

DEVELOPPEMENT ET VALIDATION D'UN MODELE DE CAVITATION A POCHE SUR HYDROFOIL ET PALE D'HELICE

DEVELOPMENT AND VALIDATION OF A SHEET CAVITATION MODEL ON HYDROFOIL AND PROPELLER BLADE

S. PHOEMSAPTHAWEE* , J.B. LEROUX* , J.M. LAURENS* , F. DENISET**

* Laboratoire de Mécanique de Structure Navale (MSN)

ENSIETA, 2 rue François Verny 29806 BREST Cedex 9

** Institut de Recherche de l'Ecole Navale (IRENav)

Ecole Navale, BP 600 – 29240 BREST ARMEES

Résumé

Un module de cavitation à poche a été développé et implémenté sur un code potentiel hélice. La méthode pour représenter la cavitation à poche utilise les vitesses de transpiration qui permettent de dévier la condition de glissement sans modification de la géométrie. Cette modélisation permet une simulation très rapide par rapport aux différentes solutions passant par la résolution des équations de Navier-Stokes en diphasique. Le modèle est validé par comparaison avec des essais expérimentaux sur hydrofoils en 2D et en 3D. Ses performances sont également comparées à d'autres simulations numériques.

Summary

A sheet cavitation module have been developed and applied in a BEM code for calculating propeller performance. This simulation, in order to represent the sheet cavitation, employs the transpiration velocities technique which allows the deviation of slip condition points without any modification of the geometry. The method provides a very rapid simulation compared to a two-phase Navier-Stokes simulations. The model is validated by comparison with the results of experimental trials performed on hydrofoils in 2D and 3D. Its performances are also compared with other numerical simulations.

I-NOMENCLATURE

$C_p = (P - P_\infty) / (0.5 \rho U_\infty^2)$	coefficient de pression en condition subcavitante (-)
k	facteur d'adaptation (-)
l	longueur caractéristique (m)
P	pression en condition subcavitante (Pa)
P_v	pression de vapeur (Pa)
P_∞	pression en amont (Pa)
s	abscisse curviligne (m)
s_0	point de détachement de la poche de cavitation (m)
$\bar{s} = s/l$	abscisse curviligne adimensionnelle (-)
t_c	épaisseur de poche de cavitation (m)
u	vitesse tangente (m/s)
u_c	vitesse tangente sur la poche de cavitation (m/s)
U_∞	vitesse en amont (m/s)
v^*	vitesse de transpiration (m/s)
$\bar{v}^* = v^* / U_\infty$	vitesse de transpiration adimensionnelle (-)
α	incidence (°)
ρ	masse volumique de l'eau (kg/m ³)
$\sigma_v = (P_\infty - P_v) / (0.5 \rho U_\infty^2)$	nombre de cavitation (-)
σ^*	intensité de source additionnelle (m/s)

II-INTRODUCTION

La cavitation est un des problèmes majeurs dans la conception des hélices marines. Chaque type de cavitation engendre des problèmes qui lui sont propres. Un des effets néfastes de la cavitation à poche est la perte de performances du propulseur. De plus, la cavitation à poche peut être à l'origine de problèmes de vibrations dont les conséquences peuvent aller jusqu'à l'endommagement de la structure. La conception des hélices se destine normalement à retarder au maximum la cavitation. En raison de l'augmentation de la charge et de la limitation d'espace pour l'installation des hélices, la cavitation à poche est de plus en plus difficile à éviter. Il est donc nécessaire à comprendre et de savoir estimer les effets de la cavitation à poche notamment sur les efforts hydrodynamiques.

Trois points importants sont à discuter quant à la modélisation de la cavitation à poche : le critère du point de détachement de la poche, le modèle complémentaire de la zone de fermeture de poche, et la méthode de résolution.

La première partie de la référence [1] donne une liste exhaustive des critères du point de détachement utilisés dans les différents modèles existants. Les critères les plus utilisés sont :

- Le critère de Brillouin-Villat, utilisé par la plupart (par exemple références [2] et [3]), consiste à choisir le point assurant la continuité de la courbure en respectant la condition de glissement et la pression de vapeur.
- Le critère de la couche limite laminaire, introduit par Franc J.P. (référence [4]) impose que la poche de cavitation commence après le point de décollement de la couche limite

laminaire. Ce critère est aussi largement accepté par exemple dans les références [5], [6] et [7]. Néanmoins, selon des essais effectués au Laboratoire de Machines Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (référence [8]), le phénomène de cavitation par poche a été obtenu sans qu'il y ait eu observation de décollement de la couche limite laminaire.

- Les autres critères souvent mentionnés sont celui de la pression minimale et celui du bord d'attaque. Cette dernière méthode peu physique est cependant celle finalement retenue par les auteurs de la référence [9] qui ont implémenté plusieurs modèles, y compris plusieurs variantes du jet ré-entrant.

Les auteurs de la référence [1] présentent également les différents modèles pour la fermeture de la poche. Les modèles de la fermeture de poche sont classés en deux catégories : fermé et ouvert. La définition est donnée par Rowe A. et Blottiaux O. (référence [10]) : un modèle fermé est un modèle dans lequel la ligne de courant, après avoir été déviée par la poche de cavitation, retouche à nouveau la surface mouillée tandis qu'un modèle ouvert est un modèle dans lequel la ligne de courant ne touche plus la surface mouillée. Même si cavitation à poche partielle et modèle fermé ne sont pas synonymes, le modèle fermé est principalement utilisé dans la modélisation de cavitation à poche partielle (par exemple références [2], [5], [6] et [11]). Même si le détail de chaque modèle n'est pas le même, le principe est de transformer de façon continue la condition de pression de vapeur sur la poche en la condition de glissement sur la surface mouillée. L'utilisation du modèle ouvert, est quant à lui, mentionné par exemple dans la référence [12], pour une modélisation de la supercavitation et aussi des poches partielles de grandes longueurs.

Pour implémenter leurs modèles de cavitation sur leurs codes potentiels, Kinnas S. et Fine N. (référence [2]) ainsi que Salvatore F. et Esposito P.G. (référence [6]) imposent les intensités des doublets sur la poche, à l'aide de la condition de pression de vapeur, et calculent les intensités des sources. Pour Peallat J.M. et Pellone C. (référence [11]), toutes les intensités des doublets et des sources sont des inconnues à déterminer. Le problème est ensuite résolu par une technique d'optimisation.

Dans la présente étude, le but est également d'implémenter un modèle de cavitation à poche partielle sur un code potentiel. Le code potentiel tridimensionnel dont nous disposons, permet de calculer les efforts hydrodynamiques d'une hélice travaillant en régime instationnaire.

Le code utilisé pour ce développement appartient à la catégorie de codes potentiels de deuxième génération selon le vocabulaire de la référence [13] dans laquelle une description exhaustive des différents modèles est donnée. Le code utilise une condition de Dirichlet intérieure, les deux problèmes, intérieur et extérieur étant raccordés à la frontière c'est à dire à la surface du corps. Les surfaces mouillées sont discrétisées en facettes du premier ordre porteuses de distributions constantes de sources et de doublets. Le sillage en aval du corps portant, foil ou pale, est représenté par une nappe de facettes de premier ordre porteuses de distributions constantes de doublets. Cette nappe est générée de manière lagrangienne ce qui permet une simulation instationnaire. Grâce à la condition de Dirichlet, les sources sont déterminées directement par la condition de glissement. De cette manière, les inconnues du problème, contrairement aux codes potentiels précédemment cités, sont les intensités de

doublets. En conséquence, les méthodes pour lesquelles on calcule les doublets à partir d'une forme de poche alors que les sources sont à déterminer ne peuvent être utilisées sans une profonde refonte du code.

Par analogie avec une méthode de couplage précédemment mise en œuvre entre le code potentiel et un code de couche limite (référence [14]), la méthode retenue ici est de modéliser la poche de cavitation par des vitesses de transpiration, normales à la paroi, qui dévient l'écoulement. Ces vitesses de transpiration v^* sont équivalentes à une distribution additionnelle de sources σ^* , qui se répartissent simplement sur la paroi. L'implémentation d'un tel modèle dans le code est simple puisqu'il ne s'agit que de modifier la condition de glissement sous la poche. La détermination de l'intensité des sources qui modélisent la poche constitue ici le cœur du modèle proprement dit, et fait l'objet du point suivant.

III-PRESENTATION DU MODELE PHYSIQUE

Nous proposons qu'il y ait une relation entre la géométrie de la poche de cavitation et la distribution de pression en condition subcavitante. Lors d'une précédente étude (référence [15]), un modèle avait été proposé qui donnait des résultats qualitativement acceptables. Depuis, le modèle a dû être repensé suite à une tentative insatisfaisante de validation quantitative. Le nouveau modèle présenté équation (1), décrit la relation entre la vitesse de transpiration v^* , et la distribution de pression en condition subcavitante P . L'épaisseur de la poche de cavitation au point d'abscisse curviligne s correspondant peut alors se déterminer, à partir de la vitesse de transpiration, par l'équation (2).

$$v^* = \frac{2k}{\rho U_\infty l} \int_{s_0}^s (P_v - P) ds \quad (1)$$

$$t_c = \frac{1}{u_c} \int_{s_0}^s v^* ds \quad (2)$$

Dans l'équation (2), nous supposons que la vitesse tangente sur la poche de cavitation u_c est constante et définie par l'équation (3). Cette équation traduit simplement la condition dynamique classique, selon laquelle la pression sur la poche de cavitation est constante, égale à la pression de vapeur.

$$u_c = \sqrt{U_\infty^2 + \frac{2(P_\infty - P_v)}{\rho}} = U_\infty \sqrt{1 + \sigma_v} \quad (3)$$

Enfin de façon adimensionnelle, l'équation de base du modèle s'écrit selon l'équation (4), en utilisant la définition du coefficient de pression et celle du nombre de cavitation :

$$\bar{v}^* = -k \int_{\bar{s}_0}^{\bar{s}} (C_p + \sigma_v) d\bar{s} \quad (4)$$

Schématiquement, la procédure générale de calcul est la suivante :

- On suit une ligne de courant le long de la paroi, à partir du point d'arrêt. Tant que la pression en condition subcavitante P est supérieure à la pression de vapeur P_v , la vitesse de transpiration est nulle.
- Le point de détachement de la poche de cavitation correspond à la première intersection entre la courbe de la pression en condition subcavitante et la pression de vapeur.
- Ensuite, la poche de cavitation continue à se développer et la fermeture de la poche est automatiquement atteinte quand l'intégrale du débit de transpiration est nulle. En effet, en vertu de l'équation (2), l'épaisseur de la poche de cavitation t_c , est alors nulle. De cette façon, la longueur de la poche de cavitation est naturellement libre et aucun modèle de fermeture complémentaire n'est imposé.

Le facteur d'adaptation k qui intervient dans le modèle (équation (1) ou (4)) est déterminé automatiquement de façon itérative selon l'algorithme suivant :

- A partir d'une valeur initiale choisie relativement petite, on calcule les vitesses de transpiration v^* sur le profil, et la forme de la poche de cavitation en résultant.
- On itère ensuite sur la valeur de k en utilisant la méthode de la sécante avec pour critère $P = P_v$ sur la poche au point d'épaisseur maximale de la poche.

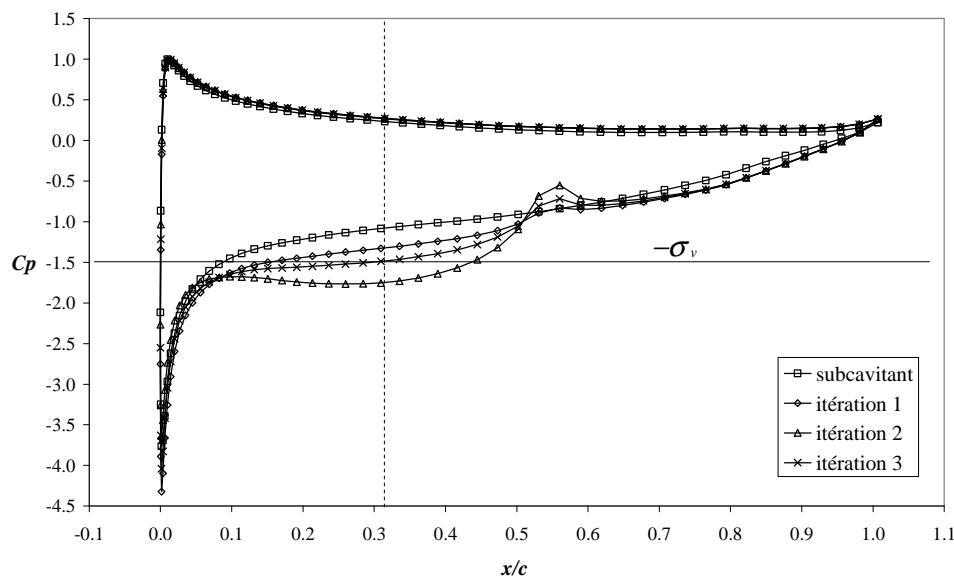


Figure 1. Convergence du coefficient de pression en fonction des itérations sur le facteur d'adaptation dans le cas d'un hydrofoil bidimensionnel en incidence partiellement cavitant ($\sigma_v = 1.495$, épaisseur maximale à $x/c = 0.32$).

Le modèle a d'abord été implémenté sur un code potentiel bidimensionnel (référence [16]). Comme le montre la Figure 1, la convergence du facteur d'adaptation est particulièrement rapide, le critère étant atteint en 3 itérations dans ce cas particulier.

IV-IMPLEMENTATION ET VALIDATION EN 2D

Dans cette partie, nous présentons l'implémentation et la validation de notre modèle de

cavitation à poche en 2D. Dans les travaux de thèse de la référence [16], des essais documentés de façon complète (références [16] et [17]) ont été effectués en tunnel hydrodynamique sur un hydrofoil bidimensionnel présentant une poche de cavitation. Ces essais ont déjà été exploités avec succès dans le cadre de confrontations expérimentale / numérique (référence [18] 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 hydrodynamique de l'IRENav - EA3634 (section carrée de 192 mm de côté). Les conditions nominales des essais sont une incidence de 6° et un nombre de Reynolds de $0.75 \cdot 10^6$. Pour la comparaison quantitative des résultats expérimentaux et numériques, comme décrit dans la référence [16], 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.

Par ailleurs toujours dans la référence [16], 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 programme de calcul 2D développé dans la thèse – couplant via des vitesses de transpiration, le calcul intégral de la couche limite, avec le calcul potentiel confiné par la méthode des images – a donc été réexploité pour l'implémentation du modèle de cavitation (la méthode et les éléments de validation de ce programme en subcavitant sont détaillés en annexe de la référence [16]). Le principal point délicat réside dans l'interaction du modèle de cavitation à poche avec le modèle de couche limite. A chaque itération du couplage fluide parfait / couche limite, nous avons retenu la procédure suivante :

- A l'intrados subcavitant, calcul de la couche limite du point d'arrêt au bord de fuite.
- A l'extrados cavitant :
 - Calcul de la couche limite du point d'arrêt au point de détachement de la poche, en démarrant avec la fermeture laminaire.
 - Epaisseur de couche limite constante du point de détachement de la poche au point de fermeture (id. vitesse de transpiration de couche limite nulle sous la poche).
 - Reprise du calcul de couche limite du point de fermeture au bord de fuite, avec la fermeture turbulente et l'épaisseur précédente comme condition initiale.

Ce procédé, s'il n'est pas juste en toute rigueur, permet en première approximation de modéliser conjointement la couche limite et la poche de cavitation.

Avant de valider les résultats numériques du modèle de cavitation par comparaison avec les résultats expérimentaux, deux étapes doivent être confirmées : la validation en condition subcavitante, ainsi que la consistance en fonction de la finesse du maillage en régime cavitant.

La Figure 2 montre d'abord la très bonne correspondance entre les mesures du coefficient de pression et les résultats du calcul simple en régime subcavitant.

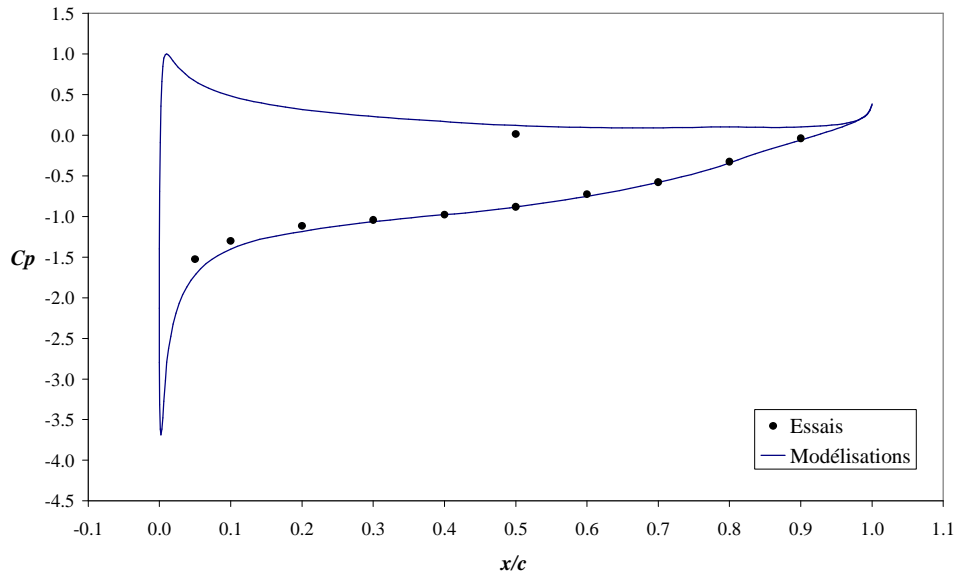


Figure 2. Comparaison des coefficients de pression mesuré et calculé en régime subcavitant, section NACA66(mod) – 312 $a = 0.8$, conditions nominales : $\alpha = 6^\circ$, $Re = 0.75 \cdot 10^6$

Les courbes de la Figure 3 montrent ensuite la consistance au niveau du nombre de mailles qui discrétisent le profil 2D. En effet, du fait des intégrations numériques présentes dans le modèle de cavitation à poche, tant pour la vitesse de transpiration que pour l'épaisseur de poche, il est nécessaire d'avoir un nombre suffisant de mailles sur la poche. Compte tenu des résultats Figure 3, un nombre de mailles de 100 sur tout le profil sera suffisant pour l'ensemble des résultats présentés dans la suite.

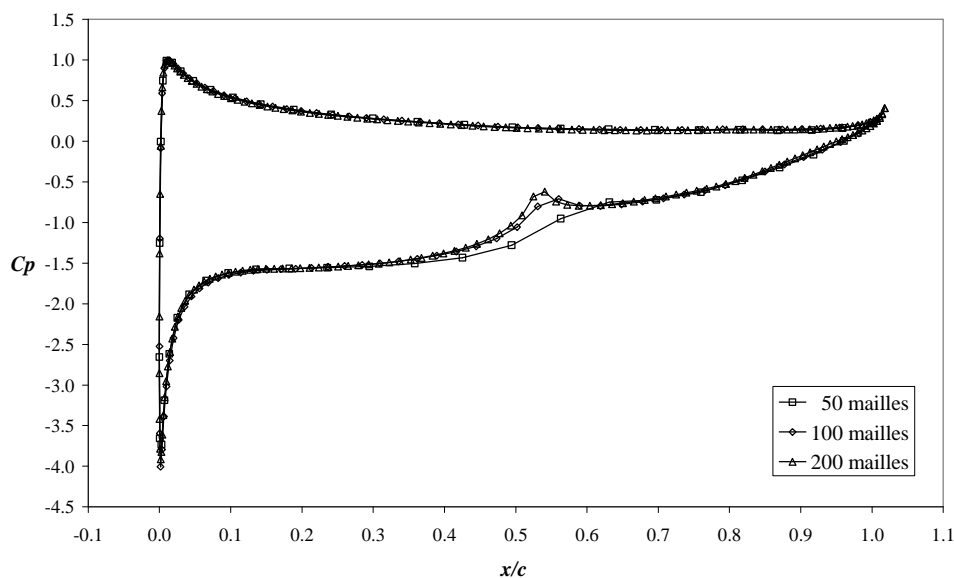


Figure 3. Comparaison des coefficients de pression calculés en régime cavitant en fonction du nombre de mailles, section NACA66(mod) – 312 $a = 0.8$, conditions nominales : $\alpha = 6^\circ$, $Re = 0.75 \cdot 10^6$, $\sigma_v = 1.495$

Pour valider le modèle de cavitation à poche, nous disposons de trois résultats d'essais où seul le nombre de cavitation, et donc la longueur de poche change. Les résultats des comparaisons sont présentés sur les figures suivantes : Figure 4, Figure 5 et Figure 6.

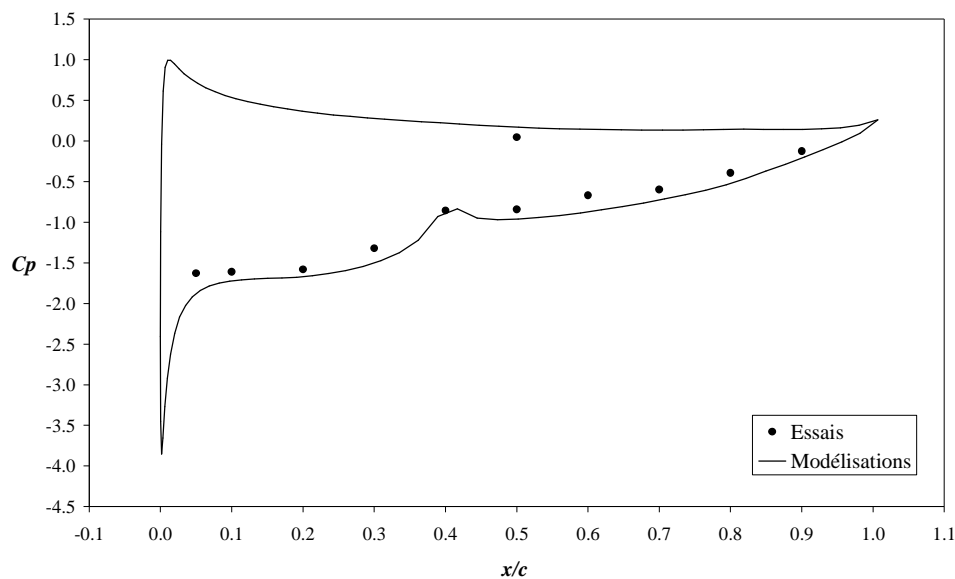


Figure 4. Comparaison des coefficients de pression calculés et mesurés en régime cavitant, section NACA66(mod) – 312 a=0.8, poche de longueur relative 30%, conditions nominales : $\alpha = 6^\circ$, $Re = 0.75 \cdot 10^6$, $\sigma_v = 1.622$

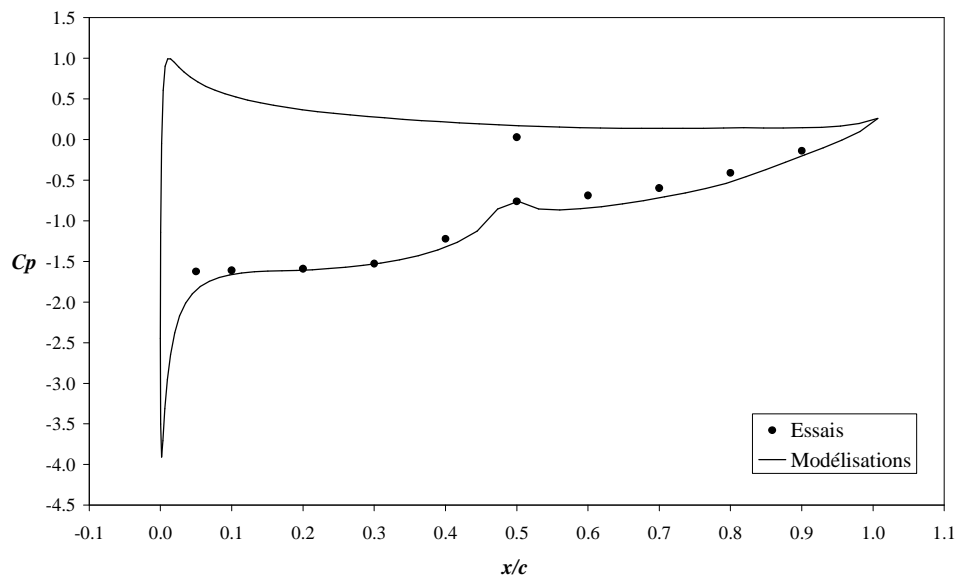


Figure 5. Comparaison des coefficients de pression calculés et mesurés en régime cavitant, section NACA66(mod) – 312 a=0.8, poche de longueur relative 40%, conditions nominales : $\alpha = 6^\circ$, $Re = 0.75 \cdot 10^6$, $\sigma_v = 1.541$

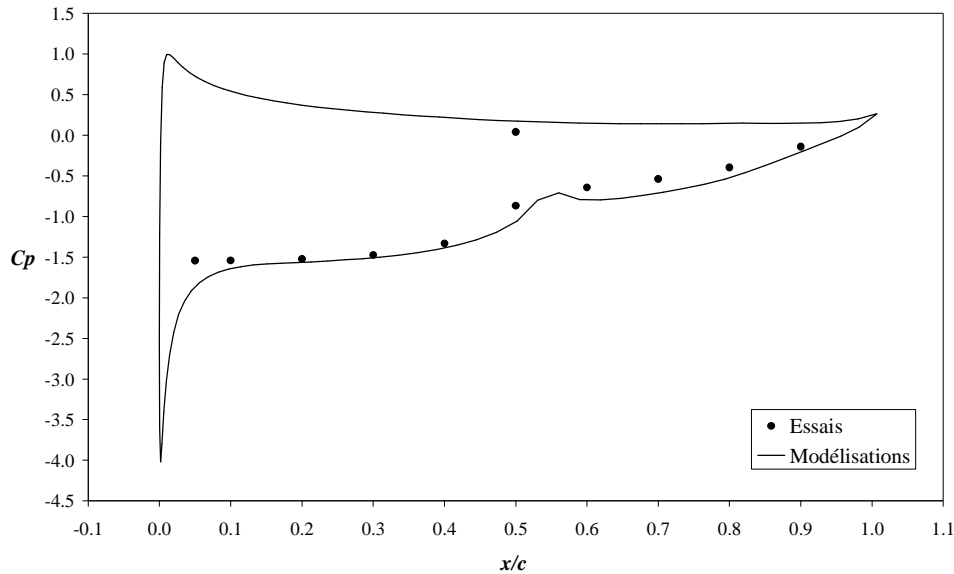


Figure 6. Comparaison des coefficients de pression calculés et mesurés en régime cavitant, section NACA66(mod) – 312 $a=0.8$, poche de longueur relative 45%, conditions nominales : $\alpha = 6^\circ$, $Re = 0.75 \cdot 10^6$, $\sigma_v = 1.495$

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 inférieur à la pression de vapeur au bord d'attaque est toujours présent dans les simulations numériques. Selon nous, ce pic résulte pour une grande part de la condition de détachement de la poche $P = P_v$ qui impose une tangente continue entre la section et la poche au point de détachement. Un affinage de cette condition, soit via une notion de pression critique d'activation $P_c < P_v$, soit via un critère de détachement au point décollement laminaire, permettra par la suite de le réduire en valeur absolue (expérimentalement cette tangence n'est pas observée). De plus les résultats pour la longueur de la poche la plus courte (Figure 4) s'accordent moins bien par rapport aux deux autres cas. Ceci mérite sans doute une plus ample investigation au niveau des paramètres du calcul comme typiquement le nombre de mailles le long de la poche de cavitation, le nombre et la répartition globale des facettes étant identiques dans tous les cas.

V-IMPLEMENTATION ET VALIDATION EN 3D

Les résultats satisfaisants du modèle sur l'hydrofoil bidimensionnel nous autorisent à implémenter le modèle de cavitation à poche dans le code potentiel tridimensionnel instationnaire décrit en introduction. Bien que le code permette une simulation instationnaire y compris de la poche, seules des comparaisons avec des essais et des calculs en régime stationnaire sont présentées ici.

Nous avons deux cas différents à notre disposition pour comparer notre modèle de cavitation à poche dans une configuration tridimensionnelle. Le premier consiste en des résultats numériques obtenus au Bassin d'Essais des Carènes et rapportés dans la référence [5]. Le second consiste en des résultats expérimentaux obtenus au MIT et rapportés dans la

référence [2]. Ces derniers résultats ont déjà été exploités et comparés avec d'autres résultats de simulations numériques réalisées par ailleurs et rapportés dans les références [6] et [11].

Contrairement au cas bidimensionnel, les effets de confinement et de la couche limite ne sont pas pris en compte dans la suite. De plus, le facteur d'adaptation en cas tridimensionnel est plus délicat à déterminer. En effet, il est a priori dépendant des lignes de courant, et donc ne peut être le même pour toutes les bandes du maillage structuré. En première approche, le facteur d'adaptation est donc déterminé indépendamment pour chaque bande.

Comparaison aux résultats numériques 3D de la référence [5]

Un modèle de cavitation à poche a été développé au Bassin d'Essais des Carènes il y a plusieurs années. Il est légitime de vouloir comparer les résultats numériques du présent modèle avec ceux-ci parce que le modèle développé au Bassin d'Essais des Carènes a été implémenté dans le même code potentiel que celui utilisé ici. Le modèle de cavitation du Bassin d'Essais des Carènes utilise une technique mixte de couplage 2D / 3D : la poche de cavitation de chaque section est d'abord calculée par un code bidimensionnel, et ensuite le maillage tridimensionnel est reconstruit à partir du résultat de chaque section. La difficulté principale de cette procédure tient aux passages entre les espaces bidimensionnels et tridimensionnels. De plus, l'opération de remaillage est un inconvénient majeur, et typiquement l'application aux régimes instationnaires s'est avérée quasiment impossible.

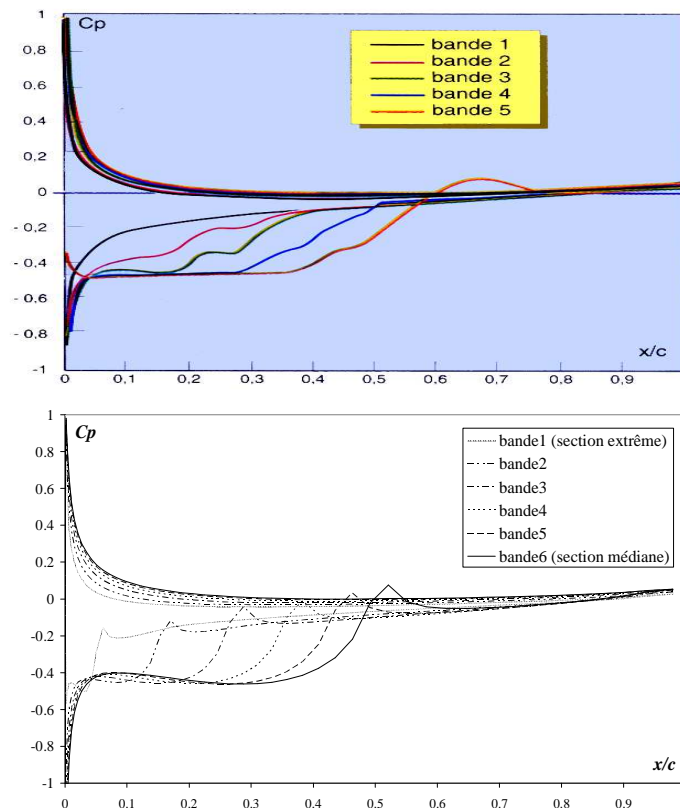


Figure 7. Comparaison des résultats numériques de la référence [5] (en haut) et du présent modèle (en bas). L'aileron est rectangulaire de section constante (allongement de 3, profil NACA0004), conditions nominales : aileron en milieu infini, $\alpha = 3.5^\circ$, $\sigma_v = 0.45$

Nous reprenons le cas relativement simple de l'aile tridimensionnelle en milieu infini présentée à la référence [5]. L'hydrofoil est de forme en plan rectangulaire, avec un allongement de 3 et un profil NACA0004 constant en envergure. La comparaison entre notre résultat numérique et celui de la référence [5] est présentée à la Figure 7.

Les longueurs de poche sont sensiblement les mêmes pour les deux simulations numériques. De plus, les résultats de la référence [5] 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. Nous soulignons enfin que la méthode des vitesses de transpiration du présent modèle, ne nécessite aucun remaillage (au contraire de la méthode de la référence [5]) ; ce qui est d'un intérêt évident pour l'étude de régimes instationnaires.

Comparaison avec des résultats expérimentaux et numériques en 3D

Des mesures de longueur de poches de cavitation sur un hydrofoil tridimensionnel ont été effectuées lors d'essais réalisés dans tunnel hydrodynamique 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 la référence [2].

Une difficulté réside ici : ne connaissant pas le profil exact de chaque section, les auteurs n'en ont mesuré que les épaisseurs maximales. L'épaisseur maximale apparaît en moyenne à 40% de corde du bord d'attaque. Les auteurs ont ensuite supposé 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 la référence [2]. Salvator et Esposito (référence [6]) ainsi que Peallat et Pellone (référence [11]) ont également utilisé ces résultats expérimentaux pour valider leurs modèles de cavitation à poche. Nos résultats numériques sont donc comparés aux résultats expérimentaux (référence [2]) et aux résultats numériques (référence [6] et [11]) (voir Figure 8 et Figure 9).

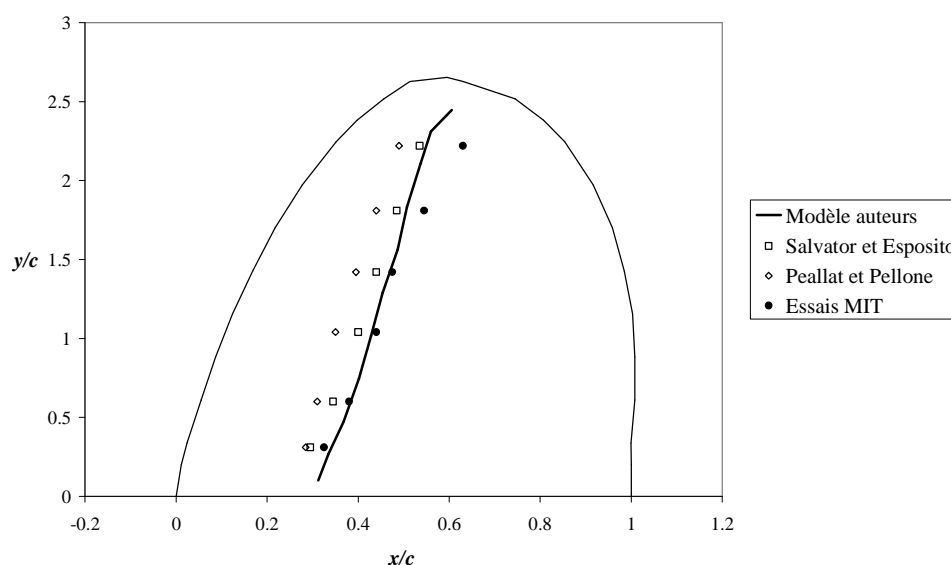


Figure 8. Longueur de la poche de cavitation en fonction de l'envergure, aileron 3D de sections NACA65a, conditions nominales : $\alpha = 6.5^\circ$, $\sigma_v = 1.084$

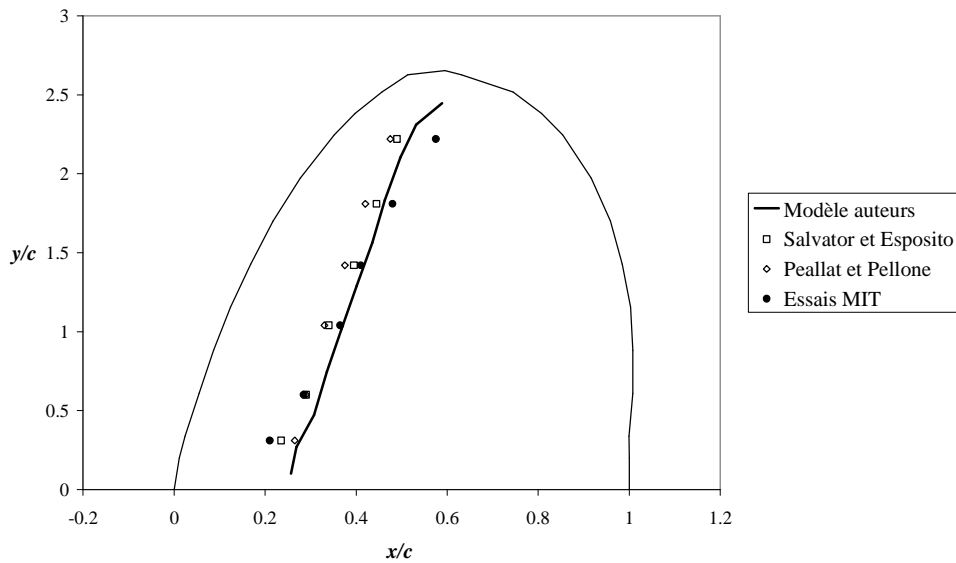


Figure 9. Longueur de la poche de cavitation en fonction de l'envergure, aileron 3D de sections NACA65a, conditions nominales : $\alpha = 6.5^\circ$, $\sigma_v = 1.148$

Ici, le confinement des essais (cf. référence [2]) et la couche limite sur l'aileron ne sont pas pris en compte dans toutes les simulations (modèle auteurs, références [2], [6] et [11]). Malgré les différences de modèle, de critère de détachement et de modèle de fermeture complémentaire, tous les résultats numériques, y compris les nôtres, s'accordent avec les résultats expérimentaux au niveau de la longueur de la poche de cavitation.

VI-CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Un modèle de cavitation à poche a été développé et implémenté dans un code potentiel tridimensionnel instationnaire pour estimer la performance et les effets hydrodynamiques des hélices en condition cavitante. Les résultats numériques sont comparés avec des résultats expérimentaux et aussi à d'autres résultats numériques. Certains points méritent sans aucun doute une investigation plus approfondie : le pic de pression inférieur à la pression de vapeur au début de la poche et la forme du plateau de pression dans les cas tridimensionnels, le critère du point de détachement de la poche, le facteur d'adaptation k , etc. A la suite de la présente communication, qui présente et valide globalement le modèle physique implémenté dans le code potentiel hélice existant, ces aspects seront l'objet de développements futurs.

Par ailleurs, ce modèle de cavitation a été développé en respectant deux principes généraux, qu'il nous semble important de conserver pour la suite :

- D'abord, nous voulons obtenir un modèle le plus proche possible d'une compréhension à la fois physique et simple de la poche de cavitation ; ceci afin de limiter l'introduction de paramètres empiriques.
- Ensuite, chaque niveau de complexité entraîne quasi inmanquablement la présence de paramètres supplémentaires sur lesquels il faut itérer ce qui augmente considérablement les temps de calcul. Or, il s'agit principalement pour nous d'effectuer des simulations

numériques en régime instationnaire, afin de déterminer les fluctuations des efforts globaux sur les pales d'hélice. Le calcul doit donc rester raisonnablement rapide, ce que permet le modèle présent, qui converge en général en trois ou quatre itérations, chacune équivalente en temps calcul à un pas de temps en régime subcavitant.

VII-REFERENCES

- [1] Pellone C., Maître T., Briançon-Marjollet L., (2000), Partially Cavitating Hydrofoils: Experimental and Numerical Analysis., *Journal of Ship Research*, Vol. 44, pp. 40-58.
- [2] Kinnas S.A., Fine N.E., (1993), A numerical nonlinear analysis of the flow around two- and three- dimensional partially cavitating hydrofoils., *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 254, pp. 151-181.
- [3] Lee H., Kinnas S.A., (2004), Application of a Boundary Element Method in the Prediction of Unsteady Blade Sheet and Developed Tip Vortex Cavitation on Marine Propellers., *Journal of Ship Research*, Vol. 48, pp. 15-30.
- [4] Franc J.P., (1986), Etude Physique d'Écoulements Cavitants., *Thèse de Docteur d'Etat ès Sciences*, Université de Grenoble.
- [5] Briançon-Marjolet L., Merle L., (1999), Modélisation de la cavitation., *Revue Scientifique et Technique de la Défense*, Bassin d'Essais des Carènes, N°43, pp. 109-114.
- [6] Salvatore F., Esposito P.G., (2001), An improved boundary element analysis of cavitating three-dimensional hydrofoils., *CAV2001 4th International Symposium on Cavitation*, Pasadena, California, June.
- [7] Brewer W.H., Kinnas S.A., (1997), Experiment and Viscous Flow Analysis on a Partially Cavitating Hydrofoil., *Journal of Ship Research*, Vol. 41, pp. 161-171.
- [8] Farhat M., Guennoun F., Avellan F., (2002), The Leading Edge Cavitation Dynamics., *Proceeding of ASME : Fluids Engineering Division Summer Meeting*, Montreal, Quebec, July.
- [9] Vaz G., Bosschers J., DeCampos J.F., (2003), Two-Dimensional Modeling of Partial Cavitation with BEM, Analysis of Several Models., *CAV2003 5th International Symposium on Cavitation*, Osaka, Japan, November.
- [10] Rowe A., Blottiaux O., (1993), Aspects of Modeling Partially Cavitating Flows., *Journal of Ship Research*, Vol. 37, pp. 34-48.
- [11] Peallat J.M., Pellone C., (1996), Experimental validation of two- and three-dimensional numerical analysis of partially cavitating hydrofoils., *Journal of Ship Research*, Vol. 40, pp. 211-223.
- [12] Achkinadze A.S., Krasilnikov V.I., (2001), A Velocity Based Boundary Element Method with Modified Trailing Edge for Prediction of the Partial Cavities on the Wings and Propeller Blades., *CAV2001 4th International Symposium on Cavitation*, Pasadena, California, June.
- [13] Hoeijmakers H.W.M., (1992), Panel Methods for Aerodynamic Analysis and Design., *AGARD Report 783*, pp. 5.1-5.47.
- [14] Laurens J.M., (1993), Couplage code de calcul fluide parfait, code de calcul couche limite 3D, *Rapport DCN/Bassin d'Essais des Carènes*, Etude 2524 pièce 3.
- [15] Laurens J.M., Phoemspatawee S., (2004), Numerical simulation of sheet cavitation effects on foils and propellers hydrodynamic performances, *NuTTs2004 7th Numerical Towing Tank Symposium*, Hamburg, Sept.

- [16] Leroux J.B., (2003), Etude expérimentale en tunnel hydrodynamique des instabilités de la cavitation par poche sur hydrofoil par la mesure spatio-temporelle du champ de pression pariétal., *Thèse de Doctorat*, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes.
- [17] Leroux J.B., Astolfi J.A., Billard J.Y., (2003), Etude expérimentale des instationnarités et des instabilités des poches de cavitation, *Actes des 9èmes Journées de l'Hydrodynamique*, 10-12 mars, 2003, Poitiers, France.
- [18] Leroux J.B., Coutier-Delgosha O., Astolfi J.A., (2005), A joint experimental and numerical study of mechanisms associated to instability of partial cavitation on two-dimensional hydrofoil, *Physics of Fluids*, Vol. 17, May 2005, pp. 052101 (20 pages, on line issue).