



Dépression sous la coque

JEAN-MICHEL COURTY • ÉDOUARD KIERLIK

Dans les passes et les détroits, les gros navires doivent ralentir sous peine de toucher le fond : leur vitesse fait qu'ils se «surenfoncent» dans l'eau.

Lorsqu'en 1992, le *Queen Elizabeth II*, s'échoue dans le Vineyard Sound (détroit du Vignoble) au large de la Nouvelle-Angleterre, les marins locaux s'étonnent : le plus grand paquebot du monde naviguait pourtant dans une zone assez profonde. Une rapide enquête suggéra un coupable qui n'en était pas à son coup d'essai : non seulement il avait déjà provoqué l'échouage de barges dans la Gironde, mais, au cours des années 1960, il avait entraîné le naufrage de trois grands navires dans les grands lacs américains. C'en était trop ! Une enquête internationale fut lancée qui confirma la culpabilité de... l'effet Venturi, phénomène physique connu depuis deux siècles. Notre enquêteur a repris le dossier.

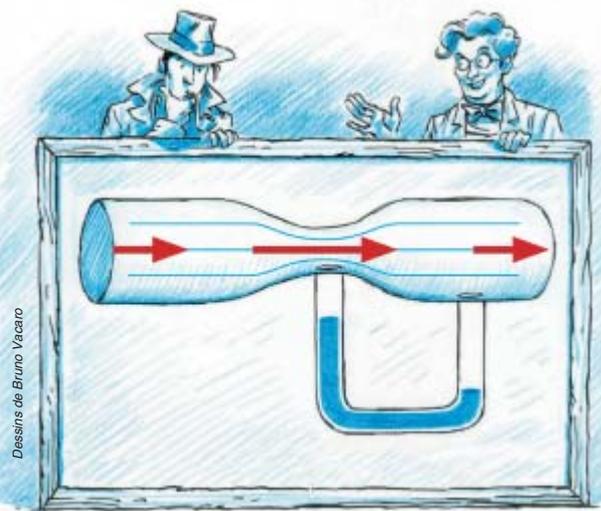
Les marins connaissent l'effet Venturi sous les navires : ils le nomment «surenfoncement». Hélas, notre enquêteur en ignorait le mécanisme : aussi étudia-t-il les différentes formes, cinétique et potentielle, d'énergie mécanique dans un fluide. Ainsi, lorsque de l'eau chute, l'énergie potentielle due à la hauteur des masses d'eau se transforme progressivement en énergie cinétique. En haut, l'énergie potentielle de l'eau est maximale tandis que son énergie cinétique et sa vitesse sont faibles ; en bas, c'est le contraire. Cette transformation d'énergie potentielle en énergie cinétique est mise à profit pour récupérer de l'énergie dans les roues à aubes des moulins de rivière.

Toutefois, cette technique primitive est peu efficace, car les masses d'eau cascaded et se dispersent inutilement. Dans les centrales hydroélectriques d'aujourd'hui, on transforme l'énergie potentielle due à la hauteur en une autre forme d'énergie liée à la pression. Pour cela, on introduit l'eau dans une conduite forcée qui guide l'eau vers une turbine située beaucoup plus bas. Le débit d'eau qui traverse n'importe quelle sec-

tion de cette canalisation est constant ; si la section est la même tout au long de la conduite, la vitesse de l'eau – égale au débit divisé par la section – est la même du haut en bas. L'énergie cinétique du fluide reste donc constante durant la descente. En revanche, la pression augmente avec le dénivelé et atteint son maximum au point le plus bas de la conduite. Ainsi, en négligeant les frottements, le liquide sous faible pression en haut de la conduite est transformé en un fluide sous pression qui actionne la turbine en contrebas.

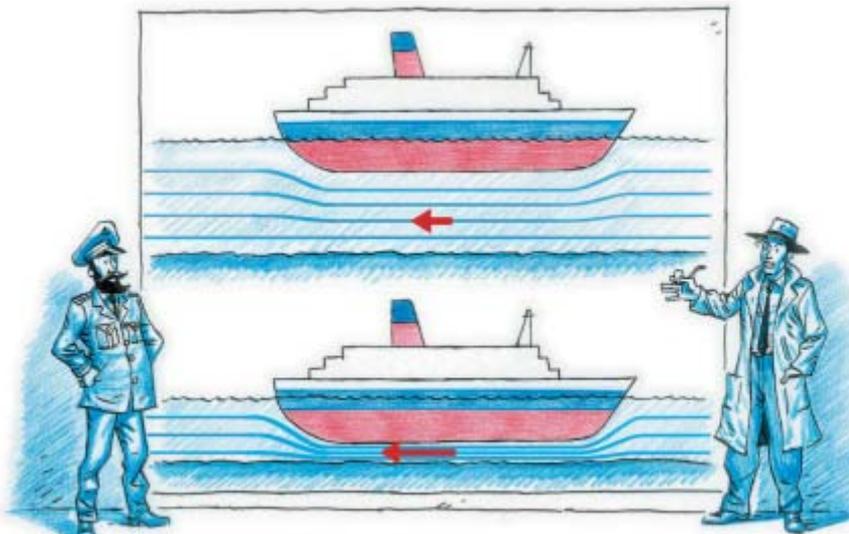
UNE ÉNERGIE LOCALE

En étudiant ces exemples, l'enquêteur prit conscience que, dans un fluide, la pression en un point constitue une forme d'énergie «locale». Comment cette énergie liée à la pression participe-t-elle aux échanges d'énergie dans le fluide ? Pour le savoir, l'enquêteur consulta un physicien, qui lui parla de Daniel Bernoulli. En 1734, le physicien suisse résolut la question en exprimant la conservation de l'énergie au sein d'un fluide incompressible qui s'écoule sans frotter ni tourbillonner. L'équation de Bernoulli stipule que la somme des énergies cinétique et potentielle d'un élément de fluide, augmentée par le produit du volume de cet élément par la pression qui règne en son sein, est une grandeur conservée. Or, lorsqu'un fluide s'écoule sur une pente, traverse un étranglement, par exemple, les vitesses et les altitudes des éléments de volume qui le constituent sont modifiées. Ainsi, en chaque élément de volume, un transfert a lieu entre l'énergie potentielle, l'énergie cinétique et l'énergie liée à la pression. En d'autres termes, si l'on accélère ou ralentit l'écoulement fluide en un lieu, on y diminue la pression ou on l'augmente.



Dessins de Bruno Vacaro

L'effet Venturi se produit quand un fluide incompressible traverse un étranglement : à débit constant, la vitesse augmente dans l'étranglement, et la pression



baisse (à gauche). Cet effet diminue les pressions sous la carène des navires en marche, ce qui les «surenfonce» (à droite). Le phénomène est très dangereux pour les gros bâtiments sur tous les hauts-fonds.

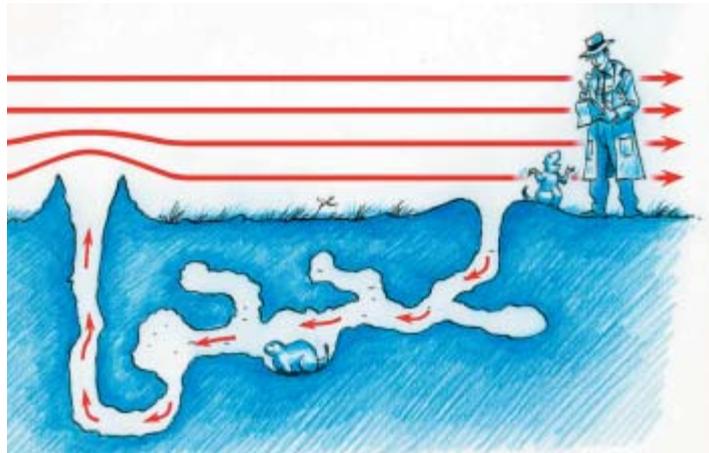
Lorsque l'énergie potentielle de pesanteur est quasi constante, l'équation de Bernoulli relie alors directement la différence de pression entre deux endroits du fluide à la variation d'énergie cinétique entre ces deux mêmes endroits. Cette différence de pression est proportionnelle au carré de la vitesse. Ainsi, la pression en un lieu du fluide est d'autant plus faible que la vitesse d'écoulement y est élevée! Lorsqu'on accélère un fluide, on y diminue la pression là où la vitesse d'écoulement augmente. Ce phénomène – l'effet Venturi – porte le nom du physicien italien Giovanni Battista Venturi, qui l'étudia de près à la fin du XVIII^e siècle. Il est par exemple utilisé dans les trompes à eau des laboratoires de chimie. Pour pomper, on y exploite l'aspiration induite par l'effet Venturi au niveau de l'étranglement d'un tuyau parcouru par de l'eau.

Le physicien consulté illustra son propos par le cas du «bruit des artères». Il arrive que la section d'un canal sanguin soit réduite par un dépôt de particules de graisse. Le sang qui chemine dans l'artère en amont accélère alors au niveau du rétrécissement, ce qui y diminue la pression sanguine. Quand une artère est à moitié bouchée, la vitesse sanguine double, passant typiquement de un à deux mètres par seconde. Cette variation réduit la pression au niveau du rétrécissement d'environ 1 600 pascals, soit 12 millimètres de mercure. Une telle baisse de pression annule parfois la surpression qui dilate les artères (et elles doivent rester dilatées!). Dans certains cas extrêmes, la pression extérieure excède la pression de l'artère, laquelle se pince. Le sang ne passant plus, la pression sanguine augmente, ce qui finit par provoquer la réouverture de l'artère ; celle-ci se pince à nouveau dès que du sang y circule à grande vitesse, etc. Cette succession de fermetures et d'ouvertures de l'artère produit une palpitation caractéristique, que les médecins identifient à l'aide de leurs stéthoscopes.

EFFET VENTURI EN EXTÉRIEUR

L'enquêteur écoutait, inquiet. Ravi d'avoir un public si attentif, le physicien lui expliqua que s'il voulait résoudre son problème, il lui fallait d'abord comprendre les techniques d'aération des... chiens de prairie. Quelque peu interloqué, l'enquêteur se rendit dans la prairie Nord-américaine à la rencontre de ces cousins des écureuils. Astucieux ingénieurs, les chiens de prairie aèrent leurs terriers grâce à l'effet Venturi. Ils construisent pour cela deux types d'entrées : les unes hautes et en forme de cratère, les autres, plus basses et en forme de dôme. Pourquoi? En hauteur, la vitesse du vent est la même dans toute la plaine. Au voisinage du sol, les masses d'air accélèrent pour contourner par le haut les obstacles qu'elles rencontrent. La vitesse de l'air est plus grande au-dessus des cratères qu'au-dessus des dômes et la pression est légèrement inférieure au-dessus d'une entrée en forme de cratère qu'au-dessus d'une entrée en forme de dôme. Cette différence engendre un courant d'air au sein des galeries du terrier, lequel apporte l'oxygène vital aux familles de chiens de prairie.

L'enquêteur avait enfin compris : les terriers de chiens de prairie sont plongés dans le courant aérien comme des coques de navires le sont dans le courant marin! Dans le cas des bateaux, l'équivalent du vent de la prairie est le courant d'eau sous la coque résultant de la progression du navire. Pour un observateur sur le bateau, l'eau arrive vers la proue à débit constant et à la vitesse du navire. Comme le long des filets de vent autour des entrées de terriers, la vitesse de l'eau augmente sur les lignes de courant qui accélèrent pour contourner la carène sur les côtés et par en dessous. Ainsi, sous la coque, la pression est d'autant plus basse que la vitesse du courant est grande. Or, la hauteur immergée d'un bateau est celle pour laquelle la résultante des forces de pression sur la carène équilibre son poids. Si la pression baisse sous la coque, le bateau s'en-



Pour aérer leurs terriers, les chiens de prairie construisent des entrées en forme de cratère. Le vent accélère pour contourner ces obstacles, de sorte que la pression chute juste au-dessus de ces orifices, ce qui crée un appel d'air et une ventilation dans le terrier.

fonce : il se «surenfonce» comme disent les marins. Si, en eau profonde, le phénomène n'augmente que faiblement le tirant d'eau, il en va tout autrement sur des hauts-fonds ou dans un canal. Dans ces endroits, le «clair sous quille», c'est-à-dire la distance entre la carène et le fond, est réduit. Les eaux ne disposent donc que de peu de place pour contourner la carène, et elles accélèrent d'autant plus. Le phénomène est amplifié lorsque le navire fend les flots à grande allure.

Maintenant qu'il avait saisi, l'enquêteur pouvait reconstituer l'échouage du *Queen Elizabeth III*! L'équation de Bernoulli indique que le surenfoncement augmente avec le carré de la vitesse du bateau, donc très fortement. Toutefois, comment le calculer exactement quand on ne maîtrise pas l'ensemble des paramètres qui font varier les vitesses de l'eau sous la coque : clair sous quille (variable), profils de carène (compliqués), turbulences, frottements? Pragmatiques, les marins emploient aujourd'hui des formules empiriques. Mises au point dans les années 1970, elles furent confirmées récemment grâce à des mesures précises de positionnement par GPS.

Appliquant ces formules aux 66 000 tonnes du *Queen Elizabeth II* et à ses 10 mètres de tirant d'eau (longueur 294 mètres, largeur 32 mètres), l'enquêteur obtint alors plusieurs ordres de grandeurs impressionnants. Le premier correspond au cas où le bâtiment navigue à 5 nœuds (10 kilomètres par heure) dans des eaux étendues d'une profondeur inférieure à 14 mètres : le surenfoncement ne vaut alors que 10 centimètres. Toutefois, il atteint 50 centimètres lorsque le navire avance à 10 nœuds et 2,2 mètres lorsqu'il croise à 20 nœuds. Lorsqu'il s'est échoué, le *Queen Elizabeth II* filait à 25 nœuds, ce qui a pu augmenter son tirant d'eau d'environ 3,5 mètres. Si son clair sous quille n'était alors que de 3 ou 4 mètres, l'accident était programmé! Dans les détroits, les canaux ou les chenaux, la vitesse des gros bâtiments est limitée par des règlements, afin d'éviter le surenfoncement. Le pilote ne pouvait ignorer à quelle vitesse maximale le grand paquebot pouvait avancer dans le Vineyard Sound. Pourtant, le capitaine a quand même lancé son bâtiment à 25 nœuds. La commission d'enquête a conclu que l'accident, qui a causé 13,5 millions de dollars de dégâts à la coque du *Queen Elizabeth II*, résultait d'un «manque de communication sur le pont».

Jean-Michel COURTY est physicien, chargé de recherche au CNRS. Édouard KIERLIK est physicien et maître de conférences à l'Université Pierre et Marie Curie.

René G. HERVIEU, *Le surenfoncement des navires*, Bibliothèque de l'Institut français d'aide à la formation professionnelle maritime, Masson, 1993.

Steven VOGEL, *Life in moving fluids*, Princeton University Press, 1996.