

6e JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

24, 25, 26 février 1997 - Nantes

**ETUDE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE DU SILLAGE
EN AMONT D'UNE HELICE**

Jean-Christophe PINARD et Stéphane CORDIER
Bassin d'essais des carènes, Chaussée du Vexin
27100 Val de Reuil

Résumé

La présence d'appendices en amont du propulseur modifie son fonctionnement : nombre de tours, poussée, cavitation, rendement et bruit. Il est donc nécessaire de connaître cet écoulement pour améliorer la forme des hélices, ainsi que les interactions carène-propulseur. Dans ce but, on étudie l'interaction des sillages de la carène et de la ligne d'arbres au moyen d'essais sur modèles de carènes et des géométries simplifiées et par la modélisation numérique de cet écoulement grâce à l'utilisation d'un code Navier-Stokes.

Summary

The presence of appendages upstream of a propeller on a ship modifies its hydrodynamic performances : rotation speed, thrust, efficiency, cavitation, noise. Hence, it is necessary to improve our knowledge of the wake on the stern in order to improve propeller designs and propeller hull interactions. To this aim, we have studied the interaction between the wake of the hull and that of the appendages using tests on hull models and on a simplified geometry and by numerical modelisation using Navier-Stokes code.

INTRODUCTION

La connaissance de l'écoulement en amont d'une hélice est une donnée essentielle pour sa conception. Sur les navires dont les arbres d'hélices sont portés par des chaises, l'écoulement est perturbé par la présence de la carène et de ses appendices : arbre d'hélice, chaises et bras de chaises (voir figure 1).

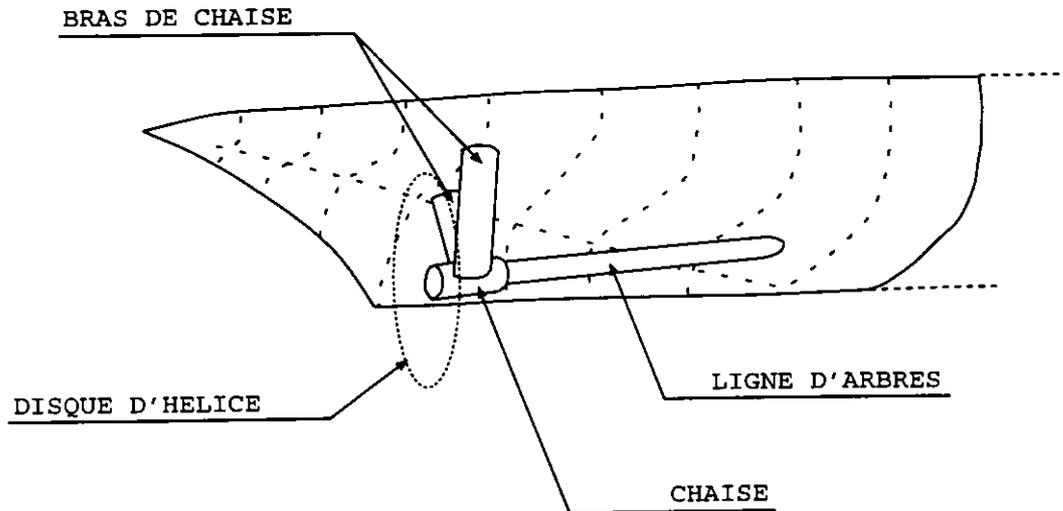


Figure 1: Carène avec appendices

Cette étude a pour but la prévision de l'écoulement autour de la carène avec appendices et l'évaluation des effets d'échelle en vue de l'extrapolation des mesures réalisées sur maquette au cas réel. Dans la perspective d'une aide à l'architecte, la modélisation de l'interaction du sillage de la carène et de ses appendices permettra d'optimiser la géométrie des appendices afin de réduire la traînée et les ralentissements dans le disque d'hélice au réel.

La capacité de prévoir et de modéliser l'écoulement de sillages est aussi importante pour la conception de générateurs de sillage. On peut ainsi augmenter la taille de modèles des hélices et éviter la réalisation de maquettes de carènes onéreuses lors des essais de propulseurs en tunnel de cavitation.

La démarche adoptée repose sur une approche expérimentale et numérique de l'interaction des sillages de la carène et de ses appendices et plus particulièrement de la ligne d'arbres.

La plupart des modélisations numériques actuelles se font sur des carènes nues. Les codes employés reposent, dans l'ensemble, sur la résolution des équations de Navier-Stokes. Le maillage du domaine fluide 3D est de topologie structurée et de réalisation assez simple en l'absence d'appendices. Par exemples, Patel [1], Stern [2], Tzabiras [3], Swean [4], Liu [5], Piquet [6] ou Alessandrini [7] utilisent ce type de modélisation pour des carènes entières avec ou sans surface libre.

A contrario, en présence d'appendices, l'emploi de maillages structurés multiblocs, non-structurés, ou hybrides se révèle incontournable. Ainsi, Bertram [8] et Wen Lin [9] emploient des maillages structurés multiblocs sur des bâtiments à une ou deux lignes d'arbres, et Pineau [10] utilise un maillage non-structuré pour modéliser des "bossings" des sorties d'arbres. En général, la complexité du maillage génère des cas de calculs avec d'importants nombres de mailles. En effet, l'épaisseur de la couche limite, des décollements ou des points d'arrêts sur les appendices nécessitent un grand nombre de cellules.

Compte tenu de ces difficultés, on cherche à terme à réaliser une modélisation de l'écoulement autour de la carène avec appendices basée sur une procédure soit purement numérique, soit couplée à des résultats expérimentaux.

ETUDE EXPERIMENTALE

Sillage de la carène avec et sans appendices

Une campagne d'essais a été menée dans le Grand Tunnel Hydrodynamique (G.T.H.) du Bassin d'essais des carènes sur 2 maquettes de 6.65 m de long de l'avis escorteur Commandant Rivière, l'une pourvue d'appendices et l'autre sans. Le diamètre des disques d'hélice est de 240 mm à l'échelle du modèle.

La veine fermée est de section rectangulaire ($1.35 \times 2 \text{ m}^2$) et mesure 10 mètres de long. Des cartes de vitesse obtenues par vélocimétrie laser 3D pour 3 nombres de Reynolds ($Re_1=8.7 \cdot 10^6$, $Re_2=4.0 \cdot 10^7$ et $Re_3=7.3 \cdot 10^7$) servent de base à l'identification d'effets d'échelles et d'appendices. Les cartes de sillage sont réalisées à l'aide de 260 points de mesure représentant chacun 1000 échantillons environ.

A partir des cartes de sillage de la carène avec et sans appendices réalisées à différents nombres de Reynolds, il est possible d'étudier :

- l'effet du nombre de Reynolds sur la carène sans appendices
- l'effet du nombre de Reynolds sur la carène avec appendices
- l'effet des appendices
- l'effet du nombre de Reynolds sur l'effet des appendices

Le tableau 1 résume l'ensemble des comparaisons effectuées (seuls les 2 nombres de Reynolds extrêmes sont utilisés) :

	Re_1	Re_3	Effet du nombre de Reynolds
Carène sans appendices	A	B	B-A
Carène avec appendices	C	D	D-C
Effet des appendices	C-A	D-B	D-B+A-C

Tableau 1: Résumé des comparaisons effectuées

Sillage de la carène sans appendices (cas A et B)

Les bâtiments à 2 lignes d'arbres se caractérisent généralement par la finesse de leur carène. De ce fait, la couche limite, qui est turbulente dès l'avant du navire, ne décolle pas sur l'arrière-corps. L'hélice généralement située sous la carène travaille donc principalement dans une zone d'écoulement irrotationnel. Ainsi sur la carène dépourvue d'appendices, seule une zone d'écoulement ralentie correspondant au sillage de la carène affecte la partie supérieure du disque d'hélice (figure 2.a).

Effet du nombre de Reynolds sur la carène sans appendices (cas B-A)

On constate que la zone du disque d'hélice concernée par le sillage de la carène est d'autant plus petite que le nombre de Reynolds est élevé.

Sillage de la carène avec appendices (cas C et D)

Sur la carène avec appendices, les mesures (figure 2.b) mettent en évidence une zone de ralentissement marquée qui s'étend en dehors du sillage de la carène nue ($U_x < 0.7U_{veine}$) dans l'espace entre les bras de chaises et la carène. Le ralentissement propre aux bras de chaises est facilement discernable ($U_x < 0.8U_{veine}$).

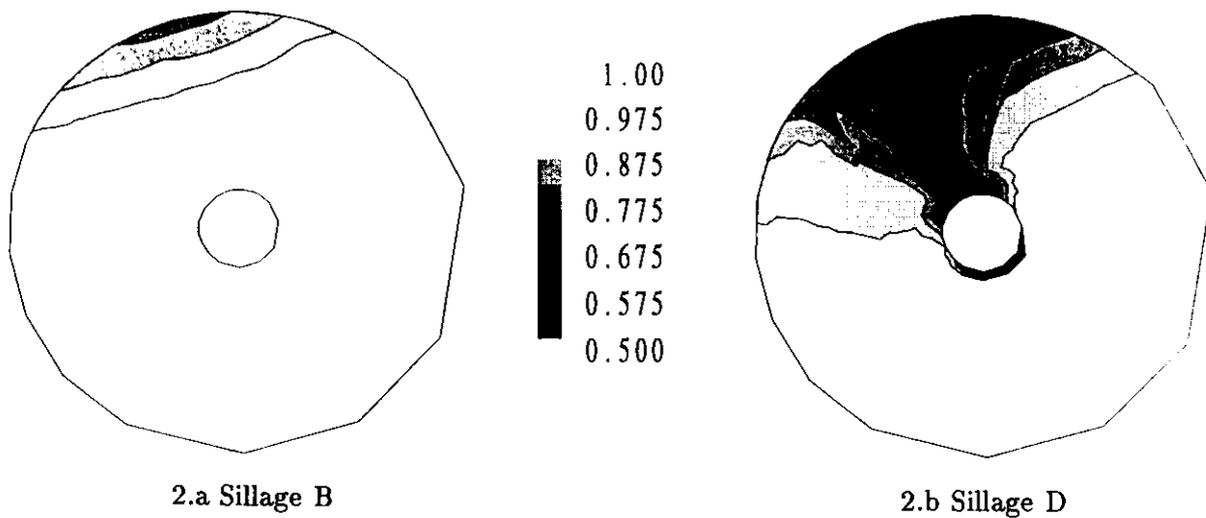


Figure 2: Sillage de la carène sans et avec appendices (Re_3), Composante longitudinale de la vitesse rapportée à la vitesse veine dans le disque d'hélice tribord

Effet du nombre de Reynolds sur la carène avec appendices (cas D-C)

La soustraction des cartes de sillage de la carène avec appendices à différents nombres de Reynolds (figure 3.a) montre que :

- les effets d'échelle sont importants sur la carène, notamment sur la partie de l'écoulement en aval de la ligne d'arbres.
- les effets d'échelle sur les bras de chaise ne sont pas identiques sur toute la longueur du bras, avec des écarts de ralentissement de l'ordre de 50 %. Plus l'on se rapproche de la carène, moins le ralentissement produit par les appendices est visible : ils sont noyés dans le sillage de la carène.

Effet des appendices (cas C-A et D-B)

On peut mettre en évidence le ralentissement des appendices par différence des cartes de sillage sur la carène avec et sans appendices. La figure 3.b (nombre de Reynolds Re_1) montre que :

- le sillage des bras de chaises est faible, ce qui témoigne de leur bon alignement dans l'écoulement. On justifie ainsi le fait qu'ils soient délaissés dans la modélisation numérique ultérieure.
- le ralentissement propre à la ligne d'arbres se ressent dans le disque d'hélice sur toute la distance séparant la chaise de la couche limite de la carène.

Effet du nombre de Reynolds sur l'effet des appendices (cas D-B+A-C)

La figure 4 a été obtenue en effectuant la différence des effets d'appendices à des nombres de Reynolds différents (Re_3-Re_1). Plusieurs constatations s'imposent :

- la présence des bras de chaises a un effet sensiblement identique pour des nombres de Reynolds différents.
- le ralentissement relatif en aval de la ligne d'arbres augmente sensiblement lorsque le nombre de Reynolds croit.

Comparaison avec des essais sur des appendices seuls

Une campagne d'essais réalisée sur des appendices seuls (soit en l'absence du sillage de la carène) montre des ralentissements extrêmement faibles en aval des appendices. Le sillage de la ligne d'arbres, en particulier, n'est discernable qu'aux plus petits rayons du disque d'hélice.

Ces observations montrent l'existence d'une interaction entre le sillage de la carène et celui

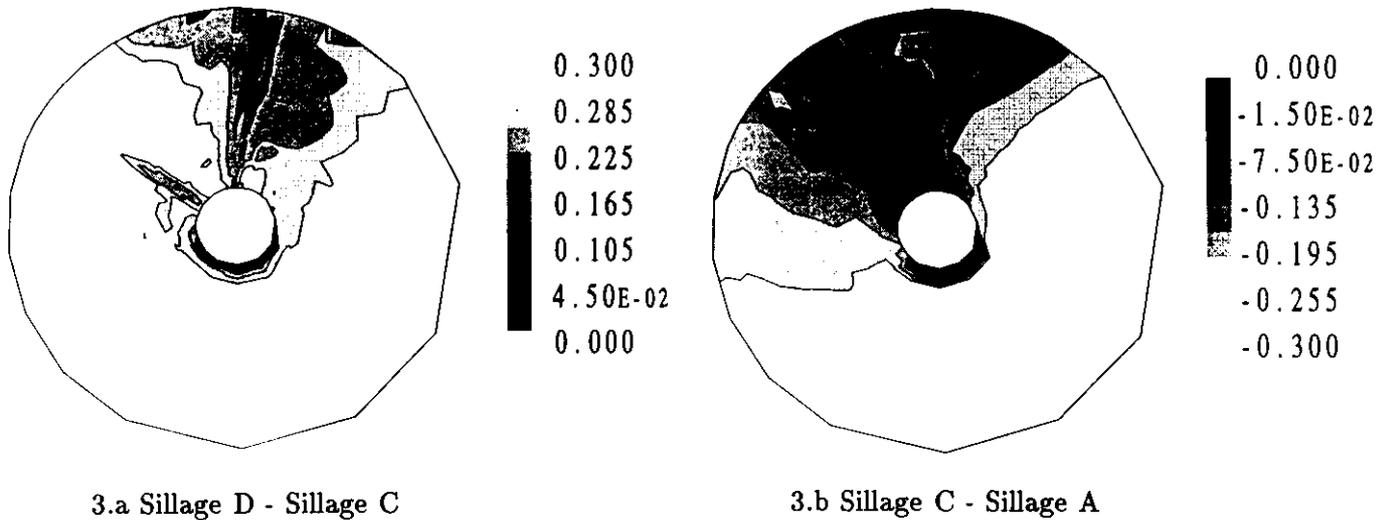


Figure 3: Effet du nombre de Reynolds sur la carène avec appendices et effet des appendices, Composante longitudinale de la vitesse rapportée à la vitesse veine dans le disque d'hélice tribord



Figure 4: Effet du nombre de Reynolds sur l'effet des appendices (Re_3-Re_1), Composante longitudinale de la vitesse rapportée à la vitesse veine dans le disque d'hélice tribord

de la ligne d'arbres. Cette interaction pourrait avoir comme origine la présence d'un gradient de vitesse au sein de la couche limite qui crée un gradient de pression négatif vers l'aval le long de la ligne d'arbres. La présence de l'arbre d'hélice faiblement incliné aurait alors pour effet de "pomper" une partie du sillage de la carène vers l'écoulement externe.

La modification de cette interaction lorsque le sillage de la carène diminue (nombre de Reynolds élevé) atteste de la complexité de l'écoulement.

Sillage d'un cylindre incliné immergé dans une couche limite

Pour aider à la compréhension de cet écoulement, un essai a été réalisé sur une géométrie simplifiée dans la Petite Veine Hydrodynamique (P.T.H.) du Bassin d'essais des carènes (section sans surface libre $0.6 \times 0.48 \text{ m}^2$ et 3 m de long) où un cylindre incliné est fixé au plafond de la veine sur lequel se trouve une couche limite.

Le but de cet essai est d'acquérir une meilleure connaissance de l'interaction du sillage de la ligne d'arbres et de la carène par une étude paramétrique. Dans cette étude, le plafond de la

veine est assimilé à la carène (voir figure 5) et le cylindre fixé à ce dernier représente la ligne d'arbres.

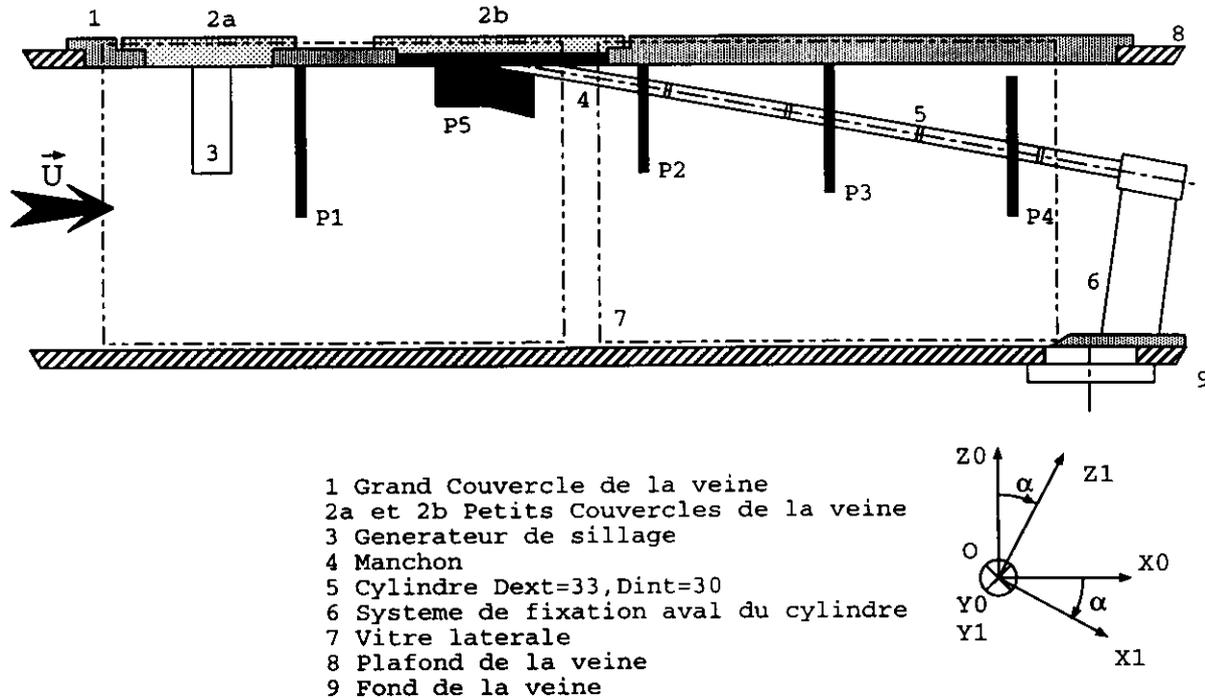


Figure 5: Schéma du montage expérimental du cylindre en veine

Les dimensions du cylindre sont en similitude d'échelle avec celles de la ligne d'arbres du modèle de la carène testée au G.T.H.. La vitesse d'écoulement et le diamètre du cylindre retenus assurent la similitude du nombre de Reynolds ($1.8 \cdot 10^5$) avec l'un des essais menés au G.T.H. sur l'avis-escorteur avec appendices.

Les essais sur le cylindre incliné comprennent 3 valeurs d'inclinaison (5, 8 et 12 degrés) et 3 épaisseurs de couche limite en amont de la liaison cylindre-plafond. La valeur centrale de 8 degrés correspond environ à l'angle d'incidence de la ligne d'arbres sur la carène par rapport à l'intersection de 2 plans perpendiculaires, l'un contenant l'axe de la ligne d'arbres et l'autre étant tangent à la carène. Les 3 profils de couche limite sont issus de la couche limite naturelle du plafond de veine et de la mise en place de 2 générateurs de sillage. En particulier, l'un de ces 2 générateurs fournit une couche limite proche de celle existante en amont de la liaison ligne d'arbres-carène sur le navire.

Afin de connaître le champ de vitesse le long du cylindre, 5 cartes de sillage ont été réalisées (figure 5, repères P1, P2, P3, P4, P5). Signalons que le plan P4 est à l'abscisse du disque d'hélice. Le champ de pression sur le cylindre est, quant à lui, mesuré grâce à 92 prises de pression disposées en 11 sections le long du cylindre. Les efforts de traînée de pression sont déduits par intégration des pressions.

Cette campagne d'essais (voir rapport [11]) a montré que les paramètres d'inclinaison et de profil amont à la liaison sont très influents sur le sillage dans le plan P4. Elle a confirmé l'hypothèse selon laquelle le sillage de la carène et celui de la ligne d'arbres étaient liés.

Les mesures en vélocimétrie laser (figure 6) prouvent que les lignes de courant suivent la ligne d'arbres. Ce phénomène perdure axialement sur une distance qui est d'autant plus grande que l'inclinaison est faible et que la couche limite est épaisse.

Globalement, les mesures de pression traitées montrent des valeurs de coefficient de pression très faibles (entre -0.15 et 0.03) comparativement à celles observées dans le calcul 2D fluide parfait d'un cylindre elliptique, valeurs comprises entre -1 et 1, et celles comprises avec un code 3D fluide parfait comprises entre -0.9 et 0.3.



Figure 6: Composante longitudinale de la vitesse mesurée rapportée à la vitesse veine dans les plans P1, P2, P3 et P4

ETUDE NUMERIQUE

Les efforts de modélisation numérique reprennent les 2 configurations d'essai : d'abord le cylindre incliné et ensuite la carène entière.

La modélisation repose sur l'utilisation du code RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) FLUENT. Les caractéristiques du code sont :

- Résolution des équations de Navier-Stokes-Reynolds par une méthode de volumes finis au second ordre
- Les équations sont discrétisées en coordonnées curvilignes et résolues par l'algorithme SIMPLEC
- Les composantes de la vitesse et la pression sont calculées au centre des volumes
- Fluide incompressible
- Modèles de turbulence employés : $k-\epsilon$ pour l'étude sur l'arrière-corps et le Renormalisation Group $k-\epsilon$ (RNG) pour la simulation autour du cylindre. Un des avantages de ce dernier par rapport au modèle $k-\epsilon$ est de mieux modéliser les zones de forts gradients, en particulier au point d'arrêt.

Modélisation de l'essai d'un cylindre incliné

Le but de cette partie numérique est de simuler une configuration de l'essai : un cylindre incliné de 8 degrés et un profil de couche limite en entrée du domaine fluide proche de celui sur la carène en amont de la liaison ligne d'arbres-carène. Le nombre de Reynolds est $Re_2 = 1.8 \cdot 10^5$.

Définition des frontières du domaine fluide

Le domaine fluide représente une demi-veine limitée par le plan de symétrie de la veine et un demi-cylindre. Le champ de vitesse mesuré au P.T.H. en amont de la liaison cylindre-plafond de veine est imposé sur le plan d'entrée du domaine fluide.

Maillage du domaine fluide

Des maillages de type structuré et non-structuré ont été utilisés. Dans le premier type, les calculs n'ont pas convergés malgré plusieurs tentatives de maillages. La faible inclinaison de la ligne d'arbres par rapport au plafond de veine génère des mailles très déformées. La convergence en version structurée est d'autant plus difficile que la plupart des cellules composant le maillage

n'est pas de forme parallépipédique.

Dans le cas du maillage non-structuré, le maillage créé des cellules tétraédriques de tailles régulières. Par ailleurs, dans ce cas, le schéma numérique est moins sensible aux déformations des mailles.

Afin de modéliser au mieux la couche limite du cylindre et du plafond de veine, une attention particulière est donnée à la taille des cellules tétraédriques au plus près de ces 2 parois. En ce sens, un sous-domaine limité par le cylindre et par une nappe cylindrique distante d'un rayon de la ligne d'arbres a été construit. Le cas de calcul a nécessité 88759 noeuds, 409802 cellules (figure 7).

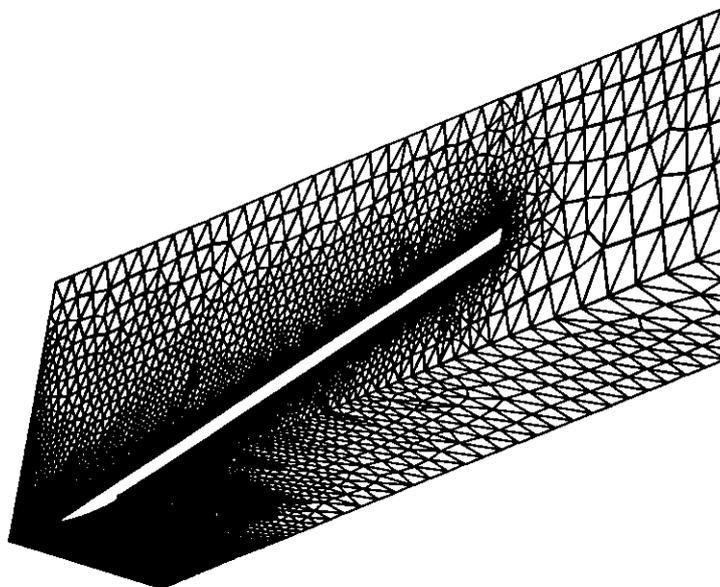


Figure 7: Représentation du maillage non-structuré du domaine fluide

Comparaison essai et modélisation numérique

Des coupes réalisées aux mêmes abscisses que celles des plans de mesure montrent des différences de l'ordre -6 à 14 % de la vitesse veine sur la composante longitudinale (figure 8) et ± 5 % de la vitesse veine sur la composante verticale selon les plans.

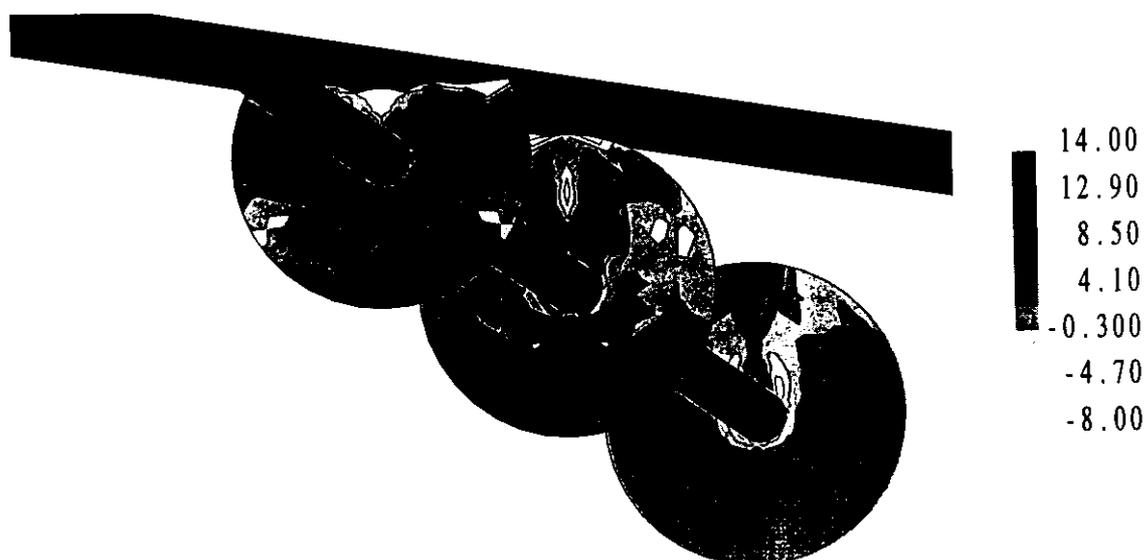


Figure 8: Différence des champs de vitesse expérimentaux - numériques rapportée à la vitesse veine (en %) dans les plans P2, P3, P4

La visualisation de lignes de courant montre que, comme lors des essais, une partie du fluide issue de la couche limite du plafond de veine suit le cylindre avant de le contourner.

Le champ de pression le long du cylindre a été intégré afin d'obtenir la traînée de pression et le coefficient associé C_{xp} (voir le tableau 2)

$$C_{xp} = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho S V_{ref}^2} \quad (1)$$

avec

$$S = DL \sin(\alpha) \quad (2)$$

où

D le diamètre et L la longueur du cylindre, α l'angle d'inclinaison du cylindre par rapport au plafond de veine (8 degrés)

	Expérimental	Numérique
Diamètre (m)	$33 \cdot 10^{-3}$	1
Vitesse veine (m/s)	5	1
Viscosité cinématique (m^2/s)	$9 \cdot 10^{-7}$	$5.45 \cdot 10^{-6}$
Nombre de Reynolds	$1.8 \cdot 10^5$	$1.8 \cdot 10^5$
C_{xp}	$1.09 \cdot 10^{-2}$	$1.37 \cdot 10^{-2}$

Tableau 2: Comparaison expérimentale et numérique Traînée et C_{xp}

Les C_{xp} sont très faibles, ce qui, ajouté aux imprécisions de mesure et d'intégration, peut expliquer en partie une différence de 25 % entre les valeurs expérimentale et numérique.

Les résultats de la modélisation numérique sont qualitativement similaires aux champs de vitesse mesurés. On remarque que le calcul sous-estime les vitesses dans la zone de formation de tourbillons (plan P3) et en aval dans la partie supérieure du disque (plan P4). Différentes raisons peuvent expliquer les écarts entre essai et calcul numérique :

- la taille des mailles relativement importante au plafond de veine. La capacité machine en terme de maillage n'a pas permis d'augmenter le nombre de cellules (déjà conséquent). Avec une plus grande capacité mémoire, la modélisation de la couche limite du plafond de veine pourrait être affinée.

- le modèle de turbulence peut être mis en cause sans pouvoir quantifier cet effet pour l'instant.

Ce cas de calcul, comme la campagne d'essais, a permis de vérifier l'hypothèse de l'interaction entre le sillage de la ligne d'arbres et celui de la carène.

Compte tenu du nombre de mailles nécessaire à une simulation réaliste de l'écoulement sur l'arbre, il est clair que le calcul du navire avec appendices imposera des tailles de maillages considérables, qui ne sont pas actuellement envisageables.

Modélisation de l'écoulement autour de l'arrière-corps sans appendices

En vue de la modélisation numérique de l'écoulement autour de la carène avec appendices, une première approche a consisté à modéliser l'écoulement autour de la carène nue.

Cette modélisation s'est faite en employant le code FLUENT dans sa version structurée et non-structurée. Seul l'écoulement sur l'arrière-corps nous intéressant, il est apparu judicieux de mailler le domaine fluide autour de cette seule partie. Le modèle de turbulence employé dans ce cas est le k- ϵ .

Définition des frontières du domaine fluide

Ce cas est traité en domaine confiné pour respecter les caractéristiques de la campagne

d'essais menée au G.T.H.. Dans un souci de rigueur, la section de la veine a été réduite de l'épaisseur de déplacement δ_1 donné dans le cas d'une plaque plane par la formule :

$$\delta_1 = \frac{1}{8}\delta \quad (3)$$

où δ est l'épaisseur de couche limite mesurée au fond ou sur des parois latérales de la veine.

Lors de la campagne d'essais, la carène avait été enfoncée d'une cote supérieure au tirant d'eau nominal afin que la couche limite du plafond de veine perturbe peu l'écoulement le long du navire. Cette caractéristique a été prise en compte dans le calcul. La couche limite du plafond est explicitement représentée dans la modélisation contrairement aux couches limites des parois latérales et du fond car elle est susceptible d'interagir avec le sillage de la carène.

Détermination précise du champ de vitesse dans le plan d'entrée du domaine fluide

Dans cette modélisation, le problème de l'initialisation du champ de vitesse dans le plan d'entrée du domaine fluide se pose. Il est résolu par le couplage du code potentiel CHERIE et du code de couche limite 3C3D utilisés au Bassin d'essais des carènes.

Le premier emploi des singularités de type sources de Rankine, lesquelles sont réparties de manière constante sur chaque facette de la carène, le fond et les parois latérales de la veine. Le problème est traité en domaine confiné avec 2 conditions de symétrie. Ce calcul est réalisé en domaine confiné afin d'être cohérent avec la modélisation RANS et les essais.

Le champ de vitesse ainsi calculé est utilisé pour le calcul de la couche limite grâce au code 3C3D. Ce code emploie les équations Navier-Stokes tridimensionnelles de couche limite mince. Il permet aussi de calculer une vitesse de transpiration normale à la carène correspondant au déplacement dû à la couche limite. On réinjecte cette modification dans le code CHERIE pour en déduire un nouveau champ de vitesse. Par itération successive, le code aboutit à un résultat convergé qui prend en compte l'effet de déplacement lié à la présence de la couche limite.

En somme, le champ de vitesse du plan d'initialisation est constitué :

- du profil de couche limite 3C3D sur la carène
- du profil de couche limite mesuré au plafond de veine
- du champ de vitesse fourni par le calcul CHERIE dans le reste de la section.

Détermination simplifiée du champ de vitesse dans le plan d'entrée du domaine fluide

On peut s'interroger sur la nécessité d'utiliser pour le calcul du champ de vitesse dans le plan d'initialisation le couplage CHERIE/3C3D. En effet, il nécessite la réalisation d'un maillage surfacique structuré de la carène et l'emploi de 2 codes.

La détermination du champ de vitesse dans le plan d'entrée est ici basée sur la formule 4 pour un écoulement 2D en assimilant la carène à une plaque plane dont le bord d'attaque serait en niveau de la proue.

$$\delta = 0.37 \left(\frac{U_{veine}}{\nu} \right)^{-0.2} x^{0.8} \quad (4)$$

La couche limite du plan d'entrée est donc d'épaisseur constante, contrairement à celle calculée par le code 3C3D [12] et par le rapport [13] qui montrent un épaississement de la couche limite près de la quille.

Modélisation avec un maillage structuré

La topologie retenue pour le maillage structuré monobloc est la topologie en O dans les plans perpendiculaires à la vitesse d'avance et en H dans la direction de la vitesse d'avance. Ces topologies sont bien adaptées pour ce type de navires.

Les calculs ont été menés pour les 3 nombres de Reynolds des essais en imposant dans le plan d'entrée successivement les 2 champs de vitesse déterminés précédemment.

Dans le premier cas, les résultats (figure 9) montrent des différences avec les mesures sur la composante longitudinale dans le plan du disque d'hélice de l'ordre de :

- > -3 à 9 % pour $Re=8.7 \cdot 10^6$
- > -3 à 4 % pour $Re=4.0 \cdot 10^7$
- > -2 à 12 % pour $Re=7.3 \cdot 10^7$

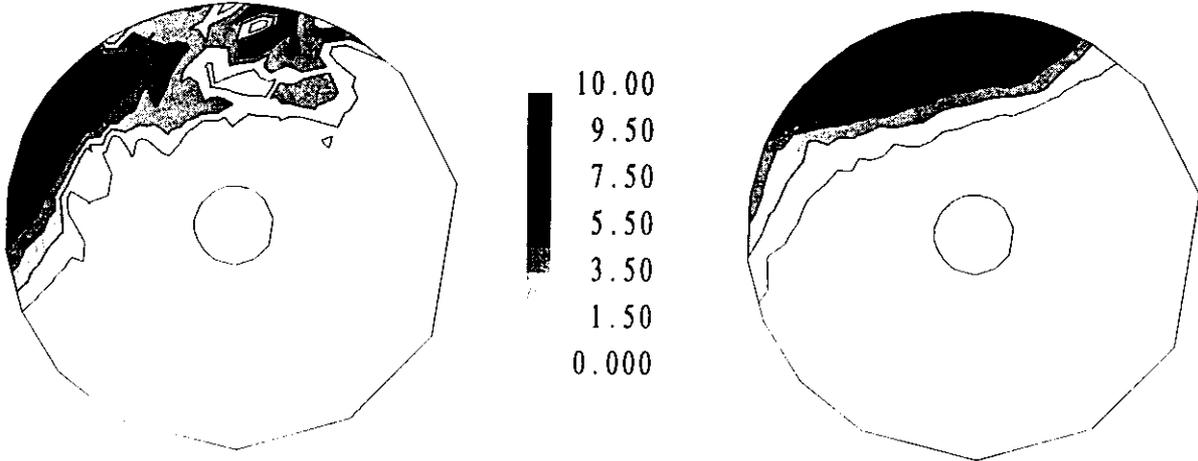


Figure 9: Différence expérimental - numérique pour Re_1 et Re_3 , Composante longitudinale de la vitesse rapportée à la vitesse veine (en %) dans le disque d'hélice tribord, maillage structuré

Ces résultats sont qualitativement satisfaisants. On notera que dans le cas du plus grand nombre de Reynolds (proche de 10^8), le calcul surestime l'épaisseur du sillage.

Dans le second cas (champ de vitesse du plan d'entrée déduit par assimilation de la carène à une plaque plane), les différences sur la composante longitudinale mesurée dans le plan du disque d'hélice se révèlent être supérieures aux précédentes valeurs de 3 % environ pour les 3 nombres de Reynolds.

L'influence du champ de vitesse amont est donc visible dans le plan du disque d'hélice. L'assimilation de l'avant du navire à une plaque plane n'est pas judicieuse et il est important de prendre la tridimensionnalité de l'écoulement. Le rapport [13] montre la convergence de lignes de courant émises près de la proue vers la quille du navire. Cette concentration de fluide épaissit la couche limite dans cette zone. Ce résultat est corroboré, comme il a été déjà remarqué, par ceux du code 3C3D. Des mesures dans le plan d'entrée du domaine de calcul seront réalisées dès que possible pour vérifier ce résultat.

Modélisation avec un maillage non-structuré

Le but de cette étude, rappelons-le, consiste à modéliser numériquement le sillage de l'arrière-corps du navire avec appendices. Dans cette configuration, la réalisation d'un maillage structuré monobloc est impossible. Le choix s'est porté sur la version non-structurée de FLUENT.

En première approche, seul le maillage de l'arrière-corps dépourvue d'appendices a été créé avec les mêmes caractéristiques que pour le maillage de type structuré : domaine confiné, couche limite au plafond de veine, et utilisation du profil de vitesse du plan d'entrée déduit du couplage des codes CHERIE/3C3D.

Le maillage du domaine fluide a été réalisé avec 115467 noeuds, 431348 cellules. Le calcul a convergé pour un nombre de Reynolds de $8.7 \cdot 10^6$. La comparaison essais et calcul montre une surestimation importante du sillage de la carène dans la modélisation numérique (figure 10). On constate une moins bonne détermination de l'écoulement par rapport à la modélisation

employant un maillage structuré (figure 9).

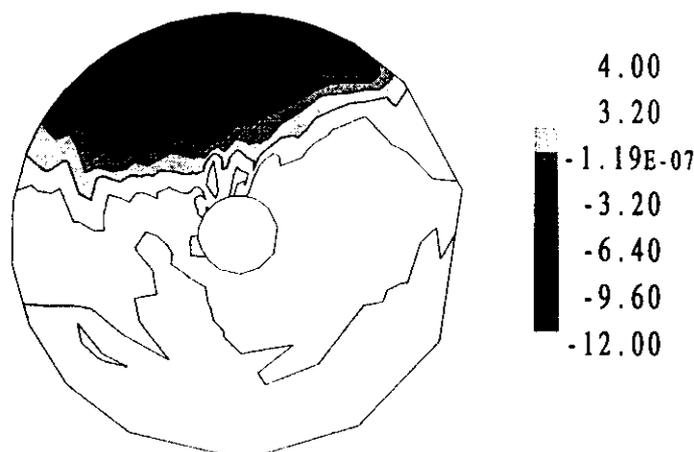


Figure 10: Différence expérimental - numérique pour Re_1 , Composante longitudinale de la vitesse rapportée à la vitesse veine (en %) dans le disque d'hélice tribord, maillage non-structuré

Ceci est imputable au fait qu'il n'y a que très peu de mailles (3 ou 4) réparties dans la couche limite du navire. En effet, l'inconvénient du maillage non-structuré est qu'il génère des cellules tétraédriques dont les 4 faces sont des triangles quasi-isocèles. Il est donc impossible de modéliser une couche limite mince sur un corps de grande surface sans un très grand nombre de cellules (estimé à 1 million dans notre cas). Ainsi, compte tenu des capacités machine que nécessiterait la réalisation d'un tel maillage non-structuré, il convient d'adopter un autre type de maillage pour une modélisation correcte de l'écoulement autour de la carène avec appendices. La possibilité d'utiliser un maillage hybride est à l'étude.

Conclusions

La modélisation numérique en maillage structuré au moyen du code FLUENT couplé aux codes CHERIE/3C3D fournit des résultats satisfaisants, mais perfectibles quand on compare les vitesses dans le plan de l'hélice aux faibles nombres de Reynolds. Les écarts augmentant lorsque le nombre de Reynolds croit. Une validation du plan d'entrée reste néanmoins nécessaire. Les différences observables ne semblent pas tant imputable au maillage, mais plus à la modélisation de la turbulence. A la fin des années 80, les codes de couche limite ont été délaissés au profit des codes RANS pour la détermination d'écoulements visqueux. Actuellement, la grande majorité des numériciens travaillant à la conception de codes RANS ont pour objectif une meilleure modélisation de la turbulence dans les différentes zones qui composent la couche limite et le sillage, et ceci pour des nombres de Reynolds élevés et des formes de corps quelconques.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Grâce à la campagne d'essais menée au G.T.H., il a été possible de caractériser le sillage des appendices sur un modèle en présence de la carène. Ces mesures et l'essai réalisé au P.T.H. ont permis de définir les paramètres qui influencent l'interaction des sillages de la carène et de la ligne d'arbres. L'extrapolation au réel du coefficient de sillage moyen dans le disque d'hélice pourra être réalisée à partir des mesures en fonction de la longueur de la ligne d'arbres, du diamètre du disque d'hélice, de son inclinaison et de l'épaisseur de couche limite amont à la liaison ligne d'arbres-carène.

La modélisation numérique de l'écoulement autour du cylindre incliné et autour de la carène nue ont permis d'obtenir de bons résultats comparativement aux essais. En particulier, il faut noter la complémentarité des codes CHERIE/3C3D/FLUENT pour le calcul du sillage

de l'arrière-corps sans appendices. Mais des progrès restent à faire dans la modélisation de la turbulence, en particulier à haut nombre de Reynolds ($> 10^8$).

Pour la modélisation du sillage de la carène avec appendices, l'emploi de la technique du maillage hybride semble être un bon compromis entre maillage structuré et non-structuré. Le maillage structuré est utilisé au plus près de la surface des appendices et de la carène (figure 11). Le maillage non-structuré est employé en dehors de la couche limite. Des quadrangles sont disposés sur la carène et des appendices au niveau de leur liaison. Ils serviront à la modélisation de la couche limite sur la carène. Des faces de forme triangulaire isocèle sont disposées sur le reste de la coque et les appendices. La couche limite est composée de prismes à section triangulaire qui ont pour base ces faces. Les tétraèdres du domaine maillé en non-structuré prolongent le maillage dans le reste du domaine en prenant appui sur la surface de ces prismes. La taille de ces cellules s'accroît lorsque l'on s'éloigne de la carène.

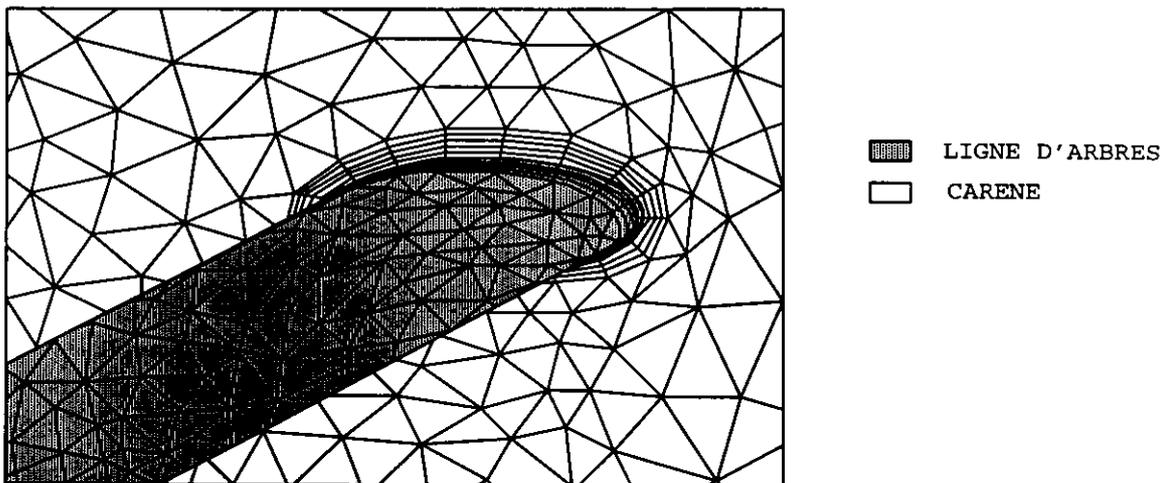


Figure 11: Représentation du maillage hybride - Liaison ligne d'arbres-carène

Cette technique présente donc l'avantage de modéliser correctement la couche limite et d'alléger le nombre de cellules du maillage dans les zones à faible gradient.

Un second type de modélisation qui consiste à employer la méthode des champs de force est en cours d'évaluation. Cette technique est déjà utilisée dans le cas d'études de profils portants [14] ou pour l'optimisation des arrière-corps avec disques moteurs [3]. Dans notre cas, elle serait employée pour remplacer les appendices, et en particulier, la ligne d'arbres par un champ de force.

Le calcul de l'écoulement autour du cylindre permet de connaître les contraintes pariétales (cisaillement et pression) sur l'ensemble des facettes qui constitue la surface du cylindre. Il est ainsi possible d'en déduire une résultante élémentaire pour chaque facette.

Le maillage structuré réalisé autour de l'arrière-corps du Commandant Rivière est alors utilisé. Connaissant la position de la ligne d'arbres sur le navire, une recherche est menée au travers du maillage pour identifier les cellules qui doivent intersecter les facettes constituant la ligne d'arbres. Les résultantes élémentaires calculées sont alors réparties dans chaque cellule retenue proportionnellement à la surface de la facette contenue dans la cellule. Dans le calcul, ces termes d'efforts sont intégrés dans le second membre des équations du code RANS. L'influence de la ligne d'arbres est donc modélisée par un champ de force extérieur : la ligne d'arbres est ici représentée de façon *implicite* (puisque non présente réellement) au sein du domaine fluide contrairement au calcul paragraphe "Modélisation de l'essai d'un cylindre incliné" où elle l'est de façon *explicite*.

Néanmoins, si cette technique génère un ralentissement équivalent à celui du profil qui

devrait être présent, cela est d'autant plus faux que l'on se situe au plus près du profil. En effet, les lignes de courant ne contournent pas la ligne d'arbres implicite, mais passe au travers. Les particules perçoivent alors un ralentissement. Dans notre étude, la comparaison dans la carte du disque d'hélice ne serait donc possible avec les essais "carène avec appendices" qu'aux grands rayons de cette carte.

Remerciements

Nous remercions la D.R.E.T. pour sa participation financière à cette étude.

References

- [1] V.C. Patel, H.C. Chen et S. Ju, Computations of ship stern and wake flow and comparisons with experiment, *Journal of Ship Research*, Vol. 34, N°3, pp. 179-193, 1990
- [2] F. Stern, H.T. Kim, D.H. Zhang, Y. Toda, J. Kerwin, S. Jessup, Computation of viscous flow around propeller-body, Configurations : Series 60 $C_B=0.6$ Ship Model, *Journal of Ship Research*, Vol. 38, N°2, pp. 137-157, 1994
- [3] G.D. Tzabiras, A numerical study of actuator disk parameters affecting the self-propulsion of a tanker, *International Ship Progress*, Vol. 43, N°433, pp. 5-47, 1996
- [4] T.F. Swean, Jr., Numerical Simulations of the Wake Downstream of a Twin-Screw Destroyer Model, Naval Research Laboratory, Memorandum Report 6131, décembre 1987
- [5] H. Liu, M. Ikehata, Computation of free surface waves around an arbitrary body by a Navier-Stokes solver using technique the pseudocompressibility technique, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 19, pp. 395-413, 1994
- [6] J. Piquet, M. Visonneau, Computation of the flow past shiplike hulls, Conference on numerical ship hydrodynamics part 2, Hiroshima, pp. 295-312, 1989
- [7] B. Alessandrini, G. Delhommeau, Simulation numérique de l'écoulement turbulent incompressible autour d'une carène de navire : vers une prise en compte rigoureuse des conditions de surface libre en fluide visqueux, Cinquièmes journées de l'hydrodynamique, mars 1995
- [8] V. Bertram, G. Jensen, Recent applications of computational fluid dynamics, *Ship Technology Research*, Vol. 41, pp. 131-134, 1994
- [9] Cheng Wen Lin, Steven C. Fisher, Gene Gotimer, Numerical prediction of nominal wake for an appended ship, Naval Surface Warfare Center, Bethesda, USA
- [10] F. Pineau, G. Dumas, J. Lemay, Mean flow prediction at the propeller's plane of naval vessels by Navier-Stokes computations, Université Laval, Québec, Canada
- [11] J.C. Pinard, Sillage ligne d'arbres, Etude N°2569, Pièce d'étude N°5, Bassin d'essais des carènes, août 1996
- [12] J.C. Pinard, Etude expérimentale et numérique du sillage en amont d'une hélice, Rapport d'avancement de thèse, Bassin d'essais des carènes, mars 1996
- [13] B. Alessandrini, Calcul de l'écoulement visqueux à surface libre autour de la carène du "Commandant Rivière", Ecole Centrale de Nantes, juin 1996
- [14] S. Cordier, J.M. Laurens, O. Martinez, Numerical simulation of a control surface behaviour by a force field, Symposium on ship manoeuvrability, Fukuoka, Japon, mai 1995