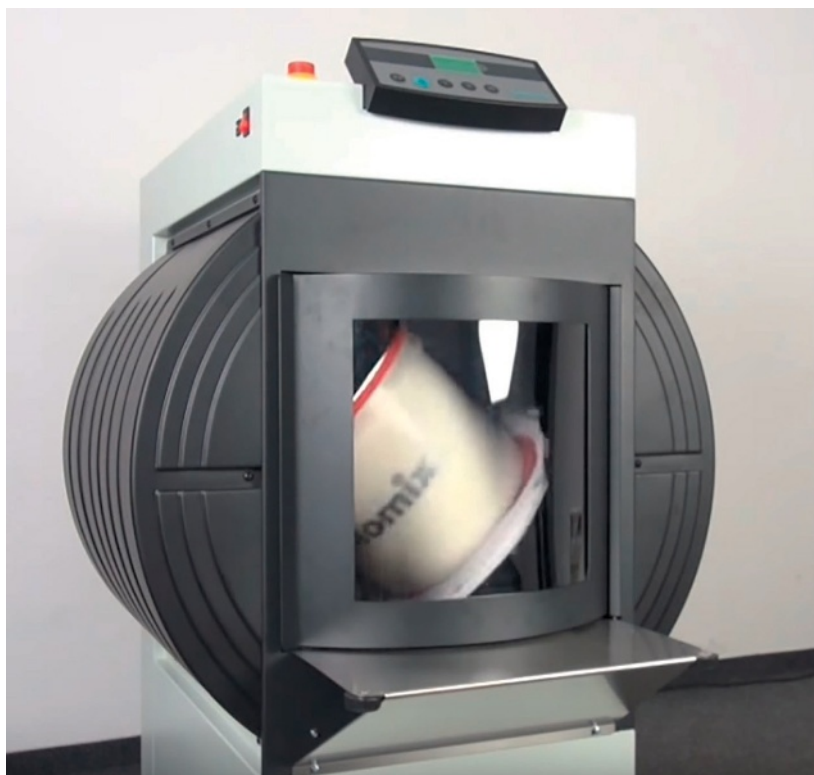




Dans un malaxeur biaxial, dit aussi «gyroscopique» ou «planétaire» (ici un modèle du fabricant allemand Collomix), le récipient tourne sur lui-même autour de son axe, lequel tourne lui-même dans un plan vertical, autour d'un axe horizontal perpendiculaire à la façade de l'appareil. Ce mouvement s'apparente à la précession de l'axe de rotation de la Terre.

un important mécanisme de mélange. Aussi les physiciens ou les géophysiciens ont-ils mené de nombreuses études fondamentales pour comprendre les écoulements au sein d'un liquide contenu dans un récipient en précession, en général de forme sphérique ou cylindrique.

SIMPLIFIER LE MOUVEMENT DE PRÉCESSION

Il y a un peu plus d'une dizaine d'années, je me suis ainsi intéressé avec plusieurs collègues au cas d'un cylindre en précession. Nos travaux nous ont permis d'identifier les mécanismes qui engendrent la turbulence au sein du fluide. Et cela a conduit à l'idée d'un nouveau concept de mélangeur sans pales, pour lequel deux brevets ont été déposés – l'un en 2016 et l'autre en 2019.

Le problème des malaxeurs biaxiaux est leur complexité sur le plan mécanique, car la rotation propre du récipient cylindrique est assurée par un moteur qui est lui-même en rotation. Il s'ensuit une limitation importante de la masse du récipient et de son contenu : quelque 40 kilogrammes dans la plupart des appareils commercialisés. Peut-on engendrer avec un mouvement plus simple le même écoulement mélangeant ?

Nos études théoriques et expérimentales ont montré que oui. Il y a quelques années, nous avons établi que dans un cylindre tournant autour de son axe et légèrement incliné par rapport à la verticale, la surface du liquide

étant libre, l'écoulement est à peu près identique à celui qui s'installe dans un cylindre en précession (voir l'encadré page précédente). D'où l'idée d'un mélangeur réalisant cette configuration beaucoup plus simple, et qui a été breveté sous le nom de Soft Mixer («malaxeur doux»). Bien qu'il ne reproduise pas véritablement une précession, ce dispositif est inspiré du mouvement de la Terre et l'on peut donc parler de géo-inspiration.

Un tel appareil paraît, à première vue, trop simple pour qu'il puisse mélanger fortement le liquide, surtout pour de faibles angles d'inclinaison. La surface libre du liquide reste immobile dans le repère du laboratoire et il est donc difficile d'imaginer que le dispositif engendre un écoulement complexe. Pourtant, le chercheur américain Rory Thompson avait observé en 1970 que l'écoulement au sein d'un cylindre incliné en rotation devenait très turbulent pour des valeurs précises du rapport d'aspect (rapport entre la hauteur du liquide dans le cylindre et le diamètre de celui-ci), même pour de très petits angles d'inclinaison.

Cela explique pourquoi, malgré sa simplicité, ce type de mélangeur n'a jamais été construit de manière empirique : il aurait fallu visualiser l'écoulement à l'intérieur du liquide et non à sa surface libre, et avoir la chance de tomber sur le bon rapport d'aspect.

Des études théoriques sur les fluides tournants ont permis de prédire ces rapports d'aspect particuliers pour lesquels une forte turbulence apparaît. Elles s'appuient en particulier sur les travaux pionniers de Lord Kelvin (alias William Thomson), publiés en 1880, qui ont mis en évidence plusieurs façons, ou «modes globaux», dont les particules constituant le fluide dans un cylindre en rotation pouvaient osciller.

On montre que le principal mode global (voir l'encadré page 48) présente un effet de résonance lorsque la hauteur du liquide dans le cylindre est égale à environ 1 diamètre de celui-ci, ou 2 diamètres, ou 3 diamètres, etc. Pour ces valeurs du rapport d'aspect, l'oscillation des particules du fluide s'effectue avec une forte amplitude.

UN MÉLANGE PUISSANT POUR UN FAIBLE CISAILLEMENT

La question est maintenant de savoir si cet écoulement est efficace pour mélanger le liquide contenu dans le cylindre, par exemple pour mélanger un colorant dans un pot de peinture. Sur le plan théorique, c'est un problème difficile, car la trajectoire des particules fait apparaître du chaos déterministe (une très grande sensibilité aux conditions initiales, qui rend impossible la prévision des trajectoires). Nous avons donc mesuré expérimentalement l'efficacité de mélange de cet écoulement. ➤

> Pour de faibles vitesses de rotation du cylindre, on voit le colorant osciller simplement, en suivant une trajectoire circulaire : l'écoulement n'est pas suffisamment turbulent pour le mélanger efficacement. C'est un effet bien connu pour les vagues à la surface de la mer : une mouette posée sur l'eau n'est pas entraînée par la houle, car elle se déplace dans un sens pendant une demi-période puis en sens inverse pendant l'autre demi-période.

Dans notre mélangeur, le mode global, excité par l'oscillation de la surface libre (dans

le référentiel tournant avec le cylindre), ne produit donc pas de mélange. Il crée simplement des filets de colorant inclinés par rapport à l'axe du cylindre (voir la figure page 49, a).

Cependant, nous avons montré que lorsque la rotation du cylindre est suffisamment rapide, le mode global décrit plus haut devient instable. Pour donner une idée, la rotation seuil est d'environ 1 tour en 3 secondes pour un cylindre faisant 9 centimètres de diamètre et incliné de 1 degré. Deux autres modes globaux d'oscillation entrent alors en jeu et s'amplifient mutuellement par

UN MODE GLOBAL D'OSCILLATION DU LIQUIDE

Dans un cylindre en rotation autour de son axe, les petites perturbations affectant le liquide peuvent se propager et s'amplifier sous la forme de divers modes globaux d'oscillation des particules fluides, un « mode » étant constitué de régions du fluide où l'amplitude de l'oscillation est grande (les ventres)

alternant avec des régions où elle est petite (les nœuds). Le principal mode global dans le cas d'un cylindre légèrement incliné par rapport à la direction de la pesanteur est décrit ici.

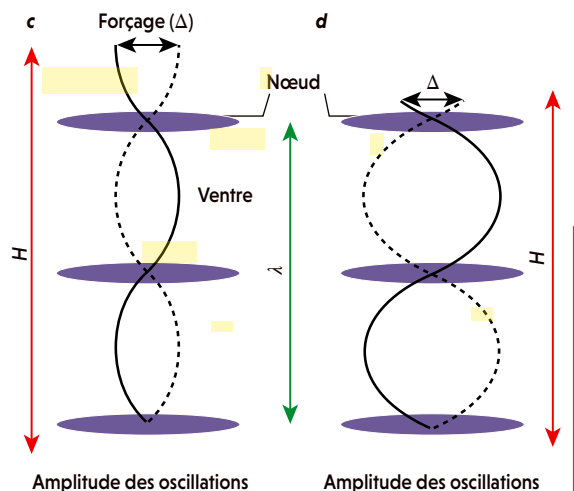
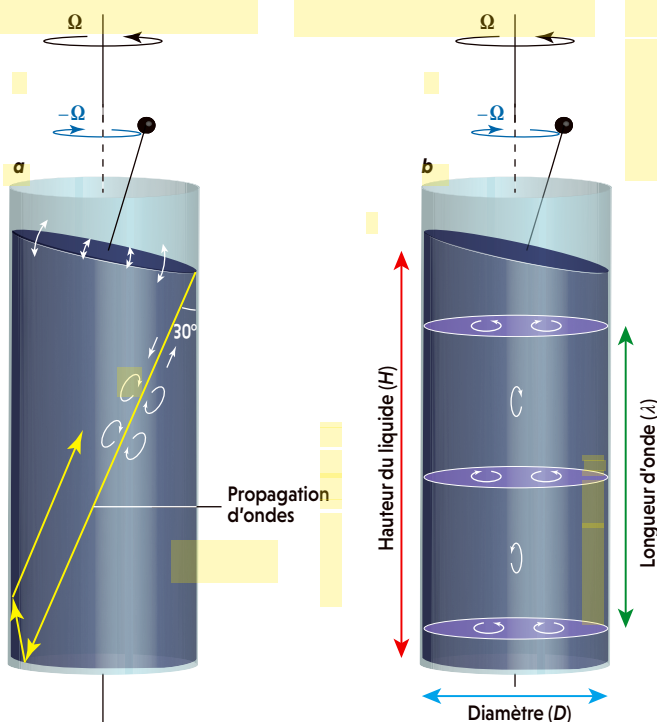
Pour comprendre l'origine et la nature de ce mode global, il est plus commode de se placer dans le repère qui tourne avec le cylindre à la vitesse angulaire Ω (sur la figure, la direction de la pesanteur est oblique, perpendiculaire à la surface du liquide). Dans ce repère, la surface libre (qui est fixe dans le repère du laboratoire) tourne à une vitesse angulaire égale à $-\Omega$, car la direction de la gravité tourne elle-même à cette vitesse $-\Omega$. L'oscillation de la surface libre engendre un cisaillement du fluide au

niveau du contact surface-paroi, et cette perturbation se propage à 30° par rapport à l'axe du cylindre. Les particules du fluide étant aussi soumises à la force de Coriolis (liée au fait qu'on est dans un repère en rotation), elles se mettent à osciller en suivant un mouvement elliptique. Ces ondes de mise en mouvement se propagent et se réfléchissent dans tout le cylindre (a). Il résulte de leur interférence un mode global d'oscillation des particules du fluide (b), avec des ventres (oscillations d'amplitude maximale) et des nœuds (oscillations d'amplitude nulle) en fonction de la direction considérée. Dans la direction de l'axe, la longueur d'onde λ de ce mode propre est égale à 1,9898 fois le diamètre D du cylindre.

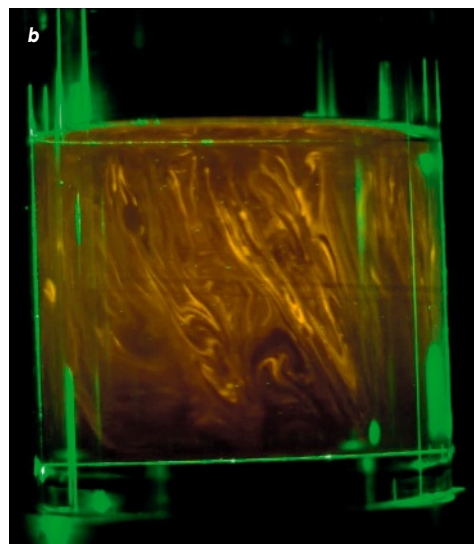
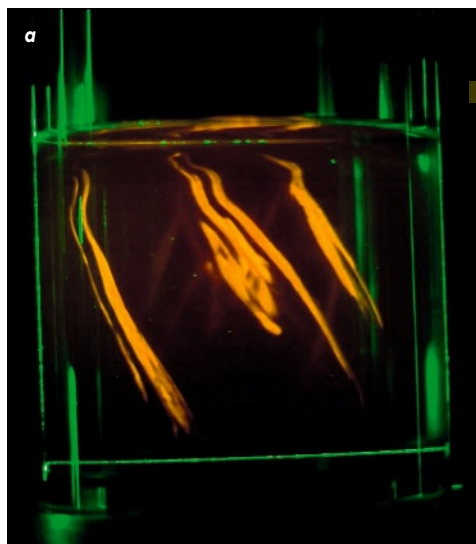
L'amplitude de l'oscillation est faible lorsque l'excitation Δ liée au mouvement de la surface libre se produit au niveau d'un ventre du mode (c). En revanche,

si la même excitation Δ est appliquée à proximité d'un nœud, l'amplitude de l'oscillation devient très grande (d). Le phénomène est similaire à celui d'une corde fixée à un mur et que l'on fait vibrer à son autre extrémité : une très petite vibration appliquée à un nœud du mode propre d'oscillation de la corde induit une réponse de la corde beaucoup plus grande que la même vibration appliquée à un ventre. C'est pourquoi les oscillations du fluide au sein du cylindre sont amplifiées lorsque la hauteur du liquide H est égale à $\lambda/2$, λ , $3\lambda/2$, etc., c'est-à-dire pour $H \approx D$, $2D$, $3D$...

Pour une vitesse de rotation Ω suffisamment rapide, on montre que deux autres modes globaux d'oscillation deviennent importants. Leur interaction avec le principal mode global produit une instabilité qui conduit, pour ces valeurs du rapport d'aspect, à un écoulement turbulent, donc fortement mélangeant.



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.