

## La supercavitation dans les écoulements

**S**ous la pression atmosphérique, l'eau bout à 100 °C. Les alpinistes savent qu'à une pression inférieure correspond une température d'ébullition plus basse. Ils utilisent ce principe pour déterminer leur altitude : ils mesurent la température d'ébullition de l'eau dans une casserole et en déduisent la pression, puis l'altitude. Sur un diagramme de phases de l'eau, où l'on indique l'état de l'eau en fonction de sa température et de sa pression, les points où a lieu l'ébullition définissent la courbe de vaporisation, frontière entre l'état liquide et l'état vapeur. Lors d'un phénomène d'ébullition, on chauffe l'eau à pression constante : on traverse la courbe de vaporisation suivant un chemin horizontal.

Au contraire, la cavitation représente la traversée de la courbe de vaporisation selon un chemin vertical : on diminue la pression à température constante. Cette «traversée» se traduit par la formation de bulles ou plus généralement de «cavités» dont la forme n'est pas nécessairement sphérique et qui renferment principalement de la vapeur d'eau. À la température ambiante (27 °C), le phénomène se produit à une pression 40 fois inférieure à la pression atmosphérique. Cette pression est parfois atteinte dans des écoulements rapides.

Pourquoi un liquide en écoulement présente-t-il des dépressions ? Prenons l'exemple d'un écoulement dans un tube resserré. Au cours de l'écoulement, la vitesse du liquide (peu compressible) varie pour conserver le débit. Elle augmente dans la partie convergente du tube et diminue dans la partie divergente.

Elle est maximale en amont du col, à l'endroit où la section est minimale.

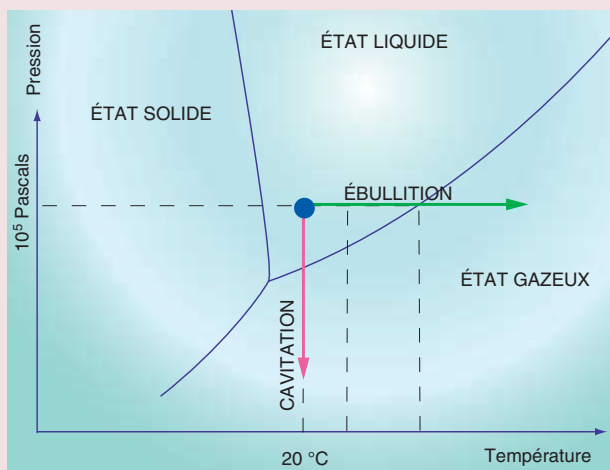
D'après le théorème de Bernoulli de la mécanique des fluides, l'énergie totale d'une particule de liquide se conserve au cours de l'écoulement. L'énergie totale est la résultante de l'énergie cinétique de l'écoulement, proportionnelle au carré de sa vitesse, et de l'énergie due à l'agitation des molécules laquelle engendre la pression. Toute variation de l'une est compensée par une variation de l'autre. Au col, la vitesse étant maximale, la pression est minimale, car une partie de l'énergie de pression est convertie en énergie cinétique.

Quand la pression au col est égale à la pression de vaporisation qui, nous l'avons vu, définit le seuil de cavitation, des bulles de gaz apparaissent. Le mouvement à grande vitesse d'un objet dans un

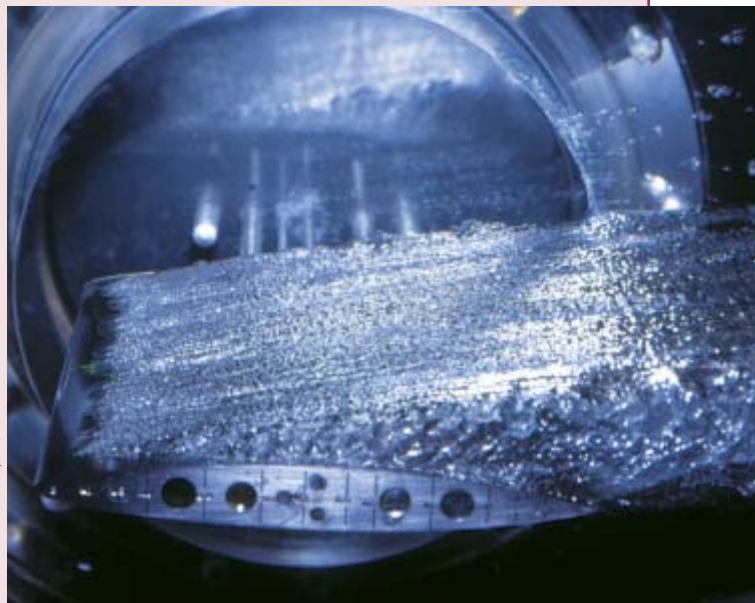
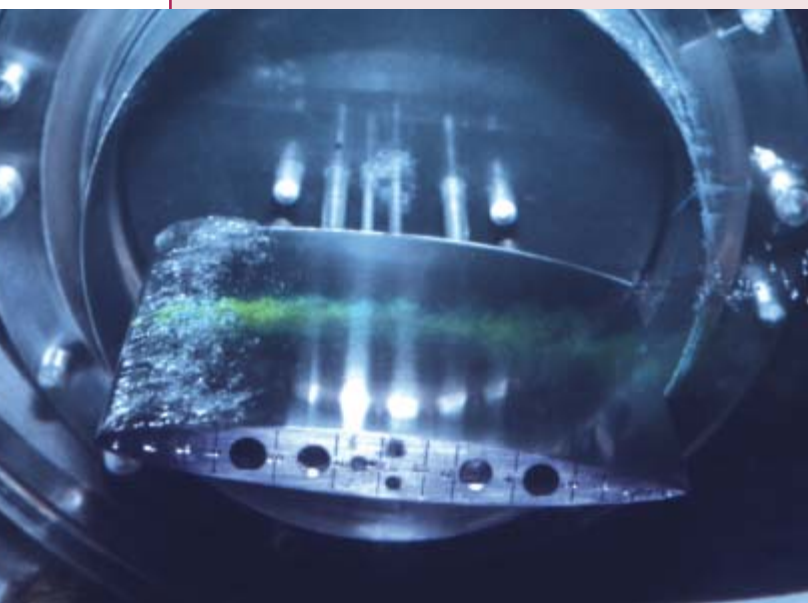
liquide s'accompagne des mêmes phénomènes physiques. Les molécules d'eau, qui sont contraintes de contourner l'objet, subissent des accélérations notables auxquelles sont associées des dépressions. Celles-ci sont d'autant plus importantes que la vitesse est grande : le mouvement à grande vitesse d'un corps dans un liquide s'accompagne de cavitation.

Les bulles de gaz formées par cavitation grossissent avec la vitesse. Pour des vitesses suffisamment élevées, elles ne forment plus qu'une unique cavité qui entoure tout l'objet. C'est la supercavitation.

Jean-Pierre FRANC, Grenoble  
Laboratoire des écoulements  
géophysiques et industriels



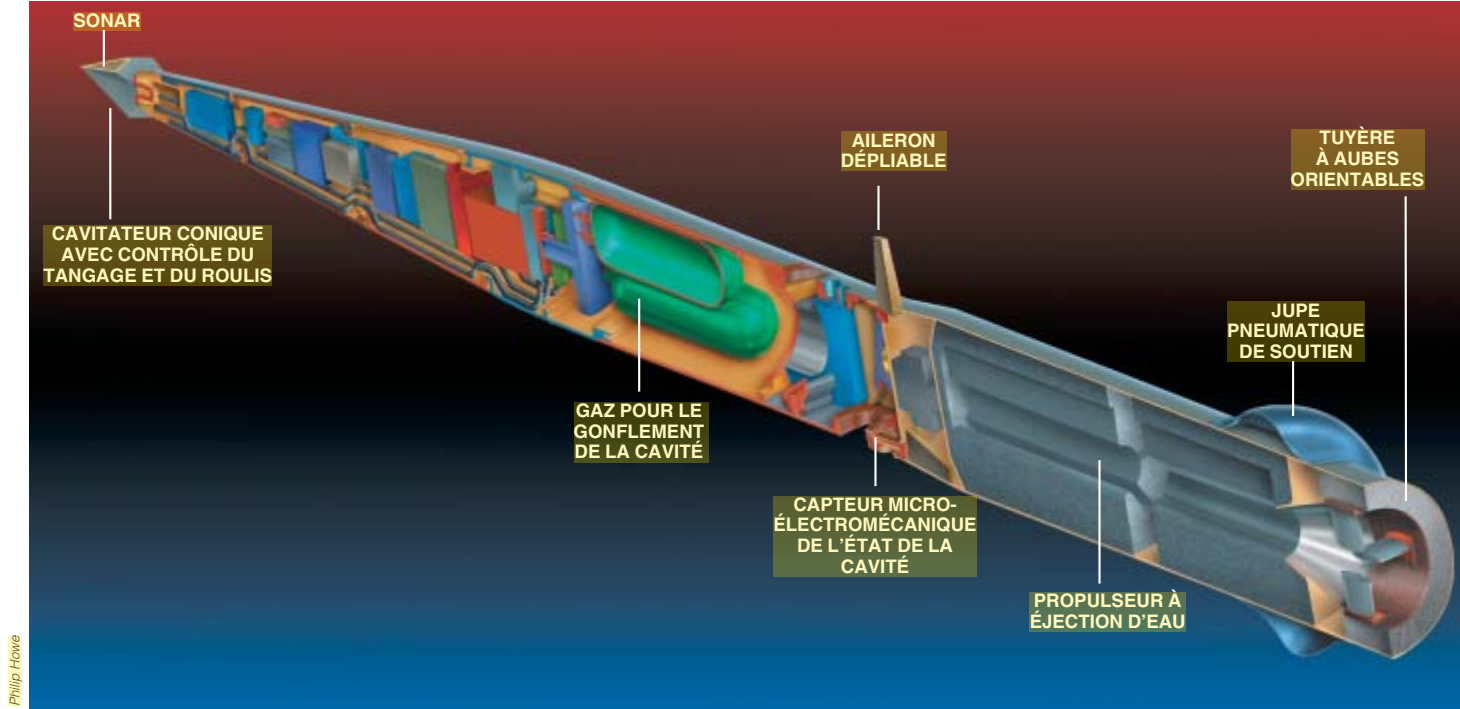
Considérons un volume d'eau (en bleu), dans les conditions normales de température (20 °C) et de pression (1 atmosphère). Quand on augmente sa température à pression constante il se produit une ébullition (en vert) ; quand on diminue sa pression à température constante, il se produit un phénomène de cavitation (en rose).



J. P. Franc et J. M. Michel, LSG/Grenoble

Cavitation naissante sur un profil placé dans un tunnel hydrodynamique. Le profil est fixe et l'écoulement de l'eau se fait de gauche à droite. Aux très grandes vitesses, le phénomène de la cavitation est si important que la cavité peut être bien plus longue que

l'engin qui l'engendre. On parle alors de supercavitation. La photo de gauche montre l'apparition, à faible vitesse, des premières bulles de vapeur. Sur la photo de droite, à plus grande vitesse, les bulles de gaz fusionnent et ne forment plus qu'une unique cavité.



**3. UNE TORPILLE À SUPERCAVITATION**, fondée sur les études de la marine américaine, comporterait toute une gamme de techniques de pointe : des systèmes de détection, de commande et de propulsion, ainsi qu'un cavitateur conique.

Le missile sous-marin russe *Squale* est le meilleur représentant des dispositifs à supercavitation de première génération. Il mesure huit mètres de longueur, pèse 2 700 kilogrammes environ, et a été conçu à l'Institut ukrainien d'hydromécanique de Kiev, où la plupart des principes des armes à supercavitation ont été élaborés.

L'arme est constituée d'une coque cylindrique effilée à l'avant (voir la figure 2), là même où est située l'ogive ; un moteur de fusée est localisé à l'arrière, d'où dépasse la tuyère. Huit petits cylindres sont disposés autour de la tuyère ; ce sont, apparemment, de petites fusées de démarrage qui accélèrent le *Squale* jusqu'à la vitesse de supercavitation. Niché entre deux de ces cylindres, une bobine de fil de guidage se déroulerait à mesure que la torpille avance dans l'eau. Ce fil permettrait aux opérateurs de contrôler la détonation de l'ogive.

À l'avant du *Squale*, le nez ferait office de cavitateur. On l'imagine plat, de forme circulaire ou elliptique. C'est la partie la plus importante puisqu'elle crée la cavité de gaz où se meut l'engin. Taillé en biseau, le cavitateur engendre également la force de portance qui soutient la partie avant de l'engin. Pour que la frontière entre l'eau et le gaz soit la moins turbulente possible, le bord du cavitateur doit être tranchant. Juste derrière le cavitateur, plusieurs conduits de ventilation de forme circulaire injectent les gaz d'échappement de la fusée et de la vapeur dans la bulle de cavitation, afin de l'agrandir. Aux deux tiers

environ de la longueur, vers l'arrière, quatre cylindres inclinés vers l'arrière sont fixés au fuselage par l'intermédiaire de ressorts. Ces cylindres, qui ressemblent à des ailerons, soutiennent la partie arrière de la torpille en la faisant rebondir sur la surface interne de la cavité. L'avant étant fixe et l'arrière ricochant sur la paroi interne, le *Squale* subirait alors un lent mouvement de précession autour de la circonférence de la cavité, tandis que la torpille se fraie un chemin dans l'eau.

Le *Squale* est un peu rudimentaire, car il ne peut se propager qu'en ligne droite. Les prochains engins à supercavitation seront manœuvrables : ils pourront changer de direction grâce à des dispositifs de commande de mouvement (actionneurs), tels que des jets de gaz ou ailerons qui perceraient la paroi de la cavité. La principale difficulté consiste à maintenir l'engin à l'intérieur de la cavité pendant les virages, pour éviter le choc avec le mur d'eau qui le désintégrerait. Peut-être les véhicules à supercavitation seront-ils manipulables avec des actionneurs correctement coordonnés : en déformant la cavité d'un côté, à l'aide d'un nez cavitateur articulé ou d'actionneurs, on créerait une force latérale qui déplacerait l'engin dans la cavité. On pourrait y parvenir à condition de coordonner les mouvements de l'avant et de l'arrière de la torpille.

On résoudrait une partie de ces problèmes en installant une boucle de contrôle en temps réel qui prendrait en compte les conditions de la cavité à l'ar-

rière de l'engin et imposerait les corrections appropriées. Les engins à supercavitation se déplaçant à l'intérieur de bulles, uniquement soutenus par le gaz à faible densité, leur partie arrière cogne fréquemment contre les parois de la cavité. Ce phénomène de battement de queue est observé sur toutes les photographies prises lors des essais à grande vitesse des dispositifs à supercavitation.

Dans les futurs engins, le passage d'un régime normal avec frottements à un régime de supercavitation sera facilité par une soufflerie qui assurera la présence continue d'une cavité partielle laquelle pourra être agrandie à volonté durant les phases d'accélération. Ainsi, une petite cavité naturelle formée au niveau de l'avant à faible vitesse sera transformée en une cavité enveloppant l'ensemble de l'objet.

## Des systèmes de propulsion d'avant-garde

Pour conférer la poussée nécessaire à la propulsion des engins à supercavitation, on a généralement recours à des moteurs de fusée, mais ils ne sont pas parfaits : ils ont une portée limitée et leurs performances diminuent à mesure que la profondeur et, par conséquent, la pression augmentent.

L'autonomie d'une torpille à supercavitation propulsée par un moteur à combustible solide n'est que de quelques dizaines de kilomètres avec une vitesse de pointe de l'ordre de 700 kilomètres par heure. Les essais des systèmes de propulsion fondés sur le principe des



Philip Howe

moteurs diesel, des moteurs électriques, des centrales atomiques et des turbines à gaz ont révélé que seules les turbines à gaz à haut rendement et les dispositifs de propulsion par réaction brûlant des combustibles métalliques (aluminium, magnésium ou lithium) et utilisant l'eau environnante à la fois comme oxydant du combustible et comme réfrigérant des produits de combustion ont la puissance suffisante pour propulser des engins à supercavitation à grande vitesse.

L'aluminium, assez bon marché, est le plus efficace de ces combustibles métalliques. La température de réaction atteint 10 600 °C. Dans un des projets de moteur envisagés, on utiliserait la chaleur de la chambre de combustion pour faire fondre des feuilles d'aluminium à 675 °C et pour vaporiser de l'eau de mer. Les produits de combustion feraient tourner les aubes d'une turbine.

Les Russes semblent disposer déjà d'un tel dispositif. Aux États-Unis, les physiciens du Laboratoire de recherches appliquées de Pennsylvanie testent un type de réacteur particulier, un statoréacteur à eau, qui brûle de l'aluminium et est utilisé comme générateur d'appoint sur les navires de surface. On introduit de l'aluminium en poudre dans un tourbillon d'eau de mer engendré dans une «chambre de combustion à tourbillons» ; sous l'effet de ces tourbillons, les particules d'aluminium se frottent les unes sur les autres, broyant le film d'oxyde d'aluminium inerte qui les recouvre ; une réaction exothermique intense se déclenche tandis que l'aluminium s'oxyde ; la vapeur à haute pres-

sion qui résulte de cette combustion propulse le navire soit en se détendant dans une tuyère de fusée, soit en entraînant l'aube d'une turbine.

Les tests montrent que la poussée obtenue par ce type de turbine est 20 pour cent supérieure à celle des moteurs de fusée. Un propulseur pour dispositifs à supercavitation constitué de deux hélices tournant en sens contraire et suffisamment longues pour atteindre la frontière entre le gaz et l'eau est en cours d'évaluation.

Quel que soit l'avenir réservé aux armes à supercavitation, elles ont déjà une influence telle que les militaires réévaluent les stratégies navales.

## Nouvelles armes, nouvelles menaces

Après la découverte de l'existence du *Squale*, un débat sur son utilisation possible a rapidement suivi. Selon certaines sources de renseignements occidentales, il aurait été conçu pour permettre aux sous-marins diesel de l'ancienne Union soviétique, vieux et bruyants, de riposter en cas d'attaque par des sous-marins américains silencieux. Si une torpille classique était lancée contre un sous-marin diesel, le *Squale* serait lancé soit pour couper le fil de guidage de la torpille, soit pour détruire l'attaquant lui-même ; le *Squale* serait un «tueur de sous-marins» potentiel, surtout s'il était équipé d'une ogive tactique nucléaire.

Ce missile pourrait aussi être une arme destinée à faire exploser une charge nucléaire de plus forte puis-

sance au milieu d'une flottille aéronavale ennemie. Nul ne dispose de contre-mesure contre une telle arme.

Récemment, pour renflouer les caisses de l'État, la Russie a mis en vente le *Squale* lors de salons internationaux de vente d'armes à Abu Dhabi et à Athènes. Plusieurs *Squale* auraient été vendus à l'Iran.

Un rapport datant de 1998 affirmait que le Kazakhstan aurait vendu une quarantaine de torpilles *Squale* à la Chine, ce qui inquiète les Américains : en cas de conflit dans le détroit de Taïwan, leurs forces navales risqueraient d'être menacées par Beijing. Selon une information d'origine chinoise (qui aurait été confirmée de source américaine), un officier de la marine chinoise se trouvait à bord du *Koursk K-141* lors de son naufrage. Il était venu assister aux essais d'une nouvelle version du *Squale*, de portée supérieure. La fin de la Guerre froide ne semble pas avoir mis fin à la course aux armements. La tempête fait rage autour du *Squale*.

Steven ASHLEY est rédacteur à la revue *Scientific American*.

J.P. FRANC et al., *La cavitation : mécanismes physiques et aspects industriels*, Collection Grenoble Sciences, Presses Universitaires de Grenoble, 81 pages, 1995.

*La cavitation : le défi*, film coproduit par Électricité de France, la Délégation Générale pour l'Armement, le Service du film de recherche scientifique, distribué par le Service du film de recherche scientifique, 96 boulevard Raspail, 75272 Paris Cedex 06.