

- > 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 :

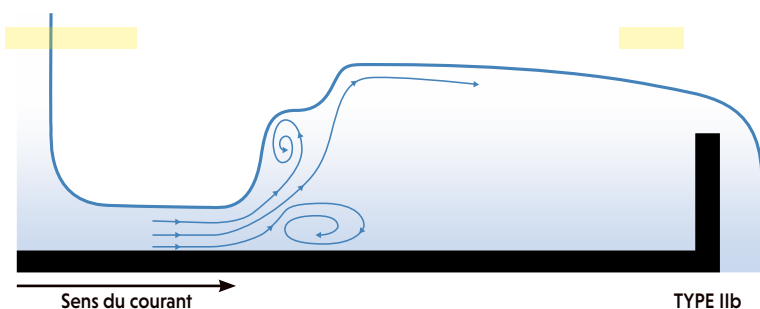
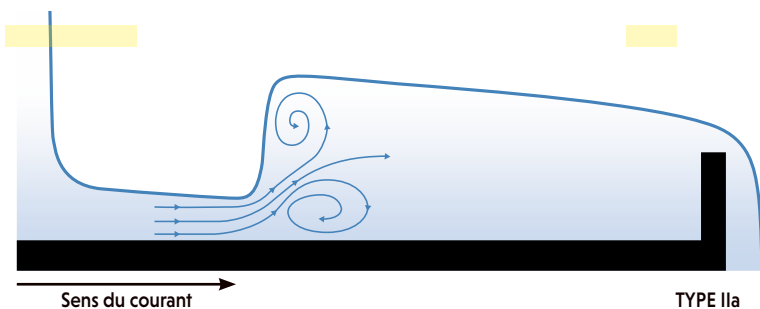
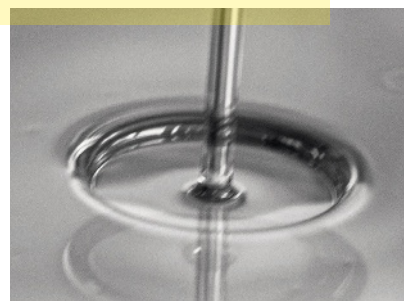
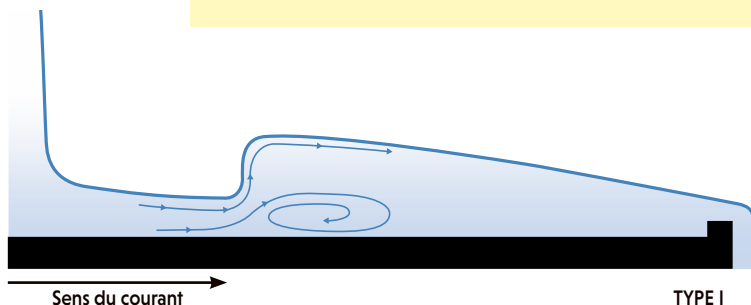
la plupart du temps, la couche limite se décolle à l'arrière de l'aile, mais si la couche limite est décollée sur toute la largeur de l'aile, on observe un décrochage de l'appareil). D'autres suggèrent que l'on peut modéliser le choc par une instabilité : dans la zone interne, la gravité cesse d'être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

