

Mélange réversible

Fabian Hoffman, Jean Spièce,

Dans la vie courante, on connaît peu de situations dans lesquelles deux liquides mélangés peuvent être « démélangés » ! On pourrait même s'interroger sur la possibilité d'un tel phénomène, puisqu'il est assez rare d'observer, par exemple, que le lait se sépare du café !

Pourtant, notre expérience montre que la réponse n'est pas clairement si évidente!

Nous disposons une petite tache de glycérol coloré dans du glycérol pur, translucide ($C_3H_8O_3$) placé entre deux cylindres concentriques. En appliquant une rotation au cylindre du centre alors que le cylindre extérieur reste immobile, la tache colorée se disperse dans le glycérol pur. Et en appliquant la rotation inverse, on se rend compte que la tache réapparaît comme si rien ne s'était passé !

Pour expliquer ce phénomène, il convient d'introduire une grandeur physique assez intuitive : la **viscosité** (μ), qui s'exprime en Pascals-secondes : [Pa.s]. En mécanique des fluides, la viscosité est une caractéristique d'un fluide, qui dépend des propriétés intrinsèques de ce fluide et éventuellement de la pression et de la température. Elle indique la résistance du fluide à s'écouler, et peut également être vue comme une mesure des forces de friction intervenant dans le fluide (fig. 1). Par exemple, la viscosité de l'eau est de l'ordre de 10^{-3} Pa.s, celle de l'air vaut environ 10^{-5} Pa.s et celle du glycérol que nous avons utilisé est d'environ 1,5 Pa.s.

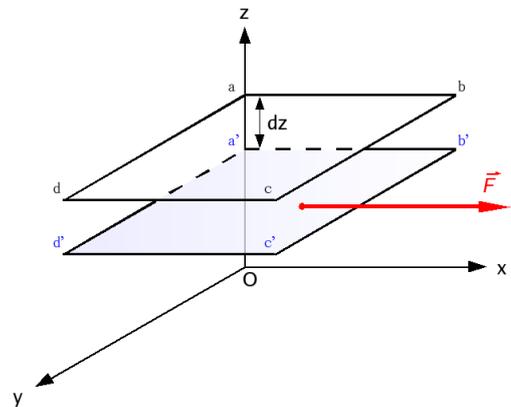


Fig. 1 - Si deux couches de fluide sont en mouvement l'une par rapport à l'autre (leur différence de vitesse est notée dv), alors la viscosité crée une force de friction entre ces deux couches, directement proportionnelle à la viscosité selon la formule : $F = \mu S \frac{dv}{dz}$, où S est la surface des deux couches

Voyons maintenant comment la viscosité du glycérol permet d'observer une expérience comme la nôtre.

Une approche analytique consisterait à écrire l'équation du mouvement pour les fluides (qui est une application de la seconde loi de Newton $F = ma$ dans le cas d'un fluide), et de vérifier si cette équation est *inchangée* si on remplace la vitesse par son opposé. En effet, on cherche à savoir si notre écoulement est réversible, c'est-à-dire s'il est possible de mettre le fluide en mouvement dans un sens, puis dans l'autre. Cela sera possible si les équations qui donnent l'évolution au cours du temps de la vitesse sont exactement les mêmes quel que soit le sens de v . L'équation en question s'appelle l'**équation de Navier-Stokes**, et il s'avère que dans le cas où la viscosité est grande, on peut négliger les termes de cette équation qui ne sont pas invariants si on change le sens de la vitesse, ce qui explique que la (quasi-)réversibilité d'un écoulement soit possible pour les liquides très visqueux.

Cependant, on peut également comprendre ce phénomène par une approche un peu plus phénoménologique.

Concrètement, on peut donner deux processus qui tendent à nous empêcher d'observer des mélanges réversibles : la **diffusion moléculaire** et la **turbulence**.



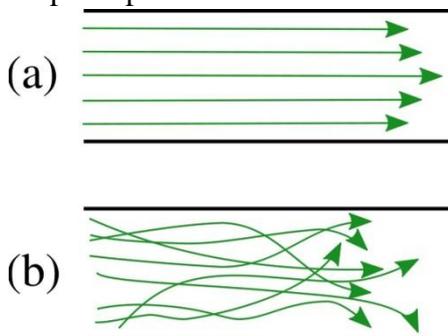
La diffusion moléculaire est un phénomène très courant qui tend à rendre homogène tout fluide qui ne l'est pas (Fig. 3). Ainsi, lorsque nous déposons une goutte d'encre dans de l'eau, par exemple, on observe très rapidement que l'encre se disperse dans l'eau alors même qu'on ne lui a communiqué aucun mouvement.

La **physique statistique** (qui est une théorie permettant de déduire beaucoup de propriétés macroscopiques de la matière à partir de calculs statistiques concernant le mouvement des atomes et molécules) permet d'expliquer ce phénomène à partir de deux résultats simples : les molécules dans un liquide sont en mouvement les unes par rapport aux autres, et statistiquement leur mouvement doit être uniforme (c'est-à-dire que spontanément, les mouvements des molécules se comportent de sorte que le mouvement global soit nul). Mais alors, comment se fait-il que dans le glycérol, la diffusion soit si lente, de sorte que notre expérience soit possible ? C'est la viscosité qui intervient encore ici : plus la viscosité du liquide est grande, plus les mouvements au sein du liquide sont « figés », c'est-à-dire que moins d'échanges seront possibles entre le colorant et le solvant, et que la diffusion sera moins importante.

La diffusion peut être quantifiée par un **coefficient de diffusion** (D), qui mesure le « déplacement quadratique moyen » des molécules du fluide via. Einstein a déduit des lois de la physique statistique une relation qui montre en effet que la viscosité tend à diminuer la vitesse de diffusion :

$$D = \frac{R}{6\pi N a} \cdot \frac{T}{\eta r}$$

C'est donc bien la viscosité du glycérol qui permet que la tache de colorant qu'on y injecte ne se disperse pas immédiatement.



La turbulence est plutôt un effet dû au mouvement qu'on impose au fluide, qui permet d'expliquer que si on tourne trop vite les cylindres, on ne puisse revenir à la situation de départ. On parle de **régime turbulent** lorsqu'un écoulement est irrégulier et difficile à prévoir, par opposition au **régime laminaire** dans lequel le fluide s'écoule de manière ordonnée (voir Fig. 2). Pour qu'un écoulement soit réversible, il faut bien évidemment que l'écoulement soit laminaire !

Fig. 2 – Un écoulement laminaire (a) et un écoulement turbulent (b)

Or la mécanique des fluides fournit un nombre sans dimension physique, appelé **nombre de Reynolds**, qui permet de déterminer si un écoulement est plutôt laminaire ou turbulent, en fonction de la viscosité : $Re = \frac{\rho UL}{\mu}$, où ρ est la masse volumique du

fluide, U la vitesse de l'écoulement, L sa longueur caractéristique et μ la viscosité. Généralement, on considère que si $Re < 1$, l'écoulement est laminaire et si $Re > 2000$, l'écoulement est turbulent (entre ces deux valeurs, on parle d'écoulement transitoire puisque le régime n'est ni strictement laminaire, ni strictement turbulent).

On a donc bien que si la viscosité est suffisamment grande par rapport à la vitesse de l'écoulement, le nombre de Reynolds est relativement petit, et l'écoulement est donc relativement laminaire, ce qui permet d'éviter les perturbations qui rendraient notre expérience impossible.