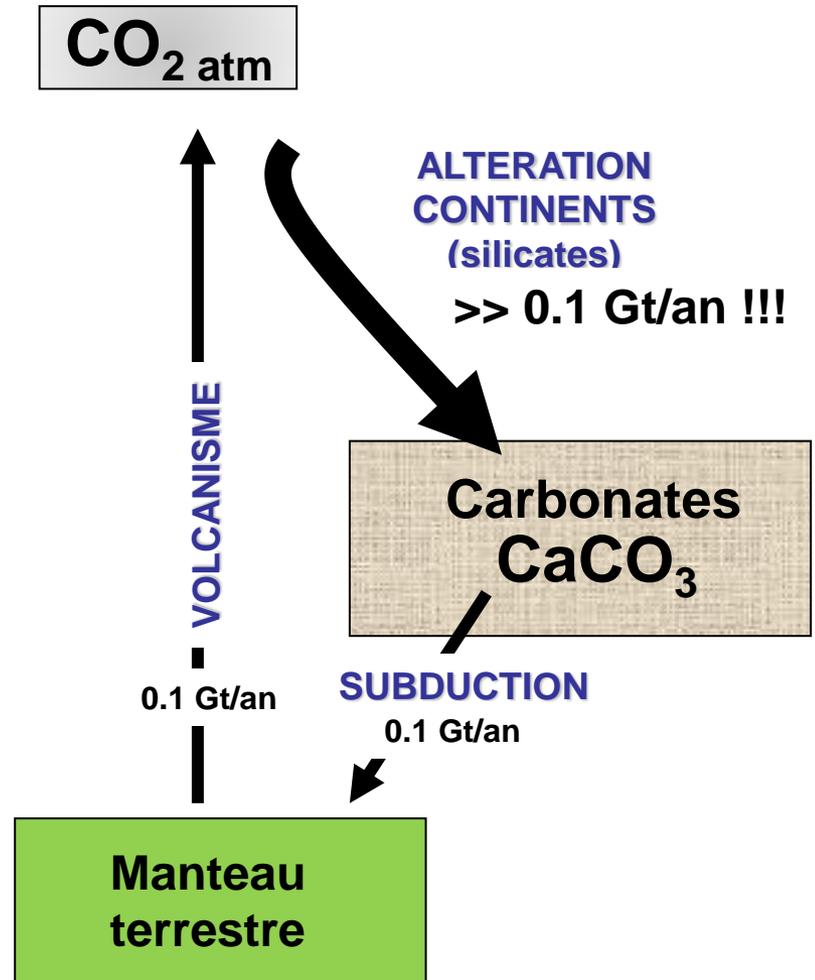


Dropstones

CYCLE LONG DU CARBONE



à l'EQUILIBRE



Durant ++ ALTERATION

IMPACT DES VOLCANS SUR LE CLIMAT ?



1 - Introduction

2 – Réservoirs et Transferts

3 – Cycle C préanthropique à l'équilibre

4 – Cycle C préanthropique en déséquilibre

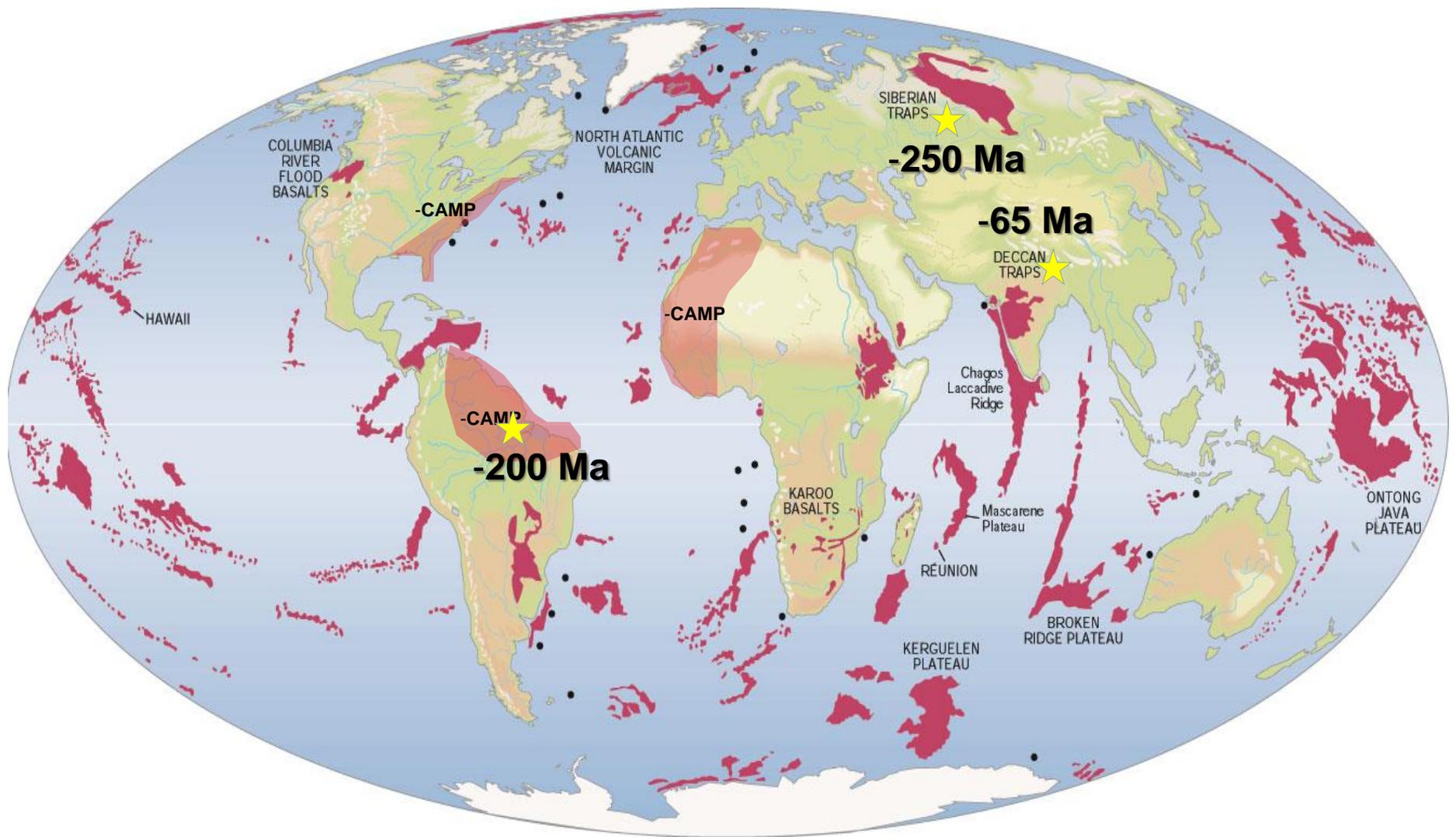
5 – Cycle C perturbé par l'homme



PINATUBO - 1991

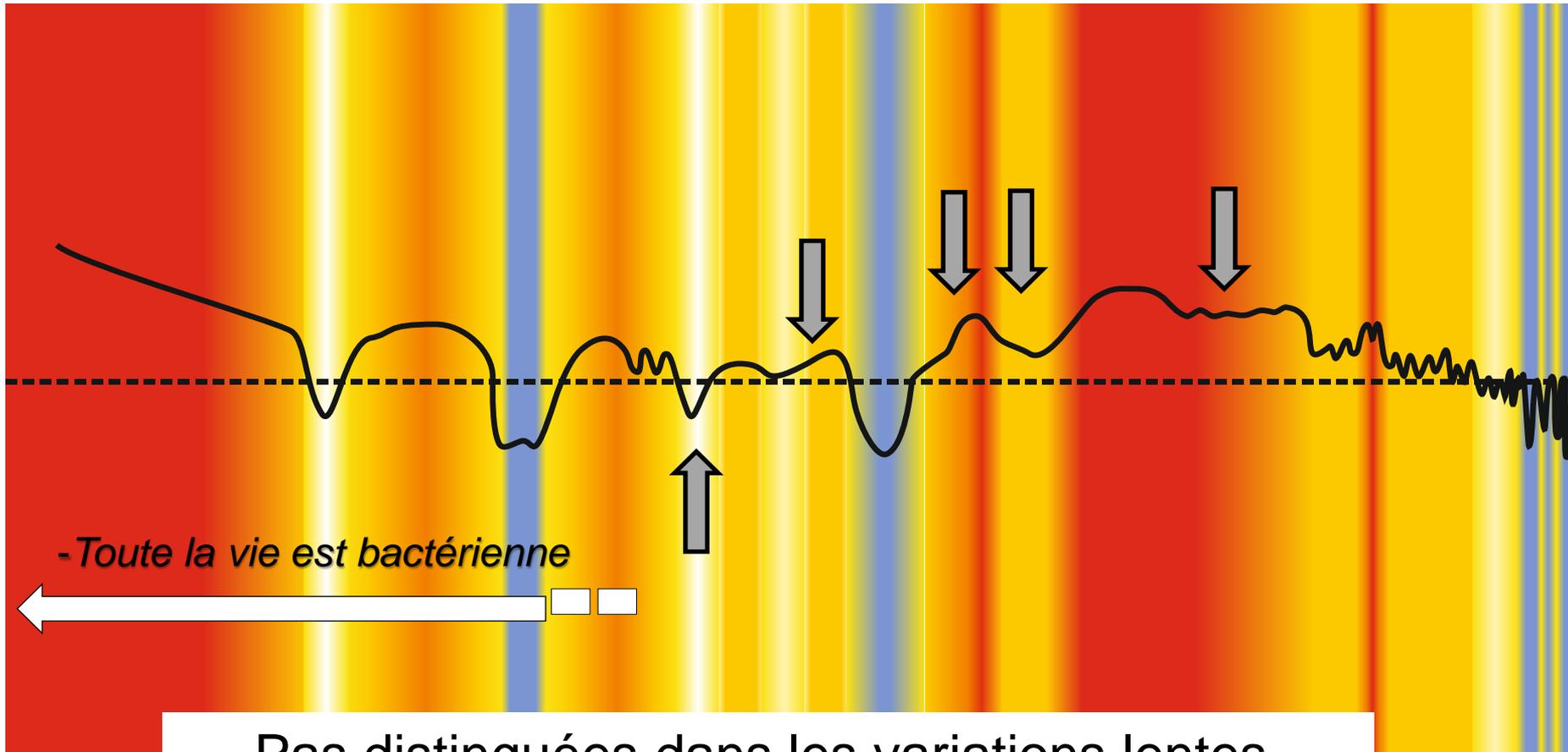
Refroidissement global dû à la propagation des poussières à la tropopause (1 – 2 ans)
Sinon, pas d'impact sur le cycle du C → les 0,1 GT/an « classiques »





Les grandes provinces magmatiques :
des millions de km³ mis en place en moins d'un million d'année !!!

LES GRANDES CRISES BIOLOGIQUES



Pas distinguées dans les variations lentes
→ événements climatiques brutaux (< 1 Ma)

SIBERIE

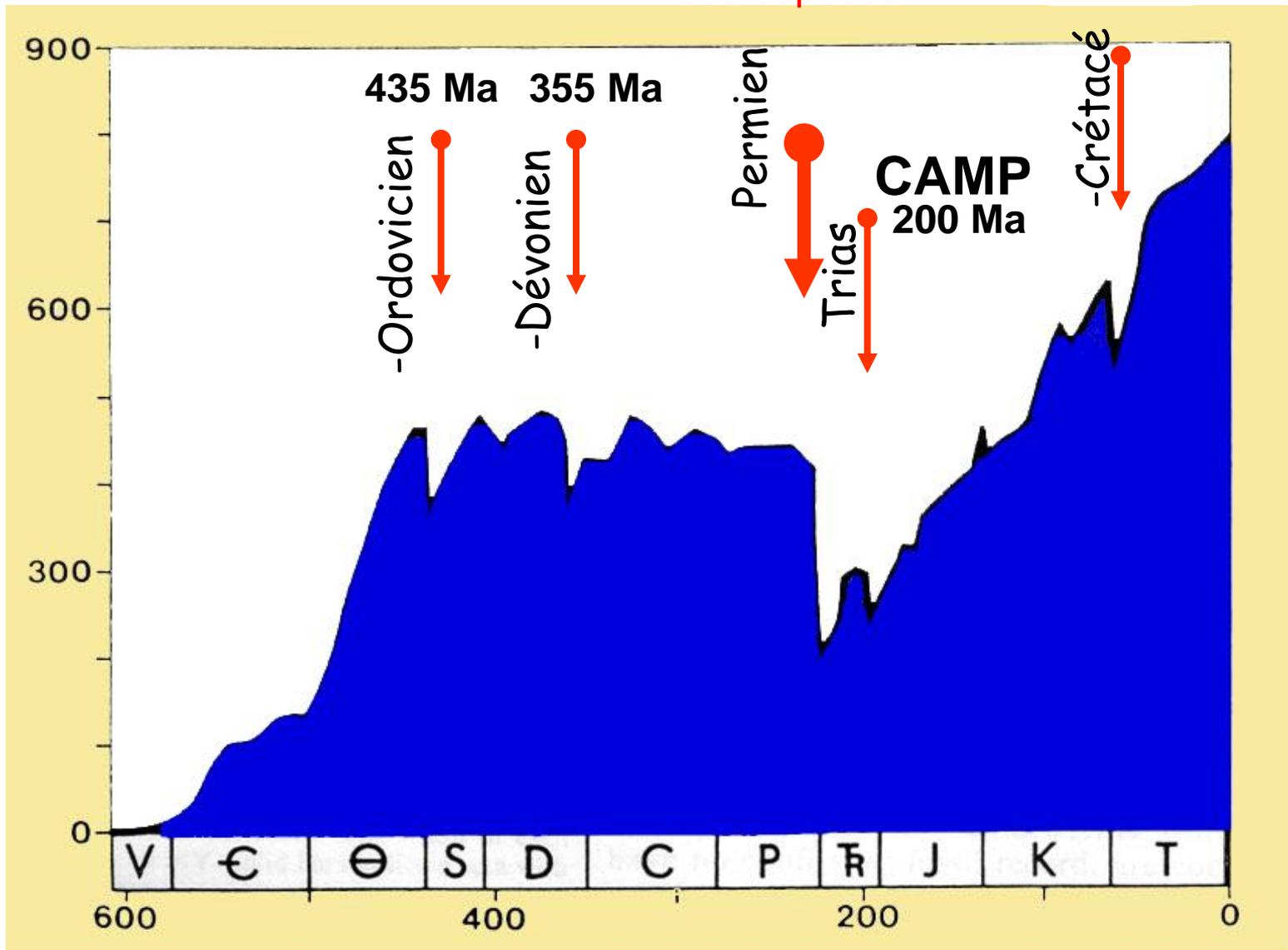
250 Ma

90% de disparition
des espèces

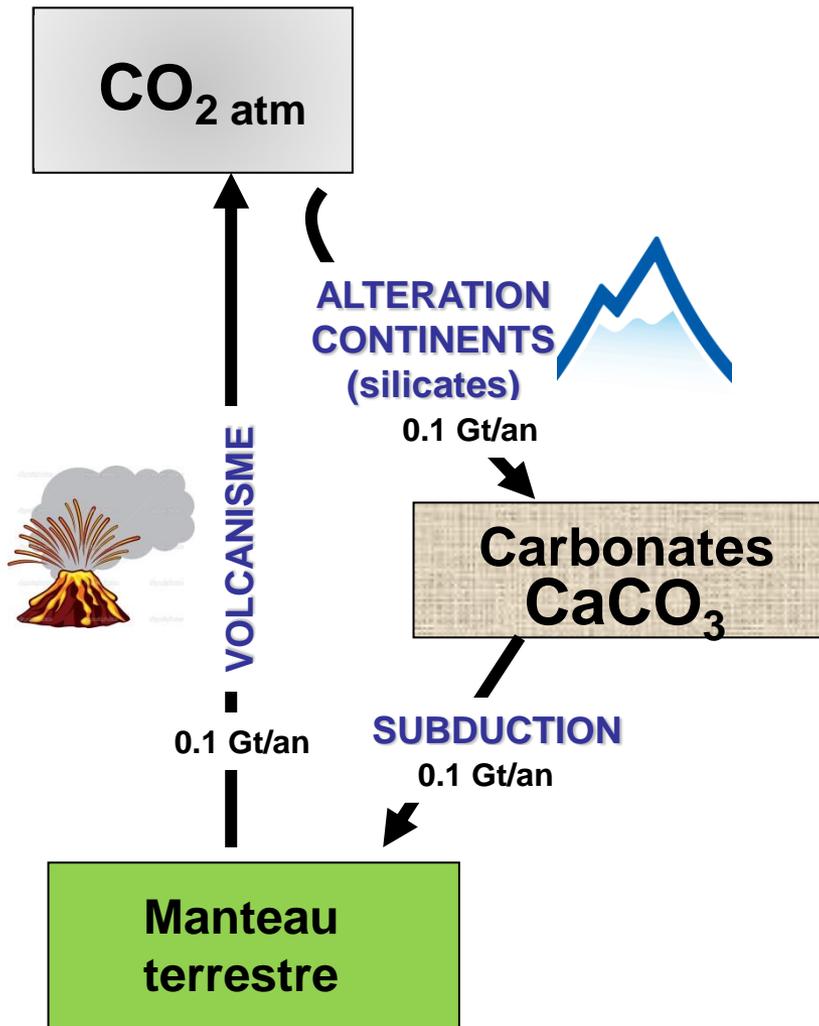
DECCAN

65 Ma

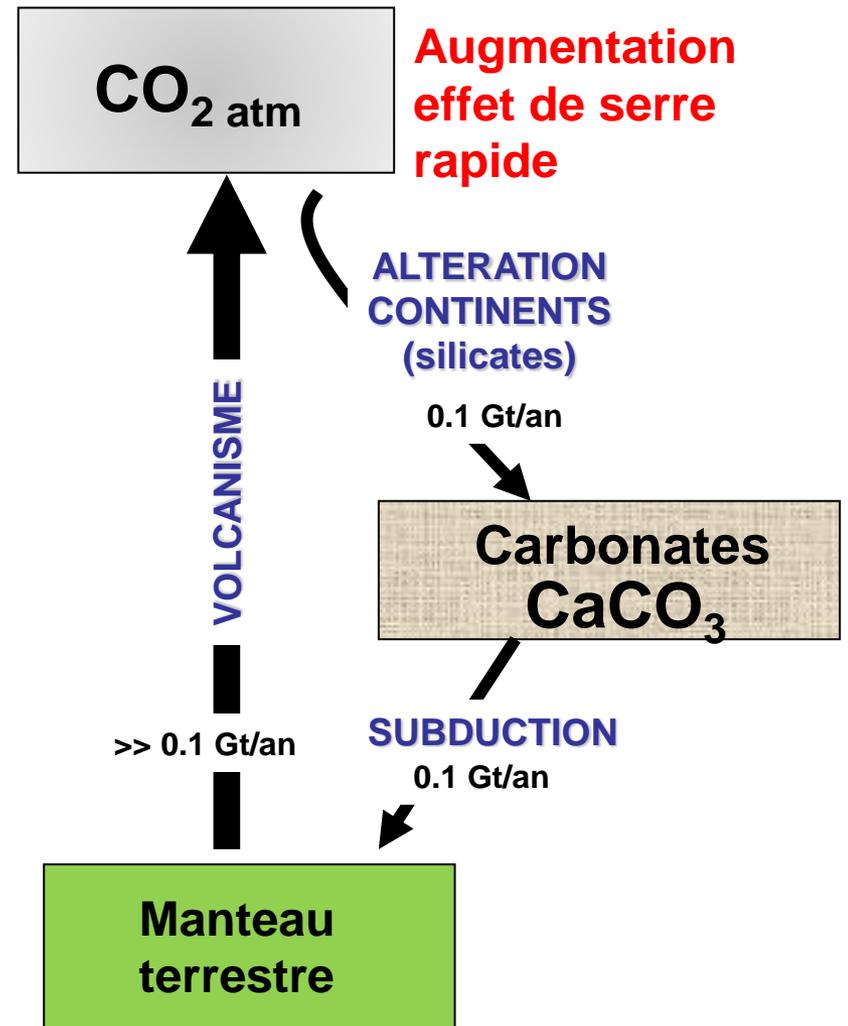
BIODIVERSITE (Nb de familles)



CYCLE LONG DU CARBONE



à l'EQUILIBRE



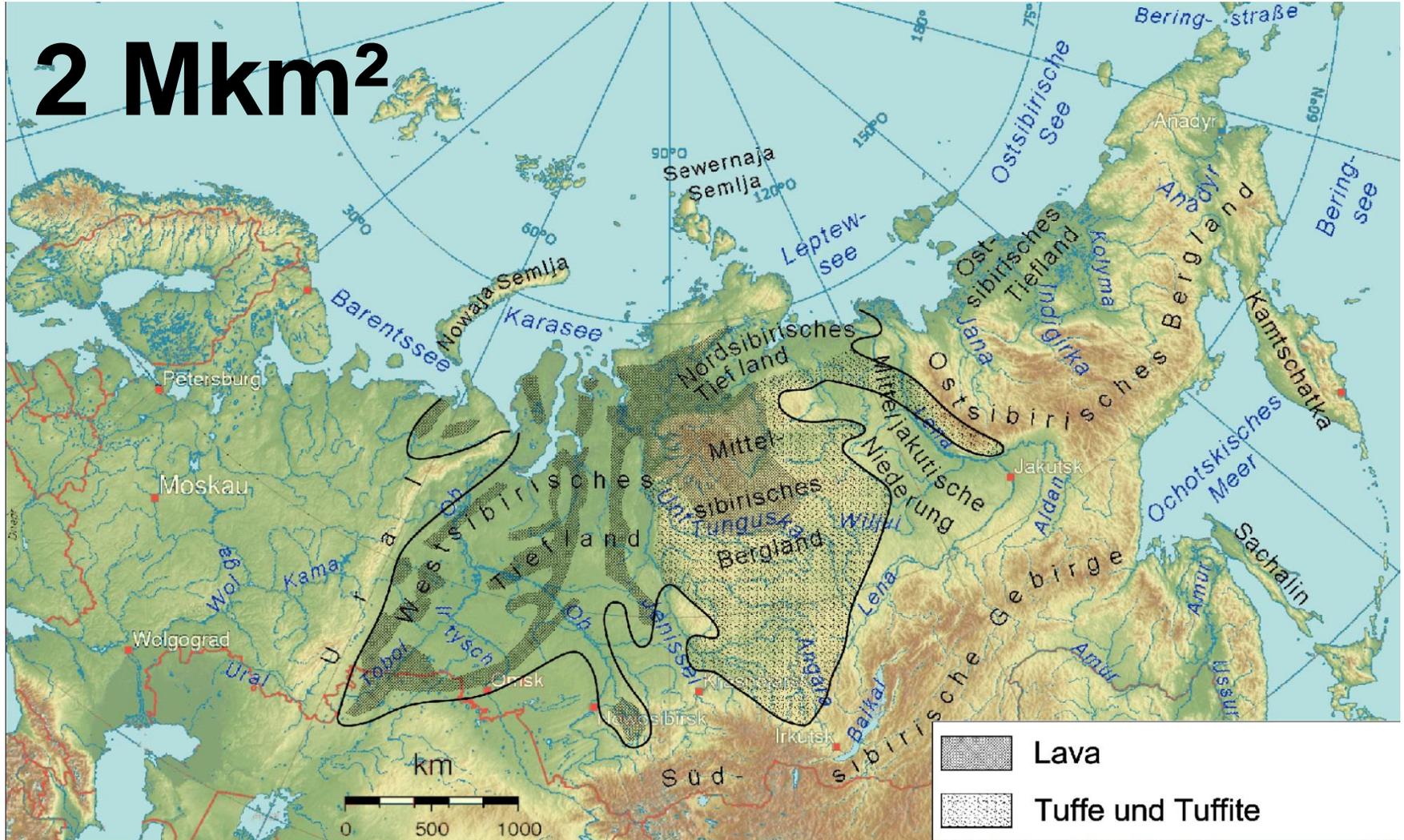
Durant VOLCANISME Trapps

DECCAN en INDE



SCENARIO de la plus GRANDE CRISE à 250 Ma

(grâce à des formations sédimentaires du Groenland)





1^{er} « tueur »

Eruptions gigantesques
durant 1 Ma
→ Augmentation CO₂



2nd « tueur »

-Début de l'extinction

1^{ère} phase

Disparition de
certaines espèces
terrestres

T° = +4 à +5 °C

40 000 ans

Extinction marine

50 000 ans **Anomalie ¹²C**

3^{ème} phase

Disparition d'une
majorité d'espèces
terrestres

T° = +4 à +5 °C

80 000 ans

DUREE
= 80 000 ans

T° = +10°C !!

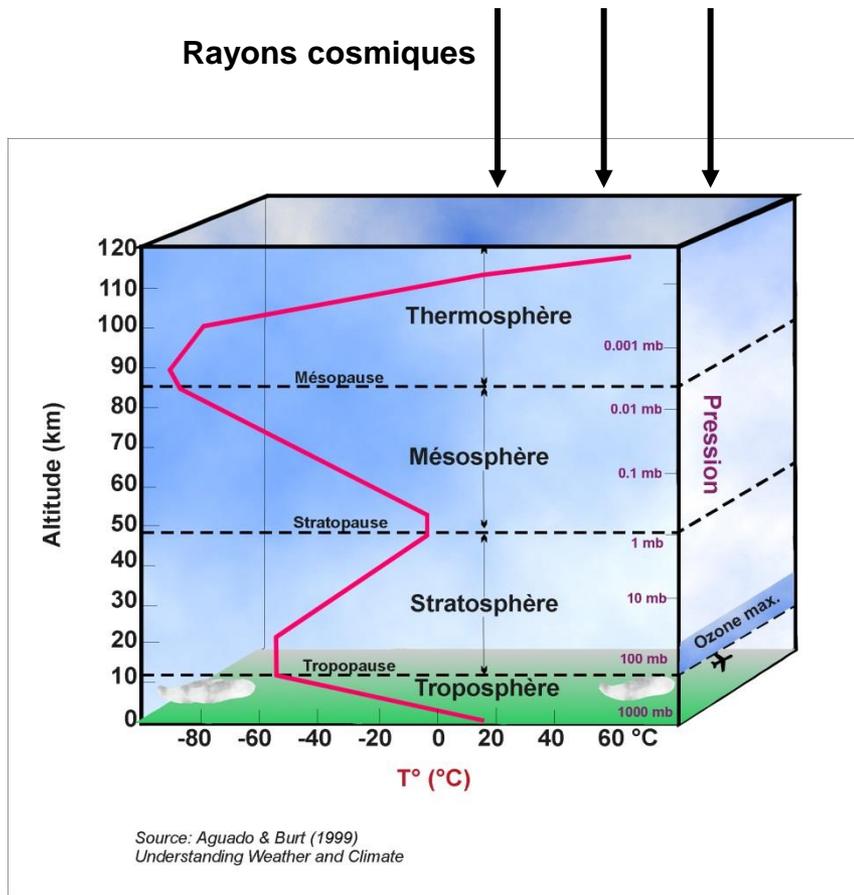
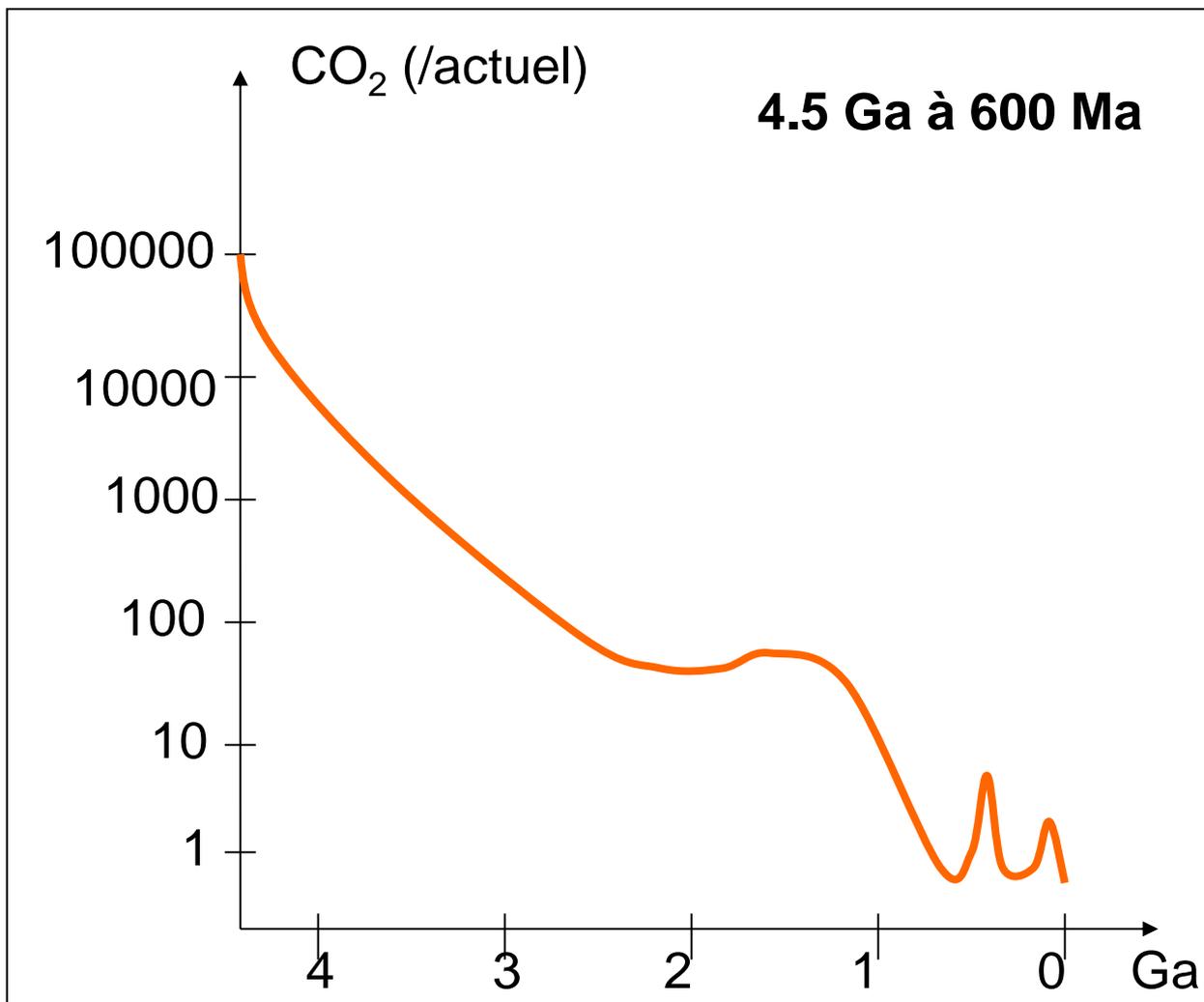


TABLE 3.1 Gaseous composition of dry air.

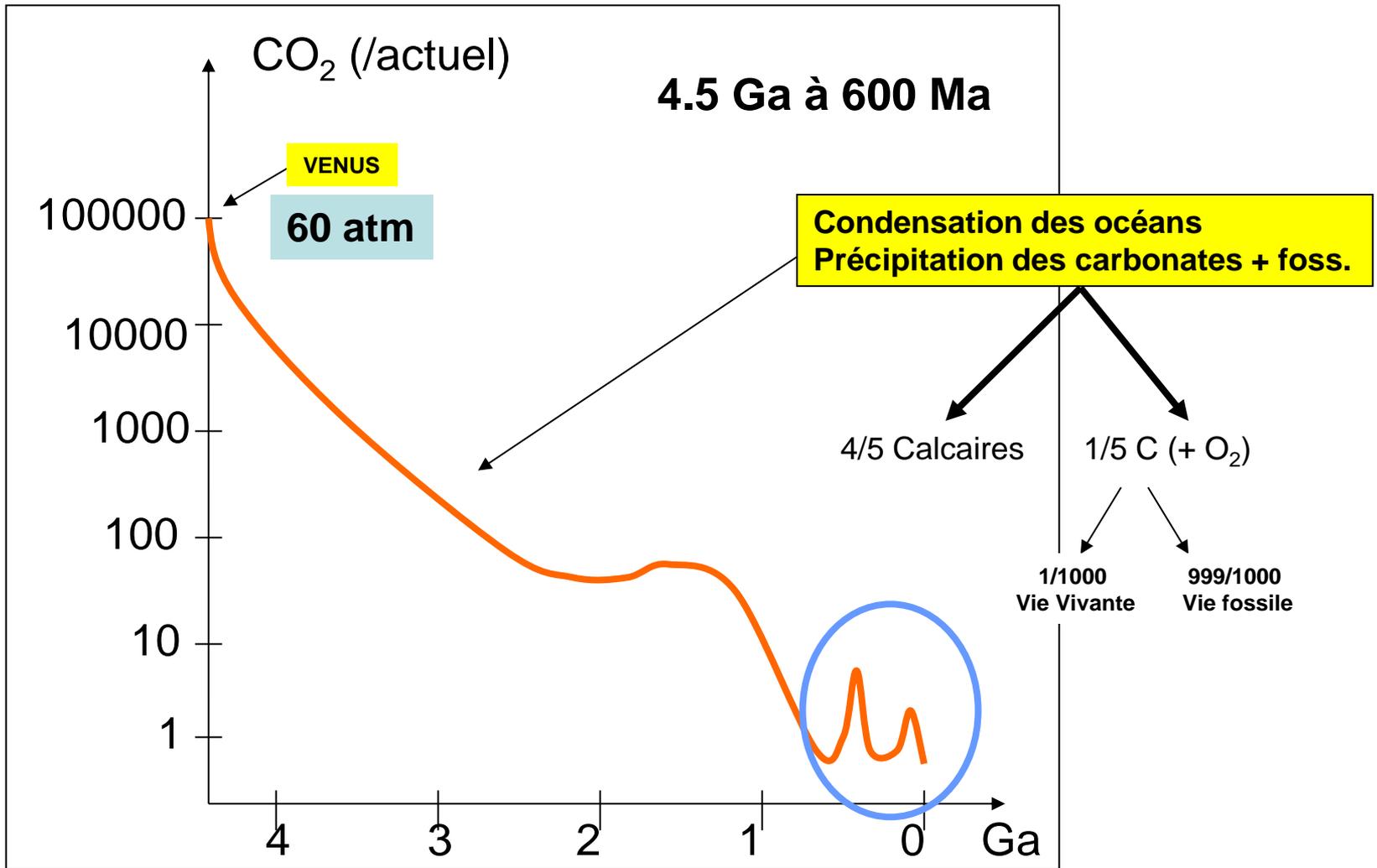
Constituent	Chemical symbol	Mole percent
Nitrogen	N ₂	78.084
Oxygen	O ₂	20.947
Argon	Ar	0.934
Carbon dioxide	CO ₂	0.0360
Neon	Ne	0.001818
Helium	He	0.000524
Methane	CH ₄	0.00017
Krypton	Kr	0.000114
Hydrogen	H ₂	0.000053
Nitrous oxide	N ₂ O	0.000031
Xenon	Xe	0.0000087
Ozone*	O ₃	trace to 0.0008
Carbon monoxide	CO	trace to 0.000025
Sulfur dioxide	SO ₂	trace to 0.00001
Nitrogen dioxide	NO ₂	trace to 0.000002
Ammonia	NH ₃	trace to 0.0000003

*Low concentrations in troposphere; ozone maximum in the 30- to 40-km regime of the equatorial region. (After Warneck, 1988; Anderson, 1989; Wayne, 1991.)

CO₂ : 0.036% - 360 ppmv
CH₄ : 1.7 ppmv
(¹⁴C : 10-20 dpm)

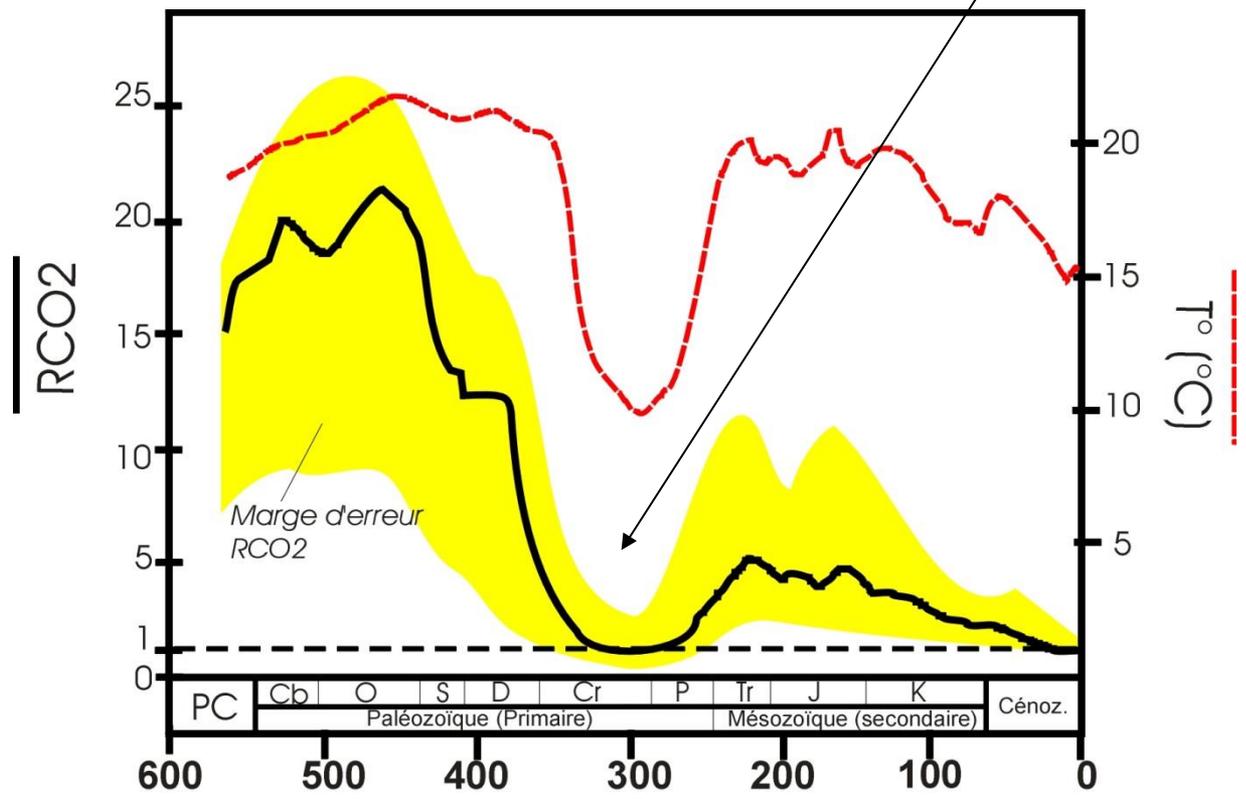


ARCHIVES → modèle planétologie comparée



ARCHIVES → modèle planétologie comparée

de 600 Ma à Actuel + froid que période pré-industrielle

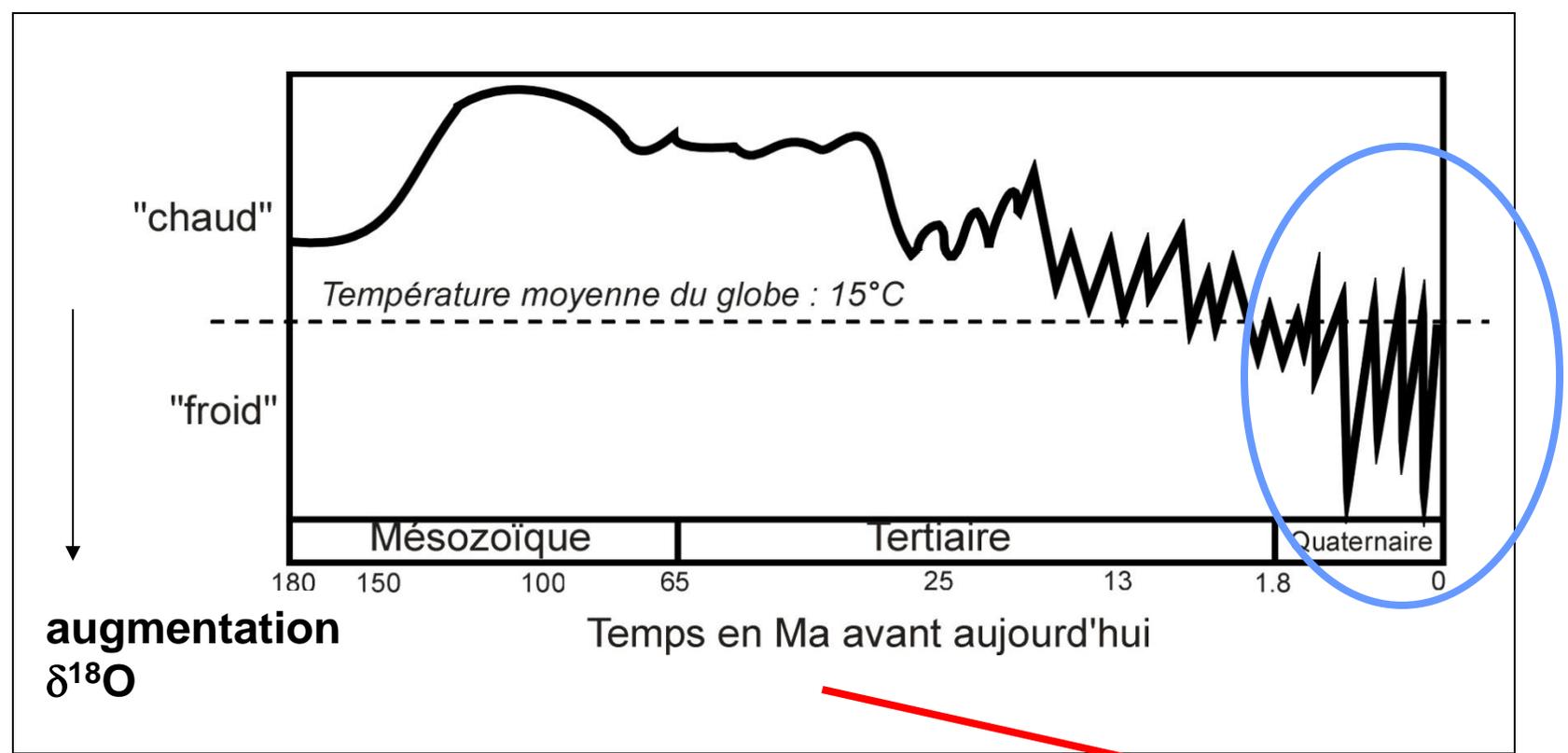


- PC = Précambrien
- Cb = Cambrien
- O = Ordovicien
- S = Silurien
- D = Dévonien
- Cr = Carbonifère
- P = Permien
- Tr = Trias
- J = Jurassique
- K = Crétacé

$$RCO2 = \frac{\text{masse de CO2 atmosphérique au temps } t}{\text{masse de CO2 actuel (300 ppm)}}$$

ARCHIVES → modèle sédimentologique

de 180 Ma à Actuel



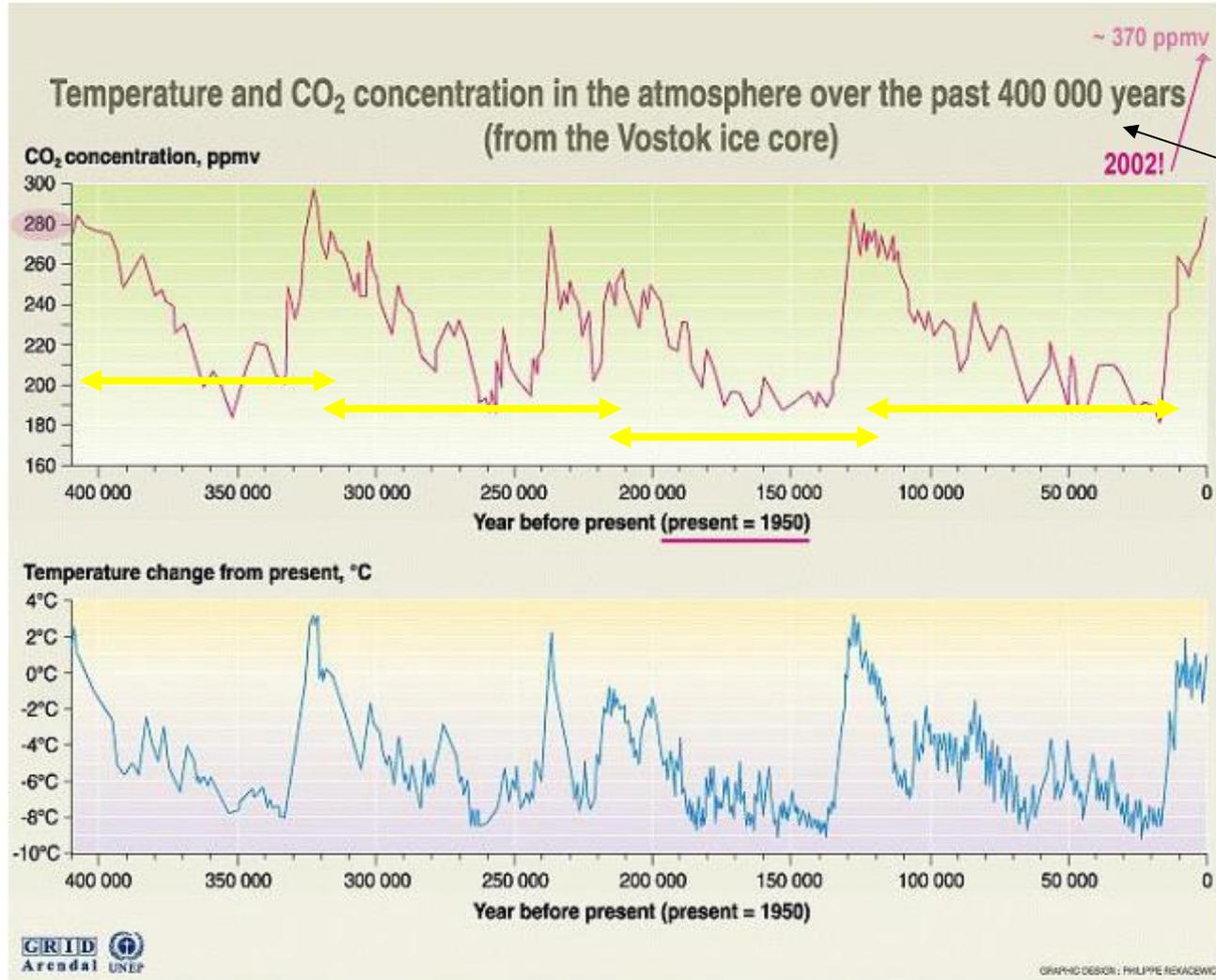
augmentation
 $\delta^{18}\text{O}$

Temps en Ma avant aujourd'hui

Refroidissement constant

ARCHIVES → carottes de sédiments marins

de 0.8 Ma à Actuel



ANTARCTIQUE

Vostok : 420 000 ans
Dôme C : 800 000 ans

PERIODICITE
100 000 ans
EXCENTRICITE

OBLIQUITE : 41 000
PRECESSION : 21 000

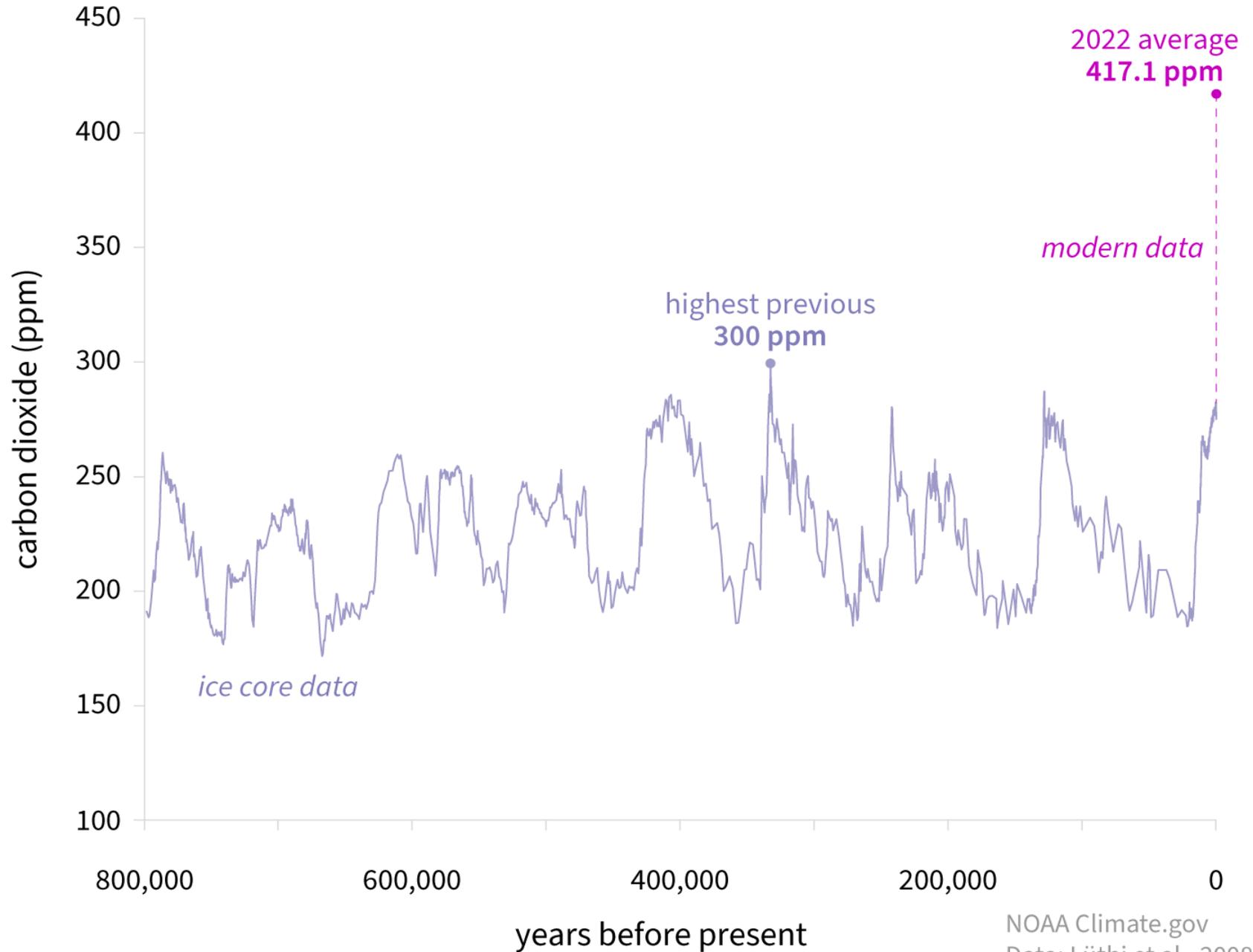
Source: J.R. Petit, J. Jouzel, et al. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core in Antarctica, Nature 399 (3/June), pp 429-436, 1998.

(Note: 2002 information added to diagram)

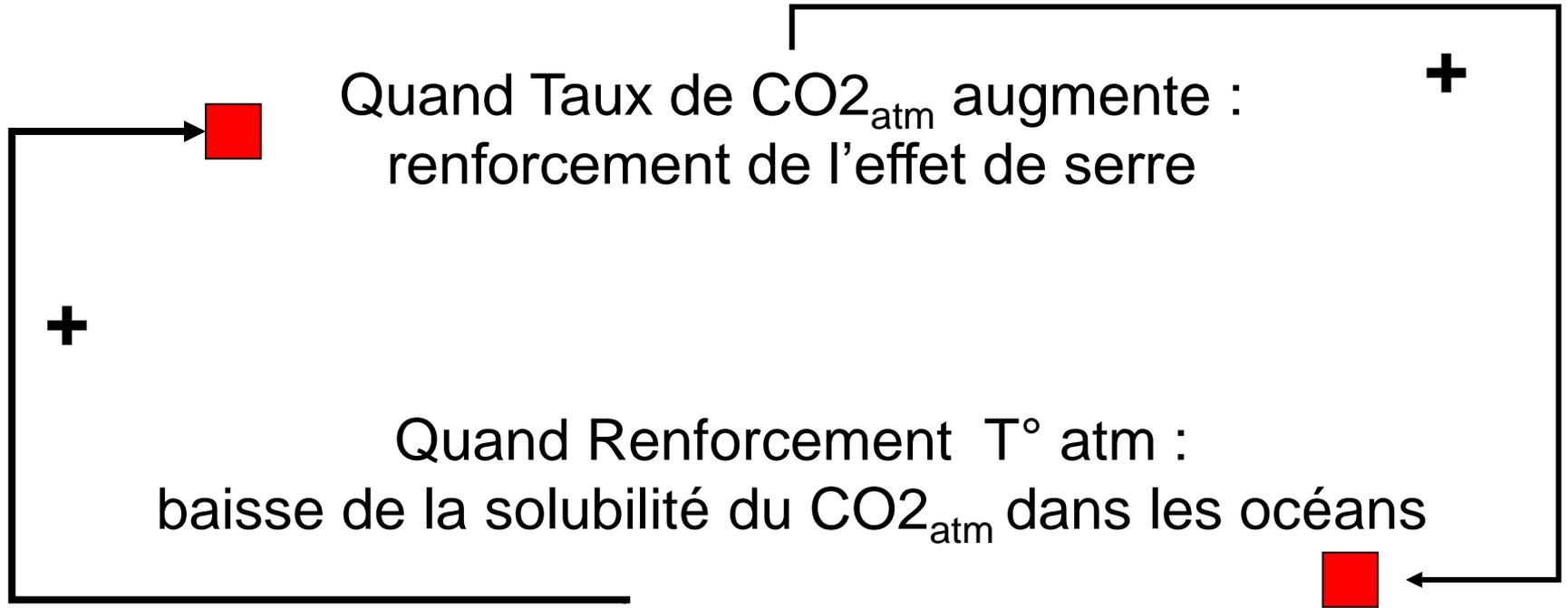
ARCHIVES → carottes de glaces

CARBON DIOXIDE OVER 800,000 YEARS

Dôme C



LIAISON T° atm - Quantité de CO_2 atmosphérique



Qui commence ?

Personne : **Rétroaction positive**

1 – Introduction / Généralités

2 - Les réservoirs et les transferts de carbone

Rappel effet de serre

Les réservoirs impliqués

Echange Océan / Atmosphère

Echange Biomasse marine / océan

Rôle de la biomasse

Echange Lithosphère-Manteau / Atmosphère

3 – Le cycle du Carbone pré-anthropique : état stationnaire – équilibre

Flux entre réservoirs – Temps de résidence

4 - Le cycle du Carbone pré-anthropique en déséquilibre

Evolution de l'atmosphère en C depuis 4.5 Ga – Long terme

5 – Le cycle du Carbone perturbé par l'activité humaine

Evolution de l'atmosphère depuis 100 ans – Court terme 

A l'échelle historique : activité humaine

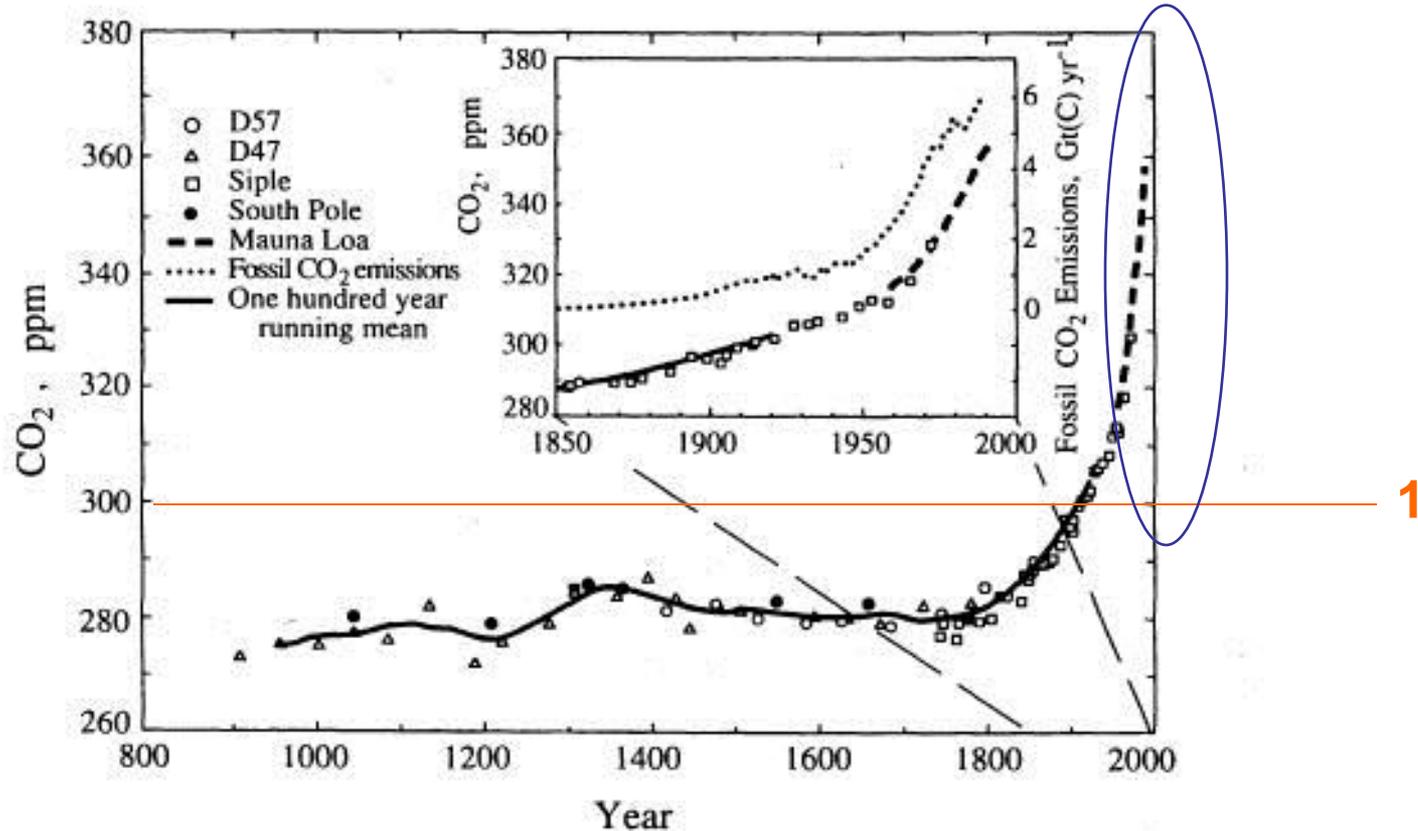
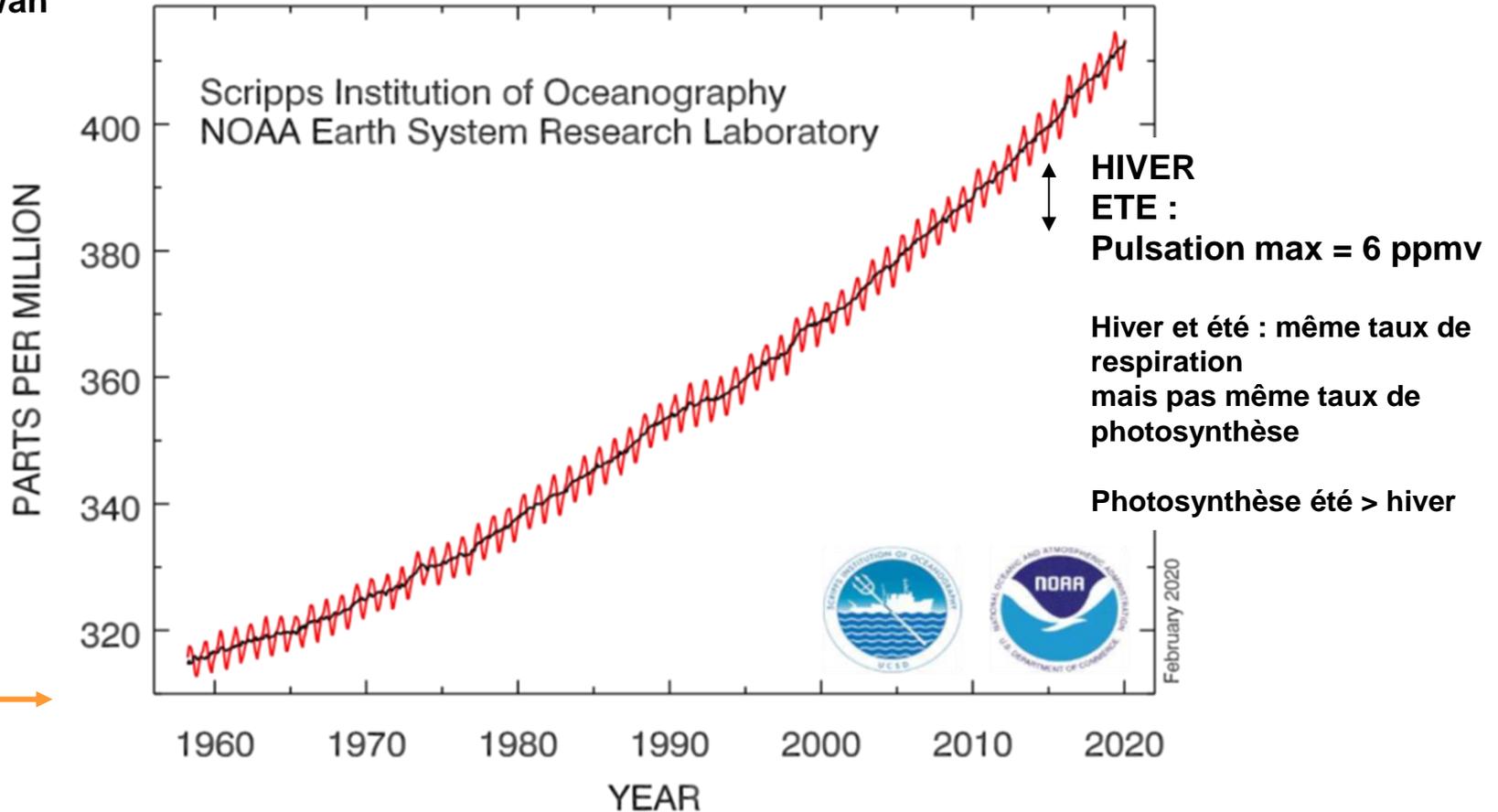
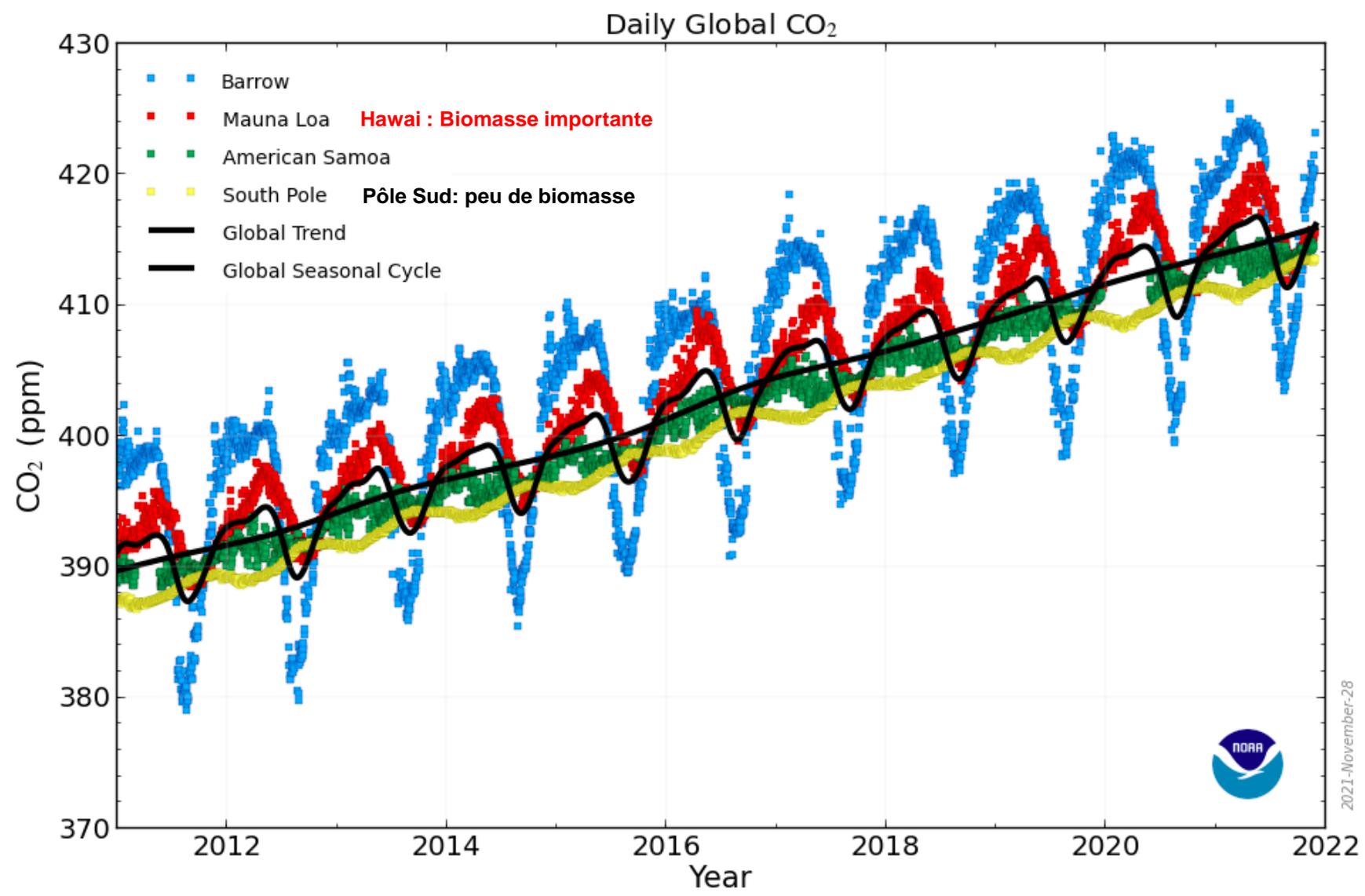


Figure 21.13 CO₂ mixing ratio over the past 1000 years from the recent ice core record and (since 1958) from the Mauna Loa measurement site. The inset shows the period from 1850 in more detail including CO₂ emissions from fossil fuel. Data sources are given in IPCC (1995). The smooth curve is based on a 100 year running mean. All ice core measurements were taken in Antarctica.

A l'échelle des saisons : activité humaine + naturel

ANTHROPISATION
+ 2 ppmv/an





1 - Introduction

2 – Réservoirs et Transferts

3 – Cycle C préanthropique à l'équilibre

4 – Cycle C préanthropique en déséquilibre

5 – Cycle C perturbé par l'homme

Site NOAA

<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/history.html>

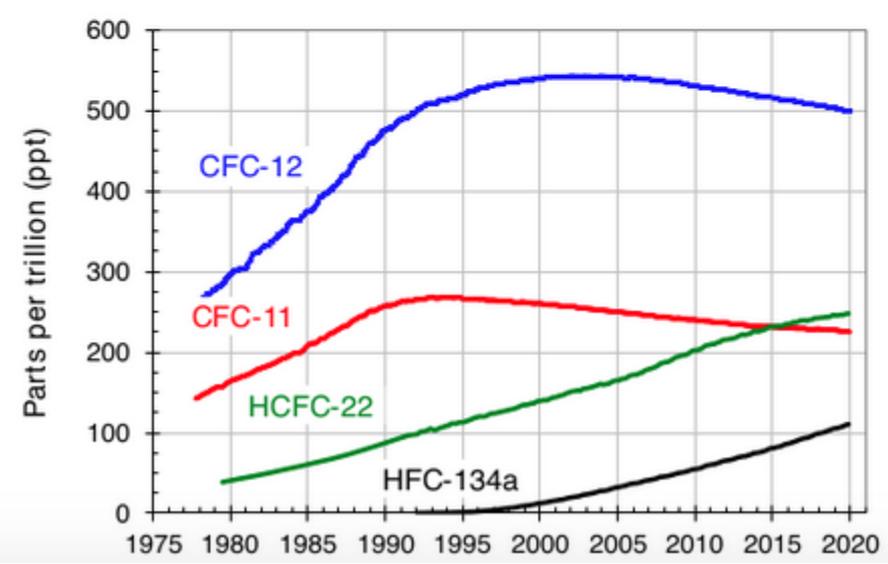
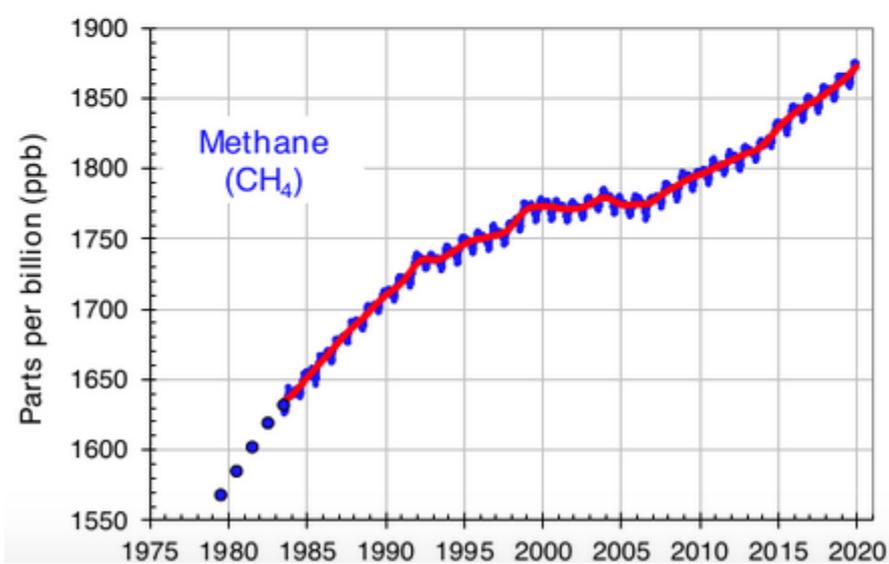
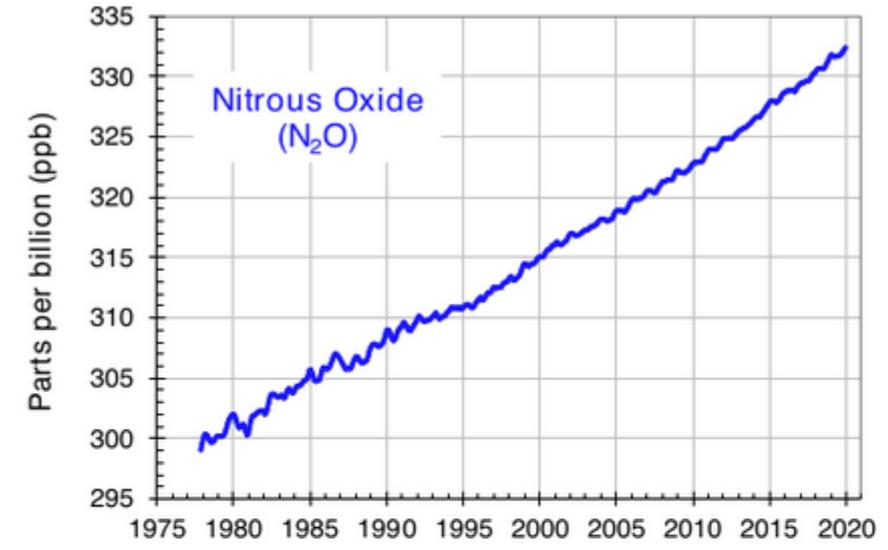
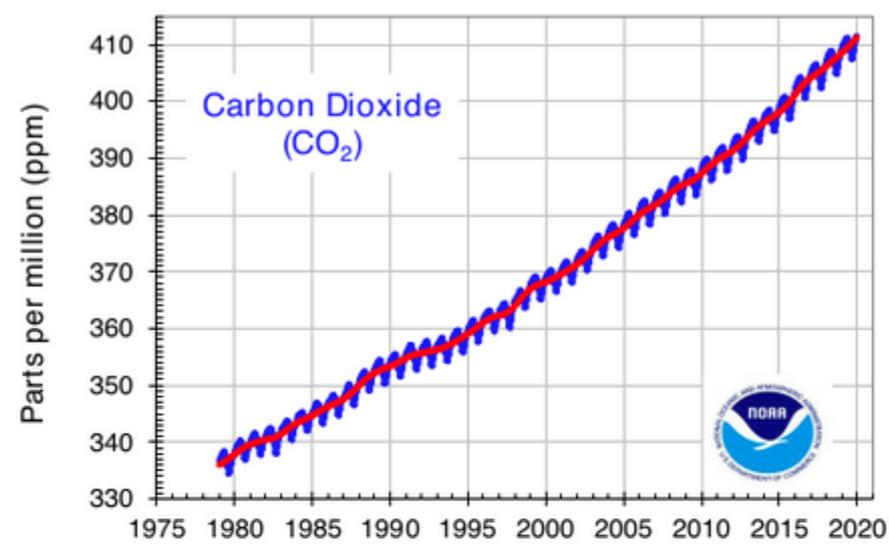
1 - Introduction

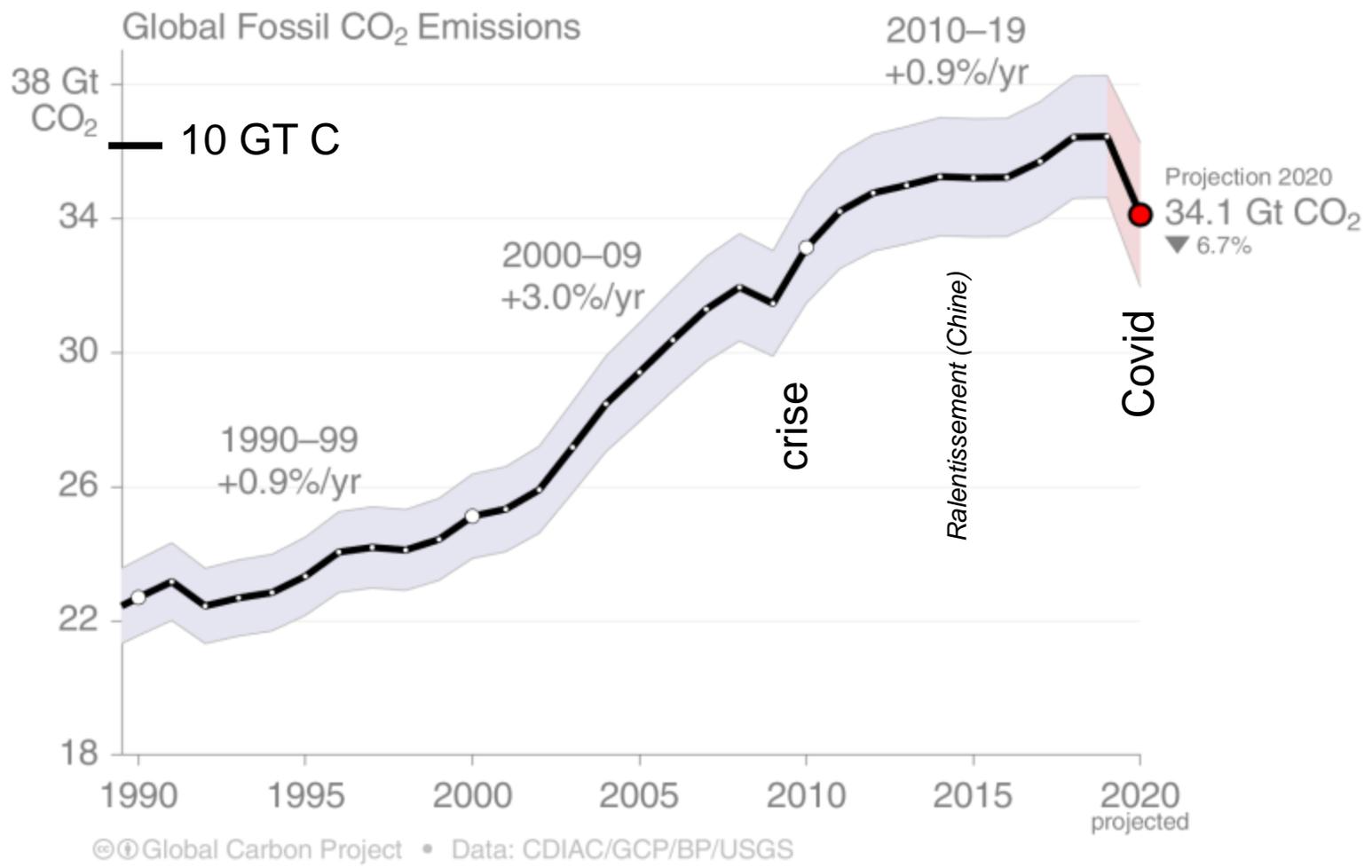
2 – Réservoirs et Transferts

3 – Cycle C préanthropique à l'équilibre

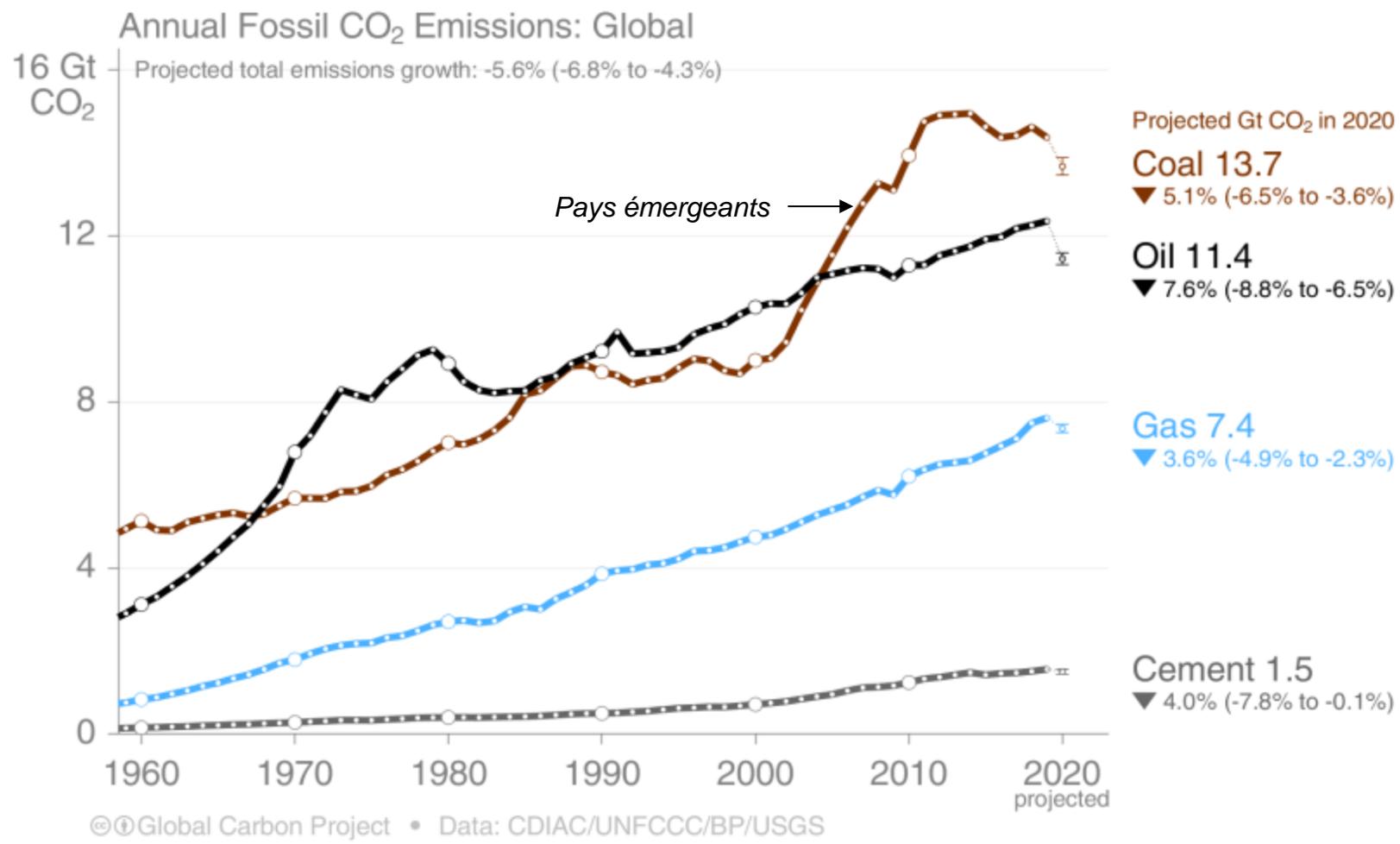
4 – Cycle C préanthropique en déséquilibre

5 – Cycle C perturbé par l'homme





Emissions de CO2 globale d'origine fossile. Source: CDIAC ; Friedlingstein et al 2020 ; Global Carbon Budget 2020.



Emissions annuelles de CO₂ au niveau global de 1960 à 2020, selon le type d'énergie : charbon (coal), pétrole (oil), gaz (gas). Source : Global Carbon Project.

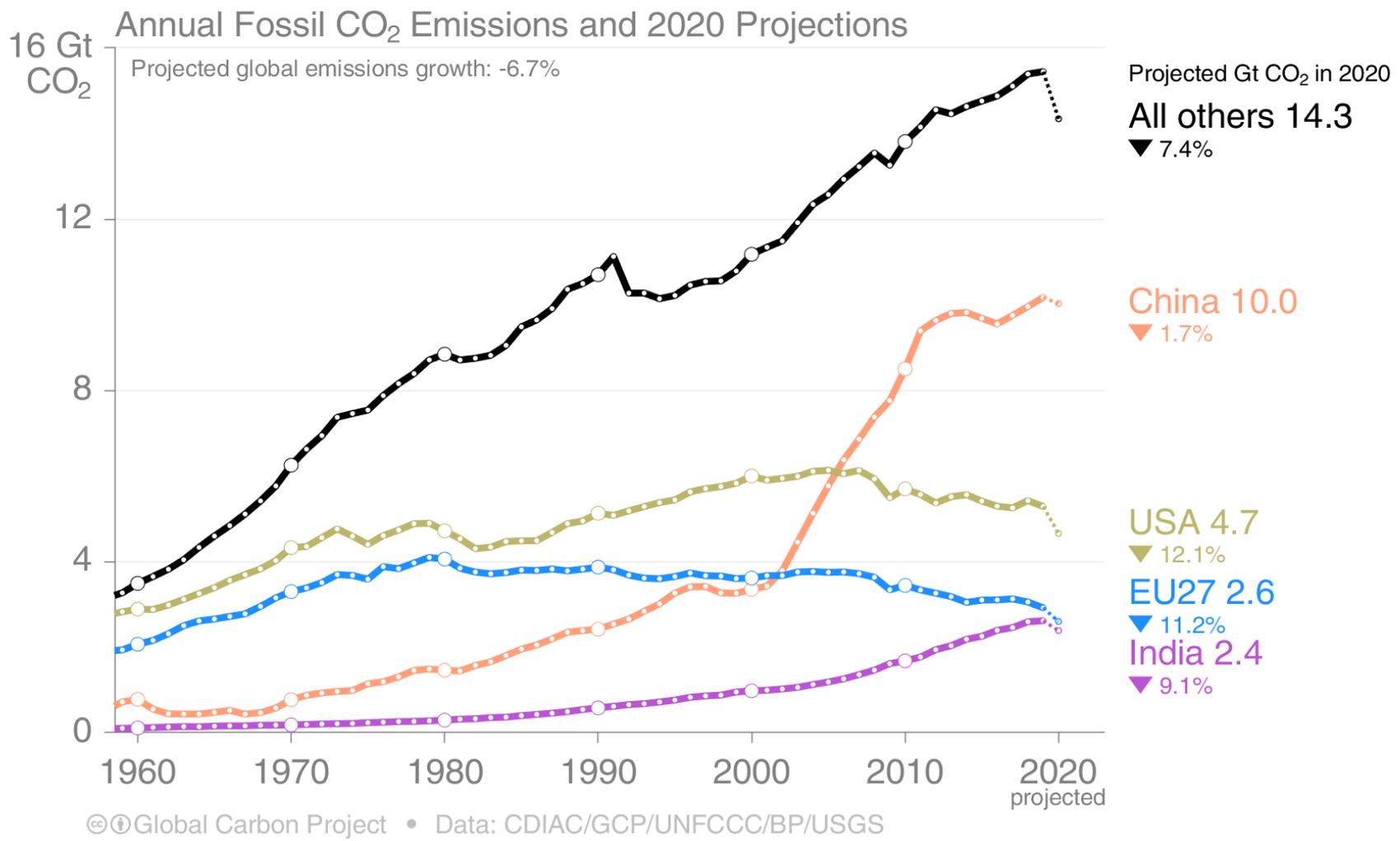
1 - Introduction

2 – Réservoirs et Transferts

3 – Cycle C préanthropique à l'équilibre

4 – Cycle C préanthropique en déséquilibre

5 – Cycle C perturbé par l'homme

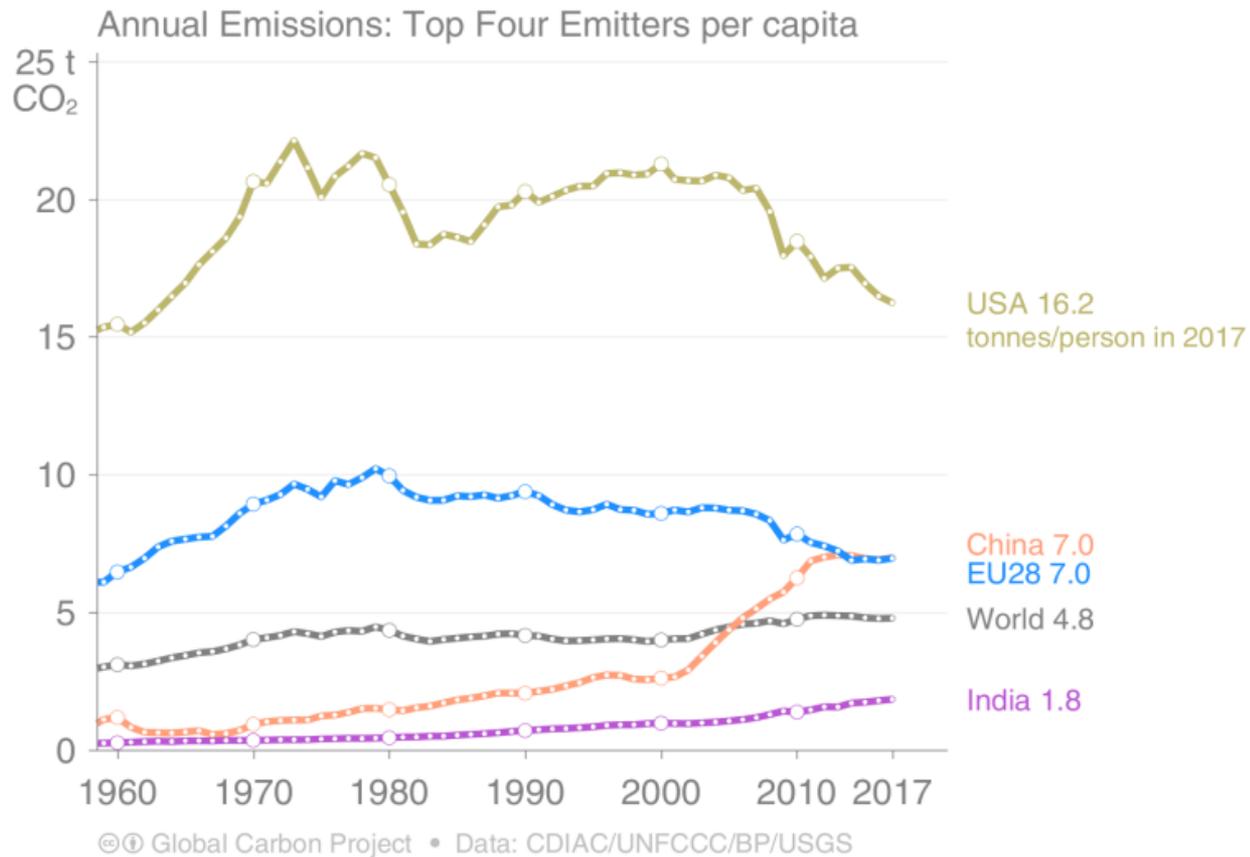


Emissions régionales de CO₂ d'origine fossile. Source : Source: CDIAC; Friedlingstein et al 2020 ; Global Carbon Budget 2020.

2 Evolution historique de l'atmosphère en C

Top emitters: Fossil CO₂ Emissions per capita

Countries have a broad range of per capita emissions reflecting their national circumstances



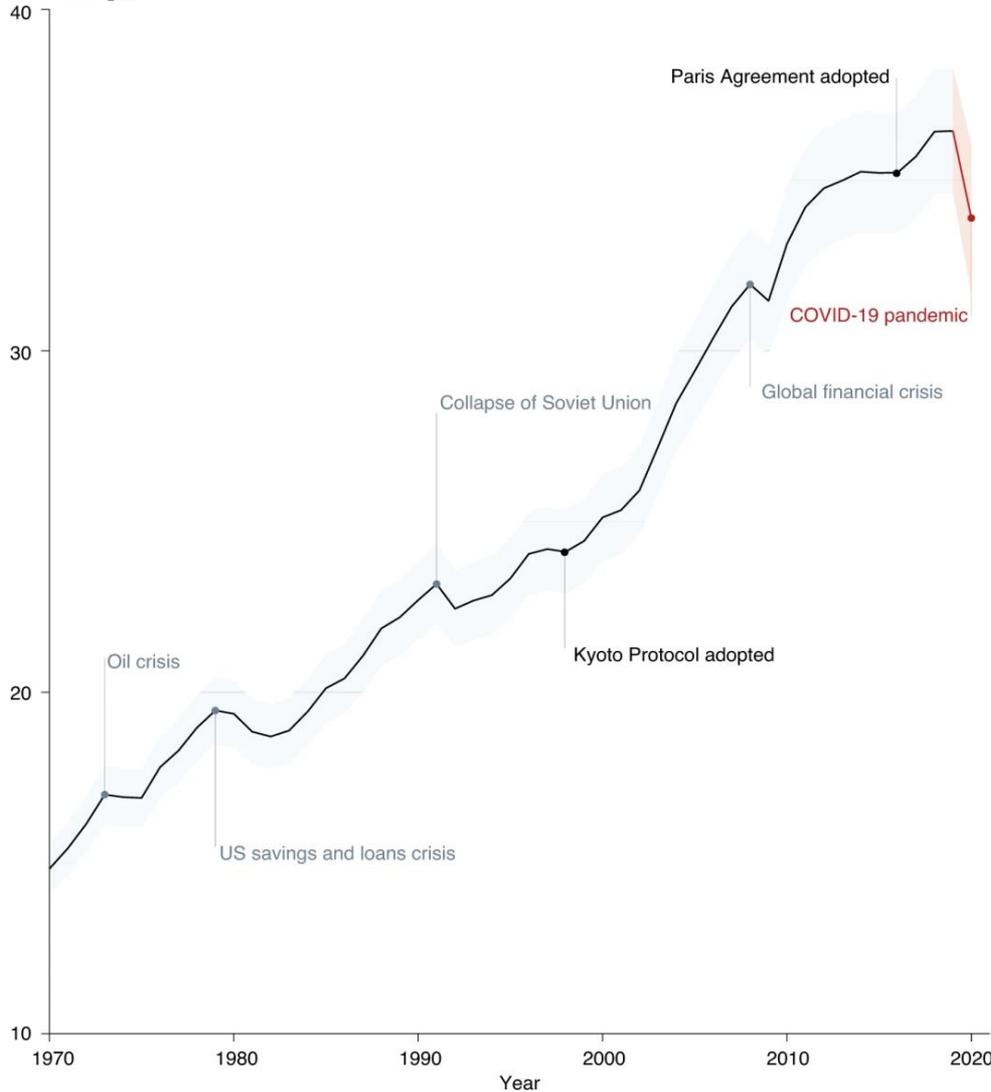
Source: [CDIAC](#); [Le Quéré et al 2018](#); [Global Carbon Budget 2018](#)

-Fossil CO₂ emissions in the post-COVID-19 era

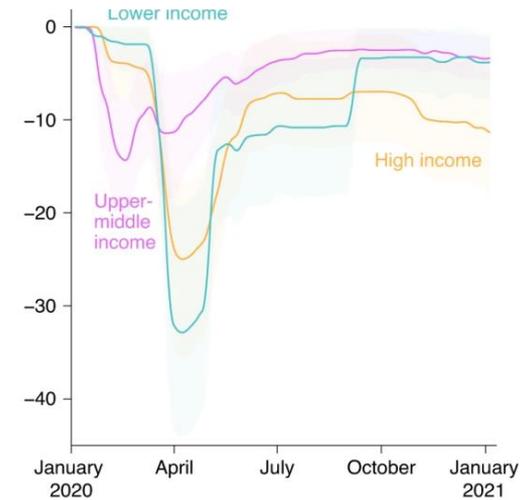
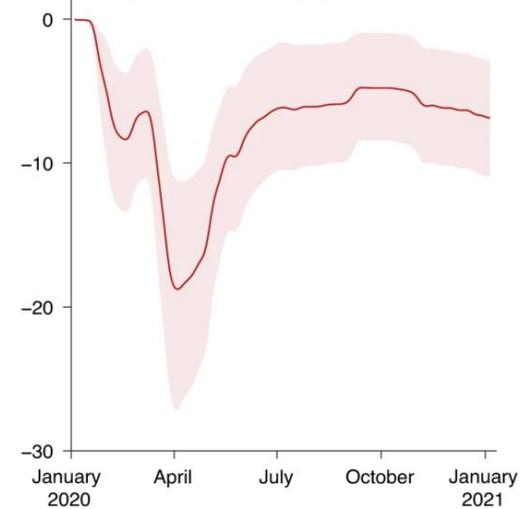
-Corinne Le Quéré, Glen P. Peters, Pierre Friedlingstein, Robbie M. Andrew, Josep G. Canadell, Steven J. Davis, Robert B. Jackson & Matthew W. Jones

-Nature Climate Change volume 11, pages197–199 (2021)

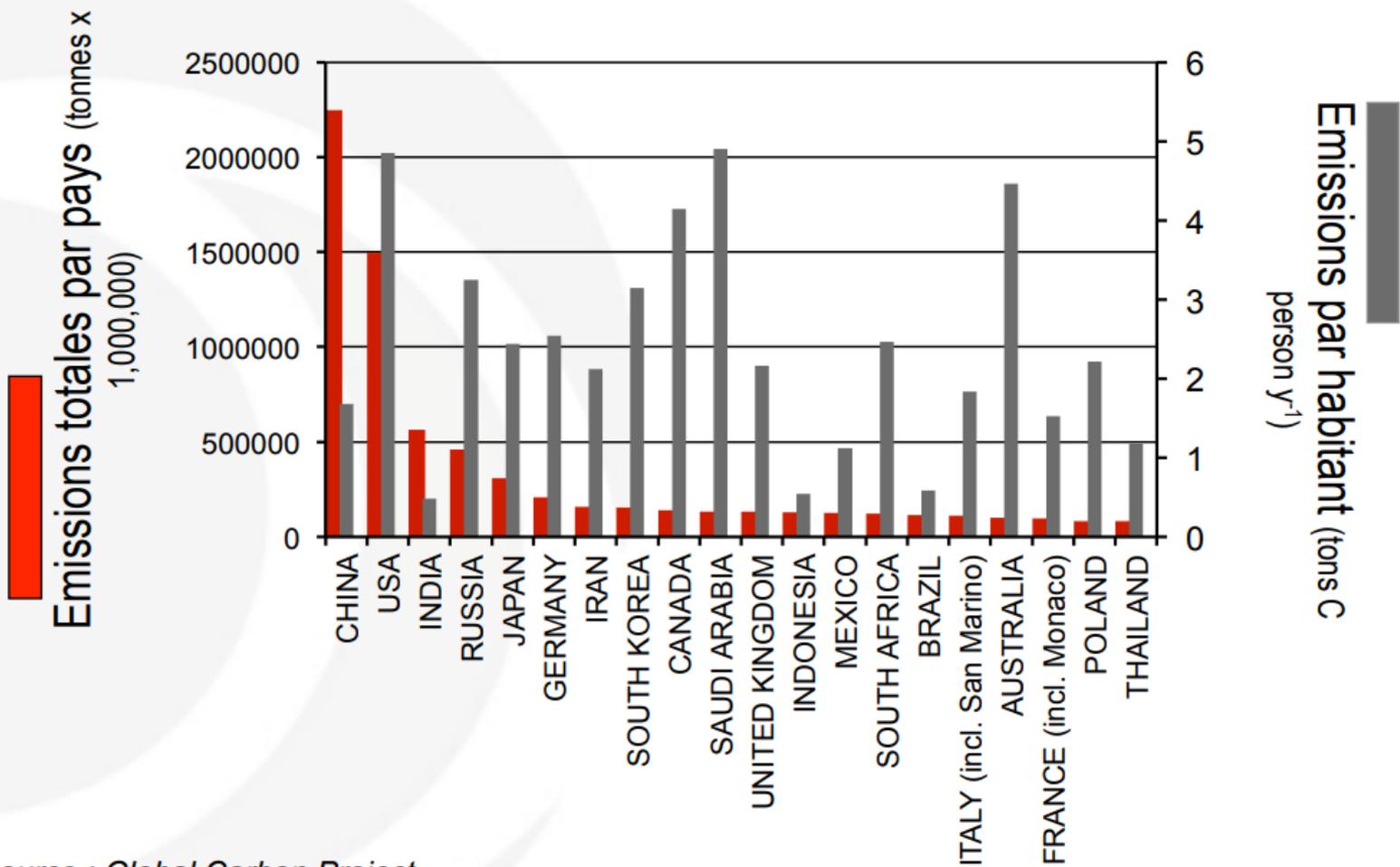
a Annual fossil CO₂ emissions
GtCO₂ yr⁻¹



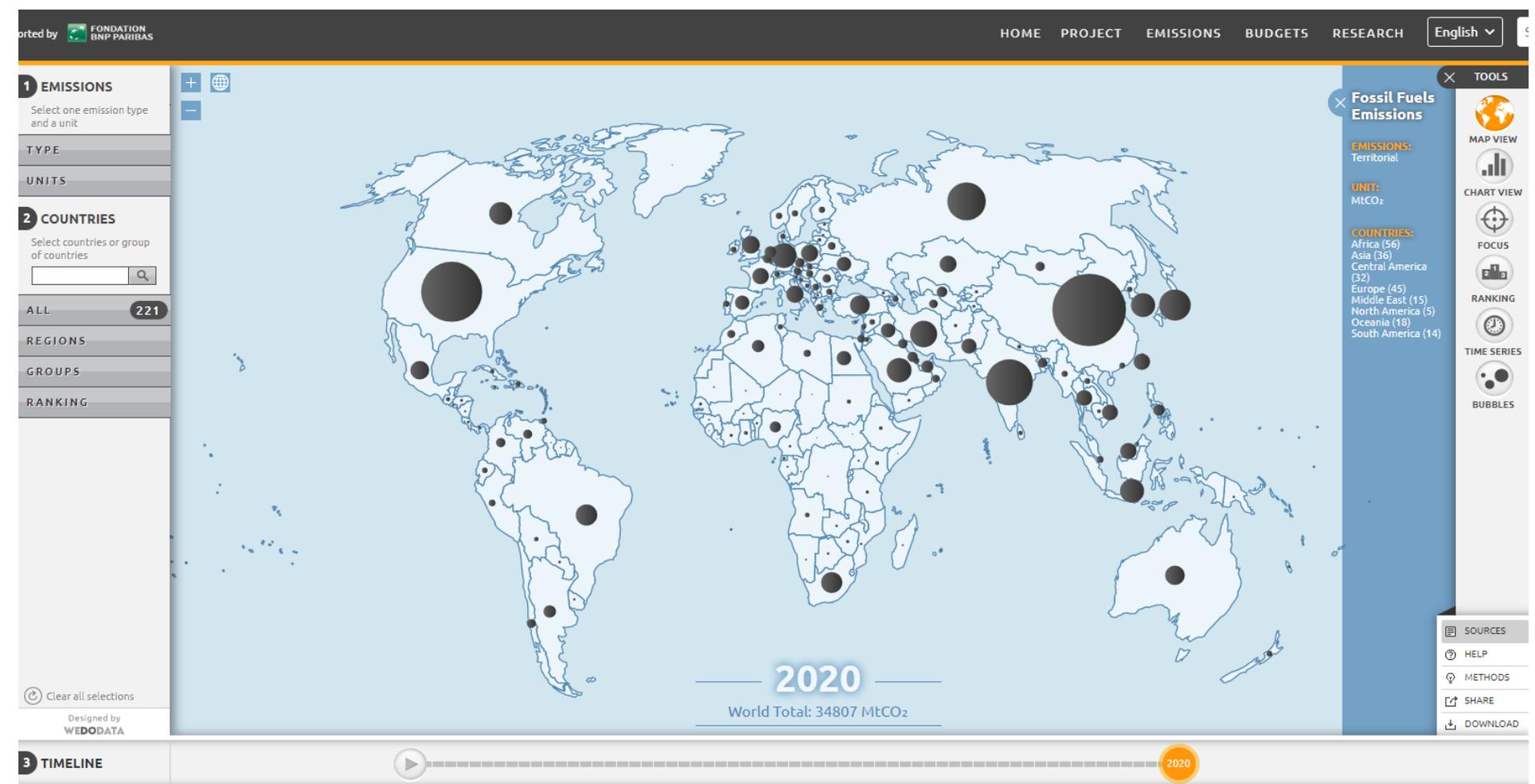
b Daily fossil CO₂ emissions
Change from 2019 levels (%)



Emissions de CO₂ fossile par **pays** et par habitant



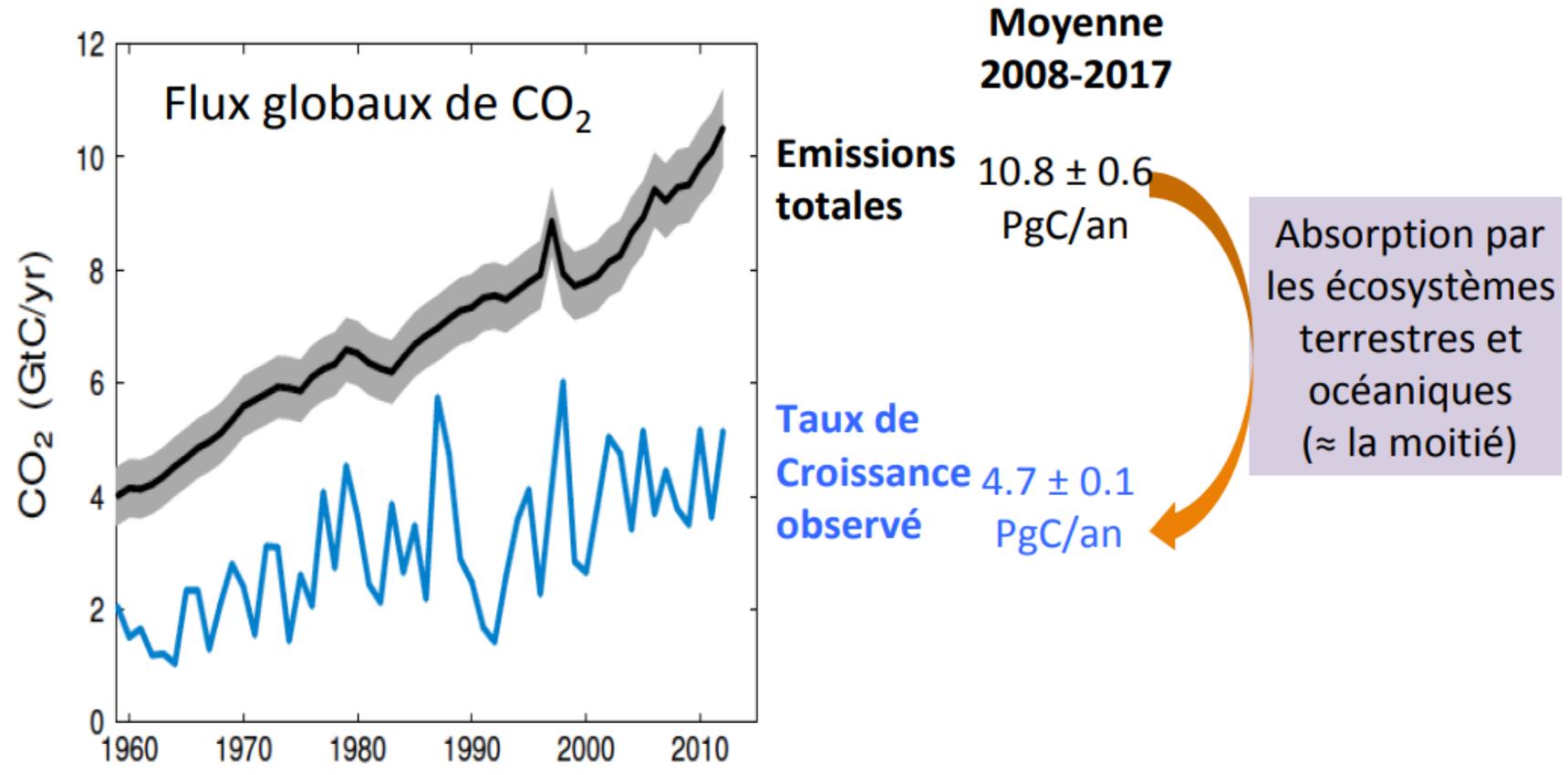
Source : Global Carbon Project



Site GLOBAL CARBONE ATLAS

Où se répartissent aujourd'hui ces 10 GT de C anthropique ?

→ Puits de C existent



Source: CDIAC Data; Global Carbon Project 2018

1PgC = 10¹⁵g de carbone

Devenir des émissions anthropiques de CO₂ (2008–2017)

Sources = Puits



9.4 GtC/yr
87%



13%
1,4 GtC/yr



4.7 GtC/yr
44%



29%
3.2 GtC/yr



22%
2.4 GtC/yr

Déséquilibre du budget:
(différence entre les sources et puits estimés)

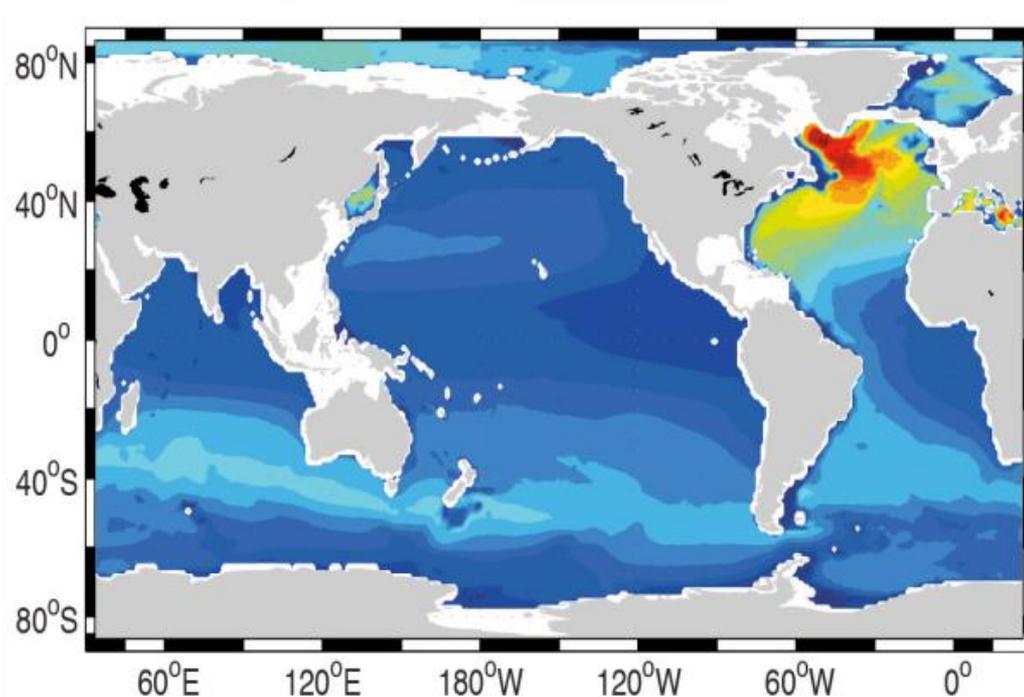
5%
0.5 GtC/yr

+ 10 GT C/an en 2020

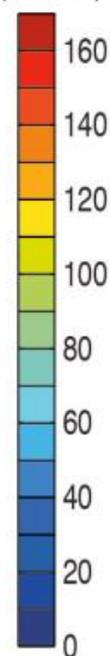
= Depuis 1750 : + 555 Pg C

→ Absorption océan + biosphère

Absorption totale du CO₂ anthropique intégrée verticalement (2010)



(mol m⁻²)



→ Absorption totale
depuis 1750:
155 PgC ± 20%

→ Importance des zones de
plongée d'eau profonde
(i.e. Atlantique nord)

→ Augmentation du puits
entre années 1990 et 2010

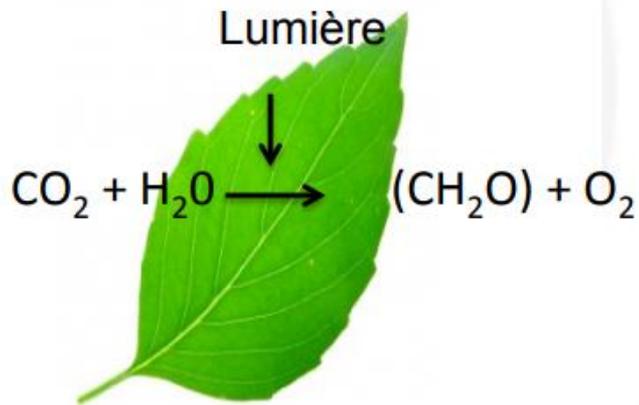
Source : IPCC; Khatiwala et al. 2013

Effet fertilisant du CO₂ atm

Photosynthèse (principe)

CO₂ atmos : substrat limitant

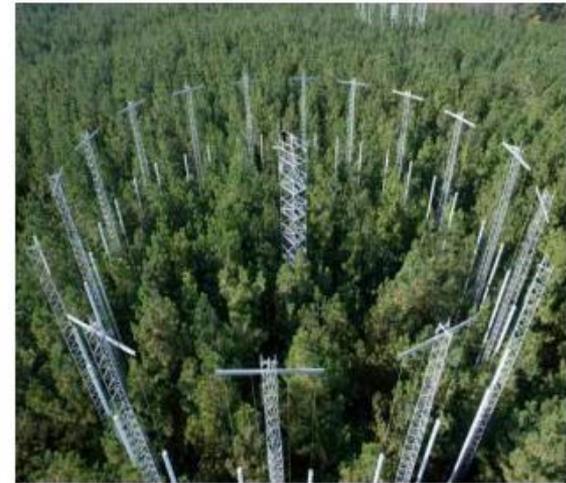
↗ [CO₂]_{atm} ➔ ↗ Assimilation C



Plante chlorophyllienne

Mise en évidence expérimentale

Expérience FACE (doublement CO₂)



➔ Augmentation de la productivité
primaire nette ≈ 20-40%
(Norby et al. 2010)

Devenir des émissions anthropiques de CO₂ (2008–2017)

Sources = Puits



9.4 GtC/yr
87%



13%
1,4 GtC/yr



4.7 GtC/yr
44%



29%
3.2 GtC/yr



22%
2.4 GtC/yr

Déséquilibre du budget:
(différence entre les sources et puits estimés)

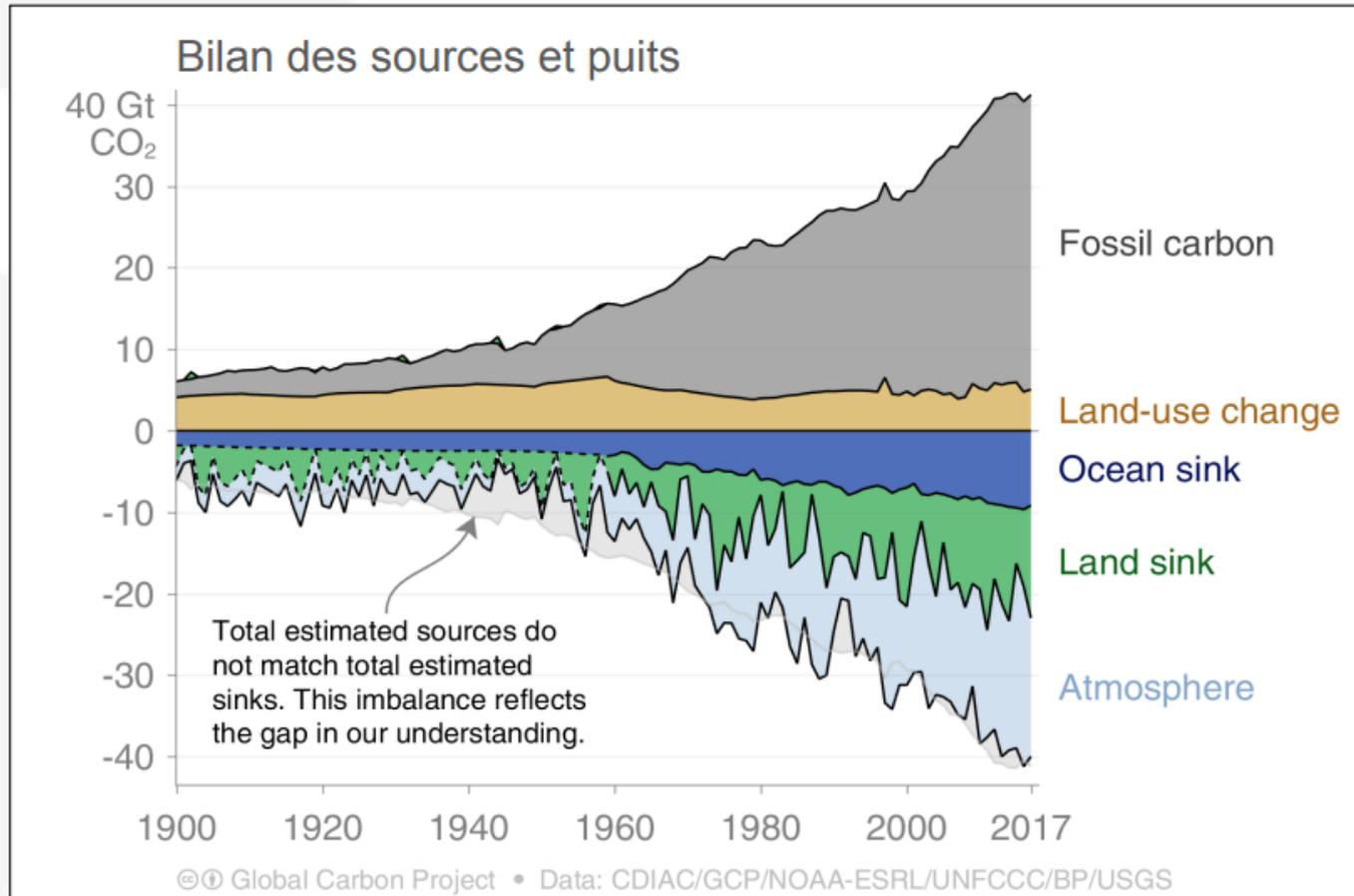
5%
0.5 GtC/yr



Attention

LE CYCLE ANTHROPIQUE

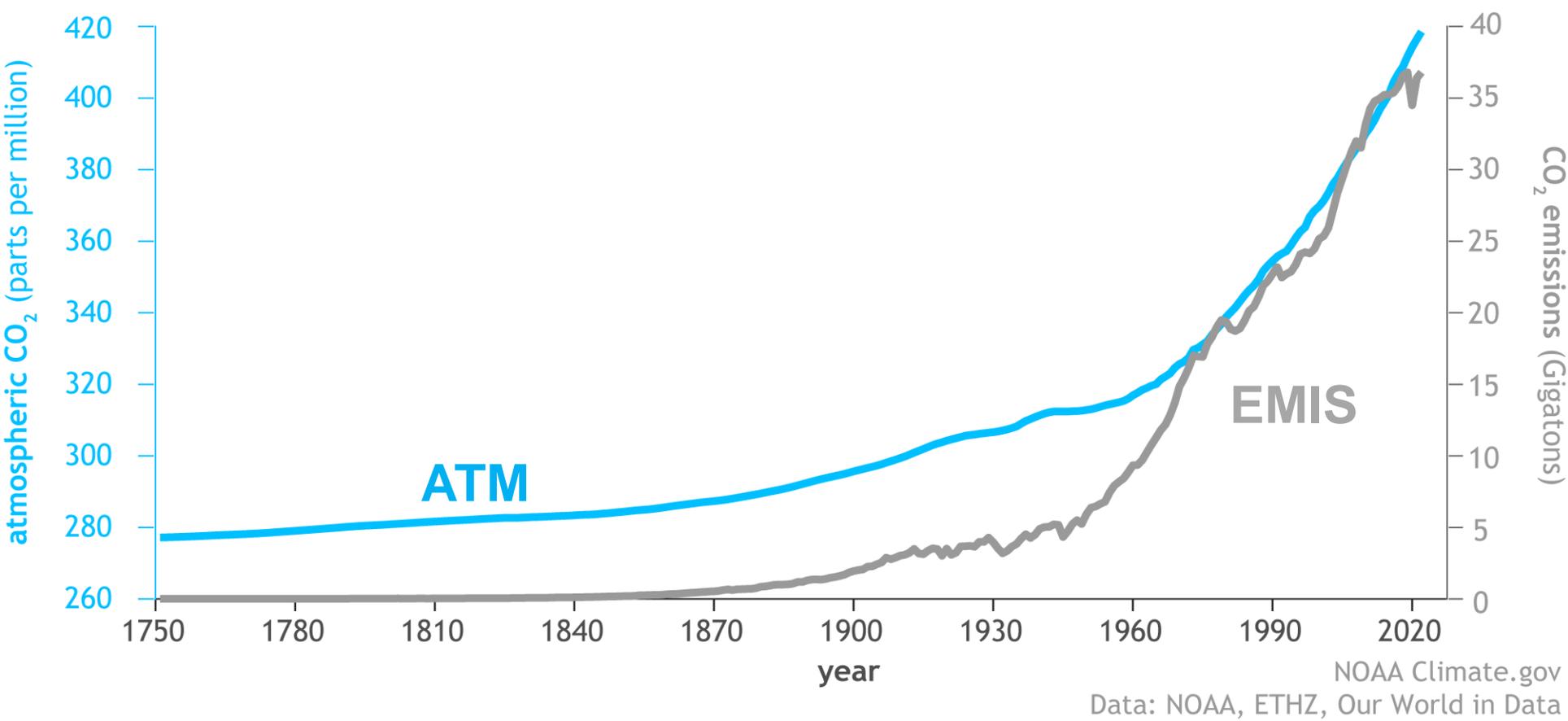
Depuis 1750, les activités humaines ont émis 555 ± 85 PgC (fossil & Land use)

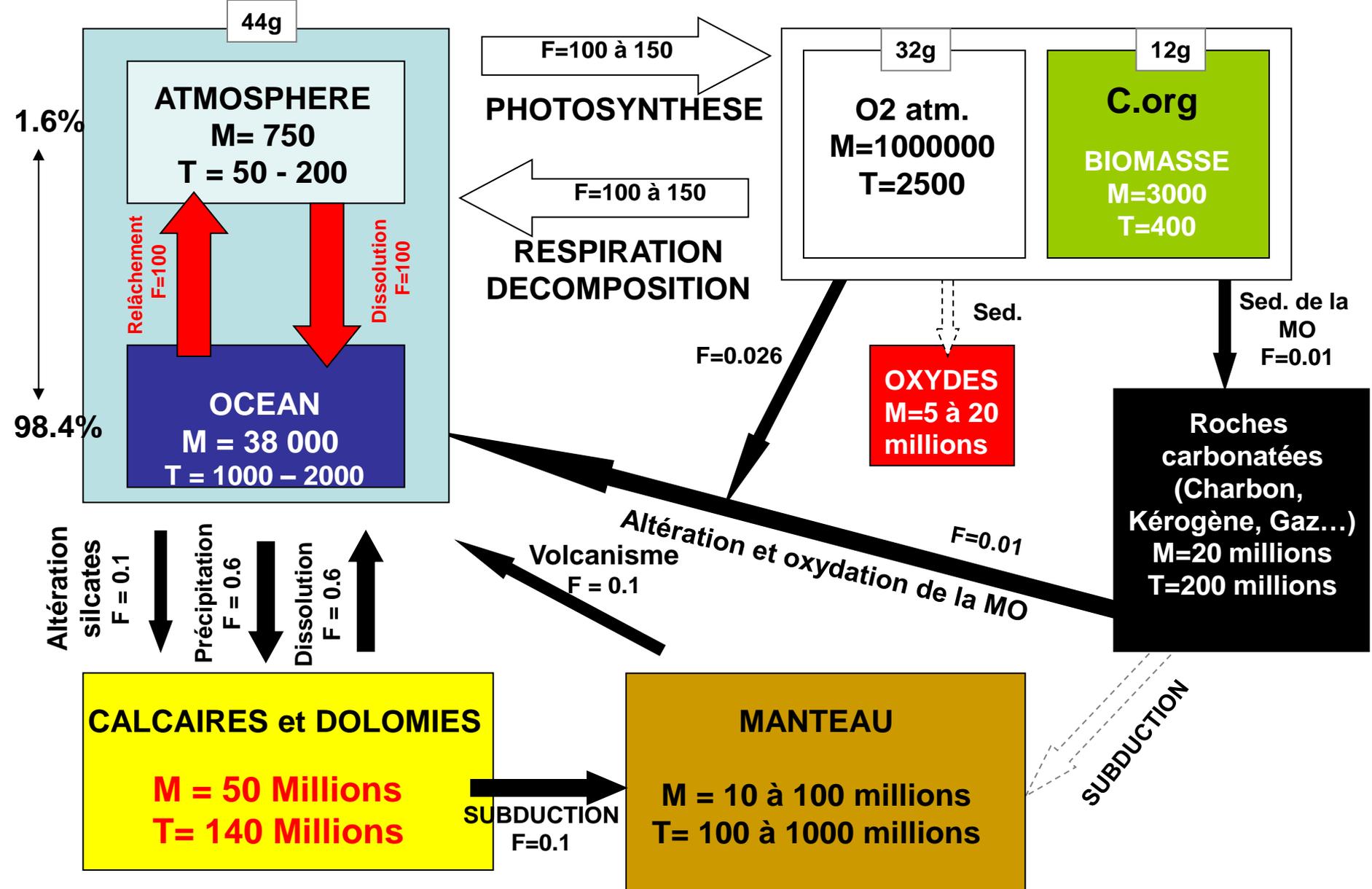


Le terme “déséquilibre” entre émissions et puits totaux révèle notre manque de compréhension!

Source: [CDIAC](#); [NOAA-ESRL](#); [Global Carbon Budget 2018](#)

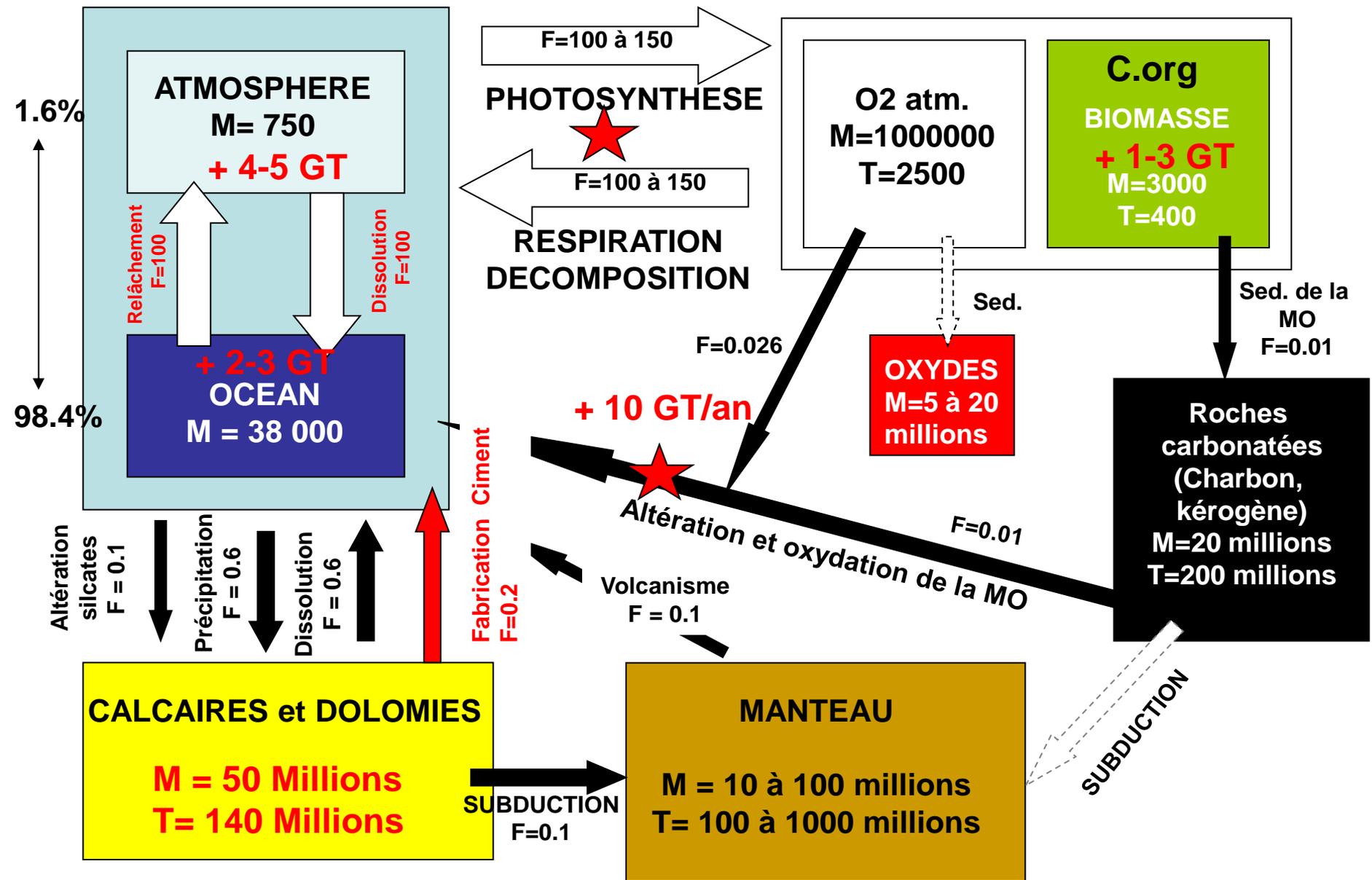
CO₂ atmosphérique global comparé aux émissions anthropiques de CO₂ (GT)





CYCLE PRE-ANTHROPIQUE SIMPLIFIE DU CARBONE

M = Masse en GT de C ou O
 F=Flux annuel en GT/an
 T=temps de résidence en années
 Flèche grise: négligeable



CYCLE ANTHROPIQUE SIMPLIFIE DU CARBONE

M = Masse en GT de C ou O
 F=Flux annuel en GT/an
 T=temps de résidence en années
 Flèche grise: négligeable



**ACADÉMIE
DE NICE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Merci de votre attention

Merci au site de Planet Terre (ENS Lyon)

Un grand merci à Pierre Thomas (ENS Lyon)

merci à Philippe Peylin (CNRS)

https://www.sfpnet.fr/uploads/tinymce/PDF/CEE/SFP_climat-Energie_Jan2019_peylin.pdf

**Merci pour la conférence de septembre 2019 en ligne de Laurent Bopp
Rétroaction entre le climat et le cycle du carbone**

<https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/climat-carbone-Bopp-2019.xml>