

Quels sont les liens entre le cycle du carbone et le climat ?

La réponse de Philippe Bousquet, du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE).

La question :

Quels sont les liens entre le cycle du carbone et le climat ?

La réponse :

Celle de Philippe Bousquet, professeur à l'université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines. Philippe effectue sa recherche au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE) sur la modélisation du cycle du carbone actuel. Il s'occupe également des questions liées à la formation pour l'Institut Pierre Simon Laplace.

Le carbone est un élément chimique présent dans l'atmosphère essentiellement sous forme de dioxyde de carbone (CO_2) et de méthane (CH_4)¹. Le cycle du carbone représente les échanges des composés carbonés entre l'atmosphère, les surfaces continentales et les océans. Dans ce texte, nous allons restreindre la notion de cycle du carbone au seul **dioxyde de carbone** car il représente environ 99 % du carbone de l'atmosphère. Cependant il ne faut pas oublier le méthane, qui est important pour son effet de serre, et l'ensemble des composés organiques volatils qui influent sur la qualité de l'air de nos villes et sur la production d'ozone.

Le CO_2 et le climat de la Terre

Dioxyde de carbone et climat sont fortement liés depuis le début de l'histoire de la Terre, il y a 4,55 milliards d'années, par l'intermédiaire de différents forçages. Aux **échelles de temps géologiques** (des centaines de millions d'années), le cycle du CO_2 est principalement

constitué de deux sources (dégazage des océans et volcanisme) et d'un puits de carbone (altération chimique des roches continentales). En modifiant la forme et la répartition des continents, la **tectonique des plaques** a un impact sur l'activité volcanique et sur l'intensité de l'altération chimique des roches continentales. Elle modifie donc indirectement le contenu de l'atmosphère en CO₂ et elle a contribué à faire osciller la Terre entre des périodes chaudes (avec des concentrations plus élevées en CO₂ dans l'atmosphère) et des périodes froides (avec des concentrations moins élevées en CO₂). Dans ce cas, les variations de CO₂ ont précédé l'évolution de la température.

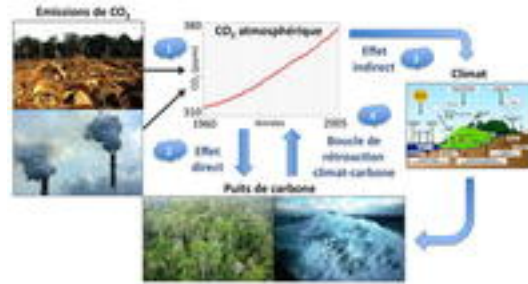
Depuis un million d'années au moins, les variations des **paramètres de l'orbite terrestre** induisent des oscillations entre des périodes glaciaires (avec des concentrations en CO₂ d'environ 180 parties par million) et des périodes interglaciaires (avec des concentrations en CO₂ d'environ 280 ppm). Bien que des incertitudes demeurent encore sur les mécanismes à l'œuvre, les variations de température au cours des périodes interglaciaires précèdent un peu les variations de CO₂ qui peuvent amplifier, en retour, les changements de température. On parle, dans ce cas, d'une rétroaction du CO₂ sur le climat.

Depuis au moins 150 ans, les **activités humaines** ont un impact significatif sur le cycle du carbone en injectant dans l'atmosphère du CO₂ par combustion de la biomasse et du carbone fossile (charbon, pétrole et gaz naturel), extrait des réservoirs géologiques constitués depuis le carbonifère. Ce forçage d'origine humaine a provoqué une **augmentation du CO₂ dans l'atmosphère** (+35 % depuis 1850, d'après le rapport 2007 du Giec), qui est la cause principale du réchauffement observé depuis 60 ans. La mesure du CO₂ dans l'atmosphère est très précise et permet de dire que, chaque année, en moyenne, seulement 45 % des émissions de CO₂ liées aux activités humaines demeurent dans l'atmosphère. Que deviennent les 55 % restants ? Les études de modélisation menées depuis 20 ans montrent que les océans et la végétation terrestre absorbent le CO₂ restant, à part à peu près égales, pour les décennies récentes².
. On parle de puits de carbone.

Un fait remarquable est que la capacité d'absorption des puits de carbone est quasi proportionnelle aux émissions de CO₂. Les **océans** et la **végétation terrestre** absorbaient ensemble un peu plus de 3 milliards de tonnes de CO₂ sur les 7 milliards émis en 1960. En moyenne, pour la décennie 2000, ils absorbent un peu plus de 18 milliards de tonnes de CO₂ sur les 36 milliards émis, nous accordant ainsi une « remise » de 55 % sur le changement climatique.

Effets du CO₂ sur les puits de carbone

Quels sont les facteurs qui ont une influence sur l'intensité des puits de carbone ? L'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère a un effet direct et un effet indirect sur les puits de carbone.



Boucle de rétroaction climat-carbone.

L'**effet direct** est dû au fait que le CO₂ fournit aux végétaux le carbone constitutif de leur matière organique. L'élévation de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère entraîne une augmentation de la photosynthèse des végétaux terrestres et donc une absorption plus grande du CO₂ atmosphérique. On parle d'effet de « fertilisation ». Un autre effet de fertilisation résulte de l'utilisation massive d'engrais dans l'agriculture. Ces derniers augmentent la quantité d'azote dans les sols, et pas seulement agricoles, grâce à la dispersion dans l'air et au dépôt de composés azotés.

Dans l'océan, même si la compréhension fine des puits de CO₂ est plus complexe, on peut dire que l'augmentation du CO₂ dans l'air accroît l'absorption du CO₂ dans les eaux de surface par diffusion physique. Cet effet physique est complété par une « pompe » biologique qui contribue à l'absorption de CO₂ par l'activité des végétaux marins. À ces processus s'ajoute encore l'existence d'une chimie du CO₂ (qui est un acide faible) dans l'eau de mer.

L'**effet indirect** du CO₂ sur les puits de carbone est lié à l'évolution du climat. L'augmentation des températures et les changements de précipitations, de l'humidité des sols, ou de la couverture nuageuse peuvent modifier les puits de carbone à la hausse ou à la baisse. Jusqu'à présent, l'effet indirect tend à augmenter la capacité d'absorption des puits de carbone avec le temps et à l'échelle mondiale.

Ce sont là les principales causes qui influent sur l'intensité des puits de carbone, mais il en existe d'autres comme le temps de résidence du carbone dans les sols ou la gestion forestière. Les puits de carbone ne sont pas régis par un mécanisme unique et il est nécessaire de prendre en compte ces multiples causes pour bien comprendre le devenir du CO₂ atmosphérique.

Évolution des puits de carbone

Que va-t-il se passer pour les puits de carbone au cours du XXI^e siècle ? L'effet direct du CO₂ atmosphérique devrait continuer d'exister. En revanche, des études de modélisation récentes montrent que l'effet indirect (via le changement climatique) pourrait réduire l'efficacité des puits de carbone³

. En effet, une évolution trop rapide du climat (par exemple, des vagues de chaleur trop fréquentes) pourrait fortement perturber la végétation terrestre qui absorberait de moins en

moins de carbone au cours du XXI^e

siècle et pourrait même en rejeter à la fin du siècle, selon certaines études. Les océans pourraient également absorber de moins en moins de carbone en se réchauffant⁴, en s'acidifiant (du fait de la perturbation de la biologie marine) et en voyant leur circulation modifiée.

Au total, les modèles actuels calculent une **efficacité moins grande des puits de carbone au XXI^e siècle**, ce qui provoquerait une augmentation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère (toutes choses égales par ailleurs) et donc une amplification du changement climatique. On parle, dans ce cas, d'une rétroaction climat-carbone positive. Une conséquence de cette évolution mérite d'être prise en considération : si les puits de carbone deviennent moins efficaces, il faudra réduire encore davantage les émissions de CO₂ pour limiter la concentration de CO₂ dans l'atmosphère à un niveau donné.

Notes :

1.

Le rapport de mélange actuel dans l'atmosphère est de 390 parties par million (ppm) pour le CO₂ et de 1,8 ppm pour le CH₄.

2.

Le Quéré C. et al., 2009 : Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geoscience*, 2, 831-836.

3.

Friedlingstein P. et al., 2006 : Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the (CMIP)-M-4 model intercomparison. *Journal of Climate*, 19, 3337-3353.

4.

Plus une eau est chaude, moins elle dissout de CO₂ et plus elle diminue l'intensité des remontées d'eau profondes qui permettent une accentuation de la photosynthèse et donc du puits de CO₂.

Glossaire :

- **Carbonifère** : période géologique où la Terre était largement recouverte de forêts. Dans celles-ci, l'enfouissement de la matière organique a progressivement permis la constitution des réserves de charbon, de pétrole et de gaz naturel exploités actuellement.
 - **Diffusion physique** : phénomène de transport de matière dont l'intensité est proportionnelle à la différence des concentrations entre deux milieux. Par exemple, si la concentration de CO₂ est plus grande dans l'air que dans l'eau, du CO₂ diffusera de l'air vers l'eau.
 - **Échelle de temps** : fenêtre de temps et résolution avec lesquelles on observe et on analyse un système ou un phénomène. Les phénomènes géologiques, comme la tectonique des plaques, imposent une échelle de temps de plusieurs centaines de millions d'années avec une résolution typique du million d'années. À l'autre extrémité, la perturbation du climat due aux activités humaines impose une échelle de temps de quelques siècles avec une résolution typique annuelle.
-

- **Forçage** : cause interne ou externe à un système provoquant une perturbation d'un état d'équilibre. Par exemple, le forçage radiatif dû à l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, depuis 150 ans, cause une augmentation de la température de l'air à la surface de la Terre.
 - **Période glaciaire** : époque caractérisée par la présence de calottes glaciaires sur l'Amérique du Nord et sur l'Eurasie, qui atteignent près de 3 km d'épaisseur et s'étendent sur plusieurs milliers de kilomètres. Cette période est également marquée par une chute du niveau moyen des mers (jusqu'à 130 m au dernier maximum glaciaire, il y a environ 20 000 ans). [Source : Marie-Antoinette Mélières (LGGE) en collaboration avec Estelle Poutou - © CNRS/sagascience.]
 - **Période interglaciaire** : période de climat chaud sur Terre, comparable au climat actuel et caractérisée par la disparition des calottes glaciaires de l'hémisphère nord (excepté celle du Groenland) et par un niveau élevé des mers. [Source : Marie-Antoinette Mélières (LGGE) en collaboration avec Estelle Poutou - © CNRS/sagascience.]
 - **Photosynthèse** : processus au cours duquel les végétaux convertissent l'énergie lumineuse en énergie chimique. Ils utilisent l'énergie solaire, le CO₂ et l'eau pour élaborer, dans leurs tissus, les matières organiques nécessaires à leur métabolisme et à leur croissance. [Source : Club des Argonautes.]
 - **Puits** : milieu, écosystème, processus qui capture des gaz à effet de serre (dioxyde de carbone par exemple) dans l'atmosphère, soit en les détruisant par des procédés chimiques, soit en les stockant.
 - **Rétroaction climatique** : Différents paramètres contraignent l'équilibre climatique. Lorsque l'un de ces paramètres change (par exemple, l'énergie solaire diminue), le climat se trouve modifié (dans notre exemple, il se refroidit). Ceci peut entraîner des modifications sur certains autres paramètres. Ces modifications ont, à leur tour, un impact sur le climat. Une boucle se met ainsi en place qui conduit soit à l'amplification du premier effet (refroidissement supplémentaire), cas d'une rétroaction positive, soit à son atténuation (refroidissement final plus faible), cas d'une rétroaction négative. En aucun cas une rétroaction ne peut inverser l'effet initial. (Dans notre exemple, il y aura toujours un refroidissement qui sera plus ou moins marqué selon que la rétroaction sera positive ou négative.) [Source : Marie-Antoinette Mélières (LGGE) en collaboration avec Estelle Poutou - © CNRS/sagascience.]
 - **Source** : milieu, écosystème, processus qui libère des gaz à effet de serre (dioxyde de carbone par exemple) dans l'atmosphère.
-