

CONTEXTE ÉVOLUTIF			MISE EN ŒUVRE	CONSÉQUENCES ÉVOLUTIVES	
Ce qui a le plus de valeur	Conservation	Wilderness*	Contribution de la nature aux sociétés (services écosystémiques)	Transitions	Impacts
Valeurs instrumentales	Aucune	Aucune	Consommation sans frein des ressources de biodiversité		
Valeur adaptative des humains	Anthropocentrée	Aucune	Services écosystémiques d'approvisionnement et de régulation à long terme		
Bien-être humain	Anthropocentrée	Quelques sites de wilderness	Services écosystémiques d'approvisionnement et culturels à court terme		
Bien-être et valeur adaptative des humains	Anthropocentrée	Quelques sites de wilderness	Services écosystémiques d'approvisionnement, de régulation et culturels à long terme		
Bien-être et valeur adaptative des humains, et valeur adaptative des autres vivants	Évocentrée	Naturalité au-delà de quelques sites de wilderness	Trajectoires évolutives à long terme au-delà des services écosystémiques		

* Concept anglo-saxon d'une nature perçue comme historiquement non anthropisée

Par ailleurs, dans ce scénario évocentré, le fantasme de résurrection d'espèces anciennement disparues au moyen de la biologie moléculaire devrait sortir du cadre de la conservation de la biodiversité, car cette approche ignore souvent les interactions écologiques et les enjeux évolutifs. Ces progrès de la biologie de synthèse et du génie génétique sont également susceptibles de conduire à l'émergence de nouveaux types d'organismes, dont certains sont même parfois présentés comme utiles aux enjeux environnementaux. C'est le cas, par exemple, de l'usage d'édition génétique pour entraîner l'extinction de rongeurs envahissants ou de la modification de plantes pour augmenter leur stockage de carbone. Si ces travaux en laboratoire ont de nombreux intérêts, notamment en médecine, la libération de tels organismes dans les écosystèmes ouvre une boîte de Pandore de nouvelles interactions génétiques, écologiques et surtout évolutives dans les écosystèmes, qui dépassent nos capacités de contrôle.

Élever les débats sur l'anthropocène à l'échelle de l'évolution ouvre donc de vastes questions et nous engage même sur un chemin

inédit. De fait, à cette échelle, considérer les autres formes de vie comme des ressources, même au sens large, n'est pas innovant. C'est même la base du fonctionnement des écosystèmes depuis que des interactions, notamment trophiques, existent entre organismes. En revanche, la conservation délibérée du potentiel évolutif des non-humains et le respect de leur altérité au-delà de ce que nous tirons serait une réelle nouveauté.

Dans une mise en abyme réflexive de nos relations aux vivants et de notre propre condition, considérer les trajectoires évolutives des non-humains au-delà des intérêts humains constituerait même une transition évolutive majeure. Très probablement pour la première fois en 3,8 milliards d'années d'évolution, une forme de vie piloterait consciemment ses propres trajectoires de développement pour respecter celles d'autres espèces au-delà de ses propres besoins. Si ce que nous conservons définit ce que nous sommes ou prétendons être, une telle bifurcation ajouterait une originalité fondamentale à notre humanité et questionnerait le principe même d'anthropocène. ■

BIBLIOGRAPHIE

R. H. Cowie *et al.* **The sixth mass extinction : Fact, fiction or speculation ?**, *Biological Reviews*, 2022.

F. Sarrazin et J. Lecomte, **Transition évolutive et naturalité**, dans E. Mermans et A. C. Dussault (éd.), **Protéger l'environnement. De la science à l'action**, Matériologiques, 2021.

P. S. Jørgensen *et al.*, **Evolution in the Anthropocene : informing governance and policy**, *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2019.

F. Sarrazin et J. Lecomte, **Evolution in the Anthropocene**, Science, 2016.

L'ESSENTIEL

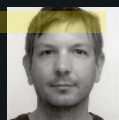
> Les formations géologiques sont constituées de minéraux entrecoupés de pores micrométriques. Ces derniers abritent des microécoulements, mais aussi des réactions géochimiques et des microorganismes.

> Pour étudier ces systèmes et ces processus micrométriques,

de véritables laboratoires géologiques sur puce recréent les conditions du sous-sol.

> Les premiers résultats expérimentaux ouvrent des pistes pour des solutions efficaces de remédiation des sols pollués.

LES AUTEURS



CYPRIEN SOULAINÉ
chargé de recherche CNRS
à l'institut des sciences
de la Terre d'Orléans



SOPHIE ROMAN
maîtresse de conférences
à l'université d'Orléans

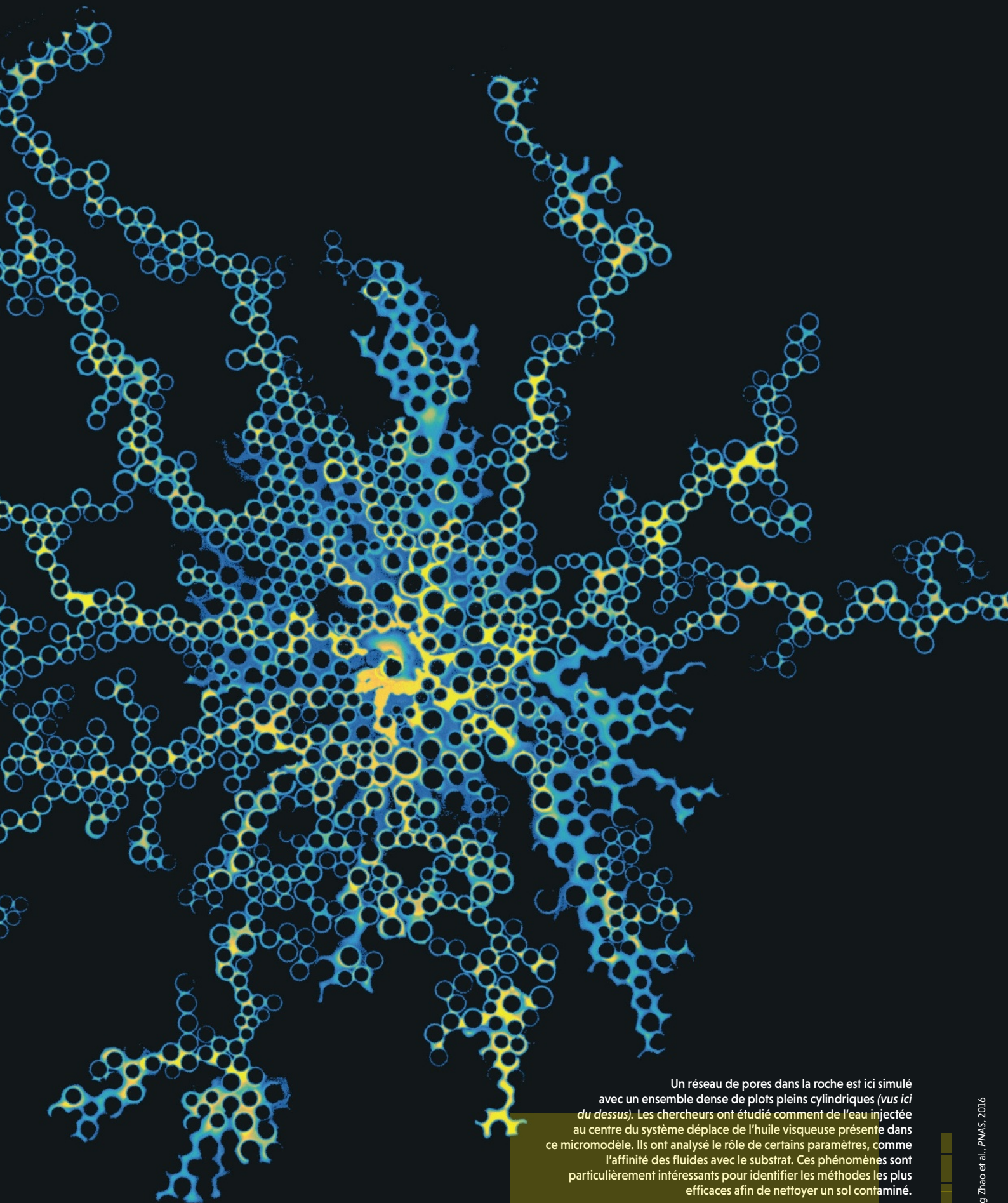
La microfluidique infiltre les géosciences

Pour améliorer les procédés de décontamination des sols pollués, exploiter les sources géothermales ou stocker du dioxyde de carbone, il est crucial d'étudier la dynamique des fluides à l'échelle micrométrique dans les roches. Comment? Grâce à des laboratoires géologiques... sur puce.

En 1990, la commune d'Erstein, en Alsace, a essuyé une mauvaise surprise. Dans le cadre de l'installation d'un puits de pompage pour recueillir l'eau de la nappe phréatique, des tests ont été réalisés pour vérifier que l'eau était potable. Mais les résultats ont révélé la présence de tétrachlorure de carbone (CCl_4), un solvant très toxique dont la concentration, comprise entre 30 et 65 microgrammes par litre, excédait de 15 à 30 fois le seuil de tolérance réglementaire! Des analyses ont alors mis en évidence une zone polluée d'une dizaine de kilomètres de long pour 1 kilomètre de large. Mais d'où venait la contamination? Des modélisations ultérieures ont relié cette pollution de la nappe phréatique alsacienne à l'accident d'un camion-citerne qui a eu lieu le 11 décembre 1970, à Benfeld, 6 kilomètres

en amont d'Erstein, qui en se renversant sur la chaussée a laissé s'échapper près de 4000 litres de tétrachlorure de carbone.

Vingt années et plusieurs kilomètres séparent l'accident de l'émergence de la pollution. Comment expliquer une diffusion aussi lente? La réponse est liée à la structure du sous-sol et aux processus qui s'y déroulent, mais les mécanismes en jeu restent mal connus. Pourtant, mieux les comprendre est indispensable, car le sous-sol est au cœur de nombreuses activités humaines: exploitation à des fins énergétiques (géothermie profonde, production pétrolière), extraction de métaux rares, stockage (déchets nucléaires dans les formations argileuses, dioxyde de carbone dans les aquifères salins profonds ou hydrogène dans les cavités profondes). Quand ces interventions ne sont pas parfaitement contrôlées,



Un réseau de pores dans la roche est ici simulé avec un ensemble dense de plots pleins cylindriques (*vus ici du dessus*). Les chercheurs ont étudié comment de l'eau injectée au centre du système déplace de l'huile visqueuse présente dans ce micromodèle. Ils ont analysé le rôle de certains paramètres, comme l'affinité des fluides avec le substrat. Ces phénomènes sont particulièrement intéressants pour identifier les méthodes les plus efficaces afin de nettoyer un sol contaminé.

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 AQUIFÈRES

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

