

> composition de l'atmosphère par exemple (voir l'encadré page 70). La mesure des quantités d'isotopes stables de l'oxygène dans les coquilles calcaires des fonds marins permet par exemple de déterminer indirectement les masses des immenses glaciers qui ont couvert la Terre à plusieurs reprises, et d'en déduire la température moyenne terrestre: comme nous l'avons indiqué, elle n'a cessé de baisser au cours des 15 derniers millions d'années (voir l'encadré page 71).

La mesure des quantités d'isotopes stables du bore dans les sédiments océaniques nous a appris par ailleurs que la concentration atmosphérique de CO_2 a diminué au cours des 15 derniers millions d'années. Elle est passée d'environ 550 ppm à 280 ppm au début de l'Holocène, il y a 10 000 ans, puis est restée relativement constante jusqu'au début de l'industrialisation, au milieu du XVIII^e siècle. Cette baisse de la concentration de CO_2 a été suffisante pour rendre compte du refroidissement.

Pour autant, un nouvel indicateur conçu en 2014 avec mon équipe, le rapport isotopique $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ du béryllium dans les sédiments océaniques, a posé une nouvelle énigme. D'après cet indicateur, le taux d'altération chimique des roches est resté constant durant les 15 derniers millions d'années de refroidissement (voir l'encadré page 70). En outre, grâce aux reconstitutions des mouvements tectoniques, nous savons que les émissions volcaniques n'ont pas diminué pendant la même période.

Dès lors, comment la température et la concentration de CO_2 ont-elles pu diminuer si ni les émissions volcaniques (V) ni le taux de météorisation (M) n'ont changé pendant 15 millions d'années? Jeremy Caves Rugenstein, de l'École polytechnique fédérale de Zurich, Dan Ibarra, de l'université Stanford, et

moi-même avons fait appel au principe de la rétroaction pour proposer, en 2019, l'idée que cela s'explique par une augmentation de la réactivité de la surface terrestre, c'est-à-dire du facteur k figurant dans l'équation différentielle donnée plus haut du bilan de CO_2 atmosphérique (voir l'encadré page 69, graphique de droite).

Si, à une concentration de CO_2 donnée, k augmente, l'érosion chimique des roches s'intensifie temporairement, ce qui retire du CO_2 de l'atmosphère; par conséquent, si l'activité volcanique n'augmente pas simultanément, il reste moins de CO_2 atmosphérique disponible pour réagir avec les roches, ce qui ralentit l'altération chimique. On a donc deux tendances simultanées qui s'opposent et, au final, s'instaure un nouvel équilibre au taux d'altération des roches initial (c'est-à-dire à la même valeur $M = k[\text{CO}_2]$). L'augmentation de la réactivité k a donc fait baisser la concentration de CO_2 atmosphérique.

Ainsi, selon le scénario proposé, l'accroissement initial de la réactivité (le facteur k) a refroidi le climat, même si le taux de météorisation des roches est resté le même. Ce raisonnement explique que pendant 15 millions d'années, la concentration de CO_2 et, donc, la température ont pu baisser, tandis que, comme l'indique le rapport isotopique $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$, le taux d'altération des roches est resté constant.

UNE SURFACE TERRESTRE PLUS OU MOINS RÉACTIVE AU CO_2

Reste une question importante: comment la réactivité k a-t-elle pu changer? Pour y répondre, nous devons nous intéresser à la pellicule la plus externe de la Terre: une couche de terre s'étendant depuis la surface jusqu'à quelques dizaines de mètres de profondeur. On la qualifie de «zone critique», car c'est dans cette épaisseur que se déroulent la plupart des

La «réactivité» de la pellicule supérieure terrestre – la zone critique d'altération chimique des roches silicatées – varie. Si le sol contient davantage de minéraux silicatés non altérés, tels que le feldspath ou le mica, il peut réagir chimiquement même avec peu de CO_2 dans l'atmosphère (à gauche), tout comme un sol déjà fortement altéré quand il y a beaucoup de CO_2 dans l'atmosphère (à droite). Dans les deux situations, on peut donc avoir le même taux d'altération chimique des roches silicatées et donc la même quantité de CO_2 retirée de l'atmosphère par intervalle de temps.

