

ces pressions ? Il y a d'abord la pression hydrostatique, due au poids du liquide et qui ne dépend que de sa hauteur. S'ajoute une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la goutte, due à la tension superficielle et qui apparaît lorsque la surface du liquide n'est pas plane.

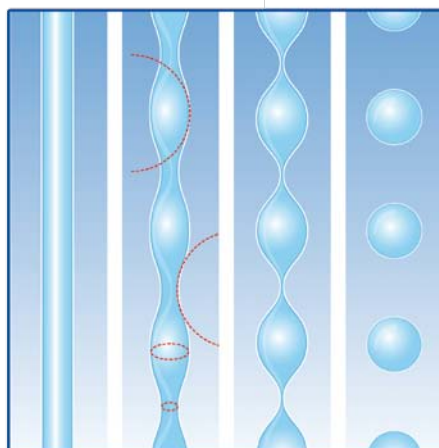
En effet, quand la surface d'un fluide est convexe, la pellicule élastique évoquée plus haut « presse » le fluide vers l'intérieur, comme le fait la paroi d'une bulle de savon ou d'un ballon de baudruche. Le fluide est donc en surpression par rapport à l'extérieur. Quand sa surface est concave, il est au contraire en dépression. Plus précisément, la différence de pression est proportionnelle à la tension superficielle et inversement proportionnelle au rayon de courbure moyen de la surface : c'est la loi dite de Laplace.

Avec ces ingrédients, il est possible de calculer la forme de la goutte pendante. Les prédictions sont d'une telle qualité qu'il est possible d'en déduire la valeur de la tension superficielle d'un liquide juste en examinant les photos d'une goutte pendante !

## Des jets fragmentés par une instabilité

Intéressons-nous maintenant à l'évolution d'un jet d'eau régulier coulant d'un robinet. À mesure de sa chute, le jet s'amincit vite et fait apparaître des ondulations jusqu'à se fragmenter en petites gouttes de taille bien déterminée (voir la figure 2). L'aminçissement se comprend aisément : l'eau, en chute libre, gagne en vitesse ; le débit étant constant le long du jet, la section de ce dernier doit alors diminuer. Mais pourquoi le jet se fragmente-t-il ?

Les plus astucieux argueront que la forme approximativement cylindrique du jet n'est pas la forme optimale du liquide, à savoir la sphère, qui est de surface minimale pour un volume donné. Certes, mais selon quels mécanismes se développe l'instabilité qui transforme le cylindre en gouttes sphériques ? Une bonne idée est d'imaginer que le jet d'eau est un cylindre présentant déjà des ondulations périodiques (voir le cartouche de la figure 2), et de se



**2. UN FILET D'EAU COULANT D'UN ROBINET** s'amincit rapidement au cours de la chute et se fragmente en gouttes. Cette fragmentation résulte du développement d'une instabilité. Supposons qu'une perturbation quelconque déforme la surface du jet (voir le cartouche). La déformation, considérée comme sinusoïdale pour faciliter les analyses, s'amplifie et finit par fragmenter le jet lorsque, dans les bourrelets, la pression du liquide est inférieure à celle du liquide des parties resserrées. Les différences de pression dépendant des courbures (en rouge) de la surface, les calculs montrent que l'instabilité se développe pour des longueurs d'onde supérieures à environ six fois le rayon du jet.

demander ce qui pourrait faire croître ou décroître ces déformations.

Les sections horizontales de ce cylindre ondulé sont des disques de rayons variables, plus grands au niveau des bourrelets du jet et plus petits au niveau de ses creux. D'après la loi de Laplace, la surpression est donc plus élevée dans les creux que dans les bourrelets. Par conséquent, le liquide va se déplacer des creux vers les bourrelets, de même qu'une petite bulle se vide de son gaz dans une bulle plus grande. Les creux vont disparaître, les bourrelets grossir et le jet se fragmenter. CQFD.

Ce raisonnement est hélas incomplet : il oublie que le cylindre ondulé est doté d'une autre courbure, celle que l'on visualise en faisant des coupes verticales. On s'aperçoit alors que l'on doit ajouter une surpression dans les bourrelets, tandis que les creux subissent une dépression en raison de la forme concave de leur surface. Les creux devraient donc aspirer le liquide et résorber les bourrelets !

Des deux phénomènes antagonistes, lequel l'emportera ? On peut déjà remarquer que pour des petites périodicités d'ondulation (à amplitude donnée), les

## LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

## BIBLIOGRAPHIE

T. C. Lipscombe et C. E. Mungan, *The physics of shot towers*, *The Physics Teacher*, vol. 50(4), pp. 218-220, 2012.

P.-G. de Gennes *et al.*, *Gouttes, bulles, perles et ondes*, Belin (2<sup>e</sup> édition), 2005.

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur [www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)





**3. DES BILLES DE PLOMB** sphériques et calibrées étaient fabriquées à l'aide d'une tour, comme à Couëron (Loire-Atlantique). Au sommet, on faisait fondre le plomb, que l'on versait dans une cuve percée de trous de taille précise. Le plomb s'écoulait en filets qui se brisaient en gouttes au cours de la chute. Les gouttes se refroidissaient en tombant et étaient freinées par un récipient rempli d'eau.

rayons de courbure dans le plan vertical sont plus petits, d'où des différences de pression plus élevées, ce qui favorise la résorption de l'ondulation. Il semble donc que seules les ondulations de grandes longueurs d'onde par rapport au rayon  $R$  du cylindre peuvent croître.

Le calcul complet est dû à Lord Rayleigh (1842-1919), qui identifia non seulement la valeur minimale de la longueur d'onde  $\lambda$  qui permet le développement de l'instabilité ( $\lambda \approx 2\pi R$ ), mais aussi la valeur qui donne la croissance la plus rapide de l'ondulation ( $\lambda \approx 9,02 R$ ). Cette dernière est particulièrement intéressante, car elle fixe la longueur des segments de liquide qui vont se découper dans le jet et donc le volume des gouttes. En pratique, il faut ajouter l'effet de l'amincissement du jet, mais la conclusion est la même : la fragmentation conduit à

des gouttes dont la taille ne dépend que du rayon initial du jet.

Il est remarquable que ce résultat ait été exploité bien avant son étude scientifique, pour fabriquer... des billes de plomb bien sphériques ! En faisant s'écouler du plomb fondu à travers une cuve percée de trous calibrés, on crée des jets liquides qui, par fragmentation, donnent des billes de la taille désirée. Si on le fait dans une tour assez haute (de l'ordre de 50 mètres), la chute permet de refroidir suffisamment la bille pour qu'il n'y ait ni choc thermique ni déformation lors de son arrivée et son freinage dans le réservoir d'eau, au bas de la tour (voir la figure 3). Ce procédé a fait la richesse de son inventeur anglais, William Watts, au XVIII<sup>e</sup> siècle. Il reste utilisé aujourd'hui pour la fabrication de billes d'urée, destinées surtout à l'industrie chimique. ■

## Restez en contact avec l'actualité scientifique.

POUR LA  
**SCIENCE**  
[www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)



Rejoignez-nous sur Facebook  
<http://bit.ly/pls-facebook>



Suivez-nous sur Twitter  
<http://twitter.com/PourlaScience>



Abonnez-vous à nos flux RSS  
<http://bit.ly/pls-rss>



Recevez nos lettres d'information  
<http://bit.ly/pls-newsletters>



Visitez notre site Internet  
<http://www.pourlascience.fr>