

**UNIVERSITÉ MARITIME DE CONSTANTA
FACULTÉ D'ÉLECTROMÉCANIQUE NAVALE
DÉPARTEMENT D'INGÉNIERIE MÉCANIQUE**

THÈSE DE DOCTORAT

**CONTRIBUTIONS À L'ÉTUDE
SUR LA DYNAMIQUE DE
L'ÉCOULEMENT ET DE LA
CAVITATION DANS L'UTILISATION
DES DISPOSITIFS NAVALS
DE TYPE TUYÈRE**

Directeur de recherche:

Prof. Dr. - Ing. Nicolae BUZBUCHI

Doctorant:

Ing. George MARTINAȘ

2015

ABRÉGÉ

Ayant un fort caractère interdisciplinaire, d'une grande complexité, la thèse dans son ensemble représente une étape importante dans l'étude de la dynamique de l'écoulement et de la cavitation de certains dispositifs navals de type tuyère.

Compte tenu du fait que la réduction de la consommation de carburants, au cours des dernières décennies, est en effet un cible majeure de la stratégie de l'industrie des transports maritimes commerciaux et des opérateurs de navires, étant donné que les prix des carburants sur les marchés peu mouvementés ont une tendance à la hausse et vu aussi la pluralité des éléments législatifs nationaux et internationaux apparus qui forcent l'industrie à utiliser diverses solutions pour réduire les émissions de SOx, NOx et de CO₂, les opérateurs mettent d'avantage la pression sur les constructeurs de navires en vue de trouver des solutions de conception qui puissent répondre aux exigences des nouvelles lois.

Afin d'augmenter l'efficacité des navires dans les termes décrits ci-dessus, pour les bateaux en services, des solutions plus simples ont été développées par le montage de dispositifs à la poupe. Toutes ces solutions et dispositifs sont connus sous le nom de "Energy Saving Devices" (ESD) ou Dispositifs d'Économie d'Énergie, parfois connus aussi comme technologies de "retrofit", (amélioration de l'efficacité énergétique). Étant classés en tant que dispositifs qui réduisent la résistance à l'avancement d'un navire et qui améliorent l'efficacité du système de propulsion, ce dernier groupe peut être divisé en dispositifs posés avant l'hélice, ceux qui sont installés juste devant l'hélice et dispositifs qu'on installe après l'hélice.

Le montage d'un tel dispositif W.E.D. (tuyère d'homogénéisation du sillage - qui constitue le sujet de cette étude) devrait se traduire par une efficacité accrue de l'hélice de 6-7%. Bien que l'étude de la performance d'un navire hydrodynamique puisse être divisée en trois catégories: "résistance à l'avancement et la propulsion", "comportement du navire en mer" et "maniabilité", les méthodes d'analyse de l'efficacité peuvent être classées selon trois approches différentes: **L'approche empirique:** ce mode de conception étant donné les coûts élevés impliqués dans la construction des modèles est considéré de nos jours comme une conception dépassée. **L'approche expérimentale,** soit par l'utilisation de modèles à l'échelle, soit à travers des essais en mer. Bien que les procédures pour la prédiction de la résistance sur la base de modèles à l'échelle réelle soient bien acceptés par la communauté scientifique, la validité est en réalité

difficile à réaliser et difficile à obtenir. **L'approche numérique** implique l'utilisation de la **DFC** (la Dynamique des Fluides Computationnelle). Ce type de conception est devenu, dans les temps modernes, indispensable à tout processus de conception. Les modèles DFC peuvent analyser des modèles numériques à l'échelle réelle pour toutes les parties d'intérêt du corps d'un bateau: coque avant, poupe ou le navire entier, mais ils sont fortement tributaires aux logiciels utilisés, à l'expertise des concepteurs et à la puissance de calcul disponible à un certain moment. Pour les modèles numériques, plus il y a de réseaux de volumes finis plus denses, plus la précision des résultats augmente en progression arithmétique, mais pour les modèles en 3D, la puissance de calcul nécessaire augmente en progression géométrique. Traditionnellement, lorsqu'un nouveau type de conception de la coque était développé, le flot de conception était du type conception - exécution du modèle-tests -re-conception -modèle final -....- conception - exécution du modèle-test du modèle final, exigeant une moyenne de 10 modèles à tester. Dans les temps modernes, les coûts associés à une telle approche sont prohibitifs, tandis que par l'utilisation de la génération géométrique de la coque par les systèmes CAO, on peut tester du point de vue numérique des centaines de variations de DFC avant d'atteindre la phase des essais avec le modèle à l'échelle, ce qui rend possible aussi l'optimisation de formes, comme nous le verrons dans un des chapitres suivants de cet ouvrage. La conséquence de l'augmentation de l'impact des simulations numériques depuis 1980 jusqu'à aujourd'hui est que les commandes pour les bassins d'essais pour tester les modèles à l'échelle ont fortement diminué, celles-ci étant reorientées vers les tests conduisant à un réglage fin des tests numériques DFC.

Cette thèse, par ses objectifs, suivra l'Approche numérique par simulation de la présence d'une tuyère de type W.E.D. (d'homogénéisation du sillage) en termes de la dynamique de l'écoulement et de la cavitation.

Mots-clés :

Modélisation géométrique, CAO - Conception Assistée par Ordinateur, Eléments de Mécanique des fluides, Hydrodynamique de l'hélice marine, Cavitation, D'optimisation de la géométrie numérique WED.

La table de matières de la thèse de doctorat est la suivante

CHAPITRE 1	11
1 CHAPITRE 1. NÉCESSITÉ ET OPPORTUNITÉ DU THÈME PROPOSÉ. OBJECTIFS	11
1.1 INTRODUCTION	11
1.2 OBJECTIFS DE LA THÈSE	13
1.3 REMERCIEMENTS	13
2 CHAPITRE 2. ÉLÉMENTS DE MÉCANIQUE DES FLUIDES	15
2.1 DYNAMIQUE DES FLUIDES	15.
2.2 INFLUENCE DU NOMBRE DE REYNOLDS ET MACH SUR LA DÉFINITION DE L'ÉCOULEMENT DES FLUIDES	24
3 CHAPITRE 3. STADE ACTUEL DE LA MÉTHODE DES VOLUMES FINIS ET OPTIMISATION NON LINÉAIRE	55
3.1 FONDEMENTS MATHÉMATIQUES DE L'ANALYSE NUMÉRIQUE DE LA DYNAMIQUE DES FLUIDES	55
3.2 PRINCIPES DE L'OPTIMISATION	96
3.2.1 Méthodes d'Optimisation	97
3.2.2 Méthode d'Approximation par „Sous-problème”	99
3.2.3 Méthode d'Optimisation de Premier Ordre	101
3.2.4 Conception paramétrique et théorie du Plan d'Expérience (DOE)	103
4 CHAPITRE 4. HYDRODYNAMIQUE DE L'HÉLICE MARINE.....	107
4.1 ÉLÉMENTS THÉORIQUES CONCERNANT LA HYDRODYNAMIQUE DE L'HÉLICE MARINE – ANALYSE ET CONCEPTION -	107
4.1.1 Introduction	107
4.1.2 Méthode du disque rotatif	111
4.2 LA CAVITATION DES HÉLICES MARINES.....	136
4.2.1 Introduction	136
5 CHAPITRE 5. MODELISATION MATHÉMATIQUE DE L'ÉCOULEMENT DU FLUIDE AUTOUR DU CORPS DU BATEAU AVEC ET SANS TUYÈRE SCHNEEKLUTH EN PRÉSENCE OU ABSENCE DE LA CAVITATION.....	159
5.1 INTRODUCTION	159
5.2 MODÈLE NUMÉRIQUE	161
5.2.1 Conditions communes de tous les modèles ANSYS-CFX	163.
5.2.2 Conditions communes des modèles CFX avec cavitation	169
5.3 ANALYSE NUMÉRIQUE PAR CFX DES MODÈLES AVEC ET SANS TUYÈRE W.E.D. (HOMOGENÉISATION DU SILLAGE) ET SANS CAVITATION - ÉTUDE COMPARATIVE	171
5.3.1 Analyse des pressions dans les plans de contrôle P1 et P2	171
5.3.2 Analyse des vitesses dans les plans de contrôle P1 et P2	172
5.3.3 Analyse des vitesses dans le plan de contrôle P3	173
5.3.4 Analyse des pressions dans le plan de la surface cible de contrôle	174

5.3.5 Analyse des vitesses dans le plan de la surface cible de contrôle	176
5.3.6 Analyse des pressions sur l'hélice	177
5.3.7 Analyse de la composante de l'axe Oz de la force d'interaction entre l'hélice et le fluide (la propulsion sur l'axe Oz)	178
5.3.8 Analyse des lignes de courant et des trajectoires décrites par les particules de fluide partant de la couche limite à l'orifice d'entrée (Inlet)	180
5.3.9 Analyse des lignes de courant et des trajectoires décrites par les particules de fluide partant de la zone de frontière à l'orifice de sortie (Outlet)	182
5.3.10 Analyse des lignes de courant et des trajectoires décrites par les particules de fluide partant de la zone de l'hélice	183
5.4 ANALYSE NUMÉRIQUE PARCFX DES MODÈLES AVEC ET SANS TUYÈRE W.E.D. (HOMOGÉNÉISATION DU SILLAGE) - ET AVEC CAVITATION - ÉTUDE COMPARATIVE.....	184
5.4.1 Analyse des pressions dans les plans de contrôle P1 et P2	184
5.4.2 Analyse des vitesses dans les plans de contrôle P1 et P2	185
5.4.3 Analyse des vitesses dans le plan de contrôle P3	186
5.4.4 Analyse des pressions dans le plan de la surface cible de contrôle	187
5.4.5 Analyse des vitesses dans le plan de la surface cible de contrôle	189
5.4.6 Analyse des pressions sur l'hélice	190
5.4.7 Analyse de la composante de l'axe Oz de la force d'interaction entre l'hélice et le fluide (la propulsion sur l'axe Oz)	191
5.4.8 Analyse des lignes de courant et des trajectoires décrites par les particules de fluide partant de la couche limite à l'orifice d'entrée (Inlet)	192
5.4.9 Analyse des lignes de courant et des trajectoires décrites par les particules de fluide partant de la zone de frontière à l'orifice de sortie (Outlet)	194
5.4.10 Analyse des lignes de courant et des trajectoires décrites par les particules de fluide partant de la zone de l'hélice	195
5.4.11 Analyse de la fraction volumique de vapeur dans la zone de l'hélice	196
5.4.12 Analyse du coefficient de pression dans la zone de l'hélice	197
6 CHAPITRE 6. RESULTATS DU CALCUL DE L'OPTIMISATION NUMÉRIQUE DE LA GÉOMÉTRIE W.E.D. À L'ENTRÉE DANS LA ZONE DE L'HÉLICE	199
6.1 INTRODUCTION	199
6.2 DÉTERMINATION DE LA SURFACE DE RÉPONSE ET DU CANDIDAT OPTIMAL	199
6.2.1 Le Candidat Optimal	199
6.2.2 Analyses de sensibilité	205
6.3 ANALYSE COMPARATIVE DU PROJET INITIAL ET DU PROJET OPTIMISÉ	211
7 CHAPITRE 7. VALIDITÉ QUALITATIVE DES MODÈLES.....	215
7.1 Le Comité de Spécialité en Propulseurs Non-conventionnels – Rapport final et recommandations de la XXII-ème conférence IFCT (L'Institut de Formation et de Coopération Technique)	215
7.2 Validité Qualitative	216
8 CHAPITRE 8. CONTRIBUTIONS PERSONNELLES, CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS CONCERNANT LES DIRECTIONS DE RECHERCHE À SUIVRE	227
8.1 CONCLUSIONS. CONTRIBUTIONS PERSONNELLES	227
8.2 RECOMMANDATIONS CONCERNANT LES DIRECTIONS DE RECHERCHE À SUIVRE	230
9 BIBLIOGRAPHIE	231

La thèse contient 8 chapitres, des figures, des tableaux, des équations et des relations mathématiques, plus de 70 titres bibliographiques et plus de 220 pages, des chiffres statistiques qui expriment l'ampleur de la tâche. Les chapitres sont présentés dans un ordre logique, afin de faciliter la compréhension à la fois de la base théorique et surtout de l'apport original de cet ouvrage.

Pour atteindre ces objectifs, les chapitres sont ordonnés suivant une succession logique. L'appareil mathématique est introduit de manière à faciliter la compréhension des fondements théoriques de l'ouvrage. Ainsi, le premier chapitre (chapitre 1), intitulé «Nécessité et opportunité du thème et objectifs proposés», affirme l'actualité et l'importance du sujet. C'est un chapitre introductif qui définit la motivation de la recherche et présente également un aperçu du stade actuel, ce qui denote une étude approfondie de la littérature concernant la recherche dans le domaine. On y passe en revue les opinions controversées, ce qui rend le sujet d'actualité et on y souligne également l'importance de l'ouvrage. Comme on le sait, les opérateurs des flottes des navires commerciaux sont constamment sous la pression des organismes de réglementation pour réduire le consommation de carburant, ce qui fait qu'on a développé pour les navires en service des solutions simples pour le montage de dispositifs à l'arrière, de sorte que leur efficacité, exprimée dans les termes ci-dessus, puisse augmenter.

Toutes ces solutions et dispositifs sont connus sous le nom de Energy Saving Devices ou Dispositifs d'Économie d'Énergie (DEE), parfois connus comme technologies de "retrofit" (amélioration de l'efficacité énergétique). L'utilisation ces dispositifs promus par les constructeurs des bateaux visant à une efficacité accrue, comme par exemple la tuyère WED, (Wake Equalising Duct – Tuyère d'homogénéisation du sillage, qui fait l'objet de cette étude) devrait se traduire par une amélioration de la propulsion par 6-7%, mais tout constructeur qui devra préciser ces chiffres dans les contrats, fera preuve de retenue quant à les garantir. Souvent, ces chiffres sont donnés d'une manière générale, sans définir le mode de calcul et de mesure, de telle manière qu'on comprend la suspicion avec laquelle ils sont regardés par les opérateurs. En outre, les taux d'avantages dans la zone des 5-7% sont en effet dans la marge d'incertitude des mesures, les nombres de Reynolds élevés décourageant l'utilisation des modèles pour les tests comme on le verra dans l'un des chapitres de cet ouvrage.

En ce qui concerne les objectifs de la thèse, ceux-ci sont structurés comme suit: le principal objectif est l'influence explicite de la présence de la tuyère W.E.D. en termes de dynamique de l'écoulement et de cavitation sur la propulsion des navires, ce qui inclut la:

- Modélisation géométrique de la poupe d'un porte-conteneurs avec et sans la tuyère WED, utilisant des techniques de conception assistée par ordinateur (CAO - Conception Assistée par Ordinateur)
- Modélisation numérique de l'écoulement autour d'une coque avec et sans tuyère WED, dans les conditions de l'absence de la cavitation - d'étude comparative;
- Modélisation numérique de l'écoulement pass une coque avec et sans conduit WED, dans les conditions de la présence de la cavitation - étude comparative;
- Optimisation de la géométrie de la tuyère WED par l'utilisation des techniques avancées de conception de type ANSYS Design Explorer - logiciel de conception):

"Eléments de Mécanique des fluides" c'est le nom du Chapitre 2, qui, conjointement avec le Chapitre 3 intitulé "Stade actuel de la méthode des volumes finis et optimisation non linéaire", réexamine les principaux fondements théoriques de la thèse. Ainsi, après avoir spécifié les principaux concepts de la dynamique des fluides, la thèse explique l'influence des nombres de Reynolds et de Mach sur la définition de l'écoulement des fluides. Ensuite, on y trouve les fondations mathématiques de l'analyse numérique de la dynamique des fluides (CFD - Dynamique des Fluides Computationnelle). On y trouve aussi la description des principes d'Optimisation, avec les méthodes d'Optimisation et d'Approximation par sous-problème, ainsi que l'Optimisation de premier ordre. Le chapitre final présente la conception paramétrique et la théorie de DOE (le Plan d'expériences)

La "Hydrodynamique de l'hélice marine" est abordée dans le chapitre suivant, qui est en même temps, le titre du Chapitre 4. Les éléments théoriques de l'hydrodynamique des hélices marines et la présentation de la méthode du disque rotatif sont largement traités dans la première partie de ce chapitre. Les discussions sur la cavitation de l'hélice marine sont les thèmes qui concluent ce chapitre dédié à la part théorique.

Le Chapitre 5 est intitulé "Modélisation mathématique de l'écoulement du fluide autour de la coque avec et sans tuyère Schneekluth en présence ou en l'absence de la cavitation" et comprend la simulation numérique de l'écoulement avec et sans modélisation de la cavitation d'un fluide

autour de la coque avec et sans tuyère Schneekluth ainsi qu'une étude comparative. Le modèle numérique est défini, ainsi que la génération de la conception géométrique – la CAO de la poupe d'un porte-conteneur, et aussi les conditions aux frontières des "volumes négatifs" de la géométrie CAO qui est en effet l'écoulement de l'eau de mer. Ensuite on passe à l'analyse numérique par le logiciel CFX des modèles avec et sans tuyère WED, sans cavitation - étude comparative.

Un par un, on compare les simulations numériques d'un navire normal et d'un navire ayant une tuyère WED pour l'homogénéité du sillage, exactement dans les mêmes conditions d'écoulement et de convergence des solutions.

Chaque sous-chapitre jouit du bénéfice des conclusions tirées directement, commençant par l'analyse de la distribution des pressions dans divers plans de contrôle préétablis et se terminant par l'analyse de la composante sur l'axe Oz de la force d'interaction fluide-structure du navire qui montre une amélioration dans la propulsion de 4,64% en concordance avec les analyses moins «enthousiastes» existantes sur le marché. Dans la section suivante on a traité l'analyse numérique avec CFX des modèles avec et sans tuyère WED, cette fois en présence de la cavitation - étude comparative, qui introduit l'effet additionnel de la cavitation.

Il a été noté que la cavitation a une influence plutôt négative sur tous les aspects du fonctionnement de l'hélice, mais même l'avantage obtenu par l'installation de la tuyère WED est réduit de 4,64% à 3,19%, en concordance, cette fois, avec les analyses les plus pessimistes sur le marché. Un autre résultat théorique important est que la tuyère WED n'a aucune influence sur la cavitation de l'hélice, un résultat qui, même s'il semble décourageant, en fait, il clarifie le différend sur l'existence des faibles influences de la tuyère WED sur la cavitation. Tout simplement, les analyses présentées dans ce document n'ont pas relevé un tel aspect au delà de tout doute.

Les conclusions tirées sont très pertinentes pour l'étude de l'efficacité de l'installation de ces dispositifs, mais également pour l'influence des dispositifs sur la cavitation, cette influence étant décrite dans ce chapitre.

Dans le Chapitre 6, intitulé «Résultats du calcul, d'optimisation de la géométrie numérique WED à l'entrée dans la zone de l'hélice», compte tenu du fait qu'en raison de la diversité géométrique des coques des navires, on ne peut trouver une tuyère WED universelle qui puisse correspondre à tous les types de navires, donc ce chapitre présente le processus nécessaire

d'optimisation afin de choisir la solution la plus viable. Les différences de géométrie impliquent de différentes conditions d'écoulement dans la zone de la poupe qui sont influencées aussi par la vitesse de croisière particulière du navire, de sorte que chaque tuyère WED devrait être "adaptée" pour mieux convenir à la situation réelle. Une tuyère WED mal conçue non seulement ne va pas améliorer les performances du navire mais elle va même les préjudicier. Le processus par lequel on peut trouver la géométrie optimale de la tuyère WED est le processus d'optimisation assistée par ordinateur.

Tout projet réussi est, comme on le sait, le résultat d'une "négociation" entre les différents objectifs et paramètres de conception, souvent contradictoires. À cet égard, il est nécessaire "d'explorer" un projet donné et cela ne peut être fait en ayant une seule variable de réalisation de ce projet. Plusieurs "points de conception" ou variantes de projet obtenues en faisant varier ces paramètres (données de conception ou dates d'entrée) seront nécessaires afin d'avoir suffisamment d'informations pour quantifier l'influence de chaque paramètre "entré" (paramètres géométriques, de résistance du matériau base, charges, éléments porteurs etc.) sur les paramètres "de sortie" (qui peuvent être des sollicitations équivalentes, vitesses du fluide, des pressions dans certaines zones etc.). La relation entre les paramètres d'entrée variables du projet et les paramètres de sortie qui permettent de quantifier la performance du projet est réalisée par le Plan d'Expériences (DOE - Design of Experiments) combiné avec la méthodologie des surfaces de réponse (RSM). Tout d'abord, en fonction du nombre de paramètres d'entrée du projet on détermine le nombre de points de conceptions par la méthode du Plan Central Composite (CCD - Central Composite Design). Par cette méthode, l'espace de conception est rempli avec un nombre suffisant de points projetés, afin qu'on puisse tracer des surfaces de réponse crédibles. L'espace de conception est donné par les valeurs maximales et minimales entre lesquelles chaque paramètre d'entrée peut être varié.

Le Chapitre 7, intitulé «Validité des modèles qualitatifs," note l'impossibilité de tirer des conclusions par les tests avec la tuyère WED sur des modèles à l'échelle de type Froude à cause des effets des nombres de Reynolds et à cause des niveaux de séparation entre les lignes de courant. Les résultats obtenus par l'utilisation des modèles à l'échelle ont été comparés avec les résultats obtenus par d'autres chercheurs. Dans ce contexte, l'auteur a examiné les effets de WED sur un navire transportant des produits chimiques. Les graphiques des surfaces de réponse et les graphiques de sensibilité, montrant comment et jusqu'à quel point les paramètres d'optimisation

influencent des paramètres de sortie, dans notre cas, la pression qui se développe à l'intérieur de la tuyère WED et la vitesse du fluide à travers la surface d'entrée dans la zone de l'hélice sont les résultats pratiques les plus importants de la thèse.

Le Chapitre 8, intitulé "Contribution personnelles. Conclusions et recommandations- concernant les directions de recherche a suivre.