

Campagne d'essais et compléments de validation

Sommaire

| | | |
|------------|---|-----------|
| 5.1 | Introduction | 62 |
| 5.2 | Moyens expérimentaux | 63 |
| 5.2.1 | Tunnel hydrodynamique | 63 |
| 5.2.2 | Montage expérimental et instrumentation | 65 |
| 5.2.3 | Chaîne d'acquisition des mesures et dépouillement statistique | 67 |
| 5.3 | Grille d'essais et procédures | 69 |
| 5.4 | Conduite des essais, problèmes rencontrés et solutions | 69 |
| 5.5 | Modélisation numérique des essais | 70 |
| 5.6 | Comparaison des résultats | 71 |
| 5.7 | Bilan du chapitre | 74 |

Comme mentionné au chapitre précédent, à ce stade, le modèle de cavitation à poche n'a pas été quantitativement validé en 3D de façon satisfaisante. Une campagne d'essais expérimentaux spécifique a donc été préparée et conduite dans ce but. Ce chapitre présente cette campagne dans le détail ainsi que la comparaison des résultats numériques et expérimentaux.

5.1 Introduction

Compte tenu de l'examen de diverses solutions, il a été choisi de réaliser la campagne d'essais expérimentaux dans le tunnel hydrodynamique du Bulgarian Ship Hydrodynamics Centre (BSHC), à Varna en Bulgarie, dans le cadre d'une collaboration.

La spécification des essais a été réalisée au laboratoire. Le modèle numérique a été exploité pour guider différents choix tels que dimensions du montage, section de l'hydrofoil, etc.. Il a également été utilisé pour estimer et limiter les effets du confinement, ainsi que pour estimer les plages de nombre de cavitation exploitables et aider à la définition de la grille d'essais.

Pour limiter les coûts, il a été retenu de travailler sur une configuration expérimentale de géométrie 3D simple :

- hydrofoil d'envergure finie montée en parois de veine,
- hydrofoil droite de section NACA0010 constante en envergure,
- forme en plan rectangulaire d'allongement géométrique 3/2.

L'hydrofoil étant monté en parois, son allongement effectif est le double de son allongement géométrique.

Pour la validation quantitative du modèle de cavitation en 3D, il a été choisi de mesurer la portance et la traînée de l'hydrofoil en régime cavitant stationnaire, au moyen d'une balance. En parallèle, pour une comparaison plus qualitative des résultats expérimentaux et numériques, des photos numériques des poches de cavitation observées ont été prévues de façon systématique.

Ensuite, de façon très synthétique :

- la réalisation du montage a été confiée au BSHC,
- la conduite des essais, le dépouillement des mesures et la réalisation de simulations de contrôle ont été menés en parallèle (en quinconce plutôt), en commun par l'équipe du laboratoire présente sur place et celle du BSHC, sur une durée d'une semaine,
- les simulations finales des essais, le dépouillement complet des résultats expérimentaux et la comparaison définitive des deux, ont été réalisés a posteriori au laboratoire.

Pour conclure cette introduction, la description précise et exhaustive de la campagne d'essais et des résultats expérimentaux a fait l'objet d'un rapport final rédigé par le BSHC et approuvé par le laboratoire (Dimitrov, 2008). Ce rapport est également joint en Annexe B.

5.2 Moyens expérimentaux

Ce point présente l'ensemble des moyens mis en œuvre dans le cadre de la campagne d'essais de validation en 3D.

5.2.1 Tunnel hydrodynamique

Le montage a été réalisé dans la veine d'essais N°1 du tunnel hydrodynamique du BSHC (voir les Figures 5.1, 5.2, 5.3). Les grandes caractéristiques de la veine sont :

- veine de 2.6 m de longueur,
- section carrée de 0.6 m de côté,
- nombre de cavitation de 0.2 minimum,
- vitesse de l'écoulement de 14 m/s maximum.



Figure 5.1. Photo du tunnel hydrodynamique du BSHC



Figure 5.2. Photo de la veine d'essais N°1 du tunnel hydrodynamique du BSHC



Figure 5.3. Photo des colonnes de mercure de mesure de pression d'entrée de veine et de pression différentielle amont / aval convergent, et des vannes de régulation manuelle

Pour le dépouillement, la température de l'eau et la pression atmosphérique ont été systématiquement mesurées en début et en fin de chaque série d'essais, une série représentant environ 2 h 30 mn de travail.

La vitesse de l'écoulement se règle au pupitre de commande via le variateur du moteur électrique de la pompe et la mesure du delta de pression amont / aval convergent. Cette mesure est réalisée visuellement par un manomètre à mercure et elle est également acquise au cours des essais via un capteur de pression pour en contrôler la stabilité.

La pression en entrée de veine se règle via un compresseur ou une pompe à vide, une vanne manuelle et la mesure de la pression en entrée de veine. Cette mesure est réalisée visuellement par un manomètre à mercure ; si besoin elle peut-être réglée et maintenue stable manuellement via la vanne au cours d'un point de mesure et elle est également acquise au cours des essais via un capteur de pression pour en contrôler la stabilité.

Les capteurs de pression sont des capteurs GE Druck, type PDCR 2110, gamme 700 mbar d. Les verniers sur les colonnes de mercure permettent une résolution théorique de 0.1 mm Hg.

Après étalonnage, les biais systématiques limites en vitesse et en pression utiles au calcul d'erreur sont respectivement estimés à 0.169 m/s et 203 Pa (ITTC (1999a), ITTC (1999b), ITTC (2001)).

5.2.2 Montage expérimental et instrumentation

La géométrie globale du montage à l'intérieur de la veine est présentée Figure 5.4. L'hydrofoil est monté verticalement en parois sous le plafond de la veine. Un sabot fixe à 0° d'incidence par rapport à l'écoulement amont, de section identique à celle de l'hydrofoil, a été ajouté pour placer ce dernier hors couche limite de paroi tunnel. L'hydrofoil est pourvu de repères permettant d'estimer les longueurs de poches d'abord qualitativement à l'œil, puis plus quantitativement sur les prises de vues. L'hydrofoil et le sabot ont été usinés sur une fraiseuse numérique 5 axes avec les tolérances recommandées par l'ITTC pour la géométrie et l'état de surface final.

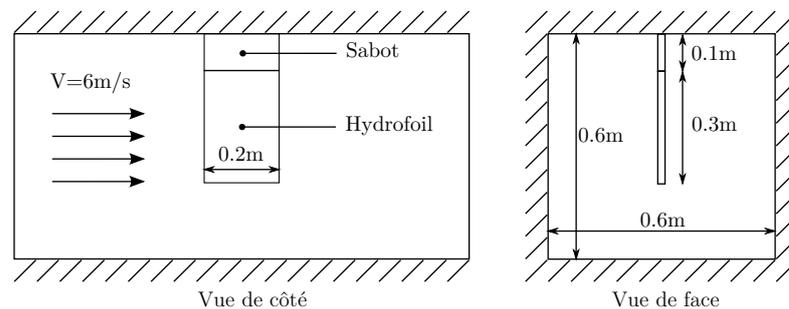


Figure 5.4. Montage des modèles expérimentaux en veine d'essais du tunnel de cavitation du BSHC

La balance et le système de réglage de l'angle d'incidence sont en eau dans un caisson étanche situé sur le plafond de veine (voir les Figures 5.5, 5.6).

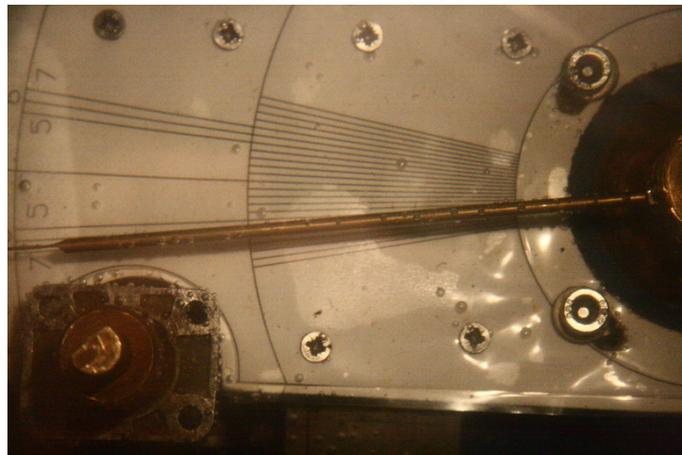


Figure 5.5. Photo du système de réglage de l'angle d'incidence

L'hydrofoil est lié à ces deux systèmes par un axe qui traverse librement le sabot avec un certain jeu fonctionnel. Ce jeu permet de rester libre compte-tenu des déformations de la balance sous chargement et de ne bien mesurer que la portance et la traînée de l'hydrofoil seul. Les capteurs de force sont situés dans des boîtiers étanches (Figure 5.6), eux-mêmes montés sur la balance.



Figure 5.6. Photo de l'hydrofoil monté dans la balance (à gauche) et photo de deux boîtiers étanches des capteurs de forces (à droite)

La balance est une balance six composantes "Kempf & Remmers". Ici seules deux composantes de force ont été mesurées (portance L et trainée D), ce qui a nécessité l'utilisation de trois capteurs (X_1 , X_2 , X_3) pour la mesure de trainée et un (Y) pour la mesure de portance (Figure 5.7).

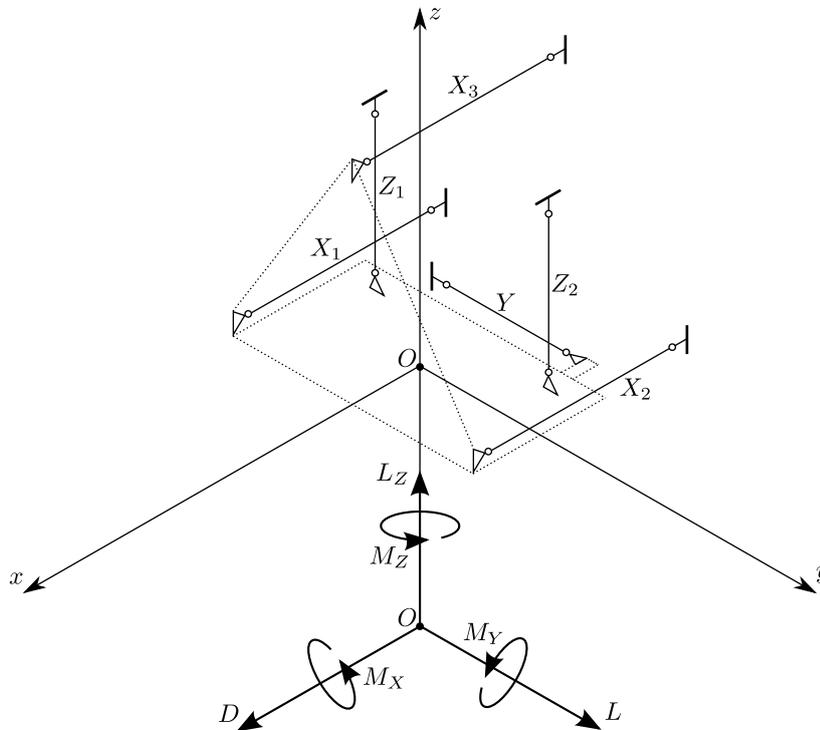


Figure 5.7. Schéma présentant le système de balance 6 composantes "Kempf & Remmers"

La balance a d'abord été étalonnée sur banc spécifique du constructeur juste avant la campagne d'essais. Comme expliqué à la Section 5.4, le montage a dû être repris à environ mi-campagne. A cette occasion, un second étalonnage balance a été réalisé prenant en compte l'ensemble du montage cette fois ci (balance, plafond de veine, sabot et hydrofoil).

Après étalonnage, les biais systématiques limites en efforts utiles au calcul d'erreur sont respectivement estimés à 1.27 N pour la portance et 1.99 N pour la trainée.

La précision du réglage de l'angle d'incidence a été estimée à 0.2° initialement. A posteriori, à partir des mesures en régime subcavitant, réalisées en incidences positive et négative, il a été possible de recalibrer l'incidence au moins partiellement, aux erreurs de mesure de forces près (sous les hypothèses raisonnables ici d'une portance linéaire en angle et d'une section effectivement symétrique). L'expérience montre que les valeurs d'incidence recalées sont cohérentes avec cette précision : typiquement 7.22° recalé pour 7.00° réglé. Au final ce sont les valeurs d'incidences recalées qui ont été utilisées comme données d'entrée dans les simulations.

5.2.3 Chaîne d'acquisition des mesures et dépouillement statistique

La chaîne d'acquisition des mesures balance et pression est restée identique au cours de la campagne et a été utilisée à la fois pour les étalonnages et les points de mesures (Figures 5.8 et 5.9).



Figure 5.8. Photo des amplificateurs des capteurs de force

Les amplificateurs des capteurs de force sont des amplificateurs HBM GmbH PME - MP55 (Figure 5.8). L'acquisition de tous les capteurs est réalisée de façon simultanée, sans filtrage particulier, par une centrale National Instrument pilotée au moyen d'un programme d'acquisition développé par le BSHC sous LabView.



Figure 5.9. Photo des conditionneurs des capteurs de pression entrée de veine et de pression différentielle convergent

Ce programme d'acquisition permet la visualisation des signaux acquis et le calcul des valeurs moyennes et RMS. Ces valeurs sont systématiquement utilisées avec les relations d'étalonnage pour un contrôle manuel rapide sous EXCEL de la cohérence de chaque point de mesure avec des estimations analytiques et des estimations réalisées avec le modèle numérique. Les fichiers de données acquis (signaux temporels, valeurs moyennes, date, heure, etc.), et la nomenclature systématique associée sont décrits dans le rapport d'essais (Dimitrov, 2008) et les disques de mesures joints.

Suite à la campagne d'essais, les fichiers acquis ont été traités statistiquement selon la procédure recommandée par l'ITTC (ITTC, 1999a) par un programme de traitement développé par le BSHC. En particulier, pour chaque point de la grille d'essais, les résultats finaux en portance et en traînée sont obtenus sous la forme d'une valeur et d'un intervalle de confiance à 95% autour de cette valeur. Tous calculs faits, pour les résultats expérimentaux présentés dans ce chapitre, les valeurs "vraies" ont une probabilité de 95% d'être dans les intervalles d'erreur autour des valeurs "calculées" suivants :

- (+) ou (-) 5.6% de la valeur "calculée" pour le coefficient de portance C_L ,
- (+) ou (-) 9.2% de la valeur "calculée" pour le coefficient de traînée C_D .

Pour rester conservatif, ces intervalles correspondent aux intervalles maximaux calculés sur l'ensemble de la grille d'essais.

5.3 Grille d'essais et procédures

La grille d'essais réalisée est présentée au Tableau 5.1. Pour chaque angle d'incidence, les points de mesures ont été réalisés dans l'ordre de la grille : du régime subcavitant initial au dernier régime cavitant en diminuant la pression en entrée de veine, puis du dernier régime cavitant au régime subcavitant initial en augmentant la pression. Les longueurs de poches ont été réglées via l'utilisation d'un stroboscope et la visualisation de la position moyenne maximale de la fermeture des poches par rapport aux repères tracés sur l'hydrofoil. Le dernier régime cavitant stationnaire en moyenne a été choisi comme étant le régime limite précédant juste le régime instable de type "cloud cavitation".

| N° | Condition d'essai | $\alpha = 7^\circ$ | $\alpha = 8^\circ$ | $\alpha = 9^\circ$ | $\alpha = -7^\circ$ | $\alpha = -8^\circ$ | $\alpha = -9^\circ$ |
|----|-----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | Subcavitant (atmosphérique) | × | × | × | × | × | × |
| 2 | Subcavitant 1 | × | × | × | × | × | × |
| 3 | Subcavitant 2 | × | × | × | × | × | × |
| 4 | $l_c/c \approx 0.1$ | × | × | × | | | |
| 5 | $l_c/c \approx 0.2$ | × | × | × | | | |
| 6 | $l_c/c \approx 0.3$ | × | × | × | | | |
| 7 | $l_c/c \approx 0.4$ | × | × | × | | | |
| 8 | $l_c/c \approx 0.5$ | × | × | × | | | |
| 9 | $l_c/c \approx 0.4$ | × | × | × | | | |
| 10 | $l_c/c \approx 0.3$ | × | × | × | | | |
| 11 | $l_c/c \approx 0.2$ | × | × | × | | | |
| 12 | $l_c/c \approx 0.1$ | × | × | × | | | |
| 13 | Subcavitant 2 | × | × | × | × | × | × |
| 14 | Subcavitant 1 | × | × | × | × | × | × |
| 15 | Subcavitant (atmosphérique) | × | × | × | × | × | × |

Tableau 5.1. Grilles d'essais

Chaque point de la grille d'essais a été répété au moins 5 fois. A chaque fois, les signaux ont été acquis sur 5 secondes avec un échantillonnage de 1 kHz et des photos numériques de l'écoulement ont été prises.

Les mesures subcavitantes à incidence négative ont été réalisées dans l'optique de vérifier et le cas échéant de corriger l'angle d'incidence.

5.4 Conduite des essais, problèmes rencontrés et solutions

La campagne d'essais a débuté par une phase de dégazage de l'eau du tunnel, puis par un balayage grossier de la grille d'essais avec des tests d'acquisition. Assez rapidement il est apparu des mesures du coefficient de trainée aberrantes.

Pour diagnostiquer, des essais en subcavitant ont été réalisés en faisant varier l'incidence et la vitesse de l'écoulement. Ces essais ont permis de déterminer un seuil approximatif de portance au delà duquel une saturation des signaux de forces apparaît progressivement. Il a été conclu que le jeu fonctionnel entre l'axe de l'aile et le sabot était insuffisant,

que sous chargement trop important un contact apparaissait et que la réaction sur l'axe faussait les mesures de la balance.

A partir de ce point, trois actions comportant des compromis ont été menées avant la poursuite de la campagne d'essais :

- Le perçage du sabot et l'axe de l'aile ont été légèrement ré-usinés, au mieux compte-tenu des autres contraintes, mécaniques pour l'axe, et géométriques pour le sabot.
- Le Reynolds de la grille d'essais a été réduit, au mieux pour tout de même maximiser en entrée de veine la pression minimale à atteindre sur la grille d'essais et ainsi fortement limiter l'activation de germes de cavitation au sein de l'écoulement.
- La balance a été ré-étalonnée in situ en prenant en compte l'ensemble du montage cette fois ci (balance, plafond de veine, sabot, et aile).

La campagne d'essais a ensuite été reprise de façon satisfaisante pour les angles d'incidence de 7° et -7° . Ce sont ces mesures qui ont été conservées pour la validation effective et qui sont présentées dans la suite de ce chapitre. Les mesures pour les angles d'incidence de 8° et 9° , réalisées par acquis de conscience, présentent quant à elles des allures cohérentes, mais au final restent trop incertaines quantitativement compte-tenu de la proximité du seuil de portance. Dans ce cadre, ces mesures ont été laissées de côté ici.

5.5 Modélisation numérique des essais

Dans les simulations numériques, l'effet du plafond de la veine d'essais a été pris en compte en employant la théorie des images. Les autres parois de la veine d'essais (latérales et inférieure) ont été modélisées par des plaques planes portant une distribution de doublets. Le modèle numérique (les maillages de l'hydrofoil, du sabot et des parois de la veine d'essais) est présenté Figure 5.10. Aucun effet de couche limite n'est pris en compte dans ces simulations.

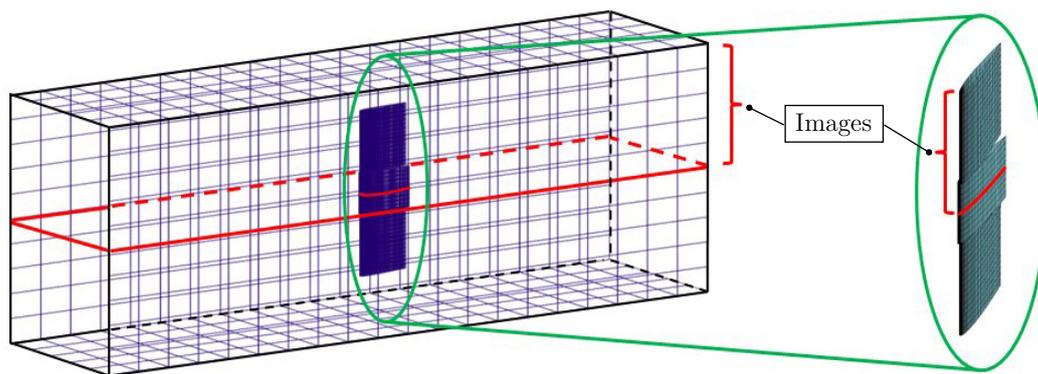


Figure 5.10. Modèle numérique : hydrofoil, sabot, parois latérales et inférieures de veine ; tous ces éléments sont symétrisés par rapport au plafond de veine ; maillage du sillage non représenté

Les coefficients de traînée calculés par le code potentiel sont très inférieurs aux coefficients de traînée mesurés puisqu'il n'y a pas la partie frottement (voir par exemple le coefficient de traînée calculé en régime subcavitant au Tableau 5.2). En effet, seule la partie de la traînée induite par la distribution de pression est simulée en potentiel. Pour la comparaison effective des coefficients de traînée, afin d'estimer le frottement, la formule ITTC1957 a été utilisée dans les simulations (ITTC (2002), Equation 5.1). Le Tableau 5.2 montre la validité de cette estimation pour notre étude et au final tous les coefficients de traînée calculés présentés dans ce chapitre ont été ainsi corrigés.

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad \text{avec} \quad Re = \frac{U_\infty}{\nu c} \quad (5.1)$$

| | C_L | C_D |
|--|-------|-------|
| Essais | 0.355 | 0.025 |
| Simulation potentielle seule | 0.335 | 0.015 |
| Simulation potentielle + frottement ITTC1957 | 0.335 | 0.024 |

Tableau 5.2. Comparaison des coefficients de portance et traînée expérimentaux et numériques, en régime subcavitant, de l'hydrofoil tridimensionnel ; profil NACA0010, $\alpha = 7.22^\circ$, $Re \approx 1.24 \times 10^6$

5.6 Comparaison des résultats

La comparaison des résultats est présentée aux Figures 5.11, 5.12, 5.13 et 5.14. Les résultats expérimentaux où les nombres de cavitation sont supérieurs à 2.5 sont en régime subcavitant.

En ce qui concerne les coefficients de portance et de traînée (Figure 5.11 et 5.12) :

- Les tendances simulées et mesurées des coefficients de portance et de traînée en fonction du nombre de cavitation sont les mêmes.
- Les valeurs numériques sont toutes inférieures aux valeurs expérimentales, en moyenne de 4.2% pour les coefficients de portance et de 5.9% pour les coefficients de traînée. Ce point, qui semble à première vue contraire aux tendances classiques des calculs potentiels, devrait pouvoir être amélioré en travaillant plus finement sur le maillage en envergure de l'hydrofoil et du sabot, et la façon dont le confinement est simulé.
- En tout état de cause, les simulations sont toutes dans les intervalles de confiance autour des points expérimentaux, ce qui valide quantitativement le modèle.

En ce qui concerne les longueurs de poche, les Figures 5.13 et 5.14 montrent que les distributions en envergure des longueurs de poche numériques et expérimentales sont très comparables. Ceci confirme l'exercice de validation qualitatif présenté au chapitre précédent (Section 4.3).

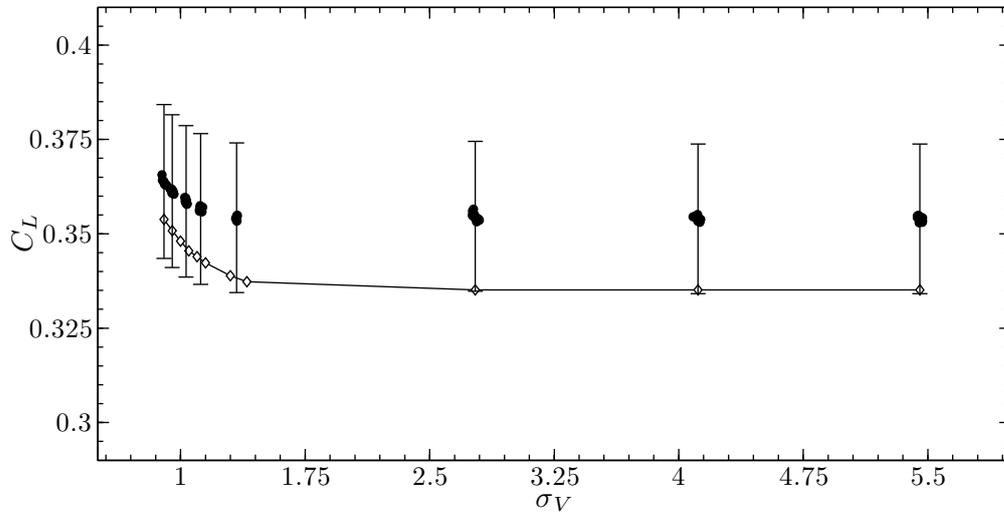


Figure 5.11. Comparaison entre les coefficients de portance numériques (\diamond) et expérimentaux (\bullet) de l'hydrofoil tridimensionnel ; profil NACA0010, $\alpha=7.22^\circ$, $Re \approx 1.24 \times 10^6$

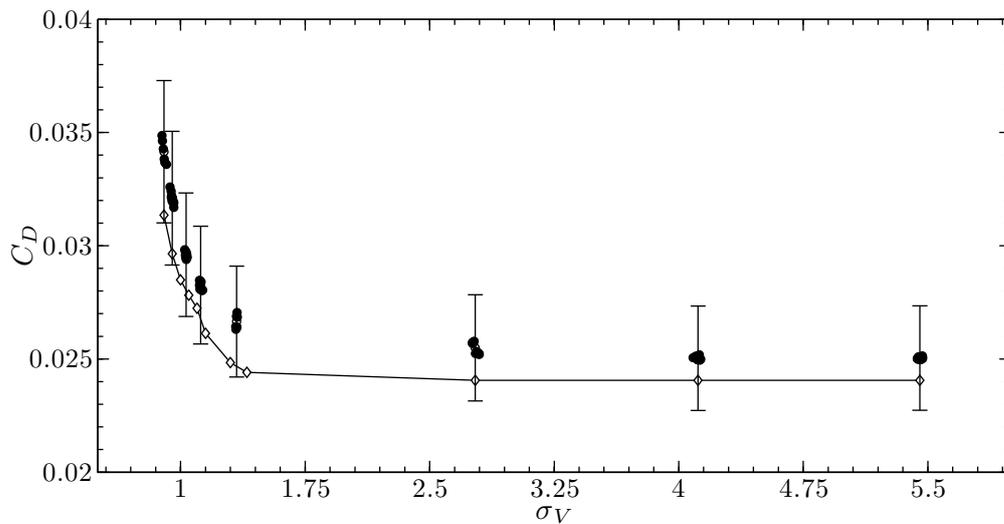


Figure 5.12. Comparaison entre les coefficients de traînée numériques (\diamond) et expérimentaux (\bullet) de l'hydrofoil tridimensionnel ; profil NACA0010, $\alpha=7.22^\circ$, $Re \approx 1.24 \times 10^6$

Enfin, la Figure 5.15 illustre la comparaison des résultats plus visiblement dans la zone cavitante. Les résultats expérimentaux ainsi que les résultats numériques confirment ici que dans le cas de la cavitation à poche partielle, les coefficients de portance et de traînée augmentent quand le nombre de cavitation diminue. Au final, bien qu'une petite augmentation du coefficient de portance soit obtenue avec la présence de la cavitation à poche partielle, une perte significative de finesse ε_F est observée.

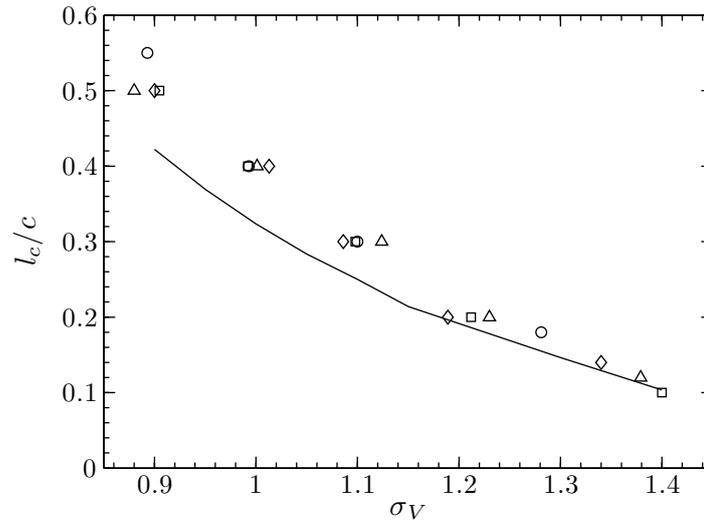


Figure 5.13. Comparaison entre les résultats numériques (—) et les résultats expérimentaux (Table 5.1 et Figure 5.1 de l'Annexe B) à $Re \approx 1.24 \times 10^6$ (\diamond), $Re \approx 1.34 \times 10^6$ (\square), $Re \approx 1.44 \times 10^6$ (\triangle) et $Re \approx 2.06 \times 10^6$ (\circ) sur la longueur maximale de poche; profil NACA0010, $\alpha=7.22^\circ$

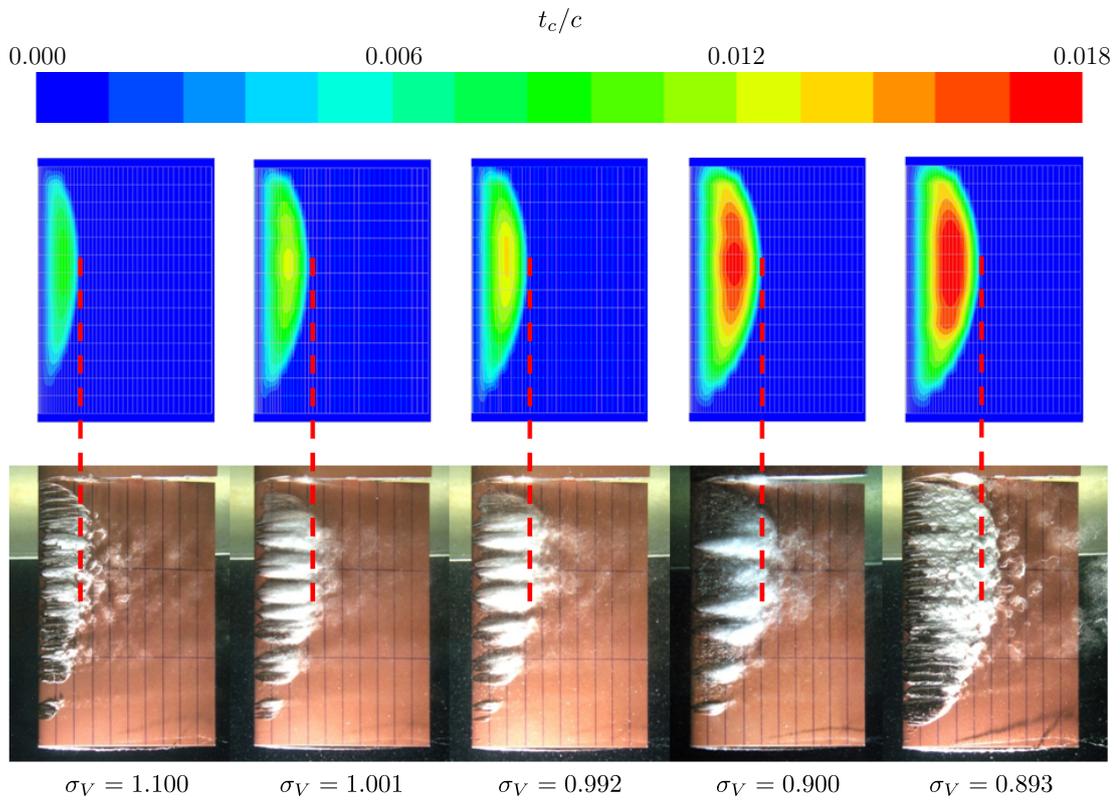


Figure 5.14. Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux relatifs à la distribution de la longueur de poche; profil NACA0010, $\alpha=7.22^\circ$

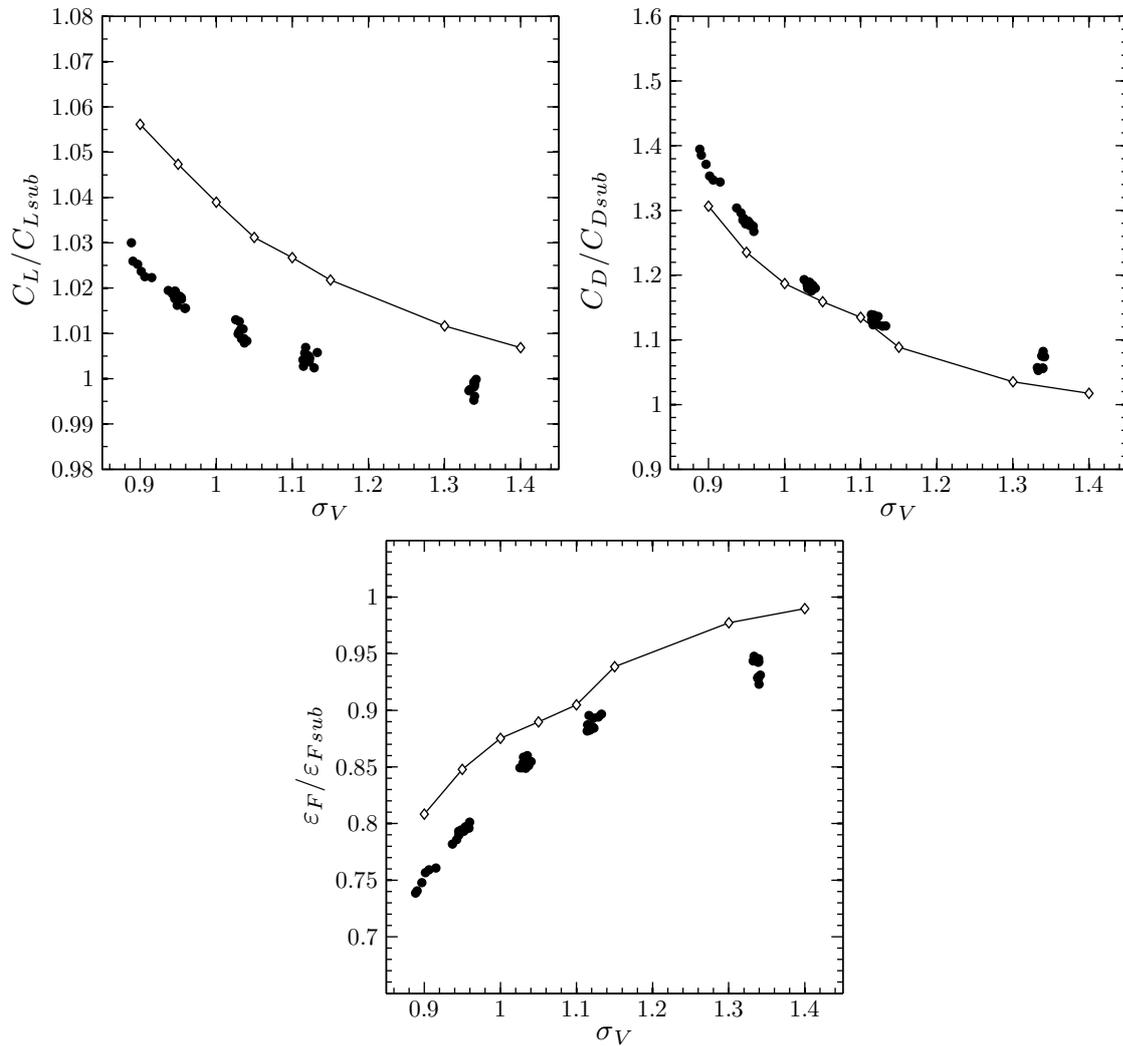


Figure 5.15. Comparaison entre les résultats numériques ($-\diamond-$) et les résultats expérimentaux (\bullet) de l'hydrofoil tridimensionnel des coefficients de portance C_L , de traînée C_D et de finesse ϵ_F en régime cavitant rapportés à ceux en régime subcavitant ; profil NACA0010, $\alpha=7.22^\circ$, $Re \approx 1.24 \times 10^6$; l'indice *sub* indique les résultats en régime subcavitant

5.7 Bilan du chapitre

Une campagne d'essais a été décidée afin d'apporter des éléments quantitatifs à la validation du cas tridimensionnel. Cette campagne d'essais a été menée au Bulgarian Ship Hydrodynamics Centre. Les résultats de cette campagne valident quantitativement le modèle de cavitation à poche en 3D stationnaire sur les efforts globaux. Ils confirment également la validation qualitative quant aux formes de poches. Sur cette configuration d'essais, il est apparu expérimentalement et numériquement que la finesse chutait en présence de cavitation à poche, malgré l'augmentation de la portance. Cette observation générale est

cohérente avec d'autres résultats obtenus et rapportés auparavant par exemple par Balhan (1951) ou encore par Leroux (2003). Enfin, il est à noter que la base de données expérimentales complète pourra être mise à disposition de la communauté scientifique.

Ce chapitre clôt la validation du modèle de cavitation à poche en régime stationnaire. Le chapitre suivant apporte des éléments de vérification pour les écoulements instationnaires autour des hélices.