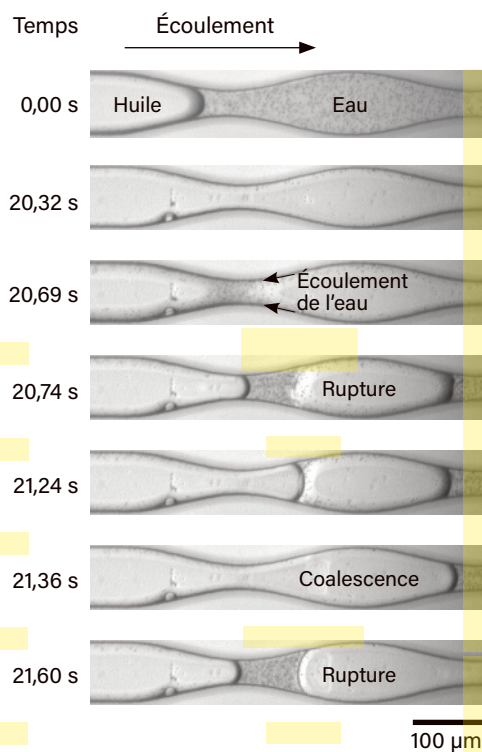


Dans cette séquence, l'huile est injectée dans un canal micrométrique aux parois hydrophiles et rempli d'eau. Lorsque l'huile pénètre dans le pore, une fine couche d'eau se maintient le long des parois. Mais le gradient de pression local induit par le changement de courbure du ménisque conduit à une 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.

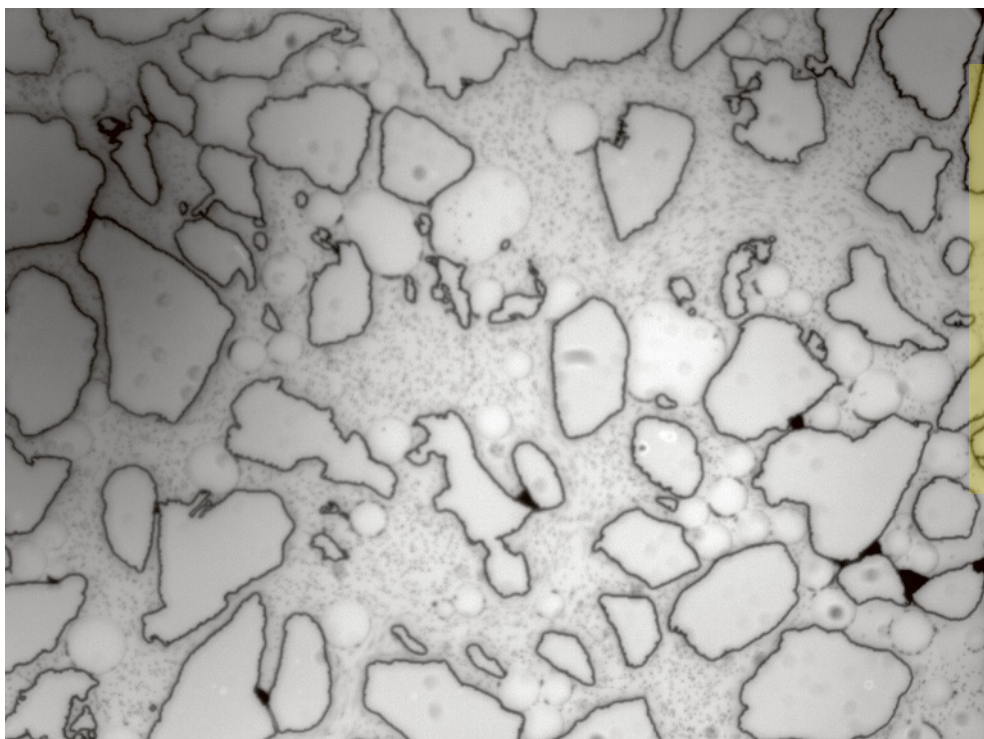
Trois forces motrices sont responsables du déplacement des fluides et de leurs interfaces: les gradients de pression, la gravité et la capillarité. Les gradients de pression mettent le fluide en mouvement par des forces extérieures, par exemple en utilisant une pompe. La gravité met un fluide verticalement, 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



Ce micromodèle est une réplique de grès, dont le motif a été obtenu à partir de l'analyse tomographique d'un échantillon de roche. L'intérêt est de se rapprocher de géométries réalistes. L'espace poral est ici rempli d'eau avec des gouttes d'huile (en blanc). Des particules sont injectées pour remobiliser les gouttes d'huile piégées par capillarité en modifiant les propriétés des interfaces huile/eau ou en colmatant certains pores (les amas noirs), ce qui redirige les lignes de courant, casse l'équilibre des forces hydrodynamiques et déplace les gouttes d'huile.

Autre atout des micromodèles, ils offrent un contrôle visuel inégalé des processus. Ainsi, en ajoutant des particules micrométriques en suspension dans les liquides, il est possible de suivre et de cartographier les écoulements dans les pores en temps réel. Ces techniques de visualisation avancées ont révélé des phénomènes qui étaient jusque-là négligés dans les modèles théoriques. Par exemple, lors d'expériences dans notre laboratoire, nous avons observé des mouvements de recirculation du fluide à l'intérieur de gouttes piégées par capillarité dans l'espace poral. Ces recirculations constituent une source de dissipation d'énergie pour l'écoulement mais aussi un mécanisme supplémentaire dans la dynamique des mélanges des espèces chimiques, ce qui modifie les vitesses de transfert de masses (et donc de diffusion de la pollution). Ces processus ignorés jusque-là pourraient être utiles dans certains procédés comme la séquestration du dioxyde de carbone, dont l'objectif est de piéger un maximum de ce gaz sous forme de gouttelettes dans les formations poreuses du sous-sol.

Récemment, avec nos collègues de l'université Stanford, nous avons d'ailleurs montré que la capillarité n'était pas le seul principe à l'œuvre dans le piégeage de poches de dioxyde de carbone à l'intérieur des pores. En effet, nous avons mis en évidence en utilisant des micromodèles à pore unique que, après sa rupture avec l'écoulement, une goutte piégée était susceptible de se reconnecter à l'écoulement (voir la figure page 57). Ces observations remettent en cause l'évaluation des quantités de dioxyde de carbone

pouvant être stockées par les différents mécanismes de piégeage: le piégeage par capillarité, par encerclement (en bloquant des pores autour de la zone de stockage) et par minéralisation. En particulier, ces données nouvelles suggèrent que les quantités qu'il sera possible de stocker par capillarité sont trop optimistes. Il semble indispensable de revoir en profondeur les scénarios d'injection envisagés.

VERS DES MICROMODÈLES RÉACTIFS

Les pistes de progrès des techniques de microfabrication sont encore nombreuses. La génération la plus récente de laboratoires sur puce pour les géosciences inclut directement des matériaux géologiques dans le processus de fabrication afin de mieux représenter les mécanismes physicochimiques comme la dissolution ou la précipitation de minéraux, autant de phénomènes capables de colmater ou ouvrir de nouveaux chemins (voir l'encadré page 56).

La maîtrise de ces processus permettra par exemple de mettre en œuvre la formation artificielle de barrières imperméables dans des zones ciblées des formations géologiques afin de contenir une pollution ou d'étanchéifier un réservoir de stockage souterrain. Comme le souligne Anthony Kovscek, la microfluidique, plus qu'un outil pour mesurer les propriétés des roches, apporte surtout des clés de compréhension pour répondre aux grands défis sociétaux et environnementaux liés à l'utilisation du sous-sol. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Poonosamy *et al.*, **Microfluidic flow-through reactor and 3D Raman imaging for in situ assessment of mineral reactivity in porous and fractured porous media**, *Lab on a Chip*, 2020.

C. Soulaïne, S. Roman *et al.*, **Pore-scale modelling of multiphase reactive flow : application to mineral dissolution with production of CO₂**, *Journal of Fluid Mechanics*, 2018.

W. Yun *et al.*, **Creation of a dual-porosity and dual-depth micromodel for the study of multiphase flow in complex porous media**, *Lab Chip*, 2017.

S. Roman, C. Soulaïne *et al.*, **Particle velocimetry analysis of immiscible two-phase flow in micromodels**, *Adv. Water Resour.*, 2016.

S. Colin, **La physique des microécoulements**, *Pour la Science*, n° 306, avril 2003.

LE TEMPS EXISTE-T-IL ?

- Une sélection d'articles rédigés par des chercheurs et des experts
- Une lecture adaptée aux écrans

3,99 €



Les *Théma* sont une collection de hors-séries numériques. Chaque numéro contient une sélection des meilleurs articles publiés dans *Pour la Science* sur une thématique.

Dans la collection *Théma* découvrez aussi

