

> 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.

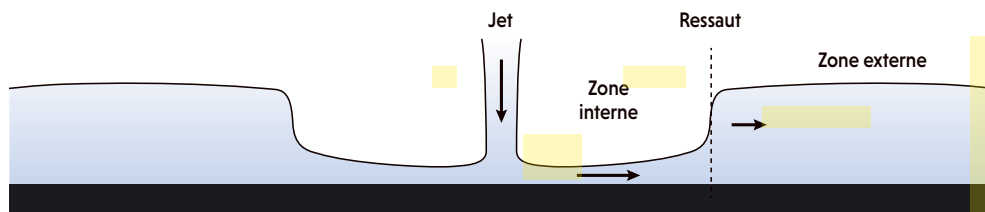


Schéma en coupe du ressaut hydraulique avec le jet d'eau, la partie interne où l'écoulement est rapide et le film d'eau mince, le ressaut et la partie externe où l'écoulement est lent et le film épais. Des considérations de conservation du débit et de la quantité de mouvement permettent de relier les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