

profondeur multiplierait la minéralisation par un facteur pouvant atteindre 5000. À ce rythme, un seul forage pourrait fixer 50000 tonnes de CO₂ par an à partir d'une surface équivalente à celle de 9 terrains de football. En dix ans, un tel puits pourrait capter 1 demi-million de tonnes de CO₂. Pour le moment, aucun essai n'a été tenté, mais un projet mené avec succès en Islande dans le basalte, une roche proche des ophiolites d'Oman, a préparé le terrain pour les Omanais.

LE FACTEUR DU « FRACKING »

Dense et plein de petits pores, le basalte gris-noir que l'on rencontre en Islande contient moins de magnésium et de calcium que sa roche mère située loin en profondeur, mais davantage que la plupart des autres roches à la surface de la Terre. Wallace Broecker, de l'observatoire de la Terre Lamont-Doherty (disparu en 2019), Pascale Bénézech et Eric Oelkers, du laboratoire Géosciences environnement de l'université de Toulouse, et d'autres chercheurs, de l'université de Reykjavik, ont aidé la société Reykjavik Energy à lancer CarbFix, un essai d'injection de CO₂ dans le basalte installé sur le périmètre de la centrale géothermique islandaise de Hellisheiði. À partir de 2012, des machines ont séparé le CO₂ et le sulfure d'hydrogène (H₂S) se trouvant dans l'eau chaude qui alimente la centrale, les ont concentrés dans de l'eau ensuite injectée dans des puits de 400 à 800 mètres de profondeur forés dans le basalte. En huit mois, les ingénieurs ont injecté 230 tonnes de dioxyde de carbone. L'étude de puits voisins a montré qu'en deux ans, 95% du dioxyde de carbone s'est fixé sous la forme de minéraux carbonatés. Le projet fonctionne depuis lors et fixe environ 10000 tonnes de CO₂ par an. En 2020, CarbFix est devenu une société indépendante dont l'objectif est de séquestrer 1 milliard de tonnes de CO₂ dans le basalte d'ici à 2030.

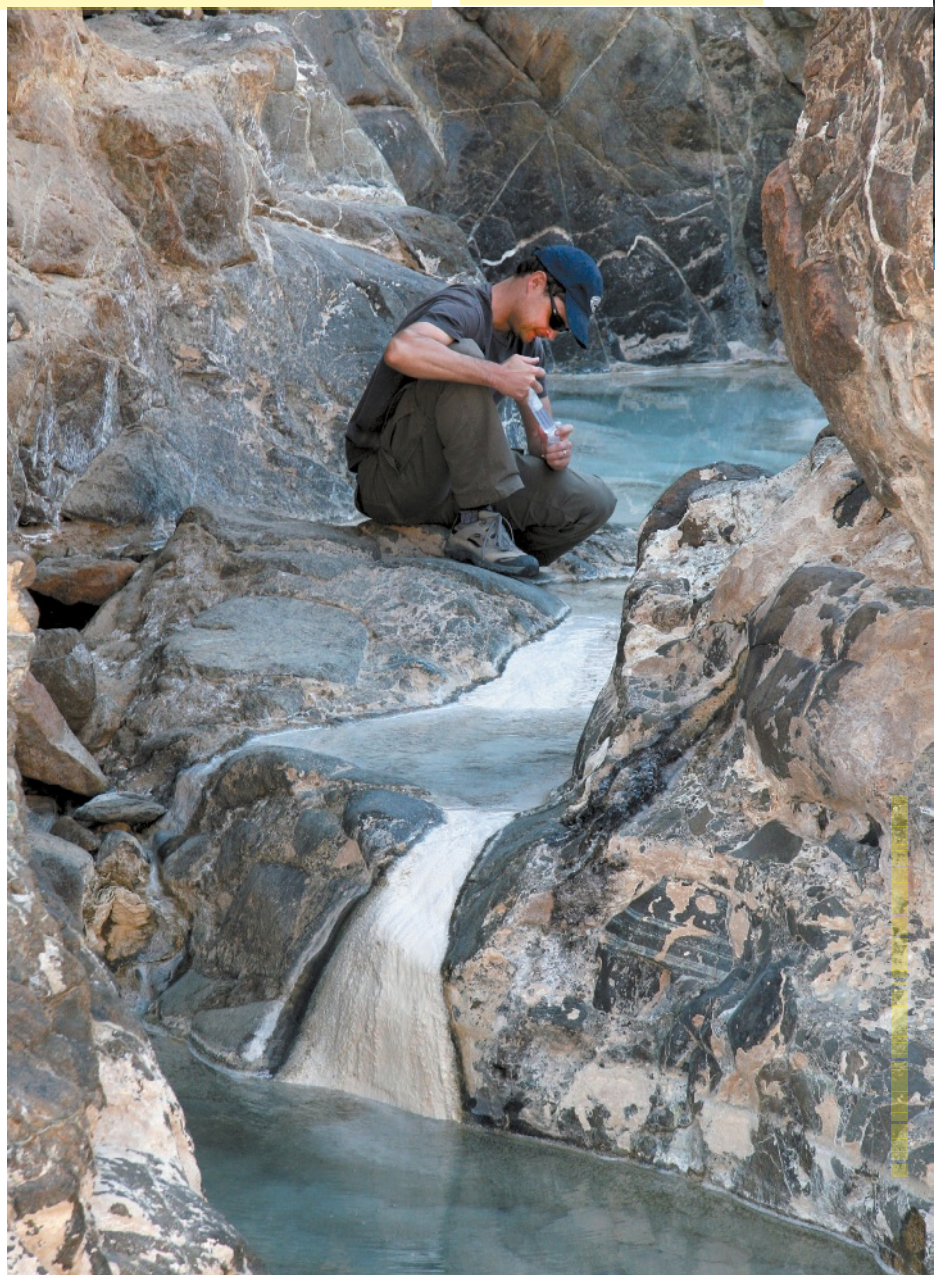
Juerg Matter, qui a codirigé les essais, considère ses résultats comme une validation majeure. Au début, dit-il, «la communauté du captage du carbone nous prenait pour des fous», car elle croyait les basaltes trop peu poreux pour permettre la circulation de l'eau. Depuis, une autre équipe du PNNL (Pacific Northwest National Laboratory), à Richland, dans l'État de Washington, a confirmé la possibilité de séquestrer du dioxyde de carbone dans les basaltes grâce à un projet pilote (*Wallula basalt sequestration pilot project*). Mais comme les roches mantelliques contiennent trois fois plus de magnésium et de calcium, elles pourraient solidifier bien plus de dioxyde de carbone: 500 kilogrammes par tonne contre 170 kilogrammes par tonne de basalte.

Toutefois, tout le monde ne pense pas que les ophiolites, ou même les basaltes, constituent la solution idéale. Ainsi Christopher Zahasky, un hydrogéologue à l'université du

Wisconsin-Madison, promeut plutôt le stockage de CO₂ dans les roches sédimentaires. Pour lui, le principal inconvénient des ophiolites est d'avoir beaucoup moins de pores que les roches sédimentaires. «Il faudra plus de puits pour répartir uniformément les fluides dans le sous-sol», souligne-t-il. Peter Kelemen s'est penché sur ce problème pendant des années, et, selon lui, il existe une solution: si l'injection est effectuée correctement, les réactions chimiques elles-mêmes pourraient fracturer les roches, permettant à l'eau de s'infiltrer. Lors de mon séjour à Oman, il m'avait en effet montré un jour un bloc rocheux particulier. De la taille d'une voiture, ce bloc était saturé de veines de carbonate. Des blocs de la taille d'une brique autrefois jointifs s'y retrouvaient séparés de façon chaotique au sein des entrelacs de veines. «Quand je vois cela, je peux presque entendre la roche exploser», avait commenté Peter Kelemen.

L'«explosion» à laquelle il faisait allusion s'est produite en fait au ralenti. Lorsque, sous

Juerg Matter analyse des eaux souterraines si saturées en calcium qu'elles réagissent avec le CO₂ de l'air, formant des films bleu nacré de calcite à la surface de l'eau (voir aussi page ci-contre). Du carbonate blanc gluant peut s'accumuler aussi là où tombe de l'eau.





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