



UNIVERSITÉ SAAD DAHLEB DE BLIDA 1
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE MÉCANIQUE



MÉMOIRE DE PROJET DE FIN D'ÉTUDES
Pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie Mécanique
Option : Fabrication Mécanique et Productique

ÉTUDE ET SIMULATION D'UNE HÉLICE MARINE

Réalisé et présenté par :

CHEMLAL Maya et MENADI Mohamed Nazim

Devant le jury :

M. A. TEMMAR	Professeur	Université de Blida 1	Président de Jury
M. A. BENMISRA	Maitre-Assistant (A)	Université de Blida 1	Encadreur
M. A. BENAROUS	Professeur	Université de Blida 1	Examineur

Année universitaire 2020-2021

Dédicaces

Je dédie ce travail

A ma regrettée grand- mère paternelle qui nous a quitté pour qui j'ai une pensée particulière. Elle qui, de son vivant, s'inquiétait toujours de mes études, peut être fière de sa petite fille.

A mon regretté oncle Ahmed qui nous a quitté récemment.

A ma Mamie à qui je souhaite un prompt rétablissement et une longue vie.

A mes chers parents pour tous les efforts consentis pour mon éducation et ma formation. Que Dieu, le tout puissant me les préserve encore pour longtemps.

A tous mes oncles, tantes, neveux, nièces, cousins et cousines.

A mon frère Dany

A mon fiancé Billel

CHEMLAL Maya

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents

A ma sœur, et à mon frère.

*A mon promoteur **Mr Abd-El-Kader BENMISRA** qui m'a aidé pendant toute
l'année.*

A toute la famille

*A mon binôme **CHEMLAL Maya***

A mes très chers amis.

*A tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin dans la réalisation de
ce travail.*

MENADI Mohamed Nazim.

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à exprimer mes vifs remerciements à notre enseignant encadreur Mr. BENMISRA ABD-EL-KADER pour sa constante disponibilité, sa gentillesse et ses conseils avisés qui ont été d'une aide précieuse dans la réalisation du projet.

Nos remerciements vont également à tous nos enseignants du département « Génie mécanique de l'université de Blida 1 qui nous ont accompagné tout le long de notre cursus et l'ensemble du personnel.

Nous tenons également à exprimer ma reconnaissance aux responsables de l'Ecole Nationale Supérieure Maritime de Bou-Ismaïl qui nous ont ouvert les portes en nous accueillant en stage et qui mis à notre disposition un fond documentaire nécessaires à la rédaction de ce mémoire.

Notre gratitude va à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la rédaction de ce travail sans oublier tous les membres de l'honorable jury devant lesquels nous présenterons ce travail.

Liste des symboles et abréviations

A_D	Surface développée	m ²
A_E	Surface étendue	m ²
A_O	Surface du disque	m ²
A_P	Surface projetée	m ²
C	Corde	m
Cam	Cambrure	m
D	Diamètre de l'hélice	m
D_H	Diamètre du moyeu	m
dQ	Couple élémentaire	N.m
dT	Poussée élémentaire	N
F	Flèche	m
f_v	Fraction massique de la vapeur	-
J	Coefficient d'avance	-
K_Q	Coefficient de couple	-
K_T	Coefficient de poussée	-
n	Vitesse de rotation de l'hélice	tr/s
N	Vitesse de rotation	rpm
P	Pas géométrique	m
P_v	Pression de vapeur	Pa
Q	Couple	N.m
R	Rayon de l'hélice	m
Re	Nombre de Reynolds	-
rh	Rayon du moyeu	m
T	Poussée	N
t	Coefficient de succion	°C
T°	Température	-
TV_o	Puissance fournie	W
U_a	Vitesse induite axiale	m/s
U_R	Vitesse induite relative	m/s
U_t	Vitesse induite tangentielle	m/s
V_a	Vitesse d'avance	m/s

V_0	Vitesse du navire	m/s
V_R	Vitesse relative de l'écoulement	m/s
V_t	Vitesse tangentielle	m/s
X_{tmax}/c	Position de l'épaisseur max par rapport à la corde	-
Z	Nombre de pale	-
α	Fraction de vapeur	-
r	Coefficient de diffusion	-
η_0	Rendement de l'hélice en eau libre	-
θ	Espacement angulaire	deg
ρ	Masse volumique	Kg/m ³
σ	Nombre de cavitation	-
ω	Vitesse de rotation de l'hélice	rad/s

Liste des figures

Figure 1.1	Evolution de l'hélice marine.....	06
Figure 1.2	Principe du dispositif de contrôle des pales.....	08
Figure 1.3	Hélice à pales fixes.....	09
Figure 1.4	Hélice à pales orientables.....	10
Figure 1.5	Hélice sous tuyères.....	10
Figure 1.6	Hélices Tandem.....	11
Figure 1.7	Hélices contrarotatives.....	11
Figure 1.8	Hélice plus hélice libre.....	12
Figure 1.9	Hélice POD.....	13
Figure 1.10	Détails du moyeu intérieur.....	13
Figure 2.1	Lignes de référence et profil d'une pale d'hélice.....	17
Figure 2.2	Détails de profil d'une pale.....	17
Figure 2.3	Faces d'une hélice bipale.....	18
Figure 2.4	Variétés d'hélices.....	19
Figure 2.5	Glissement et pas.....	20
Figure 2.6	Pas géométrique d'hélice.....	20
Figure 2.7	Rake positif d'une pale.....	22
Figure 2.8	Le dévers d'une hélice.....	22
Figure 2.9	Le dévers balancé d'une hélice.....	23
Figure 2.10	Différentes surfaces d'une pale.....	24
Figure 2.11	Différentes grandeurs intervenant dans le fonctionnement.....	26
Figure 2.12	Exemple de courbes de performance hydrodynamique d'une hélice...	28
Figure 2.13	Courbes de performance hydrodynamique des hélices B4-70.....	29
Figure 3.1	Système de transmission.....	34
Figure 3.2	Diagramme de changement de phase	37
Figure 3.3	Types de cavitation sur une hélice marine.....	38
Figure 3.4	Cavitation à bulles suivie d'un nuage de cavitation.....	38
Figure 3.5	Cavitation à poche partielle.....	39
Figure 3.6	Cavitation de tourbillon marginal.....	39
Figure 3.7	Cavitation de tourbillon de coque.....	40

Figure 3.8	Début d'érosion d'une pale d'hélice marine.....	41
Figure 3.9	Paramètres liés au rendement.....	42
Figure 3.10	Espace optimal hélice-coque.....	43
Figure 3.11	Influence de la tuyère sur le rendement.....	44
Figure 3.12	Calcul du diamètre.....	45
Figure 3.13	Espacement normalisé.....	45
Figure 3.14	Sollicitations sur la pale d'hélice marine.....	47
Figure 4.1	Arbre de création Feature Manager	50
Figure 4.2	Property Manager	51
Figure 4.3	Configuration Manager	51
Figure 4.4	Dim Xpert Manager.....	51
Figure 4.5	Display Manager.....	52
Figure 4.6	Affichage des Managers.....	52
Figure 4.7	Maillage volumique de l'hélice	54
Figure 4.8	Pression des contraintes sur les faces des pales.....	55
Figure 4.9	Déformation sur les faces des pales	56
Figure 4.10	Déplacement sur les faces des pales	56
Figure 4.11	Dispositif expérimental de la cavitation.....	57
Figure 4.12	Test expérimental et simulation de la cavitation.....	58
Figure 4.13	Caractéristiques hydrodynamiques.....	59

Résumé

Le travail envisagé dans ce mémoire est l'étude d'une hélice marine et son fonctionnement dans les conditions de son emplacement à l'arrière d'un navire. Ceci a permis de mettre en évidence l'influence de certains paramètres sur les performances de la poussée exercée par l'hélice. La cavitation a une grande influence sur le rendement de l'hélice et sur sa durée de vie. Une simulation numérique sur le comportement de l'hélice confirme l'existence de variation de pression qui est à l'origine de ce phénomène.

Mots clés : hélice marine, performances, poussée, cavitation, rendement.

Abstract

The work envisaged in this dissertation is the study of a marine propeller and its operation under the conditions of its location at the rear of a ship. This made it possible to highlight the influence of certain parameters on the performance of the thrust exerted by the propeller. Cavitation has a great influence on propeller performance and life. A numerical simulation on the behavior of the propeller confirms the existence of pressure variation which is at the origin of this phenomenon.

Keywords : marine propeller, performance, thrust, cavitation.

الملخص

لعمل المتوخى في هذه الأطروحة هو دراسة المروحة البحرية وتشغيلها في ظل ظروف موقعها في مؤخرة السفينة. هذا جعل من الممكن تسليط الضوء على تأثير بعض المعلمات على أداء الدفع الذي تمارسه المروحة. للتجفيف تأثير كبير على أداء المروحة وعمرها. تؤكد المحاكاة العددية لسلوك المروحة وجود اختلاف في الضغط الذي هو أصل هذه الظاهرة. الكلمات الرئيسية : المروحة البحرية أداء الدفع, الضغط, تجفيف.

Table des matières

Introduction générale.....	01
Chapitre 1 : Généralités sur l'hélice marine.....	04
1.1- Introduction.....	05
1.2- Historique.....	05
1.3- Fabrication des hélices marines.....	06
1.3.1- Matériaux pour hélices.....	06
1.3.2- Fonte des hélices.....	07
1.3.3-Finition.....	07
1.3.4- Contrôle des pales.	08
1.4- Types d'hélices.....	09
1.4.1-Hélice à pales fixes.....	09
1.4.2-Héliceà pales orientables.....	09
1.4.3-Hélice sous tuyère.....	10
1.4.4-Hélices tandem	11
1.4.5- Hélices contrarotatives.....	11
1.4.6- Hélice + hélice libre	12
1.4.7- Hélice POD.....	12
1.5- Montage sur l'arbre.....	13
1.6- Conclusion.....	14
Chapitre 2 : Caractéristiques géométriques et de fonctionnement.....	15
2.1- Introduction.....	16
2.2- Caractéristiques géométriques.....	16
2.2.1-Lignes de référence.....	16
2.2.2-Le profil.....	17
2.3- Caractéristiques de fonctionnement.....	25
2.3.1- Triangle des vitesses.....	25
2.3.2- Poussée, couple et rendement	27
2.3.3-Coefficients caractéristiques.....	27
2.4- Conclusion.....	29

Table des matières

Chapitre 3 : Calcul des performances des hélices marines.....	30
3.1-Introduction.....	31
3.2- Les grandeurs hydrauliques	32
3.3- Les pertes de charge.....	33
3.4- Système de propulsion.....	33
3.5- Diagramme thermodynamique.....	36
3.6- Types de cavitation.....	37
3.6.1- Cavitation à bulles.....	38
3.6.2- Cavitation à poche.....	38
3.6.3- Cavitation de tourbillon marginal.....	39
3.6.4- Cavitation de tourbillon d’ogive.....	40
3.6.5- Cavitation de tourbillon de coque.....	40
3.7- Les effets de la cavitation.....	40
3.7.1- Bruit.....	40
3.7.2- Erosion.....	41
3.7.3- Vibrations.....	41
3.7.4- Chute des performances.....	41
3.8- Rendement d’une hélice de propulsion.....	42
3.8.1- Dégagement de l’hélice de la coque.....	42
3.8.2- Influence de la tuyère.....	43
3.8.3- Rendement.....	44
3.9- Equilibre du navire.....	46
3.9.1- Forces de gravitation.....	46
3.9.2- Forces hydrostatiques.....	47
3.10- Conclusion.....	48
Chapitre 4: Simulation d’une hélice marine.....	49
4.1- Introduction.....	49
4.2- Outils Solidworks.....	50
4.3- Modélisation de l’hélice.....	53
4.3.1- Paramètres géométriques.....	53
4.3.2- Maillage	53

Table des matières

4.3.3- Charge hydrodynamique	54
4.4- Résultats de la simulation	55
4.5- Analyse bibliographique.....	57
4.5- Conclusion.....	59
Conclusion générale.....	60
Bibliographie/webographie.....	61

Introduction générale

Introduction générale

Le mouvement d'avance de translation d'un navire est obtenu grâce à la transformation de l'énergie mécanique de la ligne d'arbre actionné par un moteur par une hélice marine.

Le choix des caractéristiques de l'hélice est d'une importance capitale pour assurer de hautes qualités de performances nautiques du navire. Ces dernières se résument notamment sur le rendement de la propulsion qui reste le rapport de la quantité du carburant consommée et la distance de déplacement.

Il faut souligner que l'hélice marine est considérée comme l'élément essentiel et en même temps, le plus vulnérable dans la chaîne de la propulsion car elle fonctionne dans des conditions sévères liées à son emplacement derrière le navire. Ainsi, l'écoulement autour d'elle est le siège de fortes turbulences qui provoquent des vibrations et une fatigue de la ligne de puissance. Additivement à ces conditions, il faut tenir compte de l'influence d'un phénomène inévitable qu'est la cavitation sur les pales de l'hélice qui cause des effets nuisant comme le bruit et l'érosion entraînant une baisse des performances.

L'amélioration des systèmes de propulsion consiste à assurer une efficacité hydrodynamique, une bonne résistance du matériau et un comportement favorable face à la cavitation. C'est à ce que les fabricants d'hélices marines essayent, tant bien que mal, d'apporter des solutions en proposant des produits de plus en plus performants.

Les techniques de conception et de fabrication des hélices marines vont certainement connaître des modifications qui doivent répondre à des impératifs de l'évolution de la taille des navires de plus en plus gros.

Le présent mémoire de fin d'études traite le problème du comportement hydrodynamique des écoulements autour des hélices marines. Ce travail est structuré comme suit :

- Une introduction générale visant à cibler la problématique ;
- Un premier chapitre consacré aux généralités sur le fonctionnement des hélices marines, leur fabrication, les différents types d'hélices et les définitions de base ;

- Un second chapitre dédié aux définitions des caractéristiques géométriques de l'hélice afin de déterminer les performances hydrodynamiques comme la poussée, le couple et enfin le rendement ;
- Un chapitre troisième est consacré au calcul des performances de l'hélice marines et au phénomène de la cavitation et ses effets désastreux sur les pales d'une hélice.
- L'ultime quatrième chapitre traite le volet simulation d'une hélice marine de propulsion par Solidworks. Dans ce chapitre, sont décrits la procédure à suivre pour dessiner les géométries d'hélices, le détail du maillage généré et les résultats de la simulation numérique des pressions et des efforts exercés sur les pales.
- Et enfin une conclusion générale résume les principaux résultats obtenus dans cette étude et leur interprétation.

Chapitre 1

Généralités sur les hélices marines

Chapitre 1

Généralités sur les hélices marines

1.1- Introduction

Contrairement aux idées reçues, ce n'est pas le moteur qui fait avancer un navire mais son hélice. Donc, l'hélice est un organe mécanique essentiel pour la propulsion des navires. Son principe de fonctionnement repose sur le fait d'accélérer par sa rotation une masse d'eau créant ainsi une force propulsive nécessaire au déplacement du navire.

Depuis leur invention, les hélices ont subi énormément de changements que ce soit la matière utilisée, le processus de leur fabrication et leurs formes. Les fabricants d'hélices, les héliciers cherchent toujours à mettre en exploitation des hélices idéales sur la base de robustesse et de performance. L'utilisation et la maîtrise des méthodes d'investigation expérimentales et numériques ont permis d'améliorer leurs performances hydrodynamiques des hélices marines.

1.2- Historique

L'invention de l'hélice revient, paraît-il, aux chinois, mais c'est véritablement le mathématicien suisse Daniel Bernoulli qui en 1738, dans son ouvrage "Hydrodynamica" exposant le théorème fondamental de la mécanique des fluides et qui apporta une solution mécanique pour propulser les navires à vapeur de l'époque [5].

La propulsion de ce type de navire était assurée par une roue à aubes. Ce système de propulsion qui équipait le premier navire à vapeur Charlotte Dundas (1801) concurrençait jusqu'au milieu du dix-neuvième siècle, les bateaux à voiles avant d'être remplacé par l'hélice.

L'utilisation de l'hélice présente de nombreux avantages. Elle est moins encombrante, entièrement immergée et beaucoup moins sensible aux mouvements du navire. Plusieurs brevets d'hélices marines sont déposés dès le début du dix-neuvième siècle : J. Stevens (1804), R. Wilson (1828), A. Ressel (1828), F. Sauvage (1832), F. Petit Smith (1836),

J. Ericsson (1836). Et Bien entendu, comme pour plusieurs autres inventions majeures, plusieurs pays vont revendiquer la paternité de la mise au point de l'hélice, dont : Frédéric Sauvage et Augustin Normand, en France.

Les premières hélices n'étaient ni plus ni moins qu'une vis d'Archimède dont la longueur était égale au pas géométrique. Augustin Normand aura l'idée de fractionner la spire complète en 2 ou 3 parties : les hélices à pales apparaissent, par modifications successives de la forme des pales et de leur nombre .Ci-dessous la figure 1 montre l'évolution de l'hélice dans le temps et leurs inventeurs.



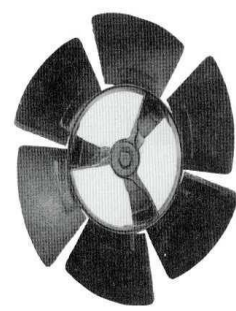
R. Wilson (1828)



F. Sauvage (1832)



F. P. Smith (1836)



J. Ericsson (1836)

Fig.1.1: Evolution de l'hélice marine. [7]

1.3- Fabrication des hélices marines

La fabrication des hélices comporte trois phases : la fonderie, la finition et le contrôle géométrique. [4].

1.3.1- Matériaux pour hélices

Les matériaux pour hélices doivent avoir les qualités suivantes :

- facilité de fabrication (moulage) ;
- bonne résistance mécanique ;
- faible corrosion marine ;
- résistance à l'érosion
- résistance à la salissure ;
- facilité de réparation

.

1.3.2- Fonte des hélices

Les hélices actuelles sont en grande majorité fabriquées en bronze-Al-Ni ou bronze-Al-Mn pour améliorer la résistance à la corrosion. C'est grâce aux études métallurgiques que les bronze-Al-Mn ont pu apporter une amélioration importante dans les qualités citées précédemment.

La coulée des hélices rentre dans la technique des opérations de fonderie des alliages. Indépendamment des masses de métal nécessaires, des précautions doivent être prises pour la réalisation de la forme en lame mince vrillée des pales. Après coulée, cette forme demande un refroidissement contrôlé très lent et homogène pendant plusieurs jours, voire la semaine, de façon à éviter les déformations des pales.

Lorsque l'on fabrique une seule hélice, le moule est détruit après usage et généralement, on prévoit une hélice de rechange. Lorsque l'on fabrique plusieurs hélices, ou des pales d'hélices à pales orientables, on utilise un modèle en bois réutilisable plusieurs fois.[7].

1.3.3-Finition

Il s'agit d'enlever les surépaisseurs de fonderie et d'usiner le moyeu .On distingue:

- la finition par meulage manuel ;
- l'usinage par machine à commande numérique.

Le meulage manuel nécessite une main-d'œuvre qualifiée. L'obtention de la forme des sections de pale est vérifiée pas à pas au cours du meulage au moyen de gabarits. Il s'agit d'une opération bruyante, polluante malgré les précautions prises, nécessitant de nombreuses heures de travail et ne permettant pas d'obtenir une bonne précision.

L'usinage par machine à commande numérique devient indispensable lorsqu'il s'agit d'assurer une grande précision. Les machines à commande numérique utilisées sont adaptées à la taille des pales d'hélices et peuvent être à trois axes ou cinq axes, de façon à pouvoir usiner des surfaces gauches. Ces machines possèdent des programmes de calculs spécifiques qui, à partir de la géométrie des pales définies par un certain nombre de sections cylindriques, permettent par interpolation entre sections de définir la trajectoire de la fraise d'usinage. En fin d'usinage, une phase ultime de polissage est destinée à effacer toute trace des outils.

Pour l'usinage des pales des hélices à pales orientables, on peut utiliser des machines à reproduire à partir d'une pale type.

1.3.4- Contrôle des pales.

Pour vérifier que la forme de pale réalisée est bien conforme à la forme prévue, à l'aide d'une machine, voir figure 48, on mesure les coordonnées dans l'espace d'un grand nombre de points judicieusement choisis sur la surface de la pale et on compare les mesures aux valeurs théoriques du plan. L'idéal est de pouvoir le faire sur une même section cylindrique (figure 1), mais cela n'est pas toujours possible.

Les normes ISO 484/1 et 2 précisent les tolérances admises sur les principales grandeurs géométriques de la pale, ainsi que sur la façon d'opérer.

Ces tolérances portent sur le pas, les longueurs de corde, l'épaisseur des sections et leur cambrure, l'angle de devers, etc. Le contrôle du profil des sections au voisinage du bord d'attaque est effectué à l'aide de calibres de profil d'une certaine longueur de corde (20 %).

On distingue différentes classes d'hélices selon un ordre de précision décroissant :

- classe S : navires rapides ayant des vitesses de plus de 25 nœuds et militaires pour lesquels le bruit et les vibrations sont d'une importance primordiale : paquebots de croisière, navires de recherche;
- classe 1 : navires marchands en général : ferries, remorqueurs de haute mer, cargos;
- classe 2 : navires de faibles puissance et vitesse : navires de pêche côtière, péniches.[7].

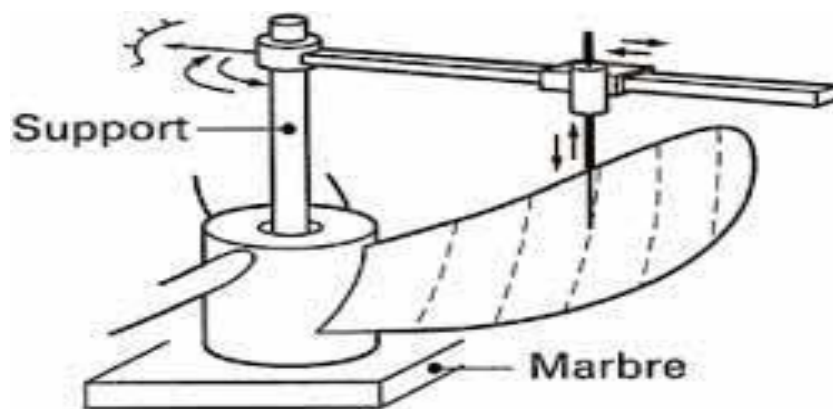


Fig.1.2: Principe du dispositif de contrôle des pales [7]

L'étape finale consiste à calculer les contraintes dans la pale de l'hélice par la méthode des éléments finis lorsque la géométrie de la pale est bien définie. Le calcul tient compte de la charge prévue lors du projet, du pas des diverses sections et de la force centrifuge.

1.4-Types d'hélice

1.4.1-Hélice à pales fixes

Elle est utilisée pour les navires de croisières de vitesse maximale ou la puissance du moteur est utilisée avec un rendement maximal. La variation de la vitesse du navire est réglée dans ce cas par l'intermédiaire d'un réducteur. Cette hélice avec ses 3 ou 5 pales est la plus utilisée.

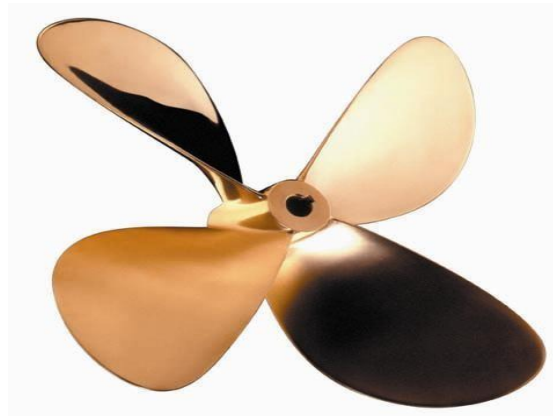


Fig.1.3: Hélice à pales fixes.[14]

1.4.2-Hélice à pales orientables

Pour changer la vitesse d'avance du navire, tout en conservant la vitesse de rotation de ce type d'hélice constante, on modifie l'orientation de ses pales grâce à un système mécanique logé dans son moyeu. Le rayon de moyeu pour ce type d'hélice est plus gros qu'une hélice à pales fixes. Ces hélices sont plus onéreuses, plus fragiles et demandent un entretien particulier.

L'utilisation de ces hélices facilite les manœuvres fréquentes surtout pour les navires propulsés par plusieurs hélices.



Fig.1.4: Hélice à pales orientables. [16]

1.4.3-Hélices sous tuyère

Appelée aussi hélice carénée, elle forme un ensemble constitué d'une hélice placée à l'intérieur d'un conduit profilé désigné tuyère. La tuyère augmente la vitesse d'arrivée d'eau à l'hélice en fournissant une poussée supplémentaire au navire.

Les hélices sous tuyères sont utilisées sur les navires ayant besoin d'une forte poussée d'une faible vitesse à l'exemple des remorqueurs et les chalutiers.

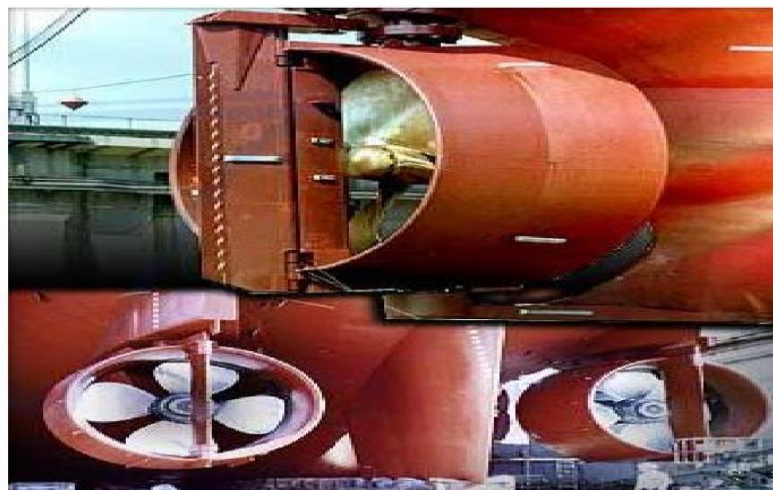


Fig.1.5: Hélice sous tuyères. [13]

1.4.4-Hélices tandem

Ce sont deux hélices ou trois montées sur le même arbre en série et tournant dans le même sens pour diminuer le risque de la cavitation. La conception de ces hélices nécessite de prendre en compte les effets de l'interaction hydro dynamique mutuelle entre l'hélice avant et l'hélice arrière.

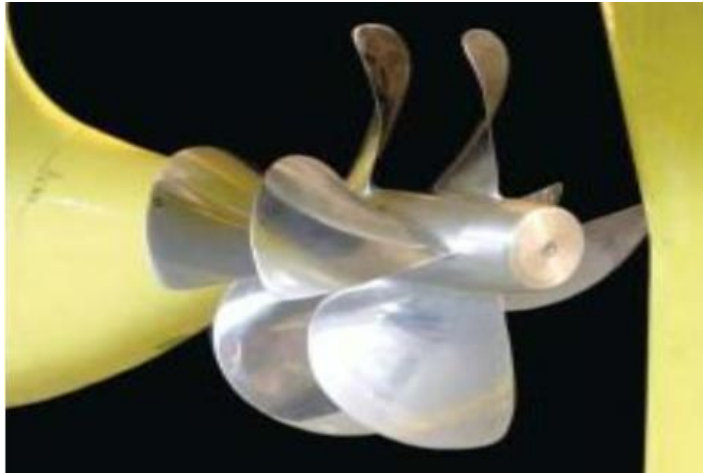


Fig.1.6: Hélices tandem [5]

1.4.5- Hélices contrarotatives

Ce sont deux hélices de diamètre différent, entraînées par deux arbres indépendants tournant en sens inverse. La petite hélice redresse le fluide mis en rotation par la plus grande et annule ainsi l'énergie rotationnelle qui serait perdue. Ce type de propulsion améliore le rendement et maintient un bon équilibre du navire.

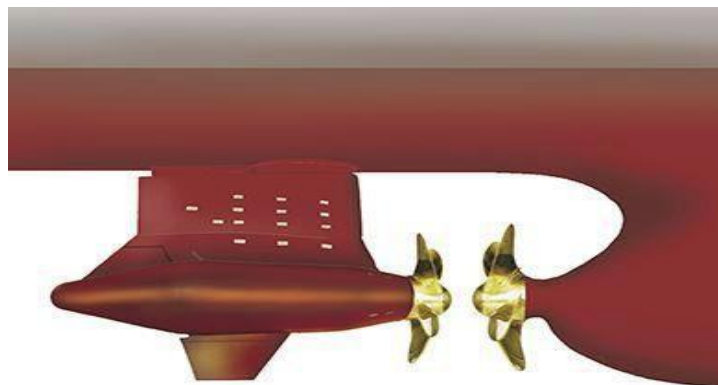


Fig.1.7: Hélices contrarotatives. [15]

1.4.6- Hélice plus hélice libre

Ce système comporte deux (2) hélices de diamètres différents qui sont montées sur un même arbre de rotation. L'hélice arrière est libre et a un diamètre supérieur de 15 à 20% à celui de l'hélice avant. La forme des pales peu larges est telle que la partie derrière l'hélice avant joue le rôle de turbine en redressant le mouvement rotationnel, alors que la partie extérieure joue le rôle d'hélice, dont le couple moteur est précisément engendré par la partie turbine de l'hélice libre : gain de rendement annoncé 6 à 10 % basé sur une seule application pratique.



Fig.1.8 : Hélice plus hélice libre [6]

1.4.7- Hélice POD

C'est une technologie récente qui date au début des années 1990. Elle est utilisée exclusivement dans la propulsion électrique des navires. Cette propulsion répond bien aux exigences économiques et environnementales.

C'est un appareil propulsif se présente sous la forme d'une nacelle orientable à 360 degrés, fixée sous la coque dans laquelle est intégrée un moteur électrique de propulsion. Le POD (**P**ropulsors with **O**utboard **D**rivers) remplace donc l'ensemble ligne d'arbre-hélice-gouvernail et permet d'orienter la poussée de l'hélice sur un tour complet. Il offre énormément d'avantages notamment une excellente manœuvrabilité du navire, la réduction du bruit et des vibrations ainsi que l'espace libéré à bord due à la suppression de la ligne d'arbre et du gouvernail.

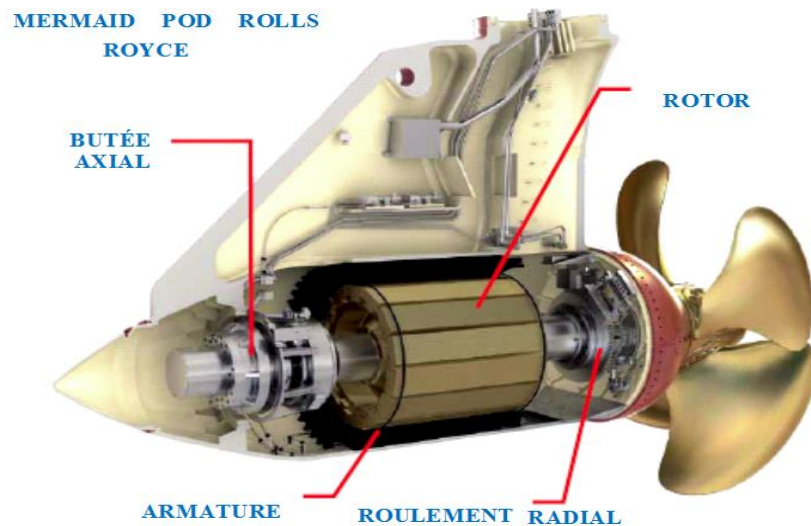


Fig.1.9 : Hélice POD. [6]

1.5- Montage sur l'arbre

Pour faciliter et assurer son montage sur l'arbre de rotation, l'hélice dispose d'un moyeu qui est la partie cylindrique d'une certaine épaisseur sur laquelle viennent se positionner les pales.

La partie interne, creuse du moyeu prévu pour recevoir le diamètre de l'arbre porteur d'hélice est munie d'une bague cannelée pour être fixée sur l'arbre. Cette bague est toujours montée par l'intermédiaire d'un flexible en caoutchouc, comme illustré par la figure 8, qui a pour rôle d'amortir le choc lorsque l'hélice heurte un obstacle, évitant ainsi la détérioration des engrenages.

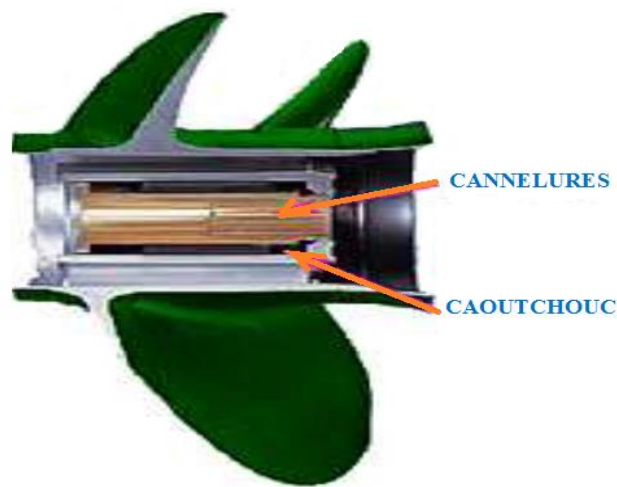


Fig.1.10: Détails du moyeu intérieur [5]

1.6- Conclusion

Les hélices, sous leurs divers types et formes sont devenues indiscutablement le moyen privilégié de propulsion des navires. Ces dernières années, l'utilisation conjointe des méthodes d'investigation expérimentales et numériques a permis d'améliorer leurs performances et leur fiabilité. Le choix du type d'hélice pour une application de propulsion particulière peut être le résultat de plusieurs considérations en l'occurrence: efficacité maximale, réduction du bruit, facilité de manœuvre, coût d'installation et minimisation du risque de cavitation.

Chapitre 2

Caractéristiques géométriques et de fonctionnement

Chapitre 2

Caractéristiques géométriques et de fonctionnement

2.1-Introduction

D'un point de vue purement géométrique une hélice est considérée comme une vis qui détermine son chemin dans un fluide constitué de surface hélicoïdale

Mise en rotation par son moteur d'entraînement, l'hélice transforme la puissance reçue en force de propulsion.

2.2- Caractéristiques géométriques

Vue de l'arrière la forme d'une pale est non symétrique par rapport à son rayon. Elle présente un dévers plus au moins prononcé. Vue de travers, la pale est également inclinée vers l'arrière.

2.2.1-Lignes de référence

Géométriquement, la pale d'hélice est définie autour d'une ligne perpendiculaire à l'axe de l'arbre appelée la ligne de référence de l'hélice ou la directrice ou génératrice.

Cette dernière passe par le centre des sections cylindriques, comme le montre la figure.11, ci-dessous. Compte tenu du mouvement de rotation de l'hélice, une section de pale est définie par le développement de l'intersection de la pale par un cylindre de rayon r centré sur l'axe. Chaque section développée à la forme d'un profil d'aile dont la longueur $C(r)$ est définie par sa corde droite joignant le bord d'attaque au bord de fuite du profil.

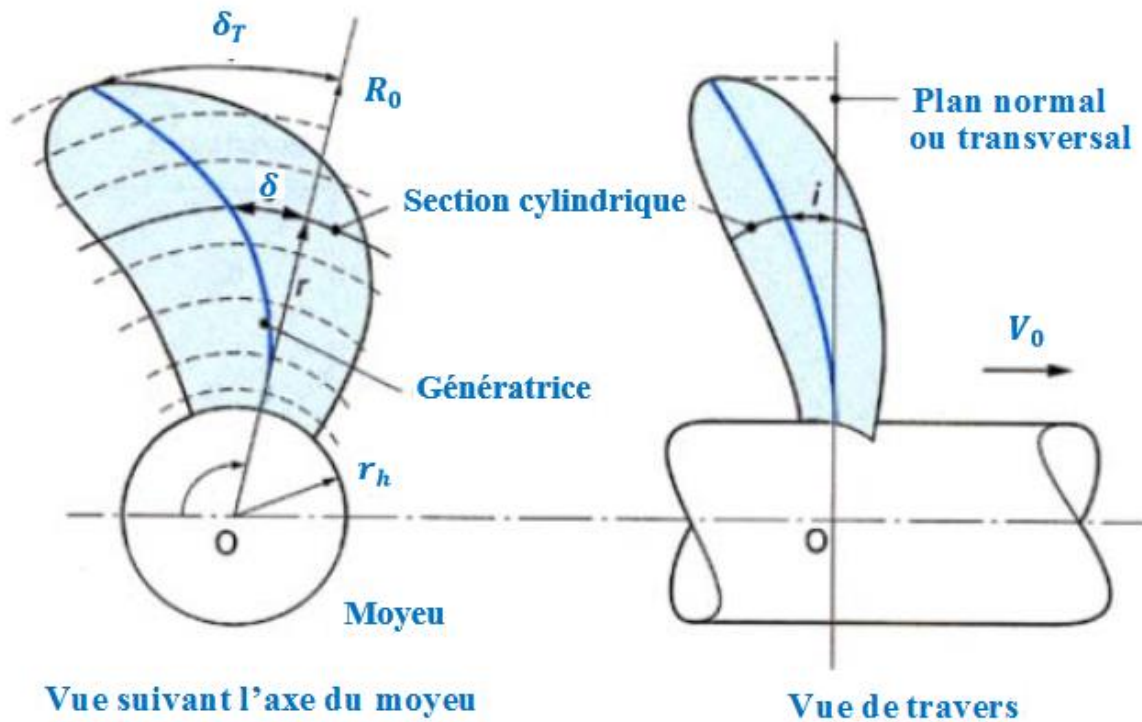


Fig.2.1: Lignes de référence et profil d'une pale d'hélice [7]

2.2.2-Le profil

On définit le profil d'une hélice comme le contour de la coupe radiale de l'une de ses pales.

Il est composé d'un bord d'attaque arrondi et d'un bord de fuite fin situé à l'arrière.

L'épaisseur de la pale étant variable sur toute la longueur.

Le profil d'une hélice marine comprend plusieurs zones et lignes caractéristiques (voir la figure 12) dont voici les définitions.

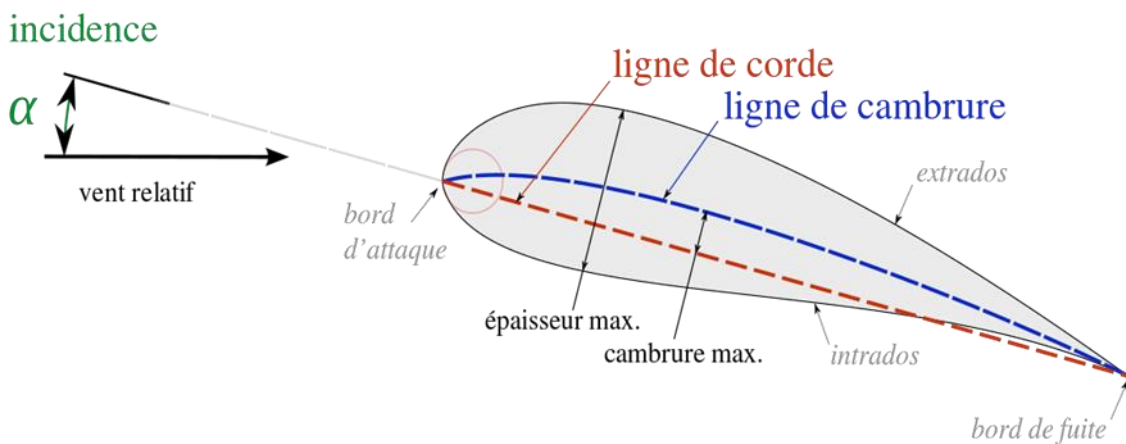


Fig.2.2: Détails de profil d'une pale [4]

- **La ligne de corde (C)** est la distance entre le bord d'attaque et le bord de fuite.
- **Intrados** est la face inférieure, en surpression.
- **Extrados** est la face supérieure convexe, en dépression. (figure13).



Fig.2.3: Faces d'une hélice bipale [4]

- La ligne de cambrure est la ligne courbée (cambrée) située à mi-distance de l'intrados et de l'extrados.

- L'épaisseur du profil est la distance entre l'extrados et l'intrados. Son maximum se situe à un tiers ($1/3$) de l'avant de la pale.

Le rapport de l'épaisseur maximale du profil à sa longueur s'appelle épaisseur relative

- La cambrure d'une section est la distance séparant les deux lignes de corde et de cambrure.

La distance entre la corde et le sommet de la ligne moyenne s'appelle la flèche(F).

Le rapport de l'épaisseur maximale du profil à sa longueur s'appelle l'épaisseur relative.

Les caractéristiques générales de l'hélice sont définies par [1]:

- Le nombre de pale Z ;
- Le diamètre D ou le rayon R,
- Le diamètre de moyeu D_h ou son rayon r_h ;
- Le pas géométrique moyen ;
- Le pas géométrique réduit,
- La fraction de surface.

- **Les pales**

Le nombre de pale des hélices marines varie 2 à 7 et leurs formes sont très variées (Figure 14). Les hélices les plus utilisées sont celles avec 4 ou 5 pales. Ce nombre peut être augmenté à 6 voire à 7 en cas de problème de vibration causant des charges sur les pales. Ceci permet l'atténuation de ces charges sur chaque pale car leur nombre a augmenté. Le choix du nombre de pales est dictée par l'utilisation de l'hélice à savoir que :

- les hélices bipales offrent un bon rendement.
- les hélices tripales sont les plus utilisées et offrent le meilleur équilibre vitesse/poussée.
- les hélices quadripôles sont mieux équilibrées et plus silencieuses.
- Les hélices à cinq (5) pales sont les plus équilibrées.



Fig.2.4: Variétés d'hélices [4]

- **Diamètre**

C'est la distance entre les extrémités de deux pales opposées et est exprimé en pouce ou en millimètre (1 pouce = 25,4 mm).

Plus le diamètre augmente, plus la traînée induite par les pales devient importante.

Le diamètre de l'hélice [4] varie dans une plage très large allant de 0.20 à 11 mètres selon le type de navire : - Bateaux de plaisance $D = (0.2 \text{ à } 0.4) \text{ m}$;

- Pétroliers et porte-conteneurs $D = (10 \text{ à } 11) \text{ m}$.

La plus grande hélice de navire a été fabriquée en Allemagne [2] en 2014. Cette hélice géante à 5 pales, d'un poids de 113 tonnes et de diamètre de 10.30 mètres est destinée pour propulser un porte -conteneurs de plus de 85 000 chevaux.

- **Pas**

Le pas théorique ou géométrique de l'hélice peut être comparé au pas de vis à métaux, l'hélice se comporte de la même façon en se vissant dans l'eau, il correspond à la distance théorique parcourue par l'hélice en une rotation complète (Figure15). Il est exprimé en pouces ou en millimètres.

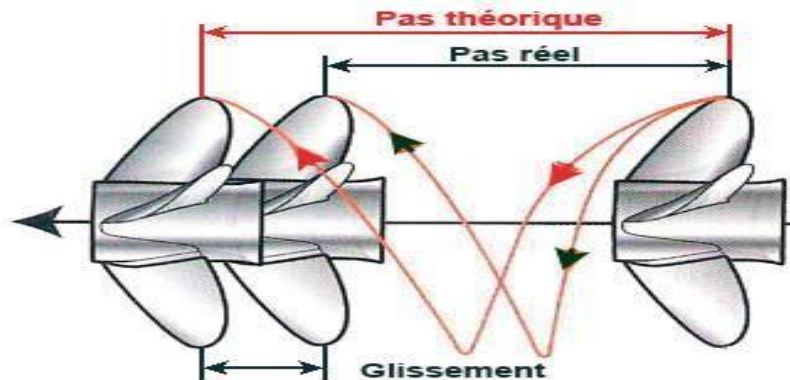


Fig.2.5: Glissement et pas.[8]

- **Calcul des différents pas**

-Le **pas géométrique théorique** est calculé d'après la figure16 ci-dessous représentant le déplacement de l'hélice pendant une révolution.

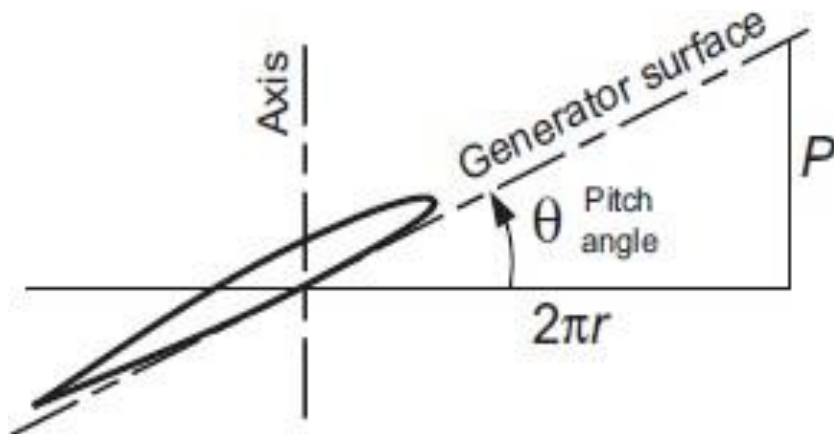


Fig.2.6: Pas géométrique d'hélice. [7]

-Le pas géométrique

$$P(r) = 2 \pi R \tan \phi(r) \quad (2.1)$$

-Le pas géométrique moyen:

$$P = \frac{\int_{rh}^R P(r) dr}{R - rh} \quad (2.2)$$

-Le pas réel représente la longueur d'avance effective durant un tour. Ainsi, le pas réel est plus faible que le pas théorique inférieur au pas géométrique à cause du glissement, correspondant le temps nécessaire aux molécules d'eau pour s'accrocher à la pale. Ce phénomène s'atténue avec la vitesse de déplacement du navire.

Pas réel = pas théorique – glissement (voir la figure 17).

-Le pas réduit P/D exprime le rapport entre le pas P et le diamètre D de l'hélice. Il varie entre 0.6 et 1.4 [4].

- **Le rake**

C'est l'inclinaison de la pale par rapport à la verticale. Elle est généralement dirigée vers l'arrière pour réduire les effets de la cavitation donc d'améliorer le rendement. Dans ce cas le rake est dit positif.

Le rake peut être également négatif si l'inclinaison est vers l'avant. C'est le cas des navires ou bateaux de (chalutiers, remorqueurs...) afin de maintenir ces embarcations dans leurs lignes d'eau.

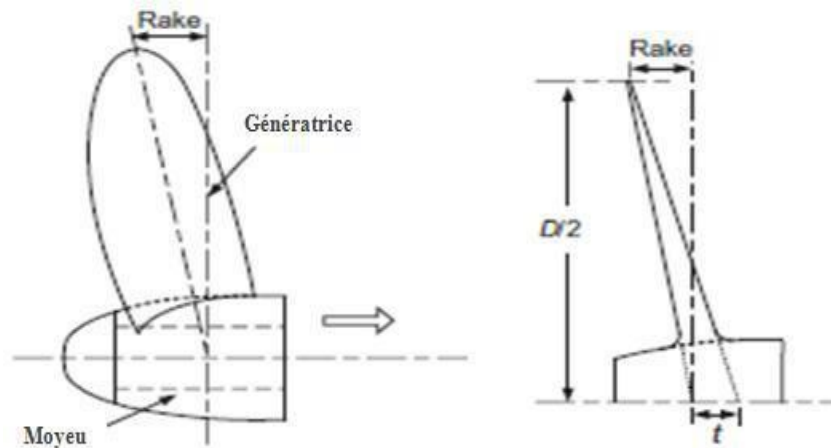


Fig.2.7: Rake positif d'une pale. [6]

- Le dévers

Comme le montre la figure 18, le dévers (skew) est l'angle compris entre la ligne directrice et le centre de la corde pour chacune des sections dimensionnelles. On définit le dévers total de l'hélice par la somme du maximum du dévers positif et négatif.

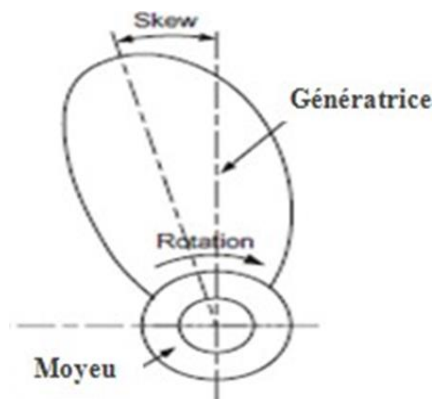


Fig.2.8: Le dévers d'une hélice. [7]

Il existe deux (2) conceptions : la conception balancée et la non- balancée. La conception balancée est lorsque la ligne de référence de la pale coupe la directrice de la pale au moins en deux fois (Figure19). Par contre, la conception non-balancée- une seule fois. Le devers est utile pour réduire les forces périodiques sur la carène et diminuer les vibrations induites.

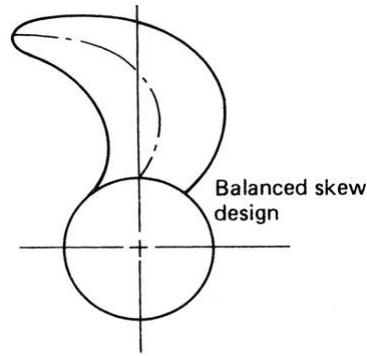


Fig.2.9: Dévers balancé d'une hélice. [7]

- Surfaces de la pale

La surface de la pale ou la largeur est déterminé sur la base du critère de la cavitation. Il y a trois (3) types de surfaces à définir et à calculer.

-La surface étendue

La surface étendue est la surface la plus facile à calculer, par la méthode de Simpson par exemple. Elle est calculée comme suit [6]:

$$A_E = Z \int_{rh}^R C dr \quad (2.3)$$

-La surface projetée

La surface projetée ou projected area est celle de l'hélice vue le long de la ligne d'arbre. Elle est définie mathématiquement par la relation suivante [6]:

$$A_P = Z \int_{rh}^R (\theta_{STE} - \theta_{SLE}) dr \quad (2.4)$$

θ_s : Angle de devers

La figure 20 ci-dessous représente les différentes surfaces d'une pale d'hélice.

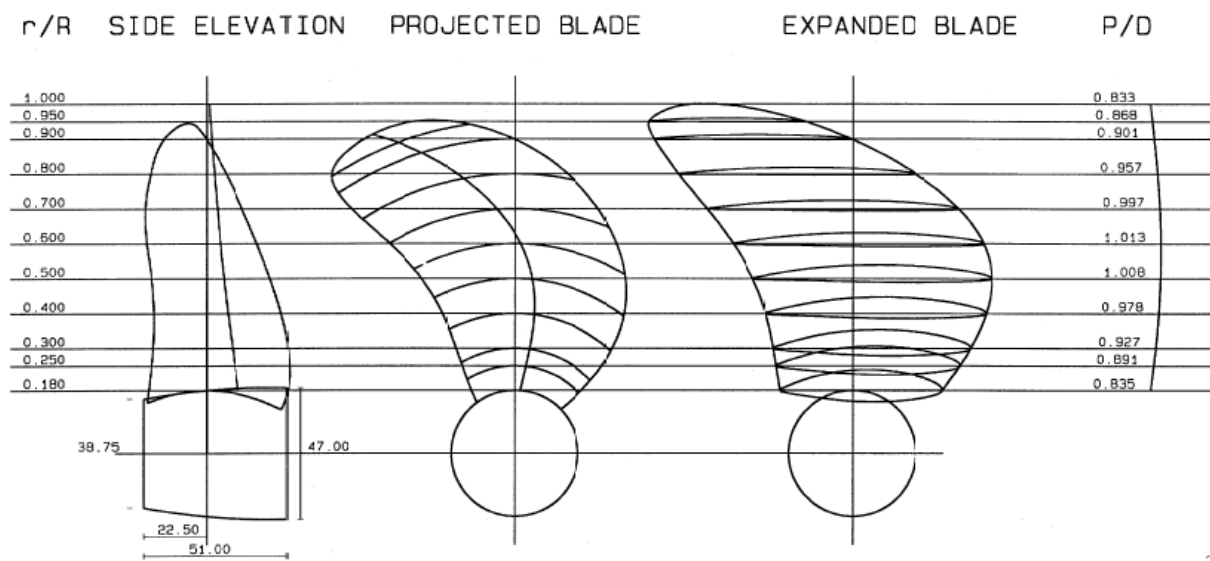


Fig.2.10: Différentes surfaces d'une pale. [6]

-Surface développée

Appelée aussi developed area, elle correspond à la surface des sections circulaires positionnées à un angle de pas nul. Elle est pratiquement égale à la surface étendue et exprimée comme suit:

$$A_D \approx A_E \quad (2.5)$$

Afin d'estimer la surface cette surface, BURRIL a développé une formule empirique pour les hélices conventionnelles:

$$A_D = \frac{A_P}{1.067 - 0.229 P/D} \quad (2.6)$$

- Fraction surfacique

La fraction surfacique est définie comme étant le rapport de la surface développée ou étendue (A_E) d'une hélice à la surface de son disque (A_0).

Ce rapport varie selon la vitesse du navire : $AE/A_o = 0.40$ pour des navires lents, il peut atteindre 1.20 pour des navires très rapides. Par contre, il ne doit pas être inférieur à 0.35 pour assurer un freinage suffisant lorsque le sens de rotation est inversé [6].

2.3- Caractéristiques de fonctionnement

La fonction de l'hélice est de fournir une poussée au navire qui vient s'opposer à la résistance à l'avancement du navire. La propulsion par hélice est le résultat d'une différence de pression créée par la rotation de l'hélice.

La pale de l'hélice tourne vers le bas, poussant l'eau vers le bas et l'arrière. L'eau s'engouffre vers l'arrière de la pale pour remplir le vide ainsi créé. Il se crée une pression différentielle entre les deux faces avant (intrados) et arrière (extrados) de la pale : une poussée positive sur la face inférieure, une traction négative sur la face supérieure. L'hélice est à la fois poussée et tirée à travers l'eau. Ceci se traduit par une poussée qui fait avancer le navire. Le calcul et la détermination des caractéristiques de fonctionnement d'une hélice marine sont proposés dans ce qui suit.

2.3.1- Triangle des vitesses

Soit hélice marine qui tourne à une vitesse de rotation et qui se déplace dans une eau au repos à la vitesse V_o . Pour le calcul suivant, c'est comme si l'hélice est fixe et se déplaçant dans un écoulement uniforme de vitesse **V_o** considérée comme étant la **vitesse axiale**, comme le montre la figure 21, illustrant les différentes grandeurs intervenant dans le fonctionnement d'une pale d'hélice. Associée à la **vitesse tangentielle V_t** à la section développée au rayon r , elles définissent la **vitesse relative V_{or}** de l'écoulement non perturbé.

Sens d'avance

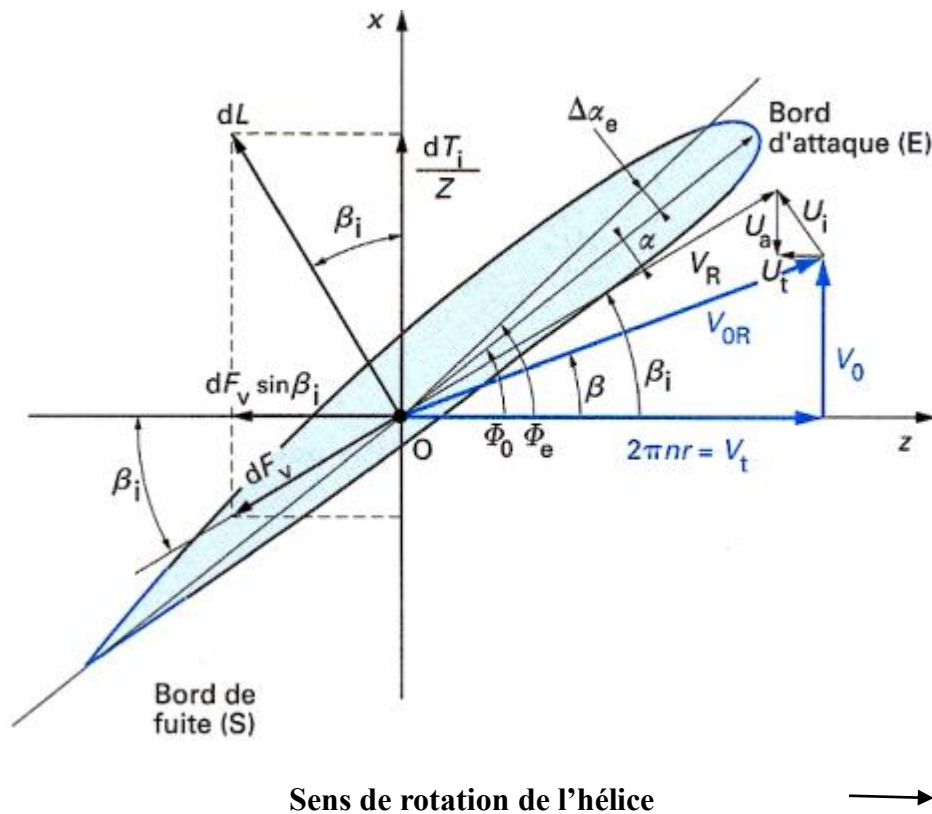


Fig.2.11: Différentes grandeurs intervenant dans le fonctionnement. [7]

De plus, l'hélice accélère l'eau qui la traverse et en même temps lui communique un mouvement de rotation. Le supplément de vitesse apporté est appelée **vitesse induite U_i** , vecteur perpendiculaire à la corde, décomposé en ses deux composantes : **vitesse axiale induite $U_a(r)$** et une **vitesse tangentielle $U_t(r)$** .

La **vitesse relative V_R** eau/section est définie alors par [7]:

- une composante axiale :
$$V_0 + U_a(r) \quad (2.7)$$

- une composante tangentielle :
$$V_t - U_t(r) = 2\pi nr - U_t(r) \quad (2.8)$$

- une vitesse relative $V_R(r)$ faisant un angle $\beta_i(r)$ avec l'axe Ox de l'hélice appelé **angle de pas hydrodynamique**.

En application du théorème de Pythagore et après simplifications, on déduit :

$$V_R^2 = [V_0 + U_a(r)]^2 + (2\pi nr - U_t)^2 \quad V_0 + (2\pi nr)^2 \quad (2.9)$$

2.3.2-Poussée, couple et rendement

L'élément de pale compris entre r et $r + dr$ est alors soumis à **une force de portance $dL(r)$** normale à VR^2 , calculable par la théorie des ailes portantes et la **traînée de frottement dF_v** de l'eau sur la surface de la pale qui par définition normale à dL par (figure 14).

Finalement, les forces hydrodynamiques s'exerçant sur les Z sections de pales comprises entre r et $r + dr$ donnent :

- en projection sur Ox , une **poussée** :

$$dT/ dr = Z [dL(r) \cos \beta_i - dF_v(r) \sin \beta_i] dr \quad (2.10)$$

- et un **couple** autour de Ox :

$$dQ/ dr = Z [dL(r) \sin \beta_i + dF_v(r) \cos \beta_i] r dr \quad (2.11)$$

L'intégration de (2.10) et (2.11) entre le moyeu et l'extrémité de pale donne la poussée T fournie par l'hélice et le couple Q résistant de l'hélice ainsi que le rendement de l'hélice en eau libre défini comme le rapport de la **puissance fournie par l'hélice au navire TV_0** sur la **puissance transmise à l'arbre $2\pi nQ$** .

$$\eta_o = TV_0 / 2\pi nQ \quad (2.12)$$

2.3.3-Coefficients caractéristiques

Pour les applications pratiques des caractéristiques de fonctionnement, on définit des coefficients dits caractéristiques qui sont des nombres sans dimensions, valables pour toutes les hélices géométriquement semblables. Ceux sont :

- Le coefficient d'avance

$$J_o = V_o / nD \quad (2.13)$$

- Le coefficient de poussée

$$K_T = T / \rho n^2 D^4 \quad (2.14)$$

- Le coefficient du couple

$$K_Q = Q / \rho n^2 D^5 \quad (2.15)$$

- Le rendement en eau libre de l'hélice

$$\eta_0 = J_0 K_T / 2\pi K_Q \quad (2.16)$$

En pratique lors des essais effectués sur des modèles d'hélices, on a pu tracer des réseaux de courbes K_T , K_Q et η_0 en fonction de J_0 (voir figure 22). Ces réseaux de courbes sont très utiles pour déterminer les caractéristiques géométriques lors d'un projet d'hélice.

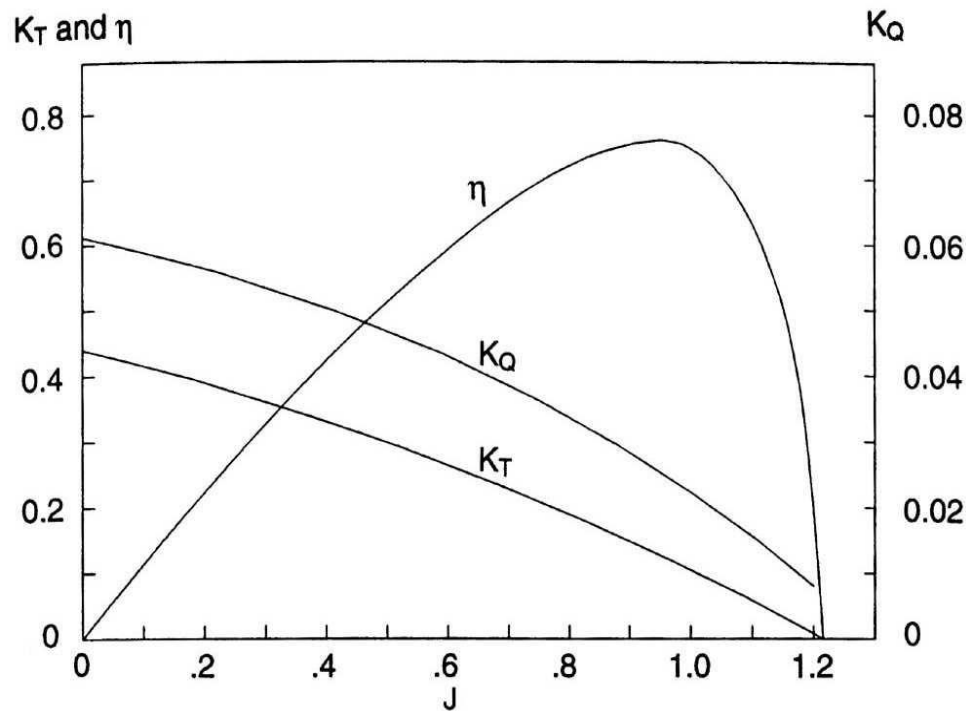


Fig.2.12: Exemple de courbes de performance hydrodynamique d'une hélice. [7]

La figure 23 représente le réseau de courbes des hélices de type B4-70 ($Z=4$ pales et fraction surfacique $AE/A_0=0,70$).

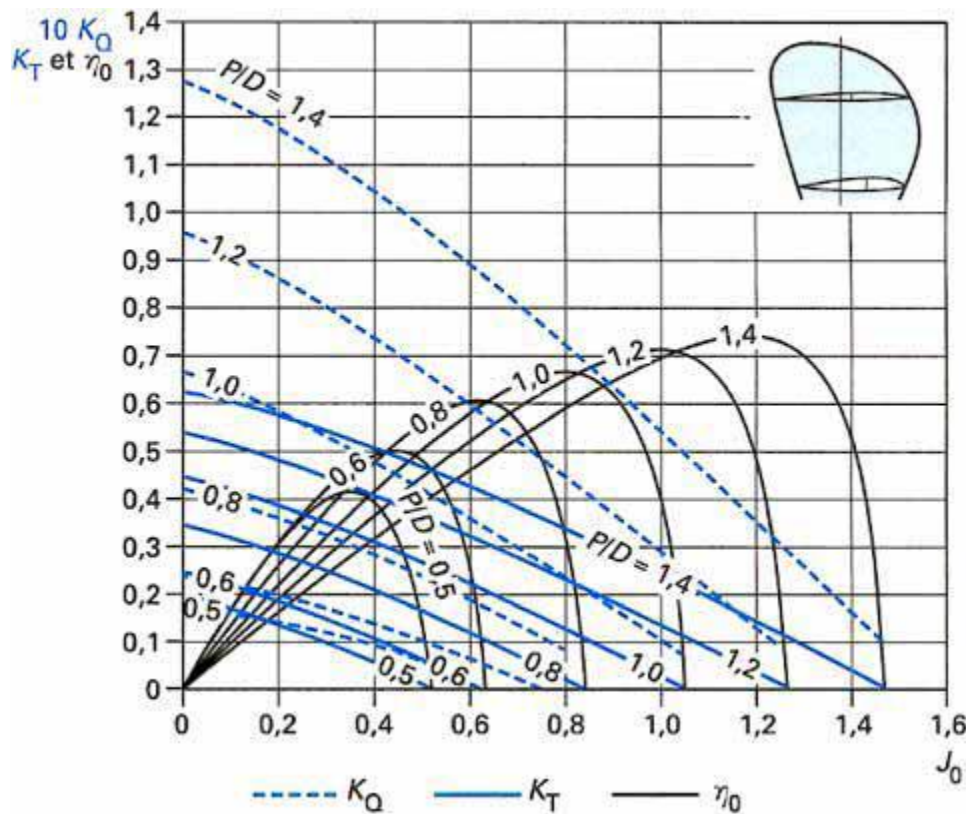


Fig.2.13: Courbes de performance hydrodynamique des hélices B4-70, avec en médaillon le contour développé [7]

2.4-Conclusion

Le diamètre de l'hélice a indéniablement une grande influence sur les performances hydrodynamiques. L'augmentation du diamètre de l'hélice permet d'améliorer en grande partie la poussée. Cependant le diamètre de l'hélice est un paramètre encore moins flexible que sa vitesse de rotation. Le disque hélice doit nécessairement être compris entre la ligne de tain et la surface libre ou la voûte arrière. De plus des marges doivent être prises pour protéger l'hélice d'un contact avec le fond et pour assurer une immersion suffisante.

Pour augmenter la poussée on peut augmenter la surface portante en ajustant la loi de corde et le nombre de pales. Le nombre de pales est choisi en fonction du coût et du risque de vibrations. Ajouter des pales c'est tout d'abord s'assurer de la disponibilité de places sur le moyeu. Ceci augmenterait aussi le poids et les contraintes de fabrication.

Chapitre 3

Calcul des performances des hélices marines

Chapitre 3

Calcul des performances des hélices marines

3.1- Introduction

Les concepteurs des hélices marines sont souvent confrontés à des problèmes complexes liés les uns aux autres qui sont le diamètre de l'hélice, ventilation, perte des charges, cavitation, poussée d'Archimède, tension superficielle...

D'une part, elles sont dues à une faible immersion de l'hélice qui impose des diamètres réduits et d'autre part les phénomènes indésirables en hydrodynamique exigent une augmentation de la surface de l'hélice donc de son diamètre sans oublier de rappeler que le dimensionnement de l'hélice est limité par les tirants d'eau autorisés des ports (profondeur de l'eau) et imposé par la géométrie de la coque.

Ces phénomènes sont dus à la dépression à l'extrados de la pale de l'hélice. La ventilation apparaît quand la dépression creuse suffisamment la surface libre pour que l'extrémité de pale perce celle-ci.

La structure du navire est très complexe et peut absorber une variété de charges statiques et dynamiques, mais une importante incertitude réside sur la nature de ces charges, notamment, sur leur location, fréquence, périodicité et magnitude. De ces faits, les méthodes de calcul utilisées étaient longtemps basées sur l'expérience du passé donc, sur des méthodes semi empiriques. L'évolution des méthodes a suivi pas à pas l'évolution des navires (types, dimensions, proportions, matériaux utilisés, puissance de la propulsion) [20].

Les vibrations à bord des navires sont généralement étudiées en considérant trois types d'excitation, à savoir :

- ✓ Excitation permanente par le système de propulsion (moteurs, hélices) ;
- ✓ Excitation transitoire de la coque par les charges d'impact (pilonnage, tangage) ;
- ✓ Excitation aléatoire de la coque par les vagues.

3. 2-Les grandeurs hydrauliques

a) Pression

Lorsqu'une force s'exerce sur une surface, nous parlerons de la notion de pression. La formule qui permet de définir la pression hydraulique :

$$\text{Pression (bar)} = \frac{\text{Force (daN)}}{\text{Section (cm}^2\text{)}} \quad (3.1)$$

$$1\text{bar}=1\text{daN/cm}^2$$

b) Débit

Le volume du fluide déplacé par unité de temps est appelé le débit. En hydraulique le débit caractérise la rapidité de mouvement [23]. C'est le volume de fluide qui s'écoule pendant l'unité de temps.

$$\text{Débit} = \frac{\text{Volumedéplacé}}{\text{Temps}} \quad , \text{ on note : } Q_v = \frac{V}{t} \quad (3.2)$$

En unité usuelle :

Le débit s'exprime en litre par min (L/mn)

Le volume s'exprime en litre

Le temps s'exprime en mn

c) Puissance

En mécanique la puissance s'exprime : $P = F \cdot V$

Par analogie la puissance hydraulique s'écrit :

$$P(kw) = \frac{Q_v\left(\frac{l}{mn}\right) \cdot p(bar)}{600} \quad (3.3)$$

3. 3- Les pertes de charges

Les pertes de charge sont à l'origine :

-Des frottements entre les différentes couches de liquide et des frottements entre le liquide et la paroi interne de la conduite le long de l'écoulement : ce sont les pertes de charge régulières.

-De la résistance à l'écoulement provoqué par les accidents de parcours (vannes, coudes, etc...) ; ce sont les pertes de charges singulières ou localisés

a) Les pertes de charge régulières

Soit un écoulement permanent d'un liquide dans une conduite de diamètre D. La perte de charge entre deux points séparés d'une longueur L, est de la forme :

$$\Delta H_r = \lambda \frac{D}{L} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (3.4)$$

Avec :

V : Vitesse moyenne du fluide

λ : Coefficient de perte de charge régulière

b) Les pertes de charge singulières

$$\Delta H_s = k \frac{V^2}{2g} \quad (3.5)$$

k : est en fonction des caractéristiques géométriques et du nombre de Reynolds.

3. 4- Système de propulsion

Les différents éléments du système sont l'arbre de poussée, un ou plusieurs arbres intermédiaires et l'arbre porte-hélice. Ces arbres sont supportés par le bloc de butée, paliers intermédiaires et le palier du tube d'étambot. Un dispositif d'étanchéité est prévu à chaque extrémité de l'arbre porte-hélice. Ces pièces et leur emplacement sont indiqués sur la figure 24.

Les moteurs (avec les vérins) qui concrétisent la puissance mise en œuvre présentent d'énormes possibilités des techniques hydrauliques.

A l'inverse des pompes, les moteurs sont des composants qui retransforment la puissance hydraulique (pression x débit) en puissance mécanique (couple x vitesse de rotation).

On peut ajouter que l'intérêt principal des moteurs hydrauliques réside dans le rapport puissance/encombrement particulièrement avantageux par rapport aux autres types de moteurs, qu'ils soient électriques ou thermiques.

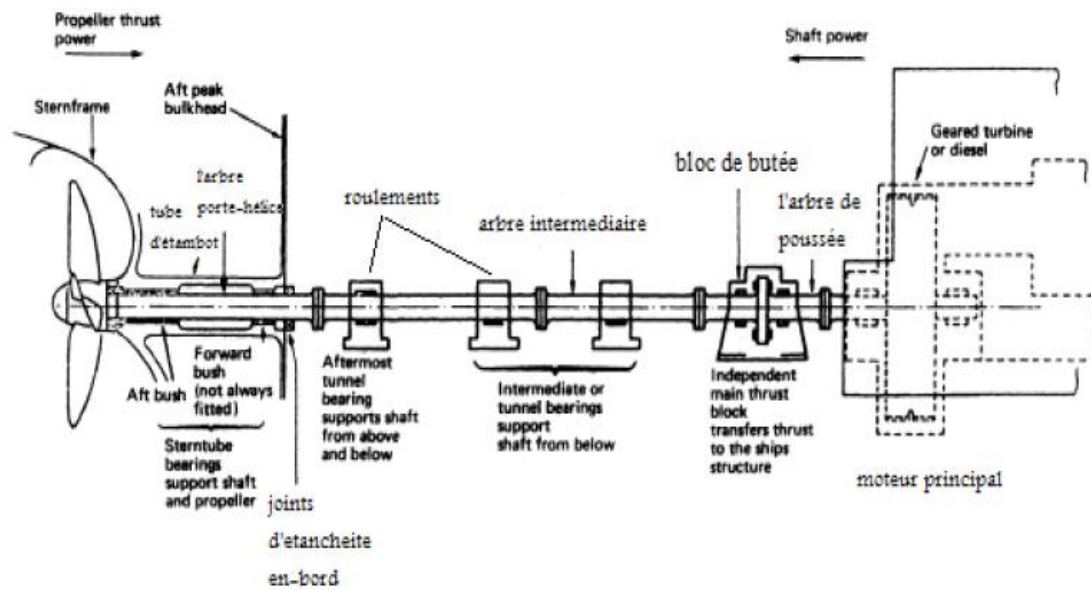


Fig.3.1: Système de transmission.

Ces moteurs entraînent des systèmes mécaniques. Si le couple résistant devient trop important, la pression monte. Quand elle atteint la valeur de réglage du limiteur de pression, le débit retourne au réservoir. Leur avantage c'est qu'ils développent une grande puissance pour un encombrement réduit.

Le moteur hydraulique transfère l'énergie hydraulique en énergie mécanique, il utilise le débit d'huile qui est poussé dans le circuit hydraulique par une pompe hydraulique et le transforme par un mouvement rotatoire pour entraîner un autre dispositif. Une différence de pression existe entre l'admission et le refoulement du moteur, cette différence de pression s'applique sur les parties mobiles internes du moteur qui sont reliées mécaniquement à l'arbre d'accouplement du moteur, sous l'effet de la différence de pression les pièces mobiles internes se déplacent et entraînent ainsi l'arbre du moteur et la charge à déplacer.

Les différents types de moteurs hydrauliques sont :

- Moteurs à engrenage
- Moteurs hydrauliques

Dans ce type d'actionneur, l'énergie hydraulique fournie par un fluide sous pression est transformée en énergie mécanique. Il en résulte un mouvement de rotation sur l'arbre de sortie.

Le moteur hydraulique et la pompe hydraulique sont similaires dans la construction, mais différent dans les caractéristiques opérationnelles.

a) Vitesse de rotation d'un moteur :

Elle est donnée par la relation :

$$N = \frac{Q}{q_{th}} \eta_v \quad (3.6)$$

dans laquelle Q est le débit d'alimentation des moteurs, q_{th} la capacité théorique ou cylindrée du moteur et η_v le rendement volumétrique du moteur.

b) Calcul du couple [16]

$$C = \frac{\Delta P \cdot q_{th} \cdot \eta_m}{2\pi} \quad (3.7)$$

Avec :

ΔP : La différence de pression entre l'entrée et la sortie du moteur.

η_m : rendement mécanique du moteur.

c) Calcul de puissance :

$$P = C \cdot \omega = C \cdot 2\pi \cdot n \quad (3.8)$$

Avec ω : la vitesse angulaire

Formule pratique :

$$P_{kw} = 10^{-2} C_{dan.m} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n_{tr/min} \quad (3.9)$$

3.4. 2. Choix du moteur hydraulique

- Vitesse de rotation

$$N = \frac{Q \times 1000}{Cyl} \quad (3.10)$$

Q : Débit (l/min)

N : Vitesse de rotation (tr/min)

Cyl : Cylindrée du moteur (m³/tr)

- Puissance

La puissance hydraulique nécessaire pour assurer le fonctionnement du moteur.

$$P = \frac{Q \times \Delta p}{60000} \quad (3.11)$$

P : Puissance hydraulique (W)

Δp : Pression coté refoulement (Pa)

Q : Débit (l/min)

3.5- Diagramme thermodynamique

La mise en évidence de la cavitation est toujours vérifiée par le diagramme de transition de phase représenté par la figure 25. Ainsi, le diagramme thermodynamique (Température, Pression) d'un corps, **renseigne sur l'ensemble** des transformations liquide-vapeur qu'il est possible d'effectuer d'une manière réversible à partir d'un point initial A d'un liquide. Deux possibilités donnent le changement de phase : ou on élève la température à pression constante jusqu'à la température d'ébullition par un apport de chaleur externe, ou bien à température constante et on abaisse la pression jusqu'au point limite de la courbe de vaporisation. Dans la plupart des cas hydrodynamiques, comme en milieu de l'eau de mer, où la température reste constante, c'est ce chemin qui est suivi, la réduction de pression étant imposée par la dynamique de l'écoulement. Dans ce cas, l'apparition de la cavitation est conditionnée par la variation de la pression qui descend en dessous de la pression de vapeur saturante.

Dans la figure ci-dessous, la zone comprise entre les lignes de vapeur spi nodale et de liquide

La ligne spinodale délimite la région où le liquide est dans un état métastable. Si la température est considérée constante au point A et en diminuant la pression, le liquide ne change pas de phase même dans des conditions de pression qui le placent sous la courbe délimitant (bc). Cependant, la tension exercée sur le liquide peut rompre les liaisons moléculaires qui peuvent provoquer la cavitation. Sous cette limite, le liquide atteint un état gazeux stable sous pression de saturation. La cavitation peut également être réalisée si le liquide conserve sa forme jusqu'à ce qu'il atteigne la pression correspondant à la ligne de liquide spinodale.

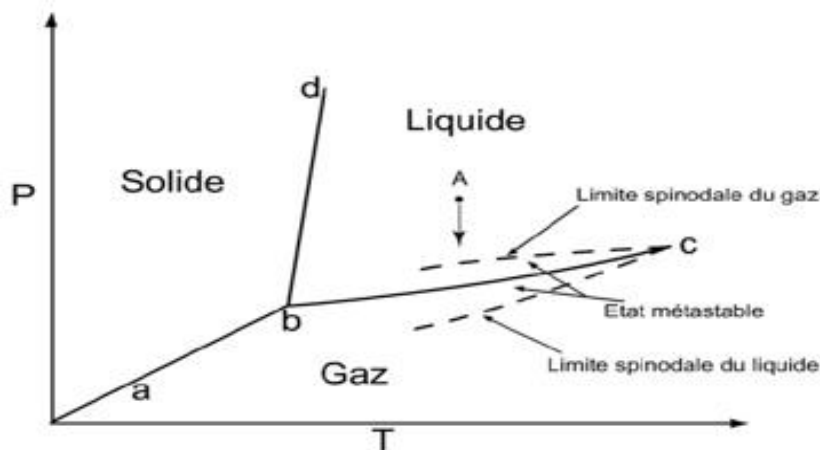


Fig.3.2: Diagramme de changement de phase. [10]

3.6- Types de cavitation

En ce qui concerne les hélices marines, 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. [7]. La figure 28, ci-dessous illustre les différents types de cavitation survenant sur une hélice marine.

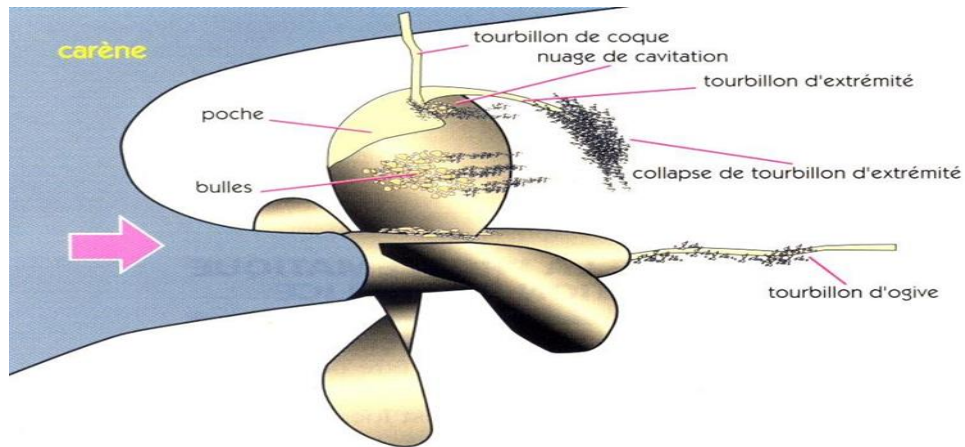


Fig.3.3: Types de cavitation sur une hélice marine. [7]

3.6.1- Cavitation à bulles

C'est le résultat du grossissement puis de l'explosion des bulles qui ont pour origine les germes cavitation contenus dans le fluide. La bulle qui se déplace avec le fluide sur la dépression à l'extrados de la pale (face bateau), grossit et atteignant la zone de décompression, implose en émettant une onde acoustique. L'implosion provoque l'arrachement de la matière à la surface de la pale et parviens à éroder la surface de la pale. La rugosité de la surface provoque l'érosion de la pale qui réduit sa durée de vie et l'augmentation des frottements donc une baisse du rendement.

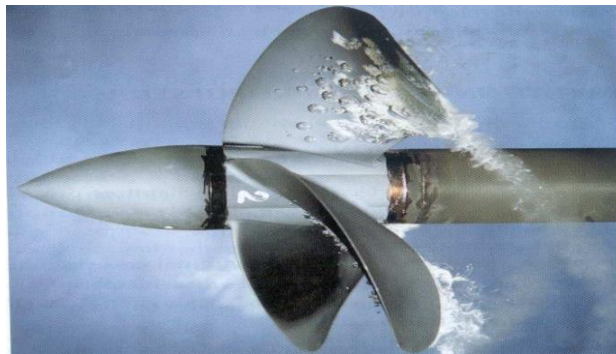


Fig.3.4: Cavitation à bulles suivie d'un nuage de cavitation. [7]

3.6.2-Cavitation à poche

L'accélération de l'écoulement au voisinage du bord d'attaque de l'hélice crée une zone de dépression en obligeant le liquide à se vaporiser dans cette région créant ainsi la cavitation par

poche. La limitation d'espace pour l'installation des hélices et l'augmentation de la charge rendent la cavitation à poche inévitable. Dans le cas où la poche se referme sur l'extrados du profil on dit qu'elle est partielle sinon, de super cavitation.

La cavitation à poche est moins destructive que la cavitation à bulles, elle engendre uniquement des problèmes de vibrations.



Fig.3.5: Cavitation à poche partielle [7]

3.6.3-Cavitation de tourbillon marginal

L'existence de la cavitation de tourbillon marginal est due à la portance développée sur la pale. Ce type de cavitation prend naissance à l'extrémité des ailes d'envergure finie. Elle présente une extraordinaire persistance en aval de l'écoulement, en aval du profil ou de l'hélice.

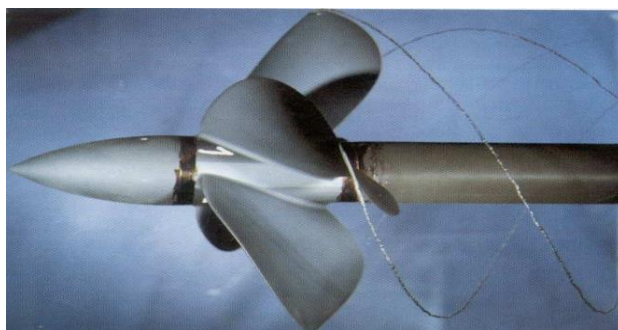


Fig.3.6 : Cavitation de tourbillon marginal. [7]

3.6.4-Cavitation de tourbillon d'ogive

Le tourbillon d'ogive est le fruit de la conjonction en rotation des tourbillons en emplanture de chaque pale. Le tourbillon d'emplature est dû au fait que deux couches limites d'épaisseurs différentes de celles de la ligne d'arbre et celle de la pale, se côtoient avec un angle vif de 90° . L'intersection des efforts de cisaillement provoque l'enroulement de l'écoulement et la formation d'un tourbillon. Ce dernier se combine aux tourbillons des autres pales en extrémité de l'ogive qui peut alors cavité si la dépression est importante.

3.6.5-Cavitation de tourbillon de coque

Le tourbillon de coque prend son origine au sommet de l'hélice et va interagir avec la couche limite développée sur la voute de la coque. Son déplacement est chaotique, et peut éroder la peinture de la coque.



Fig.3.7: Cavitation de tourbillon de coque [7]

3.7- Effets de la cavitation

La cavitation tout type confondu, a des conséquences néfastes sur le bon fonctionnement et la longévité des installations marines notamment les hélices.

Elle s'accompagne avec des effets ci- après, plus ou moins dommageables sur les hélices marines.

3.7.1-Bruit

La génération du bruit tient son origine de l'implosion des bulles de cavitation ou des poches de vapeur. En fonction du développement de la cavitation, il va évoluer de petits crépitements

à un bruit dont l'intensité peut dépasser, dès lors, les limites supportables par l'oreille humaine.

3.7.2-Erosion

Les bulles de vapeur implosent, engendrant des températures et des pressions localement très élevées ainsi que des chocs et des jets liquides violents au voisinage des parois solides c'est le début irréversible de l'érosion et de la corrosion qui limitent la durée de vie et les performances.



Fig.3.8: Début d'érosion d'une pale d'hélice marine. [9]

3.7.3-Vibrations

Les vibrations sont liées aux fluctuations des structures cavités en présence de parois solides produisent des efforts instationnaires qui se traduisent par des vibrations. Par exemple, la cavitation des hélices d'un bateau engendre des excitations de la ligne d'arbre qui peuvent se répercuter comme vibrations sur les structures du bateau ce qui occasionne une gêne ou encore du bruit.

3.7.4-Chute des performances

La cavitation diminue fondamentalement le rendement mécanique des systèmes à cause de l'effet de blocage spatial qu'une importante cavitation génère dans l'écoulement. Les performances d'une hélice peuvent chuter brutalement, d'autre-part l'apparition de ces bulles d'air faisant écran au filet d'eau au tour de l'hélice.

3.8-Rendement d'une hélice de propulsion

En plus du phénomène de cavitation, d'autres paramètres liés à la coque d'une part et à l'hélice, d'autre part, ont une grande influence sur le rendement de l'hélice de propulsion.

La figure 32 ci-dessous montre ses différents paramètres. A titre d'exemple, la rugosité de la surface provoque l'érosion de la pale qui réduit sa durée de vie et l'augmentation des frottements donc une baisse du rendement.

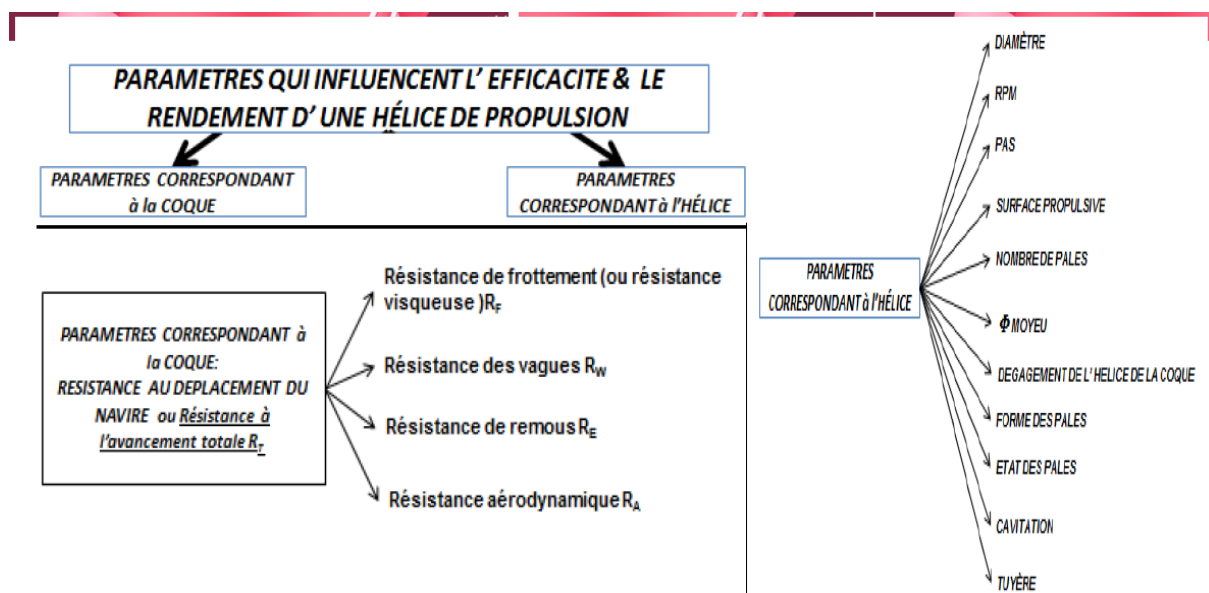


Fig.3.9: Paramètres liés au rendement.

3.8.1-Dégagements de l'hélice de la coque

Donner du devers aux pales diminue les effets néfastes de la cavitation ; de fluctuations de pression rencontré par les pales au voisinage de la coque. Pour la même raison, le jeu coque/hélice a une grande importance puisque les fluctuations de pression diminuent lorsque ce jeu augmente. Les sociétés de classification recommandent donc un jeu minimal coque/hélice de l'ordre $0,1D$ à $0,3 D$ (D étant le diamètre de l'hélice) selon la position de la coque par rapport à l'hélice. (Voir figure 33).

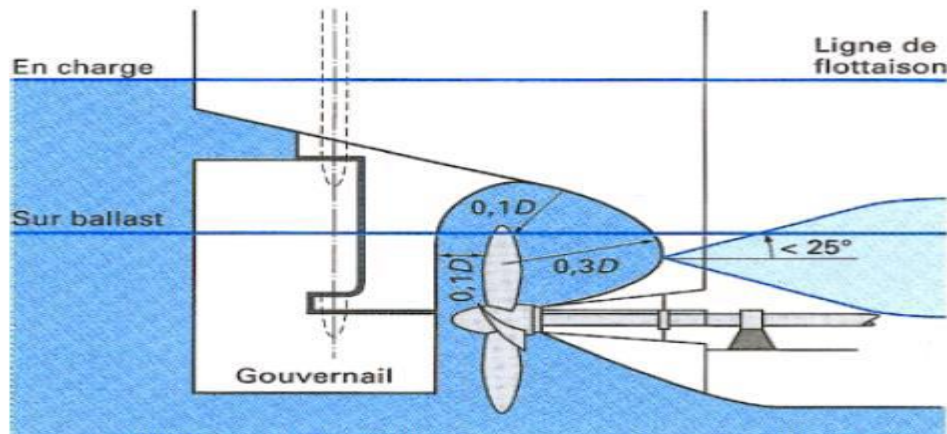


Fig. 3.10: Espace optimal entre l'hélice et la coque.

3.8.2- Influence de la tuyère.

Une tuyère est un tube court entourant l'hélice (figure 34). Dans certains cas, elle peut améliorer sensiblement le rendement du système de propulsion en gagnant environ 20 % de poussée supplémentaire tout en assurant une consommation de carburant minimum.

Le tube affleure l'hélice et est légèrement conique avec une section transversale en forme d'aile d'avion. Une tuyère améliore le rendement du système propulsif de deux façons distinctes :

- Lors de leur rotation dans l'eau, les pales de l'hélice créent des zones de haute pression en aval de chaque pale et des zones de dépression en amont, et c'est cette différence de pression qui fournit la force pour déplacer le navire dans l'eau. Des pertes se produisent à l'extrémité de chaque pale quand l'eau s'échappe du côté haute pression de la pale vers le côté basse pression, ce qui a pour effet de diminuer la force de propulsion en avant.

Quand on compare la courbe de poussée d'une hélice en tuyère à celle d'une hélice en eau libre, on note un écart important. Cet écart diminue au fur et à mesure que la vitesse du navire augmente.

L'effet est plus importante quand la vitesse du navire est basse. Pour des vitesses élevées (plus de 9 nœuds), la tuyère tend à produire plus de résistance que de poussée et a un effet négatif sur les performances de l'hélice.

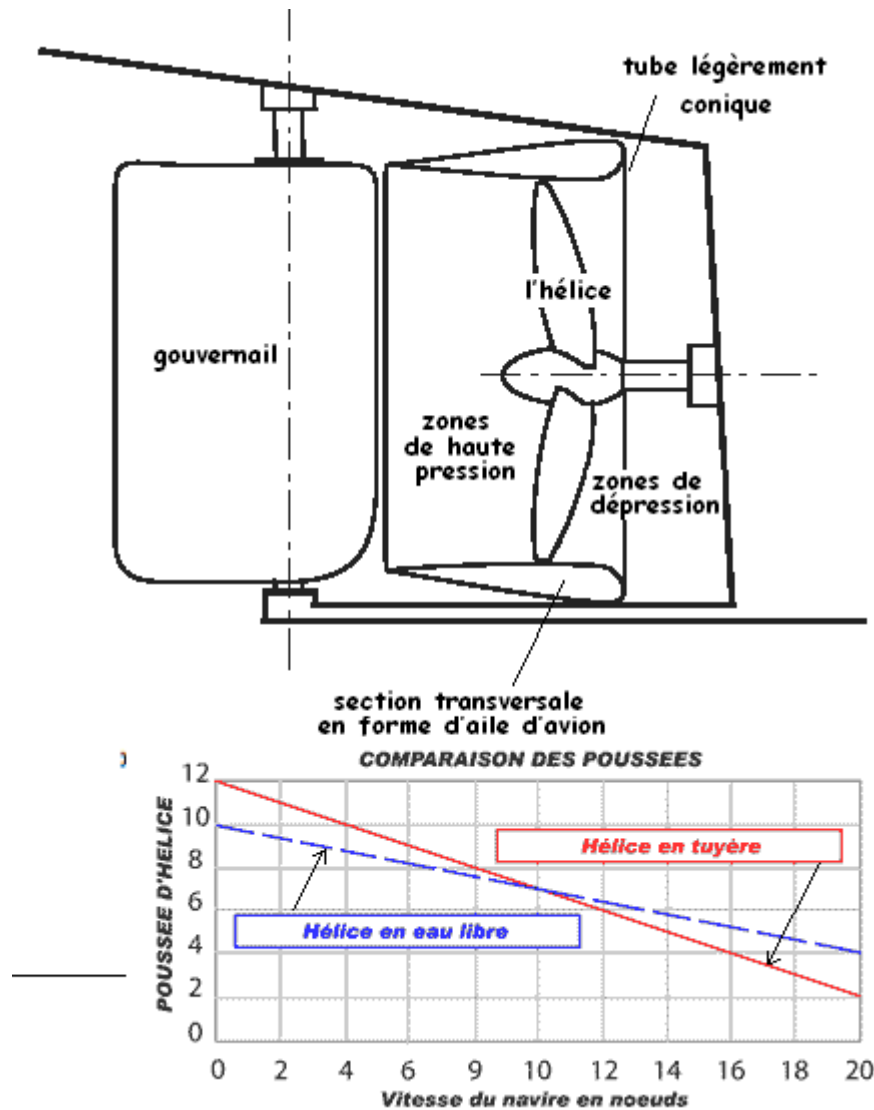


Fig. 3.11: Influence de la tuyère sur le rendement.

3.8.3- Rendement [13]

Ce calcul fait appel aux logarithmes décimaux

$$Y = 1.33 \log (Pas/D) + 0.71 \quad (3.12)$$

Cette équation va permettre de calculer le rendement

$$Rend. = 0.35 + 0.561 Y + 0.018 Y^2 - 0.191 Y^3 - 0.013 Y^4 \quad (3.13)$$

Un rendement acceptable se situe entre 0,6 et 0,7 mais certaines hélices ont un rendement supérieur à 70%. En règle générale plus une hélice tourne vite moins son rendement est bon.

Le diamètre D étant déterminé par les expressions de la figure 37.

Planing Hull Formula For Blade Diameter $\text{Blade Diameter} = \sqrt{\frac{125 \times \text{hp}}{\text{EAR} \times \text{kts} \times \sqrt{\text{ktss}}}}$	EAR = Expanded Area Ratio <table> <tr> <td>3 Blade Standard</td><td>.51</td></tr> <tr> <td>3 Blade Wide</td><td>.56</td></tr> <tr> <td>4 Blade Ultra Skewed</td><td>.75</td></tr> <tr> <td>4 Blade Standard</td><td>.69</td></tr> <tr> <td>4 Blade Wide</td><td>.81</td></tr> </table>	3 Blade Standard	.51	3 Blade Wide	.56	4 Blade Ultra Skewed	.75	4 Blade Standard	.69	4 Blade Wide	.81
3 Blade Standard	.51										
3 Blade Wide	.56										
4 Blade Ultra Skewed	.75										
4 Blade Standard	.69										
4 Blade Wide	.81										
Displacement Hull Formula For Blade Diameter $\text{Blade Diameter} = \sqrt{\frac{160 \times \text{hp}}{\text{EAR} \times \text{kts} \times \sqrt{\text{ktss}}}}$	kts = knots hp = propeller horsepower mph X .86897 = kts kts X 1.1508 = mph										
Example for a 46' Planing Hull with 4 blade ultra skewed Propellers $\sqrt{\frac{160 \times 435}{.75 \times 25 \times 5}} = \sqrt{\frac{69600}{93.75}} = \sqrt{742.4} = 27.25$	Ever wonder what Diameter Propeller You should be running? Try these formulas!										

Fig.3.12: Formules de calcul du diamètre d'hélice. [22]

Le diamètre de l'hélice est l'élément de base pour la détermination de l'espacement de tout le dispositif de propulsion. Les distances normalisées sont illustrées par la figure 38

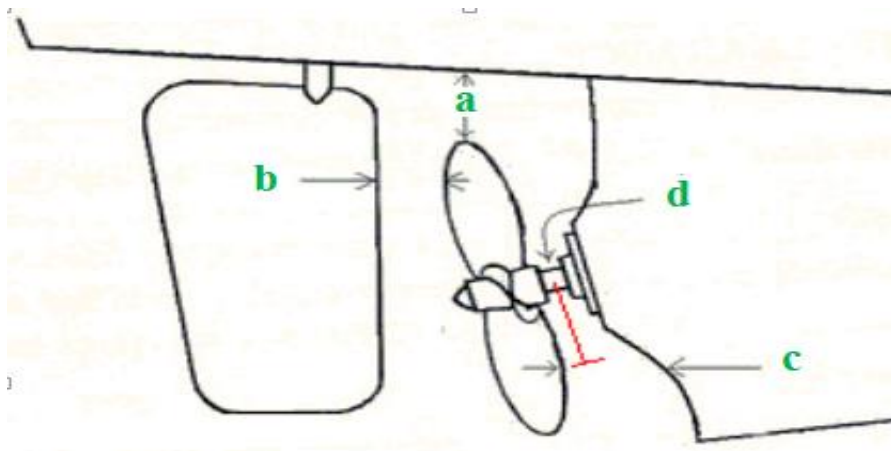


Fig.3.13: Espacement normalisé.

a = 15% diamètre de l'hélice

b = 15% diamètre de l'hélice

c = 30% diamètre de l'hélice à moitié de centre de rotation

d = bague de pale de l'hélice, 1-15x diamètre central

La règle de base pour la détermination de pas est que pour chaque pouce qu'on réduit le diamètre, le pas doit être augmenté de 2", et vice versa. Par conséquent, si on réduit le diamètre de 2", puis la règle de base serait imposée un 4" augmentation en pas.

Un principe de base pour la plupart des applications in-bord est de 200 tr / min par pouce de pas. C'est-à-dire, Si nous échappons à partir d'une hélice 24x24 à un 24x23 nous devrions gagner 200 tr / min. Une meilleure règle est : [22]

$$\text{New Pitch} = \frac{\text{Current RPM}}{\text{Desired RPM}} \times \text{Existing Pitch}$$

3.9- Equilibre du navire

Tout corps flottant (flotteurs, navires ou structures) subit l'action des forces (qui engendrent des moments) dans le milieu où il se trouve. Ces forces peuvent être internes ou externes. Dans le cas d'un navire, structure ou corps flottant on parlera des forces internes pour tout ce qui est en rapport avec le poids et d'externes pour tout ce qui est en rapport avec les forces extérieures appliquées au corps, notamment les forces d'excitation (courant, vent, vagues, etc.) et les forces hydrostatiques ou autres.

L'équilibre statique d'un corps ne se réalise que si toutes les forces et moments qui y sont appliquées sont en équilibres, donc si et seulement si leur somme respective est nulle. Il n'y a ni translation ni rotation du corps flottant.

Sur tout corps flottant au repos et en absence de toutes forces d'excitation externes (courant, vent, vagues, etc.) et internes (déplacement, ajoute ou soustraction de poids) exercent deux types de forces à savoir : **forces de gravitation** et **forces hydrostatiques**

3.9.1- Les forces de gravitation

Sont celles appliquées à toutes les composantes du navire, elles constituent tous les poids de ces composantes (structures, accessoires, vivres, chargement, personnel, consommables, etc.) et sont caractérisées par leur masse et la position de leur centre de gravité. Toutes ces forces, pour des raisons pratiques, sont représentées par une seule force résultante P(poids) ou

(déplacement) du navire appliquée verticalement à son centre de gravité G comme représenté par la figure 37.

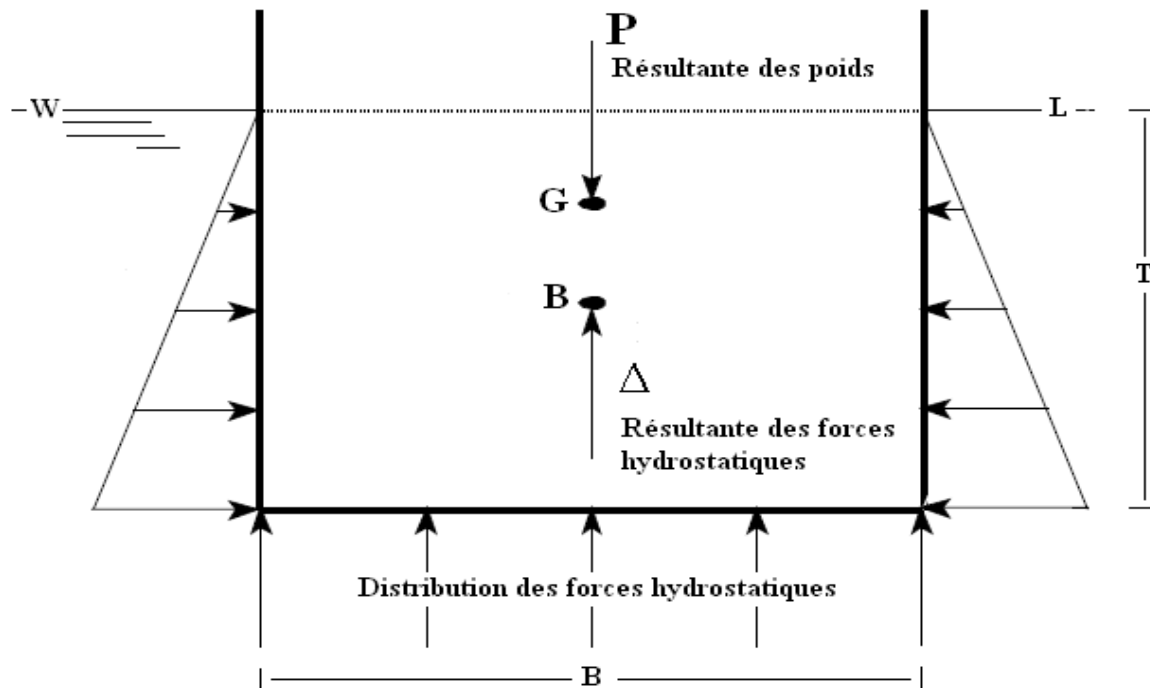


Fig.3.14: Sollicitations sur la pale d'hélice marine.

3.9.2-Les forces hydrostatiques

Sont celles appliquées à la carène (partie immergée de la coque) du navire (figure 39). Elles sont constituées des forces de pression hydrostatique qui sont appliquées perpendiculairement sur la surface de la carène (sur les parois de la carène). Les forces de pression hydrostatique sur la carène sont représentées par une force résultante (déplacement) passant verticalement par le centre de volume de la carène B .

3.10- Conclusion

Comme nous avons vu dans ce chapitre consacré aux calculs des performances des hélices marines on peut conclure que, paradoxalement aux exigences de performances des hélices marines, pour limiter les contraintes, il faut prévoir une hélice avec un plus grand nombre de pales, une surface de pales plus grande ou un diamètre plus important.

- L'hélice tournant à une vitesse donnée avec moins de pales est plus performante. Cependant, avec moins de pales, chacune subit une plus forte charge. Quand le diamètre de l'hélice est limité par l'espace disponible, il vaut souvent mieux conserver une vitesse lente de l'arbre et absorber la puissance en utilisant plus de pales.

- Une hélice avec des pales étroites est plus efficace qu'une hélice à pales larges. Cependant, une hélice avec un taux faible de surface de pale est plus sujette à cavitation car la poussée produite par l'hélice est répartie sur une surface plus petite.

- L'épaisseur des pales d'une hélice a peu d'influence sur son rendement, compte tenu des normes exigées pour conserver une résistance suffisante des pales. C'est ainsi qu'avant la construction, des expériences à l'échelle du modèle réduit ou des calculs sont effectuées.

Chapitre 4

Simulation d'une hélice marine

Chapitre 4

Simulation d'une hélice marine

4. 1- Introduction

La simulation numérique occupe aujourd'hui une place centrale dans la conception d'éléments mécaniques complexes tels que les hélices marines. Cette importance s'explique par les défis techniques considérables liés à l'optimisation simultanée des performances hydrodynamiques et de la résistance structurelle, deux critères souvent antagonistes. En effet, la conception traditionnelle basée uniquement sur des essais expérimentaux physiques serait à la fois coûteuse, longue et limitée en termes de diversité des configurations testées.

La simulation numérique permet de modéliser précisément le comportement des flux fluides autour des pales de l'hélice. Grâce aux méthodes de simulation par dynamique des fluides numérique (CFD – Computational Fluid Dynamics), il est possible d'analyser avec finesse la vitesse, la pression et la turbulence du fluide, mais aussi les phénomènes d'instabilités hydrodynamiques comme la cavitation.

En matière de résistance structurelle, la simulation par éléments finis (FEA – Finite Element Analysis) assure la prévision des contraintes mécaniques auxquelles l'hélice est soumise lors de son fonctionnement. Ces contraintes résultent notamment de la pression exercée par le fluide, des efforts de torsion dus à la rotation, mais aussi des chocs liés à des débris marins ou à des conditions de fonctionnement extrêmes. La simulation FEA offre la possibilité de localiser précisément les zones à risque de fatigue ou de rupture, d'évaluer les marges de sécurité, et par conséquent de choisir les matériaux adéquats et d'ajuster l'épaisseur des pales.

L'intégration de la simulation numérique dès la phase de conception réduit donc significativement le nombre d'itérations physiques nécessaires, diminue les coûts de prototypage et accélère la mise sur le marché des hélices innovantes.

SOLIDWORK, par son interface intégrée combinant modélisation 3D, simulation structurelle et simulation fluide, constitue ainsi un outil incontournable qui facilite la synergie entre les différentes phases du design tout en permettant une approche itérative rapide et efficace.

4. 2- Outils de Solidwork

Le panneau situé sur la gauche de la fenêtre SOLIDWORKS gère les conceptions de pièce et d'assemblage, les feuilles de mise en plan, les propriétés, les configurations et les applications de tierces parties. Le Gestionnaire de commandes donne accès aux outils SOLIDWORKS [20]:

- L'arbre de création Feature Manager

Les noms des fonctions sont affichées de haut en bas et dans l'ordre de création dans l'arbre de création Feature Manager.

Dans les assemblages, l'arbre de création Feature Manager affiche les composants (pièces ou sous-assemblages et leurs fonctions), un dossier Contraintes et les fonctions d'assemblage.

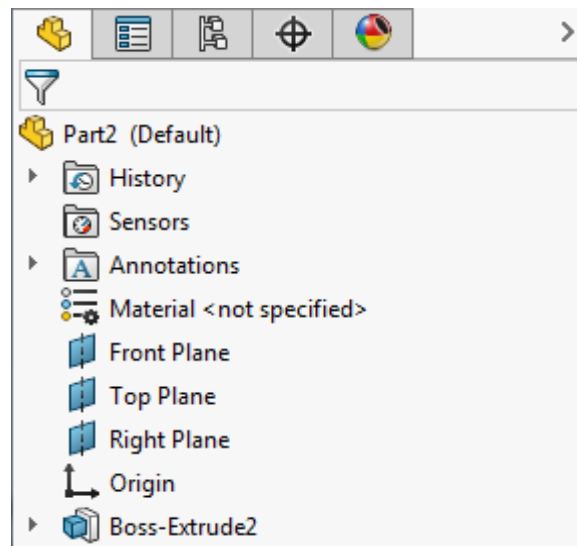


Fig.4.1: Arbre de création Feature Manager [20]

- Property Manager

Dans SOLIDWORKS, la plupart des outils d'esquisse, de fonction et de mise en plan ouvrent un Property Manager dans le panneau de gauche. Il affiche les propriétés de l'entité ou de la fonction de sorte que vous puissiez les éditer sans qu'une boîte de dialogue ne vienne couvrir la zone graphique.

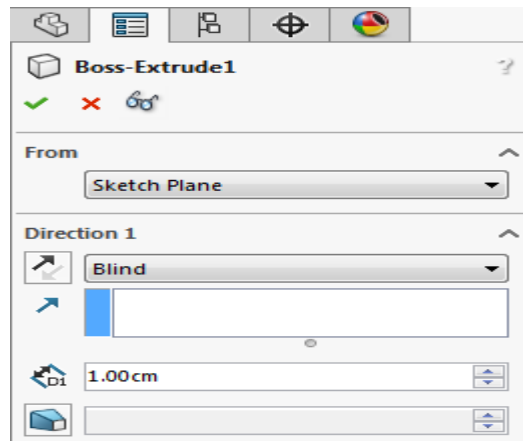


Fig.4.2: Property Manager [20]

- Configuration Manager

Le Configuration Manager sert à créer, sélectionner et visualiser les diverses configurations des pièces et assemblages.

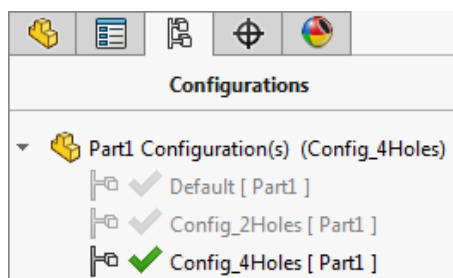


Fig.4.3: Configuration Manager [20]

- Dim Xpert Manager

Le Dim Xpert Manager liste les fonctions de tolérance définies par Dim Xpert pour les pièces. Il affiche aussi les outils Dim Xpert utilisés pour insérer des côtes et des tolérances dans les pièces. On peut importer ces côtes et tolérances dans les mises en plan.

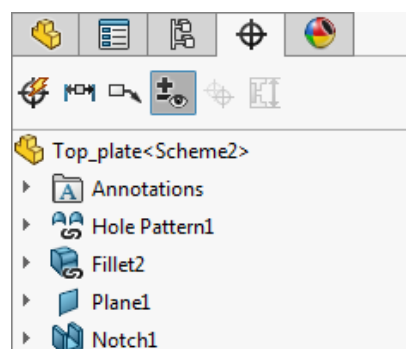


Fig.4.4: Dim Xpert Manager [20]

- Display Manager

Le Display Manager liste et permet de modifier les apparences, décalques, scènes, lumières et caméras appliqués au modèle en cours. Lorsque Photo View 360 est activé, le Display Manager fournit un accès aux Options Photo View.

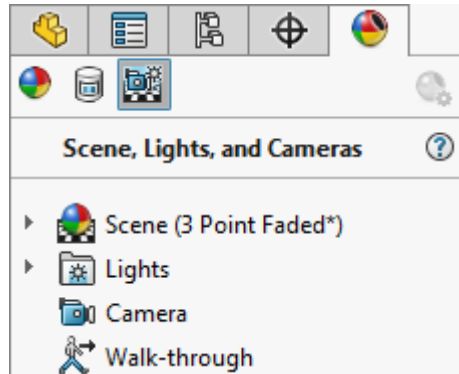


Fig.4.5: Display Manager [20]

- Affichage des Managers

Permet le passage de l'arbre de création Feature Manager au Property Manager, au Configuration Manager et au Display Manager en cliquant sur les onglets en haut du panneau de gauche dans la fenêtre SOLIDWORKS.

On peut fractionner le panneau et afficher plus d'un Manager ou plusieurs exemplaires d'un Manager.

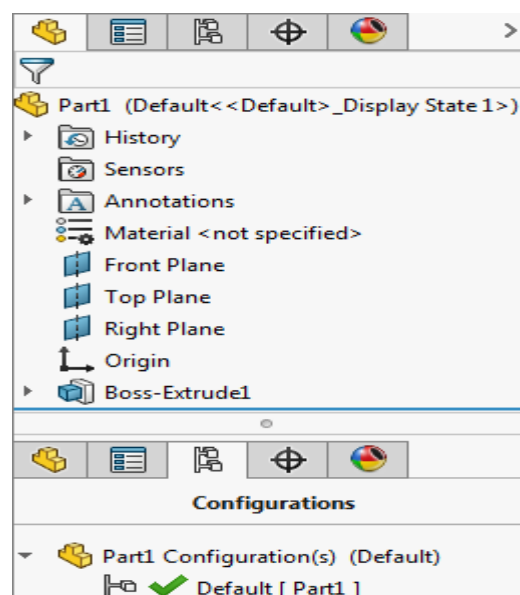


Fig.4.6: Affichage des Managers [20]

4.3- Modélisation de l'hélice

Les solutions de simulation pour Solidworks constituent un portefeuille facile à utiliser d'outils d'analyse, permettant de prédire le comportement physique réel d'un produit, en testant virtuellement des modèles CAO.

Le paramétrage pour une simulation d'une hélice marine sous SolidWorks exige une compréhension rigoureuse tant des caractéristiques géométriques que des propriétés matérielles, ainsi que la maîtrise des conditions de simulation techniques. La modélisation, première étape cruciale, s'appuie sur la définition précise des paramètres géométriques essentiels tels que le pas, le diamètre, et le nombre et la forme des pales qui influencent directement le rendement hydrodynamique de l'hélice.

4.3.1- Paramètres géométriques

Le type d'hélice étudié dans cette simulation est à quatre (4) pales, la plus utilisée dans le domaine maritime. Elle est en cupro-aluminium (CuAl), appelé également bronze d'aluminium qui est un alliage de cuivre composé de 80 à 90% de cuivre et de 4 à 14% d'aluminium, auquel est ajouté plusieurs métaux comme du fer et du nickel dans le but d'améliorer ses propriétés et sa résistance. Les autres paramètres sont :

Diamètre = 0.22727m

Diamètre de l'arbre= 45.53 mm

Pas réduit= 1.1

Fraction surfacique= 0.689

Skew= 4°48' (positif)

Rake= 4°35'

4.3.2-Maillage

La phase de sélection et de calibration des maillages constitue une étape cruciale dans la simulation numérique sous SolidWorks. Pour une hélice marine, caractérisée par des surfaces aérodynamiques courbes et des arêtes fines, il est recommandé d'opter pour un maillage à

éléments finis de type tétraédrique à propagation adaptative. Ce type de maillage est capable de s'adapter aux formes complexes, tout en offrant une meilleure résolution locale. Pour le cas stationnaire, un maillage hybride a été adopté ; tétraédrique pour le petit bloc qui entoure l'hélice et hexaédrique pour les blocs externes. Le maillage de ces surfaces a été effectué en passant par la sélection d'un certain nombre de nœuds sur les lignes formant les blocs afin de contrôler la qualité du maillage. []

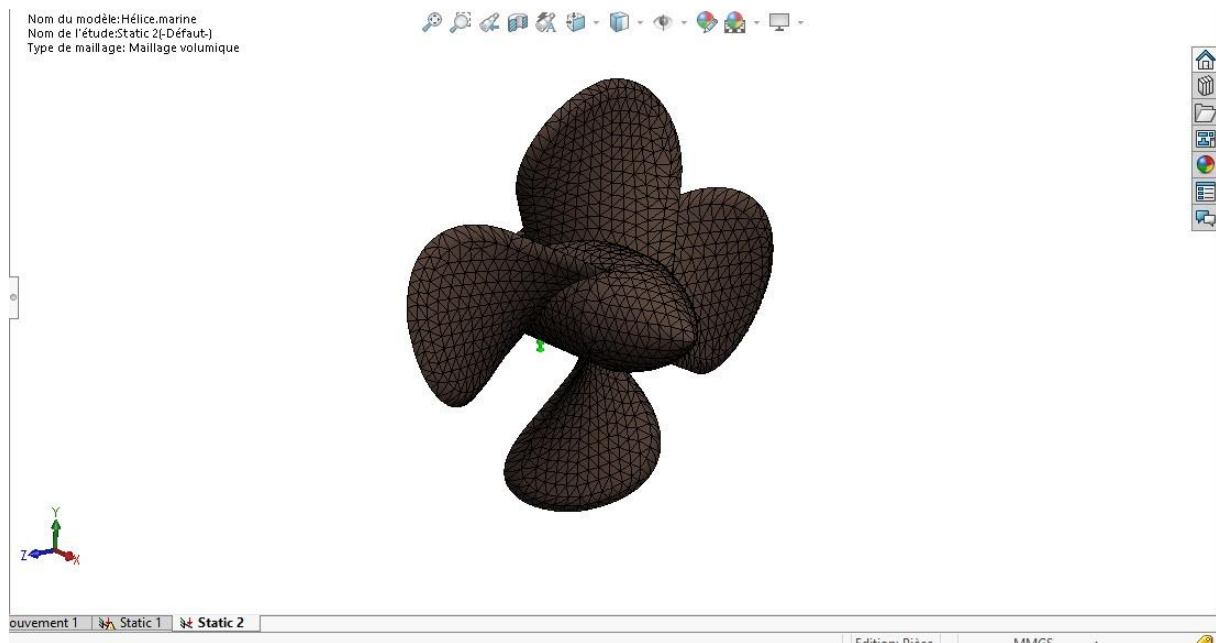


Fig.4.7: Maillage volumique de l'hélice

4.3.3-Charge hydrodynamique

La charge hydrodynamique exercée sur les pales de l'hélice est généralement modélisée comme une pression variable en fonction de la profondeur et de la vitesse de rotation de l'hélice. Pour une hélice opérant à une vitesse de rotation de 1200 tours par minute dans de l'eau de mer de densité approximative de 1025 kg/m^3 , la pression dynamique peut être calculée à partir de la formule de Bernoulli et ajustée selon le profil des pales.

Dans cette simulation, cette charge peut être appliquée comme une pression de 0.71 N/m^2 sur la zone des pales.[]

4.4- Résultats de la simulation

Les résultats de la simulation avec une pression de 0.71 N/m^2 sur les deux faces, extérieure et intérieure des pales de l'hélice sont donnés par les figures ci-dessous qui illustrent la répartition de la pression des contraintes von Mises (figure 45), de la déformation résultante 'ESTRN' (figure 46) et du déplacement résultant 'URES' (figure 47), sur les deux faces des pales de l'hélice.

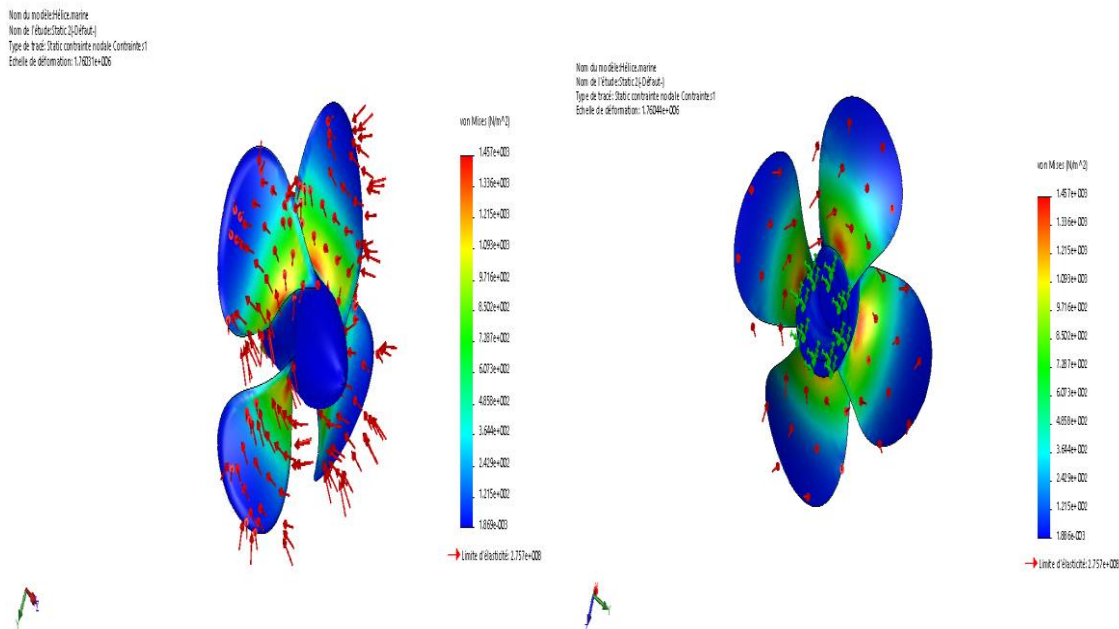


Fig.4.8: Pression des contraintes sur les faces des pales.

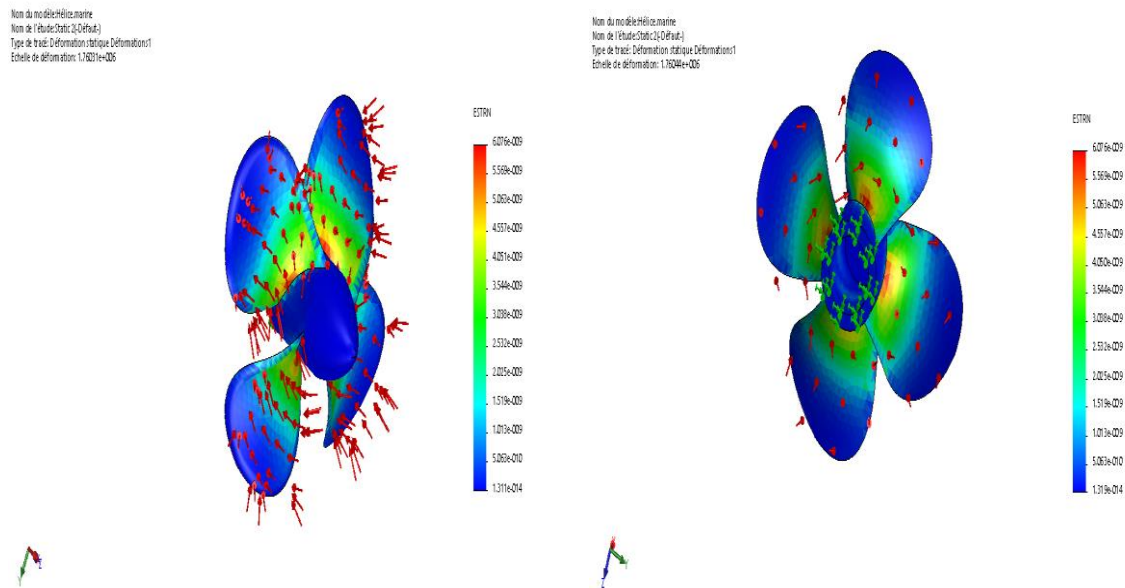


Fig.4.9: Déformation sur les faces des pales.

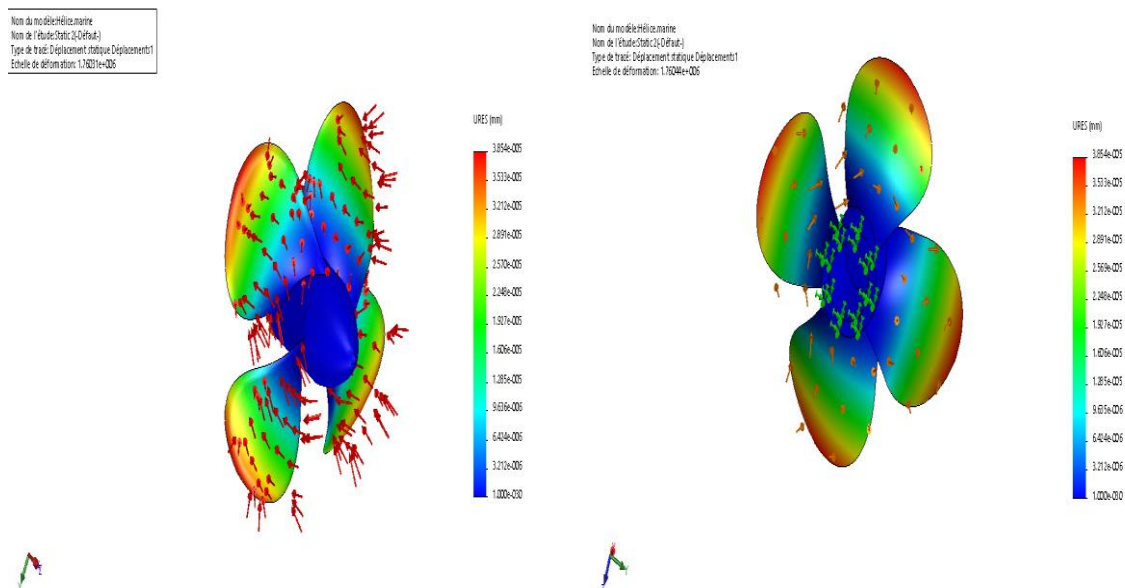


Fig.4.10: Déplacement sur les faces des pales

Il est clairement montré que la valeur minimale de la pression apparaît près du bord d'attaque de la face extérieure alors que la pression maximale toujours près du bord d'attaque de la face intérieure. Cette différence de pression entre les deux côtés crée la poussée.

L'effet de la cavitation résultant de la répartition de pression sur les pales de l'hélice apparaît sur les parties du contour.

4.5- Analyse bibliographique

La conception des hélices marines est fortement liée au phénomène de la cavitation hydrodynamique. Pour réduire son ampleur sur les performances de l'hélice, plusieurs essais expérimentaux sur modèle réduit et études numériques ont été déjà réalisés.

Ces études expérimentales sont généralement longues à réaliser et très coûteuses. Elles restent dans certain cas une confirmation des résultats obtenus par voie de simulation.

Parmi les études expérimentales de l'écoulement autour de l'hélice marine on peut citer celle réalisée par Chang, Y. Hu, Ch. Tu, J. Chow, Y.[1] dont le dispositif expérimental utilisé est illustré par la figure 4.11. Ils ont analysé les résultats obtenus pour une hélice marine afin de déterminer les paramètres statistiques de la cavitation tels que sa taille et les zones d'apparition. La comparaison des résultats expérimentaux avec ceux obtenus par la simulation RANS ont permis d'identifier les problèmes de turbulence et les modèles de cavitations.

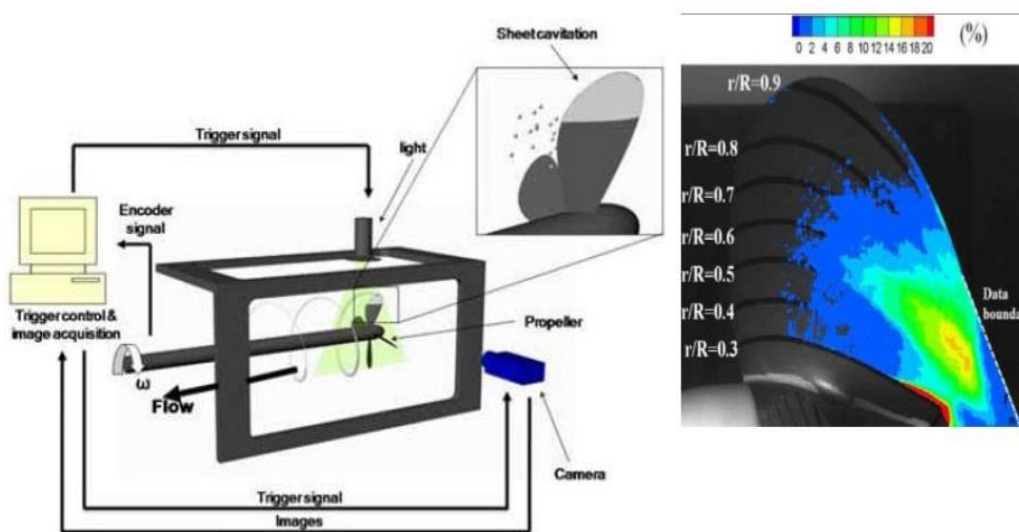


Fig. 4.11: Dispositif expérimental de la cavitation. [1]

Comme mentionner précédemment, les modèles numériques demeurent les plus adéquats afin de prédire le phénomène de cavitation autour de l'hélice marine à projeter. D'autres auteurs Lifante, C. Frank, T. Rieck, K [2] ont effectué une analyse approfondie de la modélisation de la turbulence pour l'écoulement cavitant autour de l'hélice marine de type P1353 ayant les caractéristiques : 5 pales ; $D=0.25\text{m}$; $J=0.6$. $\sigma_n=1.816$. Cette simulation avec ANSYS CFX software package effectuée sur plusieurs modèles de turbulence dont le modèle de turbulence DES a donné des résultats qui coïncident avec ceux obtenus expérimentalement. La figure 4.12, ci-dessous montre les résultats des tests.

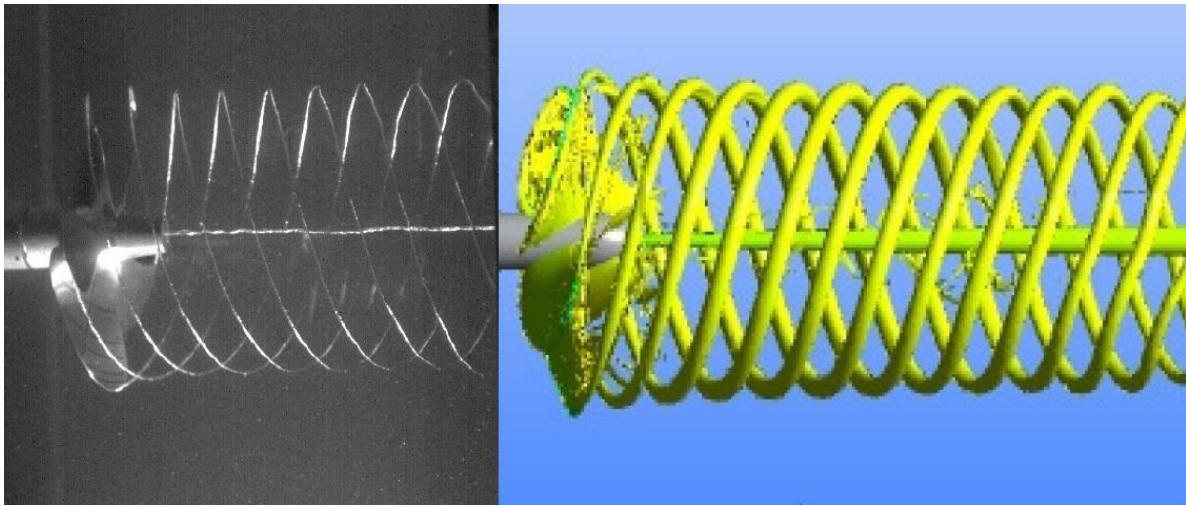


Fig.4.12 : Test expérimental et simulation numérique de la cavitation [2]

L.D.QING [3] s'est intéressé à l'étude des caractéristiques hydrodynamiques d'une hélice à fort skew. Dans cette étude, l'auteur a fait une comparaison d'un moyeu sphérique avec un autre cylindrique. La simulation par le code FLUENT et le modèle de turbulence choisi est SST $k-\omega$. Cette étude est portée sur un modèle d'hélice avec 4 pales, de $D=0.233\text{ m}$, fraction surfacique $A_D/A_0=0.729$. Pour un nombre de Reynolds de $Re=0.84 \cdot 10^6$ et une vitesse de rotation de $0.7R$, et un coefficient d'avance $J=0.736$, il a conclu que la forme du moyeu n'a pas d'effet sur la distribution de pression à l'exception régions proches de la racine. Les performances hydrodynamiques représentées par la figure 4.13 montrent une concordance quasi parfaite avec les résultats expérimentaux. L'écart étant évalué de 0.7 % pour K_{Tet} de seulement 0.5% pour $10 K_Q$.

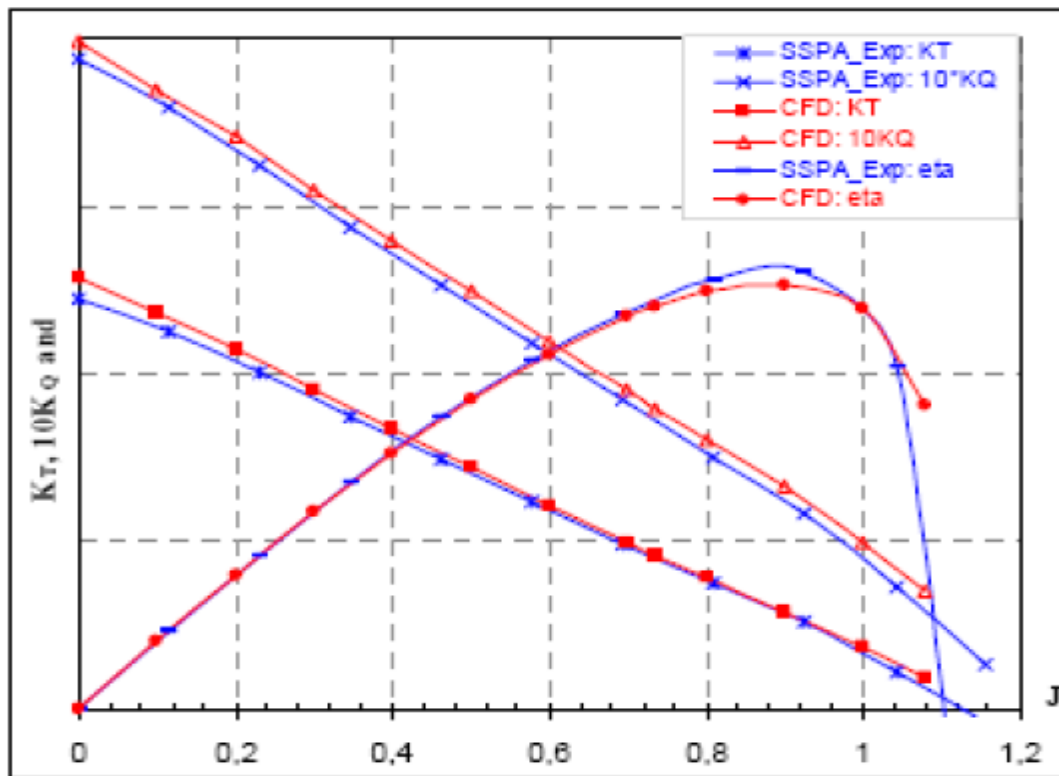


Fig.4.13: Caractéristiques hydrodynamiques. [3]

4.6- Conclusion

La simulation numérique, notamment à travers la mécanique des fluides numérique (CFD), permet d'examiner en profondeur l'écoulement de l'eau autour des pales de l'hélice par laquelle, il est possible de visualiser et de quantifier les phénomènes d'écoulement turbulent, de cavitation et de traînée hydraulique, qui ont un impact direct sur la performance globale.

Ces simulations offrent la possibilité d'évaluer l'effet de modifications géométriques très spécifiques, qui seraient difficiles à tester systématiquement en laboratoire ou en mer en raison des coûts élevés et des contraintes techniques.

La simulation devient un levier stratégique pour l'optimisation continue des performances hydrodynamiques et contribue à réduire les incertitudes liées aux essais physiques, à accélérer les processus de développement et à améliorer la fiabilité et la performance des hélices

maritimes. En somme, cette approche est essentielle pour répondre aux exigences économiques et environnementales actuelles du secteur maritime.

En modélisant le fluide et son interaction avec l'hélice, on peut détecter les phénomènes pouvant causer des vibrations excessives, des cavitations ou des efforts mécaniques trop élevés. Ainsi la détection précoce de la cavitation, qui est une cause majeure de dégradation du matériel et de perte d'efficacité, permet d'ajuster les paramètres de conception avant la fabrication, évitant ainsi des réparations coûteuses et des périodes d'indisponibilité.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'hélice maritime dépasse son rôle d'élément mécanique : elle représente le cœur de la propulsion navale, convertissant l'énergie du moteur en une force motrice efficace. Son fonctionnement repose sur la transformation du couple moteur en poussée hydrodynamique, illustrant une ingénierie avancée où chaque pale et chaque angle d'attaque sont cruciaux pour optimiser l'efficacité énergétique. Une hélice bien conçue peut ainsi réduire la consommation de carburant, ce qui constitue un levier important pour diminuer l'empreinte carbone des navires, dans un contexte où la flotte mondiale émet environ 940 millions de tonnes de CO₂ par an, selon l'Organisation Maritime Internationale (OMI).

De plus, la simulation numérique est devenue essentielle pour optimiser ces performances sans avoir recours à des essais physiques coûteux. Les logiciels de simulation, tels que les CFD, permettent d'analyser les flux hydrodynamiques autour de l'hélice, favorisant une amélioration continue des designs et réduisant les incertitudes. Ceci a permis de mettre en évidence l'apparition du phénomène de cavitation hydrodynamique qui prend naissance suite à la dépression sur les pales de l'hélice. Ce phénomène lié à l'écoulement du fluide à forte vitesse est très nuisible pour l'hélice du fait, non seulement, de la diminution des performances mais aussi de la détérioration de l'hélice suite à l'apparition de la corrosion.

Ces simulations réduisent énormément les coûts d'essai de prototypes accélérer le développement. Cette approche combinée — maîtriser la mécanique de l'hélice tout en tirant parti de la simulation — marque une avancée significative dans le secteur maritime, alliant efficacité, économie et respect de l'environnement.

En somme, l'alliance entre une compréhension approfondie du fonctionnement mécanique et la maîtrise des outils de simulation constitue la clé pour relever les défis énergétiques et environnementaux du transport maritime de demain.

Références bibliographiques

- [1] **Y. CHANG, HU, CH. TU, J., Y. CHOW**; Experimental investigation and numerical prediction of cavitation incurred on propeller surfaces. Journal of Hydrodynamics, Vol.22,N°5, pp : 722-727, 9thInternational Conference on Hydrodynamics, (11-15 October),Shanghai, China. 2010.
- [2] **C. LIFANTE, T.FRANK, K. RIECK**. Investigation of pressure fluctuations caused by turbulent and cavitating flow around a P1356 ship propeller. NAFEMS Seminar: Simulation CFD, (10-11March), Wiesbaden, Germany 2008.
- [3] **L.D. QING**; Validation of RANS Predictions of Open Water Performance of a Highly Skewed Propeller With Experiments SSPA Sweden AB, Goteborg, Sweden.
- [4] **S.BELHENNICHE** ; Thèse de magister « Simulation numérique de l'écoulement autour d'une hélice marine en présence de la cavitation ».Département de génie maritime. USTO. Oran. Algérie.2016.
- [5] <http://seme.cer.free.fr>plaisance>hélices et propulsion>. PDF.
- [6] **K. BOUMEDIENE** ; Thèse de doctorat « Analyse numérique des performances hydrodynamiques d'une hélice marine à grand dévers ». Département Génie mécanique USTO. Oran. Algérie.2019.
- [7] **M.AUCHER** ; Techniques de l'ingénieur. Hélices marines - B4360w1.10 février 1996.
- [8] <http://www.fao.org/3/X0487F/X0487F05.htm>.Mesures techniques-Hélice.
- [9] **R. PERRET** ; La cavitation : une introduction. Article : 099. Encyclopédie de l'énergie. Sources renouvelables. Avril 2016.
- [10] **C.E.BRENNEN**; Cavitation and bubble dynamics. Number44. Oxford University Press, pp : 10, 1995.
- [11] https://fr.wikipedia.org/wiki/Extrados_aéronautique.

[12] <https://lemarin.ouest-france.fr/articles/detail/>.

[13] <http://www.nauticexpo.fr/fabricant-bateau/tuyere-helice-20186.html>.

[14] http://www.er-france.fr/helice_pales_fixes.html.

[15] <http://www.nauticexpo.fr/prod/abb-marine/product-30709-461731.html>.

[16] **DJ. BOUCETTA**; Thèse de doctorat «Etude de la cavitation autour des hélices marines»
Department of marine engineering, Faculty of mechanical engineering, University of Sciences
and Technology of Oran, USTO, Oran, Algérie. 2017.

[17] **J.L. KEROUANTON**, « De la théorie au modèle : les hélices comme sculptures
calculées, le cas des fonderies de l'Atlantique à Nantes », mis en ligne le 19 mai 2009.

[18] **J.S. CARLTON**; City University London President of the Institute of Marine
Engineering Science and Technology. 2010.

[19] **I. YASAR ARGUN ISIN**; Eléments d'architecture navale. Docteur en Sciences
Appliquées. Ingénieur Civil des Constructions Navales. Océanologue. 2007.

[20] <https://www.solidworks.com/fr/product/all-products>

[21] **J.P. LOUYOT**. (2006). L'hélice marine : théorie et application.

[22] **H. RAMMAL**. Mémoire d'ingénieur Cnam, Conception et étude d'un bateau trimaran.
2011.

[23] **O. LECLERCQ**. Mémoire de maîtrise. Conception d'une entrée d'eau à géométrie
variable pour la propulsion hydrojet d'un véhicule marin. Université de Sherbrooke. Faculté
de génie. Département de génie mécanique. Québec, Canada. 2012.