

Le ressaut circulaire, une histoire à rebondissements

Un jet liquide d'huile de silicone, 20 fois plus visqueux que l'eau, frappe perpendiculairement une surface horizontale. On observe un ressaut hydraulique circulaire.

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.

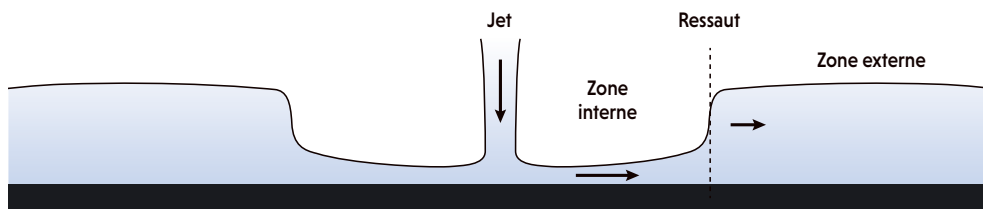


Schéma en coupe du ressaut hydraulique avec le jet d'eau, la partie interne où l'écoulement est rapide et le film d'eau mince, le ressaut et la partie externe où l'écoulement est lent et le film épais. Des considérations de conservation du débit et de la quantité de mouvement permettent de relier les vitesses et les hauteurs d'eau avant et après le ressaut.

des modélisations de ressauts hydrauliques, qu'ils soient dans les rivières ou dans les évier.

Le physicien anglais lord Rayleigh a ensuite été le premier à faire le lien entre le ressaut dans un canal et le ressaut circulaire que l'on crée dans un évier. À la veille de la Première Guerre mondiale, en 1914, il reprit la condition de choc proposée par Bélanger et l'appliqua au cas circulaire. Dans ce cas aussi, la condition de choc se vérifie bien expérimentalement. En revanche, le rayon prédit pour le ressaut est dans certains cas plusieurs dizaines de fois supérieur à celui observé.

UN INGRÉDIENT ESSENTIEL

Les physiciens ont alors compris qu'il fallait prendre en compte la viscosité dans la partie interne du ressaut pour décrire plus correctement l'écoulement du fluide et calculer le rayon du choc. La viscosité peut être vue comme le frottement entre les « particules fluides », les volumes élémentaires de fluide à une échelle mésoscopique que l'on considère pour décrire ce qui se passe dans le système. Plus ces frottements sont intenses, plus le liquide sera difficile à mettre en mouvement et donc visqueux. On le constate quand on essaye de déplacer une cuillère dans du miel, dans de l'huile ou dans de l'eau... La principale différence entre ces trois liquides est la viscosité : celle de l'huile est cent fois plus élevée que celle de l'eau, et le miel est environ cent fois plus visqueux que l'huile.

En mécanique des fluides, on distingue les écoulements inertiels, où les effets de la viscosité sont négligeables et donc l'énergie mécanique conservée, et les écoulements laminaires, où la viscosité est beaucoup plus importante. Dans ce dernier cas, une partie non négligeable de l'énergie mécanique du système se transforme en chaleur. Pour reprendre l'exemple de la cuillère dans le liquide : lorsque vous remuez votre cuillère dans du miel, vous allez mettre le liquide en mouvement uniquement autour de votre cuillère et l'énergie que vous injectez se dissipera presque instantanément sous forme de chaleur. On est alors en présence d'un écoulement visqueux.

Quand vous agitez votre cuillère dans de l'eau, vous obtenez un écoulement inertiel. Vous allez mettre en mouvement l'ensemble du liquide jusqu'à ce que l'énergie que vous

avez injectée se dissipe au niveau des bords *via* les « couches limites ».

Lorsqu'on a un écoulement inertiel sur une plaque solide immobile (ou sur le fond de l'évier juste après le jet d'eau), les particules fluides en contact avec la surface de la plaque ont une



Le ressaut hydraulique se heurte au principe de continuité de Leibniz



vitesse nulle. La vitesse des particules augmente très vite à mesure que leur distance à la plaque croît. Elle devient pratiquement égale à la vitesse du reste du fluide au bout d'une faible épaisseur, qui définit ainsi la « couche limite ».

L'existence de cette couche limite complique la modélisation du ressaut, car si l'écoulement est principalement inertiel juste après le jet, une couche limite laminaire se développe et finit par envahir entièrement l'épaisseur du film mince à mesure que l'on s'éloigne du point d'impact du jet. Dans la partie basse de la couche limite, la vitesse est très faible et la viscosité domine, et l'on se retrouve dans un régime laminaire. À cause des frottements qui sont importants dans cette couche, l'écoulement est de plus en plus ralenti à tel point que le film liquide finit par s'épaissir lorsque la couche limite envahit l'épaisseur. En l'absence de la viscosité et donc de couche limite, le film liquide ne cesserait de s'amincir car il s'étalerait radialement tout en conservant sa vitesse constante. Dès lors, on s'attend à obtenir un diamètre du ressaut d'autant plus petit que la viscosité est grande, un effet que le modèle de lord Rayleigh ne prenait pas en compte. En 1948, le physicien japonais Itiro Tani a modélisé pour la première fois cette couche limite visqueuse.

À la suite de ces travaux, le Britannique Eric Watson a développé en 1964 l'une des théories les plus abouties du ressaut circulaire. L'originalité de son modèle est de découper la ➤

INERTIEL OU LAMINAIRE ?

On utilise généralement le nombre de Reynolds, le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses, pour distinguer les différents régimes d'écoulement. Un petit nombre de Reynolds (petit devant 1) correspond à un écoulement laminaire et un grand nombre de Reynolds (grand devant 1) correspond à un écoulement inertiel.

Un très grand nombre de Reynolds correspond à un régime turbulent avec la formation de tourbillons. Le régime turbulent est un cas particulier du régime inertiel. Le nombre de Reynolds dépend de la vitesse du liquide : plus la vitesse du fluide est importante, plus le nombre de Reynolds est élevé. Inversement, plus la viscosité du liquide est élevée, plus le nombre de Reynolds est faible.

- > zone interne (avant le choc) en plusieurs parties distinctes (l'impact du jet d'eau, la zone de développement de la couche limite et la région où la couche limite a envahi toute l'épaisseur du liquide). Les équations décrivent alors très bien la hauteur du film d'eau en fonction de la distance au jet d'eau.



Sur le fleuve Qiantang, le mascaret se déplace à 40 kilomètres par heure

Cette théorie reste toutefois incomplète dans la mesure où elle ne décrit que ce qui se passe à l'intérieur du ressaut et ne donne pas d'informations sur ce qui se passe à l'extérieur. Pour déterminer le rayon, on doit associer un choc «à la Bélanger» au modèle et connaître la hauteur de liquide juste après le ressaut. Mais comme il est plus difficile de mesurer cette hauteur que le diamètre du ressaut directement, le modèle n'a que peu d'intérêt prédictif.

VERS UN MODÈLE COMPLET

En 1993, Tomas Bohr, de l'université technique du Danemark, près de Copenhague, fils et petit-fils de Prix Nobel de physique, et ses collègues ont enfin pris en compte la zone extérieure.

En modélisant les zones interne et externe avec une seule équation (dite «équation de lubrification») et en raccordant ces deux zones à l'aide d'une condition «à la Bélanger», ils ont décrit le problème complet. Grâce à une résolution numérique de ces équations, ils ont obtenu la première loi théorique prédisant le rayon du ressaut en fonction des paramètres du système (débit, viscosité et densité du liquide...).

Il a donc fallu pas moins de cinq siècles pour développer le premier modèle assez satisfaisant du ressaut circulaire. Cela paraît énorme si l'on considère qu'on n'a alors «résolu» que le cas simple d'un jet liquide tombant verticalement sur une plaque, autour de laquelle le liquide est libre de s'écouler. On ne peut ainsi pas rendre compte d'un jet incliné ou atteignant une plaque présentant des bords comme dans un évier. En réalité, on n'en est là qu'au début de la compréhension du phénomène et on a à peine effleuré la complexité du problème...

En particulier, on s'aperçoit que l'on ne comprend pas physiquement pourquoi le choc se produit. Le modèle hydrodynamique de Tomas Bohr prédit la position du ressaut en utilisant les hypothèses caractérisant les zones interne et externe et montre qu'à un certain rayon (là où l'on observe le ressaut), les solutions mathématiques de ces deux zones ne sont plus réalistes. Autrement dit, il prédit la nécessité d'une transition entre la zone interne et la zone externe, mais il n'explique rien sur la nature de cette transition. Une pente douce entre les deux zones aurait ainsi été tout autant compatible avec le modèle. Cette limite descriptive et non explicative du modèle était déjà présente dans l'approche ondulatoire évoquée au début de l'article avec les ondes gravitaires qui remontaient le courant: dans ce cas, on suppose un changement de régime de

PLUS SUR LES MASCARETS



A. Colas, **Mascaret, prodige de la marée**, YEP, 2017.

Le mascaret est un ressaut hydraulique qui se forme dans les cours d'eau comme ici sur la Dordogne, près de Saint-Pardon. Les surfeurs profitent de cette vague qui remonte vers l'amont.



propagation des ondes au niveau du mur, mais la forme de ce mur n'est pas déterminée, en particulier sa hauteur. La condition de Bélanger encode ce changement de hauteur, mais il ne fait que le décrire et n'est pas prédictif.

Certains scientifiques pensent que le mur liquide est dû à un décollement de la couche limite (comme cela arrive sur une aile d'avion :

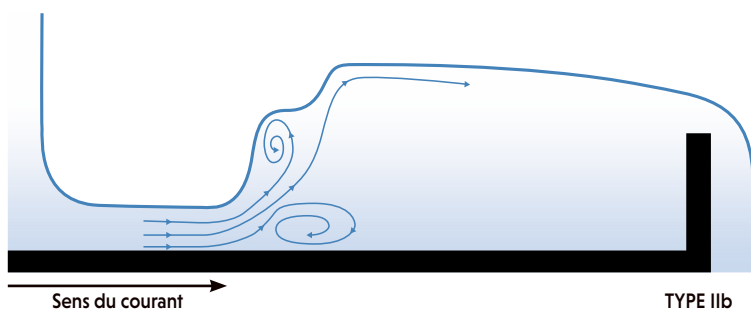
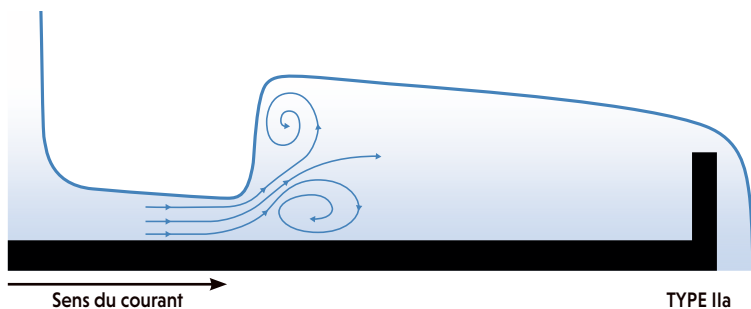
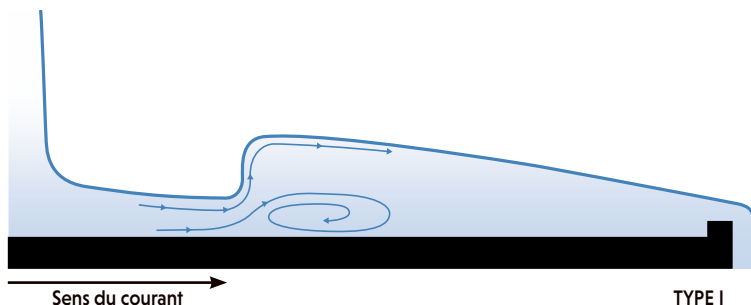
la plupart du temps, la couche limite se décolle à l'arrière de l'aile, mais si la couche limite est décollée sur toute la largeur de l'aile, on observe un décrochage de l'appareil). D'autres suggèrent que l'on peut modéliser le choc par une instabilité : dans la zone interne, la gravité cesse d'être négligeable à partir d'un certain rayon. Alors que le film s'épaissit peu à peu, la >

UN RESSAUT PAS TOUJOURS CIRCULAIRE

Quand on bouche l'évacuation d'eau, l'évier se remplit et le diamètre du ressaut rétrécit. On constate aussi que le ressaut est de moins en moins circulaire et que ses bords sont perturbés. Après le ressaut, des tourbillons (ou vortex) se forment. Quand l'épaisseur d'eau augmente, la circulation des tourbillons change et donne lieu à des brisures de symétrie, c'est-à-dire que le ressaut ne sera plus circulaire et que des « coins » vont apparaître.

En 2006, John Bush, du MIT, et ses collègues ont étudié ce qui se passe quand ils remplacent l'eau par un liquide plus visqueux et qu'ils placent un rebord pour faire varier la hauteur de l'eau dans la partie externe du ressaut. Pour une petite hauteur (ou pas de rebord du tout), on observe un ressaut classique (dit de « type I », voir la figure ci-dessous). Pour une hauteur plus importante, on constate l'apparition d'un deuxième vortex en surface du mur liquide : à la surface du mur, le sens du vortex est alors opposé à celui de l'écoulement général (ressaut de « type IIa »). Le ressaut prend une forme polygonale avec au moins trois côtés. Notons qu'il n'y a pas, à notre connaissance, de limite au nombre de côtés possibles pour un ressaut.

En changeant la taille du jet liquide et en augmentant encore la hauteur de la paroi extérieure, John Bush et ses collègues ont obtenu des motifs encore plus complexes où le ressaut est couplé avec une petite vague située juste à l'extérieur (ce type de double ressaut est noté « IIb »). Ce nouveau régime se caractérise par de nouvelles formes : ovale, œil-de-chat, nœud papillon, papillon, trèfle à trois, quatre feuilles ou davantage.



> vitesse du liquide diminuant, la surface présente une pente légèrement positive. La gravité ajoute une contrainte supplémentaire sur cette surface et s'oppose à l'écoulement. La vitesse continue alors de décroître, la pente augmente encore, le rôle de la gravité s'accroît encore, et ainsi de suite. Résultat : à cause de ce mécanisme d'instabilité, on obtient une pente quasi verticale, c'est-à-dire un ressaut.

En 2014, avec Luc Lebon et Laurent Limat, du laboratoire Matière et systèmes complexes, à Paris, j'ai réalisé des expériences qui fournissent des indices cruciaux en vue d'une explication théorique au ressaut circulaire. En mesurant avec précision la hauteur du liquide juste après le ressaut, nous avons montré que le nombre de Froude (un nombre qui compare les effets inertiels et la gravité) est identique juste après le mur pour tous les ressauts.

Il n'existe pas encore d'explication complète à cette propriété universelle, mais elle serait compatible avec le mécanisme

d'instabilité gravitationnelle évoqué précédemment. Ce n'est pas étonnant car, si le ressaut est bien déclenché à la position où la gravité cesse d'être négligeable, le nombre de Froude, qui compare localement gravité et inertie, prendrait en ce point une valeur particulière identique pour tous les systèmes, indépendamment de leurs caractéristiques. Et, en raison de la condition de choc, on aurait également un nombre de Froude « universel » juste après le ressaut.

LE RAYON DU RESSAUT CALCULÉ

En outre, combiné à une modélisation fine de l'écoulement à l'extérieur du ressaut, notre résultat permet de calculer avec précision la position du ressaut. En définitive, nous sommes parvenus à ce résultat sans rien postuler sur l'écoulement qui a lieu dans la zone interne. À rebours de ce qui avait été fait précédemment, nous nous sommes attaqués au problème du ressaut comme à un puzzle, c'est-à-dire en commençant par l'extérieur et, comme pour un puzzle, cela s'est révélé particulièrement fructueux puisque nous avons été les premiers à proposer une loi analytique simple reliant, avec une excellente précision, le rayon du ressaut aux paramètres du système.

Plusieurs équipes de théoriciens se sont emparées de la question de la constance du nombre de Froude et cherchent à retrouver dans leurs équations cette observation expérimentale. On peut ainsi espérer voir apparaître de nouveaux résultats majeurs sur le sujet dans les années à venir.

Si la viscosité joue un rôle crucial, qu'en est-il d'un autre ingrédient souvent influent en mécanique des fluides à ces échelles, la tension superficielle ? À la surface d'un liquide, à l'interface de l'eau avec l'air par exemple, la force de cohésion entre les molécules en surface, différente de ce qui se passe en volume, tend à réduire au minimum l'aire de l'interface. Cela explique la forme quasi sphérique des gouttes de pluie, par exemple.

Dans la plupart des modélisations évoquées, la tension superficielle était totalement absente. En 2003, John Bush et Jeffrey Aristoff, du MIT (l'institut de technologie du Massachusetts), aux États-Unis, ont montré grâce à une analyse poussée que cet ingrédient physique a peu d'influence sur le rayon du ressaut, excepté dans le cas des petits ressauts de moins d'un centimètre de diamètre. Il semblait donc justifié de négliger cet effet.

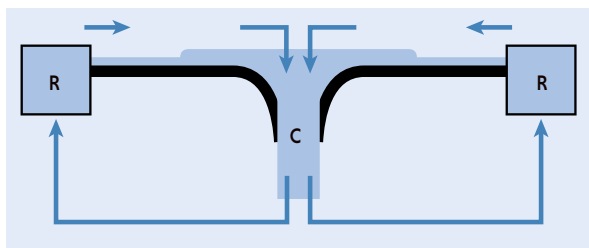
Or, en 2018, cette conclusion a été remise en cause. Avec leurs collègues, Rajesh Bhagat et Paul Linden, de l'université de Cambridge, ont proposé une nouvelle modélisation impliquant que la tension superficielle jouerait un rôle clé dans le mécanisme de formation du ressaut hydraulique. Ce résultat fournit en apparence un bon accord entre la théorie et les

DES GOUTTES DANS UN RESSAUT

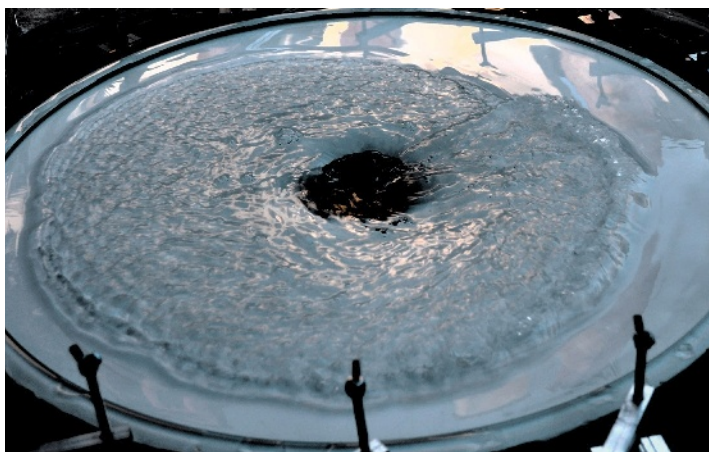
Il est aussi possible d'utiliser le ressaut dans le cadre d'expériences de lévitation de gouttes. Ainsi, lorsqu'on dépose une goutte du même liquide dans le ressaut, la goutte se retrouve piégée contre la paroi liquide du ressaut et séparée du bain par un film d'air entraîné en permanence par l'écoulement liquide du ressaut hydraulique. La goutte peut ainsi léviter plusieurs dizaines de minutes avant de finalement fusionner avec le liquide (on parle de « coalescence »).

L'un des phénomènes les plus remarquables dans cette expérience est qu'une fois entraînée contre le ressaut, la goutte se met à évoluer selon un mouvement périodique le long du ressaut à vitesse constante en faisant typiquement un tour par seconde. Mais en augmentant le diamètre du ressaut, on observe une transition vers un régime chaotique complexe : la goutte tourne dans un sens, ralentit, repart en sens inverse, fait demi-tour, etc., et cela sans motif régulier. Pourquoi le comportement de la goutte change-t-il ainsi ? Cette énigme est toujours à l'étude.





Dans cette expérience, le ressaut hydraulique est utilisé pour modéliser l'effondrement d'une étoile avant son explosion en supernova. Le dispositif consiste en un réservoir annulaire (R) qui injecte de l'eau sur une surface hyperbolique (analogue au potentiel gravitationnel de l'étoile) qui s'évacue par la partie centrale (C). Le ressaut qui se forme (inversé par rapport à celui de l'évier) est d'abord symétrique et circulaire, mais une instabilité se crée (photographie à droite). Cette instabilité est aussi observée dans les simulations numériques de supernovæ.



expériences. Mais, en 2019, avec le groupe de Tomas Bohr, j'ai suggéré que leur modèle serait fondé sur une hypothèse erronée. La question du rôle exact de la tension de surface semble encore loin d'être résolue !

Ce dernier rebondissement illustre le fait qu'il existe toujours un débat actif autour de ce problème qui semble banal et facile à résoudre : quelle est la taille du petit rond que vous voyez au fond de votre évier en faisant la vaisselle ?

DE L'ÉVIER AUX ÉTOILES À NEUTRONS

Malgré la modestie du phénomène, il pourrait nous en apprendre beaucoup sur des objets sans rapport avec le ressaut hydraulique et se manifestant à des échelles bien plus grandes. L'astrophysique nous propose des applications au phénomène de ressaut à des échelles un million de fois plus grandes qu'un évier. En 2012, Thierry Foglizzo, du CEA à Saclay, et ses collègues ont ainsi proposé d'étudier la dynamique des supernovæ par une analogie hydraulique.

Une supernova correspond à l'effondrement du cœur d'une étoile en fin de vie. Elle forme alors une étoile à neutrons ou un trou noir, tandis que les couches externes de l'astre sont violemment expulsées dans le milieu interstellaire. Les simulations numériques qui décrivent ce phénomène astrophysique ont mis en évidence que l'explosion de l'étoile présente toujours une asymétrie due à une instabilité entre le gaz qui s'effondre et l'onde de choc qui précède l'explosion en supernova. Pour modéliser expérimentalement un tel phénomène à l'échelle du laboratoire, Thierry Foglizzo et son équipe ont utilisé un dispositif ingénieux : un «ressaut circulaire inversé».

Dans un bassin circulaire de surface hyperbolique, une nappe de liquide de faible épaisseur est injectée depuis la périphérie vers un trou d'évacuation au centre. Un ressaut se forme et l'écoulement vers le tube d'évacuation central se fait ensuite en régime dominé par la

gravité. La forme hyperbolique est analogue au potentiel gravitationnel de l'étoile. Le ressaut hydraulique est similaire à l'onde de choc dans l'étoile et l'écoulement correspond au gaz en effondrement. Alors que le ressaut est initialement symétrique, il se forme une instabilité qui lui donne un mouvement global de rotation dans un sens alors que les régions internes tournent dans le sens opposé. Ces travaux confirment les instabilités observées dans les simulations numériques.

Les correspondances mathématiques entre les équations de la mécanique des fluides et les lois de la gravitation sont très fortes. En 1981, William Unruh, de l'université de Colombie-Britannique, au Canada, a suggéré que des systèmes hydrodynamiques pouvaient reproduire, par analogie, certaines propriétés des trous noirs : c'est ce qu'on nomme les trous noirs acoustiques.

Un trou noir correspond à une région où la courbure de l'espace-temps est si importante que rien ne peut s'en échapper. Plus exactement, un ressaut pourrait servir de modèle à un «trou blanc», un trou noir où la flèche du temps est inversée. En effet, de la même façon que rien ne peut pénétrer dans un trou blanc, les ondes gravitaires ne peuvent pas se propager dans la zone interne d'un ressaut. Certains chercheurs, comme Germain Rousseaux, du laboratoire Pprime, à Poitiers, travaillent donc sur le ressaut hydraulique afin d'explorer cette analogie, notamment pour tester la formation du rayonnement Hawking, de faibles radiations émises par un trou noir et prédites par Stephen Hawking en 1974.

Le ressaut hydraulique est devenu un outil puissant pour étudier des phénomènes parfois inaccessibles comme les supernovæ ou les trous noirs. Mais d'autres applications sont aussi à l'étude, en particulier l'analogie avec des systèmes dynamiques en régime chaotique (voir l'encadré page 64). Pas mal pour un phénomène né dans un simple évier ! ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Duchesne et al., **Surface tension and the origin of the circular hydraulic jump in a thin liquid film**, *Phys. Rev. Fluids*, vol. 4, art. 084001, 2019.

A. Duchesne et al., **Multiple rotations of a drop rolling inside a horizontal circular hydraulic jump**, *Europhysics Letters*, vol. 102, art. 64001, 2013.

T. Foglizzo et al., **Shallow water analogue of the standing accretion shock instability : Experimental demonstration and a two-dimensional model**, *Physical Review Letters*, vol. 108 (5), art. 051103, 2012.

J. W. M. Bush et al., **An experimental investigation of the stability of the circular hydraulic jump**, *J. Fluid Mech.*, vol. 558, pp. 33-52, 2006.

T. Bohr et al., **Shallow-water approach to the circular hydraulic jump**, *J. Fluid Mech.*, vol. 254, pp. 635-648, 1993.

E. J. Watson, **The radial spread of a liquid jet over a horizontal plane**, *J. Fluid Mech.*, vol. 20, pp. 481-499, 1964.

L'ESSENTIEL

> Longtemps a prévalu l'idée que les bâtiments de la Grèce ancienne, comme les sanctuaires d'Apollon à Délos et à Delphes, ont été construits avec de la pierre extraite localement, sauf pour les marbres.

> Depuis 2017, un projet de recherche a pour objectif d'étudier les provenances

des pierres à Délos et à Delphes, ainsi que les usages qui en ont été faits.

> Ses premiers résultats montrent que beaucoup de ces roches avaient une origine non locale, et parfois lointaine.

> Les raisons de ces importations, coûteuses en transport, sont à éclaircir.

L'AUTRICE



ISABELLE MORETTI
chercheuse associée
à Sorbonne Université
et à l'université de Pau
et des Pays de l'Adour, membre
de l'Académie des technologies

