

## La forme d'une goutte qui ruisselle

*Quand une goutte glisse assez vite sur une surface inclinée, un coin se développe sur sa frontière arrière, puis la queue se fractionne en perles.*

**L**e ruissellement de gouttes en mouillage partiel est un phénomène étonnant. Le mouillage partiel se produit lorsqu'un liquide présente peu d'affinités pour un solide. Une goutte de pluie qui ruisselle sur une vitre révèle plusieurs comportements : certaines gouttes, immobiles, semblent « accrochées » au verre ; d'autres glissent, s'étirent, et finissent parfois par se fractionner en gouttelettes. Récemment, nous avons réalisé une étude expérimentale du ruissellement de gouttes sur un plan incliné. Nous avons montré que la complexité apparente du phénomène se développe à partir d'une forme très simple : les gouttes forment un front arrière en « coin ».

En apparence un peu académique, cette étude est en réalité d'une grande importance pour la compréhension de la dynamique du mouillage, c'est-à-dire des déplacements de la ligne de contact qui sépare une surface recouverte de liquide de celle qui ne l'est pas. Cette question est essentielle dans de nombreuses applications industrielles comme l'impression à jet d'encre, le traitement de l'eau, le ruissellement dans les échangeurs de chaleur, le dépôt d'un revêtement sur un substrat, par exemple.

Formées d'huile de silicone (des molécules constituées de chaînes de silicium et d'oxygène, Si-O), les gouttes que nous étudions glissent sur des surfaces de verre revêtues de vernis fluorés. On obtient ainsi des conditions très propres de mouillage partiel, stables et reproductibles, comparables à celles qu'assure le revêtement en téflon d'une poêle anti-adhésive. En faisant varier l'inclinaison de la plaque et la taille des gouttes, nous avons mis en évidence les différents régimes d'écoulement possibles. À faible vitesse, les gouttes ont une forme arrondie. Au-delà d'un certain seuil de vitesse, la « ligne de contact » entourant leur base devient anguleuse et forme un coin. Ceci signifie que la surface libre du liquide prend, à cet endroit, une forme conique. À mesure qu'augmente la vitesse, ce cône s'allonge jusqu'à former une queue liquide « perlante », qui finit par se fractionner en gouttelettes, sur le chemin de la goutte.

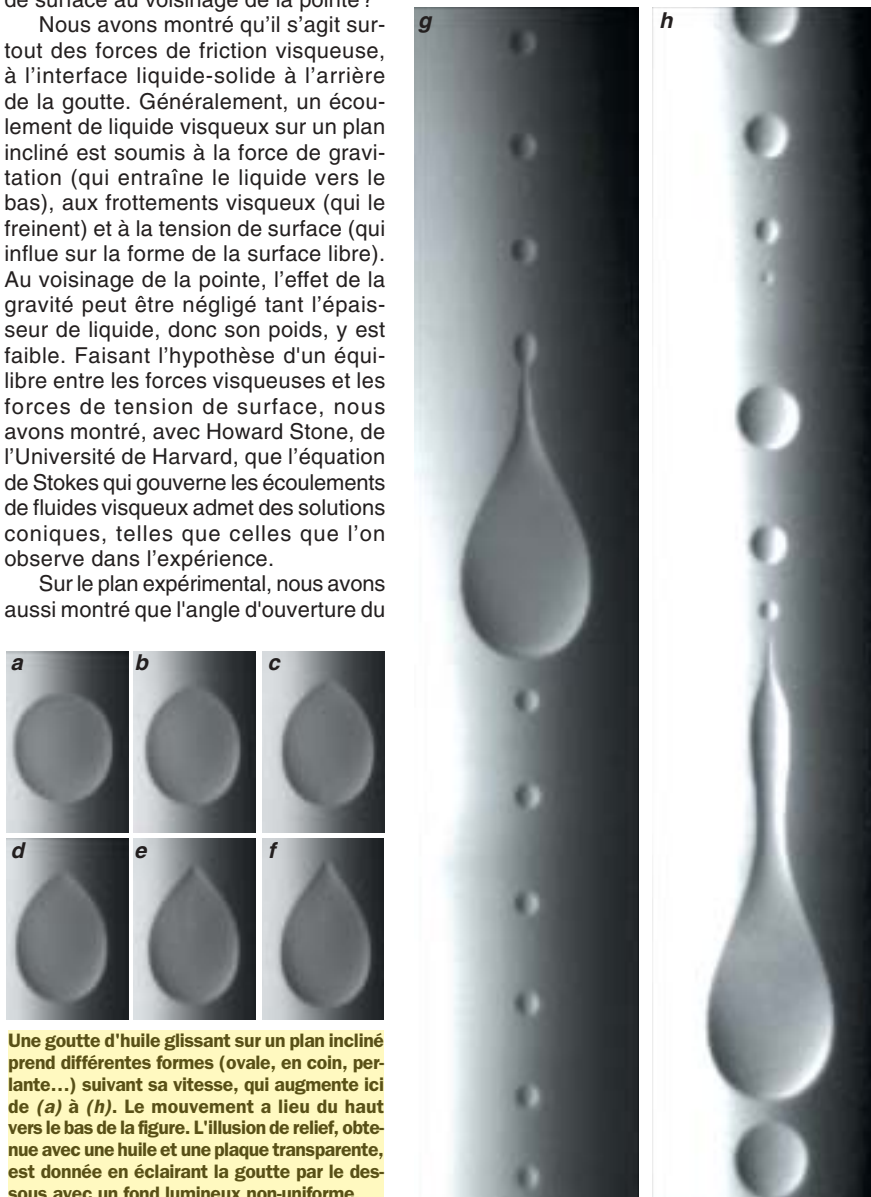
Les vitesses de transition entre ces différents régimes d'écoulement dépendent des propriétés physiques du liquide et de la surface (viscosité, tension de surface), mais pas des paramètres géométriques, la taille de la goutte, par exemple. Ainsi, c'est la nature de l'écoulement à l'arrière d'une goutte qui détermine sa façon de ruisseler. Pourquoi l'arrière de la goutte a-t-il une forme conique ? L'élasticité de l'interface liquide-air, caractérisée par un paramètre nommé tension de surface, tend naturellement à réduire la surface libre du liquide, donc sa courbure, de sorte que les pointes semblent, *a priori*, exclues. En d'autres termes, « la tension de surface arrondit les angles ». Quelles forces contrecarrent les effets de la tension de surface au voisinage de la pointe ?

Nous avons montré qu'il s'agit surtout des forces de friction visqueuse, à l'interface liquide-solide à l'arrière de la goutte. Généralement, un écoulement de liquide visqueux sur un plan incliné est soumis à la force de gravitation (qui entraîne le liquide vers le bas), aux frottements visqueux (qui le freinent) et à la tension de surface (qui influe sur la forme de la surface libre). Au voisinage de la pointe, l'effet de la gravité peut être négligé tant l'épaisseur de liquide, donc son poids, y est faible. Faisant l'hypothèse d'un équilibre entre les forces visqueuses et les forces de tension de surface, nous avons montré, avec Howard Stone, de l'Université de Harvard, que l'équation de Stokes qui gouverne les écoulements de fluides visqueux admet des solutions coniques, telles que celles que l'on observe dans l'expérience.

Sur le plan expérimental, nous avons aussi montré que l'angle d'ouverture du

coin s'ajuste pour que la vitesse apparente de la ligne de contact (vitesse de retrait du liquide mesurée perpendiculairement à la ligne) reste un peu au-dessous de la vitesse limite qui conduirait au dépôt d'un film de liquide sur le solide derrière la goutte. Le processus de formation du coin s'enclenche dès que la vitesse de la goutte atteint cette vitesse limite, de façon à minimiser l'augmentation de surface libre de liquide qui résulterait du dépôt d'un film. À partir d'une certaine taille de la queue, cet équilibre est rompu, et les gouttes ruisselantes finissent par semer des perles sur leur chemin.

Thomas PODGORSKI, Jean-Marc FLESSELLES,  
Adrian DAERR et Laurent LIMAT,  
Laboratoire PMMH, ESPCI (CNRS UMR 7636)



Une goutte d'huile glissant sur un plan incliné prend différentes formes (ovale, en coin, perlante...) suivant sa vitesse, qui augmente ici de (a) à (h). Le mouvement a lieu du haut vers le bas de la figure. L'illusion de relief, obtenue avec une huile et une plaque transparente, est donnée en éclairant la goutte par le dessous avec un fond lumineux non-uniforme.

R., et S. Michaud/Rapport

المقالة الثانية في طبيعة الدماغ وسائر أفعاله  
وهذه طبيعة العجز التي من طبيعة الدماغ على الإنسان بعد إتمامه  
وسماها علماء رجع إليها يعرف الإنسان طبيعة الشيء بما عجزه  
بما عجزه التي يخرج من هذا فلا بد من عجز هذا العلم واحد الدماغ

Les Romains avaient dû prendre connaissance du point où les rayons réfléchis convergeaient, mais ils ne lui donnèrent pas de nom. Nous devons le mot «foyer» (du latin *focus*) à l'astronome Johannes Kepler (1571-1630), qui fit aussi des recherches sur les propriétés des surfaces réfléchissantes et réfractantes, quelques décennies avant Snell et Descartes. Il étudia la focalisation des rayons par des miroirs paraboliques, elliptiques et hyperboliques. Lorsqu'il découvrit que les planètes avaient des orbites elliptiques, il plaça tout naturellement le Soleil à l'un des foyers.

## LES FOYERS DE KEPLER

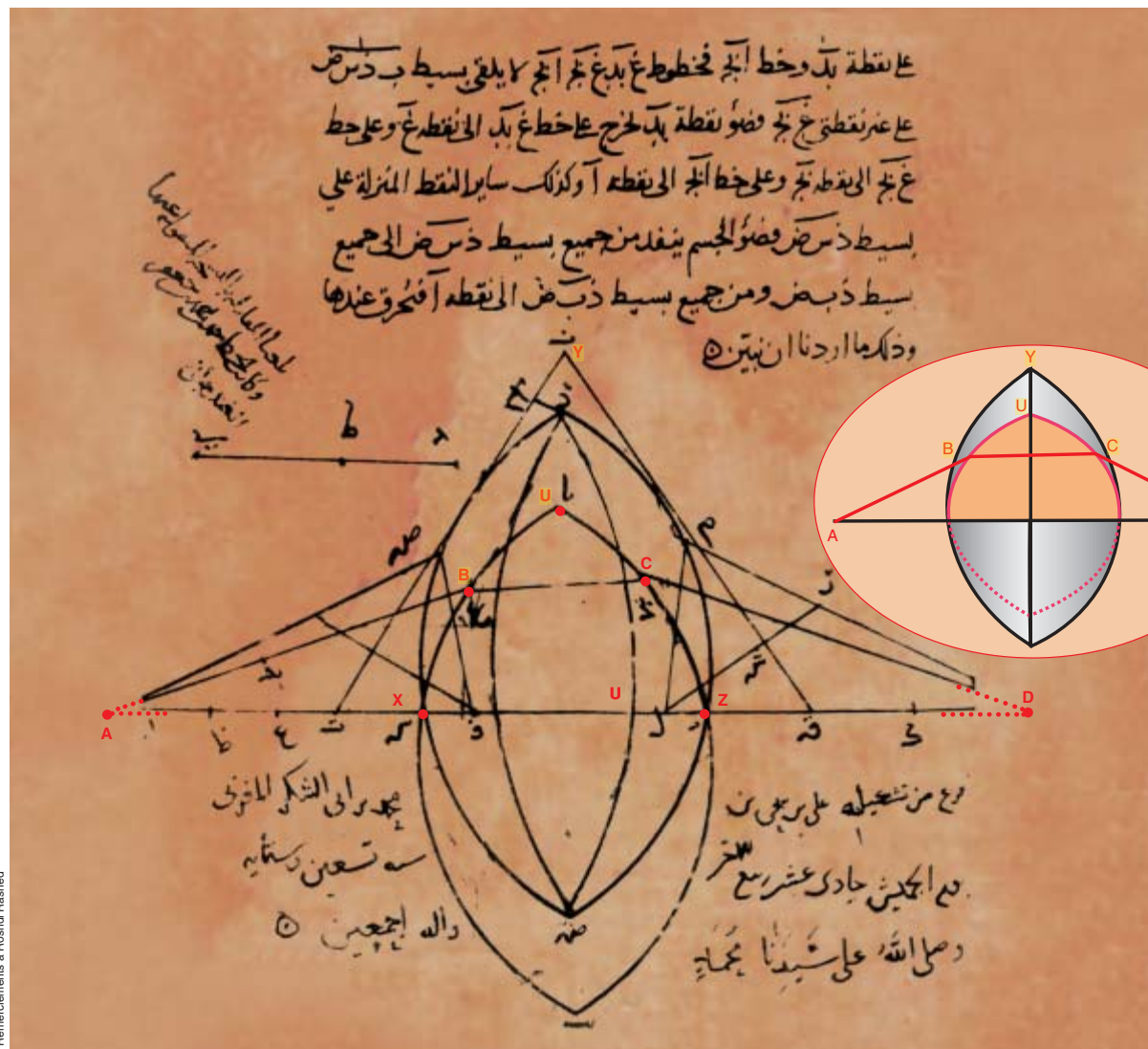
Avec les verres ardents, Kepler eut moins de succès, car il ne disposait pas de la loi des sinus qu'il aurait menée aux anaclasses. Pour obtenir cette loi, il contacta l'astronome anglais Thomas Harriot, qui avait laissé entendre l'avoir trouvée. D'après les notes de ce dernier, étudiées par les historiens des sciences dans les années 1950, il avait effectivement établi la loi des sinus depuis 1602 (la loi de Snell-Descartes aurait donc déjà du être renommée loi de Harriot). Lorsque Kepler lui demanda la loi, Harriot lui envoya des tables de valeurs expérimentales. en



Dans son traité sur la réfraction par un milieu anaclastique, il a étudié les faces réfractantes et a fait passer des rayons à travers une lentille unique (*voir l'illustration*). Les lentilles d'optique comme «verres de feu». Au III<sup>e</sup> siècle, le philosophe aurait servi des tablettes de cire pour effacer les dettes qui ne pouvaient être les vestales utiliser des verres ardents pour brûler avec une flamme du Soleil. Au premier siècle, l'ancêtre de la lunette.

R. et S. McInnes (Paganini)





2. Extrait de *Sur les instruments ardents*, d'Ibn Sahl, écrit vers 984. Après avoir énoncé la loi des sinus et avoir étudié la réfraction à travers une surface hyperbolique, Ibn Sahl considère une lentille biconvexe limitée par deux hyperboles. La figure décrit le trajet des rayons lumineux à travers la lentille. Le texte qui l'accompagne démontre qu'un rayon émanant du point A (et tombant en B sur la demi-lentille XYZ) subit une première réfraction qui le

se plaignant que son état de santé l'empêchait de la formuler explicitement sous une forme qui puisse être publiée. Peut-être ne voulait-il pas risquer de s'attirer les foudres du clergé, suspicieux à l'égard des travaux scientifiques. À mesure que la santé de Harriot déclina, la patience de Kepler s'épuisa et ce dernier entreprit d'établir seul la loi de la réfraction. Il observa que lorsque les rayons sont à peu près parallèles à l'axe de la lentille (ces rayons sont dits paraxiaux), l'angle de réfraction est proportionnel à l'angle d'incidence. De plus, il remarqua que le facteur de proportionnalité dépendait des milieux que le rayon traversait. Il appliqua cette approche aux lentilles, puis aux instruments astronomiques. Cependant, cette approximation ne l'amena pas à déterminer les formes des anacastiques, que les scientifiques cherchaient depuis si longtemps.

Outre sa correspondance avec Harriot, Kepler utilisa une autre source d'informations. Dans les années 1600, il avait écrit un traité d'optique astronomique, dans le prolongement de

celui d'un savant polonais nommé Witello. Ce volume était paru en 1270 et contenait aussi l'*Opticae Thesaurus*, un manuel d'optique arabe traduit en latin (mais on ignore par qui). Ce dernier était le *Kitâb al-manâzîr*, écrit au XI<sup>e</sup> siècle par le savant arabe Abu ali al-Hasan Ibn al-Haytham, que l'Europe médiévale appelait par la forme latine de son prénom, Alhazen. Ainsi, l'influence d'Ibn al-Haytham en Europe datait déjà de plusieurs siècles : du Moyen Âge à la Renaissance, pratiquement tous les traités d'optique se fondaient sur ses travaux.

### L'ÉCOLE ARABE

Contrairement à une idée assez répandue en Occident, les scientifiques arabes n'étaient pas de simples bibliothécaires qui ne faisaient que perpétuer le savoir grec, ils ont largement étendu les connaissances de leurs prédécesseurs antiques dans de nombreuses disciplines. Après une période de traductions