

# Validation sur la base de résultats disponibles

*“Verification is to solve the equations right.  
Validation is to solve the right equations.”*

## Sommaire

---

4.1	Validation bidimensionnelle avec des mesures du coefficient de pression . . . . .	54
4.2	Comparaison tridimensionnelle avec le modèle de cavitation du BEC . . . . .	56
4.3	Validation tridimensionnelle avec des mesures de la longueur de poche . . . . .	58
4.4	Bilan du chapitre . . . . .	59

---

Dans ce chapitre, la validation du modèle de cavitation développé (présenté à la Section 3.4) avec des résultats expérimentaux et autres résultats numériques trouvés dans la littérature est présentée. Bien que l'objectif du développement du modèle soit de savoir estimer les efforts hydrodynamiques qui s'exercent sur les hydrofoils ou sur les hélices marines en présence de cavitation à poche partielle, aucune validation avec des résultats expérimentaux dans le cas des hélices n'est effectuée ici. En effet, Les essais d'hélices sont très coûteux et les résultats d'essais sont presque toujours classés confidentiels, souvent en raison du secret défense. De plus, même si parfois il existe des résultats d'essais disponibles dans la littérature, certaines informations essentielles ne sont pas données, comme par exemple la géométrie de l'hélice ce qui les rend inexploitable pour un exercice de validation. Au final, vis à vis de la littérature, seule la validation pour des hydrofoils en régime stationnaire a pu être effectuée.

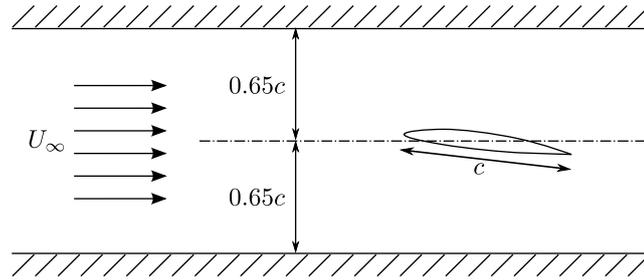
Le modèle de cavitation à poche est d'abord validé quantitativement et qualitativement en bidimensionnel par comparaison de la distribution du coefficient de pression calculée avec des mesures. On compare ensuite le modèle pour un cas tridimensionnel avec les résultats numériques d'un modèle de cavitation à poche développé au Bassin d'Essais des Carènes (BEC). Enfin, une première validation qualitative tridimensionnelle est effectuée par comparaison avec des résultats d'essais.

## 4.1 Validation bidimensionnelle avec des mesures du coefficient de pression

Dans cette section, la validation du modèle de cavitation à poche en bidimensionnel est présentée. Dans les travaux de thèse de Leroux (Leroux, 2003), des essais documentés de façon complète (Leroux, 2003; Leroux et al., 2003) ont été effectués en tunnel de cavitation sur un hydrofoil bidimensionnel présentant une poche de cavitation. Ces essais ont déjà été exploités avec succès dans le cadre de confrontations essais-calculs (Leroux et al. (2005) et Seo and Lele (2009) par exemple). Dans le cadre de la présente étude, ce sont dans un premier temps les mesures des coefficients de pression pour différentes longueurs de poches, qui sont exploitées pour la validation du modèle.

De façon succincte, l'hydrofoil instrumenté en capteurs de pression est un NACA66(mod)-312 a=0.8 (épaisseur relative de 12% et cambrure de 2%) de 150 mm de corde, monté dans la veine d'essais régulée en vitesse et en pression du tunnel de cavitation de l'IRENav – Institut de Recherche de l'Ecole navale – EA3634 (section carrée de 192 mm de côté). Les conditions nominales des essais sont pour une incidence de 6° et un nombre de Reynolds de  $0.75 \times 10^6$ . Pour la comparaison quantitative des résultats expérimentaux et numériques, comme décrit dans Leroux (2003), la procédure de correction de la vitesse en entrée de veine pour les essais a été appliquée en toute rigueur à tous les coefficients de pression et tous les nombres de cavitation expérimentaux utilisés dans le présent document. Le montage expérimental est schématisé à la Figure 4.1.

Par ailleurs toujours dans Leroux (2003), il est montré que dans ce cas d'étude les effets de confinement et de couche limite sur le profil ont une influence non négligeable et doivent être pris en compte. Le code de calcul bidimensionnel développé dans la thèse



**Figure 4.1.** Configuration d'essais utilisée par Leroux (2003)

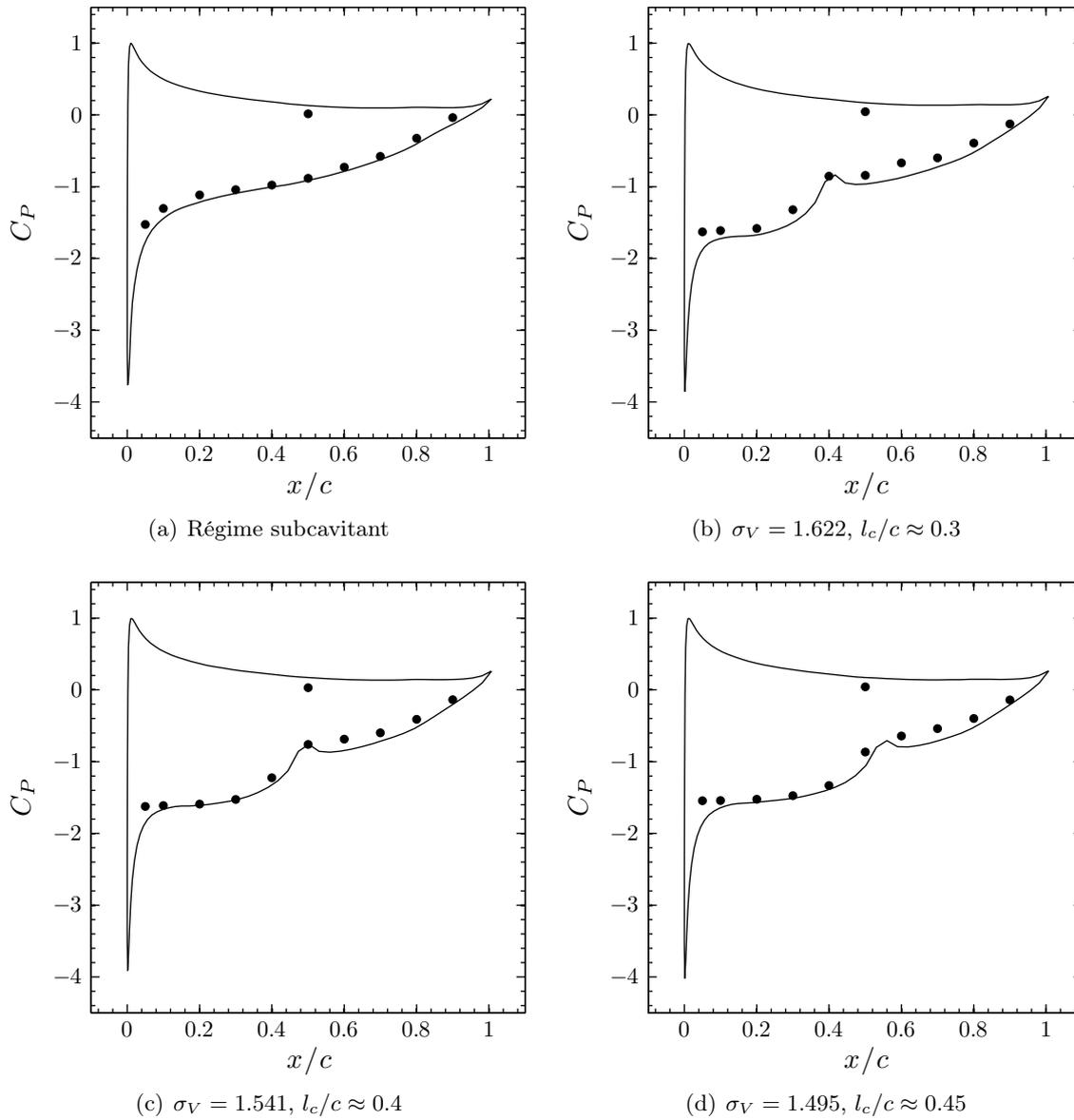
de Leroux (Leroux, 2003) est utilisé dans cette étape de validation. Les caractéristiques principales du code ont été présentées dans la Section 2.4. L'implémentation du modèle de cavitation à poche dans ce code a également été présentée à la Section 3.5.1.

Toutes les simulations effectuées et rapportées dans cette section utilisent un maillage avec 100 mailles ainsi que l'a suggéré l'étude de sensibilité au maillage présentée à la fin du chapitre précédent dans la Section 3.6.2.

Avant de valider le modèle de cavitation par comparaison de ses résultats numériques avec les résultats expérimentaux en régime cavitant, il est approprié de vérifier et de valider d'abord les résultats numériques en régime subcavitant. La Figure 4.2(a) confirme la validation des résultats numériques en régime subcavitant avec une très bonne correspondance entre les mesures du coefficient de pression et les résultats du calcul.

Par la suite, les résultats numériques en régime cavitant sont comparés avec les résultats expérimentaux. Dans cette étape de validation, toutes les mesures du coefficient de pression exploitées ont été effectuées dans les mêmes conditions à l'exception du nombre de cavitation. Les comparaisons entre les résultats numériques et les mesures pour les nombres de cavitation  $\sigma_V$  de 1.622, 1.541 et 1.495 sont présentées en Figures 4.2(b), 4.2(c) et 4.2(d). Les longueurs de poche  $l_c$  approximatives correspondantes sont respectivement de 30%, 40% et 45% de la longueur de corde.

Les résultats numériques s'accordent très bien avec les résultats expérimentaux sauf pour le premier point de mesure au début de la poche de cavitation. En effet, un pic de pression au bord d'attaque inférieur à la pression de vapeur est toujours présent dans les simulations numériques. Ce pic résulte pour une grande part du critère de détachement de la poche de Brillouin-Villat qui impose, en respectant la condition de pression de vapeur  $P = P_V$ , une tangente continue entre le profil et la poche au point de détachement. Un affinage de ce critère, soit via une notion de pression critique d'activation  $P_c < P_V$  avec une pente non-nulle au début de la poche, soit via un critère de détachement en aval du point de décollement laminaire, permettra peut-être par la suite de réduire ce pic en valeur absolue (expérimentalement la tangente continue entre le profil et la poche n'est pas toujours observée, Leroux (2003)). De plus les résultats pour la longueur de la poche la plus courte (la Figure 4.2(b)) s'accordent moins bien par rapport aux deux autres cas. Ceci est plutôt dû au nombre de mailles le long de la poche de cavitation.



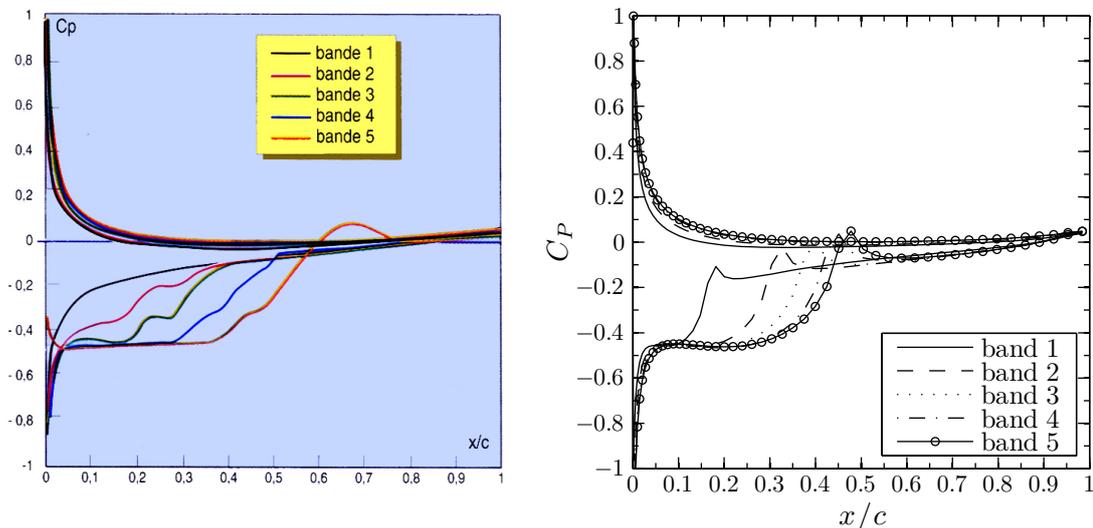
**Figure 4.2.** Comparaison entre les résultats numériques (—) et les mesures (●) du coefficient de pression distribué sur un hydrofoil bidimensionnel; section NACA66(mod)-312  $a=0.8$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $Re = 0.75 \times 10^6$

## 4.2 Comparaison tridimensionnelle avec le modèle de cavitation du BEC

Il y a quelques années, une procédure de calcul a été développée au Bassin d'Essais des Carènes pour simuler la cavitation à poche avec le code potentiel tridimensionnel instationnaire. Le code potentiel a été modifié depuis mais le solveur principal est toujours basé sur le même principe et sa description est conforme à la présentation de la Section 2.5.

La méthode pour représenter la poche consistait en un couplage assez complexe entre le code potentiel tridimensionnel instationnaire et un code potentiel bidimensionnel cavitant. Le code bidimensionnel est le résultat des travaux présentés dans la thèse de Briançon-Marjolet Briançon-Marjolet (1987). Le code potentiel est couplé avec un modèle de couche limite et un modèle de cavitation à poche.

La procédure de couplage avec le code tridimensionnel fonctionnait de la manière suivante. On fait d'abord tourner le code potentiel tridimensionnel en régime subcavitant. Chaque section est alors géométriquement transformée de sorte que la distribution de pression obtenue avec le code bidimensionnel soit identique à celle obtenue avec le code tridimensionnel. Dans le cas d'une aile à sections symétriques non vrillée opérant dans un écoulement uniforme, il s'agit simplement de changer l'angle d'attaque. Dans le cas d'une hélice, la transformation peut s'avérer plus difficile et nécessite l'emploi d'un code potentiel bidimensionnel inverse. Une fois les profils bidimensionnels obtenus, ils sont soumis au code potentiel bidimensionnel cavitant. La forme de la poche est alors obtenue pour chaque section. La transformation inverse permet de replacer les sections dans la géométrie tridimensionnelle. La nouvelle géométrie ainsi obtenue est directement utilisée dans la simulation potentielle tridimensionnelle. Malgré la complexité de la procédure, une parfaite coïncidence entre les résultats 2D et 3D est obtenue tel que c'est reporté dans Briançon-Marjolet and Merle (1999) qui présente les activités du Bassin d'Essais des Carènes à cette époque. Si l'on fait abstraction de sa complexité, la procédure de calcul a un inconvénient majeur. Elle passe par un remaillage de la surface du solide. Cette opération de remaillage augmente considérablement le temps de calcul et typiquement, l'application aux régimes instationnaires s'est avérée quasiment impossible.



**Figure 4.3.** Comparaison des résultats numériques de Briançon-Marjolet and Merle (1999) (à gauche) avec le présent modèle (à droite) ; hydrofoil rectangulaire, profil NACA0004,  $\Lambda = 3$ ,  $\alpha = 3.5^\circ$ ,  $\sigma_V = 0.45$ , en milieu infini

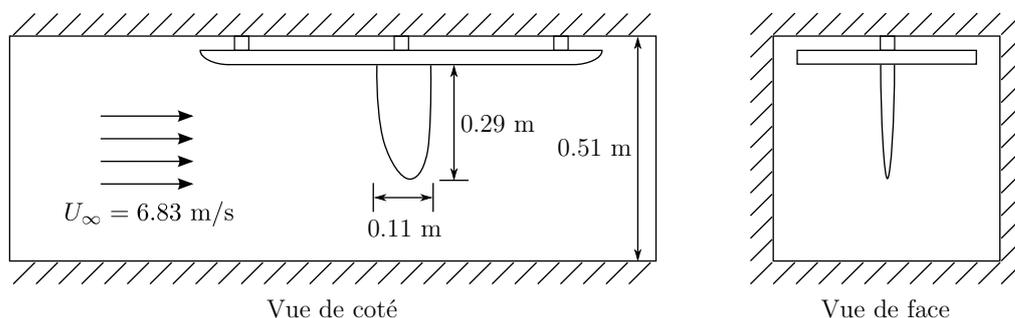
On reprend le cas relativement simple de l'aile tridimensionnelle en milieu infini présenté dans Briançon-Marjolet and Merle (1999). L'hydrofoil est de forme en plan rec-

tangulaire, avec un allongement de 3 et un profil NACA0004 constant en envergure. La comparaison entre nos résultats numériques et ceux de Briançon-Marjollet and Merle (1999) est présentée à la Figure 4.3.

Les longueurs de poche sont sensiblement les mêmes pour les deux simulations numériques. De plus, les résultats de Briançon-Marjollet and Merle (1999) montrent également un pic de pression inférieur à la pression de vapeur au bord d'attaque. Par contre, les plateaux de pression sur la poche accusent quelques différences. On souligne enfin que la méthode des vitesses de transpiration du présent modèle ne nécessite aucun remaillage (au contraire de la méthode de Briançon-Marjollet and Merle (1999)), ce qui est d'un intérêt évident pour l'étude de régimes instationnaires.

### 4.3 Validation tridimensionnelle avec des mesures de la longueur de poche

Des mesures de longueur de poches de cavitation sur un hydrofoil tridimensionnel ont été effectuées lors d'essais réalisés dans le tunnel de cavitation du MIT. L'hydrofoil mis en jeu est un aileron de planche à voile fabriqué à la main par FINTECH. La géométrie de l'hydrofoil et les conditions des essais sont détaillées au mieux dans Kinnas and Fine (1993). La configuration de ces essais est présentée à la Figure 4.4.

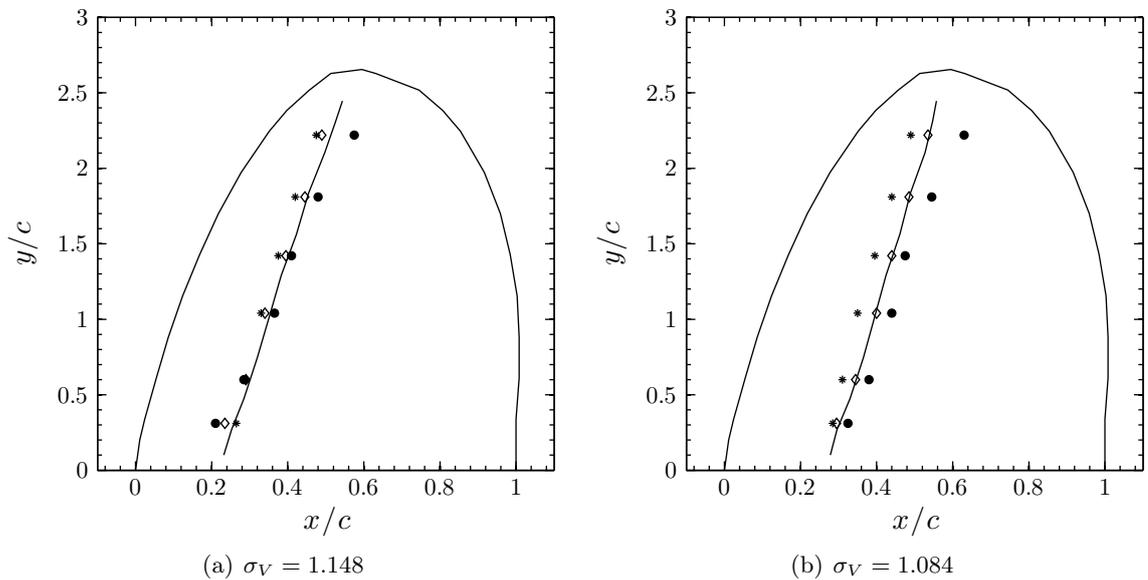


**Figure 4.4.** Configuration d'essais cités par Kinnas and Fine (1993)

Une difficulté réside ici : ne connaissant pas le profil exact de chaque section, les auteurs n'en ont mesuré que les coordonnées du bord d'attaque, du bord de fuite et du point d'épaisseur maximale. L'épaisseur maximale apparaît environ à 40% de corde du bord d'attaque. Tous les auteurs qui ont exploité ces résultats expérimentaux ont supposé, comme ici, que le profil était sensiblement similaire à la section NACA65a pour simplifier le problème.

Les essais ont été effectués pour deux nombres de cavitation différents  $\sigma_V = 1.084$  et 1.148. Malheureusement, seules les longueurs de poche sont disponibles dans Kinnas and Fine (1993). Salvatore and Esposito (2001) ainsi que Peallat and Pellone (1996) ont également utilisé ces résultats expérimentaux pour valider leurs modèles de cavitation à poche. Nos résultats numériques sont donc comparés aux résultats expérimentaux (Kinnas and Fine, 1993) et aux résultats numériques (Salvatore and Esposito, 2001; Peallat and Pellone, 1996).

À la différence de la validation dans le cas bidimensionnel, même si les mesures ont été effectuées dans un tunnel de cavitation, l'effet de confinement n'est pas pris en compte dans le calcul. L'effet de la couche limite n'est pas pris en compte non plus. Salvatore and Esposito (2001) ainsi que Peallat and Pellone (1996) ignorent également ces effets car seule la comparaison qualitative est possible – c'est-à-dire ni mesures des efforts ni mesure de pression ne sont disponibles. Néanmoins, si l'effet du confinement est d'allonger la poche, la prise en compte de la couche limite a l'effet inverse. On peut espérer que dans ce cas les deux effets s'annulent. Enfin, l'emploi de la théorie des images a permis de respecter la condition de symétrie de l'écoulement dans le plan contenant la section emplanture d'hydrofoil.



**Figure 4.5.** Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques de plusieurs modèles sur la distribution de longueur de poche d'un aileron tridimensionnel; section NACA65a,  $\alpha=6.5^\circ$ , l'écoulement vient de la gauche de la Figure; (●) mesures Kinnas and Fine (1993), (◇) Salvatore and Esposito (2001), (\*) Peallat and Pellone (1996), (—) présent modèle

La comparaison des résultats est présentée à la Figure 4.5. Malgré les différences de modèle, de critère de détachement et de modèle de fermeture complémentaire, tous les résultats numériques, y compris ceux de notre modèle, s'accordent bien avec les résultats expérimentaux au niveau de la longueur de la poche de cavitation.

## 4.4 Bilan du chapitre

Les résultats disponibles dans la littérature sont malheureusement le plus souvent incomplets. Seule une validation pour un hydrofoil bidimensionnel en régime stationnaire a été effectuée de manière complète et satisfaisante. Non seulement les géométries de poche sont retrouvées mais également les pressions. Les comparaisons de nos résultats avec des

calculs et des essais sur des hydrofoils tridimensionnels nous apportent des résultats qui viennent conforter notre confiance dans notre modèle de poche. Il ne s'agit pourtant que de comparaisons qualitatives de la géométrie de la poche. Sachant que l'objectif est en partie de déterminer les effets de la poche de cavitation sur les efforts hydrodynamiques, le bilan de ce chapitre n'est que partiellement satisfaisant. Une campagne d'essais a été décidée pour obtenir une validation complète dans le cas tridimensionnel. La campagne d'essais et la comparaison des résultats font l'objet du prochain chapitre.

# Chapitre 5

## Campagne d'essais et compléments de validation

### Sommaire

---

<b>5.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>62</b>
<b>5.2</b>	<b>Moyens expérimentaux</b>	<b>63</b>
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
<b>5.3</b>	<b>Grille d'essais et procédures</b>	<b>69</b>
<b>5.4</b>	<b>Conduite des essais, problèmes rencontrés et solutions</b>	<b>69</b>
<b>5.5</b>	<b>Modélisation numérique des essais</b>	<b>70</b>
<b>5.6</b>	<b>Comparaison des résultats</b>	<b>71</b>
<b>5.7</b>	<b>Bilan du chapitre</b>	<b>74</b>

---

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.

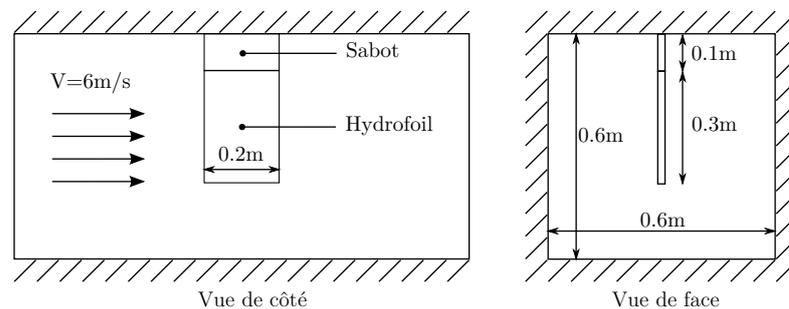
La pression en entrée de veine se règle via un compresseur ou une pompe à vide, une vanne manuelle et la mesure de la pression en entrée de veine. Cette mesure est réalisée visuellement par un manomètre à mercure ; si besoin elle peut-être réglée et maintenue stable manuellement via la vanne au cours 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)).

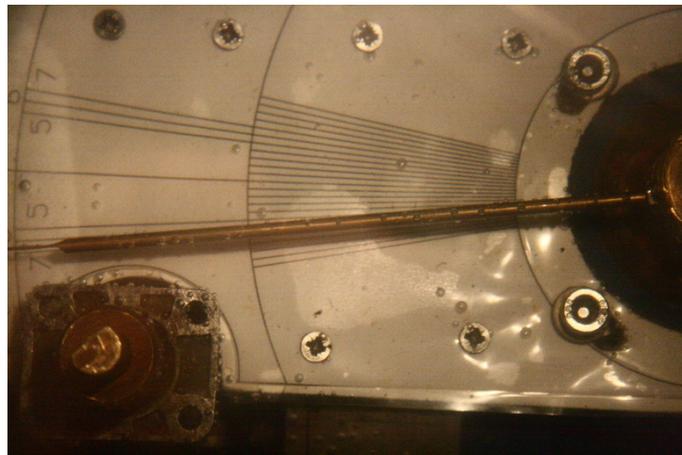
### 5.2.2 Montage expérimental et instrumentation

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  $0^\circ$  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).



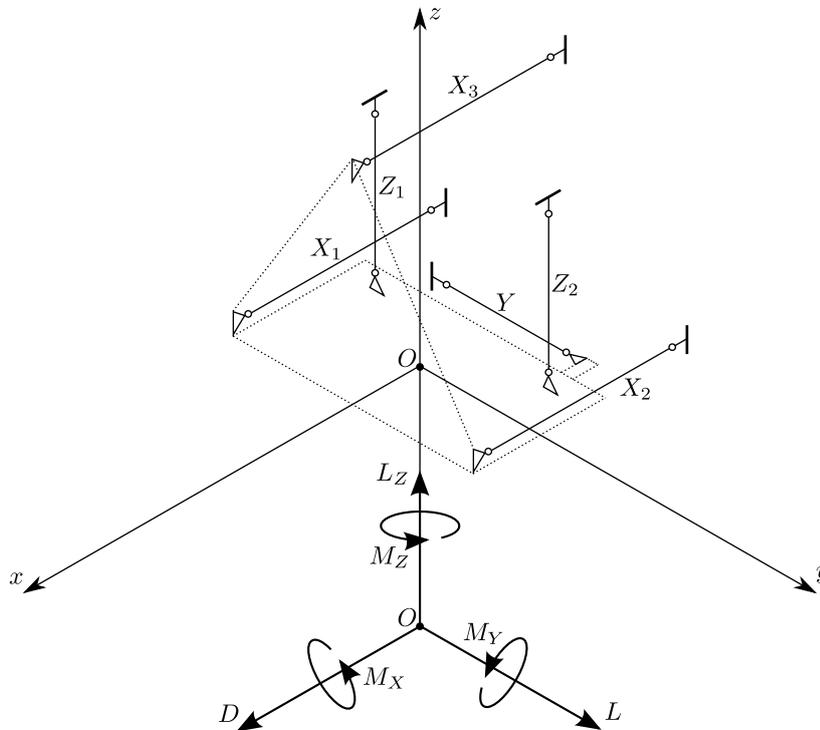
**Figure 5.5.** Photo du système de réglage de l'angle d'incidence

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 trainée 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  $0.2^\circ$  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  $7.22^\circ$  recalé pour  $7.00^\circ$  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,