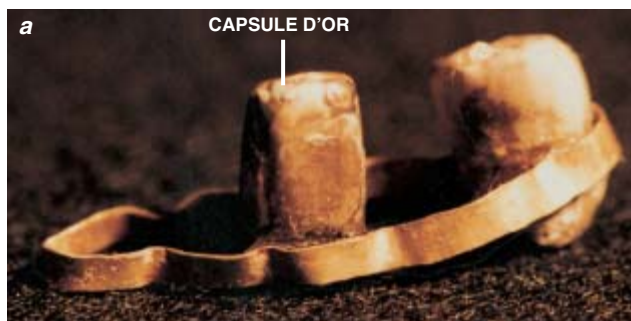


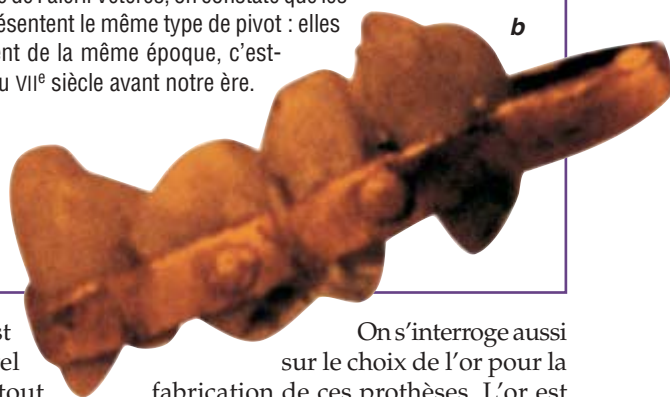
Les prothèses de Satricum et de Palestrina



La prothèse de Satricum (a) est une prouesse technique odontologique : dans l'attelle destinée à entourer quatre dents de l'arcade mandibulaire, une capsule d'or a été introduite par soudure. Cette capsule, haute de 10 millimètres, pèse 1,2 gramme ; elle a été obtenue en combinant deux facettes qui s'adaptent exactement sur une incisive latérale inférieure. Une analyse par fluorescence aux rayons X a mis en évidence la présence de points de soudure à l'argent. De plus, les bords de la cavité de la dent naturelle sont façonnés. On peut suivre des sillons qui évoquent de probables soins dentaires au moyen de curettes, en vue d'une possible obturation. La capsule d'or qui se substitue à la dent manquante, les soudures faites à l'argent et la présence de deux stries profondes évoquent une cassure ou une sensation d'inconfort qui auraient obligé l'«odontologiste» à modifier l'appareil. Déposée auprès du

Musée archéologique national de Villa Giulia, la dent daterait du VII^e ou du VI^e siècle avant notre ère. Le principe d'une capsule d'or posée à la surface ou à la place d'une dent sera redécouvert par Girolamo Fabrizio D'Acquapendente (1533-1619), mais pratiqué avec succès seulement un siècle plus tard par le chirurgien dentiste Pierre Fauchard (1678-1761).

La prothèse de Palestrina (b) présente trois dents dont une incisive centrale fracturée longitudinalement, sans reste de crâne. Sur un cerclage de quelque trois millimètres de hauteur, qui enserré les dents centrales de la mâchoire supérieure, des anneaux minces de séparation ont été exécutés et deux petits pivots en or remplacent des incisives au centre et sur le côté. Le façonnage de la prothèse montre qu'elle se substituait à deux dents, perdues naturellement ou peut-être extraites. Elle est conservée au Musée archéologique national de Villa Giulia. Quand on la compare à la prothèse de Falerii Veteres, on constate que les deux présentent le même type de pivot : elles dateraient de la même époque, c'est-à-dire du VII^e siècle avant notre ère.



locale commence dès le Premier Âge du fer, vers le X^e siècle avant notre ère, comme l'attestent les éléments d'ornementation retrouvés dans les sépultures de cette période. L'orfèvrerie se développe en Étrurie au début du VII^e siècle avant notre ère, quand sont introduites, grâce au développement des échanges avec l'Orient méditerranéen, des nouvelles techniques : par exemple la granulation ou le filigrane obtenus en soudant de fins fils d'or ou de petites sphères d'or microscopiques. On a ainsi retrouvé une coupe de cette période sur laquelle était soudée plus de 137 000 de ces petites sphères d'un diamètre moyen de 0,3 millimètre.

Même si, dans l'Antiquité, l'or n'a jamais été un métal disponible en grande quantité, le nombre d'objets retrouvés dans les tombes de la région montre qu'une opulente aristocratie étrusque avait un accès facile aux métaux précieux. Ces réseaux commerciaux étaient peut-être alimentés par les gisements localisés dans la partie septentrionale de l'Italie, entre les Alpes et le Pô. Ces gisements sont mentionnés par des auteurs classiques, notamment par Pline l'Ancien (23-79).

L'or était extrait soit du sable des cours d'eau, sous forme de pépites ou de paillettes, soit directement des filons aurifères affleurant dans la roche. L'or

natif n'est jamais pur : il est sous forme d'alliage naturel avec d'autres métaux, surtout l'argent. Son extraction ne nécessitait pas, alors, de techniques complexes, de sorte que l'or a été l'un des premiers métaux utilisés par l'homme : on en retrouve des traces dans la nécropole bulgare de Varna, qui date de près de 6 500 ans. Les prothèses étrusques qui ont été examinées sont considérées comme datant d'une période où les techniques métallurgiques étaient déjà bien maîtrisées, ce qui semble quelque peu en désaccord avec le caractère exceptionnel de ces pièces. Toutefois, cette rareté tient, d'une part, aux pratiques d'incinération et, d'autre part, à la fragilité de ces prothèses que l'on identifie avec certitude seulement quand elles sont encore liées aux dents, lesquelles doivent avoir été conservées en connexion anatomique.

Gaspare BAGGIERI est professeur d'histoire de la médecine dans le Service de recherche anthropologique et paléontologique du Ministère de la Culture, à Rome. Marina di GIACOMO, docteur en lettres et en histoire, travaille avec G. Baggieri.

C. GIARDINO et al., *EDXRF and metallography for in situ simultaneous analysis of archeological metals artefacts*, in *5th Inter-*

On s'interroge aussi sur le choix de l'or pour la fabrication de ces prothèses. L'or est la marque d'un statut social élevé, tout en ayant une certaine valeur magique, ce qui en fait le matériau idéal pour les bijoux ou les amulettes destinées aux personnes de haut rang. Il résiste bien à la corrosion de la cavité buccale, ce que ne font pas d'autres métaux ou alliages, tels les alliages de cuivre et de fer. Les alliages d'or sont très stables, ce qui est une raison de leur compatibilité avec les tissus biologiques. Les prothèses découvertes en Étrurie peuvent même être considérées comme la preuve que l'on avait découvert, sans doute fortuitement, que ce métal est biocompatible.

Au crépuscule de leur civilisation, les Étrusques avaient-ils pressenti que le silence, dans lequel ils allaient plonger, était d'or?

national Conference on non destructive testing, microanalytical methods and environmental evaluation for study and conservation of works of art, Budapest, 1996.

C. GIARDINO, *Archeometallurgia*, éditions Laterza, Bari, 1998.

G. BAGGIERI, *Appointment with an Etruscan Dentist*, in *Journal of the Etruscan Studies Foundation*, vol. 6, pp. 33-42, 1999.

Propulsion sous-marine

STEVEN ASHLEY

Des torpilles se déplacent sous l'eau à plusieurs centaines de kilomètres par heure dans un flot de bulles de gaz qui réduit notablement les frottements du liquide sur le métal.

par supercavitation



Août 2000, mer de Barents, Norvège : le sous-marin russe *Koursk* K-141 sombre après que deux explosions ont éventré la coque du navire ; le bruit court que l'accident est dû à des essais menés sur un nouveau type de torpilles ultrarapides. Quelques mois auparavant, un homme d'affaires américain, Edmond Pope, avait été arrêté et accusé d'espionnage ; il aurait tenté d'acquiescer les plans de nouvelles armes sous-marines. On ignore les détails tant de l'accident que de l'affaire d'espionnage, mais l'un et l'autre seraient liés au développement d'une technique d'avant-garde, qui permettrait aux armes et aux sous-marins de se déplacer en immersion à plusieurs centaines de kilomètres par heure, voire d'aller plus vite que le son dans l'eau. Aujourd'hui, la vitesse maximale ne dépasse pas 130 kilomètres par heure.

Les principales puissances navales semblent toutes développer ce type d'armes et de sous-marins ultrarapides, fondés sur le phénomène de la supercavitation, qui se produit lorsqu'on immerge un objet dans un écoulement liquide rapide. Des bulles de gaz se forment tout autour, ce qui diminue les frottements puisque le liquide ne mouille presque plus l'objet. Les systèmes à supercavitation constituent un bond en avant en matière de combat naval, comparable à ce qui s'est passé dans les airs, quand les avions à réaction ont remplacé les avions à hélices.

Bien que les fonds alloués à la recherche sur la supercavitation soient officiellement modestes, la liste des

armes et des vaisseaux de guerre potentiels fondés sur la supercavitation est longue. Elle comprend des balles sous-marines destinées à faire exploser des mines, des bateaux, voire des avions ou des hélicoptères volant à faible altitude ; des torpilles antivaissseau et antitorpille ; des armes de grande taille qui visent à mettre fin à un combat entre deux sous-marins ; des petits vaisseaux de surface ultrarapides et, enfin, des missiles sous-marins nucléaires destinés à neutraliser une flotille aéronavale complète.

L'utilisation de la supercavitation pourrait modifier notablement la stratégie militaire. Certains experts de la marine américaine y voient la fin des combats sous-marins classiques, où deux navires jouaient au chat et à la souris : les futurs affrontements ressembleraient plus aux combats aériens, avec des petites unités rapides et bruyantes, lancées à la manière des avions de chasse sur les porte-avions par des « porteurs sous-marins » géants. De telles armes seraient efficaces contre le système de défense antimissile du programme américain de « guerre des étoiles ». Une torpille ou un missile à supercavitation à plusieurs étages et à longue portée équipé d'ogives nucléaires serait tiré sous l'eau, effectuerait un long parcours sous-marin, puis surgirait des eaux côtières à proximité de leur cible sans que les systèmes de défense aériens ou spatiaux aient le temps de réagir.

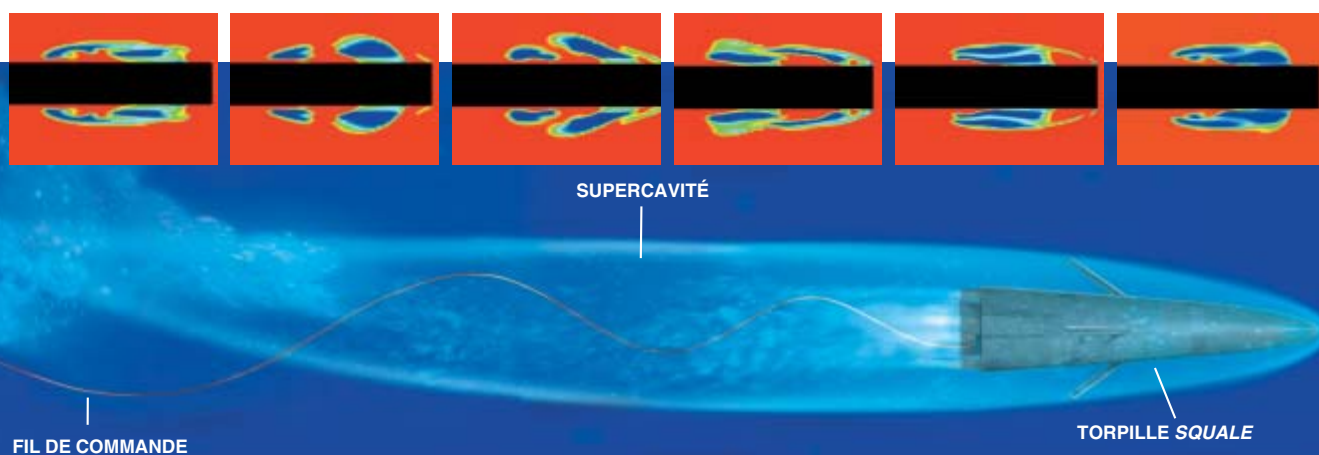
Nous savons qu'une arme à supercavitation – au moins – existe depuis de nombreuses années. En 1977, après plus d'une décennie de recherches et

de développements, la marine soviétique a ajouté à son arsenal une torpille propulsée par un moteur de fusée, nommée *Squale*, qui se déplace dans l'eau à plus de 360 kilomètres par heure à l'intérieur d'une cavité de gaz produite par le missile lui-même. Bien que ce missile sous-marin à tête nucléaire soit rudimentaire et d'une efficacité limitée, la découverte de son existence au début des années 1990 a contraint les puissances militaires occidentales à s'intéresser à la supercavitation.

Les instances civiles s'y intéressent aussi et savent que l'on ne mènera à bien les projets d'engins à supercavitation qu'en résolvant toutes les difficultés techniques, écologiques... et financières, sans compter les problèmes que cela poserait à la navigation. Aujourd'hui, la technique n'en est qu'à ses débuts, au stade où en était l'aviation, il y a une centaine d'années, après les premiers vols sur un avion à deux hélices des frères Wright, à ceci près que l'on connaît mieux la physique de la supercavitation que l'on ne connaissait alors l'aérodynamique.

Un voyage dans une bulle

La propulsion d'un objet dans l'eau – comme tout nageur a pu le constater – demande un effort considérable. Le frottement y est 1 000 fois plus important que dans l'air et la force de frottement augmente avec la vitesse. Pour que les bateaux fendent efficacement les lames, architectes et ingénieurs du génie maritime dotent les bâtiments de



1. MODÉLISATION DU FLUX DE L'EAU lors d'un phénomène de supercavitation. Lorsqu'un objet avance très vite dans l'eau, la pression diminue tout autour de lui. À des vitesses de l'ordre de 180 kilomètres par heure, la pression diminue suffisamment pour que l'eau se dissocie en vapeur, formant une bulle géante de gaz derrière l'objet : c'est le phénomène de cavitation. La supercavitation se produit quand l'engin est totalement emprisonné dans

cette bulle de gaz. Certaines torpilles, tel le *Squale*, créent une supercavité ellipsoïdale (*en bas*). Sur la modélisation (*en haut*), l'eau est rouge et la vapeur bleue ; l'écoulement va de la droite vers la gauche. Sur ce modèle, on observe une cavitation partielle et un décollement de la cavité provoqué par la remontée à contre-courant le long de la surface de l'objet d'un film de liquide ; il y a un décollement quand ce film atteint l'avant de l'objet.

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

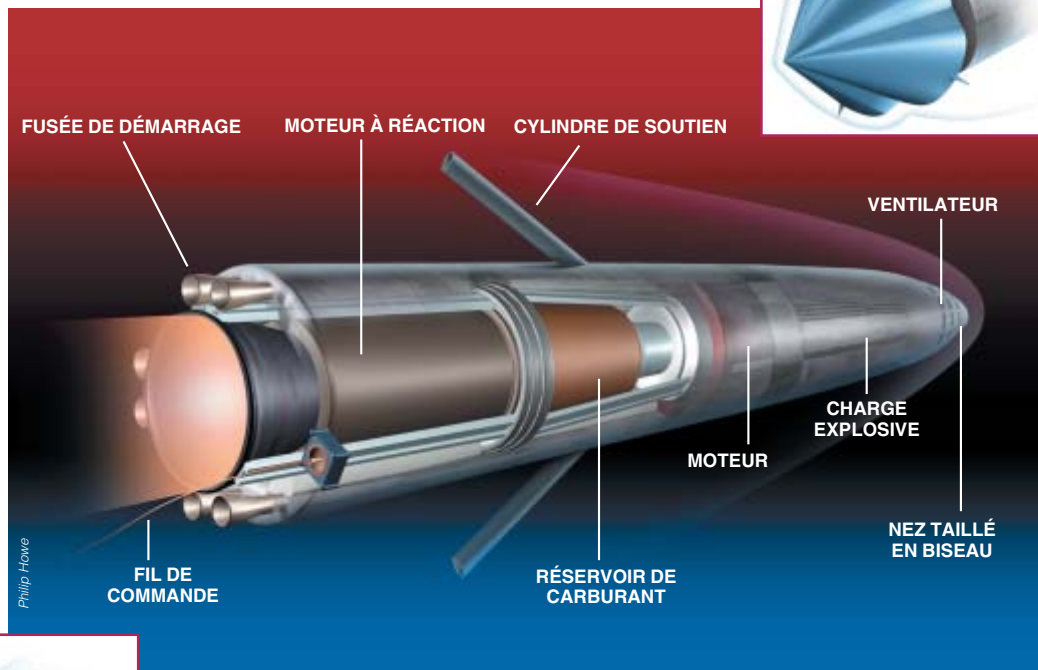
début des années 1950 pour le développement d'hélices à grande vitesse et d'hydrofoils, puis s'est tournée vers d'autres techniques plus silencieuses, préférant les navires furtifs aux navires ultrarapides. Aujourd'hui, elle ne disposerait d'aucune arme à supercavitation, et tente de rattraper l'avance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

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

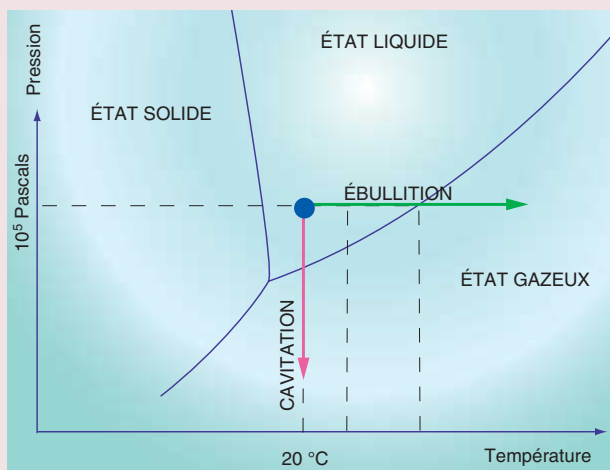
D'après le théorème de Bernoulli de la mécanique des fluides, l'énergie totale d'une particule de liquide se conserve au cours de l'écoulement. L'énergie totale est la résultante de l'énergie cinétique de l'écoulement, proportionnelle au carré de sa vitesse, et de l'énergie due à l'agitation des molécules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

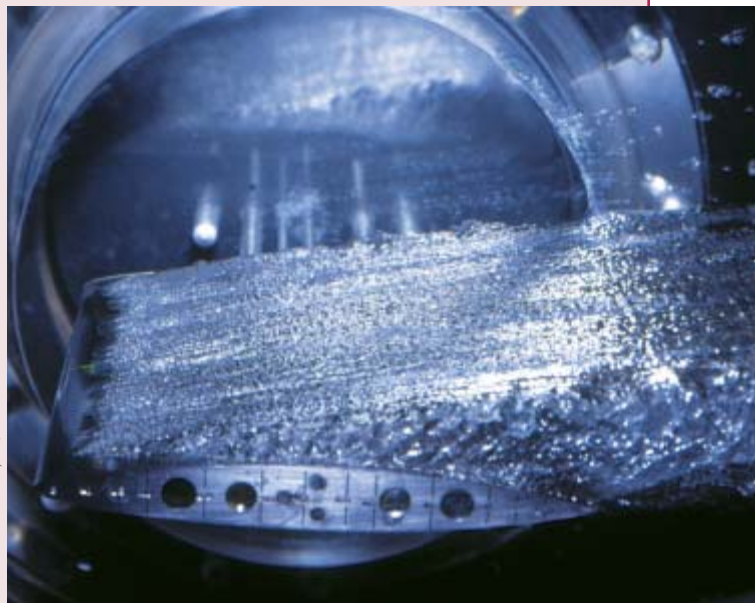
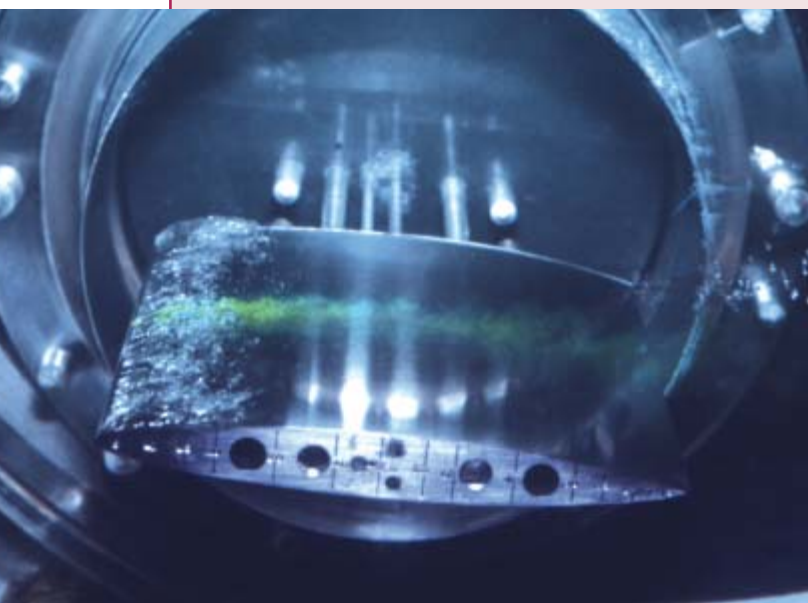
liquide s'accompagne des mêmes phénomènes physiques. Les molécules d'eau, qui sont contraintes de contourner l'objet, subissent des accélérations notables auxquelles sont associées des dépressions. Celles-ci sont d'autant plus importantes que la vitesse est grande : le mouvement à grande vitesse d'un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



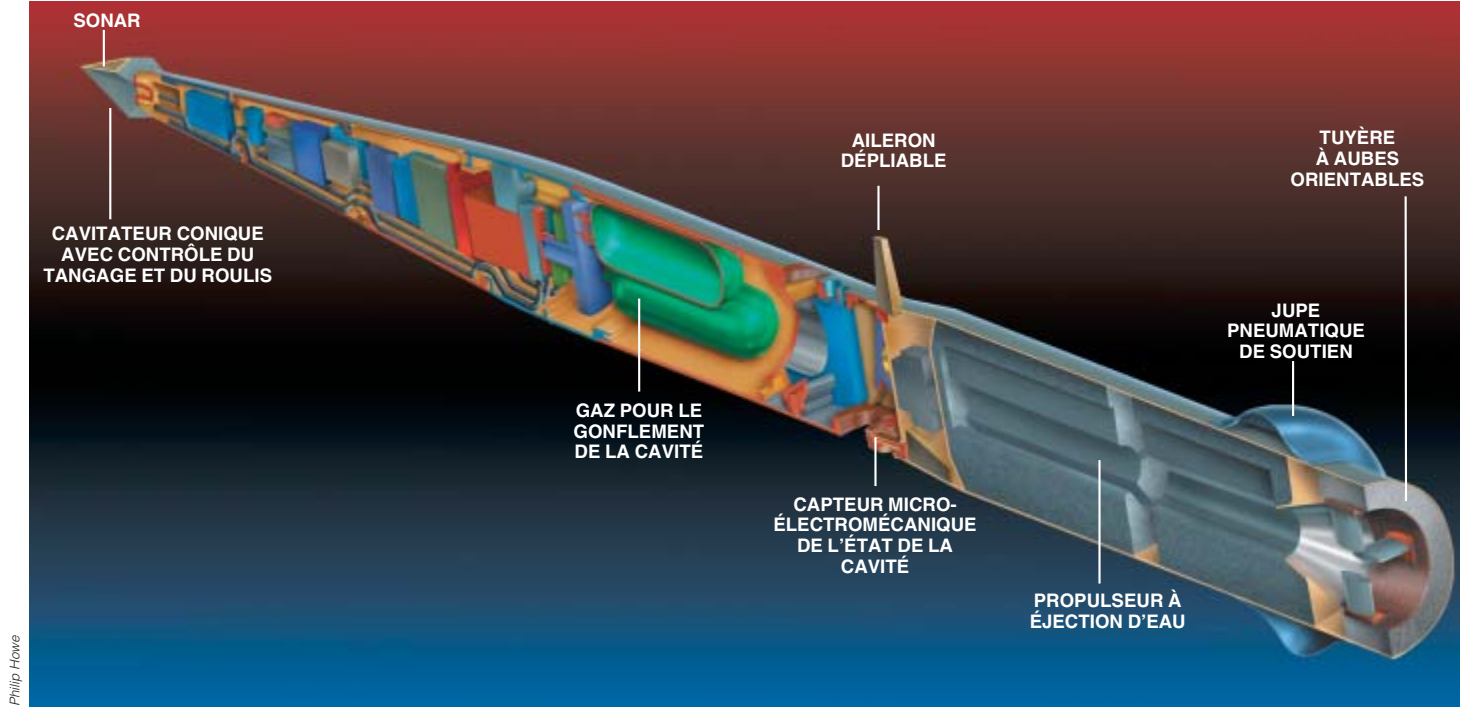
Considérons un volume d'eau (en bleu), dans les conditions normales de température (20 °C) et de pression (1 atmosphère). Quand on augmente sa température à pression constante il se produit une ébullition (en vert) ; quand on diminue sa pression à température constante, il se produit un phénomène de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

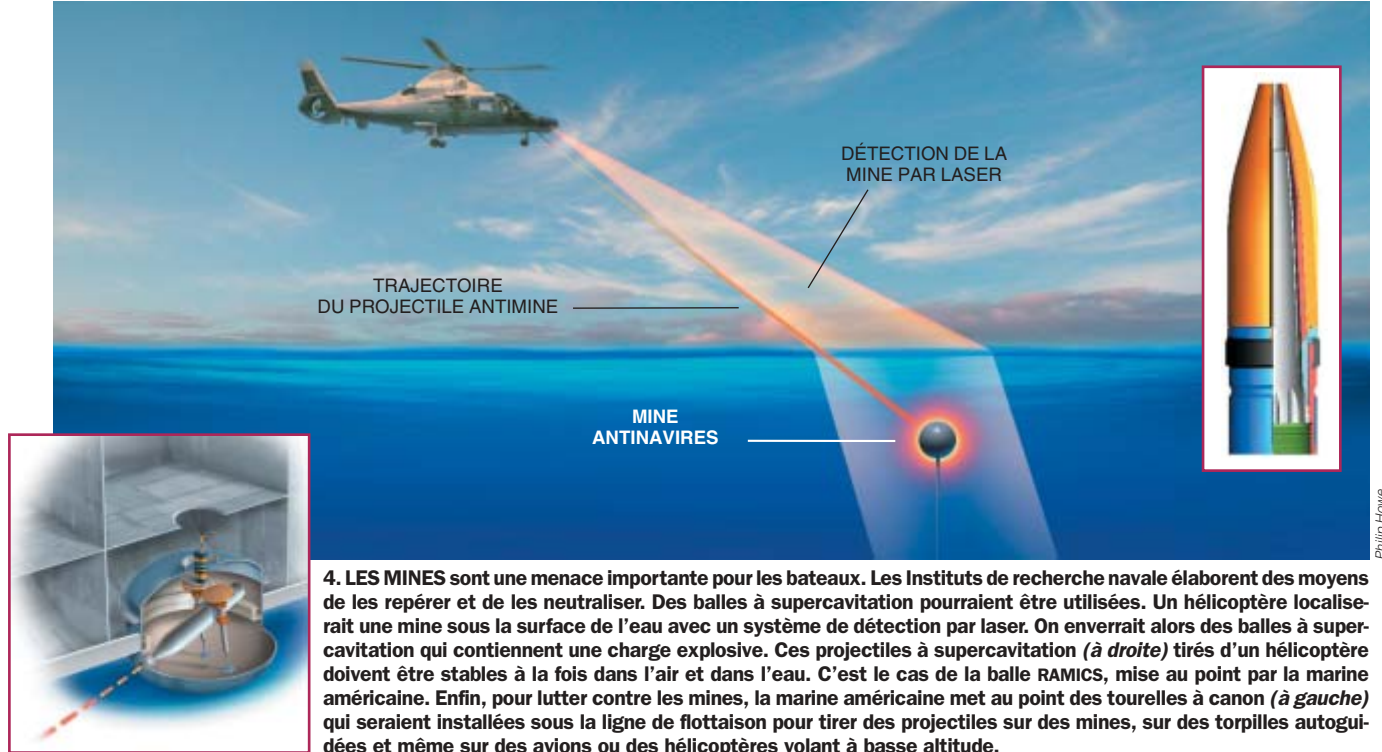
rière de l'engin et imposerait les corrections appropriées. Les engins à supercavitation se déplaçant à l'intérieur de bulles, uniquement soutenus par le gaz à faible densité, leur partie arrière cogne fréquemment contre les parois de la cavité. Ce phénomène de battement de queue est observé sur toutes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



4. LES MINES sont une menace importante pour les bateaux. Les Instituts de recherche navale élaborent des moyens de les repérer et de les neutraliser. Des balles à supercavitation pourraient être utilisées. Un hélicoptère localiserait une mine sous la surface de l'eau avec un système de détection par laser. On enverrait alors des balles à supercavitation qui contiennent une charge explosive. Ces projectiles à supercavitation (à droite) tirés d'un hélicoptère doivent être stables à la fois dans l'air et dans l'eau. C'est le cas de la balle RAMICS, mise au point par la marine américaine. Enfin, pour lutter contre les mines, la marine américaine met au point des tourelles à canon (à gauche) qui seraient installées sous la ligne de flottaison pour tirer des projectiles sur des mines, sur des torpilles autoguidées et même sur des avions ou des hélicoptères volant à basse altitude.

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.

