

épigénétiques d'un gène donné est illustrée par un fil qui, selon qu'il est tendu ou non, se traduit par une dépression ou un pic. Ces modifications exercent en quelque sorte une « force chimique » qui déforme le paysage (*la nappe est élastique*) en raccourcissant ou non les fils. Certaines agissent de concert (*a, les fils sont réunis en un nœud*), d'autres ont plusieurs effets (*b, plusieurs fils partent d'un même picot*).

La différenciation des cellules d'un organisme est ici représentée par des billes (*en*

rouge, bleu et vert) qui cheminent dans les vallées du paysage. Une bille ne peut que descendre vers son destin ! À chaque bifurcation, un choix est fait, dépendant des gènes et de l'environnement, engageant un peu plus irrémédiablement la cellule vers sa fonction finale. Waddington nommait *créodes* les chemins possibles, ce néologisme étant issu de deux termes grecs qui signifient « chemin nécessaire ».

Pour Waddington, le paysage épigénétique n'était qu'une image approximative que

l'on ne pouvait interpréter de façon rigoureuse. Ce n'est plus le cas. Plusieurs équipes ont su déterminer expérimentalement le paysage épigénétique d'une cellule (adipocyte, cellule musculaire...) et son évolution. La dynamique révélée correspond bien aux animations de P. Harrison. La métaphore n'en est plus tout à fait une. ■

La vidéo *The Epigenetic Landscape* est visible sur : www.vivomotion.co.uk/folio.html
Le site de *EpiGeneSys* : www.epigenesys.eu



Paul Harrison, Link Li et Mhairi Towler

IDÉES DE PHYSIQUE

Des gouttes bien calibrées

Les gouttes se détachant d'un compte-gouttes sont de taille uniforme, tout comme celles formées par un filet d'eau qui se fragmente. Pourquoi ?

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Quand un robinet est mal fermé, les gouttes qui tombent une à une sont toutes identiques. Il en est de même pour celles qui se créent quand un filet d'eau se brise. Cette uniformité de taille est telle qu'elle permet un dosage précis de certains médicaments, administrés à l'aide d'un compte-gouttes. Elle ne repose pas sur le remplissage d'un récipient calibré, mais sur des phénomènes liés à la tension superficielle des liquides, c'est-à-dire à leur propension à prendre des formes dont la superficie est minimale.

Pour créer des gouttes de taille déterminée, il existe un outil simple et bien commode : le compte-gouttes. Lorsqu'on appuie doucement sur la poire qui surmonte le tube en verre, du liquide émerge et prend la forme d'une ampoule. Celle-ci s'allonge et se déforme à mesure qu'elle grossit,

jusqu'à se détacher en une goutte à peu près sphérique (voir la figure 1).

Que se passe-t-il ? Entre les molécules du liquide agissent des forces de cohésion. Il faut alors fournir de l'énergie pour amener des molécules du cœur du liquide à la surface, là où elles ont beaucoup moins de voisines, donc beaucoup moins de liens de cohésion. Cette propriété est quantifiée par la « tension superficielle », souvent notée γ (gamma), qui est l'énergie à fournir au fluide pour créer une unité de surface supplémentaire. Elle signifie aussi que l'on peut assimiler la surface du liquide à une mince pellicule élastique, qui doit être la moins étendue possible.

Lorsqu'on appuie sur la poire d'un compte-gouttes, on pousse du liquide hors du tube. Pourquoi le liquide ne tombe-t-il pas tout de suite ? Parce qu'il est retenu

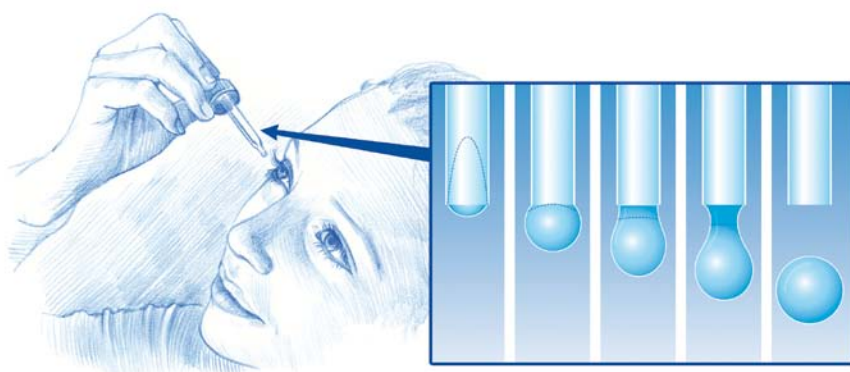
par la force capillaire exercée au niveau de la circonférence du tube. Cette force résulte de la tension superficielle [qui est de même dimension qu'une force par unité de longueur] et est égale à $2\pi r\gamma$, où r est le rayon du tube.

Force capillaire sur goutte pendante

À mesure que la goutte grossit, le volume de liquide augmente, mais pas la force capillaire. Lorsque le poids de liquide dépasse cette dernière, une goutte se détache et tombe – et son volume est déterminé, comme il se doit pour un compte-gouttes. Et si la goutte est assez petite, son poids ne suffit pas à la déformer : elle reste sphérique, forme qui présente une surface minimale pour un volume donné.

Avec un tube de un millimètre de rayon, on calcule, connaissant la valeur de la tension superficielle, que le volume d'une goutte d'eau qui tombe devrait être d'environ 50 millimètres cubes. Cependant, les considérations précédentes nécessitent des corrections. On constate en effet que la goutte pendante s'étire peu à peu et présente un col avec un rétrécissement important. Au moment de son détachement, une partie du liquide sorti hors du tube reste alors accrochée.

À toutes les étapes de sa croissance, la goutte a une forme parfaitement déterminée : celle qui réalise l'équilibre des pressions en tout point de sa surface. Quelles sont



1. UNE GOUTTE SE DÉTACHE d'un compte-gouttes quand le poids du liquide émergeant du tube devient supérieur à la force de capillarité qui la retient. Cette force de capillarité est égale au produit de la tension superficielle du liquide par la circonférence de l'orifice du tube.

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.

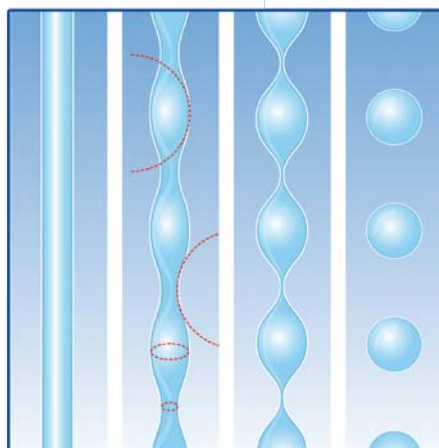
En effet, quand la surface d'un fluide est convexe, la pellicule élastique évoquée plus haut « presse » le fluide vers l'intérieur, comme le fait la paroi d'une bulle de savon ou d'un ballon de baudruche. Le fluide est donc en surpression par rapport à l'extérieur. Quand sa surface est concave, il est 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^e édition), 2005.

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur 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 λ 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^e 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



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>

PLS433 – Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 30.11.2013