

HYPERSUSTENTATION PAR CYLINDRE TOURNANT

Stéphane Cordier

BASSIN D'ESSAIS DES CARENES
Chaussée du Vexin
27100 Val de Reuil

Résumé

Dans le but de développer un concept de gouverne stabilisatrice à haute portance, une étude systématique a été entreprise pour déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de plans portants comportant un ou plusieurs cylindres tournants. A partir d'un bilan de l'état de l'art d'allongement fini dans ce domaine 4 configurations sont retenues. Les modes de fonctionnement de ces configurations sont analysés numériquement et interprétés physiquement. Des géométries sont définies pour faire l'objet d'essais en tunnel hydrodynamique. Les effets de confinement sont étudiés numériquement et expérimentalement. Les résultats des essais sont présentés pour les différentes configurations en fonction de l'incidence et de la vitesse de rotation du cylindre. Les influences du nombre de Reynolds et du paramètre de cavitation sont discutées. Un coefficient caractérisant la puissance nécessaire à la rotation des cylindres est défini. Les configurations sont comparées vis-à-vis de ce paramètre, de la traînée et des incidences nécessaires.

Summary

As part of the development of high-lift fin stabilisers a systematic study of lifting bodies incorporating one or several rotating cylinders was undertaken to determine their hydrodynamic characteristics. A survey of the state of the art identified 4 configurations. A numerical analysis and a physical interpretation of their behaviour is presented. The design of the finite aspect-ratio models to be tested in a water tunnel is discussed. The wall effects were investigated numerically and experimentally. The results are presented as a function of angle of attack and cylinder angular velocity for the different configurations. Reynolds number and cavitation effects are discussed. A coefficient for the power required to rotate the cylinder is defined. The various configurations are compared based on this parameter, the drag data and the angles of attack required.

INTRODUCTION

Dans certaines applications les plans portants doivent pouvoir conserver une portance constante à des vitesses réduites par rapport aux conditions normales d'utilisation. Ceci nécessite une augmentation temporaire du coefficient de portance: hypersustentation. Ce besoin se retrouve dans l'aéronautique (décollage et atterrissage), dans la propulsion éolienne, et plus pertinemment, dans le cas de gouvernes stabilisatrices.

Dans ce dernier cas une paire de gouvernes dont la vitesse d'avance, la portance et l'envergure sont fixées nécessite dans l'application visée un rapport portance/allongement (C_z/Ag) de 2,5: par exemple $C_z=2,5$ ($Ag=1$) ou $C_z=5,0$ ($Ag=2$). Pour atteindre ce but, divers dispositifs hypersustentateurs existent: volets multiples, soufflage, aspiration, surfaces mobiles, etc... Dans la présente communication les solutions étudiées comportent un ou plusieurs cylindres tournants. Ces dispositifs nécessitent la même complication mécanique nécessaire à l'entraînement des cylindres et l'objectif de cette étude est de déterminer la configuration optimale de ce mode d'hypersustentation. Dans cet exposé, seules les performances en écoulement stationnaire seront abordées.

De nombreux travaux ont été effectués sur différentes configurations comportant un cylindre soit intégré dans un profil soit isolé. Ces études à caractère expérimental sont généralement orientées vers la démonstration des performances d'une configuration particulière. Aucune étude systématique n'a été entreprise pour différentes configurations d'envergure finie comportant un ou plusieurs cylindres tournants. Les configurations suivantes existent dans la littérature:

- a) Bord d'Attaque Tournant (BAT) sur profil symétrique: STEELE 1970, TENNANT 1975, KUDREVATYI 1983, MILLWARD 1984, YOUHUA 1987, RITTEMARD 1988, MODI 1990.
- b) Bord d'attaque tournant sur profil avec volet: JASTRAM 1989.
- c) Emplanture de volet tournant: CALDERON 1964.
- d) Cylindre tournant sur l'extrados: MODI 1988.
- e) Bord de Fuite Tournant (BFT): TENNANT 1976, MODI 1990.
- f) Bord d'attaque et bord de fuite tournants: KUDREVATYI 1988, MODI 1990.
- g) Cylindre Tournant (CT): CHARRIER 1979.
- h) Cylindre à proximité d'un autre cylindre ou cylindre à proximité d'un plan portant.

Les configurations c , d , et h n'ont pas été retenues. Le cylindre à l'emplanture d'un volet ou sur l'extrados s'est avéré être peu efficace. Les configurations proposées en h imposent une géométrie variable trop complexe. Les 4 configurations retenues comportent un cylindre tournant au bord d'attaque et sont dénommées de la manière suivante:

- bord de fuite symétrique: BAT-SYM,
- volet de bord de fuite: BAT-VOLET,
- bord de fuite tournant: BAT-BFT,
- cylindre tournant: CT.

ANALYSE DES PROFILS

Bord d'attaque tournant

Sur un profil symétrique à forte incidence l'écoulement est accéléré puis décéléré brutalement au bord d'attaque. Au delà d'une certaine incidence α_{max} cette zone de recompression provoque le décollement de la couche limite et une perte de portance. Le décollement peut être retardé par le mouvement de la paroi dans le sens de l'écoulement. Ceci est réalisé par le biais d'un cylindre tournant (BAT-SYM). L'incidence maximale et la portance correspondante augmentent avec la vitesse de rotation du cylindre. Celle-ci est caractérisée par le paramètre adimensionnel K .

Aux incidences inférieures à α_{max} , les résultats publiés dans la littérature montrent que la rotation du cylindre ne contribue pas à la portance. En effet, la condition de Kutta-Joukowski vérifiée au bord de fuite prédétermine la circulation présente sur le profil.

Pour étudier la forme d'un profil symétrique comportant un bord d'attaque circulaire, des calculs ont été effectués à l'aide du code EPPLER (singularité, épais, 2D, portant). La rotation du cylindre n'est pas modélisée (effet visqueux) et l'écoulement est supposé rester collé. Pour une incidence d'environ 20° ($C_z=2,5$) les distributions de pression autour d'une famille de profils ont été calculées. L'objectif est de minimiser le gradient de recompression et de maximiser l'étendue de la zone de recompression couverte par le cylindre tournant. Un profil avec un cylindre de diamètre égal à l'épaisseur s'est imposé: $d_1/c=t/c=25\%$. Le profil et la distribution de pression sont présentés sur la Figure 1. Le cylindre permet de contrôler l'écoulement sur 15% de la corde à partir du bord d'attaque..

TENNANT, YOUHUA et KUDREVATYI ont testés des profils similaires et ils obtiennent des portances ($C_{zmax}=2,1-2,35$ pour $2 < K < 3$) qui sont supérieurs à celles obtenues par des profils dont le cylindre est

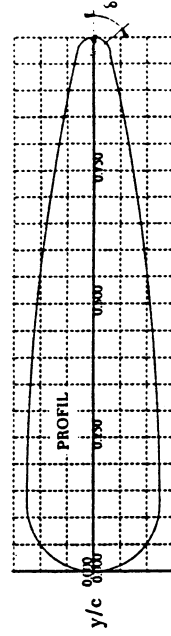
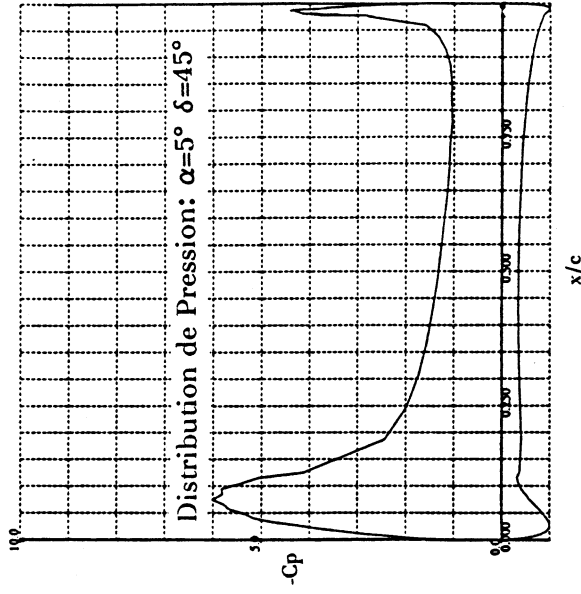
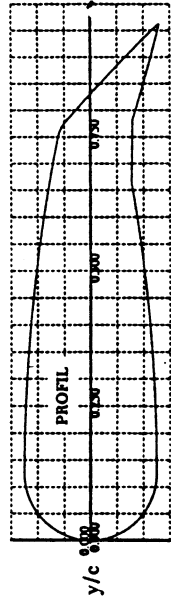
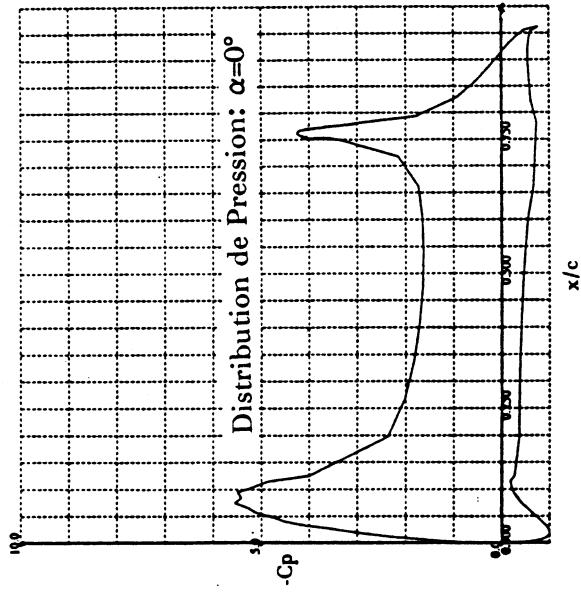
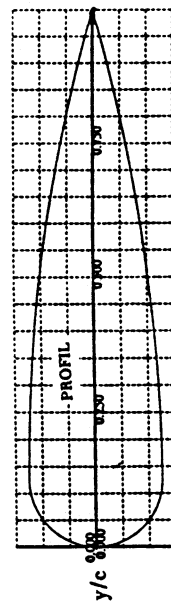
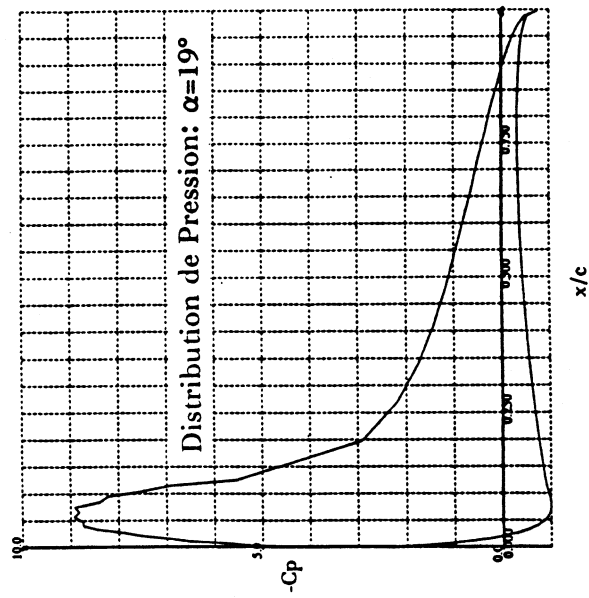


Figure 1: Profil BAT-SYM

Figure 2: Profil BAT-VOILET

Figure 3: Profil BAT-BFT

inscrit dans le bord d'attaque ($C_{zmax}=1,6-1,9$ pour $K>3$): MODI, MILLWARD, RITTEMARD.

L'addition d'un volet au bord de fuite permet de réduire l'incidence nécessaire pour atteindre une portance donnée et uniformise la distribution de pression. Pour simuler une configuration réaliste, l'axe du volet est situé sur la corde et le rayon de raccord correspond à la demi épaisseur du profil. Une analyse paramétrique du champ de pression en fonction de la corde et du braquage du volet a été effectuée pour un C_z de 2,5. Le profil et la distribution de pression résultant de cette étude sont présentés en Figure 2 ($c_v/c=25\%$, $\beta=30^\circ$). La société JASTRAM construit des gouvernails basés sur ce concept mais ne publie pas de données sur leurs performances.

Bord de fuite tournant

Le cylindre tournant au bord de fuite agit sur la position du point de séparation qui détermine la circulation et donc la portance du profil. A l'opposé des profils avec BAT, ce type de contrôle influence la portance indépendamment de l'incidence et a un effet similaire à de la cambrure. L'efficacité de ce concept a été mis en évidence lors d'essais sur des profils BAT avec un écoulement inversé: $\alpha=180^\circ$ (KUDREVATI 1983, YOUHUA 1987) et sur des profils munis d'un bord de fuite tournant (TENNANT 1975, MODI 1990). Des C_z de l'ordre de 1,0 sont obtenus à incidence nulle par la simple rotation du bord de fuite.

L'évolution de la couche limite et la position du point de séparation (caractérisée par sa position angulaire δ par rapport à la corde) sont conditionnées par la vitesse de rotation du cylindre et par le champ de pression local. Celui-ci dépend de la portance et de la courbure de la surface caractérisée par $d2/c$.

La prédiction numérique directe de la position du point de séparation sur le bord de fuite n'est pas encore abordable par le calcul. Cependant, l'influence des paramètres δ et $d2/c$ sur la portance a pu être étudiée à l'aide du code EPPLER. Pour chaque configuration la position du point de bord de fuite δ est prescrite arbitrairement. Un exemple de résultat est présenté en Figure 3 ($d2/c=6\%$ $\delta=45^\circ$). La distribution de pression obtenue est similaire à celle du profil avec volet. La portance d'une famille de profils avec BFT a été calculée en faisant varier les paramètres α δ et $d2/c$. Les résultats présentés pour une incidence nulle sur la Figure 4 montrent que la portance augmente avec δ et $d2/c$ croissants. Le cas du cylindre Magnus est un cas limite de profil BFT.

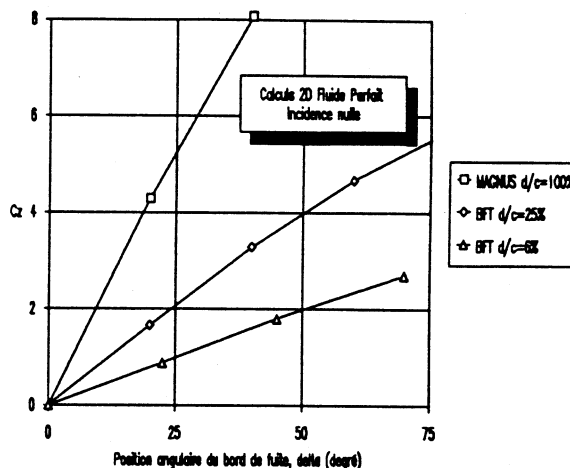


Figure 4: Effet du diamètre du bord de fuite et du point de décollement sur la portance à incidence nulle.

Une première configuration BFT a été conçue avec un cylindre de bord de fuite de diamètre égal à l'épaisseur ($d2/c=t/c=25\%$). Pour contrôler l'écoulement au bord d'attaque deux solutions sont retenues: bec de bord d'attaque (BFT-BEC) et bord d'attaque tournant (BAT-BFT). La première alternative a été mise au point avec le code EPPLER ($c_b/c=15\%$, $\beta=30^\circ$). La seconde alternative consiste à installer un bord d'attaque tournant dont le diamètre a été fixé à $d1/c=6\%$ soit le quart de l'épaisseur.

Une seconde configuration BAT-BFT est obtenue en inversant le même profil ($d1/c=25\%$ $d2/c=6\%$). Cette configuration permet l'évaluation des performances d'un profil doté d'un petit cylindre de bord de fuite dont la traînée est minimale lorsque le cylindre est à l'arrêt.

MODI a récemment démontré en 2D l'efficacité de ce type de configuration ($C_z=2,6$ à $K=4$). KUDREVATYI mentionne un C_z de 4,7 pour une voile dont les bords d'attaque et de fuite sont 2 cylindres de même diamètre $d1/c=d2/c=15\%$

Cylindre Tournant Seul

Le cylindre tournant seul constitue le cas limite des configurations à bord d'attaque et bord de fuite tournants. La portance d'un cylindre en rotation dans un écoulement transverse fut mis en évidence par MAGNUS il y a 150 ans (obus). FLETTNER en trouva la première utilisation pratique il y a 70 ans (propulsion éolienne). Dans un exposé des applications possibles du cylindre MAGNUS au domaine marin, MORRISEAU mentionne les stabilisateurs pour lesquels 2 brevets existent. Les caractéristiques aérodynamiques des cylindres

tournants ont été traités de manière détaillée par CHARRIER. Les points sur lesquels un effort reste à fournir sont les effets de Reynolds (de l'ordre de 10^4 dans le travail de CHARRIER et d'autres), la cavitation, les performances à faible allongement, et les caractéristiques instationnaires (délai sur l'établissement de la portance). Ce dernier point étant encore en cours d'étude il n'est pas abordé dans cette communication.

Plans Marginaux

L'effet de disques d'extrémité sur un cylindre tournant a été mis en valeur par le travail de CHARRIER. Pour un cylindre d'allongement de 2, des disques de diamètre 2 fois celui du cylindre ($d^*=2,0$) implantés à la base et en bout permettent de quadrupler le C_z à $K=3$. Il a aussi mis en évidence le fait que les contributions des 2 disques sont égales et cumulatives. Les disques d'extrémité n'agissent donc pas directement sur la distribution de circulation mais augmentent l'efficacité du contrôle de la couche limite sur les cylindres. Pour des raisons d'encombrement les disques d'extrémités utilisés sont de diamètre $d^*=1,5$ seulement.

Le mécanisme d'entraînement du deuxième cylindre tournant (BAT-BFT) a imposé la présence d'un carter épais de 10% d'envergure. Ce "plan marginal" a été utilisé pour tous les essais pour pouvoir comparer les performances des différents systèmes d'hypersustentation.

MONTAGE EXPERIMENTAL

Moyen d'essais

Les essais ont été effectués dans le Petit Tunnel Hydrodynamique (PTH) du centre de Val de Reuil (Figure 5). La veine du Bassin d'Essais des Carènes a une section de 480 mm x 600 mm et les vitesses d'écoulement sont de 2 à 12 m/s sans surface libre. Les efforts sont mesurés par une balance de paroi à 5 composantes limitée en portance à environ 1000 N. L'axe de la balance est excentré par rapport à la veine. Une plaque de plexiglass a été fabriquée pour pouvoir effectuer des essais dans un écoulement bidimensionnel (Figure 6). La vitesse de la veine est mesurée par LDV au milieu de la section 2D, 500 mm en amont du profil. L'incidence est pilotée sur 65° par des vérins électriques reliés à l'ordinateur d'acquisition de données. L'acquisition de données est effectuée lors de balayages automatiques des incidences par pas de 4° . La chape qui supporte les vérins est orientable sur 360° autour de la balance ce qui permet de centrer le balayage des incidences de manière arbitraire. La vitesse du cylindre est réglable jusque ± 20000 tr/mn par un moteur spécialement conçu par SERMAT. Les conditions standards d'essais sont les suivantes:

V_0	=	4,0 m/s
Re	=	$0,6 \cdot 10^6$
σ	=	11
K	=	0 à 4 ($N=0$ à 8000 t/min)
α	=	-12° à $+54^\circ$

Modèles

Les dimensions des modèles sont de 150 mm x 150 mm. Ils sont constitués d'un corps central en acier inoxydable qui est solidaire du plateau de la balance et dans lequel sont aménagés les passages pour la fluorescéine. Devant le corps de la gouverne le cylindre circulaire est centré par des roulements à bille sur un mat solidaire du plateau de la balance. Un arbre au centre du mat entraîne le cylindre par son disque d'extrémité. TENNANT et MILLWARD ont montré l'effet négatif d'un jeu trop important entre le cylindre et le profil. Sur le modèle utilisé ce jeu est quasiment nul et les visualisations ont montré qu'aucune recirculation n'existe autour du cylindre.

Quatre bords de fuite ont été réalisés pour modéliser les différentes configurations: bord de fuite symétrique, volet, bec, cylindre. Les différents bords de fuite sont interchangeables sur l'arrière du corps de la gouverne. Ceux-ci sont dotés d'une alimentation en fluorescéine pour visualiser le décollement. L'entraînement du petit cylindre de bord de fuite se fait par courroie et roue dentée. Les 2 cylindres ont alors la même vitesse tangentielle.

Pour les essais de cylindre tournant seul, le montage permet de tester indépendamment le cylindre du bord d'attaque de la gouverne ($d=37,5$ mm, $Ag=4$): CT1. Un deuxième cylindre ($d=75,0$ mm, $Ag=2$) a été réalisé pour évaluer les effets d'allongement et de Reynolds: CT2.

Les modèles sont lisses. Des bandes de rugosité ont été introduites sur le bec de bord d'attaque et en amont du volet pour garantir la présence d'une couche limite turbulente.

ETUDE DU CONFINEMENT

Profil

La présence du plancher et du toit de la veine modifie l'écoulement autour des plans portants et influence les efforts mesurés. Les modèles ont été dimensionnés pour minimiser ce problème ($c/H=0,31$) sans pouvoir l'éliminer. Pour évaluer l'importance du confinement le code PROFIL (2D confiné, singularité, portant, épais) a été utilisé pour calculer la portance d'un profil du type BAT-SYM à des incidences positives et négatives par rapport à un centre de rotation (axe du cylindre) excentré dans la veine.

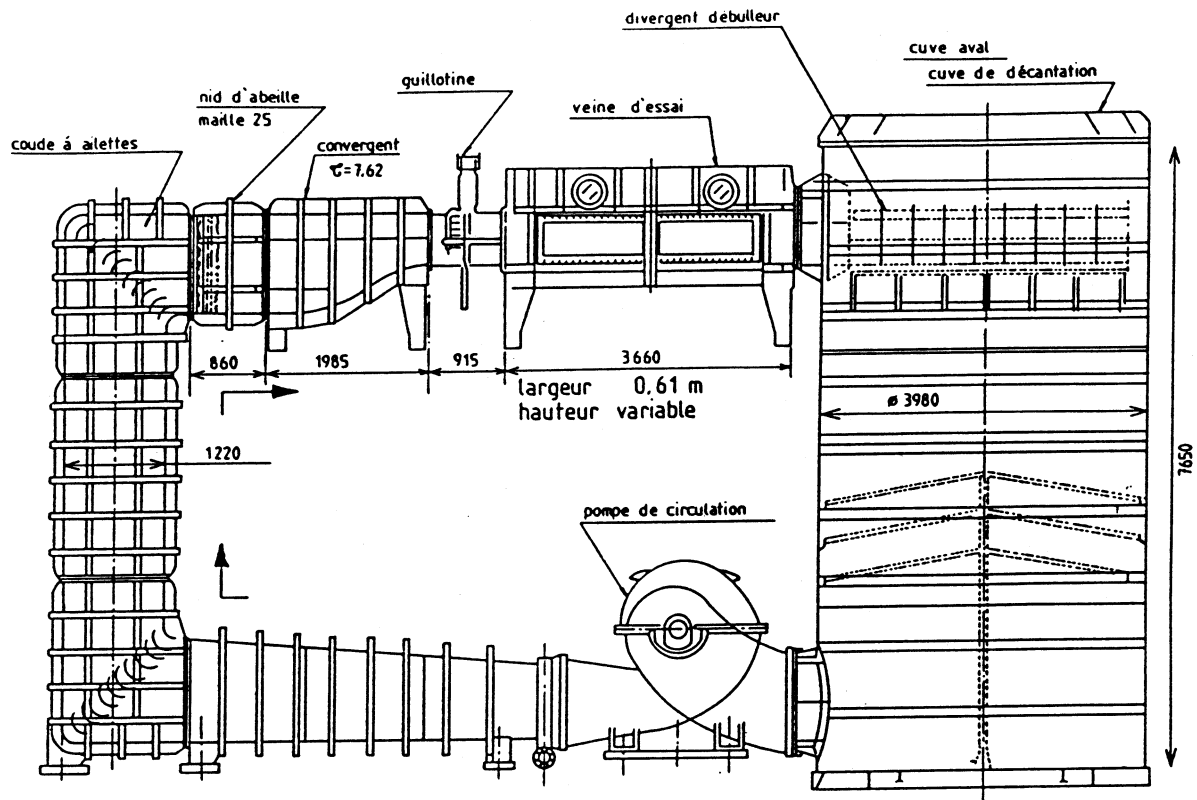


Figure 5: Schéma du Petit Tunnel Hydrodynamique

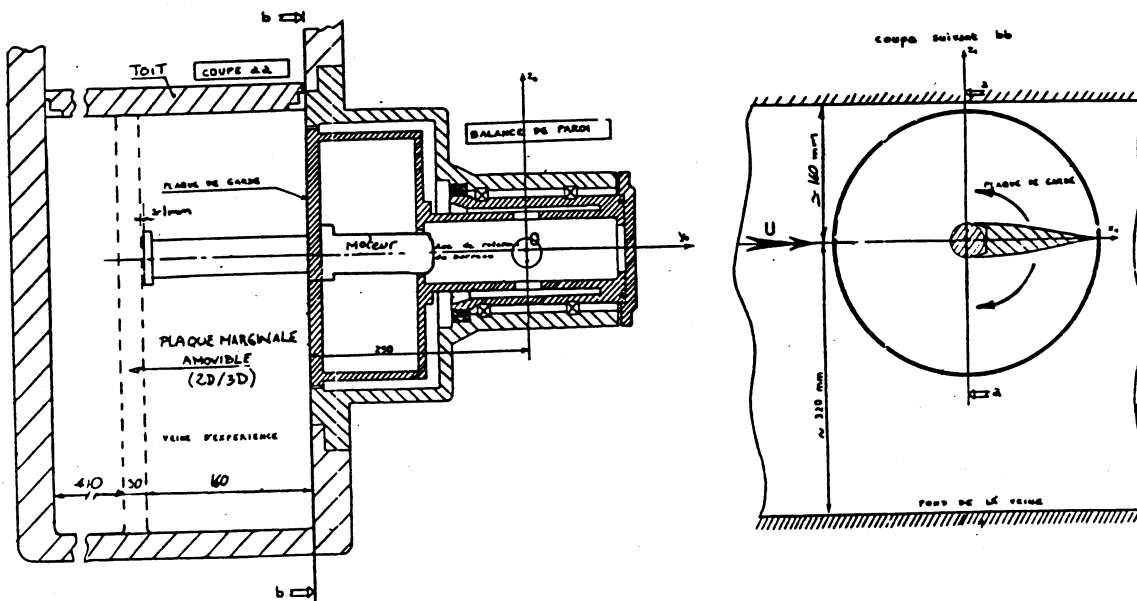


Figure 6: Schéma de la Balance de Paroi du PTH

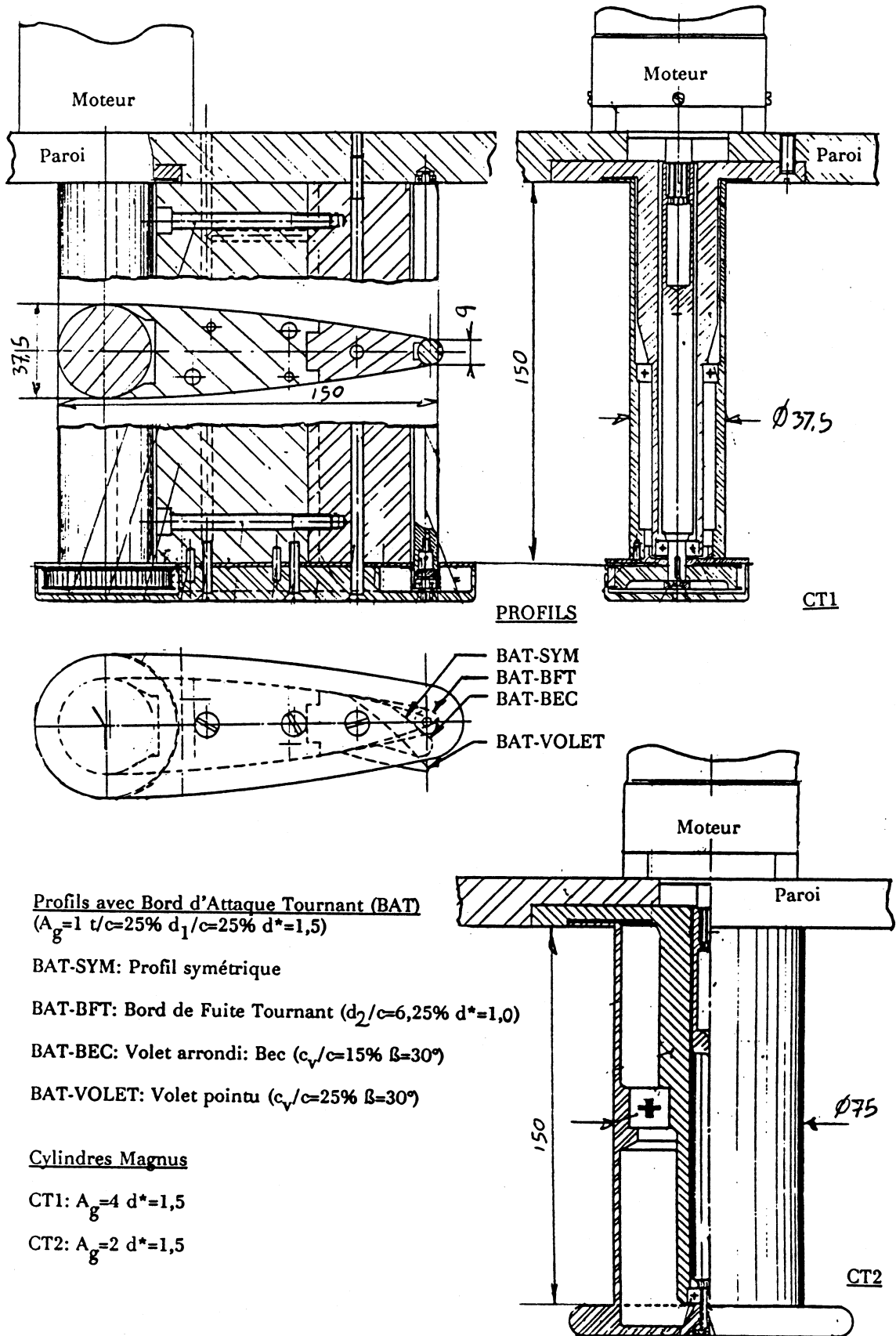


Figure 7: Géométrie des Modèles

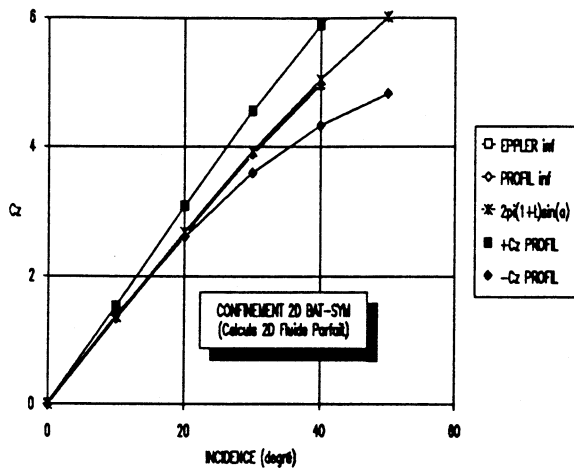


Figure 8: Effet calculé du confinement 2D sur la portance du profil BAT-SYM.

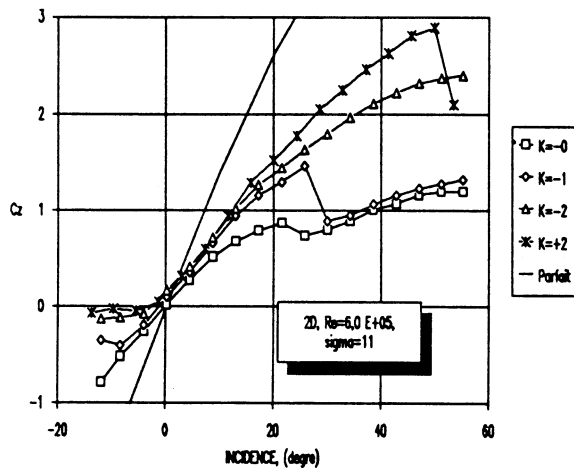


Figure 9: Effet mesuré du confinement 2D sur la portance du profil BAT-SYM.

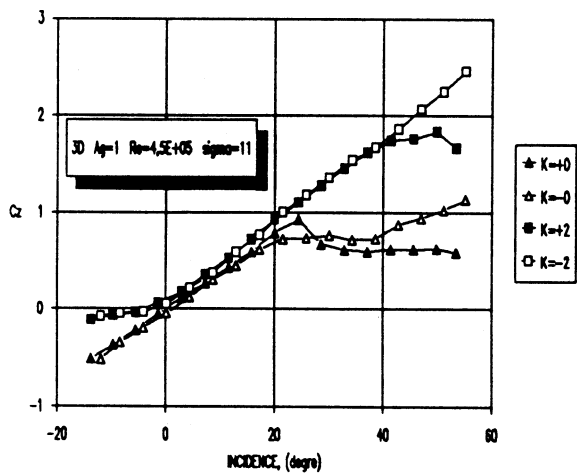


Figure 10: Effet mesuré du confinement 3D sur la portance du profil BAT-SYM.

Les résultats sur la Figure 8 indiquent que la portance est sur-estimée pour des portances positives ("Cz") et sous-estimée pour des portances négatives ("-Cz").

Des mesures effectuées en veine 2D pour des portances positives ($K=+2$) et négatives ($-K$) indiquent les mêmes tendances (Figure 9). Les pentes $\delta C_z / \delta \alpha$ sont bien plus faibles qu'en fluide parfait. Les performances à $K=-0,-1$ sont portées à titre indicatif. On peut noter le comportement typique de profils à BAT où le décollement est retardé avec la mise en rotation du cylindre. Les différences de pente entre $K=0,-1,-2$ sont attribuables au confinement.

Les mesures effectuées en veine 3D (Figure 10) montrent que l'orientation de la portance (positive vers le haut ou négative vers le bas) ne modifie pas la pente de la portance. Sachant que le confinement 2D introduit dans les 2 cas des tendances opposées du fait de la dissymétrie de la veine on peut donc conclure qu'il n'y a pas d'effet de confinement pour $\alpha < 40^\circ$. A plus hautes incidences le profil portant vers le haut décolle plus rapidement. C'est dans cette configuration que toutes les mesures 3D ont été effectuées: portance vers le haut ($C_z > 0$ et $K > 0$). Les vitesses de rotation nécessaires à l'établissement d'un écoulement collé sont donc sur-estimées.

Cylindres Tournants

Le même exercice numérique a été effectué pour évaluer le confinement des cylindres tournants. La position imposée au bord de fuite sur la surface du cylindre permet de faire varier la portance calculée par le code PROFIL. Les tendances calculées (Figure 11) sont similaires au cas du profil BAT-SYM. L'effet de confinement est plus important pour le cylindre CT2 que pour CT1 dont le diamètre est 2 fois moindre. Dans les 2 cas, l'effet de confinement est plus marqué pour une portance vers le haut, en particulier pour CT2.

Des mesures ont été effectuées pour les cylindres CT1 et CT2 en veine 2D et 3D avec des portances positives ($+K$) et négatives ($-K$). Les résultats confirment les tendances prédites par le calcul et permettent d'apprécier l'effet d'allongement. Pour CT1 les effets de confinement et d'allongement sont faibles (Figure 12). Les résultats pour CT2 (Figure 13) montrent un effet plus marqué du confinement pour $K > 1,5$. Une perte de C_z de l'ordre de 0,8 pour $2 < K < 3$ est due aux effets d'allongement. Pour les 2 cylindres, la configuration utilisée pour les essais de performance 3D correspond à la courbe la plus basse: "-K 3D".

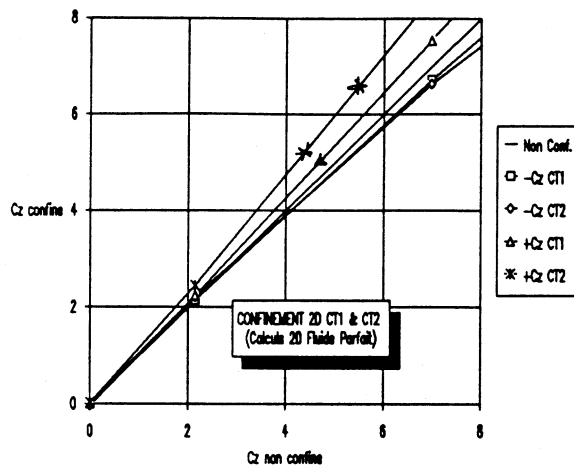


Figure 11: Calcul de confinement 2D pour CT1 & CT2.

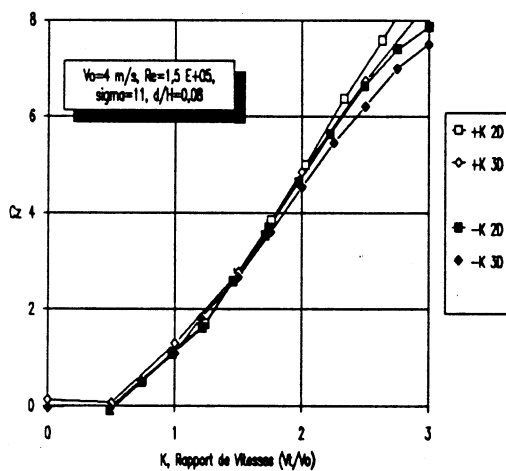


Figure 12: Mesure du confinement 2D et 3D pour CT1.

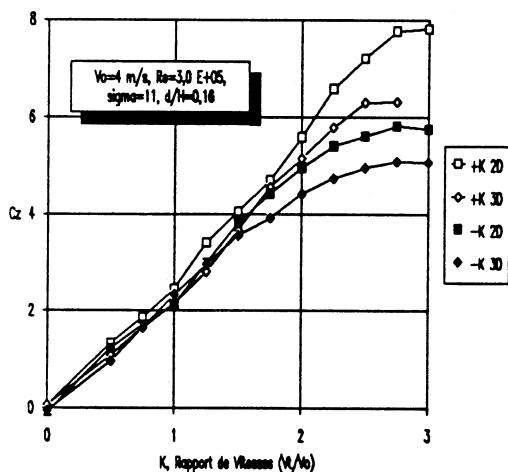


Figure 13: Mesure du confinement 2D et 3D pour CT2.

PROFILS: RESULTATS EXPERIMENTAUX

Bord d'attaque tournant

Trois bords de fuite (SYM, VOLET, BFT) ont été testés sur la gouverne avec bord d'attaque tournant: $d1/c=25\%$.

BAT-SYM: Les courbes de portance en fonction de l'incidence pour différentes vitesses de rotation du cylindre (Figure 14) ont la même pente et ont quasiment la même valeur ($Cz=0$) à incidence nulle. Le point de décollement varie en fonction de la vitesse de rotation. Pour $K=3$ un Cz de 2,15 est atteint à 54° d'incidence. Des vitesses de rotation accrues ne permettent pas d'augmenter le Cz .

BAT-VOLET: La portance du profil avec volet (Figure 15) exhibe le même comportement que celui du profil BAT-SYM. Cependant, la cambrure introduite par le volet augmente les Cz d'environ 0,4. De plus la vitesse de rotation nécessaire pour obtenir un écoulement collé à 54° est réduite. Pour $K=2$ le volet permet d'atteindre $Cz_{(\alpha=54^\circ)}=2,37$, soit une augmentation de 37% par rapport au BAT-SYM ($Cz_{max}=1,83$). La visualisation de l'écoulement a mis en évidence le fait que l'écoulement à l'extrados du volet était décollé pour toutes les incidences.

BAT-BFT: Sur le profil BAT-BFT, la rotation des cylindres permet simultanément d'augmenter α_{max} et de déplacer la courbe verticalement (Figure 16). Pour $K=2$ le Cz_{max} de la configuration BAT-VOLET est égalée. A l'opposé des profils BAT-SYM et BAT-VOLET, le Cz ne sature pas pour des vitesses de rotation accrues: pour $K=3$ et 4 $Cz_{(\alpha=54^\circ)}=2,51$ et 2,73 respectivement ce qui est remarquable pour un profil de faible allongement. On note que $Cz_{(\alpha=0^\circ)}=1,12$ ce qui est supérieur au Cz_{max} d'un profil classique. La visualisation de l'écoulement montre qu'à l'opposé des profils BAT-SYM et BAT-VOLET sur lesquels il y a décollement au bord de fuite à haute incidence, le cylindre de bord de fuite empêche la formation d'une zone de séparation.

Sur la courbe $K=3$ de la Figure 16 obtenue à 3,0 m/s ont été portés les points (tirés) obtenus lors d'un deuxième essai à 4,0 m/s. La gamme des efforts, la vitesse de rotation du cylindre sont alors différents. Cette comparaison illustre la validité du paramètre K pour un BFT aussi bien que pour un BAT.

La finesse maximum des profils est obtenue pour un Cz d'environ 0,5. Le profil BAT-BFT est supérieur aux 2 autres profils avec $Cz/Cx=8,0$ à $K=2$. Pour toutes les configurations, la finesse à haute portance est conditionnée par la traînée induite. Pour $Cz=2$, $Cz/Cx=2,0$ 2,5. L'allongement effectif est alors de 1,6.

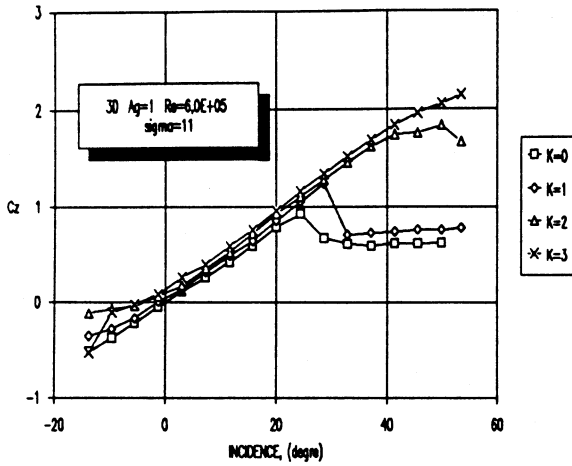


Figure 14: Effets de l'incidence et de la vitesse de rotation sur la portance du profil BAT-SYM.

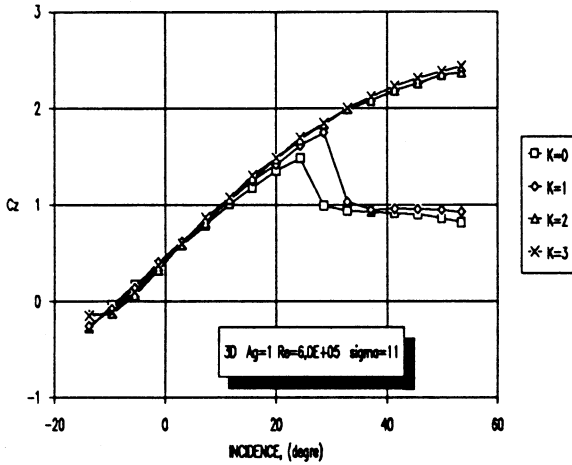


Figure 15: Effets de l'incidence et de la vitesse de rotation sur la portance du profil BAT-VOLET.

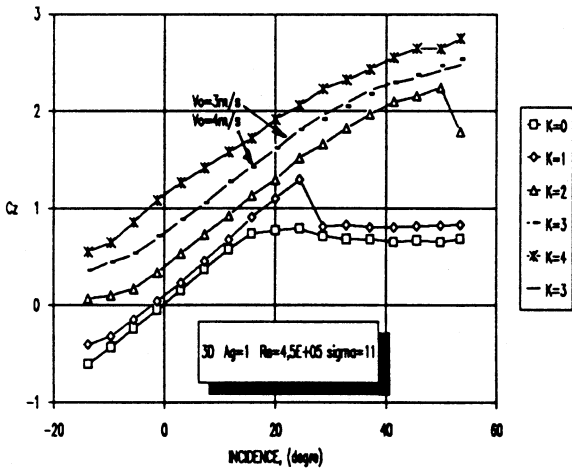


Figure 16: Effets de l'incidence et de la vitesse de rotation sur la portance du profil gBAT-pBFT.

Pour les conditions de similitude en cavitation ($\sigma=12$) le seul type de cavitation visible émane du plan marginal pour des C_z de 2,0 et plus. Pour le profil BAT-SYM des essais à 6 m/s ($\sigma=5$) ont fait apparaître une cavitation à bulle sur le cylindre à un C_z de 1,40.

Bord de fuite tournant

Plusieurs essais ont été effectués pour évaluer les performances d'un profil avec un bord de fuite tournant de diamètre important: $d_2/c=25\%$. Quatre types de bords d'attaque ont été testés:

- bord d'attaque pointu: BAT-SYM $\alpha=180^\circ$,
- bec de bord d'attaque arrondi: BAT-BEC,
- bec de bord d'attaque pointu: BAT-VOLET $\alpha=180^\circ$,
- bord d'attaque tournant: BAT-BFT $\alpha=180^\circ$.

Les résultats montrent que la pente $\delta C_z / \delta \alpha$ est faible et que malgré les précautions prises au bord d'attaque le décollement se produit à faible incidence. Les résultats pour les quatre configurations sont présentés sur la Figure 17 pour $K=4$. La meilleure configuration est encore celle avec cylindre tournant qui permet d'atteindre $C_z(\alpha=0^\circ)=2,0$ et un maximum $C_z(\alpha=15^\circ)=2,17$.

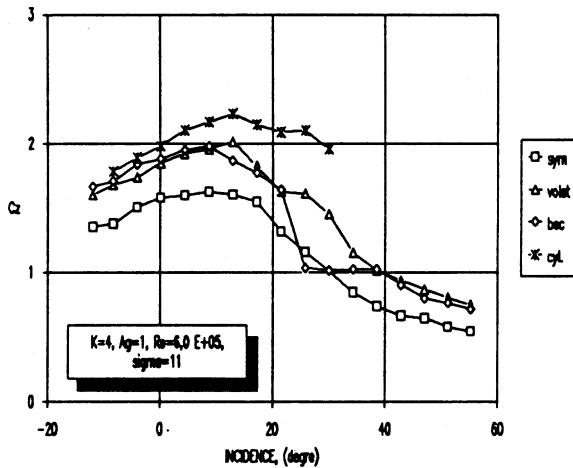


Figure 17: Effets de l'incidence, de la vitesse de rotation, et du type de bord d'attaque sur la portance de profils avec bord de fuite tournant.

Le comportement du profil BAT-BFT inversé (Figure 18) est à rapprocher de la Figure 16 obtenue avec le même profil. A rapport K donné le gros cylindre BFT ($d_2/c=25\%$) est beaucoup plus efficace que le petit ($d_2/c=6\%$). Ceci est particulièrement évident à incidence nulle. L'aplatissement des courbes de portance lorsque la vitesse de rotation augmente montre que la portance du gros cylindre BFT est limitée par le décollement au bord d'attaque.

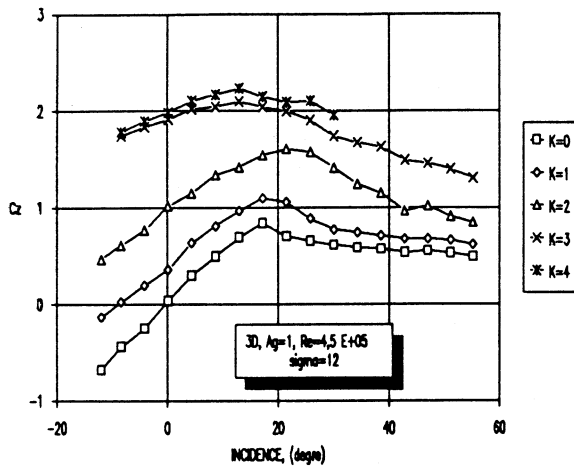


Figure 18: Effets de l'incidence et de la vitesse de rotation des cylindres sur la portance du profil gBAT-pBFT.

Synthèse des Profils

Sur les Figures 19 a,b,c sont portés les résultats pour $K=2,3,4$ respectivement des essais de 3 profils dont le BAT-BFT qui a été testé dans les 2 sens: "grosBAT-petitBFT" et "petitBAT-grosBFT". Pour $K=2$ on constate que le profil BAT-VOLET est le meilleur. Les profils gBAT-pBFT et BAT-SYM sont équivalents. Pour $K=3$ le profil gBAT-pBFT est légèrement supérieur au BAT-Volet. Pour $K=4$ il devient nettement supérieur. Le comportement du profil pBAT-gBFT a un intérêt pratique car il permet d'obtenir un C_z de 2,0 à incidence nulle alors que les autres profils nécessitent des incidences 20° à 50° .

Quelques résultats obtenus en veine 2D sont présentés ici pour effectuer une comparaison avec les résultats de MODI et al. pour un profil BAT-SYM et un profil BAT-BFT. Les caractéristiques géométriques des profils sont données ci-dessous.

	SYM	MODI	BFT	MODI
t/c	25%	19%	25%	19%
d1/c	25%	13%	25%	13%
d2/c	0%	0%	6%	7%

Dans les 2 cas, la comparaison (Figure 20) montre que pour un même rapport K , les portances sont très proches pour de faibles incidences ($\alpha < 15^\circ$). Notamment le bon accord entre les gains de portance attribuables à la rotation du cylindre BFT est remarquable. Pour des incidences plus élevées, les profils de MODI décollent plus rapidement à cause d'un contrôle de couche limite moins efficace au bord d'attaque. En 2D pour $K=3$ le profil BAT-BFT atteint un C_z de 3,5 à 54° d'incidence.

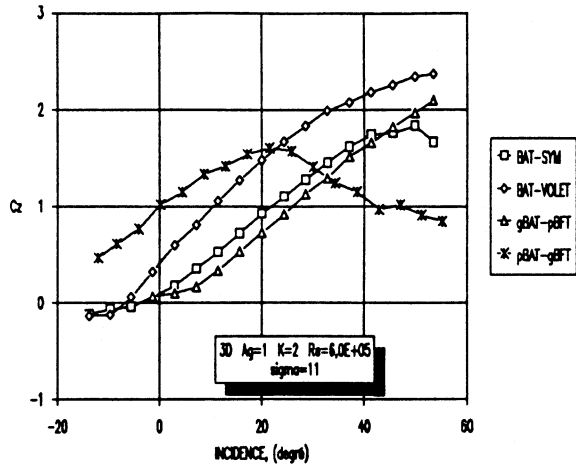


Figure 19-a: $K=2$.

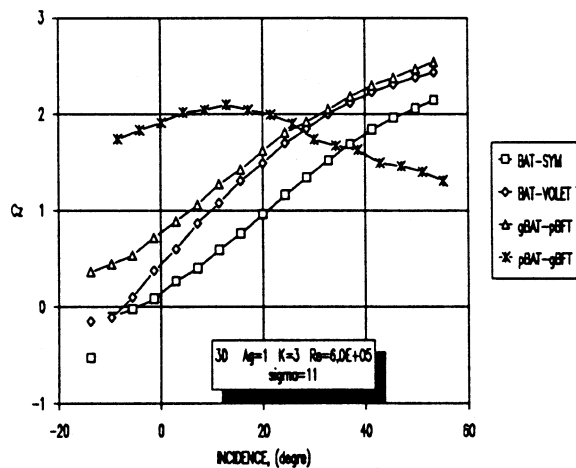


Figure 19-b: $K=3$.

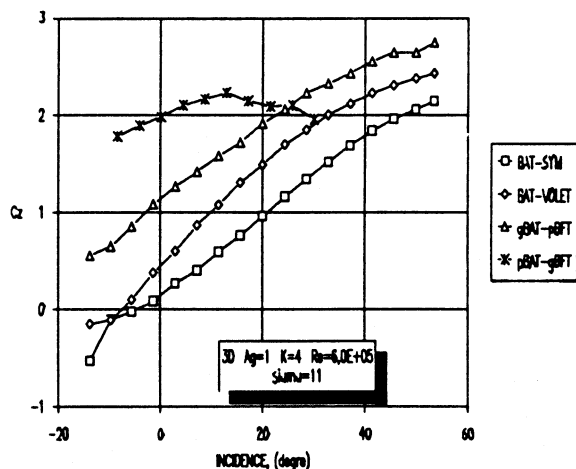


Figure 19-c: $K=4$.

Figure 19: Synthèse des résultats de l'effet de l'incidence et de la vitesse de rotation du cylindre sur la portance de différents profils.

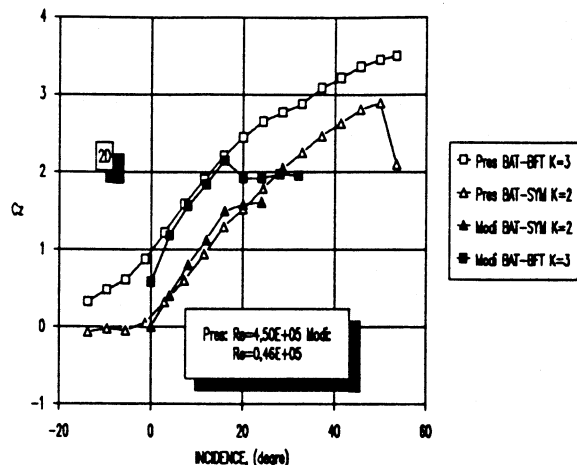


Figure 20: Comparisons des portances obtenues avec celles de MODI pour les profils BAT-SYM et BAT-BFT.

CYLINDRE TOURNANT: RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les 2 cylindres tournants CT1 et CT2 ($Ag=4$ et 2) ont été testés de $K=0$ à 3 pour des vitesses de veine de 3 à 8 m/s. Pour CT2 les vitesses de rotation à haute vitesse ont été limitées par les capacités de la balance et le régime cavitant n'a pas été atteint.

Effets de Reynolds

Les résultats pour CT1 (Figure 21) montrent la progression de la portance avec le paramètre K pour plusieurs vitesses de veine. A chaque vitesse correspond un nombre de Reynolds et sigma. On note que la portance est quasiment nulle pour $K=0,5$ sauf dans le cas du plus haut nombre de Reynolds où $Cz=0,9$. La portance atteint un Cz de 7,5 pour $K=3$. Les différences entre les courbes obtenues à des différents nombres de Reynolds s'expliquent par la transition en régime turbulent de la couche limite du cylindre pour des rapports de vitesse de plus en plus faible. En effet ces sauts se produisent autour du nombre de Reynolds critique du cylindre circulaire qui est de $3,0 \cdot 10^5$.

Le comportement de la portance de CT2 est illustré sur la Figure 22. Le diamètre de CT2 étant le double de CT1, l'effet de Reynolds qui se manifestait sur CT1 comme un retard de la portance pour $K < 2$, n'existe plus que pour le plus faible nombre de Reynolds testé ($2,25 \cdot 10^5$). Les données obtenues à des vitesses d'écoulement supérieures se superposent exactement. La pente de la portance pour $K > 2$ est réduite par les effets de confinement et d'allongement discutés précédemment.

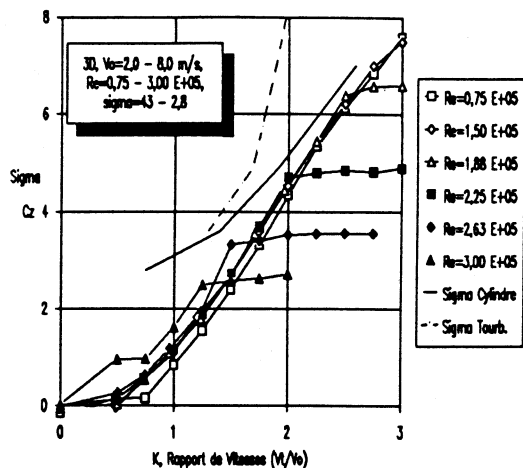


Figure 21: Effet de la vitesse de rotation sur la portance et le sigma d'apparition de la cavitation du cylindre CT1.

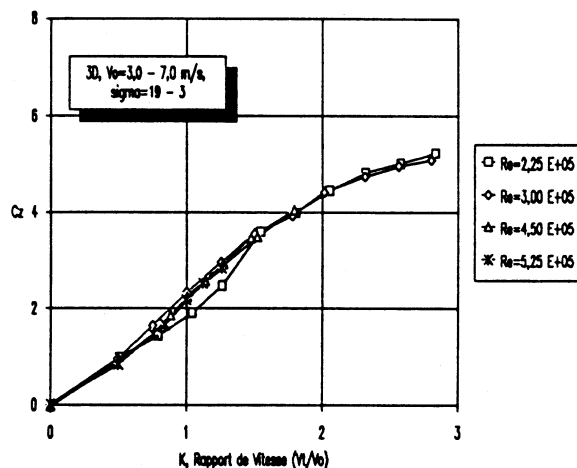


Figure 22: Effet de la vitesse de rotation et de Re sur la portance du cylindre Magnus CT2.

Cavitation

La cavitation sur le cylindre tournant CT1 est mise en évidence par le comportement de la portance qui stagne à Cz constant après l'apparition de la cavitation. Les sigma d'apparition visuelle de la cavitation de tourbillon marginal et de cylindre sont portés sur la Figure 21 en fonction de K . On peut noter que pour $\sigma=12$ (similitude au réel) seul le tourbillon marginal risque de caviter. Pour $\sigma=3$ le cylindre tournant peut atteindre un Cz de 2,3 à $K=1$ sans caviter.

Les résultats pour les 2 cylindres CT1 et CT2 sont comparés sur la Figure 23. On note l'influence de l'allongement pour $K > 2$ et celui du nombre de Reynolds pour $K < 2$. Les performances des 2 cylindres sont égales pour $K=2$ ($Cz=4,5$). L'accord avec les résultats de CHARRIER pour $Ag=4$ ($d^*=2$) est excellent pour CT1 ($Ag=4$) à un nombre de

Reynolds subcritique. Pour CT2 ($Ag=2$) la taille réduite des disques d'extrémité et le confinement semblent faire une différence importante pour $K>2$. Pour $K<2$, l'effet de Reynolds donne un avantage à CT2.

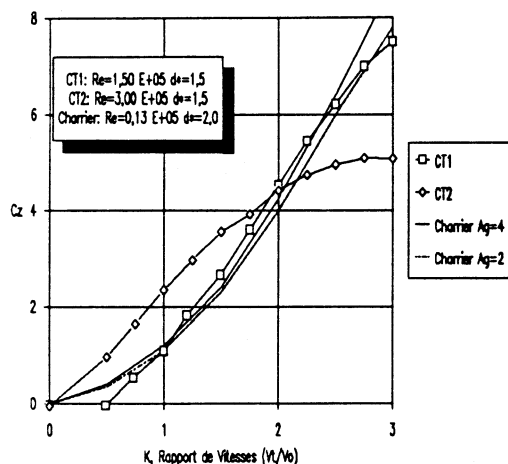


Figure 23: Synthèse des résultats des effets de la vitesse de rotation sur la portance du cylindre tournant.

SYNTHESE DES RESULTATS

Une représentation synthétique des résultats a été effectuée pour comparer les diverses configurations entre elles et par rapport au but initial de $Cz/Ag=2,5$ et des conditions dans lesquels ce but est atteint.

Pour comparer les différentes configurations il est important de disposer d'un paramètre représentant la puissance nécessaire à la mise en rotation des cylindres. Pour ce faire et dans le cadre de l'application envisagée, un paramètre de puissance Ca est défini de la manière suivante:

Puissance par définition:

$$\mathcal{P} = (F_t \cdot r) \cdot (V_t/r) = F_t \cdot V_t$$

La force tangentielle sur le cylindre:

$$F_t = \tau_f \cdot S_{cyl}$$

En supposant la vitesse de cisaillement égale à V_t :

$$F_t = C_f \cdot (0,5 \rho V_t^2) \cdot (\pi d_{cyl} e_{cyl})$$

La puissance peut alors s'exprimer:

$$\mathcal{P} = (\pi C_f 0,5 \rho e_{cyl}^2 V_o^3) \cdot (d/e)_{cyl} \cdot (V_t/V_o)^3$$

Pour une vitesse V_o et une envergure l_{cyl} donnée on pose:

$$Ca = \mathcal{P} / (\pi C_f 0,5 \rho e_{cyl}^2 V_o^3)$$

$$Ca = A_{cyl} \cdot K^3$$

Dans le cas de cylindres multiples les Ca de différents cylindres sont additionnés.

Le coefficient de puissance Ca pour les différents profils sont portés sur la Figure 24-a en fonction du paramètre de portance Cz/Ag .

Les finesses (Cz/Cx) de différents profils sont portées sur la Figure 24-b. On remarque qu'à haute portance celles-ci sont sensiblement identiques: 1,8 pour $Cz/Ag=2,5$.

Les incidences des profils sur ces graphes sont limitées à 54° (Figure 24-c). Au dessus de cette valeur la portance augmente avec une pente très faible, nulle dans certains cas. Des valeurs d'incidence excessives ne sont pas désirables dans l'application considérée (vitesses de mise en incidence excessives). On rappelle que les cylindres tournants ne nécessitent pas de mise en incidence.

Les valeurs exactes du Ca minimum pour la portance correspondant au recollement ne sont pas disponibles pour les profils BAT-SYM et BAT-VOLET à cause du pas de variation de vitesse trop élevé. Par contre les courbes pour CT1 et CT2 ont une bonne résolution.

Le bilan est le suivant:

- Le profil gBAT-pBFT et CT2 atteignent l'objectif recherché. Le profil gBAT-pBFT est le plus économique et conserve un potentiel de performance pour des vitesses plus élevées. La portance de CT2 semble saturer à $K=3$. Cependant, il ne nécessite pas de mise en incidence et le confinement réduit artificiellement ses capacités à haute portance.
- Le profil BAT-VOLET arrive très près avec un Ca faible. Il est probable qu'à des incidences plus élevées et en optimisant le volet, le but puisse être atteint.
- Le cas du pBAT-gBFT est particulier car le bord d'attaque du modèle n'a pas permis de développer son potentiel de portance. Il reste néanmoins supérieur à CT1 dans la configuration testée. Ce profil porte à des incidences très faibles ce qui est un avantage pratique considérable.
- Le profil BAT-SYM et CT1 ne semblent pas être capables d'atteindre les portances requises.

CONCLUSIONS

- 2 solutions permettant d'atteindre l'objectif de portance stationnaire ont été identifiées: profil avec un bord d'attaque et un bord de fuite tournants (BAT-BFT) et un cylindre tournant de faible allongement (CT2).

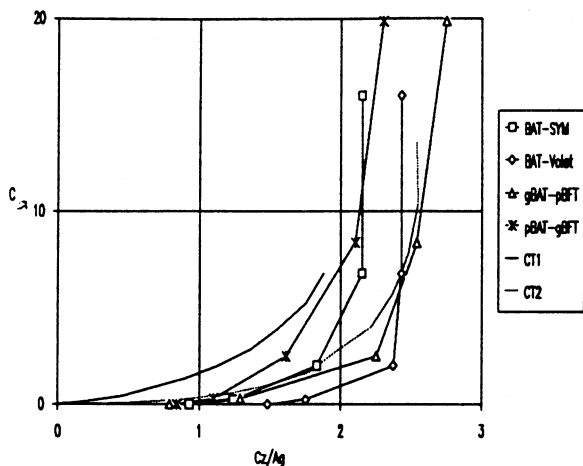


Figure 24-a: C_a vs C_z/Ag

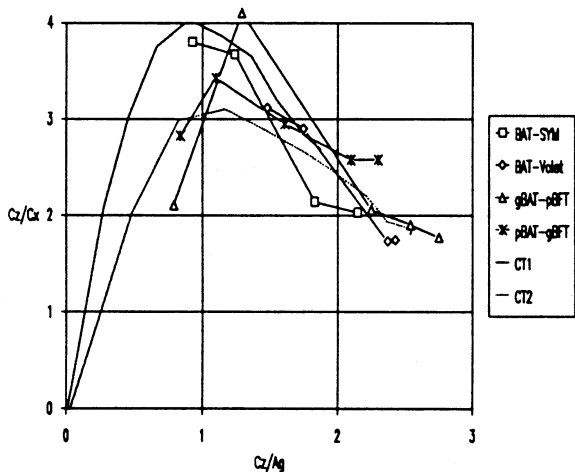


Figure 24-b: C_z/C_x vs C_z/Ag

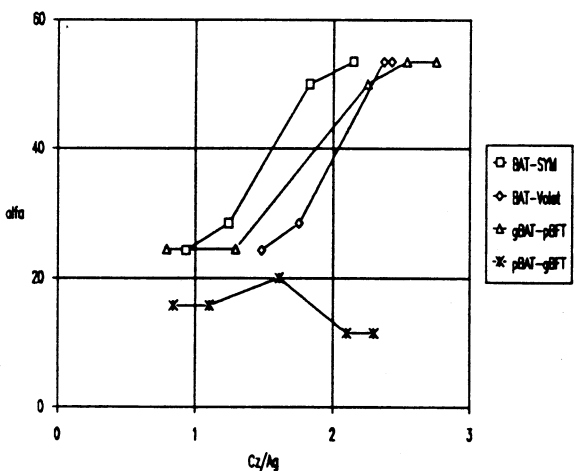


Figure 24-c: α vs C_z/Ag

Figure 24: Synthèse des résultats pour diverses configurations d'hypersustentation par cylindre(s) tournant(s)

- Le profil avec bord d'attaque tournant et volet constitue une troisième solution envisageable pour des portances un peu plus faibles. Cette solution impose des incidences très élevées.
- Une optimisation de la configuration BAT-BFT (incidence, diamètres, vitesses de rotation) sera nécessaire pour mettre au point cette configuration.
- Une étude des caractéristiques instationnaires de des profils retenus est nécessaire.
- Dans la phase d'optimisation, la puissance nécessaire à la mise en incidence et au renversement de rotation (période de 5 à 10 s) devra être pris en compte.

SYMBOLES

A_{cyl}	Allongement du cylindre	
A_g	Allongement géométrique BAT	"Bord d'attaque tournant"
BEC	"Bec de bord d'attaque"	
BFT	"Bord de fuite tournant"	
c	Corde	
c_a	Coefficient de puissance	
c_b	Corde du bec de bord d'attaque	
C_f	Coefficient de friction	
CT	"Cylindre tournant"	
c_v	Corde du volet de bord de fuite	
C_x	Coefficient de traînée	
C_z	Coefficient de portance	
d	Diamètre	
e	Envergure	
F_t	Force tangentielle	
gBAT	"gros BAT"	
gBFT	"gros BFT"	
pBAT	"petit BAT"	
pBFT	"petit BFT"	
H	Hauteur de la veine	
K	Rapport de vitesses= V_t/V_o	
\mathcal{P}	Puissance	
r	rayon= $d/2$	
Re	Nombre de Reynolds= $V_o.c/v$	
S	Surface	
V_o	Vitesse amont	
V_t	Vitesse tangentielle	
VOLET	Bord de fuite avec volet	
α	Angle d'incidence	
β	Angle de braquage de volet ou de bec	
ρ	Densité	
δ	Position angulaire du bord de fuite	
σ	Nombre de cavitation	
τ_f	Contrainte de frottement	
Indices:		
1	Cylindre BAT	
2	Cylindre BFT	
($\alpha=$)	Valeur à une incidence α donnée	

REFERENCES

- A.A. CALDERON, "Rotating cylinder flaps for V/STOL aircraft", Aircraft Engineering, Octobre 1964.
- B. CHARRIER, "Etude Théorique et expérimentale de l'effet Magnus destinée à la propulsion éolienne des navires", Thèse de Doctorat 3^{ème} Cycle Paris VI, Octobre 1979.
- JASTRAM, Brochure publicitaire de la société.
- W.S. JOHNSON, J.S. TENNANT, R.E. STAMPS, "Leading Edge Rotating Cylinder for boundary layer control on lifting surfaces", Journal of Hydronautics, Vol 9 N°2 Avril 1975.
- V.P. KUDREVATYI, V.P. KHUDIN, B.N.ZAKHAROV, "Un propulseur aerodynamique haute performance pour les navires", Sudostoeie N°2, 1983.
- V.P. KUDREVATYI, B.N.ZAKHAROV, "Efficacité des propulseurs éoliens pour navires de commerce", Sudoestoeie N°5, 1988.
- V.J. MODI, F. MOKHTARIAN, M. FERNANDO, T. YOKOMIZO, "Moving surface boundary-layer control as applied to two-dimensional airfoils", 27th Aerospace Sciences Meeting 9-12 Janvier 1989 RENO Etats Unis, AIAA paper 89-0296.
- V.J. MODI, F. MOKHTARIAN, "Effect of moving surfaces on the airfoil boundary layer control", J. Aircraft, Vol. 27, N°1, Janvier 1990.
- K.C. MORISSEAU, "Marine applications of Magnus effect devices", Naval Engineers Journal, Janvier 1985.
- A. MILLWARD, F.G. MC GEOUGH, "The effect of cavitation on the rotating cylinder rudder", International Shipbuilding Progress, Vol 28, N°317, 1981.
- A. MILLWARD, P.J. EDWARDS, B.P. WAKELING, "The rotating cylinder rudder: the effect of cylinder roughness and cylinder gap", International Shipbuilding Progress, Vol 31, N°361, 1984.
- P. RITTEMARD, G. CROUT DE BEAUFORT, "Recherche et mise au point d'un système de stabilisation en roulis à basse vitesse pour bâtiments de moyen tonnage", Bassin d'Essais des Carènes, Juin 1988.
- B.N. STEELE, M.H. HARDING, "Application of rotating cylinders to ship manoeuvring", NPL Ship Report 148 Decembre 1970.
- L. YOUHUA, X. HANZHEN, "Further experiments on the rotating cylinder rudder", International Shipbuilding Progress, Vol 34, N°397, 1987.