

Quelle planète singulière que la Terre ! Sa surface est couverte à 70 % par de l'eau qui, pendant la presque totalité des 4,5 milliards d'années d'histoire géologique, est restée liquide. Heureusement : si la glace avait régné sur Terre, comme c'est actuellement le cas sur Mars, aucune vie n'aurait été possible ; et si toute l'eau s'était trouvée dans l'atmosphère sous forme de vapeur, comme c'est actuellement le cas sur Vénus, les rayons ultraviolets auraient dissocié les molécules d'eau en hydrogène et oxygène, qui se seraient ensuite échappés dans l'espace, et la vie n'aurait pas non plus été possible. De fait, il règne sur Vénus une température d'environ 470 °C, en raison de l'effet de serre dû à une atmosphère composée surtout de dioxyde de carbone. Par contraste, la température moyenne de la Terre se maintient depuis très longtemps dans une fourchette comprise entre 0 et 100 °C, ce qui a été favorable à la vie. Mais pourquoi en est-il ainsi ?

Un simple bilan thermique de la Terre montre que cela n'a rien d'évident. À la surface de notre planète, le rayonnement solaire est la principale source de chaleur. Si l'on suppose que la Terre absorbe parfaitement l'énergie lumineuse, c'est-à-dire si l'on suppose qu'elle est un « corps noir », le calcul aboutit à une température moyenne (à la surface du globe) de 5 °C.

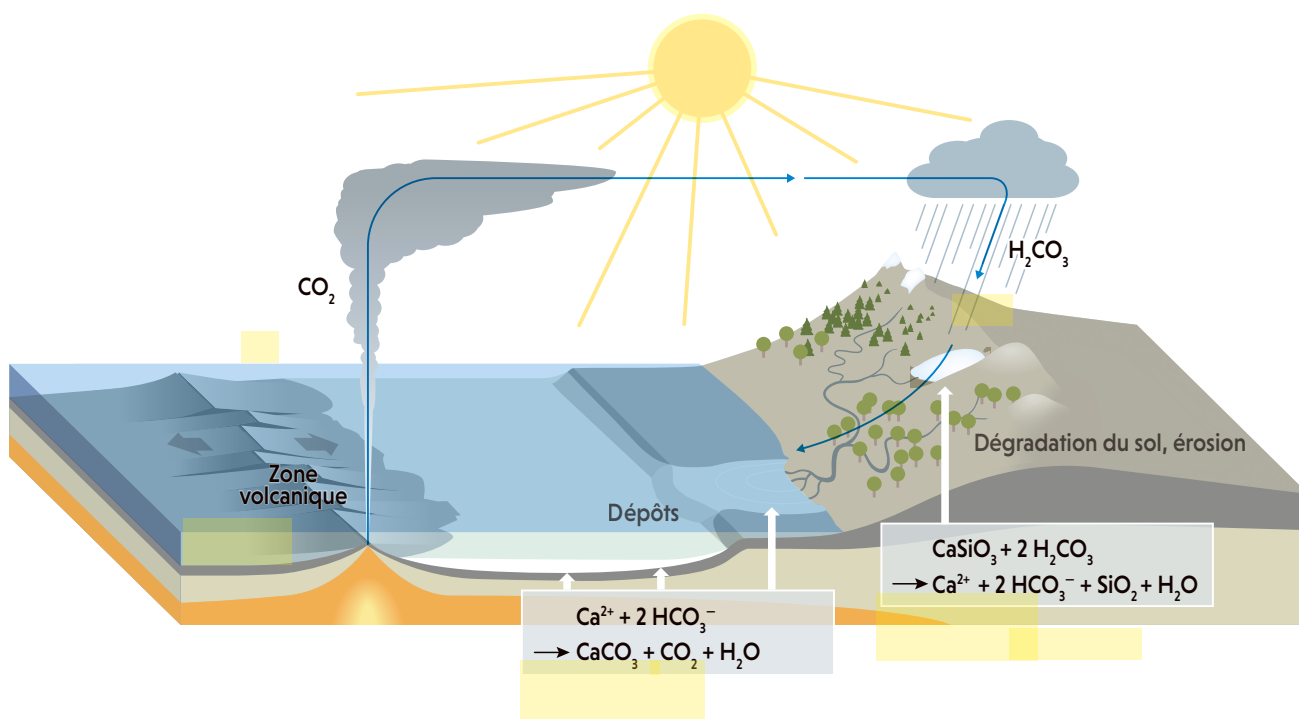
Toutefois, notre planète est loin d'être un corps noir : les nuages, les glaciers et les sols réfléchissants des déserts, entre autres, renvoient vers l'espace une partie du rayonnement solaire incident. L'ensemble de ces zones brillantes contribue à élever l'albédo terrestre, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie lumineuse réfléchie vers l'espace et l'énergie incidente. Si l'on tient compte de l'albédo terrestre, le calcul conduit à une température moyenne terrestre d'environ -18 °C, ce qui impliquerait l'absence d'eau liquide.

Or la température moyenne est d'environ 15 °C. Nous la devons à un autre phénomène physique : l'effet de serre. En effet, toute la lumière renvoyée vers l'espace n'y parvient pas : une partie du rayonnement rencontre sur

L'ABSORPTION DE CO₂ PAR LA MÉTÉORISATION

Les émissions volcaniques de dioxyde de carbone sont contrebalancées par l'érosion chimique qui se produit dans la zone critique d'altération des roches du sol. Le silicate de calcium (CaSiO₃) des roches réagit avec l'acide carbonique (H₂CO₃) des précipitations. Cela libère des ions hydrogénocarbonate HCO₃⁻ et des ions calcium Ca²⁺, lesquels sont transportés par le ruissellement des eaux vers l'océan, où ils précipitent sous la forme de calcite

(carbonate de calcium, CaCO₃), qui contribue ensuite à la formation de bancs de calcaire. Le schéma de droite montre la zone critique d'altération. L'activité tectonique approvisionne cette zone en roches, en particulier dans les chaînes de montagnes. La roche s'altère chimiquement au contact de l'eau et du dioxyde de carbone, ce qui produit du sol. La surface de ce sol est soumise à l'érosion.



son chemin des molécules (H_2O , CO_2 , CH_4 , O_3 , etc.) qui la renvoient vers la surface terrestre. Par cet effet de serre, l'atmosphère se réchauffe d'autant plus qu'elle contient davantage de gaz ayant le pouvoir de renvoyer le rayonnement. Aujourd'hui, la vapeur d'eau est à l'origine d'environ 60% de l'effet de serre, tandis que la part du dioxyde de carbone (CO_2) en constitue 26%. Les variations de la température de la Terre au cours de son histoire proviennent des variations de l'effet de serre, qui est principalement déterminé par la teneur atmosphérique en CO_2 .

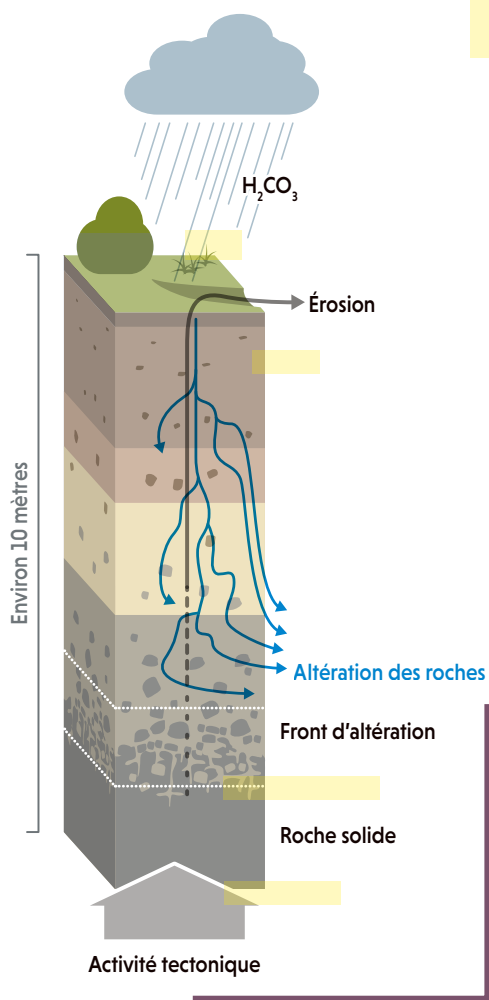
Avant l'ère industrielle, le CO_2 atmosphérique provenait surtout des émissions de gaz volcaniques. Aujourd'hui, ces émissions s'élèvent à environ 0,55 milliard de tonnes de CO_2 par an (pour comparaison, en 2019, les émissions anthropiques étaient de 37 milliards de tonnes, près de 70 fois plus!). Sachant que les volcans émettent du CO_2 depuis les débuts de l'histoire de la Terre, pourquoi ce gaz ne s'est-il pas accumulé au point de plonger la planète dans un enfer brûlant, comme sur Vénus?

La réponse réside dans la «météorisation» (*weathering* en anglais), terme qui désigne l'altération des roches par l'eau, les agents chimiques qu'elle contient, les gaz atmosphériques, les variations de température, les organismes vivants, l'érosion éolienne, etc. La météorisation a pour effet de décomposer les roches silicatées en composés qui se dissolvent dans les eaux et en solides résiduels qui s'accumulent dans les sols. Or la météorisation absorbe du CO_2 présent dans l'atmosphère et contrecarre ainsi l'incessant ajout de CO_2 par les volcans.

La météorisation absorbe du CO_2 et contrecarre ainsi l'ajout de CO_2 par les volcans

Comment la météorisation des roches silicatées consomme-t-elle du CO_2 ? En réagissant avec l'eau, le dioxyde de carbone atmosphérique forme de petites quantités d'acide carbonique (H_2CO_3). S'il pleut, cet acide faible parvient au sol. Au contact des roches silicatées, l'acide carbonique dissout partiellement les minéraux primaires dont ils sont formés, tels le mica (silicates d'aluminium et de potassium en feuillets) et le feldspath (des aluminosilicates de sodium, de potassium et de calcium, qui constituent les minéraux les plus fréquents sur Terre). Ce processus est très lent: typiquement, il n'use la roche que de 5 à 100 millimètres par millénaire. Cependant, la réaction chimique qui l'accompagne libère des ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) qui, avec l'ion hydrogénocarbonate (HCO_3^-) provenant de l'acide carbonique, sont convoyés dans l'océan par le ruissellement (voir l'encadré page ci-contre).

Là, l'ion calcium se combine avec l'ion carbonate (CO_3^{2-}) pour former de la calcite (CaCO_3); puis, au fil des centaines de milliers d'années, les cristaux de calcite déposés sur le fond des mers se transforment en calcaire. Ce processus est à l'origine des puits de carbone océaniques: le CO_2 consommé par la météorisation passe des centaines de millions d'années hors de l'atmosphère, piégé sous forme de calcaire. Ainsi, si les volcans ajoutent du CO_2 dans l'atmosphère, l'altération des roches en soustrait et le séquestre dans les puits de carbone océaniques.



Ces images illustrent le cycle géologique du CO_2 . À gauche, un exemple de source : un volcan dont les émissions contiennent du CO_2 . En haut à droite, le réacteur qui extrait du CO_2 de l'atmosphère : l'altération chimique des roches. On remarque que le sol est déjà largement altéré, même si des blocs de granit en voie d'érosion chimique subsistent. En bas à droite, l'un des puits de carbone océaniques : des récifs coralliens.



> Depuis les débuts de la Terre, les émissions volcaniques de CO_2 ont toujours été contrebalancées par les puits de carbone océaniques. C'est ce qui a garanti que l'atmosphère et avec elle le climat soit restés favorables à la vie. Cet équilibre nécessaire n'a cependant pas besoin d'être strictement respecté chaque année. Il suffit qu'il le soit sur une période de temps supérieure ou à peu près égale au temps moyen de séjour d'une molécule de CO_2 dans l'atmosphère (temps allant de son émission par un volcan jusqu'à sa consommation chimique).

Au cours de l'Holocène, c'est-à-dire les derniers 10 000 ans, ce temps de séjour a été d'environ 250 000 ans. C'est plutôt court si l'on considère que la teneur atmosphérique en CO_2 et donc le climat sont restés stables pendant des centaines de millions d'années. Alors comment se fait-il que tout le CO_2 atmosphérique n'ait pas été consommé en quelques centaines de milliers d'années, par exemple sous l'effet d'une météorisation deux fois plus importante ? Ou, à l'inverse, pourquoi une augmentation durable du volcanisme n'a-t-elle pas transformé la Terre en four ?

UN THERMOSTAT GÉOLOGIQUE

Le mécanisme qui équilibre le retrait et l'ajout de CO_2 dans l'atmosphère fait partie du genre de boucles de contrôle qui nous sont familières avec certaines machines, un réfrigérateur par exemple. Si l'on en ouvre la porte

pour prendre une boisson, l'arrivée d'air extérieur réchauffe l'intérieur ; le thermomètre électronique ordonne alors au compresseur de refroidir le liquide caloporteur, qui va prélever des calories à l'intérieur du réfrigérateur, et ce processus se poursuit jusqu'à ce que l'intérieur soit de nouveau à la température programmée. Ce type de boucle de contrôle fonctionne grâce à une rétroaction, en d'autres termes à une action en retour d'un signal.

Dans la machine climatique terrestre, la rétroaction provient de la météorisation des roches. Supposons qu'une activité tectonique accrue crée plus de volcans aux frontières des plaques tectoniques. Davantage de CO_2 est alors libéré dans l'atmosphère, ce qui augmente l'effet de serre ; la température moyenne s'élève ; davantage d'eau s'évapore alors des océans, de sorte qu'il pleut et ruisselle plus sur les continents. Ces phénomènes accélèrent l'altération des roches, ce qui en retour élimine plus de CO_2 de l'atmosphère, d'où une diminution de l'effet de serre et donc un refroidissement...

Ce régulateur de température fonctionne aussi dans l'autre sens : si, par exemple, des calottes glaciaires se développent aux pôles, l'albédo de la Terre augmente, ce qui refroidit le climat ; dès lors, moins de vapeur se forme au-dessus des océans, de sorte qu'il pleut et neige moins, ce qui ralentit la météorisation ; moins de CO_2 étant éliminé de l'atmosphère, la Terre commence à se réchauffer...