

LES AUTEURS



**JEAN-MICHEL COURTY
ET ÉDOUARD KIERLIK**
professeurs de physique
à Sorbonne Université, à Paris

MÉLANGER, UNE OPÉRATION PAS SI SIMPLE

Mélanger deux liquides, même miscibles comme l'eau et le sirop de grenadine, n'est pas de tout repos: il faut agir mécaniquement de façon appropriée et fournir une énergie considérable.



Il fait chaud et c'est l'heure de l'apéritif; pourquoi ne pas ajouter à notre verre d'eau fraîche un trait de pastis? Le résultat est décevant: une petite couche de pastis pur flotte au-dessus de l'eau, sans s'être mélangée. Nous aurions dû nous souvenir de l'adage: «Verser l'eau dans le pastis et non le pastis dans l'eau»! Est-ce un effet de densité? Pas vraiment, car un phénomène analogue se produit avec du sirop de grenadine. Plus dense que l'eau, celui-ci coule au fond du verre... sans se mélanger non plus (voir l'illustration ci-dessus).

TROP LENTE DIFFUSION MOLECULAIRE

On comprend qu'il soit compliqué de mélanger deux fluides non miscibles tels que l'huile et l'eau. Ces molécules d'espèces différentes n'ont aucune affinité

(chimique) entre elles et tendent à rester séparées. Mais pourquoi est-il parfois si difficile de mélanger deux liquides bien miscibles, comme du sirop dans de l'eau ou du miel dans une tisane?

Un phénomène physique, la diffusion, assure pourtant, sans action extérieure, le mélange parfait de composés miscibles. Son origine est l'agitation thermique des molécules. À l'échelle microscopique, les molécules sont sans cesse en mouvement et se cognent les unes aux autres. De ce fait, la trajectoire d'une molécule est une marche aléatoire qui l'écarte progressivement de sa position initiale. Au bout d'un certain temps, la probabilité de trouver cette molécule à un endroit donné sera uniforme dans tout le volume du fluide.

Pourquoi alors ne pas laisser faire la nature? Parce que nous n'avons pas le

temps! En effet, l'une des propriétés de la marche aléatoire est qu'à cause des multiples changements de direction, la durée moyenne nécessaire pour que la molécule se trouve à une distance donnée du point de départ est proportionnelle au carré de cette distance. Un coefficient de diffusion typique dans l'eau est de l'ordre de 10^{-9} mètre carré par seconde. Cela signifie qu'il faut une milliseconde pour diffuser sur une épaisseur de 1 micromètre... mais déjà 16 minutes pour une épaisseur de 1 millimètre!

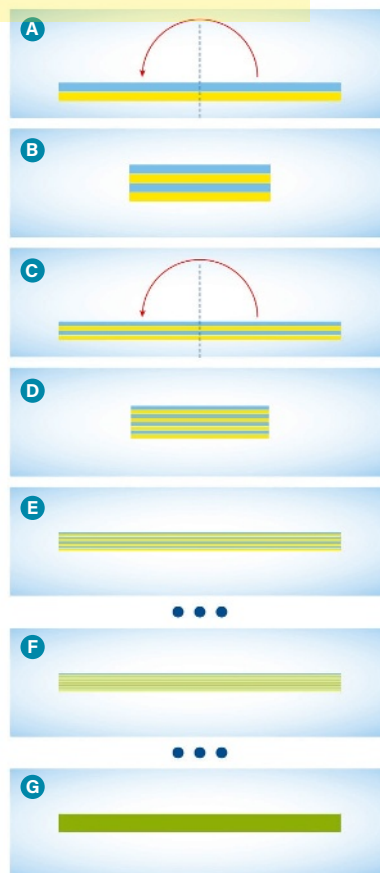
La diffusion n'étant efficace qu'aux petites échelles, une piste, pour mélanger deux fluides sur des dimensions macroscopiques, est de procéder en plusieurs étapes. Il faut tout d'abord faire interpénétrer les deux fluides pour homogénéiser la concentration moyenne uniquement à grande échelle. À une



Lorsqu'on verse de l'eau dans un verre contenant un fond de sirop, les deux liquides se mélangent très vite. Mais quand on verse le sirop dans un verre d'eau, le mélange ne se fait pas...

UN CHAOS BOULANGER

La « transformation du boulanger », inspirée de la préparation d'une pâte feuilletée, est un exemple très simple de mélange dit « chaotique » (où deux points initialement voisins peuvent se retrouver lointains à la fin du processus). Une variante est illustrée ici. On part d'un bloc constitué de deux couches (en bleu et en jaune) des matières à mélanger **A** ; on le tranche au milieu et on superpose les deux moitiés **B**. Puis on étale le bloc obtenu de façon qu'il retrouve sa largeur et son épaisseur initiales **C**. On tranche de nouveau par le milieu et on superpose les deux moitiés **D**. On aplatit pour retrouver les dimensions initiales **E**. Et ainsi de suite. À la fin du processus (**F**, **G**), les couches alternées sont tellement minces que la diffusion moléculaire complète l'homogénéisation très rapidement.



échelle intermédiaire, disons le millimètre, cette étape ne modifie pas la concentration locale: on est en présence de l'un ou l'autre des deux fluides. Ensuite, on tente de réduire la taille de ces régions de composition uniforme, disons jusqu'à une fraction de millimètre, et d'augmenter la surface totale de la frontière qui sépare les deux fluides.

MÉLANGER PAR LA TURBULENCE ET LE CHAOS

Ces deux étapes nécessitent des actions mécaniques appropriées. Pour déformer un fluide, il est en effet nécessaire de le cisailer, c'est-à-dire de faire glisser des couches de fluide les unes sur les autres. Il faut aussi que ces actions concernent bien l'ensemble du volume de fluide, sans volume mort. Cela conduira

à la dernière étape, durant laquelle la diffusion moléculaire effectuera un mélange intime à l'échelle microscopique.

Comment procéder? Selon les situations, on a le choix entre la turbulence et le chaos. Avec des fluides peu visqueux, les écoulements deviennent vite turbulents. C'est le cas lorsqu'on remue une boisson avec une petite cuillère. En régime turbulent, les tourbillons créés à grande échelle par les mouvements de la cuillère engendrent des tourbillons plus petits, qui font de même à leur tour, et ainsi de suite. On a ainsi du désordre en cascade à toutes les échelles, cascade qui permet d'atteindre d'une pierre deux coups: une homogénéité aux échelles macroscopiques et une très grande surface de contact entre les deux fluides.

Lorsque les fluides sont plus visqueux – par exemple de l'huile ou du miel liquide,

Les auteurs ont récemment publié: **En avant la physique!**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).

