



Très présente dans les roches mantelliques, la péridotite foncée réagit avec le dioxyde de carbone atmosphérique dissous dans l'eau de pluie qui s'infiltré à travers les fissures, formant des veines blanches de carbonates.

Pour que cette vision se concrétise, il faudra que l'humanité se dote d'une vaste infrastructure mondiale de machines à extraire le dioxyde de carbone de l'air pour l'injecter dans des puits forés dans la roche mantellique. L'émergence éventuelle de l'industrie le permettant va dépendre des résultats des recherches menées à Oman. En 2018, alors que Peter Kelemen et moi nous entretenions sous l'acacia, une pelleuse travaillait à préparer le forage prochain du fond de l'oued Lawayni, dans le but d'étudier les réactions chimiques qui se produisent dans les 400 premiers mètres du terrain. Publiée en 2019 et 2020, l'étude des carottes prélevées donne des pistes quant à la façon dont on pourrait intensifier les réactions de la roche avec le dioxyde de carbone. En mai de cette année, une équipe a mené dans l'oued Lawayni le premier essai de minéralisation du CO₂ dans la profondeur de la roche mantellique omanaise.

LE CAPTAGE DU CO₂ EN QUESTION

Les efforts de Peter Kelemen s'inscrivent dans la vaste mouvance travaillant à créer des «émissions négatives de carbone», c'est-à-dire des retraits de l'atmosphère de quantités notables de dioxyde de carbone afin d'influencer l'évolution climatique. Les chercheurs proposent diverses méthodes: planter des forêts ou fertiliser les océans pour augmenter la croissance consommatrice de CO₂ des arbres ou du phytoplancton; gérer les cultures afin de garder dans le sol la plus grande partie possible du CO₂ absorbé au cours de la croissance des plantes; poser des dispositifs de captage du carbone pour retenir le CO₂ passant par les cheminées des centrales électriques ou des usines; ou encore installer partout sur la planète de centaines de milliers de machines de «captage direct» du CO₂ de l'atmosphère et capables de l'injecter dans le sol nuit et jour.

Le dioxyde de carbone ainsi capté devrait toutefois être séquestré de façon permanente. Quelques projets sont en cours de test. Ainsi, dans le champ de gaz de Sleipner, au large de la Norvège, le CO₂ naturellement mêlé au gaz naturel est réinjecté à 1 kilomètre sous le plancher océanique, dans le réservoir fait de roches sédimentaires gréseuses. Lancé en 1996, le projet stocke 1 million de tonnes de dioxyde de carbone par an environ, mais avec un inconvénient: comme ce gaz réagit à peine avec les roches sédimentaires, il ne se minéralise pas, mais s'infiltré seulement dans les pores de la roche, de sorte que certains chercheurs craignent qu'il ne finisse par rejoindre l'atmosphère.

Peter Kelemen a passé les années 1990 à poursuivre une autre idée: campant pendant des semaines dans les oueds reculés d'Oman, il y a cartographié les conduits qui transportèrent du magma depuis les profondeurs du manteau vers la surface, où, se solidifiant, il a donné du basalte, cette roche dure, dense et foncée qui forme la plus grande partie de la croûte océanique. Puis en 2004, lorsqu'il est passé de l'institut océanographique de Woods Hole (Woods Hole Oceanographic Institution) à l'observatoire de la Terre Lamont-Doherty, il y a rencontré le géophysicien Klaus Lackner – aujourd'hui directeur du Centre pour les émissions négatives de carbone (Center for Negative Carbon Emissions) de l'université d'État de l'Arizona – et Juerg Matter, alors postdoctorant. Klaus Lackner et Juerg Matter cherchaient à savoir si du CO₂ pouvait être injecté dans des roches riches en magnésium et en calcium, qui, plus réactives que les roches sédimentaires, transformeraient facilement le gaz en minéraux solides – un processus nommé «carbonatation minérale».

Les roches mantelliques d'Oman – riches en péridotites – contiennent en grande proportion deux minéraux – l'olivine et le pyroxène – très riches en magnésium et calcium. Comme ces roches sont traversées par des veines de carbonate, il est clair qu'elles ont absorbé du CO₂ dans le passé. La plupart des chercheurs avaient toutefois supposé que cette production de carbonates à partir du CO₂ avait duré des millions d'années. Pour sa part, Peter Kelemen n'avait jamais réfléchi à l'élimination du carbone, mais il était sceptique quant à la lenteur des réactions: lorsqu'il travaillait à Oman, il passait souvent dans la vallée Khafifah devant une source alcaline, où l'eau jaillissante était si saturée en calcium qu'elle réagissait continuellement avec le CO₂ atmosphérique pour donner une couche de calcite. Il avait remarqué que lorsque le vent ou la pluie brisait cette couche de calcite lisse et nacré, fine comme du papier, elle était remplacée en 24 heures. «En géologie, tout processus se produisant en un jour est ultrarapide», soulignait-il.

En théorie, les ophiolites du monde entier pourraient fixer de 60 à 600 gigatonnes de CO₂



La rapidité de cette formation de calcite en surface amena Peter Kelemen à se demander si les veines de carbonates ne se formaient pas bien plus vite dans la roche que ce que l'on pensait. Lorsqu'ils retournèrent à Oman en 2007, lui et ses étudiants recueillirent des fragments de ces veines afin de les dater en laboratoire. « Je m'attendais à des âges de l'ordre de 90 millions d'années, explique Peter Kelemen, mais elles avaient toutes moins de 50000 ans. » Certaines n'avaient que 6000 ans. Les roches du manteau d'Oman ne s'étaient pas contentées d'absorber du CO₂ dans un passé lointain; elles le faisaient encore aujourd'hui, peut-être 10000 fois plus vite que Peter Kelemen ne l'avait imaginé.

En 2008, lors d'une autre mission, Peter Kelemen et Juerg Matter estimèrent que près de la surface, les carbonates représentaient environ 1% du volume rocheux, ce qui impliquait que la région entière minéralise entre 50000 à 100000 tonnes de CO₂ par an, soit l'équivalent des émissions annuelles de 10000 à 20000 automobiles américaines. Cette quantité n'a aucun effet sur le changement climatique, mais le résultat de leur calcul les amena à se demander s'il serait possible d'accélérer assez la carbonatation pour faire une différence à l'échelle planétaire.

Au cours des quatre années suivantes, les deux chercheurs retournèrent donc plusieurs fois à Oman, prélevant des échantillons d'eau profonde afin de suivre les réactions chimiques s'y produisant. Les résultats montrèrent que le dioxyde de carbone dissous dans l'eau de pluie s'infiltre dans le sol, réagit avec la péridotite dans les aquifères peu profonds, ce qui donne des eaux riches en ions Mg²⁺ et HCO₃⁻, produisant des carbonates de magnésium. En

conséquence, des veines de carbonate de magnésium se forment. Dans le même temps, le calcium de la péridotite se dissout et s'accumule dans l'eau. Puis cette eau enrichie en calcium finit par réapparaître dans les sources alcalines comme celle de Khafifah, où elle réagit alors avec le CO₂ atmosphérique, formant les films de calcite notés par Peter Kelemen, ainsi que les vastes terrasses de travertin (calcaire de source chaude) qui existent dans tout le sultanat.

À ce stade, Peter Kelemen et Juerg Matter ignoraient encore dans quelle mesure les humains pourraient accélérer ce processus de carbonatation. Tout dépendrait de la profondeur et de la vitesse d'écoulement de l'eau, mais pour répondre à cette question, il fallait étudier le sous-sol.

L'EAU DES PROFONDEURS

Par une chaude après-midi de janvier 2018, j'observais Peter Kelemen et Juerg Matter en train d'examiner l'intérieur des roches de l'oued Lawayni. Huit dromadaires mâchouillaient des arbustes sans prêter la moindre attention au grondement de la foreuse montée à l'arrière d'un bulldozer en train de creuser le sol dans le fond de la vallée. Un câble avait déjà hissé 9 mètres de carotte hors du trou. Longs de quelques mètres pour environ 5 centimètres de largeur, les morceaux de carotte étaient disposés en ordre sur des tables pliantes sous les regards d'une demi-douzaine de chercheurs. « Beaucoup de choses se passent dans les premiers mètres », résuma Peter Kelemen en se déplaçant de table en table. Effectivement la couleur de la roche changeait de façon notable, même lorsque les différences de profondeur étaient relativement faibles.

Une foreuse perce lentement la roche mantellique (à gauche) afin d'obtenir des carottes de forage cylindriques. Les chercheurs les disposent de façon à reconstituer la colonne de roche (à droite), ce qui met en évidence la profondeur à laquelle l'eau pénètre et quelles quantités de dioxyde de carbone sont minéralisées.



Les roches mantelliques profondes sont vert foncé en raison de la présence d'olivine et de pyroxène, des minéraux riches en magnésium et en calcium formés en profondeur à plus de 1300 °C en l'absence totale d'oxygène, d'eau et de dioxyde de carbone. Une fois remontées en surface, ces roches dévoilent les réactions chimiques subies le long du parcours, ce qui explique que les premiers mètres de carotte étaient teintés de jaune et d'orange: l'oxygène transporté par l'eau de pluie s'y était lié au fer des minéraux, produisant une couleur rouille. Ces tons disparaissaient au-delà de quelques mètres, traduisant l'épuisement de l'oxygène apporté par l'eau. Au-delà de cette profondeur, la roche grise était parcourue d'innombrables fines veines de serpentine, un minéral turquoise qui se forme lorsque les molécules d'eau se fixent aux atomes de magnésium et de fer, produisant l'hydrogène qui fait pétiller les sources.

Sur ce fond, des veines blanches de carbonate s'entrecroisaient. Près de la surface, elles mesuraient quelques centimètres de large, mais à 10 mètres de profondeur, elles devenaient rares et fines, ce qui montre qu'en s'infiltrant de plus en plus profond, l'eau avait perdu son dioxyde de carbone.

Alors que se poursuivait le forage, et tandis que les ouvriers emballaient les carottes les unes après les autres, il s'avéra que les roches provenant de 400 mètres de profondeur étaient encore veinées de serpentine, ce qui confirmait que l'eau avait percolé au moins à cette profondeur. Des analyses se sont poursuivies en laboratoire au cours des trois années qui suivirent, afin de déterminer à quelle vitesse les roches réagissaient avec le CO₂ et l'eau. En 2020, Juerg Matter, devenu entre-temps professeur de

géo-ingénierie à l'université de Southampton, en Angleterre, m'a expliqué avoir été frappé par un fait: «Au-delà de 100 mètres de profondeur, on ne trouve plus aucun minéral carbonaté.» Conclusion: le dioxyde de carbone ne pénètre pas plus profondément dans les roches.

Les recherches récemment publiées par l'équipe suggèrent pourquoi: dans un article de 2019, Peter Kelemen, Juerg Matter et Amelia Paukert Vankeuren, alors tous à l'université d'État de Californie à Sacramento, estiment que l'eau souterraine d'origine pluviale des 50 mètres supérieurs de roche se trouve là depuis 4 à 40 ans. L'eau plus profonde, pour sa part, est sous terre depuis au moins 20000 ans. Dans un article publié en 2020, Juerg Matter et Gérard Lods, de l'université de Montpellier, publient leur mesure de la vitesse de déplacement de l'eau dans la roche réalisée en injectant de l'eau dans des forages distants de 15 mètres: il en ressort que l'eau circule facilement d'un trou à l'autre dans les 100 premiers mètres, mais qu'au-delà la perméabilité des roches s'effondre d'un facteur 1000.

L'ensemble de ces observations montre que le taux de carbonatation minérale à Oman est limité par un goulot d'étranglement majeur: l'eau de pluie ne va tout simplement pas plus loin qu'une centaine de mètres, alors que les roches mantelliques omanaises ont une épaisseur moyenne de 3 kilomètres... «Il existe donc un énorme potentiel de carbonatation en profondeur», en déduit Juerg Matter, pourvu que de l'eau chargée en CO₂ puisse d'une manière ou d'une autre pénétrer dans les roches profondes et y circuler rapidement.

Pour surmonter cette difficulté, l'idée serait que des machines de captage direct dotées de grands ventilateurs fasse passer de l'air à travers des absorbants chimiques afin de retirer et de concentrer le dioxyde de carbone atmosphérique; puis d'autres équipements pressuriseraient le gaz et l'enverraient dans un puits de forage. À une profondeur de 1000 à 3000 mètres, le gaz serait mélangé à de l'eau (injectée par un tuyau séparé), et le mélange riche en CO₂ libéré dans les roches mantelliques. S'infiltrant à travers les pores de la roche, l'eau finirait par atteindre un deuxième forage situé à environ 1 kilomètre, et qui ferait office de cheminée de retour. Là, appauvrie en CO₂ elle remonterait à la surface, où elle pourrait se recharger en gaz.

Comme la température de la roche à 3 kilomètres de profondeur est d'environ 100 °C, cela devrait favoriser les réactions chimiques qui, à leur tour, engendreront de la chaleur supplémentaire, qui contribuera à faire remonter l'eau réchauffée dans les cheminées.

En 2020, Peter Kelemen et Amelia Paukert Vankeuren ont publié des calculs suggérant qu'injecter de l'eau modérément chargée en dioxyde de carbone jusqu'à 3 kilomètres de