

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 deviendra-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

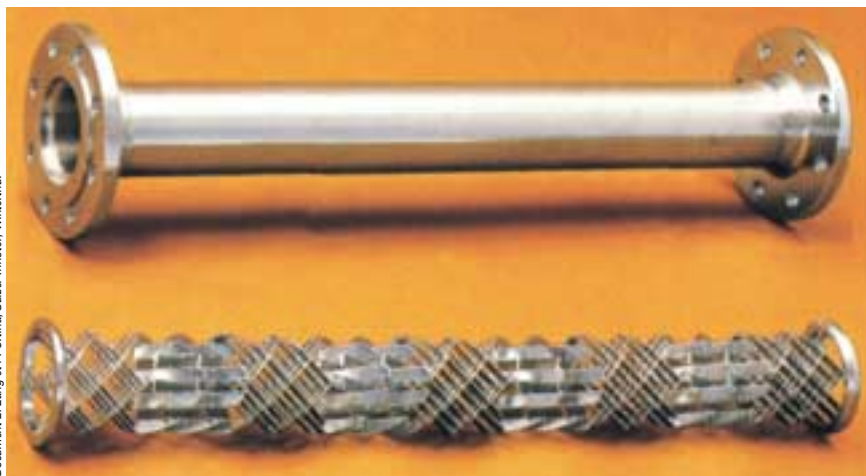
longtemps et où la réversibilité apparaît : ainsi pour l'écoulement parallèle dans des couches de perméabilités différentes, l'étalement du front de séparation entre les liquides est en grande partie réversible. En effet, la majeure partie de l'étalement vient de la différence de vitesse d'une couche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

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.
