

Simulations instationnaires en régime cavitant. Application aux hélices marines

Sommaire

6.1	Hydrofoil immobile et oscillation du nombre de cavitation	78
6.2	Hydrofoil animé d'un mouvement oscillant	81
6.3	Hélice travaillant dans un champ de pression hydrostatique	83
6.4	Hélice travaillant dans un champ de vitesses uniforme incliné	87
6.5	Origine du bruit numérique	88
6.6	Bilan du chapitre	90

Dans les deux chapitres précédents, le modèle de cavitation à poche a été validé par comparaison à des résultats numériques et expérimentaux obtenus sur des hydrofoils en régime stationnaire. Cependant, en régime instationnaire ainsi que dans le cas d'une hélice, dû au manque de résultats expérimentaux exploitables issus de la littérature, seules des études numériques peuvent être effectuées ici. Par le terme instationnaire, nous entendons les fluctuations de vitesses de rencontre ou de pression dues à des mouvements du corps et/ou de l'écoulement incident.

En règle générale, le fonctionnement d'un safran correspond à un écoulement stationnaire. En effet, les changements d'angle d'un gouvernail sont assez lents pour n'avoir à considérer qu'un écoulement stationnaire. Dans le cas d'un safran, seule la prise en compte de l'action de l'hélice sur le gouvernail est un élément d'instationnarité. En ce qui concerne ce dernier cas, on peut signaler au passage que nous disposons maintenant de tous les éléments de la chaîne de calcul permettant de simuler les fluctuations de poche sur le gouvernail travaillant derrière l'hélice. Il suffit pour cela d'activer le modèle de cette étude en présence de la chaîne de calcul existante présentée par Laurens and Grosjean (2002). En dehors de cette application, les cas d'écoulements instationnaires sur hydrofoils restent particuliers (rudder-roll, marsouinage, ...).

L'application la plus courante de ces simulations instationnaires est le cas des hélices marines. Il y a trois facteurs principaux responsables des fluctuations de pression sur les pales d'hélice. Le premier est l'hydrostatique car la pale en position haute est soumise à une pression plus faible qu'en position basse. Le deuxième est l'angle que fait l'hélice avec l'écoulement amont. Cet angle est la résultante d'une combinaison de l'inclinaison dans le plan vertical de la ligne d'arbre et des lignes de courant remontant sous la voûte du navire, de la divergence dans le plan horizontal pour un navire à deux lignes d'arbre. Le troisième facteur est la carte de sillage due à l'écoulement visqueux sur l'arrière du navire.

Afin de vérifier le comportement du couplage entre le code potentiel tridimensionnel et le modèle de cavitation à poche en régime instationnaire, nous considérons dans ce chapitre une analogie entre la pale et un hydrofoil. Nous pouvons ainsi mettre en parallèle l'effet de l'hydrostatique sur la pale avec une variation de pression pour un hydrofoil qui avance en translation. De la même manière, nous faisons un parallèle entre l'écoulement rencontré par la pale lorsque l'hélice fait un angle par rapport à l'écoulement incident et un hydrofoil avançant en mouvement de pilonnement, ce qui induit en particulier une variation d'incidence.

6.1 Hydrofoil immobile et oscillation du nombre de cavitation

Dans cette première étude numérique instationnaire sur un hydrofoil, la distribution de pression en régime subcavitant reste inchangée. Seul le nombre de cavitation varie. Ce cas d'étude est en effet un cas simplifié d'hélice travaillant dans un champ de pression hydrostatique (présenté à la Section 6.3). Le nombre de cavitation σ_V est forcé à varier entre 0.6823 et 1.1695 par une fonction sinusoïdale; $\sigma_V = 0.9259 + 0.2436 \sin(\omega t)$. La fréquence d'oscillation donnée correspond au nombre de Strouhal Sr de 0.25. L'hydrofoil a une section NACA0010 et une forme rectangulaire avec un allongement Λ de 3. L'angle d'incidence α est de 5 degrés. Le modèle numérique de l'hydrofoil a 80 facettes autour de

sa section et 10 facettes le long de l'envergure. Le pas de temps Δt est constant et égal à $1/16^e$ de période.

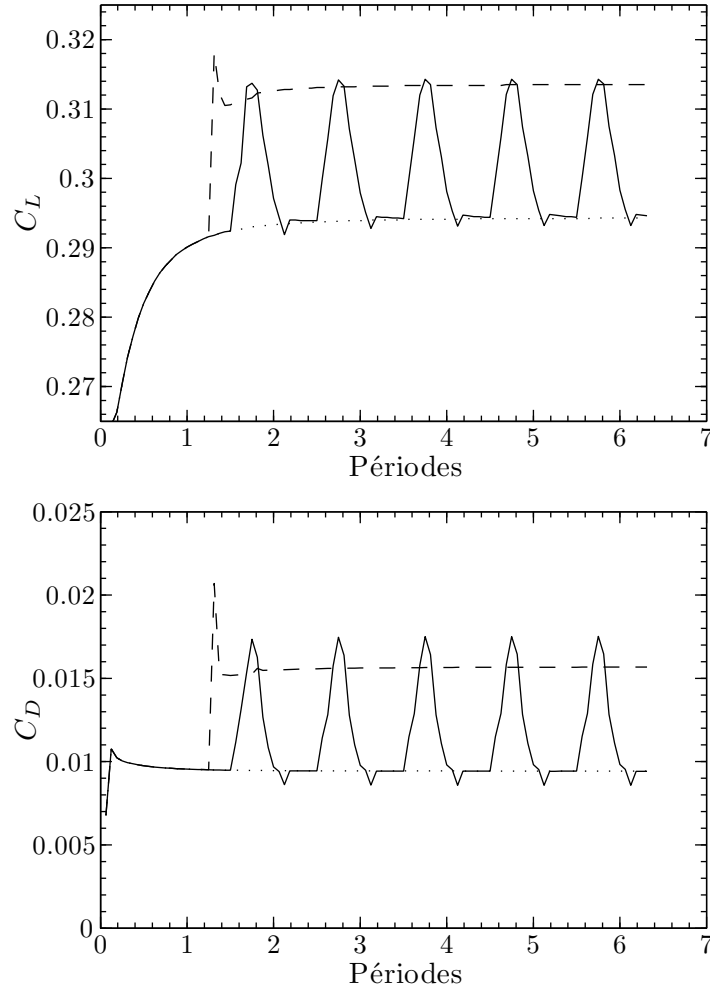


Figure 6.1. Variation des coefficients de portance C_L et traînée C_D en fonction du nombre de cavitation σ_V en régime instationnaire; hydrofoil rectangulaire, profil NACA0010, $\Lambda = 3$, $\alpha = 5^\circ$, $Sr = 0.25$, $\Delta t = T/16$; (—) avec nombre de cavitation oscillant $\sigma_V = 0.9259 + 0.2436 \sin(\omega t)$, (- - -) avec nombre de cavitation fixé $\sigma_V = 0.682$, (· · ·) en régime subcavitant

Les résultats de cette simulation sont présentés sur les Figures 6.1 et 6.2. Les résultats en régime instationnaire sont comparés aux deux autres résultats en régime stationnaire : avec le nombre de cavitation constant $\sigma_V = 0.6823$ et en régime subcavitant. Il faut noter que, dans les deux cas en régimes cavitant stationnaire et cavitant instationnaire, le module de cavitation est activé après convergence du calcul subcavitant. Comme on pouvait s'y attendre, les coefficients de portance et de traînée varient en fonction du nombre de cavitation. Comme déjà remarqué dans la validation du chapitre précédent, la cavitation à poche partielle a plus d'effet sur les coefficients de traînée que sur les coefficients de portance. Dans ce cas-ci, le coefficient de portance augmente seulement de 6% environ tandis que le coefficient de traînée augmente de 50% environ.

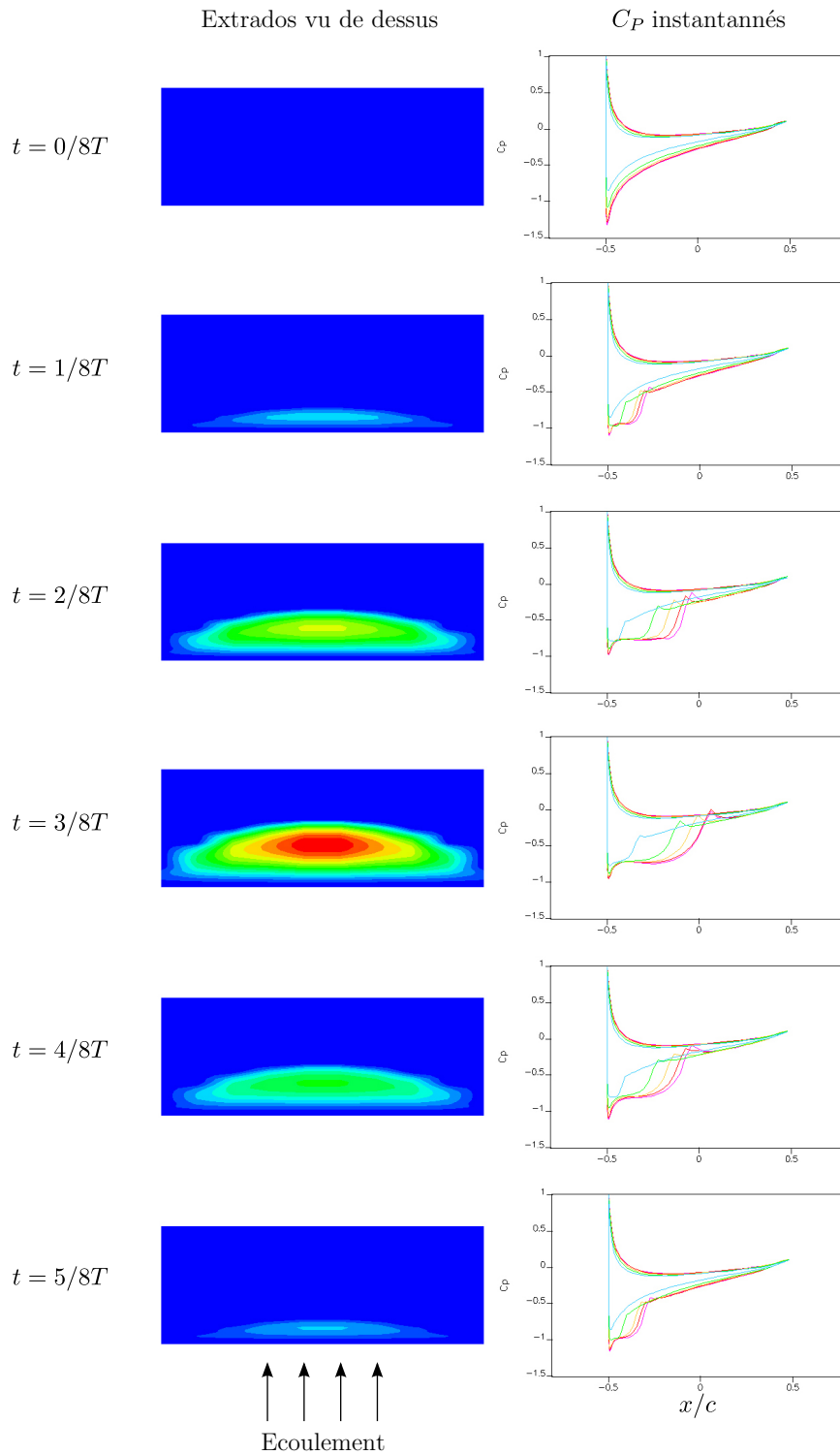
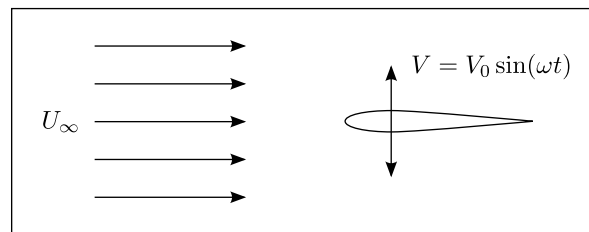


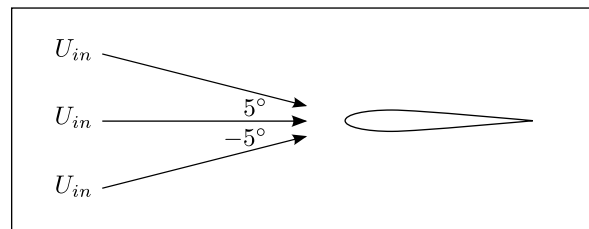
Figure 6.2. Variations de la forme de poche (à gauche) et des coefficients de pression de chaque bande de maillage (à droite) en fonction du nombre de cavitation σ_V en régime instationnaire pendant une période T ; hydrofoil rectangulaire, profil NACA0010, $\Lambda = 3$, $\alpha = 5^\circ$, σ_V sinusoïdal, $Sr = 0.25$, $\Delta t = T/16$; positions des relevés de pression exprimées en % de l'envergure totale : 5, 15, 25, 35 et 45

6.2 Hydrofoil animé d'un mouvement oscillant

Ici, on étudie le cas où la distribution de pression en régime subcavitant varie tandis que le nombre de cavitation reste constant. Ce cas peut être considéré comme un cas simplifié d'une hélice travaillant dans un champ d'écoulement uniforme incliné présenté dans la Section 6.4. Un hydrofoil se déplace verticalement dans un écoulement uniforme, comme défini à la Figure 6.3(a). Le mouvement de pilonnement crée la variation de l'angle d'incidence et aussi la variation de la grandeur de vitesse d'incidence. La vitesse latérale sinusoïdale est donnée de telle manière que l'angle d'incidence varie entre -5 degrés et 5 degrés comme présenté à la Figure 6.3(b). Le profil de l'hydrofoil est également un NACA0010. Le modèle numérique a 80 facettes autour de la section et 10 facettes le long de l'envergure comme dans le cas précédent. Cependant, l'allongement Λ est dans ce cas-ci de 6 au lieu de 3 afin de réduire l'effet d'écoulement tridimensionnel pour mieux capturer l'effet de cavitation. Le nombre de cavitation est constant et égal à 0.65. Le nombre de Strouhal St est également 0.25 comme dans le cas précédent.



(a) Configuration générale



(b) Variation de la vitesse incidente vue par l'hydrofoil

Figure 6.3. Variation de la vitesse incidente pour prise en compte du mouvement de pilonnement de l'hydrofoil

La Figure 6.4 montre les coefficients de portance et de traînée de l'hydrofoil en fonction de l'angle d'incidence. En régime quasi-statique, c'est-à-dire lorsque la fréquence d'oscillation est très basse et que l'inertie du fluide est négligée, le coefficient de portance varie linéairement avec l'angle d'incidence. En régime de pilonnement, le coefficient de portance en régime subcavitant présente une courbe elliptique due à l'inertie du fluide. Pour le coefficient de traînée, on obtient une courbe parabolique classique en régime quasi-statique. En mouvement de pilonnement, l'inertie du fluide transforme la courbe parabolique en une courbe en forme de papillon. La cavitation à poche partielle n'a pas beaucoup d'effet sur l'évolution du coefficient de portance avec l'incidence. Par contre, l'effet de la cavitation à poche partielle est remarquable sur la courbe du coefficient de traînée. Les résultats en ré-

gime cavitant présentés démontrent également que le modèle de cavitation peut être utilisé pour des simulations en régime instationnaire.

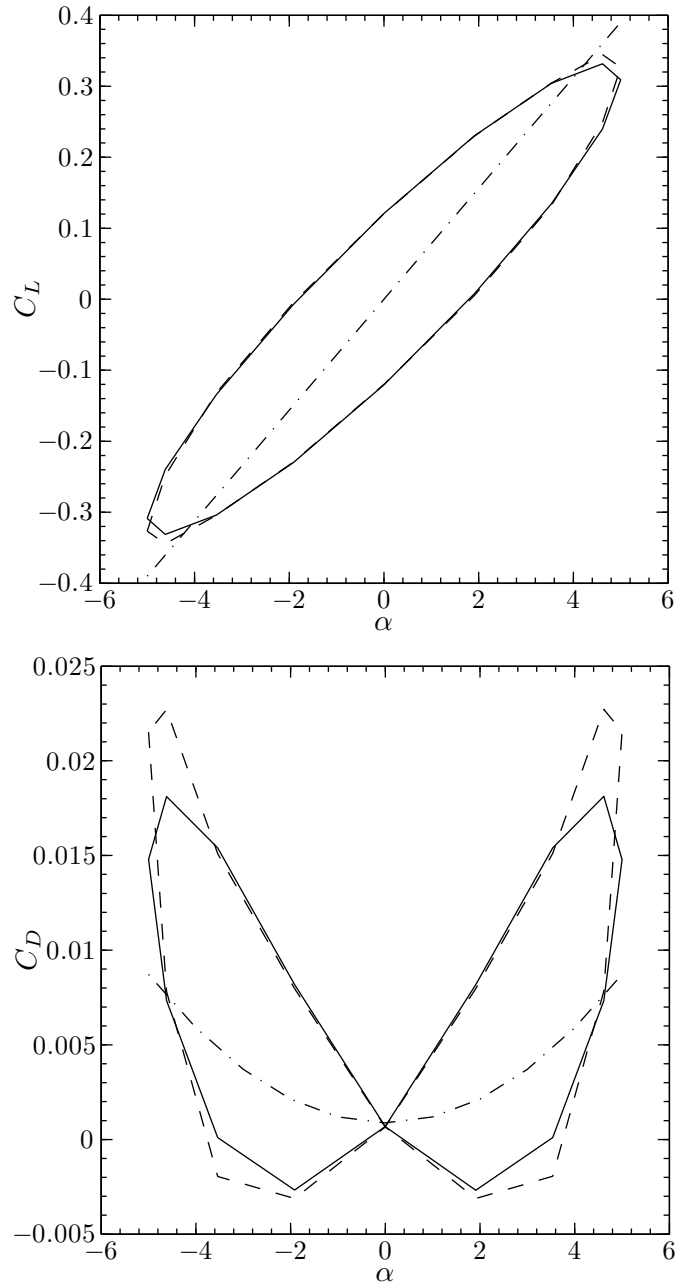


Figure 6.4. Coefficients de portance C_L et de traînée C_D de l'hydrofoil avec le mouvement de pïonnement ; hydrofoil rectangulaire, profil NACA0010, $\Lambda = 6$, α sinusoïdal, $Sr = 0.25$, $\sigma_V = 0.65$; (—) en régime instationnaire subcavitant, (- -) en régime instationnaire cavitant $\sigma_V = 0.65$, (- · -) en régime quasi-statique subcavitant

6.3 Hélice travaillant dans un champ de pression hydrostatique

Avant d'étudier l'effet de la cavitation à poche sur la performance de l'hélice en régime instationnaire, il est légitime d'étudier d'abord son effet en régime stationnaire. Une hélice marine cavitante est simulée pour plusieurs nombres de cavitation. Il faut noter que les nombres de cavitation utilisés ici pour des simulations de l'hélice en régime soit stationnaire soit instationnaire sont définis par rapport à la vitesse d'avance V_a de l'hélice,

$$\sigma_V = (P_\infty - P_V) / \left(\frac{1}{2} \rho V_a^2 \right) \quad (6.1)$$

L'effet de la cavitation à poche partielle sur le coefficient de poussée K_T , sur le coefficient de couple K_Q et sur le rendement η de l'hélice en régime stationnaire est présenté à la Figure 6.5. Comme dans les cas de l'hydrofoil, avec la présence de la cavitation à poche partielle, les coefficients de poussée et de couple augmentent lorsque le nombre de cavitation diminue. Dans ce cas particulier, la poussée et le couple augmentent seulement de quelques pourcents même lorsque la longueur de la poche de cavitation atteint 3/4 de la longueur de corde dans certaines sections en tête des pales d'hélice comme illustré à la Figure 6.6. De plus, le rendement η de l'hélice ne diminue quasiment pas. Ces petits effets sont attendus puisque les efforts hydrodynamiques sur les hélices ont pour origine la portance de chaque section et la charge n'est pas concentrée dans la zone en tête des pales.

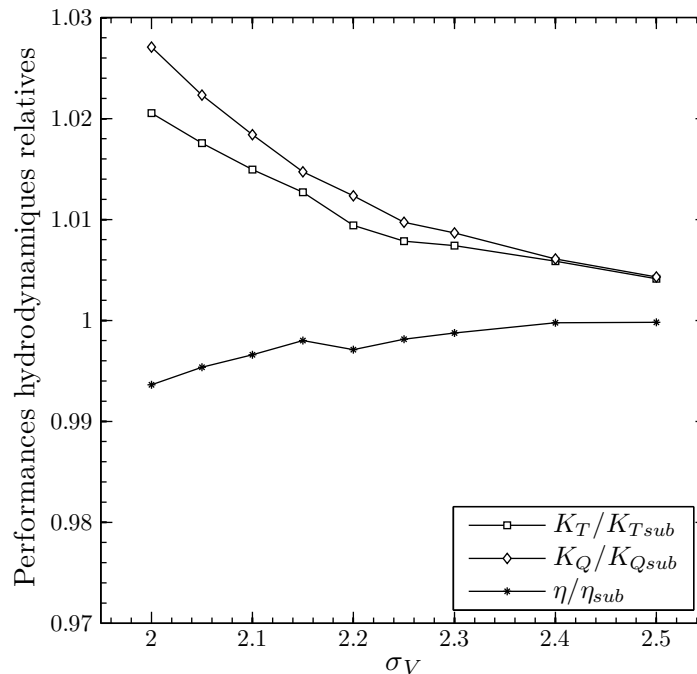


Figure 6.5. Effet de cavitation à poche partielle sur le coefficient de poussée K_T , le coefficient de couple K_Q et le rendement η d'une hélice marine ; l'indice *sub* représente les résultats en régime subcavitant

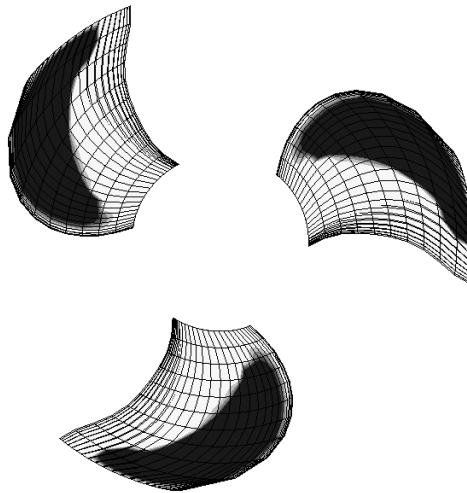


Figure 6.6. Forme de la poche de cavitation à l'extrados de chaque pale de l'hélice marine en régime stationnaire cavitant, $\sigma_V=2.0$

Maintenant on étudie l'effet de la cavitation à poche partielle sur la performance de l'hélice en régime instationnaire. Une simulation de l'hélice cavitant dans un champ de pression hydrostatique est effectuée. La pression hydrostatatique fait varier le nombre de cavitation avec la profondeur. La configuration qui permet la variation du nombre de cavitation est présentée à la Figure 6.7.

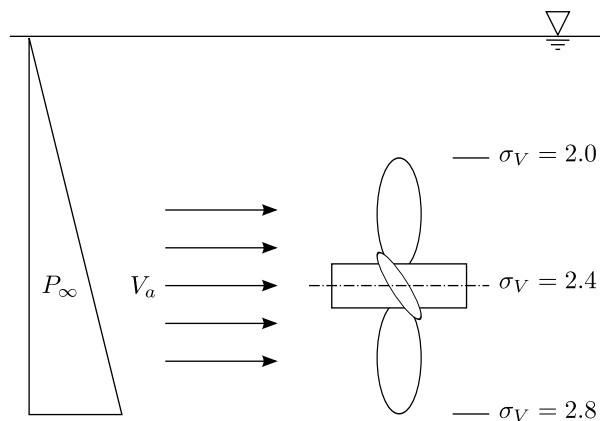


Figure 6.7. Configuration générale de la simulation d'une hélice travaillant dans un champ de pression hydrostatique

Les poches de cavitation sur les pales de l'hélice sont présentées à la Figure 6.8. La poche apparaît et grandit lorsque la pale de l'hélice s'approche de la surface libre. De plus, comme prévu, la poche diminue et puis disparaît avec l'augmentation de la pression lorsque la pale de l'hélice s'éloigne de la surface libre.

L'apparition et la disparition de la poche font varier les coefficients de poussée et de couple de chaque pale de l'hélice. Ces variations sont présentées sur les Figures 6.9 et 6.10. Il y a un bruit d'origine numérique dans les résultats des calculs qui est dû aux sauts de

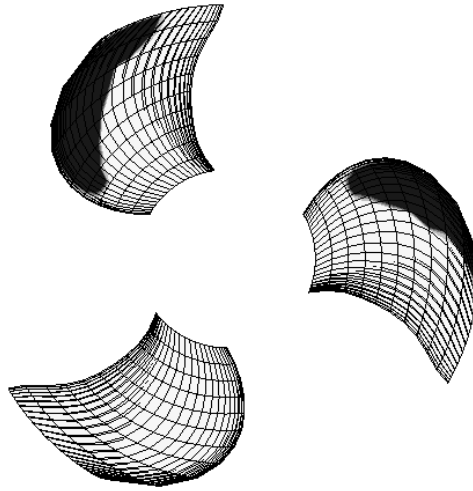


Figure 6.8. Forme des poches de cavitation à l'extrados des pales de l'hélice marine sous l'effet de la pression hydrostatique

la fermeture des poches à l'extrados des pales de l'hélice entre deux mailles consécutives selon la corde, ou selon l'envergure. Ces sauts proviennent de la faible densité de mailles dans la zone de fermeture des poches. Une investigation détaillée de ce bruit numérique est présentée Section 6.5. Cependant, en moyenne, l'évolution temporelle des résultats est satisfaisante. Un exemple de la distribution du coefficient de pression sur la section $r/R = 0.7$ (R est le rayon de l'hélice) lorsque la pale est en position haute (Figure 6.8) est présenté à la Figure 6.11. Il montre bien que, malgré le bruit numérique, la distribution du coefficient de pression en régime cavitant respecte bien la condition de pression de vapeur.

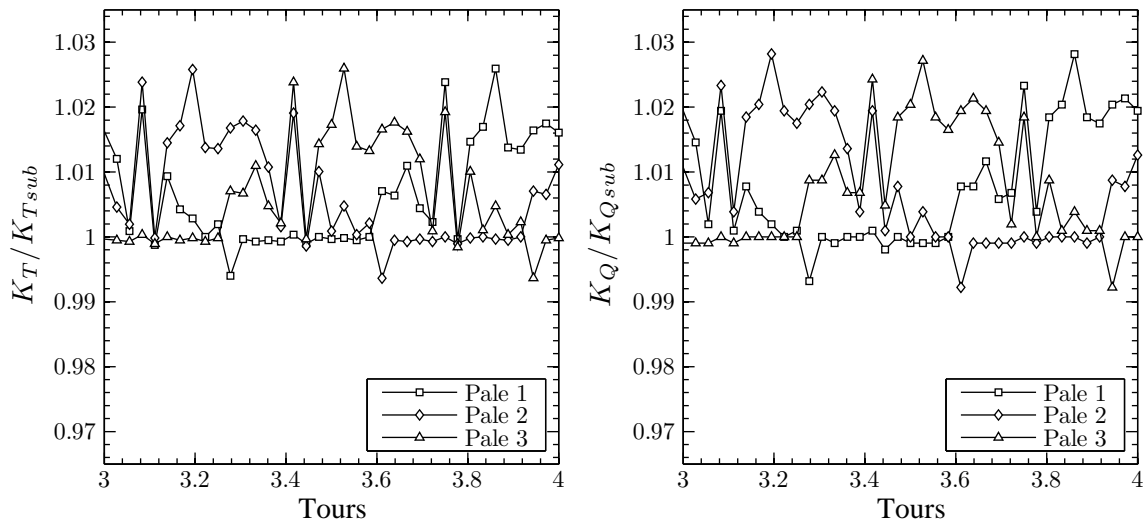


Figure 6.9. Variations sur un tour des coefficients de poussée et de couple de chaque pale de l'hélice travaillant dans un champ de pression hydrostatique ; l'indice *sub* représente les résultats en régime subcavitant

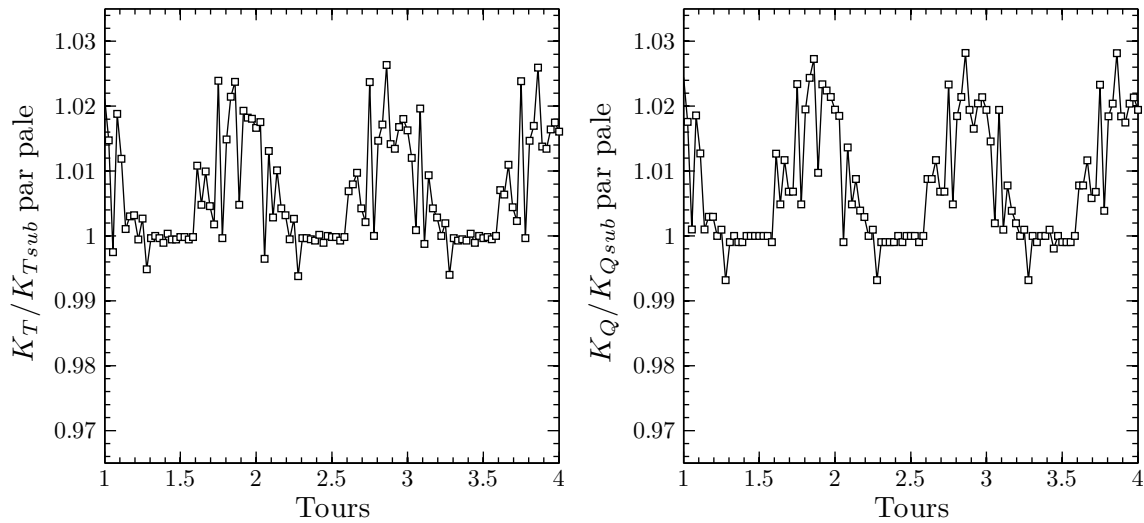


Figure 6.10. Variations sur un tour des coefficients de poussée et de couple d'une pale de l'hélice travaillant dans un champ de pression hydrostatique; l'indice *sub* représente les résultats en régime subcavitant

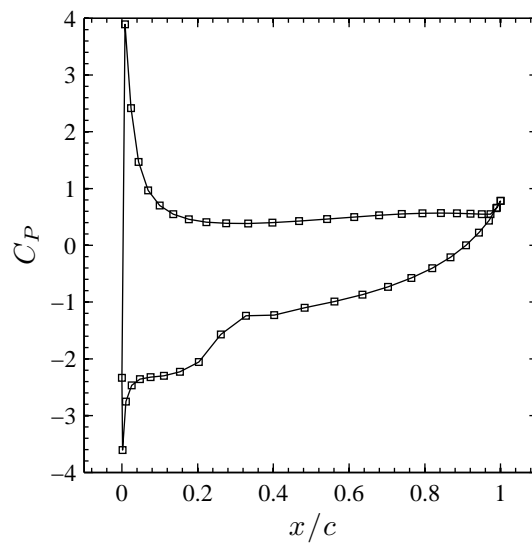


Figure 6.11. Distribution du coefficient de pression sur la section $r/R = 0.7$ de la pale en position haute de l'hélice travaillant dans un champ de pression hydrostatique

Comme en régime stationnaire, la cavitation à poche partielle a un faible effet sur les efforts hydrodynamiques. On a également regardé l'effet de la poche de cavitation partielle sur le moment de flexion de la ligne d'arbre. Il apparaît que, comme sur les coefficients de poussée et de couple, la variation du moment de flexion est très petite. Néanmoins, la variation de ces efforts hydrodynamiques peut se combiner avec des efforts hydrodynamiques instationnaires ayant d'autres origines (mouvements de plate-forme dus aux manoeuvres et/ou à l'état de mer) et entraîner la vibration du bateau ainsi que la fatigue de la ligne d'arbre, des pales d'hélice et du gouvernail.

6.4 Hélice travaillant dans un champ de vitesses uniforme incliné

La dernière simulation instationnaire présentée ici est celle d'une hélice marine travaillant dans un champ d'écoulement uniforme incliné. La configuration est présentée à la Figure 6.12. L'angle entre la vitesse de l'écoulement uniforme incliné et l'arbre de l'hélice est de 5 degrés.

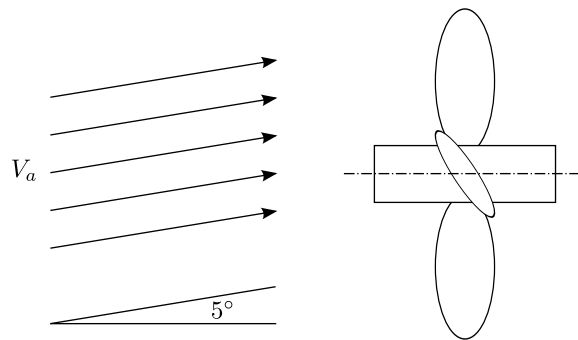


Figure 6.12. Configuration générale de la simulation d'une hélice travaillant dans un champ d'écoulement uniforme incliné

Comme présenté à la Figure 6.13, la poche se développe du côté tribord de l'hélice. Ceci est dû à l'angle d'incidence et à la valeur de la vitesse d'entrée dans chaque section des pales de l'hélice. Ce résultat confirme les prévisions puisque la grandeur de la vitesse d'entrée et l'angle d'incidence sont supérieurs sur le côté tribord.

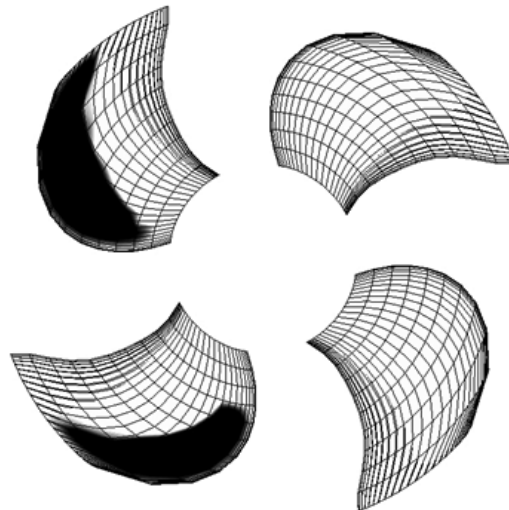


Figure 6.13. Forme des poches de cavitation à l'extrados des pales de l'hélice travaillant dans un champ d'écoulement uniforme incliné

Comme dans les cas précédents, de petits effets sont observés sur la poussée et sur le couple. La Figure 6.14 montre la variation du coefficient de poussée pendant une révolution en régimes subcavitant et cavitant. Il est évident que la cavitation se produit lorsque la pale de l'hélice est très chargée. Dans ce cas particulier, l'effet de la cavitation à poche partielle augmente les efforts hydrodynamiques (poussée, couple et moment de flexion) par rapport à leurs valeurs en régime instationnaire subcavitant.

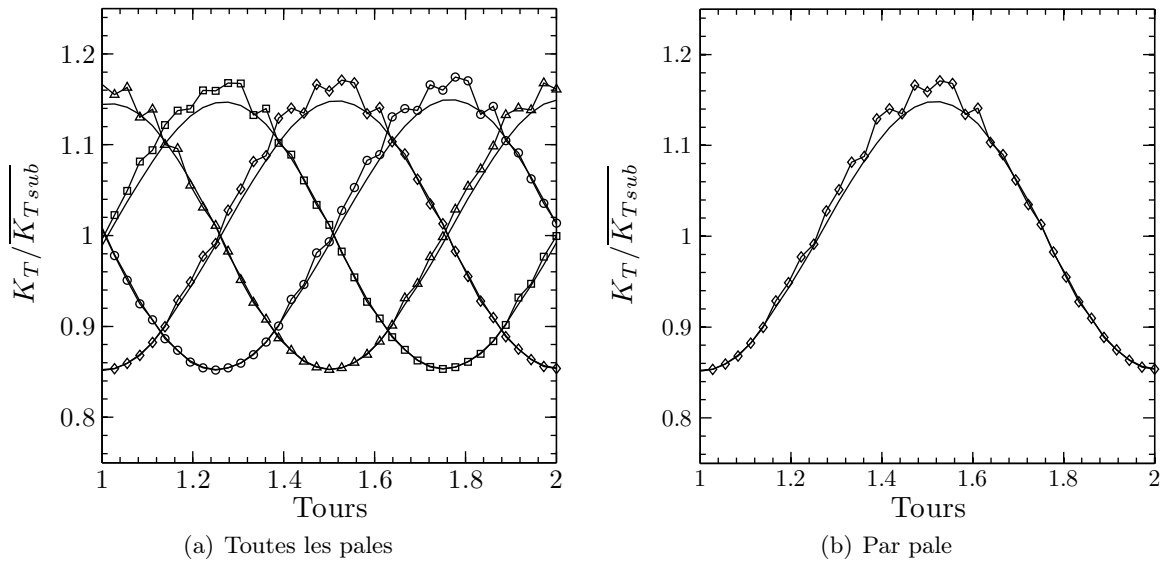


Figure 6.14. Coefficient de poussée d'une hélice travaillant dans un champ de vitesse uniforme incliné; (—) en régime subcavitant; $\overline{K_{T_{sub}}}$ représente la moyenne temporelle du coefficient de poussée d'une pale de l'hélice en régime subcavitant

On remarque Figure 6.14 également le même type de bruit numérique que celui observé au point précédent.

6.5 Origine du bruit numérique

Selon les Figures 6.9 et 6.10 à la Section 6.3 et la Figure 6.14 à la Section 6.4, les tendances moyennes des signaux temporels d'efforts globaux sont correctes, mais entachées d'un bruit relativement important. L'objet de cette section est de montrer que l'origine de ces bruits est purement numérique.

En régimes transitoires cavitant, il est évident que la résolution spatiale du maillage d'un hydrofoil ou d'une pale d'hélice doit être choisie de façon cohérente avec le pas de temps. En effet, la discrétisation spatiale doit être suffisamment fine pour pouvoir résoudre l'évolution temporelle de la fermeture de poche entre deux pas de temps consécutifs.

Très schématiquement et de façon mesurée, à maillage fixé une augmentation progressive du pas de temps conduira à partir d'une certaine valeur à un résultat lisse temporellement mais non nécessairement convergé. De façon analogue pour un pas de temps fixé, un affinage progressif du maillage lissera également les résultats.

Comme mentionné succinctement à la Section 6.3 et 6.4, ce qui précède explique l'origine du bruit détecté Figures 6.9, 6.10 et 6.14 : dans ces simulations, la discrétisation spatiale de l'hélice n'est pas assez fine pour résoudre l'évolution temporelle des poches compte tenu de la discrétisation temporelle, et d'un pas de temps à l'autre la fermeture de poche peut osciller entre deux facettes. Compte-tenu de la différence des niveaux de pression entre facette cavitante où non, et de la taille des facettes relativement importante, ces oscillations de la fermeture se ressentent de façon significative en termes d'efforts globaux après intégration des contraintes de pressions.

Pour la démonstration, le cas de l'hydrofoil en incidence, en translation dans un champ de pression amont variable, est repris (Section 6.1, Figures 6.1 et 6.2). Le maillage de la correspondant aux Figures 6.1 et 6.2 comporte 80 facettes en corde (extrados + intrados) \times 10 facettes en envergure, et le pas de temps vaut $1/16^e$ de période. Avec ces paramètres le résultat est lisse et correct.

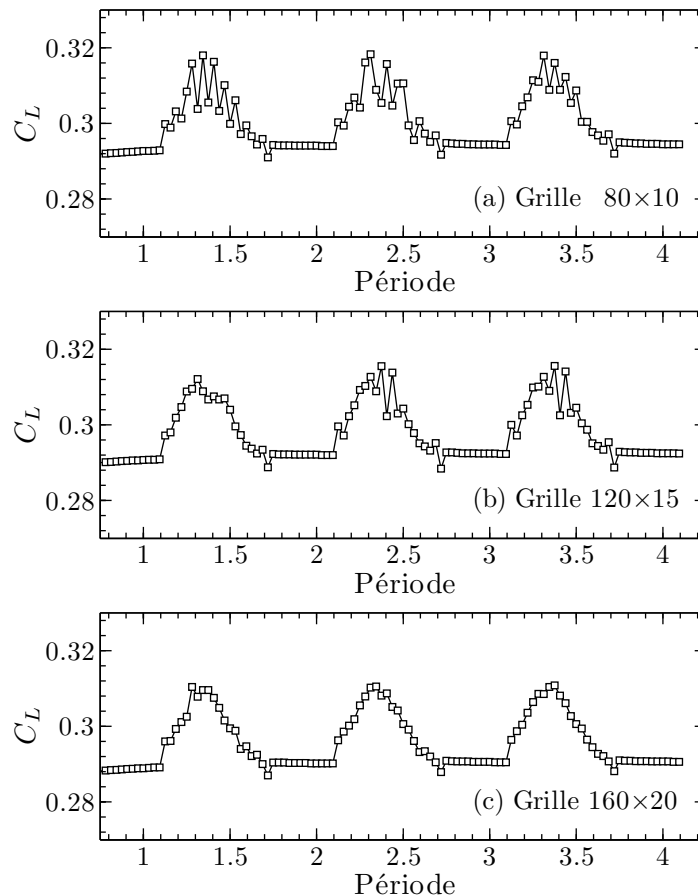


Figure 6.15. Variation des coefficients de portance C_L en régime instationnaire en fonction du maillage ((a) grille 80×10 , (b) grille 120×15 et (c) grille 160×20); hydrofoil rectangulaire, profil NACA0010, $\Lambda = 3$, $\alpha = 5^\circ$, $Sr = 0.25$, $\Delta t = T/32$, nombre de cavitation oscillant $\sigma_V = 0.9259 + 0.2436 \sin(\omega t)$

Ce même cas de calcul a été repris en divisant le pas de temps par 2, soit $1/32^e$ de période, et pour plusieurs discrétisations spatiales de plus en plus fines : 80×10 , 120×15 et 160×20 . Le cas étant 3D, les discrétisations spatiales ont été choisies de façon à conserver l'allongement des facettes, et ont donc été affinées de façon cohérente en corde et en envergure. Les résultats sont présentés à la Figure 6.15 pour les trois premières périodes.

Pour la grille 80×10 (Figure 6.15(a)) avec le pas de temps $1/32^e$ de période, la discrétisation spatiale est insuffisante pour résoudre l'évolution de la poche entre deux pas de temps consécutifs, et la fermeture de poche oscille entre deux facettes sur une ou plusieurs bandes de maillage. Par conséquent, le bruit numérique apparaît sur le signal de coefficient de portance.

Pour la grille 120×15 (Figure 6.15(b)) avec le pas de temps $1/32^e$ de période, la discrétisation spatiale est toujours insuffisante pour résoudre correctement l'évolution de la poche entre deux pas de temps consécutifs, et la fermeture de poche oscille entre deux facettes sur une ou plusieurs bandes de maillage, mais les facettes sont plus petites. Par conséquent, le bruit numérique est toujours présent mais de plus faible amplitude que dans le cas précédent.

Pour la grille 160×20 (Figure 6.15(c)) avec le pas de temps $1/32^e$ de période, la discrétisation spatiale est suffisante pour résoudre l'évolution de la poche entre deux pas de temps consécutifs, et si la fermeture de poche oscille entre deux facettes sur une ou plusieurs bandes de maillage, l'impact devient négligeable après intégration. Par conséquent, le bruit numérique disparaît sur le signal de coefficient de portance.

On note enfin que les résultats obtenus dans ce dernier cas sont conformes à ceux obtenus avec la discrétisation et le pas de temps initiaux (Figure 6.1), ce qui confirme la validité des résultats en régime transitoire.

6.6 Bilan du chapitre

L'objectif des études numériques de ce chapitre est d'étudier la performance du modèle de cavitation à poche pour les simulations des hélices marines en régime cavitant instationnaire. Deux comportements classiques responsables des fluctuations de pression sur les pales sont plus particulièrement reportés. Le premier comportement est la variation du nombre de cavitation qui correspond à l'effet hydrostatique. Par analogie, on compare la pale d'hélice avec le cas de l'hydrofoil en translation horizontale dans un milieu où le nombre de cavitation fluctue de manière régulière. Le deuxième comportement correspond à l'inclinaison de l'écoulement sur l'hélice qui par analogie est aussi représenté par un hydrofoil animé cette fois d'un mouvement de pilonnement. Les résultats numériques montrent que le modèle semble tout à fait adapté pour simuler les écoulements instationnaires autour d'une hélice marine en présence de cavitation à poche. Cependant, ces simulations instationnaires en régime cavitant nécessitent des maillages suffisamment fins en fermeture de poche pour pouvoir résoudre convenablement son évolution entre deux pas de temps consécutifs. Les résultats numériques montrent également que la cavitation à poche partielle affecte très peu dans les cas présentés les performances hydrodynamiques de l'hélice.

Conclusion

Un modèle de cavitation à poche partielle a été développé et implémenté dans un code potentiel bidimensionnel stationnaire puis dans un code potentiel tridimensionnel instationnaire. L'originalité de la méthode est d'utiliser la technique des vitesses de transpiration pour simuler la présence de la poche à la surface de laquelle la pression est égale à la pression de vapeur saturante et sur laquelle on applique une condition de glissement. Le modèle est basé sur la seule hypothèse que le fluide change de phase lorsque la pression à la surface de l'obstacle en régime subcavitant passe en dessous de la pression de vapeur saturante. Le taux d'épaississement de la poche est une fonction linéaire de la différence entre ces deux pressions. Le modèle s'appuie donc sur l'hypothèse que la poche est entièrement déterminée à partir de la distribution de pression en régime subcavitant. On impose très logiquement que lorsque l'intégrale des vitesses de transpiration redevient nulle, la poche est fermée. Cette méthode permet une fermeture naturelle de la poche sans avoir à imposer un quelconque artifice dans le modèle ou dans la méthode de calcul. Le modèle couplé aux codes potentiels permet, grâce à cette technique, une simulation raisonnablement rapide de l'écoulement cavitant sur un hydrofoil ou une hélice marine en régime d'écoulement stationnaire ou instationnaire.

Le modèle a été validé par comparaison avec des essais en régime stationnaire sur un profil bidimensionnel. On retrouve numériquement les longueurs de poche observées lors des essais ainsi que les pressions mesurées. Pour retrouver ces résultats, il a fallu respecter le plus exactement possible les conditions d'essais. Ainsi, le nombre de Reynolds est respecté dans le calcul de couche limite dont la présence est également simulée avec la technique des vitesses de transpiration. Il a fallu également tenir compte du confinement dans la veine d'essais.

Des résultats de calculs et d'essais disponibles dans la littérature ont été utilisés pour la validation du modèle tridimensionnel. Seules les longueurs de poche sont disponibles et cette étape de la validation du modèle tridimensionnel n'est que qualitative. Comme l'un des objectifs principaux du développement est d'obtenir un outil de calcul permettant d'étudier les effets de la cavitation à poche partielle sur les efforts hydrodynamiques, nous ne pouvions nous satisfaire de ces résultats. Une campagne d'essais en collaboration avec le BSHC a alors été décidée. Cette campagne d'essais a été organisée autour de sa finalité qui consistait à obtenir des résultats exploitables pour valider le modèle de cavitation à poche partielle de manière quantitative. La collaboration avec le BSHC s'est naturellement effectuée en trois étapes : préparation des essais, déroulement des essais et dépouillement. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre les mesures expérimentales et les résultats numériques, ce qui permet de conclure de façon satisfaisante quant à la validation du modèle.

Finalement, des résultats de simulations instationnaires sur des hélices en régime cavitant sont présentés. Afin de vérifier le bon comportement de l'outil numérique, un parallèle est apporté entre les fluctuations de conditions limites vues par la pale d'hélice et un hydrofoil. Ainsi, l'effet de l'hydrostatique sur les pales de l'hélice marine correspond à l'effet d'une fluctuation du nombre de cavitation pour un hydrofoil dans un écoulement stationnaire. Pour l'analogie avec l'écoulement autour d'une pale d'une hélice inclinée par

rapport à la vitesse d'avance, un hydrofoil animé d'un mouvement de pilonnement dans un écoulement stationnaire est considéré.

L'outil numérique peut ainsi servir dans de multiples applications. Essentiellement destiné aux hélices il peut être aussi utilisé pour simuler l'écoulement cavitant sur un gouvernail travaillant derrière l'hélice ou encore sur la jambe d'un pod thruster (Deniset et al., 2006). Pour cela, on reprendrait la chaîne de calcul développée dans des études antérieures à celle-ci.

On peut penser à plusieurs points d'amélioration du modèle de cavitation lui-même :

- le pic de pression inférieur à la pression de vapeur,
- le critère de détachement de la poche,
- l'interaction avec la couche limite.

Même si un pic de dépression marqué au début de la poche est parfois reporté dans des rapports d'étude expérimentale, il est lié en partie au critère de détachement de la poche. Cependant, on sait qu'en modélisation potentielle subcavitante, le pic de dépression est exagéré par rapport à celui de l'écoulement réel. Ce n'est donc pas forcément le modèle de cavitation qui est responsable du pic mais cela est sûrement en partie imputable au modèle potentiel. Affecter le critère de détachement de la poche dans le seul but de se débarrasser du pic n'est pas conseillé car non seulement il ajoute une complexité artificielle au modèle mais on risque par cet artifice de l'invalider. La meilleure façon de vérifier si le modèle est en cause serait de le coupler avec un solveur Navier-Stokes. L'idée serait alors d'injecter de la vapeur perpendiculaire à la surface aux lieux et avec les intensités calculées par le modèle. La vapeur serait de plus convectée en aval ce qui peut ouvrir de nombreuses possibilités y compris celle de modéliser les fluctuations dues à la physique de la poche. Quant à l'interaction avec la couche limite, il faut également rester prudent. Il n'existe aucune mesure permettant de contrôler si la couche limite continue à s'épaissir sous la poche ou même si elle disparaît. La seule chose sûre est qu'en sortie de poche, elle est turbulente, ce qui est imposé dans nos simulations. En absence d'information fiable sur ce point, le mieux est encore d'obéir au principe d'Ockham : *Pluralitas non est ponenda sine necessitate*.

Finalement, le modèle se limite à des poches de cavitation partielles. La simulation de la supercavitation n'intéresse a priori pas les applications industrielles car on sait qu'il y a effondrement des performances hydrodynamiques et il s'agit simplement de l'éviter. En cela, le modèle répond à cette demande car il permet de déterminer pour quel chargement elle apparaît. Les effets de la cavitation à poche partielle obtenus dans les calculs et les essais rapportés dans ce document sur les efforts hydrodynamiques sont somme toute assez faibles. L'estimation de leurs fluctuations appliquées à l'arbre d'hélice donne des résultats négligeables qui n'ont même pas lieu d'être rapportés ici. Par contre, l'estimation des effets de la supercavitation sur les efforts appliqués à la ligne d'arbre peut avoir un intérêt industriel surtout si les simulations sont suivies d'essais et de calculs de tenue en fatigue. Cette estimation pourrait alors justifier une extension du modèle à un modèle de supercavitation. La piste la plus judicieuse est d'imposer la pression de vapeur saturante au bord de fuite. La poche s'étend sur tout l'extrados à partir du point de détachement et la condition de Joukowski devrait suffire à obtenir la distribution de pression à l'intrados.

Références

- Achkinadze, A. and Krasilnikov, V. (2001). A velocity based boundary element method with modified trailing edge for prediction of the partial cavities on the wings and propeller blades. In *Proceedings of CAV2001 the Forth International Symposium on Cavitation*, Pasadena, California, USA.
- Ait-Bouziad, Y. (2005). *Physical modelling of leading edge cavitation : computational methodologies and application to hydraulic machinery*. PhD thesis, École polytechnique fédérale de Lausanne. Thèse de Docteur ès Sciences.
- Ait-Bouziad, Y., Guennoun, F., Farhat, M., and Avellan, F. (2003). Numerical simulation of leading edge cavitation. In *Proceedings of ASME - the Forth Fluids Engineering Division Summer Meeting*, Honolulu, Hawaii, USA.
- Balhan, J. (1951). Metingen aan enige bij sloopsschroeven gebruikelijke profielen in vlakke stroming met en zonder cavitatie. Uitgave Publicatie No.99, Nederlandsch Scheepsbouwkundig Proefstation te Wageningen.
- Brennen, C. (1995). *Cavitation and bubble dynamics*. Oxford University Press.
- Brewer, W. and Kinnas, S. (1997). Experiment and viscous flow analysis on a partially cavitating hydrofoil. *Journal of Ship Research*, 41 :161–171.
- Briançon-Marjollet, L. (1987). *Couches-Limites, Germes et Cavités en Interaction : Étude Physique*. PhD thesis, Université Scientifique, Technologique et Médicale de Grenoble.
- Briançon-Marjollet, L. and Merle, L. (1999). Modélisation de la cavitation. *Revue Scientifique et Technique de la Défense*, 43 :109–114. Bassin d’Essais des Carènes.
- Califano, A. and Steen, S. (2009). Analysis of different propeller ventilation mechanisms by means of RANS simulations. In *Proceedings of SMP’09 the First International Symposium on Marine Propulsors*, pages 334–341, Trondheim, Norway.
- Callenaère, M. (1999). *Étude physique des poches de cavitation partielle en écoulement interne*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Carlton, J. (2007). *Marine propellers and propulsion*. Elsevier, second edition.
- Chahine, G. and Hsiao, C.-T. (2001). Modeling 3d unsteady sheet cavities using a coupled UnRANS-BEM code. In *Twenty-Third Symposium on Naval Hydrodynamics*.
- Cousteix, J. (1988). *Couche limite laminaire*. Cépadues-Editions, Paris.
- Cousteix, J. (1989). *Turbulence et couche limite*. Cépadues-Editions, Paris.
- Coutier-Delgosha, O., Fortes-Patella, R., and Reboud, J. (2003a). Evaluation of turbulence model influence on the numerical simulation of unsteady cavitation. *Journal of Fluids Engineering*, 125 :38–45.

- Coutier-Delgosha, O., Reboud, J., and Delannoy, Y. (2003b). Numerical simulation of the unsteady behavior of cavitating flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 42 :527–548.
- Demailly, J. (1991). *Analyse numérique et équations différentielles*. Presse Universitaire de Grenoble.
- Deniset, F., Laurens, J., and Romon, S. (2006). Computation of the fluctuating pressure distribution on the pod strut. In *Proceedings of T-POD2006 the First International Conference on Technological Advances in Podded Propulsion*, Brest, France.
- Dimitrov, V. (2008). Cavitating hydrofoil tests. Technical Report Doc. KP082010, Rev. 0, Bulgarian Ship Hydrodynamics Centre, Varna, Bulgaria.
- Drela, M. (2001). *XFOIL 6.9 user guide*. MIT Aero & Astro, Harold Youngren, Aircraft, Inc.
- Dupont, P. and Avellan, F. (1991). Numerical computation of a leading edge cavity. In *Proceedings of the Cavitation91 Symposium, 1st ASME-JSME Fluid Engineering conference*, volume 116, pages 47–54, Portland, Oregon, USA.
- Farhat, M. and Avellan, F. (2001). On the detachment of a leading edge cavitation. In *Proceedings of CAV2001 the Forth International Symposium on Cavitation*, Pasadena, California, USA.
- Farhat, M., Guennoun, F., and Avellan, F. (2002). The leading edge cavitation dynamics. In *Proceedings of ASME - Fluids Engineering Division Summer Meeting*, Montreal, Quebec, Canada.
- Fine, N. and Kinnas, S. (1993). A boundary element method for the analysis of the flow around 3-d cavitating hydrofoils. *Journal of Ship Research*, 37 :213–224.
- Franc, J. (1986). *Étude physique d'écoulements cavitants*. PhD thesis, Université de Grenoble. Thèse de Docteur d'Etat ès Sciences.
- Franc, J.-P., Avellan, F., Belahadji, B., Billard, J.-Y., Briançon-Marjolet, L., Fréchou, D., H.Fruman, D., Karimi, A., Kueny, J.-L., and Michel, J.-M. (1995). *La cavitation, mécanismes physiques et aspects industriels*. Presses Universitaires de Grenoble.
- Gaggero, S. and Brizzolara, S. (2008). A potential panel method for the prediction of midchord face and back cavitation. In *HIPER'08 6th International Conference on High-Performance Marine Vehicles*, Naples, Italy.
- Greitsch, L., Eljardt, G., and Krueger, S. (2009). Operating conditions aligned ship design and evaluation. In *Proceedings of SMP'09 the First International Symposium on Marine Propulsors*, Trondheim, Norway.
- Grin, R., van Terwisga, T., and Veldhuis, C. (2009). Integrated design approach helps reduce fuel consumption and emissions. *MARIN report*, 97 :10–11.

- Hirschi, R., Dupont, P., Avellan, F., Favre, J., Guelich, J., Handloser, W., and Parkinson, E. (1997). Centrifugal pump performance drop due to leading edge cavitation : numerical predictions compared with model tests. In *Proceedings of ASME - Fluids Engineering Division Summer Meeting*.
- Hirschi, R., Dupont, P., Avellan, F., Favre, J., Guelich, J., and Parkinson, E. (1998). Centrifugal pump performance drop due to leading edge cavitation : Numerical predictions compared with model tests. *Journal of Fluids Engineering*, 120 :705–711.
- Hoeijmakers, H. (1992). Panel methods for aerodynamic analysis and design. *AGARD Report*, 783 :5.1–5.47.
- Hsiao, C.-T. and Chahine, G. (2008). Numerical study of cavitation inception due to vortex/vortex interaction in a ducted propulsor. *Journal of Ship Research*, 52 :114–123.
- Huuva, T. (2008). *Large eddy simulation of cavitating and non-cavitating flow*. PhD thesis, Chalmers University of Technology.
- ITTC (1999a). ITTC recommended procedures and guidelines 7.5-02-01-01 rev.00, testing and extrapolation methods, uncertainty analysis in efd - uncertainty assessment methodology.
- ITTC (1999b). ITTC recommended procedures and guidelines 7.5-02-01-02 rev.00, testing and extrapolation methods, uncertainty analysis in efd - guidelines for resistance towing tank tests.
- ITTC (2000). ITTC 22nd ittc recommendations from “the specialist committee on computational method for propeller cavitation”.
- ITTC (2001). ITTC recommended procedures and guidelines 7.5-02-02-02 rev.01, testing and extrapolation methods, uncertainty analysis - example for resistance test.
- ITTC (2002). ITTC recommended procedures 7.5-02-03-01.1 rev.01, testing and extrapolation methods propulsion, performance propulsion test.
- Jessup, S., Donnelly, M., McClintock, I., and Carpenter, S. (2009). Measurements of controllable pitch propeller blade loads under cavitating conditions. In *Proceedings of SMP’09 the First International Symposium on Marine Propulsors*, pages 36–43, Trondheim, Norway.
- Kanemaru, T. and Ando, J. (2009). Numerical analysis of steady and unsteady sheet cavitation on a marine propeller using a simple surface panel method “SQCM”. In *Proceedings of SMP’09 the First International Symposium on Marine Propulsors*, pages 372–379, Trondheim, Norway.
- Kato, K., Dan, H., and Matsudaira, Y. (2006). Lock-in phenomenon of pitching hydrofoil with cavitation breakdown (unsteady fluid force characteristics and visualization of flow structure). *Japan Society of Mechanical Engineers International Journal, Series B*, 49(3) :797–805.

- Katz, J. and Plotkin, A. (2001). *Low-speed aerodynamics*. Cambridge university press, second edition.
- Kinnas, S. and Fine, N. (1990). Theoretical prediction of midchord and face unsteady propeller sheet cavitation. In *The Fifth International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*.
- Kinnas, S. and Fine, N. (1993). A numerical nonlinear analysis of the flow around two- and three-dimensional partially cavitating hydrofoils. *Journal of Fluid Mechanics*, 254 :151–181.
- Kinnas, S., Lee, H., Gu, H., and Natarajan, S. (2007). Prediction of sheet cavitation on a rudder subject to propeller flow. *Journal of Ship Research*, 51 :65–75.
- Kinnas, S., Lee, H., and Yong, Y.-L. (2003). Modeling of unsteady sheet cavitation on marine propeller blades. *International Journal of Rotating Machinery*, 9 :263–277.
- Kinnas, S., Lee, H., and Young, Y.-L. (2002). Boundary element techniques for the prediction of sheet and developed tip vortex cavitation. *Electronic Journal of Boundary Elements*, BETEQ2001 :151–178.
- Kinnas, S. and Pyo, S. (1999). Cavitating propeller analysis including the effects of wake alignment. *Journal of Ship Research*, 43 :38–47.
- Kopriva, J., Amromin, E., Arndt, R., Wosnik, M., and Kovinskaya, S. (2007). High-performance partially cavitating hydrofoils. *Journal of Ship Research*, 51 :313–323.
- Krasilnikov, V., Berg, A., and Oye, I. (2003). Numerical prediction of sheet cavitation on rudder and podded propellers using potential and viscous flow solutions. In *Proceedings of CAV2003 the Fifth International Symposium on Cavitation*, Osaka, Japan.
- Krishnaswamy, P., Andersen, P., and Kinnas, S. (2001). Re-entrant jet modelling for partially cavitating two-dimensional hydrofoils. In *Proceedings of CAV2001 the Forth International Symposium on Cavitation*, Pasadena, California.
- Kuiper, G. (2001). New developments around sheet and tip vortex cavitation on ships' propellers. In *Proceedings of CAV2001 the Forth International Symposium on Cavitation*, Pasadena, California.
- Laurens, J.-M. (1993). Couplage code de calcul fluide parfait - code de calcul couche limite 3d. Rapport d'activité Etude 2524 pièce 3, DCN - Bassin d'Essais des Carènes, Centre de Val de Reuil.
- Laurens, J.-M. (2002). *Comportement Hydrodynamique d'un Gouvernail Travaillant dans le Sillage d'une Hélice*. PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale.
- Laurens, J.-M. and Grosjean, F. (2002). Numerical simulation of the propeller-rudder interaction. *Ship Technology Research*, 49 :3–12.

- Laurens, J.-M. and Phoemsapthawee, S. (2004a). Numerical simulation of sheet cavitation effects on foils and propellers hydrodynamic performances. In *NuTTs2004 the Seventh Numerical Towing Tank Symposium*, Hamburg, Germany.
- Laurens, J.-M. and Phoemsapthawee, S. (2004b). Simulation numérique de cavitation à poche sur une pale d'hélice. Technical report, Rapport d'étude Ensieta pour le compte du Bassin d'Essai des Carènes.
- Le, Q. (1989). *Étude Physique du Comportement des Poches de Cavitation Partielle*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Le, Q., Franc, J., and Michel, J. (1993). Partial cavities : Global behavior and mean pressure distribution. *Journal of Fluids Engineering, ASME transactions*, 115 :243–248.
- Lecoffre, Y. (1994). *La cavitation, traqueurs de bulles*. Hermes.
- Lee, H. and Kinnas, S. (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*, 48 :15–30.
- Lee, H., Kinnas, S., Gu, H., and Natarajan, S. (2003). Numerical modeling of rudder sheet cavitation including propeller/rudder interaction and the effects of a tunnel. In *Proceedings of CAV2003 the Fifth International Symposium on Cavitation*, Osaka, Japan.
- Lemonnier, H. (1984). *Optimisation du maillage et de la répartition de simple couche dans la méthode des singularités, Application à la modélisation des écoulements cavitants*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Leroux, J.-B. (2003). *Étude expérimentale en tunnel hydrodynamique des instabilités de la cavitation par poche sur hydrofoil par la mesure spatio-temporelle du champ de pression pariétal*. PhD thesis, École Centrale de Nantes et Université de Nantes. Thèse de Doctorat.
- Leroux, J.-B., Astolfi, J.-A., and Billard, J.-Y. (2003). étude expérimental des instationnarités et des instabilités des poches de cavitation. In *Actes des 9èmes Journées de l'Hydrodynamique*, Poitiers, France.
- Leroux, J.-B., Coutier-Delgosha, O., and 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*, 17 :052101. (20 pages online issue).
- Liu, D., Hong, F., Zhao, F., and Zhang, Z. (2008). The CFD analysis of propeller sheet cavitation. In *Proceedings of ICHD08 the Eighth International Conference on Hydro-Dynamics*.
- Peallat, J. and Pellone, C. (1996). Experimental validation of two- and three- dimensional numerical analysis of partially cavitating hydrofoils. *Journal of Ship Research*, 40 :211–223.

- Pellone, C., Maître, T., and Briançon-Marjolet, L. (2000). Partially cavitating hydrofoils : experimental and numerical analysis. *Journal of Ship Research*, 44 :40–58.
- Pereira, F., Salvatore, F., Di-Felice, F., and Elefante, M. (2002). Experimental and numerical investigation of the cavitation pattern on a marine propeller. In *24th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Fukuoka, Japan.
- Phoemsapthawee, S., Leroux, J.-B., Laurens, J.-M., and Deniset, F. (2007a). Development and validation of a sheet cavitation model on hydrofoil and propeller blade. In *10th Nutts Numerical Towing-Tank Symposium*, Hamburg, Germany.
- Phoemsapthawee, S., Leroux, J.-B., Laurens, J.-M., and Deniset, F. (2007b). Développement et validation d’un modèle de cavitation à poche sur hydrofoil et pale d’hélice. In *Actes des 11èmes Journées de l’Hydrodynamique*, pages 113–126, Brest, France.
- Phoemsapthawee, S., Leroux, J.-B., Laurens, J.-M., and Deniset, F. (2008a). Développement et validation d’un modèle de cavitation à poche sur hydrofoil et pale d’hélice. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 12(5) :509–521.
- Phoemsapthawee, S., Leroux, J.-B., Laurens, J.-M., and Deniset, F. (2008b). Partial sheet cavitation simulation on marine propeller in unsteady flow. In *Proceedings of ICHD08 the Eighth International Conference on HydroDynamics*, pages 163–170, Nantes, France.
- Phoemsapthawee, S., Leroux, J.-B., Laurens, J.-M., and Deniset, F. (2009a). A transpiration velocities based sheet cavitation model. *Journal of Ship Technology Research*, 56(4) :161–176.
- Phoemsapthawee, S., Leroux, J.-B., Laurens, J.-M., and Deniset, F. (2009b). Versatile partial sheet cavitation model. In *Proceedings of SMP’09 the First International Symposium on Marine Propulsors*, pages 380–386, Trondheim, Norway.
- Rowe, A. and Blottiaux, O. (1993). Aspects of modeling partially cavitating flows. *Journal of Ship Research*, 37 :34–48.
- Salvatore, F. and Esposito, P. (2001). An improved boundary element analysis of cavitating three-dimensional hydrofoils. In *Proceedings of CAV2001 the Forth International Symposium on Cavitation*, Pasadena, California.
- Salvatore, F., Streekwall, H., and van Terwisga, T. (2009). Propeller cavitation modelling by CFD - results form the VIRTUE 2008 rome workshop. In *Proceedings of SMP’09 the First International Symposium on Marine Propulsors*, pages 362–371, Trondheim, Norway.
- Salvatore, F., Testa, C., and Greco, L. (2003). A viscous/inviscid coupled formulation for unsteady sheet cavitation modelling of marine propellers. In *Proceedings of CAV2003 the Fifth International Symposium on Cavitation*, Osaka, Japan.

-
- Seo, J. H. and Lele, S. K. (2009). Numerical investigation of cloud cavitation and cavitation noise on a hydrofoil section. In *CAV2009 The 7th International Symposium on Cavitation*, Ann Arbor, Michigan, USA.
- Shin, B.-R. (2009). Numerical investigation of cavitation bubble collapsing behavior. In *Proceedings of SMP'09 the First International Symposium on Marine Propulsors*, Trondheim, Norway.
- Streckwall, H. (2007). Rudder cavitation - numerical analysis and shape optimization. In *CFD in Ship Design*, Hamburg, Germany.
- Vaz, G., Bosschers, J., and de Cāmpo, J. F. (2005). Validation of a BEM for modelling steady sheet cavitation on marine propellers. In *MARINE2005 International Conference on Computational Methods in Marine Engineering*, Barcelona, Spain.
- Vaz, G., Bosschers, J., and DeCompos, J. (2003). Two-dimensional modelling of partial cavitation with BEM, analysis of several models. In *Proceedings of CAV2003 the Fifth International Symposium on Cavitation*, Osaka, Japan.
- Wang, G., Senocak, I., Shyy, W., Ikohagi, T., and Cao, S. (2001). Dynamics of attached turbulent cavitating flows. *Progress in Aerospace Sciences*, 37 :551–581.
- Watanabe, T., Kawanura, T., Takekoshi, Y., Maeda, M., and Rhee, S.-H. (2003). Simulation of steady and unsteady cavitation on a marine propeller using a RANS CFD code. In *Proceedings of CAV2003 the Fifth International Symposium on Cavitation*, Osaka, Japan.
- Yamaguchi, H. and Kato, H. (1983). On application of nonlinear cavity flow theory to thick foil sections. In *Proceedings of the Second International Conference on Cavitation*, pages 167–174, Edinburgh, Great Britain. IMechE C209/83.
- Yamasaki, S., Okazaki, A., Hasuike, N., Kawanami, Y., and Ukon, Y. (2009). Numerical and experimental investigation into cavitation of propellers having blades designed by various load distributions near the blade tips. In *Proceedings of SMP'09 the First International Symposium on Marine Propulsors*, Trondheim, Norway.
- Yiu, K. and Stow, P. (1994). Aspects of the transpiration model for aerofoil design. *International Journal for Numerical Method in Fluids*, 18 :509–528.
- Young, Y.-L. and Kinnas, S. (2003). Numerical modeling of supercavitating propeller flows. *Journal of Ship Research*, 47 :48–62.
- Young, Y.-L. and Liu, Z. (2008). Performance prediction of newton-rader propellers. *Journal of Ship Research*, 52 :124–145.