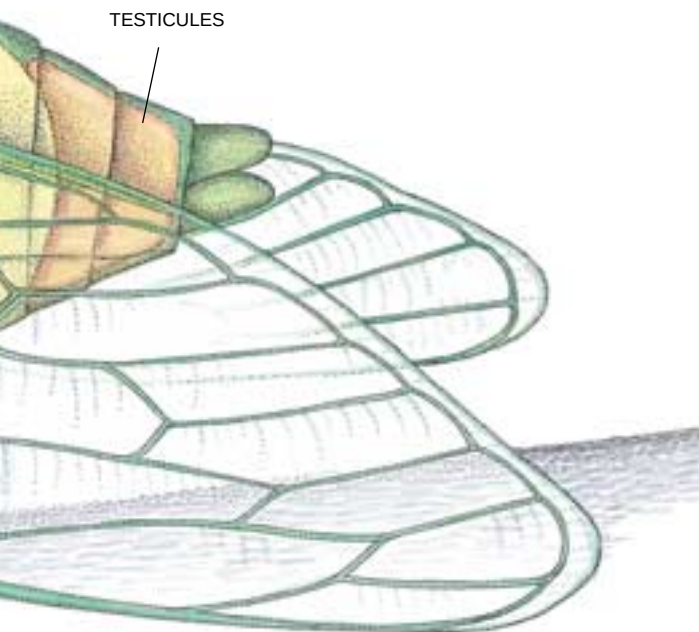
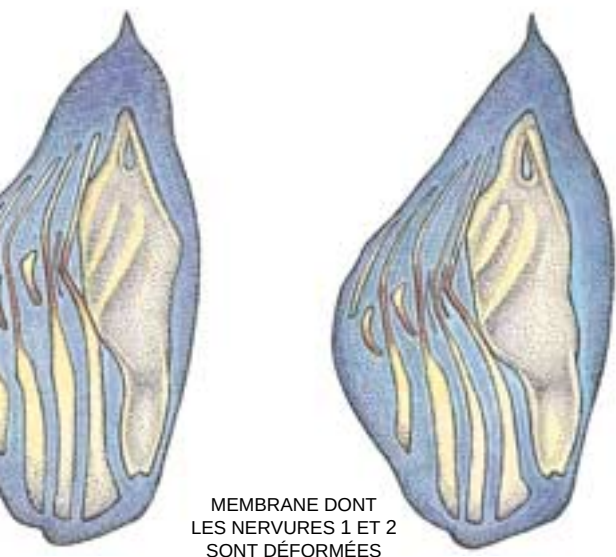


respond à un cycle par seconde). En fait, les deux membranes des tambours ne se déforment pas d'un bloc, mais nervure après nervure.

En se contractant rapidement, les muscles produisent suffisamment d'énergie, durant les trois premières milli-secondes de chaque contraction, pour déformer, les unes après les autres, deux ou trois nervures de chaque «cou-vercle». Ce mouvement déplace, en deux ou trois fois, les deux faces de chaque tambour vers l'intérieur. À chaque fois qu'une nouvelle nervure se déforme, un claquement



LES NERVURES sont déformées les unes après les autres par le puissant muscle de chaque tambour. Chaque déformation crée une pression sonore atteignant 158 décibels. Les nervures des membranes sont entourées d'un tissu élastique (en bleu).



MEMBRANE DONT
LES NERVURES 1 ET 2
SONT DÉFORMÉES

Patricia J. Wynne

bref et intense retentit. Comme, à chaque contraction des muscles, chaque nervure produit plusieurs clics, que les nervures d'une même membrane sont déformées les unes après les autres et que les nervures des deux membranes sont actionnées séquentiellement, l'ensemble aboutit à 4 300 clics par seconde : l'ensemble des clics produit un train de vibrations dont la fréquence résultante est celle du chant de la cigale, soit 4,3 kilohertz.

Le claquement d'une des nervures produit des pressions sonores élevées, atteignant 158 décibels, dans l'abdomen de la cigale, ce qui équivaut au bruit produit par l'explosion d'une grenade à un mètre de distance (un décibel est un dixième de bel, unité d'intensité sonore relative ; un son est un bel plus haut qu'un autre lorsque le rapport de leurs intensités est égal à dix). Chez la plupart des cigales, l'abdomen contient une grande poche d'air, ou chambre sonore ; chez la cigale australienne, cette poche, dont le volume atteint 1,8 millilitre, occupe 70 pour cent de l'abdomen de l'insecte. L'abdomen contient une paire de membranes amplificatrices qui s'étendent sur toute la largeur de la face ventrale de l'insecte et qui relie la chambre sonore à l'extérieur.

Les impulsions sonores produites par les tambours et par les nervures résonnent dans la chambre sonore abdominale. Les membranes amplificatrices transmettent efficacement le son vers l'extérieur et l'amplifient : le son est environ 20 fois plus puissant que s'il était émis par les tambours seuls. De cette façon, l'insecte est audible de beaucoup plus loin.

Pourquoi ce son de 158 décibels n'endommage-t-il pas le système auditif de la cigale ? Parce qu'il est transmis grâce aux membranes amplificatrices, tandis que la partie sensorielle du système auditif du mâle est localisée dans une capsule séparée et n'est reliée à ces membranes que par un petit canal. Cette séparation semble protéger les mâles de la surdité.

L'orchestration du chant

L'abdomen et les tympanes ne diffusent pas seulement les sons vers l'extérieur : ils garantissent la qualité du chant nuptial. En étirant l'abdomen et en ouvrant les opercules qui recouvrent les membranes amplificatrices, la cigale ajuste son résonateur abdominal à la fréquence de 4,3 kilohertz, celle des vibrations sonores produites par les tambours. Les structures abdominales améliorent à la fois la pureté du chant et son intensité : elles corrigent et équilibrent les tambours.

De nombreuses espèces de cigales semblent pourvues d'un mécanisme similaire de production des sons, et d'autres insectes sonores «chantent» quasiment de la même façon. Toutefois, pour autant que nous le sachions, les mâles des cigales australiennes restent les insectes les plus bruyants du monde... au grand dam des habitants de Melbourne et de Sydney.

Henry BENNET-CLARK est attaché au département de zoologie des invertébrés de l'Université d'Oxford.

H.C. BENNET-CLARK et D. YOUNG, *A Model of the Mechanism of Sound Production in Cicadas*, in *Journal of Experimental Biology*, vol. 173, pp. 123-153, 1992.

D. YOUNG et H.C. BENNET-CLARK, *The Role of the Tymbal in Cicada Sound Production*, in *Journal of Experimental Biology*, vol. 198, pp. 1001-1019, 1995.

Mélange et désordre figé

ÉTIENNE GUYON • JEAN-PIERRE HULIN

*Deux liquides se mélangent quand ils traversent un solide poreux.
Inversement, les solides poreux peuvent aussi séparer des mélanges.
La physique explore les raisons de ces différences.*

Devant la gare de Dijon, la grande place Henry Darcy rappelle la mémoire de l'ingénieur en chef du corps des Ponts qui, entre 1834 et 1842, met en place le réseau d'alimentation en eau de cette ville. Il en fait alors la ville la plus propre de France, avec une consommation en eau de 200 litres par jour rapportés à chacun des 30 000 habitants de l'époque.

Dijon est traversé par le Suzon, qui, lit-on dans un écrit du XVIII^e siècle, «se mouvait dans un lit de roc pourry, entremêlé de sable mouvant». En appendice d'un article sur «les fontaines publiques de la ville de Dijon», Darcy mentionne ce lit poreux du Suzon et il exprime la loi de l'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux. Son nom est resté attaché à cette loi (voir la figure 2).

Bien des problèmes que Darcy se posait sont encore ouverts et d'actualité. Ils se présentent sous des formes variées : comment des polluants déchargés accidentellement se mélangent-ils aux eaux souterraines et à quelle vitesse se dispersent-ils ? Comment évaluer la sécurité d'un site de stockage de déchets chimiques ou radioactifs ? Comment récupérer efficacement un polluant (ou du pétrole) dans le sous-sol ? Nous verrons plus loin que d'autres questions, apparemment disjointes, sont pourtant très proches : comment mélanger les constituants visqueux d'un mélange ou d'une pâte ? Comment séparer les éléments d'un mélange chimique ?

La réponse à ces questions impose des études en laboratoire et des tests pratiques des théories : l'écoulement désordonné d'un liquide dans un réseau complexe de canaux, à l'intérieur du sol ou d'une roche poreuse, mélange souvent les espèces entraînées par le liquide. De même, certains

mélangeurs industriels, sans aucune pièce mobile, contiennent un ensemble de cloisons qui imposent au fluide un écoulement analogue à celui qui aurait lieu dans une roche poreuse ; les espèces à mélanger sont divisées en fines lanières qui s'entremêlent. Comment optimiser de tels systèmes ?

Nombre de ces questions simples restent ouvertes. Nous verrons toutefois que certains écoulements que l'on inverse renseignent sur la structure des milieux poreux. D'autre part, la compréhension des phénomènes d'hydrogéologie tire également parti d'expériences de laboratoires sur des milieux stratifiés ou de porosité particulière. On ne pourra vraiment interpréter les écoulements observés dans le sous-sol que lorsque les mécanismes de base auront été analysés finement par de telles expériences.

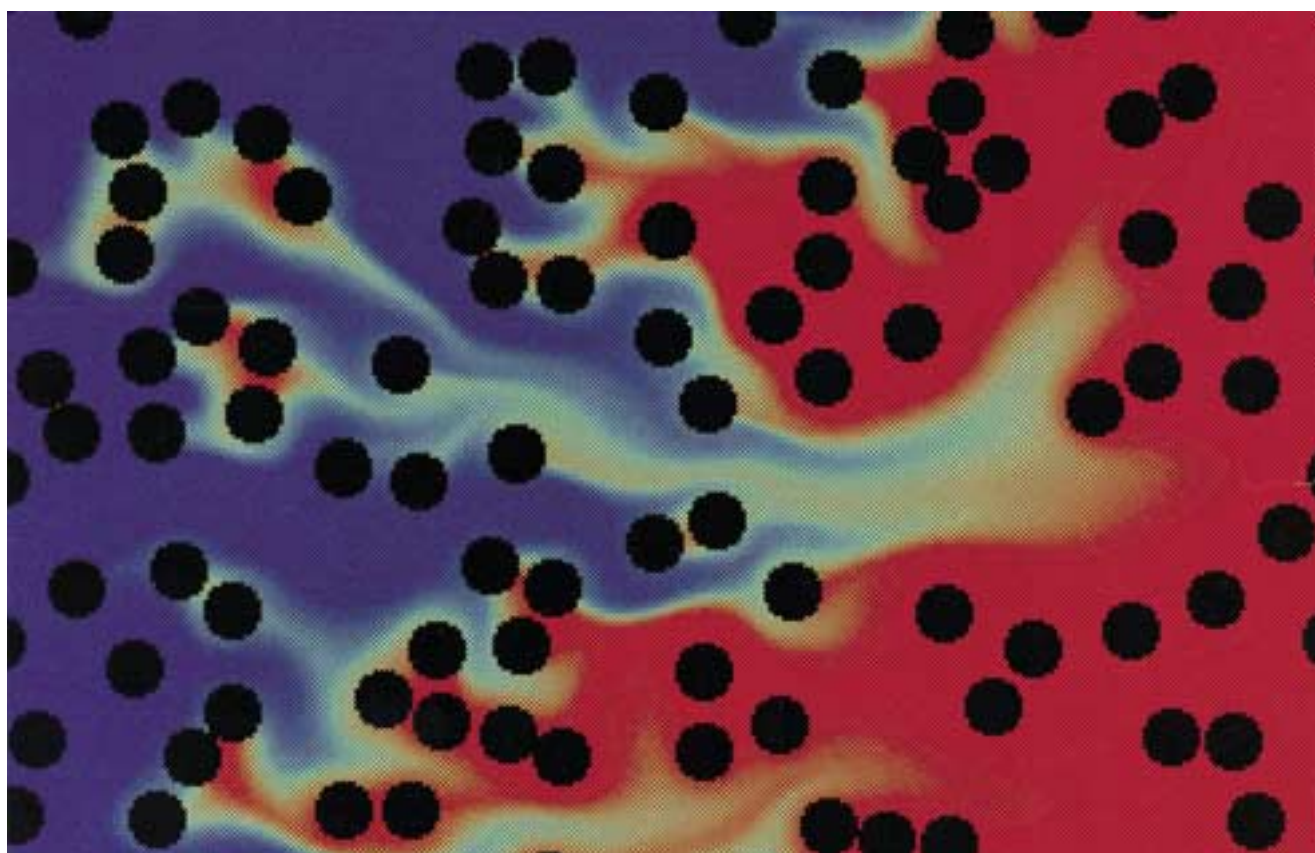
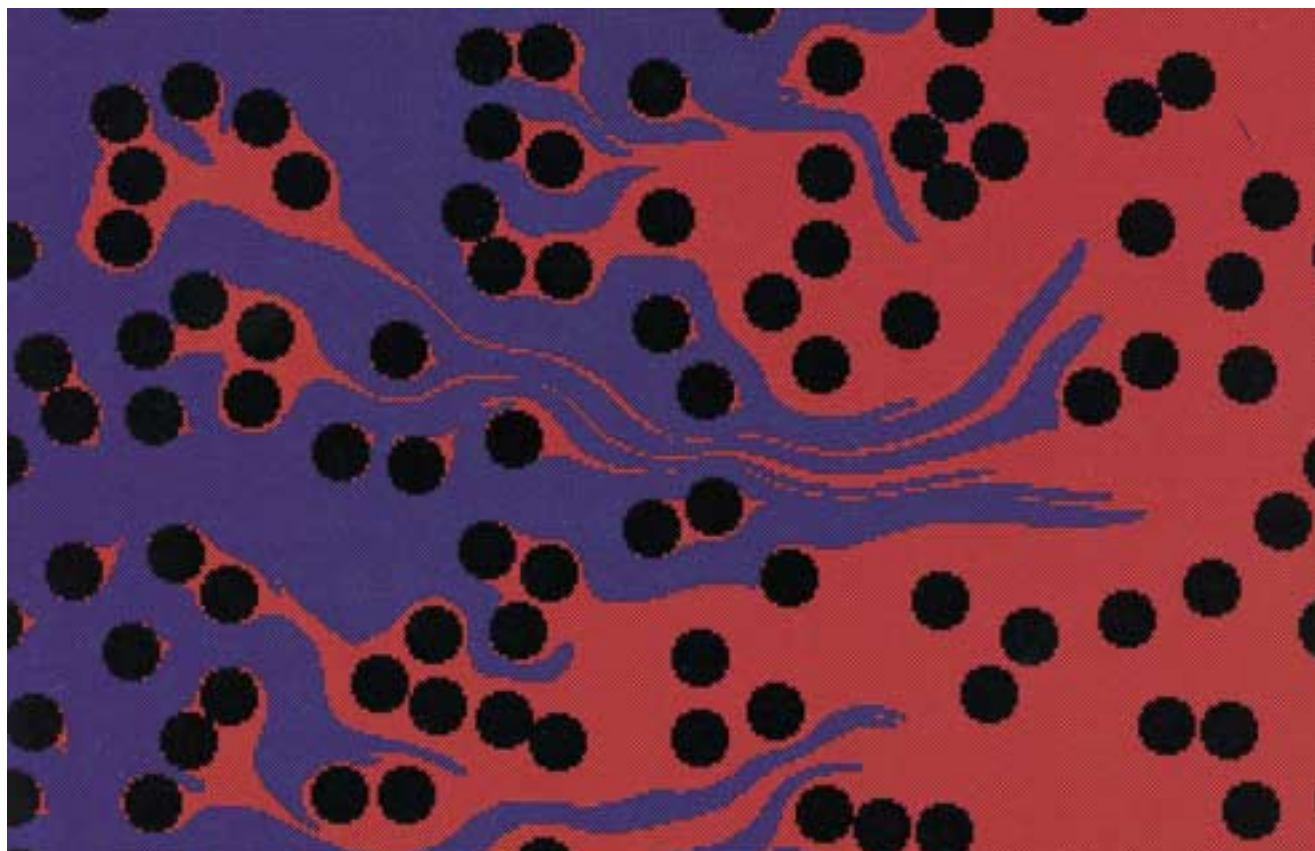
Enfin le mélange n'est pas le seul effet que produit la traversée d'un solide poreux : ce passage peut, au contraire, séparer des espèces et produire une eau pure. C'est ce que réalisent les bons filtres, qui ne sont que des matériaux poreux particuliers : ils arrêtent les particules trop grosses pour passer dans les pores, ou les molécules qui se lient aux parois. Les chimistes séparent ainsi les molécules dissoutes dans les solvants à l'aide de colonnes de chromatographie, où un empilement de grains aux propriétés chimiques particulières retient différemment les divers constituants : au lieu d'être arrêtés, comme dans un filtre, ces constituants sont plus ou moins retardés, selon l'intensité de leurs interactions avec les grains. L'examen des mécanismes de mélange et de séparation montre en quoi ces deux phénomènes sont bien des frères ennemis.

Diffusion et convection

Le mécanisme physique qui mélange le plus intimement deux matériaux est la diffusion moléculaire : dans un bol de café, ajoutons un peu de lait ; même si nous déposons celui-ci précautionneusement, dans un coin du bol, l'agitation naturelle des molécules assure le mélange. Cette diffusion moléculaire agit très lentement, car les trajectoires des molécules sont erratiques : les molécules se propagent en ligne droite jusqu'à ce qu'elles heurtent d'autres molécules ou la paroi du récipient qui les contient ; elles rebondissent et repartent en ligne droite, et ainsi de suite. En raison de cette progression en zigzag, les molécules s'éloignent très lentement du point où on les a placées. La distance atteinte augmente seulement comme la racine carrée du temps écoulé : une molécule met 100 fois plus de temps pour aller seulement dix fois plus loin ! Et une molécule d'eau, dans la tasse à café, ne franchit le rayon de la tasse qu'en plusieurs centaines d'heures, quand elle n'est mue que par l'agitation moléculaire.

Pourtant, ce mécanisme est essentiel, à la fin de tout mélange, car c'est le seul qui reste efficace jusqu'aux distances moléculaires. Quand on a mélangé macroscopiquement deux liquides au point de former des zones de petite taille composées des deux liquides, la diffusion parachève le mélange.

C'est ainsi que, pour obtenir rapidement un café au lait homogène, on agite le contenu du bol à l'aide d'une cuiller. Le mouvement désordonné du liquide, nommé convection, étire chaque goutte de lait, réduit ses dimensions transverses et favorise ensuite le mélange par diffusion moléculaire avec le café environnant. La séquence d'opérations ressemble beaucoup à celle qu'ef-



N. Marty, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland

1. DANS UN MILIEU POREUX, l'écoulement d'un liquide est fortement modifié par la diffusion moléculaire. N. Marty, du Bureau américain de normalisation, a simulé un écoulement d'un liquide bleu (circulant de gauche à droite) dans un liquide rouge qui emplissait initialement un solide poreux. Les plots noirs représentent les parties solides du

matériau poreux. Leur répartition aléatoire divise le liquide bleu en filets désordonnés. En l'absence de diffusion moléculaire (*en haut*), le liquide bleu se divise en lanières qui ne se mélangent pas parfaitement au liquide rouge. En présence de diffusion moléculaire (*en bas*), les divers filets se mélangent transversalement.

fectuent les boulangers quand ils pétrissent le pain : ils étirent et replient la pâte à plusieurs reprises, afin de disperser les levures responsables de la fermentation. Dans un liquide, le mélange est partout efficace si ces séquences s'opèrent de façon aussi désordonnée que possible : si l'on tournait lentement, toujours dans le même sens, sans induire d'échange entre le fond et la surface du bol, on risquerait de conserver de grandes zones non mélangées.

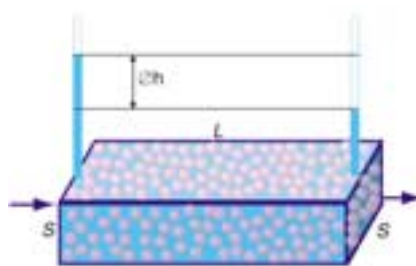
Étirement et repliement, mouvements désordonnés turbulents : voilà les ingrédients qui permettront un mélange intime final, par diffusion. Ces opérations sont efficaces quand le mélange a été optimisé selon la nature et les propriétés des constituants à mélanger : c'est le travail de l'ingénieur de génie des procédés ou du responsable de l'environnement dans l'industrie.

Du café aux poreux : le mélange figé

Toutefois, dans de nombreuses situations expérimentales, tels les mélanges de pâtes ou les écoulements lents dans les sols poreux, la turbulence est absente. Dans un matériau poreux, par exemple, la vitesse d'un liquide en chaque point ne varie pas, au cours du temps, car les frottements visqueux du liquide contre le solide régularisent les écoulements, amortissant quasi instantanément les fluctuations de vitesse qui engendrent la turbulence dans les écoulements libres.

Le mélange qui s'opère quand on injecte dans un tel milieu deux liquides ensemble, ou l'un après l'autre, est «figé». La répartition des vitesses n'évolue pas au cours du temps, mais cette vitesse du liquide diffère selon les points : les éléments de fluide subissent ainsi des déformations analogues à celles qui résultent des opérations d'étirement et de repliement dans les écoulements turbulents.

Caractériser et comprendre les mélanges dans les milieux poreux est nécessaire pour nombre d'applications. Par exemple, les hydrogéologues chargés du contrôle de la qualité de l'eau qui circule dans les nappes phréatiques doivent évaluer si des déchets chimiques ou radioactifs déposés au voisinage des nappes sont entraînés vers celles-ci. Ainsi, il y a une dizaine d'années, à la suite d'un accident de la route, un camion citerne avait perdu plusieurs mètres cubes de tétrachlorure de carbone dans la plaine d'Alsace. Quelques



2. HENRY DARCY, ingénieur en chef du corps des Ponts, alimenta en eau la ville de Dijon, au début du XIX^e siècle. À cette fin, il utilisa un cours d'eau qui traversait la ville dans un massif rocheux poreux, et il énonça la loi qui porte aujourd'hui son nom : le débit d'écoulement d'un liquide dans un solide poreux est proportionnel à la différence de pression entre l'entrée et la sortie du milieu, à la section S , et inversement proportionnel à la longueur L de matériau traversé et à la viscosité du liquide ; le coefficient de proportionnalité est la perméabilité du milieu. Elle se mesure... en darcys.

années plus tard, ce composé fut détecté dans des puits profonds d'une centaine de mètres, à plusieurs kilomètres en aval. Dans une polémique juridique qui dure encore, il fut argué que la pollution provenait non de cet accident, mais d'une usine située à proximité. La résolution du conflit nécessite que l'on modélise les conditions de transport des déchets, leur vitesse de migration et leur trajectoire en fonction de la nature du sol.

Une expérience classique de laboratoire reproduit de tels phénomènes dans de petits échantillons : on fait d'abord couler à vitesse moyenne constante V un liquide dans un cylindre poreux, tel un échantillon de roche ou de sol ; puis, pendant un court instant, on ajoute à l'entrée du solide une substance qui ne modifie pas l'écoulement et n'interagit pas avec le solide (colorant, composé fluorescent, traceur radioactif, etc.). On choisit cette substance afin d'en détecter la sortie à l'extrémité de l'échantillon poreux et de mesurer les variations de sa concentration au cours du temps.

Le traceur parcourt l'échantillon en un temps moyen de l'ordre de L/V , où L est la longueur du solide poreux. Toutefois, même si l'injection du traceur est brève, les molécules ne séjournent pas toutes pendant le même temps dans l'échantillon : à la sortie d'un matériau homogène, la courbe qui représente la concentration du traceur en fonction du temps a approximativement la forme d'une courbe en cloche, nommée courbe gaussienne. Cet étalement associé à un écoulement est nommé dispersion.

Pourquoi l'étudier alors qu'on s'intéresse aux mélanges ? Parce que le colorant qui se disperse dans le fluide environnant se mélange à lui : le volume où s'effectue ce mélange grossit au cours du temps, en raison du phénomène de dispersion.

Dans cette première expérience, nous avons supposé que la concentration en traceur était uniforme dans une section de l'échantillon poreux : nous n'avons examiné l'étalement que dans la direction de l'écoulement moyen, ce que l'on nomme la dispersion longitudinale. Si nous déposons maintenant une petite goutte de traceur au milieu de l'écoulement, nous voyons celle-ci s'étaler aussi bien dans la direction perpendiculaire à l'écoulement que parallèlement à celui-ci, mais de façon différente ; pour un fluide qui s'écoule dans un solide poreux, la

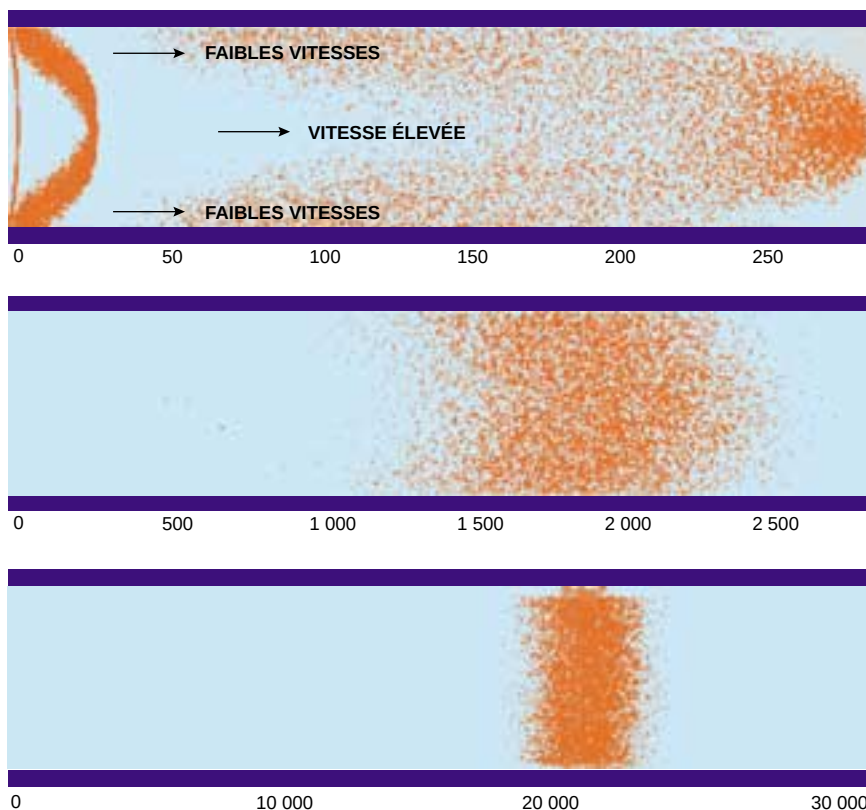
dispersion longitudinale diffère de la dispersion transverse, tandis que, dans les fluides simples, la diffusion moléculaire est identique dans toutes les directions (elle est «isotrope»). Dans le premier cas, une goutte sphérique de traceur s'allonge dans la direction de l'écoulement, tandis que, dans le second cas, elle reste sphérique.

La dispersion au microscope

Pourquoi cette différence? Afin d'en identifier la cause, utilisons un milieu transparent et un microscope qui permette une observation à l'échelle des pores. En pratique, nous employons un solide poreux composé de grains de verre entassés (du verre pilé, par exemple), où nous faisons passer un liquide transparent de même indice de réfraction que le verre. Le milieu, alors transparent, permet de suivre une tache de colorant. Un peu comme un bouchon à la surface d'un torrent hérissé de nombreux obstacles rocheux, une molécule du traceur entraînée par le liquide accélère, ralentit, est déviée en tous sens...

La figure 1 montre une simulation numérique à deux dimensions de cette expérience : les grains solides du matériau poreux sont représentés sous la forme de plots circulaires. Un fluide coloré est déplacé par un autre fluide d'une couleur différente : le front initialement plan prend une forme de plus en plus complexe, à mesure que les fluides traversent les pores et contournent les grains. On voit notamment le fluide envahissant se diviser en filets étroits, qui sont souvent vite étalés latéralement par l'effet de la diffusion moléculaire, si l'écoulement n'est pas trop rapide.

Si nous nous déplaçons à la vitesse moyenne imposée au liquide, nous verrions que tout se passe comme si chaque particule de fluide effectuait une marche au hasard dans l'échantillon : elle va parfois vers l'avant (plus vite que la vitesse moyenne), vers l'arrière (moins vite que le reste du liquide), tout à fait comme des molécules ayant un mouvement d'agitation thermique. Cette marche au hasard qui se superpose à un déplacement d'ensemble explique la différence des temps de traversée du milieu (on a le même effet pour un ensemble d'ivrognes qui s'éloigneraient d'un café, en effectuant chacun une série de pas de directions imprévisibles et indépendantes).



3. UNE LIGNE VERTICALE DE COLORANT injectée dans un tube fin se disperse par un mécanisme hydrodynamique identifié par le physicien britannique Geoffrey Ingram Taylor. L'image supérieure montre trois états de la ligne, déformée par l'écoulement du liquide, à des temps successifs 1, 10 et 100 (mesurés en nombre de pas de la simulation numérique). Les autres images, à des échelles différentes, montrent l'étalement à des temps respectivement 1 000 et 10 000. La différence d'échelle horizontale entre les trois figures donne l'impression que l'étalement diminue, mais la goutte continue de s'étaler (comme la racine carrée de la distance parcourue).

Si l'on injecte initialement une goutte de colorant dans un solide poreux et si on laisse le liquide circuler suffisamment, la distribution des distances parcourues par le traceur prend une forme de courbe gaussienne, comme si la goutte s'étalait par diffusion moléculaire dans un volume de fluide immobile. Cependant cette répartition gaussienne n'apparaît qu'après un nombre suffisant de changements de direction, c'est-à-dire après un nombre suffisant de pas dans la marche au hasard. Au tout début du processus, quand la distance de déplacement est inférieure à la taille d'un pore, la répartition des distances résulte simplement de la répartition des vitesses dans l'écoulement.

L'existence de ces deux régimes est illustrée par une expérience récente de Jacques Leblond et de Luc Lebon, à l'École supérieure de physique et de chimie de Paris : à l'aide d'une technique de résonance magnétique nucléaire, ils suivent le déplacement des molécules d'un liquide sur une distance comprise entre une faible

fraction de la taille de pore et quelques tailles des pores. Quand le temps de mesure est plus court que le temps moyen de parcours d'un pore par le liquide, la mesure révèle la distribution des vitesses dans les canaux. Lorsque le trajet moyen devient de l'ordre d'une dizaine de diamètres de pore, la répartition des vitesses est presque gaussienne, et centrée sur la distance parcourue à la vitesse moyenne dans l'échantillon. Enfin, aux déplacements intermédiaires (deux pores environ), la courbe que représente le nombre de molécules en fonction de la vitesse présente deux bosses : les particules les plus rapides ont parcouru plusieurs diamètres de pores et ont eu des vitesses très différentes, mais les plus lentes sont restées piégées à l'intérieur du canal où elles étaient initialement.

Ces expériences expliquent ainsi l'existence des deux dispersions longitudinale et transverse. La différence quantitative entre ces deux dispersions, qui résulte de l'anisotropie du problème, reste toutefois un problème ouvert.

Des capillaires de Poiseuille à ceux de Taylor

Une autre forme de dispersion dans les solides poreux a une origine hydrodynamique. Les travaux du médecin Jean-Louis Poiseuille, au XIX^e siècle, ont montré que, dans un tube de diamètre suffisamment petit pour que la turbulence soit absente, un vaisseau sanguin de faible diamètre, par exemple, la vitesse est nulle aux bords du tube et maximale au centre.

Ce phénomène provoque un étalement longitudinal d'un segment de colorant injecté dans l'écoulement et initialement localisé suivant un diamètre du tube : en l'absence de diffusion moléculaire, la ligne de colorant dessine une parabole qui s'étire au cours du temps.

L'effet d'éirement longitudinal par les différences de vitesse est cependant contrebalancé en partie par la diffusion moléculaire dans la direction perpendiculaire à l'écoulement, qui tend à homogénéiser la distribution du colorant dans la section du tube. La figure 3 montre ainsi le résultat du jeu combiné de ces deux effets. Aux temps courts (*figure supérieure*), le profil parabolique s'étale de plus en plus transversalement sous l'effet de la diffusion. Il disparaît aux temps assez longs, et la concentration en colorant le long du tube devient une gaussienne. De plus, la largeur de cette gaussienne augmente proportionnellement à la racine

carrée du temps, comme pour les autres mécanismes que nous avons examinés. D'une image à l'autre, les distributions paraissent de plus en plus étroites, car la largeur augmente plus lentement que le temps de trajet.

Où est la marche au hasard, dans ce problème ? La durée d'un pas de marche au hasard est ici le temps que met une molécule de fluide (ou de traceur) pour « oublier » sa vitesse à un instant donné. Dans ce cas, c'est le temps qu'il faut pour que, par diffusion transverse à l'écoulement, les molécules aillent du centre de l'écoulement jusqu'au bord ou inversement.

À l'Université de Cambridge, le grand mécanicien des fluides Geoffrey Ingram Taylor, qui avait aussi réalisé les premières études du mélange dans des tubes capillaires, a montré que le coefficient de dispersion hydrodynamique qui caractérise cet étalement est inversement proportionnel à la diffusion moléculaire : la dispersion est d'autant plus forte que la diffusion est faible.

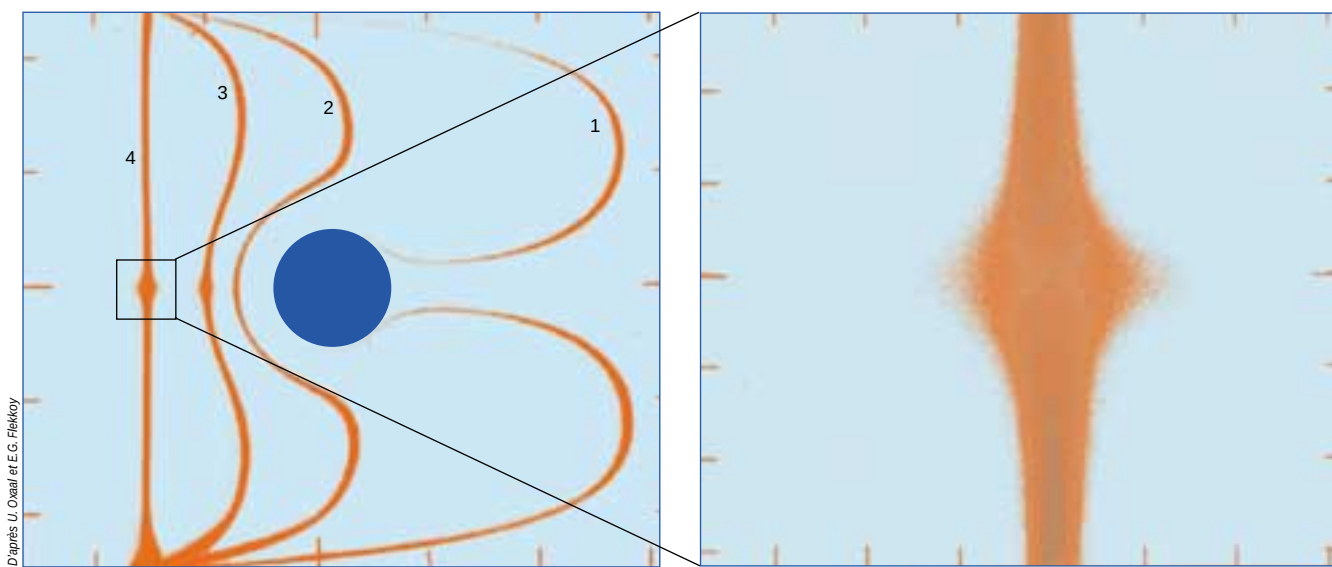
Dans les cas précédemment examinés, la diffusion, prenant le relais de la convection aux petites distances, favorise l'étalement. Dans le cas présent, si la diffusion moléculaire est très efficace, elle fera sans cesse passer les molécules de colorant de la proximité des parois vers la partie centrale du tube : l'effet sur l'étalement des vitesses créé par l'effet Poiseuille sera très limité. En revanche, si la diffusion moléculaire est faible, les particules de traceur

resteront longtemps à une même distance de l'axe. L'éirement produit par le profil parabolique de vitesse, et la dispersion, seront importants.

Cette dispersion de Taylor intervient dans de nombreux phénomènes naturels, telle l'homogénéisation du sang dans les artères. Elle intervient beaucoup moins dans les milieux poreux habituels, à trois dimensions, tels des empilements de grains : si l'on trouve encore des profils proches de celui de Taylor à l'intérieur des canaux d'écoulement, les trajectoires des particules fluides sont plus complexes quand on passe d'un canal à l'autre, et ne suivent plus nécessairement les parois. Les molécules de fluides qui arrivent à un embranchement peuvent choisir l'une ou l'autre des branches ; au cours de ce parcours, une molécule qui se déplace rapidement, parce qu'elle est au centre d'un écoulement, dans un pore, peut se retrouver contre la paroi, dans le pore suivant, où elle se déplace alors lentement (*voir la figure 5*). L'effet du profil Poiseuille est limité à la longueur d'un canal et s'en trouve donc très diminuée.

Dans les roches

Les mécanismes que nous avons considérés sont surtout valables pour de petits échantillons relativement homogènes. En analysant la dispersion, on obtient alors des informations sur la structure à petite échelle des milieux poreux.



4. UNE LIGNE DE COLORANT injectée dans un écoulement (de gauche à droite) a été déformée par un cylindre (en bleu foncé) d'axe perpendiculaire au plan de la figure (1). Quand on inverse le sens de l'écoulement, après quelque temps, la ligne (en rouge) reprend progressivement sa forme initiale (positions successives

2, 3, 4), à l'exception de la partie centrale, qui a été étirée davantage et sur laquelle l'influence de la diffusion moléculaire a été supérieure : les molécules de colorant s'étant mélangées aux molécules du fluide sur une distance supérieure, le mélange a été notable.

Toutefois l'observation d'une coupe de terrain, sur le bord d'une autoroute, montre que le sol est rarement homogène : il est souvent constitué de bandes qui résultent d'accumulations successives de sédiments. Les propriétés varient fortement d'une zone à l'autre, et des liquides s'écoulent dans les diverses couches à des vitesses différentes. La dispersion diffère alors beaucoup de celle dans un milieu poreux homogène.

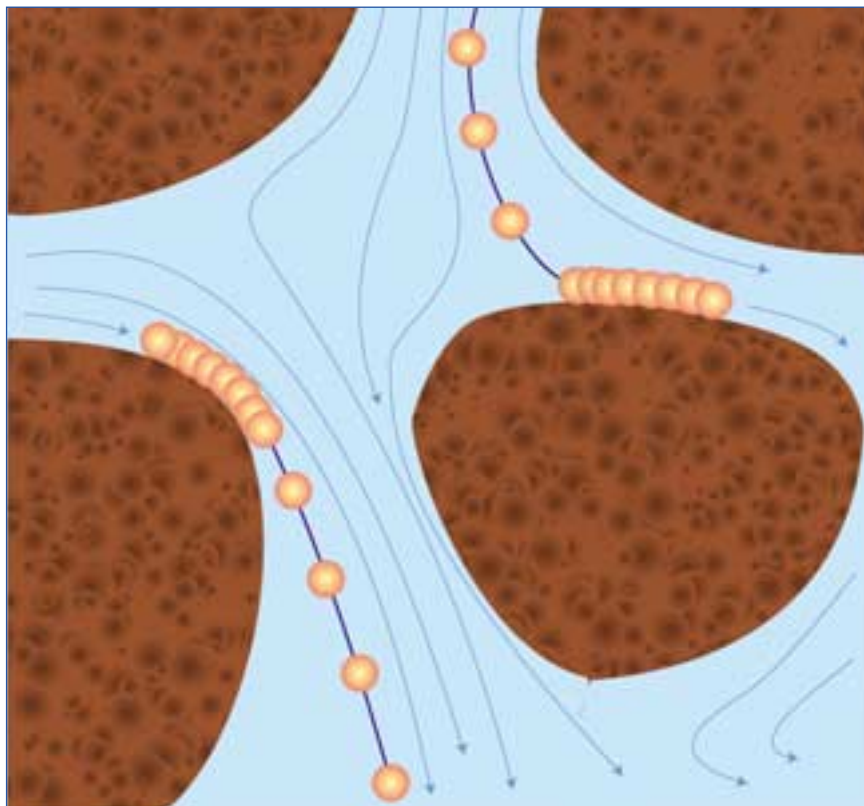
Notamment la loi de dispersion gaussienne s'applique rarement. Parfois un polluant se propage beaucoup plus vite qu'on ne le prévoyait. C'est le cas quand il existe des canaux de forte perméabilité, où l'écoulement est beaucoup plus rapide que l'écoulement moyen, comme dans les massifs calcaires où des dissolutions créent des zones où l'écoulement est direct. Parfois, au contraire, un polluant reste piégé très longtemps dans des poches contenant du liquide au repos, et il n'est relargué que bien après le temps moyen de transit. On parle dans ces deux cas de dispersion anormale.

Les descriptions précédentes ne s'appliquent donc plus que par morceaux dans ces situations pratiques de terrain, et les résultats globaux diffèrent généralement du modèle de dispersion gaussienne classique. Notamment, pour de longs trajets dans ce type de milieu, les coefficients de dispersion calculés (le rapport du carré de l'étalement au temps d'écoulement) augmentent avec la distance.

On comprend ces effets à partir du cas très simple d'un écoulement parallèle à des nappes poreuses, telles que la perméabilité varie de tranche en tranche. L'écoulement est le plus rapide là où la perméabilité est supérieure. Si l'on injecte ainsi un traceur dans un milieu formé de deux strates parallèles en contact, où l'eau s'écoule à des vitesses différentes V_1 et V_2 , la différence des distances parcourues après un temps donné (elle représente l'étalement du traceur) augmente proportionnellement au temps et non plus à la racine du temps comme dans un poreux homogène. Un tel processus résulte d'une convection à différentes vitesses d'une couche à l'autre.

Mélanges et instabilités

Il n'y a d'ailleurs pas besoin d'avoir des couches de terrain différentes pour créer des écoulements variables par



5. DES MOLÉCULES qui se déplacent rapidement, au centre de l'écoulement dans un pore (en haut), parce qu'elles se trouvent au centre de l'écoulement, peuvent être ralenties, dans le pore suivant, au contact d'un grain. Inversement, des molécules qui se déplaçaient lentement (en bas à gauche), peuvent accélérer. L'effet de dispersion de Taylor n'a donc pas le temps de s'établir.

tranche. Imaginons le cas d'un milieu poreux rempli d'un liquide A que l'on pousse en injectant à la suite un second liquide B miscible au premier. Les deux liquides se mélangent localement, et la frontière nette entre les deux liquides est remplacée par une zone intermédiaire dont l'épaisseur croît lentement au cours de l'écoulement. Cependant, si le liquide A est plus visqueux que le liquide B et si l'injection est rapide, alors le liquide B pénètre beaucoup plus rapidement sous la forme de doigts dans le milieu A qui le précède : de tels effets de digitation sont classiques en mécanique des fluides et résultent de l'instabilité du front entre les deux liquides. Une fois un doigt formé, la dispersion transverse au doigt favorise naturellement le mélange, comme dans la dispersion de Taylor. L'interpénétration pourra être inégale : lorsqu'un doigt prend de l'avance, il limite la croissance des autres.

Une autre instabilité, favorisant également le mélange, intervient quand deux couches liquides superposées s'écoulent horizontalement dans un matériau poreux. Normalement le front

de séparation s'élargit uniquement en raison de la dispersion transverse à l'écoulement, mais, si le liquide supérieur est plus dense que le liquide inférieur, la gravité tend à faire redescendre le premier liquide en doigts et à faire monter le second. L'effet de la dispersion transverse est notablement amplifié par un tel échange.

Notons cependant que de telles instabilités produisent une interpénétration des fluides sous la forme de doigts d'assez grandes dimensions, mais ne permettent pas, par leur seule action, d'obtenir un mélange efficace à toutes les échelles. L'interpénétration pourra être inégale : lorsqu'un doigt prend de l'avance, il limite la croissance des autres. D'autres mécanismes doivent intervenir pour fractionner encore le mélange jusqu'aux petites échelles, où la diffusion moléculaire devient efficace.

Renverser le mélange

Comment étudier les milieux poreux réels, alors que leur structure est inconnue. Une technique récemment imaginée donne des indications précieuses. Les écoulements lents de fluides vis-

queux sont généralement réversibles : si l'on filme un écoulement et qu'on passe ensuite le film à l'envers, on voit un autre écoulement compatible avec les lois de la mécanique des fluides (à condition de négliger la diffusion moléculaire qui, elle, provoque toujours un mélange irréversible ; toutefois celle-ci agit lentement, de sorte qu'elle ne détruit pas toujours la réversibilité).

C'est le cas dans une expérience modèle à deux dimensions, réalisée par Eric Flekkoy et ses collègues de l'Université d'Oslo : on déforme une ligne de colorant en l'entraînant par un écoulement vers un plot cylindrique. Une fois que la ligne de colorant s'est déformée, on inverse le sens de l'écoulement, et l'on retrouve des positions identiques à celles de l'aller (voir la figure 4). Finalement on obtient une ligne presque droite et presque aussi fine qu'au départ, sauf dans la partie centrale : c'est là que l'étirement de la ligne a été maximal. Lorsque la ligne retrouve sa forme et sa longueur initiales, l'étalement transversal dû à la diffusion moléculaire et acquis pendant la phase d'étirement est fortement amplifié.

Dans un milieu poreux réel, la présence de nombreux grains multiplie les étirements et les divisions du front d'interpénétration des fluides. L'effet de mélange de la diffusion moléculaire s'en trouve amplifié. Qu'en est-il alors du front de séparation entre deux fluides injectés successivement dans un milieu poreux : ce front de séparation redeviendra-t-il de plus en plus étroit si l'on inverse le sens de l'écoulement ?

Injectons, par exemple, du colorant dans un écoulement et inversons le sens de ce dernier après un temps T . Comment le colorant sera-t-il réparti après le temps $2T$? Si les particules suivaient exactement les mêmes lignes de fluide, mais dans le sens inverse, on obtiendrait un «écho de dispersion» très peu étalé, où on retrouverait concentrées toutes les particules de traceur. C'est effectivement ce que l'on trouve si le temps T est court (quand le liquide parcourt en moyenne deux ou trois canaux). Toutefois, si le temps T est long par rapport au temps de parcours d'un pore, les phénomènes entre T et $2T$ sont indépendants des phénomènes entre 0 et T : le front de dispersion se déforme comme si l'on avait laissé couler le liquide continûment dans la même direction pendant le temps $2T$. Notre collègue Patrick Rigord a fait l'expérience et a observé que cette perte de mémoire d'une ligne de courant entre l'aller et le retour est presque complète dès que le liquide a parcouru une distance de l'ordre d'une dizaine de diamètres de grains, dans un solide poreux homogène.

On se représente mieux cet effet en pensant à ce qui se passerait dans un labyrinthe : à chaque bifurcation, une petite déviation latérale aléatoire peut nous emmener dans un couloir ou un autre, et séparer irrémédiablement des trajectoires en faisant perdre la mémoire du chemin déjà parcouru.

Il existe cependant des cas où les liquides gardent la mémoire plus

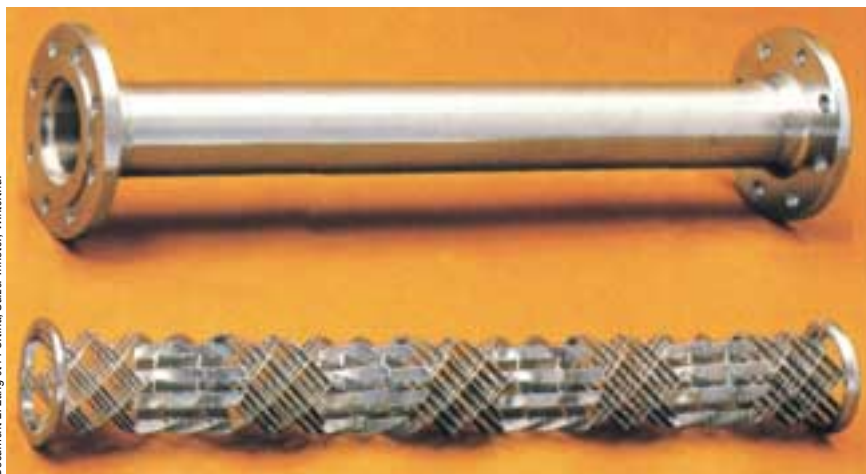
longtemps et où la réversibilité apparaît : ainsi pour l'écoulement parallèle dans des couches de perméabilités différentes, l'étalement du front de séparation entre les liquides est en grande partie réversible. En effet, la majeure partie de l'étalement vient de la différence de vitesse d'une couche à une autre : quand on inverse le sens de l'écoulement, les particules situées dans une couche d'écoulement rapide (celles qui sont allées le plus loin) reviennent vers leur point de départ à vitesse supérieure. Elles l'atteindront en même temps que les particules d'une couche «lente», qui parcourent moins de chemin, mais se déplacent plus lentement. La seule condition à cette réversibilité est qu'il n'y ait pas trop d'échange de particules de fluide entre couches par diffusion transverse : autrement dit, les particules doivent garder la mémoire de la couche de terrain où elles étaient initialement.

De telles expériences, d'«écho de dispersion», permettent de distinguer les différents types d'hétérogénéités : celles de grande taille, qui donnent des effets réversibles, et celles de petite taille et distribuées aléatoirement, qui donnent la même contribution à la dispersion quand on inverse le sens de l'écoulement (ce ne sont naturellement que les deux cas extrêmes).

Les échos de dispersion pourraient également permettre de sonder la distribution de perméabilités d'un massif poreux où l'on n'a accès que par une extrémité : c'est le cas, par exemple, dans un forage pétrolier. Les mesures que l'on y fait, les diagraphies, introduites par les frères Schlumberger dans les années 1920, ne sont-elles pas un des outils les plus utilisés pour la recherche pétrolière ? Des mesures de dispersion comme celles que nous venons d'examiner représenteraient une extension possible de telles techniques.

Tuyaux et mélange

Le déplacement conjoint de deux fluides miscibles initialement séparés dans un solide poreux conduit généralement, par dispersion, à l'apparition et à la croissance d'une zone de mélange. Cette idée simple sous-tend le fonctionnement de dispositifs pratiques et bien adaptés au mélange de fluides visqueux dans des écoulements qu'on ne peut rendre turbulents.



6. LES MÉLANGEURS STATIQUES de type «Sulzer» contiennent une âme constituée de nombreuses lames d'orientations variées qui découpent et dévient les liquides dans toutes les directions. Deux liquides injectés simultanément, mais complètement séparés, à l'entrée du mélangeur sont divisés en filets de plus en plus fins, qui sont mêlés, jusqu'à ce que la diffusion moléculaire vienne parfaire le mélange.

Les «mélangeurs statiques» sont bien adaptés aux problèmes de mélange des fluides complexes et visqueux : ils ne contiennent pas de pièces mobiles et ne sont en fait que des tuyaux à l'intérieur desquels sont disposés un ensemble de lamelles d'orientations variées (voir la figure 5). Deux écoulements de fluide différents, injectés côte à côte sont divisés et déviés par les lamelles, ce qui finit par les entremêler de plus en plus finement, jusqu'à ce que le mélange soit bon : ce processus ressemble à la dispersion transverse, où les filets de fluide sont divisés et entremêlés au fur et à mesure des passages d'un pore à un autre. Évidemment l'espacement entre les lamelles sera pris bien supérieur à la taille des pores dans une roche : sinon la dissipation d'énergie dans l'écoulement serait excessive, surtout dans le cas de fluides visqueux. On fait d'ailleurs une pierre deux coups, car on augmente simultanément la dispersion longitudinale et la dispersion transverse, et la largeur de la zone mélangée croît beaucoup plus rapidement.

Ces mélangeurs servent aussi à mélanger des suspensions de grains solides. En général, les méthodes de mélange des liquides s'appliquent mal aux mélanges granulaires secs et provoquent plutôt des ségrégations. En mettant les grains en suspension dans des liquides, on réalise des pâtes auxquelles on applique des techniques de mélange classique, quitte à sécher ensuite le mélange.

Séparation dans un poreux

Nous avons annoncé que les milieux poreux séparent parfois, au lieu de mélanger. C'est le cas en filtration, en microfiltration ou en ultrafiltration, où l'on bloque respectivement le transport de petites particules, de grosses molécules ou de virus. De façon générale, les milieux poreux sont utilisés chaque fois que l'on veut séparer des molécules différentes, en chimie et en biologie.

Ainsi, le chimiste qui effectue une séparation de molécules par chromatographie en phase liquide réalise en apparence une expérience de dispersion : il injecte un petit volume de mélange à séparer à l'entrée d'un milieu poreux (la colonne de chromatographie) où il établit un écoulement régulier d'un fluide porteur

(l'éluant). Comme pour la dispersion, un détecteur placé en fin de colonne analyse les variations des concentrations en divers composés dissous : on observe une succession de pics, souvent étroits, qui correspondent chacun à un composé du mélange.

Qu'est devenue la dispersion? Elle est toujours là, mais c'est un parasite qu'on cherche à minimiser en réduisant la longueur des pas de la marche au hasard pour les composés du mélange dans le solide poreux. Les résultats précédents montrent que, à cette fin, le poreux doit être aussi homogène que possible, il doit présenter aucune strate, ni aucun chemin préférentiel, ce qui pose de difficiles problèmes techniques ; en outre, il doit être composé de grains très petits (quelques micromètres de diamètre). Des canaux aussi fins présentent une forte résistance à l'écoulement : on doit parfois appliquer des pressions de quelques centaines d'atmosphères pour obtenir une vitesse d'écoulement notable. Une vitesse d'écoulement trop faible finirait par rendre sensible l'influence de la diffusion moléculaire et conduirait à des temps de mesure prohibitifs. Une vitesse excessive augmenterait la dispersion.

Ainsi, dès qu'on regarde l'écoulement dans une colonne chromatographique à une échelle un peu plus grande que la taille des grains microscopiques qui emplissent la colonne, on constate qu'il est parfaitement uniforme sur toute la section de la colonne, et non parabolique, comme dans un tuyau simple.

La chromatographie hydrodynamique permet de séparer des particules de tailles variables en suspension dans un liquide que l'on fait circuler dans un milieu poreux dont les canaux sont plus larges que la taille des particules. Ce sont paradoxalement les plus grosses particules qui arrivent en tête, parce qu'elles doivent emprunter les canaux les plus larges où la vitesse est grande ; les plus petits objets «perdent du temps» dans les canaux étroits ou dans les zones de faible vitesse, près des parois.

Mélangeurs statiques industriels et colonnes de séparation chromatographique ne sont donc pas si différents, malgré leurs objectifs opposés : ils diffèrent surtout par la taille des pores, la façon dont les fluides sont injectés et l'interaction des composants en écoulement et des parois solides.

Le désordre «figé» d'un milieu poreux ou d'un mélangeur statique peut donc assurer le mélange tout comme le désordre perpétuellement changeant d'un écoulement turbulent. Pour mieux comprendre la différence de fonctionnement entre ces deux situations, revenons à l'exemple du mélange que crée la petite cuiller dans le bol de café au lait, et qui est bien adaptée aux fluides peu visqueux. Ce mélange turbulent fait intervenir de multiples échelles de tailles caractéristiques, allant de la taille globale de l'écoulement (celle du bol) à celle des plus petits tourbillons. Pour obtenir un bon mélange, on doit veiller à ce que cette interpénétration soit réalisée jusqu'aux plus petites échelles, où la diffusion assure le mélange.

C'est la combinaison de ces mouvements désordonnés qui conduit à un mélange efficace. Dans un milieu poreux homogène, le mélange est dominé par la seule taille caractéristique des grains et sera peu efficace, ce qui permettra d'obtenir de bonnes séparations en jouant sur l'interaction variable des espèces à séparer et des grains du milieu. En revanche, dans les solides poreux usuels, il existe des hétérogénéités à des échelles de tailles supérieures à celle des grains, qui réalisent une interpénétration des fluides sur une échelle supérieure, ce que font également les écoulements turbulents.

Bien que l'on soit encore loin d'un modèle universel du mélange, que nous avons nommé GUM (pour «grande unification du mélange»), dans un congrès international de notre discipline, certaines caractéristiques communes applicables à des systèmes très différents permettent de mieux comprendre et d'améliorer les opérations de mélange... et de séparation.

Étienne GUYON est directeur de l'École normale supérieure, à Paris. Jean-Pierre HULIN est directeur de recherche au CNRS ; il travaille au Laboratoire Fast de l'Université Paris Sud, à Orsay.

Étienne GUYON et Jean-Pierre HULIN, *Granites et fumées, un peu d'ordre dans le mélange*, Éditions Odile Jacob, 1998.

U. OXAAL, E.G. FLEKKOY et J. FEDER, *Irreversible Dispersion at a Stagnation Point : Experiments and Lattice Boltzmann Simulations*, in *Physical Review Letters*, vol. 75, p. 3514, 1994.
