

5^e JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

22, 23, 24 mars 1995 – ROUEN

**MODELISATION D'ÉCOULEMENTS PROPULSIFS A L'AIDE
D'UN CODE NAVIER-STOKES**

**D. BELLEVRE, S. CORDIER et L. GAUTIER
BASSIN D'ESSAIS DES CARENES
27100 - VAL DE REUIL**

Résumé

On présente dans ce papier une méthode de modélisation d'écoulement en présence d'un propulseur. Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un code Navier-Stokes dans lequel l'action du propulseur est modélisé par un champs de force. Ce champ de force peut être imposé arbitrairement ou obtenu itérativement par un calcul d'hélice ou de pompe qui prend en compte l'écoulement calculé dans le code Navier-Stokes. Cette méthode a l'avantage de pouvoir traiter d'une part les écoulements visqueux dans lesquels opèrent fréquemment les propulseurs marins, et d'autre part des géométries complexes telles que les propulseurs carénés. En particulier, on peut envisager de traiter le problème d'un propulseur intégré où l'écoulement sur l'arrière-corps est à la limite du décollement. Dans cette perspective, et pour valider ce type de calcul, on présente la comparaison de résultats numériques et expérimentaux sur 3 géométries d'arrière-corps avec propulseur intégré présentant des risques de décollement.

Summary

This paper presents a method capable of simulating hydrodynamic flows in presence of a propulsor. This method is based on the use of a Navier-Stokes code in which the action of the propulsor is simulated by a force field. This force field can either be imposed arbitrarily or calculated iteratively using a propeller or pump code which takes into account the flow field calculated in the Navier-Stokes code. This method has the advantage of being capable of treating viscous flows in which marine propulsors often operate in, as well as complex geometries such as ducted propulsors. Specifically, this method can solve the problem of integrated propulsors where the flow on the aft-body is close to separation. To validate this capability, comparisons between numerical and experimental are presented for three geometries of after-bodies with an integrated propulsor where flow separation occurs.

1 - INTRODUCTION

La connaissance de l'écoulement dans le propulseur d'un navire est une donnée fondamentale pour permettre d'optimiser sa géométrie. Cet écoulement est cependant difficile à prévoir car il nécessite dans la majorité des cas la modélisation d'un écoulement visqueux, sur des géométries complexes, et en présence du propulseur dont l'action dépend elle-même de l'écoulement incident. Depuis déjà plusieurs années, des méthodes permettant de traiter ce problème par l'utilisation de codes Navier-Stokes 2D puis 3D ont été proposées [1, 2]. Ces méthodes reposent sur la simulation de l'action du propulseur par un champ de force volumique distribué dans le maillage Navier-Stokes et pris en compte dans la résolution des équations. Ce champ de force peut être imposé au début du calcul, ou il peut être recalculé à chaque pas de temps de la résolution du code Navier-Stokes en prenant compte du champ de vitesse modifié par l'action du propulseur.

Ce type de méthode a été développé au Bassin d'Essais des Carènes [3, 4, 5, 6, 7] pour traiter le cas de propulseurs sous tuyère aussi bien que celui d'une hélice isolée. Le principe de la méthode est présenté dans la première partie du papier et une comparaison avec des résultats expérimentaux est présentée dans le cas d'une hélice derrière un arrière-corps axisymétrique.

Dans la seconde partie, on s'attache au cas de propulseurs intégrés où l'interaction entre le propulseur et l'écoulement sur la carène est la plus forte. Ce type de géométrie est constituée d'un arrière-corps et d'une tuyère sur lesquels différents décollements peuvent apparaître. Dans un premier temps, les géométries d'arrière-corps et de tuyères ont été paramétrisées pour pouvoir les définir et les modifier rapidement. Diverses configurations sont testées numériquement afin de déterminer trois géométries qui serviront à la réalisation d'un montage expérimental en tunnel hydrodynamique. On présente enfin la description de ce montage expérimental ainsi que quelques exemples de confrontation essais calculs.

2 - MODELISATION D'ECOULEMENTS PROPULSIFS

2.1 - Code Navier-Stokes

Le logiciel de résolution des équations de Navier-Stokes à Reynolds moyenné (Reynolds Average Navier Stokes) permet de modéliser en 2D ou 3D l'écoulement visqueux autour d'un corps de géométrie complexe. La présence d'une tuyère ou de parois peut être prise en compte dans les conditions aux limites sur les frontières du maillage. Il est aussi possible d'imposer le champ de vitesse en amont du domaine de calcul si on s'intéresse uniquement à l'écoulement sur une partie du corps.

Le logiciel utilisé peut traiter un écoulement laminaire ou turbulent. Dans ce dernier cas le maillage doit être affiné sur les parois et un modèle de turbulence doit être utilisé. On utilise actuellement 3 types de modèles de turbulence: Baldwin-Lomax, k- ϵ standard, et RNG (Renormalization Group k- ϵ). Ces modèles permettent de simuler avec une certaine confiance des écoulements turbulents à des nombres de Reynolds jusqu'à des valeurs telles $10.E+8$. Le modèle Baldwin-Lomax n'est pas utilisé dans le cas présent car il n'est pas adapté au calcul d'écoulements en cisaillement (distance à la paroi non-définie).

La difficulté principale avec le type de calcul présenté est de pouvoir générer un maillage adapté à l'écoulement étudié. Le meilleur développé au Bassin d'Essais des Carènes permet de resserrer les mailles au niveau des parois et dans certaines parties du domaine où

l'on peut s'attendre à de forts gradients: bord d'attaque, bord de fuite, ou des portions de corps à petits rayons de courbure. Ce mailleur permet d'insérer des corps dans le domaine (une tuyère par exemple) et de régulariser la dimension des mailles dans tout le domaine.

Un champ de force peut être réparti sur un certain nombre de mailles sélectionnées. On donne à ce champ de force une "épaisseur" de plusieurs mailles de manière à réduire les gradients de pression au voisinage du propulseur. Son intensité peut être soit fixée avec une distribution représentant les effets d'un propulseur, soit calculée par un code de calcul d'hélice.

2.2 - Couplage code Navier-Stokes - code Hélice

Une méthode de couplage itératif a été développée au Bassin d'Essais des Carènes afin de déterminer le sillage effectif derrière une carène. Ce sillage sert à la conception des hélices et diffère de manière significative du sillage nominal que l'on trouve derrière la carène seule. En effet, l'action du propulseur modifie la distribution de pression sur l'arrière du navire et ainsi le développement du sillage. Si des méthodes existent pour prédire le sillage sur un corps axisymétrique [8] aucune méthode satisfaisante n'existe pour un écoulement 3D. Un avantage supplémentaire de ce type de méthode serait de pouvoir calculer le sillage effectif à des nombre de Reynolds (Re) proches du Réel (10^9) et ainsi prendre en compte les effets d'échelle. Cependant, les modèles de turbulence ne sont pas encore validés pour des Re aussi élevés.

Dans la version axisymétrique de ce couplage, un code Navier-Stokes 2D et un code de calcul d'hélice, stationnaire, de type surface portante sont utilisés. Une procédure lance les deux logiciels alternativement, le couplage est alors réalisé par des fichiers intermédiaires contenant les données nécessaires: champs de force et de vitesses induites et totales.

Le couplage fonctionne de la manière suivante: un sillage nominal est calculé par le code Navier-Stokes sans champ de force, le code hélice donne en sortie la distribution de circulation en envergure qui permet le calcul des efforts générés par l'hélice. La composante axiale et radiale de ces efforts sont injectés sous la forme d'un champ de force volumique dans une zone proche de l'hélice, dans le code Navier-Stokes qui restitue un sillage total. Le sillage effectif nécessaire au calcul d'hélice est obtenu en soustrayant au sillage total les vitesses induites calculées par le code hélice. Le code hélice peut alors recalculer un champ de force et on passe à l'itération suivante (figure 1). Après quelques itérations, le calcul converge vers un sillage effectif et un chargement de propulseur qui sont compatibles. Les coefficients de poussée K_t et de couple K_q servent d'indicateurs pour cette convergence.

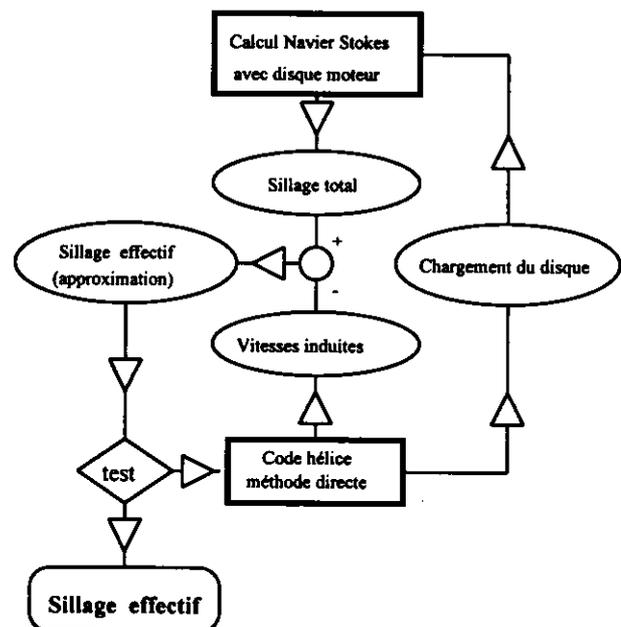


Figure 1: Schéma du couplage Navier-Stokes / Hélice

Une version 3D de ce couplage est en cours de développement afin de traiter le cas des bâtiments de surface avec ligne d'arbre inclinée, ou de cargo avec sillage 3D complet, ou encore de sous-marin avec le sillage des barres ou d'un stator.

2.3 - Cas d'une hélice derrière un sous-marin

On présente (figure 2) le résultat d'un calcul sur l'arrière-corps de sous-marin testé au GTH. La géométrie du corps et de l'hélice ont été maillées pour le calcul Navier-Stokes et le calcul d'hélice respectivement (emblème 5ème Journées). Les valeurs de K_t et K_q convergées sont proches des résultats expérimentaux à 1% près. On peut aussi remarquer sur ce graphe la différence considérable qui existe entre les valeurs des efforts calculés dans le sillage nominal et les valeurs convergées, dans le sillage effectif.

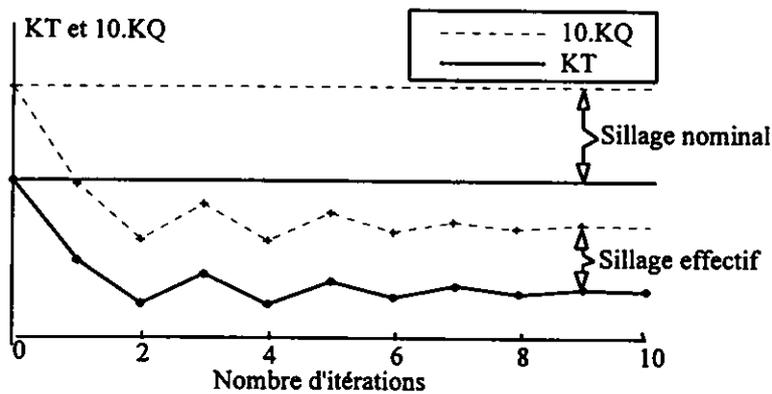


Figure 2: Exemple de convergence des efforts

Une comparaison plus détaillée entre les calculs et l'expérience a été réalisée en comparant les profils de vitesse axiales. On présente tout d'abord le sillage nominal dans 2 plans situés en amont et dans le plan de l'hélice (figure 3). Ce calcul sans hélice est très proche des résultats expérimentaux ce qui permet d'envisager un calcul avec couplage réaliste.

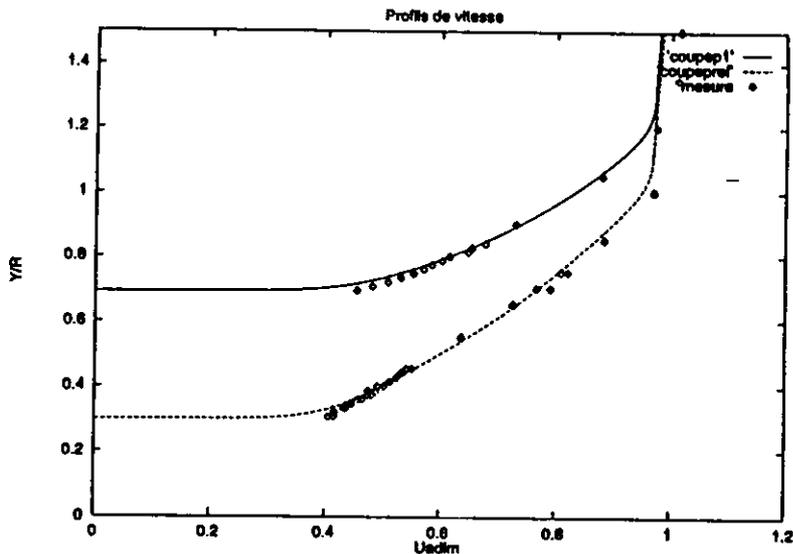


Figure 3: Sillage nominal dans le plan de l'hélice

A la fin du calcul, lorsque le K_t a convergé, le champ de vitesse calculé immédiatement en aval du disque moteur est comparé à des mesures réalisées dans le même plan (figure 4). On constate des différences significatives qui peuvent être expliquées par le fait que dans une zone aussi proche de l'hélice le sillage mesuré évolue très rapidement. Finalement on représente le sillage nominal (Navier-Stokes), le sillage total (Navier-Stokes), et les vitesses induites (code hélice) sur la figure 5 dans le même plan, et pour le même point de fonctionnement. Le sillage effectif représenté est la différence entre les vitesses totales et les vitesses induites.

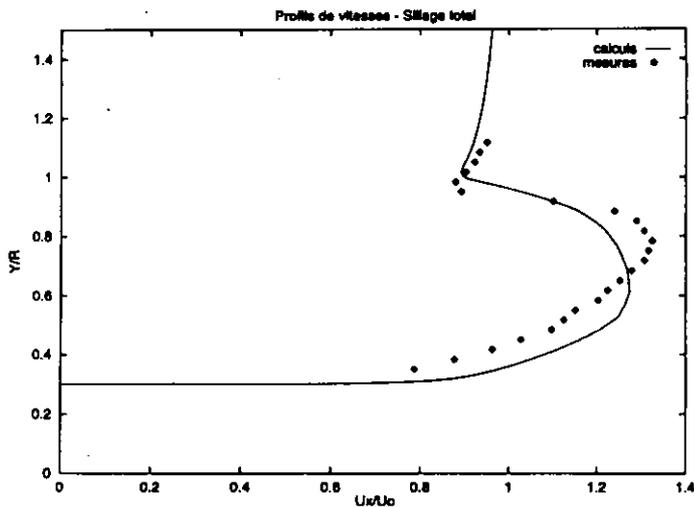


Figure 4: Sillage total derrière l'hélice

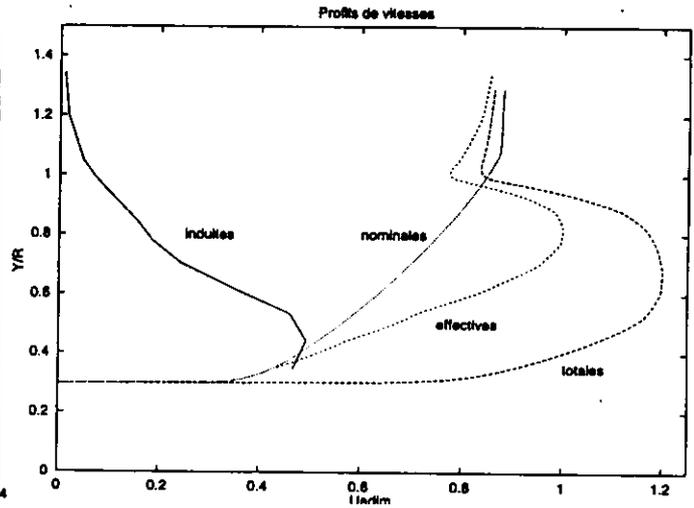


Figure 5: Sillages nominal, total, et effectif et vitesses induites

3 - GÉOMÉTRIES DE PROPULSEURS INTÉGRÉS

Si les efforts de développement continuent pour généraliser cette méthode en 3D, un effort de validation a été mené en parallèle pour évaluer les capacités de ce type de code à traiter le cas d'écoulements propulsifs où l'action du propulseur agit sur le développement de la couche limite sur l'arrière-corps et éventuellement prévient des décollements. Les géométries concernées sont celles de propulseurs intégrés (figure 6).

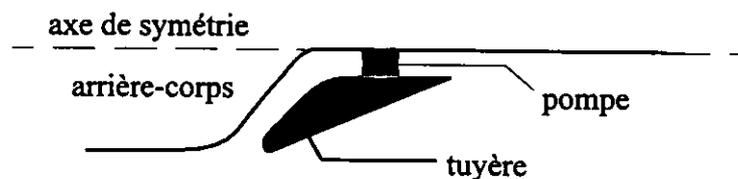


Figure 6: Géométrie de propulseur intégré

On peut considérer que le propulseur intégré est un propulseur caréné dont le diamètre de la tuyère approche celui du corps amont. Le débit ingéré dans la fente ainsi créée est constitué de la partie la plus ralentie de la couche limite présente sur le corps. La couche limite qui se recrée sur la tuyère est donc beaucoup moins épaisse, et la recompression sur l'extérieur de la tuyère peut s'effectuer de manière plus brutale avec un risque limité de décollement.

Afin de faciliter la création et le maillage de multiples configurations, la géométrie du propulseur intégré a été simplifiée en éléments géométriques simples (polynômes de degré 1, 2

ou 3 et arcs de cercle) et ainsi réduite à quelques paramètres qui sont principalement l'inclinaison moyenne de l'extrados, la longueur de la tuyère, l'épaisseur d'entrée et de sortie de l'écoulement ingéré, ainsi que l'inclinaison du conduit d'aspiration. Dans le calcul des géométries on tient compte de contraintes dues au montage expérimental, principalement la longueur du dispositif de pompage qui simule l'effet d'une pompe. Les géométries ainsi calculées sont directement exploitées par le mailleur du code Navier-Stokes.

Au total une dizaine de géométries ont été définies, maillées et testées numériquement avec un confinement identique à celui du montage expérimental envisagé. Celui-ci a la particularité d'être plan, c'est à dire que la fente aura une section rectangulaire. Suite à ces calculs, la sensibilité de différents types de décollement aux paramètres géométriques et au débit dans la tuyère ont été mis en évidence sur ces géométries. À partir de ces résultats, trois géométries de tuyères ont été sélectionnées pour servir de support à la validation du code de calcul. Ces trois configurations mettent en évidence les particularités suivantes: décollement sur l'extérieur de la tuyère (configuration A), tuyère avec recompression brutale (configuration B), arrière-corps avec décollement (configuration C). Dans les trois cas, seule la tuyère est modifiée, l'arrière-corps étant conservé de manière à simplifier le montage expérimental.

4 - ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Une campagne d'essai a été réalisée pour tester les trois configurations choisies dans le Petit Tunnel Hydrodynamique (PTH) du Bassin d'Essais des Carènes dont la veine a les dimensions suivantes: 600mm x 480 mm x 3000 mm.

4.1 - Description du montage

Le montage expérimental de 150 mm de hauteur est assemblé sur le plafond amovible de la veine ce qui permet un accès aisé à la maquette et à l'instrumentation. Compte tenu de la disposition des hublots de la veine d'essai, cette disposition autorise aussi la mesure de vitesse par vélocimétrie Laser (LDV) dans la veine et sur toute l'épaisseur du corps. Le choix des dimensions de la maquette a été dictée par l'utilisation de la LDV et la résolution spatiale de ce type de mesure (0.5 mm). Ainsi l'épaisseur de la fente est de 20 mm environ et le débit nominal de l'ordre de 40 l/s. Afin de réduire les débits nécessaires et l'influence des couches limites sur les parois de veine, l'assemblage des différents éléments se fait entre deux flasques verticaux espacés de 200 mm qui recréent ainsi une veine plus petite au centre de la veine. La génération du débit se fait par une pompe (140 m³/h à 1 bar) déportée sur le plancher du tunnel. Des tuyaux de 120 mm de diamètre assurent la connexion entre la pompe, la veine, et le débitmètre. Le plan d'élévation du montage est présenté sur la figure 8. On remarque que l'arrière-corps et la tuyère sont montées de manière à pouvoir mesurer les efforts. Une photographie du montage est représentée sur la figure 9.

On distingue 6 types de mesures qui ont été réalisées sur le montage:

- o LDV environ 7 plans de mesure
- o Pressions statiques par scanivalve rotatif: 20 sur l'arrière-corps, 30 sur la tuyère
- o Cisaillement en amont de l'arrière-corps par tube de Preston
- o Pressions totales en amont et en aval de l'ensemble propulsif par tube de pitot
- o Efforts: Fx sur l'arrière-corps et Fx,Fz sur la tuyère
- o Visualisation des décollements par tranche lumineuse

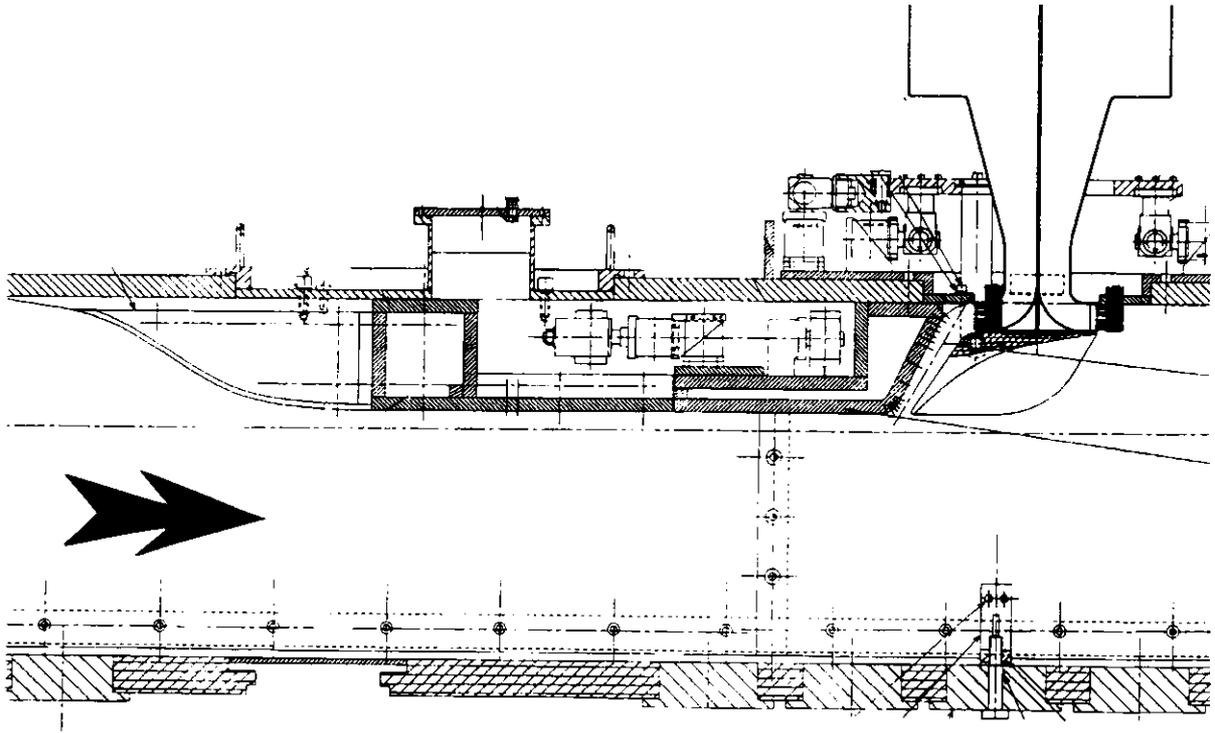


Figure 7: Coupe verticale à travers le montage dans l'axe de la veine

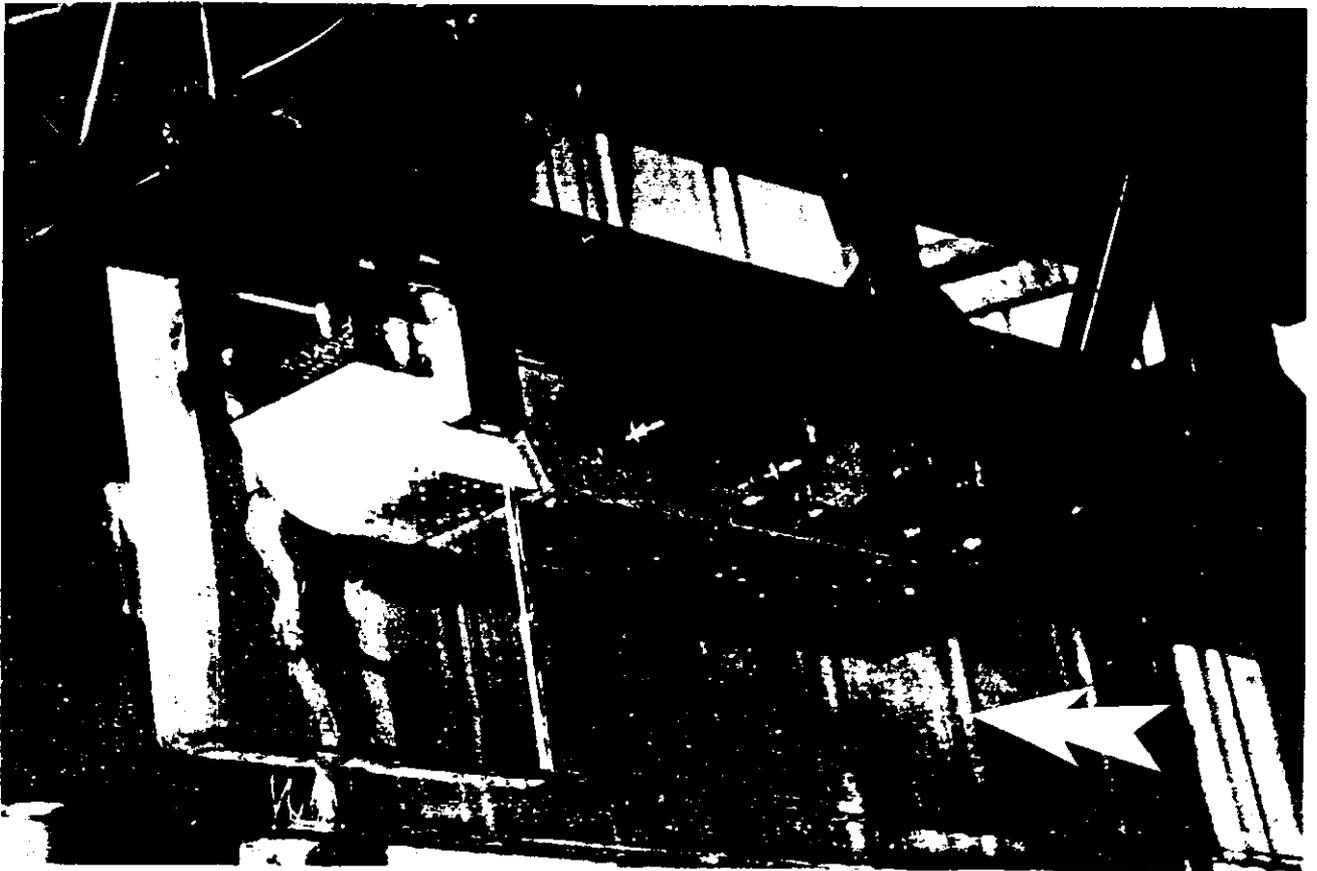


Figure 8: Photographie du montage hors veine

4.2 - Résultats expérimentaux

Pour chaque tuyère des mesures de vitesses, de pression, et d'efforts ont été réalisés pour les points de fonctionnement indiqués dans le tableau 1. Ces points de fonctionnement sont identifiés par le coefficient de débit C_q . La longueur de référence est $L=1500$ mm.

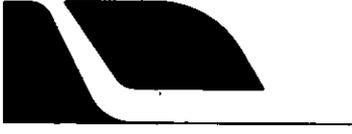
$$C_q = \frac{Q}{\rho V_{\text{réf}} S_{\text{jet}}}, \text{ où } V_{\text{réf.}} \text{ est la vitesse moyenne au milieu de la veine à } X/L=0.427$$

S_{jet} est la surface de la section en sortie du jet.

On utilise aussi pour la présentation des données un coefficient de pression C_p

$$C_p = \frac{P - P_{\text{réf}}}{\frac{1}{2} \rho V_{\text{réf}}^2}, \text{ où } P_{\text{réf}} \text{ est la pression de référence à } X/L=0.427.$$

Tableau 1: Paramètres expérimentaux

Tuyère	n° essai	Vref (m/s)	Q (l/s)	Cq (-)
 <p>A</p>	A1	4.1	17.7	0.544
	A2	4.4	25.8	0.736
	A3		35.9	1.028
	A4	6.5	26.4	0.508
	A5		37.7	0.728
 <p>B</p>	B1	4.4	18.0	0.514
	B2	4.6	26.2	0.710
	B3	4.8	35.5	0.896
	B4	6.5	25.2	0.486
	B5	6.4	34.7	0.674
 <p>C</p>	C1	4.8	17.4	0.450
	C2		25.0	0.649
	C3	4.9	36.7	0.940
	C4	6.3	23.9	0.475
	C5	6.4	33.3	0.649

Quelques mesures sont d'abord présentées pour 2 vitesses de veine différentes sur les figures 9 à 11 pour illustrer la validité du paramètre de coefficient de débit ainsi que la répétabilité des mesures. On constate en effet sur ces figures que l'on retrouve des résultats adimensionnels identiques pour différentes vitesses de veine, aussi bien pour les mesures de pression que pour les mesures de vitesse.

Ces données peuvent aussi être examinées pour identifier les caractéristiques principales du type d'écoulement étudié. Les pressions mesurées sur la tuyère A (figure 9) montrent une dépression au bord d'attaque et un plateau de pression relativement élevé pour $X/L > 0.95$ qui trahit une zone de décollement. On distingue sur le profil de vitesse mesuré en aval de la tuyère B (figure 10) la sur vitesse due au jet, ainsi qu'une zone d'écoulement ralenti provenant de l'extérieur de la tuyère. Enfin, la distribution de pression mesurée sur l'arrière-corps en présence de la tuyère C (figure 11) met en évidence la dépression qui est présente à l'entrée de la fente. C'est la recompression en aval de ce point qui peut donner lieu à un décollement.

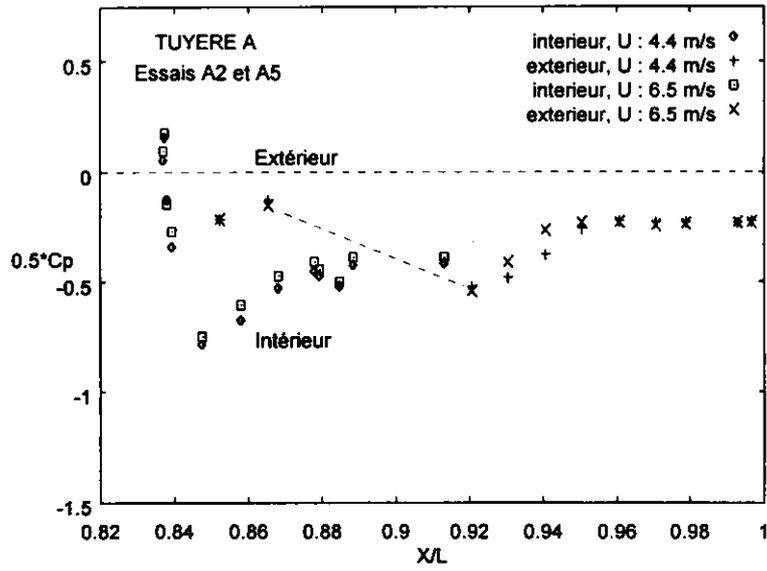


Figure 9: Distribution de pression sur la tuyère A

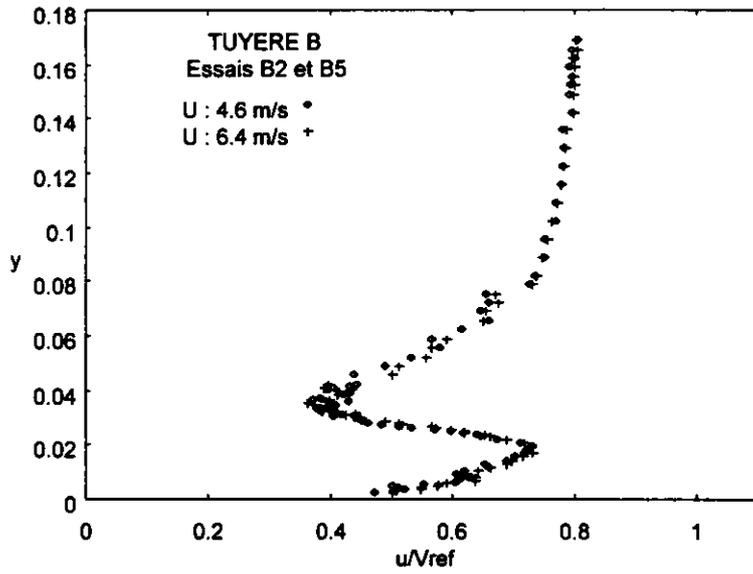


Figure 10: Distribution de vitesse en aval de la tuyère B

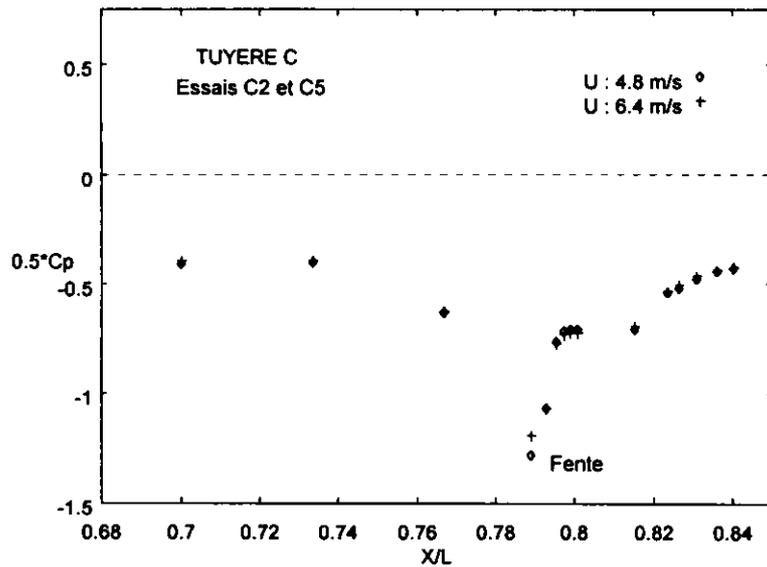


Figure 11: Distribution de pression sur l'arrière-corps avec la tuyère C

5 - COMPARAISON CALCUL-EXPERIENCE

5.1 - Profils de vitesse

Les résultats de calculs pour les 3 tuyères pour un coefficient de débit proche de 1.0 sont présentés sur la figure 12 où l'on a porté le module des vitesses. Les zones blanches correspondent à des zones très ralenties ou décollées.

On présente sur les figures 13 à 16 des comparaisons entre 5 profils de vitesse mesurés et calculés pour les trois tuyères dont une (tuyère A) à 2 coefficients de débit différents. Le profil de vitesse imposé comme condition limite en amont du domaine est porté sur les figures X.a avec un profil de vitesse mesuré immédiatement en amont de la fente. Les profils X.b et X.c sont mesurés ou calculés sur l'extérieur de la tuyère. Enfin, les figures X.d correspondent aux vitesses immédiatement en aval de la tuyère. On remarque sur ces 4 figures que la vitesse mesurée loin du corps a tendance à être supérieure aux valeurs calculées, et ce d'autant plus que l'on s'éloigne du profil initial ($X/L = 0.427$). Cet écart reste pour l'instant inexplicé. Il reste néanmoins possible de comparer l'évolution de ces profils de vitesse.

Dans le cas de la tuyère A, le calcul prédit correctement un décollement sur l'arrière de la tuyère pour les 2 débits considérés (figure 13 et 14). Les deux modèles de turbulence testés ($k-\epsilon$ et RNG $k-\epsilon$) montrent des différences minimales au bord de fuite de la tuyère. Pour la tuyère B qui est à la limite du décollement dans le calcul (figure 15), il s'avère qu'expérimentalement l'écoulement décolle sur l'extérieur de la tuyère. Enfin, sur la tuyère C (figure 16), il s'avère que l'écoulement est relativement plus rapide expérimentalement que numériquement.

5.2 - Distributions de pression

On présente sur les figures 17 et 18 les distributions de pression sur l'arrière-corps et la tuyère (intérieur et extérieur) pour les tuyères A et B respectivement. Dans les deux cas, les pressions sur l'arrière-corps sont bien captées par le calcul. A l'intérieur de la tuyère, certaines différences apparaissent, en particulier au voisinage du dispositif de pompage.

Sur l'extérieur de la tuyère A on constate que le bord d'attaque est bien capté. Par contre, l'écart entre mesure et calcul à $X/L = 0.85$ et 0.86 n'est pas expliqué. Près du bord de fuite, l'accord est relativement bon dans la zone décollée. Sur la tuyère B, la recompression prédite par le calcul n'est pas vérifiée expérimentalement à cause d'un décollement relativement mince qui n'est pas capté par le calcul. Les pressions sont donc légèrement plus faibles.

6 - CONCLUSIONS

L'utilisation d'un code Navier-Stokes pour la prévision d'écoulements propulsifs permet de simuler des géométries complexes et des écoulements visqueux qui sont typiques des configurations de propulseurs marins.

Le couplage d'un code Navier-Stokes avec un code de calcul d'hélice donne des résultats proches de l'expérience et permet de calculer le sillage effectif nécessaire à l'optimisation d'une hélice. L'extension de cette méthode au cas 3D, et la validation de codes Navier-Stokes à des nombres de Reynolds réels permettent d'envisager la résolution d'un des problèmes les plus complexes en hydrodynamique navale.

L'utilisation de cette méthode dans des cas d'une forte interaction entre l'écoulement sur la carène et le propulseur, le propulseur intégré par exemple, a été étudiée numériquement et expérimentalement. La confrontation des calculs et des mesures montre que la méthode

proposée reproduit de manière réaliste le comportement du fluide sur ce type de géométrie. On a pu s'assurer par ailleurs de la sensibilité de cet outil à des modifications, mêmes minimales, de géométries.

Le développement d'un environnement adapté (paramétrisation, génération de forme, maillage, visualisation) permet d'envisager l'utilisation de cette procédure dans le cadre d'une optimisation d'un ensemble carène-propulseur afin de minimiser la puissance requise pour déplacer un corps de volume donné.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé avec le soutien de la Direction des Recherches Etudes et Techniques et de la DCN.

REFERENCES

- [1] Stern F., Kim H.T., Patel V.C., and Chen H.C., "A Viscous Flow Approach to the Computation of Propeller-Hull Interaction", *Journal of Ship Research*, Volume 32, N°4, December 1988, pp. 246-262.
- [2] Stern F., Kim H.T., Zhang D. H., Toda Y., Kerwin J., Jessup S. "Computation of Viscous Flow around Propeller-Body Configurations: Series 60 Cb=0.6 Ship Model", *Journal of Ship Research*, Volume 38, N°2, June 1994, pp. 137-157.
- [3] Bellevre D. et Cordier S., "Evaluation des Performances d'un Propulseur Intégré à l'aide d'un logiciel Navier-Stokes 2D", DCN/Bassin d'Essais des Carènes Rapport d'activité, Etude N°2582 - Pièce d'étude N°3, février 1993.
- [4] Cremel L., "Evaluation des Performances d'une Hélice par Couplage de la Méthode des Singularités et d'un code Navier-Stokes", DCN/Bassin d'Essais des Carènes, Rapport de stage, septembre 1993.
- [5] Banderier J., "Couplage entre un code hélice et un code Navier-Stokes 3D", DCN/Bassin D'Essais des Carènes, Rapport de stage, Octobre 1994.
- [6] Baubeau R., "Comparative calculation of propellers by surface panel method", *Proceedings of the 20th ITTC Conference*, San Francisco, September 1993.
- [7] Cordier S. et Laurens J.-M. "Interaction Propulseur Carène - Approches Expérimentales et Numériques", *Congrès OCEANOSCIENCE*, Toulon Avril 1994.
- [8] Huang T.T. et Groves N.C. "Effective Wake: Theory and Experiment", *David Taylor Research Center Report*, pp 651-669.



Figure 12.a: Tuyère A

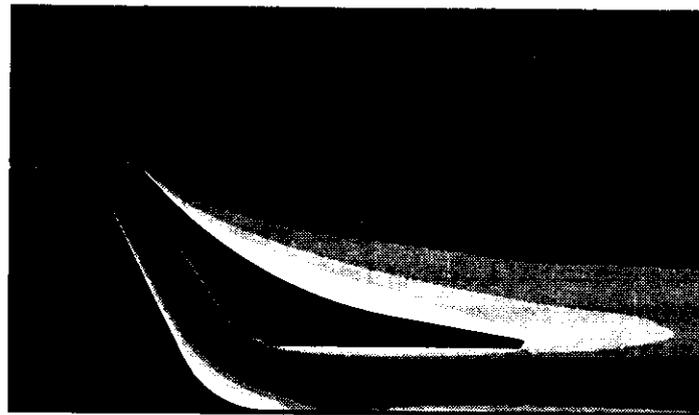


Figure 12.b: Tuyère B

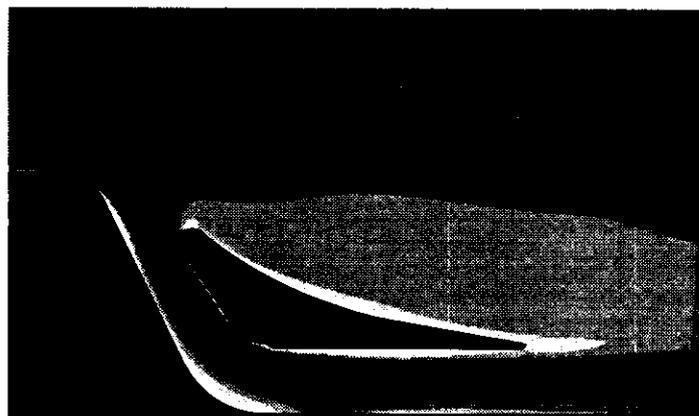


Figure 12.c: Tuyère C

VitesseFigure 12: Module des vitesses sur les trois tuyères (C_q proche de 1.0)

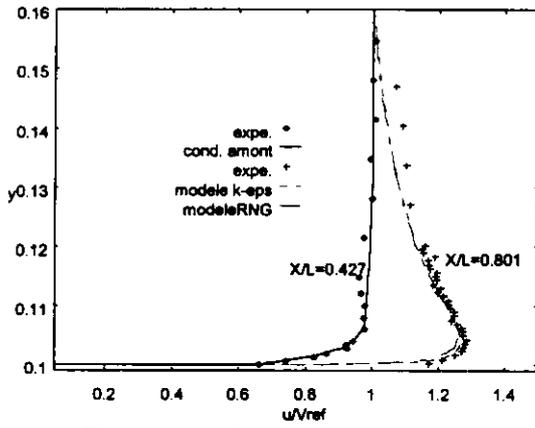


Figure 13.a: Plans amont et entrée fente

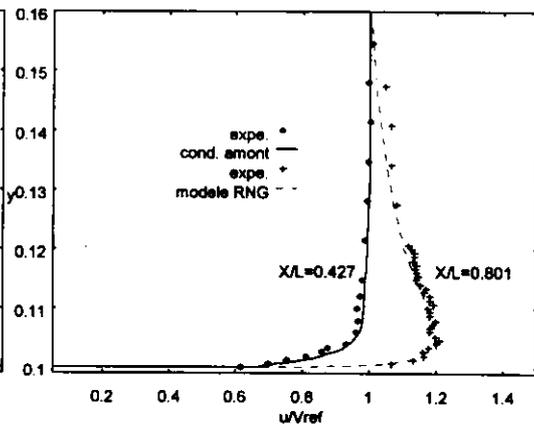
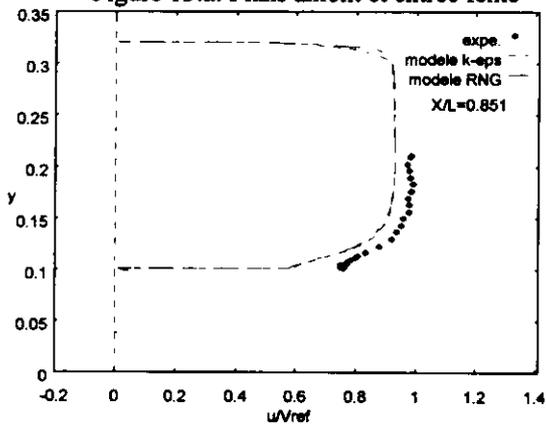
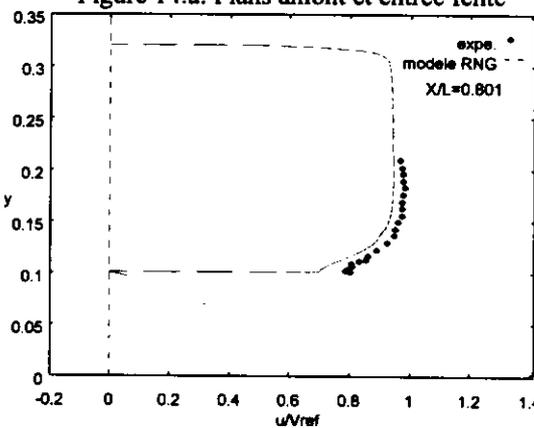


Figure 14.a: Plans amont et entrée fente



13.b: Début extrados tuyère



14.b: Début extrados tuyère

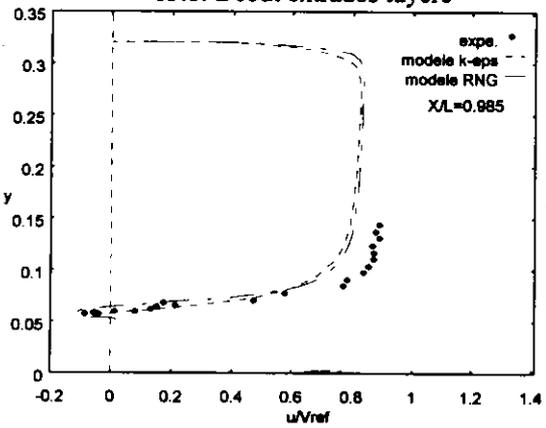


Figure 13.c: Fin extrados tuyère

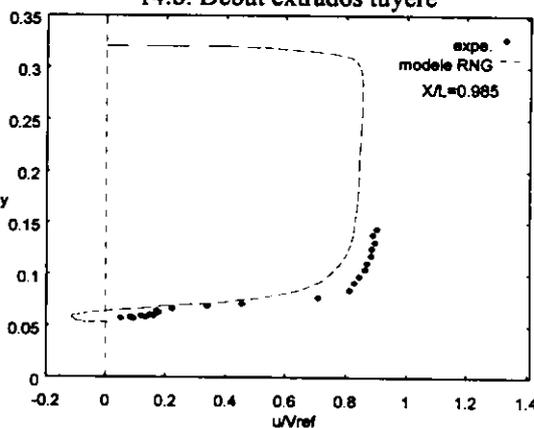


Figure 14.c: Fin extrados tuyère

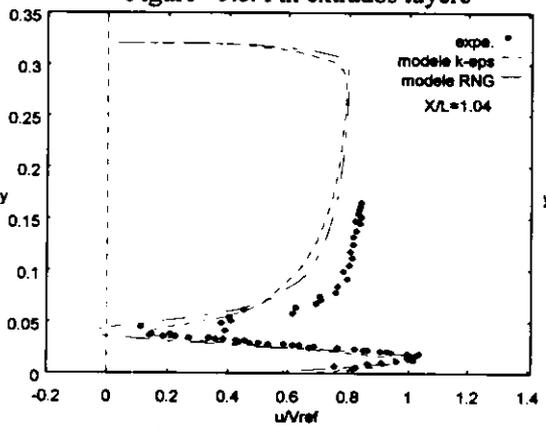


Figure 13.d: Plan aval tuyère
Figure 13: Profils de vitesse
(Tuyère A, $C_q=1.03$)

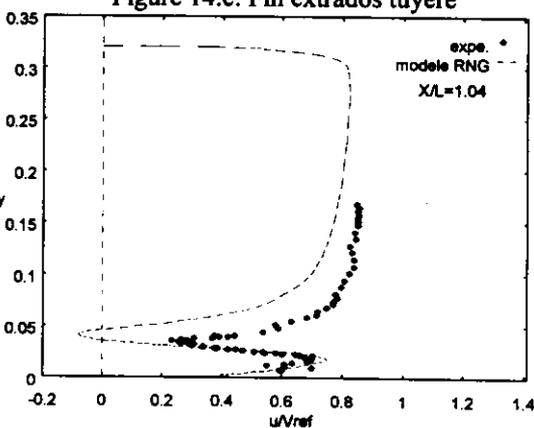


Figure 14.d: Plan aval tuyère
Figure 14: Profils de vitesse
(Tuyère A, $C_q=0.74$)

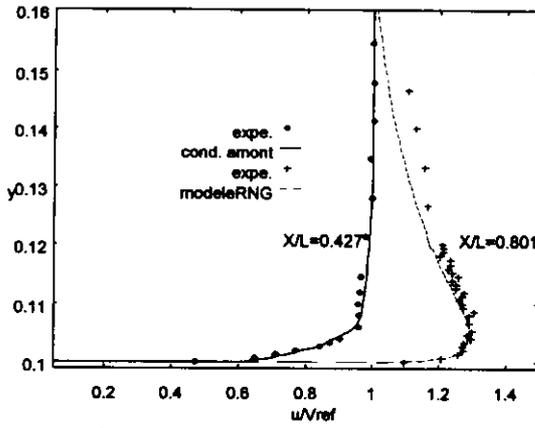


Figure 15.a: Plans amont et entrée fente

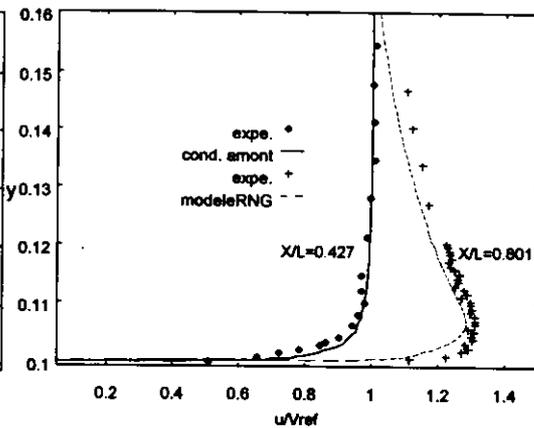
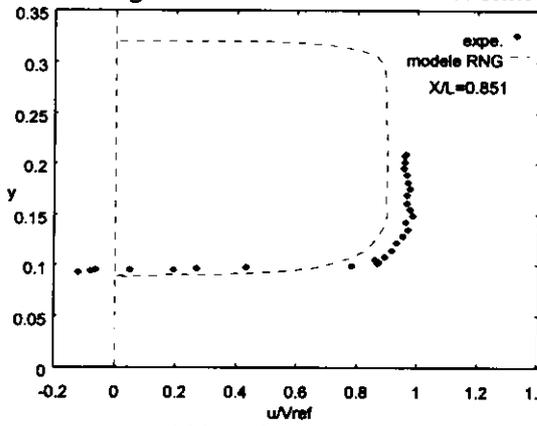
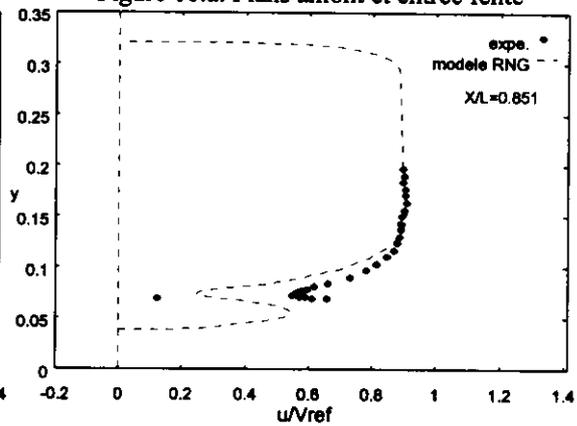


Figure 16.a: Plans amont et entrée fente



15.b: Début extrados tuyère



16.b: Début extrados tuyère

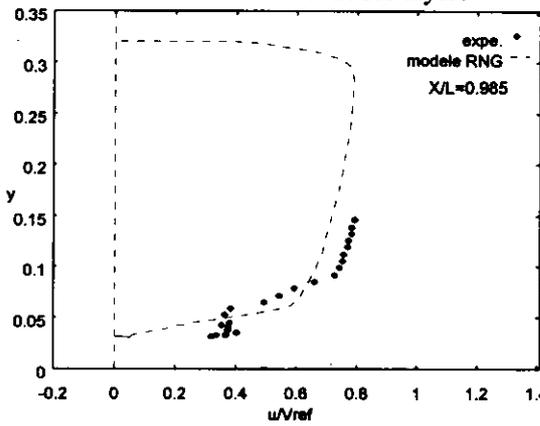


Figure 15.c: Fin extrados tuyère

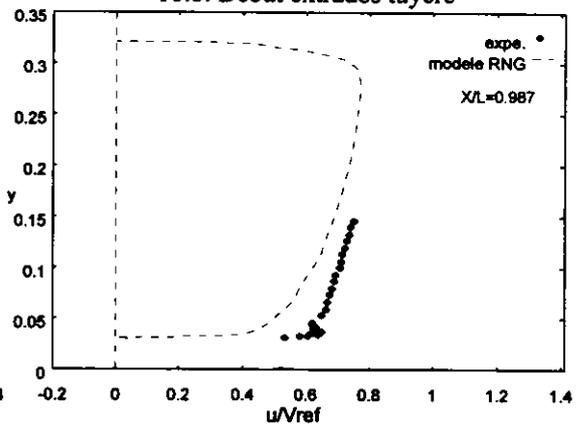


Figure 16.c: Fin extrados tuyère

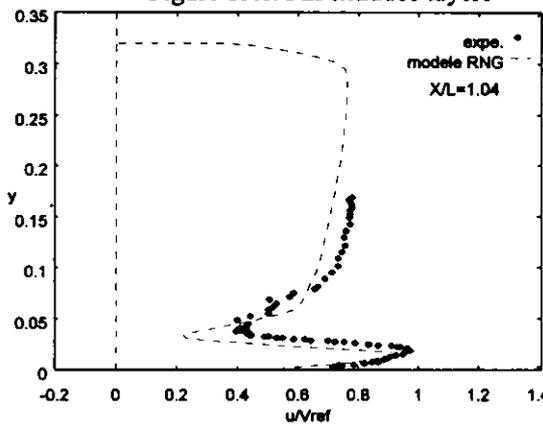


Figure 15.d: Plan aval tuyère

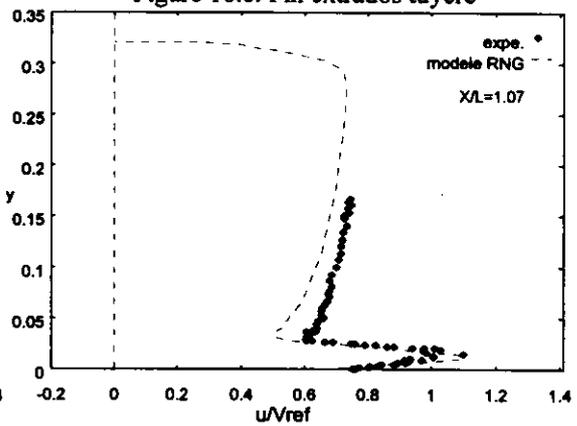


Figure 16.b: Plan aval tuyère

Figure 15: Profils de vitesse
(Tuyère B, $C_q=0.90$)

Figure 16: Profils de vitesse
(Tuyère C, $C_q=0.94$)

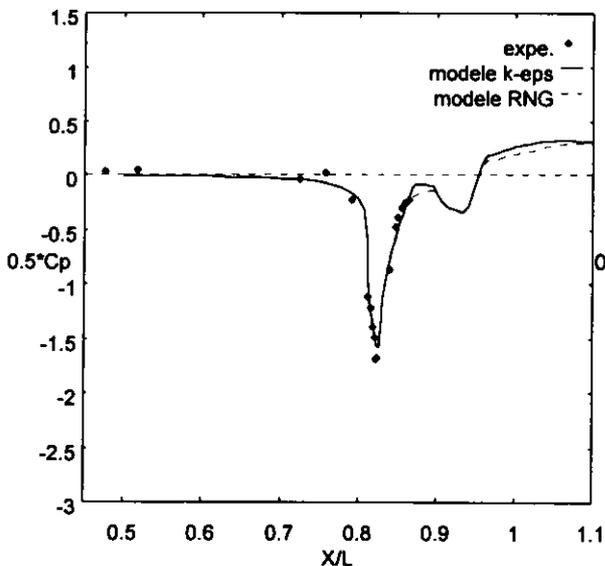


Figure 17.a: Arrière-corps

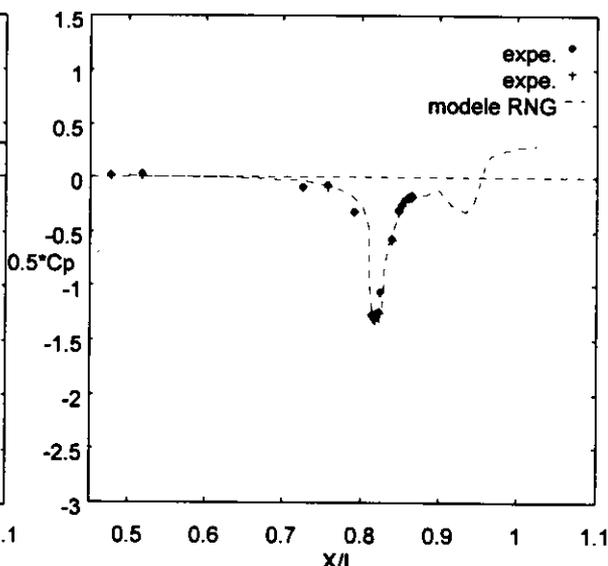


Figure 18.a: Arrière-corps

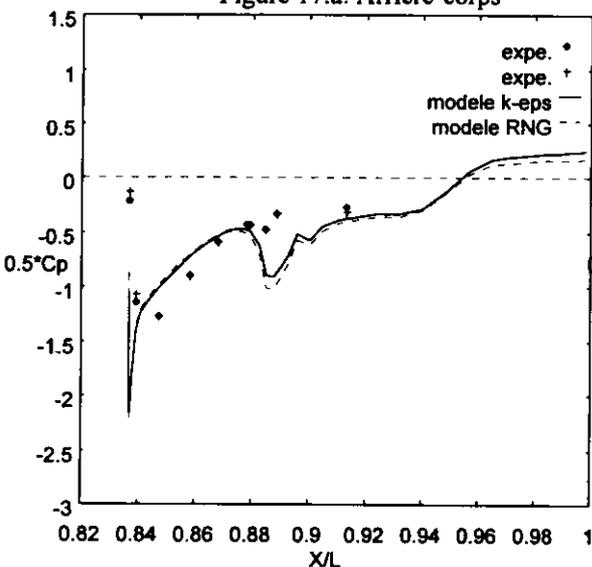


Figure 17.b: Intérieur tuyère

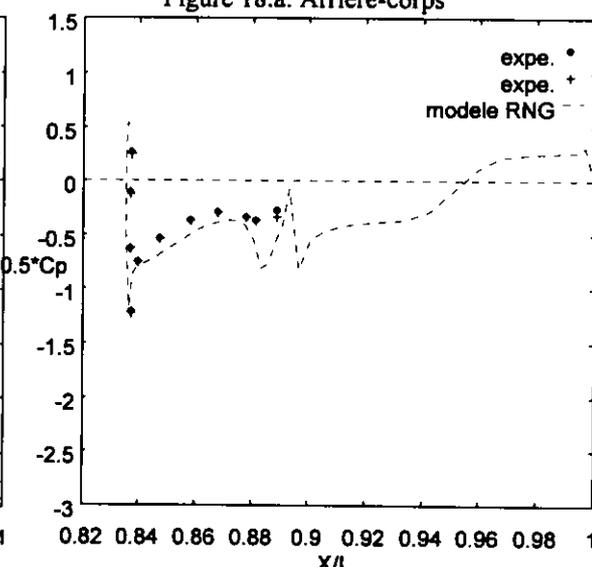


Figure 18.b: Intérieur tuyère

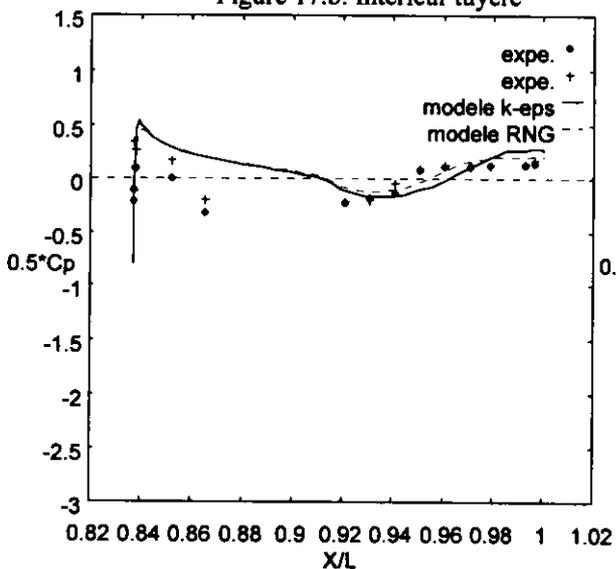


Figure 17.c: Extérieur tuyère

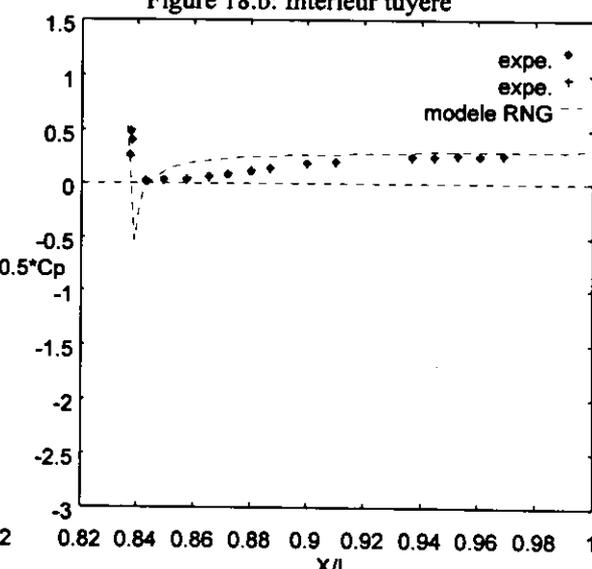


Figure 18.c: Extérieur tuyère

Figure 17: Distributions de pression
(Tuyère A, $C_q=1.04$)

Figure 18: Distributions de pression
(Tuyère B, $C_q=0.90$)

