

elles entraînent parfois des pollutions involontaires, dont l'impact se répercute souvent sur la qualité des eaux souterraines, qui représentent un réservoir important d'eau douce.

Pour mieux appréhender la dynamique du sous-sol, depuis quelques années, les hydrogéologues ont adopté les techniques de la microfluidique, introduites au début des années 1980 dans les biotechnologies. Ces laboratoires sur puce sont très efficaces pour étudier les écoulements dans le sous-sol : ils simulent les conditions dans la roche et offrent la possibilité de visualiser les microécoulements et les processus hydrauliques qui régissent le monde souterrain.

ZOOM SUR LES PETITES ÉCHELLES

Pourquoi est-il nécessaire de se concentrer sur des mécanismes qui se manifestent à des échelles microscopiques quand on étudie des systèmes, comme les nappes phréatiques, qui s'étendent sur des centaines de kilomètres ? La réponse est simple. Loin de la vision erronée qui voudrait que les nappes phréatiques prennent la forme de lacs souterrains, la plupart des aquifères sont des formations géologiques poreuses, c'est-à-dire des roches composées de matière solide minérale entrecoupée d'interstices à travers lesquels s'écoule l'eau. La taille caractéristique des pores est de l'ordre de la dizaine de micromètres. Pour se représenter les écoulements souterrains dans la matrice poreuse, il faut donc imaginer un réseau de canalisations dont les tuyaux auraient le diamètre d'un cheveu. Bien que le mouvement des masses d'eau à travers ce réseau soit très lent – avec des vitesses de déplacement de l'ordre du mètre par jour –, leur dynamique est loin d'être négligeable et explique, typiquement, l'étalement de la pollution dans la nappe phréatique de Benfeld.

LA DYNAMIQUE DES AQUIFERES

Les volumes et les échelles de temps considérés dans le déplacement de fluides souterrains sont colossaux. Ainsi, le bassin-versant de la Loire, le plus grand sur le territoire français, s'étend sur une superficie de 117 500 kilomètres carrés en surface. En ajoutant la contribution des eaux souterraines dans les aquifères, on estime que ce bassin mobilise un débit de près de 30 kilomètres cubes d'eau par an. Dans ces conditions, un événement local, comme une pollution liée à l'activité anthropique de surface, peut avoir des conséquences de très longue portée.

L'analyse des processus à l'échelle du pore et du réseau apparaît donc comme le niveau de description incontournable pour déchiffrer les mécanismes complexes et le plus souvent couplés qui régissent le monde souterrain. Il faut prendre en compte simultanément les microécoulements, les réactions géochimiques qui façonnent les minéraux et modifient la composition de l'eau et l'activité des microorganismes qui utilisent les pores comme habitat. Grâce à la connaissance détaillée de ces interactions, il sera possible, à terme, de prédire l'évolution du sous-sol et d'apprendre à contrôler les différents processus afin de proposer, par exemple, des procédés efficaces de remédiation des sols pollués, en ciblant très localement une zone contaminée.

Un aspect essentiel de ces écoulements est le fait que l'espace poral des formations géologiques est susceptible de se boucher. L'obstruction des pores est d'origine hydraulique lorsqu'une bulle d'air ou une goutte d'huile (issue d'une pollution, par exemple) vient se piéger par capillarité dans l'espace poral ; mécanique lorsque des particules de sable ou d'argile s'agregent à l'entrée d'un pore ; chimique lorsque, par exemple, de la calcite précipite et colmate des pores ; ou biologique lorsque des colonies de microorganismes se développent au sein de biofilms bactériens. Cette réduction de l'espace à travers lequel s'écoulent les fluides devient une aubaine pour étanchéifier des réservoirs de stockage souterrain ou au contraire un fléau lorsque le colmatage d'un puits fait chuter sa production, ou lorsqu'il faut extraire un polluant piégé dans les pores d'un sous-sol contaminé.

Cependant, comprendre les processus physicochimiques à l'échelle d'un seul pore ne suffit pas pour appréhender pleinement les phénomènes impliqués dans les formations géologiques. En effet, les matériaux poreux ont comme particularité la mise en réseau d'un très grand nombre de pores qui rentrent en compétition les uns avec les autres. Dans un tel système, tous ont des géométries et des tailles différentes et tous ne sont pas impactés de la même façon. Lorsqu'une voie se bouche, elle oblige l'écoulement à passer par un autre chemin. Certaines voies de circulation sont plus rapides et d'autres plus lentes, à l'image d'un réseau routier avec ses autoroutes, ses nationales, ses départementales et ses routes de campagne. Cette hétérogénéité de la taille des pores entraîne des phénomènes dans certains cas hautement non linéaires et complexes à analyser.

Par exemple, pour se développer, les bactéries ont besoin de nutriments (et parfois d'oxygène) qui, schématiquement, circulent de façon prioritaire à travers les microécoulements rapides – les autoroutes. Les colonies bactériennes prospèrent donc principalement dans les pores les plus gros jusqu'à les engorger,



Le sous-sol est parcouru par un réseau de canalisations dont les tuyaux ont le diamètre d'un cheveu



FABRICATION DES MICROMODÈLES

Il existe aujourd'hui plusieurs solutions techniques pour fabriquer des micromodèles. La première utilise la microfabrication sur un substrat de silicium ou de verre (*wafer*) selon des procédés empruntés à l'industrie des puces microélectroniques. Cette technique a les inconvénients d'être lourde à mettre en œuvre et coûteuse. Les deux autres approches utilisent le moulage en polydiméthylsiloxane (PDMS, un polymère siliconé) et l'impression 3D.

La microstructure que l'on souhaite étudier est d'abord imprimée sur un photomasque. Ce procédé reproduit avec précision la structure porale d'une roche dans toute sa complexité géométrique. Les techniques actuelles permettent de fabriquer des canaux d'un diamètre typiquement micrométrique, mais qui peuvent aller jusqu'à une dizaine de nanomètres, ouvrant ainsi la voie à l'étude des mécanismes de transport et de stockage dans les roches nanoporeuses comme les schistes ou les roches argileuses.

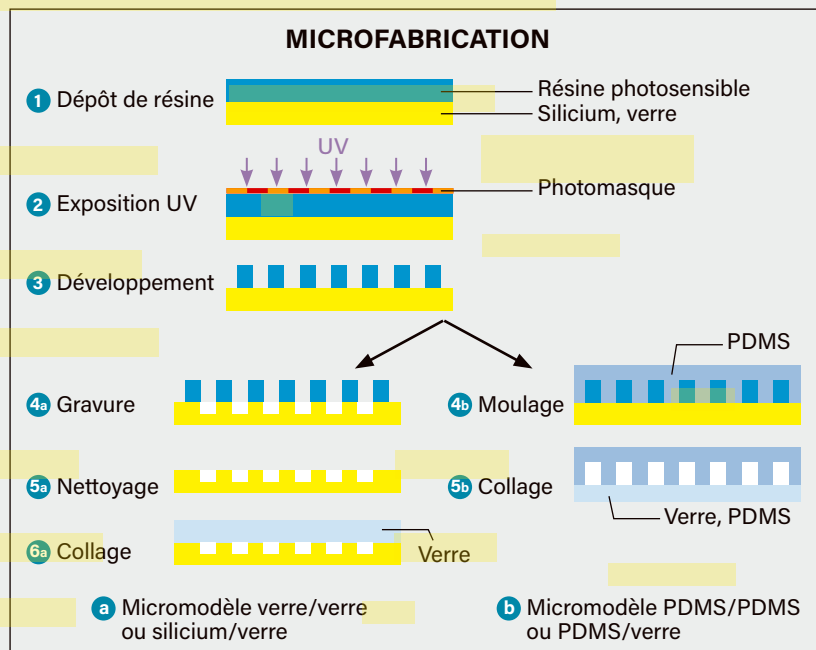
Une résine photosensible est déposée sur un *wafer*. Le photomasque est appliqué sur la surface et le tout est exposé à des rayons ultraviolets. Seules les zones transparentes du masque sont irradiées, entraînant une transformation chimique locale de la résine qui devient soit soluble soit insoluble (selon le type de résine). La résine soluble est ensuite évacuée lors du développement quand le *wafer* est plongé dans un bain chimique (le révélateur). Le motif de la microstructure est maintenant présent sur le *wafer*.

Deux approches sont alors possibles : la gravure ou le moulage. Dans le cas de la gravure, la résine résiduelle sert de protection et le substrat de silicium ou de verre est gravé (processus chimique, plasma ou ionique réactif). Les trous qui serviront à l'injection des fluides sont percés. Un traitement chimique élimine la résine restante et nettoie les impuretés résiduelles. Le micromodèle est fermé en collant une plaque de verre sur le *wafer*. Ce matériau transparent permet la visualisation des phénomènes qui seront étudiés sous le microscope et assure l'étanchéité. Ce dernier aspect est crucial, car les volumes de fluide manipulés en microfluidique sont si petits – de l'ordre de la goutte d'eau – que la fuite la plus infime risque de rendre tout le système défaillant.

Dans la seconde approche, le *wafer* gravé sert de moule. Du PDMS liquide, ou un autre polymère, est déposé sur le *wafer*. Après polymérisation, il est décollé du moule, les trous sont percés pour l'injection des fluides et il est assemblé avec une plaque de verre ou un autre film de PDMS.

L'avantage de cette méthode est que le moulage peut être fait en dehors d'une salle blanche et répété à l'envi en laboratoire, réduisant aussi le coût à la microfabrication d'un seul *wafer*.

Cependant, les micromodèles moulés ne sont pas toujours adaptés pour les systèmes des géosciences. En effet, l'élasticité du PDMS est peu représentative des propriétés mécaniques d'une roche réelle. L'avantage économique se fait également au détriment



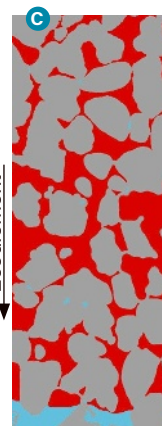
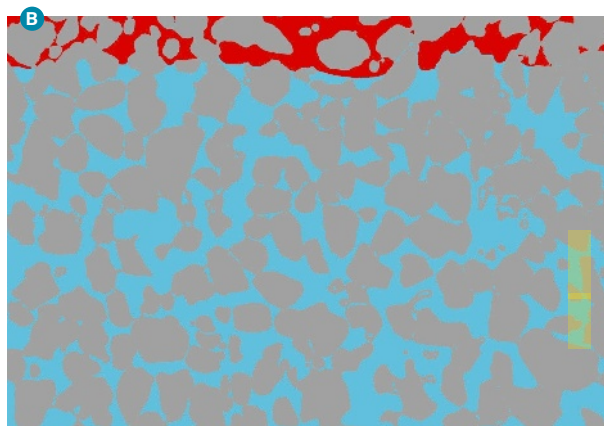
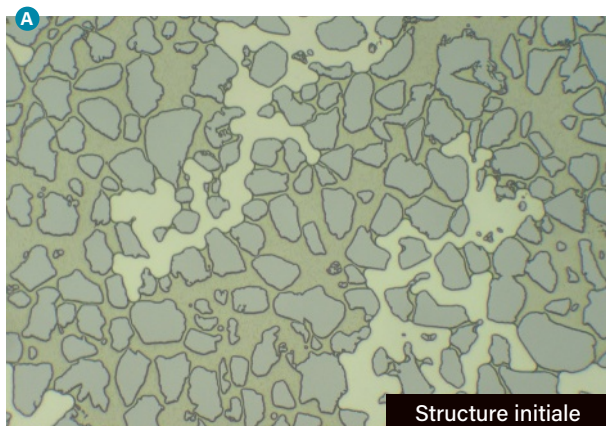
de la reproductibilité des micromodèles, car deux puces moulées diffèrent toujours l'une de l'autre, notamment à cause d'imperfections géométriques des parois. Par ailleurs, les traitements de surface contrôlant les conditions physicochimiques des parois de la microstructure pour les rendre représentatives d'un matériau géologique sont moins efficaces que dans le cas d'un micromodèle en silicium ou en verre.

Or la rugosité et les conditions de charge électrostatique des surfaces sont parmi les aspects les plus fondamentaux pour décrire les conditions de mouillabilité des surfaces ainsi que l'affinité d'attachement de particules submicrométriques (bactéries, virus, nanoparticules métalliques, nanoplastiques, particules minérales solides...) sur les parois solides. De plus, le PDMS est perméable au gaz et à certains solvants, ce qui limite son utilisation pour des applications comme le stockage géologique de dioxyde de carbone.

Une autre solution à bas coût pourrait révolutionner l'utilisation de la microfluidique dans la recherche en sciences de la Terre. L'impression 3D – ou stéréolithographie – est une méthode additive où l'objet est créé via l'ajout des couches de matière successives. Les matériaux utilisés dans la fabrication des objets imprimés en 3D sont variés (plastique, cire, métaux, plâtre, céramiques, verres) et laissent entrevoir la possibilité de reproduire des objets géologiques

complexes. Julien Maes et ses collègues, de l'université Heriot-Watt, en Écosse, en collaboration avec Sophie Roman et Cyprien Soulaïne, travaillent sur des dispositifs exploratoires de puces imprimées. Cependant, malgré toutes les avancées techniques sur le sujet et la démocratisation des imprimantes 3D, les techniques de microfabrication classiques ont encore une longueur d'avance.

En effet, contrairement à la structure porale d'une roche, les tailles de pore obtenues en stéréolithographie sont de l'ordre de la centaine de micromètres, ce qui est trop large, par exemple, pour capturer correctement les mécanismes de piégeage capillaire lorsque de l'huile et de l'eau occupent simultanément l'espace poral d'un aquifère contaminé par des hydrocarbures. Par ailleurs, la précision des impressions actuelles engendre une rugosité non contrôlée à la surface de la structure porale, susceptible de déstabiliser artificiellement les écoulements dans ces puces. Néanmoins, les progrès rapides de cette technique laissent penser qu'elle pourrait concurrencer la microfabrication d'ici à quelques années.



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