

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.

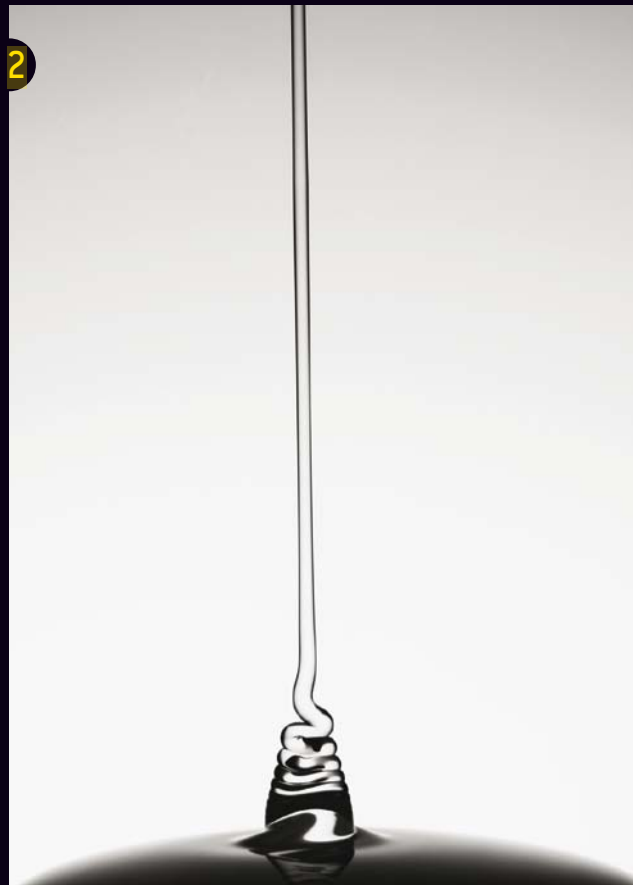
❶ **Mode visqueux.** Lorsque le filet d'huile tombe d'une faible hauteur (4 à 8 millimètres), il se comporte comme du dentifrice qu'on fait sortir lentement du tube en le pressant. Le fluide s'enroule si lentement que la gravité et l'inertie sont négligeables par rapport aux forces de frottement. La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

❷ **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.

❸ **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.

❹ **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.





Au-delà du simple enroulement

Les liquides très fluides, contrairement aux liquides visqueux, peuvent faire beaucoup plus que juste s'enrouler. Dans ces exemples, les auteurs ont utilisé des huiles de viscosité comprise entre 400 et 6 000 centistokes : des liquides plus coulants que le miel, mais plus épais que l'eau.

❶ **Écoulement stationnaire.** Pour une viscosité relativement faible, de petites hauteurs de chute et des débits élevés, le fluide tombe tout droit et s'étale de façon égale dans toutes les directions de la plaque. Ces conditions s'appliquent à des liquides ménagers courants tels que l'eau ou l'huile d'olive. Cela dit, même ces liquides peuvent s'enrouler si les conditions sont réunies. Ainsi, de l'huile d'olive versée d'une hauteur de 10 centimètres à un débit de 1 millilitre par 40 minutes s'enroulerait.

❷ **Pliage rotatif.** La corde liquide se replie périodiquement sur elle-même tandis que l'ensemble du motif de pliage tourne autour d'un axe vertical, créant un effet de torsion.

❸ **Surenroulement.** Le surenroulement désigne ce qui se passe avec des cordons téléphoniques entortillés, c'est-à-dire subissant un enroulement secondaire qui se superpose à la structure déjà bien enroulée. Dans le cas des fluides, le filament qui s'écoule crée un cylindre creux, qui à son tour s'enroule dans son ensemble. L'enroulement secondaire se fait à un rythme environ dix fois plus lent que l'enroulement primaire.





Des spirales de bulles

Les auteurs ont découvert ce motif par hasard en expérimentant avec une huile de silicone de haute viscosité (30 000 centistokes), à un débit élevé (0,14 millilitre par seconde) et à de faibles hauteurs de chute (3 à 4 centimètres). Les spirales ont toujours cinq branches. Elles naissent parce que le centre de l'enroulement n'est pas fixe, mais décrit un cercle. Aux points de croisement entre les boucles successives du filament liquide qui s'enroule, des bulles d'air sont facilement piégées. La position des points de piégeage migre lentement autour d'un cercle tandis que les bulles précédentes sont entraînées radialement par le fluide qui s'étale. Les spirales résultent de la combinaison de ces deux mouvements.

par un bilan de forces différent (voir l'encadré page 32).

Ayant déterminé les grands types d'enroulements, nous pensions avoir brossé un tableau assez complet – à tort. Des expériences complémentaires, menées à titre exploratoire et sans idées préconçues, ont révélé des phénomènes nouveaux et remarquables.

Le premier est l'apparition de magnifiques ondes spirales de bulles d'air dans la mince couche de fluide qui s'écarte du filament en train de s'enrouler (voir la photographie ci-dessus). Elles se forment quand les boucles successives du filament sont légèrement décalées l'une par rapport à l'autre, piégeant de petites poches d'air. Mais nous ne comprenons toujours pas ce qui confère à ces spirales leur forme précise, ni pourquoi elles ne se créent que dans une plage étroite de valeurs de la viscosité, du débit et de la hauteur de chute du fluide.

Nous avons également joué avec des huiles de silicone de viscosité beaucoup plus faible. Ces fluides s'enroulent beau-

coup plus rapidement (jusqu'à 2 000 fois par seconde) et il nous a donc fallu des caméras rapides pour enregistrer leur comportement. Les fluides peuvent s'enrouler et même se plier de façons bien plus complexes (voir l'encadré page 34). Un état donné persiste longtemps en l'absence de perturbation, mais bascule soudainement dans un autre si l'on donne au dispositif un petit coup bien sec.

Dans toutes les expériences décrites ci-dessus, le fil de liquide tombait sur une surface immobile. Mais d'autres effets peuvent apparaître si la surface et la source de liquide sont en mouvement relatif, comme ont pu l'observer l'artiste américain Jackson Pollock avec ses tableaux d'action painting ou les fabricants de textiles avec des fils de polymère fondu.

Couler sur un tapis roulant

En 2006, à l'Université de Cambridge en Grande Bretagne, nos collègues Keith Moffat, Sunny Chiu-Webster et John Lister ont étudié ces situations en utilisant une sorte de « machine à coudre du fluide ». Ce dispositif extrude un filament de fluide visqueux sur un tapis qui roule horizontalement à vitesse constante. À grande vitesse, le fil tiré laisse une trace rectiligne sur le tapis. Mais quand le tapis avance plus lentement, des motifs irréguliers plus complexes émergent : des méandres, des boucles qui alternent, des doubles enroulements et même une forme en W.

Nous avons encore beaucoup de chemin à faire avant de comprendre parfaitement les cordes liquides. L'une des grandes priorités est de comprendre le mécanisme qui engendre les ondes spirales de bulles. Pourquoi le centre de l'enroulement se met-il à décrire une trajectoire distincte ? Un autre objectif est de modéliser l'enroulement secondaire complexe qui se produit dans les fluides de faible viscosité.

Nous projetons aussi d'étendre notre exploration à des systèmes plus exotiques, notamment des fluides complexes qui réagissent de façon inhabituelle aux forces appliquées, ainsi que des fluides électriquement chargés qui s'enroulent à des échelles micrométrique ou nanométrique dans un champ électrique. À en juger par nos expériences passées, bien d'autres surprises nous attendent. ■

■ SUR LE WEB

Instructions pour réaliser vos propres expériences et des liens vers des vidéos d'enroulements de cordes liquides : ScientificAmerican.com/feb2014/coils

■ BIBLIOGRAPHIE

A. Javadi et al., *Delayed capillary breakup of falling viscous jets*, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 110, 144501, 2013.

N. M. Ribe, M. Habibi et D. Bonn, *Liquid rope coiling*, *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 44, pp. 249-266, 2012.

P.-Th. Brun, *Dynamique des filaments élastiques et visqueux*, thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, 17 septembre 2012.

A. Herczyński et al., *Painting with drops, jets, and sheets*, *Physics Today*, vol. 64, pp. 31-36, juin 2011.