

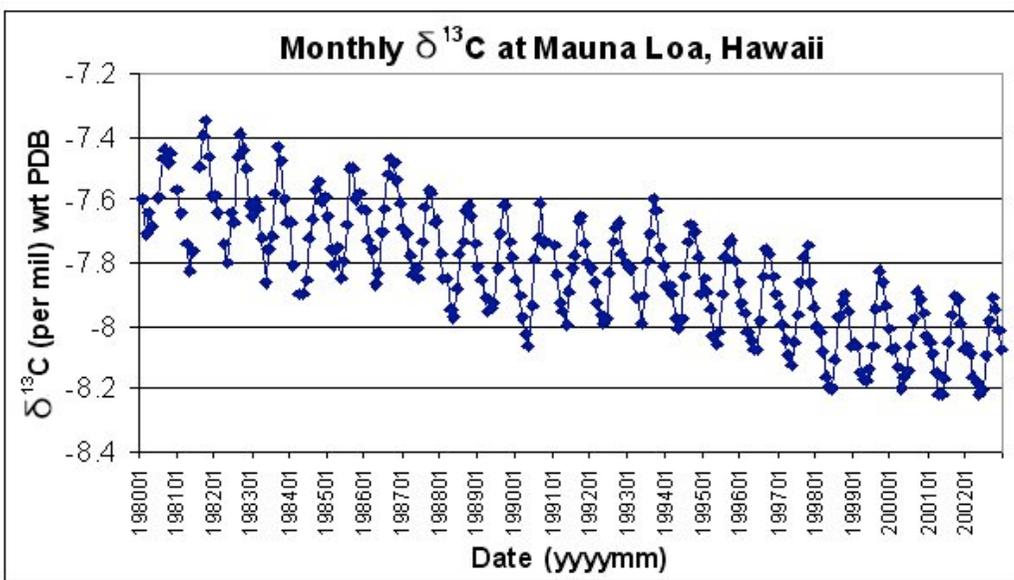
Plan

- I. Un changement de la chimie de l'atmosphère sans précédent.
- II. L'origine du CO₂ en excès
- III. La séquestration océanique du C
- IV. La séquestration continentale
- V. Le cycle du carbone perturbé et les prévisions.
- Que faire ???????

D'où vient ce CO₂ ?

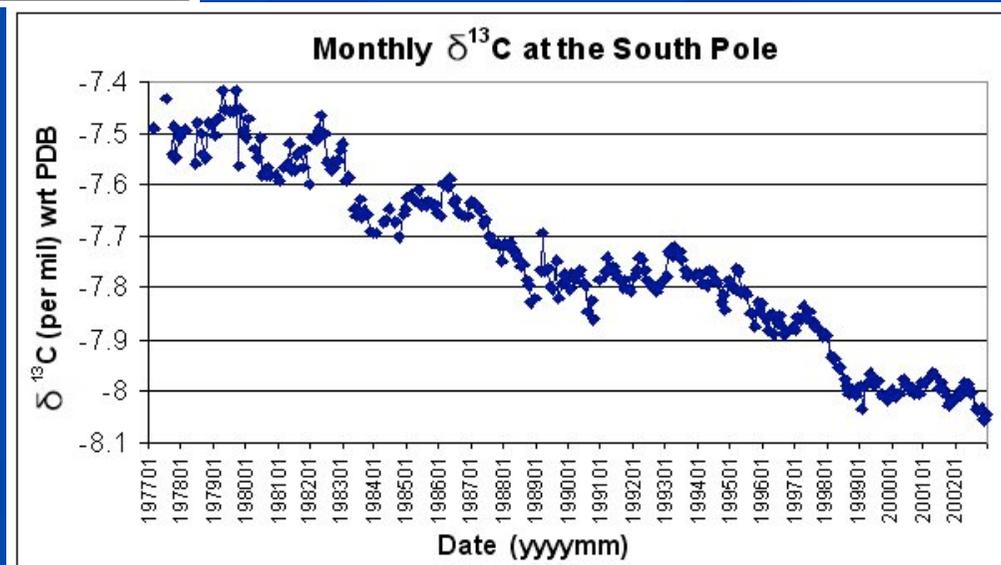
- La composition isotopique du carbone des arbres en ¹⁴C ne cesse de baisser. Ceci est compatible avec un apport de carbone privé de ¹⁴C, donc de C fossile.
- Quelle est la quantité de C injectée dans l'atmosphère par l'homme

Les isotopes du carbone

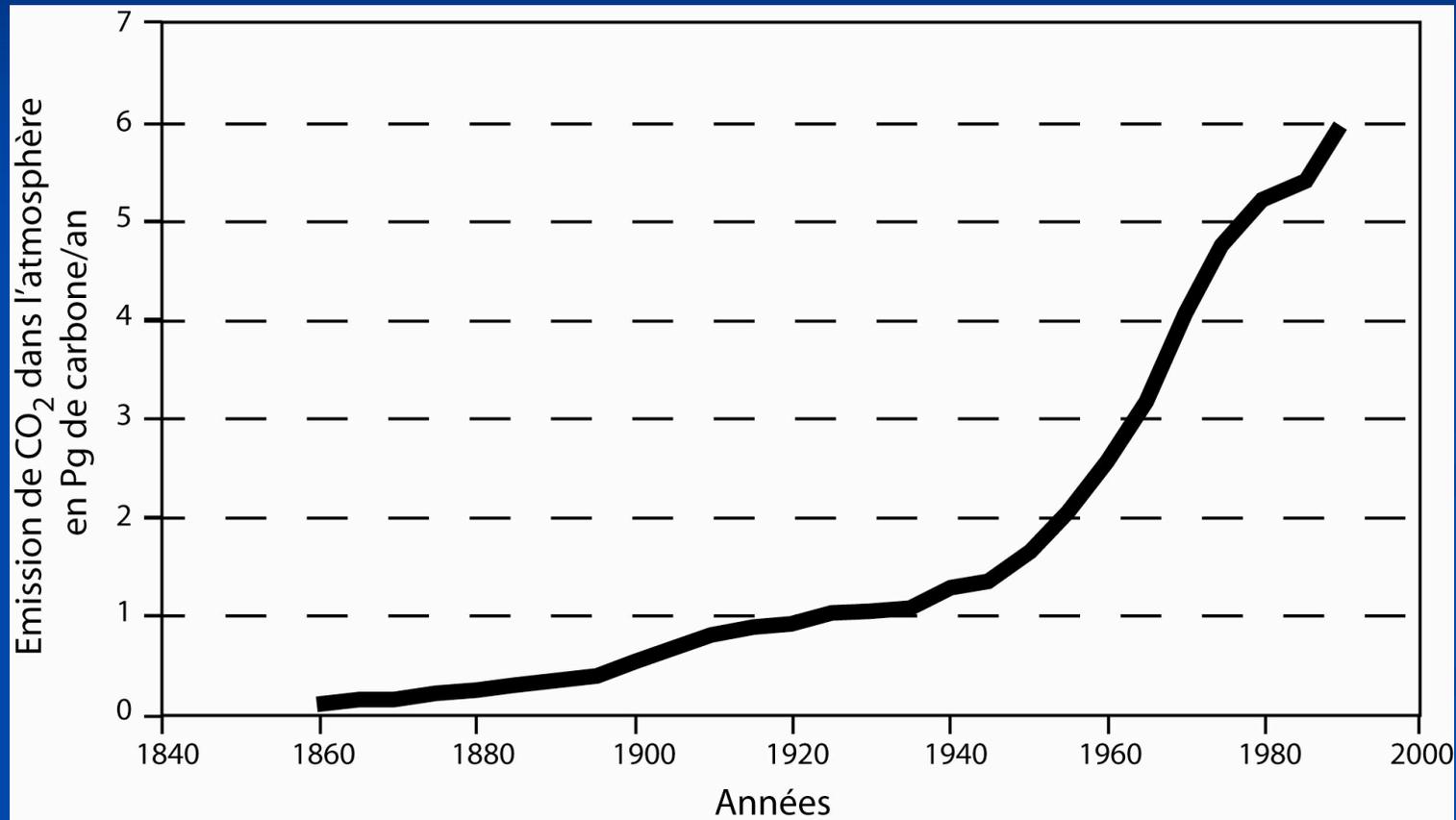


Ils démontrent
l'origine humaine
du CO_2

$$\delta^{13}\text{C} = \left[\frac{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{échantillon}}}{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{standard}}} - 1 \right] \cdot 1000$$



Combustion des charbons, pétroles et gaz

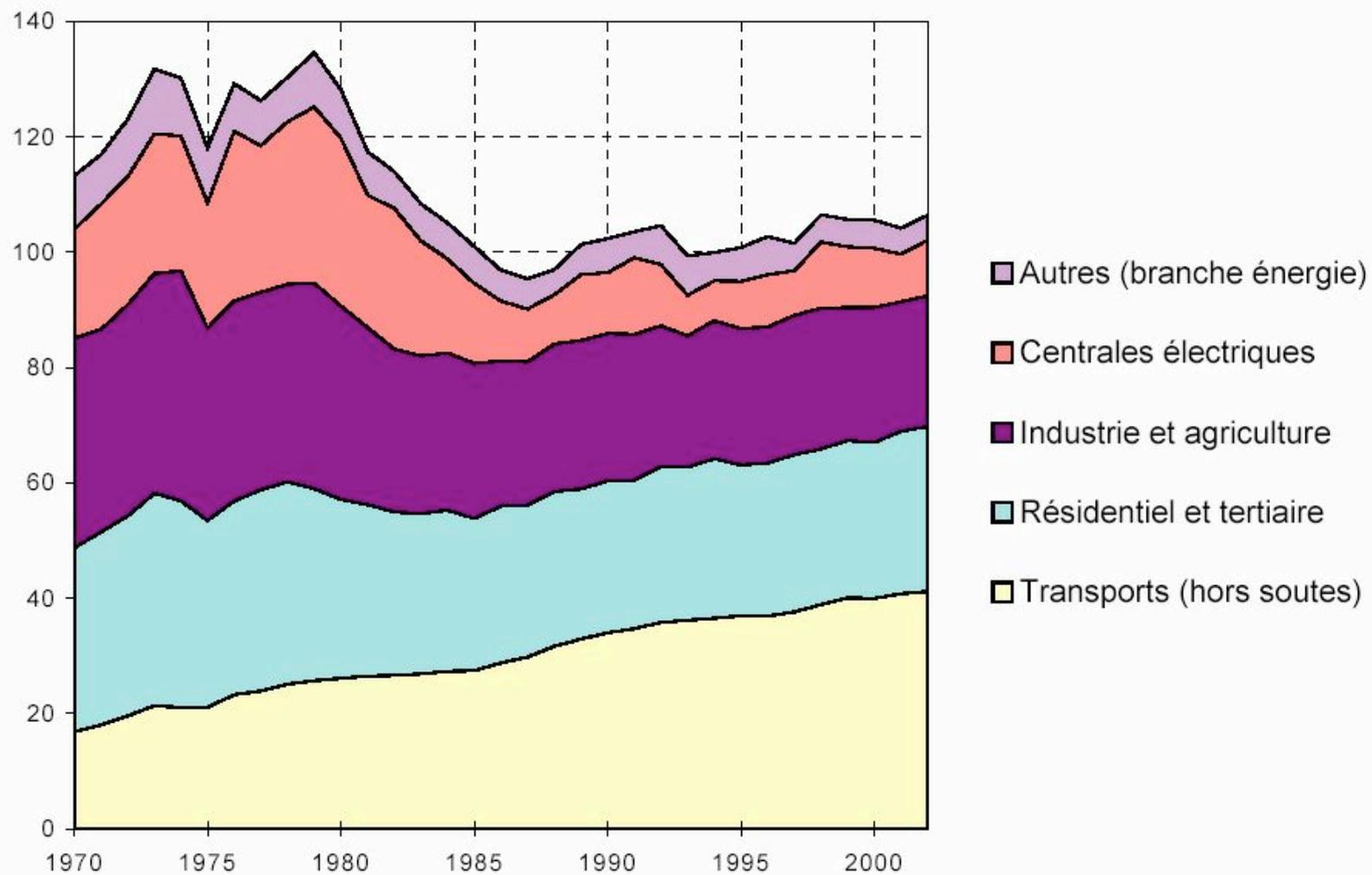


Quantité de C total injectée dans l'atm : 230 GtC = 230 PgC.

C'est environ la moitié du stock de carbone dans l'atmosphère

Emissions de CO2 d'origine énergétique en 1997

- L'américain : 20,5 t
- L'australien : 17 t
- L'allemand : 11 t
- Le russe : 7,8 t
- Le français : 6,2 t
- Le chinois : 2,6 t
- La Chine est quand même responsable de 14 % des émissions...



Émissions de CO₂ de la France (corrigées du climat, en millions de tonnes de carbone)

Déforestation

- 1860-1990 : 121 PgC de bois coupé/brulé

Fabrication des ciments

- 100 PgC environ
- Quelle serait l'augmentation de CO₂ dans l'atmosphère due à la déforestation, aux ciments et à la combustion du carbone fossile ?
- Volume de l'atm : $3,86 \cdot 10^9 \text{ km}^3$
- Masse de l'atm : $5,13 \cdot 10^{18} \text{ kg}$
- Volume molaire gaz parfait : 22,4 l/mol
- Masse molaire du carbone 12 g/mol.

Puits de carbone

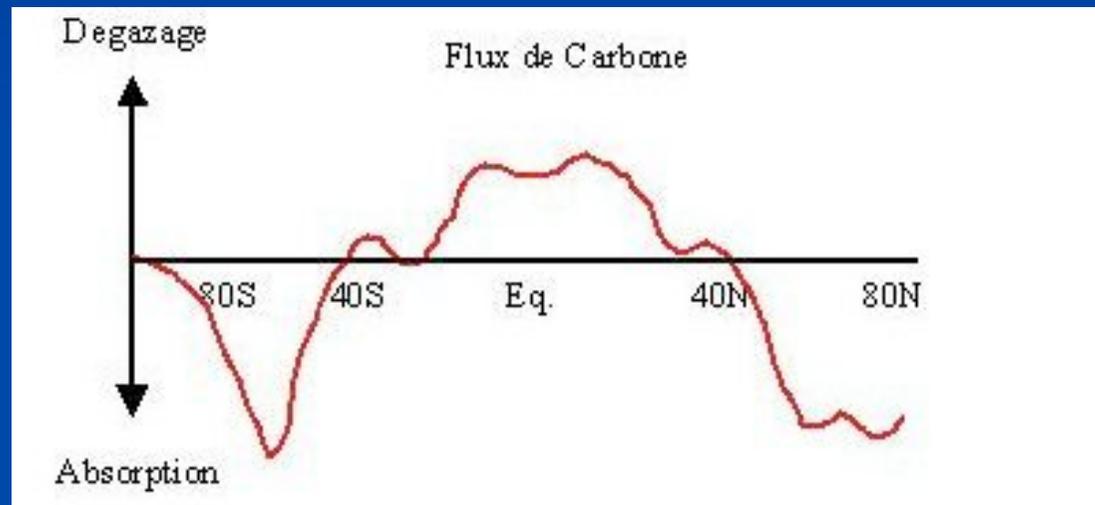
- Le puit continental
 - 550 PgC « vivant »
 - 1500 PgC « mort » dans les sols
- L'océan
 - 900 PgC en surface
 - 3 PgC biomasse marine
 - 37100 PgC dans l'océan intermédiaire et profond
- Les variations fines de la quantité d'oxygène dans l'atmosphère permettent de quantifier les flux atm-continent (O échangée) et atm-ocean (pas d'O échangé).

Le puit océanique

- Deux réservoirs océaniques : le C organique (3 PgC) et le stock inorganique (37100 PgC) pour l'essentiel dans les eaux profondes.
- Deux mécanismes de pompage : la pompe biologique et la pompe à solubilité.
- A l'état pré-anthropique, le système devrait être grossièrement en équilibre : sources équatoriales compensées par des puits des hautes latitudes.

Solubilité

- Loi de Henry et système carbonate. Capacité de tampon de l'acidité. Régions puits et régions sources.



- La dissolution du CO_2 dans l'océan acidifie l'océan. 10 % d'augmentation de CO_2 atm conduit à une augmentation de 1% de HCO_3^- dans l'eau.

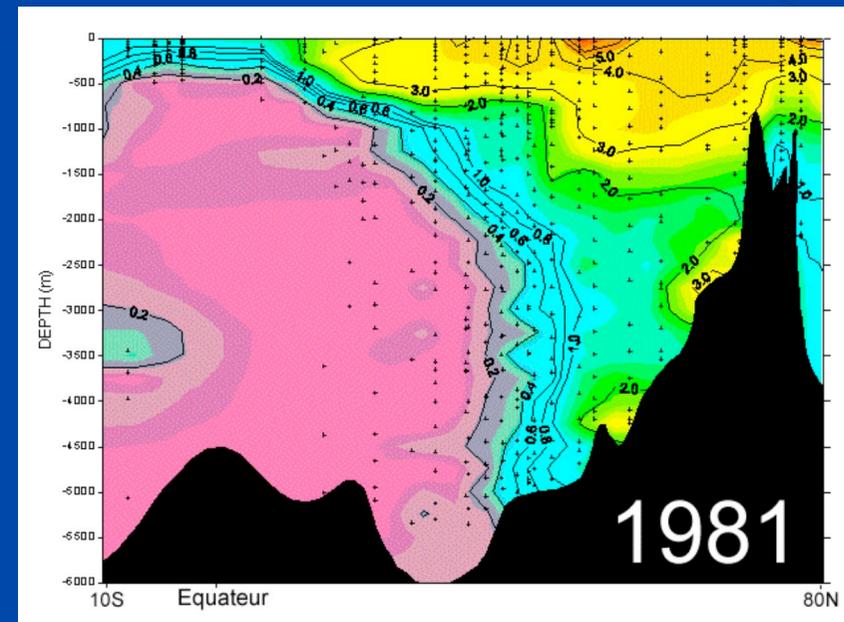
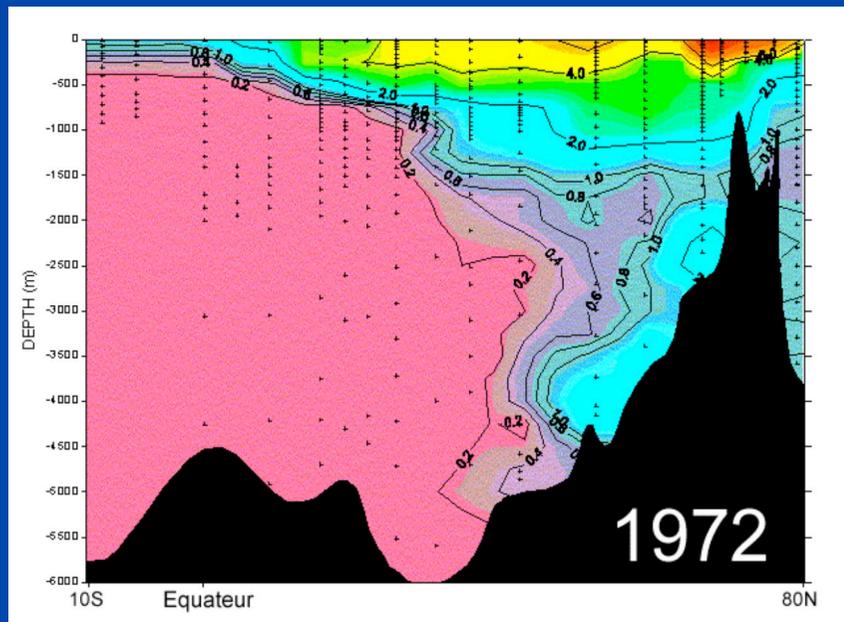
		-log K					
		5° C	10° C	15° C	20° C	25° C	40° C
$\text{CaCO}_3(\text{s})$	$= \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	8.35	8.36	8.37	8.39	8.42	8.53
$\text{CaCO}_3(\text{s}) + \text{H}^+$	$= \text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+}$	-2.22	-2.13	-2.06	-1.99	-1.99	-1.69
H_2CO_3^*	$= \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$	6.52	6.46	6.42	6.38	6.35	6.30
$\text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}$	$= \text{H}_2\text{CO}_3^*$	1.20	1.27	1.34	1.41	1.47	1.64
HCO_3^-	$= \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$	10.56	10.49	10.43	10.38	10.33	10.22

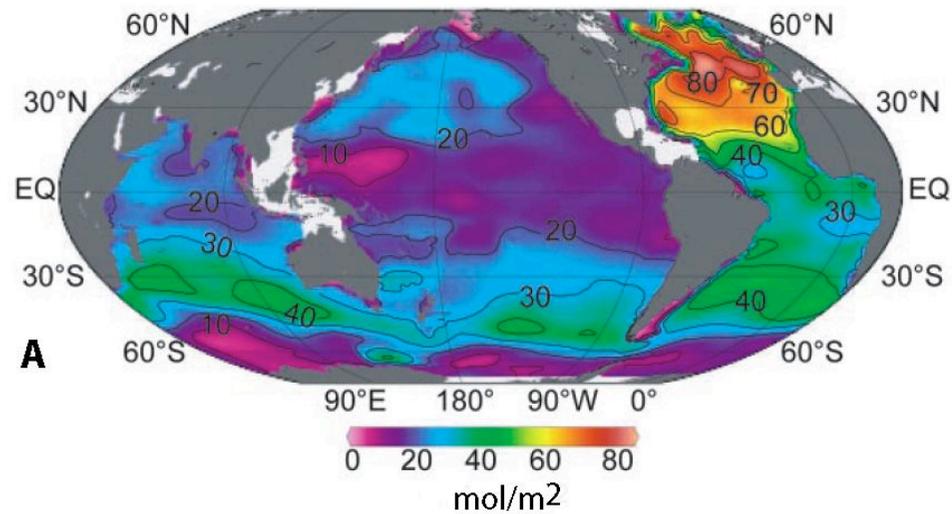
La constante de Henry (K) baisse quand la température augmente.

A 20 °C, $[\text{H}_2\text{CO}_3] = 370 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-1,41} = 10^{-3,43} \cdot 10^{-1,41} = 10^{-4,84}$ mol/l
 Donc, indépendant du pH de la solution.

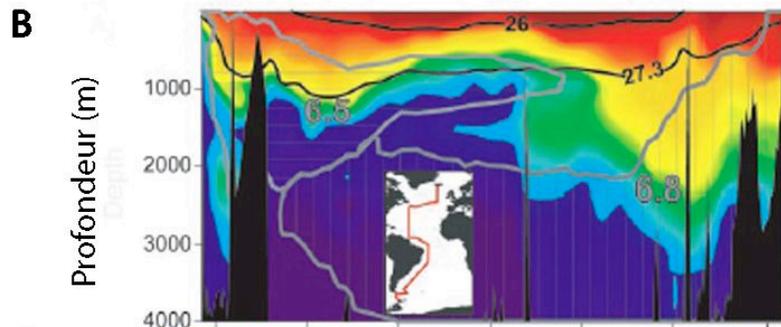
Invasion du tritium des bombes

- Vitesses de 10 cm/s par endroit à 1 mm/s

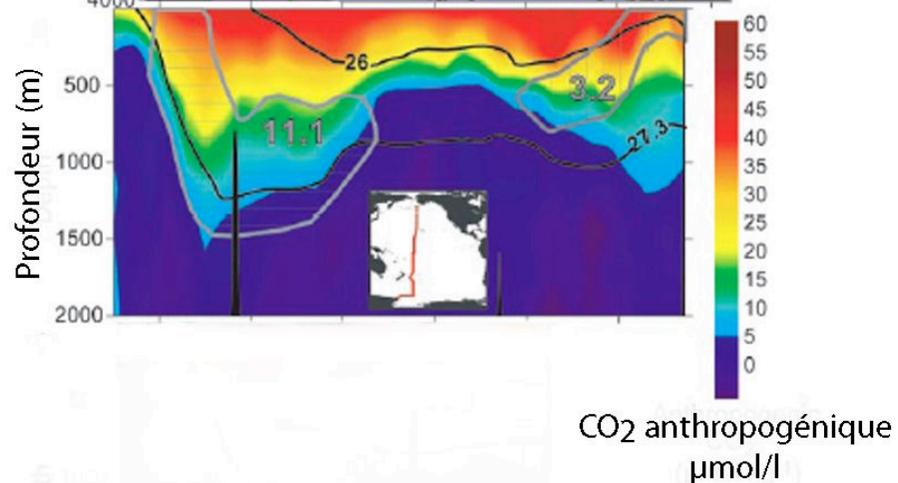




A



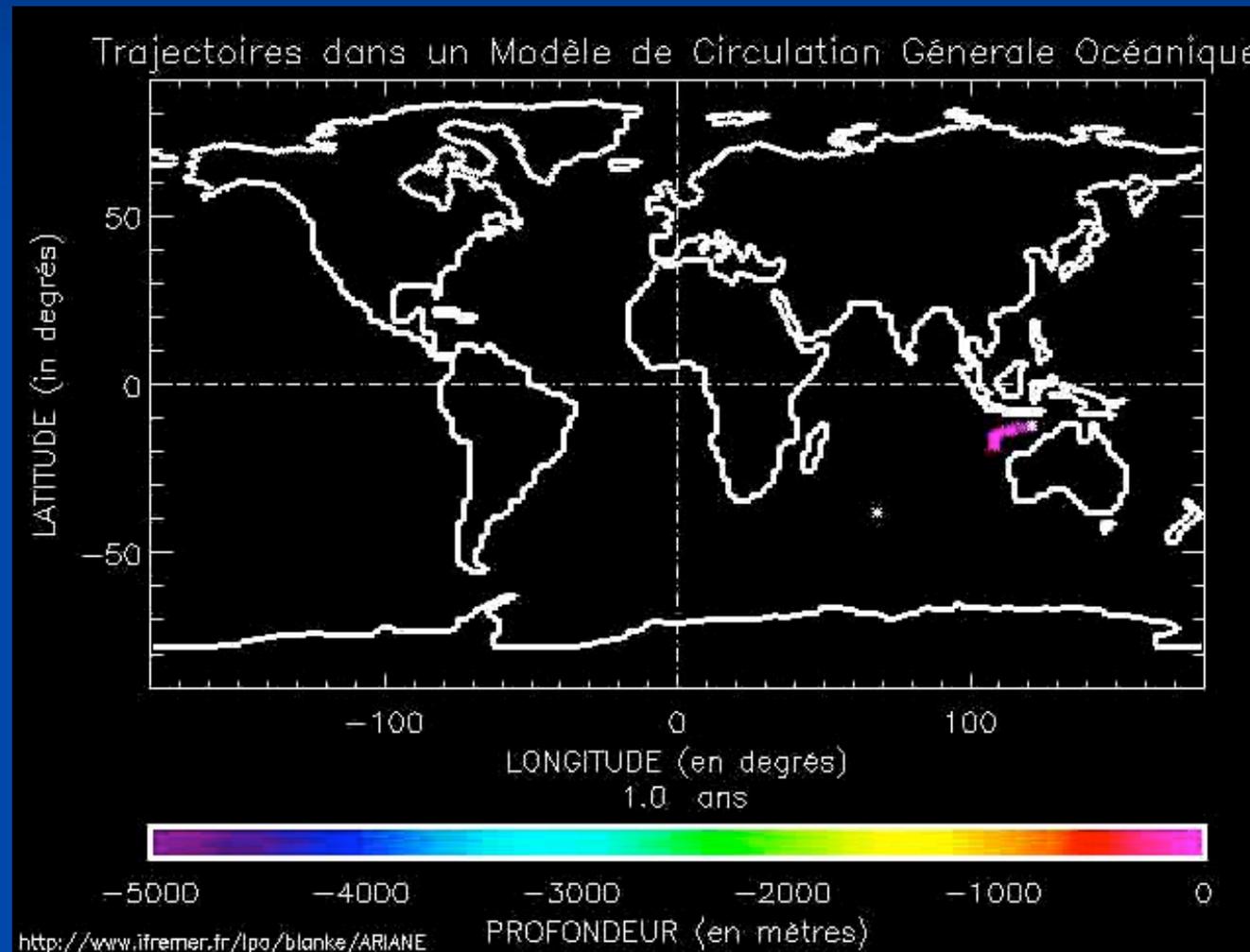
B



Concentrations en C anthropique dans l'océan.

- A. intégration le long d'une colonne d'eau.
- B. Concentration en $\mu\text{mol/l}$ dans un profil N-S de l'océan Atlantique
- C. Concentration en $\mu\text{mol/l}$ dans un profil N-S de l'océan Pacifique.

La circulation océanique : inertie de l'océan



Explications de ces profils

- L'océan Atlantique Nord ne représente que 15% de la surface de la Terre, mais stocke 23% du carbone anthropique. 60% du C anthropique (océanique) est dans l'océan l'hémisphère Sud.
- Avec la profondeur: l'essentiel du C anthropique est en surface car le mode de pénétration est un échange avec l'atmosphère. La pénétration est très variable selon les zones océaniques. Une eau est d'autant plus riche qu'elle a été exposée longtemps et que son facteur de Revelle est bas ($d \text{ PCO}_2/d \text{ DIC}$). Forte pénétration ($60 \mu\text{mol/l}$) dans les océans subtropicaux, faible dans le North Pacific ou la concentration en DIC est moindre. 50% du C anthropogénique est au dessus de 400 m, la moyenne mondiale est $5 \mu\text{mol/kg}$. La répartition du C anthropogénique suit la dynamique océanique. Seulement 7% du C anthropogénique se trouve à des profondeurs de plus de 1700 m.
- Stockage total dans l'océan= 250 PgC.

Bilan en PgC

- Combustion des hydrocarbures : 244 PgC
- Déforestation
- Ciments
- Total injecté : 380 PgC
- Puit océanique : 120 PgC
- Accumulation dans l'atmosphère : 165 PgC

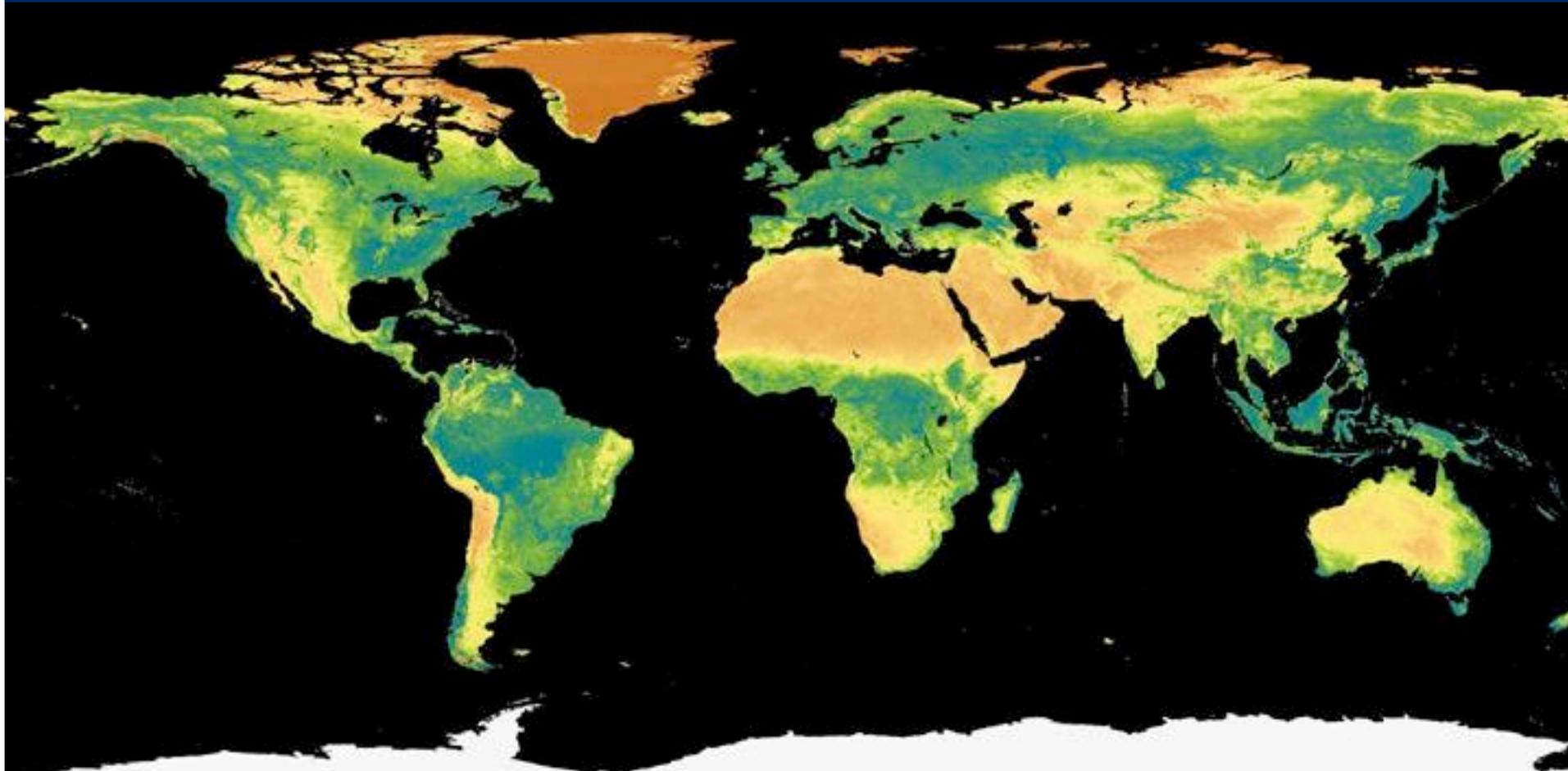
Plan

- I. Un changement de la chimie de l'atmosphère sans précédent.
- II. L'origine du CO₂ en excès
- III. La séquestration océanique du C
- **IV. La séquestration continentale**
- V. Le cycle du carbone perturbé et les prévisions.
- Que faire ???????

Puits de carbone

- Le puit continental
 - 550 PgC « vivant »
 - 1500 PgC « mort » dans les sols
- Les variations fines de la quantité d'oxygène dans l'atmosphère permettent de quantifier les flux atm-continent (O échangée) et atm-ocean (pas d'O échangé).

Surfaces continentales



Effet climatique physique + effet climatique chimique

Effet Physiques de la végétation sur le climat

- Albédo : une forêt est plus sombre qu'une surface enneigée. Une forêt de feuillus est plus claire qu'une forêt de résineux. Par ex. le remplacement de la Toundra par la forêt réchauffe la planète. La disparition des forêts tempérées a augmenté l'albédo de la Terre.
- Evaporation: A même énergie lumineuse incidente, la végétation favorise l'évaporation et donc la consommation d'énergie (chaleur latente). Les forêts augmentent la rugosité de la planète et diminuent l'effet du vent.

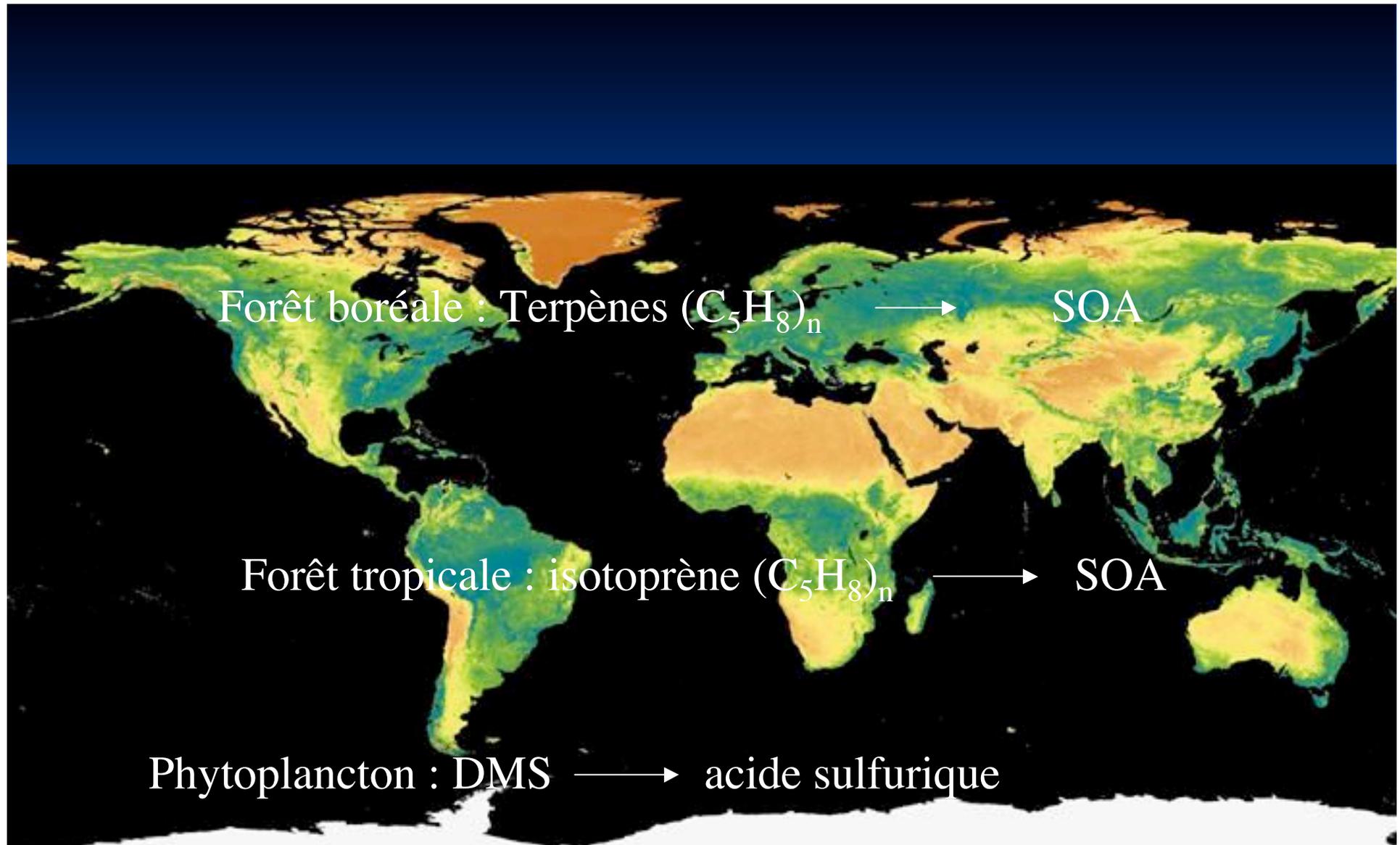
Puit continental: effets chimiques

La végétation échange des gaz avec l'atmosphère

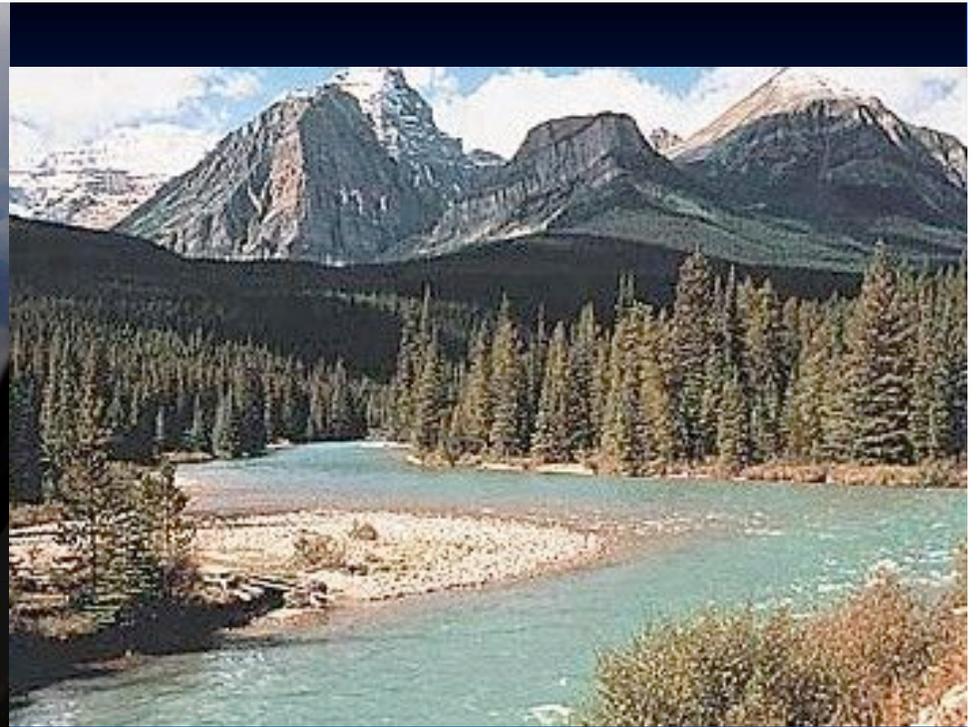
-H₂O, CO₂, les plus évidents, ce sont des gaz à effet de Serre

-CH₄: rizières

-Oxydes d'azote et isoprènes, diméthylsulfures qui conduisent à la formation d'aérosols.



Formation de brouillard les secondary organic aerosols et nucléation des nuages : effets climatiques.



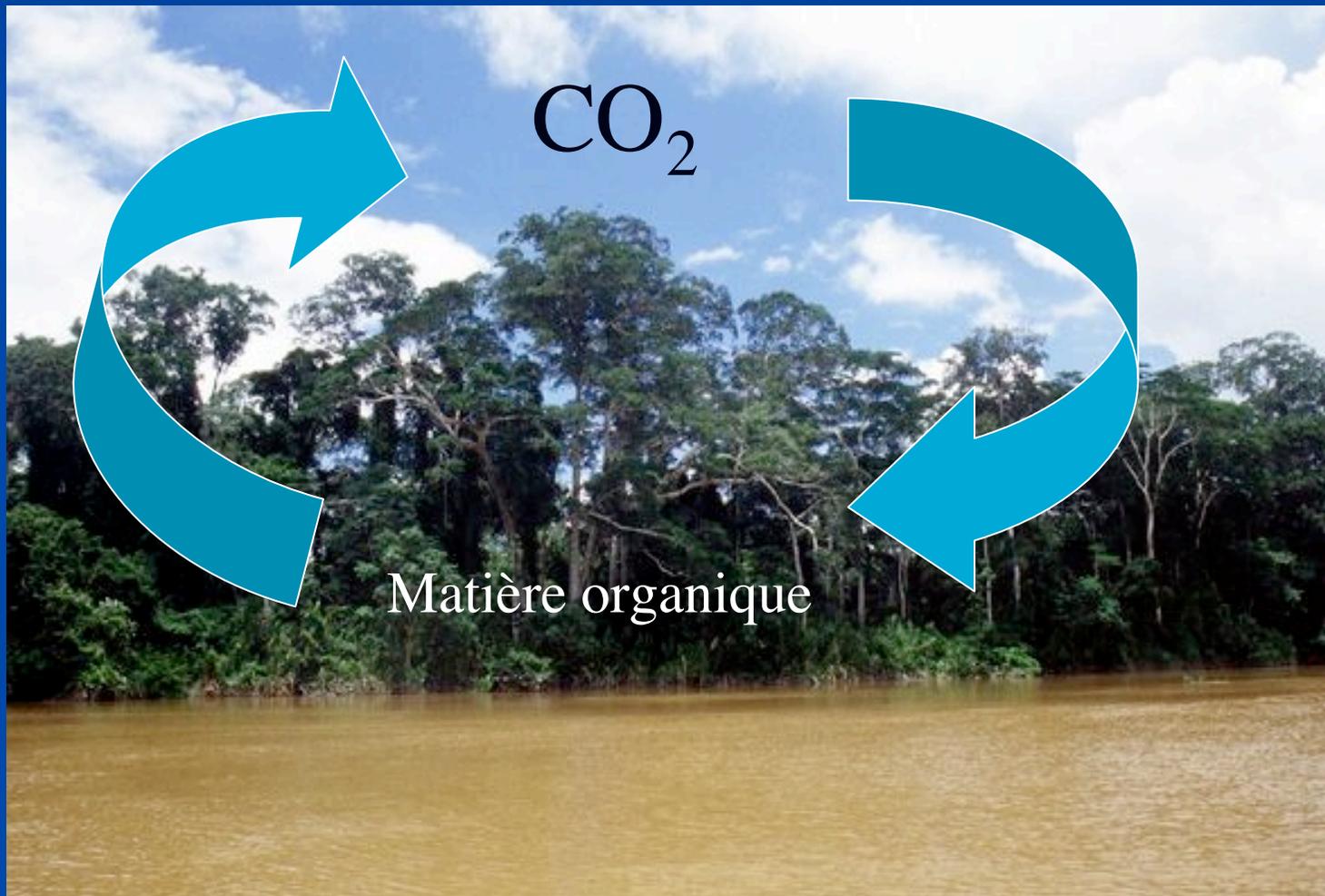
Coral Atoll



Puit continental: CO₂

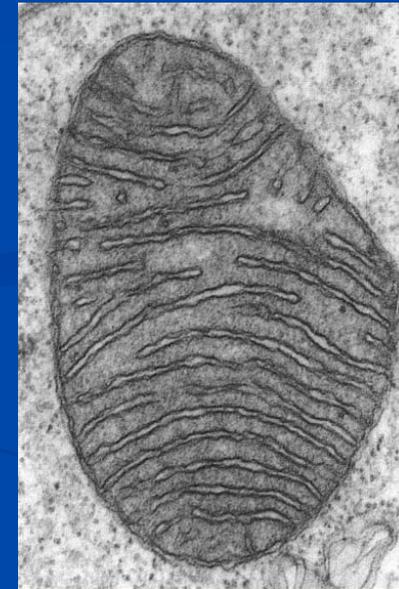


grâce à l'énergie lumineuse et l'enzyme RubisCo.



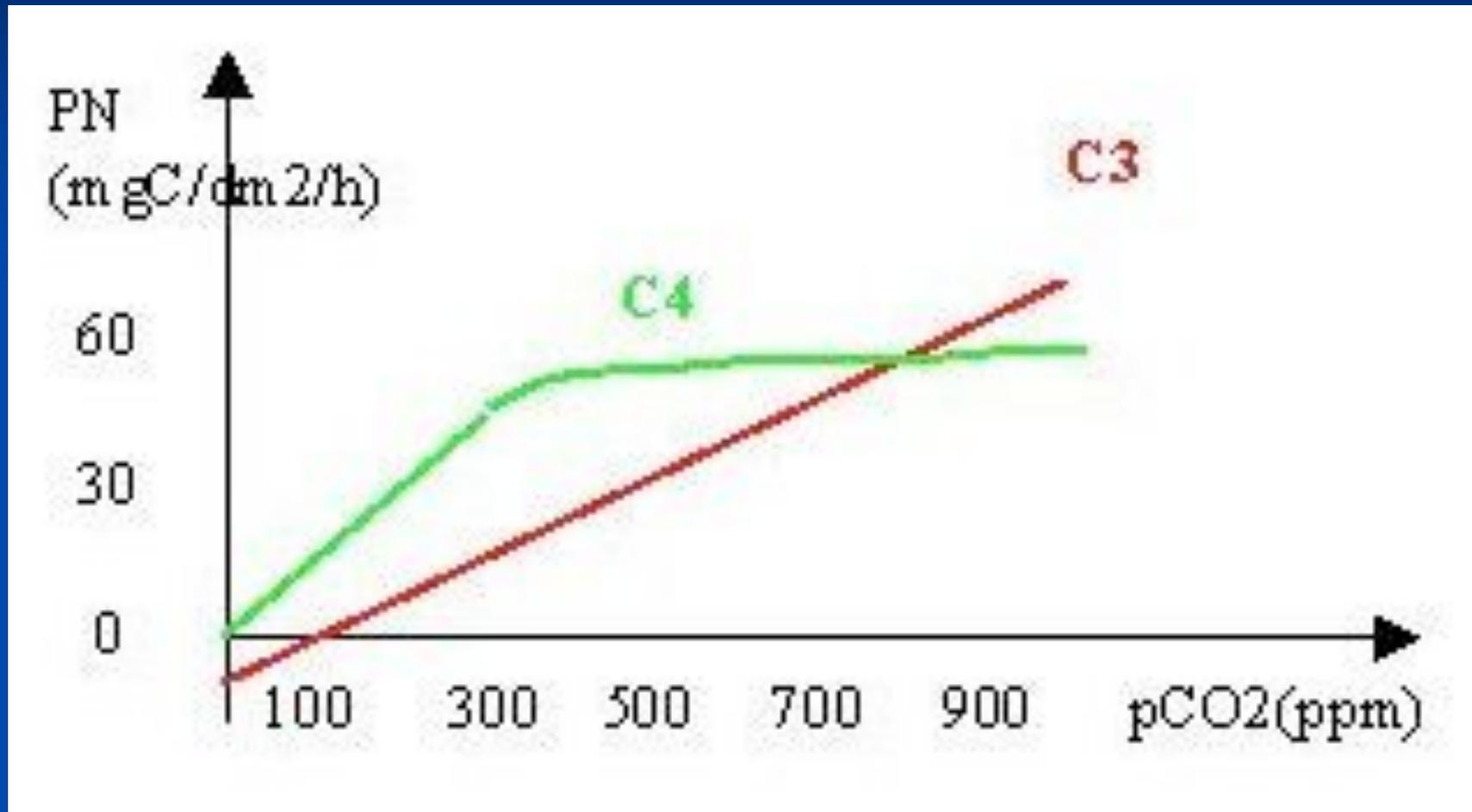
Flux de C dans les écosystèmes

- $PPN = PPB - R - L$
- Productivité nette = productivité brute - respiration - litière



- Une forêt à l'état stationnaire est telle que $PPN = 0$

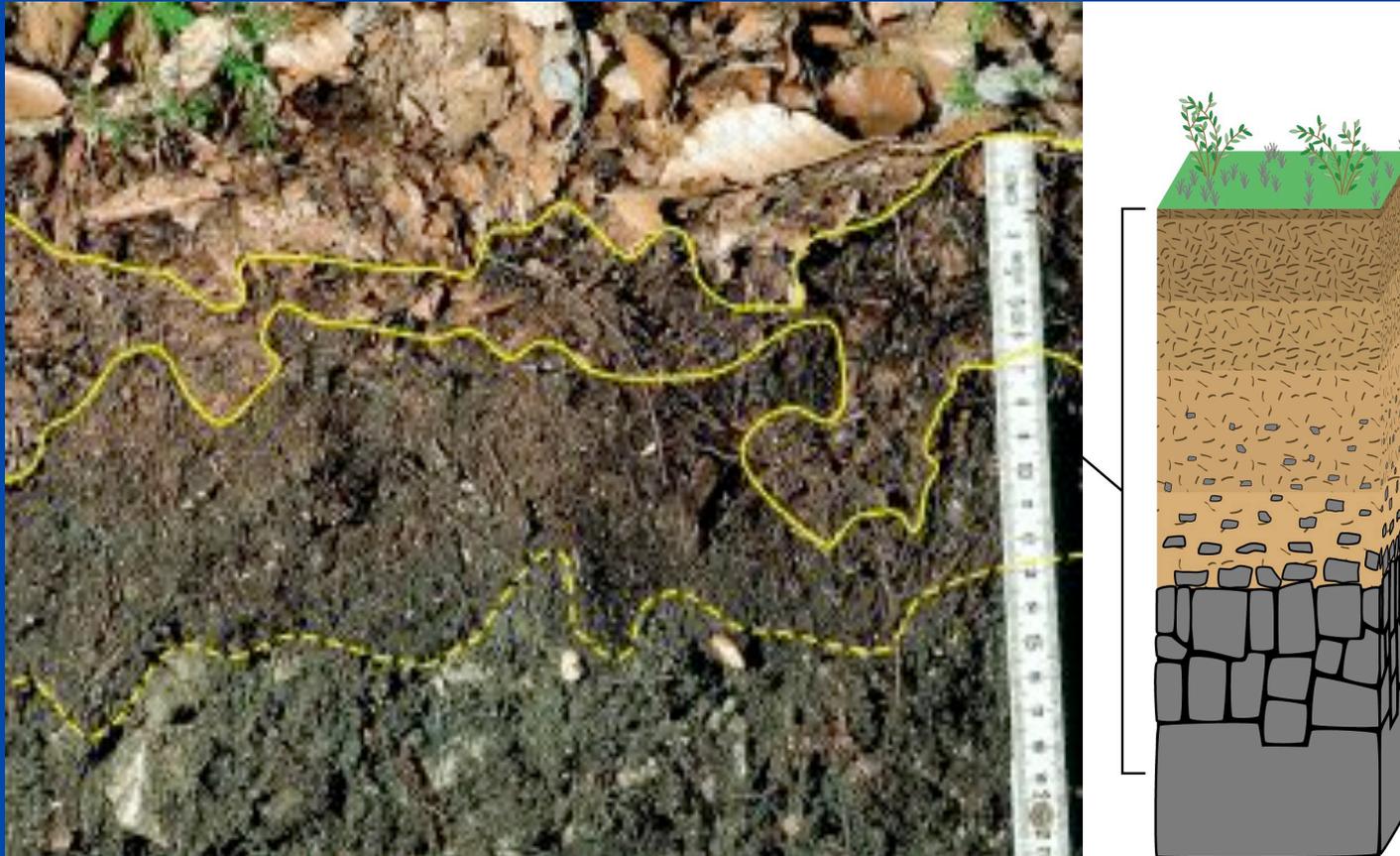
Le CO₂, un facteur limitant



Plus de CO₂, plus de photosynthèse, mais effets de saturation

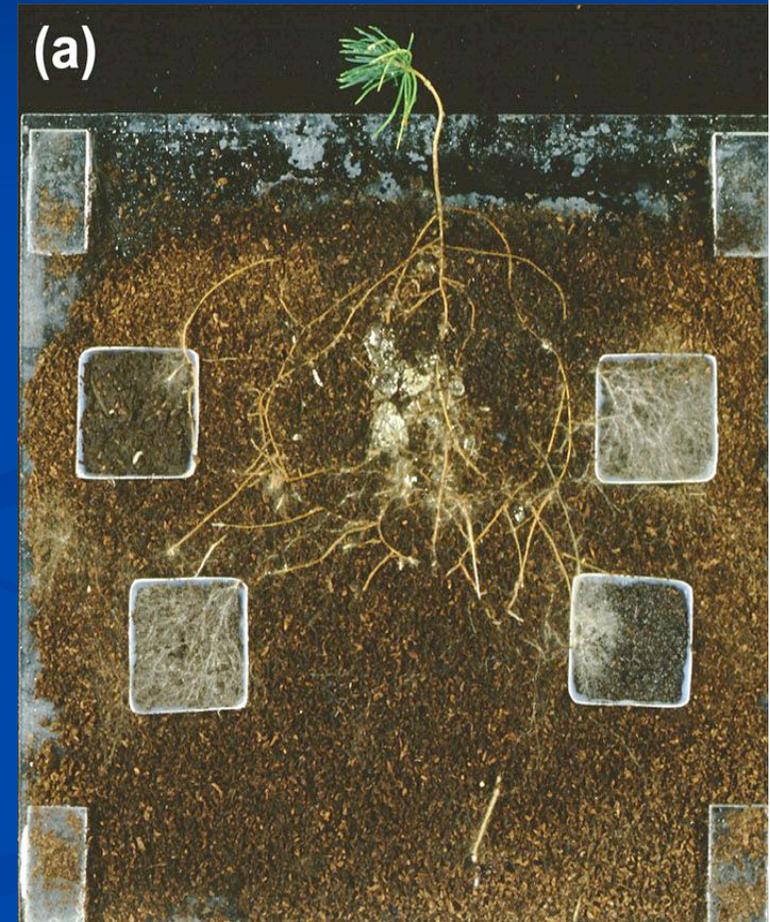
La respiration des sols

- litière = $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} +$ matière réfractaire (respiration hétérotrophe)
- Respiration des racines (respiration autotrophe)



Facteurs de contrôles de la respiration du sol

- R_a est fonction de la croissance de la plante
- R_h dépend de la croissance microbienne et donc des nutriments disponibles.
- Les deux sont fonctions de la quantité d'eau dans le sol, de la température, d'ou des rétro-contrôles climatiques.
- Une augmentation de la T va donc accentuer la respiration des sols: feedback positif.
- Raisonnement compliqué par l'existence de différents pools de C organique dans le sol avec des temps de résidence différents
- Raisonnement compliqué aussi par l'augmentation de l'exportation de C organique par érosion mécanique due à l'installation de l'homme (séquestration organique)



Biodiversité

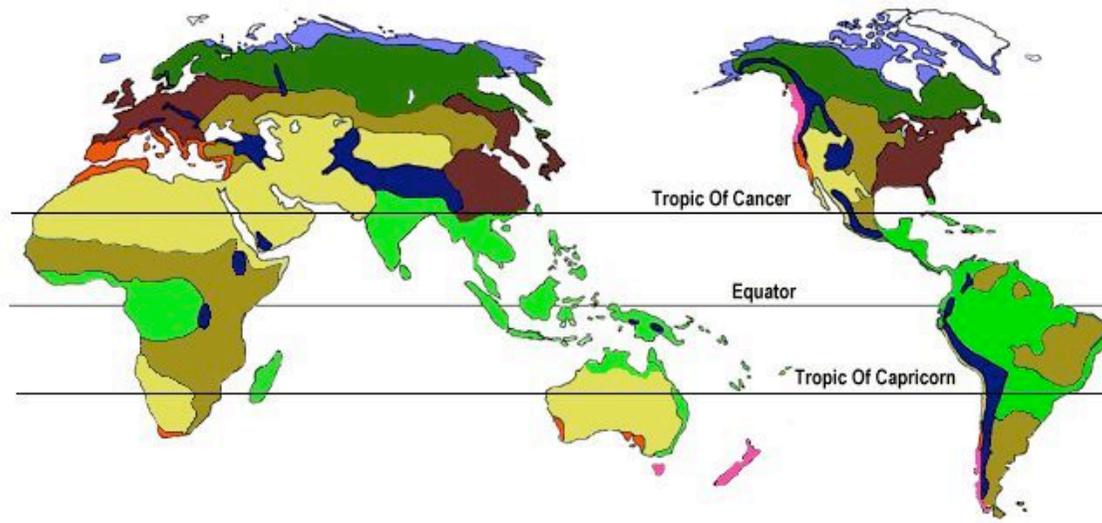


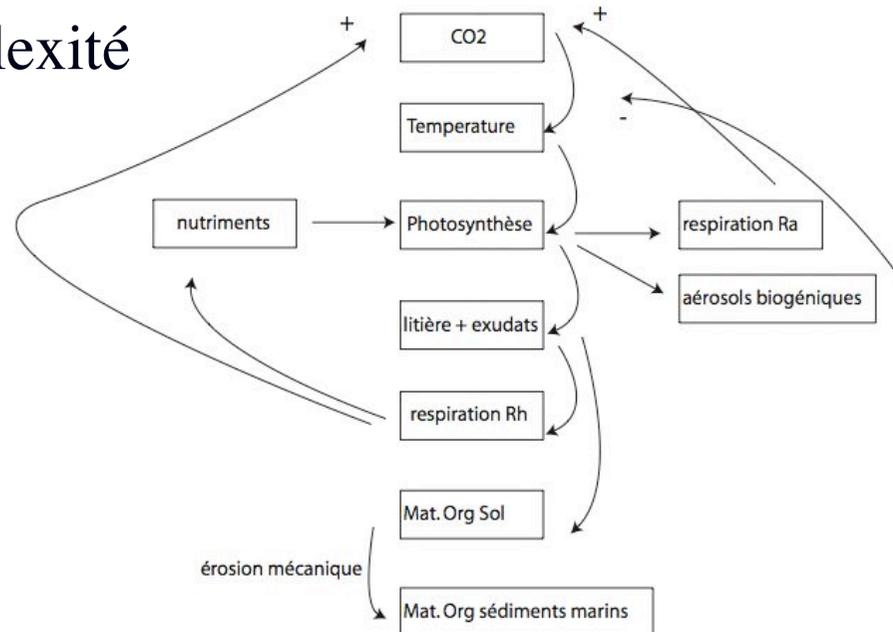
Table 5.4 Distribution of Soil Organic Matter by Ecosystem Types^a

Ecosystem Type	Mean Soil Organic Matter (kg C m ⁻²)	World Area (ha × 10 ⁸)	Total World Soil Organic Carbon (mt C × 10 ⁹)	Total World Litter (mt C × 10 ⁹)
Tropical forest	10.4	24.5	255	3.6
Temperate forest	11.8	12	142	14.5
Boreal forest	14.9	12	179	24.0
Woodland and shrubland	6.9	8.5	59	2.4
Tropical savanna	3.7	15	56	1.5
Temperate grassland	19.2	9	173	1.8
Tundra and alpine	21.6	8	173	4.0
Desert scrub	5.6	18	101	0.2
Extreme desert, rock and ice	0.1	24	3	0.02
Cultivated	12.7	14	178	0.7
Swamp and marsh	68.6	2	137	2.5
Totals		147	1456	55.2

^aFrom Schlesinger (1977).

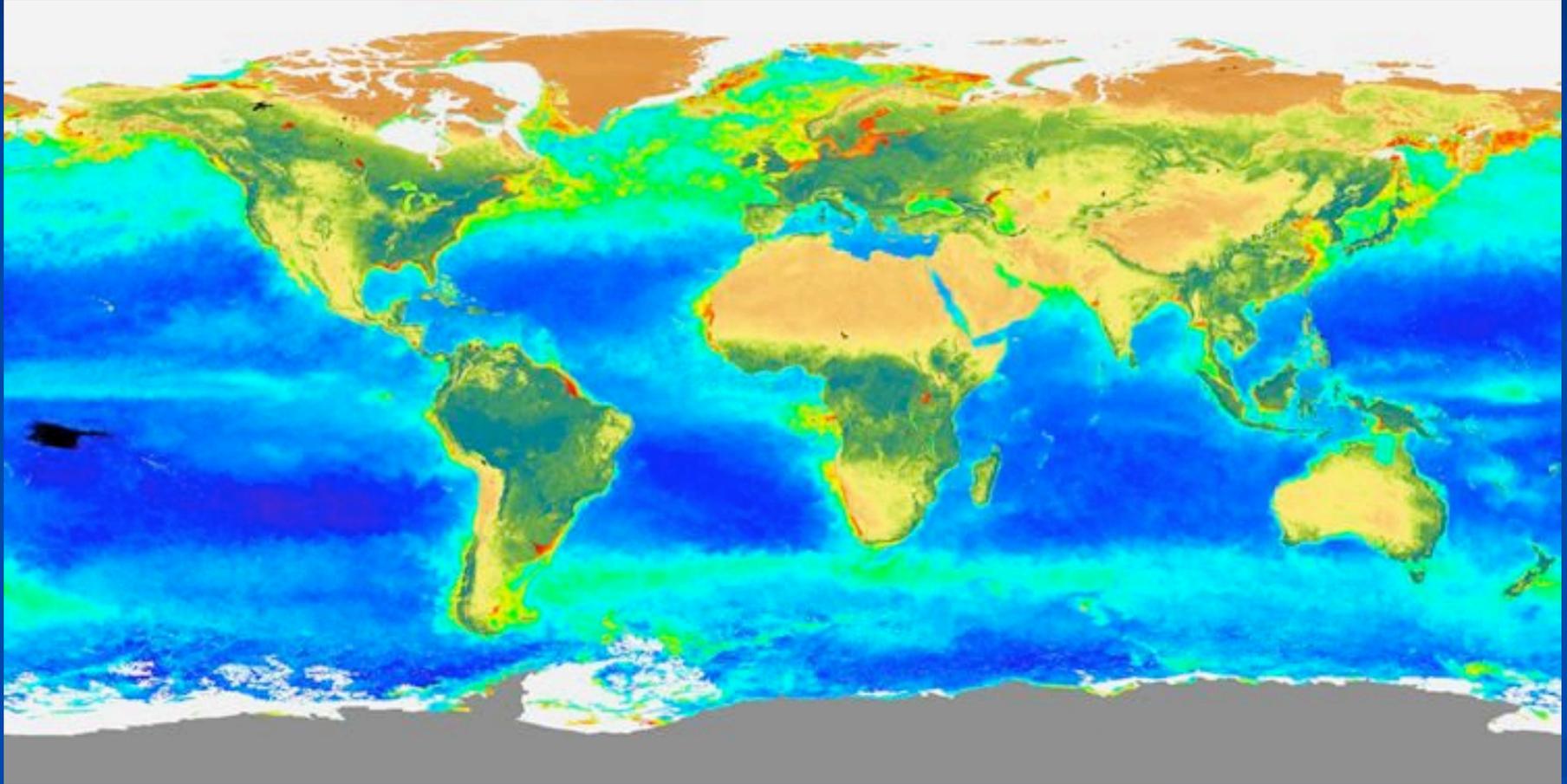
Un domaine très vierge et en demande de données de terrain

Un aperçu de la complexité



+ Fertilisation par les nitrates des pluies

Pompe biologique océanique



Contenu en chlorophylle de l'océan de surface

Pompe biologique

- La séquestration de CO₂ par la biomasse marine représenterait 50 PgC/an. Avec une taille de 3 PgC, ce réservoir est extrêmement actif.
- L'essentiel de cette matière organique serait décomposée après sa mort et reminéralisée dans les eaux profondes (Bactéries).
- La plupart de la production biologique primaire marine n'est donc pas disponible pour la chaîne trophique.
- La quantité de C organique qui serait enfouie dans les sédiments marins serait finalement de 0.2 PgC/an, c'est à dire très peu.
- La production océanique primaire est limitée par la teneur en fer.

Bilan en PgC

- Combustion des hydrocarbures + déforestation + ciments : 380
 - Accumulation dans l'atmosphère :
 - Puit océanique : 120
- ✓ $380 \text{ PgC} = 120 \text{ PgC} + 160 \text{ PgC} + 95 \pm 50 \text{ PgC}$

Plan

- I. Un changement de la chimie de l'atmosphère sans précédent.
- II. L'origine du CO₂ en excès
- III. La séquestration océanique du C
- IV. La séquestration continentale
- V. Le cycle du carbone perturbé et les prévisions.
- Que faire ???????

Bilan, l'homme a modifié le cycle du carbone.

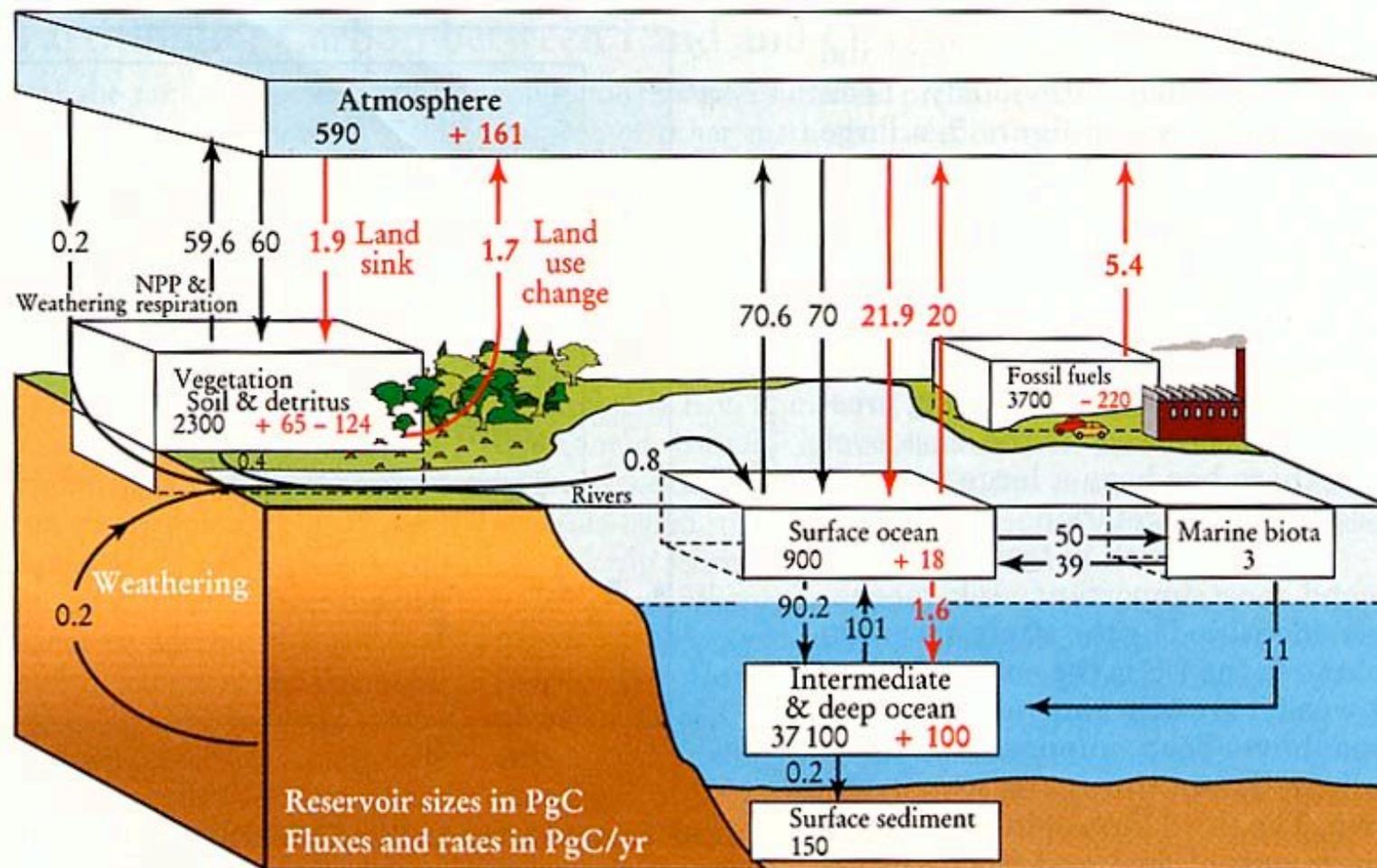


FIGURE 1.2