



**HAL**  
open science

## Mélanger en s'inspirant du mouvement de la Terre

Patrice Meunier

► **To cite this version:**

Patrice Meunier. Mélanger en s'inspirant du mouvement de la Terre. Pour la Science. Dossier, 2020. hal-03000938

**HAL Id: hal-03000938**

**<https://hal.science/hal-03000938>**

Submitted on 12 Nov 2020

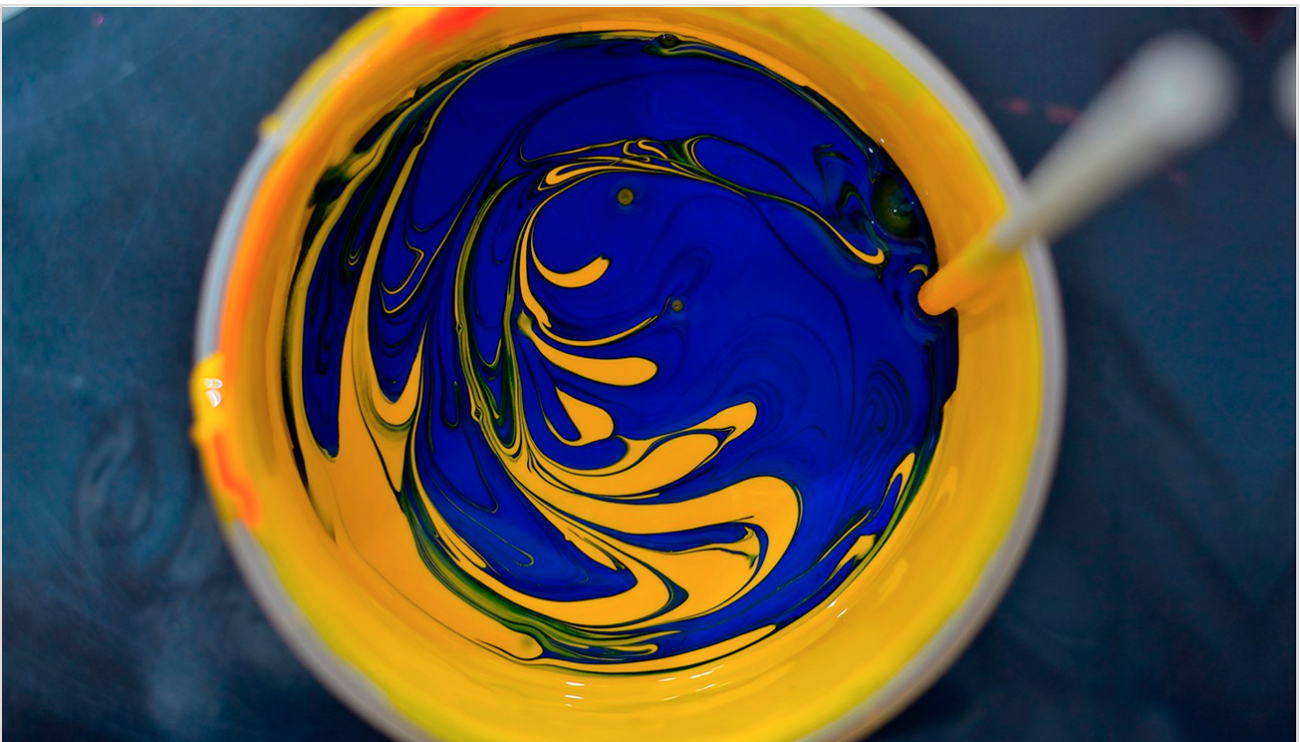
**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# 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 !

PATRICE MEUNIER | 25 mai 2020 | POUR LA SCIENCE N° 512 | TIMN



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.

© Shutterstock.com/gloligloloat

**D**e 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 !

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, le récipient cylindrique, dont la 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 .

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 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.

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.

## **Simplifier le mouvement de précession**


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 . 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.



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.



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.

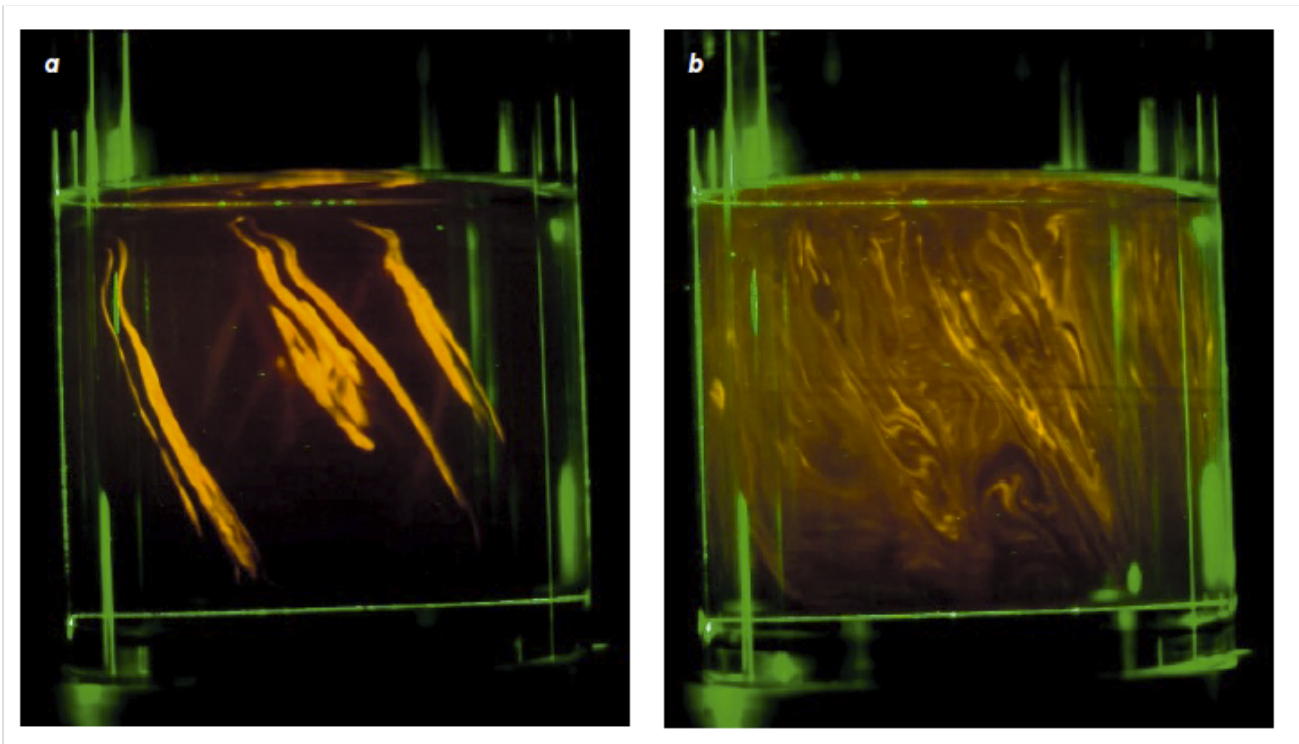
On montre que le principal mode global présente un effet de résonance lorsque la hauteur du liquide dans le cylindre est égale à environ 1 diamètre de celui-ci, ou 2 diamètres, ou 3 diamètres, etc. Pour ces valeurs du rapport d'aspect, l'oscillation des particules du fluide s'effectue avec une forte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



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.

© Patrice Meunier

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 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 !

---

## Abonnez-vous et accédez à plus de 20 ans d'archives !



12 numéros + 4 hors-série  
en version papier + numérique

+ Accès illimité à plus de 20 ans  
d'archives

**JE M'ABONNE**

## Auteur



### **Patrice Meunier**

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

## 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.

## En savoir plus

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 1er mars 2016.

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

---

**Chères lectrices,  
chers lecteurs,**

En raison de l'épidémie de Covid-19, la production et la distribution de nos magazines sont perturbées. Nous mettons tout en œuvre pour diffuser à nos abonnés, en kiosque et sur notre site internet, nos dernières parutions.

[Plus d'informations](#)

---

## Les + partagés

### 1. **Épidémiologie**

**Covid-19 : ce que les tests sérologiques peuvent et ne peuvent pas nous dire**

---

### 2. **Médecine**

**Covid-19 : des symptômes de la tête jusqu'aux doigts de pied**

---

### 3. **Climatologie**

**Le rétablissement de la couche d'ozone a des effets sur le climat**

---

### 4. **Paléontologie humaine**

**Nous sommes les descendants des « Superarchaïques »**

---

### 5. **Covid-19**

**Les enfants propagent-ils le coronavirus ?**

---