



terre, le dioxyde de carbone s'attache au magnésium ou au calcium pour former des carbonates, il produit un matériau carbonaté occupant de 20 à 60% plus de volume que celui qu'il remplace. Une modélisation de Peter Kelemen suggère que ces minéraux carbonatés exercent au cours de leur croissance jusqu'à 2900 atmosphères de pression sur la roche les entourant. Le chercheur en conclut que la conversion chimique des roches mantelliques les fracture et propage de larges fissures, ce qui crée de nouvelles surfaces réactives et facilite l'infiltration de l'eau et du CO₂.

En 2019 et 2020, Juerg Matter et le géophysicien Robert Sohn, de l'institut océanographique de Woods Hole en ont découvert des preuves. Au cours de missions dans l'oued Lawayni, ils ont descendu des hydrophones dans plusieurs puits de forage remplis d'eau et placé des sismomètres tout autour de la vallée. Un mois durant, ils ont alors enregistré des centaines de microséismes: «La fracturation due aux réactions chimiques déclenche ces signaux très spécifiques», explique Robert Sohn. Mais si ces signaux suggèrent que les réactions chimiques fissurent la roche, ils ne suffisent pas à le prouver, tient-il à avertir.

Même si les ingénieurs parvenaient à trouver un moyen d'exploiter l'expansion et la fissuration à leur avantage, ils devraient tenir compte des conséquences involontaires. Selon des estimations approximatives, le piégeage de 1 milliard de tonnes de CO₂ dans les minéraux carbonatés pourrait augmenter le volume de la roche de un dixième de kilomètre cube, soit l'équivalent d'environ 35 Empire State Buildings! Si cette expansion était répartie dans les roches sous-jacentes de 300 kilomètres carrés de terres – comme ce serait le cas dans l'un des scénarios de Peter Kelemen –, la minéralisation de 1 milliard de tonnes de CO₂ par an pourrait entraîner une élévation du sol de 30 centimètres par an...

En revanche, l'injection de seulement 1 million de tonnes de CO₂ par an sur 300 kilomètres carrés n'entraînerait pas plus de 1 millimètre d'élévation du sol par an, soit moins que ce que les forces tectoniques entraînent dans de nombreuses régions. Ainsi, l'augmentation du volume des roches ne serait problématique qu'avec les très grands volumes d'injection. Peter Kelemen pense que pour résoudre ce problème à Oman toute injection à l'échelle de 1 gigatonne devrait se faire sur les rives de la mer. Là, les ingénieurs pourraient forer en biais



sous le fond marin peu profond, de sorte qu'ultérieurement seul le sol marin gonflera, vraisemblablement sans effet de bord. Cette stratégie fournirait en outre de l'eau de mer pour transporter le CO_2 concentré, ce qui est important dans ce pays désertique, pauvre en eaux souterraines... Reste à le démontrer.

À LA CONQUÊTE DES COÛTS

Une société basée à Oman et baptisée 44.01 (d'après le poids moléculaire moyen du CO_2) a reçu l'approbation du gouvernement pour mener le premier essai pilote au monde de carbonatation minérale dans les roches du manteau. En mai dernier, après avoir prépositionné du matériel dans l'oued Lawayni, 44.01 a commencé à injecter de l'eau douce contenant du dioxyde de carbone et un traceur chimique inerte dans le forage pratiqué à 100 mètres de celui que j'avais vu creuser en 2018. Pour déterminer la vitesse de diffusion de l'eau dans la roche et la quantité de CO_2 séquestrée, Peter Kelemen et Juerg Matter surveilleront les concentrations de traceur, de CO_2 et de minéraux dans de l'eau parvenant dans un forage situé à une centaine de mètres du puits d'injection. Si l'essai démontre la minéralisation rapide du CO_2 – quatre mois devraient y suffire –, Talal Hasan, le fondateur de 44.01 prévoit de lancer en 2022 la première

opération commerciale d'injection. Elle utilisera de l'eau douce ou éventuellement des eaux usées traitées pour acheminer 10000 tonnes de gaz par an dans un seul puits, avec l'espoir de passer à 100000 tonnes par an. L'entreprise prévoit également de lancer un deuxième essai pilote plus près de la côte, en utilisant de l'eau de mer.

Selon Hasan, 44.01 pourra un jour minéraliser de l'ordre de 1,3 milliard de tonnes de CO_2 par an dans la formation mantellique d'Oman. Cette quantité viendrait en diminution des 2 à 20 milliards de tonnes de dioxyde de carbone que l'humanité doit retirer de l'atmosphère chaque année afin de ne pas laisser croître la température moyenne de plus de $1,5^\circ\text{C}$. Actuellement, 44.01 est la seule entreprise tentant d'injecter du CO_2 dans des roches mantelliques, mais une recherche récente de l'Académie nationale des sciences des États-Unis suggère que les diverses ophiolites du monde pourraient séquestrer de 5 milliards à 10 milliards de tonnes supplémentaires par an, sans parler de la séquestration dans le basalte, comme celle pratiquée en Islande.

À quels coûts? La réponse sera déterminante. En Islande, CarbFix minéralise du CO_2 pour environ 22 euros la tonne, tandis que 44.01 n'a pas encore publié d'estimation officielle. Toutefois, selon un rapport de 2018 de Sabine

Le littoral de Mascate, la capitale d'Oman, comprend nombre de zones industrielles. Capturer des milliards de tonnes de CO_2 atmosphérique et le concentrer dans de l'eau injectée sous terre afin de l'y minéraliser impliquerait une très importante infrastructure.

Fuss, de l'institut de recherche Mercator sur les biens communs mondiaux et le changement climatique, ces coûts se situeraient dans la fourchette de ceux des stratégies comme la reforestation ou la gestion des sols cultivés. Certes, les nombreux pollueurs ne semblent pas pressés de payer pour faire minéraliser le CO₂ qu'ils émettent. Mais à mesure que les gouvernements taxent les émissions de carbone, la demande de séquestration minérale devrait augmenter.

Reste une question délicate: la séquestration de 1 milliard de tonnes de CO₂ par an à Oman nécessiterait une infrastructure massive. Peter Kelemen a calculé que si le gaz était concentré 440 fois ce qu'il est naturellement dans l'eau de mer – ce qui peut facilement être fait par les machines de capture d'air actuelles – 5000 puits d'injection seraient nécessaires. Ensemble, ils pomperaient 23 kilomètres cubes d'eau par an, soit presque la moitié du débit du Rhône. Par ailleurs une telle opération nécessiterait entre 700 milliards et 1,3 billion de kilowattheures d'énergie... Pour éviter d'utiliser des carburants fossiles, cette énergie devrait provenir de 300 à 600 kilomètres carrés de panneaux solaires, n'occupant pas plus de 0,2% du territoire d'Oman, selon les formules standard basées sur l'intensité de l'ensoleillement. L'ampleur d'une telle opération peut paraître choquante – notamment dans ce sultanat d'Oman dont le patrimoine naturel fragile doit être protégé – sauf à considérer que l'urgence climatique exige une intervention colossale, et que, bien entendu, il appartiendrait à l'humanité de profiter de cette occasion pour passer aux énergies renouvelables plutôt que de la considérer comme un permis d'émettre encore plus de carbone.

Pour l'instant, la proposition de Peter Kelemen de forer 5000 puits d'injection aurait de plus modestes conséquences: les puits se trouveraient dans les zones industrielles du littoral, de sorte qu'ils ne changeraient guère plus le paysage qu'un parc éolien côtier. Pour leur part, les panneaux solaires pourraient se trouver sur des surfaces soigneusement sélectionnées à l'intérieur des terres. Peter Kelemen, qui se réjouit simplement de voir une première étape – l'essai sur le terrain dans l'oued Lawayni –, réfléchit déjà à l'avance à la manière dont l'empreinte physique de la carbonatation minérale pourrait être réduite.

Un soir de 2018 au crépuscule, il m'a emmené dans un canyon proche pour me montrer un sommet rougeâtre. «Cette petite montagne contient 1 milliard de tonnes de CO₂», m'a-t-il expliqué. D'ordinaire, les carbonates ne représentent que de l'ordre de 1% du volume des roches de surface, mais dans le mont en question, «tous les atomes de magnésium et de calcium ont donné des carbonates.»

À l'origine, cette montagne avait la même composition que les autres roches mantelliques

Les coûts seraient comparables à ceux de stratégies comme la reforestation

omanaises, mais ses minéraux ont réagi avec du dioxyde de carbone et de l'eau alors qu'il y a longtemps elles étaient encore profondément enfouies et donc très chaudes. L'eau et le CO₂ qui réagissaient étaient présents dans les sédiments océaniques que la subduction d'une plaque tectonique sous une autre enfouissait profondément dans le manteau. Sur la base d'analyses géochimiques publiées en 2020, Peter Kelemen avance que les roches se trouvaient alors à une température de 150 à 250 °C. Elles étaient aussi assez chaudes pour que la fracturation entraînée par les réactions aille jusqu'à son terme, de sorte que les magnésiums et les calciums de chaque grain de roche ont pu réagir.

Aujourd'hui, beaucoup des roches mantelliques d'Oman sont à de telles températures, mais elles se trouvent à 5 à 6 kilomètres sous la surface... Pour les atteindre, des forages plus sophistiqués seraient nécessaires, de sorte que, pour Talal Hasan, «dès que la séquestration de dioxyde de carbone sera rentable, des gens commenceront à exploiter cette possibilité.»

Après tout, l'industrie de production d'émissions négatives n'en est aujourd'hui qu'à ses balbutiements, un peu comme l'était l'extraction pétrolière au milieu du XIX^e siècle, tandis que régnait la puissante industrie de l'huile de baleine. Les premiers puits de pétrole n'avaient que quelques mètres de profondeur, puis les entreprises pétrolières ont progressivement cherché à extraire des richesses plus profondes, ce que l'amélioration des techniques de forage a progressivement rendu possible, jusqu'à ce qu'une infrastructure mondiale capable de capter, de transporter et de vendre le précieux produit, ne réponde à une demande toujours croissante. Ces mêmes forces pourraient un jour pousser l'humanité à creuser toujours plus profondément à la recherche d'une autre ressource: des roches chaudes capables de minéraliser le CO₂. Oman est un pays pétrolier, mais le sultanat pourrait dès aujourd'hui se préparer à devenir un spécialiste du réenfouissement dans le sol du carbone qui en fut extrait au cours de l'ère industrielle. ■

BIBLIOGRAPHIE

G. Lods, et al., **Groundwater flow characterization of an ophiolitic hard-rock aquifer from cross-borehole multi-level hydraulic experiments**, *Journal of Hydrology*, vol. 589, article 125152, 2020.

F. Savatier, **Les bactéries influencent la séquestration du carbone dans les basaltes**, *Pour la science*, en ligne le 20 novembre 2017.

M. Tiano, **Vers une séquestration géologique sûre et rapide du gaz carbonique**, *Pour la science*, en ligne le 15 juillet 2016.

S. Bryant, **Enterrer le carbone en déterrâant du méthane ?**, *Pour la science* n° 435, décembre 2013.