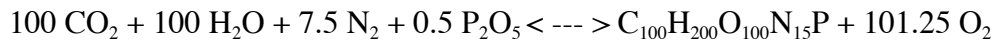


1.3. Couplage du cycle du carbone avec les cycles géologiques de l'azote et du phosphore

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 : $C_{100}H_{200}O_{100}N_{15}P$
Notion de rapport de Redfield (les rapports C/N/P moyens de la biomasse)

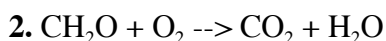
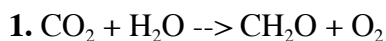


La masse de la biomasse pourrait être liée aux quantités de N et de P biodisponibles qui n'ont peut être pas tellement changé depuis 3.5 milliards d'années (fixées par l'altération). Donc, malgré les conditions très changeantes de la Terre, la biomasse se maintient potentiellement

En effet, la masse de la biomasse n'est pas globalement limitée par le carbone mais par l'azote et le phosphore bio-disponibles. Pour N, l'ammonium NH_4^+ , le nitrate NO_3^- et un peu N_2 . Pour le phosphate, les ions PO_4^{3-} en solution.

Remarque : l'épandage anthropique massif d'engrais, qui revient à augmenter les quantités d'azote et de phosphore bio-disponibles conduit à une augmentation de la biomasse, donc probablement du flux de sédimentation organique, donc à une séquestration accrue de CO_2 qui pourrait partiellement compenser les effets de la combustion des combustibles fossiles (à hauteur d'environ 10^{14} mol de C/an). Cela reste à démontrer

1.4. Couplage du cycle du carbone avec le cycle géologique de l'oxygène

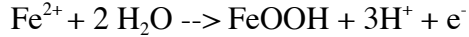
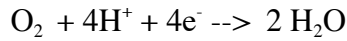


Comme **1.** = **2.** + **3.** ; **1.** est légèrement supérieur à **2.**

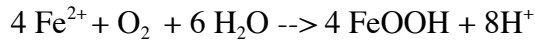
Ces équations nous permettent de voir un couplage fort du cycle du carbone avec le cycle de l'oxygène

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 l'altération oxydante des roches contenant du Fe^{2+} , en particulier au niveau des dorsales océaniques.

Les équations correspondant à cette altération oxydante des roches sont :



qui se combinent en



Certains procaryotes vivant à proximité des dorsales océaniques se servent d'ailleurs de cette réaction pour tirer de l'énergie et participent donc à cette régulation de l'oxygène terrestre.

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

Par exemple, dans l'océan archéen, il y avait probablement beaucoup de 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 Fe^{3+} . la régulation de O_2 produit lorsque fut inventée la photosynthèse oxygénique (personne ne sait quand) a pu se faire à cette époque par oxydation du Fe^{2+} de l'océan conduisant à la formation des BIF (Banded Iron Formation, fer rubanés, formations géologiques sédimentaires constituées d'oxydes de fer et de silice en bandes alternées).

Deux chronologies possibles

Théorie classique

1. La photosynthèse oxygénique apparaît il y a environ 3.5 Ga. Les fossiles correspondant sont les stromatolites. qui existent encore en petite quantité dans la Terre actuelle et qui lorsqu'on les observe actuellement sont basés sur des bactéries photosynthétiques oxygéniques : les cyanobactéries.
2. Pendant plus d'un milliard d'années, l'oxygène produit par cette photosynthèse réagit avec le Fe^{2+} présent dans l'océan (qui lui-même provient de l'altération de la croûte continentale en milieu réducteur sans oxygène) selon la réaction : $4 \text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 6 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{FeOOH} + 8\text{H}^+$ ce qui explique la formation des BIF
3. Vers - 2.4 Ga, -2.3 Ga, l'océan a consommé tout son Fe^{2+} dans la réaction précédente. Le flux associé à cette réaction $4 \text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 6 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{FeOOH} + 8\text{H}^+$ devient insuffisant pour compenser la production de la photosynthèse oxygénique et la pression d' O_2 commence à monter dans l'atmosphère. La réaction $4 \text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 6 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{FeOOH} + 8\text{H}^+$ continue à se produire mais seulement au niveau de l'hydrothermalisme océanique (réaction avec le O_2 dissous dans l'eau), ce qui permet d'empêcher la montée indéfinie de O_2 dans l'atmosphère lequel se fixe à un certain niveau en raison de la vitesse des processus.

Théorie alternative

La photosynthèse oxygénique n'apparaît que vers - 2.4 Ga, -2.3 Ga, ce qui explique à ce moment là la montée de la pression d' O_2 dans l'atmosphère. Les stromatolites peuvent être formés par d'autres procaryotes que des cyanobactéries. Les BIF peuvent se former dans un océan contenant du sous l'effet d'une photosynthèse anoxygénique utilisant Fe^{2+} comme donneur d'électrons suivant :

$\text{Fe}^{2+} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeOOH} + 3\text{H}^+ + \text{e}^-$ sous l'effet de la lumière

$\text{CO}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$

Soit au total : $4 \text{Fe}^{2+} + \text{CO}_2 + 7\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{FeOOH} + \text{CH}_2\text{O} + 8\text{H}^+$

Des organismes de ce type peuvent également expliquer les stromatolites à -3.5 Ga. Cette théorie alternative semble mieux expliquer la géologie de l'archéen et les données biologiques que la théorie classique mais c'est un enjeu majeur de la géologie actuelle de chercher dans les roches très anciennes les traces de la meilleure théorie explicative.

Dans un cas comme dans l'autre, une innovation biologique à l'échelle moléculaire, la photosynthèse oxygénique, a bouleversé la géologie de la planète.