

Neil Ribe, Mehdi Habibi et Daniel Bonn

Ils s'enroulent, oscillent, se plient, serpentent...
Soumis à la gravité, les filets de miel, d'huile ou d'autres fluides visqueux ont des comportements étonnants et qui restent imparfaitement compris.

Les acrobaties

Si vous aimez le miel sur votre tartine au petit-déjeuner, vous êtes prêt à réaliser l'une des expériences de physique des fluides les plus simples et les plus belles. Plongez une cuillère dans le pot de miel, sortez-la et tenez-la verticalement, quelques centimètres au-dessus de la tranche de pain. Le filet de miel qui s'en écoule ne rejoint pas la tartine en ligne droite, mais forme, dans le bas, une structure hélicoïdale. À la fin des années 1950, cette ressemblance avec un tas de cordage enroulé a conduit les Américains George Barnes et Richard Woodcock, les premiers chercheurs à examiner le phénomène, à parler d'«enroulement d'une corde liquide».

Nous sommes tous trois fascinés depuis longtemps par cet effet, mais nous n'avions jamais trouvé l'occasion de l'étudier jusqu'à il y a une dizaine d'années, quand N. Ribe et D. Bonn ont découvert par hasard leur intérêt commun lors d'un atelier scientifique à Paris. À l'époque, D. Bonn collaborait avec l'Institut d'études avancées en sciences fondamentales de Zanj, en Iran, et nous

L'ESSENTIEL

- En tombant sur un plan, les fluides visqueux tels que le miel s'enroulent en hélice. Ce phénomène, dont l'étude systématique est récente, présente une complexité inattendue.
- Un fluide très visqueux manifeste quatre modes distincts d'enroulement, selon le bilan des forces de gravité, de viscosité et d'inertie qui s'exercent sur le filament liquide.
- Plusieurs phénomènes, tel celui de la formation de bulles en spirales, restent à expliquer de façon complète.

Photographies de Damien Paparo

avons donc invité M. Habibi et quelques autres chercheurs qui y travaillaient (dont, à divers moments, Ramin Golestanian, Maniya Maleki, Yasser Rahmani et Seyed Hossein Hosseini) à compléter l'équipe.

L'expérience de la tartine en version contrôlée

Nous avons ainsi développé une version contrôlée de l'expérience du petit-déjeuner, en remplaçant le miel par des huiles de silicone, car ces dernières sont disponibles avec un large éventail de viscosités. La viscosité est une mesure de l'«épaisseur» d'un liquide, de sa résistance à l'écoulement due aux frottements internes. Nous avons fait varier les conditions d'écoulement (tels le débit du fluide et la hauteur de laquelle il tombe) et examiné comment elles modifient la fréquence d'enroulement (la vitesse à laquelle la colonne verticale de fluide s'enroule).

Au début, nous nous attendions à ce que l'enroulement soit une affaire de tout

A vertical filament of viscous liquid, likely honey or oil, is shown falling from the top of the frame. As it descends, it begins to coil around itself, forming a tight helical structure. The liquid is highly reflective, showing bright highlights and dark shadows that emphasize its glossy texture. The background is a smooth gradient from light gray at the top to white at the bottom.

des filaments liquides

EN S'ÉCOULANT VERTICALEMENT, un filet de liquide visqueux peut s'enrouler sur lui-même. Quand cet enroulement est assez rapide, un cylindre creux se forme. Ce cylindre grossit, atteint une certaine hauteur et s'effondre. Et le processus recommence...

ou rien, c'est-à-dire à ce qu'il ait lieu ou non, selon les conditions expérimentales. Nous n'étions donc pas du tout préparés à la profusion de comportements différents que nous avons observés.

Par exemple, pour un faible débit, nous avons constaté que plus la hauteur de chute du fluide est grande, plus il s'enroule lentement. Mais pour des débits plus importants, c'est le contraire : quand la hauteur de chute augmente, la fréquence aussi augmente rapidement. De plus, quand on maintient constante la hauteur de chute, le liquide s'enroule en passant, de façon apparemment aléatoire, d'un état à l'autre, les deux états correspondant à des fréquences différentes.

Trois principales forces à l'œuvre

Parallèlement à ces expériences, nous avons élaboré un modèle mathématique afin d'identifier les principes de base à l'œuvre dans l'enroulement d'une corde liquide. Le point de départ était les lois du mouvement de Newton, écrites sous une forme appropriée pour un mince filet liquide beaucoup plus long que son diamètre.

Trois principales forces agissent sur chaque élément de volume d'une telle

■ LES AUTEURS



Neil RIBE est directeur de recherche du CNRS au laboratoire FAST (Fluides, automatique et systèmes thermiques) à l'Université Paris-Sud, à Orsay.



Mehdi HABIBI est chercheur invité à l'Institut de physique de l'Université d'Amsterdam. Il est aussi professeur à l'Institut d'études avancées en sciences fondamentales à Zanjan, en Iran.



Daniel BONN dirige l'Institut de physique de l'Université d'Amsterdam. Ses travaux sur les enroulements liquides ont été en partie réalisés alors qu'il était chercheur du CNRS à l'École normale supérieure, à Paris.

corde liquide. Il y a d'abord la gravité, qui s'exerce vers le bas, et les forces visqueuses (forces de frottement interne). La corde peut se déformer de trois façons : elle peut s'étirer, se courber ou se tordre. À chacun de ces modes de déformation est associée une force visqueuse qui s'y oppose.

La forme de la corde dépend des intensités relatives de ces forces ainsi que de la force d'inertie du fluide (c'est-à-dire le produit de la masse de l'élément fluide par son accélération). La tension de surface, force importante dans de nombreux autres écoulements fluides, s'est révélée ne jouer ici qu'un rôle mineur.

La résolution des équations était un défi. Dans la plupart des problèmes de physique figurant dans les manuels universitaires, les frontières du système sont spécifiées, et la tâche de l'étudiant est de déterminer ce qui se passe à l'intérieur. En revanche, l'enroulement d'une corde liquide est ce que les physiciens nomment un « problème aux frontières libres », où la forme de la frontière est inconnue et fait elle-même partie du problème à résoudre. Avec beaucoup de précaution, nous avons réussi à montrer que l'enroulement d'un fluide très visqueux peut avoir lieu selon quatre modes distincts, chacun caractérisé

Enroulements et balancements

Les filaments de fluide visqueux peuvent s'enrouler de quatre façons différentes selon les intensités relatives des forces de gravité, d'inertie et de viscosité (forces de frottement). Dans les exemples illustrés ci-contre, les auteurs ont laissé couler un filet d'huile de silicone sur une plaque métallique de hauteur variable. Le filet avait un diamètre de 0,7 millimètre et s'écoulait avec un débit de 0,23 millilitre par minute. Les huiles présentant une viscosité telle que celle utilisée ici (100 000 centistokes) mettent quelques minutes à s'écouler entièrement de la cuillère. Pour comparaison, l'eau à température ambiante a une viscosité de 1 centistoke ; la viscosité du miel est, elle, de 10 000 centistokes.

① Mode visqueux. Lorsque le filet d'huile tombe d'une faible hauteur (4 à 8 millimètres), il se comporte comme du dentifrice qu'on fait sortir lentement du tube en le pressant. Le fluide s'enroule si lentement que la gravité et l'inertie sont négligeables par rapport aux forces de frottement. La force visqueuse dominante est celle qui s'oppose à la flexion.

② Mode gravitationnel. Pour des hauteurs de chute comprises entre 1,5 et 7 centimètres, la gravité devient un facteur important. La corde liquide présente deux parties, une longue queue au-dessus et un enroulement plus court en dessous. Dans la queue, la gravité équilibre la résistance visqueuse à l'étirement, alors que dans l'enroulement elle équilibre la résistance visqueuse à la flexion.

③ Mode pendulaire. Pour des hauteurs comprises entre 7 et 12 centimètres, la queue se balance d'avant en arrière à la manière d'un pendule. Pour la plupart des hauteurs, la queue ne peut pas se balancer librement, car son mouvement est régi par l'enroulement, dans le bas. Mais pour certaines hauteurs d'écoulement, la fréquence d'enroulement correspond à l'une des fréquences naturelles d'oscillation de la queue (un effet de résonance, par lequel la situation s'auto-renforce). La queue tournoie alors en décrivant un large cercle.

④ Mode inertiel. Au-delà de 15 centimètres de chute, la queue est quasiment verticale, parce que l'enroulement n'exerce plus sur elle d'attraction latérale significative. Au sein de l'enroulement, la force visqueuse qui résiste à la flexion est presque entièrement équilibrée par l'inertie, la gravité ne jouant plus qu'un rôle mineur.