

Ce fascinant mécanisme de régulation naturelle constitue le thermostat géologique de la Terre. Son existence n'implique pas que la quantité de CO_2 atmosphérique et donc la température moyenne à la surface de la Terre aient toujours été les mêmes. Les grandeurs faisant réagir le thermostat ont au contraire constamment varié, en fonction des baisses et des hausses des émissions volcaniques ou parce que la formation de montagnes augmentait l'altération des roches.

Une équation différentielle simple traduit la variation de la quantité Q de CO_2 atmosphérique en fonction des sources et des puits de CO_2 :

$$dQ/dt = V - M = V - k[\text{CO}_2]$$

Dans cette équation, dQ/dt est la variation de la quantité de CO_2 atmosphérique par unité de temps, V est la quantité de CO_2 que les volcans ajoutent à l'atmosphère par unité de temps, M est la quantité de CO_2 retirée de l'atmosphère par la météorisation, par unité de temps; $[\text{CO}_2]$ représente la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone; et k est

une constante de réaction qui traduit la propension du CO_2 atmosphérique à être consommé par la météorisation, en d'autres termes la réactivité de la surface terrestre (notons que les grandeurs Q , V , M et $[\text{CO}_2]$, voire k , sont des fonctions du temps t).

UN ÉQUILIBRE APPARENT

Quand les émissions et la séquestration de CO_2 s'équilibrent, c'est-à-dire quand V et M sont égales, dQ/dt est nul. Pour que la température terrestre reste convenable, cet état «stationnaire» des échanges de CO_2 doit persister pendant la durée déjà citée de quelque 250 000 ans, à quelques pourcents près. Bien que les volcans introduisent constamment du CO_2 dans l'atmosphère et que l'altération des roches en retire sans cesse, la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone reste quasiment constante.

Deux facteurs peuvent perturber cet équilibre: une soudaine augmentation ou diminution des émissions volcaniques, ou une variation dans l'altération chimique des roches >

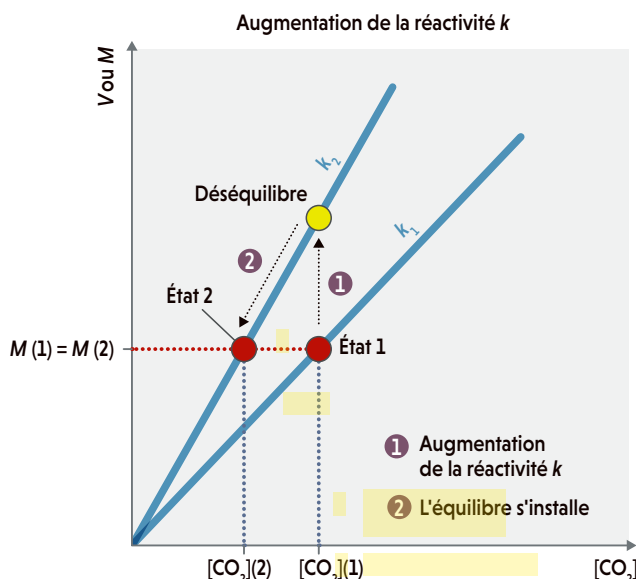
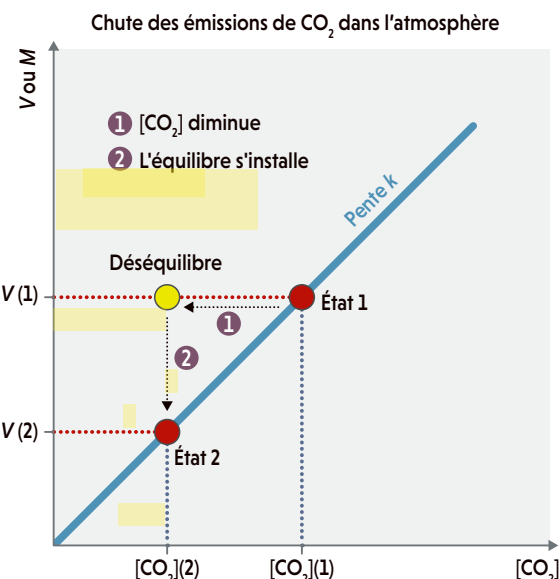
RÉTROACTION EN GRAPHIQUES

On peut représenter graphiquement la rétroaction due à une modification de l'émission de CO_2 par les volcans ou d'un changement de la réactivité chimique des surfaces terrestres, en considérant l'équation simple $dQ/dt = V - M = V - k[\text{CO}_2]$ où dQ/dt représente la variation au cours du temps de la quantité de CO_2 dans l'atmosphère. Montrons d'abord comment un changement de l'émission V de CO_2 par les volcans modifie $[\text{CO}_2]$, la concentration atmosphérique de CO_2 , par le biais de la constante de la réaction d'érosion chimique k . À l'équilibre, $dQ/dt = 0$, donc V est égale à M , l'absorption de CO_2 par la météorisation des roches. La grandeur V (ou M) est ici portée sur l'axe vertical des graphiques.

Le graphique de gauche montre le cas d'une baisse de l'émission volcanique V .

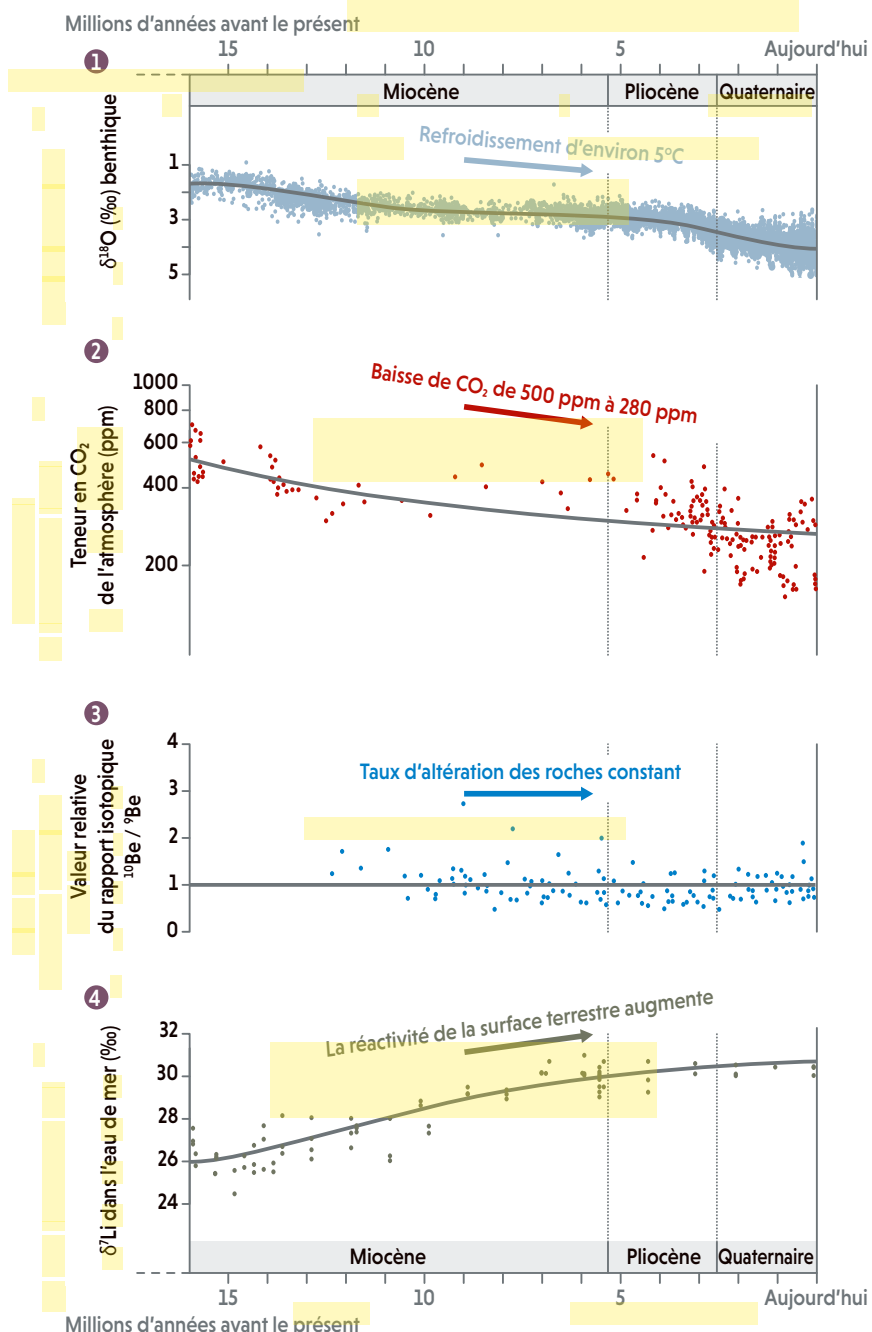
Le système Terre est alors temporairement déséquilibré, car la concentration atmosphérique $[\text{CO}_2]$ diminue (point jaune). L'absorption de CO_2 par la météorisation (M) diminue donc, jusqu'à ce que le système soit de nouveau à l'équilibre (position 2), mais à une concentration $[\text{CO}_2]$ inférieure, correspondant à la nouvelle valeur de V .

Le graphique de droite montre ce qui se passe lorsque la constante de réaction k augmente, par exemple en raison d'une érosion accrue des roches. La quantité $M = k[\text{CO}_2]$ devient alors temporairement plus élevée que V (point jaune). Toutefois, l'équilibre sera ici aussi rétabli, parce que la concentration $[\text{CO}_2]$ va diminuer de telle façon que, à la fin, règne le même taux d'altération M , mais avec une concentration $[\text{CO}_2]$ plus faible.



LES SIGNES DU CHANGEMENT

Au cours des 15 derniers millions d'années, une plus forte rétroaction a fait évoluer la régulation du climat terrestre. ① Ce dernier s'est refroidi (ce que l'on sait grâce aux isotopes stables de l'oxygène). ② La concentration atmosphérique de CO₂ a diminué (ce que l'on sait grâce aux isotopes stables du bore). ③ Le taux d'altération des roches silicatées est néanmoins resté constant (ce que nous savons en comparant le rapport passé entre l'isotope ¹⁰Be, produit par le rayonnement cosmique, et l'isotope stable ⁹Be dans les sédiments marins, au rapport actuel ¹⁰Be/⁹Be dans l'eau de mer, qui est de l'ordre de 10⁻⁷). ④ Pour autant, la réactivité chimique de la surface terrestre a augmenté (ce que nous savons grâce aux isotopes stables du lithium).



> silicatées. Si, par exemple, les émissions volcaniques diminuent, la concentration atmosphérique de CO₂ baisse. Cela fait diminuer l'altération des roches, qui absorbe alors moins de CO₂, jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre s'instaure, avec une concentration atmosphérique de CO₂ inférieure à la concentration initiale (voir l'encadré page 69). Comme indiqué plus haut, la durée d'un état d'équilibre est de l'ordre de 250 000 ans.

Au cours de son histoire, la Terre a connu de telles évolutions du CO₂ atmosphérique. Nous savons par exemple qu'au début de l'Éocène, il y a 52 millions d'années, notre planète était environ 10 °C plus chaude qu'à la fin de l'Éocène, il y a 35 millions d'années, et que l'atmosphère contenait alors environ 3 000 parties par million, ou ppm, de CO₂. En revanche, à l'époque préindustrielle, le niveau de CO₂ était faible: 280 ppm. En fait, au cours des 15 derniers millions d'années, la température moyenne mondiale a, globalement, diminué régulièrement; elle a baissé d'environ 3 °C au cours des 5 derniers millions d'années. En conséquence, il y a 2,5 millions d'années, d'énormes calottes glaciaires ont commencé à se former périodiquement dans l'hémisphère Nord: ce sont les «glaciations quaternaires».

Un vif débat se poursuit depuis plus de vingt ans sur les raisons de ce long refroidissement. Selon la théorie qui a le plus de partisans, la formation de grandes montagnes telles que l'Himalaya, les Andes ou les Alpes aurait entraîné une augmentation globale de la météorisation des roches silicatées. La quantité de CO₂ atmosphérique aurait alors diminué, et l'atmosphère se serait refroidie.

UNE FAILLE DANS LA THÉORIE DOMINANTE

Cependant, en 1997, les géochimistes américains Robert Berner et Ken Caldeira ont attiré l'attention sur une faille majeure dans cette théorie: ils ont montré qu'une évolution aussi considérable de la météorisation des roches aurait très vite déséquilibré le fragile bilan du CO₂, les émissions volcaniques étant restées au même niveau. Dans cette hypothèse, il ne devrait pratiquement plus rester de CO₂ dans l'atmosphère et une Terre «boule de neige» aurait dû se former. Or cela ne s'est pas produit.

Pour comprendre où se niche le problème dans ce raisonnement, il faut savoir ce qui s'est déroulé dans l'atmosphère et à la surface terrestre au cours des 15 derniers millions d'années. Pour se renseigner sur l'histoire climatique, les géologues étudient les archives sédimentaires. Ils recherchent des dépôts d'âges connus, puis en extraient des informations sur des grandeurs physiques caractérisant les climats passés: température de surface, >