



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 20 000 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

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.

