

L'ESSENTIEL

> De nombreux secteurs d'activité ont besoin d'appareils mélangeurs efficaces.

> Il y a une trentaine d'années, des mélangeurs sans pales ou hélices sont apparus sur le marché.

> Inspiré par des travaux de géophysique, l'auteur

a proposé un nouveau concept de mélangeur sans pales, bien plus simple que les dispositifs existants.

> Ce mélangeur a plusieurs avantages qui le rendent intéressant pour, notamment, des applications aux biotechnologies.

L'AUTEUR



PATRICE MEUNIER
directeur de recherche du CNRS
à l'Institut de recherche sur les phénomènes
hors équilibre (Irphé), Aix-Marseille
Université-CNRS-École centrale de Marseille

Mélanger en s'inspirant du mouvement de la Terre

Comment mélanger avec efficacité une préparation liquide, par exemple un colorant dans un pot de peinture ? À partir de leurs recherches fondamentales, des géophysiciens ont breveté un procédé étonnamment simple : faire tourner le récipient sur lui-même en l'inclinant légèrement !

De nombreux secteurs industriels ont besoin d'équipements et de procédés permettant de mélanger rapidement et efficacement des poudres, des liquides, des pâtes ou des matériaux granulaires. On peut penser au secteur du bâtiment, avec les peintures, les ciments ou le béton, à l'industrie chimique ou pharmaceutique, à l'industrie agroalimentaire... Le plus souvent, les mélangeurs ou malaxeurs sont des appareils qui accomplissent leur tâche grâce à des pales ou des hélices en mouvement au sein du matériau à homogénéiser. Ces systèmes à intrusion souffrent de plusieurs inconvénients, notamment la nécessité d'ouvrir le récipient et de

nettoyer les pales après usage, opération souvent longue et fastidieuse – comme l'a constaté toute personne qui a mélangé un colorant dans un pot de peinture !

MÉLANGER SANS PALES

Depuis le début des années 1990, plusieurs fabricants ont développé des malaxeurs qui s'affranchissent de pales ou d'hélices. Le principe est simple, bien que techniquement délicat : faire tourner autour de lui-même le récipient contenant le matériau à mélanger, l'axe de cette rotation subissant lui-même un mouvement de rotation afin d'éviter la mise en place d'un écoulement régulier. Dans les appareils commercialisés (voir la photo page 47), le récipient cylindrique, dont la >

Les procédés usuels pour mélanger des liquides font appel à des pales ou une hélice en mouvement dans le fluide. L'un des principaux inconvénients réside dans le long nettoyage du dispositif introduit. Il existe aujourd'hui des mélangeurs sans pales ; celui conçu par l'auteur repose sur un mouvement particulièrement simple du récipient.



> capacité est d'une quarantaine de kilogrammes, tourne autour de son axe à une vitesse d'environ 1 tour par seconde, tandis que cet axe tourne lui-même dans un plan vertical (c'est-à-dire autour d'un axe horizontal), à une vitesse allant jusqu'à environ 150 tours par minute.

REPRODUIRE LA PRÉCESSION TERRESTRE

Qualifiés de malaxeurs biaxiaux, gyroscopiques ou planétaires, ces dispositifs sont un bon exemple de géomimétisme: le mouvement imprimé au récipient imite, par certains aspects, celui de la Terre.

En quoi est-ce une imitation? Notre planète tourne en 24 heures autour de son axe nord-sud, lequel est incliné de 23,5 degrés par rapport à l'axe de l'écliptique (c'est-à-dire l'axe perpendiculaire au plan de l'orbite autour du Soleil). Et l'axe de rotation terrestre tourne lui-même très lentement, en environ 26 000 ans, autour de l'axe de l'écliptique: par ce mouvement dit de précession, il décrit ainsi un cône dont le sommet est le centre de la Terre et dont l'angle d'ouverture est de 47 degrés. Si l'on omet sa révolution autour du Soleil, notre

planète a ainsi un mouvement semblable à celui d'une toupie (voir l'encadré ci-dessous).

Ce mouvement de précession est tout à fait similaire à celui du récipient dans un malaxeur biaxial tel que celui décrit plus haut. Les différences résident dans l'ouverture et l'orientation du cône de précession, et dans les vitesses de rotation. Ainsi, dans le malaxeur biaxial évoqué, l'angle d'ouverture du cône de précession est de 180 degrés, c'est-à-dire que ce cône forme un demi-espace, et son axe est horizontal (perpendiculaire à la façade, vitrée, du malaxeur).

La précession terrestre est 10 millions de fois plus lente que la rotation propre de la planète. Pourtant, les modélisations des géophysiciens ont montré qu'elle induit un forçage important dans la partie externe, liquide, du noyau de la Terre, et y crée un écoulement turbulent grâce à des phénomènes de résonance et d'instabilités.

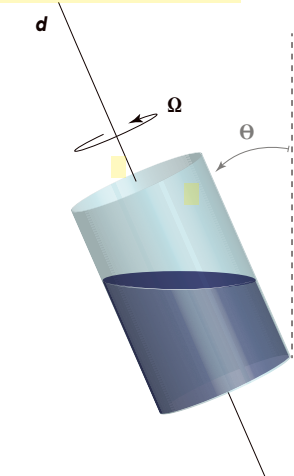
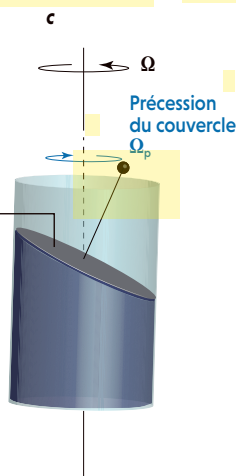
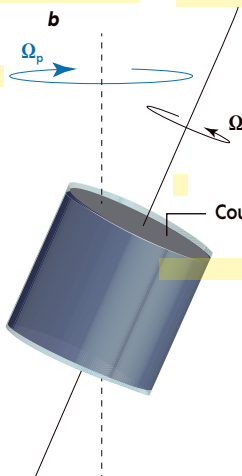
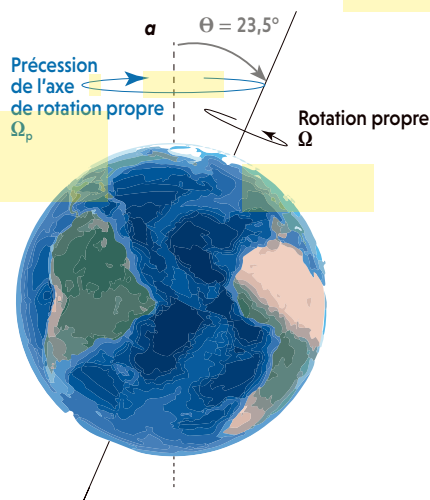
Cette source d'énergie a probablement été suffisante pour entretenir l'effet dynamo, responsable du champ magnétique terrestre, avant que la partie interne du noyau de notre planète ne se solidifie. De plus, la forte turbulence engendrée par la précession constitue

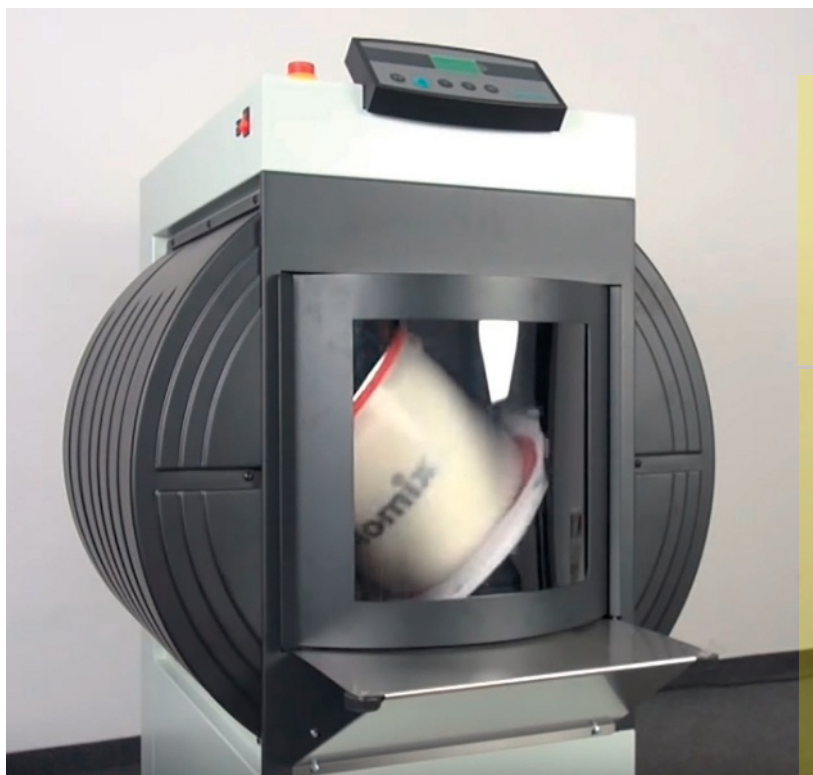
DE LA PRÉCESSION TERRESTRE AU MOUVEMENT D'UN MÉLANGEUR

La précession de la Terre (a) ou d'un cylindre (b) correspond à une rotation, à la vitesse angulaire Ω_p , de l'axe de rotation propre de l'objet, à la vitesse angulaire Ω . Dans le cas de la Terre, Ω vaut 1 tour (ou 2π radians) par 24 heures et Ω_p correspond à environ 1 tour en 26 000 ans. Le mouvement d'un fluide contenu dans un cylindre

en précession est très similaire à l'intérieur d'un cylindre en rotation sur un axe fixe, le fluide étant recouvert d'un couvercle qui effectue une précession à la vitesse angulaire Ω_p (c). Cette propriété est valable également si l'on tient compte de la pesanteur (verticale sur la figure). Dans la limite où Ω_p est très petit devant la vitesse angulaire Ω de

rotation du cylindre sur lui-même, le couvercle est immobile dans le repère du laboratoire. Cette situation correspond ainsi au mouvement d'un cylindre incliné par rapport à la verticale et en rotation autour de son axe, le liquide ayant sa surface supérieure libre (d). C'est cette configuration très simple, géo-inspirée, qu'utilise le mélangeur conçu par l'auteur.





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. ➤