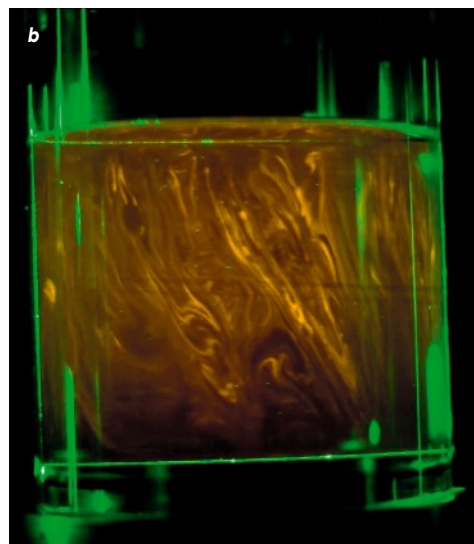
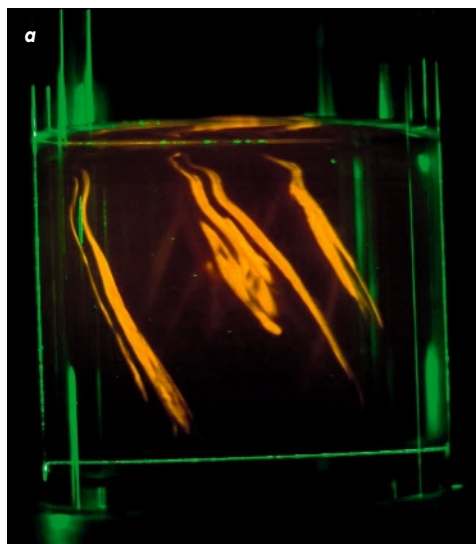


Ces photos montrent le mélange par un Soft Mixer d'un colorant fluorescent orange dans de l'eau. Pour de faibles vitesses de rotation du récipient, seul le principal mode global d'oscillation est excité, et le colorant ne se mélange pas (a). Pour des vitesses de rotation plus élevées, le mode global se déstabilise et l'écoulement devient suffisamment turbulent pour que les filets de colorant s'étirent et se replient (b). Il en résulte un mélange très efficace : le colorant s'homogénéise dans le cylindre en quelques rotations seulement de celui-ci.



couplage avec le mode global initial. Cela rend l'écoulement beaucoup plus complexe. Les filets de colorant sont fortement étirés puis repliés sur eux-mêmes, d'où un processus de mélange chaotique très efficace. Le colorant se répartit alors de façon homogène dans tout le cylindre en quelques rotations seulement de celui-ci.

Bien qu'il soit de conception très simple, ce mélangeur est aussi efficace que ceux utilisant une hélice en rotation dans le liquide. Il a plusieurs autres avantages. L'absence de pales évite non seulement d'avoir à les nettoyer, mais aussi de polluer ou de contaminer les composants à mélanger, ce qui est un gros atout dans les applications en biologie et en médecine.

Enfin, l'écoulement engendré dans notre dispositif est beaucoup plus doux que dans un mélangeur à pales : le cisaillement induit au sein du liquide est environ 20 fois plus faible que celui créé par la pointe d'une pale tournante. Or un faible cisaillement est une propriété très intéressante pour les biotechnologies destinées à produire en grande quantité des cellules animales ou végétales.

DES APPLICATIONS INDUSTRIELLES

En effet, les cellules vivantes ont besoin d'un apport constant en oxygène (pour les cellules animales) ou en dioxyde de carbone (pour les cellules végétales). Mais ces gaz ne diffusent pas assez vite pour imprégner de grands volumes. Afin d'augmenter l'apport gazeux aux cellules produites, on est donc contraint d'utiliser une pale tournante ou du bullage. Cependant, ces deux procédés produisent un très fort cisaillement qui endommage les cellules fragiles.

Grâce au faible cisaillement, notre procédé de mélange est tout à fait adapté à la production à grande échelle de cellules fragiles. À

partir du Soft Mixer, nous avons donc conçu en 2017, au sein de la jeune entreprise marseillaise Planktovie, un nouveau type de photobioréacteur afin de produire des dinoflagellés, des algues microscopiques sensibles au cisaillement. Les tests effectués dans des petits volumes ont montré que le procédé est très efficace et permet d'atteindre des concentrations plus élevées qu'avec un système de bullage. Un prototype de 150 litres est actuellement en cours d'élaboration.

Ces microalgues sont connues pour contenir de nombreuses molécules intéressantes, aux propriétés anticancéreuses, anesthésiantes, analgésiques, antivirales... La production à grande échelle de dinoflagellés ouvrirait donc de nouvelles perspectives dans le domaine médical. On pourra ensuite adapter ce nouveau type de bioréacteur à des cellules animales qui sont aussi sensibles au cisaillement. Nous sommes actuellement dans une phase de prototypage de ce type de bioréacteur, et leur commercialisation sera probablement possible d'ici à quelques années.

Le principe de notre mélangeur peut intéresser d'autres domaines. Le faible cisaillement serait un atout majeur pour le mélange de produits pharmaceutiques contenant des molécules fragiles, des anticorps par exemple. De plus, le dispositif est suffisamment simple pour s'appliquer au mélange de fluides visqueux dans des domaines comme l'industrie agroalimentaire. Et l'absence de pales est avantageuse quand il s'agit de mélanger des fluides corrosifs ou rhéoépaississants (c'est-à-dire dont la viscosité augmente avec leur agitation). Bref, ce nouveau type de mélangeur ouvre bien des perspectives dans divers secteurs industriels et technologiques. Une retombée inattendue d'études fondamentales en physique et en géophysique! ■

BIBLIOGRAPHIE

T. Albrecht et al., **On triadic resonances as an instability mechanism in precessing cylinder flow**, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 841, R3, 2018.

R. Lagrange et al., **Precessional instability of a fluid cylinder**, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 666, pp. 104-145, 2011.

R. Thompson, **Diurnal tides and shear instabilities in a rotating cylinder**, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 40, pp. 737-751, 1970.

W. Thomson (Lord Kelvin), **Vibrations of a columnar vortex**, *Philosophical Magazine*, vol. 10, pp. 155-168, 1880.

P. Meunier et R. Manasseh, **Soft Mixer**, brevet FR1651703 du 1^{er} mars 2016.

P. Meunier et N. Brosse, **Soft Mixer 2**, brevet FR19/02211 du 5 mars 2019.



© Getty Images/MedioTuerto

Chez la drosophile, chaque unité de ses yeux à facettes contient des cellules photoréceptrices sensibles à différentes gammes de longueurs d'onde. Un événement aléatoire – l'expression ou non d'un gène lors de la différenciation de ces cellules – détermine à quelle gamme elles seront sensibles.