

> 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.

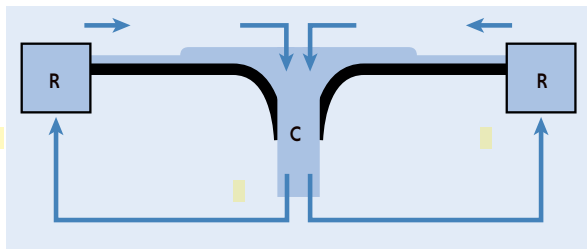
Or, en 2018, cette conclusion a été remise en cause. Avec leurs collègues, Rajesh Bhagat et Paul Linden, de l'université de Cambridge, ont proposé une nouvelle modélisation impliquant que la tension superficielle jouerait un rôle clé dans le mécanisme de formation du ressaut hydraulique. Ce résultat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

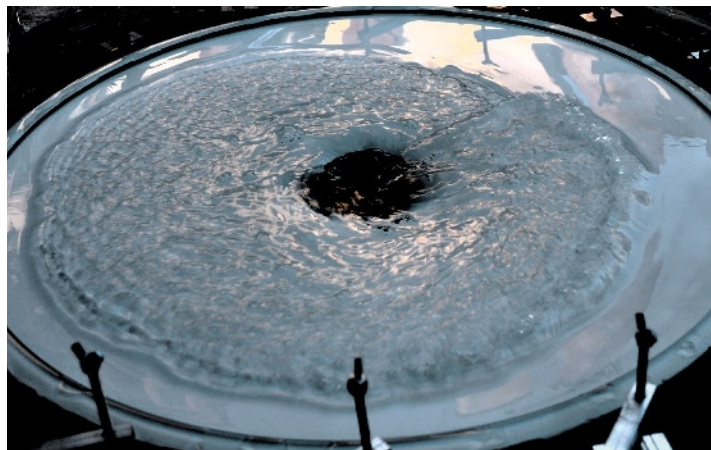
L'un des phénomènes les plus remarquables dans cette expérience est qu'une fois entraînée contre le ressaut, la goutte se met à évoluer selon un mouvement périodique le long du ressaut à vitesse constante en faisant typiquement un tour par seconde. Mais en augmentant le diamètre du ressaut, on observe 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.