

### 2.3. Résumé des flux dans le cycle du carbone

On considère le CO<sub>2</sub> total dans l'ensemble atmosphère + océan.

S'il augmente, le CO<sub>2</sub> augmente dans l'océan et dans l'atmosphère

S'il diminue, le CO<sub>2</sub> diminue dans l'océan et dans l'atmosphère

S'il est constant, le CO<sub>2</sub> est constant dans l'océan et dans l'atmosphère

Flux augmentant cette grandeur

2 et 6

Flux diminuant cette grandeur

1, 3 et 5

A l'échelle de quelques centaines années 1 ≈ 2.

Pour équilibrer sur les temps longs de quelques centaines de milliers d'années 6 ≈ 3 + 5

Expliquons d'abord la régulation 1 ≈ 2 sur quelques centaines d'années ; c'est le propre de la biologie

Note (cette remarque n'a pas été faite dans le cours 6 mais je l'insère ici dans la version écrite, par souci de cohérence) : La valeur de 1 peut fluctuer. Ce qui fixe 1 au premier ordre, c'est la disponibilité en azote et en phosphore. Il est possible que la biomasse soit grosso-modo la même depuis 3.5 milliards d'années, ce qui est évidemment contre-intuitif mais pas impossible.

En effet, la masse de la biomasse n'est pas globalement limitée par le carbone mais par l'azote et le phosphore bio-disponibles. C'est un concept très important, bien connu en agronomie, qui illustre le couplage du cycle du carbone avec les cycles de l'azote et du phosphore.

Il faut en effet aussi de l'azote et du phosphore pour faire de la biomasse : C<sub>100</sub>H<sub>200</sub>O<sub>100</sub>N<sub>15</sub>P.

Notion de rapport de Redfield :



Pour expliquer l'équilibre 6 ≈ 3 + 5 sur quelques centaines de milliers d'années, plusieurs boucles de régulation qui font l'objet d'intenses recherches actuelles peuvent être proposées.

Par exemple :

Si 6 augmente, CO<sub>2</sub> augmente dans l'ensemble océan-atmosphère, la température globale augmente, l'altération des roches augmente, le N et le P disponibles augmentent, 1 augmente, 3 augmente ce qui tend à diminuer CO<sub>2</sub> dans l'ensemble océan-atmosphère

Ou encore :

Si  $\delta^{13}C$  augmente,  $CO_2$  augmente dans l'ensemble océan-atmosphère, la température globale augmente, l'altération des roches augmente, ce qui tend directement à diminuer  $CO_2$  dans l'ensemble océan-atmosphère car  $CO_2$  est consommé dans l'altération des roches

Mais il existe aussi potentiellement des boucles dérégulatrices :

Par exemple

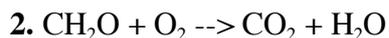
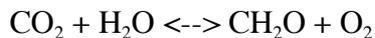
Si  $\delta^{13}C$  augmente,  $CO_2$  augmente dans l'ensemble océan-atmosphère, les organismes formateurs de carbonates solides diminuent, la consommation de  $CO_2$  diminue avant que d'autres espèces puissent remplacer les espèces disparues.

Note : Une innovation biologique peut potentiellement avoir un impact majeur.

Le succès écologique des diatomées (grosses cellules assez denses qui permettent un enfouissement rapide de matière organique) dans le phytoplancton marin pourrait avoir une conséquence sur la flèche 3 en l'augmentant depuis environ 60 millions d'années et pourrait contribuer au refroidissement de la surface terrestre. Comment tester ce genre d'hypothèse ? Regarder la sédimentation organique actuelle dans des milieux écologiquement variés ; avoir des marqueurs de productivité et écologiques dans des sédiments actuels et anciens ?

#### 2.4. Couplage du cycle du carbone et du cycle de l'oxygène

La réaction centrale



Comme **1.** = **2.** + **3.** ; **1.** est légèrement supérieur à **2.**

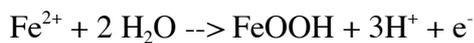
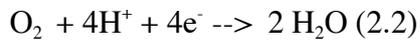
Cela affecte donc forcément le  $O_2$  atmosphérique ( $5 \cdot 10^{19}$  moles au total dans l'atmosphère) en en produisant  $10^{13}$  moles de  $O_2$ /an.. Aucun des flux du cycle du carbone étudiés plus haut ne permet de réguler cet  $O_2$  excédentaire.

La même chose dite autrement : comme il y a nécessairement plus de production primaire que de respiration + combustion (puisque'il y a nécessairement un peu de perte par sédimentation organique), ce système produit en permanence du  $O_2$ , de l'ordre de  $10^{13}$  moles de  $O_2$ /an qui par définition ne sont pas pris en charge par la respiration+combustion. Il existe ainsi dans la Terre actuelle un mécanisme régulateur de  $O_2$ , probablement

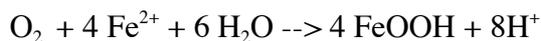
La solution. C'est l'oxydation de matériaux réduits nouveaux en provenance de l'intérieur de la Terre ( $H_2$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $H_2S$ ) qui permet de consommer cet  $O_2$  excédentaire et donc de réguler son niveau. Cela se passe probablement majoritairement au niveau de l'hydrothermalisme océanique. Ce flux est en partie contrôlé (à un niveau encore inconnu) par la vie qui se développe dans ces environnements (écosystèmes hydrothermaux): importance de l'étude de cette vie en conditions extrêmes. Cet équilibre de l'oxygène a probablement changé

significativement au cours de l'histoire de la Terre. Cf Mécanisme de l'oxygénation à -2.3 Ga, océans archéens, BIFs.

Les équations correspondant à cette altération oxydante des roches sont :



qui se combinent en



Réactions équivalentes à écrire avec  $\text{H}_2$  et  $\text{H}_2\text{S}$ . Certains procaryotes vivant à proximité des dorsales océaniques se servent de ces réactions pour tirer de l'énergie, faire de la production primaire, et participent donc à cette régulation de l'oxygène terrestre.

Comment ce régulateur a-t-il fonctionné dans le passé ? Peut-il évoluer ?

Discussion des conséquences de l'apparition de l'innovation écologique : photosynthèse oxygénique.

Par exemple, dans l'océan archéen, il y avait probablement beaucoup de  $\text{Fe}^{2+}$  qui est soluble mais inexistant dans la Terre actuelle car il s'oxyde très vite dans une atmosphère riche en oxygène et reste sur place lors de l'altération de la roche sous forme d'oxyde de  $\text{Fe}^{3+}$ . La régulation de  $\text{O}_2$  produit, lorsque fut inventée la photosynthèse oxygénique (personne ne sait quand), a pu se faire à cette époque par oxydation du  $\text{Fe}^{2+}$  de l'océan conduisant à la formation des BIF (vus dans le **TD**).

## 2.5. Grandes crises et cycle du carbone

### *Exemple : crise permo-trias*

Les caractéristiques principales de cette crise sont un taux d'extinction élevé, avec une récupération de la biosphère très lente (plus de 5Ma).

Cette extinction est associée à

une augmentation de la teneur en  $\text{CO}_2$  atmosphérique entraînant un réchauffement du climat

une baisse importante du taux d'oxygène dans l'atmosphère

une anoxie des océans

Tout se passe comme si la photosynthèse avait brutalement baissé

L'élément déclencheur de la crise n'est pas identifié. Cela pourrait être le volcanisme des traps de Sibérie (émission massive de poussière, pluies acides, consommation d'oxygène). Quoi qu'il en soit une fois l'extinction commencée l'anoxie des océans, si elle n'en a pas été le déclencheur, en a été l'amplificateur.

Exemple : crise actuelle

Augmentation de CO<sub>2</sub> atmosphérique. Très rapide

Quelles évolutions ?

Réchauffement global ?

Acidification des océans ?

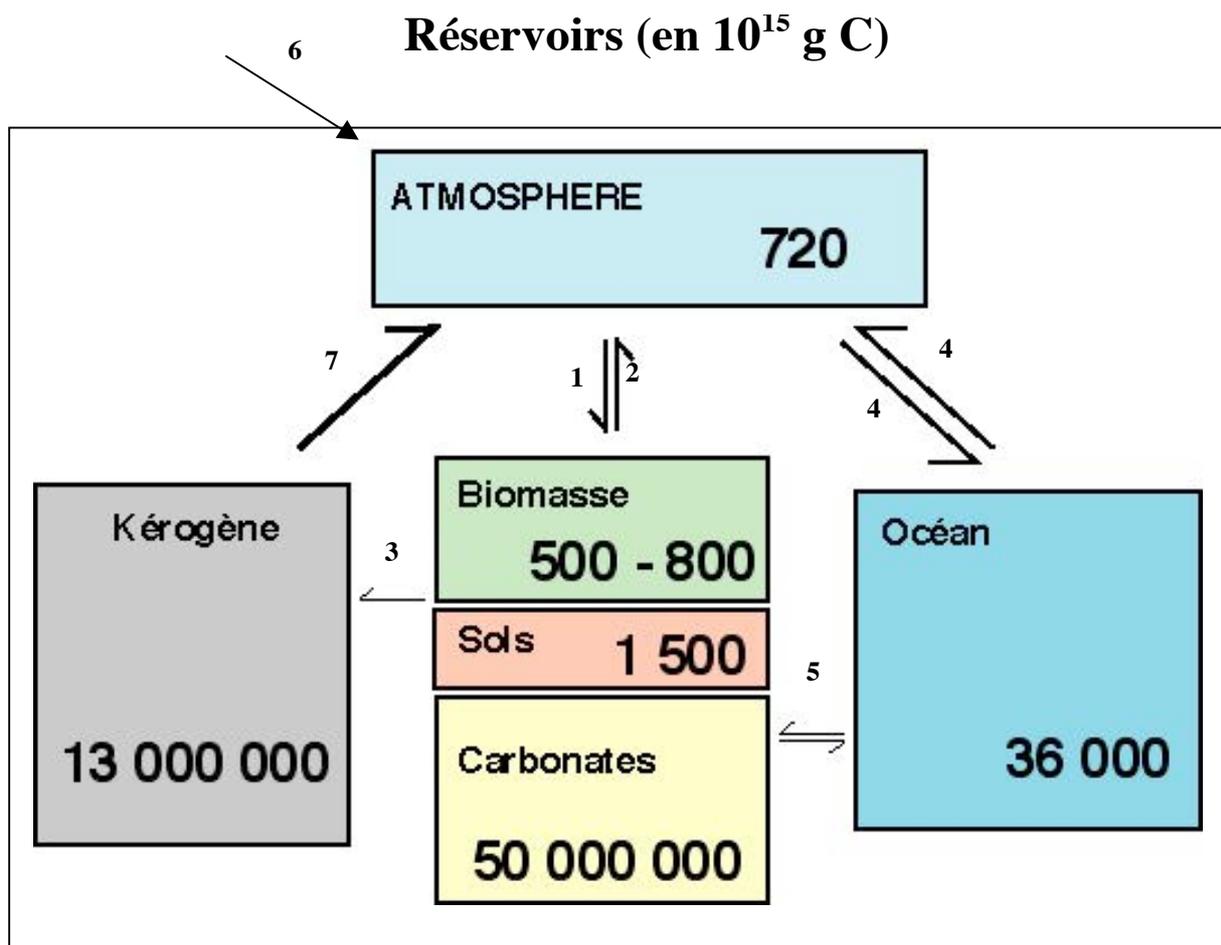


Figure 3 – Cycle du carbone (cf Cours 3).