

Les cycles biogéochimiques : l'exemple du carbone

La géosphère et les systèmes de la Terre Cours

Idées importantes du syllabus :

« La matière de la Terre passe de façon cyclique entre les différents réservoirs tout en changeant de forme. La matière passe dans et entre les différents systèmes de la Terre : la lithosphère (les roches et le sol); l'atmosphère (l'air), l'hydrosphère (l'eau) et la biosphère (les êtres vivants). »

Capacités IESO :

« Être capable d'identifier un système spécifique (l'un des systèmes de la Terre) comme cyclique – un système où la quantité totale de matière est conservée et où les flux de matière n'ont pas un taux égal. »

Mots clés :

- **réservoir** : système terrestre capable d'échanger et/ou de stocker du carbone (ex : océan, atmosphère, sol...). La quantité totale de l'élément dans le réservoir est exprimée en Gt (gigatonnes) ou Pg (pétagrammes), ces deux unités représentant 10^{12} kg.
- **flux** : masse de matière échangée entre réservoirs pendant un an
- **temps de résidence** : temps moyen passé par un atome dans un réservoir.
- **équilibre** : le cycle est à l'équilibre si flux entrants et sortants sont égaux pour tous les réservoirs
- Il y a conservation de la **quantité totale de matière** sur le cycle

Méthode générale de construction d'un cycle :

1. Identifier les différents réservoirs et leurs connexions
2. Quantifier la matière présente dans chaque réservoir
3. Estimer les flux entre réservoirs (et identifier les processus à l'origine de ces flux)

Application au cycle du carbone :

1. Les principaux réservoirs

L'atmosphère : 700 Gt (sous forme de dioxyde de carbone CO_2 et de méthane CH_4)

Les océans 40 000 Gt (sous forme de CO_2 dissous et d'ion bicarbonate HCO_3^-)

Les sols et la biosphère : 2 000 Gt (sous forme de C organique)

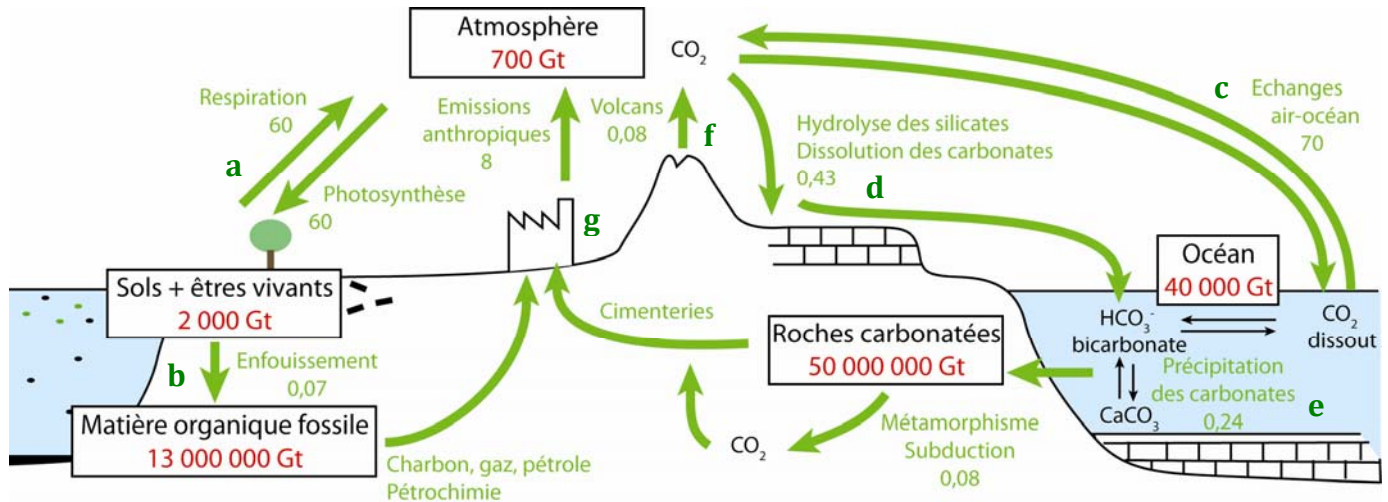
Les roches de la croûte : 50 000 000 Gt (sous forme de carbonates, principalement CaCO_3)

La matière organique fossile : 13 000 000 Gt (sous forme de C organique)

On voit que le principal réservoir de carbone, et de beaucoup, est la croûte terrestre (roches carbonatées et carbonées, et matière organique disséminée comme dans les schistes bitumineux ou le désormais célèbre « gaz de schiste »)! Pourtant, on se préoccupe beaucoup du réservoir « atmosphère », insignifiant en comparaison. C'est parce qu'il faut également considérer les flux entre les réservoirs : les échanges de C entre l'atmosphère et les autres réservoirs sont bien plus important que ceux entre les carbonates de la croûte et les autres réservoirs.

2. Les flux entre réservoirs et les processus responsables (à vous de les retrouver sur le schéma !)

En divisant la quantité de carbone dans un réservoir par le flux global sortant, on obtient le temps moyen que passe un atome de carbone dans ce réservoir : c'est la notion de **temps de résidence**. On voit que dans un petit réservoir comme l'atmosphère, avec des flux importants, le carbone a un temps de résidence court : 4 ans. A l'inverse, le temps de résidence du carbone dans la lithosphère serait de 200 millions d'années !



Le cycle du carbone : réservoir et flux. Les flux (en vert) sont indiqués en gigatonnes (Gt) par an. Valeurs d'après J. Gaillardet,

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadate/SMIL-SGF-gaillardet.xml>

- Respiration, photosynthèse** : les êtres vivants libèrent du CO₂ par la respiration et la fermentation ; du CO₂ est également libéré par l'oxydation de la matière organique des sols ; on peut écrire une équation bilan de la respiration de la façon suivante : $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$. La photosynthèse est en quelque sorte le processus inverse de la respiration ; elle consiste en une réduction du CO₂ en carbone organique. Cette réaction consomme de l'énergie (fournie par le Soleil). Ces deux flux sont importants mais ils s'équilibrent globalement.
- Enfouissement** : dans certaines conditions (enfouissement rapide et absence de dioxygène), les plantes, animaux et microorganismes morts peuvent donner de la **matière organique fossile**, disséminée ou rassemblée sous la forme de roches carbonées (pétrole, gaz, charbon... voir la fiche du même nom). Par exemple, au Carbonifère (il y a 360 millions d'années), ces conditions étaient réunies et des forêts entières ont été enfouies, cela a donné notamment les grands gisements houillers (mines de charbon) du Nord de la France.
- Equilibre chimique entre océan et atmosphère** : le CO₂ est un **gaz soluble** dans l'eau (on peut dissoudre 3,4 g de CO₂ dans un litre d'eau à 0°C, cette solubilité diminue quand la température augmente). Le CO₂ dans l'atmosphère est à l'équilibre avec le CO₂ dans l'océan (c'est-à-dire qu'il y a échange permanent de CO₂ entre l'atmosphère et l'océan, mais que les flux entrant et sortant sont égaux). De plus, la respiration et la photosynthèse sont aussi effectuées par le phytoplancton et le zooplancton, ce qui contribue à l'échange de carbone entre les deux réservoirs.
Il existe un autre équilibre chimique au sein de l'océan : l'acide carbonique H₂CO₃, issu de la solvatation du CO₂ dissout, est un acide faible, la base associée étant l'ion bicarbonate HCO₃⁻. **Le dioxyde de carbone en solution** (dans l'eau de l'océan) réagit donc selon la réaction $CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3 \leftrightarrow HCO_3^- + H^+$. Cette réaction impose le pH de l'océan : plus il y a de CO₂ dissout, plus l'océan est acide (et donc son pH faible).

Par ces deux équilibres chimiques, il y a un lien entre la concentration en CO₂ dans l'atmosphère et le pH de l'océan. Le taux de CO₂ atmosphérique est relié à la concentration en CO₂ dissout dans l'océan (par le premier équilibre chimique) et la concentration en CO₂ dissout dans l'océan détermine son pH (par le second équilibre).

- d. Altération des silicates, dissolution des carbonates.** On a vu que le CO₂ dissout acidifie l'eau ; cette solution acide va attaquer les minéraux des roches continentales, exposées aux eaux d'infiltration et de ruissellement. Du coup, la consommation de protons déplace l'équilibre $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$ vers la droite, et vers l'ion bicarbonate. C'est notamment le cas de **l'hydrolyse des minéraux silicatés** des roches magmatiques. Si l'on écrit l'équation bilan, on voit que cette réaction consomme du CO₂. En prenant le silicate calcique le plus simple, on a : $\text{CaSiO}_3 + 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- + \text{SiO}_2$. Notez la libération d'ions calcium, dont on verra ci-dessous l'importance dans la précipitation du carbonate de calcium.

La **dissolution des roches carbonatées** consomme également du CO₂ atmosphérique. Pour un calcaire, on a : $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+}$

Le bilan de ces réactions d'altération et de dissolution est que **du CO₂ est soustrait (« pompé ») à l'atmosphère** et transformé en ion bicarbonate HCO₃⁻, transporté par les cours d'eau jusque dans l'océan. **Notez que l'hydrolyse du silicate consomme deux fois plus de CO₂ que la dissolution du carbonate.**

- e. Précipitation des carbonates.** A partir des ions Ca²⁺ et HCO₃⁻, on peut reformer du carbonate de calcium par la réaction inverse à celle écrite ci-dessus : $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ On voit donc que la **précipitation des carbonates**, à l'origine des roches carbonatées (calcaires par exemple), **dégage du CO₂**.

Si l'on part d'une roche carbonatée, le bilan entre dissolution et précipitation est nul. En revanche, si l'on part d'une mole de silicate, son hydrolyse consomme deux moles de CO₂ tandis que la précipitation de carbonate n'en libère qu'une : **globalement, l'altération des minéraux des roches magmatiques revient donc à pomper du carbone atmosphérique et à le stocker sous forme de roches carbonatées.** Lors des grandes crises volcaniques qui ont ponctué l'histoire de la Terre, on estime que les surfaces immenses de roches volcaniques alors exposées à l'altération (ex. trapps du Deccan, voir fiche « Magmatisme intraplaque ») ont contribué à un pompage considérable de carbone atmosphérique.

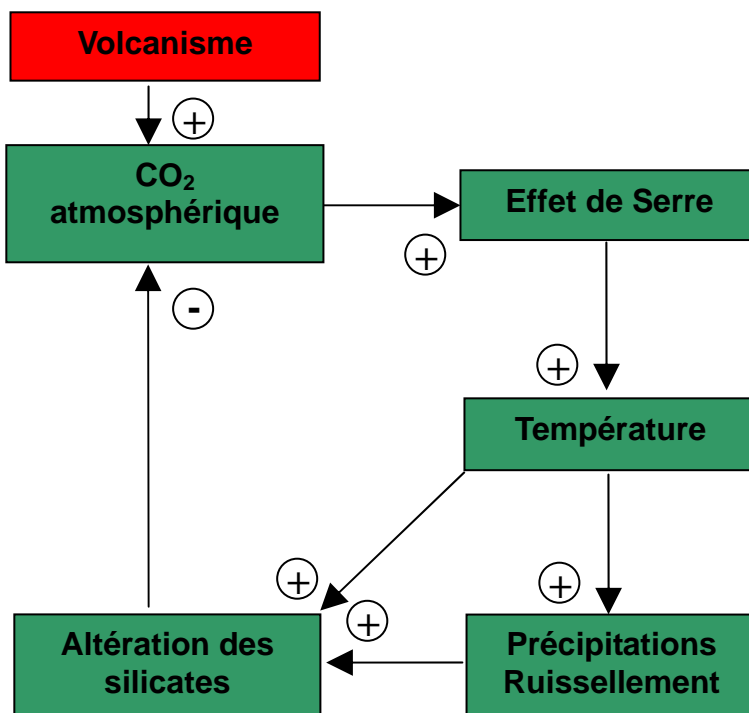
- f. Emissions volcaniques.** Le volcanisme a aussi l'effet inverse : lors des éruptions, du CO₂ est libéré dans l'atmosphère, que l'altération des roches volcaniques nouvellement produites contribuera à résorber (on revient ainsi à l'équilibre). Des quantités très importantes de CO₂ ont été injectées dans l'atmosphère lors des grandes crises volcanique, mais ce flux est faible de nos jours. L'origine de ce CO₂ est le manteau, et l'on pense que ce flux sortant de carbone par dégazage est compensé par le flux entrant de carbone dans le manteau (subduction de roches carbonatées). Notez également que le métamorphisme des roches libère aussi du CO₂.

- g. Emissions anthropiques** (humaines) : elles introduisent un déséquilibre dans le cycle du carbone car elles augmentent la quantité de carbone dans l'atmosphère sur une échelle de temps très courte. Elles sont de trois types :

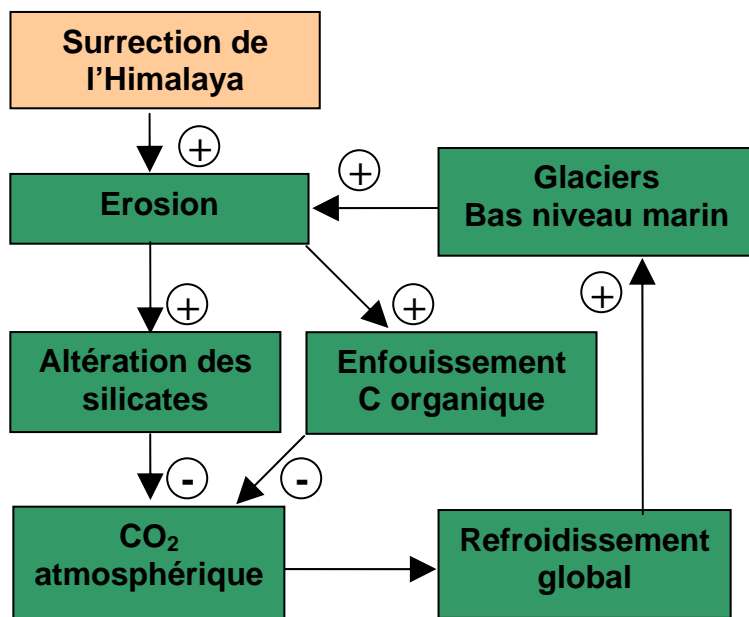
- **combustion de matière organique fossile** (pétrole, gaz, charbon...)
- **déforestation** et labourage des sols (le carbone est exposé à l'oxydation, ce qui libère du CO₂)
- **cimenteries** : la production de ciment par calcination de calcaire libère du CO₂

Prédire les réponses de ces cycles emboîtés aux perturbations est complexe ! Ainsi, vous connaissez tous le lien entre la teneur en CO₂ atmosphérique et la température globale, le dioxyde de carbone (avec le méthane CH₄, autre forme de carbone atmosphérique) étant un gaz à effet de serre. Contentons nous de présenter deux scénarios d'évolution à long terme en guise d'exemple.

- a. **Exemple de rétroaction négative : le modèle de Walker (« hypothèse du thermostat »).** L'augmentation de température entraînée par l'augmentation de la teneur en CO₂ atmosphérique renforce l'altération des silicates, donc le pompage du CO₂. Comme exposé plus haut, on revient à la situation de départ.



- b. **Exemple de rétroaction positive : le modèle de Raymo.** Ici, c'est la formation de l'Himalaya qui, en exposant des reliefs à l'érosion, augmente le pompage du CO₂ par l'altération des silicates. La diminution de la température globale qui s'ensuit entraîne le développement des glaciers et l'abaissement du niveau marin, ce qui augmente le taux global d'érosion, et abaisse encore la température globale !



À retenir :

- les ordres de grandeur des réservoirs (et leurs unités !)
- C'est l'énergie solaire qui met en mouvement le cycle du carbone superficiel présenté ici.
- **L'océan est un puits de carbone**
- Le cycle est à l'équilibre à l'échelle des temps géologiques, mais pas forcément à l'échelle de temps des sociétés humaines.
- Il existe beaucoup d'autres cycles de matière : eau, soufre, oxygène, phosphore...

Sitographie

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-himalaya-pompe-co2.xml>

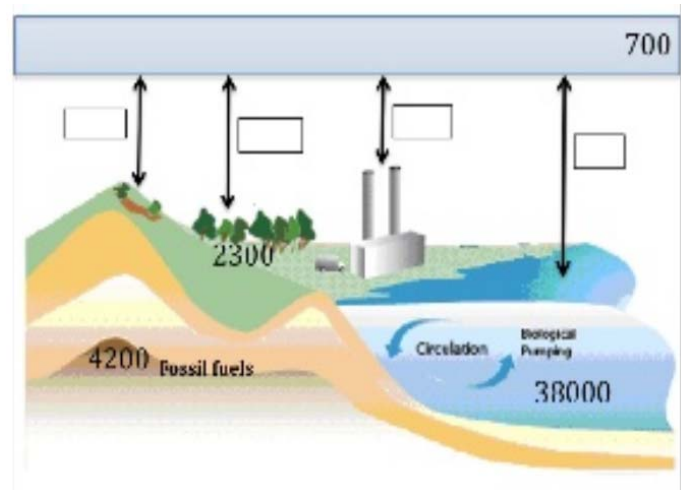
<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-co2-et-carbonates.xml>

http://lecarbone.com/article.php3?id_article=82

<http://cycleducarbone.ipsl.jussieu.fr/>

Annales :

- À quel cycle de matière le calcaire est-il relié ? (IESO 2011)
 - a) cycle du phosphore
 - b) cycle du carbone
 - c) cycle du soufre
 - d) cycle de l'azote
- La concentration du CO₂ en solution régule la précipitation d'un de ces minéraux, lequel ? (IESO 2011)
 - a) halite
 - b) gypse
 - c) apatite
 - d) calcite
 - e) opale
 - f) barytine
- Quelles sont les unités des valeurs portées sur le schéma ci-contre, montrant des estimations des réservoirs principaux de carbone et les flux de carbone (IESO 2011)
 - a) kg C m⁻³
 - b) Pg C
 - c) mol C
 - d) Gt C
 - e) les réponses b et d sont justes
 - f) les réponses b et c sont justes



L'atmosphère actuelle contient environ 700 Gt de carbone sous forme de CO₂. Les réserves de combustibles fossiles sont estimées à, au moins, 4200 Gt de carbone. Environ la moitié du carbone dégagé par la combustion des combustibles fossiles reste dans l'atmosphère. En considérant que cela reste vrai, si on brûle instantanément toutes les réserves de combustibles fossiles, de combien la quantité de CO₂ atmosphérique augmentera-t-elle ? (Donner le rapport de la nouvelle quantité de CO₂ sur l'ancienne).