Co-simulation CFD / structures élancées

Alban Leroyer, Ganbo Deng, Emmanuel Guilmineau, Patrick Queutey, Michel Visonneau, Jeroen Wackers

▶ **To cite this version:**

Alban Leroyer, Ganbo Deng, Emmanuel Guilmineau, Patrick Queutey, Michel Visonneau, et al.. Co-simulation CFD / structures élancées. 25ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2022, Nantes, France. hal-03876246

HAL Id: hal-03876246
https://hal.science/hal-03876246

Submitted on 28 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Co-simulation CFD / structures élancées

A. Leroyer[a], G.B. Deng[b], E. Guilmineau[c], P. Queutey[d], M. Visonneau[e] et J. Wackers[f]

a. LHEEA, UMR-CNRS6598, Centrale Nantes, 1 rue de la Noë, 44300 Nantes, alban.leroyer@ec-nantes.fr
b. LHEEA, UMR-CNRS6598, Centrale Nantes, 1 rue de la Noë, 44300 Nantes, ganbo.deng@ec-nantes.fr
c. LHEEA, UMR-CNRS6598, Centrale Nantes, 1 rue de la Noë, 44300 Nantes, emmanuel.guilmineau@ec-nantes.fr
d. LHEEA, UMR-CNRS6598, Centrale Nantes, 1 rue de la Noë, 44300 Nantes, patrick.queutey@ec-nantes.fr
e. LHEEA, UMR-CNRS6598, Centrale Nantes, 1 rue de la Noë, 44300 Nantes, michel.visonneau@ec-nantes.fr
f. LHEEA, UMR-CNRS6598, Centrale Nantes, 1 rue de la Noë, 44300 Nantes, jeroen.wackers@ec-nantes.fr

Résumé :

De nombreuses configurations impliquant une forte interaction entre un fluide et une structure concerne naturellement les structure élancées qui peuvent être modélisées de manière efficace et précise par un modèle poutre. Les phénomènes de VIV (Vortex Induced Vibration) mettant en jeu des cables sont un exemple typique. C'est aussi le cas des hydrofoils qui sont de plus en plus utilisés dans les voiliers. Le travail présenté ici vise à proposer une approche partitionnée flexible, robuste, efficace et précise entre un code Navier-Stokes et un code poutre qui soit le moins intrusif possible vis-à-vis de ce dernier.

Abstract :

Numerous hydrodynamic configurations involving strong fluid-structure interaction concerns elongated structures which can be accurately and efficiently modelled with a 1D-beam. Vortex Induded Vibration (VIV) phenomena bringing into play cables and rods are a typical example. It is also the case of the hydrofoils which are more and more used in sailing boats. The present work aims at proposing a flexible robust, efficient and accurate partitioned approach between a Navier-Stokes code and a beam code, which is minimaly intrusive for the latter.

Mots clefs : interaction fluide-structure, co-simulation, approche partitionnée, CFD, modèle poutre

1 Introduction

De nombreuses configurations impliquant une forte interaction entre un fluide et une structure concerne naturellement les structure élancées qui peuvent être modélisées de manière efficace et précise par un modèle poutre. Les phénomènes de VIV (Vortex Induced Vibration) mettant en jeu des cables sont un exemple typique. C'est aussi le cas des hydrofoils qui sont de plus en plus utilisés dans les voiliers.

Le travail présenté ici vise à proposer une approche partitionnée flexible, robuste, efficace et précise entre un code Navier-Stokes et un code poutre qui soit le moins intrusif possible vis-à-vis de ce dernier.

Pour ce faire, le code ISIS-CFD, développé par l'équipe METHRIC du LHEEA, est utilisé. Celui-ci est basé sur une méthode Volumes-Finis utilisant des maillage non-structurés s'appuyant sur les surfaces des corps autour desquelles l'écoulement est résolu. Ce type d'approche permet de capturer précisément les couches limites turbulentes, même sur des configurations à hauts nombres de Reynolds. Lorsqu'une interaction fluide-structure est présente, les modifications de forme et de positions des corps sont naturellement prises en compte par une formulation ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian), tandis que le couplage des deux milieux est pris en charge par un algorithme implicite interne, dont le résultat à convergence est identique à une approche monolithique (voir section 2.2).

Pour améliorer l'efficacité du couplage dont les goulots d'étranglement peuvent être engendrés par la résolution de la structure (ce qui n'est pas le cas d'un modèle poutre) et par les techniques de déformation de maillage appelés après chaque résolution structure, i.e. à chaque itération non-linéaire, une méthode hybride incorporant la prise en compte des mouvements de l'interface par une condition aux limites de transpiration a été implémentée (voir section 3). De plus, pour conserver une capture précise des phénomènes turbulents sans grandes limitations par rapport au champ des possibles offert par les approches de frontières immergées, une technique de recouvrement de maillage associée à une méthode de raffinement automatique de maillage ([8]) est utilisée quand les déformations de la structure le nécessite. Cela permet d'étudier des configurations mettant en jeu de grandes déformations en conservant une bonne qualité de maillage et une maîtrise de l'erreur numérique en adaptant la densité de maillage non seulement à l'écoulement mais aussi pour assurer une bonne continuité de tailles de cellules dans la zone de recouvrement des différents domaines.

Des cas-tests de validation seront proposés, via un couplage avec deux codes poutres distincts. Le premier est un code poutre 2D nommé Beam3P développé en interne qui s'appuye sur le modèle non-linéaire décrit dans [7]. Le deuxième concerne le code BeamDyn, basé sur une implémentation Eléments-Finis spectral de Legendre d'un modèle de poutre géométriquement exact ([11]) intégré dans l'outil FAST/OpenFAST développé au NREL ([5]).

2 Co-simulation avec le code ISIS-CFD

2.1 Code Navier-Stokes ISIS-CFD

La résolution fluide est assurée par le code de calcul ISIS-CFD, développé par l'équipe METHRIC du laboratoire LHEEA de Centrale Nantes. Ce code est distribué par Cadence au sein de la suite FINE™/Marine et développé principalement pour des applications d'hydrodynamique navale. ISIS-CFD est basé sur une méthode volumes-finis sur maillages non-structurés et résout les équations de Navier-Stokes instationnaires en moyenne de Reynolds. Les configurations avec surface libre sont gérées par une méthode de

capture d'interface. Une formulation ALE ("Arbitrary Lagrangian Eulerian") est utilisée pour prendre en compte les modifications du domaine spatial fluide, engendrées par les mouvement de corps ([6]). Cette dernière est associée à des méthodes de déformation de maillage. Par défaut, une technique rapide et robuste de remaillage par pondération est utilisé pour des mouvements de corps rigides tandis qu'une méthode basée sur une approche pseudo-structure quasi-statique est mis en oeuvre pour des déformations d'interface non spécifiques telle que rencontrées dans des configurations de corps déformables ([1]. Le schéma de discrétisation temporel est le schéma décentré BDF2 ("Backward Difference Formula of order 2"). À chaque pas de temps, une boucle interne, appelée boucle non-linéaire, est utilisée pour faire converger les différents termes explicites dépendant de la solution et résoudre les non-linéarités du système et les différents couplages (couplages entre la vitesse, la pression, les quantités turbulentes, la fonction de présence,...). Le code est entièrement parallélisé par le biais du protocole MPI ("Message Passing Interface").

2.2 Algorithme de couplage

Dans le cas de mouvements résolus (que ce soit pour la résolution des lois de Newton pour les corps rigides, du module d'approche modale intégrés dans le code fluide ou bien de couplage avec des codes structures externes), le couplage entre la résolution de l'écoulement et celle des degrés de liberté de la structure se fait au sein de la boucle non-linéaire, d'où la dénomination d'*algorithme implicite interne* []). A défaut d'être mathématiquement attractif, étant donné que l'on se base à chaque couplage sur un chargement fluide en cours de convergence dont on ne connaît pas grand chose de ces propriétés, son comportement n'a jamais été mis à défaut pour autant que le temps de calcul de la structure reste limité par rapport à celle d'une itération non-linéaire fluide, afin de rester efficace en terme de temps de calcul. Cet algorithme partionné, dans lequel la boucle de convergence non-linéaire fluide a été fusionnée avec la boucle de convergence fluide-structure, permet à convergence de donner des résultats identiques à une approche monolithique.

Dans le cas présent, les codes structures pour résoudre le modèle poutre ne sont pas intégrés au code fluide, mais des échanges de données sont mis en place à chaque itération non-linéaire afin de réaliser le couplage fluide-structure (cf. figure 1).

Une interface générique a été mis en place pour faciliter le couplage avec n'importe quel code poutre. L'échange de données s'appuie sur la librairie ZMQ ([4]), basé sur un protocole de type TCP/IP. Issue d'une extension de [12] pour les corps élancés, les instabilités numériques classiques de couplage liées aux effets de masses ajoutées sont traités sans modification du coeur du solveur poutre. Par conséquent, le caractère intrusif est réduit à son minimum vis-à-vis du code poutre, qui peut être presque vu comme une boîte noire. La seule exigence est d'avoir accès à la boucle temporelle afin de résoudre plusieurs fois le même pas de temps avec des chargements fluides mis à jour jusqu'à convergence. L'objectif est de pouvoir coupler n'importe quel code poutre, en ajoutant simplement au sein de celui-ci les protocoles d'échange de données au niveau de la boucle temporelle.

3 Techniques numériques additionnelles

3.1 méthode hydride de transpiration

L'approche de déformation pseudo-structure, qui est utilisé dans le cas présent, nécessite la résolution de trois opérateurs elliptiques couplés à chaque appel (et donc à chaque itération non-linéaire), ce qui la

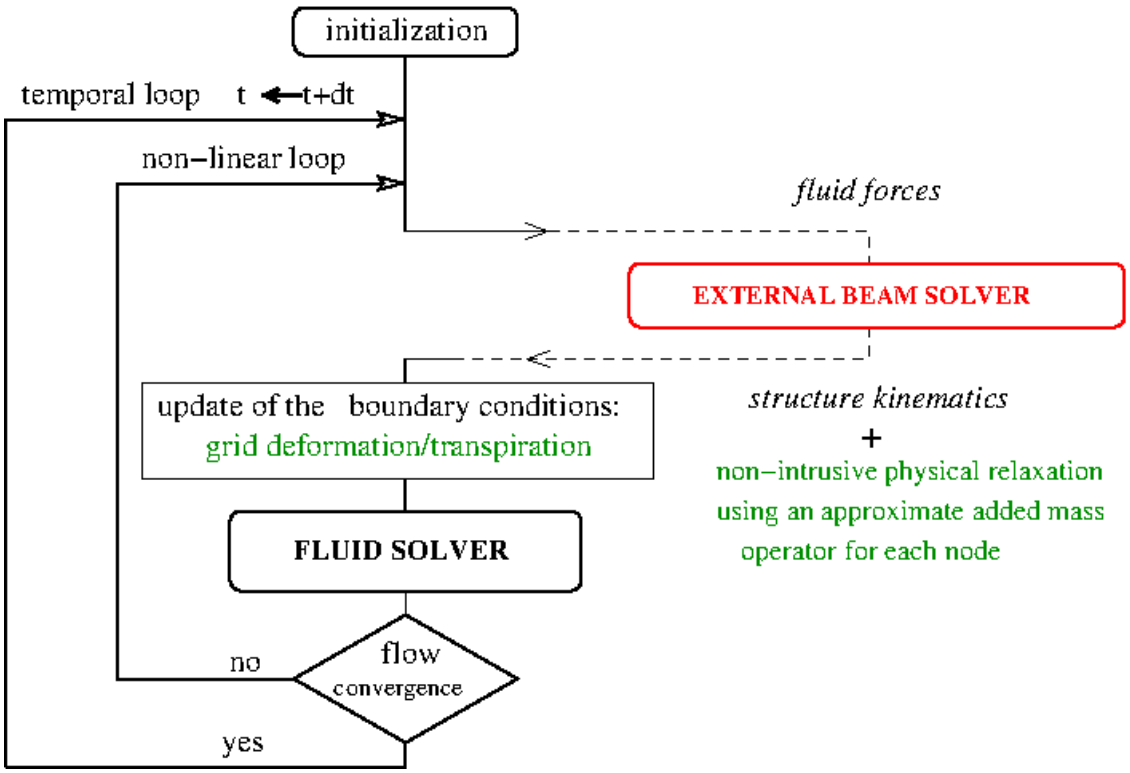

FIGURE 1 – Algorithme de couplage.

rend assez coûteuse en temps de calcul. Pour réduire drastiquement le coût calcul associé à cette étape sans compromettre la précision des résultats, une méthode de transpiration a été implémentée. Celle-ci est inspiré de [2], mais son implémentation diffère. Dans notre cas, l'approche classique de déformation de maillage est appelé à la première itération non-linéaire (i.e. à chaque nouveau pas de temps) pour se conformer à la nouvelle position prédite de la structure pour ce pas de temps. Puis, pour les itérations non-linéaire suivantes (qui correspondent à des mise à jour de la position structure au même pas de temps pour résoudre le couplage IFS), le maillage de la première itération non-linéaire est conservé et la mise à jour de la position de la structure se fait via une condition de transpiration sur les conditions aux limites, voir figure 2.

3.2 recouvrement/raffinement automatique de maillages

Afin de pouvoir traiter des configurations mettant en jeu des structures très flexibles générant de grandes déformations et de grands déplacements, l'approche ALE est couplé à une technique de recouvrement de maillage. Ainsi, seul le maillage généré autour du corps flexibles se déforme et permet des déformations de grandes amplitudes (voir figure 4) tout en conservant une très bonne qualité de maillage, notamment pour la capture des couches limites. La précision des interpolations avec le maillage de fond est assurée tout au long du calcul par l'utilisation conjointe du raffinement de maillage anisotrope qui permet automatiquement d'optimiser les tailles de cellules au voisinage des interfaces entre les domaines de calcul [8, 9].

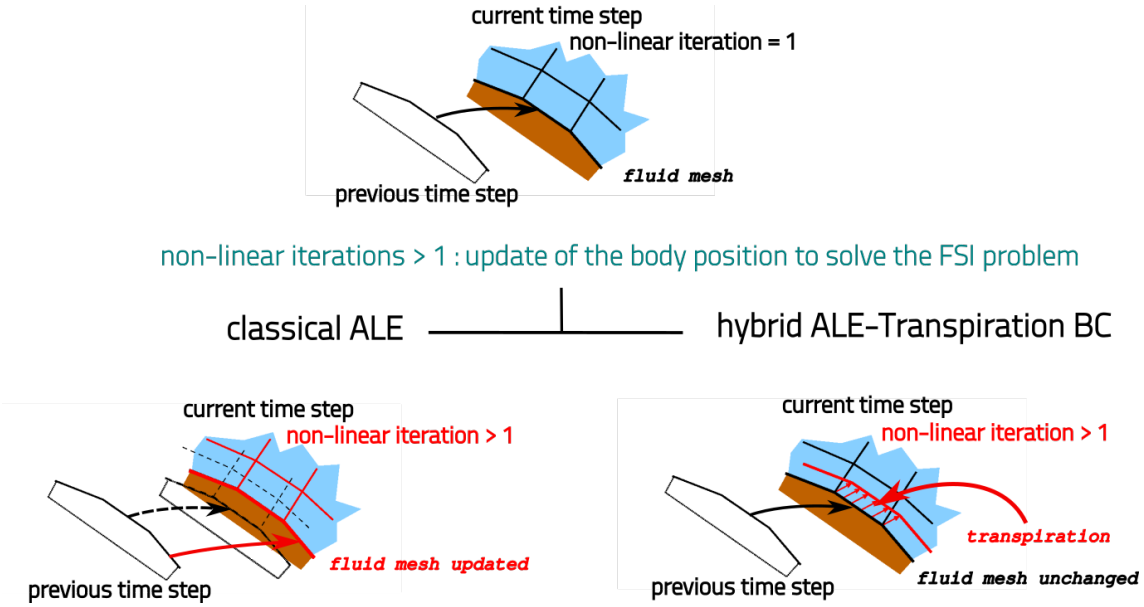

FIGURE 2 – Schématisation de la méthode hybride ALE/Transpiration. Dans la méthode ALE classique (à gauche, les frontières du maillage (rouge) sont mis à jour à partir de la nouvelle cinématique de la structure et une technique de déformation de maillage permet de retrouver un maillage (en rouge) "body-fitted". Avec la technique de transpiration, le maillage à la première itération non-linéaire est conservée et la mise à jour de la position de la structure est prise en compte par une conditition aux limites de type "transpiration" pour prendre en compte l'influence de la nouvelle position.

4 Validation

Les techniques décrites ont été mises en oeuvre pour le moment sur des premiers cas-test 2D classiques utilisés pour la validation des modèles numériques d'interaction fluide-structure : le cas-test de Glück ([3] basé sur une plaque 2D verticale soumis à un écoulement permettant d'obtenir après un transitoire un équilibre dynamique et le cas-test de Walhorn [10] reproduisant en 2D l'impact d'une structure verticale élastique après une rupture de barrage.

4.1 cas-test de Glück

Ce cas-test a été le premier mis en oeuvre car il permet d'obtenir à convergence une solution statique pour la structure, ce qui facilite les comparaisons. Pour ce cas-test, le code structure BeamDyn a été utilisé. Les caractéristiques de la configuration sont reprises sur la figure 3.

Le régime d'écoulement est laminaire. Une condition d'adhérence est appliquée à l'ensemble des parois, y compris le sol. Deux domaines de calcul avec recouvrement sont utilisés pour un total d'environ 12000 cellules : le premier représente l'ensemble du domaine complet en absence de la plaque et le deuxième est un maillage déformable autour de la plaque, voir figure 4. Les résultats obtenus en modifiant uniquement les caractéristiques de la structure sans changer le maillage basé sur une épaisseur de plaque de $10\,mm$ donnent des résultats en très bon accord avec ceux fournis dans [3].

4.2 cas-test de Walhorn

Même si la configuration de ce cas-test ressemble à celle de Glück, celui-ci diffère par la présence d'une surface libre (rupture du barrage d'eau en amont) générant une réponse dynamique forte de la structure lors de l'impact. Les principales caractéristiques sont rappelées sur la figure 5.

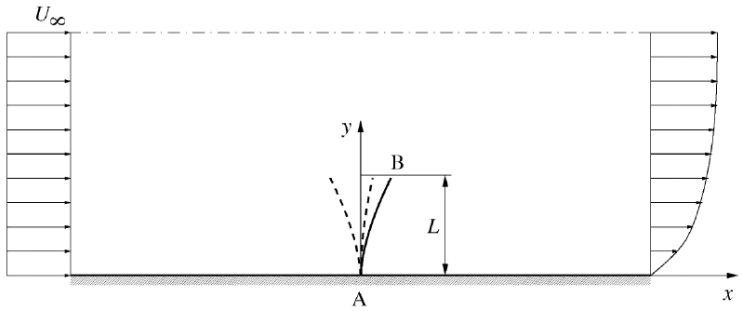

FIGURE 3 – Schématisation du cas-test. Caractéristique de la structure : longueur de la plaque $L = 1\,m$, épaisseur de la plaque $e = 3,\ 4$ ou $10\,mm$, masse volumique $\rho_s = 1200\,kg.m^{-3}$, module d'Young $E = 3500\,MPa$. Caractéristique de l'écoulement : $U_\infty = 10\,m.s^{-1}$, masse volumique $\rho_f = 1\,kg.m^{-3}$, viscosité $\mu_f = 0.2\,Pa.s$.

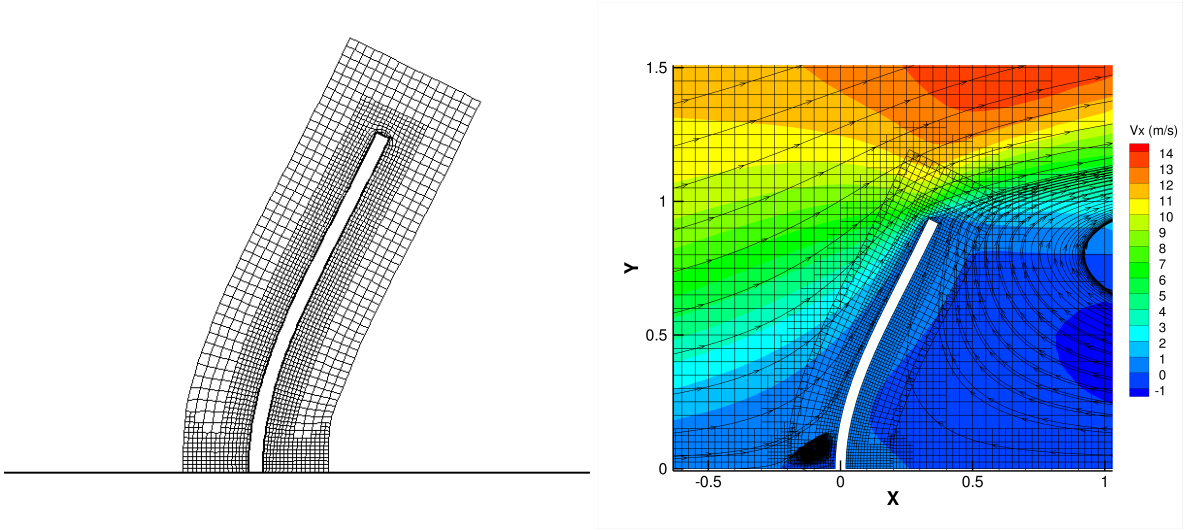

FIGURE 4 – Résultat de la déformée finale pour la configuration d'épaisseur $4,\ mm$ réalisé sur un maillage d'épaisseur $10\,mm$. A gauche : mise en évidence du maillage déformée autour de la plaque. A droite : immersion du domaine déformé dans le maillage de fond raffiné dans la zone d'interface, visualisation du champ de vitesse suivant l'axe x et de lignes de courant.

BeamDyn n'ayant pas été modifié pour pouvoir être utilisé avec un pas de temps variable (utile pour la partie fluide dans ce genre de configuration), le cas-test a été réalisé par un couplage avec le code poutre 2D non-linéaire Beam3P développé en interne. Pour ces calculs préliminaires, les équations d'Euler sont résolues avec une condition de glissement sur les parois. En plus du raffinement au niveau de l'interface entre les maillages, l'utilisation d'un critère combiné permet dans le même temps un raffinement anisotrope de la surface libre afin que celle-ci soit capturée précisément sans avoir à raffiner tout le domaine de calcul, mais uniquement au voisinage de la surface libre par un suivi dynamique (figure 6). Le nombre de cellules oscille durant le calcul entre 10000 et 18000 durant la totalité de la simulation. La déflection de l'extrémité de la plaque (figure 7) est en bon accord avec celle obtenue par [10].

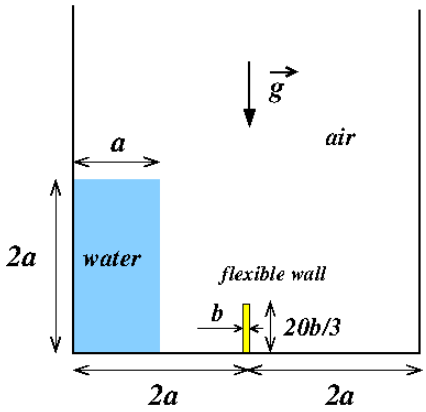

FIGURE 5 – Schématisation du cas-test. Caractéristique de la structure : $a = 14.6\,cm$, $b = 1.2\,cm$, masse volumique $\rho_s = 2500\,kg.m^{-3}$, module d'Young $E = 1\,MPa$. Masse volumique de l'eau $\rho_f = 1000\,kg.m^{-3}$.

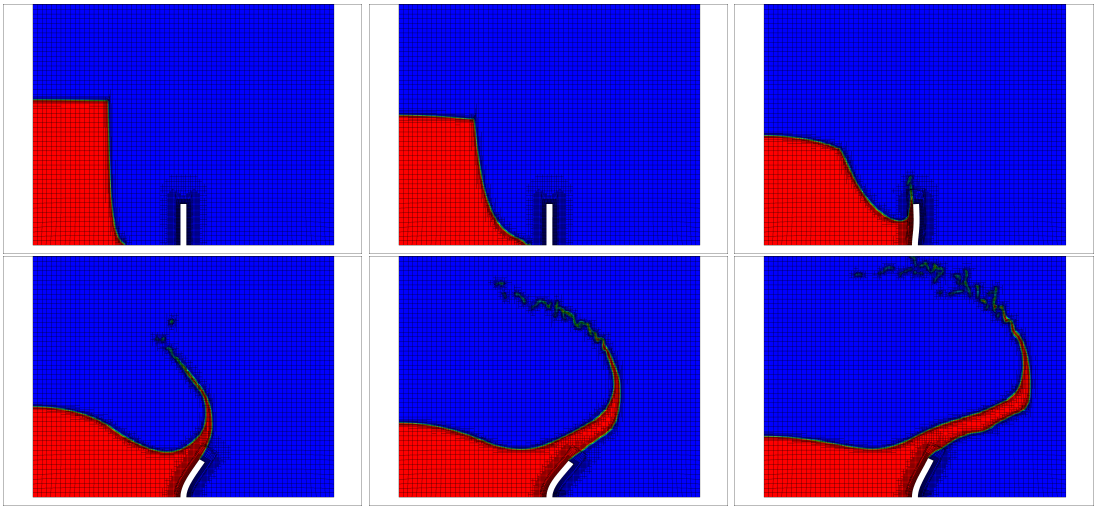

FIGURE 6 – Visualisation de l'écoulement à $t = 0.05\,s$, $t = 0.10\,s$, $t = 0.15\,s$, $t = 0.20\,s$, $t = 0.25\,s$, $t = 0.30\,s$.

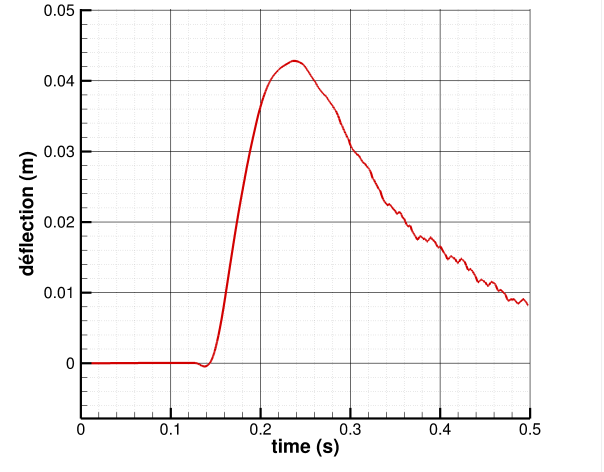

FIGURE 7 – Déflection de l'extrémité en fonction du temps.

5 Bilan et perspectives

La co-simulation mis en place permet d'obtenir un couplage stable et robuste sans pénaliser le temps de calcul, grâce à l'utilisation de l'opérateur de masses ajoutées approché (diagonalisé) évalué à partir d'un calcul spécifique au sein du code fluide et utilisé pour effectuer une relaxation physique de la cinématique résolue par la structure. Associée à une méthode hybride de transpiration limitant le nombre d'appel aux techniques de déformation de maillages à un seul appel par pas de temps (gain de temps de calcul d'environ 30 % sur les cas-tests présentés), l'écart du temps de calcul d'une simulation couplée par rapport à un calcul fluide similaire non couplé est fortement réduit. De plus, l'utilisation conjointe des méthodes numériques de recouvrement de maillage et de raffinement automatique permet de s'approcher de la versatilité des méthodes de frontières immergées sans avoir besoin de faire des concessions sur la résolution des couches limites turbulentes au niveau des parois.

L'ensemble de ces ingrédients permet d'obtenir un couplage très efficace. Des cas-test de validation supplémentaires et l'étude de configurations réalistes de foils sont envisagés à court terme afin de pouvoir comparer les résultats de ce couplage à des données expérimentales et à un couplage par approche modale par exemple.

Références

[1] G. De Nayer. *Interaction Fluide-Structure pour les corps élancés*. PhD thesis, Ecole Centrale Nantes, 2008.

[2] S. Deparis, M. A. Fernández, and L. Formaggia. Acceleration of a fixed point algorithm for fluid-structure interaction using transpiration conditions. *ESAIM : Mathematical Modelling and Numerical Analysis*, 37(04) :601–616, 2003. transpiration condition.

[3] M. Glück, M. Breuer, F. Durst, A. Halfmann, and E. Rank. Computation of fluid–structure interaction on lightweight structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89(14–15) :1351 – 1368, 2001. ISSN 0167-6105. doi : 10.1016/S0167-6105(01)00150-7. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610501001507. Bluff Body Aerodynamics and Applications, cas oscillation plaque plane verticale.

[4] P. Hintjens. *Code Connected Volume 1, Learning ZeroMQ*, 2013.

[5] J. M. Jonkman and J. Buhl, 2022. URL https://www.nrel.gov/wind/nwtc/fast.html.

[6] A. Leroyer. *Etude du couplage écoulement/mouvement pour des corps solides ou à déformation imposée par résolution des équations de Navier-Stokes. Contribution à la modélisation numérique de la cavitation.* PhD thesis, Ecole Centrale Nantes, December 2004.

[7] J. N. Reddy. *An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis : with applications to heat transfer, fluid mechanics, and solid mechanics*. OUP Oxford, 2014. Beam solver 3P.

[8] J. Wackers, G. Deng, A. Leroyer, P. Queutey, and M. Visonneau. Adaptive grid refinement for hydrodynamic flows. *Computers & Fluids*, 55(0) :85–100, 2012. ISSN 0045-7930. doi : 10.1016/j.compfluid.2011.11.004. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045793011003392.

[9] J. Wackers, G. Deng, E. Guilmineau, A. Leroyer, P. Queutey, and M. Visonneau. Combined refinement criteria for anisotropic grid refinement in free-surface flow simulation. *Computers & Fluids*, 92(0) :209 – 222, 2014. ISSN 0045-7930. doi : http ://dx.doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.12.019. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045793013005112.

[10] E. Walhorn, A. Kölke, B. Hübner, and D. Dinkler. Fluid-structure coupling within a monolithic model involving free surface flows. *Computers & Structures*, 83(25-26) :2100 – 2111, 2005. ISSN 0045-7949. doi : DOI : 10.1016/j.compstruc.2005.03.010. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045794905001768. Barrage Obstacle Fixe et Flexible.

[11] Q. Wang, M. A. Sprague, J. Jonkman, N. Johnson, and B. Jonkman. Beamdyn : A high-fidelity wind turbine blade solver in the fast modular framework. *Wind Energy*, 20(8) :1439–1462, 2017. BeamDyn ref.

[12] C. Yvin, A. Leroyer, M. Visonneau, and P. Queutey. Added mass evaluation with a finite-volume solver for applications in fluid–structure interaction problems solved with co-simulation. *Journal of Fluids and Structures*, 81 :528–546, 2018.