

UTILISATION DE LA CFD POUR L'ETUDE DES EFFETS DE CONFINEMENT

B. CARDOT - H. CREPEL - P. HOCQUET -
B. LEVOIR - R. MARSAA-POEY

Bassin d'Essais des Carènes
Centre de Paris
8 bd Victor. 75732 PARIS cedex 15

Résumé

Nous proposons ici une étude numérique des effets de confinement (effets de parois) existant dans les veines du Grand Tunnel Hydrodynamique (GTH) de Val de Reuil. Leur estimation ainsi que la détermination des effets de Reynolds sont nécessaires lors de l'extrapolation des mesures au réel.

Nous nous intéressons à l'écoulement autour d'un corps de forme axisymétrique placé dans les veines d'essais du GTH. L'accent est mis sur l'influence des veines, tant au niveau de leur taille qu'au niveau de leur modélisation (section circulaire ou section rectangulaire) afin d'étudier l'existence d'éventuels effets tridimensionnels. Différents codes de calcul sont utilisés pour l'analyse des effets de parois tant sur la partie potentielle que sur la partie visqueuse de l'écoulement. Pour le calcul de l'écoulement potentiel en présence de parois, un code d'éléments finis tridimensionnel est mis en oeuvre. En ce qui concerne les effets visqueux, la couche limite à l'avant du corps ainsi que la position de la zone de transition sont calculées à l'aide d'une méthode intégrale en hypothèse de couche limite mince tandis qu'un code Navier-Stokes turbulent en formulation de volumes finis permet le calcul de l'écoulement sur l'arrière corps.

Summary

In this paper we propose a study of wall effects observed in the test sections of the Grand Tunnel Hydrodynamique (GTH) of Val de Reuil. These effects are responsible for an important part of the errors in measurements during the extrapolation to full scale as well as Reynolds effects.

We study the flow around an axisymmetric body in the test sections of the GTH. We insist on the influence of the size and the form of these for the study of possible 3d-effects. Different computational programs are used to study wall effects on potential and viscous flow. In addition, we analyze the location of transition. For the potential calculation, a 3D finite element code is used, the boundary layer on the forebody is computed with an integral method based on the Prandtl's assumption; a turbulent Navier-Stokes code in a finite volume formulation is used for the afterbody flow calculation.

NOTATIONS

- X Axe de la veine
 x Point générique, $x=(x,y,z)$
 Rc Rayon du corps au niveau du maître couple
 Lc Longueur du corps
 Lv Largeur de la veine
 Hv Hauteur de la veine
 Sv Aire de la section de la veine
 Rv Rayon d'une veine cylindrique de section équivalente à celle de la veine considérée.
 α Rapport de confinement : rapport de l'aire de la section maximale du corps sur l'aire de la section de la veine.
 u Champ de vitesse, $u=(u_x, u_y, u_z)$
 u_∞ Vitesse à l'entrée de la veine
 p pression statique
 Cp coefficient de pression statique
 Re Nombre de Reynolds de l'écoulement,

$$Re = \frac{u_\infty L_c}{\nu}$$

- ν viscosité cinématique
 Tu Taux de turbulence de l'écoulement (en %)
 δ Epaisseur de couche limite
 Cf Coefficient de frottement
 k Energie cinétique turbulente
 ϵ Taux de dissipation visqueux
 ν_t Viscosité cinématique turbulente

1 - INTRODUCTION

Parmi les activités du Bassin d'Essais des Carènes, la réalisation d'essais sur maquettes et la modélisation mathématique et numérique des problèmes associés constituent les deux principaux domaines d'étude et de développement. Du point de vue des moyens expérimentaux, le Grand Tunnel Hydrodynamique (GTH) du centre de Val de Reuil joue, de part ses fonctionnalités et ses performances, un rôle d'importance capitale dans toutes les études et recherches en hydrodynamique. Parallèlement, l'arrivée sur le marché de calculateurs puissants et les progrès réalisés ces dernières années dans le domaine de la simulation numérique des écoulements (CFD) permettent maintenant de coupler étroitement l'expérimental et le numérique.

Du fait de la complexité des problèmes hydrodynamiques traités, l'approche numérique peut être utilisée d'une part pour la compréhension des phénomènes à partir d'études paramétriques et d'autre part pour une meilleure extrapolation des résultats expérimentaux au réel concernant les effets de Reynolds et les effets de parois. Ces derniers sont en effet susceptibles d'entacher les mesures d'erreurs non négligeables et leur évaluation est devenue impérative, aussi bien dans les souffleries aérodynamiques que dans les tunnels hydrodynamiques, afin de pouvoir répondre aux tolérances requises pour les mesures.

Depuis de nombreuses années, divers procédés visant à réduire les effets de confinement ont été développés et mis au point dans les souffleries [1], [2]. C'est ainsi que des veines à parois perforées, rainurées, ventilées ou déformables couplées ou non à un code de calcul utilisant une méthode d'optimisation en hypothèse d'écoulement

potentiel sont aujourd'hui largement représentées dans les souffleries modernes. La situation en hydrodynamique est notablement différente : la plupart des veines équipant les tunnels de cavitation sont à parois fixes et lisses et les effets de parois ne sont souvent pris en compte que de façon empirique par les expérimentateurs. Il est évident qu'à plus ou moins long terme cette situation devra faire place à une démarche utilisant les progrès réalisés dans les souffleries ou, tout au moins dans un premier temps, donnant à l'expérimentateur des moyens lui permettant d'extrapoler de façon rapide les résultats au réel. La démarche proposée ici constitue une première approche dans cette entreprise puisqu'elle permet dans un cadre simple (maquette et veines de formes simples) d'apprécier l'influence des parois sur les différents paramètres hydrodynamiques classiquement calculés, ceci tant quantitativement que qualitativement.

Différentes approches numériques sont choisies pour analyser et comprendre les phénomènes liés au confinement hydrodynamique. Une première simulation réalisée, successivement en milieu infini et en milieu confiné, pour un écoulement incompressible et irrotationnel en hypothèse de fluide parfait a permis d'une part de déterminer l'effet de blocage pour différentes tailles de veines et d'autre part de quantifier l'importance des effets tridimensionnels dus à leur géométrie. L'approximation de la section réelle des veines par une section circulaire est largement discutée. La connaissance de la pression pariétale est utilisée, dans un second temps, pour évaluer l'influence des parois sur le développement de la couche limite visqueuse à l'avant du corps en précisant plus particulièrement les positions de début et de fin de la zone de transition. Enfin, un calcul Navier-Stokes turbulent, effectué sur l'arrière du corps, permet de comparer les profils de vitesse et de pression pour différentes sections de veines d'essais et d'évaluer ainsi les écarts dus au confinement dans cette région.

2 - CADRE PHYSIQUE CONSIDERE

Le Grand Tunnel Hydrodynamique du Bassin d'Essais des Carènes situé sur le centre de Val de Reuil (GTH) possède deux sections d'essais parallèles: une petite veine (PV) à section carrée et une grande veine (GV) à section rectangulaire pouvant être utilisée avec surface libre [3].

Cette présentation est axée sur l'écoulement autour d'un corps de forme axisymétrique, composé de trois parties. La partie centrale de forme cylindrique, possède un rayon noté R_c . La figure 2.1 visualise le corps placé dans la grande veine du GTH.

Le tableau suivant donne les caractéristiques exactes des deux veines : L_v et H_v représentent les largeurs et hauteurs, S_v l'aire de la section, R_v le rayon d'une veine circulaire d'aire équivalente à celle de la veine considérée et α le rapport de confinement défini par :

$$\alpha = \frac{\pi R_c^2}{L_v H_v}$$

	L_v (m)	H_v (m)	S_v (m*m)	α	R_v (m)
PV	1,14	1,14	1,3	0,112	0,643
GV	2,00	1,35	2,7	0,054	0,927

3 - SIMULATION EN HYPOTHESE DE FLUIDE PARFAIT

3.1 Le modèle numérique

La méthode numérique, développée à l'INRIA par F. Hecht, est une méthode tridimensionnelle d'éléments finis calculant le champ potentiel dans une formulation mixte (\mathbf{u}, p) utilisant un algorithme d'Uzawa préconditionné par un laplacien avec conditions de Neumann. On résout donc le système :

$$\begin{aligned} \mathbf{u} + \nabla(-\phi) &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \end{aligned}$$

auquel on adjoint les conditions aux limites suivantes :

$$\begin{aligned} \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} &= \mathbf{u}_\infty \cdot \mathbf{n} && \text{en entrée et en sortie} \\ \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} &= 0 && \text{sur le corps et les parois latérales} \end{aligned}$$

L'élément fini utilisé est l'élément $(P1+\text{bulle}, P1)$ c'est à dire que les degrés de liberté pour la vitesse sont les valeurs au barycentre et aux quatre sommets du tétraèdre et pour la pression les valeurs aux sommets [4]. Les fonctions de base associées sont les coordonnées barycentriques λ_i et leur produit $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4$ qui constitue la "bulle" (celle-ci étant d'ailleurs éliminée lors de la résolution par un choix judicieux de certains coefficients). Les systèmes linéaires issus de la formulation variationnelle sont résolus par une méthode de gradient conjugué préconditionné par une factorisée incomplète de Choleski [5]. Comme toute méthode d'éléments finis, le maillage de la zone occupée par le fluide est nécessaire, à la différence des méthodes de singularités utilisant uniquement un maillage surfacique du corps. Ce type de méthode prend donc naturellement en compte l'existence de parois. Le domaine fluide est ici maillé en tétraèdres à l'aide du logiciel d'édition de contours et de maillages EMC2 développé à l'INRIA par F. Hecht et E. Saltel [6] et en utilisant aussi divers programmes de la bibliothèque MODULEF [7]. Il est clair que la qualité du maillage est d'une importance capitale notamment en ce qui concerne la modélisation du bord d'attaque. Les résultats proposés concernent un corps axisymétrique placé, sans incidence, au centre des veines du GTH (petite veine à section carrée (PV) et grande veine à section rectangulaire (GV)).

3.2 Analyse des résultats obtenus

L'objectif des simulations en hypothèse de fluide parfait irrotationnel est double : il s'agit d'une part d'examiner si la forme tridimensionnelle des veines peut induire une perturbation de l'écoulement et d'autre part de quantifier les écarts dus à la présence de parois sur les champs de vitesse et de pression en fonction du rapport de confinement.

3.2.1 Etude des effets tridimensionnels

Nous étudions ces effets sur les différentes quantités représentatives de l'écoulement : le coefficient de pression sur le corps et sur les parois de la veine, le champ de pression et le champ de vitesse.

Une coupe du coefficient de pression sur le corps, dans un plan perpendiculaire à l'axe de la veine, donne une valeur constante quelque soit la veine considérée, c'est à dire :

$$C_p(x, r, \theta) \equiv C_p(x, r)$$

dans le repère cylindrique lié à l'axe de la veine (figure 2.2). Notons également que dans le cas particulier de la grande veine ($H_v \neq L_v$), le coefficient de pression dans un plan méridien horizontal ($Z=0$) coïncide avec celui obtenu dans le plan méridien vertical ($Y=0$). Les coefficients de pression sur les parois des veines relevés dans ces deux plans permettent cependant d'observer une légère différence, toutefois pas de l'ordre que l'écart entre la largeur et la hauteur de la veine nous permettait de penser. Toujours dans ce cas, les lignes isobares obtenues dans les plans $Y=0$ et $Z=0$ sont pratiquement superposables (figures 2.3a et 2.3b) bien que la non-orthogonalité de celles-ci avec

la paroi soit révélatrice d'un effet de confinement certain. Concernant l'influence des parois sur le champ de vitesse, on peut observer au voisinage de celles-ci une amplification des composantes non-axiales, néanmoins l'ordre de grandeur de ces composantes reste peu important et pas de nature à expliquer l'invariance de la pression selon les plans méridiens (figures 2.4a et 2.4b). Une influence directe de ces perturbations sur les cartes de sillage au niveau d'un éventuel propulseur semble donc difficilement estimable dans le cadre des simulations en hypothèse de fluide parfait qui sont ici envisagées.

En conclusion, il semble que la forme tridimensionnelle des veines n'induit pas d'effets tridimensionnels majeurs sur l'écoulement (dans le cas d'un corps axisymétrique à incidence nulle) et une approximation des veines à section rectangulaire par des veines cylindrique de rayon R_v , c'est à dire possédant une section d'aire équivalente soit justifiée comme l'indique la figure 2.5 dans le cas de la grande veine.

Nous limiterons donc notre étude au cas de veines cylindriques de rayon R_v .

3.2.2 Etude quantitative des effets de parois

Afin de pouvoir estimer l'importance des effets de parois, une simulation en milieu semi-infini est effectuée. Les écarts obtenus sur le coefficient de pression entre les cas confinés et le cas infini tant en niveau (certains écarts dépassent largement 10%) qu'en terme de gradient sont présentés sur la figure 2.6. Si l'on note C_{pm} la valeur du coefficient de pression sur la partie cylindrique du corps et en supposant l'écoulement uniforme dans cette zone, un rapide calcul permet d'obtenir :

$$C_{pm} = 1 - \frac{R_v^4}{(R_v^2 - R_c^2)^2} = 1 - \frac{1}{(1-\alpha)^2}$$

valeur théorique faisant intervenir le rapport de confinement et vérifiée numériquement. Remarquons que si α est suffisamment petit (donc si l'écoulement est peu confiné), un développement limité au premier ordre permet d'obtenir l'approximation :

$$C_{pm} \approx -2\alpha$$

donnant une première idée de la perturbation occasionnée par les effets de parois.

4 - INFLUENCE DES EFFETS DE PAROIS SUR LA COUCHE LIMITE

4.1 Méthode numérique

Nous avons vu précédemment que les effets de parois modifiaient sensiblement le champ potentiel, il est donc essentiel d'examiner maintenant leur influence sur le caractère visqueux de l'écoulement en déterminant la zone de transition et en analysant l'évolution des paramètres de la couche limite (coefficient de frottement, épaisseurs de couche limite, épaisseur de déplacement...) pour des valeurs du nombre de Reynolds et du taux de turbulence de l'écoulement correspondant aux conditions expérimentales. La méthode numérique, développée au CERT/DERAT, est une méthode intégrale tridimensionnelle basée sur l'hypothèse de couche limite mince [8]. Des critères longitudinaux et transversaux, également développés au CERT/DERAT [9], permettent de déterminer la position de la zone de transition et également le lieu où les instabilités de Tollmien-Schlichting commencent à se développer. Il est clair que les résultats obtenus ne sont pas valables sur la partie arrière du corps où la couche limite est épaisse. Cette méthode utilise pour données la géométrie du corps et la distribution de vitesse potentielle sur celui-ci, les équations intégrales étant résolues dans un repère curviligne lié au corps.

Les résultats issus des simulations en hypothèse de fluide parfait présentées ci-dessus sont donc utilisés comme données potentielles du calcul couche limite mince. Cette démarche est justifiée tant qu'il n'existe pas d'interaction entre la couche limite se développant sur le corps et celle liée aux parois des veines, c'est à dire tant que le rapport de confinement n'est pas trop élevé.

4.2 Analyse des résultats

D'une façon générale, on note que les instabilités de Tollmien-Schlichting, susceptibles de provoquer le déclenchement de la transition, apparaissent d'autant plus rapidement que le rapport de confinement α est grand. Dans un premier cas, représentatif des conditions d'essais au GTH ($Re=3,8 \cdot 10^7$, $Tu=0,6\%$), l'écart entre les débuts d'instabilités dans la grande veine et dans la petite veine est très faible, par contre il n'est plus négligeable entre cette dernière et le cas non confiné. En ce qui concerne la zone de transition, il ne semble pas y avoir d'évolution monotone avec α mais les différences de position restent faibles. Une étude paramétrique effectuée pour différents couples (Re, Tu) montre que seul le cas extrême ($Re=0,95 \cdot 10^7$, $Tu=0,1\%$) fait apparaître d'importants écarts selon le rapport de confinement considéré, ce phénomène s'atténuant quand un des deux facteurs augmente (fig 3.1a et 3.1b). Donc, nous pouvons noter que pour des vitesses et des taux de turbulence voisins de ceux rencontrés lors des essais au GTH, la position de la zone de transition est peu affectée par la présence des parois.

Les paramètres de la couche limite, tels l'épaisseur de couche limite, les épaisseurs de déplacement et de quantité de mouvement et le coefficient de frottement, sont également peu sensibles au rapport de confinement à l'exception là encore du cas à faibles vitesses et taux de turbulence ($Re=0,95 \cdot 10^7$, $Tu=0,1\%$). Par ailleurs, un calcul effectué à un nombre de Reynolds proche du réel, pour un même taux de turbulence, montre des différences importantes sur les courbes d'évolution des paramètres entre le cas réel et le cas modèle. Ceci tend donc à prouver que les effets de Reynolds sont largement prépondérants sur les effets de parois mais l'absence de modélisation du phénomène de rugosité intervenant au réel doit faire envisager ces résultats avec circonspection. Les figures 3.2a, 3.2b et 3.2c présentent pour les cas étudiés l'évolution du coefficient de frottement Cf.

En conclusion, pour des formes géométriques et des conditions d'essais voisines de celles rencontrées au GTH, il ressort qu'en dépit des variations importantes constatées sur la pression, les paramètres de la couche limite sont peu affectés par le confinement sauf pour de faibles vitesses et de faibles taux de turbulence de l'écoulement. Par contre, les effets de Reynolds sont très importants et des simulations effectuées dans des conditions proches du réel, avec prise en compte de la rugosité, sont nécessaires pour extrapoler correctement les mesures.

5 - ECOULEMENT SUR ARRIERE-CORPS

Un des principaux sujets de recherche au Bassin d'Essais des Carènes est la détermination des sillages et l'optimisation des propulseurs. De ce fait, l'évaluation de l'effet de blocage à l'arrière des corps, et plus précisément dans le disque de l'hélice, est fondamentale pour une correcte extrapolation des mesures au réel.

5.1 Principe de la méthode numérique

Afin de simuler l'écoulement sur l'arrière du corps et prendre correctement en compte les effets visqueux dans cette région, il a paru intéressant d'adapter le code "Navier-Stokes parabolisé axisymétrique", développé à l'ENSM par l'équipe du professeur Piquet [10], au traitement des écoulements en milieu confiné.

En effet, sur la partie arrière, la convergence des lignes de courant entraîne un épaissement de la couche limite. De ce fait, la résolution des équations de couche limite mince n'est plus adaptée et doit être remplacée par celle des équations complètes de Navier-Stokes. Toutefois, lorsque la forme géométrique traitée est peu complexe, c'est à dire en l'absence d'appendices, il est possible de négliger les termes de diffusion dans la direction de l'écoulement, le système d'équations ainsi obtenu étant de nature parabolique, les équations peuvent alors être résolues par une méthode de marche dans le sens de l'écoulement. La version utilisée repose sur la méthode de résolution SIMPLER de Patankar qui correspond à une formulation vitesse-pression sur un maillage différences finies. Le code utilise un modèle de turbulence à deux zones : un modèle à une équation de transport au voisinage

du corps et un modèle $k-\epsilon$ complet dans le reste du domaine (figure 5.1) .

Pour permettre le traitement de ces écoulements en milieu confiné, les modifications apportées à la version initiale du code concernent principalement le traitement des conditions aux limites:

- La paroi de la veine d'essais a été modélisée par une condition d'adhérence (figure 5.1) et par un resserrement du maillage permettant ainsi la prise en compte correcte d'une couche limite visqueuse dans cette région.

- Les calculs étant effectués uniquement sur l'arrière du corps, la condition initiale amont a également été corrigée. Le profil de vitesse dans la section initiale, située généralement au niveau de la partie cylindrique du corps et correspondant à une région où l'écoulement est pratiquement uniforme, est déterminé de façon à conserver le débit. Pour une simulation effectuée en milieu infini, le profil de la vitesse initiale est obtenu, au voisinage de la paroi, à partir d'une procédure dite IVKCC (Initial-Value-Kaups-Cebeci et Chang) utilisant l'épaisseur de couche limite et la vitesse de frottement à la paroi. Celui-ci est ensuite raccordé à la vitesse uniforme ($u_x / u_\infty = 1$) par l'intermédiaire d'une légère survitesse. En milieu confiné, le profil se décompose en trois parties : au voisinage du corps et de la paroi de la veine, le profil est obtenu à partir de la formulation IVKCC mais pour des épaisseurs de couche limite et des vitesses de frottement correctement choisies, ces deux parties, déterminées séparément, se raccordent à un profil de vitesse u_x / u_∞ uniforme, calculé de manière à conserver le débit. La figure 5.2 présente ces profils de vitesse. Le modèle de turbulence $k-\epsilon$, utilisé dans la majeure partie du domaine, est conservé au voisinage de la paroi de la veine.

5.2 Etude numérique

Les simulations numériques sont effectuées sur une forme arrière axisymétrique, pour une vitesse habituelle de fonctionnement de 8 m/s, les deux veines PV et GV sont modélisées par des veines à section circulaire d'aire équivalente.

L'épaisseur de couche limite et la vitesse de frottement sur le corps à l'abscisse initiale, nécessaires à la détermination du profil de vitesse, sont déterminées à partir du code couche limite mince. L'épaisseur de couche limite sur la paroi de la veine est mesurée expérimentalement en un point, son évolution ainsi que la valeur de la vitesse de frottement sont estimées à partir de lois "plaque plane" en écoulement turbulent. Une vue partielle du maillage correspondant à la petite veine est présentée sur la figure 5.3.

L'évolution longitudinale du coefficient de pression sur le corps et les profils de vitesse axiale et radiale pour la section correspondant au disque de l'hélice sont comparés pour la petite et la grande veine avec la solution en milieu infini (figures 5.4 à 5.7). Il faut préciser, par ailleurs, que le coefficient de pression est calculé avec l'hypothèse d'une pression de référence nulle dans la section initiale du calcul. Ce choix implique que la pression en amont du corps est différente pour le cas confiné et la cas non confiné; le théorème de Bernoulli devra donc être utilisé pour une comparaison directe avec des mesures. Au niveau de l'hélice, les résultats numériques montrent, pour la petite veine, un écart non négligeable sur la vitesse axiale qu'il est important de quantifier lors de l'extrapolation des mesures en vue de l'optimisation des propulseurs.

Une première validation numérique de ces résultats a été faite par comparaison avec les simulations de CHEN et PATEL [11] sur un arrière-corps de forme légèrement différente où des évolutions identiques ont pu être observées. Néanmoins, l'ensemble de l'étude a montré que ces résultats sont essentiellement pilotés par le profil de vitesse initial et plus particulièrement par la vitesse maximale dans cette région, qui reste une inconnue non négligeable dans cette simulation.

6 - CONCLUSION

Le problème du confinement hydrodynamique a été abordé à partir de simulations numériques. Nous avons montré comment des codes de calcul performants pouvaient être utilisés afin d'évaluer l'importance des effets de blocage, souvent non négligeables dans des moyens d'essais tels que les tunnels de cavitation. Les tests numériques ont été réalisés pour les veines du GTH, avec des conditions analogues à celles rencontrées lors des essais, et pour une géométrie axisymétrique correspondant à la forme mère d'un sous-marin. Les simulations, en hypothèse de fluide parfait, ont montré que pour une veine à section carrée ou rectangulaire respectant un rapport longueur sur largeur réaliste, les effets dus à la tridimensionnalité des veines sont négligeables. De ce fait, l'approximation par des veines à section circulaire d'aire équivalente est justifiée. Les distributions de vitesse potentielle, présentant d'importants écarts avec le rapport de confinement ont permis ensuite de montrer la faible influence des parois sur la position de la zone de transition et sur les paramètres représentatifs de la couche limite pour des conditions d'écoulements voisines de celles rencontrées au GTH. La dernière approche a été réalisée afin d'évaluer l'importance de l'effet de blocage sur des mesures de vitesse par vélocimétrie laser et permettre ainsi de les corriger avant toute extrapolation au réel.

Le but essentiel de cette étude n'était pas de quantifier de façon générale les effets de parois mais plutôt de montrer la démarche numérique adoptée parallèlement aux campagnes d'essais en vue d'analyser et d'interpréter correctement les mesures. Il est clair que ceci ne constitue qu'une première approche vers un couplage mesures-calcul.

REFERENCES :

- [1]: J.P Chevalier, X. Vaucheret : "Effets de parois en soufflerie".
Association Aéronautique et Astronomique de France. Note technique n°83-12.
- [2]: X. Vaucheret : "Progrès récents des calculs d'effets de parois en souffleries industrielles".
La Recherche Aéronautique 1988-3. Mai-Juin 88. Pages 45-57.
- [3]: Y. Lecoffre, P. Chantrel, J. Teiller : "Le Grand Tunnel Hydrodynamique (GTH)".
ASME Winter Annual Meeting, Boston 1987.
- [4]: Arnold, Brezzi, Fortin : "A stable finite element for the Stokes equations".
Calcolo 21 (4) , pages 337-344, 1984.
- [5]: O. Pironneau : "Méthode des éléments finis pour les fluides".
Collection RMA n°7. MASSON.
- [6]: F. Hecht, E. Saltel : "Emc2, un logiciel d'édition de maillages et de contours bidimensionnels".
Rapport Technique INRIA. Mars 1990.
- [7]: P. L. Georges : "Construction et modification de maillages".
Rapport Technique INRIA n°104. Dec 1988.
- [8]: C. Gleyzes, J. Cousteix, B. Aupoix : "Couches limites tridimensionnelles sur des corps de type fuselage".
Rapport Technique OA N° 4/5025 AYD (février 1985).
- [9]: D. Arnal, M. Habiballah, E. Coustols : "Théorie de l'instabilité laminaire et critères de transition en écoulement bi et tridimensionnel". La Recherche Aéronautique 1984-2.
- [10]: M. Ferry, J. Piquet, P. Queutey, M. Visonneau : "Ecoulement visqueux sur un arrière-corps axisymétrique". Premières Journées de l'Hydrodynamique (février 1987).
- [11]: H.C. Chen, V.C. Patel : "The wake of an axisymmetric body with and without tail separation".
6th Symposium on Turbulent Shear Flows; Sept 7.9, 1987 (Toulouse).

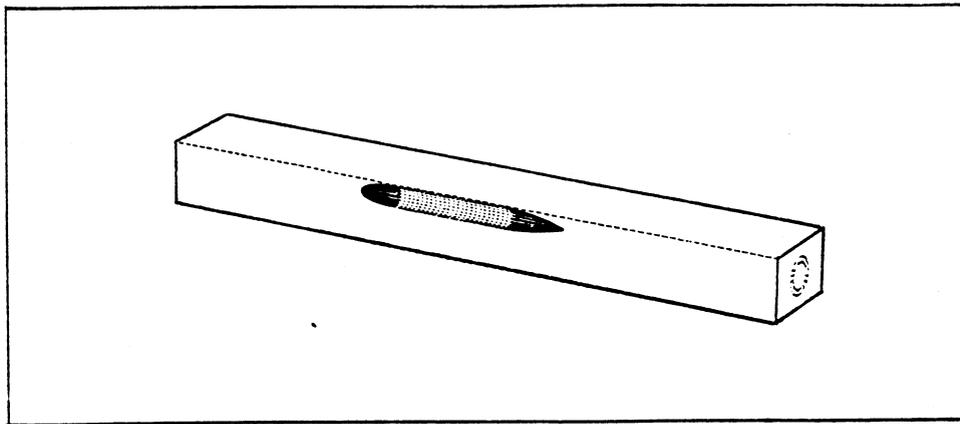


Figure 2.1: Vue du corps dans la grande veine.

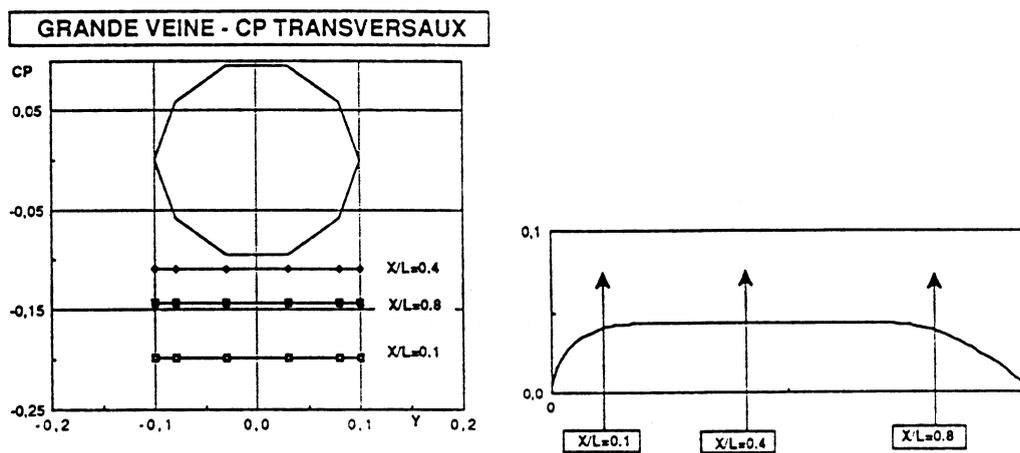


Figure 2.2: Coefficient de pression transversal aux abscisses $x/L_c=0.1, 0.4$ et 0.8 dans le cas GV.

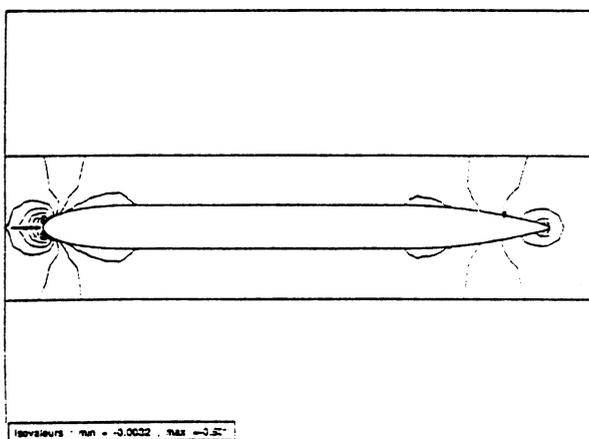


Figure 2.3 a

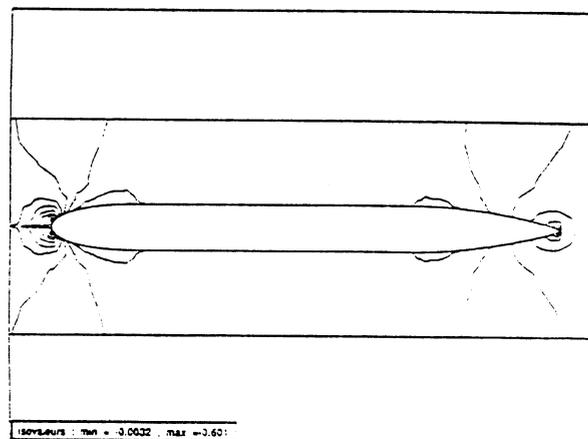


Figure 2.3 b

Isobares dans le cas GV dans le plan $Y=0$ (a) et dans le plan $Z=0$ (b).

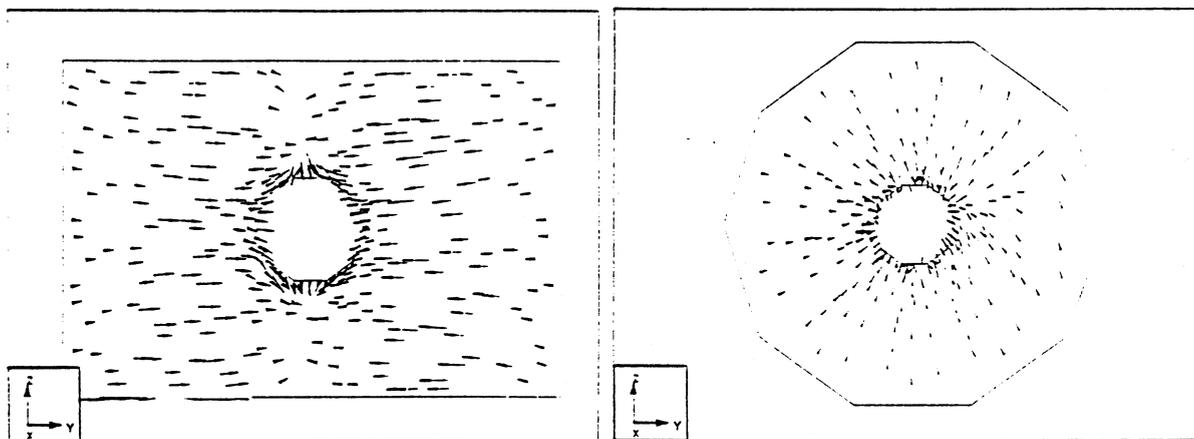


Figure 2.4 a

Figure 2.4 b

Composantes transversales du champ de vitesse dans la section $x=Lc/2$

a) Cas GV, b) cas de la veine cylindrique de rayon $Rv=1m$

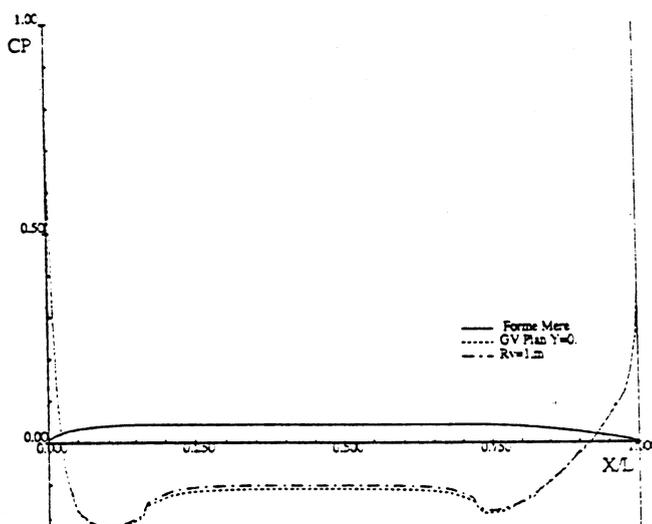


Figure 2.5: Comparaison des coefficients de pression dans le plan $Y=0$ pour le cas de la grande veine et de la veine cylindrique de rayon $Rv=1m$.

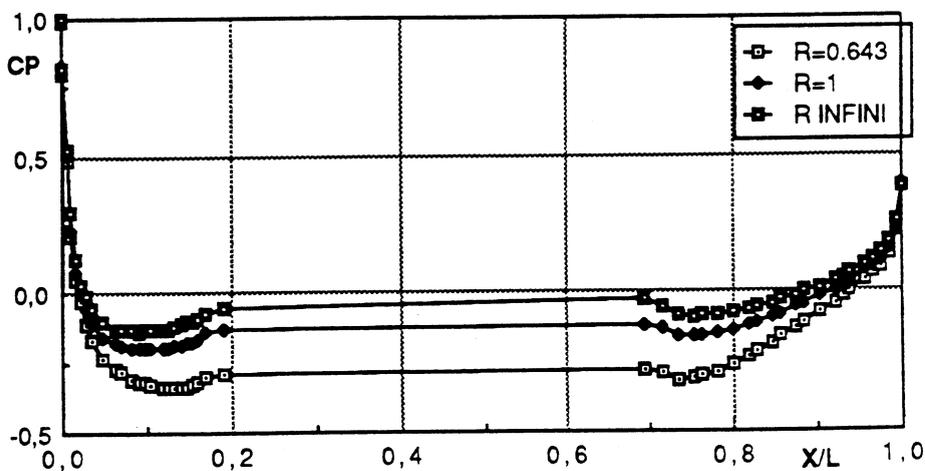


Figure 2.6: Comparaison du coefficient de pression dans le cas des veines cylindriques de rayon $Rv=0.643m$, $Rv=1m$ et du milieu semi infini.

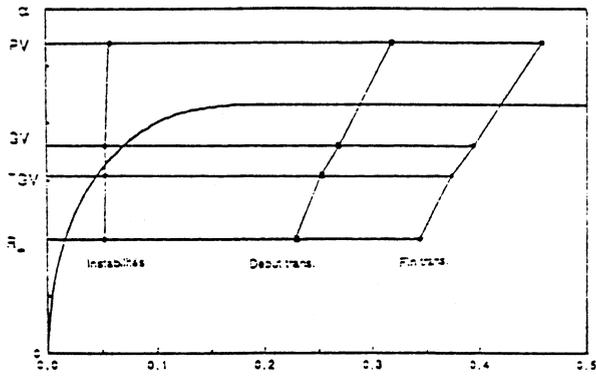


Figure 3.1 a

Position du déclenchement des instabilités et du début et fin de transition dans les cas $U_\infty = 2 \text{ m/s}$, $Tu = 0.1\%$ (a) et $U_\infty = 8 \text{ m/s}$, $Tu = 0.6\%$ (b).

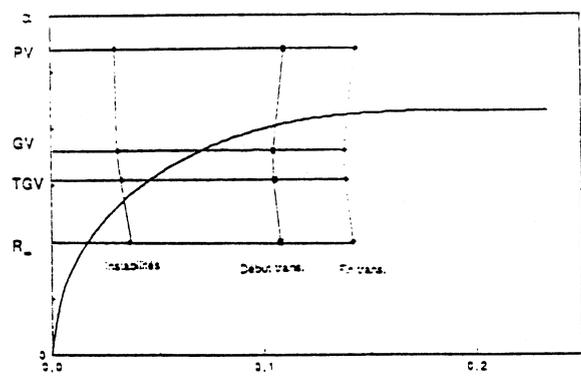


Figure 3.1 b

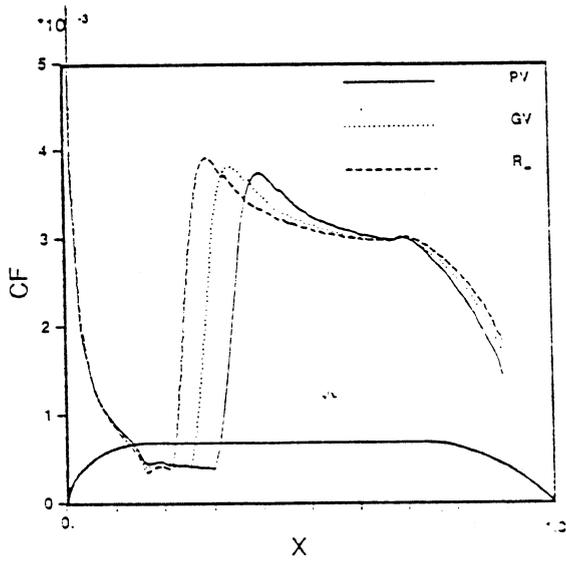


Figure 3.2 a

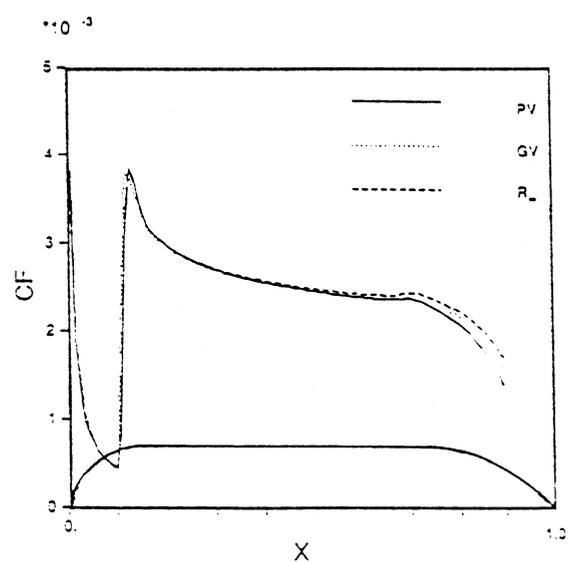


Figure 3.2 b

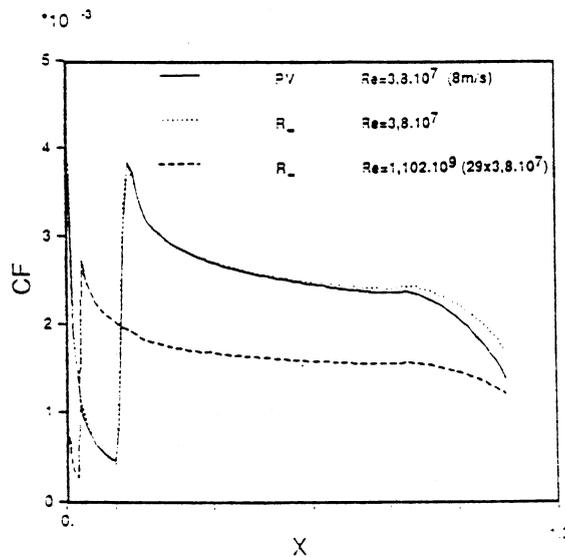


Figure 3.2 c

Evolution du coefficient de frottement dans les cas $U_\infty = 2 \text{ m/s}$, $Tu = 0.1\%$ (a), $U_\infty = 8 \text{ m/s}$, $Tu = 0.6\%$ (b) pour PV , GV et non confiné et dans le cas $Tu = 0.6\%$ pour PV , non confiné maquette et non confiné réel (c).

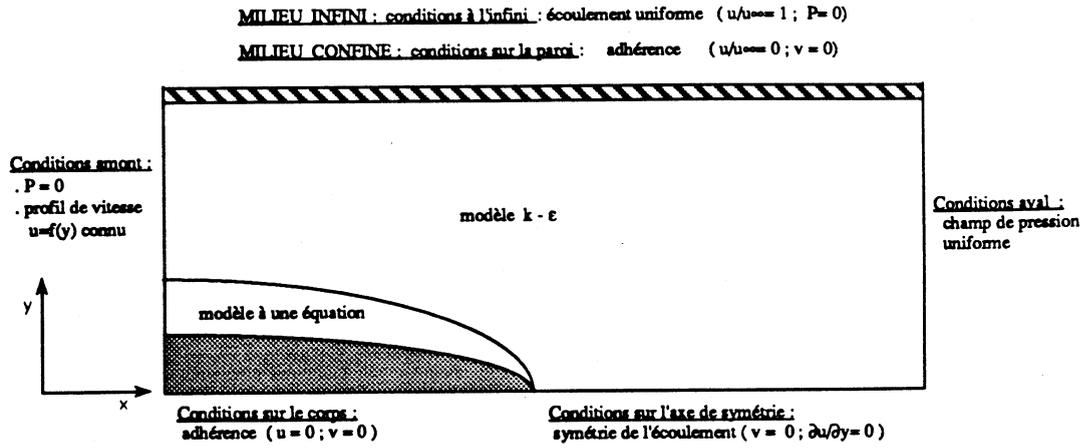


Figure 5.1: Conditions aux limites

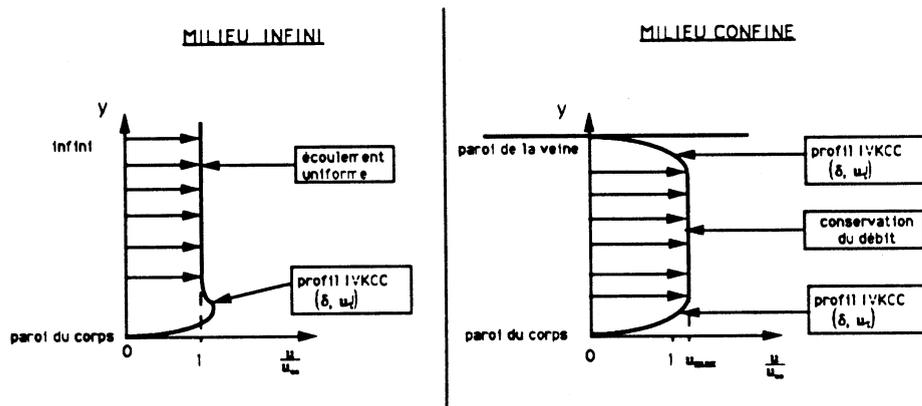


Figure 5.2: Profils de vitesse dans la section initiale du calcul

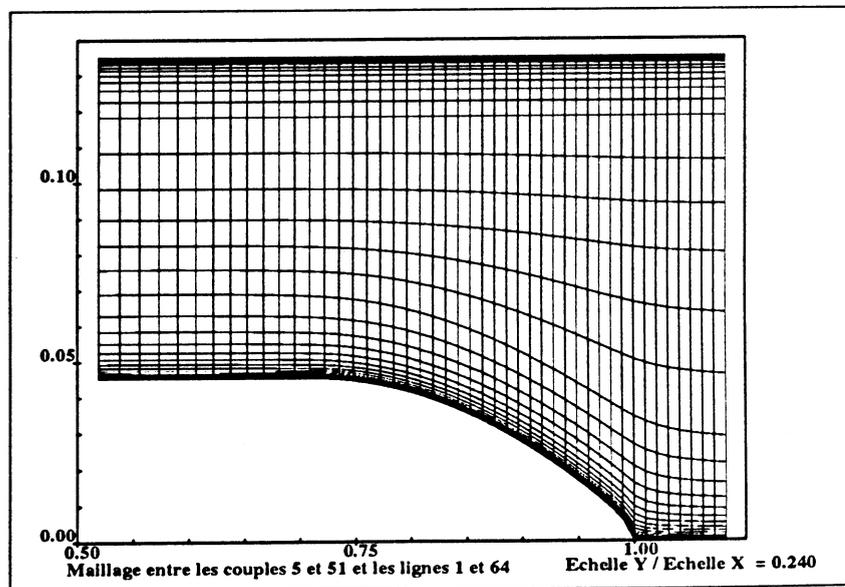


Figure 5.3: Vue partielle du maillage de la petite veine

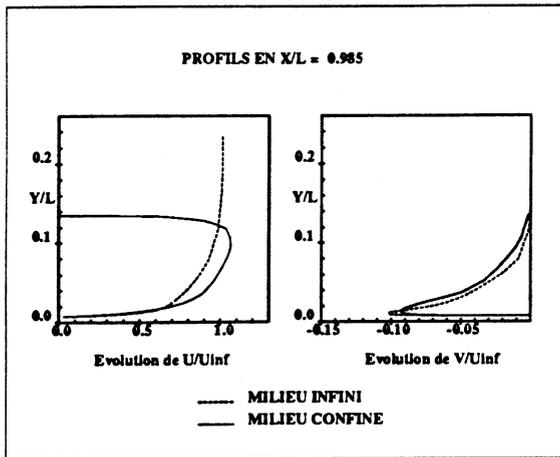


Figure 5.4 : Comparaisons des profils de vitesse axiale et radiale dans le disque de l'hélice pour la petite veine

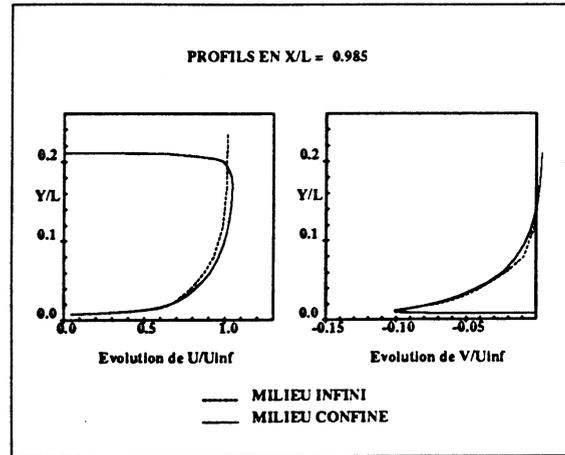


Figure 5.5 : Comparaisons des profils de vitesse axiale et radiale dans le disque de l'hélice pour la grande veine

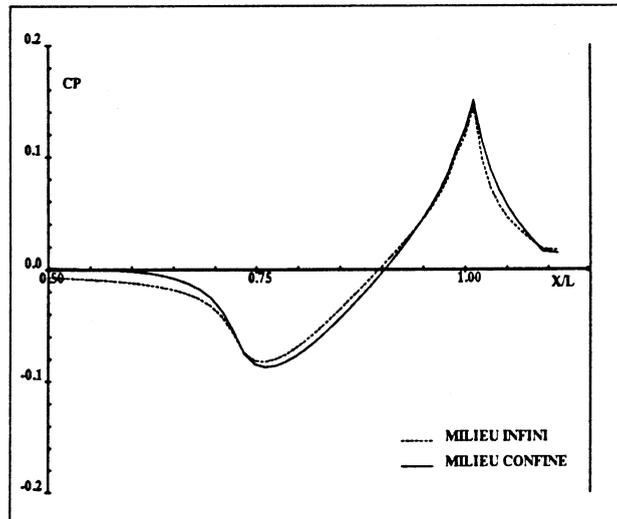


Figure 5.6 : Comparaison des coefficients de pression sur le corps pour la petite veine

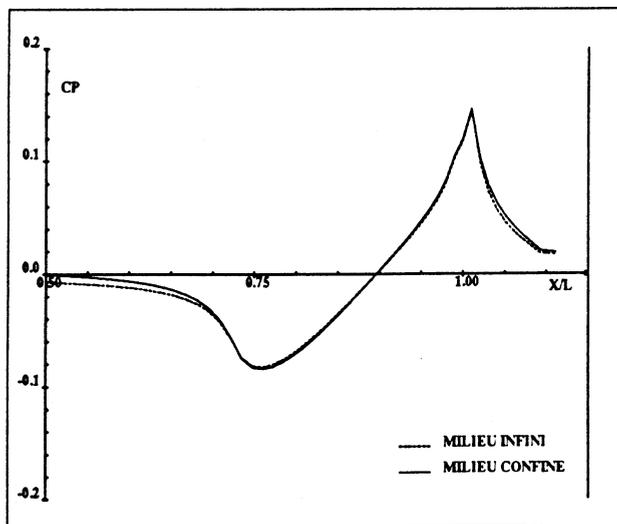


Figure 5.7 : Comparaison des coefficients de pression sur le corps pour la grande veine