

# Etude numérique et expérimentale du comportement hydroélastique d'un hydrofoil dans un écoulement cavitant

M. BENAOUICHA, A. DUCOIN, S. FRIKHA, J.A. ASTOLFI, H. DEBECDELIEVRE

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

## Résumé :

*Ce travail concerne une étude préliminaire relative à la modélisation numérique d'une structure déformable immergée dans un écoulement cavitant instationnaire. Un hydrofoil de type NACA66012 est considéré. Le calcul de la dynamique du fluide est basé sur un code volume finis 2D avec modèle de cavitation 1-fluide. Le calcul de la dynamique de la structure 3D, est réalisé avec le code éléments finis CASTEM. Le couplage est réalisé simplement par l'interpolation des efforts de pression aux noeuds de la structure calculés au préalable sur une section 2D de la structure rigide. Les résultats obtenus sont comparés à des résultats expérimentaux obtenus dans le tunnel hydrodynamique de l'Ecole Navale.*

## Abstract :

*The present work deals with the preliminary study of numerical modeling of a deformable structure immersed in an unsteady cavitating flow. A NACA66012 cambered hydrofoil type is considered. The 2D computational fluid dynamics is based on a single fluid model of cavitation. The 3D computational structure dynamics is carried out with the finite element code CASTEM. The results are compared with the experiments ones obtained from experimental study carried out in the hydrodynamic tunnel of the research institute of the French Naval Academy.*

**Mots clefs :** Couplage fluide-structure, cavitation, hydroélasticité

## 1 Introduction

Dans les écoulements liquides, la cavitation apparaît lorsque la pression descend en dessous de la pression de vapeur saturante. Elle peut être observée dans une grande variété de systèmes comme les pompes, les injecteurs et les propulseurs marins. Le développement de la cavitation peut être à l'origine de plusieurs effets négatifs comme le bruit, les chutes de performances, l'érosion et les vibrations.

Des études numériques de la cavitation ont été poursuivies pendant des années, mais il est toujours très difficile de prévoir de tels écoulements instables et complexes [1]. De plus, les travaux sur l'interaction fluide-structure dans les écoulements cavitant sont très rares.

L'objectif de ce travail est l'étude le comportement hydroélastique d'un hydrofoil immergé dans un écoulement cavitant. Cette étude est développée dans le cadre général de conception et de dimensionnement de structures marines. Le calcul de la dynamique du foil 2D est réalisé avec un code volumes finis 2D. Les chargements en pression issus du calcul fluide sont appliqués à la structure en considérant une répartition uniforme le long de l'envergure du foil. Le calcul de la dynamique de la structure 3D est réalisé dans le cadre de la théorie de l'élasticité dynamique linéaire. La méthode des éléments finis est utilisée pour la discrétisation spatiale et l'algorithme de Newmark pour la discrétisation en temps. Des essais ont été réalisés dans le tunnel de cavitation sur le même profil (NACA66 en POM, encasté d'un côté et libre de l'autre). Les résultats numériques obtenus ont été confrontés aux résultats issus de cette étude expérimentale.

## 2 Modélisation numérique de la cavitation :

Les calculs ont été réalisés sur une configuration 2D. Les calculs sont basés sur la modélisation 1-fluide de la cavitation : le mélange liquide/vapeur est considéré comme un fluide homogène à densité variable. Les équations de conservation (1) sont couplées à une loi d'état barotrope qui relie la densité du fluide à la pression locale [2].

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_F}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_F u) = 0 \\ \frac{\partial (\rho_F u)}{\partial t} + \nabla (\rho_F u^2) = \nabla \cdot \sigma_F \end{cases} \quad (1)$$

Les calculs 2D sont réalisés avec un code basé sur la discrétisation en volumes finis sur un maillage curviligne orthogonal bidimensionnel. La résolution numérique est basée sur une méthode de correction de pression dérivée de l'algorithme SIMPLE. Un schéma d'intégration temporelle précis à l'ordre 2 est appliqué. Un modèle de turbulence  $k - \epsilon - RNG$  modifié pour tenir compte du mélange liquide-vapeur, est appliqué. La viscosité turbulente est donnée par :

$$\mu_t = \frac{f(\rho_F)C_\mu k^2}{\epsilon} \quad \text{où } f(\rho_F) = \rho_v + (1 - \alpha)^n(\rho_l - \rho_v)$$

où  $\alpha$  est le taux de vide.  $n$  est pris égal à 10, cette valeur a été proposé par Coutier-Delgosha et al. 2006 [3]. Les conditions de frontière classiques pour des écoulements incompressibles sont appliquées : une vitesse imposée à l'entrée, et une pression fixée en sortie. Un maillage orthogonal de type 'C' est utilisé (FIG. 1). Un calcul 2D sur un foil de type NACA66 a été effectué en utilisant la loi barotrope de Delannoy [4] pour  $\sigma = 1.3$  et un angle d'incidence de  $8^\circ$ .

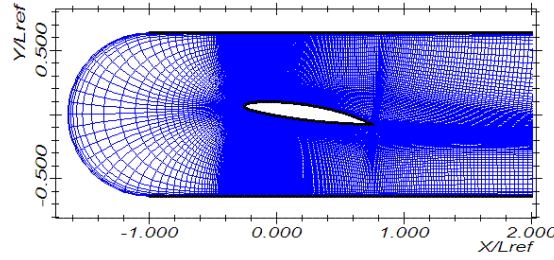


FIG. 1 – Maillage du domaine fluide, l'écoulement va de la gauche vers la droite

### 3 Modélisation numérique de la structure :

On note  $\Omega$  le domaine occupé par l'hydrofoile à l'équilibre et  $\mathbf{n}$  le vecteur unitaire normal à la surface extérieure à la frontière  $\partial\Omega = \partial\Omega_\xi \cup \partial\Omega_\sigma$  du domaine  $\Omega$ .  $\xi(M, t) = (\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  désigne le déplacement à un instant  $t$  du point  $M(x_1, x_2, x_3) \in \Omega$ .

On travaille dans le cadre de la théorie viscoélastique linéaire (modèle de Kelvin-Voigt). D'où

$$\sigma_S = \frac{E}{1 + \nu}\epsilon + \frac{E\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}Tr(\epsilon)I + \eta\dot{\epsilon} \quad (2)$$

où  $\epsilon = \frac{1}{2}(\nabla\xi + \nabla^t\xi)$  est le tenseur des déformations linéarisé,  $Tr$  est l'opérateur Trace,  $I$  est le tenseur identité et  $\eta$  le coefficient d'amortissement visqueux.  $\xi$  vérifie les équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \rho_S \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \nabla \cdot \sigma_S + f_v & \text{sur } \Omega \\ \xi = 0 & \text{sur } \partial\Omega_\xi \\ \sigma_S \cdot \mathbf{n} = \sigma_F \cdot \mathbf{n} & \text{sur } \partial\Omega_\sigma \\ \xi(\cdot, 0) = 0 & \text{sur } \Omega \\ \dot{\xi}(\cdot, 0) = 0 & \text{sur } \Omega \end{array} \right. \quad (3)$$

#### 3.1 Résolution numérique

La méthode des éléments finis est utilisée pour la discrétisation spatiale du problème. La forme discrète des équations (3) est donnée par :

$$\mathbf{M}\ddot{X} + \mathbf{C}\dot{X} + \mathbf{K}X = \mathbf{F} \quad (4)$$

où  $X, \dot{X}, \ddot{X} \in \mathbf{R}^N$  représentent respectivement les valeurs de  $\xi, \frac{\partial\xi}{\partial t}, \frac{\partial^2\xi}{\partial t^2}$  aux  $N$  noeuds du maillage.  $\mathbf{M}, \mathbf{C}$  et  $\mathbf{K}$  sont respectivement les  $N \times N$  matrices de masse, d'amortissement et de rigidité et  $\mathbf{F}$  est le vecteur des efforts.

L'algorithme centré de Newmark [5] est utilisé pour la discrétisation en temps du problème.

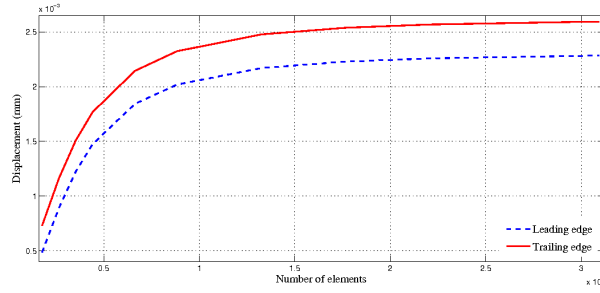


FIG. 2 – Influence du maillage sur les déformations du foil

$$\begin{aligned} X_{n+1} &= X_n + \Delta t_S \dot{X}_n + \frac{\Delta t_S^2}{2} \ddot{X}_n \\ \dot{X}_{n+1} &= \dot{X}_n + \frac{\Delta t_S}{2} \ddot{X}_n + \frac{\Delta t_S}{2} \ddot{X}_{n+1} \end{aligned} \quad (5)$$

Ainsi, le problème final est réduit à l'inversion du système des équations linéaire suivant :

$$\begin{aligned} (\mathbf{M} + \frac{\Delta t_S}{2} \mathbf{C}) \ddot{X}_{n+1} &= \mathbf{F} - \mathbf{C}(\dot{X}_n + \frac{\Delta t_S}{2} \ddot{X}_n) \\ &- \mathbf{K}(X_n + \Delta t_S \dot{X}_n + \frac{\Delta t_S^2}{2} \ddot{X}_n) \end{aligned} \quad (6)$$

Pour la résolution numérique, le code éléments finis CASTEM est utilisé[6]. Des éléments 3D linéaires ( $\mathbf{Q}_1$ ) sont utilisés pour le maillage du foil. Les matrices de masse et de raideur sont déterminées par les caractéristiques matérielles et géométriques du foil. La matrice d'amortissement est déterminé par le choix du coefficient d'amortissement visqueux ( $\eta$ ) de telle façon que la solution instationnaire converge sans oscillations vers l'état stationnaire sous un chargement constant. L'écoulement, décrit dans la section ci-dessus, est considéré comme bi-dimensionnel autour d'un hydrofoil 2D fixe (FIG. 1). Le chargement fluide (en pression) issu du calcul fluide est donné par :  $P_F(t) = \sigma_F \cdot \mathbf{n}$ . Ce chargement est appliqué, après interpolation, à chaque section transversale le long de l'envergure de l'hydrofoil 3D.

### 3.1.1 Cas stationnaire

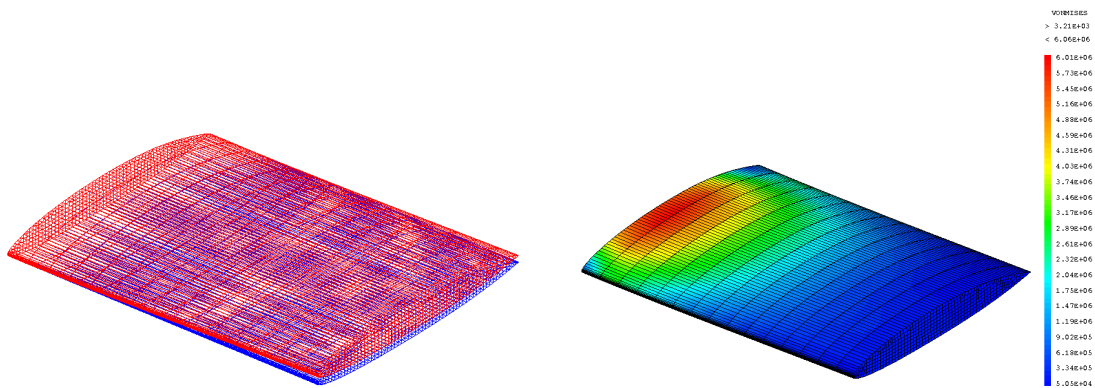


FIG. 3 – Déformation de l'hydrofoil (à gauche). Tension de von-Mises (à droite)

Dans ce cas, les moyennes temporelles des pressions sont considérées :

$$\langle P_F \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T P_F(t) dt$$

La figure (FIG. 2) montre l'influence du maillage sur la déformation de la structure. L'augmentation du nombre de noeud devient sans influence à partir de ( $N > 30000$ ). Dans la suite des calculs, on prend  $N = 30940$ . Les figures (FIG. 3) illustrent les déformations et les tensions de von-Mises de l'hydrofoil. On peut observer que le déplacement maximal se situe à l'extrémité libre du foil et que les contraintes sont maximales à l'emplanture.

### 3.1.2 Cas instationnaire

Dans ce cas, les pressions instantanées issues du calcul fluide  $P_F(t)$  sont appliquées à la structure avec un pas de temps  $\Delta t_S = 10 \Delta t_F = 1.41 \cdot 10^{-3} s$ .

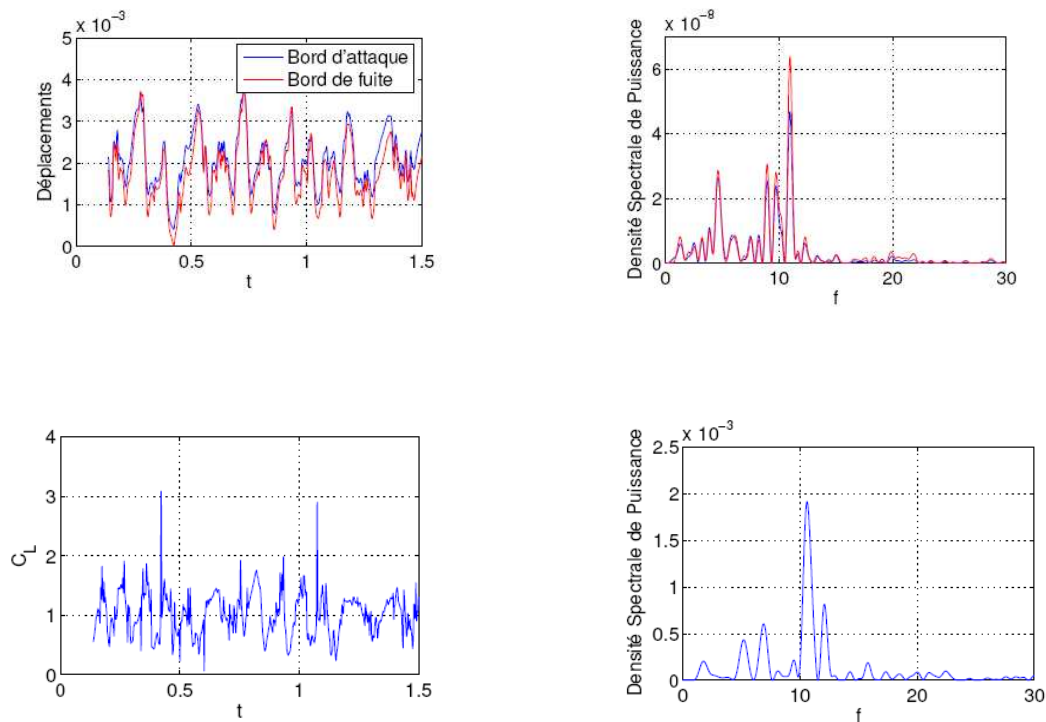


FIG. 4 – Variations temporelles du coefficient de portance et du déplacement du bord d'attaque et du bord de fuite de l'hydrofoil et leurs densités spectrales.

On montre (FIG. 4) les variations temporelles et les densités spectrales du coefficient de portance, obtenues par le calcul fluide et les déformations correspondantes de l'hydrofoil (déplacement du bord d'attaque et du bord de fuite), obtenues avec le calcul structure. Le régime d'écoulement est celui d'une poche de cavitation pulsante de grande dimension ( $l/c = 0.8$ ) caractérisée par un pic principal aux environs de  $11 Hz$  visible sur le spectre de portance et un pic secondaire sous-harmonique aux alentours de  $5 Hz$ . On observe une bonne correspondance entre les spectres de déplacements de la structure et les variations du chargement fluide exercé sur le foil. On voit que la fréquence caractéristique des déplacements de la structure est égale à la fréquence des oscillations des poches de cavitation. On notera que la sous-harmonique aux environs de  $5 Hz$  est nettement visible sur les spectres de déplacements.

## 4 Etude expérimentale et comparaison des résultats :

### 4.1 Protocole expérimental

Les essais ont été réalisés par Ducoin [7] dans le tunnel de cavitation de l'Ecole Navale. Un foil NACA66 en polyacétate (POM) est monté horizontalement dans le tunnel (FIG. 5). Le module de Young du matériau vaut  $E = 3 GPa$  et le coefficient de poisson est  $\nu = 0.35$ . La densité du matériau est  $\rho_S = 1480 kg/m^3$ . Une caméra numérique à haute cadence a été utilisée pour filmer la section libre de l'hydrofoil au cours de son mouvement. Une méthode de traitement d'images a été spécifiquement développée pour reconstituer le déplacement vertical au cours du temps d'un point quelconque de la section libre de l'hydrofoil. Elle est fondée sur une technique de gradient et de détection de front. Une série d'image a été enregistrée à une fréquence de  $2 kHz$ . La précision de la méthode est de 2 pixels. La corde du foil fait 2056 pixels correspondant à  $150 mm$ , 1 pixel représente  $0.07 mm$  et l'incertitude de la mesure du déplacement vaut donc  $0.14 mm$  qui correspond aussi à la résolution de la méthode de mesure. Les déplacements au dessous de cette valeur ne sont pas détectés. Les essais et les calculs ont été réalisés à une vitesse de  $5.33 m/s$  correspondant à un nombre de Reynolds de  $0.8 \cdot 10^6$ , une incidence de  $8^\circ$  et un nombre de cavitation  $\sigma = 1.4 \pm 0.1$ .

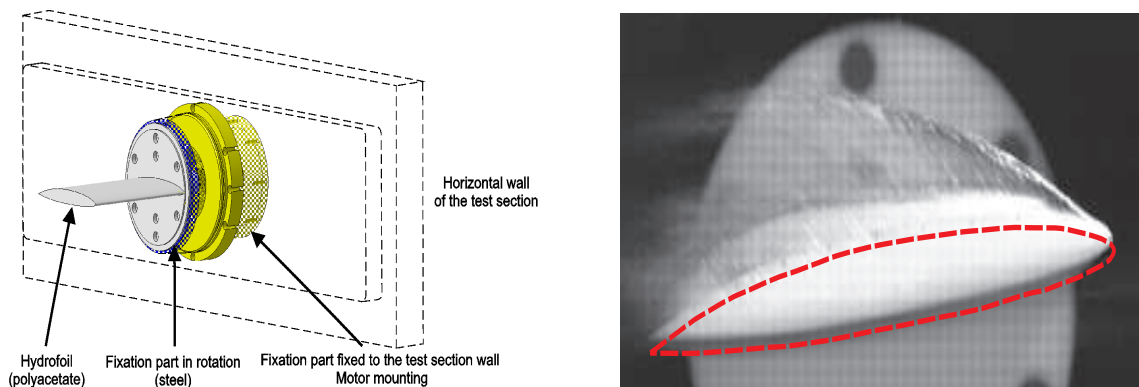


FIG. 5 – Montage expérimental (à gauche). Mesure des déplacements de la section du foil (à droite)

## 4.2 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

Dans cette section, les résultats numériques et expérimentaux sont comparés. On s'intéresse particulièrement aux déplacements de la section libre d'extrémité de l'hydrofoil au bord d'attaque et au bord de fuite. Les figures (FIG. 6) représentent les déplacements temporels du bord d'attaque et du bord de fuite de la section libre obtenus numériquement et expérimentalement avec un recalage en temps fondé sur le passage par un maximum. On observe un bon accord qualitatif entre le calcul et l'expérience. Globalement dans les deux cas, le foil est animé d'un mouvement oscillatoire à la même fréquence que celle des oscillations de la poche de cavitation : les déplacements verticaux augmentent quand la cavité se développe sur l'extrados et chute rapidement lorsque la cavité implose. Ce phénomène périodique n'est pas parfaitement sinusoïdale et peut conduire à des oscillations secondaires harmoniques ou sous-harmoniques de la fréquence d'oscillation principale. On pourra cependant noter que les déplacements expérimentaux font apparaître en plus des oscillations plus hautes fréquences.

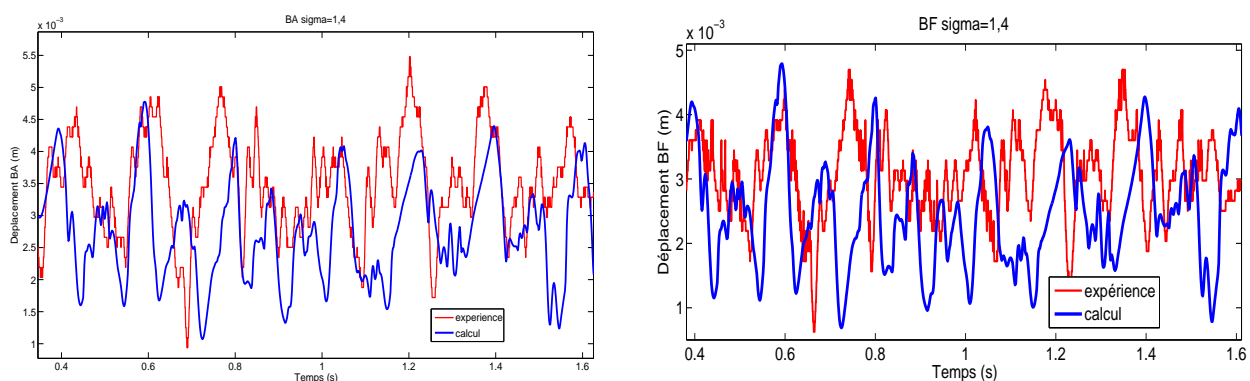


FIG. 6 – Déplacements du bord d'attaque (à gauche) et du bord de fuite (à droite). Résultats numériques (bleu) et expérimentaux (rouge)

D'autre part, l'intensité des déplacements instantanées du bord d'attaque et du bord de fuite sont très voisines montrant que l'hydrofoil ne subit pas de torsion instationnaire significative dans le cas des poches de cavitation pulsante. Du point de vue quantitatif, on obtient une valeur moyenne (sur une durée d'environ 1 seconde) pour le déplacement du bord d'attaque de  $3.4 \text{ mm}$  dans l'expérience contre  $2.7 \text{ mm}$  dans le calcul. De même pour le bord de fuite on trouve un déplacement moyen de  $3 \text{ mm}$  dans l'expérience contre  $2.4 \text{ mm}$  pour le calcul. L'intensité des fluctuations de déplacement vertical est de  $0.73 \text{ mm}$  (resp.  $0.557 \text{ mm}$ ) dans l'expérience pour le bord d'attaque (resp. bord de fuite) à comparer avec  $0.62 \text{ mm}$  (resp.  $0.921 \text{ mm}$ ), pour le calcul. Les densités spectrales de déplacement (FIG. 7) montrent clairement la réponse spectrale de la structure dans le cas expérimental et numérique. On observe un accord satisfaisant entre les deux spectres. On note cependant que la fréquence principale aux alentours de  $11 \text{ Hz}$  est nettement atténué dans le cas expérimental par comparaison au calcul. On observe également expérimentalement une remontée spectrale aux alentours de  $40 \text{ Hz}$  correspondants aux premiers modes de flexion de l'hydrofoil immergé.

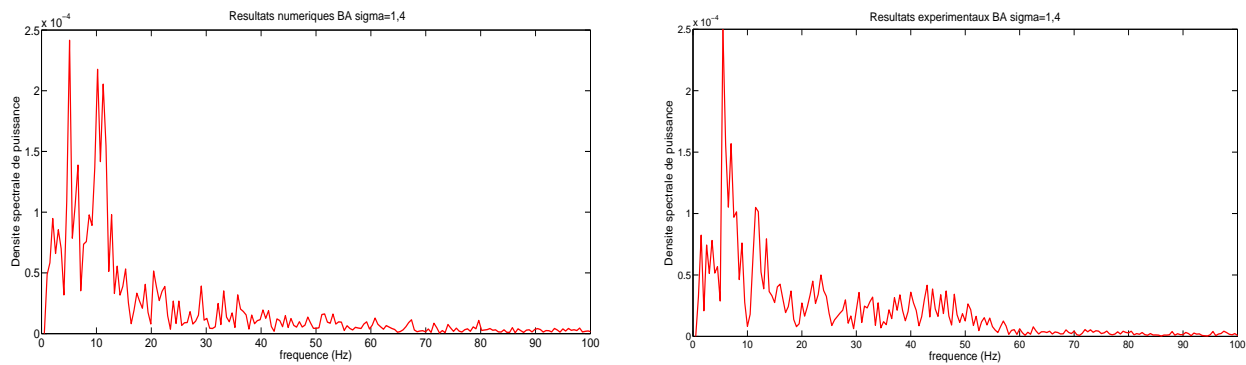


FIG. 7 – Densité spectrale du déplacement du bord d’attaque. Numérique (à gauche) et expérimentale (à droite)

## 5 Conclusion :

Ce travail a permis d’initier une étude numérique et expérimentale relative au couplage entre un écoulement turbulent cavitant instable (de type cavitation par poches pulsantes) et une structure déformable linéaire. Les calculs fluide  $2D$  sont réalisés avec un code basé sur la discrétisation en volumes finis des équations RANS et un modèle de turbulence  $k - \epsilon - RNG$  modifié pour tenir compte du mélange liquide-vapeur. La structure est supposée linéaire et résolue par la méthode des éléments finis. Le couplage fluide-structure est faible au sens où il est fondé sur le transfert et l’interpolation vers la structure du chargement fluide calculée initialement en écoulement  $2D$  sur une structure rigide. Du point de vue hydrodynamique, les résultats obtenus (longueur caractéristique de la poche de cavitation, fréquence principale d’oscillation) sont en bon accord avec les observations expérimentales. Des visualisations de la déformation de la structure par vidéo numérique à haute cadence et une méthode de traitement d’images développés au laboratoire ont permis de mesurer la dynamique de la structure avec une relative bonne précision. Vu la complexité de l’écoulement et malgré le couplage faible, les résultats numériques montrent un bon accord avec les résultats expérimentaux aussi bien dans le cas statique que dans le cas dynamique. On observe cependant une réponse plus importante à la fréquence principale d’excitation dans le cas numérique que l’on peut attribuer à l’hypothèse de couplage faible.

## Références

- [1] Leroux J., Coutier-Delgosha O., and Astolfi J. A joint experimental and numerical study of mechanisms associated to instability of partial cavitation on two-dimensional hydrofoil. *Physics of Fluids*, 17, 052101, 2005.
- [2] Frikha S., Coutier-Delgosha O., and Astolfi J.-A. Influence of the cavitation model on the simulation of cloud cavitation on 2d foil section. *International Journal of Rotating Machinery*, 2008, 2008.
- [3] Coutier-Delgosha O., Stutz B., Vabre A., and Legoupil S. Experimental study of the cavitation flow on a 2d hydrofoil by x-ray absorption. *Sixth International Symposium on cavitation CAV2006*, Wageningen, The Netherlands, 2006.
- [4] Delannoy Y. and Kueny J.-L. Cavity flow predictions based on the euler equations. *ASME Cavitation and Multi-Phase Flow Forum*, 109, 153–158, 1990.
- [5] Kane C., Marsden J., Ortiz M., and West M. A preliminary evaluation of carbon fiber reinforced polymer plates for strengthening reinforced concrete members. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 49(10), 1295–1325, 2000.
- [6] Le Fichoux E. Présentation et utilisation de CASTEM 2000. ENSTA-LME (<http://www-cast3m.cea.fr>), 1998.
- [7] Ducoin A. Etude expérimentale et numérique du chargement hydrodynamique des corps portants en régime transitoire avec prise en compte du couplage fluide structure. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes/Ecole Navale, ED SPIGA, Novembre 2008.