

Proposition de thèse : contrôle d'écoulements potentiellement cavitants autour de structures flexibles déformables de type hydrofoil

1. Objet de la thèse

Cette thèse a pour but de faire progresser les connaissances sur la thématique des structures portantes "intelligentes" en hydrodynamique par une approche duale expérimentale-numérique. Plus précisément, il est visé une meilleure compréhension des phénomènes physiques en jeu et de leur interaction, l'analyse de la précision des modèles physiques utilisés de manière combinée et le contrôle d'écoulements potentiellement cavitants autour de structures flexibles déformables de type hydrofoil.

2. Descriptif de la thèse

L'amélioration et l'optimisation des performances des systèmes marins sont désormais principalement réalisées à partir d'outils numériques maîtrisés et éprouvés, tout au moins sur des configurations classiques, sur lesquelles de nombreuses bases de données de validation sont disponibles.

Il en est tout autrement lorsque l'on s'intéresse à des solutions non conventionnelles mettant en jeu par exemple des structures flexibles déformables. Ce type de structure est pourtant largement utilisé par les animaux aquatiques pour se propulser avec une dextérité et une efficacité déconcertante. Force est de constater que les solutions biomimétiques n'ont pas encore atteint leur niveau de performance.

A ce jour, les connaissances sur le comportement d'un propulseur déformable, de safrans de direction et de stabilisation ou encore d'hydrofoils de navires rapides soumis à un écoulement instationnaire et cavitant restent limitées et les outils de simulation disponibles et validés quasi-inexistants. Ces systèmes sont amenés à fonctionner à des régimes différents et un des problèmes qui se pose est de savoir s'il est envisageable de contrôler l'écoulement et en particulier la cavitation par une action contrôlée de la déformation de la structure portante. Cette thèse vise à contribuer au développement de ces connaissances par la mise en œuvre conjointe des outils de simulations numériques développées dans l'équipe Modélisation des Écoulements Turbulents Haut Reynolds Incompressibles et Couplage (METHRIC) du Laboratoire de Recherche en Hydrodynamique, Énergétique et Environnement Atmosphérique (LHEEA) de l'Ecole Centrale de Nantes et d'expériences réalisées dans le groupe de recherche Mécanique et Energie en Environnement Naval (M2EN) de l'Institut de Recherche de l'Ecole Navale (IRENav) en lien direct avec les calculs.

Un certain nombre d'études relatives au contrôle des écoulements par une action active permettant de contrôler la forme de la structure (morphing) ont été menées en aérodynamique [Weisshaar,2013]. De façon générale, ces techniques de morphing

appliquées à l'aéronautique sont développées pour le contrôle des écoulements dans différents régimes, souvent entre un régime basse vitesse et un régime haute vitesse. Ces deux régimes impliquent des conditions de fonctionnement différentes et le morphing est vu comme un moyen d'adapter la structure à ces deux régimes. Cette problématique se retrouve dans les applications navales, par exemple dans le cas d'une hélice fonctionnant à bas ou haut régime, mais aussi pour les navires sur foils pour lesquels on doit gérer une phase de décollage à basse vitesse et une phase de navigation à haute vitesse. En hydrodynamique, ces deux régimes peuvent conduire à une apparition non souhaitable de la cavitation. Jusqu'à présent, le morphing s'est essentiellement limité à des transformations de corps rigides : pas variable sur une hélice, volets rétractables sur les ailes. Plus récemment, l'apport des matériaux composites et leur propriété a permis d'envisager la possibilité de modifier la forme de la structure sous l'effet de la charge hydrodynamique permettant à la structure de s'auto-adapter aux conditions d'écoulement suivant les conditions d'applications et d'orientation des fibres ([Liu and Young, 2009], [Zarruka, 2014], [Banks, 2015]). Le contrôle reste donc passif et du point de vue numérique, l'écoulement est simplement modélisé par une approche potentielle.

L'objectif de cette thèse vise donc à une meilleure compréhension et maîtrise des mécanismes physiques en jeu pour mener à bien un contrôle actif d'écoulements potentiellement cavitants autour de structures portantes déformables, en utilisant une approche duale de mesures expérimentales et de simulations numériques résolvant les équations de Navier-Stokes en moyenne de Reynolds.

Cela s'inscrit naturellement dans la priorité 2017 « Maîtrise des régimes complexes d'écoulements fluides: contrôle des écoulements » de l'axe thématique « Fluides-Structures ».

Au-delà du cadre de la thèse, ce travail de recherche s'inscrit dans une perspective de développement de méthodes d'optimisation fluide-structure permettant d'améliorer la réponse des structures hydrodynamique portantes.

[Weisshaar,2013] Morphing Aircraft Systems : Historical Perspectives and Future Challenges. T. A. Weisshaar, Journal of Aircraft, March, Vol. 50, No. 2 : pp. 337-353 (doi: 10.2514/1.C031456)

[Liu and Young, 2009] Z. Liu, Y. Young : Utilization of bend-twist coupling for performance enhancement of composite marine propellers Journal of Fluids and Structures, Elsevier, 2009, 25, 1102-1116

[Zarruka, 2014] G. A. Zarruka, P. A. Brandnera, B. W. Pearcea, A. W. Phillips. Experimental study of the steady fluid-structure interaction of flexible hydrofoils, Journal of Fluids and Structures, Volume 51, November 2014, Pages 326-343

[Banks, 2015] J. Banks, L. Marimon Giovannetti, X. Soubeyran, A.M. Wright, S.R. Turnock, and S.W. Boyd. Assessment of digital image correlation as a method of obtaining deformations of a structure under fluid load. Journal of Fluids and Structures, 58:173 – 187, 2015.

3. Programme de la thèse

Cette thèse sera réalisée dans le cadre d'une collaboration scientifique entre l'équipe METHRIC du LHEEA et le groupe de recherche M2EN de l'IRENav. Elle s'inscrit dans les échanges et partenariats menés depuis un certain nombre d'années sur des problématiques de couplage fluide-structure pour des applications navales ([Durand 2012]).

Ces travaux de recherche s'appuieront sur une double expertise, numérique pour l'équipe METHRIC, et expérimentale pour l'IRENav.

Du côté numérique, le candidat disposera du code de calcul Navier-Stokes ISIS-CFD développé au sein de l'équipe METHRIC qui a déjà fait l'objet de nombreuses validations dans le domaine de l'hydrodynamique navale ([Deng,2010], [Guilmineau,2015], [Deng,2015],...). Ce code de calcul résout les équations de Navier-Stokes instationnaires en moyenne de Reynolds par une formulation Volumes-Finis sur maillages non-structurés. Il possède déjà toutes les fonctionnalités (formulation ALE, couplage fluide-structure par approche modale, raffinement automatique de maillages, méthode de capture pour les écoulements multi-fluides) et tous les modèles physiques (turbulence, transition, cavitation) nécessaires pour reproduire de manière fine le comportement expérimental des configurations multiphysiques envisagées.

Une des questions posée sera d'étudier dans quelle mesure les différents modèles physiques développés et validés séparément sont à même de reproduire des configurations dans lesquelles ils sont utilisés de manière combinée.

Les ressources de calculs seront assurées par l'utilisation des moyens de calculs nationaux (Cines, Idris) et du nouveau calculateur Liger, récemment installé à l'Ecole Centrale de Nantes.

Afin d'appuyer ces simulations et pour contribuer à la compréhension des phénomènes complexes mis en jeu dans les problèmes d'interaction fluide structure (IFS) sur hydrofoils flexibles, il est nécessaire de développer des expériences contrôlées en tunnel hydrodynamique. Du côté expérimental, le groupe de recherche M2EN possède des moyens de mesures peu communs au plan national, à savoir un tunnel de cavitation permettant une vitesse d'écoulements jusqu'à 15 m/s et une pression réglable de 0,1 à 3 bar. Il permet entre autre des mesures d'efforts hydrodynamiques (portance, trainée, couple), une caractérisation de la cavitation, une caractérisation des écoulements par PIV, LDV, une analyse vibratoire, des mesures de contraintes locales par jauges, des mesures de déflexion par mesureur de distance, et une capture par caméra rapide (6000 images/s). L'approche expérimentale est fondée sur des méthodes originales de mesures et de traitement et qui permettent d'analyser finement la physique complexe et les interactions au sein de ces écoulements spécifiques à grand nombre de Reynolds, turbulents et avec cavitation... Les membres de ce groupe disposent d'ores et déjà d'une solide expérience dans la mise en œuvre de configurations mettant en jeu des corps flexibles et des écoulements cavitants ([Astolfi,2015], [Gaugain,2013]). Des données

expérimentales sont donc déjà disponibles pour entamer la phase de validation, données qui seront complétées lors de cette thèse par des mesures dédiées.

L'objectif est de tirer profit de cette approche conjointe numérique et expérimentale des configurations étudiées pour mieux appréhender la physique des phénomènes et leur modélisation, comme cela a été précédemment le cas lors de la thèse de Mathieu Durand [Durand,2012] dédiée à l'étude des interactions fluide-structure appliquée aux voiliers. Durant cette thèse, le candidat n'aura pas à développer le dispositif expérimental mis en œuvre pour modifier la géométrie des hydrofoils mais il participera aux essais pour bien appréhender les conditions expérimentales nécessaires pour les confrontations numériques-expériences.

[Deng,2010] G.B.Deng, A.Leroyer, E.Guilmineau, P.Queutey, M. Visonneau, J. Wackers. Verification and Validation for Unsteady Computation. Proceedings of Gothenburg 2010 A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics, Vol. 2, pp. 447-452, Gothenburg, Sweden, 2010.

[Guilmineau,2015] E. Guilmineau, G.B. Deng, A. Leroyer, P. Queutey, M. Visonneau, J. Wackers. Numerical Simulations of the Cavitating and Non-Cavitating Flow around the Postdam Propeller Test Case. Second International Workshop on Cavitating Propeller Performance, SMP'15, Austin, Texas, USA, May 31-June 4, 2015.

[Deng,2015] G. Deng, A. Leroyer, E. Guilmineau, P. Queutey, M. Visonneau, J. Wackers, A. del Toro Llorens. Verification and validation of resistance and propulsion computation. Proc. A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics, December 2-4 2015, NMRI ed., Tokyo, 2015.

[Astolfi,2015] Astolfi, J.A., Lelong A., Bot, P. Marchand, J.B. 2015 "Experimental analysis of hydroelastic response of flexible hydrofoils".5th High Performance Yacht Design Conference, Auckland, NZ.

[Gaugain,2013] Gaugain, F.. Analyse expérimentale et simulation numérique de l'interaction fluide-structure d'un hydrofoil élastique en écoulement subcavitant et cavitant. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers, 2013.

[Durand,2012] Interaction fluide-structure souple et légère, application aux voiliers. M. Durand. Thèse de doctorat, Ecole Centrale Nantes. 2012.

Pour cette thèse, il est prévu un découpage en trois phases successives :

Phase 1 : appropriation du sujet et analyse de l'état de l'art

a. Etude bibliographique sur les travaux numériques et expérimentaux relatifs aux interactions fluide-structure dans le domaine naval appliquées aux structures portantes en régime cavitant.

b. Prise en main du code de calcul

c. Formation aux moyens d'essais disponibles

Phase 2 : étude numérique de l'écoulement autour d'une structure rigide ou déformable en régimes non cavitant et cavitant et comparaison aux mesures expérimentales

a. Réalisation de calculs de validation préliminaires sur foils rigides sur la base des mesures déjà effectués à l'IReNav, analyse de l'erreur numérique et de l'erreur de modélisation.

Des expériences de références sont déjà disponibles (mesures des efforts et PIV, analyse de la cavitation) et pourront être reprises si besoin au gré des résultats issus de la confrontation expérimentale/numérique.

b. Réalisation de simulations sur hydrofoil flexible homogène, module de Young modéré (plein ou creux), à l'aide d'un couplage implicite interne ([Durand,2014], [Yvin,2014]), par une approche modale et/ou par un couplage avec un code de structure.

Là encore, des expériences de référence sont déjà disponibles. Elles pourront aussi être reprises si le besoin s'en fait sentir à la lumière des résultats de l'exercice de validation du modèle numérique afin de reproduire au plus juste les conditions expérimentales.

L'IReNav a déjà acquis une forte expérience dans ce domaine, ce dont bénéficiera le candidat. Des travaux expérimentaux antérieurs ont en effet montré la nécessité d'un étalonnage fin de la structure (conditions aux limites, fréquences propres, amortissements dans l'air dans l'eau, etc..) pour obtenir une reproduction fidèle des conditions expérimentales.

Phase 3 : mise en œuvre de calculs et d'essais sur une structure déformable avec contrôle de la forme en interaction avec l'écoulement.

Définition d'une configuration d'étude sur structure déformable et d'une stratégie de déformation active pour contrôler la cavitation.

La stratégie envisagée pour déformer l'hydrofoil consistera a priori en une structure creuse dans laquelle on pourra contrôler la pression et qui conduira à déformer de façon intelligente l'hydrofoil pour contrôler le phénomène de cavitation. L'utilisation d'une structure multi-matériaux pourrait s'avérer nécessaire.

Des expériences numériques seront utilisées pour évaluer la pertinence des différentes possibilités envisagées pour le contrôle de la déformation de la structure, avant de passer à la réalisation expérimentale effective.

Essais: mesures des déformations, de l'écoulement et de la réponse vibratoire,...

Calculs : implémentation de la stratégie de contrôle dans les calculs et réalisation de simulations couplées fluide-structure sur la base des calculs réalisés en phase 2. Comparaison des efforts, des champs de vitesses obtenus par mesures PIV autour du foil en amont et dans le sillage, de la carte de cavitation, des déformations,...

La démarche poursuivie tout au long de cette thèse s'attachera à tirer profit d'un enrichissement mutuel entre les aspects numériques et expérimentaux afin de progresser efficacement dans l'étude poursuivie.

4. Références

Depuis plus de dix ans, l'équipe METHRIC travaille sur le couplage fluide-structure ([Leroyer,2005], [Durand,2014], [Yvin,2014], [Leroyer,2015],...). Cela forme depuis lors un des axes de recherche associé à la thématique générale de résolution des équations de Navier-Stokes en moyenne de Reynolds. Une thèse a aussi été entièrement dédiée à l'étude numérique des écoulements cavitants [Dauby,2007] et des travaux plus récents sont actuellement menés pour améliorer les modèles de cavitation existants [Ramirez,2016].

Une des spécificités du code de calcul est de pouvoir tirer profit du raffinement automatique de maillage [Wackers,2010]. Celui-ci pourra être avantageusement mis à profit pour réduire l'erreur de discrétisation sans trop pénaliser les temps de calculs.

[Leroyer,2005] A. Leroyer, M. Visonneau. Numerical methods for RANSE simulations of a self-propelled fish-like body. *Journal of Fluids and Structures*. 2005, 975—991, 20.

[Durand, 2014] M. Durand, A. Leroyer, C. Lothode, F. Hauville, M. Visonneau, R. Floch, L. Guillaume, "FSI Investigation on Stability of Downwind Sails with an Automatic Dynamic Trimming", *Ocean Engineering*, Special Issue 90, pp. 129-139.

[Yvin,2014] Interaction fluide-structure pour des configurations multi-corps. Applications aux liaisons complexes, lois de commande d'actionneur et systèmes souples dans le domaine maritime. Thèse de doctorat. Ecole Centrale Nantes, 2014.

[Leroyer,2015] A. Leroyer, C. Yvin, E. Guilmineau, M. Visonneau, P. Queutey. Efficient FSI codes coupling with possible large added mass effects: applications to rigid and elongated flexible bodies in the maritime field. VI International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering COUPLED PROBLEMS 2015.

[Dauby,2007] Simulation d'écoulements cavitants par résolution numérique des équations de Navier-Stokes en moyenne de Reynolds. Application à la cavitation de tourbillon d'extrémité. Thèse de doctorat. Ecole Centrale Nantes, 2007.

[Ramirez,2016] C. Ramirez, A. Leroyer, E. Guilmineau, P. Queutey. Numerical features of cavitation models based on the simplified Rayleigh-Plesset equation. NuTTS2016.

[Wackers,2010] Wackers, J., Deng, G., Leroyer, A., Queutey, P. & Visonneau, M. Adaptive grid refinement for hydrodynamic flows *Computers & Fluids*, 2012, 55, 85-100.

Le groupe de recherche M2EN de l'IRENav a acquis une solide expérience dans l'étude expérimentale du comportement de foils rigides ou déformables passivement en régime cavitant et non cavitant. Les expériences menées dans le tunnel de cavitation de l'Ecole navale sont en constante évolution tant sur le point de l'instrumentation associée que sur le dispositif lui-même.

[Ducoin,2012] Ducoin, A., Astolfi, J.A. & Sigrist, J.-F., 2012, "An Experimental Analysis of Fluid Structure Interaction on a Flexible Hydrofoil in Various Flow Regimes including Cavitating Flow", European Journal of Mechanics B/Fluids, (sous presse) doi/j.euromechflu.2012.03.009.

[Ducoin,2012] Ducoin, A., Astolfi, J. A., Gobert, M.-L., 2012, "An Experimental Study of Boundary-Layer Transition Induced Vibrations on a Hydrofoil", Journal of Fluids and Structures (2012), Vol. 32, pp. 37–51, doi:10.1016/j.jfluidstructs.2011.04.002.

[Akcabay,2014] Akcabay, D.T., Chae, E.J., Young, Y.L., Ducoin, A., Astolfi, J. A., 2014, "Cavity Induced Vibration of Flexible Hydrofoils", Journal of Fluids and Structures, Vol.49 pp. 463–484, 2014, Elsevier, DOI : 10.1016/j.jfluidstructs.2014.05.007

[Akcabay,2014] Akcabay, D.T., Young, Y.L., Lelong A., Astolfi J-A 2014 Cavity-Induced Vibrations of Flexible Hydrofoils and their Susceptibility to Lock-in and Parametric Excitations, 30th Symposium on Naval Hydrodynamics Hobart, Tasmania, Australia, 2-7 November 2014

[Lelong,2015] Lelong A., Astolfi J-A 2015 Experimental Analysis of Hydroelastic Response of a Flexible Foil, Fourth International Symposium on Marine Propulsors, SMP'15, Austin, Texas, USA, June 2015

[Lelong,2016] A. Lelong, J.A. Astolfi, P. Guiffant, 2016, An Experimental Analysis of Hydroelastic Response of Flexible Lightweight Hydrofoils in Non-Cavitating and Cavitating Flow, 31st Symposium on Naval Hydrodynamics, Monterey, California, 11-16 September 2016