

Simulation couplée fluide – structure d'un hydrofoil en composite sous écoulement stationnaire et instationnaire

L. PERNOD^{a,c}, A. DUCOIN^a, H. LE SOURNE^b, J.F. SIGRIST^c

a. Laboratoire du LHEEA, Ecole Centrale de Nantes (CNRS UMR 6598),

laetitia.pernod@wanadoo.fr

b. Institut du GeM (CNRS UMR 6183), ICAM Nantes, herve.lesourne@icam.fr

c. DCNS Research, CESSMAN, Département Expertise Recherche et Développement,

Bouguenais, jean-francois.sigrist@dcnsgroup.com

Résumé :

Ces travaux présentent la validation d'une boucle de calculs fortement couplés fluide-structure à l'aide des logiciels commerciaux de CFD (Starccm+) et de CSD (Abaqus) des déformations d'un profil composite sous chargement hydrodynamique. Le cas de validation envisagé ici est un NACA0009 développé initialement par l'Australian Maritime College (AMC) et testé expérimentalement dans [12]. L'hydrofoil est encastré à sa base, et son extrémité laissée libre afin d'obtenir un comportement s'approchant de l'hélice marine. Les résultats numériques concernent les performances hydrodynamiques, les fréquences propres de la structure ainsi que la flèche à l'extrémité et sont confrontées aux données d'expériences issues de la littérature [12]. Il est montré que le modèle fluide prédit correctement les coefficients hydrodynamiques jusqu'au décrochage ($\alpha < 10^\circ$), et que les fréquences propres ainsi que la masse de l'hydrofoil sont bien calculées. De plus, la flèche calculée en extrémité de 1,92 mm présente un bon accord avec les données expérimentales de 2,1 mm. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du développement et de l'optimisation d'un nouveau design de propulseurs composites marins.

Abstract :

The objective of this paper is to investigate the fluid structure interaction of a 3D NACA0009 composite hydrofoil in steady and unsteady flows. This hydrofoil set up, which was originally developed experimentally by the Australian Maritime College (AMC), is clamped at the root and free at the tip section, and was designed to behave like a marine propeller blade [12]. 3D fluid structure computations are performed using a coupling between CFD (Computational Fluid Dynamic) and CSD (Computational Solid Dynamic) softwares, through tightly coupled algorithm. The hydrodynamic performances, structure natural frequencies and tip displacements are validated against experiments. Hydrodynamic coefficients present a good agreement for an attached flow ($\alpha < 10^\circ$), and natural frequencies and structural mass are correctly predicted. Moreover, calculated tip displacements of 1.92 mm also match well with experimental data of 2.1 mm. The results will help for the validation of a tightly coupled procedure, which will be used for the development and the optimization of a newly developed design of composite marine propeller.

Mots clefs : Hydrofoil composite, interaction fluide - structure, code commercial, simulation numérique, validation expérimentale

1 Introduction

Les dix dernières années ont connu un intérêt grandissant pour le développement et l'utilisation des matériaux composites appliqués aux hélices marines. En effet, dans un objectif mondial de réduction des émissions de CO₂, les gains de masse et la propriété d'auto-adaptation à l'écoulement rendus possibles par l'utilisation de composites présentent un avantage majeur. Plusieurs études académiques ont montré que l'utilisation de composite permet de réduire significativement les niveaux de vibrations causés par l'écoulement, et donc d'augmenter les performances hydrodynamiques globales ([4] et [9]), ainsi que de retarder l'apparition de la cavitation [3]. C'est la propriété de couplage flexion – torsion propre au composite qui rend possible une adaptation passive de l'hélice composite à l'écoulement [9], résultant en de meilleures performances que pour leur équivalent métallique, et sur une plus large gamme de vitesse du navire.

Il convient donc d'étudier le design et l'optimisation des hélices marines en composite. [5] ont étudié l'influence de l'arrangement des plis de composite sur les performances hydroélastiques de l'hélice, et ont également réalisé l'optimisation de l'arrangement des plis à l'aide d'un algorithme génétique. En 2009, [7] ont développé une méthode de design systématique des hélices composites, puis en 2010, [1] ont réalisé l'optimisation d'une hélice composite à échelle réelle. Un critère de résistance des structures a par ailleurs été introduit dans la boucle d'optimisation. En 2015, [6] ont également optimisé l'arrangement des fibres de composites.

Grâce aux récents développements concernant le couplage de codes fluide et structure, il est désormais possible d'utiliser les calculs couplés fluide – structure (CFD – CSD) pour valider les design d'hélices en composite. Il est également possible d'associer ces calculs couplés à une boucle d'optimisation du design de l'hélice, prenant en compte l'arrangement des plis du composite ainsi que la géométrie du propulseur. Enfin, les critères de résistance à la rupture, de cavitation et l'évaluation des instabilités hydroélastiques peuvent être calculés par des codes dédiés, et pris en compte de manière itérative.

Cette étude présente le cas de validation numérique d'une boucle de calculs fortement couplés fluide – structure développée dans nos travaux afin d'aider au design et à l'optimisation de nouvelles hélices en composite. Il s'agit de la reproduction numérique des expériences réalisées sur un NACA0009 développé initialement par l'*Australian Maritime College* (AMC) pour s'approcher du comportement d'une hélice. Deux hydrofoils présentant des matériaux différents – aluminium et composite – ont été testés dans leurs études et simulés dans nos travaux. Les détails de la conception et de la mise en place du montage expérimental sont présentés dans [2] et [8], et les résultats sont exposés dans [12]. Aussi dans un premier temps nous introduisons la formulation mathématique du problème, puis nous présentons la mise en place et la validation des modèles fluide et structure non couplés. Enfin, nous détaillons la mise en place et les résultats des calculs faiblement couplés et fortement couplés.

2 Formulation mathématique du problème

Le cas étudié consiste en un milieu fluide Ω_f et un milieu solide Ω_s distincts séparés par une interface. Le fluide est considéré visqueux incompressible et est caractérisé par ses champs de vitesse et de pression. Les équations de Navier-Stokes régissant ce type de problème fluide sont résolues par la méthode RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*), écrites sous la forme (1). Le comportement du solide est décrit par la relation fondamentale de la dynamique, ainsi que la relation d'élasticité

anisotrope dans le cadre du composite, et isotrope pour l'aluminium. La relation déformations – déplacements est également considérée. Ces équations sont reportées sous la forme du système (2). Les deux physiques sont couplées à l'interface par les conditions (3) assurant la continuité des vitesses ainsi que l'équilibre des forces à l'interface.

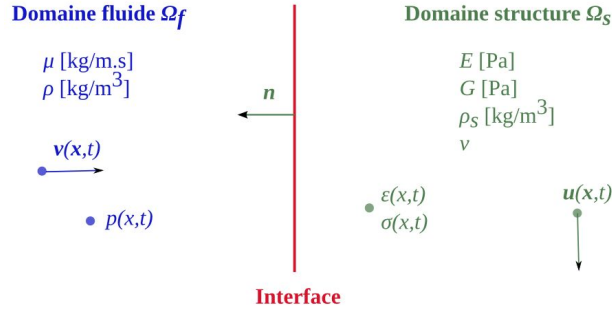


Figure 3 – Formulation mathématique du problème d'interaction fluide-structure

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = 0 \\ \rho \left(\frac{\partial \bar{V}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} \bar{V}_j \right) = \rho f_i - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{V}_i}{\partial x_i \partial x_j} - \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{V}_i \bar{V}_j) \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_s \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \rho_s g_i \\ \epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \\ \bar{\epsilon} = C \bar{\sigma} \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_i = \frac{\partial u_i}{\partial t} \\ \sigma_{ij} \cdot n_j = \left(-p \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right) \cdot n_j \end{array} \right. \quad (3)$$

3 Mise en place et validation du modèle structure

Cette partie présente le montage expérimental réalisé par l'*Australian Maritime College* et sa reproduction numérique dans cette étude. Ceci inclut la description de la géométrie de l'hydrofoil, la mise en place des conditions aux limites d'encastrement, la modélisation des matériaux utilisés ainsi que la validation du modèle numérique vis-à-vis des résultats expérimentaux.

3.1 Géométrie et conditions aux limites

Les deux hydrofoils étudiés sont de géométrie trapézoïdale avec une corde de base de 120 mm et une corde d'extrémité de 60 mm, pour une envergure de 300 mm, Figure 1 (A). Leur section est un

NACA0009 épaissi au niveau du bord de fuite pour rendre possible la fabrication du composite. L'hydrofoil est encastré dans l'une des parois de la veine d'essai à l'aide de deux plaques métalliques venant pincer l'hydrofoil de part et d'autre de sa base, elles-mêmes tenues par un disque métallique. Le support d'encastrement peut pivoter afin de tester différents angles d'incidence, Figure 1 (B). Il est à noter que l'encastrement de l'hydrofoil nécessite de prolonger sa base par une partie métallique de 20 mm, représentée en bleu sur la Figure 1 (A). La CAO utilisée dans le modèle numérique reproduit la géométrie complète de l'hydrofoil, y compris le prolongement métallique, pour lequel tous les nœuds du maillage sont fixés à zéro degré de liberté.

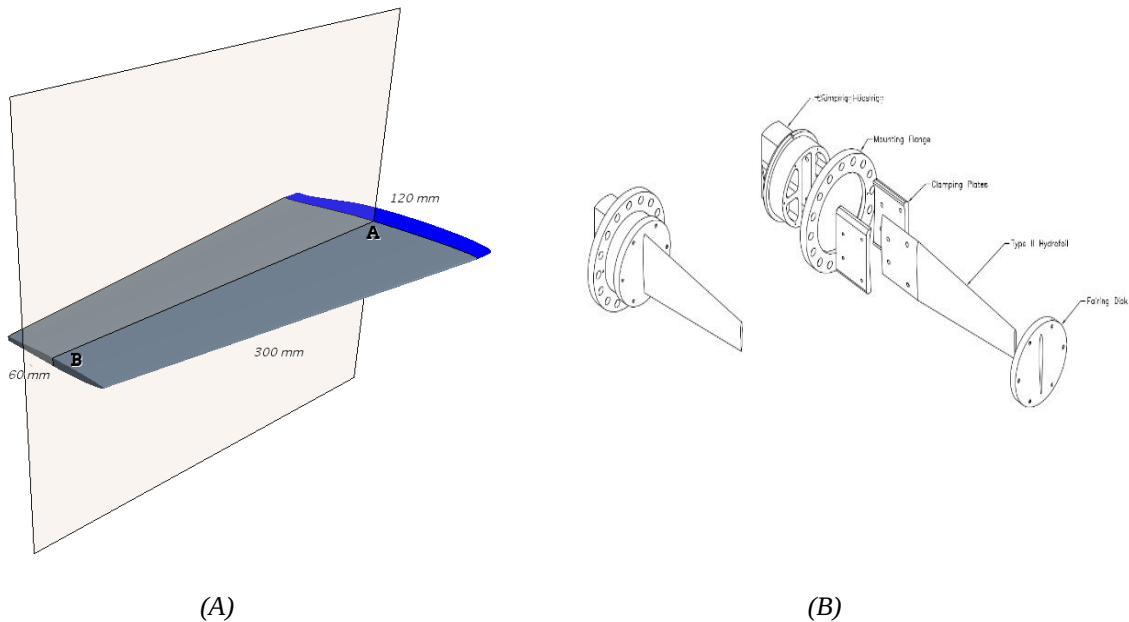


Figure 1 – (A) Géométrie et dimensions des hydrofoils testés, et plaque métallique permettant l'encastrement de l'hydrofoil. (B) Système d'encastrement de l'hydrofoil.

3.2 Matériaux et caractéristiques mécaniques

Les deux hydrofoils diffèrent uniquement par leurs propriétés matériaux : le premier est entièrement en aluminium, alors que le second est un composite sandwich constitué de fibres de carbones unidirectionnelles et d'un tissu de fibres de verres. L'empilement des couches composites est présenté sur la Figure 2 (A), qui constitue une vue en coupe suivant la direction (AB) de la Figure 1 (A). La structure est traversée en son centre sur toute sa longueur par un mat de verre épais dont le but est d'aider la distribution homogène de la résine pendant le procédé de RTM (*Resin Transfer Molding*) utilisé pour la fabrication. Sur l'extérieur, un tissu de fibres de verre est ajouté pour assurer un bon état de surface. Les caractéristiques structurales de l'hydrofoil sont quant à elles assurées par l'empilement de fibres de carbone et de fibre de verre entre le mat et la couche externe. Les propriétés des plis sont présentées dans le Tableau 1. De plus, comme l'épaisseur de l'hydrofoil n'est pas constante le long de l'envergure, il est nécessaire de diminuer progressivement l'épaisseur des plis du centre, ainsi qu'illustré sur la Figure 2 (A).

Tableau 1 – Propriétés des plis de composite

	Carbone	Verre	Externe	Mat
ρ [g/cm ³]	1.55	1.78	1.69	7.40
E_{11} [Mpa]	118000	20600	15000	3000
E_{22} [MPa]	6500	20600	15000	5000
ν_{12}	0.27	0.32	0.13	0.26
G_{12} [MPa]	4500	4000	4000	2500
G_{23} [MPa]	4500	4000	4000	2500
G_{13} [MPa]	3300	3300	3300	3300
Orientation [°]	0	0	0	isotrope

3.3 Méthodes numériques de résolution structure

Le code commercial d'éléments finis Abaqus est utilisé comme solveur structure pour résoudre les équations (2) avec un schéma explicite. En effet, le même pas de temps est utilisé pour les solveurs fluide et structure lors de la mise en place du couplage, et celui-ci est suffisamment faible pour justifier une résolution explicite, qui permet un gain de temps comparativement au schéma implicite. En raison de leurs différences structurelles, les deux hydrofoils ne peuvent pas être modélisés par un même modèle structure. L'hydrofoil rigide est entièrement modélisé par des éléments volumiques de type C3D8R avec la partie correspondant à la surface mouillée dotée des propriétés isotropes de l'aluminium, et la partie correspondant à l'encastrement dotée des propriétés isotropes de l'acier. L'hydrofoil composite est quant à lui modélisé en deux parties : un volume interne et une surface externe. Le volume interne représente le remplissage par du mat et la partie encadrée en acier. Le mat n'ayant pas de propriétés structurelles, il est considéré comme un matériau isotrope, et le volume interne est donc maillé par des éléments C3D8R. La surface externe représente les plis de composite maillés par des éléments de coques minces S4R prenant en compte l'épaisseur, l'orientation et les caractéristiques mécaniques (telles que définies dans le Tableau 1) de chacun des plis. De plus, afin de modéliser la diminution progressive des plis le long de l'envergure, la surface externe de l'hydrofoil est découpée en sections d'éléments S4R contenant un nombre de plis spécifique, ce qui est illustré sur la Figure 2 (B).

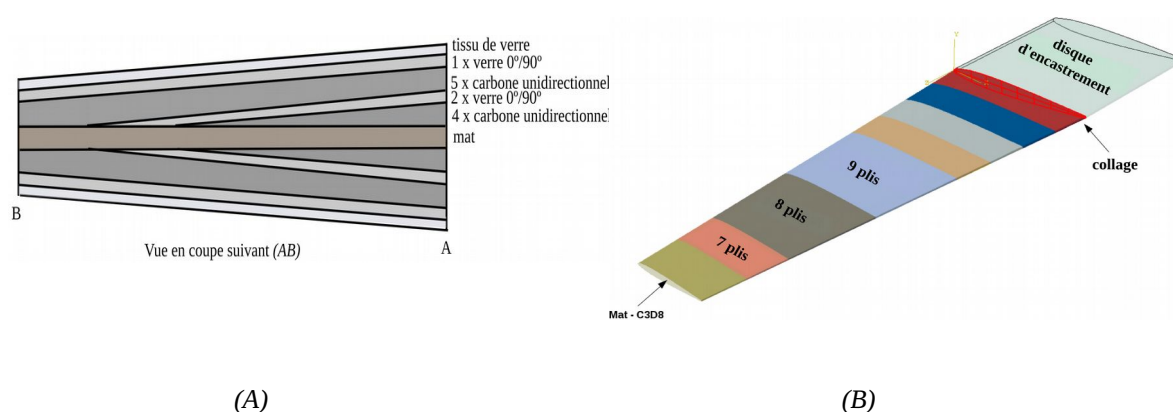


Figure 2 – (A) Empilement des plis de composite le long de l'envergure, dans un plan de coupe au milieu de l'hydrofoil, (B) Découpage en sections de l'hydrofoil pour prendre en compte la diminution progressive des plis. Les éléments de maillage interne sont volumiques (C3D8R), et les éléments à la surface sont des coques minces de type S4R.

3.4 Validation du modèle structure

La validation du modèle structure se fait en trois temps : recalage de la masse de l'hydrofoil en ajustant la masse volumique des matériaux, recalage des fréquences propres de flexion en ajustant le module d'Young E_{22} , puis recalage des fréquences propres de torsion en ajustant le module de cisaillement G_{12} . Les matériaux dont les caractéristiques mécaniques sont ajustées sont les plis de fibre de carbone unidirectionnelles, ainsi que les plis de tissus de verre $0^\circ/90^\circ$, car ce sont les matériaux structurels de l'hydrofoil. Le Tableau 2 présente la synthèse des valeurs numériques obtenues lors de ces trois étapes de validation comparées aux valeurs expérimentales issues de la littérature [12].

Tableau 2 – Validation du modèle structure

	Masse [g]	Mode de flexion [Hz]	Mode de torsion [Hz]
Al - expérience	-	100	-
Al - numérique	-	100.5	-
Composite - expérience	409.6	112	415
Composite - numérique	408	111	417

4 Mise en place et validation du modèle fluide

Nous présentons ici la mise en place du modèle numérique fluide, c'est-à-dire la géométrie du domaine fluide ainsi que les conditions aux limites et les méthodes de résolution numériques choisies. La validation du modèle fluide dans le cas d'un hydrofoil infiniment rigide préalable à la mise en place du couplage est également présentée. Celle-ci inclut l'étude de convergence en maillage ainsi qu'une estimation des coefficients hydrodynamiques de portance, de trainée et de moment comparée aux résultats expérimentaux.

4.1 Domaine fluide et conditions aux limites

Le modèle fluide reproduit numériquement la veine d'essai de l'AMC dans laquelle ont été testés les hydrofoils. Il s'agit d'une veine de section carrée de 0.6 m pour une longueur de 2.6 m. L'hydrofoil est positionné contre une des parois de la veine numérique afin de modéliser son encastrement, et est traité avec deux types de conditions aux limites : i) dans un premier temps, des conditions de non-glissement sont imposées sur la surface de l'hydrofoil ($\mathbf{v} \cdot \mathbf{t} = 0$) pour modéliser une structure infiniment rigide, ce qui permet de réaliser un calcul fluide de validation, i.e sans couplage, ii) une fois la validation effectuée, les déplacements de la structure calculés par le solveur structure sont imposés sur les surfaces de l'hydrofoil. Des conditions aux limites de symétrie ($\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = 0$) sont implémentées sur les parois de la veine numérique, ainsi qu'une condition de pression au niveau de l'*outlet*. Un écoulement incident uniforme de 5 m/s est considéré au niveau de l'*inlet*. Les conditions limites sont précisées sur la Figure 3.

4.2 Méthodes numériques de résolution fluide

Le comportement du fluide est régi par les équations de Navier-Stokes 3D moyennées au sens de Reynolds (1), que l'on résout ici par une formulation découplée pression-vitesse avec le code commercial de volumes finis Starccm+. Le domaine spatial est discrétisé par un maillage polyédrique raffiné au bord d'attaque et au bord de fuite, ainsi que dans le sillage. Un maillage structuré de couche limite est également ajouté proche de la paroi de l'hydrofoil. Une vue en coupe du maillage est présentée sur la Figure 3, pour un plan de coupe pris à la base de l'hydrofoil (section encastree). Le modèle de turbulence SST $k-\omega$ développé par Menter en 1994 est adopté pour prédire correctement les

décollements de couche limite, et une formulation en loi de paroi logarithmique est utilisée dans la couche limite ($50 < y^+$). Pour le cas des simulations instationnaires, un schéma d'intégration temporelle du second ordre de type Euler décentré amont est utilisé avec une condition sur le pas de temps pour assurer un CFL tel que $CFL = U_0 \Delta t / \Delta x_{MEAN} > 1$. Δx_{MEAN} représente la taille moyenne des mailles à la surface de l'hydrofoil suivant la direction de l'écoulement.

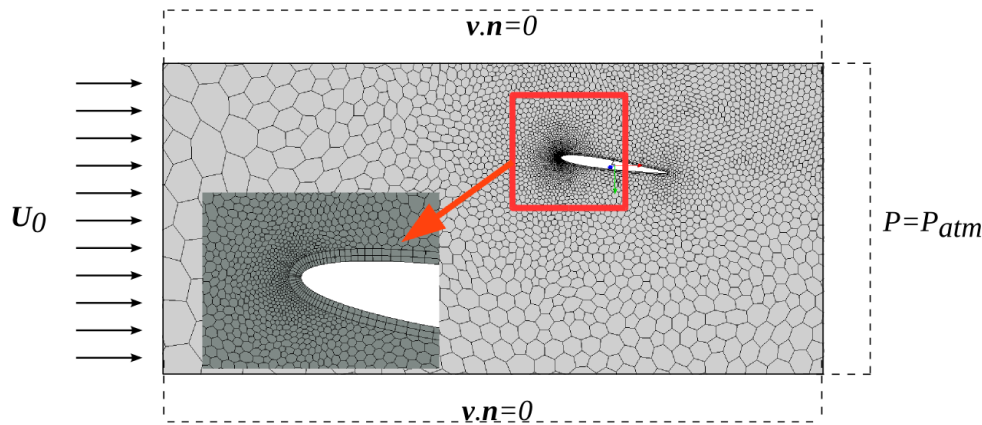


Figure 3 – Maillage du domaine fluide et conditions aux limites

4.3 Validation du modèle fluide

La première étape de validation du modèle fluide porte sur une étude de convergence en maillage réalisée pour un angle d'attaque de 8° et un nombre de Reynolds au niveau de la corde moyenne de 600 000. Ces valeurs permettent de se situer avant le décrochage de l'hydrofoil pour un nombre de Reynolds modéré. Sept maillages allant de $\sim 200\,000$ à $\sim 4\,000\,000$ de mailles sont testés sur les coefficients hydrodynamiques de portance, de trainée et de moment. Le maillage de couche limite est gardé constant, et les zones de raffinement sont toujours situées au niveau des bords d'attaque et de fuite, ainsi que dans le sillage. La Figure 4 montre que la convergence est atteinte pour le maillage de 543 535 mailles, qui est donc retenu pour la suite des calculs fluides ainsi que la mise en place du couplage.

La deuxième étape de validation consiste à estimer les coefficients hydrodynamiques pour plusieurs valeurs d'angles d'attaque, les autres paramètres du calcul étant gardés constants (maillage et nombre de Reynolds). Ces valeurs numériques sont comparées aux expériences réalisées par [12] sur la Figure 5 (A) et (B). Les coefficients hydrodynamiques sont correctement prédits dans la zone avant décrochage de l'hydrofoil, *i.e* pour $0 < \alpha < 8^\circ$, cependant la trainée est sous-estimée dans la zone décrochée. Les performances moindres calculées en terme de finesse par rapport aux expériences sont dues à cette erreur sur la prédiction de la trainée. Il est donc choisi dans un premier temps d'effectuer les calculs couplés pour une valeur d'angle d'attaque significative, mais avant décrochage, *e.g.* 6° .

5 Mise en place et validation du couplage

5.1 Algorithme de couplage

Le couplage est mis en place par l'intermédiaire du *Co-Simulation Engine* d'Abaqus (CSE) une fois les modèles fluide et structure validés. Il consiste à transférer le champ de pression du solveur fluide vers le solveur structure, et le champ de déplacements du solveur structure vers le solveur fluide, afin de modéliser l'échange d'énergie mécanique se produisant entre les deux milieux. Deux

possibilités existent selon la force du couplage. Dans le cas d'un couplage faible, une seule solution fluide convergée est transférée au solveur structure, qui calcule le champ de déplacements correspondant. Ce type de calcul est appelé *calcul chaîné*. Dans le cas d'un couplage fort, plusieurs sous-itérations existent entre les deux solveurs au sein d'un même pas de temps, afin d'assurer la conservation de l'énergie à l'interface (voir Figure 6). L'avance en temps se fait donc après convergence entre les valeurs $(u,p)^k_{t-1}$ et $(u,p)^{k+1}_{t-1}$ ou après un nombre de sous-itérations maximum fixé à dix dans notre cas. Par ailleurs, afin d'aider la stabilité du couplage, un facteur de sous-relaxation compris entre 0,2 et 0,5 est appliqué au champ de déplacements importé par le solveur fluide.

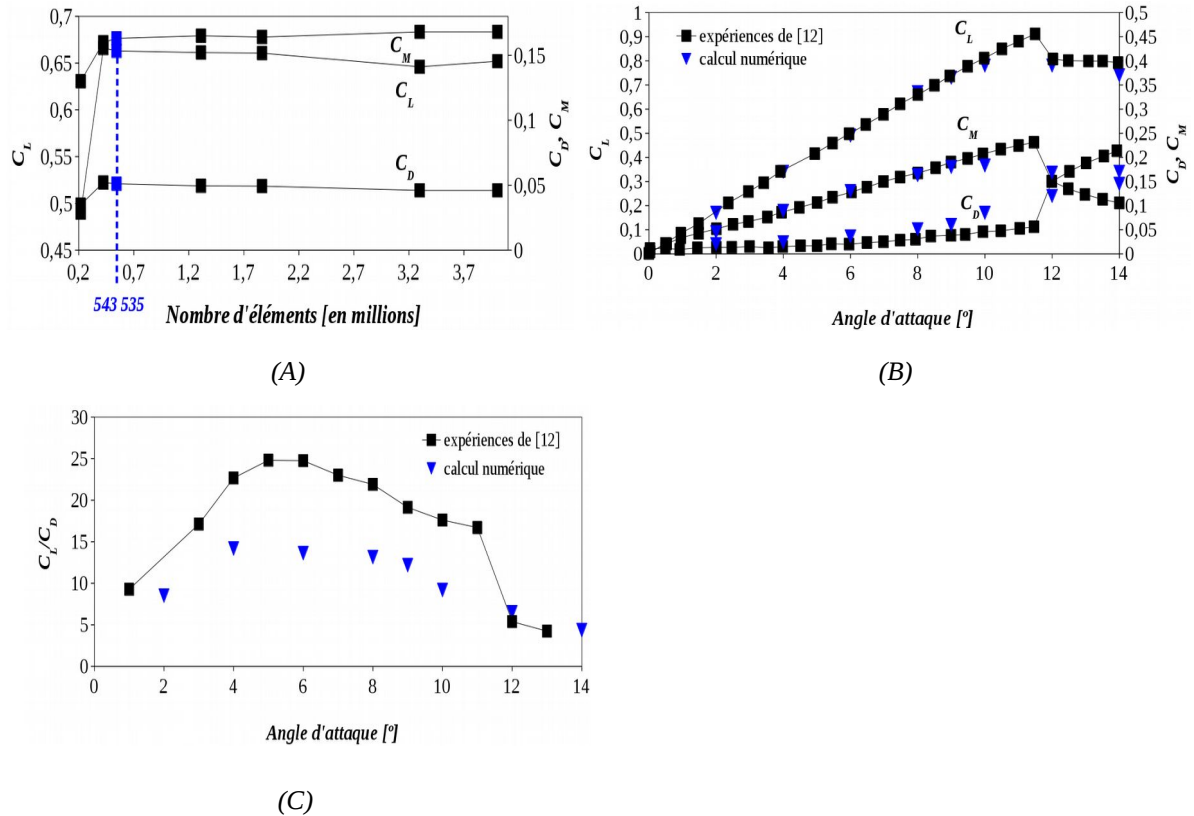


Figure 5 – (A) Etude de convergence en maillage sur les coefficients hydrodynamiques, (B) Comparaison expériences / calcul numérique sur les coefficients hydrodynamiques pour différentes valeurs d'angle d'attaque, $R_e = 600\ 000$, (C) Performances hydrodynamiques pour différents angles d'attaque comparées aux expériences.

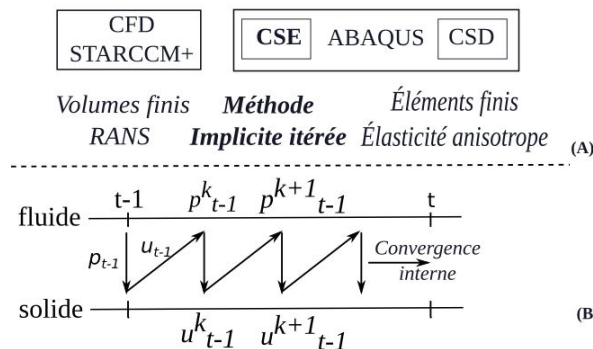


Figure 6 – (A) Codes numériques utilisés pour le calcul couplé fluide – structure, et méthodes numériques correspondantes, (B) Algorithme de couplage fort, dit implicite itéré

5.2 Résultats : calculs chaînés et couplés

La validation des calculs chaînés et couplés se fait sur les coefficients hydrodynamiques, la flèche en extrémité ainsi que la valeur du vrillage par rapport aux données expérimentales issues de [12]. Un calcul chaîné (*i.e* couplage faible) est effectué dans un premier temps pour les deux hydrofoils (aluminium et composite), et les résultats sont présentés dans le Tableau 3. Il y a un bon accord global des résultats numériques avec les expériences, avec cependant une sur-estimation de la trainée et une sous-estimation du déplacement en extrémité. Il est attendu que les calculs couplés (qui seront présentés dans la version finale du papier) se rapprochent des valeurs expérimentales étant donné qu'ils prendront en compte les effets d'interaction fluide-structure, tels que le couplage vrillage - portance. Par exemple, l'hydrofoil en composite est plus flexible que l'aluminium, et présente donc un vrillage plus important, il est donc attendu des effets d'interaction fluide-structure également plus importants et une meilleure prédiction du déplacement maximum. **Les calculs couplés sont en cours d'étude et seront fournis dans la version finale du papier, pour remplacer les X dans le Tableau 3.**

Tableau 3 – Comparaison entre le calcul chaîné et les expériences de [12]

	C_L	C_D	Déplacement max. en extrémité [mm]		Vrillage [°]
			Bord d'attaque	Bord de fuite	
Al - expériences	0,50	0,020	2,1	2,1	0
Al – chaîné	0,49	0,033	1,92	1,88	-0,03
Al – couplé	X	X	X	X	X
Composite – expériences	0,51	0,026	2,6	2,5	0,09
Composite – chaîné	0,49	0,033	1,71	1,62	0,09
Composite – couplé	X	X	X	X	X

6 Conclusion et perspectives

Ce papier présente la validation d'une boucle de calculs couplés fluide – structure à l'aide de deux codes commerciaux de volumes finis / éléments finis, Starccm+ et Abaqus. Le cas de validation expérimentale est issu de la littérature et réalise l'étude d'un hydrofoil flexible en composite 3D de type NACA0009 sous chargement hydrodynamique. Un hydrofoil plus rigide en aluminium, de même dimensions et de même géométrie trapézoïdale, est également testé à l'identique. Les deux hydrofoils sont testés dans une configuration poutre encastree à la base et laissée libre à son extrémité. La simulation des hydrofoils est réalisée en trois temps, avec une validation préalable des modèles fluide et structure, puis la mise en place de calculs chaînés, *i.e* un couplage faible, permettant de vérifier le transfert des champs entre les deux solveurs, et enfin la mise en place du couplage fort. La validation se fait sur les coefficients hydrodynamiques de portance, de trainée et de moment, ainsi que sur le déplacement en extrémité de la structure. Un bon accord global est obtenu entre les résultats numériques et les expériences, malgré une sur-estimation de la trainée et une sous-estimation du déplacement en extrémité pour les calculs chaînés. Le composite présente bien un vrillage supérieur à l'aluminium, et il est par conséquent attendu que les calculs couplés se rapprochent des valeurs expérimentales par la prise en compte des effets d'interaction fluide – structure tels que le couplage vrillage – portance.

Références

- [1] Blasques, J-P, Berggreen, C., Andersen, P. (2010). 'Hydroelastic Analysis and Optimization of a Composite Marine Propeller'. Marine Structures **51**, pp.22-38
- [2] Cohen, B., Dylejko, P., Moore, S., & Philipps, A. (2014). 'Numerical Modelling and Experimental Determination of the Dynamic Behaviour of Composite Structures'. Inter-noise 2014 Melbourne, Australia
- [3] Chen, B., Neely, S., Michael, T., Gowing, S., Szwere, R., Buchler, D., Schult, R. (2006). 'Design, Fabrication and Testing of Pitch-Adapting (Flexible) Composite Propellers'. The SNAME Propellers/Shafting Symposium Williamsberg
- [4] He, X.D., Hong, Y., Wang, R.G. (2012). 'Hydroelastic Optimization of a Composite Marine Propeller in a Non-Uniform Wake'. Ocean Engineering **39**, pp.14-23
- [5] Lee, Y-J, Lin, C-C. (2004). 'Optimized Design of Composite Propeller'. Mechanics of Advanced Materials and Structures **11**, pp.17-30
- [6] Liu, Z., Young, Y.L.. (2007). 'Utilization of Deformation Coupling in Self-Twisting Composite Propellers'. 16Th International Conference on Composite Materials Kyoto, Japan
- [7] Liu, Z., Young, Y.L.. (2009). 'Utilization of Bend-Twist Coupling for Performance Enhancement of Composite Marine Propellers'. Journal of Fluid and Structures **25**, pp.1102-1116
- [8] Phillips, A., Nanayakkara, A., Cairns, R., St John, N., Herath, M. T., Zarruk, G. A., & Brandner, P. A. (2015). 'Effect of Material Anisotropy on the Structural Response of Flexible Composite Hydrofoils'. SAMPE Conference Proceedings Baltimore, Maryland
- [9] Plucinski, M.M., Young, Y.L., Liu, Z. (2007). 'Optimization of a Self-Twisting Composite Marine Propeller using a Genetic Algorithms'. 16Th International Conference on Composite Materials Kyoto, Japan
- [10] Yamatogi, T., Murayama, H., Uzawa, K., Kageyama, K., & Watanabe, N. (2009). 'Study on Cavitation Erosion of Composite Materials for Marine Propeller'. 17th International Conference on Composite Materials Edinburgh, Scotland.
- [11] Young, Y. L., Motley, M., Barber, R., Chae, E. J., & Garg, N. (2016). 'Adaptive Composite Marine Propulsors and Turbines: Progress and Challenges'. Applied Mechanics Reviews
- [12] Zarruk, G. A., Brandner, P. A., Pearce, B. W., & Phillips, A. W. (2014). 'Experimental study of the steady fluid–structure interaction of flexible hydrofoils'. Journal of Fluids and Structures **51**, pp.326-343