



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...

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

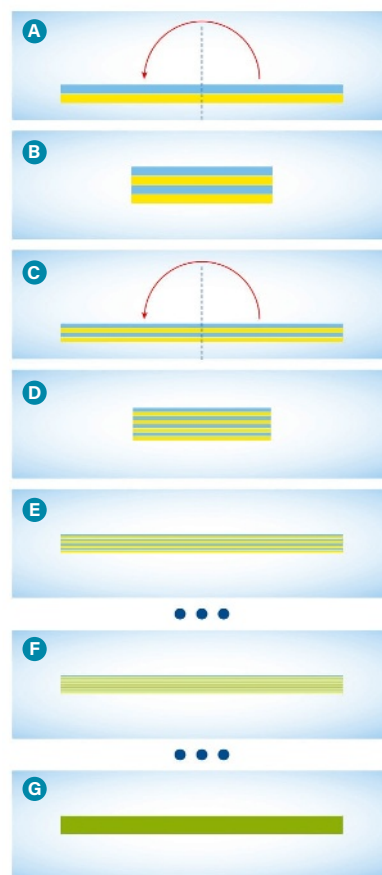
à la dernière étape, durant laquelle la diffusion moléculaire effectuera un mélange intime à l'échelle microscopique.

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,

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.



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



dix mille fois plus visqueux que l'eau –, il est difficile de créer de la turbulence. Qu'à cela ne tienne: on peut effectuer un «mélange chaotique», l'exemple le plus simple étant celui de la «transformation du boulanger» (voir l'encadré page 89). Le chaos est caractérisé par une évolution parfaitement déterministe, mais très sensible aux conditions initiales, de telle sorte que deux éléments de volume très proches peuvent se retrouver très distants à la fin de la transformation. Un mélange chaotique emplit ainsi de façon homogène tout le volume avec les deux fluides.

En pratique, on peut facilement réaliser ce type de transformation dans des tuyaux à l'aide de mélangeurs dépourvus de pièces mobiles. Les deux fluides sont injectés à l'entrée; puis des cloisons successives séparent, étirent et recombinaient les écoulements pour obtenir, à la sortie, un mélange bien homogène. Dans un récipient, vous pouvez obtenir un résultat analogue à celui de la transformation du boulanger en faisant des 8 avec votre cuillère, par exemple pour mélanger de la pâte fluide à du chocolat fondu.

CISAILLER ÉNERGIQUEMENT

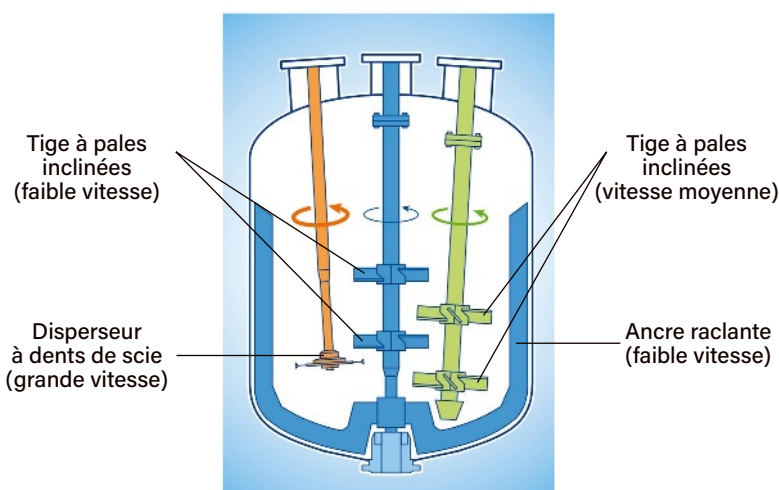
L'histoire est-elle finie? Hélas non. Lorsque les fluides à mélanger ont des viscosités très différentes, du miel dans du thé par exemple, la cuillère ne suffit pas. Son principal effet est de déplacer le miel en bloc dans de l'eau tourbillonnante. Pourquoi? Parce que pour une même contrainte, la vitesse de cisaillement est inversement proportionnelle à la viscosité. Par conséquent, si l'on veut déformer notablement le miel, il est nécessaire d'appliquer des forces très importantes ou, ce qui est équivalent, donner une très grande vitesse à l'eau.

L'agitation manuelle à la petite cuillère ne le permet pas et il faut recourir à un fouet mécanique ou à un blender. Quant aux mélangeurs industriels, ce sont souvent des dispositifs comportant plusieurs éléments mobiles qui agissent chacun à une échelle différente (voir l'encadré ci-dessus). Un premier dispositif opère à l'échelle du récipient entier, afin que les fluides ne restent pas immobiles à proximité des parois. Un deuxième porte sur l'homogénéisation moyenne à des échelles intermédiaires et, enfin, un troisième dispositif agit aux petites échelles pour briser les éventuels morceaux homogènes trop visqueux...

Dans tous les cas, il faut se résoudre à fournir de l'énergie, beaucoup d'énergie, car qui dit cisaillement dit dissipation

HOMOGENÉISER AUX DIFFÉRENTES ÉCHELLES

Les mélangeurs industriels sont de conceptions très variées. Dans le type de mélangeur schématisé ici, un premier dispositif (en bleu) à rotation lente assure un mélange grossier, à grande échelle. Un deuxième (en vert), qui tourne à moyenne vitesse, permet de mélanger plus finement, à une échelle intermédiaire. Enfin, le troisième (en orange) tourne à grande vitesse et ses dents de scie effectuent un mélange à petite échelle. Et à l'échelle microscopique, c'est la diffusion moléculaire qui fait son œuvre.



d'énergie à cause de la viscosité. C'est d'ailleurs pourquoi il faut ajouter l'eau dans le sirop et non l'inverse. Détaillons cela.

Lorsqu'on verse un liquide dans un récipient qui en contient déjà un autre, l'énergie apportée est l'énergie cinétique du fluide versé lorsqu'il arrive au niveau de la surface du fluide déjà présent. Si l'on diminue au maximum la vitesse de versement, par exemple en opérant très près de la surface ou délicatement le long d'une paroi ou d'un objet qui ralentit la chute, on parvient à superposer deux fluides *a priori* miscibles sans qu'ils ne se mélangent, l'énergie apportée étant minime.

Maintenant, supposons que l'on veuille mélanger une mesure de sirop ou de pastis à neuf mesures d'eau, en versant les boissons d'une hauteur égale à la moitié de la hauteur du verre. L'énergie disponible pour le mélange est 15 fois supérieure si l'on verse l'eau en second que si on la verse en premier: les 9 volumes d'eau mettent facilement en mouvement turbulent le volume de sirop ou de pastis, alors que le contraire ne se produit pas. Et c'est sans tenir compte des différences de masse volumique et de viscosité, qui constituent elles aussi des freins au mélange par simple ajout. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. S. Dickey, **Tackling difficult mixing problems**, *Chemical Engineering Progress*, vol. 111(8), pp. 35-42, 2015.

A. L. Ventresca et al., **The influence of viscosity ratio on mixing effectiveness in a two-fluid laminar motionless mixer**, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 80(4), pp. 614-621, 2002.

J. Villermaux, **The role of energy dissipation in contacting and mixing devices**, *Chemical Engineering & Technology*, vol. 11(1), pp. 276-287, 1988.

La grenadine parfaite, vidéo de Merci la Physique : <https://www.youtube.com/watch?v=FZ62nDv19nc>