



# LE CYCLE DU CARBONE



—

***Webinaire n°3  
Du 7 décembre 2023  
Michel Jauzein,  
Professeur de Science des Sols***



1. La photosynthèse dans les océans
2. La photosynthèse sur les continents
3. La matière organique et les sols
4. L'altération des roches dans les sols
5. Les transferts de matières dans les eaux continentales
6. La genèse des roches carbonatées dans les océans
7. La question de la production de ciments



# 1 – LA PHOTOSYNTHÈSE DANS LES OCÉANS



# La transformation du carbone minéral en carbone organique : La photosynthèse

- *Une réaction de biosynthèse possible grâce à l'énergie solaire, la formation de biomasse « sucrée »*



- Du CO<sub>2</sub> dissout dans l'eau doit diffuser et pénétrer dans un organisme photosynthétique
- Un flux de rayonnement solaire doit être disponible
- La première transformation en présence d'eau génère de la matière organique « sucrée » : glucose et autres glucides
- Si du CO<sub>2</sub> atmosphérique doit être utilisé, il doit se dissoudre dans l'eau : **environ 80 PgC/an se dissout dans les océans**
- *56 à 70 % de la photosynthèse planétaire pour 71 % des surfaces occupées par les océans (mais – de 1 % biomasse)*
  - Le rayonnement solaire est assez rapidement absorbé par l'eau en profondeur (sur environ 100 m de profondeur)
  - La diffusion des gaz dans l'eau est effective mais limitante
  - La présence de nutriments minéraux est aussi limitante

**Grande efficacité rapportée à la biomasse**

# La réaction inverse : La respiration

- *La réaction inverse permet d'utiliser l'énergie stockée dans la matière organique sucrée pour l'activité biologique :*

- Elle se traduit par une respiration des organismes vivants



- Le CO<sub>2</sub> est rejeté sous forme dissoute dans l'eau
- Une partie est liée à l'activité des organismes photosynthétiques :

**20 à 60 PgC/an**

D'où une production primaire nette de biomasse marine de :

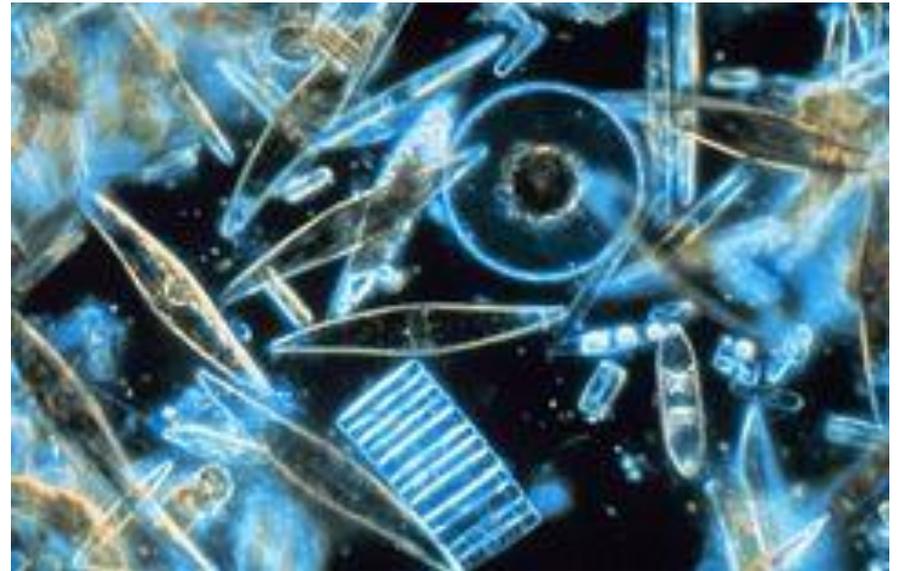
**40 à 50 PgC/an**

- Pour rejoindre l'atmosphère, le CO<sub>2</sub> rejeté doit diffuser jusqu'à la surface de l'océan et se volatiliser dans l'air atmosphérique
- Une partie de la matière organique « morte » se retrouve dissoute ou en suspension pour rejoindre les zones plus profondes avant de se minéraliser éventuellement :

**Respectivement environ 2 et 11 PgC/an**

# Une biosphère photosynthétique des océans composée de microorganismes :

- *Des protistes : microalgues du microplancton*
  - diatomées** : protistes microalgues
  - dinoflagellées** : protistes microalgues
- *Des bactéries : cyanobactéries du picoplancton*
  - cyanobactéries** : Prochlorococcus
  - cyanobactéries** : Synechococcus



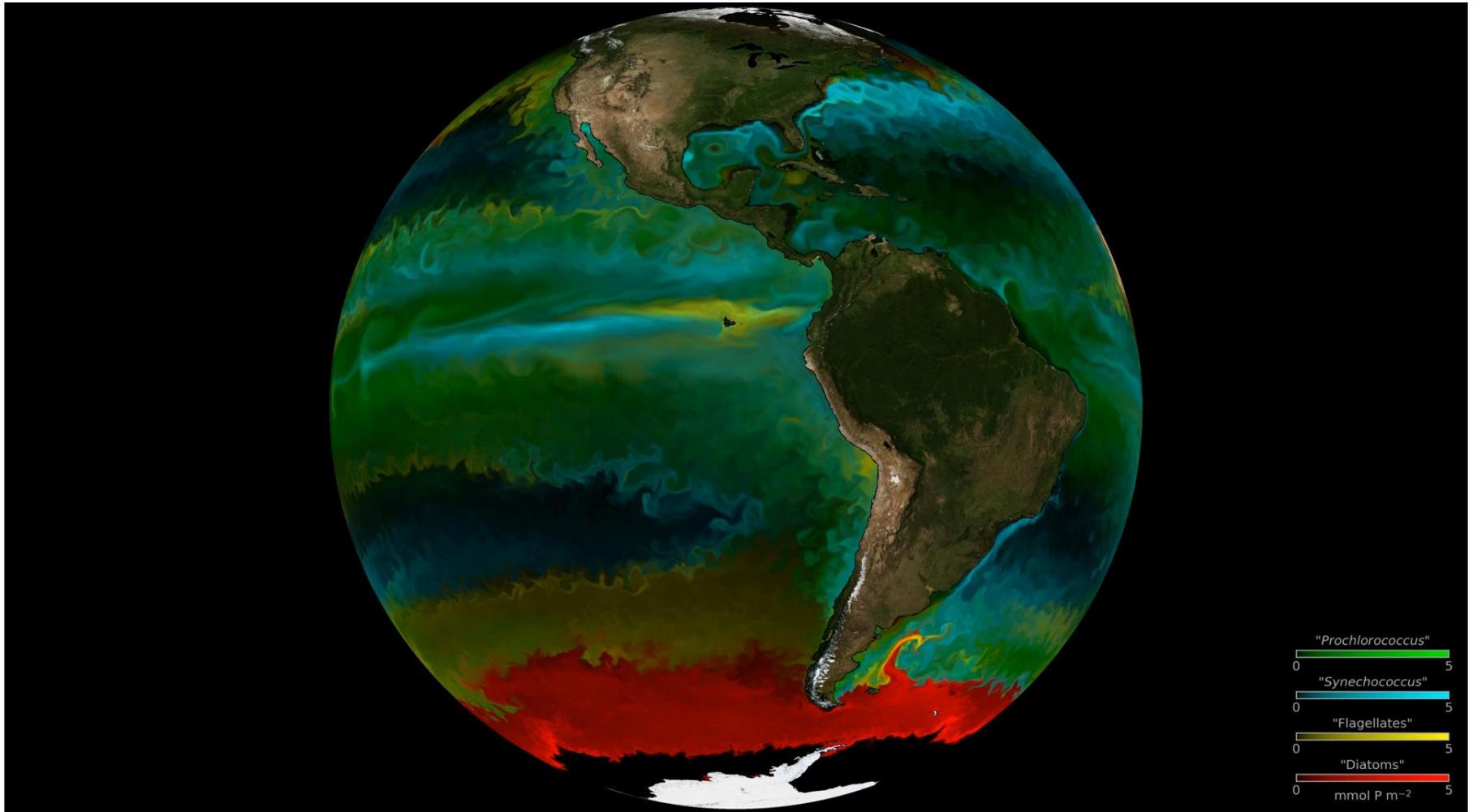
© SEM of Prochlorococcus marinus pseudo-colored, [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/be/Prochlorococcus\\_marinus.jpg/220px-Prochlorococcus\\_marinus.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/be/Prochlorococcus_marinus.jpg/220px-Prochlorococcus_marinus.jpg)

Diatomées marines vues au microscope., [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/31/Diatoms\\_through\\_the\\_microscope.jpg/240px-Diatoms\\_through\\_the\\_microscope.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/31/Diatoms_through_the_microscope.jpg/240px-Diatoms_through_the_microscope.jpg)

© [3/31/Diatoms through the microscope.jpg/240px-Diatoms through the microscope.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/31/Diatoms_through_the_microscope.jpg/240px-Diatoms_through_the_microscope.jpg)

# « Modeled Phytoplankton Communities in the Global Ocean » NASA

© <https://www.youtube.com/watch?v=noCrFOEdzEY>



**Rouge** : diatomées   **Jaune** : Flagellées   **Vert** : Prochlorococcus  
**Bleu** : Synechococcus   **Noir** : Biomasse



# 1 – LA PHOTOSYNTHÈSE SUR LES CONTINENTS



# La photosynthèse continentale

- *La photosynthèse des végétaux continentaux :*

**123 à 142 PgC/an**

- Le CO<sub>2</sub> est directement disponible dans l'air ambiant, c'est sa pression partielle qui détermine sa disponibilité
  - Le rayonnement solaire n'est filtré que par l'atmosphère, la couverture nuageuse est le principal écran
  - C'est le bon développement des surfaces foliaires des végétaux qui permet d'augmenter la captation
  - Les échanges gazeux se font principalement dans les stomates des feuilles et créent une dépendance entre échanges de CO<sub>2</sub> et d'eau
  - Les nutriments minéraux sont disponibles au niveau des sols
- *Entre 30 et 44 % de la photosynthèse planétaire pour 29 % des surfaces occupées par les continents (# 18 % hors déserts)*
    - C'est généralement la disponibilité en eau et la température qui deviennent les facteurs limitants principaux de l'activité photosynthétique des écosystèmes continentaux

**Efficiences spatiales entre 110 et 150 % supérieures aux océans**

# La respiration continentale

- *La respiration des écosystèmes continentaux :*

- Elle se traduit par une respiration des organismes vivants qui s'ajoute aux flux issus de la combustion naturelle de biomasse :

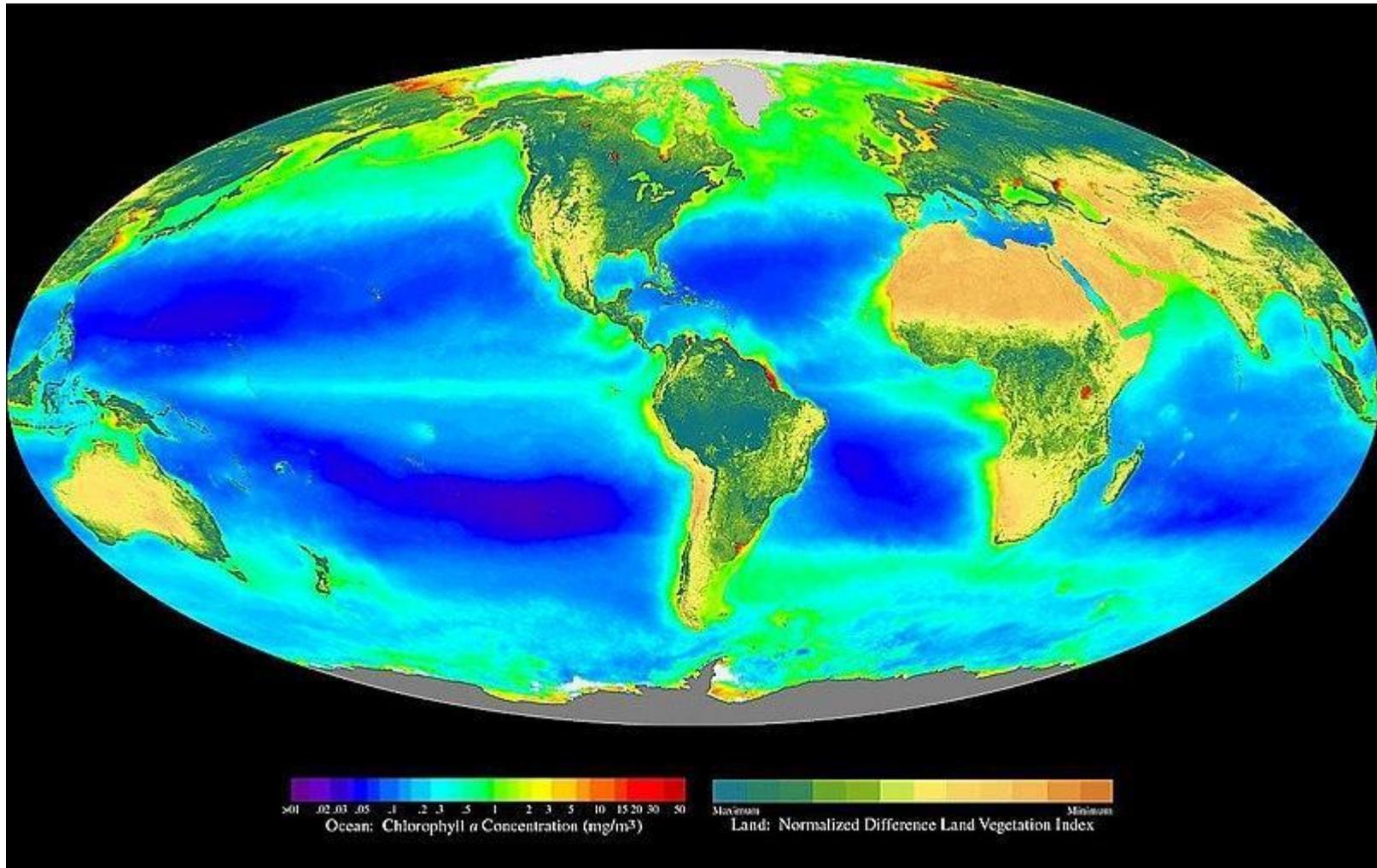
**121 à 139 PgC/an**

- Le CO<sub>2</sub> issu de la respiration et des feux naturels rejoint directement l'air ambiant de l'atmosphère pour sa plus grande part
- Une part importante est générée au niveau des sols avant de rejoindre l'atmosphère par diffusion dans l'eau et l'« atmosphère » des sols
- Une autre part rejoint les circulations des eaux continentales sous forme carbonatée (CO<sub>2</sub> dissous) ou organique (dissoute ou en suspension) :

**2 à 2,5 PgC/an**

- Ce flux des eaux continentales peut donner lieu à des précipitations de carbonates ou des dépôts sédimentaires continentaux (lacs et mers intérieures)

# Une biosphère photosynthétique des continents composée de plantes



© Provided by the [SeaWiFS Project](#), [Goddard Space Flight Center](#) and [ORBIMAGE](#), source : <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/BACKGROUND/Gallery/index.html>

# Une biosphère photosynthétique riche



**La forêt amazonienne, Brésil, © Neil Palmer/CIAT**    **La forêt boréale, Russie, © Vasiliy Tatarinov**

*Des plantes sur les continents  
(82 % de la biomasse terrestre)  
avec des protistes et des bactéries*

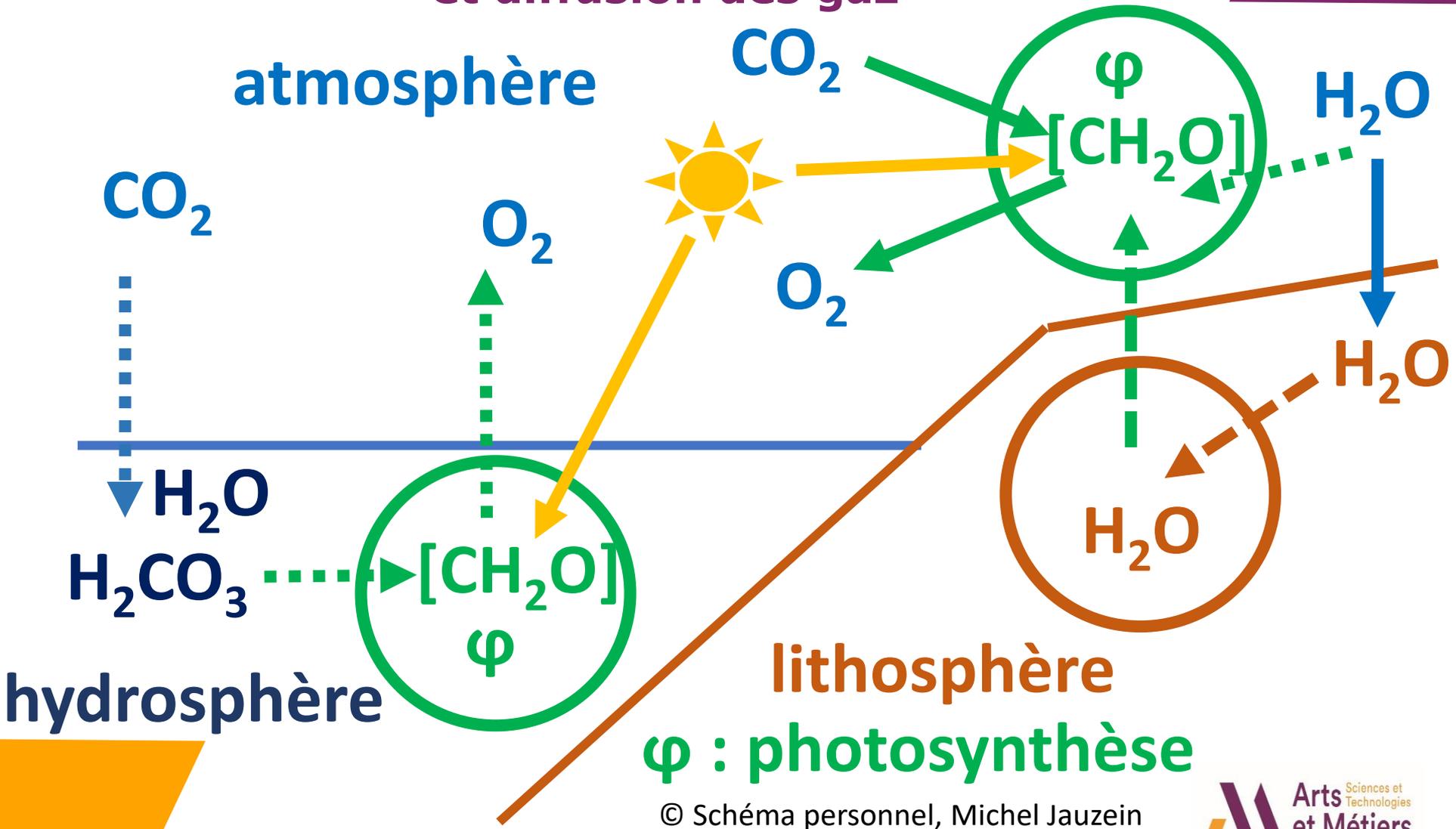


*Mais aussi des protistes  
(0,4 % de la biomasse),  
et des bactéries  
(0,3 % de la biomasse)  
dans les océans*

**La grande barrière de corail, Australie**  
© Commonwealth of Australia (GBRMPA)

1 processus biologique : la photosynthèse

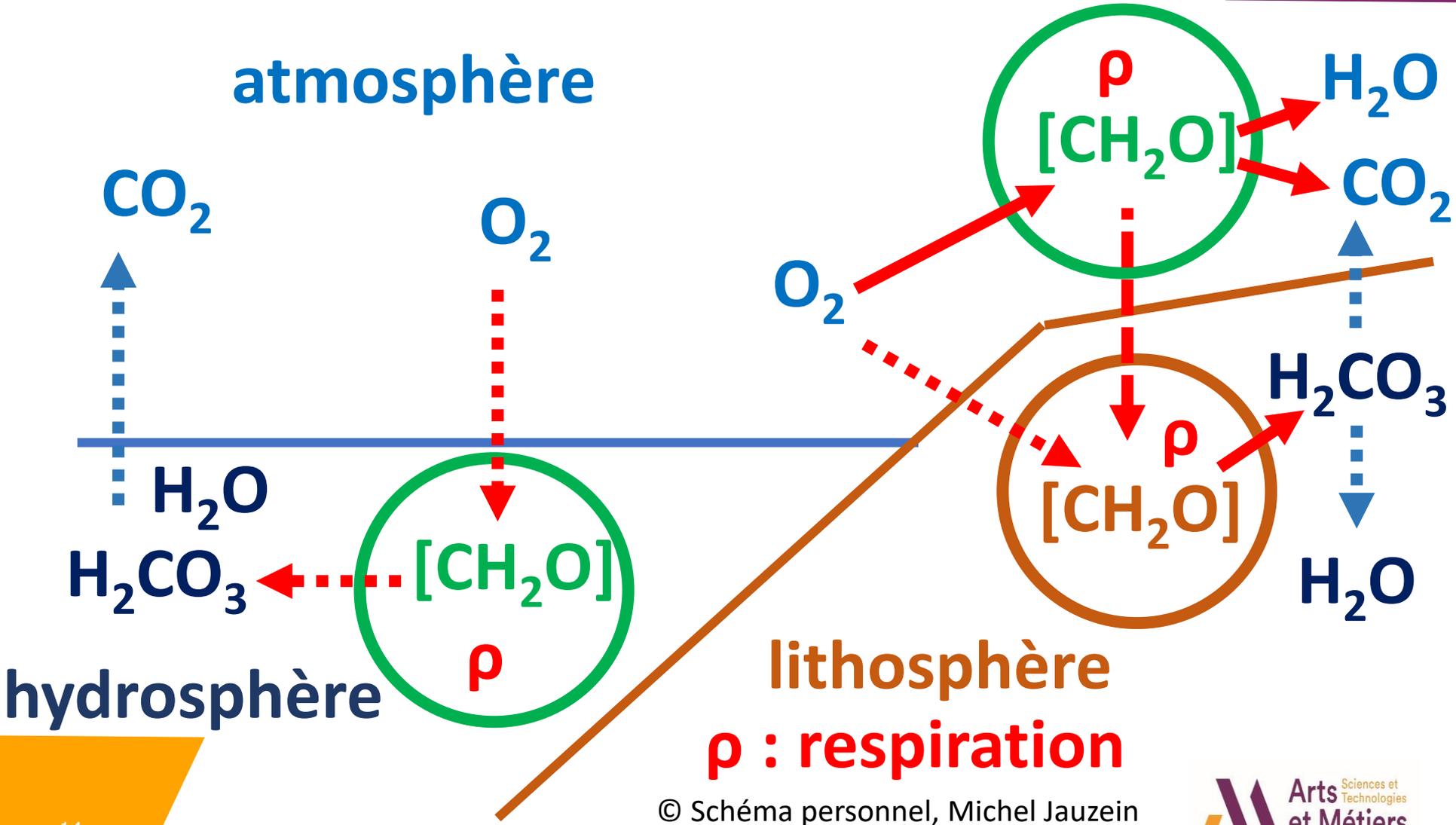
2 processus physiques : rayonnement solaire  
et diffusion des gaz



© Schéma personnel, Michel Jauzein

1 processus biologique : la respiration

1 processus physique : la diffusion des gaz



© Schéma personnel, Michel Jauzein



## 3 – LA MATIÈRE ORGANIQUE ET LES SOLS

—

# La transformation de la biomasse du vivant

- **La formation de biomasse « huileuse » :**

- Quand l'oxygène est moins disponible ou quand la biomasse sucrée est excédentaire, la vie produit de la biomasse huileuse



ou



- **La formation de biomasse « ligneuse » :**

- Une partie de la biomasse des végétaux est composée de polymères comme la cellulose (biomasse sucrée polymérisée : polysaccharides) et la lignine (biomasse sucrée polymérisée et cyclisée : substances polyphénoliques) dans le bois
- Cette biomasse est aussi moins biodégradable
- Les cycles aromatiques permettent une condensation de la matière organique autour des atomes de carbone, libérés d'une partie de l'oxygène et de l'hydrogène (part volatile) sous forme d'eau :



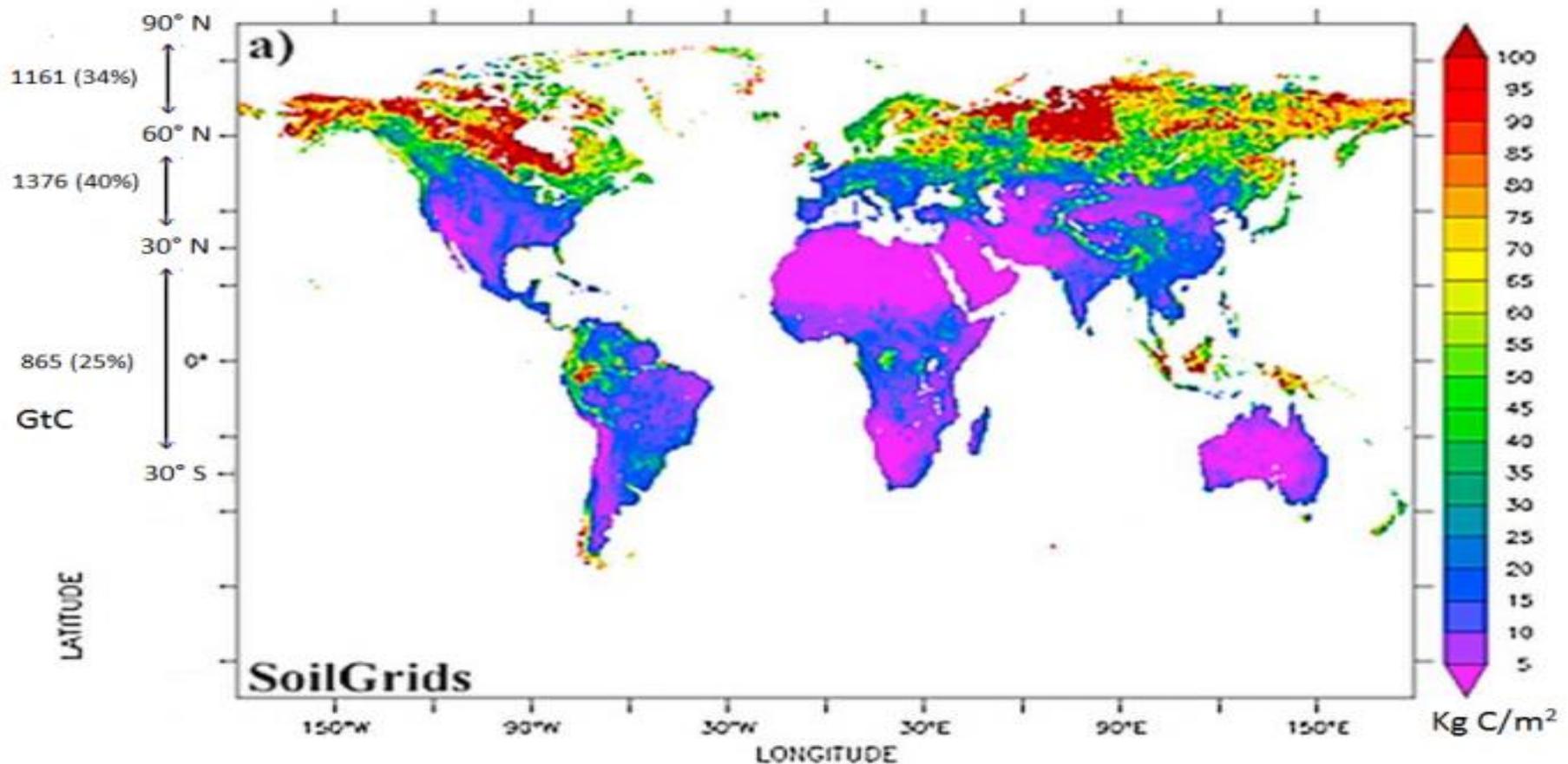
ou



# Devenir de la matière organique des sols

- ***La minéralisation progressive des matières organiques :***
  - Pendant leur vie et une fois morts, les êtres vivants fournissent de la matière organique au sol dont une partie est décomposée par la microflore (bactéries, champignons, algues...) et la microfaune (protozoaires, nématodes, insectes...) : « respiration des sols »
  - La biomasse « morte » s'accumule dans les sols sous forme d'humus dont les fractions sont plus ou moins biodégradables suivant leur poids moléculaire :
    - **Des acides humiques à l'humine**
  - Cette biomasse devient « ***goudronneuse*** » par polymérisation et cyclisation devenant de moins en moins biodégradable. Elle devient « l'huile des sols », un mélange complexe d'hydrocarbures polycycliques aromatiques, dont l'humine est la forme la plus condensée et la moins biodégradable.
  - En conditions propices (aération, humidité, température), la minéralisation peut être progressive et même très poussée, en limitant fortement la stabilisation de carbone organique dans les sols, qui restent dans ce cas plutôt minéraux.

# Une accumulation variable de matière organique dans les sols



Répartition mondiale du carbone organique du sol jusqu'à un mètre de profondeur

Source : Tifafi et al, 2018 [4]

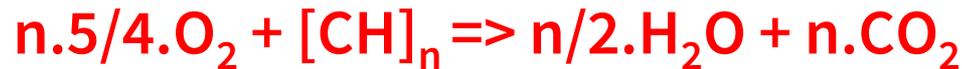
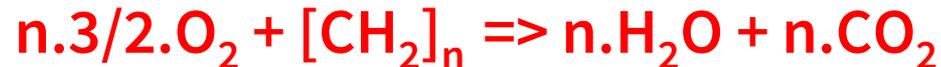
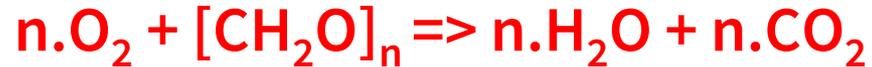
© Tifafi M., Guenet B., Hatté C. Large differences in global and regional total soil carbon stock estimates based on SoilGrids, HWSD and NCSCD: Intercomparison and evaluation based on field data from USA, England, Wales and France.

Global Biogeochemical Cycles 9 January 2018 Volume 32, Issue 1 Pages 42–56

# Une dégradation possible par combustion ou pyrolyse

- *La combustion possible de la biomasse*

- En contact avec l'oxygène de l'air et en condition sèche, l'inflammation engendre une combustion assurant un retour de l'eau et du CO<sub>2</sub> vers l'atmosphère :



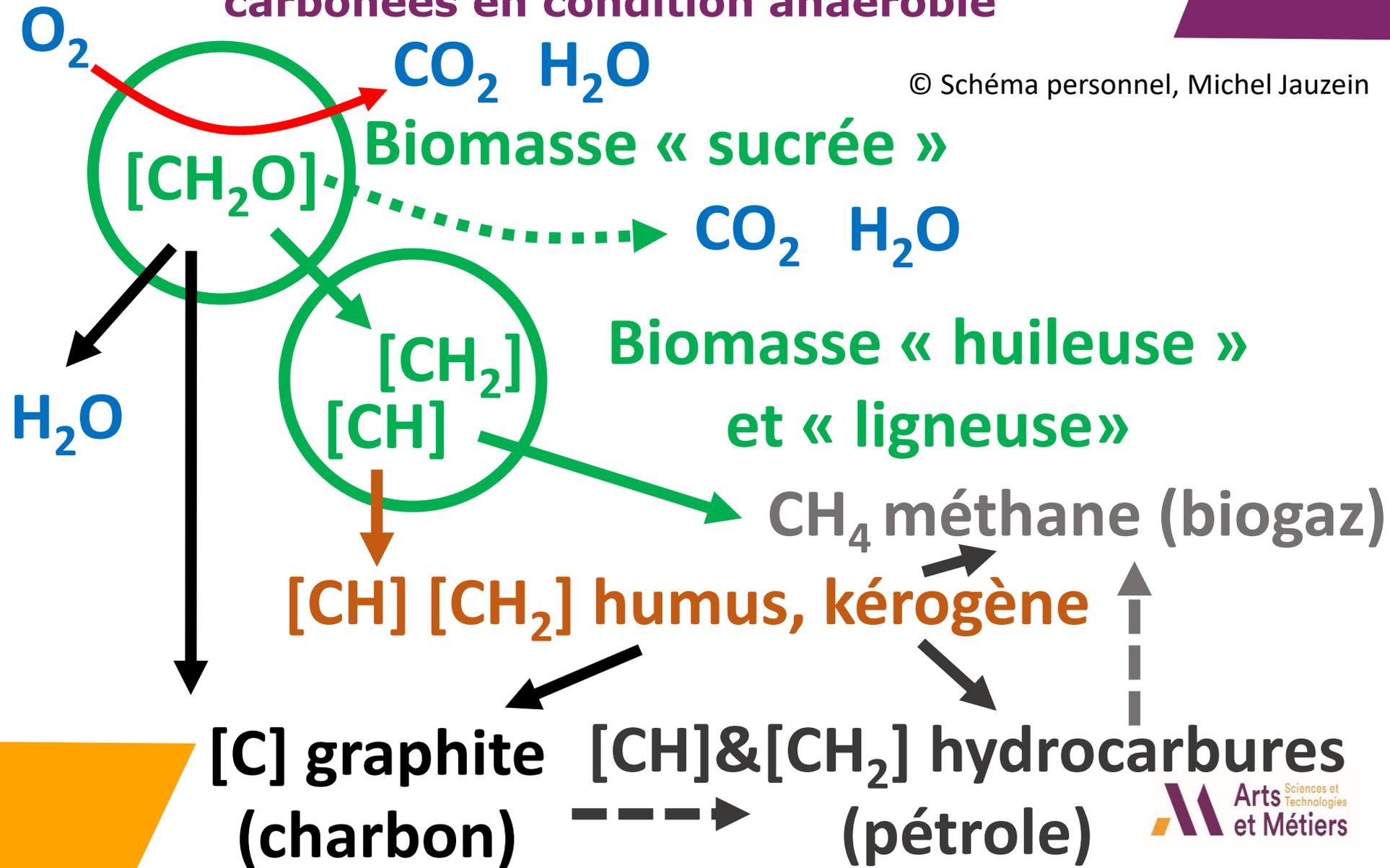
- Quand l'oxygène se fait plus rare pendant la combustion, la pyrolyse permet la formation de charbon de bois et de gaz



- Dans les sols engorgés et surtout dans les sédiments riches en matières organiques, l'enfouissement géologique permet la formation de « kérogène », la « cire des sédiments », qui par pyrolyse et transformation progressive, peut générer charbon (lignite, houille, anthracite), pétrole et gaz (méthane)

des processus physiques, biologiques ou géologiques à l'origine des roches carbonées en condition anaérobie

© Schéma personnel, Michel Jauzein





## 4 – L'ALTÉRATION DES ROCHES DANS LES SOLS

—

# Des processus pédologiques généraux

- ***L'accumulation variable de matière organique :***

- Forte en conditions froides ou humides
- Faible en conditions chaudes ou sèches

- ***L'activité biologique des sols :***

- Augmente la pression partielle en CO<sub>2</sub> en profondeur de la zone racinaire
- Augmente l'altération des minéraux des roches
- Régule le puit continental de CO<sub>2</sub> vers les eaux souterraines en fonction des roches en présence, par exemple :
  - Calcaire : décarbonatation progressive, eaux carbonatées calciques



- Quartz : résistance, eaux carbonatées acides

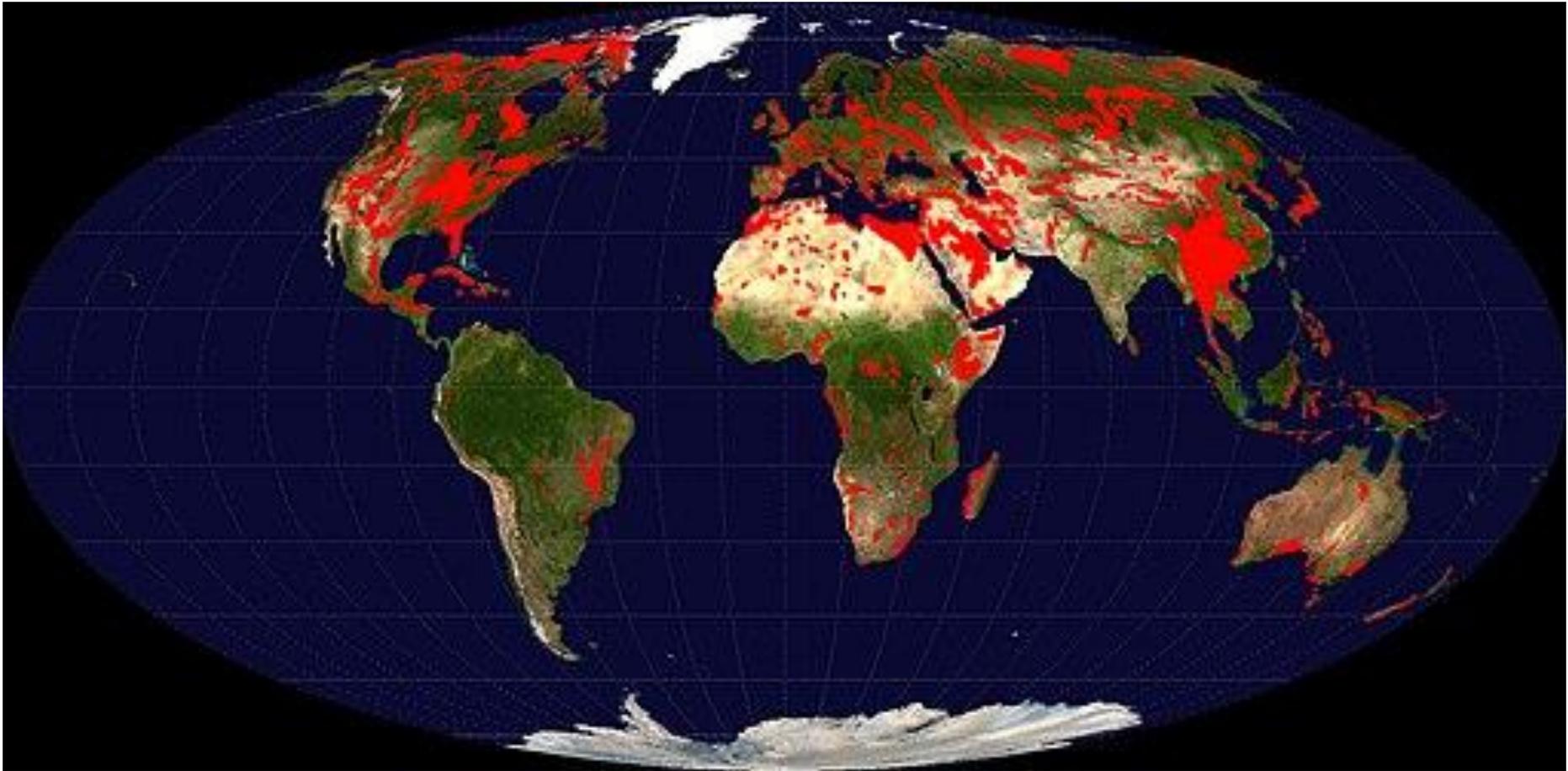


- Aluminosilicates calciques : altération en argile et décalcification



Anorthite + eau carbonatée acide => kaolinite + eau carbonatée calcique

# Des roches calcaires qui affleurent sur les continents, sédiments océaniques issus du vivant, et d'âge variable



© Tichy, Ulrich, Tuebingen, Germany    Datenbasis : COST 65, 1995 + 620, 2003; Europ. Comm., Luxembourg. Encycl. caves + karst science, N.Y., 2004

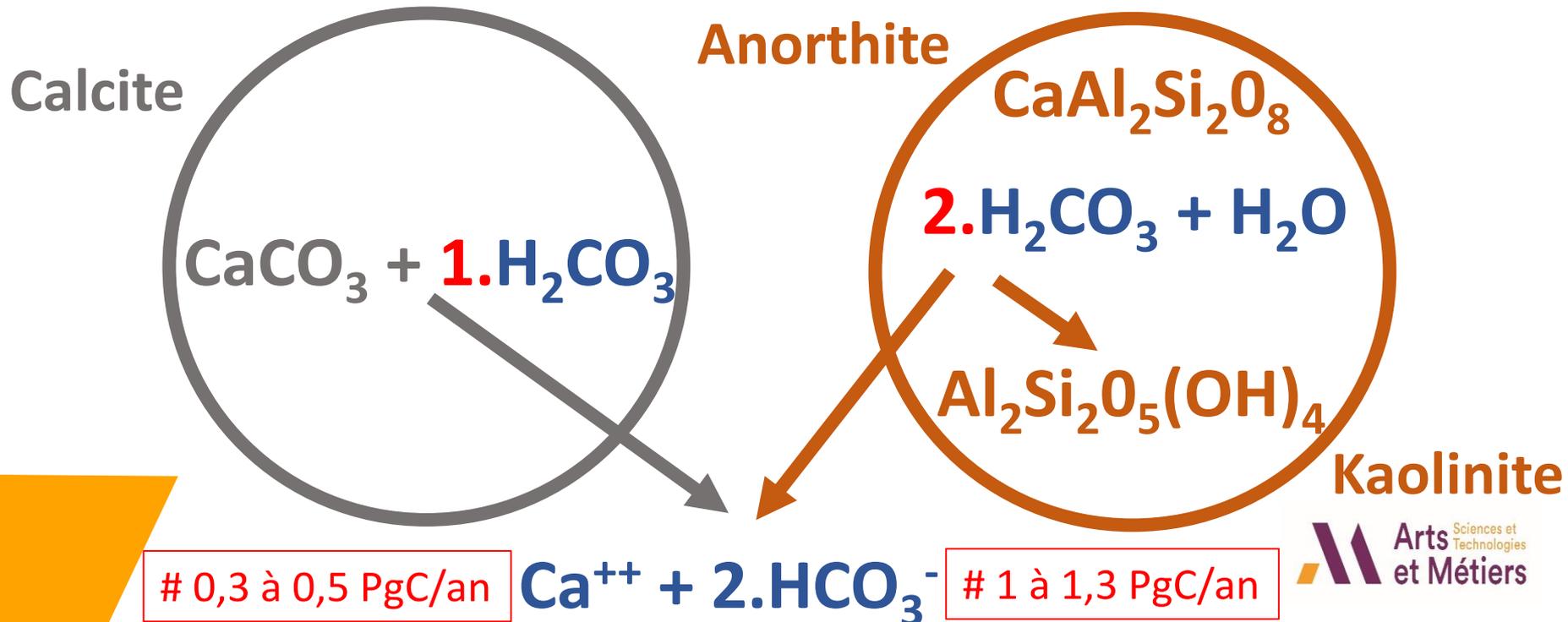
## 2 processus chimiques

d'altération des minéraux contenant du calcium en présence de  $\text{CO}_2$  dans l'eau

© Schéma personnel, Michel Jauzein

Lithosphère  
« carbonatée »  
calcaires

Lithosphère  
« calcique »  
basaltes, diorites, granites





## 5 – LES TRANSFERTS DE MATIÈRES PAR LES EAUX CONTINENTALES



# Des processus hydrologiques généraux

- **L'érosion des surfaces continentales :**
  - Solutés issus de l'altération (sels solubles) et du vivant (carbone organique dissous)
  - Particules en suspension (contenant des argiles et de la matière organique)
- **Les transferts dans les eaux souterraines et le transport dans les eaux de surface : 2 à 2,5 PgC/an**
  - Interactions possibles entre les particules et les solutés dans l'eau :
    - Échange cationique sur les argiles en faveur de la fixation du calcium  
$$\text{Argile}^{--}\text{-Na}^+_2 + \text{Ca}^{++} + 2.\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{Argile}^{--}\text{-Ca}^{++} + 2.\text{Na}^+ + 2.\text{HCO}_3^-$$
    - Échange cationique possible aussi sur la matière organique avec une influence du calcium sur la « floculation » des argiles
- **La sédimentation possible dans les lacs et mers intérieures :**
  - Sédimentation de solutés par précipitation de minéraux (calcite par exemple)
  - Floculation de particules (argiles calciques ou matières organiques stabilisée par du calcium) **sédimentation # 0,2 PgC/an**
  - Avec un dégazage des eaux de surfaces : **1 à 1,5 PgC/an**

2 processus physiques : transfert d'eau douce (souterraine et de surface), érosion

des processus physico-chimiques : altération, échange d'ions

Avec du C organique dissous (COD) et particulaire (COP)

Retour du carbone aux océans :  
C inorganique # 0,5 à 0,6 PgC/an  
C organique # 0,3 PgC/an  
Total d'environ 0,8 à 0,9 PgC/an

$\text{Ca}^{++} + 2.\text{HCO}_3^-$   
hydrosphère  
 $\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$

Argiles<sup>--</sup> $\text{Na}_2^{++}$

$\text{Na}^+ + \text{HCO}_3^-$   
Argiles<sup>--</sup> $\text{Na}_2^{++}$   
Argiles<sup>--</sup> $\text{Ca}^{++}$   
 $\text{Ca}^{++} + 2.\text{HCO}_3^-$

Argiles<sup>--</sup> $\text{Na}_2^{++}$   
Argiles<sup>--</sup> $\text{Ca}^{++}$

$\text{Ca}^{++} + 2.\text{HCO}_3^-$   
 $\text{Na}^+ + \text{HCO}_3^-$

lithosphère

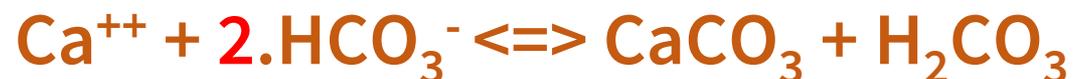


## 6 – LA GENÈSE DES ROCHES CARBONATÉES DANS LES OCÉANS

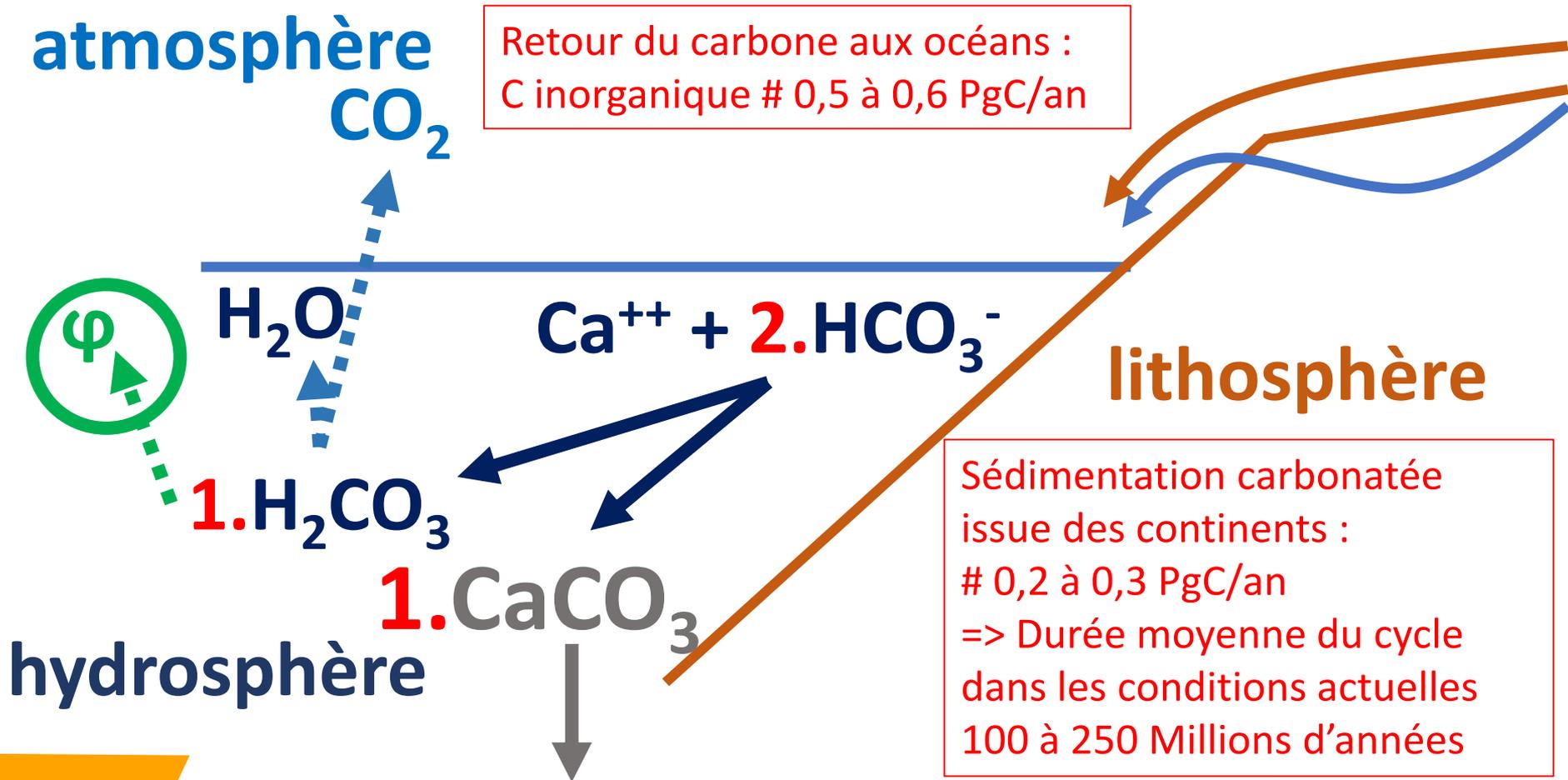
—

# Des processus biogéochimiques couplés dans les océans

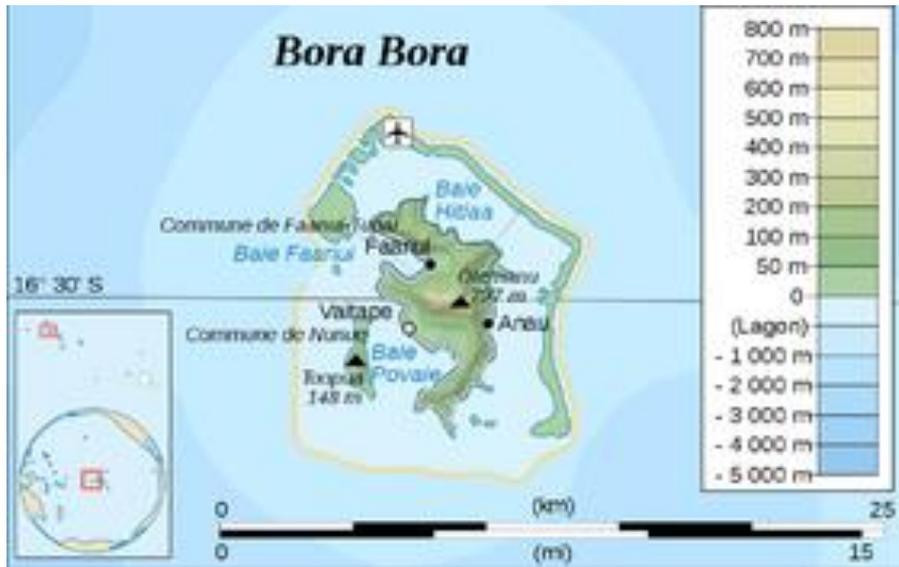
- ***Le mélange des eaux continentales et océaniques facilite la précipitation de calcite en marge continentale***
  - Avec le sel (NaCl) en forte concentration, les argiles calciques relarguent le calcium dans l'eau de mer et sédimentent par floculation sous forme sodique dans une eau chargée en ions
  - L'augmentation de la concentration en calcium en présence d'hydrogénocarbonates peut faire précipiter la calcite
  - Les nutriments minéraux amenés par les eaux continentales (azotés et phosphatés) augmentent l'activité biologique et notamment le flux de photosynthèse
  - L'utilisation des carbonates dissous par la photosynthèse peut s'accompagner d'une précipitation de calcite
- ***L'activité photosynthétique en plein océan et son dégazage en zone chaude facilite la précipitation de calcite biogène***
  - La pompe photosynthétique déplace les équilibres calco-carboniques vers la précipitation de la calcite et la production de CO<sub>2</sub> dissous en compensation



# 1 processus biogéochimique : précipitation de calcite (calcaires) facilitée en marge continentale et augmentée par la photosynthèse



# Le cas d'école des atolls volcaniques océaniques : Bora Bora



© Carte topographique de Bora Bora, 2010  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Bora-Bora#/media/Fichier:BoraBora\\_without\\_Tupai\\_topographic\\_map-fr.png](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bora-Bora#/media/Fichier:BoraBora_without_Tupai_topographic_map-fr.png)

© Vue aérienne de Bora Bora avec les motus environnants, makeke, 2000  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Bora-Bora#/media/Fichier:Boraboraluft\\_edited3.jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Bora-Bora#/media/Fichier:Boraboraluft_edited3.jpg)

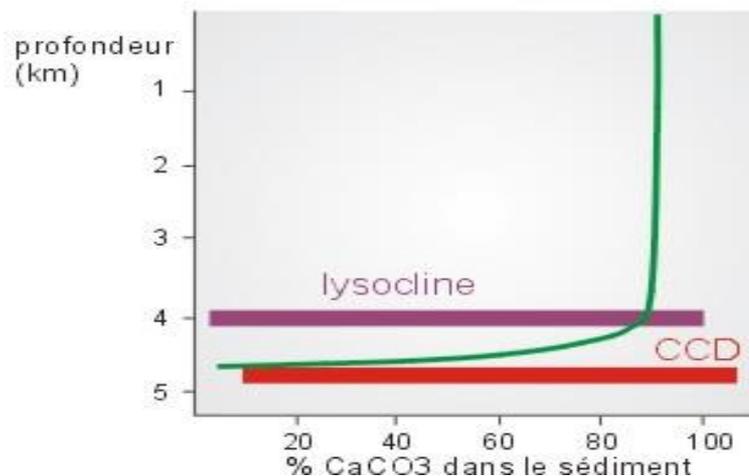
**Ile volcanique basaltique, végétalisée en climat chaud et océanique**  
**Altération par un cycle de l'eau rapide chargé en carbonates de calcium**  
**Formation d'une barrière de corail et d'un lagon de sédimentation**  
**construits par l'activité biologique périphérique facilitant la précipitation de calcite.**

# Le calcaire biogénique ne peut atteindre les grands fonds en général



profondeur CCD en km

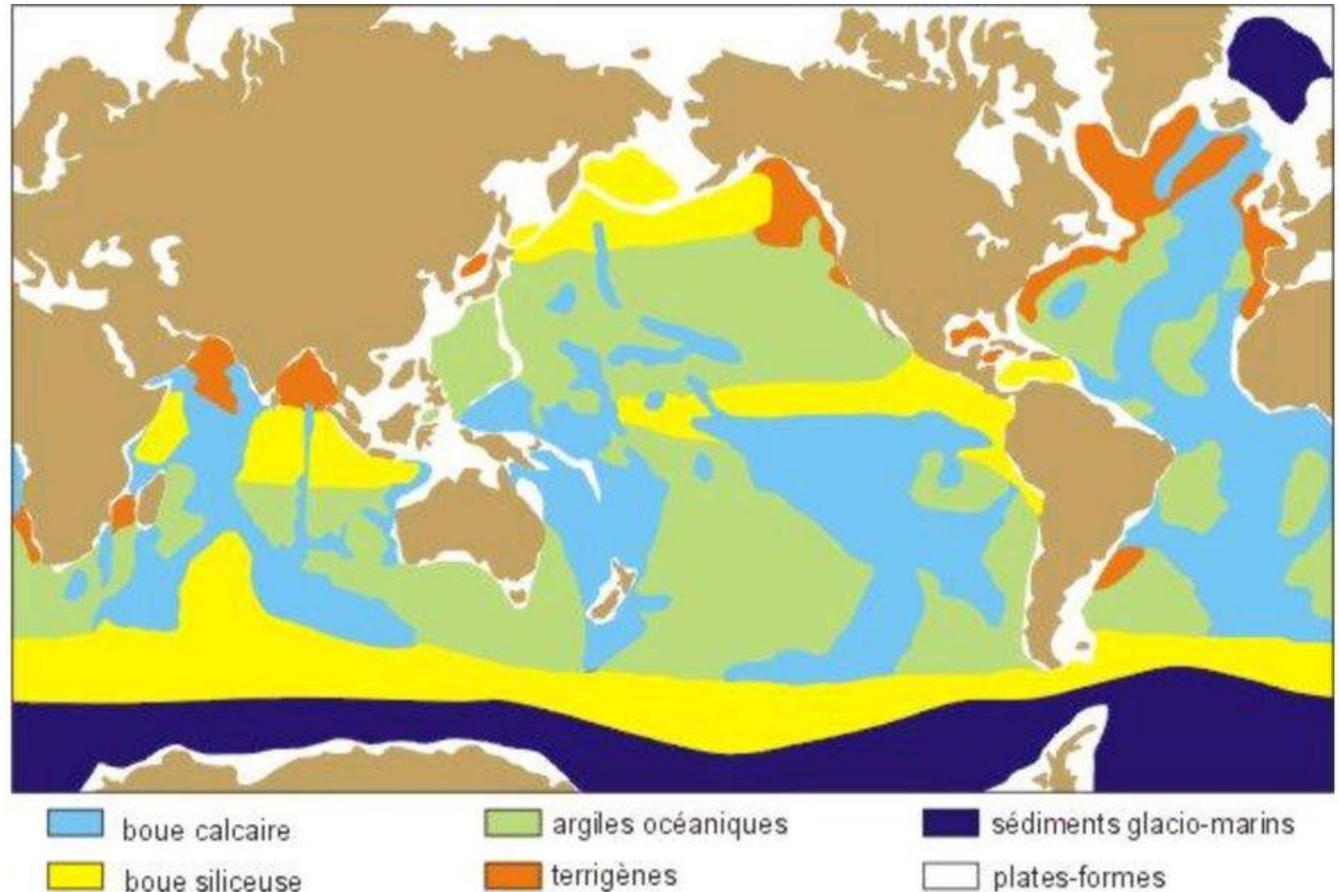
Lysocline :  
profondeur à  
laquelle la solubilité  
du calcaire augmente  
rapidement



CCD :  
Carbonate  
Compensation Depth,  
profondeur à partir de  
laquelle le calcaire se  
dissout complètement

# La sédimentation océanique est diversifiée en nature et distribuée dans l'espace

Calcaires en bleu clair sur les hauts fonds en zone plutôt chaude et sur les plates-formes péri-continentales



Répartition des sédiments actuels

<http://www2.ulg.ac.be/geolsed>



## 6 – LES STOCKS DE CARBONE ET LA REPRÉSENTATION GLOBALE DU CYCLE

—

# Quelques chiffres de stocks de carbone En GigaTonnes de Carbone (GtC # PgC)

## Deux stocks géologiques :

**Carbonates** 30000000 - 50000000 GtC

**Kérogène** 5000000 - 15000000 GtC

**Un stock océanique carbonaté :** 35000 - 40000 GtC

## Trois stocks organiques aux interfaces :

**Sols** 1500 - 2500 GtC

**Sous-Sols gelés** 1500 - 2000 GtC

**Sédiments marins** 1500 - 2000 GtC

## Les autres stocks océanique, atmosphérique et géologique :

**CO<sub>2</sub> atmosphérique** 600 - 900 GtC

**C organique des océans** 600 - 800 GtC

**Biomasse continentale** 400 - 700 GtC

**Gaz exploitable** 400 - 1500 GtC

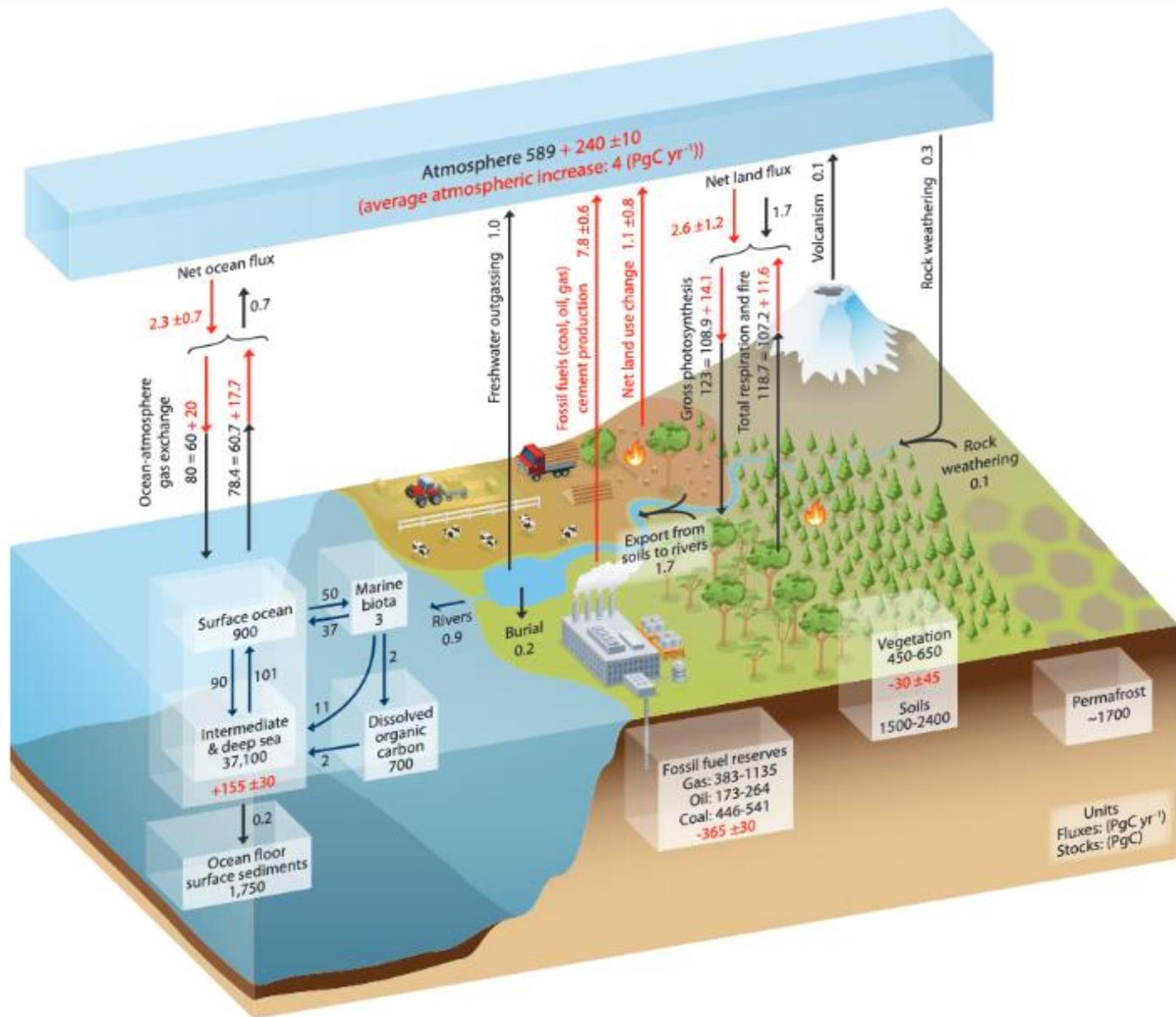
**Charbon exploitable** 400 - 600 GtC

**Pétrole exploitable** 150 - 300 GtC

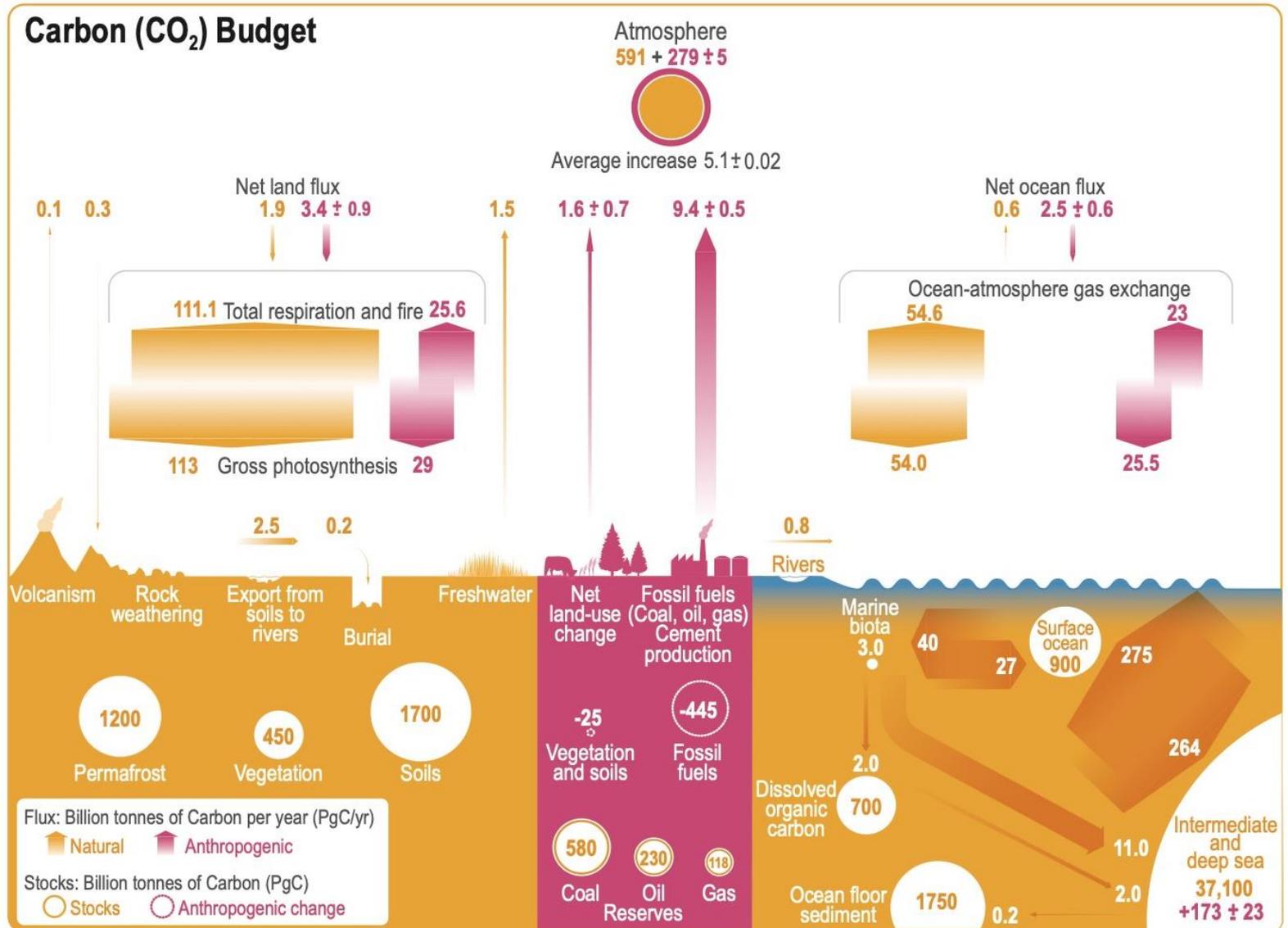
# Cycle du carbone GIEC 2014

Temps de séjour  
du carbone  
atmosphérique :  
2,5 à 4,5 ans

Temps de séjour  
du carbone  
océanique :  
440 à 520 ans



# Cycle amendé du carbone GIEC 2021

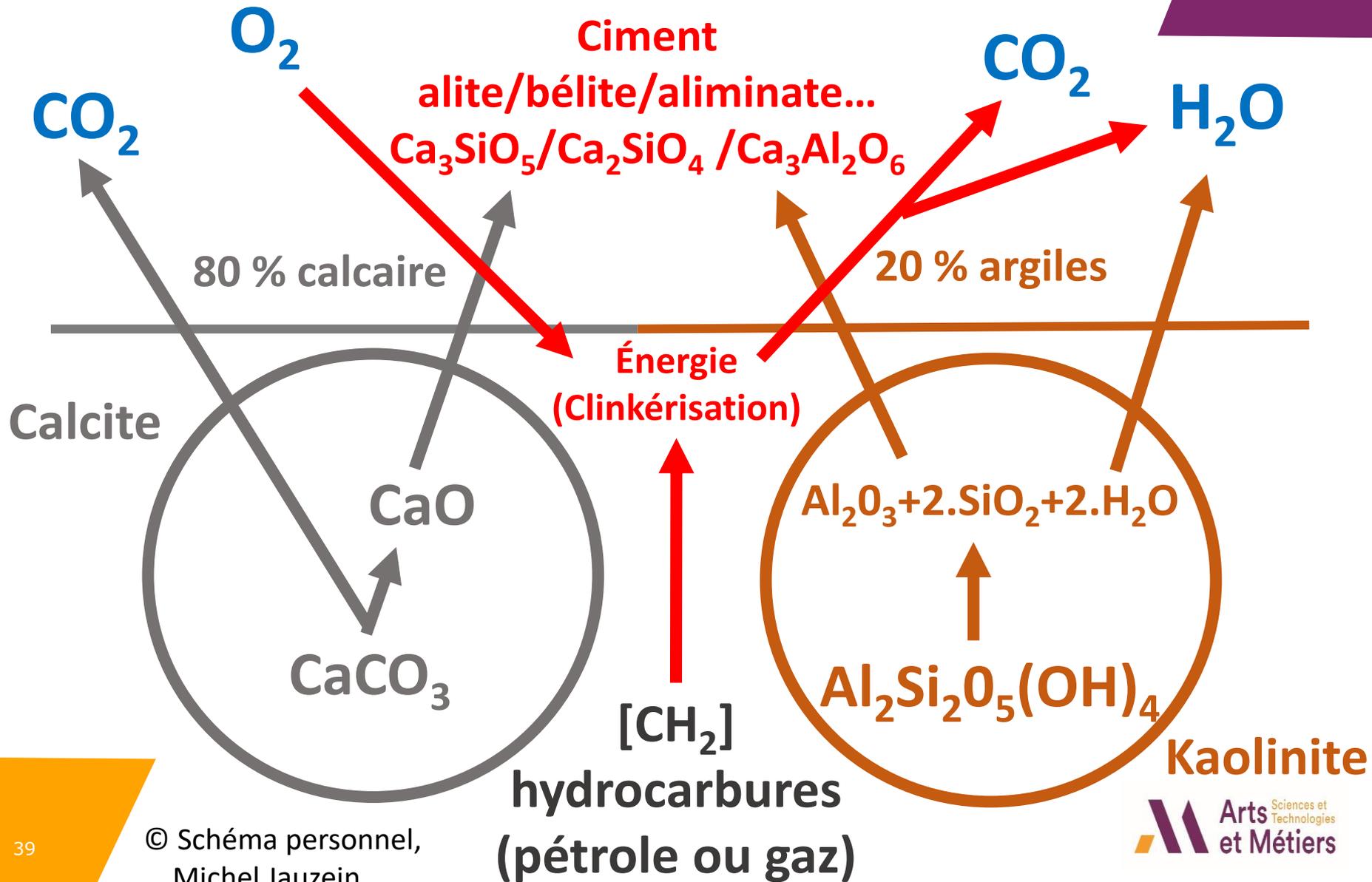




# Les ciments ?



# 1 processus anthropique « dangereux » fortement producteur de CO<sub>2</sub>



## Quelques constats factuels sur le ciment et le béton dans le monde

« Si le **béton** utilisé sur la planète était un pays, il serait le **3<sup>ème</sup> émetteur mondial** de gaz à effet de serre, juste derrière la Chine et les Etats-Unis... »

<https://www.sudouest.fr/environnement/>

« Majoritairement composé de **ciment**, ce matériau s'avère très polluant puisqu'il représente **7 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> ...**»

<https://www.linfordurable.fr/environnement/>

« **Le ciment** est le composé du **béton** qui a l'impact environnemental le plus significatif. La production **d'1 tonne de ciment rejette 0,7 tonne de CO<sub>2</sub> équivalente dans l'atmosphère...**»

<https://www.ecohabitation.com/guides/2816/tout-sur-le-beton/>

# Quelques constats factuels sur le ciment et le béton en France

« En France, en 2019, 21 millions de tonnes de produits en béton ont été fabriqués d'après la Fédération de l'Industrie du Béton. De par son importante production, on peut dire que **le béton est** un matériau de construction **particulièrement émetteur de carbone** et donc dans d'autres termes **ayant une empreinte carbone élevée**. Ainsi, le secteur de **la construction représente 10% des émissions** de gaz à effet de serre (GES) mondiales et **le béton, 52% des émissions de ce secteur : ...»**

<https://www.concretedispatch.eu/blog/empreinte-carbone-beton/>

# Dans le cas du campus Arts et Métiers de Cluny, site de l'Abbaye de Cluny :

Vive les PIERRES CALCAIRES du Mâconnais  
avec lesquelles sont construits les bâtiments de l'Abbaye de Cluny fondée  
au X<sup>ème</sup> siècle,  
y compris la partie du XVIII<sup>ème</sup>  
et les ateliers du site datant du XIX<sup>ème</sup> et XX<sup>ème</sup>  
&

Vive les matériaux BOIS  
utilisés pour les charpentes anciennes  
et pour la construction  
de notre Halle Bois du XXI<sup>ème</sup> siècle !



© ENSAM, Cluny



© ENSAM, Cluny



© ENSAM, Cluny



 Arts Sciences et Technologies  
et Métiers



[ARTSETMETIERS.FR](http://ARTSETMETIERS.FR)