

9^{èmes} JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

10 - 11 - 12 MARS 2003

POITIERS - FUTUROSCOPE

Etude Expérimentale et Numérique des instabilités liées à la cavitation sur un Hydrofoil

O. Coutier-Delgosha,
coutier@enstap.ensta.fr

J-F. Devillers
deviller@enstap.ensta.fr

Laboratoire de Mécanique de l'ENSTA, Chemin de la Humière, 91761 Palaiseau Cedex

Résumé

L'écoulement cavitant instationnaire sur un foil de type plan convexe est étudié par des essais en tunnel à cavitation et par la simulation numérique. L'auto-oscillation à grande échelle observée expérimentalement est bien reproduite par le modèle, avec en particulier un bon accord sur la fréquence du phénomène dans différentes configurations. Pour confirmer le très faible taux de vide prédit par le calcul dans la majeure partie de la poche de cavitation, une technique expérimentale nouvelle est mise en œuvre : elle est fondée sur la visualisation par endoscopie de l'intérieur du mélange liquide/vapeur. Les développements récents sont présentés, et des premiers résultats sont analysés.

1. Introduction

La cavitation dans les pompes ou sur les hélices entraîne un certain nombre de difficultés de dimensionnement et de maintenance : baisse de performance, érosion des aubages, vibrations susceptibles de provoquer des ruptures, ou encore le bruit associé au phénomène. Dans les inducteurs de pompe spatiale par exemple, les efforts axiaux et radiaux associés à la présence de la phase vapeur pose des problèmes d'équilibrage du rotor [Goirand et al 1992]. La compréhension des mécanismes de changement de phase et de coexistence des deux phases liquide/vapeur dans un mélange cavitant est donc primordiale pour réduire ou tout au moins contrôler ces différents effets. Des expériences sont donc menées au Laboratoire de Mécanique de l'ENSTA pour étudier le phénomène sur des géométries simplifiées, essentiellement bidimensionnelles, mais représentatives des écoulements qui se produisent dans une pompe ou une hélice 3D. Ces études sont réalisées dans le tunnel à cavitation de l'ENSTA, qui permet en baissant la pression jusqu'à 150 mbar environ de recréer des conditions de cavitation variées.

Parrallèlement, un modèle numérique a été développé au Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (LEGI) pour simuler le mécanisme de cavitation [Delannoy et Kueny 1990, Reboud et al. 1998, Coutier-Delgosha et al. 2002a]. Il est fondé sur la prise en compte d'un fluide unique pour le mélange de liquide et de vapeur, caractérisé par une densité qui est contrôlée par une loi d'état barotrope [Delannoy, 1989]. Ce modèle a donné précédemment de bons résultats dans des configurations de profils Venturi cavitants et d'hydrofoils [Coutier-Delgosha et al., 2002b, Lohrberg et al., 2002].

Les travaux présentés ici portent sur l'étude de l'écoulement cavitant qui a lieu sur la face en dépression d'un hydrofoil bidimensionnel placé en légère incidence par rapport à l'écoulement. Une poche de cavitation se développe (figure 1), et adopte un comportement instationnaire plus ou moins prononcé: dans des conditions faiblement cavitantes (à faible incidence par exemple), seules de faibles fluctuations sont visibles au sein de la poche, sans mouvement d'ensemble. Lorsque l'incidence est augmentée, un comportement instable périodique est observé, mettant en jeu une fluctuation de la taille de la poche associée à des lâchers de nuages de vapeur dans l'écoulement.



Figure 1. Poche de cavitation sur la face en dépression du foil

Ce comportement instable est étudié à la fois expérimentalement et numériquement (parties 2 et 3), afin de montrer la capacité du modèle numérique à reproduire les mécanismes responsables de l'auto-oscillation de la poche. Le faible taux de vide obtenu par la simulation dans l'ensemble de la poche de cavitation suggère que celle-ci est composée majoritairement de liquide, ce qui est cohérent avec les mesures par sonde optique effectuées précédemment par [Stutz et Reboud, 1997] dans des configurations de profils Venturi. Une technique expérimentale nouvelle visant à confirmer ce résultat est présentée en partie 4.

2. Comportement expérimental

Le foil considéré est un profil bidimensionnel de longueur 150 mm et de largeur 80 mm. Sa section est définie par une partie supérieure plate et une partie inférieure convexe, caractérisée par un rayon de courbure $R = 195$ mm (figure 2). Les essais ont été réalisés dans le tunnel à cavitation du Laboratoire de Mécanique de l'ENSTA, dont la veine d'essais mesure 150 mm de hauteur, 80 mm de largeur, et 640 mm de longueur.

Le foil est placé à mi-hauteur, avec un angle d'incidence de 5° , et une poche de cavitation se forme sur la face supérieure lorsque la pression est diminuée dans l'ensemble du tunnel. Par rapport aux configurations de profils Venturis étudiées précédemment [Stutz et Reboud, 1997, Coutier-Delgosha et al., 2003], le comportement cavitant est ici modifié par la possibilité d'une interaction entre les écoulements sur les deux faces du foil.

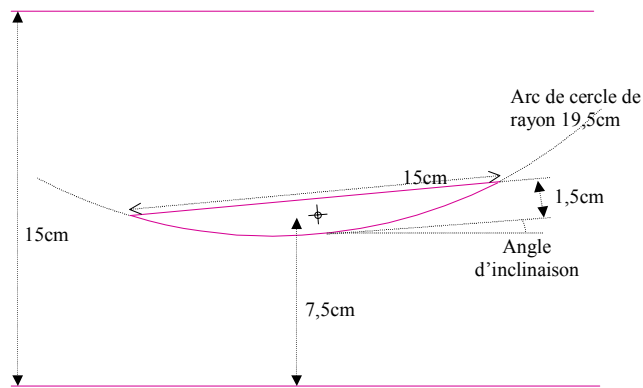


Figure 2. Géométrie du foil

Pour une vitesse d'entrée de 6.8 m/s et un nombre de cavitation égal à 1.65, la poche de cavitation obtenue sur la face en dépression se caractérise par une longueur moyenne de 60 ± 5 mm, mais avec un comportement oscillant : l'ensemble de la poche fluctue de manière périodique, avec des lâchers de nuages de vapeur dans la partie arrière du foil. La figure 3 présente la forme moyenne de la poche obtenue, sur la base d'une centaine de photos prises de manière aléatoire puis moyennées.

Il faut préciser que cette poche moyenne inclut ici les lâchers de vapeur qui se produisent en arrière de la poche : c'est la raison pour laquelle sa longueur est nettement supérieure aux 60 mm annoncés précédemment, qui correspondent à la longueur moyenne de la poche attachée.

La fréquence d'oscillation de la poche est déterminée à partir des fluctuations du bruit produit par la cavitation, mesuré par un hydrophone placé en paroi. Elle vaut dans ce cas de figure 33 ± 3 Hz. Il a été observé précédemment par [Pham et al., 1999] que le lâcher de vapeur est ici le résultat direct d'un jet rentrant qui remonte périodiquement sous la poche de cavitation à proximité de la paroi du foil. Il vient couper la poche près du bord d'attaque, provoquant sa rupture et le départ de la partie arrière vers l'aval.

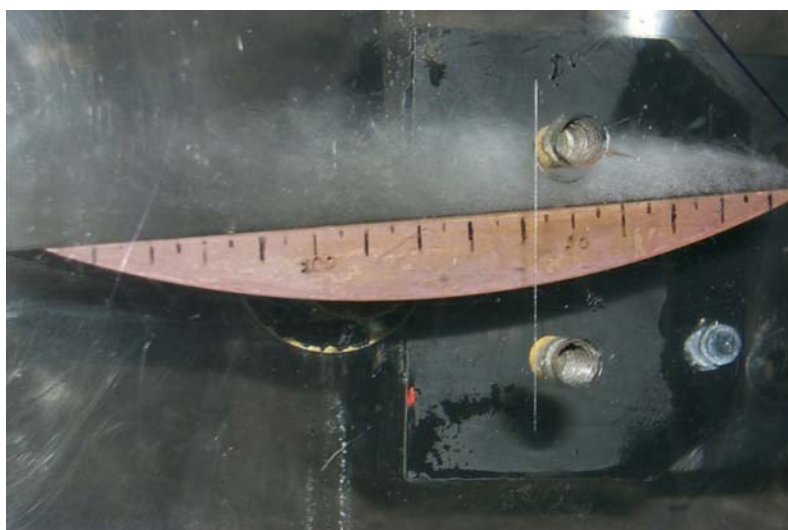


Figure 3. Forme moyenne de la poche de cavitation.

(Angle d'incidence 5° , $V_{ref} = 6.8$ m/s, $\sigma = 1.65$, échelle de longueur indiquée sur le foil à chaque cm)

3. Simulation numérique

3.1 Modèle physique et numérique

Des calculs numériques sont effectués pour simuler le phénomène dans la même configuration. Le modèle physique est basé sur une approche dite 1-fluide, qui considère le mélange liquide/vapeur comme un milieu homogène dont la densité varie fortement lorsqu'il y a changement de phase. Les variations de densité sont gérées par une loi d'état barotrope pour le mélange (figure 4), qui les lie directement aux variations de pression. Cette approche physique est implantée dans une résolution de type correction de pression, basée sur un algorithme SIMPLE modifié pour tenir compte de l'aspect fortement compressible du fluide modélisé. La résolution temporelle est de type implicite avec une discrétisation au 1^{er} ordre dans le cas présent, et le schéma de convection HPLA du second ordre proposé par [Zhu, 1991] est mis en œuvre pour éviter les instabilités numériques. Ce modèle numérique a été validé par des études précédentes portant sur des géométries de Venturi, d'hydrofoils, et de cascades d'hydrofoils [Coutier-Delgosha et al. 2002a, Lohrberg et al. 2002].

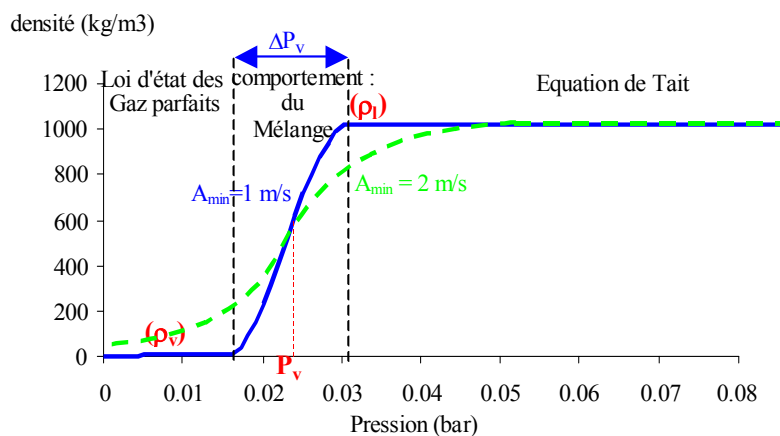


Figure 4. Loi d'état barotrope pour le mélange liquide/vapeur

Un modèle de turbulence à deux équations $k-\omega$ est utilisé. La prise en compte de l'effet de la compressibilité du mélange cavitant sur la structure de la turbulence est nécessaire afin d'obtenir les effets instationnaires observés expérimentalement [Coutier-Delgosha et al. 2002b]. Le domaine de calcul (figure 5) est composé de 140×70 mailles, avec un raffinement spécifique dans les zones où la cavitation se produit, c'est à dire sur la face supérieure du foil et en particulier dans la zone du bord d'attaque. Un raffinement supplémentaire est également imposé à proximité des parois du foil et de la veine, de façon à respecter les critères de y^+ dans le cadre de l'utilisation d'une loi de paroi. En pratique, le y^+ au centre de la première maille près des parois est ici compris entre 25 et 80.

On impose les conditions d'écoulement expérimentales ($V_{ref} = 6.8 \text{ m/s}$, $\sigma = 1.65$).

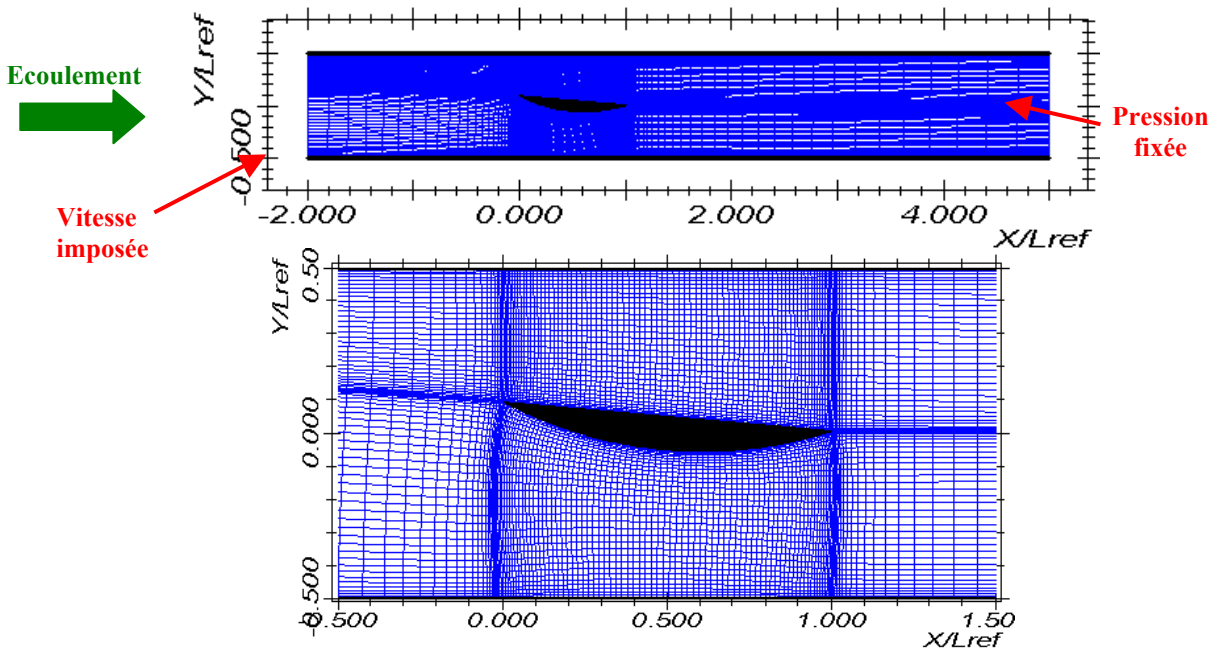


Figure 5. Maillage de la veine d'essais près du foil ($L_{ref} = 15$ cm).

3.2 Résultats

Le comportement obtenu est en très bon accord avec les données expérimentales : la poche de cavitation adopte un comportement cyclique auto-fluctuant (figure 6), dont la fréquence oscille autour de 30/35 Hz. La longueur moyenne de la poche attachée obtenue vaut 60 mm environ. Ces résultats sont donc très proches des valeurs obtenues en essais.

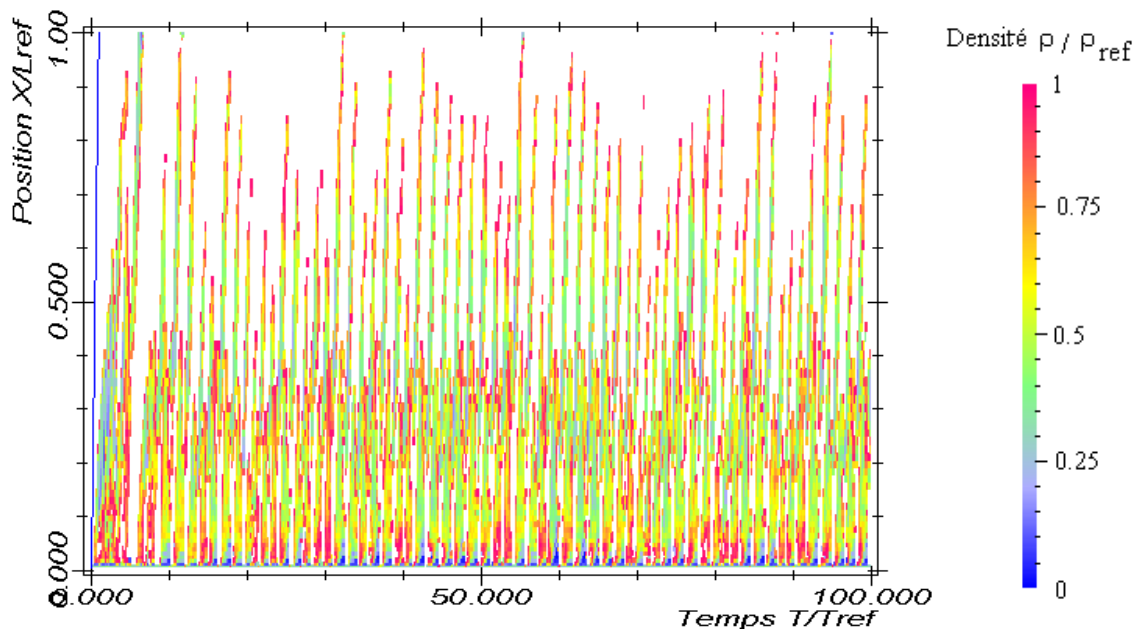


Figure 6. Comportement cavitant cyclique : cette figure montre l'évolution temporelle (en abscisse) de la densité minimale présente dans chaque section de la veine (en ordonnée) entre $X/Lref = 0$ (bord d'attaque) et $X/Lref = 1$ (bord de fuite)

(Angle d'incidence 5° , $V_{ref} = 6.8$ m/s, $\sigma = 1.65$)

La figure 7 montre les formes de poche successives obtenues au cours du cycle de cavitation. Il s'agit de formes reconstituées en moyenne de phase : la partie inférieure correspond à chaque fois au résultat de la simulation, et la partie supérieure à l'expérience. On peut observer que l'évolution de la forme de la poche au cours du cycle est très similaire dans les deux cas. On observe en particulier au niveau du calcul le jet rentrant qui remonte vers l'amont à proximité du profil, et qui avait été mis en évidence expérimentalement par [Pham et al., 1999]. En revanche, une petite poche de cavitation est également obtenue par la simulation numérique du côté intrados, ce qui n'est pas le cas expérimentalement. Néanmoins, on observe également ce type de phénomène en essais pour des conditions légèrement différentes (incidence plus élevée par exemple).

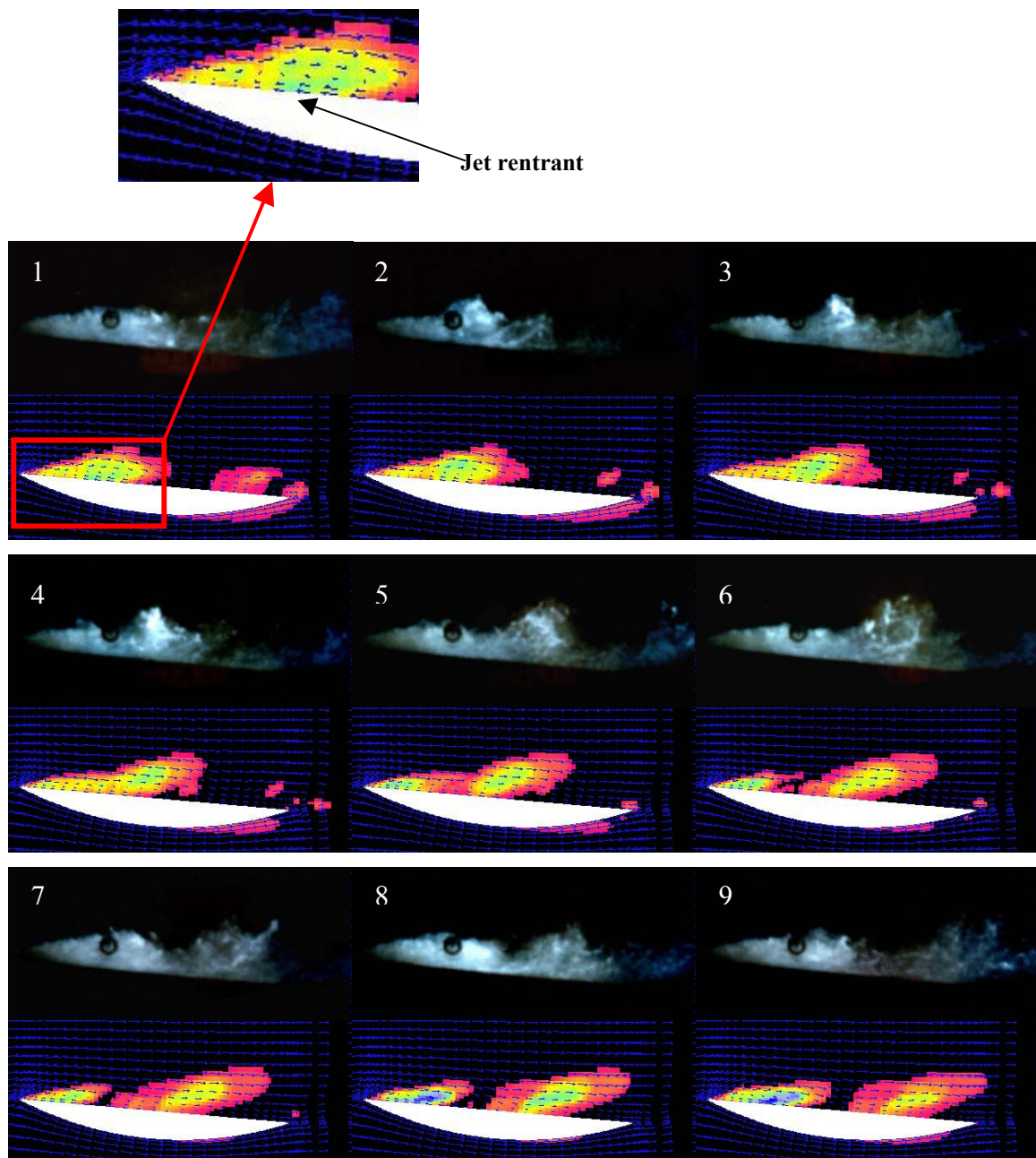


Figure 7. Cycle de cavitation en moyenne de phase :

en haut, image obtenue par traitement d'images à partir de photos prises en essais, en bas, le résultat numérique

Plusieurs conditions d'écoulement ont été étudiées en faisant varier le nombre de cavitation. Les fréquences d'oscillation obtenues dans ces différents cas de figures sont indiquées sur la figure 8 en fonction des longueurs moyennes de poches attachées correspondantes. Les nombres de Strouhal calculés sur la base de cette longueur de référence sont tous très proches de la valeur standard de 0.3 indiquée par plusieurs auteurs dans des configurations de ce type [Joussellin et al 1991, Stutz et Reboud 1997]. Il faut noter que la mesure expérimentale pour $V_{ref}/L_{cav} = 194$ Hz doit être considérée avec prudence, car l'estimation visuelle de la longueur de poche attachée n'est pas très précise pour des cavités aussi petites. La valeur plus élevée du nombre de Strouhal dans ce cas précis ainsi que l'écart avec le résultat numérique pourraient être dus à cette imprécision. Dans les autres cas de figure, les simulations et les essais sont en bon accord, ce qui suggère que notre modèle est capable de modéliser les phénomènes d'instabilité de cavitation à grande échelle qui se produisent sur ce type de géométrie.

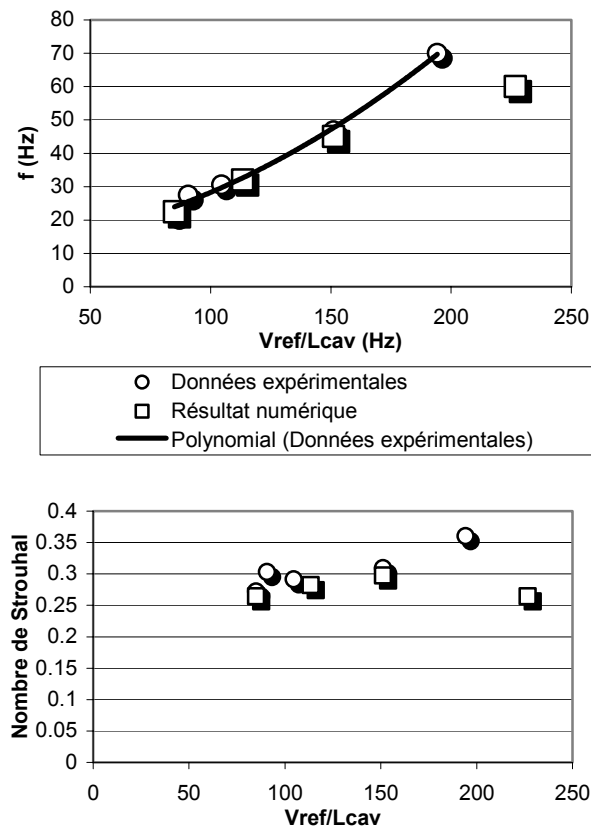


Figure 8. Comparaison des fréquences d'auto-oscillation de la poche de cavitation obtenues par l'expérience et par le calcul.

De faibles taux de vide moyens sont obtenus par le calcul à l'intérieur du mélange cavitant : ils ne dépassent quasiment jamais 50% (sauf en tout début de croissance de poche, au niveau du bord d'attaque), et s'élèvent à 10 à 20% dans la majeure partie de la poche (cf. figure 6). Cette caractéristique, qui indique que le mélange est composé en majeure partie de liquide, est cohérente avec des études antérieures menées sur un profil Venturi au LEGI [Stutz et Reboud 1997, Coutier-Delgosha et al. 2002a]. Pour confirmer ce résultat, un

dispositif de mesure nouveau est mis en place sur le tunnel à cavitation de l'ENSTA : il consiste à visualiser au moyen d'un endoscope l'intérieur de la poche de cavitation.

4. Etude de la structure du mélange par endoscopie

Pour approfondir la connaissance de la structure de la cavitation, et évaluer en particulier les taux de vide locaux à l'intérieur de la poche, une technique d'endoscopie est développée à l'ENSTA depuis quelques années. L'objectif est d'observer l'intérieur du mélange liquide/vapeur, ce qui est difficile avec des méthodes classiques à cause de l'opacité de la poche de cavitation.

L'utilisation d'un micro-endoscope permet de s'affranchir en partie de cette difficulté. L'endoscope, qui mesure 200 mm de longueur et 2mm de diamètre, traverse à la fois la veine d'essais et le profil, et vient affleurer sous la poche de cavitation (figure 9). De cette manière, il est possible d'observer le dessous de la poche sans perturber son comportement. La tige de l'endoscope est exposée à l'écoulement sous le profil, et elle engendre un sillage cavitant qui perturbe cependant très peu le phénomène de cavitation sur l'extrados. En éclairant l'écoulement à contre-jour par un stroboscope, on visualise la structure du mélange diphasique. Les images ainsi obtenues sont filmées par une caméra CCD noir et blanc à une cadence de 25 images par seconde, puis numérisées sur PC en direct. Les flashes du stroboscope sont réglés à la même cadence, avec une durée de flash de l'ordre de 30 μ s de façon à figer l'écoulement sur les images obtenues.

L'incidence de foil est fixée dans cette configuration à 2.5°, et elle est maintenue constante par une bride pour ne pas risquer d'endommager l'endoscope. Suivant le nombre de cavitation atteint, la poche est plus ou moins longue, ce qui permet de placer l'endoscope aussi bien dans le sillage que dans le cœur de la poche de cavitation.

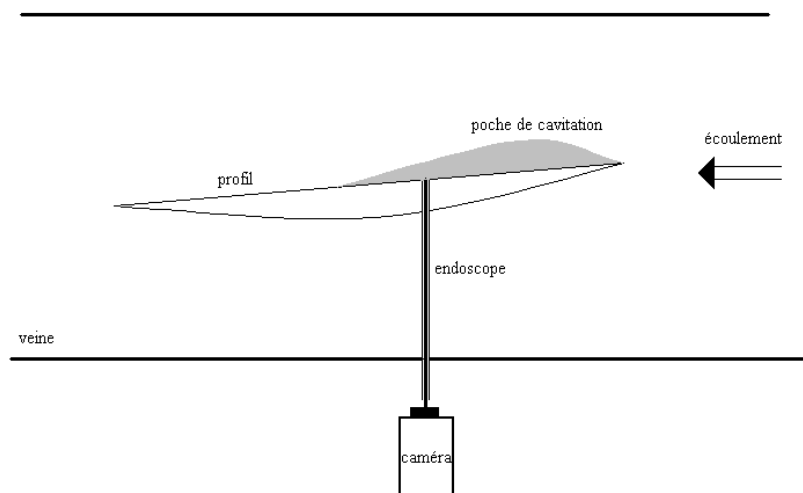


Figure 9. Dispositif expérimental pour la visualisation endoscopique.

Le champ de visée de l'endoscope est de 50 degrés, avec une distance de mise au point réglable entre 1 mm et l'infini. La profondeur de champ varie dans le même sens et dans les mêmes proportions que la

distance de mise au point. On considère que pour une distance de mise au point de 1 cm, le domaine de vision est un cône dont le sommet est le bout de l'endoscope et la base un diamètre d'environ 9 mm.

Il apparaît que les images obtenues dans le sillage de la poche permettent de distinguer très nettement des bulles de vapeur au sein d'un milieu essentiellement liquide (figure 10). En revanche, les images filmées au cœur de la poche de cavitation sont presque systématiquement floues, en raison des bulles de vapeur qui passent très près de l'endoscope et masquent complètement son champ de vision (figure 11). L'éclairage devient alors très aléatoire, et ne permet pas de distinguer correctement la vapeur du liquide.

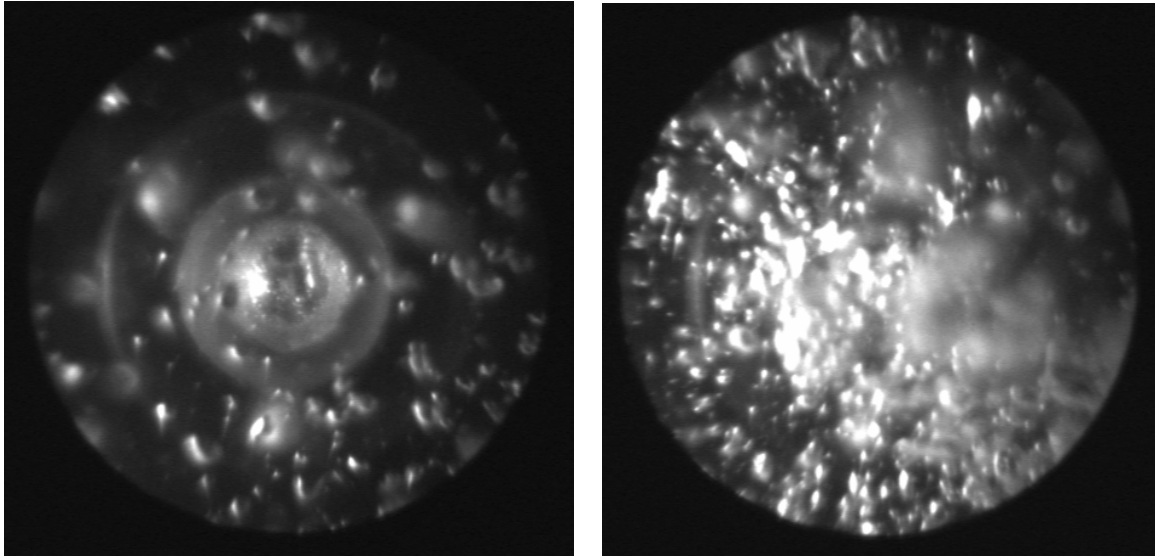


Figure 10. Images du sillage de la poche de cavitation

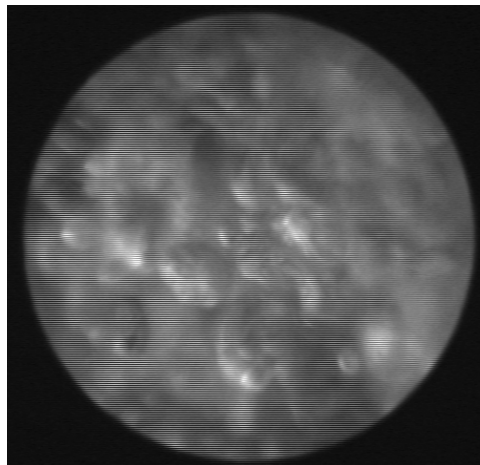
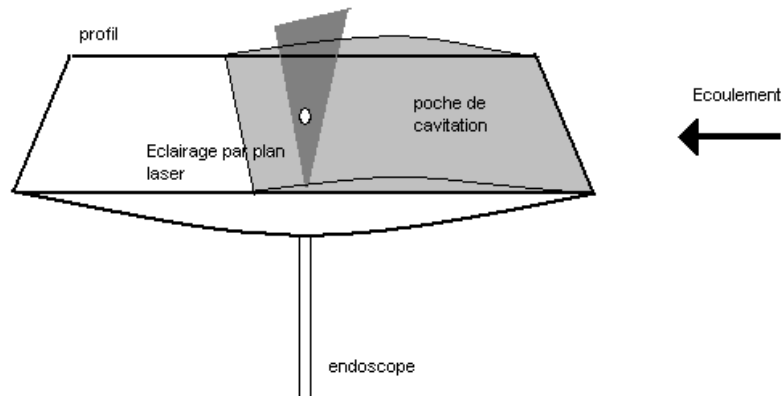


Figure 11. Image endoscopique au cœur de la poche

Une estimation du taux de vide dans le sillage des poches de cavitation peut être menée en effectuant un traitement d'images [Devillers et Leriche, 2001]. Des valeurs de 7% environ ont ainsi été obtenues. Il est apparu néanmoins que la détermination du volume vu par l'endoscope est relativement imprécise, du fait de sa grande profondeur de champ et de l'éclairage stroboscopique par une torche.

Les travaux récents ont donc consisté à remplacer cet éclairage par un plan laser horizontal de quelques degrés d'amplitude seulement, au dessus de l'endoscope (figure 12). L'objectif est d'obtenir ainsi sur les images uniquement la trace des bulles de vapeur dans le plan laser, de façon à calculer un taux de vide de façon plus précise.



Il s'avère que le plan laser ne permet pas de faire pénétrer la lumière au cœur de la poche de cavitation. De plus, la qualité des images obtenues dans le sillage de la poche, où le plan est assez peu déformé, est trop médiocre pour réellement les exploiter. Il a donc été entrepris à présent d'apporter la source lumineuse par l'endoscope lui-même. Ces travaux sont en cours au Laboratoire de Mécanique de l'ENSTA.

5. Conclusion

Le comportement cavitant d'un profil bidimensionnel a été étudié à la fois expérimentalement et numériquement. L'attention s'est portée principalement vers le mécanisme instationnaire d'auto-oscillation périodique qui affecte la poche de cavitation. Cette particularité a pu être obtenue par le modèle numérique, et les fréquences du phénomène ont été comparées aux mesures expérimentales pour plusieurs longueurs de poche. Un très bon accord a été mis en évidence, avec en particulier un nombre de Strouhal cohérent avec la valeur classique de 0.3. L'analyse des résultats numériques a révélé également un très faible taux de vide dans la majeure partie de la poche (inférieur à 30%, sauf au niveau du bord d'attaque durant certaines phases du cycle). Pour confirmer ce résultat, une technique de visualisation de l'intérieur de la poche de cavitation par endoscopie est développée à l'ENSTA. Ces travaux se heurtent actuellement à des problèmes d'éclairage du mélange liquide/vapeur.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) pour son soutien permanent.

Le modèle numérique mis en oeuvre a été développé au sein du Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (LEGI).

Références

- [1] Goirand B, Mertz A, Joussellin F, Rebattet C, 1992, "Experimental Investigation of Radial Loads Induced by Partial Cavitation with Liquid Hydrogen Inducer", *Proceedings of the 3rd Int. Conf. on Cavitation, ImechE*, C453/056 Cambridge U.K, 263-269.
- [2] Delannoy Y, Kueny JL, 1990, "Two-phase flow approach in unsteady cavitation modeling", *Cavitation and Multiphase Flow Forum, ASME-FED 98* 153-158.
- [3] Reboud JL, Stutz B, Coutier O, 1998, "Two phase flow structure of cavitation: experiment and modeling of unsteady effects", *3rd Int. Symp. on Cavitation* Grenoble France.
- [4] Coutier-Delgosha O, Reboud JL, Delannoy Y, 2002a, "Numerical simulations in unsteady cavitating flows", *accepté pour publication au Int. J. for Numerical Methods in Fluids*.
- [5] Coutier-Delgosha O, Fortes-Patella R, Reboud J-L, 2002b, "Evaluation of the turbulence model Influence on the Numerical Simulations of Unsteady Cavitation", *J. of Fluid Eng., Vol. 25, à paraître en janvier 2003*.
- [6] Pham T M, Larrarte F, Fruman D H, 1999, "Investigation of Unsteady Sheet Cavitation and Cloud Cavitation Mechanisms", *J. of Fluid Eng.* **121** 289-296.
- [7] Stutz B, Reboud J-L, 1997, "Experiments on unsteady cavitation", *Exp. in Fluids* **22** 191-198.
- [8] Lorberg H, Stoffel B, Fortes-Patella R, Coutier-Delgosha O, Reboud J-L, 2002, "Numerical and Experimental Investigations on the Cavitating Flow in a Cascade of Hydrofoils", *Experiments in Fluids* 33/4 : pp 578-586.
- [9] Devillers J-F., Leriche M-A., 2001, "Endoscopie d'une poche de cavitation sur un profil plan convexe en incidence", *Congrès Flu Visu 2001*, Rouen.