



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.

