

L'ESSENTIEL

> Les premières observations du ressaut hydraulique sont anciennes. Pourtant, les modèles qui décrivent ce phénomène ne sont pas encore totalement satisfaisants.

> Des expériences et des travaux théoriques récents continuent d'affiner la compréhension du ressaut hydraulique.

> La modélisation du ressaut présente des analogies avec des systèmes astrophysiques bien plus difficiles à étudier en laboratoire : les supernovæ ou les hypothétiques « trous blancs », inverses des trous noirs.

L'AUTEUR



ALEXIS DUCHESNE
maître de conférences
à l'université de Lille
et à l'Institut d'électronique,
de microélectronique et
de nanotechnologie (IEMN)

Le bourrelet liquide qui se forme dans un évier autour du jet d'eau du robinet est facile à observer. Mais ce phénomène résiste depuis cinq cents ans à une explication complète. Et, de façon surprenante, il sert aussi à comprendre certaines explosions d'étoiles.

Et si, une fois la vaisselle terminée, vous laissez le robinet couler encore un peu ? Ce n'est certes pas très écologique, mais cela vous permettra d'observer un phénomène surprenant. Le jet atteint le fond de l'évier et l'eau s'écoule radialement autour du point d'impact sous la forme d'un mince film. En raison de l'étalement radial et de la friction de l'eau sur la surface de l'évier, on s'attend à ce que le film liquide perde peu à peu sa vitesse. Pour autant, on n'anticipe pas la présence d'une transition brutale, où le film de faible épaisseur et de forte vitesse fait place à un écoulement environ cinq fois plus épais et cinq fois plus lent. Ce changement de régime d'écoulement se traduit par un « mur » d'eau, un bourrelet liquide circulaire. C'est ce qu'on appelle le « ressaut hydraulique circulaire ».

Même s'il nous est familier, un tel ressaut peut surprendre, car il va à l'encontre d'un précepte partagé par les physiciens et les philosophes depuis Aristote jusqu'à Newton et élevé au rang d'axiome par Leibniz : *Natura non facit saltus* (« La nature ne fait pas de saut »). Ce principe, également nommé « principe de continuité », est assez intuitif et, en effet, très souvent valable. Il suppose qu'en général les choses évoluent de façon continue et progressive. Et pourtant, dans l'évier, on observe un ressaut plutôt qu'une pente faible et régulière de la surface liquide.

Pendant longtemps, ce mur d'eau ne semble pas avoir troublé les savants. Il a fallu attendre

Léonard de Vinci, au ^{xv}^e siècle, pour trouver la première description du ressaut. Il notait ainsi dans ses carnets : « L'eau qui tombe en ligne perpendiculaire par un tuyau arrondi sur un lieu plan, tracera une onde circulaire autour de l'endroit percuté ; à l'intérieur de ce cercle, l'eau se mouvra très rapidement et s'étalera en une couche fort mince autour du point frappé, puis finira par heurter la vague qu'elle a produite qui cherche à retourner au lieu de la percussion. »

En termes modernes, de Vinci définit, à juste titre, le ressaut comme une onde de choc. Pour les physiciens, ce phénomène est dû à la compétition entre la vitesse de déplacement du liquide et la célérité des ondes gravitaires. Ces dernières sont des vagues qui se propagent à la surface d'un fluide. C'est la gravité et la hauteur du liquide qui déterminent leur longueur d'onde et leur vitesse de propagation. Elles deviennent visibles sous l'effet d'une excitation externe, comme le vent sur la mer ou lorsqu'on lance un caillou dans une mare.

Dans la zone interne d'un ressaut circulaire (près du jet), les ondes gravitaires se propagent moins vite que le liquide ; elles sont donc emportées par l'écoulement. Dans la zone externe où l'eau est plus profonde et l'écoulement plus lent, les ondes gravitaires vont plus vite que le fluide. Du fait de perturbations ou de réflexions, sur les bords de l'évier par exemple, ces ondes gravitaires sont susceptibles de remonter le courant. Le ressaut hydraulique est alors vu comme l'endroit où l'onde gravitaire (surélévation du liquide) émise depuis les bords (bords de l'évier, fin de >

> la plaque) ne peut plus remonter vers l'amont car l'onde «rencontre» un écoulement trop rapide pour se propager.

Peut-on alors dire que la question du ressaut a été résolue il y a cinq siècles par Léonard de Vinci? Pas tout à fait. À ce jour, il n'existe toujours pas de modèle qui fasse consensus et qui permette de prédire une caractéristique aussi essentielle que le rayon du ressaut en fonction des paramètres du système (le débit, les propriétés du liquide, le diamètre du jet, etc.). Néanmoins, d'importants progrès ont été réalisés depuis les observations du génie italien. On a une meilleure idée des mécanismes en jeu et de leurs importances respectives, et le ressaut hydraulique est même devenu un outil pour modéliser d'autres phénomènes.

LE MASCARET, GRAND FRÈRE DU RESSAUT CIRCULAIRE

Après Léonard de Vinci, les savants ne semblent pas s'être intéressés à l'énigme du ressaut hydraulique circulaire pendant plus de trois cents ans. On n'en retrouve la trace qu'au XIX^e siècle, dans les études du médecin et physicien français Félix Savart qui a observé et dessiné le phénomène sans particulièrement chercher à l'étudier. Un regain d'intérêt est dû à de nombreux travaux qui ont porté, dès le XVIII^e siècle, sur le «grand frère» du ressaut circulaire, le mascaret.

Ce type de ressaut hydraulique, que l'on observe sur les rivières et les fleuves, par exemple la Dordogne ou la Sélune, se caractérise par une vague plus ou moins haute qui

COMME LE MUR DU SON !

Le ressaut hydraulique est un analogue du célèbre mur du son. Dans l'évier, les ondes gravitaires jouent le rôle des ondes acoustiques et l'écoulement, se déplaçant à quelques dizaines de centimètres par seconde, remplace l'avion volant à 1 224 kilomètres par heure.

remonte le courant. Cette vague sépare une zone torrentielle, située en amont, où la vitesse du liquide est supérieure à la célérité des ondes gravitaires et une zone fluviale, en aval, où les ondes gravitaires se déplacent plus rapidement que le liquide et sont donc susceptibles de se diriger vers l'amont.

Le changement rapide de hauteur d'eau à l'embouchure du fleuve lors d'une marée montante est à l'origine du mascaret. Plus la marée est rapide et puissante, plus la vague est importante. L'onde gravitaire induite par la marée se propage vers l'amont et crée une onde de choc avec le courant torrentiel.

Si les mascarets font aujourd'hui le bonheur des surfeurs en Gironde (voir l'illustration page 62), ils n'en sont pas moins meurtriers, dans la Seine par le passé, et encore aujourd'hui dans le fleuve Qiantang, qui débouche sur la baie de Hangzhou (au sud de Shanghai, en Chine) où une vague pouvant atteindre trois mètres de hauteur remonte la baie à 40 kilomètres par heure. On peut toutefois moduler la puissance du mascaret, voire empêcher sa formation, en aménageant la topographie et en contrôlant le débit du fleuve. Si le mascaret est un ressaut mobile, on peut aussi observer des ressauts hydrauliques stationnaires lors d'un lâcher d'eau au cours de l'activité d'un barrage, à la sortie d'une chute d'eau ou encore dans un déversoir.

À partir de la fin du XVIII^e siècle, des ingénieurs et des physiciens se sont intéressés au mascaret. Par exemple, l'Italien Giorgio Bidone voyait dans ce ressaut hydraulique un moyen de surélever le liquide afin de faciliter l'irrigation. Il a ainsi été le premier à décrire le ressaut dans un cas à deux dimensions.

Dans la continuité de Bidone, l'hydraulicien français Jean-Baptiste Bélanger a été le premier à étudier le choc d'un point de vue théorique. En 1828, il proposa une équation qui permettait de lier l'écoulement (défini par la hauteur et la vitesse du liquide) en amont et celui en aval. Malheureusement, si ce premier modèle était en accord avec les données de Bidone, il est incorrect, car il suppose la conservation de l'énergie mécanique sans prendre en compte sa dissipation sous forme de tourbillon et de chaleur au voisinage immédiat du choc.

Bélanger corrigea lui-même son erreur quelques années plus tard en publiant, en 1846, une équation correcte fondée sur la conservation de la quantité de mouvement du fluide (c'est-à-dire le produit de sa masse volumique par sa vitesse) et du débit de part et d'autre du ressaut. Il posa ainsi la première condition de «choc» qui permet de raccorder mathématiquement les zones amont et aval. À la même époque, grâce à des expériences menées dans des canaux, les hydrauliciens français Henry Darcy et Henry Bazin ont confirmé cette théorie du choc, qui reste encore aujourd'hui à la base



Ressaut hydraulique circulaire dans un évier. On observe une zone de faible épaisseur et de vitesse élevée près de l'impact, puis une zone de forte épaisseur et de faible vitesse après un «mur» liquide.