

Structures Compliantes Composites sous Chargement Hydrodynamique

**F. MOHAMMED ARAB^a, B. AUGIER^b, F. DENISET^a, P. CASARI^c, J-A.
ASTOLFI^a**

a. Institut de Recherche de l'Ecole Navale IRENav EA 3634, Brest.

fatiha.mohammed_arab@ecole-navale.fr

francois.deniset@ecole-navale.fr

jacques-andre.astolfi@ecole-navale.fr

b. IFREMER de Brest.

Benoit.Augier@ifremer.fr

c. Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM) de Saint-Nazaire.

pascal.casari@univ-nantes.fr

Résumé :

Dans ce travail, une étude expérimentale collaborative a été menée afin d'évaluer l'effet de la pression imposée dans la cavité interne d'un hydrofoil déformable en matériaux composites sur ses performances hydrodynamiques. On s'attend à ce que la pression dans la cavité ainsi que les structures composites permettent de contrôler les forces hydrodynamiques. Un nouveau concept d'hydrofoil déformable a été fabriqué par le GeM à Saint-Nazaire et testé dans le tunnel de cavitation de l'Institut de Recherche de l'Ecole Navale. Les expériences ont été basées sur la mesure des forces hydrodynamiques et des déformations de l'hydrofoil dans diverses conditions de pression dans la cavité. Parallèlement à ces expériences, un outil numérique 2D a été développé afin d'aider à la conception des hydrofoils. Numériquement, le couplage fluide-structure est basé sur une méthode itérative avec l'hypothèse de petites perturbations en couplant le code potentiel-couche limite pour la partie fluide et le code éléments finis pour la partie structure. Il a été montré que l'hydrofoil déformable en composite et piloté par la pression dans sa cavité est adapté dans une certaine mesure au contrôle des forces hydrodynamiques et permet d'élargir son domaine de fonctionnement en fonction de l'angle d'attaque et de la pression dans la cavité.

Abstract :

In this work a collaborative experimental study is conducted in order to assess the effect of an imposed cavity pressure on the hydrodynamic performance of a compliant composite hydrofoil. It is expected that the cavity pressure together with the composite structures is suitable to control the hydrodynamic forces. A new concept of morphing hydrofoil is manufactured by the GeM at Saint-Nazaire and tested in the cavitation tunnel at the French Naval Academy Research Institute. The experiments are based on the measurements of hydrodynamic forces and hydrofoil deformations under various conditions of cavity pressure. In parallel to this experiment, a 2D numerical tool is developed in order to help to design new hydrofoil shapes. Numerically, the fluid structure coupling is based on an iterative method under

small perturbation hypothesis by coupling the potential-boundary layer code for the fluid and the finite-element solver for the structure. It is shown that internal pressure driven compliant composite structure is suitable to some extent to control the hydrodynamic forces permitting to enlarge the operating domain of the compliant hydrofoil according to the angle of attack and the cavity pressure.

Mots clefs : Hydrofoils, matériaux composites, cavitation, morphing, smart-structure, IFS

1 Introduction

Le transport maritime représente 90% du transport mondial de marchandises d'où la demande de réduction de la consommation des navires et des émissions de CO_2 qui devient de plus en plus forte [1]. Compte tenu de la nécessité d'améliorer les performances, le confort et la stabilité des navires pour différentes conditions de fonctionnement, l'utilisation d'hydrofoils et de pales d'hélice innovantes ouvre des perspectives d'amélioration. Pour un hydrofoil, l'amélioration de ses performances hydrodynamiques nécessite de modifier sa forme et de la rendre adaptable à ses conditions de fonctionnement, d'où l'idée de recourir à l'utilisation de structures déformables [9].

En aérodynamique, l'utilisation de foils déformables a fait ses preuves avec l'étude des systèmes de contrôle de forme (passifs ou actifs) ainsi que l'effet des paramètres géométriques des foils sur leurs performances ([5] et [11]), mais en hydrodynamique ces études sont moins avancées. Jusqu'à présent, la plupart des recherches sont basées sur l'optimisation des hydrofoils en utilisant les matériaux composites afin d'améliorer leurs performances ([4], [6] et [12]). L'Institut de Recherche de l'Ecole Navale s'intéresse aux structures flexibles dans les écoulements subcavitants mais aussi dans les écoulements cavitants. L'interaction fluide structure a été analysée expérimentalement en étudiant la réponse structurelle des profils portants flexibles sous différentes conditions d'écoulement incluant les écoulements cavitants ([3] et [2]). Un outil d'optimisation de la conception de forme et des caractéristiques d'un hydrofoil équipé d'un bord de fuite déformable a été développé au sein de l'institut ([8]).

L'Institut de Recherche de l'Ecole Navale, l'Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique et IFREMER ont initié un programme de recherche sur les hydrofoils déformables pour des applications navales. L'objectif est de caractériser un hydrofoil déformable en composite et pilotable grâce au contrôle de la pression dans sa cavité intérieure en ce qui concerne les forces de portance et de traînée. Ce travail présente une étude expérimentale réalisée dans le tunnel hydrodynamique de l'IRENav sur un hydrofoil composite fabriqué au GeM à Saint-Nazaire. Cet hydrofoil est d'abord testé en air afin d'évaluer l'effet de la pression dans la cavité sur ses déformations au moyen d'un système de corrélation d'images numériques (DIC-3D). Ensuite, l'hydrofoil est testé dans le tunnel de cavitation de l'IRENav où le coefficient de portance et les déformations de l'hydrofoil ont été mesurés. Conformément aux expériences, une approche numérique basée sur un algorithme de couplage fluide-structure a été développée. L'article décrit la configuration expérimentale ainsi que l'algorithme numérique IFS et présente les principaux résultats.

2 Dispositif expérimental

L'hydrofoil en composite a été fabriqué à l'Institut de recherche en Génie Civil et Mécanique (figure 2) et a été testé dans le tunnel de cavitation de l'IRENav (figure 1). La veine d'essai mesure 1 m de long et sa section est carrée de côté 192 mm. La vitesse d'entrée varie entre 0.5 et 12 m/s et la pression dans la veine d'essai du tunnel varie entre 0.1 et 3 bar pour contrôler l'apparition de la cavitation. La section de base de l'hydrofoil est celle du NACA 0012, avec une corde de 0.15 m, une épaisseur relative de 12% et une envergure de 0.191 m. Il est fixé en porte-à-faux dans la veine sur un axe cylindrique en aluminium à un quart de corde adapté à l'équilibre hydrodynamique. L'hydrofoil est composé d'une paroi flexible constituée de trois plis de carbone/époxy orientés à 0°/90°. Cette paroi a un bord d'attaque et un bord de fuite plus fins. Ces deux parties sont composées de deux plis : premier en carbone/époxy [0°/90°] et le second en fibre de verre orienté à 45°. La paroi de dessous est plus rigide. Elle se compose de cinq plis de carbone/époxy avec des orientations à 0° et 90°. L'hydrofoil possède aussi une cavité interne mise en dépression et contrôlée par un vérin pneumatique (figure 3). La quantité ΔP représente la baisse de pression par rapport à la pression atmosphérique de référence. ΔP croissant signifie que la pression à l'intérieur de la cavité diminue.

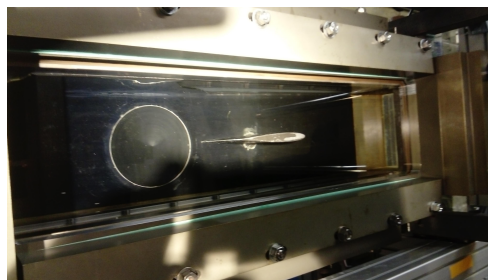


FIGURE 1 – Veine d'essai du tunnel de cavitation de l'IRENav avec l'hydrofoil déformable en composite.

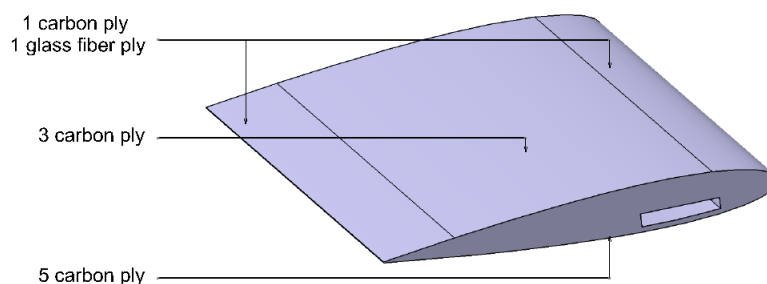


FIGURE 2 – Géométrie de l'hydrofoil compliant composite.

Afin d'évaluer l'effet de la pression dans la cavité sur les déformations de l'hydrofoil en composite, le déplacement le long de la corde a été mesuré en air à l'aide du système de corrélation d'images numériques (DIC-3D) du GeM (4). Cette méthode est sans contact et convient particulièrement aux matériaux flexibles. Elle est basée sur la comparaison de deux images numériques caractéristiques de la surface de l'hydrofoil avant et après déformation. Le système se compose de deux caméras qui permettent de mesurer la déformation de la surface de l'hydrofoil. Afin de produire des détails fins et exploitables, un motif de peinture aléatoire a été appliqué à la surface de l'hydrofoil. En plus de ces essais, la déformation

à une position précise ($X/c = 0.33$, $Z/c = 0.63$) a été mesurée à l'aide d'un palpeur micrométrique pour différentes pressions dans la cavité.

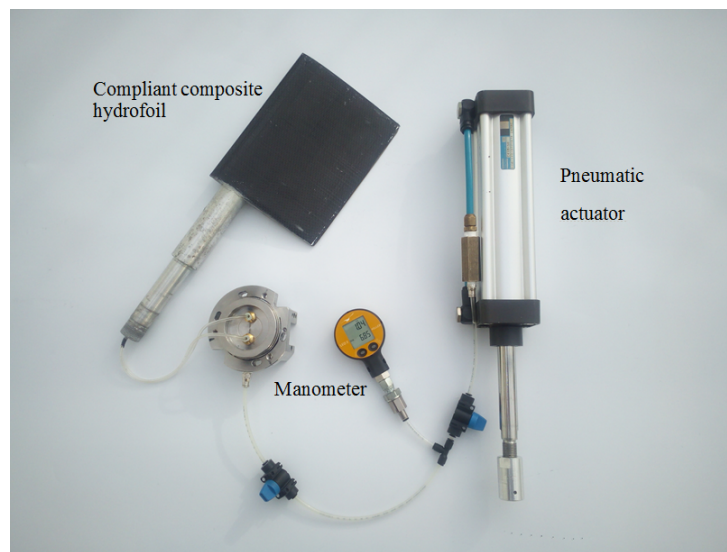


FIGURE 3 – Système de contrôle de pression dans la cavité de l'hydrofoile déformable avec le vérin pneumatique.

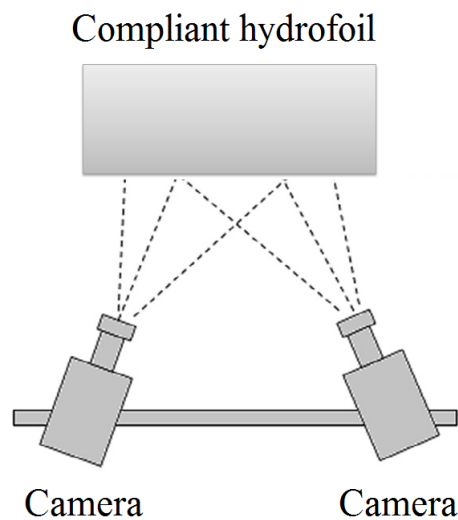


FIGURE 4 – Schéma du système de corrélation d'images numériques (DIC-3D) du GeM (Saint-Nazaire).

Lors des essais en tunnel hydrodynamique, la déformation statique a été mesurée à l'aide d'un télémètre laser monté sur un système de translation 2D placé au-dessus de la veine d'essai. Ce système permet de scanner la surface de l'hydrofoile pour une condition d'écoulement donnée le long de différentes sections selon l'envergure. Dans ce cas, neuf sections équidistantes de l'emplanture à la section libre sont sélectionnées. Ensuite, la déformation a été obtenue en comparant les balayages entre deux pressions dans la cavité. Les forces hydrodynamiques ont été mesurées à l'aide de la balance hydrodynamique dans différentes conditions de pression dans la cavité et une vitesse d'écoulement de 5 m/s qui correspond à un nombre de Reynolds de $0.75 \cdot 10^6$.

3 Algorithme de couplage fluide-structure

L'approche numérique a consisté à créer un modèle IFS 2D pour étudier l'effet de la pression dans la cavité interne sur la réponse structurelle des sections de l'hydrofoil déformable ainsi que son impact sur les performances hydrodynamiques. Le code potentiel-couche limite Xfoil [7] a été couplé avec le code éléments finis ANSYS-Mechanical à l'aide d'un algorithme écrit en langage Python. Cet algorithme IFS est basé sur une méthode itérative de chaînage entre les deux solveurs et sous l'hypothèse de petites perturbations. La figure 5 décrit l'algorithme de couplage fluide-structure.

L'algorithme IFS est initialisé par un calcul structure pour lequel l'hydrofoil ($i = 1$) n'est soumis qu'à une pression dans sa cavité. Les déplacements obtenus conduisent à un nouvel hydrofoil ($i = i + 1$). Ensuite, l'écoulement visqueux autour de ce nouveau foil est résolu. La pression hydrodynamique externe résultant de la distribution de C_p est appliquée pendant la résolution de la structure. Le problème est résolu par une méthode itérative jusqu'à ce que la convergence sur le déplacement maximal et le coefficient de portance C_L soit atteinte. La convergence vers l'équilibre de l'hydrofoil est obtenue après un nombre restreint d'itérations (3 à 4) montrant que la méthode développée dans ce travail présente un avantage par rapport aux méthodes avancées CFD-CSD qui nécessitent des temps de calcul très importants.

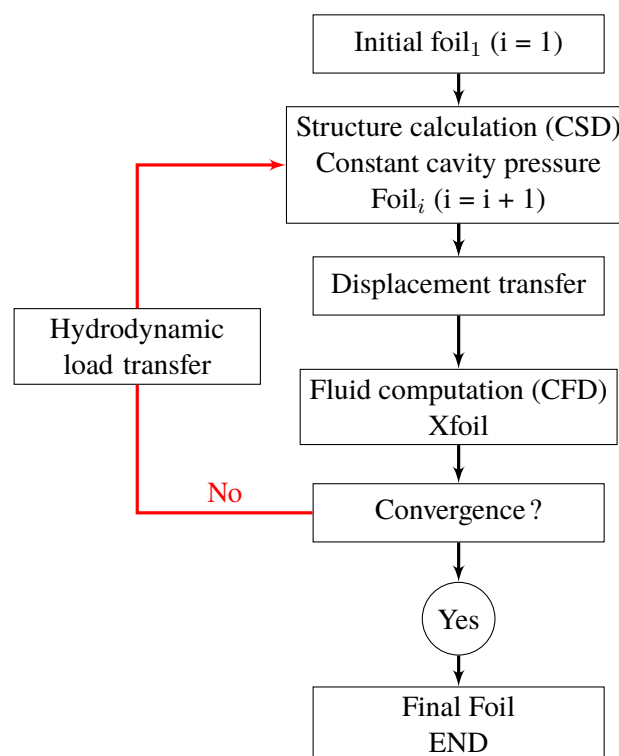


FIGURE 5 – Algorithme de couplage fluide-structure avec imposition d'une pression dans la cavité.

Dans une première approche, l'hydrofoil est modélisé par un matériau homogène équivalent. Sur la base des mesures du déplacement pour différentes pressions dans la cavité, le module d'Young équivalent utilisé dans le calcul a été fixé à $E = 70000 \text{ MPa}$ et le coefficient de Poisson équivalent à $\nu = 0.34$.

La figure 6 présente la forme initiale et la déformée de l'hydrofoil à un angle d'attaque de 3° , $Re = 0,75 \cdot 10^6$ et une pression dans la cavité imposée de 0.24 bar . Le déplacement maximal calculé de l'hydrofoil est 3.3% de la corde.

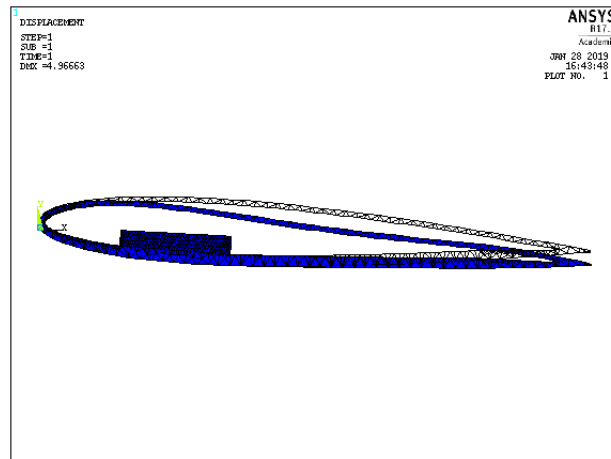


FIGURE 6 – Géométrie initiale et déformée de l’hydrofoil à la première itération, $\Delta P = 0.24 \text{ bar}$, $\alpha = 3^\circ$ et $Re = 0.75 \cdot 10^6$.

4 Résultats et discussion

L’effet de la pression imposée dans la cavité sur les déformations de l’hydrofoil a été étudié à l’aide de la corrélation d’images numériques (DIC-3D). Le champ de déplacement est représenté en fonction des coordonnées de l’hydrofoil (figure 7) pour une pression dans la cavité $\Delta P = 0.415 \text{ bar}$. On remarque que le déplacement maximal est de 8.06 mm ($5.3\% c$). La déformation n’est pas uniforme dans le sens de l’envergure en raison des conditions aux limites différentes à l’emplanture et à l’extrémité libre.

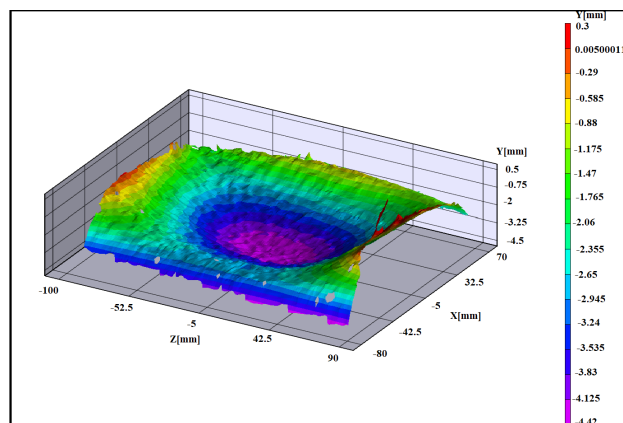


FIGURE 7 – Champ de déplacement obtenu par la DIC-3D, $\Delta P = 0.415 \text{ bar}$.

Le déplacement maximal en fonction de la corde de l’hydrofoil a été extrait à $Z/c = 0.55$ et représenté en figure 8. Cette figure met en évidence les résultats du champ de déplacement 3D représenté en figure 7.

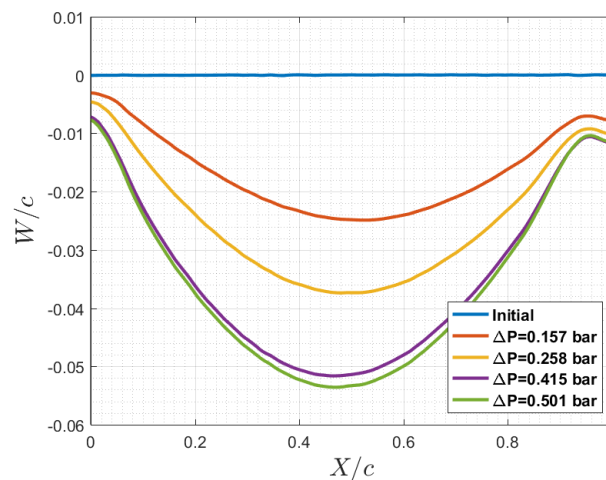


FIGURE 8 – Déplacement expérimental de l’hydrofoil composite en fonction de la corde et de la pression dans la cavité à $Z/c = 0.55$ lors des essais en air libre.

Les déformations de l’hydrofoil sont également mesurées par contact à une position caractérisée par $X/c = 0.33$ et $Z/c = 0.63$ à l’aide d’un palpeur micrométrique. Les résultats de ces mesures sont comparés à ceux de la simulation numérique et aux résultats obtenus par le système de mesures DIC-3D au même endroit (figure 9).

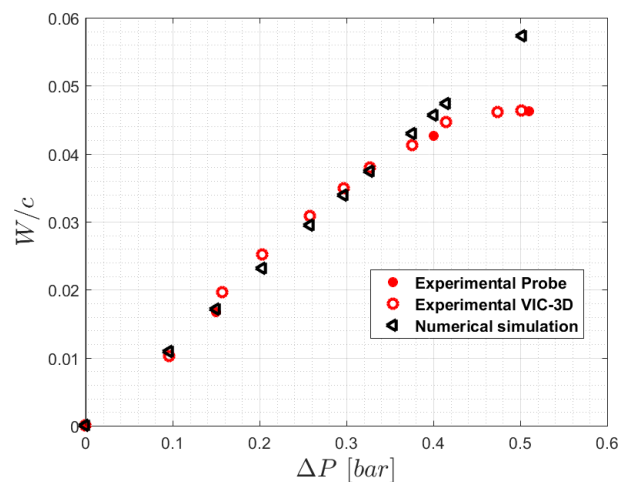


FIGURE 9 – Mesure et prédiction numérique du déplacement de l’hydrofoil à $X/c = 0.33$ et $Z/c = 0.63$ lors des essais en air libre.

On remarque que le déplacement est linéaire pour une pression dans la cavité allant jusqu’à $\Delta P = 0.4 \text{ bar}$ et atteint une valeur limite d’environ $0.045c$. Les résultats numériques sont en bon accord avec les résultats expérimentaux pour une pression dans la cavité allant jusqu’à $\Delta P = 0.4 \text{ bar}$, ce qui montre que le modèle homogène équivalent est assez cohérent avec les expériences. Au-delà de $\Delta P = 0.4 \text{ bar}$, la déformation numérique augmente linéairement sans présenter de saturation.

La déformation de l’hydrofoil est maintenant analysée à l’aide du télémètre laser dans le tunnel hydrodynamique pour une vitesse d’écoulement de 5 m/s . La déformation de la section à mi-envergure sous $\Delta P = 0.24 \text{ bar}$ a été extraite et comparée à la déformation prédite par les calculs. Comme le montre la

figure 10, les déplacements expérimentaux et numériques ont la même tendance, à l'exception du bord de fuite où une différence significative a été observée. Cette différence est due à la torsion de l'hydrofoil composite lors des expériences et qui n'est pas observée avec le calcul 2D lors de l'étude numérique.

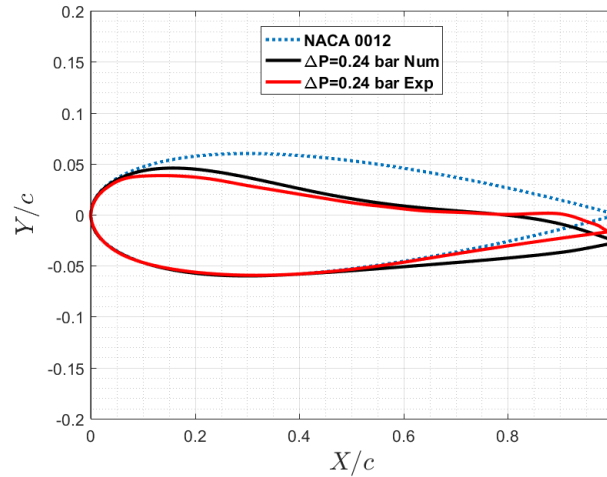


FIGURE 10 – Géométrie expérimentale et numérique de la section de l'hydrofoil, $\Delta P = 0.24$ bar et $V = 5$ m/s.

Les forces hydrodynamiques pour différentes pressions dans la cavité sont présentées en figures 11.a et 11.b. On rappelle que l'augmentation de ΔP signifie que la pression à l'intérieur de la cavité diminue. On remarque que le coefficient de portance se décale vers le haut au fur et à mesure que ΔP augmente avec un léger changement de pente.

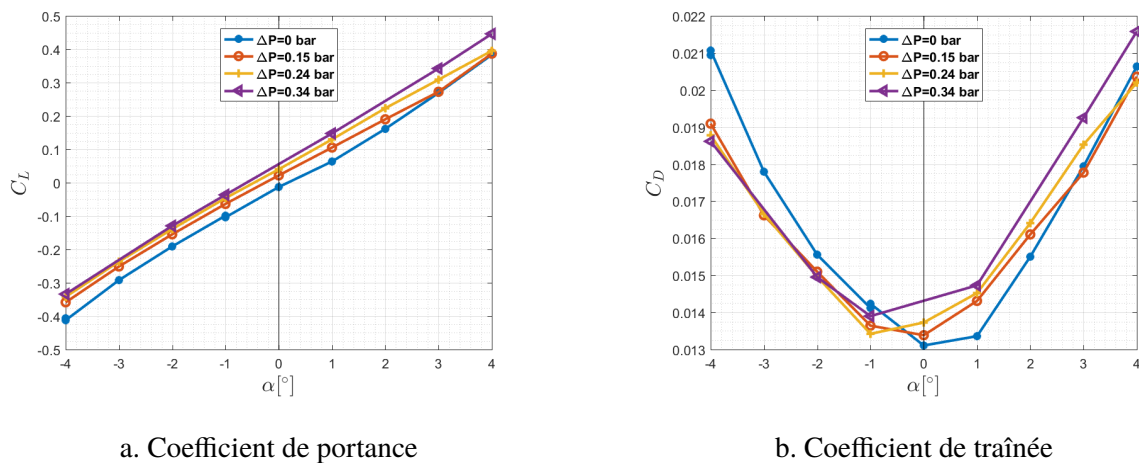
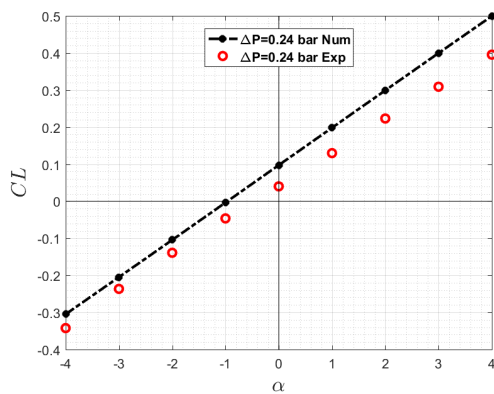
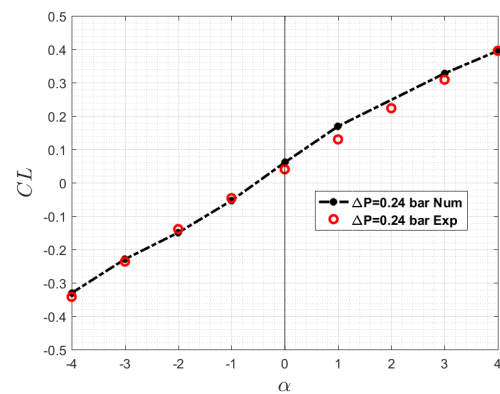


FIGURE 11 – Coefficients de portance et de traînée expérimentaux en fonction de l'angle d'attaque et de la pression dans la cavité à $Re = 0.75 \cdot 10^6$.

La figure 12.a montre les coefficients de portance expérimental et numérique obtenu avec l'algorithme IFS. On remarque que le coefficient de portance prédit par le calcul est en bon accord avec les mesures mais il s'écarte progressivement de l'expérience avec l'augmentation de l'angle d'attaque. La raison de ces écarts peut trouver son explication dans l'analyse de la forme de l'hydrofoil.



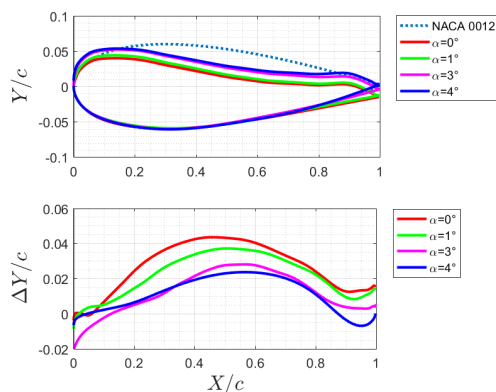
a. Calcul IFS sur l'hydrofoil déformable en composite



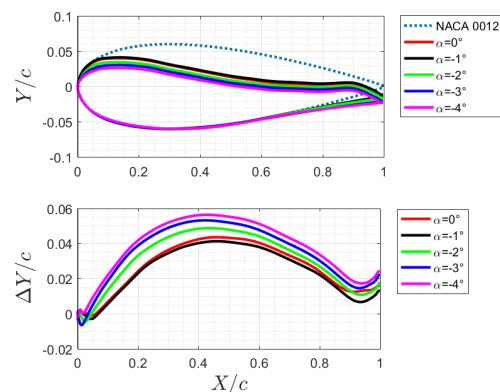
b. Calcul IFS sur les sections expérimentales à mi-envergure

FIGURE 12 – Coefficients de portance expérimental et numérique en fonction de l'angle d'attaque pour une pression de la cavité $\Delta P = 0.24 \text{ bar}$ et $Re = 0.75 \cdot 10^6$. a. Calcul IFS du foil en composite. b. Calcul IFS sur les sections expérimentales à mi-envergure.

En effet, les formes et les déplacements expérimentaux de la section à mi-envergure de l'hydrofoil déformable sont extraits pour α compris entre -4° et 4° . Elles sont représentées aux figures 13.a et 13.b pour les angles d'attaque positifs et négatifs respectivement.



a. *NACA 0012*, $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 1^\circ$, $\alpha = 3^\circ$, $\alpha = 4^\circ$



b. $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = -1^\circ$, $\alpha = -2^\circ$, $\alpha = -3^\circ$, $\alpha = -4^\circ$

FIGURE 13 – Déformées de la section à mi-envergure et les déplacements associés pour $\Delta P = 0.24 \text{ bar}$, $Re = 0.75 \cdot 10^6$ et angles positifs et négatifs.

Une analyse attentive montre qu'un petit effet de volet est observé expérimentalement au niveau du bord de fuite, ce qui peut affecter le coefficient de portance et qui n'est pas vu par le calcul structure 2D. De plus, les sections de l'hydrofoil déformable en composite tournent autour de $0.25X/c$ en raison d'une légère torsion de la mèche interne. Ceci est particulièrement observé pour des angles d'attaque positifs. La torsion de cet hydrofoil tend à réduire l'angle d'attaque, donc à diminuer le coefficient de portance. On observe que les résultats du calcul IFS sont en très bon accord avec les expériences pour les angles d'attaque négatifs lorsque la torsion peut être négligée. De plus, pour les angles d'attaque positifs, la torsion observée expérimentalement n'est pas prise en compte lors des simulations IFS, car une condition

d'encastrement parfait a été imposée. Ceci est clairement montré en figure 12.b où le coefficient de portance est calculé directement sur les sections expérimentales déformées à mi-envergure. Dans ce cas, le coefficient de portance prédit par le calcul est très proche du C_L expérimental sur toute la plage d'incidence. Cependant, il convient de souligner que les résultats numériques ont de nombreuses raisons de s'écarter des résultats expérimentaux telles que le modèle structure, la géométrie, les propriétés du matériau (isotrope ou orthotrope), les conditions aux limites structurelles, les effets 3D ou encore le confinement de l'écoulement dans la veine d'essais.

5 Conclusion

Dans cet article, une étude expérimentale et numérique est présentée afin d'évaluer l'effet de la pression dans la cavité de l'hydrofoil composite déformable sur ses performances hydrodynamiques. La forme de l'hydrofoil déformable est contrôlée par la dépression dans la cavité. Il est testé dans le tunnel de cavitation à $Re = 0.75 \cdot 10^6$ et pour différents angles d'attaque. Premièrement, les déformations de l'hydrofoil ont été mesurées à l'air libre à l'aide de la corrélation d'images numériques (DIC-3D) et d'un palpeur micrométrique. Deuxièmement, des essais ont été effectués dans le tunnel hydrodynamique de l'IRENav où les coefficients de portance et de traînée ont été mesurés à l'aide d'une balance hydrodynamique. La déformation de la paroi flexible de l'hydrofoil composite a été mesurée à l'aide d'un télémètre laser. Un modèle de couplage fluide-structure bidimensionnel a été développé conformément aux expériences. Il est basé sur une méthode itérative chaînant le code fluide Xfoil et le code structure ANSYS-Mechanical. Les expériences et les simulations sont effectuées à différents angles d'attaque et à diverses pressions imposées dans la cavité. Les expériences montrent que la variation de pression dans la cavité a un effet significatif sur la forme de l'hydrofoil et sur les forces hydrodynamiques appliquées. La variation de la pression dans la cavité conduit à des variations de section (épaisseur, cambrure) ainsi qu'à une légère torsion globale et à un petit effet de volet au bord de fuite. La diminution de la pression dans la cavité tend à augmenter le coefficient de portance et à diminuer sa pente.

Des études expérimentales et numériques plus avancées sont en cours. Cependant, le modèle d'hydrofoil déformable développé dans ce travail basé sur une structure compliant composite pilotée par le contrôle de la pression dans la cavité interne fournit des résultats encourageants pour piloter les forces hydrodynamiques. Ces résultats ouvrent aussi la voie à des méthodes d'optimisation pour améliorer les performances de l'hydrofoil.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le personnel technique de l'Institut de Recherche de l'Ecole Navale, ainsi que l'Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique de Saint-Nazaire pour leur soutien afin de réaliser cette étude.

Références

- [1] A. Coraddu, L. Oneto, F. Baldi & D. Anguita, Vessels fuel consumption : A data analytics perspective to sustainability, In *Soft Computing for Sustainability Science*, Springer, Cham, (2018) 14–48.
- [2] A. Ducoin, J. A. Astolfi & J. F. Sigrist, An experimental analysis of fluid structure interaction on a flexible hydrofoil in various flow regimes including cavitating flow, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 1 (2012), 63–74.
- [3] A. Lelong, P. Guiffant & J.A. Astolfi, An Experimental Analysis of the structural response of flexible lightweight hydrofoils in cavitating Flow, *Journal of Fluids Engineering*, 140 (2018) 021116.
- [4] G. A. Zarruk, P. A. Brandner, B. W. Pearce & A. W. Phillips, Experimental study of the steady fluid–structure interaction of flexible hydrofoils, *Journal of Fluids and Structures*, 51 (2014) 326–343.
- [5] I. Dimino, L. Lecce & R. Pecora, *Morphing Wing Technologies : Large Commercial Aircraft and Civil Helicopters*, Butterworth-Heinemann, (2017).
- [6] L. M. Giovannetti, J. Banks, M. Ledri, S. R. Turnock & S. W. Boyd, Toward the development of a hydrofoil tailored to passively reduce its lift response to fluid load, *Ocean Engineering*, 167 (2018) 1–10.
- [7] M. Drela, XFOIL : An analysis and design system for low Reynolds number airfoils, In *Low Reynolds number aerodynamics*, (1989) 1–12.
- [8] M. Sacher, M. Durand, E. Berrini, F. Hauville, R. Duvigneau, O. Le Maître and J.A. Astolfi, Flexible hydrofoil optimization for the 35th America’s cup with constrained Ego Method, *Ocean Engineering*, 157 (2017) 62–72.
- [9] T.A. Weisshaar, Morphing aircraft systems : historical perspectives and future challenges, *Journal of Aircraft*, 50 (2013) 337–353.
- [10] T. Georges, V. Brailovski, E. Morellon, D. Coutu & P. Terriault, Design of shape memory alloy actuators for morphing laminar wing with flexible extrados, *ASME. Journal of Mechanical Design*, 131 (2009) 091006.
- [11] V. Brailovski, P. Terriault & al, Morphing laminar wing with flexible extrados powered by shape memory alloy actuators, *ASME. Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, 1 (2008) 615–623.
- [12] Y. L. Young, N. Garg, P. A. Brandner, B. W. Pearce, D. Butler, D. Clarke & A. W. Phillips, Load-dependent bend-twist coupling effects on the steady-state hydroelastic response of composite hydrofoils, *Composite Structures*, 189 (2018) 398–418.