

Hydrodynamique : comment faire avancer un bateau ?

Le fonctionnement d'une hélice

Culture Sciences
de l'Ingénieur

Balthazar LESCANNE

Édité le
10/01/2025

école
normale
supérieure
paris-saclay

Cette ressource est issue d'un travail personnel de Balthazar Lescanne, élève au département d'enseignement et de recherche (DER) de Génie Mécanique de l'ENS Paris-Saclay et diplômé du Master 2 Mécanique et Energie en Environnement Naval (M2EN) de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers et de l'Ecole Navale et du Master 2 Mécanique des matériaux pour l'intégrité des structures de l'ENS Paris-Saclay. Ce document a été relu par Patrick BOT Maître de conférences à l'Ecole Navale.

Cette ressource présente les enjeux liés à l'utilisation des hélices marines, composantes essentielles de la propulsion maritime puisqu'elles convertissent l'énergie mécanique des moteurs en énergie propulsive. Leur conception est cruciale à l'obtention d'un bon rendement propulsif et a significativement évolué depuis les premières hélices, permettant des améliorations significatives pour de nombreux usages.

L'utilisation d'hélices marines remonte au début du XIX^e siècle et a, dès cette époque, permis une augmentation importante de l'efficacité énergétique des navires par rapport aux roues à aubes. Plus récemment les méthodes de simulations numériques, en particulier dans le domaine de la dynamique des fluides, permettent de continuer à améliorer les performances des hélices. Le phénomène de cavitation demeure cependant un enjeu majeur dans la conception des hélices en affectant leur performance et leur durabilité. La cavitation se produit lorsque la pression sur les surfaces de l'hélice chute en dessous de la pression de vapeur du liquide environnant, entraînant la formation de bulles de vapeur. Ces bulles implosent ensuite, lors de leur retour à l'état liquide, endommageant ainsi la surface de l'hélice.



Figure 1 : Hélice endommagée par la cavitation [6]

1 - Les hélices marines : Des profils portants

1.1 - Une aile, comment ça marche ?

Un profil porteur est une forme conçue pour générer une force dite de portance lorsqu'elle se déplace dans un fluide. C'est par exemple l'aile d'un avion qui génère en se déplaçant dans les airs, la force ascensionnelle qui lui permet de voler. Deux forces s'appliquent sur un profil porteur, la force de **portance** est celle qui permet à l'avion de voler, c'est la composante de la force normale à la direction de l'écoulement. La force de **traînée** est celle qui le ralentit, c'est la composante de la force qui est parallèle à la direction de l'écoulement. Lorsqu'on regarde une hélice marine vue en coupe, on s'aperçoit qu'il s'agit en réalité d'une suite de profils qui se succèdent depuis l'intérieure de l'hélice (le moyeu) vers l'extérieur. Les principes de la mécanique des fluides permettant à une hélice de générer une poussée sont donc les mêmes que ceux qui permettent à un avion de voler. On retrouve une force de portance permettant au navire d'avancer et une force de traînée ralentissant la rotation de l'hélice [1].

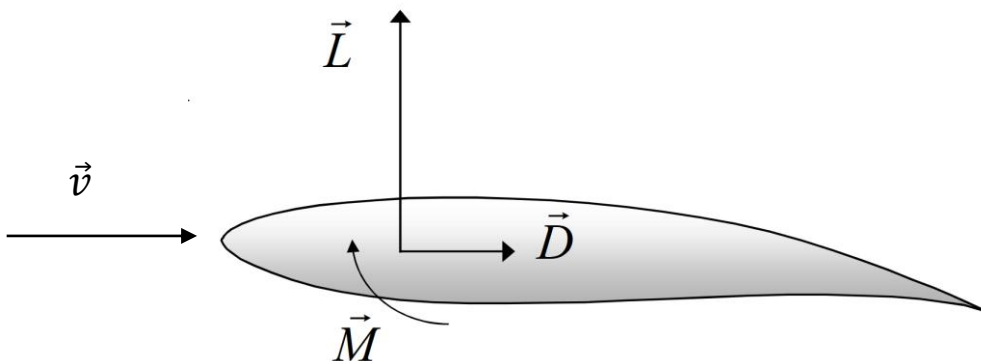


Figure 2 : Forces s'appliquant sur un profil porteur pour un angle d'incidence nul (vue en coupe) [1]

Portance : La portance, souvent notée \vec{L} pour lift en anglais, est générée par la différence de pression entre le dessus et le dessous du profil.

Traînée : La traînée, souvent notée \vec{D} pour drag en anglais, est la force de résistance qui s'oppose au mouvement du profil dans le fluide. On la décompose souvent en deux composantes, la traînée de frottement et la traînée de forme. La traînée de frottement est dû à la friction du fluide contre la surface du profil. La traînée de forme est, comme son nom l'indique, due à la forme du profil et à la différence de pression entre les côtés amont et aval. C'est, par exemple, cette traînée de forme qui explique qu'il est beaucoup plus facile de déplacer une plaque plane parallèlement au flux et non pas perpendiculairement.

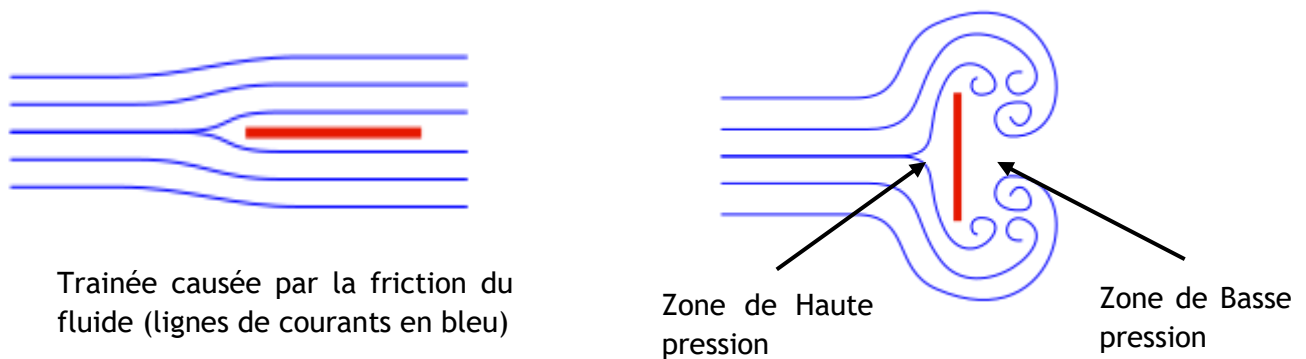


Figure 3 : Traînée d'une plaque plane, à gauche il s'agit principalement de traînée de frottement alors qu'à droite il s'agit principalement de traînée de forme [7]

Il reste maintenant à mieux comprendre d'où vient la différence de pression à l'origine de la force de portance. Cette différence de pression entre la face extérieure (que l'on appelle l'extrados) et l'intérieur (que l'on appelle l'intrados) du profil est causée par la variation de la vitesse de l'air ou de l'eau, selon une équation appelée équation de Bernoulli. Cette équation relie la pression à la vitesse du fluide, si l'on ne considère pas la variation d'énergie potentielle ; elle s'écrit :

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{constante}$$

Avec :

P est la pression du fluide en Pa ;

ρ est la masse volumique du fluide en kg/m^3 ;

v est la vitesse du fluide en m/s .

Dans le cas d'un entonnoir en Figure 4, au point 1 la vitesse du fluide est faible et la pression est donc élevée. Lorsque le flux est canalisé, il se resserre et accélère par conservation du débit. Au point 2 la vitesse est donc plus élevée et la pression plus faible, cet effet s'appelle l'effet Venturi.

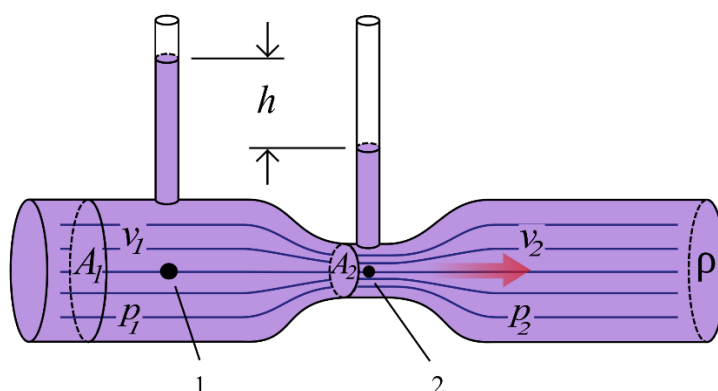


Figure 4 : Effet Venturi dans un entonnoir [8]

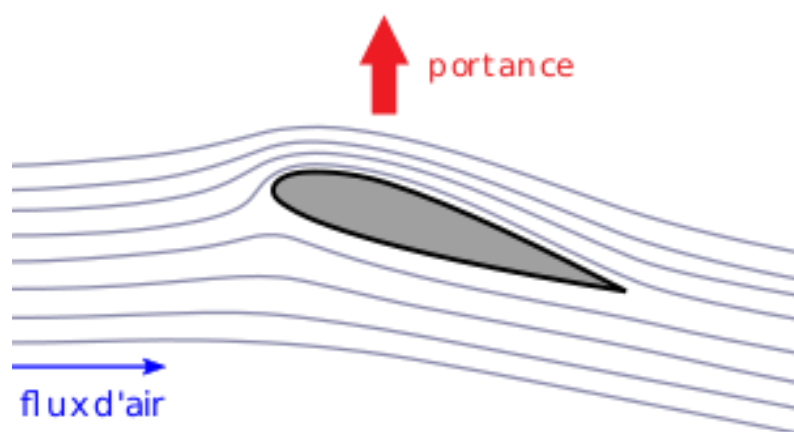


Figure 5 : Canalisation du fluide autour d'une aile [9]

Pour une aile, à l'extrados les lignes de courant se resserrent et le fluide accélère, à l'intrados au contraire les lignes de courant s'écartent et le fluide ralentit. On en déduit donc, à l'aide de l'équation de Bernoulli qu'il y a une zone de basse pression à l'extrados et une zone de haute pression à l'intrados. Cette différence de pression est ce qui permet aux avions de voler, ils se font en quelque sorte « aspirer vers le haut » par cette différence de pression. De la même manière c'est cette différence de pression qui permet à une hélice de générer une poussée lors de son mouvement.

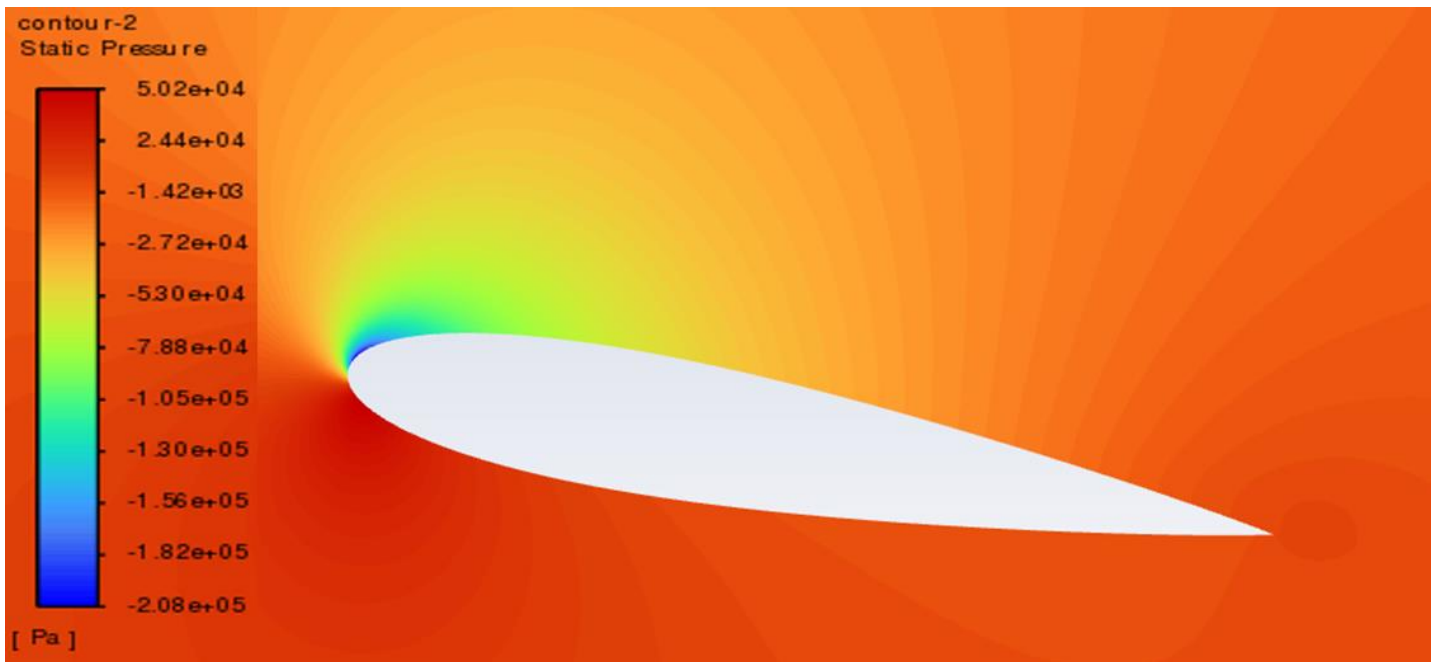


Figure 6 : Pression autour d'une aile

1.2 - Application aux hélices

Comme évoqué dans la partie précédente la pale d'une hélice est constituée de profils portants qui se succèdent depuis le moyeu jusqu'à l'extrémité de la pale. La vitesse étant de plus en plus élevée lorsque l'on s'éloigne du centre de l'hélice une pale présente des profils différents selon l'endroit examiné. Il est donc nécessaire de mieux comprendre comment l'on définit un profil portant.

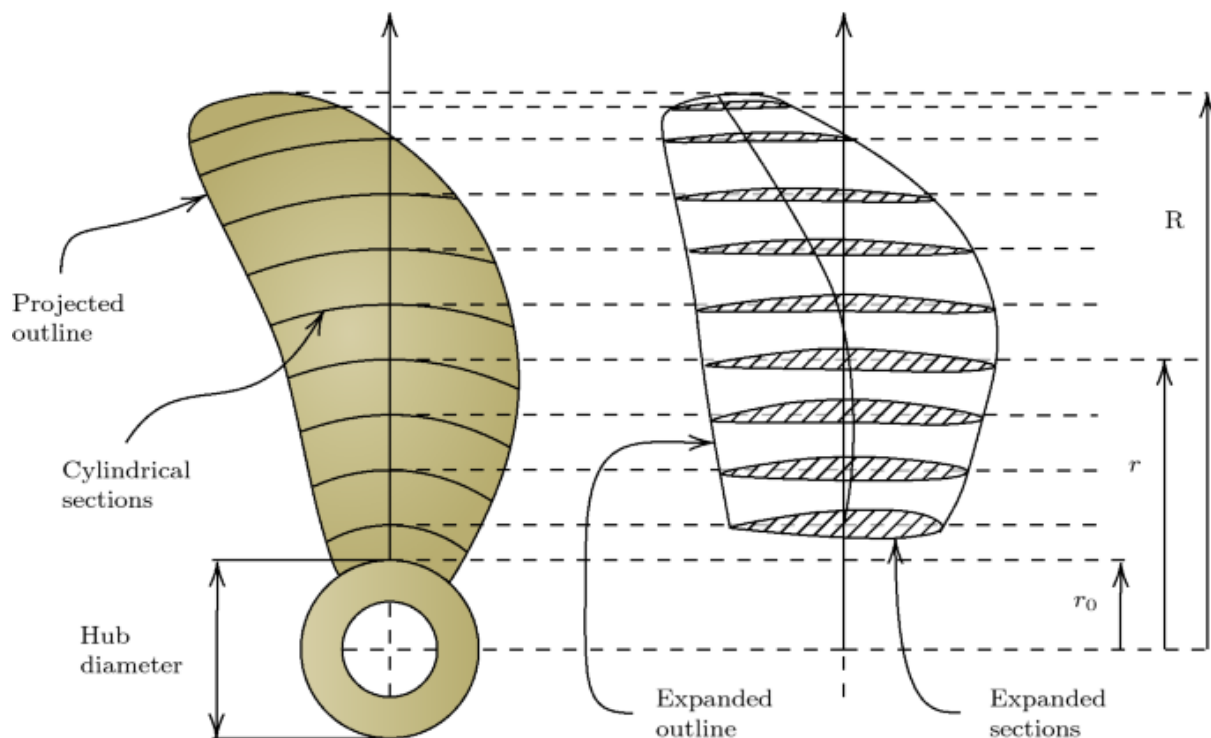


Figure 7 : Vue en coupe d'une pale d'hélice on remarque que les profils sont très variés et ont tendances à s'affiner à l'extérieur [10]

De nombreuses nomenclatures existent afin de définir de très nombreux profils portants différents. On peut néanmoins noter trois caractéristiques principales : l'angle d'incidence, la cambrure et l'épaisseur.

L'**angle d'incidence** d'un profil est l'angle formé entre le fluide en amont suffisamment loin pour que l'écoulement ne soit pas perturbé par le profil et la corde de l'aile (ou de la pale) : une ligne imaginaire qui traverse l'aile de son bord avant à son bord arrière. En augmentant l'angle d'incidence on augmente la portance, qui permet à notre navire d'avancer, mais on augmente aussi la trainée qui ralentit la rotation de l'hélice. Imaginez que vous êtes en voiture, et que vous tendez votre main par la fenêtre. Si vous gardez votre main parfaitement horizontale, elle coupe l'air sans produire beaucoup de résistance. Mais si vous inclinez votre main vers le haut vous augmentez son angle d'incidence. Vous allez alors sentir une force l'entraînant vers le haut (la portance) et une force l'entraînant vers l'arrière (la trainée).

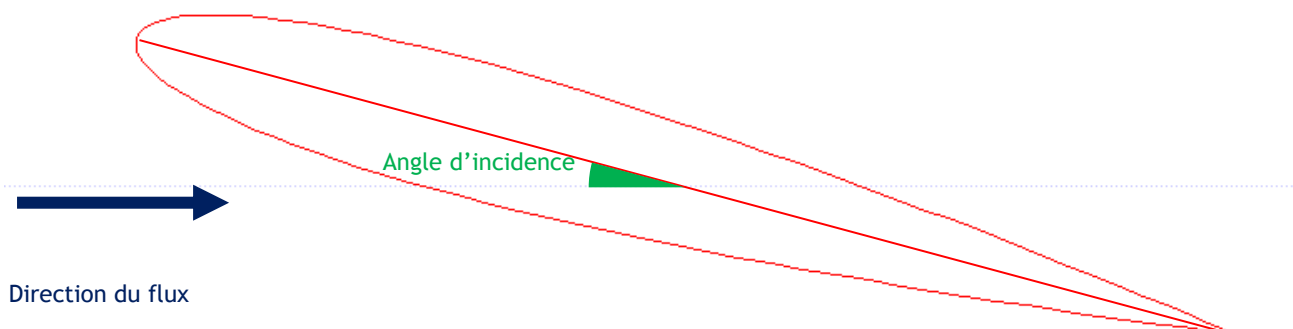


Figure 8 : Profil avec un angle d'attaque de 15° en vert sur le schéma

La **cambrure** est la courbure du profil de l'aile (ou de la pale). Elle est définie par la différence de hauteur entre la partie la plus haute du profil (généralement le dos de la pale) et la ligne de corde. Une cambrure plus prononcée augmente la portance, car elle crée une plus grande différence de pression entre le dessus et le dessous de l'aile ou de la pale. Comme pour l'angle d'attaque cette augmentation de la portance s'accompagne de l'augmentation de la trainée. Ci-dessous on a en rouge un profil qui n'est pas cambré et en bleu un profil qui a une cambrure égale à 5% de sa corde.

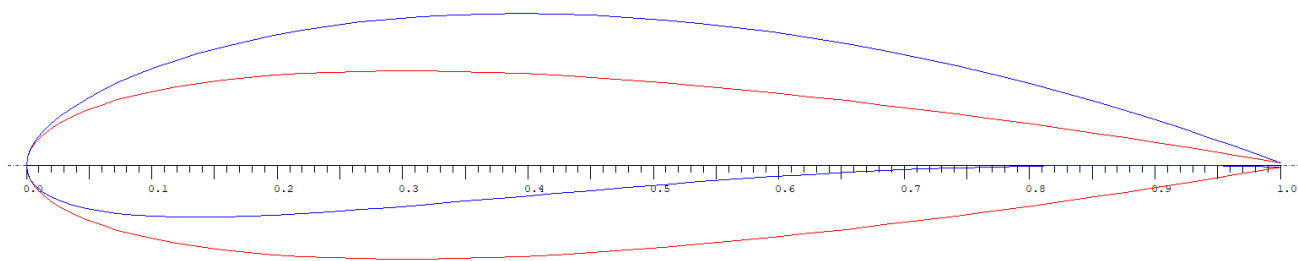


Figure 9 : Comparaison entre un profil avec une cambrure nulle et un profil cambré

Finalement, l'**épaisseur** d'un profil portant joue sur les performances à basse vitesse. Une augmentation de l'épaisseur a cependant tendance à augmenter la trainée. Pour les hélices, l'épaisseur importante proche du centre vient principalement de la résistance mécanique recherchée à cet endroit

Le profil d'une hélice marine est complexe et doit réaliser un compromis entre ces différents paramètres. L'objectif est de maximiser la portance et de minimiser la trainée tout au long de la pale tout en garantissant la tenue mécanique de l'ensemble.

1.3 - L'enjeu de la cavitation

Comme évoqué en introduction, la cavitation est un enjeu majeur lors du design des hélices marines ([2]). Pour comprendre la cavitation, il faut cependant d'abord comprendre ce qu'est la **pression de vapeur saturante**. Il s'agit, à une température donnée, de la pression à partir de laquelle un

liquide commence à s'évaporer. Nous avons vu qu'une hélice marine fonctionne avec une dépression à l'extrados de la pale. Lorsque la pression locale passe sous la pression de vapeur saturante l'eau liquide se transforme en vapeur d'eau, c'est la cavitation. La cavitation peut se produire à plusieurs endroits sur l'hélice et prendre des formes diverses que nous allons détailler ([3], [4] et [5]).

- **Cavitation à bulles**

On trouve dans tous les milieux liquides des microbulles que l'on appelle germes de cavitation, lorsqu'ils se déplacent avec le fluide sur la dépression à l'extrados de la pale, la bulle va grossir jusqu'à être clairement visible. Elle reste visible jusqu'à atteindre une zone où la pression augmente à nouveau. La vitesse à laquelle la pression augmente entraîne l'implosion de la bulle. L'implosion a pour première conséquence un bruit très important ce qui pose un problème pour les navires militaires qui veulent être discrets. L'implosion est également si violente qu'elle peut arracher de la matière à la surface de l'hélice ce qui l'endommage et augmente le frottement fluide ainsi que les risques de corrosion.

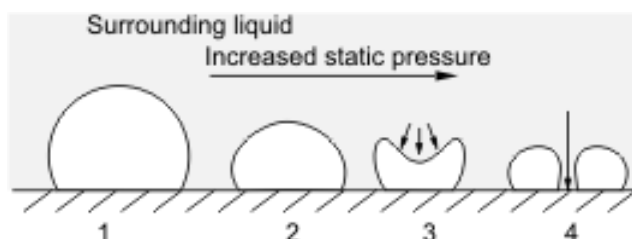


Figure 10 : Schéma de l'implosion d'une bulle de cavitation et du jet endommageant la pale [12]

- **Cavitation à poche**

La cavitation peut également prendre la forme d'une poche de cavitation qui part du voisinage du bord d'attaque et s'arrête au milieu du profil, on parle alors de cavitation à poche partielle, voire après le bord de fuite, on parle alors de supercavitation. Ce type de cavitation est moins bruyant et moins destructeur que la cavitation à bulle. La cavitation à poche est cependant à l'origine de problèmes de vibration qui peuvent aller jusqu'à endommager la structure. Ce type de cavitation dégrade également de manière importante les performances propulsives.



Figure 11 : Cavitation à poche partielle (photo BEC)

- **Cavitation de tourbillon marginal**

La cavitation de tourbillon marginal est l'un des premiers types de cavitation qui apparaît. Elle se produit à cause de la portance générée par les pales. Pour bien comprendre, reprenons l'analogie d'une aile d'avion. Sous l'aile, la pression est généralement plus élevée

qu'au-dessus, créant une différence de pression qui génère de la portance. Sur une aile, le flux d'air au-dessus et en dessous de l'aile se rejoignent en bout d'aile, créant un tourbillon lorsque l'air contourne l'aile du bas vers le haut. Dans le cas d'une hélice marine, un phénomène similaire se produit. L'eau contourne l'extrémité des pales de l'hélice, formant des tourbillons dit marginaux, au cœur de ces tourbillons l'eau est accélérée ce qui crée donc une dépression. Cette dépression peut atteindre la pression de vapeur saturante de l'eau, entraînant la formation de bulles de cavitation.

Contrairement aux avions, où des dispositifs appelés winglets réduisent ces tourbillons, les tentatives similaires sur les hélices marines n'ont pas été aussi fructueuses, car elles diminuent l'efficacité de l'hélice et augmentent son poids. Une autre solution, l'hélice sous tuyère, ajoute du poids et introduit la cavitation d'entrefer entre la pale et la tuyère.

Une solution consiste à appliquer une forte loi de dévers c'est-à-dire d'utiliser des pales en forme de « boomerang » (figure 13). Cela réduit les tourbillons marginaux et minimise la cavitation, tout en maintenant une efficacité acceptable. Les hélices avec une forte loi de dévers sont cependant plus difficiles à fabriquer que les hélices traditionnelles et sont principalement utilisées sur les navires militaires.

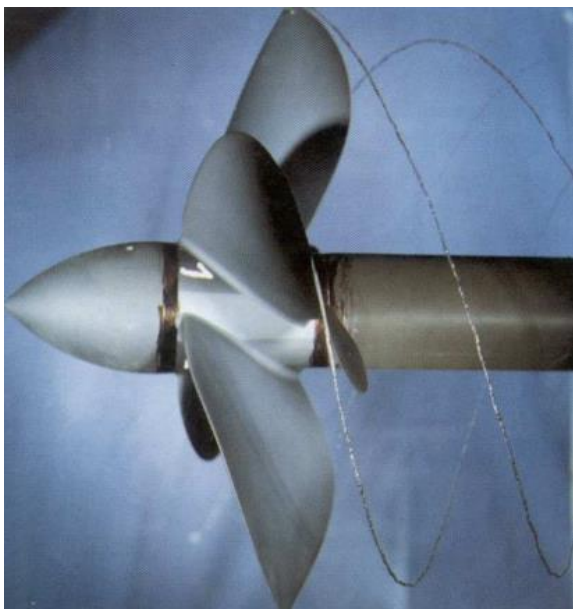


Figure 12 : Cavitation de tourbillon marginal.
(photo BEC)

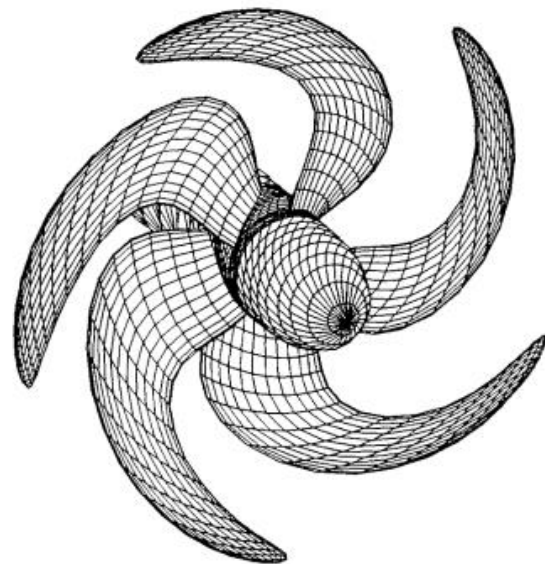


Figure 13 : Hélice présentant une forte loi de dévers [11]

- **Cavitation de tourbillon d'ogive**

La cavitation de tourbillon d'ogive se produit lorsque des tourbillons se forment autour de la pointe avant de l'hélice, également connue sous le nom d'ogive. Ces tourbillons sont créés par la différence de pression autour de l'ogive et peuvent entraîner une dépression suffisante pour provoquer la cavitation. Pour atténuer ce type de cavitation, des modifications de design telles que l'amélioration du profil de l'ogive et l'utilisation d'un congé de raccordement afin de relier les pales au moyeu peuvent être utilisées.

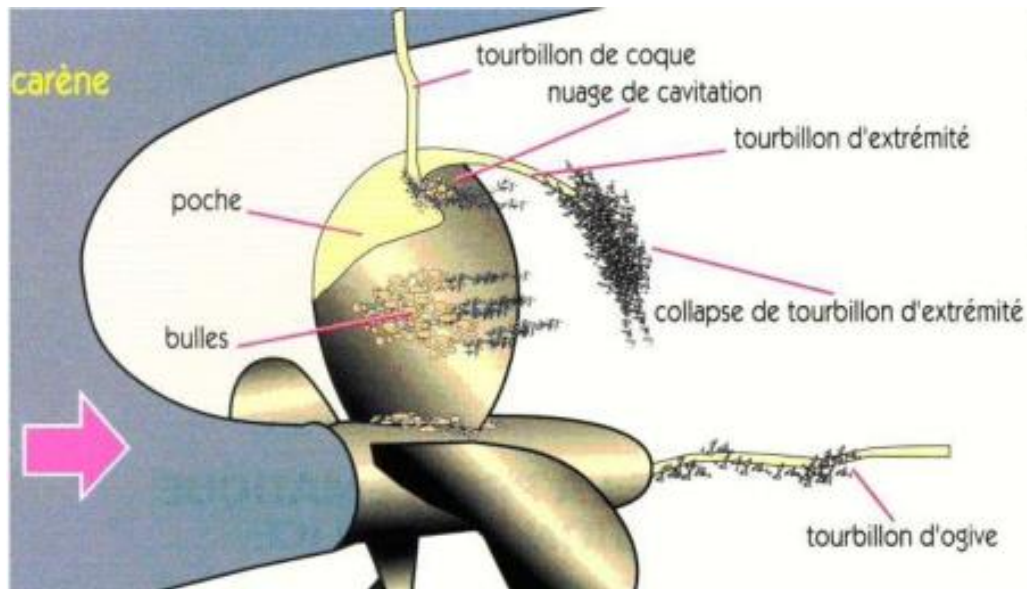


Figure 14 : Les différents types de cavitation d'une hélice [11]

2 - Comment avoir la meilleure hélice possible

Maintenant que nous avons vu comment fonctionne une hélice et quelles sont les difficultés liées à sa fabrication nous allons faire un tour d'horizon des différentes méthodes utilisées afin de fabriquer l'hélice la plus performante possible.

2.1 - Modélisation numérique

Il est tout d'abord possible de modéliser les écoulements de fluides numériquement à l'aide de méthodes dites de CFD (computational fluid dynamics ou dynamique des fluides par ordinateur). Ces méthodes permettent de simuler et d'analyser l'écoulement des fluides et donc de prédire les différents phénomènes observés. Pour cela on utilise les équations de la mécanique des fluides que l'on résout de manière approchée. Ces méthodes restent très difficiles à utiliser pour les hélices à cause de la complexité de leur géométrie et de l'écoulement en résultant. On peut tout de même étudier par exemple l'influence de la vitesse de rotation de l'hélice et de sa géométrie sur la pression et la vitesse du fluide ce qui permet d'optimiser la conception de l'hélice. L'utilisation de CFD présente de nombreux avantages en permettant de réduire les coûts de prototypage et en réduisant la durée nécessaire au design de l'hélice.

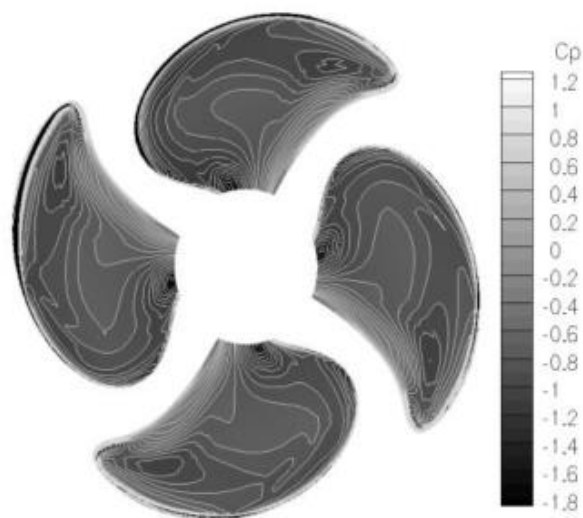


Figure 15 : Simulation du champ de pression sur une hélice [11]

La CFD permet également d'identifier les régions où la pression du fluide descend en dessous de la pression de vapeur saturante, condition préalable à la formation de cavitation. La modélisation de la cavitation dans l'écoulement autour d'une hélice reste cependant impossible à l'heure actuelle, c'est un sujet de recherche en ce moment même. Il est tout d'abord difficile de savoir quel type de cavitation va apparaître. De plus lorsque des bulles apparaissent, on doit alors modéliser deux fluides aux propriétés très différentes : d'un côté un liquide qui est dense et incompressible et de l'autre un gaz qui est peu dense et compressible. Il faut ajouter les tourbillons qui peuvent encore compliquer la modélisation. De nombreux chercheurs travaillent actuellement à mieux modéliser l'interface vapeur/eau afin de mieux prévoir l'endommagement des hélices.

2.2 - Etude expérimentale

Ces difficultés de modélisation rendent, encore aujourd'hui, indispensable la réalisation de nombreux essais des hélices marines. On utilise pour cela un tunnel hydrodynamique, aussi appelé tunnel de cavitation. Ces tunnels fonctionnent de manière similaire à des souffleries, mais avec de l'eau au lieu de l'air. L'objectif est de reproduire des conditions de flux d'eau contrôlées (en vitesse et en pression) afin de tester et d'analyser divers phénomènes hydrodynamiques, y compris la cavitation. Parmi les plus importants tunnels hydrodynamiques du monde on peut par exemple citer le Grand Tunnel Hydrodynamique à Val de Reuil en Normandie utilisé par la direction générale de l'armement afin de tester les hélices des bâtiments de la marine française. On retrouve de plus petits tunnels dans plusieurs laboratoires en Europe, ces infrastructures sont très volumineuses afin de garantir un écoulement de la meilleure qualité possible. Ci-dessous en Figure 16 : Tunnel hydrodynamique de l'Institut de Recherche de l'Ecole Navale (IRENAV) occupe deux étages alors que la veine d'essais ne fait que 20 cm par 20 cm.

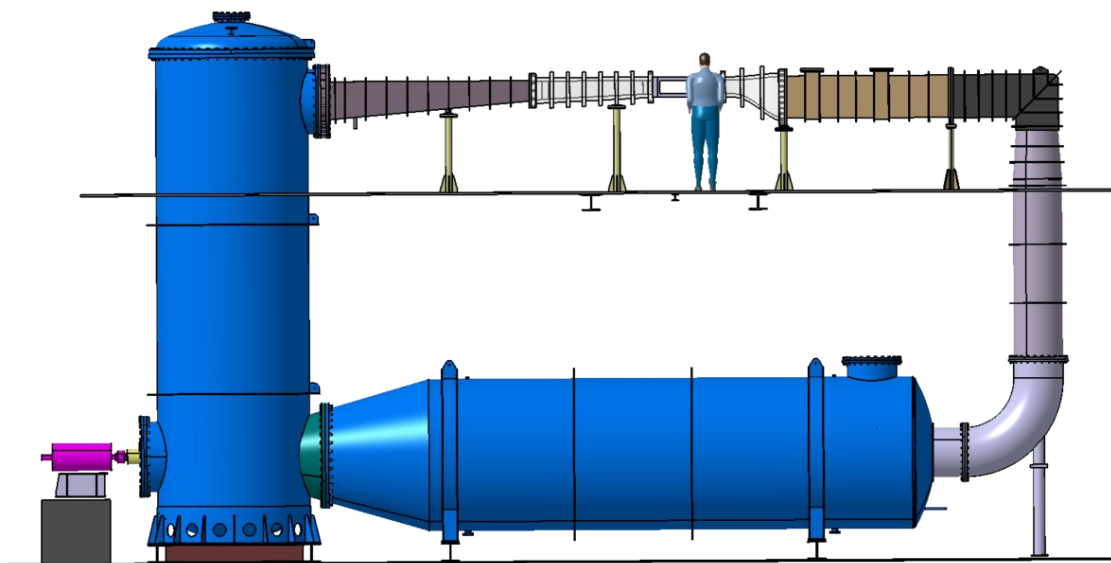


Figure 16 : Tunnel hydrodynamique de l'Institut de Recherche de l'Ecole Navale (IRENAV)

Les essais dans ces tunnels hydrodynamiques sont cruciaux pour plusieurs raisons. Tout d'abord, ils permettent de valider les modèles numériques issus de la CFD. Les simulations, bien qu'avancées, reposent sur des approximations et doivent être vérifiées par des données expérimentales. En comparant les résultats expérimentaux avec ceux des simulations, les ingénieurs et les chercheurs peuvent valider les modèles et améliorer leur précision.

Les tunnels hydrodynamiques offrent également la possibilité d'observer directement des phénomènes complexes comme la formation et l'implosion des bulles de cavitation ou les poches de cavitation. Pour cela des particules solides sont placées dans l'eau et sont ensuite suivies à l'aide de caméras ultra rapides pouvant atteindre jusqu'à 75 000 images par secondes. Cette

observation directe est nécessaire pour comprendre les dynamiques à l'œuvre, qui peuvent être difficiles à capter uniquement par des modèles théoriques. De plus, les essais permettent de tester la cavitation sous différentes conditions de vitesse, de pression et de température, offrant une compréhension plus complète des facteurs qui peuvent l'influencer.

Ces essais permettent finalement de tester différents modèles d'hélices dans des conditions contrôlées tout en offrant une représentation réaliste des conditions opérationnelles. Les ingénieurs peuvent évaluer leurs performances en termes de résistance à la cavitation. Cela permet d'identifier les zones les plus sensibles et de modifier les designs pour améliorer l'efficacité et la durabilité des équipements.

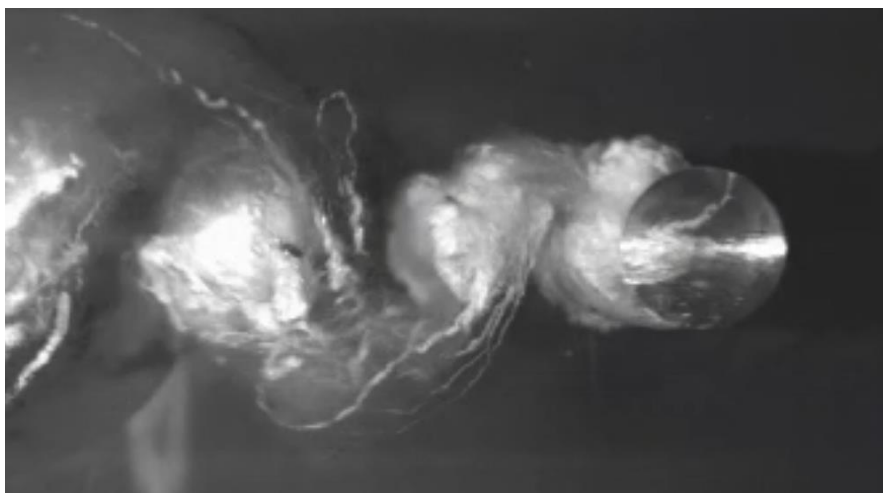


Figure 17 : Cavitation dans un tunnel hydrodynamique (Photo : IRENAV)

3 - Pour aller plus loin, détails concernant les équations

Démonstration de l'équation de Bernoulli : approche énergétique

Nous avons utilisé l'équation de Bernoulli en partie 1 afin de relier la variation de vitesse autour de l'aile à la variation de pression.

L'équation de Bernoulli est nommée d'après le mathématicien et physicien suisse Daniel Bernoulli qui a publié cette équation pour la première fois en 1738 dans son ouvrage *Hydrodynamica* [13]. Cette équation est un résultat fondamental en mécanique des fluides et décrit la conservation de l'énergie dans un fluide en mouvement.

Pour démontrer l'Équation de Bernoulli, partons des principes de base de la conservation de l'énergie et appliquons-les à un fluide incompressible et en régime stationnaire.

Principe de Conservation de l'Énergie

Considérons un élément de fluide se déplaçant le long d'un tube de courant entre deux points (1) et (2). Pour ce fluide, la différence d'énergie cinétique entre les points 1 et 2 est égale à la somme des travaux des forces qui s'exercent sur ce point le long du chemin entre les points 1 et 2.

- Travail effectué par les forces de pression : Lorsque le fluide se déplace d'une distance Δx , le travail effectué par la pression P est :

$$W = P * A * \Delta x$$

où A est l'aire de la section transversale.

- Énergie cinétique : L'énergie cinétique d'un élément de fluide est :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

où m , est la masse du fluide et v sa vitesse.

- Énergie potentielle gravitationnelle : La force de gravité étant conservative il est possible d'écrire son travail sous forme d'énergie potentielle.

L'énergie potentielle de pesanteur s'écrit :

$$E_p = mgh$$

où h est la hauteur par rapport à une référence.

Application du Principe

Pour un fluide incompressible se déplaçant entre les points (1) et (2), nous avons :

- Travail effectué par les forces de pression entre (1) et (2) : $P_1V_1 - P_2V_2$
- Changement d'énergie cinétique : $\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$
- Changement d'énergie potentielle : $mgh_2 - mgh_1$

En appliquant la conservation de l'énergie, nous avons :

$$P_1V_1 - P_2V_2 = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_2 - mgh_1$$

Si nous considérons que le fluide est incompressible et que la ρ est constante, alors $V = \frac{m}{\rho}$, et nous pouvons réécrire l'équation en termes de masse volumique :

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2$$

Ceci nous donne l'équation de Bernoulli sous la forme :

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{constante}$$

Cette démonstration montre que pour un écoulement incompressible et stationnaire, la somme de la pression, de l'énergie cinétique par unité de volume, et de l'énergie potentielle par unité de volume reste constante le long d'une ligne de courant, c'est l'équation de Bernoulli utilisée plus haut.

4 - Conclusion

Nous avons pu mieux comprendre comment fonctionnait une hélice marine et la complexité derrière leur fonctionnement. Les méthodes de simulation numériques sont aujourd'hui de plus en plus utilisées afin de prévoir par ordinateur les performances des hélices marines. La complexité des phénomènes à modéliser rend indispensable la réalisation d'essais dans des tunnels hydrodynamiques. La cavitation et les interactions liquide-gaz sont par exemple particulièrement difficile à modéliser, il s'agit en effet d'un phénomène qui démarre à l'échelle locale des germes de cavitation mais a un impact important sur l'ensemble du fonctionnement de l'hélice. Ces problématiques de passages de l'échelle locale à un problème global sont à la source de nombreux travaux de recherches dans l'ensemble des sciences pour l'ingénieur aujourd'hui.

Références :

- [1]: Hydrodynamique Navale Appliquée, J.A. Astolfi, 2022
- [2]: Physical Hydrodynamics : Cavitation, J.A. Astolfi, 2022
- [3]: Hélices marines, Jean-Marc Laurens, 2011
- [4]: Hélices marines, Max Aucher, techniques pour l'ingénieur, 1996
- [5]: Propulsion navale, Pr. Jean Yves Billard, 2015
- [6]: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cavitation_Propeller_Damage.JPG
- [7]: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Flow_plate_perpendicular.svg
- [8]: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Venturifixed2.PNG>
- [9]: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DeflectionAndLift_W3C.svg?lang=fr
- [10]: Identification of the geometric design parameters of propeller blades from 3D scanning, Eirik B. Njaastad, 2022
- [11]: Propulsion navale, F.Hauville, 2022
- [12]: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cavitation_bubble_implosion.png
- [13]: La famille Bernoulli, lequel a fait quoi ? H. horsin Molinaro, M. Poncelet, octobre 2023, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/la-famille-bernoulli-lequel-a-fait-quoi