

coques hydrodynamiques et de puissants moteurs. La supercavitation est un moyen de réduire les frottements de l'eau en enveloppant l'objet immergé d'une bulle de gaz de faible densité.

Quand un fluide se déplace rapidement autour d'un objet, sa pression diminue en certains endroits, notamment sur les coins et les arêtes de l'objet. Quand la vitesse augmente, la pression de l'écoulement atteint la pression de vapeur saturante de l'eau et le fluide subit un changement de phase : l'eau se transforme en vapeur d'eau. En d'autres termes, quand la pression est trop faible pour assurer leur cohésion, les molécules d'eau liquide se dispersent pour passer à l'état de gaz. C'est le phénomène de cavitation. Pour les navires, la cavitation est un fléau. Elle crée autour du navire des tourbillons qui perturbent l'écoulement de l'eau et le fonctionnement des pompes, des turbines, des hélices et des hydrofoils (les bateaux à flotteurs immergés qui se soulèvent avec la vitesse). La cavitation engendre également, lorsque les bulles de gaz disparaissent (dans un liquide les bulles de gaz n'éclatent pas comme des bulles de savon dans l'air, mais s'effondrent sur elles-mêmes), de violentes ondes de choc qui déforment et érodent les coques.

La supercavitation est une cavitation extrême, où une seule bulle entoure l'objet en mouvement tout entier. À des vitesses supérieures à 180 kilomètres par heure, les cavitateurs à pointe arrondie et les systèmes d'injection de gaz placés à l'avant de l'objet produisent de telles poches de gaz à basse densité, les supercavités. Quand l'objet est allongé et a un axe de symétrie, la supercavité a une forme d'ellipsoïde à l'avant et est plus effilée vers l'arrière ; sa longueur dépend de la vitesse. La cavité ellipsoïdale se referme sous l'effet de la pression ambiante dans une zone caractérisée par un écoulement complexe et instable. On modélise difficilement le flux dans cette région turbulente et même dans l'ensemble de la cavité, car la pression n'y est pas constante. Quoi qu'il en soit, tant que l'eau ne touche que le cavitateur, les engins à supercavitation filent à l'intérieur d'une bulle de gaz en subissant un frottement minime de la part du liquide.

La marine américaine s'est intéressée à la supercavitation au

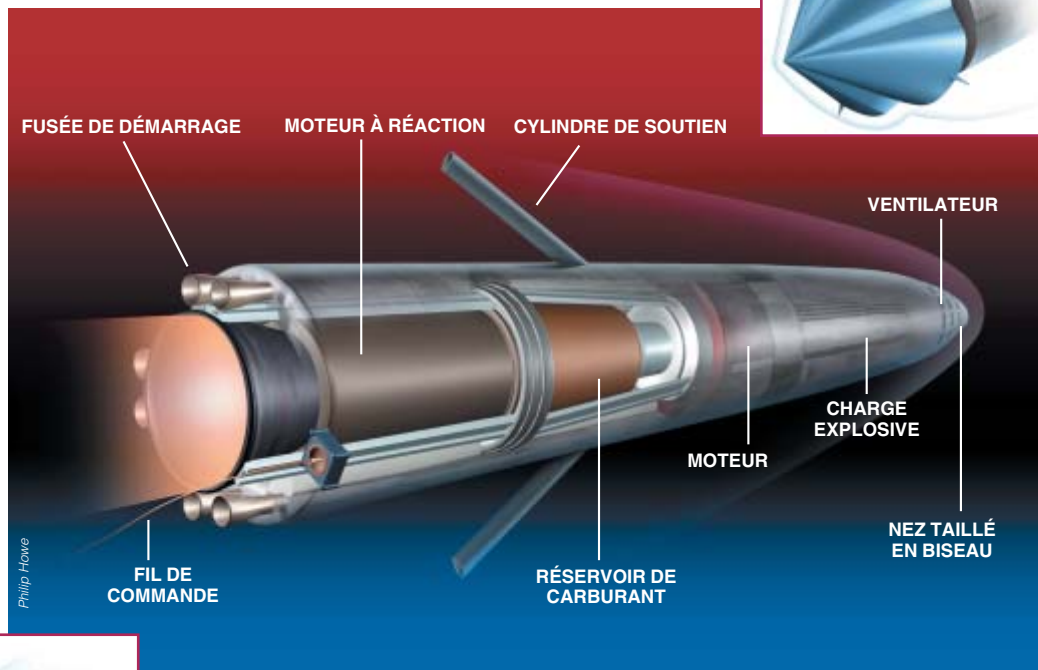
début des années 1950 pour le développement d'hélices à grande vitesse et d'hydrofoils, puis s'est tournée vers d'autres techniques plus silencieuses, préférant les navires furtifs aux navires ultrarapides. Aujourd'hui, elle ne disposerait d'aucune arme à supercavitation, et tente de rattraper l'avance prise par la marine russe en matière de projectiles et de torpilles.

Le système RAMICS, un système de déminage aéroporté, est une arme hélicoptée capable de détruire les mines de surface ou proches de la surface avec des balles à supercavitation. Les projectiles expérimentaux, d'un diamètre de 20 millimètres, sont conçus pour avoir une trajectoire stable à la fois dans l'air et dans l'eau ; ils sont tirés par un canon à tir rapide équipé d'un système de visée perfectionné. La marine américaine envisage de placer sur le pont des navires des armes adaptées de type RAMICS pour détruire les torpilles qui se camouflent dans le sillage des bâtiments.

La prochaine arme tirant des projectiles à supercavitation sera un système entièrement sous-marin, l'AHSUM, des munitions sous-marines se propageant à grande vitesse et adaptables. Les balles seront tirées par des tourelles profilées, placées sur la coque

immergée de sous-marins, de navires de surface ou de radeaux antimines remorqués. La version du système AHSUM commandé par sonar devrait être l'équivalent sous-marin du système d'armes *Phalanx*, un canon à tir rapide et à pilotage radar qui assure la protection des vaisseaux de surface contre les missiles de croisière.

Une torpille pouvant atteindre 370 kilomètres par heure est également à l'étude. Ce type de torpille pose des difficultés techniques quant à son lancement, son comportement hydrodynamique et acoustique, son guidage et sa commande, et finalement sa propulsion. Pour simuler les écoulements de l'eau autour d'une torpille, on doit considérer un régime d'écoulement à deux phases, où coexistent l'eau et le gaz. On cherche à comprendre comment l'eau s'écoule, à quoi ressemble la cavité de gaz, et à s'assurer que la torpille reste bien tout le temps à l'intérieur de la cavité. Si jamais la cavité est perturbée, la surface au contact de l'eau augmente et la vitesse diminue d'un seul coup.



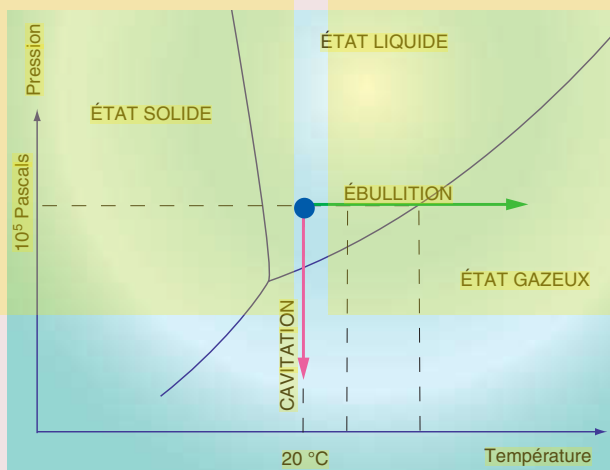
2. LA TORPILLE RUSSE SQUALLE présente, à la proue, un avant taillé en biseau qui crée une cavité partielle de gaz. Des ventilateurs montés à l'avant injectent des gaz dans cette cavité, de sorte qu'elle s'agrandit et finit par envelopper entièrement la torpille. De petites fusées de démarrage accélèrent la torpille jusqu'à la formation de la cavité partielle ; le moteur de fusée central prend ensuite le relais. D'autres formes de cavitateurs (la partie avant) sont à l'étude : des disques plats, des cônes plans ou crénelés (en haut et au milieu). D'autres cavitateurs pourraient ressembler à des cônes qui ressortiraient plus ou moins du fuselage, telle la pointe rétractable d'un stylo à bille (à gauche).

La supercavitation dans les écoulements

Sous 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.



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).

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

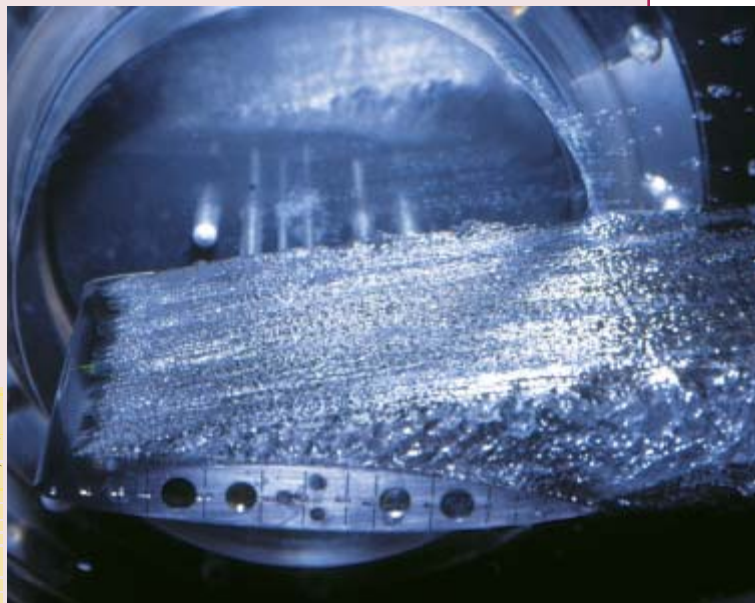
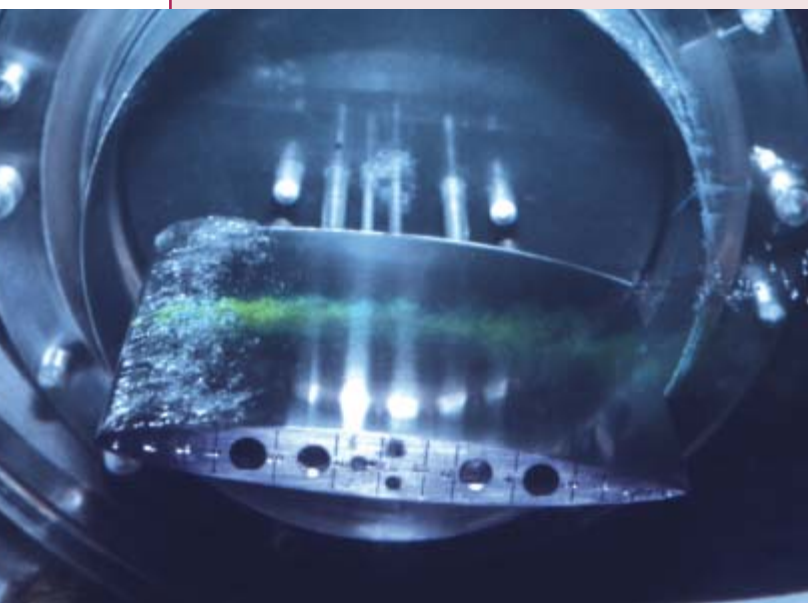
D'après le théorème de Bernoulli de la mécanique des fluides, l'énergie totale d'une particule de liquide se conserve au cours de l'écoulement. L'énergie totale est la résultante de l'énergie cinétique de l'écoulement, proportionnelle au carré de sa vitesse, et de l'énergie due à l'agitation des molécules 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



J. P. Franc et J. M. Michel, Lesi/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.