

# Etude expérimentale du comportement hydroélastique d'un hydrofoil en écoulement cavitant

P. BARREAU<sup>a</sup>, J.-A. ASTOLFI<sup>a</sup>, A. CLEMENT<sup>a,b</sup>

a. Institut de Recherche de l'Ecole Navale (IRENav), BCRM BREST, CC 600-29240 BREST Cedex 9

b. DCNS Propulsion, 44620 La Montagne, France

## Résumé :

*Cet article présente les résultats d'une expérience originale permettant de caractériser le comportement hydroélastique d'un hydrofoil soumis à un écoulement cavitant instationnaire. L'expérience est fondée sur la mesure dynamique simultanée de l'état de contrainte par extensométrie, de la réponse vibratoire de la structure par vibrométrie laser et de la visualisation par caméra rapide de l'écoulement cavitant. On montre que l'état de contrainte et de vibration augmente de façon significative en écoulement cavitant. L'influence de la cavitation sur la réponse modale est particulièrement mise en évidence.*

## Abstract :

*The present work deals with an genuine experiment allowing the characterisation of the hydroelastic behaviour of an hydrofoil in an unsteady cavitating flow. Local stress on the foil is measured through the use of strain gages, vibrating reponse is measured using a laser doppler vibrometer and the flow is observed using a high speed digital camera. The paper shows that stress and vibrations increase significantly under cavitating flow. The influence of cavitation on the frequency response of the foil is highlighted.*

**Mots clefs :** cavitation ; extensométrie ; contraintes

## 1 Introduction

La cavitation est un phénomène complexe qui apparaît dans un liquide lorsque la pression descend en dessous d'une pression critique généralement voisine de la pression de vapeur [1]. Elle peut être observée dans une grande variété de systèmes comme les pompes, les injecteurs, les propulseurs marins, les hydrofoils à grande vitesse [2]. Le développement de la cavitation est à l'origine d'effets négatifs comme les chutes de performances, le bruit, les vibrations et l'érosion. Différents types de cavitation peuvent apparaître dans un écoulement [3]. La cavitation par poches est couramment rencontrée sur les pales des machines hydrauliques. Elle correspond à la situation pour laquelle une cavité de vapeur est attachée au bord d'attaque et s'étend sur une distance le long de la surface de la pale qu'il est d'usage d'appeler la longueur de poche [4]. Si la longueur de poche est plus petite que la corde de la pale, la cavitation est appelée cavitation partielle. Inversement la supercavitation correspond à une situation pour laquelle la cavité de vapeur s'étend au delà du bord de fuite. La cavitation par poche est instationnaire par nature. Pour des cavités de petites longueurs relativement à la corde, les instationnarités sont plutôt localisées dans la zone de fermeture de la cavité alors que pour des longueurs de poche plus grandes, toute la zone de vapeur devient instable avec une pulsation de l'ensemble de la cavité et l'émission périodique d'un nuage de vapeur [5]. Ce type de cavitation est connu pour générer de fortes fluctuations de pression pariétale, un haut niveau de vibration et de contraintes au sein de la structure.

Les travaux sur le comportement hydroélastique des structures soumises à ce type d'écoulements cavitants sont très rares [6, 7]. L'étude originale proposée ici, menée au tunnel de cavitation de l'IRENav, s'inscrit dans le cadre d'un programme de recherche qui relève de la conception, du dimensionnement et de la fiabilité de structures marines soumises à des efforts importants [8]. Elle est fondée sur une étude

expérimentale des déformations, de l'état de contraintes et de la vibration engendrés par un écoulement cavitant de type poche de cavitation se développant sur un hydrofoil souple. Les contraintes sont mesurées à l'aide d'un système de trois jauges collées au voisinage de la surface de la structure. Les vibrations sont mesurées par vibrométrie laser. Ces mesures sont réalisées pour différentes longueurs de poches de 10% à 50%. Elles montrent clairement l'influence de la cavitation sur les déformations et les contraintes générées au sein de la structure.

## 2 Dispositif expérimental

Les essais ont été réalisés dans le tunnel de cavitation de l'IRENav. Le profil étudié est un NACA66-312 en polyacétate (POM), possédant une épaisseur relative de 12%, une longueur de corde  $c = 0.15m$  et une envergure  $b = 0.19m$ . Le matériau a un module de Young  $E = 3100MPa$ , un coefficient de poisson  $\nu = 0,35$  et une densité  $\rho = 1480kg/m^3$ . Le profil est monté horizontalement dans la veine d'essai, encastré à la base et libre à l'extrémité Fig. 1. La vitesse de l'écoulement est  $U_{ref} = 5m/s$  et l'incidence est  $\alpha = 8^\circ$ .

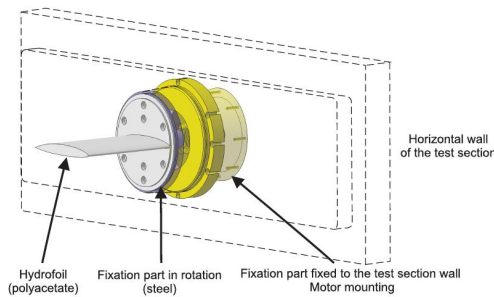


FIGURE 1 – Schéma du montage

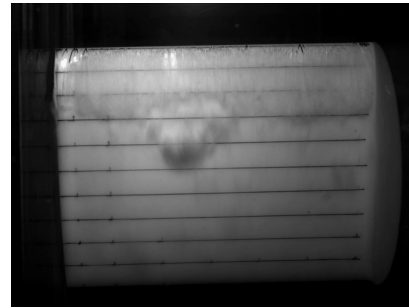


FIGURE 2 – Développement de la poche de cavitation, l'écoulement vient du haut

Une caméra numérique à haute cadence a été utilisée pour mesurer le développement de la poche de cavitation. Ce développement pouvant être estimé en fonction du rapport longueur de poche sur corde ( $l/c$ ) à l'aide de repères placés sur l'extrados du profil Fig. 2.

Les vibrations de la structure ont également été analysées en utilisant un vibromètre laser Polytech PSV-400. Ce vibromètre, équipé d'un laser He-Ne de classe II et de longueur d'onde  $\lambda = 632,8nm$ , a une sensibilité comprise entre  $10mm/s/Volts$  et  $1m/s/Volts$ . Un spectre représentant la vibration moyenne en un point a été obtenu en moyennant 256 spectres différents.

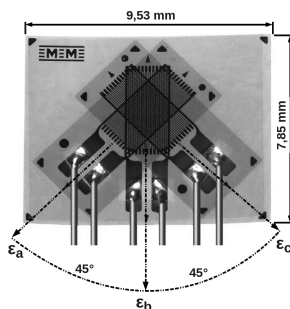


FIGURE 3 – Détail de la rosette

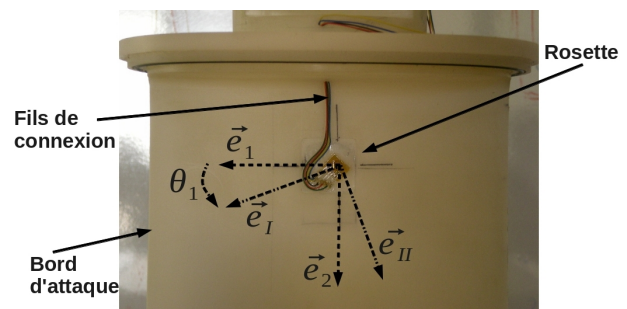


FIGURE 4 – Emplacement de la rosette

Une rosette rectangulaire, formée d'un ensemble de trois jauges de déformation, dont les directions font entre elles un angle de  $45^\circ$  a été choisie pour déterminer les déformations (VISHAY<sup>®</sup>, référence : L2A-13-125WW-120, Fig. 3). Chaque jauge est caractérisée par une résistance de  $120 \Omega$  et un facteur de jauge  $k = 2,10$ .

La rosette a été collée en un point de l'intrados situé à  $78mm$  du bord d'attaque ( $x/c = 0,53$ ) et à  $36,6mm$  de la base du foil Fig. 4. Elle est logée dans une cavité, usinée à cet effet, de profondeur  $1mm$

et de surface  $21 * 23mm^2$ . Des rainurages ont également été usinés pour le passage des connecteurs. Un compound recouvre l'ensemble, permettant de retrouver l'état de surface initial et d'étanchéifier le système.

L'acquisition des mesures a été réalisée à l'aide du système d'acquisition SPIDER 8, à une fréquence d'acquisition  $f_e = 2400Hz$ .

Les mesures ont été réalisées pour des développements de la poche de cavitation, de longueur relative  $l/c = 10\%, 20\%, 30\%, 40\%$  et  $50\%$ , correspondant respectivement à des nombres de cavitation  $\sigma = 2, 55; 2, 40; 2, 14; 1, 97; 1, 90$  où  $\sigma$  est défini par

$$\sigma = \frac{P_{ref} - P_v}{0,5\rho V_{ref}^2} \quad \text{Avec } P_{ref} = \text{pression à mi-veine et } V_{ref} = \text{vitesse de l'écoulement}$$

Concernant les jauges de déformations, 16 acquisitions de 10 secondes ont été réalisées pour chacun des 5 cas.

### 3 Principe

La déformation longitudinale  $\varepsilon$  est déterminée par :

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon \quad \text{avec } k \text{ le facteur de jauge et } \Delta R \text{ la variation de résistance} \quad (1)$$

Trois déformations longitudinales  $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$  suivant trois directions faisant entre elles un angle de  $45^\circ$  Fig.3 sont mesurées. Les deux directions a et c constituent les deux directions d'une base  $(\vec{e}_1, \vec{e}_2)$  Fig.4.

On considère que l'état des contraintes à la surface de l'intrados est un état plan de contraintes. Le tenseur des déformations au point de collage, dans la base  $(\vec{e}_1, \vec{e}_2)$ , est défini par :

$$\bar{\varepsilon} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} \end{vmatrix}$$

On pose ici :

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_a ; \varepsilon_{22} = \varepsilon_c ; \varepsilon_{12} = \varepsilon_b - \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \quad (2)$$

Les déformations principales  $\varepsilon_I, \varepsilon_{II}$  sont données par :

$$\varepsilon_I = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}}{2}\right)^2 + \varepsilon_{12}^2} \quad ; \quad \varepsilon_{II} = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}}{2}\right)^2 + \varepsilon_{12}^2} \quad (3)$$

La direction principale I, portée le vecteur  $\vec{e}_I$  Fig.4, est définie par :

$$\theta_1 = (\vec{e}_I, \vec{e}_1) = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c - \varepsilon_b}{\varepsilon_a - \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2}} \right) \quad (4)$$

Les contraintes principales et la contrainte de Von Mises sont données par :

$$\sigma_I = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_I + \nu\varepsilon_{II}) \quad ; \quad \sigma_{II} = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_{II} + \nu\varepsilon_I) \quad ; \quad \sigma_{VonMises} = \sqrt{\sigma_I^2 + \sigma_{II}^2 - \sigma_I\sigma_{II}} \quad (5)$$

### 4 Résultats

Les déformations principales et la direction principale pour différentes longueurs de poches sont données Fig. 5. Les barres verticales correspondent à l'écart type. On observe que l'angle  $\theta_1$  définissant la direction principale I est égal à  $79^\circ (\pm 1^\circ)$  Fig. 5, cette valeur évoluant faiblement avec les conditions de cavitation. La direction principale I est proche de l'envergure tandis que la direction II est proche de la corde.

Nous observons que  $\varepsilon_I > 0$  et  $\varepsilon_{II} < 0$  Fig. 5. La valeur positive de  $\varepsilon_I$  indique que localement, l'intrados est en extension suivant la direction I, direction proche de l'envergure. Ceci indique une sollicitation en

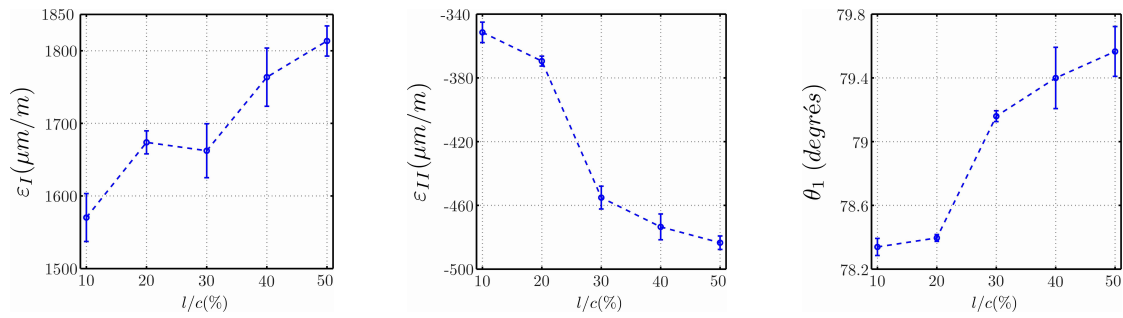


FIGURE 5 – Valeur moyenne des déformations principales  $\varepsilon_I, \varepsilon_{II}$  et de l'angle  $\theta_I$  de la direction principale I

flexion de l'hydrofoil. La valeur négative de  $\varepsilon_{II}$  indique que localement, l'intrados est en compression suivant la direction II. Ceci indique un vrillage de l'hydrofoil, provoqué par une sollicitation de torsion. Les valeurs plus élevées de  $\varepsilon_I$  par rapport à  $\varepsilon_{II}$  reflètent la sollicitation essentiellement en flexion de l'hydrofoil.  $\left(\frac{|\varepsilon_{II}|}{\varepsilon_I} \sim 25\%\right)$

Concernant les contraintes, nous constatons, Fig.6, que  $\sigma_{II}$  est nettement inférieure à  $\sigma_I$ ,  $\left(\frac{\sigma_{II}}{\sigma_I} \sim 10\%\right)$ . Nous notons que la contrainte principale  $\sigma_I$  augmente lorsque la poche de cavitation se développe. Elle passe d'une valeur de  $5,1\text{MPa}$  à une valeur de  $5,8\text{MPa}$ . La contrainte principale  $\sigma_{II}$ , par contre, diminue passant de  $0,7\text{MPa}$  à  $0,53\text{MPa}$ . Les évolutions, dans les deux cas, ne sont pas régulières et sont caractérisées par un décrochage, pour une longueur de poche relative,  $l/c = 30\%$ . La contrainte de Von Mises, Fig.6, varie de  $4,8\text{MPa}$  à  $5,6\text{MPa}$ , avec un palier pour  $l/c$  compris entre 20% et 30%. L'augmentation de la contrainte de Von Mises est d'environ 17%.

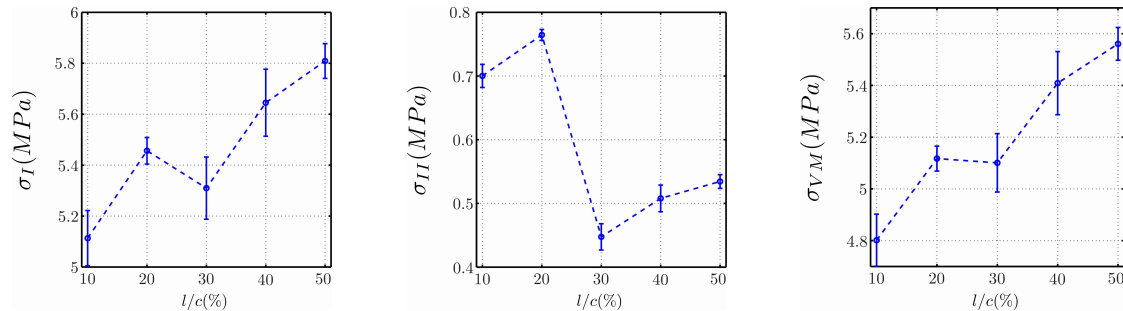


FIGURE 6 – Valeur moyenne des contraintes  $\sigma_I, \sigma_{II}$  et  $\sigma_{VonMises}$

L'intensité des fluctuations des contraintes principales et de la contrainte de Von Mises augmente avec le développement de la poche de cavitation Fig. 7. L'augmentation est plus marquée à partir d'une longueur relative de poche  $l/c = 30\%$ , ceci illustre l'instationnarité plus élevée de la poche de cavitation.

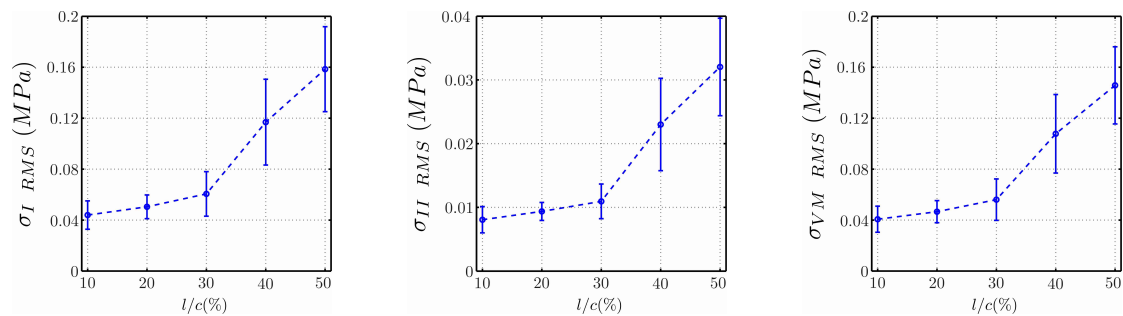


FIGURE 7 – Intensité des fluctuations des contraintes  $\sigma_I, \sigma_{II}$  et  $\sigma_{VonMises}$

Les densités spectrales des contraintes,  $(\sigma_I; \sigma_{II}; \sigma_{VonMises})$ , ont une allure générale semblable. Cette allure est illustrée par l'exemple du spectre de la contrainte de Von Mises, pour un développement de la poche de cavitation  $l/c = 10\%$  Fig.8. Cinq pics de fréquence (f1, f2, f3, f4, f5) apparaissent dont un très prononcé à la fréquence f1 Tab. 1.

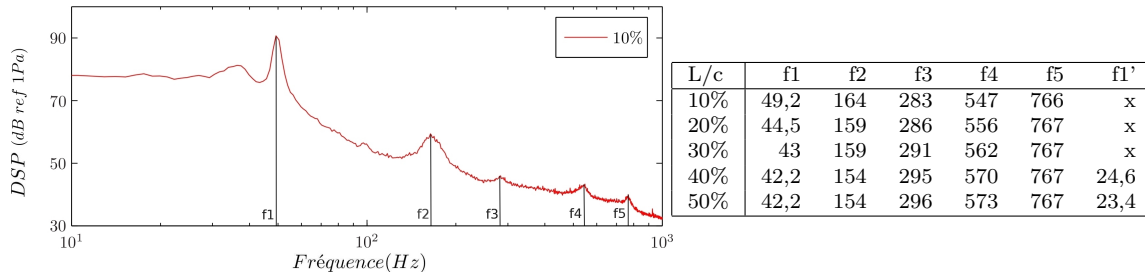


FIGURE 8 – Densité spectrale de la contrainte de Von Mises pour  $l/c=0,1$       TABLE 1 – Fréquences modales et f1' fréquence de poches

Pour une longueur relative de la poche de cavitation, supérieure à  $l/c = 30\%$ , un deuxième pic de fréquence prononcé apparaît (f1') à une fréquence inférieure à la fréquence f1. Ce pic a été identifié comme correspondant à la fréquence d'excitation liée à la pulsation de la poche Fig. 9.

On observe que la fréquence propre f1 diminue lorsque le développement de la poche de cavitation augmente de même que la première fréquence liée à la cavitation, f2. Les fréquences plus élevées liées à la cavitation, f3 et f4, augmentent avec le développement de la poche de cavitation. Pour les poches de cavitation développées à 40% et 50% de la corde, les pics s'élargissent. Cet élargissement suppose une augmentation de l'amortissement.

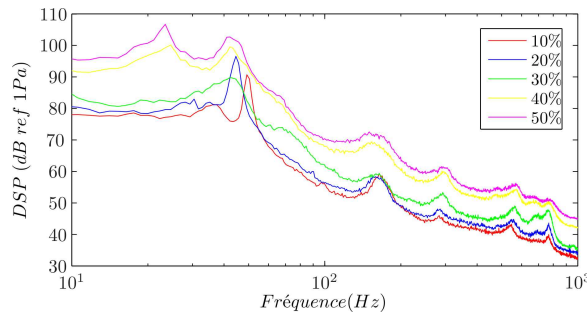


FIGURE 9 – Densité spectrale de la contrainte de Von Mises

Les fréquences obtenues par vibrométrie laser sont similaires à celles issues des jauges de contraintes Fig. 10. La présence d'une transition pour un développement de la poche de cavitation compris entre 20% et 30% est elle aussi visible Fig. 11

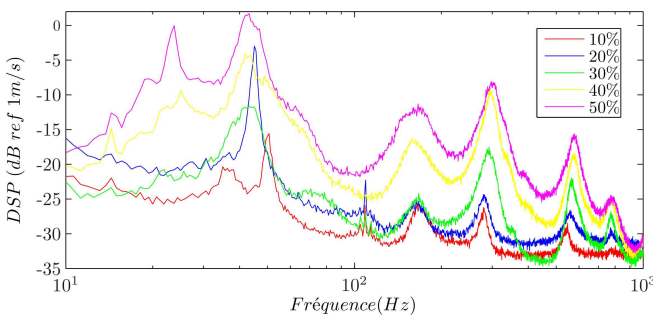


FIGURE 10 – Densité spectrale de vibration

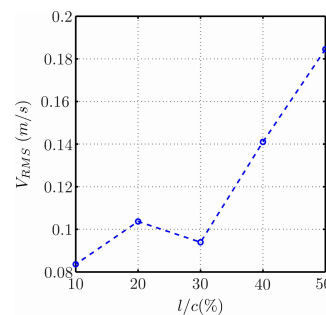


FIGURE 11 – Intensité de la fluctuation de vitesse vibratoire

## 5 Conclusions

Ce travail expérimental a permis de caractériser l'état local des déformations et des contraintes par extensométrie et le niveau vibratoire par vibrométrie laser, d'un hydrofoil souple soumis à un écoulement cavitant de type poche de cavitation. Les mesures extensométriques ont montré que les directions principales de déformations ou de contraintes font un angle d'environ  $9^\circ$  avec l'envergure et la corde et ont tendance à s'aligner suivant ces dernières quand la cavitation se développe (elles font un angle de  $8^\circ$  pour une poche de cavitation de l'ordre de 50% de la longueur de corde). Les amplitudes des contraintes principales montrent que l'hydrofoil est essentiellement soumis à une sollicitation de flexion et que celle-ci augmente lorsque la poche de cavitation croît. On note également l'existence d'une sollicitation en torsion plus faible et qui diminue avec le développement de la poche de cavitation. La contrainte de Von Mises augmente de 17% lorsque la longueur relative de la poche passe de 10% à 50%. On observe que l'intensité des fluctuations des contraintes augmente de façon significative lorsque la poche se développe. Concernant le comportement vibratoire de l'hydrofoil, il a été caractérisé par les densités spectrales des contraintes et les densités spectrales de vitesse vibratoire. On observe clairement sur les deux types de mesure la réponse modale de la structure à ses fréquences propres. Les spectres s'enrichissent en hautes fréquences avec une augmentation de la longueur de poche. On note que la fréquence du mode fondamental diminue mais que certaines fréquences propres ont tendance à augmenter avec le développement de la cavitation. On observe que les vibrations de l'hydrofoil sont marquées aux basses fréquences ( $< 50Hz$ ). On note également l'apparition d'un pic de fréquence prononcée ( $23Hz - 24Hz$ ) lorsque le développement de la poche dépasse la valeur  $l/c = 40\%$ , correspondant à la fréquence d'excitation liée à la pulsation de la poche. Les spectres semblent montrer également une augmentation de l'amortissement avec le développement de la cavitation.

## Références

- [1] Frédéric Caupin and Eric Herbert. Cavitation in water : a review. *Comptes Rendus Physique*, 7(9-10) :1000 – 1017, 2006. Nucleation.
- [2] R E A Arndt. Cavitation in fluid machinery and hydraulic structures. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 13(1) :273–326, 1981.
- [3] Christopher Earls Brennen. *Cavitation and Bubble Dynamics*. Oxford University Press, 1995.
- [4] J P Franc and J M Michel. Attached cavitation and the boundary layer : Experimental investigation and numerical treatment. *Journal of Fluid Mechanics*, 154 :63–90, 1985. cited By (since 1996) 42.
- [5] Jean-Baptiste Leroux, Olivier Coutier-Delgosha, and Jacques Andre Astolfi. A joint experimental and numerical study of mechanisms associated to instability of partial cavitation on two-dimensional hydrofoil. *Physics of Fluids*, 17(5) :052101, May 2005 2005.
- [6] E. Amromin and S. Kovinskaya. Vibration of cavitating elastic wing in a periodically perturbed flow : Excitation of subharmonics. *Journal of Fluids and Structures*, 14(5) :735 – 751, 2000.
- [7] M. Benaouicha, J. A. Astolfi, A. Ducoin, S. Frikha, and O. Coutier-Delgosha. A numerical study of cavitation induced vibration. *ASME Conference Proceedings*, 2010(49231) :35–42, 2010.
- [8] Antoine Ducoin, Francois Deniset, Jacques Andre Astolfi, and Jean-Francois Sigrist. Numerical and experimental investigation of hydrodynamic characteristics of deformable hydrofoils. *Journal of Ship Research*, 53 :214–226(13), December 2009.