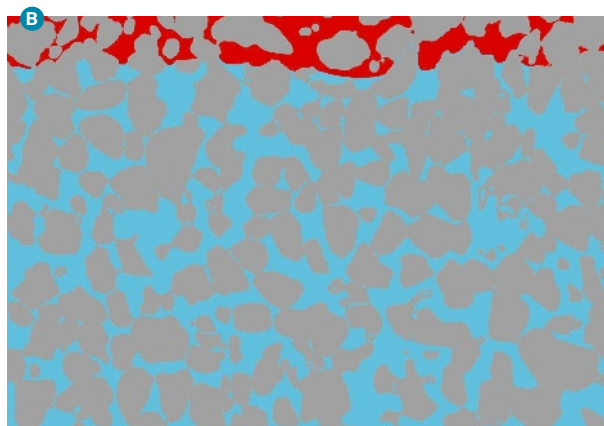
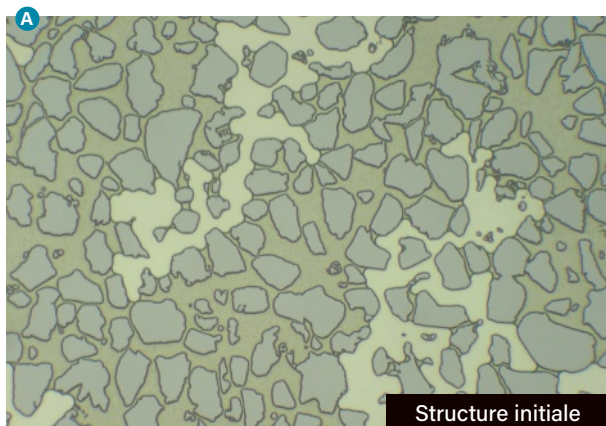


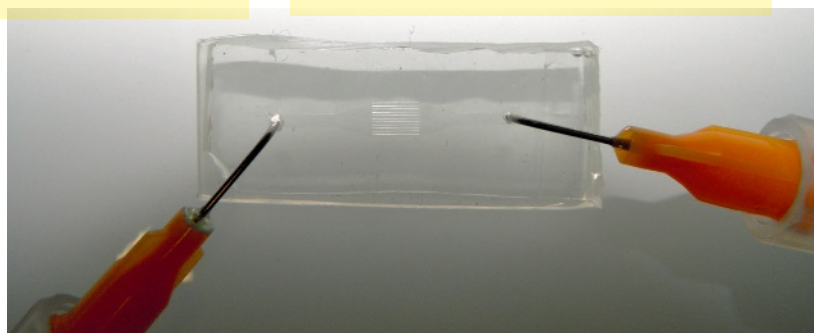
stopper ainsi l'apport en nutriments nécessaires à leur croissance. Les microécoulements et les nutriments sont donc déviés vers d'autres pores où s'établissent de nouvelles colonies. Privées d'alimentation, les colonies meurent, ouvrant à nouveau le chemin pour les microécoulements jusqu'à ce qu'une autre colonie se développe. Ce type de rétroaction est aussi observée lorsqu'un microécoulement transporte un réactif qui entraîne la précipitation de minéraux dans les pores, créant localement une barrière imperméable.

L'étude des différents mécanismes d'écoulement et de transport à l'échelle d'un réseau de pores se heurte à l'opacité des roches. Comment observer et caractériser les phénomènes dynamiques qui se déroulent au sein de la microstructure de la roche sans perturber leur évolution? Avec l'imagerie non destructive, comme la microtomographie à rayon X, il est possible de représenter en trois dimensions la structure d'un échantillon de roche, de cartographier la distribution des fluides dans l'espace poral et d'évaluer l'évolution de la structure minérale en fonction des réactions géochimiques.

Cependant, et malgré les progrès recensés ces dernières années, ces techniques opèrent à des fréquences d'acquisition encore trop lentes pour capturer les phénomènes dynamiques qui sont au cœur de nombreuses problématiques en géosciences. Par exemple, les mécanismes d'infiltration des fluides dans la roche impliquent des événements rapides – de l'ordre de la milliseconde – responsables du piégeage de gouttelettes par capillarité. De la même façon, la caractérisation de la dynamique d'attachement des virus, des bactéries ou des nanoparticules aux parois des minéraux nécessite des outils de visualisation dotés d'une résolution spatiale et temporelle importante. Ce sont précisément les atouts de la microfluidique, qui offre de nouvelles perspectives pour sonder et suivre les microécoulements à l'intérieur des roches avec une précision inégalée à ce jour.



Dans ce micromodèle, le liquide est injecté à gauche (aiguille orange) et ressort à droite par l'autre aiguille. Il traverse un circuit dont la configuration est gravée dans le substrat et peut prendre de nombreuses formes, ici un réseau de pores parallèles.

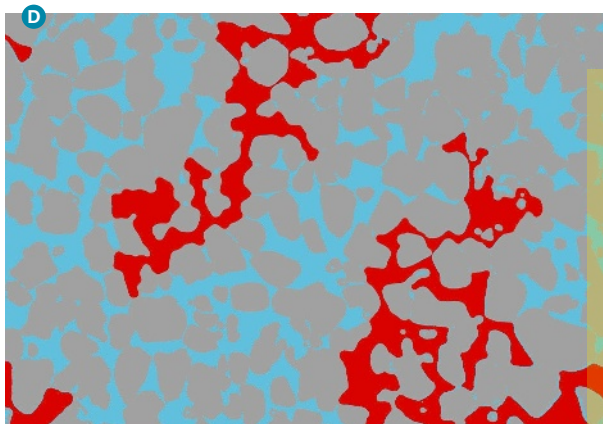
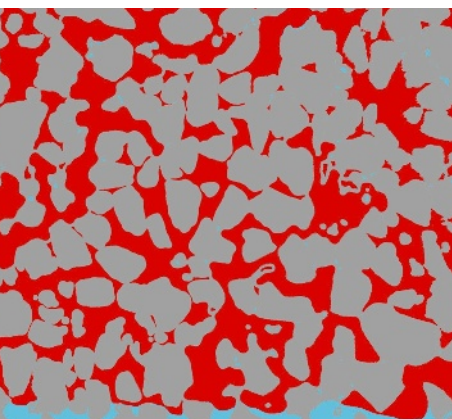


L'histoire de la microfluidique a commencé en 1979 quand Stephen Terry et ses collègues, de l'université Stanford, aux États-Unis, ont miniaturisé un système d'analyse de gaz par chromatographie sur un substrat de silicium. L'approche a vraiment pris son essor dix ans plus tard.

UN LABORATOIRE MINUSCULE

L'idée est simple: les fluides sont manipulés à l'échelle micrométrique grâce à la miniaturisation de systèmes hydrauliques obtenus selon des techniques de fabrication spécifiques. C'est un véritable réseau de microcanalisations qui est reproduit sur des puces, avec des microvalves, des micropompes, des micromélangeurs et des microcapteurs. Cet ensemble de composants miniaturisés a notamment été développé pour l'étude et l'analyse d'échantillons chimiques ou biologiques, en remplacement des dispositifs classiques, le plus souvent encombrants et moins efficaces. On parle alors de «laboratoires sur puce» (*lab-on-chip*) ou plus généralement de «micromodèles».

Cette miniaturisation autorise, entre autres, un contrôle très précis de la formation des gouttes et des mélanges. Les débouchés sont multiples et de nombreux secteurs de la recherche et de l'industrie se sont déjà saisis de ces nouvelles possibilités. Ainsi des tests sanguins tirent profit de la microfluidique pour trier les globules rouges et détecter des maladies



Dans cette expérience de drainage, l'espace poral du micromodèle (a) est d'abord rempli avec de l'eau. De l'huile est ensuite injectée par en haut (b). Selon les conditions d'injection et la nature des fluides, la dynamique est différente. Si les forces visqueuses dominent, les pores se remplissent uniformément selon un front stable qui se propage dans le sens de l'écoulement (c). Si la capillarité domine, l'huile envahit certaines zones de façon préférentielle laissant de larges poches du fluide initial (d).

infectieuses à partir d'une simple goutte de sang. Les industries pharmaceutique et cosmétique exploitent les capacités de la microfluidique pour manipuler de très petits volumes de fluide – parfois de l'ordre du picolitre – pour synthétiser de nouveaux produits. Largement répandus dans la vie quotidienne, les tests de grossesse urinaires jetables sont également des micromodèles. Ces quelques exemples sont loin de rendre compte de toutes les possibilités offertes par cette discipline, et on considère que la microfluidique représente pour les domaines des sciences de la vie, de la médecine, de la chimie et de l'environnement une révolution comparable à celle amorcée, au siècle dernier, par les microprocesseurs dans les domaines de l'électronique et de l'informatique.

À partir des années 2010, ces systèmes se sont imposés en géosciences pour simuler les microstructures du sol et du sous-sol. Ces dispositifs microfluidiques sont parfois qualifiés d'«aquifères sur puce» (*aquifer-on-chip*) – ou de «laboratoires géologiques sur puce» (*geological-lab-on-chip*). Il s'agit ici de représenter les processus naturels dans un environnement contrôlé afin de les observer sous un microscope, de les caractériser puis de les modéliser. Associées à des techniques d'imagerie avancées, les expériences microfluidiques pour les géosciences offrent à la fois une visualisation directe et des mesures quantitatives des mécanismes de transport et des réactions chimiques dans l'espace poral.

Pour déchiffrer les événements complexes qui se déroulent dans les milieux poreux géologiques, la recherche actuelle s'articule autour de deux approches. La première s'emploie à reproduire des échantillons de roche sur les puces microfluidiques en représentant la géométrie hétérogène de l'espace poral et les conditions physicochimiques des parois minérales le plus fidèlement possible. L'objectif est de recréer des environnements naturels sur puce afin, par exemple, d'étudier comment les phénomènes complexes influent les uns sur

les autres. Les chercheurs sont alors en mesure d'identifier le rôle de la structure porale dans la distribution des événements au sein de la roche. Dans la seconde voie d'étude, les hydrogéologues exploitent la capacité de la microfluidique à créer des environnements contrôlés pour isoler, le plus souvent au sein d'une géométrie simple, des processus spécifiques. En les découplant ainsi des autres mécanismes qui se juxtaposent et interagissent dans les environnements naturels complexes, ils peuvent mieux les comprendre et les caractériser.

Loin d'être exclusives, ces deux approches sont en fait complémentaires. Ainsi, le développement de communautés bactériennes dans le sous-sol ne peut se comprendre pleinement que si d'une part les mécanismes élémentaires de croissance, d'agrégation et d'attachement des bactéries sur les parois solides sont caractérisés à l'échelle d'un pore et si, d'autre part, on est capable de déterminer l'apport des nutriments et de l'oxygène dans le réseau hydraulique à travers les microécoulements.

LE DÉFI DE LA MICROFABRICATION

Selon l'objectif visé, le motif gravé sur le micromodèle peut être de complexité très variable, d'un microcanal unique pour se focaliser sur un phénomène à des motifs représentatifs d'un milieu poreux géologique. Ces derniers motifs peuvent s'obtenir en partant de l'image microtomographique d'un échantillon minéral. Bien évidemment, il faut garder à l'esprit que les micromodèles sont des représentations des milieux poreux en deux dimensions et que la caractérisation d'une roche, qui est par essence un objet en trois dimensions, à partir d'expériences microfluidiques doit se faire avec précaution. Pour contourner cette limite, Anthony Kovscek, de l'université Stanford, et son équipe ont développé en 2017 un protocole pour produire différentes profondeurs de gravure dans les micromodèles afin de capturer certains effets en trois dimensions.