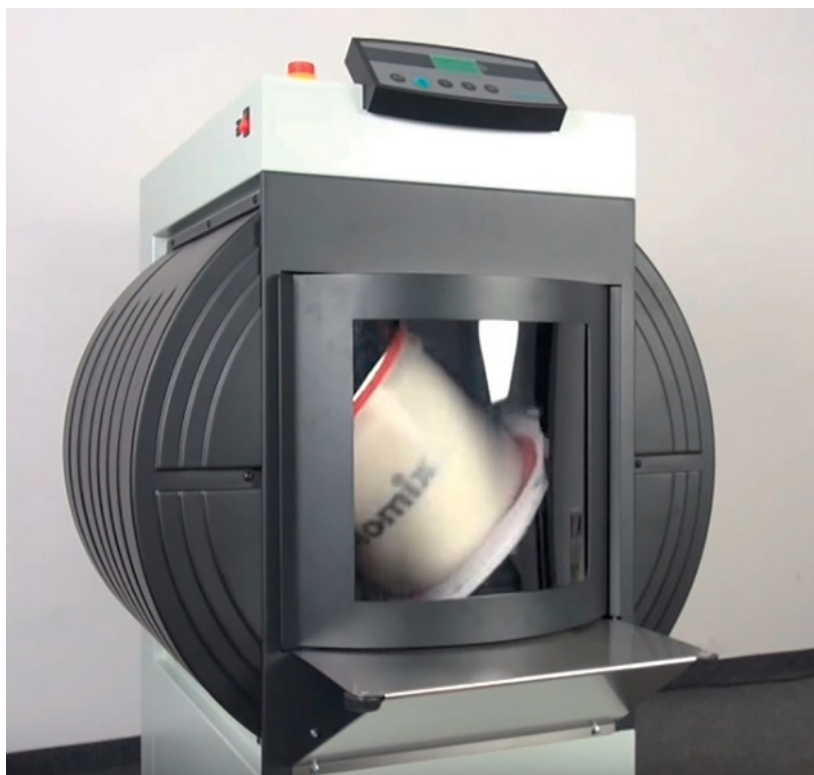




Dans un malaxeur biaxial, dit aussi «gyroscopique» ou «planétaire» (ici un modèle du fabricant allemand Collomix), le récipient tourne sur lui-même autour de son axe, lequel tourne lui-même dans un plan vertical, autour d'un axe horizontal perpendiculaire à la façade de l'appareil. Ce mouvement s'apparente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