

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

