

Cycle du carbone

Le **cycle du carbone** est le cycle biogéochimique (ensemble des échanges d'un élément chimique) du carbone sur une planète.

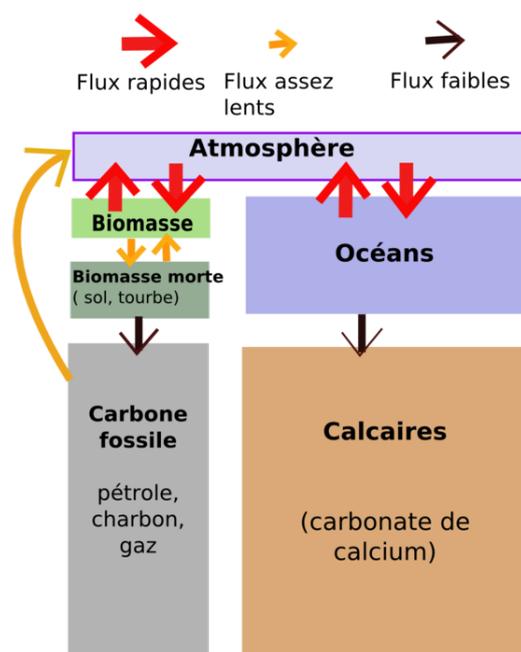
Celui de la Terre est rendu plus complexe par l'existence d'importantes masses d'eau océaniques, et surtout par le fait que la vie (et donc les composés carbonés qui en sont le substrat) y tient une place importante.

Il existe quatre réservoirs de carbone : l'hydrosphère, la lithosphère, la biosphère et l'atmosphère. La plus grande partie du carbone terrestre est piégée dans des composés qui participent peu au cycle : roches sous forme de carbonates et océan profond. L'essentiel du cycle se fait entre l'atmosphère, les couches superficielles du sol et des océans, et la biosphère (biomasse et nécromasse).

En mer, le carbone se trouve surtout sous forme de carbonate et de biomasse planctonique.

Sur les continents, les tourbières, prairies et forêts, mais aussi certains sols jouent un rôle plus ou moins important de stockage de carbone ou de puits de carbone.

Les échanges de carbone s'expriment en *milliards de tonnes (gigatonnes)* par an (*Gt/an*).



Cycle simplifié du carbone

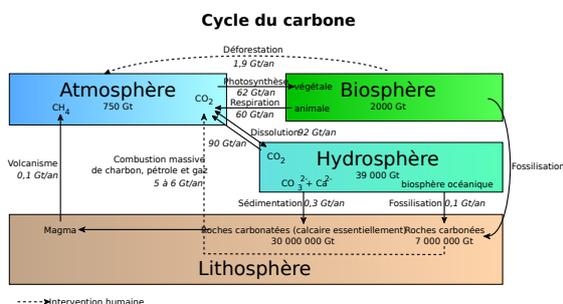


Schéma du cycle du carbone [réf. nécessaire].

des facteurs primordiaux pour le développement des êtres vivants sur Terre.

Enfin l'étude de ce cycle a récemment pris un relief tout particulier dans le cadre de la question du réchauffement climatique : deux des gaz à effet de serre en cause, le dioxyde de carbone (CO_2) et le méthane (CH_4), participent au cycle du carbone, dont ils sont la principale forme atmosphérique. Plus largement que les questions climatiques, l'étude du cycle du carbone permettra de déterminer les effets du relargage par les activités humaines du carbone stocké sous forme de combustibles fossiles.

1 Intérêt

L'étude des cycles des principaux éléments chimiques (dont le carbone) ont toujours été d'un grand intérêt scientifique et technique ; cela permet notamment d'évaluer la disponibilité, prédire les conditions et zones d'accumulation (pour une exploitation), définir les leviers à actionner pour optimiser localement une production sensible à un élément, etc.

Le cycle du carbone est très important pour la biosphère, puisque la vie est fondée sur l'utilisation de composés à base de carbone : la disponibilité en carbone fait partie

2 Les réservoirs de carbone

Le cycle naturel du carbone dans le système Terre peut être évalué en analysant la dimension, les flux d'échanges et le temps de résidence d'un atome de Carbone dans les différents réservoirs. Par ordre de taille décroissante, on distingue :

- un immense réservoir (> à 50 millions de Gtc) qui correspond aux sédiments et roches sédimentaires présentes dans la lithosphère océanique,

- un réservoir de taille moyenne (39 000 Gtc) constitué par les masses d'eaux océaniques superficielles et profondes,
- il existe plusieurs réservoirs de petite taille, c'est-à-dire inférieure à 2000Gtc comprenant : l'atmosphère, la biosphère (plantes, sols, animaux).

3 Origine volcanique du dioxyde de carbone

Le cycle du carbone débute par l'arrivée du dioxyde de carbone (CO_2) à la surface de la Terre. Elle résulte du dégazage du manteau terrestre lors des éruptions volcaniques, qui rejettent dans l'atmosphère divers gaz dont le CO_2 et le monoxyde de carbone (CO). Ainsi l'atmosphère primitive de la Terre était principalement composée de CO_2 . Aujourd'hui ce dégazage continue selon un flux faible, soit environ 0,1 Gt/an.

Au cours des âges, et alors que la température du soleil augmente, la plupart de ce CO_2 originel a été peu à peu piégée surtout par des processus biologiques dans des « réservoirs » tels que la lithosphère (roches carbonatées, charbon...), la biosphère ou les océans.

3.1 Intérêt du volcanisme et de ses dégagements du CO_2 dans l'histoire de la Terre

À plusieurs périodes dans l'histoire de la Terre, celle-ci a connu des refroidissements tels qu'elle était entièrement recouverte de glace des pôles à l'équateur. C'est la théorie de la Terre 'boule de neige' (snow ball).

Un de ces événements eut lieu au Paléo protérozoïque (2,2 à 2,3 milliards d'années), et 3 ou 4 autres glaciations totales se seraient déroulées au Néoprotérozoïque (entre 730 à 590 millions d'années). Ce phénomène peut être expliqué par l'augmentation de la pluie, le ruissellement et donc l'érosion de surface et la présence de multiples autres facteurs qui vont conduire à la chute du taux de CO_2 atmosphérique.

Malgré la présence de glace partout, les éruptions volcaniques ont perduré et ont permis d'augmenter le taux de CO_2 dans l'atmosphère qui a induit un réchauffement. Les volcans auraient joué un grand rôle en mettant fin à la glaciation "boule de neige". C'est grâce à des cataclysmes volcaniques que notre planète a pu sortir de son état de sphère gelée.

La présence du CO_2 fut à l'origine de l'explosion de la vie en permettant de ramener la température de la Terre dans une plage idéale (15 °C de moyenne) où les organismes vivants peuvent se développer.

L'ensemble volcans et monde vivant, plus précisément le

plancton des océans, a permis d'ajuster le taux de CO_2 de l'atmosphère terrestre. En effet, les volcans rejettent des quantités gigantesques de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et favorisent l'explosion de la vie, le plancton lui est venu tamponner cet effet en absorbant une partie du CO_2 relargué et s'en sert encore aujourd'hui pour former sa coquille (formée souvent de CaCO_3), éliminant ainsi une grande partie du dioxyde de carbone.

3.2 Apport des météorites

Plus exceptionnellement, du carbone peut être apporté à l'occasion de l'impact d'une importante météorite sur la Terre. Selon la violence de cet événement, la quantité de matière expulsée et les conséquences peuvent varier considérablement. Alors que l'activité volcanique normale fait augmenter le taux atmosphérique des gaz à effet de serre, la chute d'un corps lourd ou une éruption exceptionnellement puissante propagent dans la haute atmosphère de grandes quantités de poussière qui réduisent le flux du rayonnement solaire, ce qui provoque une diminution de la température qui peut aller jusqu'à plusieurs dizaines de degrés en quelques semaines. Un cataclysme de ce type est peut-être la cause de la disparition des dinosaures.

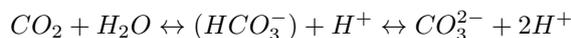
Article connexe : Extinction du Crétacé.

4 Les principaux éléments du cycle

4.1 Échanges atmosphère-hydrosphère (dissolution - dégazage)

Du fait de la forte solubilité du dioxyde de carbone (CO_2) dans l'eau et de l'importance du volume des océans, la capacité de stockage des couches supérieures de l'hydrosphère, c'est-à-dire jusqu'à 100 m, est impressionnante : 63 fois plus élevée que celle de l'atmosphère.

Le carbone s'y retrouve sous diverses formes. En milieu aqueux le CO_2 est en équilibre avec les formes hydrogénocarbonate (HCO_3^-) et ion carbonate (CO_3^{2-}).



La répartition du CO_2 dans l'océan est approximativement la suivante :

- 1 % dans le dioxyde de carbone (CO_2)
- 90 % dans l'hydrogénocarbonate (HCO_3^-)
- 9 % dans les ions carbonates (CO_3^{2-})

Ces proportions dépendent du PH de l'eau et par conséquent sont très variables dans les eaux continentales.

Les ions carbonates seront eux-mêmes en équilibre avec des formes précipitées (carbonate de calcium, qu'on re-

trouve notamment dans les coquilles d'animaux marins qui formeront le calcaire).

Enfin, le développement des être vivants qui captent le CO₂ (photosynthèse, construction d'une coquille) ou en rejettent (respiration) a une importance non négligeable sur la quantité de carbone dissous et représente une part de la biomasse.

Les variations de la pression partielle du CO₂ dans l'air modifie les flux entre l'atmosphère et les eaux. Ces variations dépendent de la latitude car les flux de CO₂ dépendent aussi de la température de l'eau des océans (les eaux froides contiennent plus de gaz dissous que les eaux chaudes), mais aussi de l'état de l'interface air-eau, donc du vent et de la hauteur de la houle : plus la surface de l'eau sera agitée et plus les échanges seront facilités... Étant donné les valeurs très élevées des flux d'échanges dans les deux sens, une augmentation de teneur en CO₂ atmosphérique de 2 à 3 % correspond à une arrivée dans l'océan d'environ 2 à 3 milliards de tonnes de carbone par an^[1].

4.2 Échanges atmosphère-biosphère

Les êtres vivants échangent 60 Gt/an de carbone avec l'atmosphère. Cet échange se fait dans les deux sens : alors que la fermentation, la respiration des bactéries, des animaux et des végétaux dégagent du CO₂, la photosynthèse (notamment celle des végétaux chlorophylliens) fixe le carbone dans la matière organique ou biomasse. Ces deux mécanismes font à la fois partie du cycle du carbone et du cycle de l'oxygène.

Articles connexes : Photosynthèse, Respiration cellulaire et Fermentation.

Dans un écosystème en équilibre, la quantité nette de dioxygène produit par les organismes autotrophes (photosynthèse) est égale à la quantité de dioxygène consommée par les organismes hétérotrophes (respiration).

Mais les écosystèmes ne sont en général pas équilibrés. Globalement ils contribuent à un stockage de carbone, par la sédimentation, la fossilisation, la formation de kérogène, etc. (voir infra biosphère-lithosphère). Les tourbières par exemple stockent des débris végétaux dans les sols, la tourbe. Cette biomasse « morte » est estimée à 1 600 Gt de Carbone, deux fois la quantité de carbone de la biomasse « vivante ».

4.3 Les échanges lents avec la lithosphère

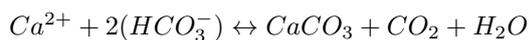
4.3.1 Échanges biosphère-lithosphère (fossilisation)

La fossilisation des êtres vivants morts demande plusieurs millions d'années. Comme le nombre d'organismes vivants ne peut pas augmenter brutalement de manière

significative, ce transfert ne change guère au cours du temps. Il est estimé à moins de 0,5 Gt/an.

4.3.2 Les échanges hydrosphère-lithosphère (sédimentation)

La « sédimentation océanique » : les coquilles des crustacés, des mollusques ou des algues planctoniques se forment par précipitation du calcaire à partir des éléments dissous :



Cette précipitation peut être spontanée dans certaines conditions physico-chimiques.

La sédimentation des coquilles est à l'origine de la plupart des roches contenant du calcaire (craie, calcaire, marne etc.). Ce calcaire ou carbonate de calcium (CaCO₃) reste stocké pendant des centaines de millions d'années (délai de renouvellement moyen : 330 millions d'années, à comparer avec le délai de renouvellement du carbone de l'atmosphère qui est de cinq ans).

4.4 Conclusion des échanges

Le cycle du carbone est donc un système de recyclage très complexe où les processus physiques, chimiques et biologiques sont si intimement liés qu'il devient difficile d'examiner séparément le recyclage des deux formes de carbone (carbone organique et inorganique).

Si le cycle du carbone semble équilibré sur l'échelle des temps géologiques, il arrive souvent que les quantités et les flux de carbone varient de façon assez conséquente entre différents réservoirs et ont ainsi des implications climatiques majeures^[2].

5 Polémiques sur le rôle des forêts, anciennes notamment

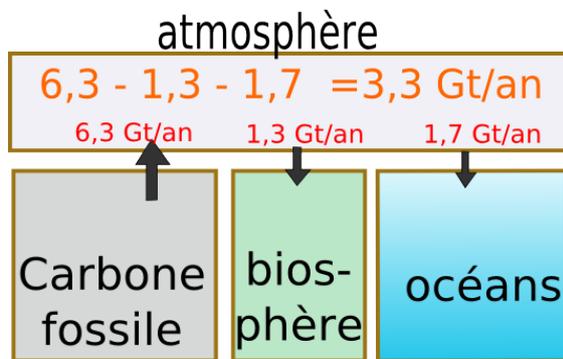
Pendant sa phase de croissance initiale une forêt joue un rôle de puits de carbone : la masse de carbone sous forme de branches, racines et humus augmente à partir de zéro. Par contre il n'y a pas de consensus scientifique concernant les forêts anciennes.

Une hypothèse posée par Eugène Odum dans les années 1960 était que ces forêts étaient à l'état d'équilibre, c'est-à-dire émettant autant de CO₂ qu'elles en absorbent. Contrairement aux tourbières, les vastes zones forestières auraient alors été neutres dans le cycle du carbone.

Une étude internationale récente^[3] infirme cette hypothèse, montrant que globalement, comme les jeunes forêts, les forêts anciennes peuvent stocker aussi du carbone (plus ou moins selon le contexte climatique et les apports atmosphériques en azote, mais tout à fait significativement). Les auteurs de cette étude invitent donc à

intégrer dans les bilans les forêts de 15 et 800 ans d'âge, et surtout à mieux les protéger car leur destruction ou même leur perturbation^[4] est cause d'importants relargages de carbone. En effet, les données récentes des réseaux d'observatoires « CarboEurope » et « AmeriFlux » ont prouvé que ces forêts anciennes séquestrent annuellement de 0,8 à 1,8 milliard de tonnes de carbone. Les forêts anciennes comptent encore pour environ 15 % de la surface forestière totale (forêt primaires pour 30 % de cette surface, dont la moitié est la forêt boréale située dans l'hémisphère Nord, couvrant $6 \cdot 10^8$ hectares). Elles n'étaient jusqu'ici pas prise en compte dans les bilans-carbone, alors qu'elles séquestrent selon cette étude, notamment dans les litières et leurs sols^[5] au moins 10 % de tout le CO₂ stocké^[6].

6 Les activités humaines participent au cycle du carbone



Les humains modifient le cycle du carbone (1990-1999)

Les quantités de carbone émis par les activités humaines dans l'atmosphère sont de :

- 6,4 Gt/an pour les années 1990^[7].
- 7,2 Gt/an pour la période 2000-2005.
- Selon l'Académie Nationale des Sciences des États-Unis, pour 2000-2006, 10 Gt/an de carbone ont été émis, soit 37 % de plus par rapport à 1990^[8].

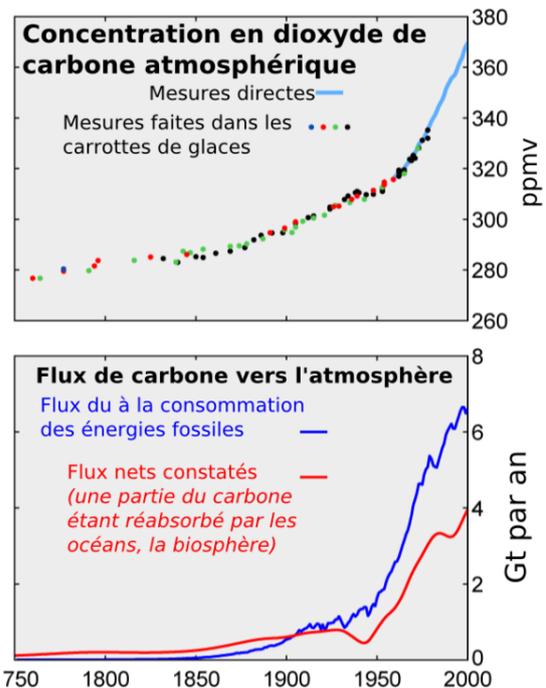
Environ la moitié de ce carbone a été réabsorbée par la biosphère, par photosynthèse accrue, et les océans, par dissolution.

Ainsi la quantité de carbone dans l'atmosphère s'est accrue de 3,2 à 3,3 Gt/an dans la période 1990-1999.

6.1 Combustion

Les interventions les plus évidentes de l'homme sont :

- la combustion massive de matières organiques due à la déforestation,



Concentrations et flux en CO₂ atmosphérique



Plate-forme pétrolière, dans le Golfe du Mexique

- la combustion de roches carbonées (charbon, pétrole, gaz naturel) qui rejettent énormément de dioxyde de carbone et de méthane.

6.2 La fabrication du ciment

La fabrication du ciment se fait, entre autres processus, par la calcination du calcaire dans les fours à calcination.

- Le CaCO_3 est converti en CaO (chaux) avec un rejet de CO_2 dans l'atmosphère.
- Ce dégagement de CO_2 lors de la calcination du calcaire ne paraît pas très préoccupant. En effet lors de l'utilisation du ciment produit, la réaction

physico-chimique complexe de prise des mortiers & bétons absorbe du CO_2 contenu dans l'air dans les mêmes proportions. Ainsi la boucle est bouclée

- Cette calcination nécessite beaucoup d'énergie, souvent d'origine fossile.

Elle est à l'origine d'environ 7 à 8 % des émissions totales de CO_2 à l'échelle du globe^[9]

En revanche la consommation d'énergie à partir de combustible fossile provoque un flux faible (0,2 Gt/an, quoique non négligeable ; le stockage du carbone dans les roches calcaires se ferait à une vitesse équivalente ou légèrement supérieure^[réf. nécessaire].

7 Effet du réchauffement climatique sur le cycle du carbone

Le cycle du carbone dépend du climat et réciproquement. Les interactions sont complexes, avec des phénomènes qui contribuent à une rétroaction positive, d'autres à une rétroaction négative. Tous les phénomènes ne sont pas complètement identifiés et quantifiés, mais on peut quand même en citer quelques-uns

- Le CO_2 et le méthane atmosphériques contribuent à l'effet de serre : une augmentation de leur taux est un facteur de réchauffement climatique
- Le réchauffement climatique diminue la dissolution du CO_2 dans les océans : la solubilité du dioxyde de carbone dans les océans dépend de leur température. Si cette température augmente, la capacité de stockage inorganique des océans diminue et ils se mettent à rejeter eux-mêmes du dioxyde de carbone. L'enclenchement d'un tel cercle vicieux serait catastrophique.
- Le réchauffement climatique peut diminuer le transfert du CO_2 vers les eaux profondes, et donc diminuer encore davantage sa dissolution dans les eaux superficielles. S'il prend trop d'ampleur, il pourrait aussi diminuer en grande partie la sédimentation

océanique, en ralentissant, voire supprimant sous certaines latitudes, les courants océaniques profonds de la plongée (au niveau du Groenland pour le Gulf Stream et dans l'Océan Pacifique pour la branche asiatique) des eaux froides et plus salées chargée de dioxyde de carbone. Même si cette sédimentation est très faible, c'est elle qui génère l'ensemble des roches carbonatées, c'est-à-dire contenant des carbonates tels le carbonate de calcium (calcaire).

- Le réchauffement climatique augmente la dégradation de la matière organique des sols gelés (pergélisol) et des milieux tourbeux ce qui rejette du CO_2 et du méthane, aggravant l'effet de serre additionnel.

8 Articles connexes

- Fermentation
- Fossilisation
- Sédimentation
- Respiration
- Photosynthèse
- Combustion
- Biosphère
- Hydrosphère
- Lithosphère
- Atmosphère
- Stockage géologique du carbone
- Puits de carbone

9 Liens externes

- Site dédié au cycle du carbone, publié par le LSCE, le laboratoire des sciences du climat et de l'environnement. Contient des informations pédagogiques pour le grand public et aussi pour les enseignants du secondaire.
- (fr/en) CarBBAS Groupe de recherche en biogéochimie du carbone dans les écosystèmes aquatiques boréaux
- Comprendre le cycle du carbone sur le site energieplus-lesite.be de Architecture et Climat de l'Université catholique de Louvain
- Histoire du carbone et du CO_2 .

10 Bibliographie

- Allen AP, Gillooly JF, Brown JH (2005) *Linking the global carbon cycle to individual metabolism*. *Functional Ecology*, 19, 202–213.

11 Références

- [1] JUPIN H. (1996). *Le cycle du carbone*, Hachette supérieur, Paris
- [2] D'après le livre : *Géologie, Maxi Fiches*, d'L.Emmanuel, M de Raféllis, A.Pasco
- [3] Sebastiaan Luyssaert et al. *Old-growth forests as global carbon sinks* ; étude publiée par le journal *Nature*, 11 September 2008
- [4] « *We expect, however, that much of this carbon, even soil carbon, will move back to the atmosphere if these forests are disturbed* » in résumé de l'étude
- [5] Björn Berg and Ryszard Laskowski, *Litter decomposition : a guide to carbon and nutrient turnover ?* ; *Advances in Ecological Research* 38
- [6] *Old forests capture plenty of carbon* Accès à l'étude, Doi: 10.1038
- [7] GIEC, 2007
- [8] *Le Monde*, 23.10.07
- [9] IFIPS , Université Paris-SUD 11



- Portail de la biochimie

12 Sources, contributeurs et licences du texte et de l'image

12.1 Texte

- **Cycle du carbone** *Source* : http://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_du_carbone?oldid=114670387 *Contributeurs* : Anthere, Orthogaffe, Kelson, Moala, Gem, Spooky, Phe, MedBot, Eiku, VIGNERON, Phe-bot, ~Pyb, Fylyp22, Romary, Jef-Infojef, Bradipus, Leag, Xavier Combelle, FredB, Michel Volle, Korg, Wart Dark, Gede, MisterMatt Bot, Holycharly, Vazkor, Lmaltier, Thedreamstree, Plyd, RobotQuistnix, TOnin, Poppy, Eskimbot, Jerome66, MMBot, Crouchineki, Loveless, TED, Oxo, Chlewbot, Cehagenmerak, Pautard, Gonioul, Xofc, Esprit Fugace, Tchai, Elapied, SashatoBot, Jmax, Rpa, Lamiot, Jabadao, Linan, YSidlo, NicoV, Ban~frwiki, Thijs !bot, CardinalJo, Kropotkine 113, JAnDbot, Zedh, .anacondabot, Nono64, Sebleouf, Melusyne, Eybot, VonTasha, Haltopub, Salebot, Speculos, Zorrobot, DodekBot~frwiki, AlnokaBOT, Idioma-bot, MenasimBot, Chandres, TXiKiBoT, Environnement2100, Tooony, Bapti, VolkovBot, AmaraBot, ChLenclud, Ptbogourou, BotMultichill, SieBot, Laddo, ZX81-bot, Chphe, Salmoneus, Vlaam, PipepBot, LeMorvandiau, Ir4ubot, Renouvelable, HerculeBot, SilvononBot, ZetudBot, Ccmpg, FiriBot, E Bernal, Géodigital, Luckas-bot, Gagea, Bendeck, Archimèa, Pbrender, Penjo, Cantons-de-l'Est, JamousMarc, Xqbot, MerLinkBot, EpopBot, Pom445, D'ohBot, MastiBot, Coyote du 57, Lomita, MondalorBot, Super Bazooka, Toto Azéro, Catschlum, EmausBot, Nico 5 M., ChuispastonBot, Jules78120, Pierre Allemand, Ge3k-tv, Oimabe, UPVD-BioEco-STEL3-2011, Nicolas.fstgelais, OrlodrimBot, Thehelpfulbot, Vagobot, La-crevette-jaune, Rene1596, Orikrin1998, FDO64, DarafshBot, Biquet47, Addbot et Anonyme : 100

12.2 Images

- **Fichier:Carbone_flux2.png** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/37/Carbone_flux2.png *Licence* : CC-BY-SA-3.0 *Contributeurs* : Travail personnel *Artiste d'origine* : maxime lev
- **Fichier:Confusion_colour.svg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6f/Confusion_colour.svg *Licence* : Public domain *Contributeurs* : Travail personnel *Artiste d'origine* : Bub's
- **Fichier:Cycle du carbone2.svg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1d/Cycle_du_carbone2.svg *Licence* : CC BY-SA 3.0 *Contributeurs* : Travail personnel *Artiste d'origine* : bendeck
- **Fichier:Déséquilibre du cycle du carbone.png** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8e/D%C3%A9s%C3%A9quilibre_du_cycle_du_carbone.png *Licence* : CC-BY-SA-3.0 *Contributeurs* : Travail personnel *Artiste d'origine* : saphon
- **Fichier:Flux carbone fr.png** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8a/Flux_carbone_fr.png *Licence* : CC BY-SA 3.0 *Contributeurs* : common Image:Carbon History and Flux-2.png *Artiste d'origine* : toony
- **Fichier:Gulf Offshore Platform.jpg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/ba/Gulf_Offshore_Platform.jpg *Licence* : CC BY 2.0 *Contributeurs* : Flickr.com - image description page *Artiste d'origine* : Chad Teer from Coquitlam, France
- **Fichier:Hemogloblin.jpg** *Source* : <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/19/Hemogloblin.jpg> *Licence* : CC-BY-SA-3.0 *Contributeurs* : ? *Artiste d'origine* : ?

12.3 Licence du contenu

- Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0