

La fabrication des microstructures est un défi majeur qui demande des conditions drastiques comparables à celles utilisées dans l'industrie des puces microélectroniques (voir l'encadré page 53). Ces procédés sont très techniques et sensibles à la moindre impureté. Ils s'effectuent en salle blanche, c'est-à-dire dans des pièces où la température, la pression et la qualité de l'air sont contrôlées et où le personnel équipé de combinaisons intégrales obéit à un protocole strict, pour éviter toute contamination par des poussières ou des gouttelettes. Ces procédés sont aussi très chers, ce qui limite leur généralisation dans les laboratoires de géosciences. Il n'est pas rare, en effet, de déboursier près d'un millier d'euros pour graver un seul micromodèle, le plus souvent à usage unique, en l'absence de procédés de nettoyage efficaces. Pour pallier cette limitation, il est possible d'avoir recours à d'autres méthodes de fabrication moins chères comme le moulage en PDMS (un polymère siliconé) ou l'impression 3D. Elles souffrent encore d'inconvénients, mais de nombreux progrès récents concernant les traitements de surface et la résolution de l'impression laissent penser qu'elles seront assez performantes d'ici à quelques années.

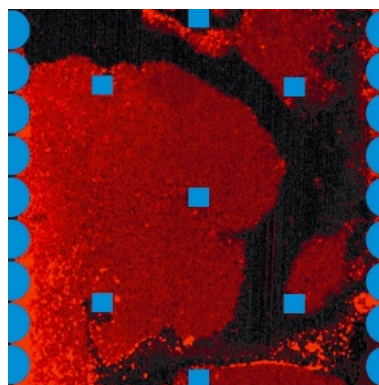
Dès son introduction, la microfluidique a contribué à une meilleure représentation des écoulements multiphasiques dans les milieux poreux. Ces systèmes dans lesquels plusieurs phases fluides – liquides ou gazeuses – coexistent dans l'espace poral sont omniprésents dans les milieux naturels. Par exemple, les pores du sous-sol les plus proches de la surface contiennent souvent à la fois de l'eau et de l'air en mouvement. Les réservoirs pétroliers sont régulièrement gorgés d'eau, d'huile et parfois de gaz. Ces écoulements multiphasiques sont fréquents et parmi les plus difficiles à modéliser car, malgré les avancées récentes en mécanique des fluides et physique des interfaces, de nombreux phénomènes restent encore incompris.

DES MÉLANGES AU MICROSCOPE

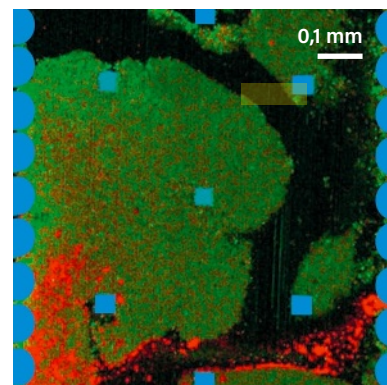
La présence de transitions abruptes à l'interface entre deux fluides, comme la surface d'une goutte qui sépare l'eau de l'air, constitue la particularité des écoulements multiphasiques. Les interfaces sont mobiles à travers l'espace poral et sont capables de se déformer pour minimiser leur énergie. Pour satisfaire ce principe d'énergie minimale, elles peuvent coalescer (lorsque deux gouttes fusionnent) ou

GARANTIR LA PÉRENNITÉ DU STOCKAGE DU DIOXYDE DE CARBONE

Une des pistes étudiées actuellement pour limiter la hausse de la température moyenne à 1,5 °C, objectif défini par les accords internationaux sur le climat, consiste à capter le dioxyde de carbone atmosphérique, puissant gaz à effet de serre, et à le stocker dans les formations géologiques du sous-sol. La présence de barrières imperméables est une condition indispensable pour assurer la pérennité des sites de stockages à l'échelle de plusieurs milliers d'années. Or les mécanismes de dissolution et de précipitation de minéraux dans les pores de la roche sont assez mal connus. En 2020, Jenna Poonosamy, Cyprien Soulaïne, Sophie Roman et leurs collègues de l'institut des sciences de la Terre d'Orléans et de l'Institut de recherche sur l'énergie et le climat de Jülich, en Allemagne, ont mis au point un dispositif microfluidique pour étudier et visualiser avec précision la formation de barrières réactives grâce à la spectroscopie Raman (qui permet d'identifier la nature des différents matériaux en présence). Leur micromodèle est constitué de grains de célestine, un minéral assez abondant dans les milieux hydrothermaux. Ils ont alors injecté en continu une solution

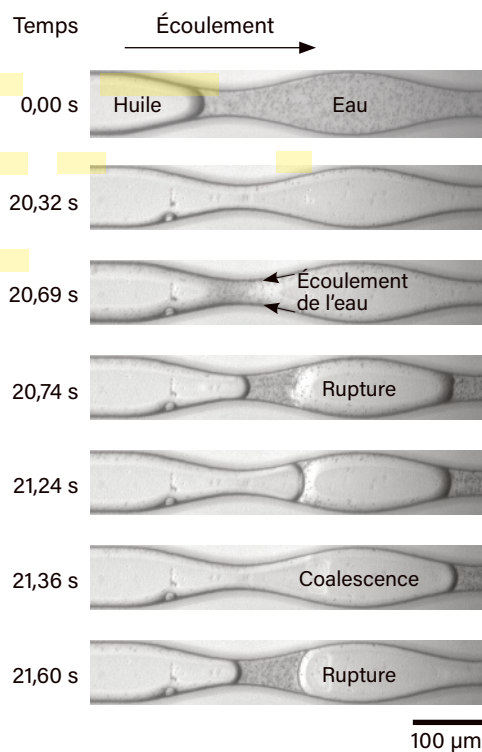


de chlorure de baryum, qui entraîne la dissolution de la célestine et forme de la baryte, un autre minéral. Grâce à la chimie assez simple du système célestine/baryte, les chercheurs ont un modèle analogue des barrières de confinement réactives leur permettant ici d'étudier les couplages entre écoulements et réactions chimiques. Ils ont analysé les cas d'un milieu homogène (grains de célestine répartis uniformément) ou hétérogène (milieu fracturé), où ils ont observé et quantifié l'apparition de baryte. Pour la même réactivité du milieu et les mêmes débits



d'injection, elle est beaucoup plus importante dans le milieu fracturé. Ce nouveau dispositif offre la possibilité de suivre en temps réel les processus de dissolution et de précipitation des minéraux constituant la roche. Cette connaissance fine et détaillée des mécanismes de colmatage de pores à l'échelle micrométrique fournira, à terme, les informations nécessaires pour mettre en œuvre *in situ* des barrières imperméables dans des zones ciblées de formations géologiques afin d'étanchéifier un réservoir de stockage souterrain.

Dans cette séquence, l'huile est injectée dans un canal micrométrique aux parois hydrophiles et rempli d'eau. Lorsque l'huile pénètre dans le pore, une fine couche d'eau se maintient le long des parois. Mais le gradient de pression local induit par le changement de courbure du ménisque conduit à une circulation de l'eau à contre-courant de l'huile, ce qui finit par provoquer une rupture et la formation d'une gouttelette d'huile. Quand l'huile pénètre de nouveau dans le pore, la coalescence avec la gouttelette remobilise cette dernière. Puis le processus recommence... Ces phénomènes jouent un rôle important dans la dynamique d'un milieu diphasique et peuvent rendre difficiles des opérations de remédiation de sites pollués ou réduire les performances de stockage.



se rompre (lorsqu'une goutte se fragmente en plusieurs objets). Dans les milieux poreux, cette énergie minimale portée par les interfaces doit aussi composer avec l'espace confiné à l'intérieur des pores et les propriétés de mouillabilité qui caractérisent l'étalement d'un fluide sur la paroi des minéraux.

Trois forces motrices sont responsables du déplacement des fluides et de leurs interfaces : les gradients de pression, la gravité et la capillarité. Les gradients de pression mettent le fluide en mouvement par des forces extérieures, par exemple en utilisant une pompe. La gravité met un fluide verticalement, vers le bas lorsqu'il est dense ou vers le haut à cause de la poussée d'Archimède pour les fluides légers. La capillarité est la force qui agit pour réduire la surface de l'interface et donc l'énergie associée. Selon que les parois des pores sont hydrophiles ou hydrophobes, les forces capillaires poussent le liquide à pénétrer dans les pores ou au contraire s'opposent à l'entrée du liquide.

Au cours des années 1980, lors d'expériences pionnières en microfluidique, Roland Lenormand et ses collègues, de l'institut de mécanique des fluides de Toulouse, ont mis en évidence plusieurs régimes d'écoulement lors de l'injection d'un fluide dans un milieu poreux initialement saturé par un autre fluide. Ainsi, selon le poids respectif des effets d'entraînement d'un fluide sur l'autre, des effets gravitaires et capillaires – qui varient avec les débits d'injection et les propriétés des fluides et des minéraux – les pores se remplissent

uniformément suivant un front stable qui se propage dans le sens de l'écoulement ou bien envahissent certaines zones du domaine de façon préférentielle, laissant de larges poches du fluide initial encerclées par le fluide pénétrant dans le milieu (voir la figure pages 54-55). Les micromodèles de l'époque étaient alors de simples réseaux de canaux rectangulaires de largeur supérieure à 100 micromètres. Depuis ces travaux pionniers, les techniques de micro-fabrication se sont beaucoup améliorées, et on sait dorénavant graver des micromodèles représentant une section de roche avec des tailles de pore de l'ordre du micromètre, ce qui est indispensable pour capturer correctement les forces capillaires responsables du piégeage de gouttelettes d'hydrocarbure ou de solvants chlorés dans l'espace poral de la roche. Les micromodèles actuels sont ainsi représentatifs des mécanismes de contamination des aquifères.

Dans la remédiation des sols pollués, la difficulté est de remobiliser les gouttelettes de contaminant piégées dans les pores à cause de la capillarité. Avec des temps de dissolution très lents, ces gouttelettes sont en effet responsables de la pollution des nappes phréatiques sur de très longues durées. Une des stratégies pour évacuer cette source de pollution – réputée parmi les plus difficiles à enlever – consiste à modifier les propriétés interfaciales de la goutte pour briser l'équilibre des forces qui l'immobilisent dans le pore. Il est en effet possible d'agir sur les forces capillaires au niveau de l'interface à l'aide de molécules dites « tensioactives » ou de nanoparticules métalliques qui altèrent ces forces et peuvent libérer les gouttelettes piégées (voir la figure page 58). La microfluidique offre une solution efficace pour tester rapidement différents produits qui seront injectés dans le sol pour le nettoyer. Grâce aux laboratoires sur puces, les chercheurs ont une meilleure compréhension des mécanismes liés au transport de ces produits vers les interfaces. Ils peuvent alors mieux identifier les points où injecter des fluides pour cibler une zone contaminée et ainsi optimiser les méthodes de remédiation.



Les estimations du volume de CO₂ qu'une roche peut stocker sont trop optimistes

