

---

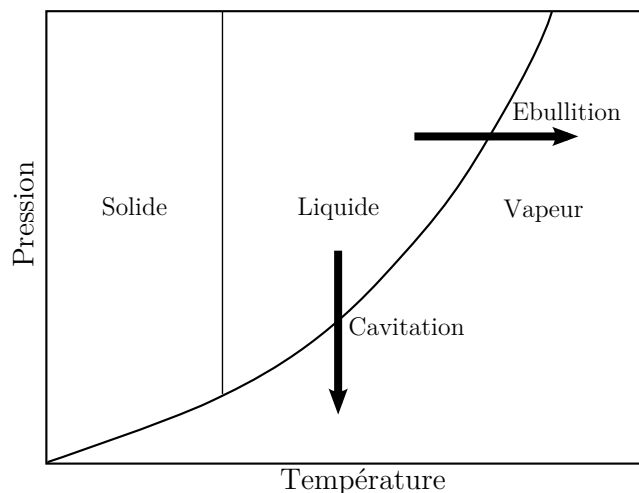
## Phénomène de cavitation

Le phénomène de cavitation n'est pas limité à l'hydrodynamique navale et aux hélices marines en particulier. Pour beaucoup de domaines, il s'agit plus d'une nuisance que d'un avantage car elle s'accompagne de bruit, d'érosion et de perte de performances. La contrainte de la NPSH (*Net Positive Suction Head*) qui fait partie des connaissances de base de l'ingénieur est liée à la cavitation dans les turbomachines. La cavitation est aussi un des problèmes majeurs dans la conception des hélices marines. Le risque de cavitation doit être pris en compte pour tous les éléments de la conception. Chaque type de cavitation engendre des problèmes qui lui sont propres. Pour rappel, le phénomène se déclenche quand la pression atteint un certain seuil, la pression de vapeur saturante  $P_V$ . Quand la pression locale  $P$  est inférieure à ce seuil  $P_V$ , l'eau change brusquement de phase, elle se vaporise. Tout comme la pression est adimensionnalisée par rapport à une pression de référence  $P_\infty$ , en un coefficient de pression  $C_P$ , on adimensionnalise la pression de vapeur  $P_V$  en un nombre de cavitation  $\sigma_V$ . L'équation 1.1 présente la définition du coefficient de pression  $C_P$  et l'équation 1.2 présente la définition du nombre de cavitation  $\sigma_V$ .

$$C_P = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \quad (1.1)$$

$$\sigma_V = \frac{P_\infty - P_V}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \quad (1.2)$$

Ainsi, de par la définition du coefficient de pression  $C_P$  et du nombre de cavitation  $\sigma_V$  ci-dessus, la condition  $P < P_V$  se traduit par la condition  $-C_P > \sigma_V$  ou  $C_P < -\sigma_V$ .



**Figure 1.1.** Diagramme de changement de phase

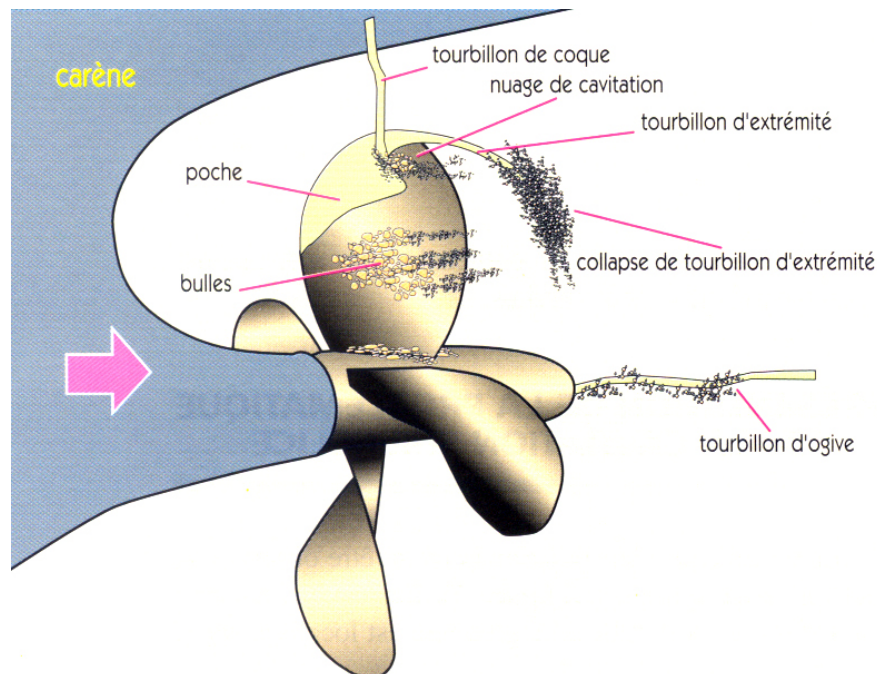
La pression de vapeur saturante n'est pas une constante universelle, elle varie notamment avec la température. L'eau à 15°C a une pression de vapeur saturante de 1700 Pa, à

20°C elle est de 2500 Pa et à 100°C de 101300 Pa ce qui correspond à la pression atmosphérique. Le phénomène d'ébullition est donc le même phénomène que la cavitation. Qu'il s'agisse d'ébullition dans une casserole, de bulles de cavitation, de cavitation à poche, de nuage de cavitation ou encore de cavitation de tourbillon, la phase gazeuse est constituée de vapeur d'eau. On différencie l'ébullition de la cavitation en fonction du moteur de déclenchement du changement de phase. Pour l'ébullition il s'agit de faire varier la température à pression constante et pour la cavitation il s'agit de faire varier la pression à température constante, voir le diagramme de la Figure 1.1. En hydrodynamique navale, l'eau est à température suffisamment froide et homogène pour ignorer le couplage des deux effets et l'apparition de cavitation se limite à un effet de variation de pression.

Le déclenchement de ce changement de phase de l'eau se situe bien sûr au niveau moléculaire ce qui rend le phénomène difficile à cerner et impossible à modéliser de façon exacte. Cependant les nombreuses études de la cavitation dans le domaine de l'hydrodynamique navale ont permis d'en cerner les principaux paramètres et conséquences.

## 1.2 Différents types de cavitation sur une hélice

En ce qui concerne les hélices, on identifie plusieurs formes de cavitation : la cavitation à bulles, la cavitation à poche, la cavitation de tourbillon marginal, la cavitation de tourbillon d'ogive et la cavitation du tourbillon de coque. La Figure 1.2 présente les différents types de cavitation sur une hélice.



**Figure 1.2.** Différents types de cavitation sur une hélice ; image extraite de Briançon-Marjollet and Merle (1999)

### 1.2.1 Cavitation à bulles

Les bulles ont pour origines des germes de cavitation contenus dans le fluide. Ces germes de cavitation sont des microbulles et il n'y a pas de milieu liquide qui n'en contienne. La teneur en germes (le nombre de germes de cavitation par unité de volume fluide) caractérise la qualité de l'eau. Quand un germe de cavitation se déplace avec le fluide dans la zone de dépression à l'extrados de la pale (coté bateau), elle grossit et devient une bulle clairement visible. La bulle grossit jusqu'à ce qu'elle atteigne la zone de recompression. La rapidité du passage provoque une implosion de la bulle. L'implosion a pour première conséquence d'émettre une onde acoustique. Le bruit rayonné par la cavitation à bulles est très important et si la population de bulles n'est pas trop importante, le phénomène est facilement identifiable à l'oreille. Le phénomène est également assez violent pour que l'implosion arrache de la matière à la surface de la pale. Les implosions de bulles viennent donc grêler la surface de la pale. Cette érosion de la surface a de multiples conséquences néfastes pour le bon fonctionnement et la longévité de l'hélice. La pale est d'avantage exposée à la corrosion. La rugosité de l'état de surface en résultant vient bien sûr augmenter le frottement ce qui se traduit par une baisse de rendement. Finalement si les bulles viennent à recouvrir une bonne partie de la surface, on note une perte de performance. En effet, les bulles viennent affecter la distribution de pression car la pression dans et à la surface des bulles avoisine la pression de vapeur saturante. Un exemple de la cavitation à bulles sur une hélice est présenté à la Figure 1.3.



**Figure 1.3.** Cavitation à bulles suivie d'un nuage de cavitation ; photo BEC (Bassin d'Essais des Carènes)

L'équation la plus utilisée pour décrire l'évolution du rayon de la bulle en fonction de la distribution de pression est l'équation de Rayleigh-Plesset. Le détail de cette équation

est présenté à la Section 3.2. Une analyse dimensionnelle sur l'équation de Rayleigh-Plesset permet également de mettre en évidence un facteur de similitude pour la qualité de l'eau. Si on considère une maquette d'hélice à l'échelle  $\lambda$  par rapport au réel, les rapports des teneurs en germes,  $N'$  et  $N$ , entre l'essai sur maquette et au réel doivent respecter la règle de similitude suivante :  $N'/N = 1/\lambda^3$ . L'étude expérimentale du phénomène en tunnel de cavitation nécessite donc d'avoir la possibilité de contrôler la teneur en germes. Finalement, quand les germes de cavitation sont trop nombreux, il y a saturation. Toutes les bulles sont en contact et il n'y a plus de place pour en générer d'autres.

### 1.2.2 Cavitation à poche

La cavitation à poche (voir un exemple à la Figure 1.4) est moins bruyante et moins destructive que la cavitation à bulles (pas d'implosion). Un des effets néfastes de la cavitation à poche est la perte de performances du propulseur. De plus, la cavitation à poche peut être à l'origine de problèmes de vibrations dont les conséquences peuvent aller jusqu'à l'endommagement de la structure. Ces vibrations peuvent avoir plusieurs causes comme la fluctuation temporelle des efforts sur les pales due au fait que la pale peut très bien ne caviter que lorsqu'elle est en position haute où la pression ambiante  $P_\infty$  est moins élevée ou être due au fait que la poche de cavitation est très instable. Dans les deux cas, les fréquences sont bien sûr très différentes.

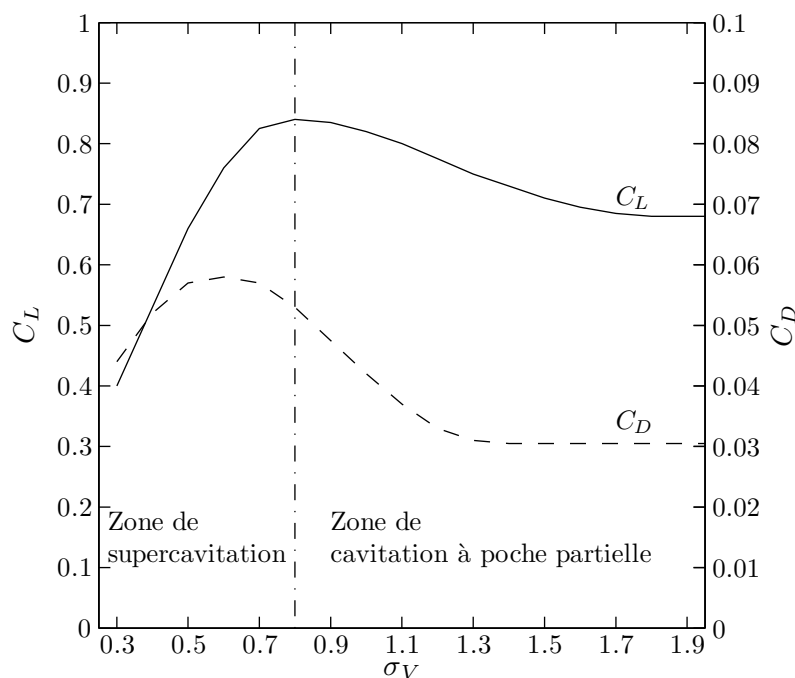


**Figure 1.4.** Cavitation à poche partielle ; photo BEC

La conception des hélices consiste notamment à retarder au maximum la cavitation. En raison de l'augmentation de la charge et de la limitation d'espace pour l'installation des hélices, la cavitation est de plus en plus difficile à éviter. Il est donc nécessaire de comprendre et de savoir estimer les effets de la cavitation à poche notamment sur les efforts hydrodynamiques. Il existe peu de documentation sur le sujet. Certains documents peuvent être anciens.

C'est le cas du rapport d'essais de *Nederlandshc Scheepsbouwkundig Proefstation te Wageningen* (aujourd'hui MARIN) écrit en 1951 (Balhan, 1951) qui fait état de l'effet

mesuré de la cavitation à poche sur des corps portants. Il démontre que les coefficients de portance  $C_L$  et de traînée  $C_D$  des profils bidimensionnels de Kármán-Trefftz varient en fonction de nombre de cavitation  $\sigma_V$ . Quand le nombre de cavitation diminue, le coefficient de portance augmente d'abord légèrement pour diminuer ensuite brutalement quand le nombre de cavitation atteint une certaine valeur. Un exemple de ces données expérimentales démontrant cet effet est présenté à la Figure 1.5. Après ce rapport et jusqu'à il y a peu, il n'existait aucune confirmation publiée de l'effet de la cavitation à poche sur les coefficients hydrodynamiques d'un hydrofoil ou d'une hélice marine. Maintenant, il est généralement établi que dès que la poche de cavitation atteint le bord de fuite, les performances hydrodynamiques s'effondrent.

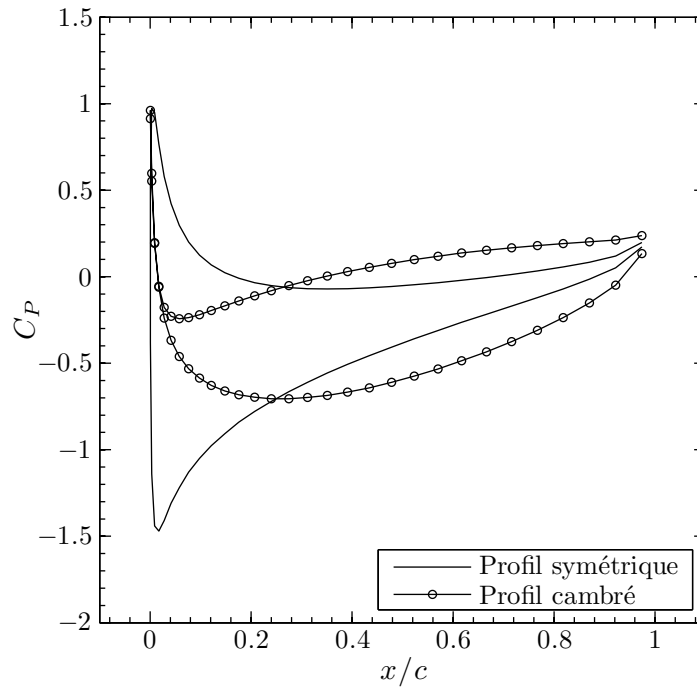


**Figure 1.5.** Effet de cavitation sur les coefficients de portance  $C_L$  et de traînée  $C_D$  d'un profil de Kármán-Trefftz ; données extraites de Balhan (1951)

Qualitativement, la cavitation à poche peut prendre plusieurs formes typiques : poche partielle stable en moyenne, poche partielle instable (instabilité intrinsèque de type jet rentrant), et supercavitation. Si la poche se referme avant le bord de fuite, on parle de poche partielle sinon on parle de supercavitation.

Même si la poche paraît stable en moyenne, il s'agit toujours d'un phénomène instationnaire de haute fréquence. Les fluctuations à haute fréquence de la poche sont responsables du bruit et l'érosion à la surface de la pale est surtout due à la cavitation de bulles.

Les types de cavitation à bulles et à poche se manifestent à la surface des corps quand la pression locale devient inférieure à la pression de vapeur. Dans le cas d'un corps portant, hydrofoil, pale d'hélice ou gouvernail, la dépression se manifeste d'abord à l'extrados (pour une hélice il s'agit bien sûr de la face orientée vers le bateau). Le type de cavitation dépend



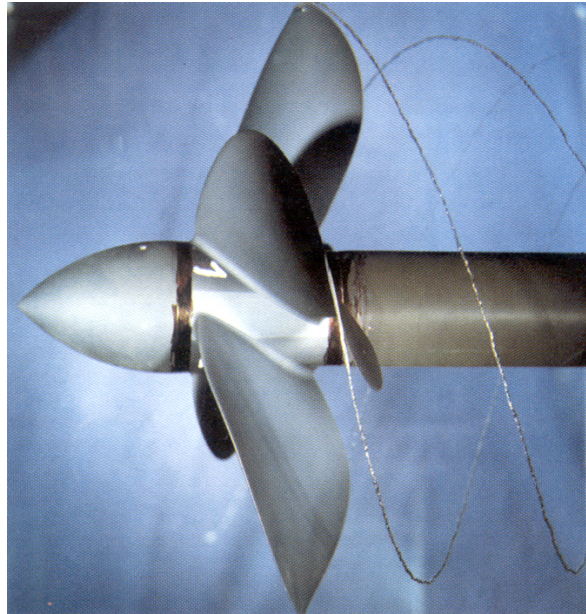
**Figure 1.6.** Distributions de coefficient de pression  $C_P$  de deux profils à portance égale

surtout de la distribution des pressions en régime subcavitant. La Figure 1.6 présente des distributions de coefficient de pression  $C_P$  très différentes de deux profils à portance égale. Quand la distribution de  $C_P$  présente un pic de  $C_{Pmin}$  très prononcé proche du bord d'attaque, il y a beaucoup de chances pour qu'une cavitation à poche plutôt qu'une cavitation à bulles se développe. Dans le cas d'une hélice fonctionnant à son paramètre d'avance nominal, la courbe de  $C_P$  ne devrait pas présenter de pic et si une étude a été faite, elle ne devrait pas caviter à ce régime. Lorsque l'hélice est chargée, en fonction du profil, la distribution peut présenter un pic proche du bord d'attaque, auquel cas, on observera une cavitation à poche. Pour contrôler le type de cavitation ayant le plus de chance de se manifester lorsque l'hélice est chargée, il faut étudier l'influence du chargement sur la distribution de  $C_P$ .

### 1.2.3 Cavitation de tourbillon marginal

La cavitation de tourbillon marginal est le type de cavitation qui apparaît généralement en premier. Le tourbillon marginal existe à cause de la portance développée sur la pale. Ce tourbillon s'explique assez facilement. Reprenons le cas d'une aile portante. Les pressions sous l'aile, soit à l'intrados (pressure side), sont généralement supérieures à la pression de référence alors qu'au-dessus de l'aile, à l'extrados (suction side), elles sont inférieures à la pression ambiante. L'écoulement ne pouvant s'effectuer au travers de l'aile, les deux écoulements intrados et extrados se rejoignent au bord de fuite. C'est ce qui se passe tout le long de l'envergure. Mais à l'extrémité, le fluide peut contourner l'aile de l'intrados vers l'extrados. L'écoulement s'enroule et forme le tourbillon marginal. Dans l'eau,

la dépression au coeur du tourbillon peut être assez importante pour que la cavitation apparaisse. De plus, on peut voir la trajectoire des pales d'hélice en observant la cavitation de tourbillon marginal (voir la Figure 1.7).



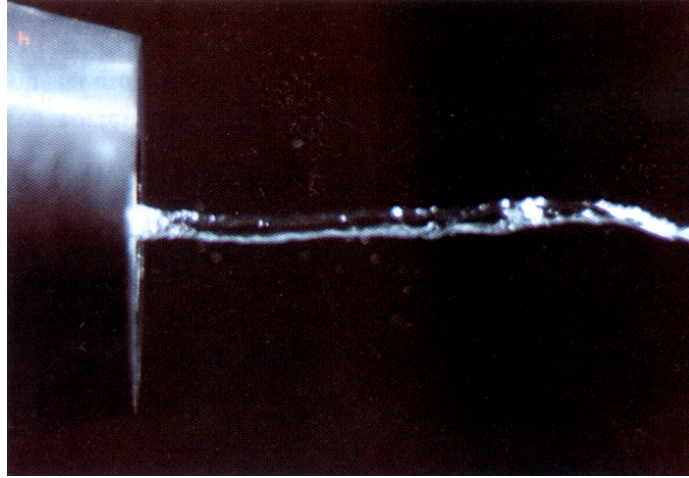
**Figure 1.7.** Cavitation de tourbillon marginal; photo BEC

Sur les avions plusieurs dispositifs (winglets) ont été imaginés avec succès pour détourner, atténuer ou encore disperser le tourbillon. La préoccupation dans le cas d'un avion est la perturbation que cause le passage de l'avion en aval. Le tourbillon impose un délai à respecter entre les décollages de deux avions sur une même piste. Le principe a été testé de nombreuses fois sur une pale d'hélice mais avec beaucoup moins de succès. Le retardement de la cavitation est quasi-insignifiant alors que l'on perd beaucoup en efficacité sans parler de l'inertie qu'il faut alors combattre due à l'excès de poids en extrémité de pale. Une solution alternative est l'hélice sous tuyère ou carénée mais il s'agit de poids additionnel et on perd souvent plus qu'on y gagne. De plus il se développe alors un autre type de cavitation, la cavitation d'entrefer, entre la pale et la face interne de la tuyère. La solution la plus couramment utilisée consiste à appliquer une forte loi de dévers ainsi qu'un très faible pas en extrémité de pale.

#### 1.2.4 Cavitation de tourbillon d'ogive

Le tourbillon d'ogive (voir la Figure 1.8) est le fruit de la conjonction en rotation des tourbillons en emplanture de chaque pale. Le tourbillon d'emplanture est dû au fait que deux couches limites d'épaisseurs différentes, celle de la ligne d'arbre et celle de la pale, se côtoient avec un angle vif ( $90^\circ$ ). L'intersection des efforts de cisaillement cause l'enroulement de l'écoulement et la formation d'un tourbillon. Le tourbillon vient se combiner aux tourbillons des autres pales en extrémité de l'ogive qui peut alors caviter si la dépression est importante. Une des manières de limiter les risques d'apparition et de développement

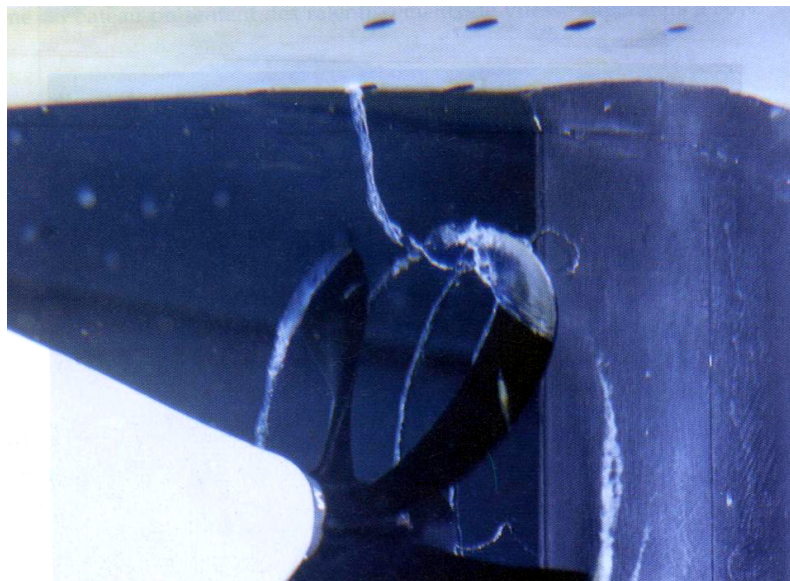
de ce type de cavitation est de relier les pales au moyeu par un congé de raccordement.



**Figure 1.8.** Cavitation de tourbillon d'ogive; photo BEC

### 1.2.5 Cavitation du tourbillon de coque

Ce type de cavitation est moins souvent observé mais s'il se manifeste il peut s'avérer très dérangeant. Le tourbillon de coque (voir la Figure 1.9) prend son origine au sommet de l'hélice et va interagir avec la couche limite développée sur la voute de la coque. Le mécanisme n'a pas été étudié en détail mais on sait que le tourbillon ne se développe que si la couche limite de la voute est relativement proche de l'hélice. La dépression au sommet de l'hélice peut aspirer la couche limite si elle est assez proche. Le sens du tourbillon est alors probablement aléatoire mais une fois enclenché il se stabilise.



**Figure 1.9.** Cavitation de tourbillon de coque; photo BEC



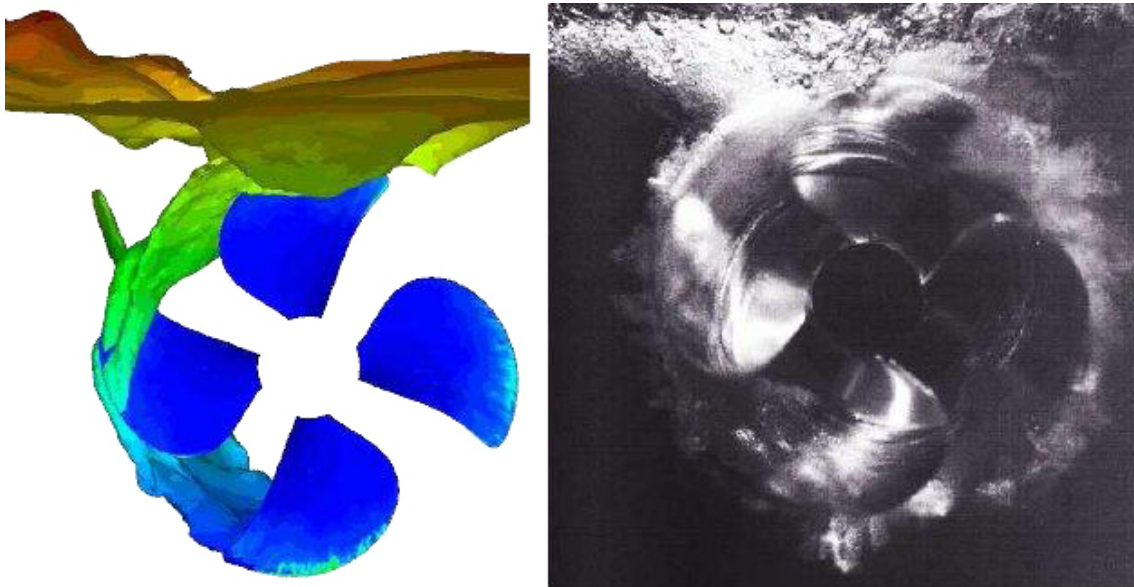
S'il est attaché de façon assez stable au sommet de l'hélice, il se déplace de façon chaotique sur la coque. Si de plus il est cavitant, il va éroder la peinture de la coque à la manière d'une perceuse qui ripe sur une surface. Le phénomène est bien sûr très bruyant. Sur certains navires il se manifeste au point de fonctionnement nominal. La solution la plus simple consiste à modifier l'écoulement sur la voute par addition de plaques soudées. Cette solution est généralement appliquée de manière assez empirique mais elle offre l'avantage d'être économique. Le tourbillon de coque s'apparente également au tourbillon hélice-gouvernail. Le phénomène est similaire mais le tourbillon cavitant part le plus souvent de l'apex de l'hélice pour rejoindre le bord d'attaque du gouvernail situé en aval. La différence principale est qu'il est alors stable de chaque côté traçant un tube cavitant permanent entre l'hélice et le gouvernail.

### 1.3 Remarques additionnelles concernant la cavitation

Deux remarques doivent être apportées ici en qui concerne la cavitation.

#### 1.3.1 Cavitation versus ventilation

Un phénomène analogue se produit à proximité de la surface libre. La dépression aspire la surface libre qui se déforme en hypersphère. Si l'apex de cette dernière entre en contact avec le sommet de la pale, de l'air est emprisonné dans la rotation, voir Figure 1.10. Le phénomène est alors un phénomène de ventilation. La deuxième phase gazeuse est alors de l'air à la pression atmosphérique contrairement à la cavitation où il s'agit de vapeur d'eau à pression de vapeur saturante.



**Figure 1.10.** Simulation et essai expérimental de ventilation ; images extraites de Califano and Steen (2009)

### 1.3.2 Bucket de cavitation

Il s'agit d'un diagramme qui indique sur une carte chargement versus nombre de cavitation, la frontière entre les fonctionnements en régimes cavitant et subcavitant. Le plus souvent on l'utilise pour des sections 2D et l'ordonnée est alors l'angle d'attaque. Pour chaque type de cavitation (bulles ou poche), le plan est séparé par une frontière à peu près droite et l'intersection des différents demi-plans donne un diagramme semblable à celui de la Figure 1.11. Ces diagrammes sont le fruit d'une série d'essais ou de calculs. Ils permettent de vérifier si les points de fonctionnement de l'hélice correspondent à un fonctionnement cavitant ou subcavitant. Cet outil illustre bien le souci de rester en régime subcavitant.

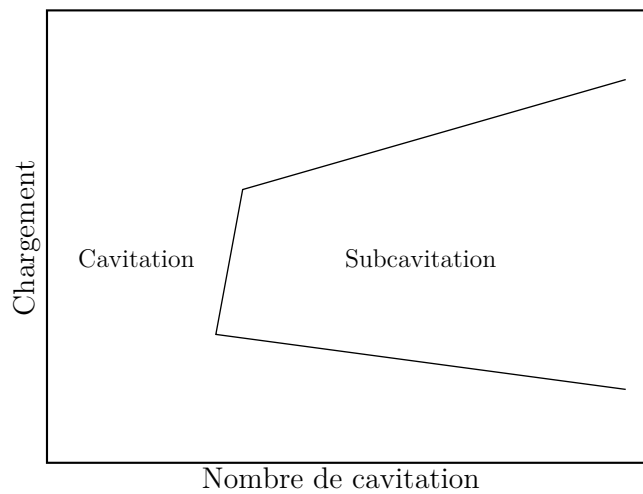


Figure 1.11. Bucket de cavitation

## 1.4 Objectifs et organisation de la thèse

### 1.4.1 Objectifs et originalité de l'étude

L'objectif principal de cette étude est d'améliorer un outil d'aide à la conception des hélices marines.

Un rapport de MARIN (Grin et al., 2009) indique que d'après des études expérimentales, l'efficacité des hélices peut être améliorée avec la présence d'une poche de cavitation si sa longueur est suffisamment importante. Il est affirmé dans ce rapport que l'efficacité d'une hélice peut être augmentée de l'ordre de 5% en présence de la poche de cavitation qui couvre alors une bonne moitié de la surface de l'extrados de la pale. Selon les résultats numériques présentés au Chapitre 6 de cette thèse, le coefficient de poussée,  $K_T$ , augmente légèrement en présence de la poche de cavitation. Le coefficient de couple,  $K_Q$ , augmente également ce qui résulte le plus souvent en une perte de rendement très légère voire insignifiante. Cependant, si la poche partielle est assez importante, la surface exposée au

frottement diminue considérablement (Kopriva et al., 2007) et on peut alors envisager un gain de rendement. Par conséquent, il est sans doute possible d'améliorer le rendement d'une hélice en provoquant la présence d'une cavitation à poche partielle que l'on doit alors contrôler.

L'objectif de cette étude est d'étudier l'effet de la cavitation à poche partielle sur les efforts hydrodynamiques. On doit pour cela disposer d'un outil numérique fiable et rapide. Les simulations numériques doivent également prendre en compte les fluctuations de pression sur les pales lors d'écoulements instationnaires tels que l'hélice en rencontre quand elle travaille en inclinaison ou dans un sillage amont non-uniforme. On doit également être en mesure de simuler la fluctuation de la poche due à la pression hydrostatique. L'outil numérique servira également à déterminer les risques de supercavitation.

Différentes approches numériques sont possibles (ITTC, 2000). Le modèle physique le plus complet est basé sur les équations de Navier-Stokes qui décrivent l'écoulement visqueux en considérant le fluide comme un milieu continu. C'est le choix de plusieurs équipes de développement dont le but est de greffer un modèle de cavitation à poche partielle sur un code de résolution des équations de Navier-Stokes (Chahine and Hsiao (2001); Wang et al. (2001); Watanabe et al. (2003); Coutier-Delgosha et al. (2003a,b); Streckwall (2007); Huuva (2008); Hsiao and Chahine (2008); Liu et al. (2008); Yamasaki et al. (2009); Salvatore et al. (2009); Shin (2009); Greitsch et al. (2009)). Cette approche pose deux inconvénients majeurs, le premier étant bien sûr la capacité informatique nécessaire. Puisqu'il s'agit d'efforts hydrodynamiques, la résolution doit déjà être assez fine. Les modèles de cavitation proposés dans les références citées dans ce paragraphe sont pour la plupart basés sur le contrôle du changement de phase. Si des germes de cavitation sont modélisés, la résolution doit être extrêmement fine. Ce n'est bien sûr pas le cas pour la plupart des développements. Toutefois, quand la poche est établie, quel que soit le principe de calcul ayant permis d'y parvenir, pour la maintenir, on doit en permanence contrôler le changement de phase ce qui implique le plus souvent la résolution d'une équation supplémentaire d'origine thermodynamique. Le phénomène modélisé est très rapide ce qui oblige à utiliser une résolution temporelle très fine. En conclusion, toutes ces approches impliquent des maillages très fins et des pas de temps très petits. Si l'on ne dispose pas d'outils numériques surpuissants, les temps de calcul sont trop longs pour envisager des simulations instationnaires tridimensionnelles. Ces méthodes sont très intéressantes si le but est d'étudier la physique de la poche et de ses fluctuations afin par exemple, à terme, d'estimer son effet sur l'érosion du matériau. On peut également s'amuser à estimer le bruit rayonné encore que de toute façon, la cavitation, quelle qu'elle soit, engendre beaucoup de bruit.

Une autre approche consiste à résoudre la phase liquide de l'écoulement visqueux par résolution des équations de Navier-Stokes et à réduire la poche à une condition de frontière. C'est l'approche utilisée notamment par Hirschi et al. (1997, 1998); Ait-Bouziad et al. (2003). Les simulations sont alors indéniablement plus économiques en temps calcul. Par contre, il faut bien définir une géométrie initiale pour la poche. Comme il n'existe pas de modèle universel de poche de cavitation, le plus logique est d'utiliser le modèle de bulle de Rayleigh-Plesset. La poche est alors assimilée à un train de bulles (ou plutôt de demi-bulles).

Décrire la poche comme une condition frontière permet donc de s'affranchir de mo-

délimiter la physique vraie de la poche tout en modélisant ses effets sur les efforts hydrodynamiques. C'est également cette approche qui a été utilisée pour les cas de simulations présentés par le Bassin d'Essais des Carènes (Briançon-Marjollet and Merle, 1999). Dans ce cas, la phase liquide est calculée par résolution du modèle potentiel qui décrit l'écoulement non-visqueux et irrotationnel ce qui est parfaitement justifié en dehors de la couche limite. Dans cette méthode numérique comme pour la précédente, la géométrie de l'obstacle est modifiée comme si la poche était intégrée à sa géométrie. Cette astuce de calcul pose toutefois un problème majeur lorsque l'on cherche à modéliser l'évolution de la poche en fonction des conditions instationnaires de l'écoulement. La simulation instationnaire passe par un remaillage ce qui rend les choses extrêmement délicates.

La plupart des développements visant à simuler de manière rapide et fiable l'effet de la cavitation à poche sur les efforts hydrodynamiques en régime instationnaire utilisent des codes potentiels et évitent le remaillage. Les méthodes de singularités ont cet avantage que l'on peut dévier l'écoulement par ajustement des intensités. Sans changer sa position, on peut ainsi agir sur tout l'écoulement, en modifiant l'intensité d'une singularité qu'elle soit une source, un doublet ou encore un tourbillon. C'est ce type d'approche qui est utilisé par Yamaguchi and Kato (1983); Lemonnier (1984); Le (1989); Kinnas and Fine (1990, 1993); Fine and Kinnas (1993); Peallat and Pellone (1996); Brewer and Kinnas (1997); Kinnas and Pyo (1999); Achkinadze and Krasilnikov (2001); Krishnaswamy et al. (2001); Salvatore and Esposito (2001); Kinnas et al. (2002, 2003); Krasilnikov et al. (2003); Lee et al. (2003); Pereira et al. (2002); Salvatore et al. (2003); Vaz et al. (2003); Young and Kinnas (2003); Lee and Kinnas (2004); Vaz et al. (2005); Kinnas et al. (2007); Gaggero and Brizzolara (2008); Young and Liu (2008) dont la plupart font l'objet d'une description détaillée à la Section 3.1.

C'est également ce type d'approche qui a été choisi pour le développement présenté dans ce document. En s'inspirant d'une étude ancienne qui consistait à utiliser les vitesses de transpiration pour modéliser la couche limite (Laurens, 1993), on a pensé à utiliser la même technique pour modéliser la poche de cavitation. L'utilisation des vitesses de transpiration est la principale originalité de ce développement. On évite ainsi le remaillage ce qui facilite la simulation de poche en présence d'écoulements instationnaires et qui permet de plus de combiner les modélisations de la couche limite et de la poche de cavitation.

## 1.4.2 Organisation du document

Le chapitre 2 de ce mémoire reprend la description du modèle potentiel et des méthodes de singularités et décrit comment sont introduites les vitesses de transpiration. Les deux codes potentiels qui seront utilisés par la suite sont également présentés. Il s'agit d'un code bidimensionnel et d'un code tridimensionnel. On aborde également certains principes qui seront utilisés dans les cas de simulations présentés dans ce mémoire comme la théorie des images.

Présentée dans le chapitre 3, la méthode de calcul consiste donc à simuler la présence de la poche de cavitation à l'aide de la technique des vitesses de transpiration. Le modèle de cavitation développé ici permet de déterminer la distribution des vitesses de transpiration à appliquer pour représenter la poche. Dans un premier temps, on étudie la possibilité

d'utiliser le modèle de Rayleigh-Plesset et il est expliqué pourquoi ce modèle est inadapté. Dans un deuxième temps on étudie l'influence de la géométrie de poche sur la distribution des coefficients de pression. Il ressort de cette étude que la longueur et l'épaisseur de la poche doivent être variées simultanément pour réussir à obtenir un plateau de pression réaliste à la surface de la poche. Dans un troisième temps, ce chapitre détaille le modèle finalement adopté. Il s'agit d'un modèle basé sur des hypothèses physiques simples et sans artifice supplémentaire. On propose en effet que la poche peut être modélisée en partant de la distribution des coefficients de pression en régime subcavitant. Le principe est simplement d'imposer le démarrage de la poche quand la pression subcavitante est inférieure à la pression de vapeur saturante. La longueur, et donc la fermeture de la poche, est naturellement déterminée en imposant très logiquement que l'intégrale des vitesses de transpiration le long de la ligne de courant soit nulle. Le modèle est ensuite implémenté et vérifié dans les codes bidimensionnel et tridimensionnel. L'influence des paramètres de la discrétisation est alors bien sûr étudiée et rapportée.

Les chapitres 4 et 5 sont dédiés à la validation du modèle. On commence par utiliser les données disponibles dans la littérature. Une validation du modèle est d'abord effectuée en régime stationnaire bidimensionnel. Les données expérimentales détaillées de ce cas nous permettent une validation non seulement qualitative (géométrie de la poche) mais aussi quantitative (efforts hydrodynamiques et coefficients de pression). On verra d'ailleurs qu'il a été nécessaire de respecter toutes les conditions d'écoulement pour obtenir des résultats très proches de ceux des essais. Après avoir vérifié que l'on retrouvait des résultats similaires aux résultats numériques du BEC (Briançon-Marjollet and Merle, 1999), les résultats publiés de Kinnas and Fine (1993) ont été retrouvés. Même si la comparaison est très bonne, ces derniers résultats ne sont que qualitatifs. Une campagne d'essais a alors été mise en place pour obtenir une validation du modèle plus complète dans le cas tridimensionnel. Le dispositif expérimental et le déroulement des essais sont décrits au Chapitre 5 ainsi que la comparaison avec les simulations numériques dont les résultats nous permettent de conclure à la validation complète du modèle.

Le nouvel outil numérique résultant est ensuite utilisé pour des cas instationnaires réalistes. C'est l'objet du sixième et dernier chapitre. Une analogie entre un hydrofoil et une pale d'hélice dans deux types de régimes instationnaires permet une analyse plus rigoureuse des résultats qui vient conforter la confiance dans le modèle et l'outil numérique en résultant.