

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

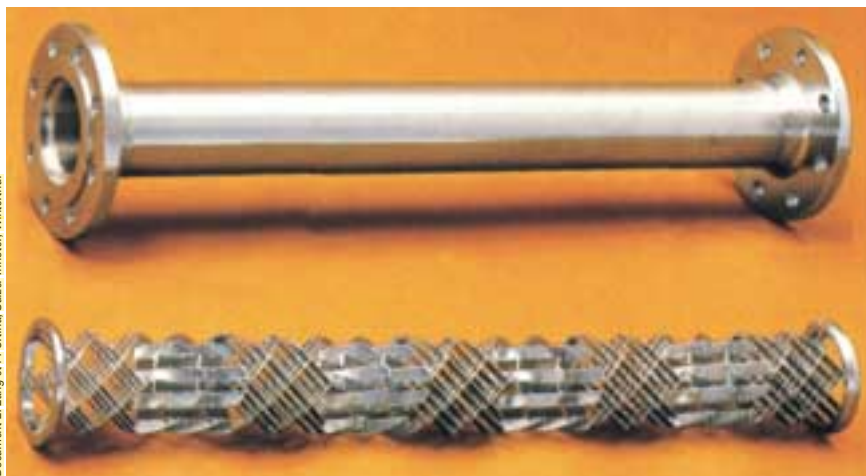
longtemps et où la réversibilité apparaît : ainsi pour l'écoulement parallèle dans des couches de perméabilités différentes, l'étalement du front de séparation entre les liquides est en grande partie réversible. En effet, la majeure partie de l'étalement vient de la différence de vitesse d'une couche 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 diagrapies, 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.