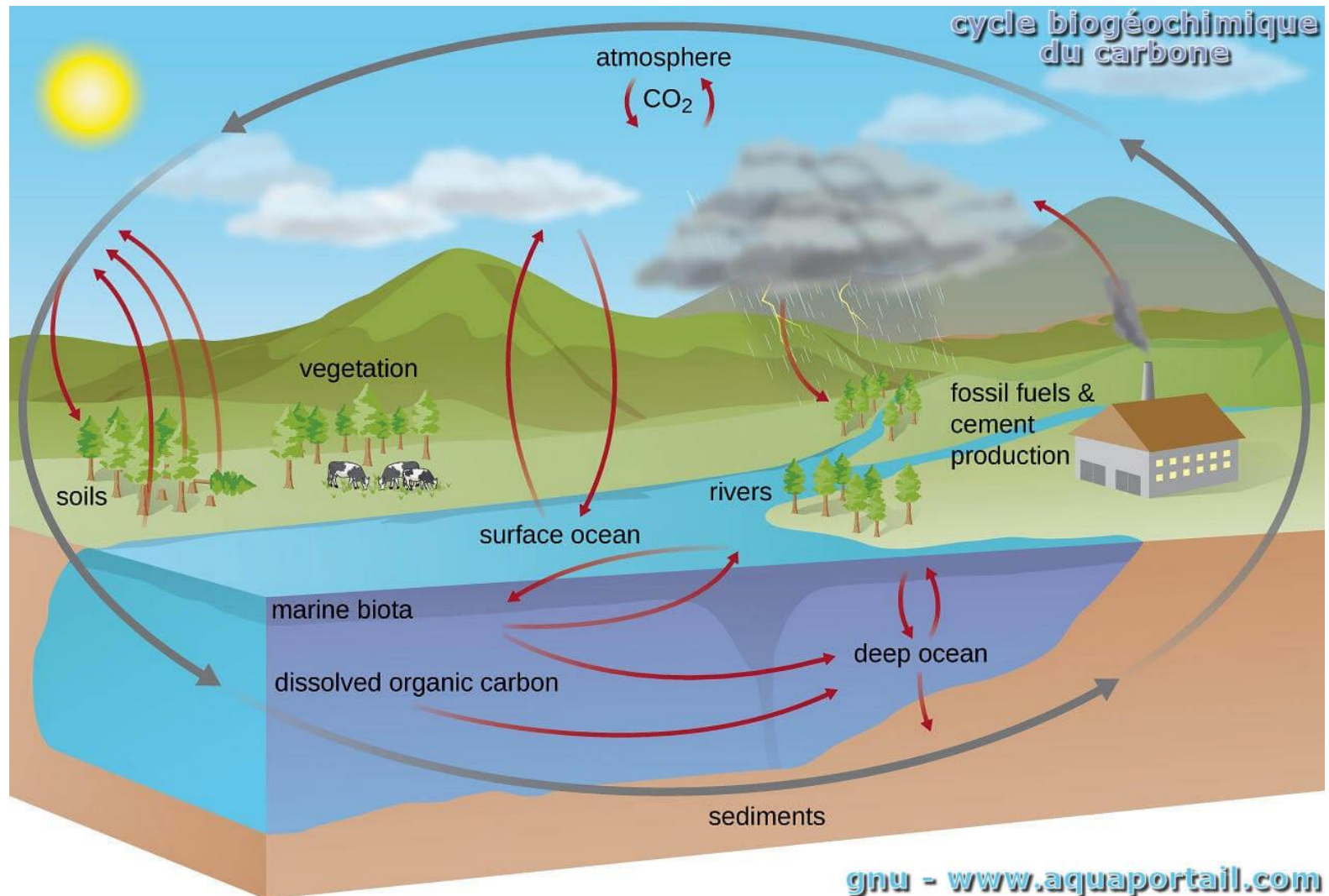


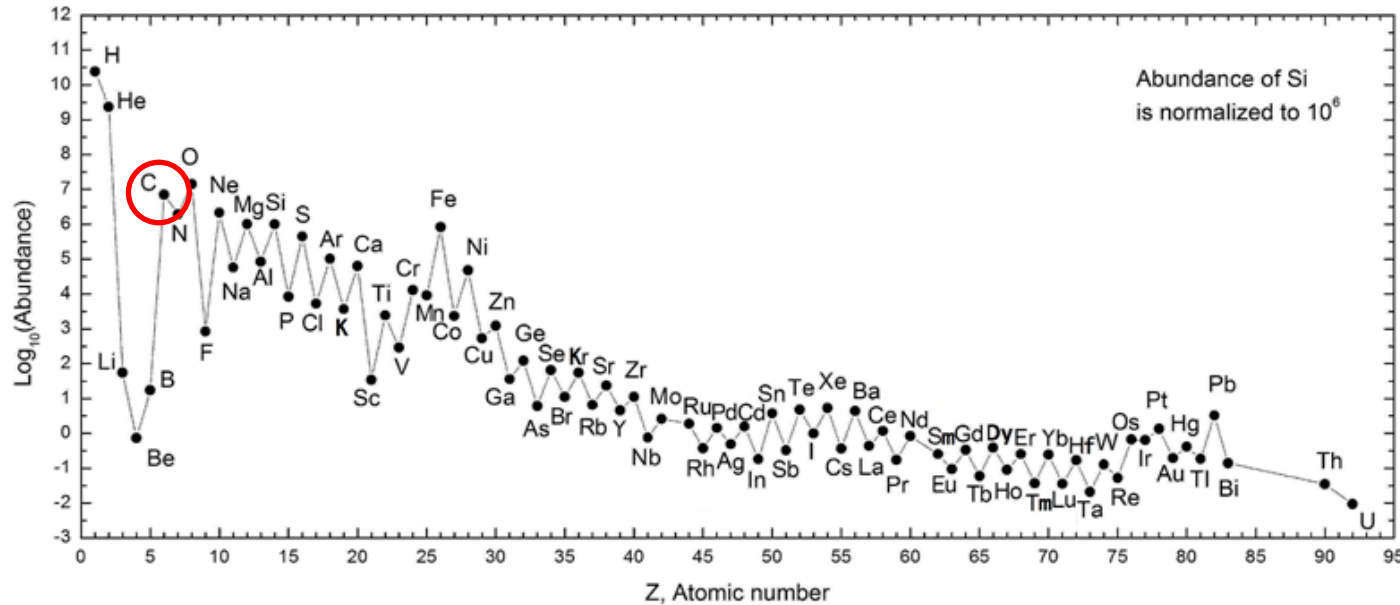
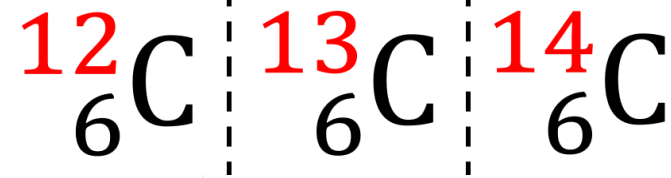
BG – A Les grands cycles biogéochimiques

BG – A1 Le cycle du carbone



Le carbone dans le système solaire et sur Terre

Différents isotopes de l'élément carbone C



Abondance en masse des éléments chimiques dans le système solaire

Composition élémentaire comparée entre la croûte terrestre et deux types d'organismes.

Les valeurs sont indiquées en % de la masse totale.

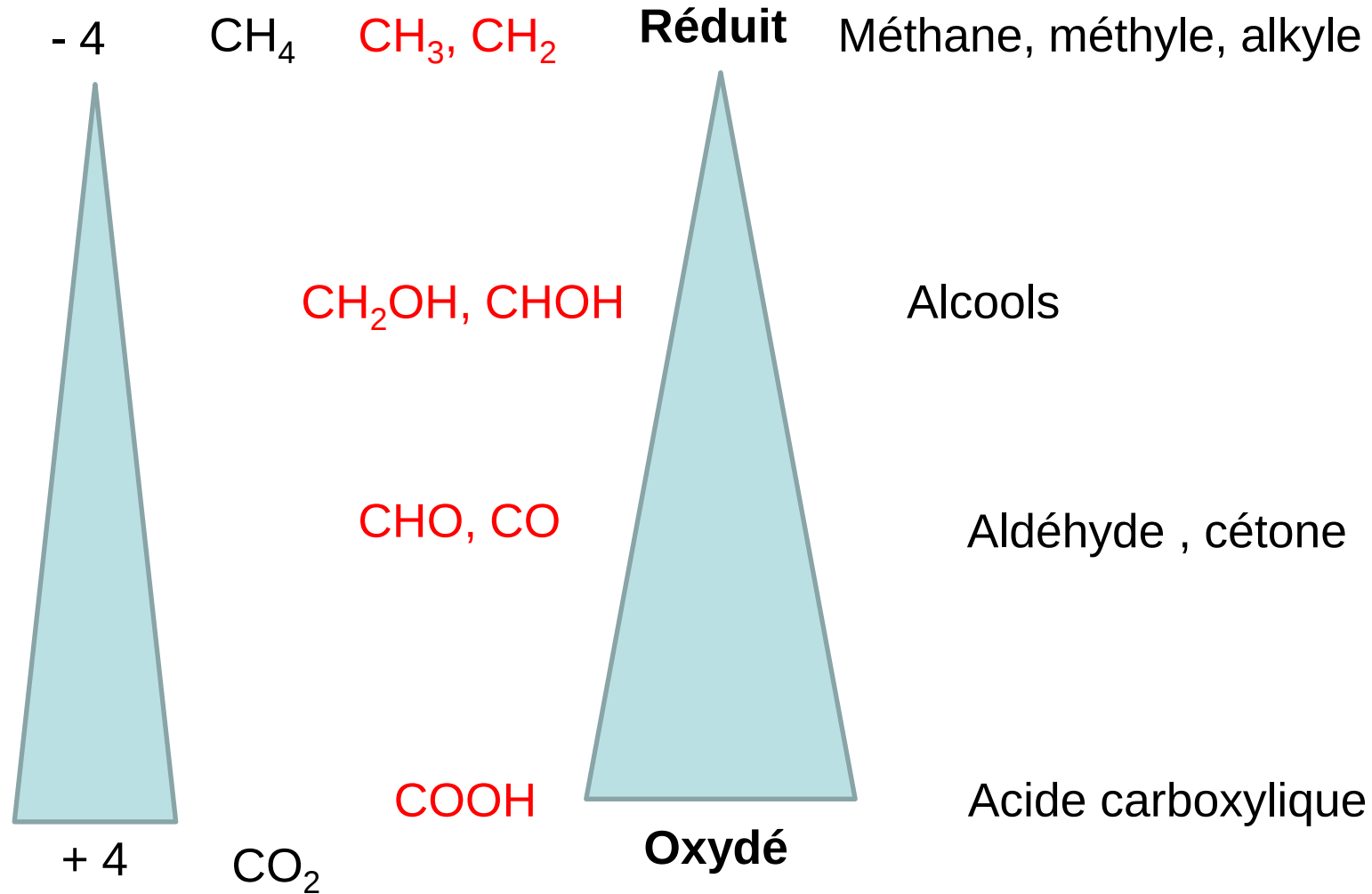
(PEYCRU P. et coll., « Biologie 1^{ère} année BCPST, Dunod Ed., 2007).

Croûte terrestre				Cellules animales		Cellules végétales	
O	50,0	Na	2,3	O	62,8	O	77,9
Si	25,8	K	2,3	C	19,4	C	11,3
Al	7,3	Mg	2,1	N	9,3	N	8,7
Fe	4,2	H	0,9	H	5,0	H	0,8
Ca	3,2				= 96,5		= 98,7
Ti, C, F, S, F, Ba... < 0,5				Ca, S, P, Na, K, Cl, Mg de 1,3 à 0,04		P, Ca, K, S, Mg, Cl, Na de 0,7 à 0,03	
				F, Fe, Si, Zn, Al, Cu... < 0,009		Si, Fe, Al, B, Mn, Zn. < 0,009	

≈ 200 ppm dans la croûte soit 0,02 % en masse

≈ 400 ppmv dans l'atmosphère soit 0,04 % en volume

Document 1. Etat d'oxydation du carbone.



Formations carbonées du sous-sol



Modifications de la tourbe fraîchement déposée à l'anthracite, fortement transformée par la température, la pression et le temps.

Au cours de cette transformation, on assiste à un enrichissement relatif en carbone du fait de la perte des autres éléments chimiques. On constate aussi un changement physique du charbon, depuis des roches brunes et mates à des roches brillantes, plus compactes (mais fracturées).

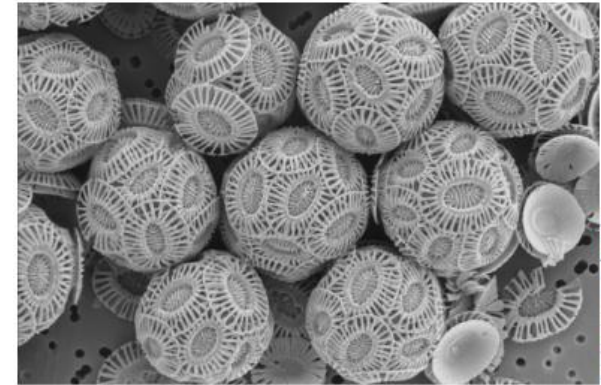
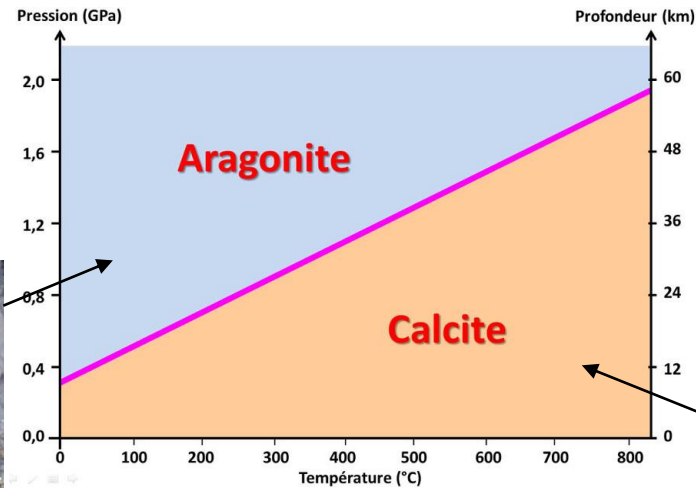
Les formes de carbone inorganique

- CO_2 , CO , ions carbonates



- Carbonates CaCO_3 et MgCO_3

Formes minérales de surface du carbone



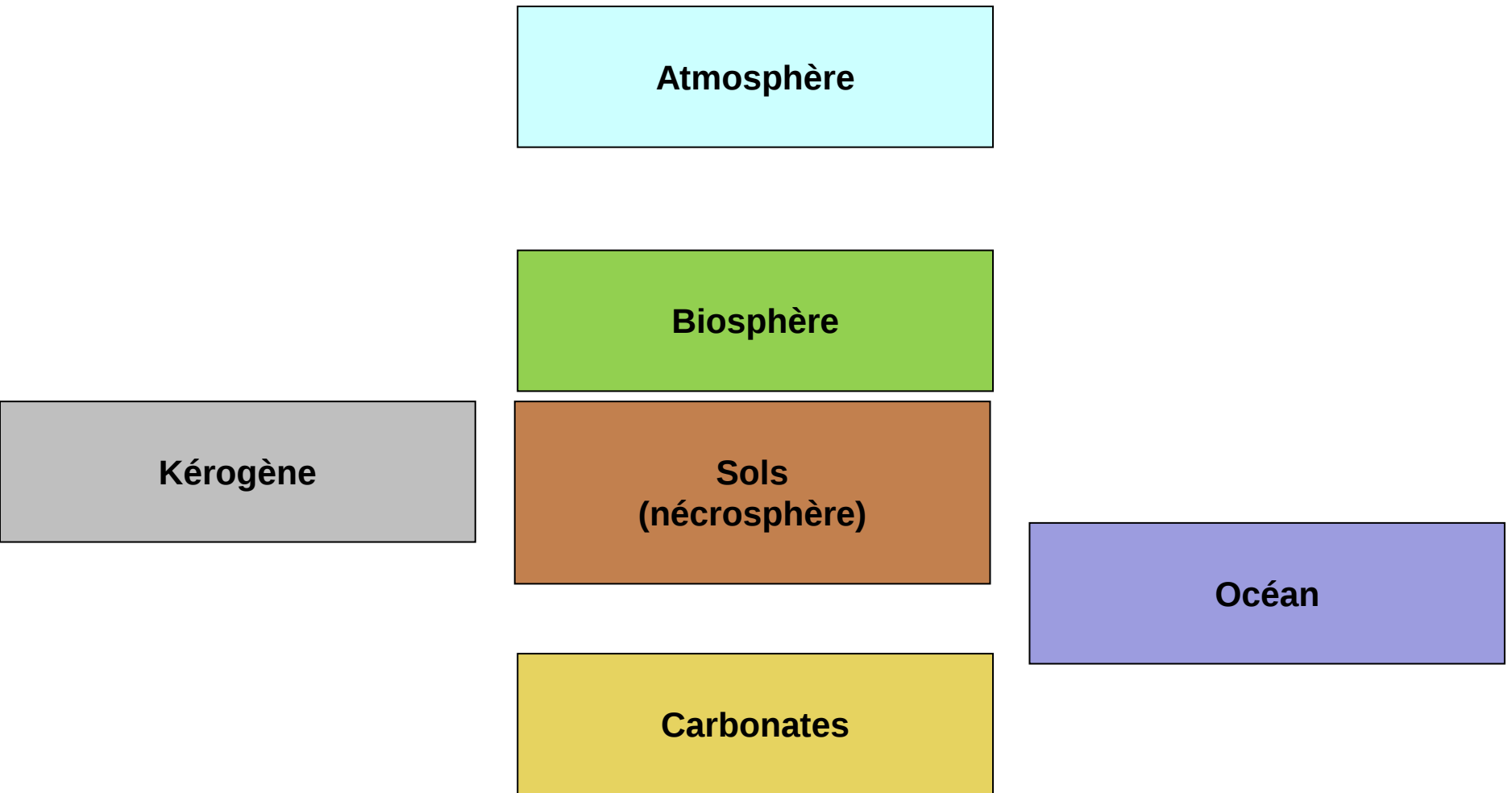
Les coccolithophores sont des organismes unicellulaires et calcifiés, parmi les plus petits qui vivent dans les océans.



Diagramme de phase simplifié du carbone pur

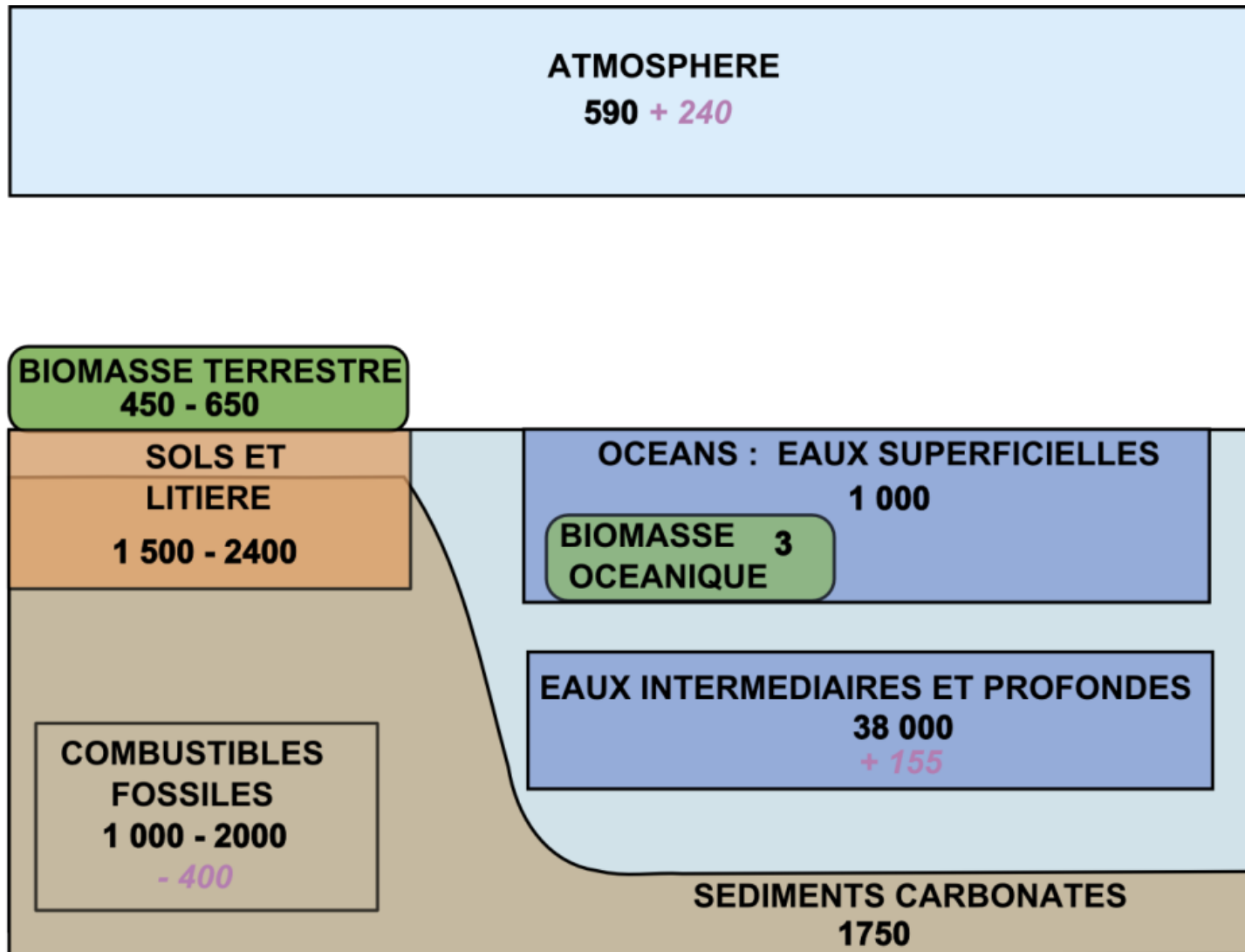


Les réservoirs de carbone



Document 2. Les réservoirs de carbone.

Les masses sont indiquées en GtC



Document 3. Formes du carbone dans les réservoirs et tailles des réservoirs.

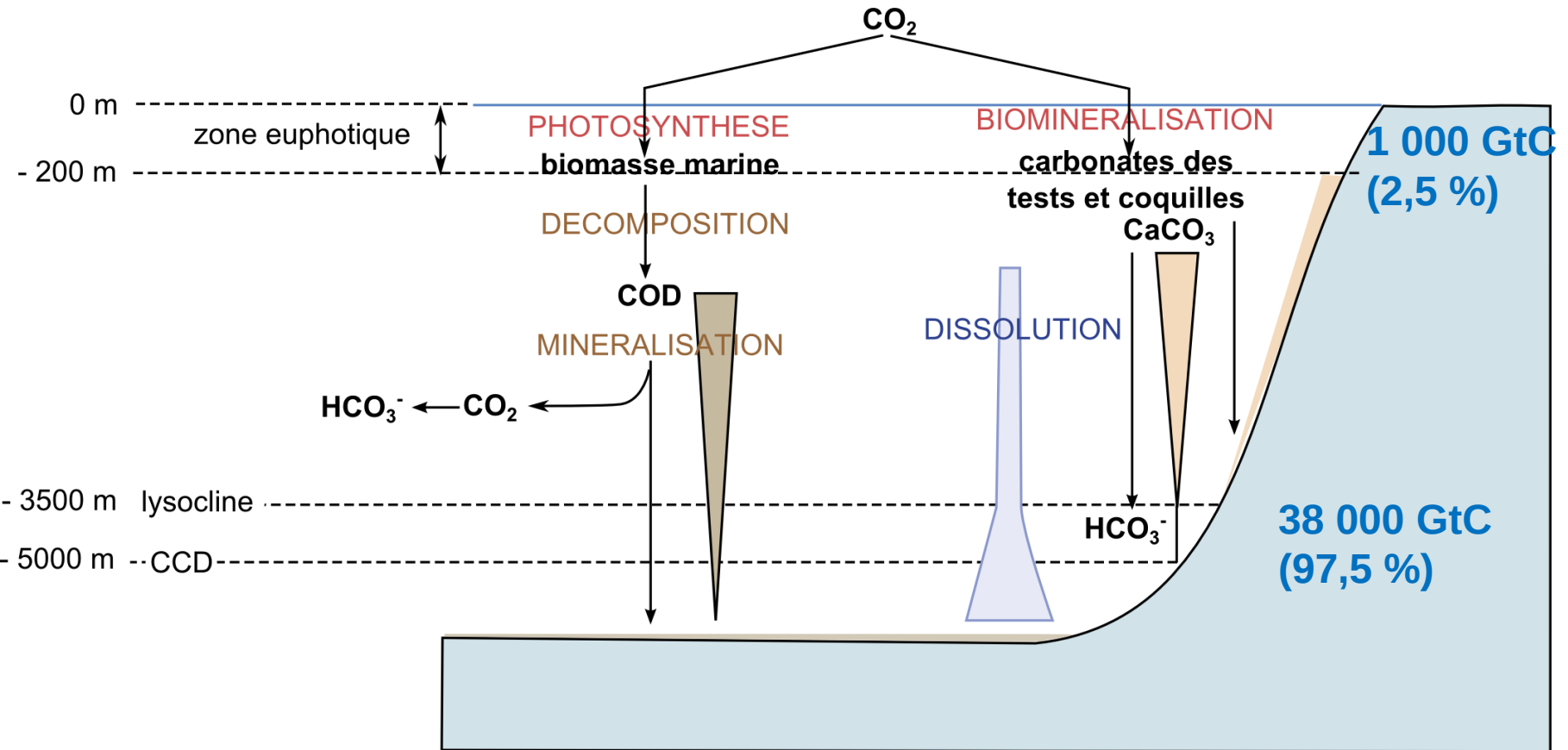
Réservoir dilué / **concentré**

Matière minérale / *organique*



Réservoir	Etat	Nature (formes du Carbone)	Masse (en GtC)	Indicateur pour quantification	Ordre de grandeur
Atmosphère	gazeux	CO ₂ (400 ppmv) Traces de <i>CH₄</i> (1,7 ppmv), CFC et CO	830 +/- 10	[CO ₂] _{atm}	1
Biosphère	solide ou dissous	<i>Biomolécules des êtres vivants (glucides, lipides, dont lignines, protides acides nucléiques)</i>	450 à 650	Mesures de biomasse	1
Sols Nécromasse	solide, dissous ou gazeux	<i>Biomasse des microorganismes des sols ; nécromasse du sol (et des fonds océaniques)</i>	1500 à 2400	Relevés pédologiques	3
Hydrosphère (océan mondial)	dissous	HCO ₃ ⁻ (≈ 93%), CO ₃ ²⁻ (≈ 6%) CO ₂ (≈ 1%)	39 000	pH des eaux océaniques	50
Croûte	solide	<i>Hydrates de méthane (pergélisols ; fonds marins)</i>	3000 à 10 000	Relevés géologiques	10
	solide	Carbonates (carbone oxydé) : - calcite, aragonite : CaCO ₃ - marbres : CaCO ₃ - dolomite : CaMg(CO ₃) ₂	≈ 1.10 ⁸		+++ x 10 ⁶
	solide ou liquide	<i>Matière organique fossile Exploitable (< 1%) : gaz : 400 -1100 ; huile: ≈ 200 ; charbons : ≈ 500</i>	2. 10 ⁷		+++ x 10 ⁴
	solide	Carbone des roches silicatées	5.10 ⁷		+++
Manteau, noyau	Solide, liquide, gazeux	Diamant, carbonates, CO ₂	De 1.10 ⁷ à 7.10 ⁸	Teneur en carbone des laves	+++ x 10 ⁸

Document 4. Transferts de carbone de la couche de mélange à l'océan profond.



COD = carbone organique dissous

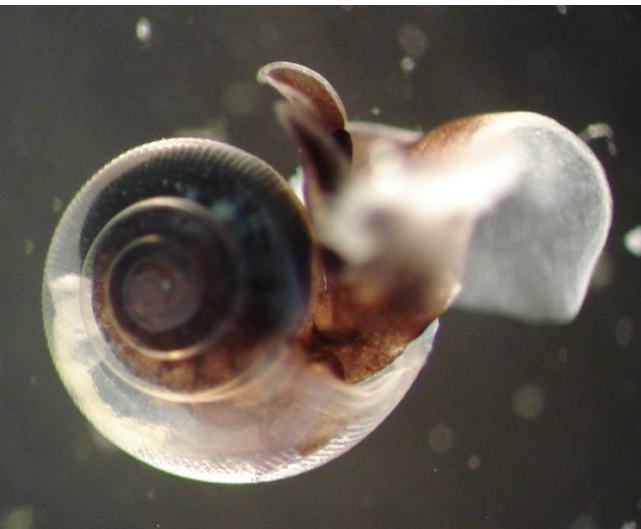
CCD = profondeur de compensation de la calcite

Deux grandes origines au carbone de l'océan liées à des processus localisés dans la zone photique :

- **La photosynthèse :**
génère la biomasse océanique.
- **La biominéralisation**
= fabrication de tests ou de coquilles par les êtres vivants (Mollusques, Foraminifères, Coccolithophoridés)



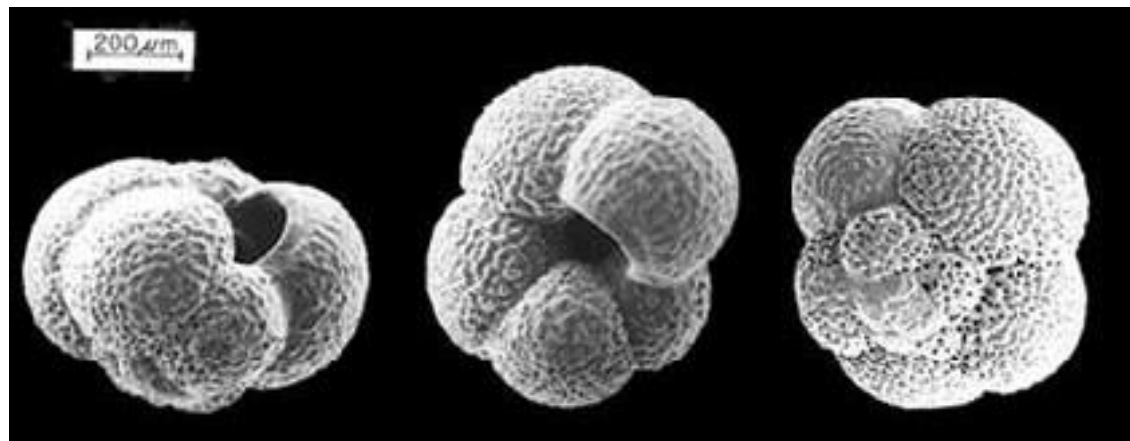
Coccolithophoridé



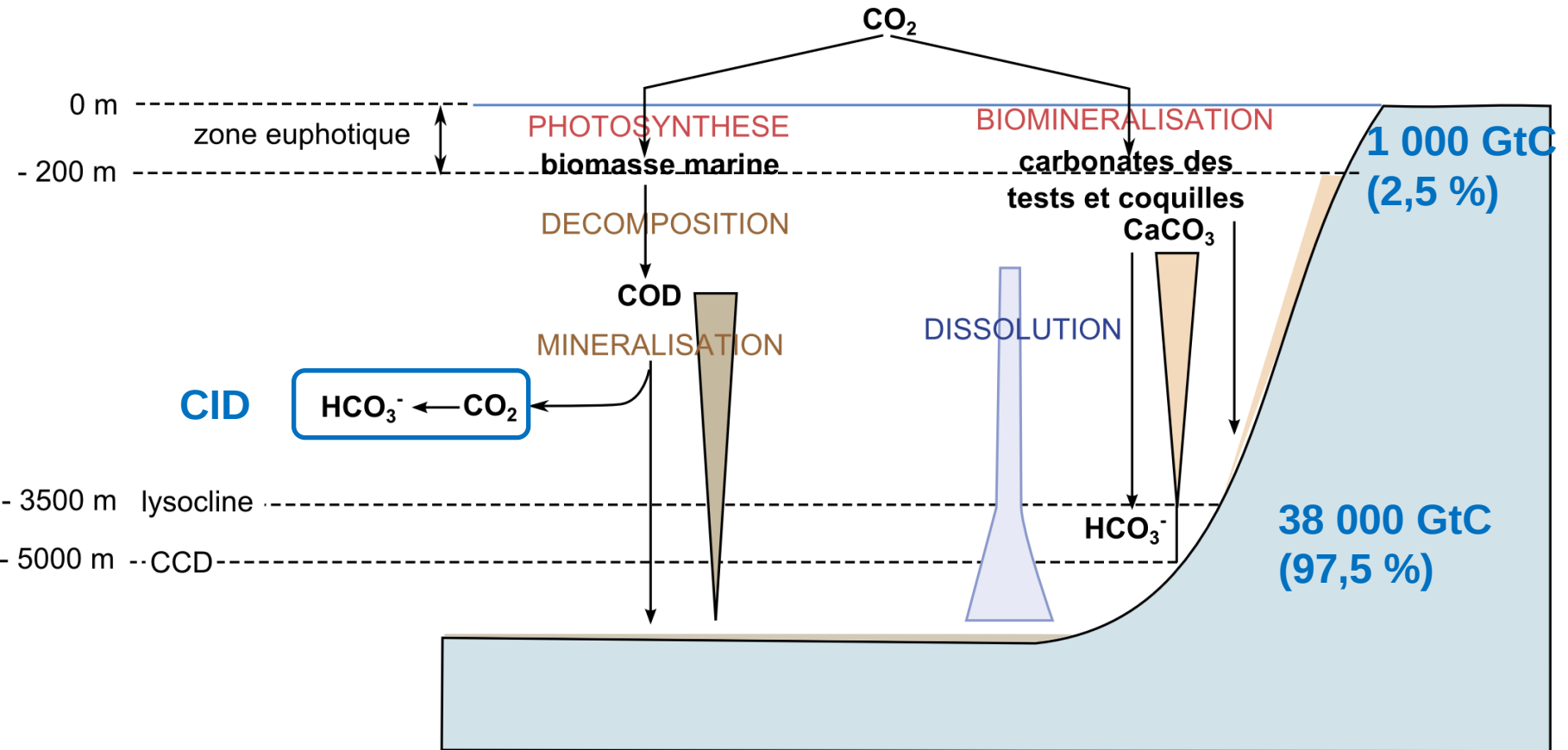
Ptéropode (escargot marin nageur)

Globigérines

Foraminifères actuels des zones boréales



Document 4. Transferts de carbone de la couche de mélange à l'océan profond.



COD = carbone organique dissous

CID = carbone inorganique dissous

CCD = profondeur de compensation des carbonates

Document 3. Formes du carbone dans les réservoirs et tailles des réservoirs.

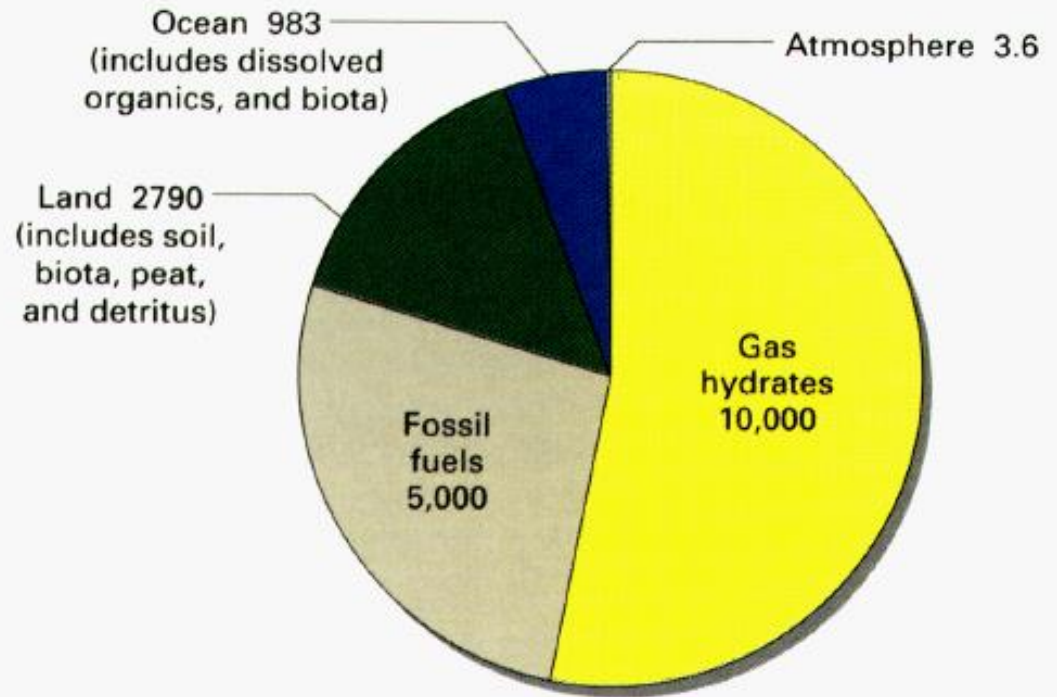
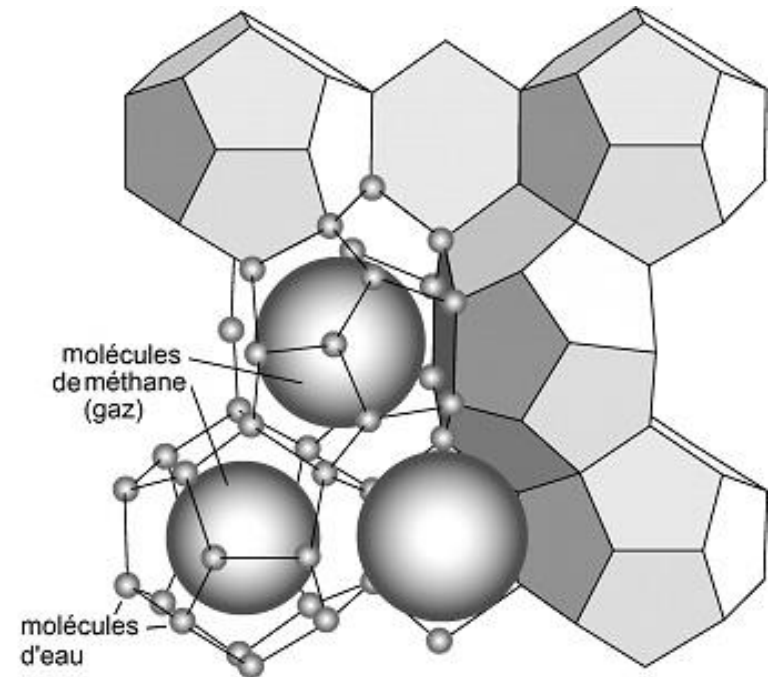
Réservoir dilué / **concentré**

Matière minérale / *organique*



Réservoir	Etat	Nature (formes du Carbone)	Masse (en GtC)	Indicateur pour quantification	Ordre de grandeur
Atmosphère	gazeux	CO ₂ (400 ppmv) Traces de <i>CH₄</i> (1,7 ppmv), CFC et CO	830 +/- 10	[CO ₂] _{atm}	1
Biosphère	solide ou dissous	<i>Biomolécules des êtres vivants (glucides, lipides, dont lignines, protides acides nucléiques)</i>	450 à 650	Mesures de biomasse	1
Sols Nécromasse	solide, dissous ou gazeux	<i>Biomasse des microorganismes des sols ; nécromasse du sol (et des fonds océaniques)</i>	1500 à 2400	Relevés pédologiques	3
Hydrosphère (océan mondial)	dissous	HCO ₃ ⁻ (≈ 93%), CO ₃ ²⁻ (≈ 6%) CO ₂ (≈ 1%)	39 000	pH des eaux océaniques	50
Croûte	solide	<i>Hydrates de méthane (pergélisols ; fonds marins)</i>	3000 à 10 000	Relevés géologiques	10
	solide	Carbonates (carbone oxydé) : - calcite, aragonite : CaCO ₃ - marbres : CaCO ₃ - dolomite : CaMg(CO ₃) ₂	≈ 1.10 ⁸		+++ x 10 ⁶
	solide ou liquide	<i>Matière organique fossile Exploitable (< 1%) : gaz : 400 -1100 ; huile: ≈ 200 ; charbons : ≈ 500</i>	2. 10 ⁷		+++ x 10 ⁴
	solide	Carbone des roches silicatées	5.10 ⁷		+++
Manteau, noyau	Solide, liquide, gazeux	Diamant, carbonates, CO ₂	De 1.10 ⁷ à 7.10 ⁸	Teneur en carbone des laves	+++ x 10 ⁸

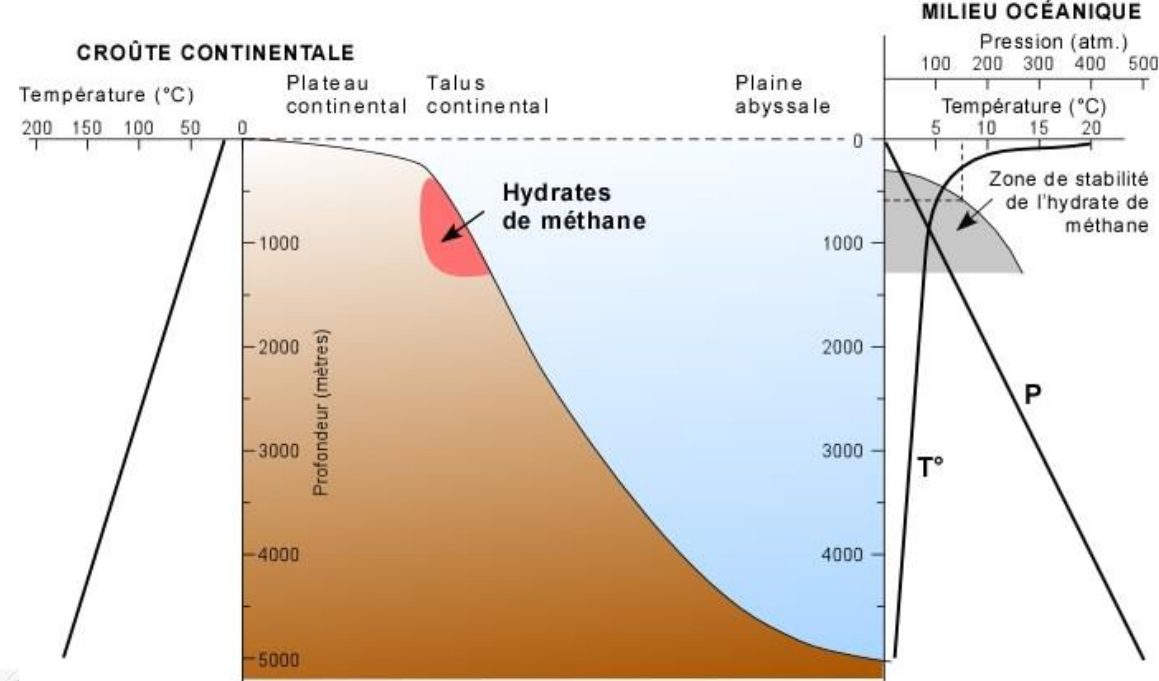
Les hydrates de méthane ou clathrates



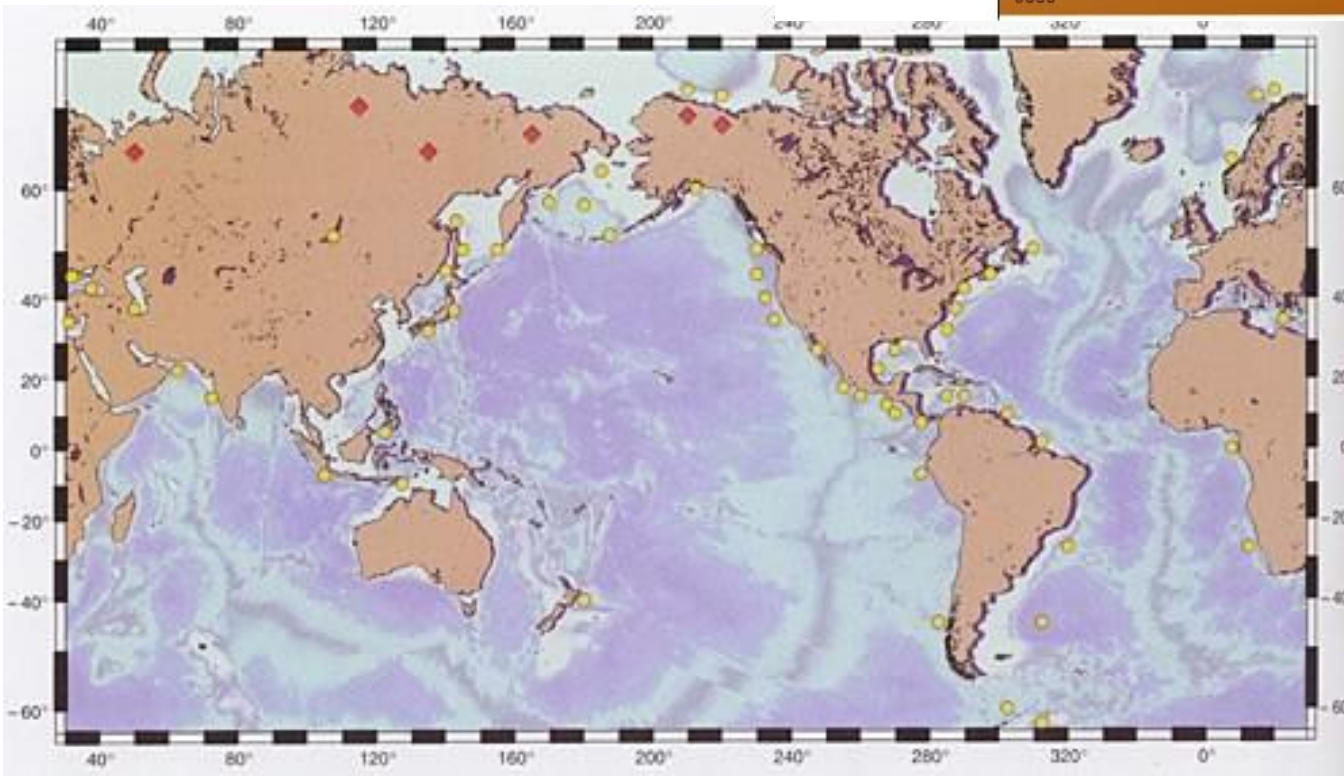
Distribution of organic carbon in Earth reservoirs (excluding dispersed carbon in rocks and sediments, which equals nearly 1,000 times this total amount). Numbers in gigatons (10¹⁵ tons) of carbon.

On estime (?) que les hydrates de méthane des fonds océaniques contiennent deux fois plus en équivalent carbone que la totalité des gisements de gaz naturel, de pétrole et de charbon connus mondialement.

Conditions de formation des hydrates de méthane ou clathrates



Gisements d'hydrates de méthane ou clathrates



Les points jaunes indiquent les gisements sur les plateaux ou les talus continentaux, les losanges rouges, les gisements dans le pergélisol (sol gelé en permanence).

<http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/hydrates.methane.htm>

Document 3. Formes du carbone dans les réservoirs et tailles des réservoirs.

Réservoir dilué / **concentré**

Matière minérale / *organique*



Réservoir	Etat	Nature (formes du Carbone)	Masse (en GtC)	Indicateur pour quantification	Ordre de grandeur
Atmosphère	gazeux	CO ₂ (400 ppmv) Traces de <i>CH₄</i> (1,7 ppmv), CFC et CO	830 +/- 10	[CO ₂] _{atm}	1
Biosphère	solide ou dissous	<i>Biomolécules des êtres vivants (glucides, lipides, dont lignines, protides acides nucléiques)</i>	450 à 650	Mesures de biomasse	1
Sols Nécromasse	solide, dissous ou gazeux	<i>Biomasse des microorganismes des sols ; nécromasse du sol (et des fonds océaniques)</i>	1500 à 2400	Relevés pédologiques	3
Hydrosphère (océan mondial)	dissous	HCO ₃ ⁻ (≈ 93%), CO ₃ ²⁻ (≈ 6%) CO ₂ (≈ 1%)	39 000	pH des eaux océaniques	50
Croûte	solide	<i>Hydrates de méthane (pergélisols ; fonds marins)</i>	3000 à 10 000	Relevés géologiques	10
	solide	Carbonates (carbone oxydé) : - calcite, aragonite : CaCO ₃ - marbres : CaCO ₃ - dolomite : CaMg(CO ₃) ₂	≈ 1.10 ⁸		+++ x 10 ⁶
	solide ou liquide	<i>Matière organique fossile Exploitable (< 1%) : gaz : 400 -1100 ; huile: ≈ 200 ; charbons : ≈ 500</i>	2. 10 ⁷		+++ x 10 ⁴
	solide	Carbone des roches silicatées	5.10 ⁷		+++
Manteau, noyau	Solide, liquide, gazeux	Diamant, carbonates, CO ₂	De 1.10 ⁷ à 7.10 ⁸	Teneur en carbone des laves	+++ x 10 ⁸

Les carbonates sédimentaires

Mont Aiguille



© Vallouimages

Dimensions : hauteur moyenne : 300 m, largeur : 130 m, longueur : 900 m → $35 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de CaCO_3

Masse volumique d'une roche calcaire : $2,5 \text{ g.cm}^{-3}$

→ le Mont Aiguille pèse : $35 \cdot 10^6 \times 2,5 = 87,5 \cdot 10^6$ tonnes soit 87,5 Mt.

Masse molaire de CaCO_3 : 100 g/mole → 10 moles / kg de calcaire

→ Il y a donc $87,5 \cdot 10^6 \times 10^3 \times 10 = 87,5 \cdot 10^{10}$ moles de CaCO_3

Masse de carbone stocké par le Mt Aiguille : $M_C = 12 \cdot 10^{-6} \times 87,5 \cdot 10^{10} = \underline{10,5 \text{ Mt}}$

A titre de comparaison, si l'on considère que la composition de la matière sèche d'un être humain est celle d'un glucide $(\text{CH}_2\text{O})_n$, un être humain de 70 kg contient 45 kg d'eau et 25 kg de matière organique soit 10 kg de carbone = 10^{-8} Mt

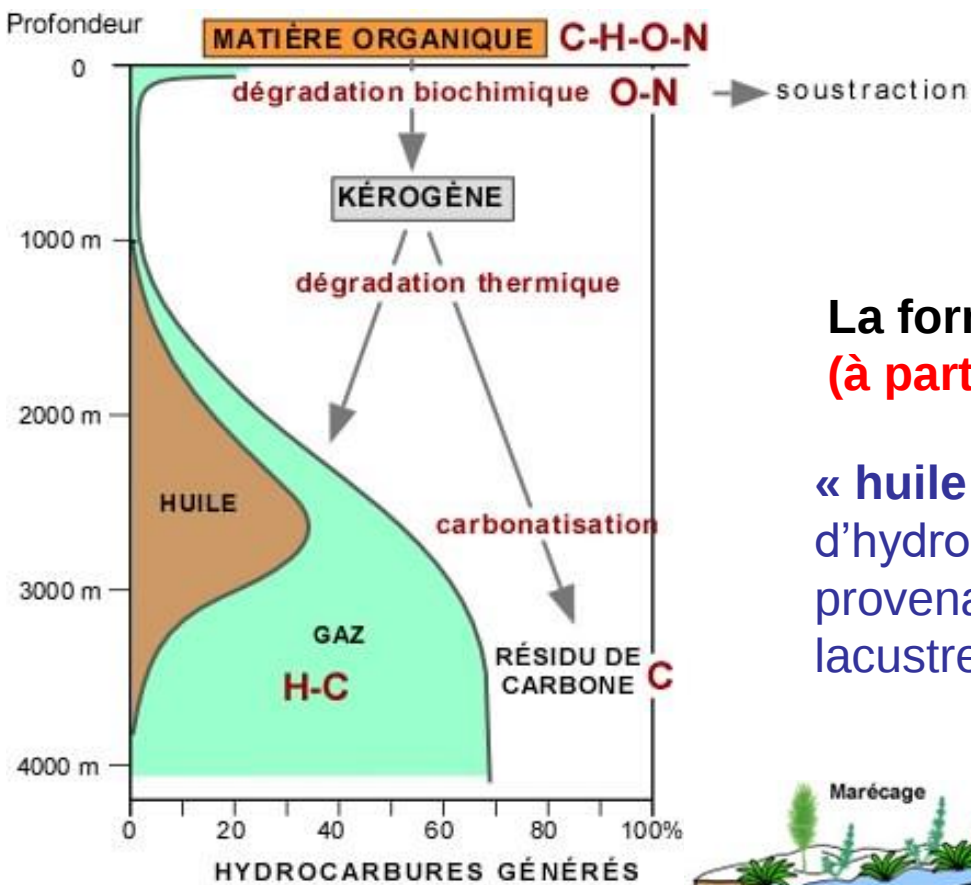
Document 3. Formes du carbone dans les réservoirs et tailles des réservoirs.

Réservoir dilué / **concentré** Matière minérale / *organique*



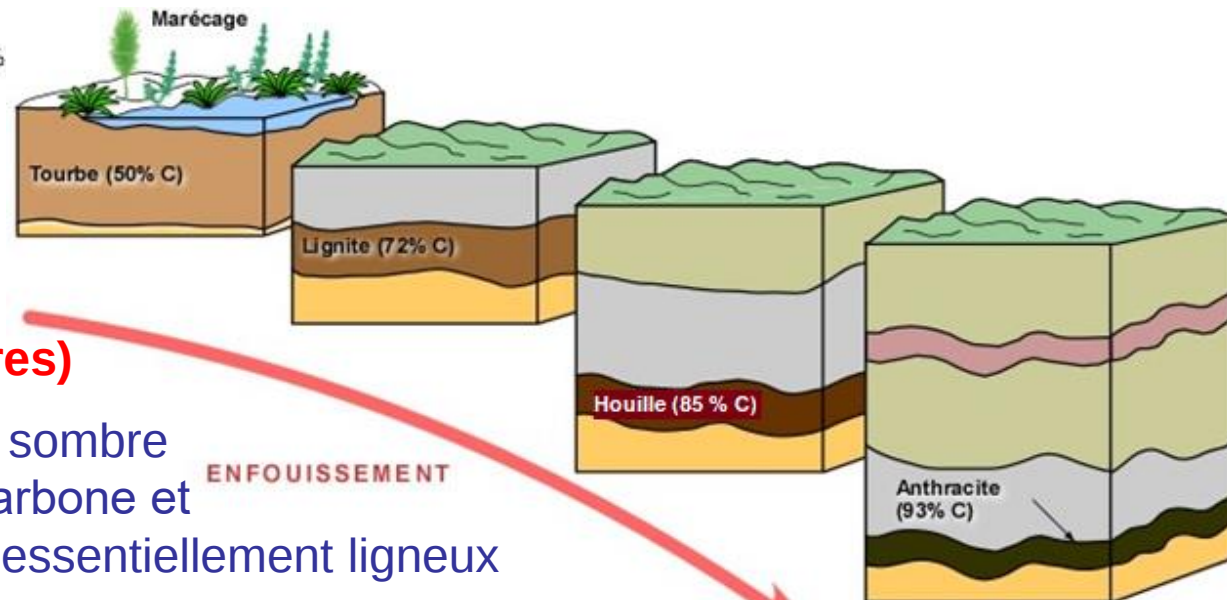
Réservoir	Etat	Nature (formes du Carbone)	Masse (en GtC)	Indicateur pour quantification	Ordre de grandeur
Atmosphère	gazeux	CO ₂ (400 ppmv) Traces de <i>CH₄</i> (1,7 ppmv), CFC et CO	830 +/- 10	[CO ₂] _{atm}	1
Biosphère	solide ou dissous	<i>Biomolécules des êtres vivants (glucides, lipides, dont lignines, protides acides nucléiques)</i>	450 à 650	Mesures de biomasse	1
Sols Nécromasse	solide, dissous ou gazeux	<i>Biomasse des microorganismes des sols ; nécromasse du sol (et des fonds océaniques)</i>	1500 à 2400	Relevés pédologiques	3
Hydrosphère (océan mondial)	dissous	HCO ₃ ⁻ (≈ 93%), CO ₃ ²⁻ (≈ 6%) CO ₂ (≈ 1%)	39 000	pH des eaux océaniques	50
Croûte	solide	<i>Hydrates de méthane (pergélisols ; fonds marins)</i>	3000 à 10 000	Relevés géologiques	10
	solide	Carbonates (carbone oxydé) : - calcite, aragonite : CaCO ₃ - marbres : CaCO ₃ - dolomite : CaMg(CO ₃) ₂	≈ 1.10 ⁸		+++ x 10 ⁶
	solide ou liquide	<i>Matière organique fossile Exploitable (< 1%) : gaz : 400 -1100 ; huile: ≈ 200 ; charbons : ≈ 500</i>	2. 10 ⁷		+++ x 10 ⁴
	solide	Carbone des roches silicatées	5.10 ⁷		+++
Manteau, noyau	Solide, liquide, gazeux	Diamant, carbonates, CO ₂	De 1.10 ⁷ à 7.10 ⁸	Teneur en carbone des laves	+++ x 10 ⁸

Document 5. La formation des roches carbonées.



La formation des hydrocarbures
(à partir de matière organique planctonique)

« huile » ou pétrole s.l. = mélange liquide d'hydrocarbures de densité 0,8 – 1,02 provenant de kérogènes marins ou lacustres



La formation de charbon
(à partir de végétaux terrestres)

charbon = roche sédimentaire sombre formées d'au moins 50 % de carbone et provenant de débris végétaux, essentiellement ligneux

<http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/combustibles.fossiles.html>

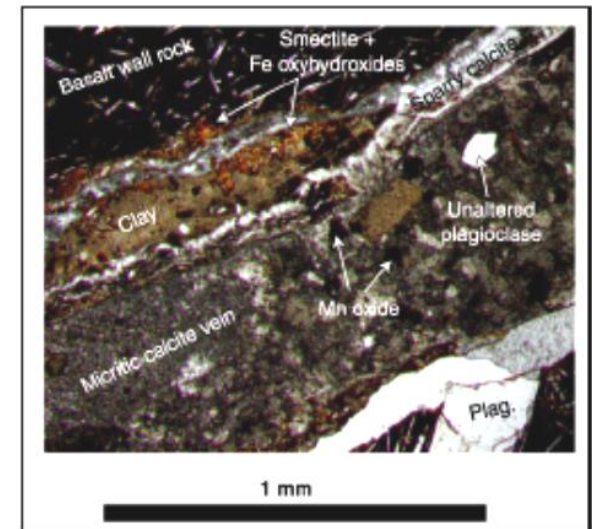
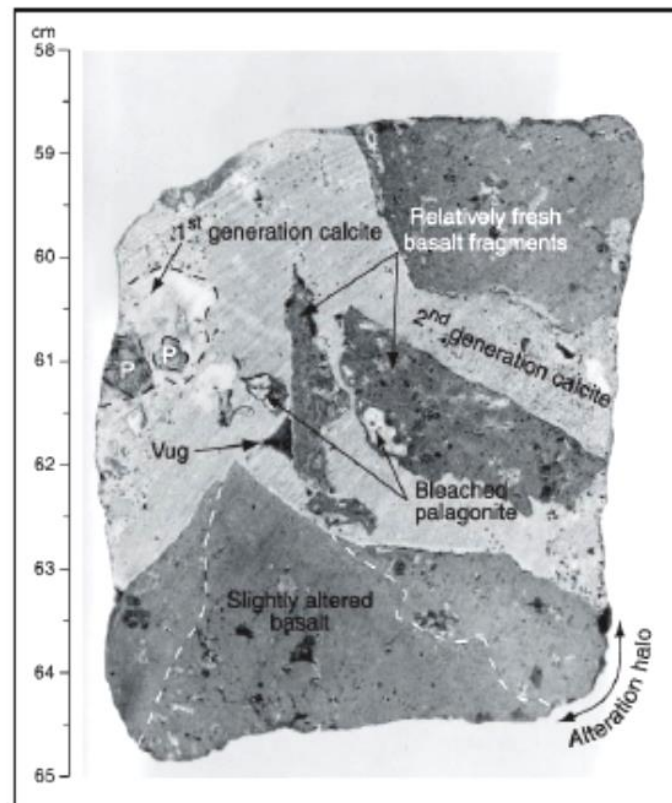
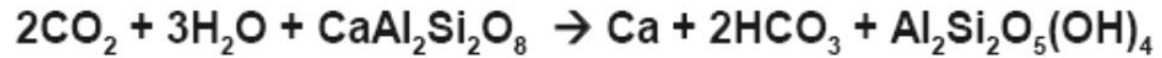
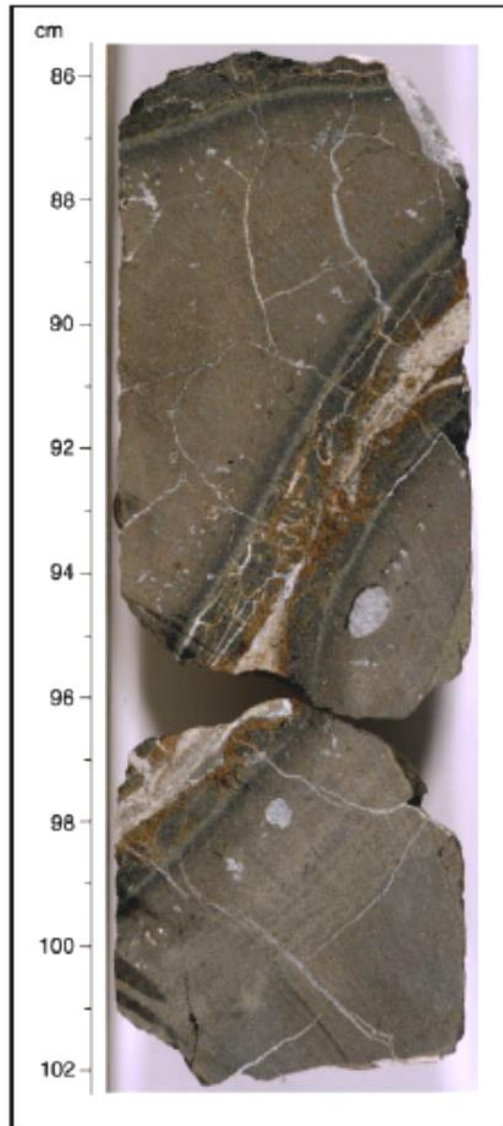
Document 3. Formes du carbone dans les réservoirs et tailles des réservoirs.

Réservoir dilué / **concentré** Matière minérale / *organique*



Réservoir	Etat	Nature (formes du Carbone)	Masse (en GtC)	Indicateur pour quantification	Ordre de grandeur
Atmosphère	gazeux	CO ₂ (400 ppmv) Traces de <i>CH₄</i> (1,7 ppmv), CFC et CO	830 +/- 10	[CO ₂] _{atm}	1
Biosphère	solide ou dissous	<i>Biomolécules des êtres vivants (glucides, lipides, dont lignines, protides acides nucléiques)</i>	450 à 650	Mesures de biomasse	1
Sols Nécromasse	solide, dissous ou gazeux	<i>Biomasse des microorganismes des sols ; nécromasse du sol (et des fonds océaniques)</i>	1500 à 2400	Relevés pédologiques	3
Hydrosphère (océan mondial)	dissous	HCO ₃ ⁻ (≈ 93%), CO ₃ ²⁻ (≈ 6%) CO ₂ (≈ 1%)	39 000	pH des eaux océaniques	50
Croûte	solide	<i>Hydrates de méthane (pergélisols ; fonds marins)</i>	3000 à 10 000	Relevés géologiques	10
	solide	Carbonates (carbone oxydé) : - calcite, aragonite : CaCO ₃ - marbres : CaCO ₃ - dolomite : CaMg(CO ₃) ₂	≈ 1.10 ⁸		+++ x 10 ⁶
	solide ou liquide	<i>Matière organique fossile Exploitable (< 1%) : gaz : 400 -1100 ; huile: ≈ 200 ; charbons : ≈ 500</i>	2. 10 ⁷		+++ x 10 ⁴
	solide	Carbone des roches silicatées	5.10 ⁷		+++
Manteau, noyau	Solide, liquide, gazeux	Diamant, carbonates, CO ₂	De 1.10 ⁷ à 7.10 ⁸	Teneur en carbone des laves	+++ x 10 ⁸

Les carbonates dans les basaltes des planchers océaniques



Réserve : ? 2 à 10 10^6 Gt C

Document 3. Formes du carbone dans les réservoirs et tailles des réservoirs.

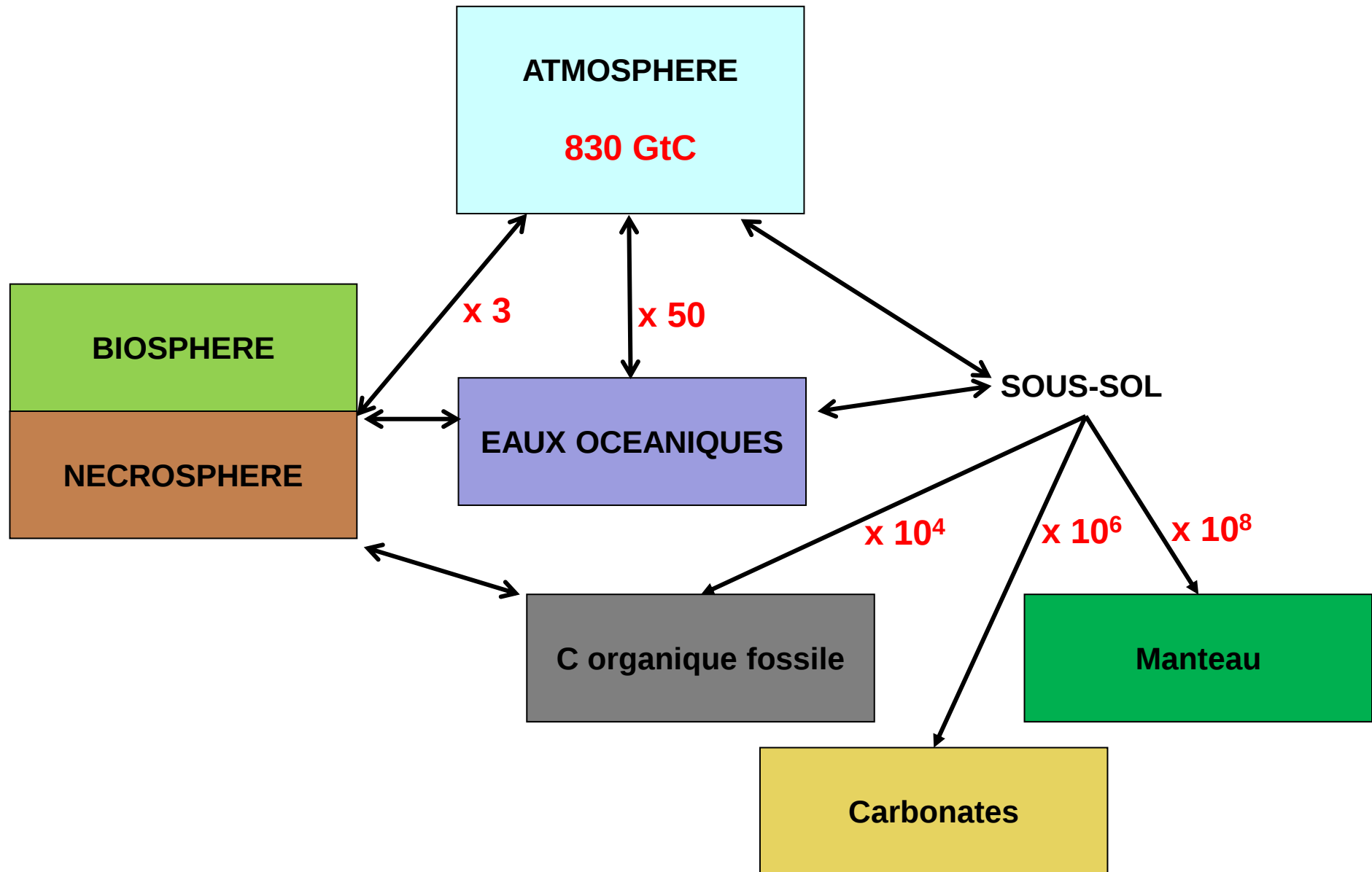
Réservoir dilué / **concentré**

Matière minérale / *organique*

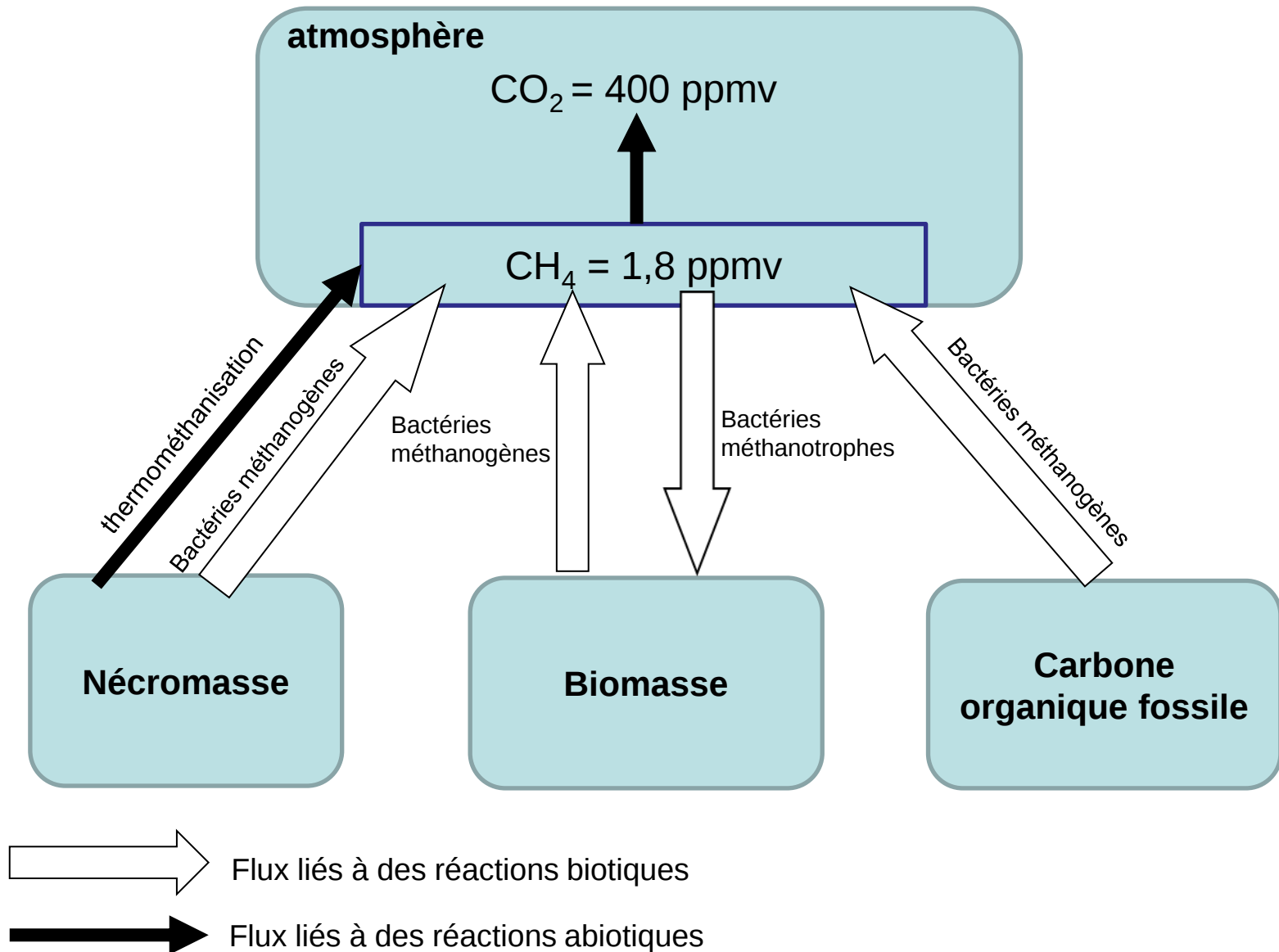


Réservoir	Etat	Nature (formes du Carbone)	Masse (en GtC)	Indicateur pour quantification	Ordre de grandeur
Atmosphère	gazeux	CO ₂ (400 ppmv) Traces de <i>CH₄</i> (1,7 ppmv), CFC et CO	830 +/- 10	[CO ₂] _{atm}	1
Biosphère	solide ou dissous	<i>Biomolécules des êtres vivants (glucides, lipides, dont lignines, protides acides nucléiques)</i>	450 à 650	Mesures de biomasse	1
Sols Nécromasse	solide, dissous ou gazeux	<i>Biomasse des microorganismes des sols ; nécromasse du sol (et des fonds océaniques)</i>	1500 à 2400	Relevés pédologiques	3
Hydrosphère (océan mondial)	dissous	HCO ₃ ⁻ (≈ 93%), CO ₃ ²⁻ (≈ 6%) CO ₂ (≈ 1%)	39 000	pH des eaux océaniques	50
Croûte	solide	<i>Hydrates de méthane (pergélisols ; fonds marins)</i>	3000 à 10 000	Relevés géologiques	10
	solide	Carbonates (carbone oxydé) : - calcite, aragonite : CaCO ₃ - marbres : CaCO ₃ - dolomite : CaMg(CO ₃) ₂	≈ 1.10 ⁸		+++ x 10 ⁶
	solide ou liquide	<i>Matière organique fossile Exploitable (< 1%) : gaz : 400 -1100 ; huile: ≈ 200 ; charbons : ≈ 500</i>	2. 10 ⁷		+++ x 10 ⁴
	solide	Carbone des roches silicatées	5.10 ⁷		+++
Manteau, noyau	Solide, liquide, gazeux	Diamant, carbonates, CO ₂	De 1.10 ⁷ à 7.10 ⁸	Teneur en carbone des laves	+++ x 10 ⁸

Document 6. Les ordres de grandeur à retenir.



Document 7. Flux impliquant le réservoir atmosphérique méthane.

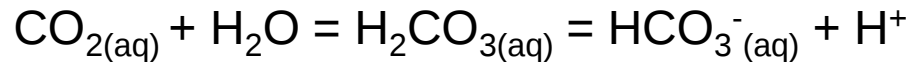


Document 8. L'altération, une pompe chimique de CO₂.

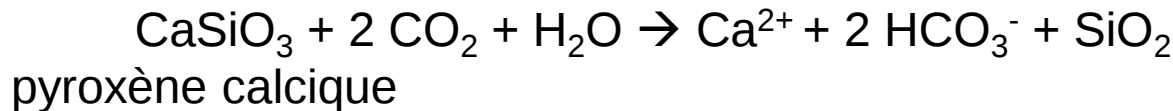
- **L'altération des silicates :**



Les protons proviennent pour l'essentiel de :

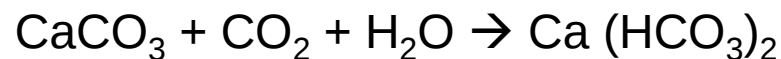


→ Consommation de 2 CO₂ pour 3 orthoses



→ Consommation de 2 CO₂ pour 1 pyroxène calcique

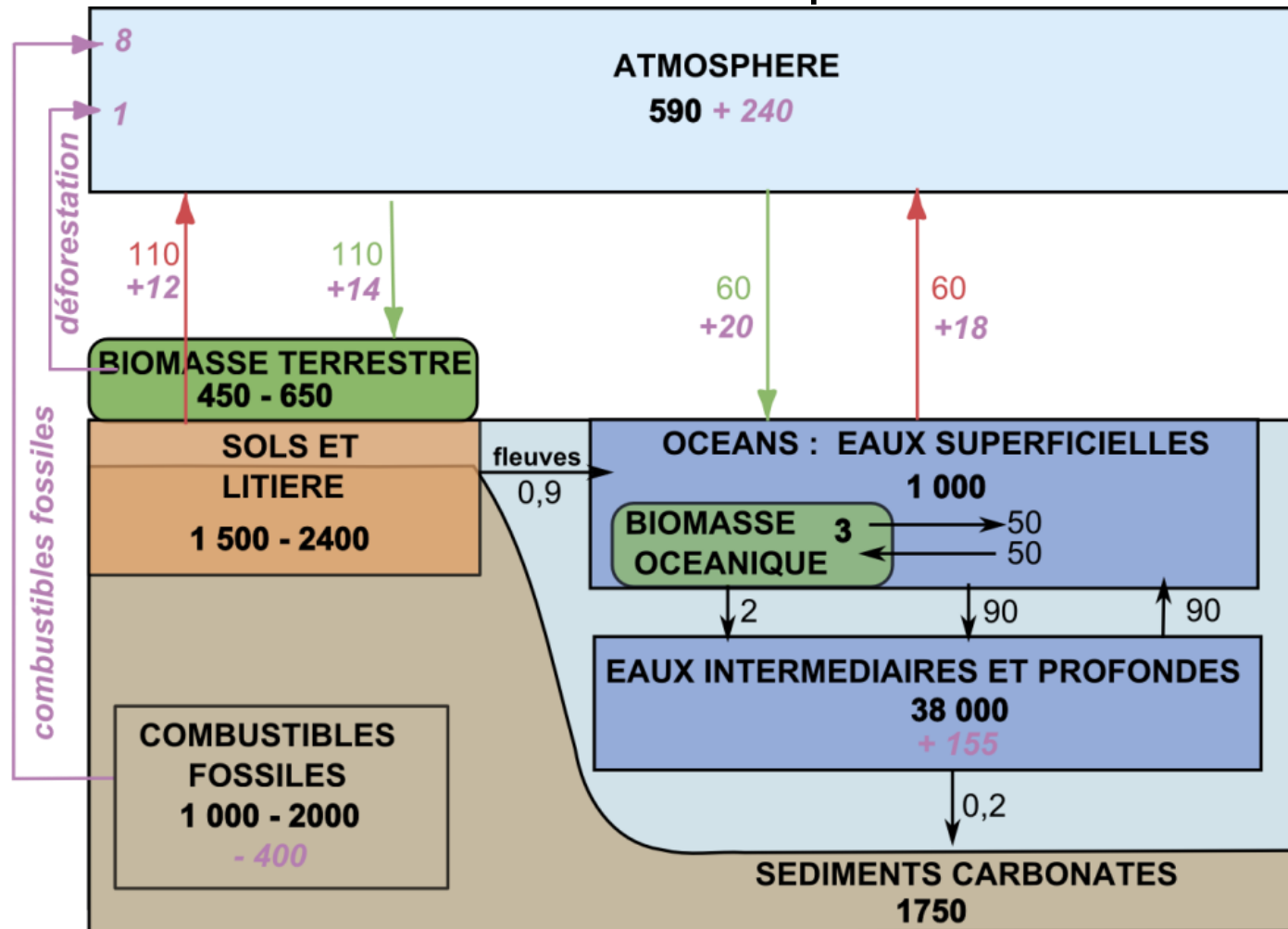
- **L'altération des carbonates :**



→ Consommation de 1 CO₂ pour 1 calcite

Document 9. Les flux de carbone entre réservoirs.

Les masses sont indiquées en GtC



Masse des réservoirs en GtC ou PgC

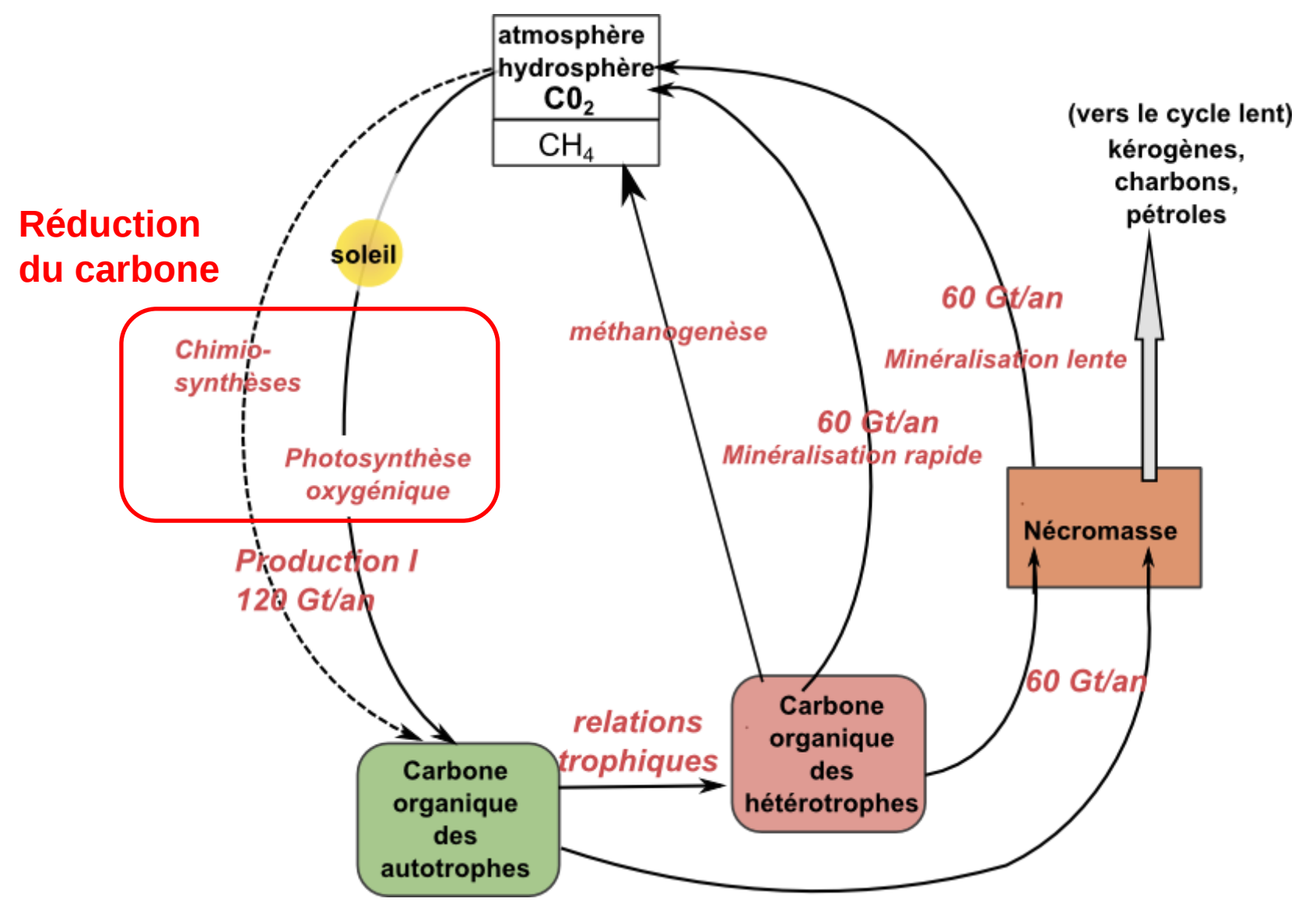
→ Flux en GtC.an⁻¹ ou PgC.an⁻¹

→ Flux consommant du CO₂ atmosphérique

→ Flux dégageant du CO₂ vers l'atmosphère

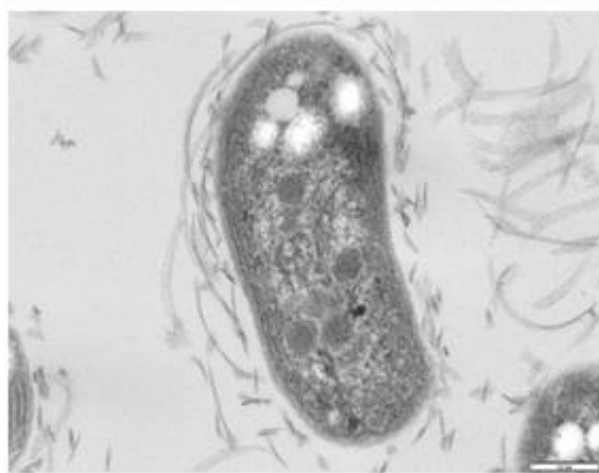
Modifications d'origine anthropique (depuis 1750) avec les mêmes unités

Document 10. Le cycle court du carbone réduit.



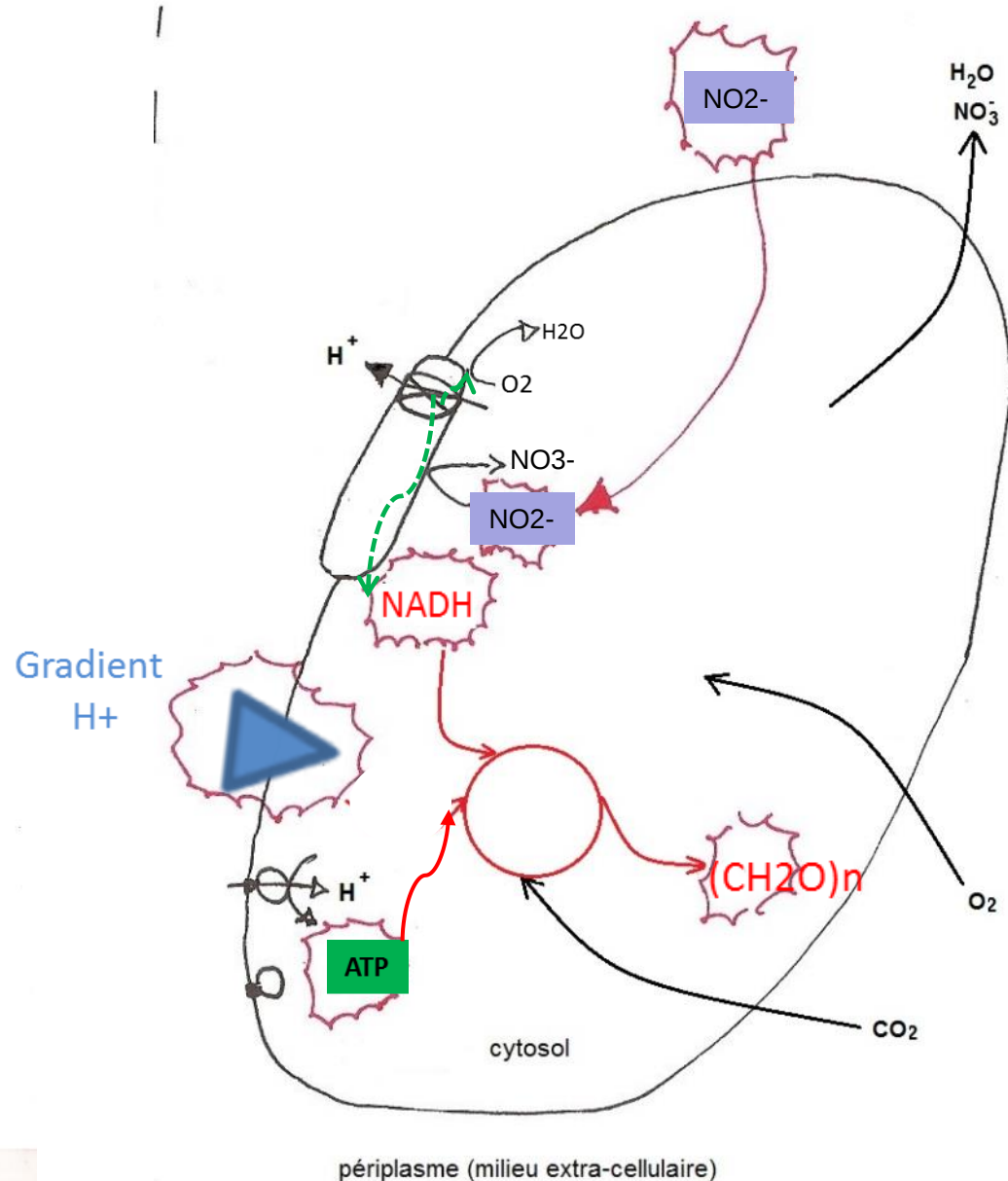
Chimiosynthèse et autotrophie au carbone

Chimiolithotrophie



Nitrobacter (MET)

(W.J. Hickey, University of Wisconsin-Madison, 2006)



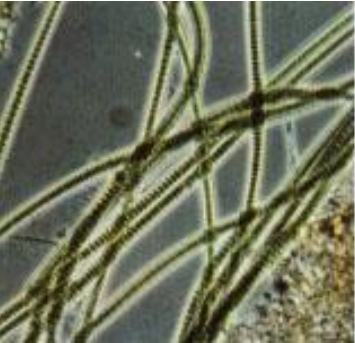
Les photosynthèses

Photosynthèse oxygénique

H₂O donneur d'électrons

Cyanobactéries

Oscillaires



Nostoc



Anaboena



Anaboena et *Nostoc* fixent N₂
Elles vivent dans les sols et peuvent
être utilisés comme engrais verts.



Synechococcus
Près de 25 % de la
productivité des
écosystèmes marins

Photosynthèse anoxygénique

H₂S donneur d'électrons

Bactéries pourpres sulfureuses



Chromatium

<http://starcentral.mbl.edu/microscope/portal.php>

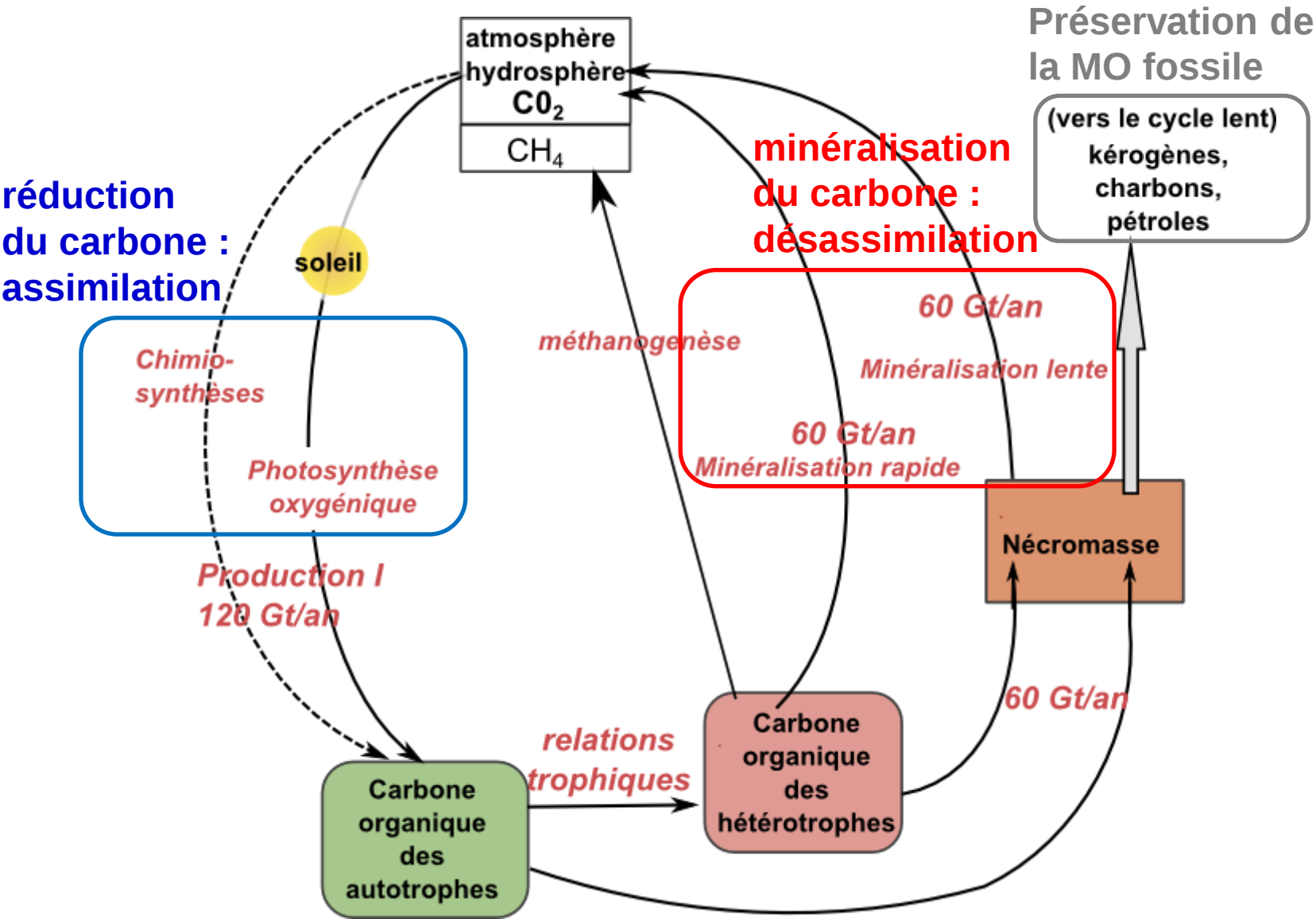
Bactéries vertes sulfureuses



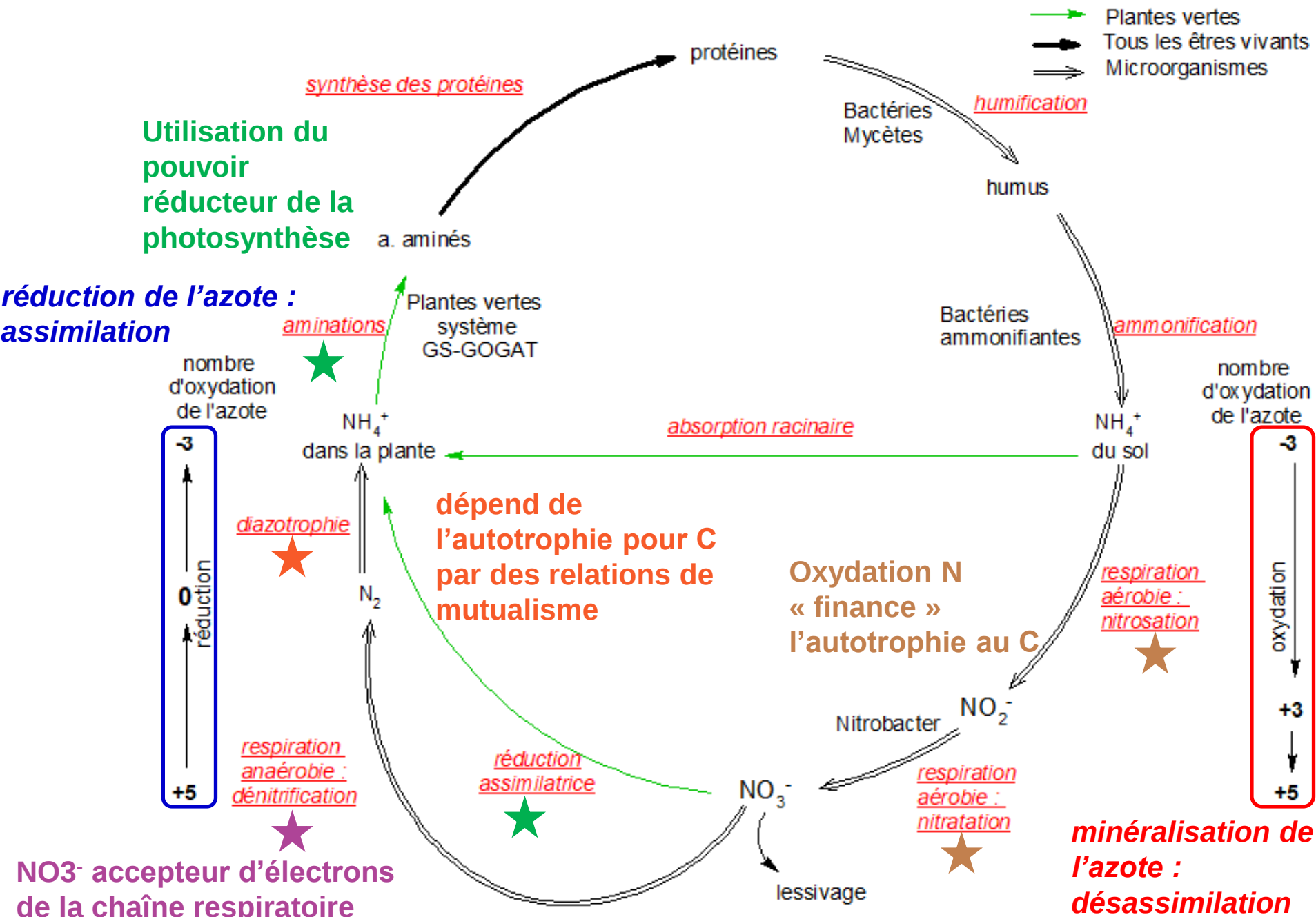
Chlorobium

www.chm.bris.ac.uk/motm/oec/backup/motmc.htm

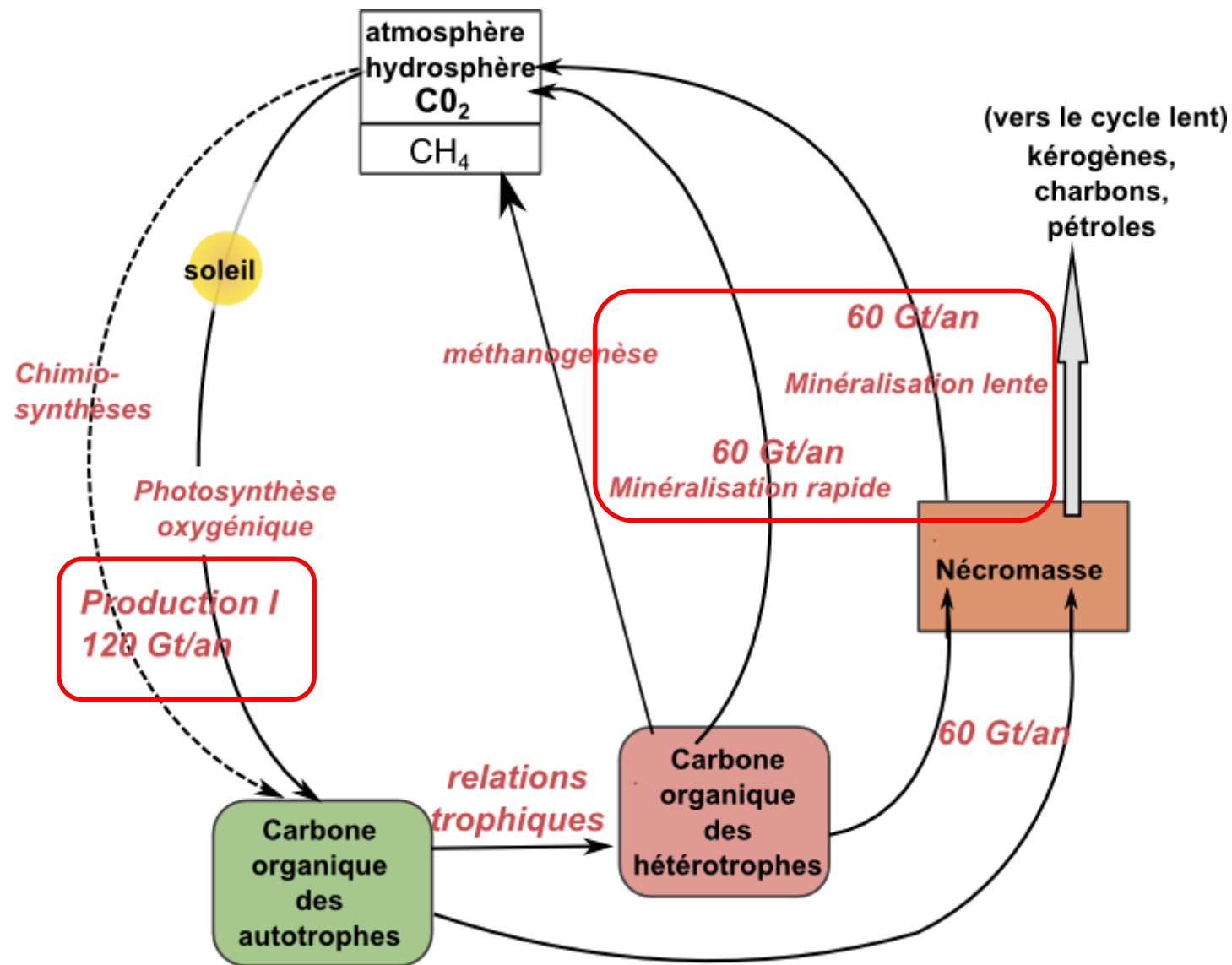
Document 10. Le cycle court du carbone réduit.



Document 11. Liens entre cycle de l'azote et cycle du carbone

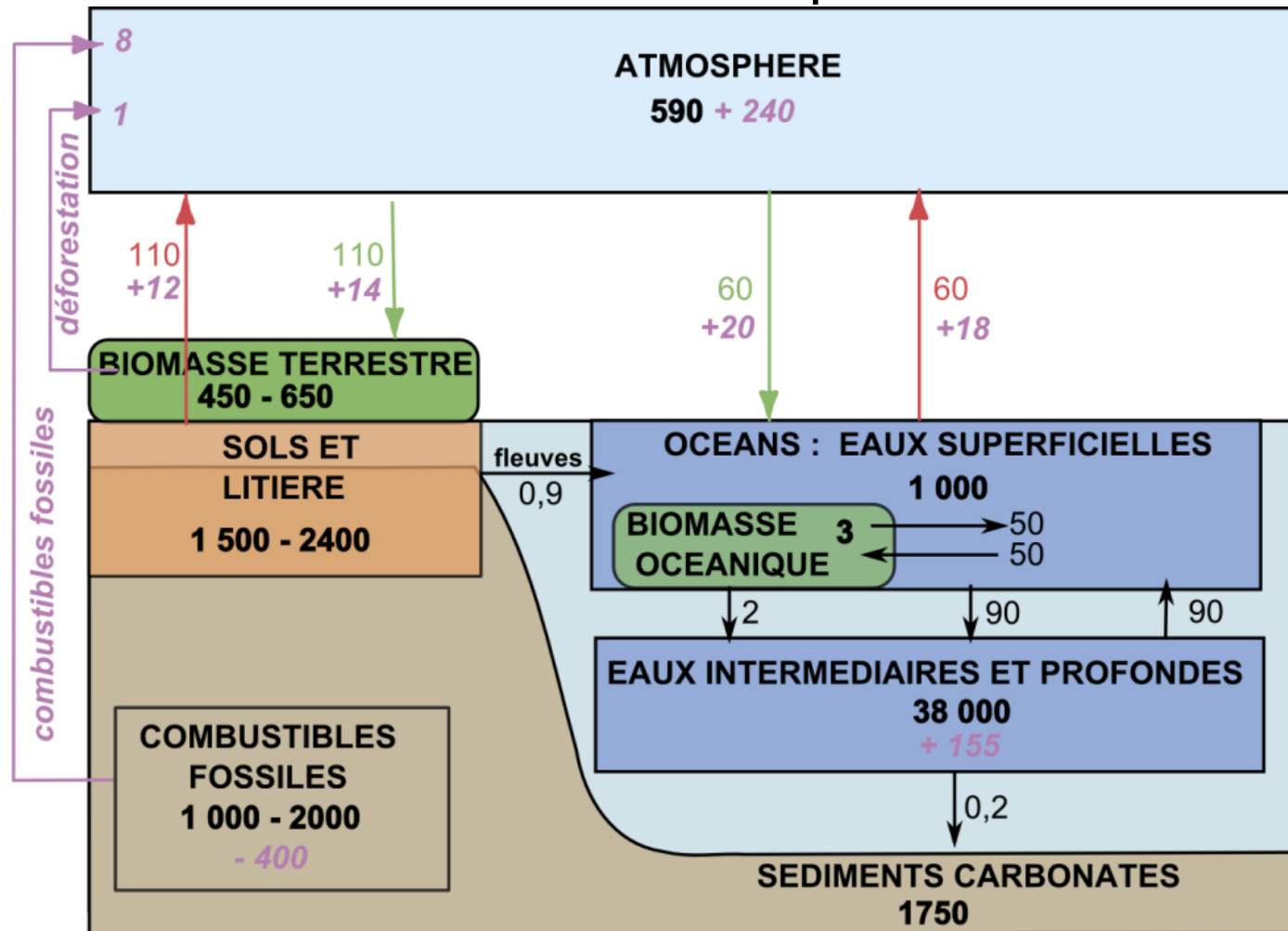


Document 10. Le cycle court du carbone réduit.



Document 9. Les flux de carbone entre réservoirs.

Les masses sont indiquées en GtC



Masse des réservoirs en GtC ou PgC

→ Flux en GtC.an⁻¹ ou PgC.an⁻¹

→ Flux consommant du CO₂ atmosphérique

→ Flux dégageant du CO₂ vers l'atmosphère

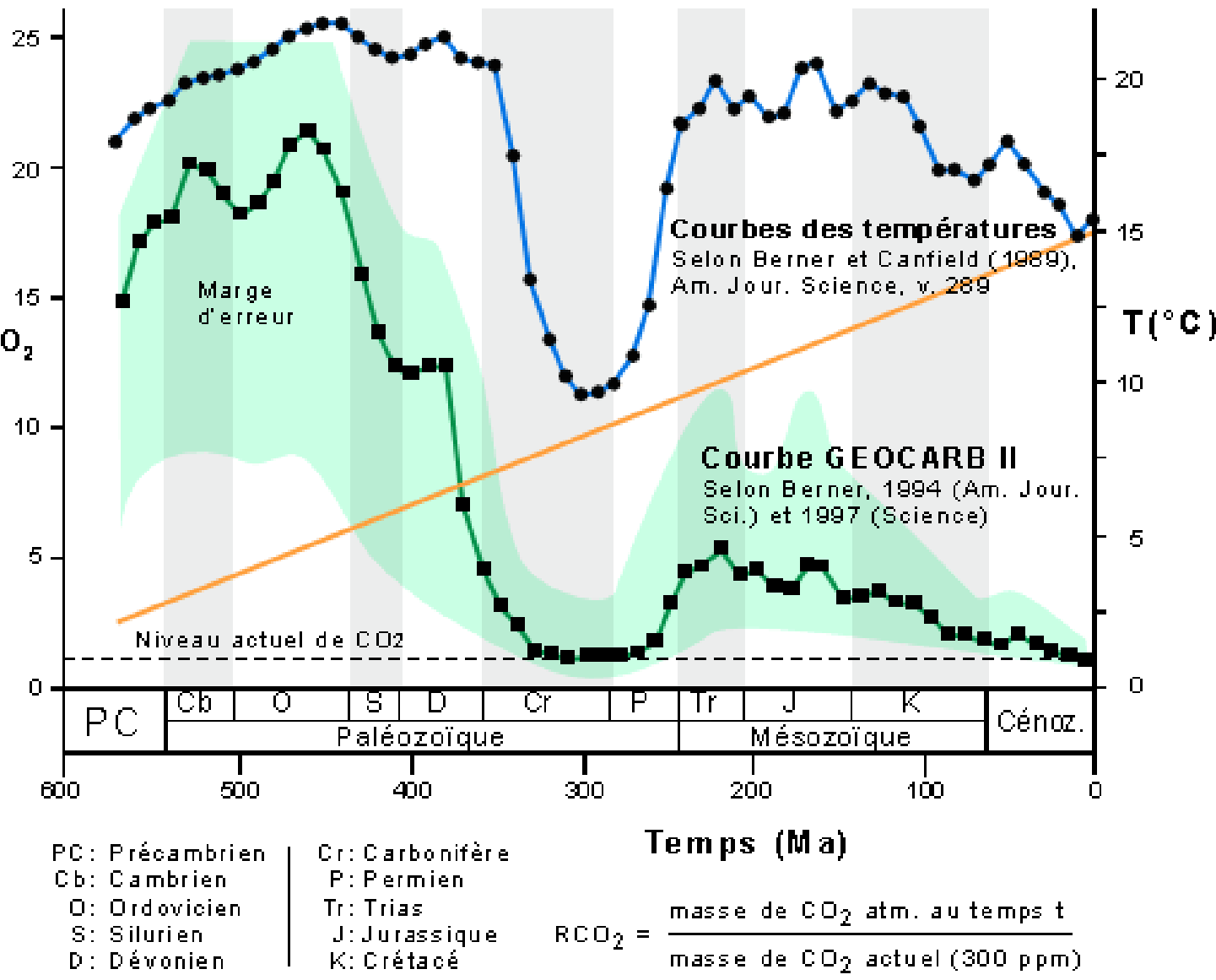
Modifications d'origine anthropique (depuis 1750) avec les mêmes unités

Document 12. Modélisation des variations de la teneur en CO₂ atmosphérique durant le Phanérozoïque.

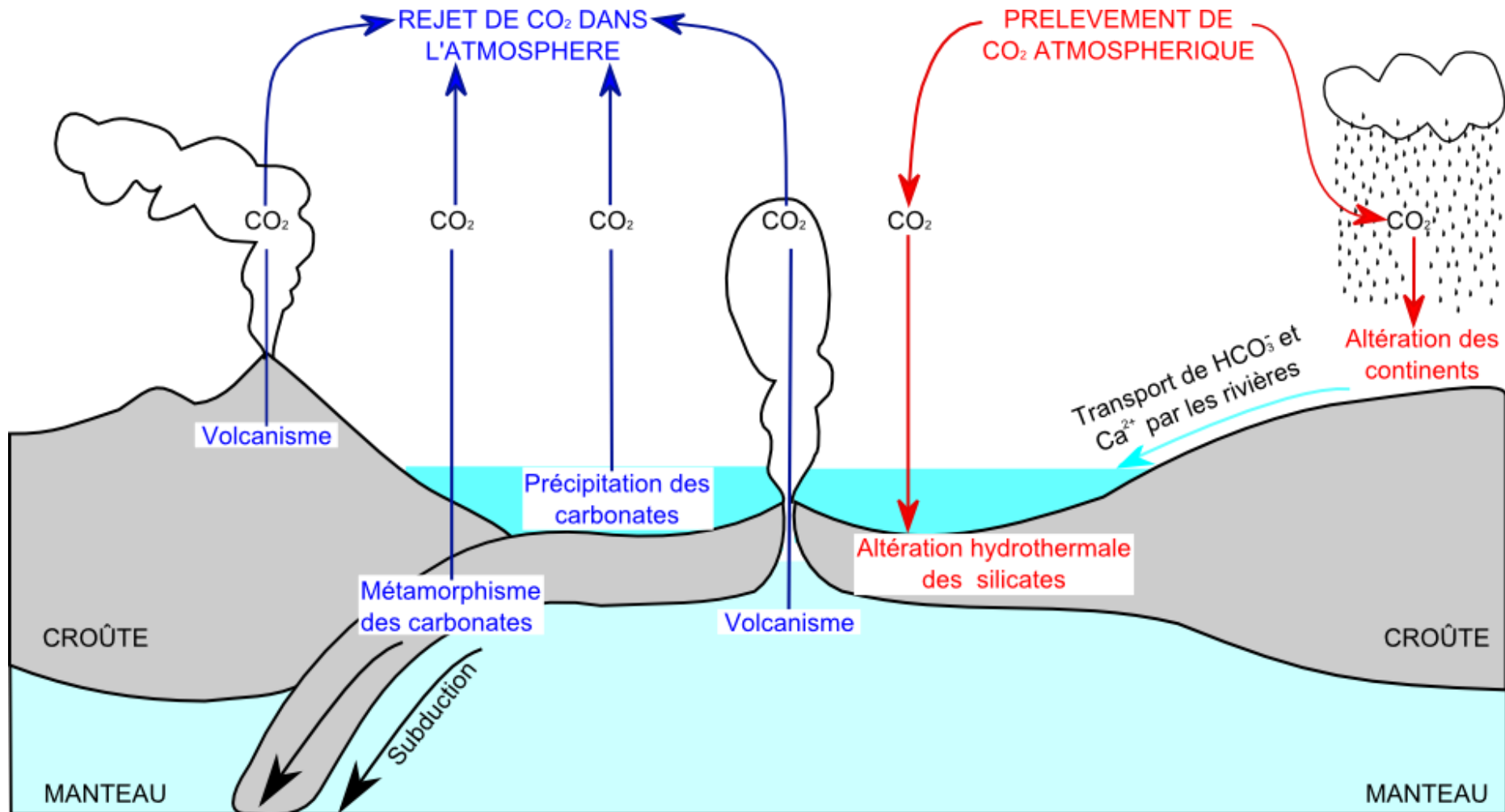
En vert, les variations de la teneur en CO₂ atmosphérique par rapport à la valeur actuelle, juste avant l'ère industrielle. Sont représentés les points qui ont servi à construire la courbe, ainsi que la marge d'erreur liée à la méthode.

En orange, températures de surface calculées uniquement en fonction de la variation de l'intensité du rayonnement solaire, en l'absence de CO₂.

En bleu, températures de surface calculées en tenant compte également des teneurs en CO₂ atmosphérique.

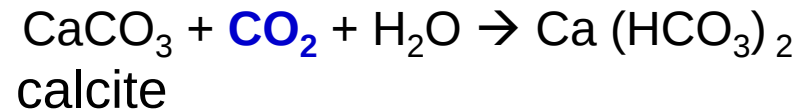


Document 13. Le cycle long du carbone.





- **L'altération des carbonates :**



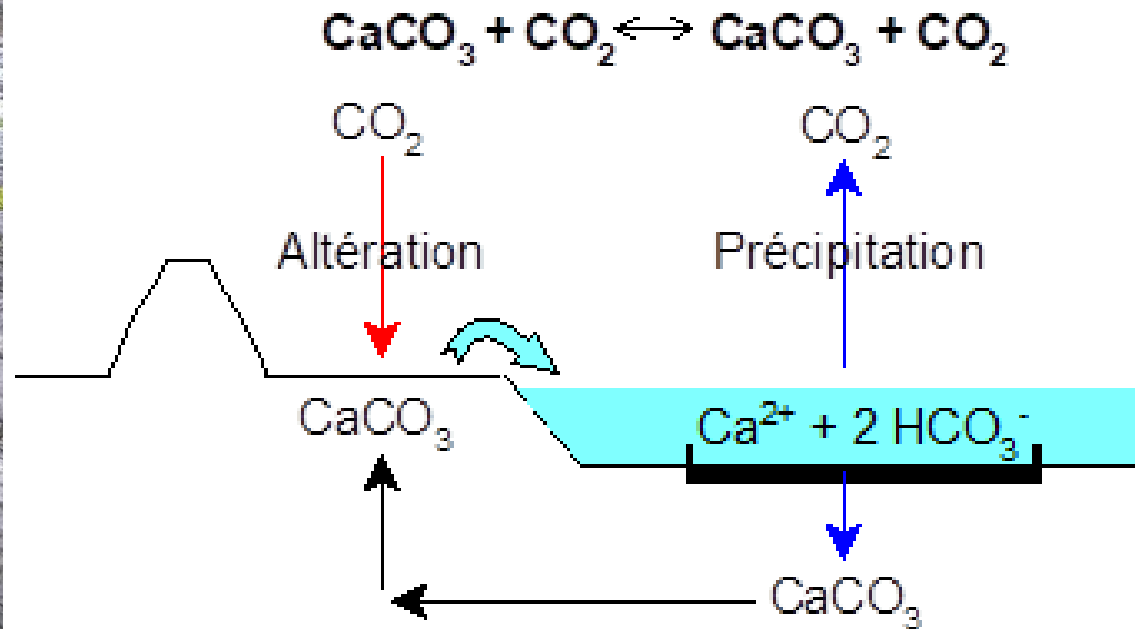
→ Consommation de **1 CO₂** et
production de 2 HCO₃⁻

- **La précipitation des carbonates :**

→ Consommation de 2 HCO₃⁻ et
production de **1 CO₂**

Lapiaz de la carrière de Savoie à
Hauteville (01)

Document 14. Le cycle des carbonates.

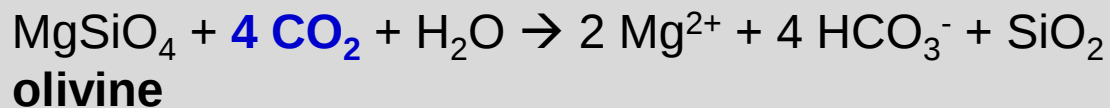
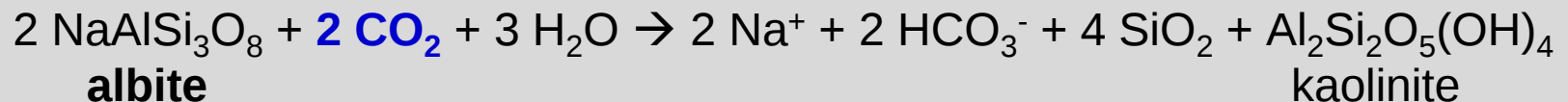
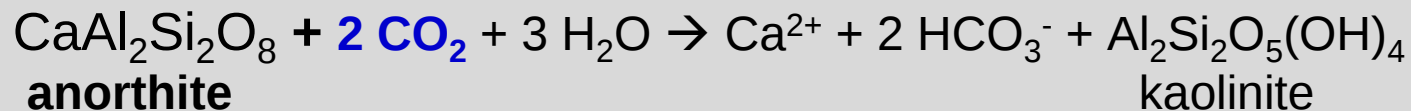
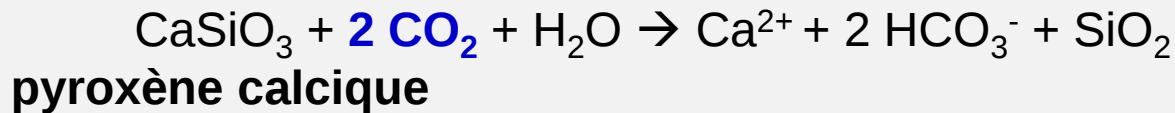
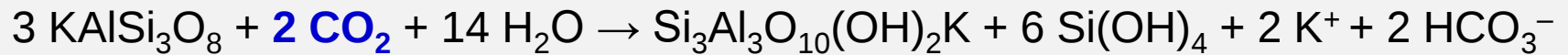


Lapiaz de la carrière de Savoie à Hauteville (01)

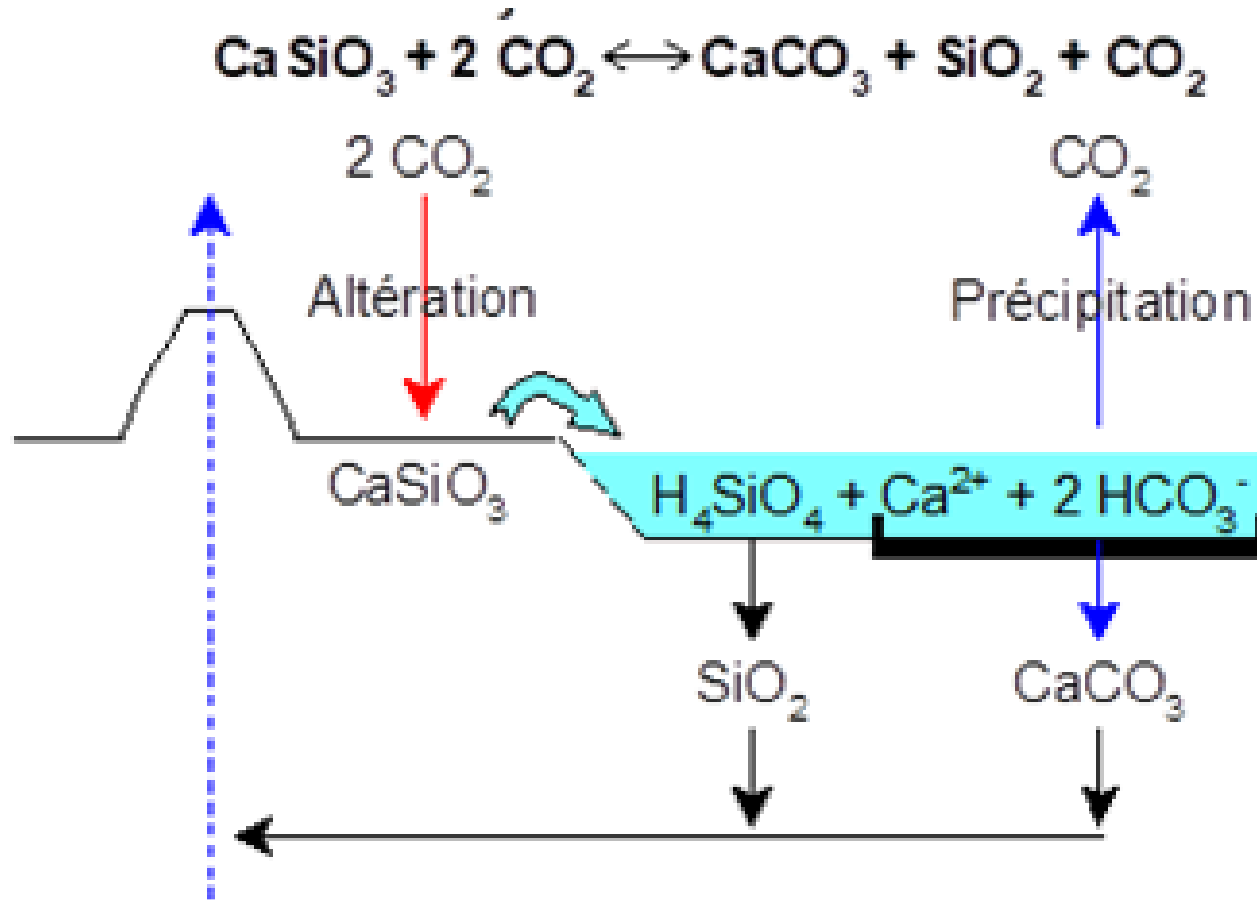
L'altération des silicates continentaux consomme du CO₂



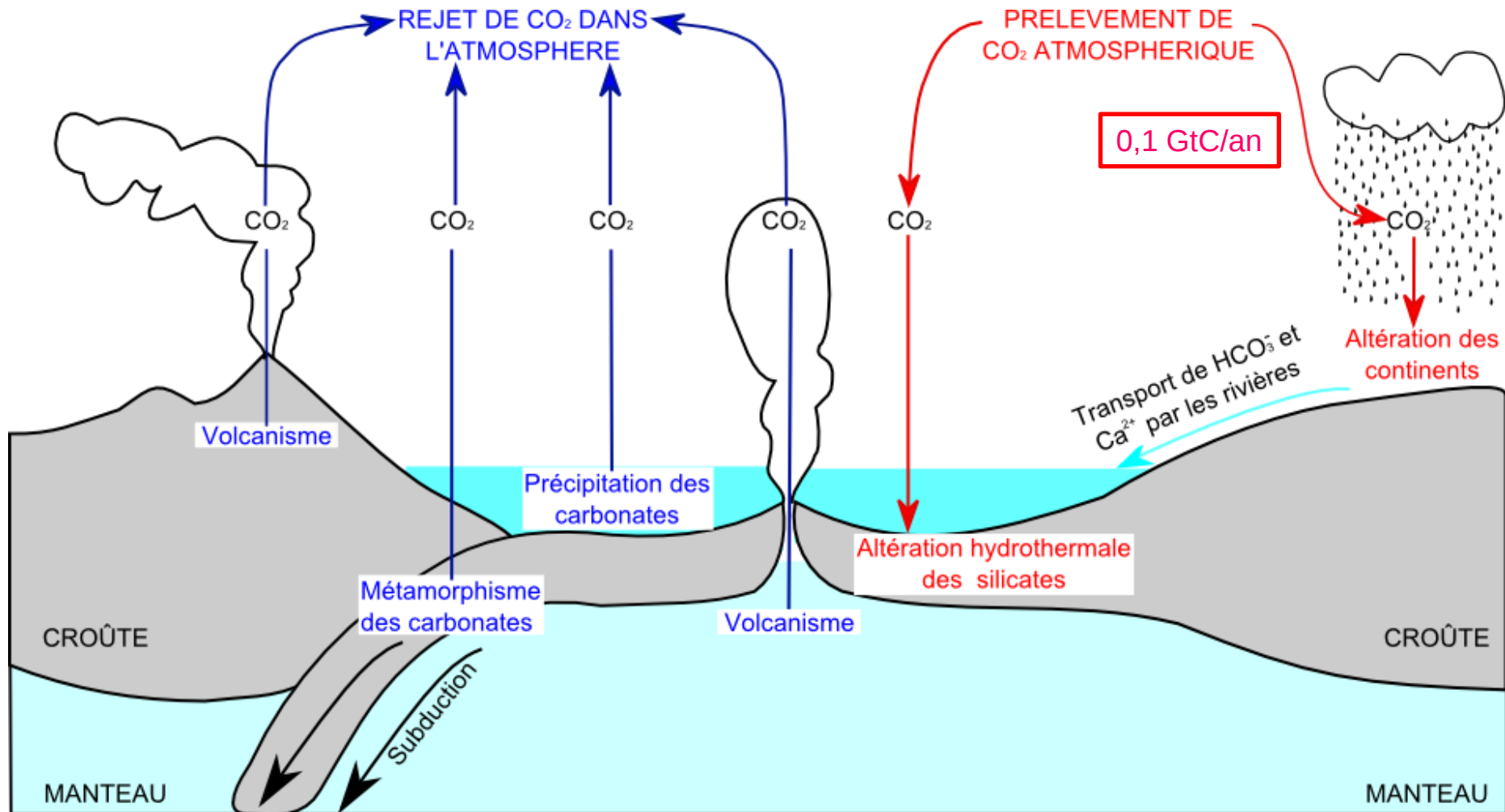
Devient, en tenant compte de l'origine des protons :



Document 15. Le cycle des silicates.

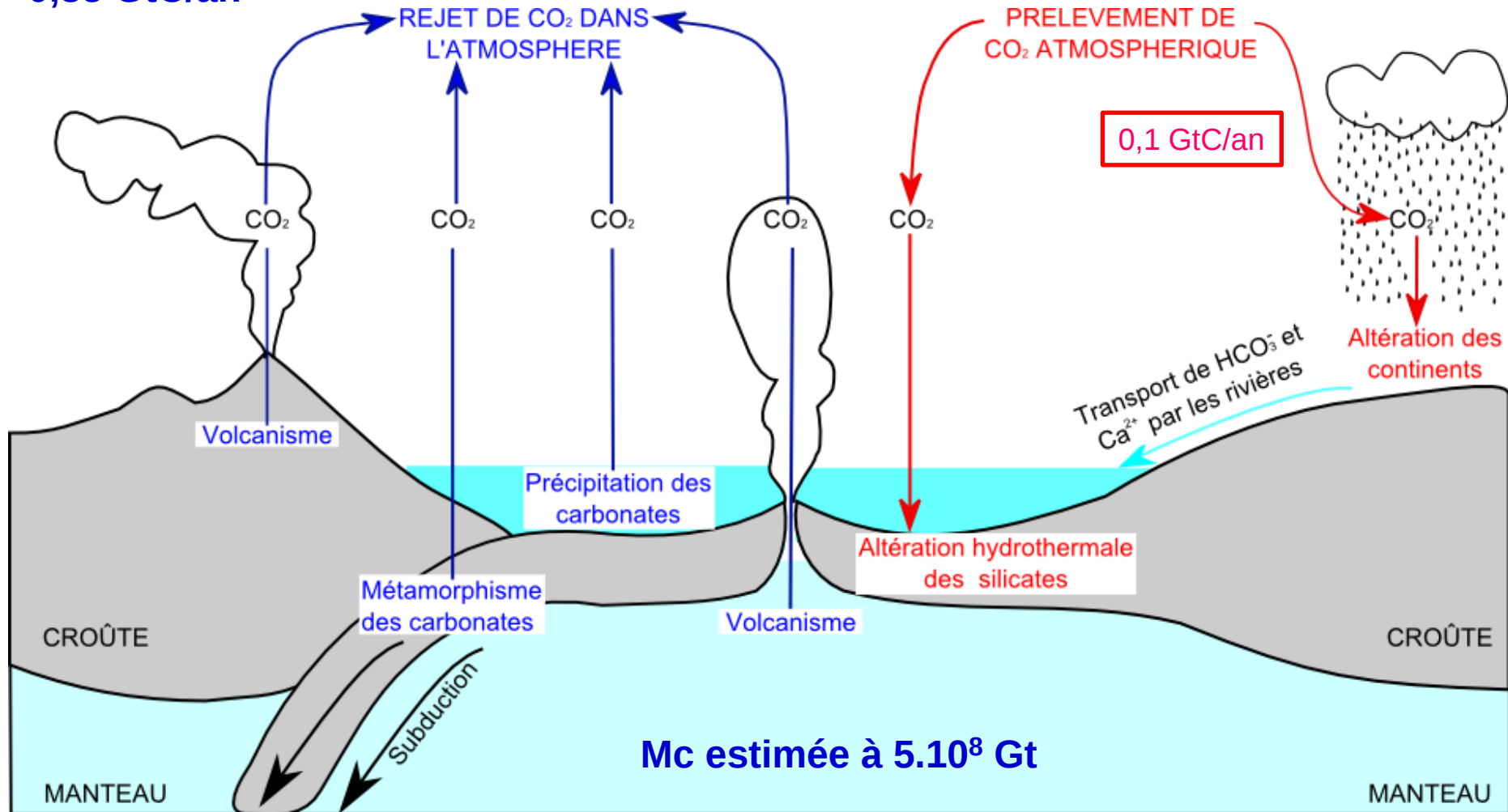


Document 13. Le cycle long du carbone.



Document 13. Le cycle long du carbone.

Flux de C extrait du manteau par volcanisme estimé à :
0,35 GtC/an



Document 13. Le cycle long du carbone.

Flux de C extrait du manteau par volcanisme estimé à :
0,35 GtC/an

