



HAL
open science

Couplages de codes de calcul scientifique pour l'étude des interactions fluide structure en présence d'écoulements

Elisabeth Longatte

► **To cite this version:**

Elisabeth Longatte. Couplages de codes de calcul scientifique pour l'étude des interactions fluide structure en présence d'écoulements. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03378598

HAL Id: hal-03378598

<https://hal.science/hal-03378598>

Submitted on 14 Oct 2021

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.

Couplage de codes de calcul scientifique pour l'étude des interactions fluide structure en présence d'écoulements

E. LONGATTE^a, M. SOULI^b

a. Département Mécanique des Fluides, Energies et Environnement (MFEE), EDF R&D, CHATOU
b. Laboratoire de Mécanique de Lille (LML), Université de Lille, VILLENEUVE D'ASCQ

Résumé :

Pour l'étude de certains phénomènes couplés multi-physiques, la voie du couplage de codes qui consiste à faire communiquer entre eux des outils mono-disciplinaires semble prometteuse. Effectuer un calcul couplé revient à faire communiquer des milieux distincts à travers une ou plusieurs interfaces communes. Le mécanisme d'un calcul couplé dynamique instationnaire est décrit puis illustré au travers de quelques exemples. Ils sont consacrés à l'interaction fluide structure intervenant lorsque le changement de la géométrie à l'interface induit par un champ de pression dans le fluide, un cisaillement ou une perte de charge a un effet significatif sur l'écoulement et les chargements pariétaux en retour.

Abstract :

Understanding of coupled multi-physics problems is still a challenge to overcome. Code coupling seems to be an interesting approach and consists in building a communication process between single-physics solvers. Performing a coupled computation requires suitable data transfer through the interface. An unsteady dynamics coupling process is described and computation is illustrated with few examples. Test cases are devoted to fluid structure interaction problems with or without mean flow.

Mots clefs : couplage, flottement

1 Introduction

Le recours à la modélisation et au calcul scientifique est devenu systématique y compris pour la compréhension de phénomènes physiques isolés. La voie du couplage de codes qui consiste à faire communiquer entre eux des outils informatiques distincts semble donc prometteuse pour aborder les physiques couplées sous réserve que les modèles aux interfaces et leur compatibilité soient maîtrisés.

Effectuer un calcul couplé revient à faire communiquer au moins deux milieux à travers une ou plusieurs surfaces communes : l'interface de couplage. Le principe réside en un calcul simultané des deux codes avec des échanges réguliers d'informations, ou plus précisément de quantités physiques au niveau de l'interface de couplage. Dans le cadre d'un couplage dynamique fluide structure, le fluide transmet une contrainte au solide qui lui restitue un déplacement ou une vitesse (FIG. 1). Du point de vue pratique, la communication est prise en charge par l'intermédiaire d'une bibliothèque de couplage qui assure le transfert des quantités physiques d'une part, des connectivités géométriques d'autre part. Grâce à un certain nombre d'échanges successifs à chaque étape du processus de communication, il est possible d'obtenir une description du couplage instationnaire entre les deux milieux. Le mécanisme d'un calcul couplé dynamique instationnaire est décrit puis illustré au travers de quelques exemples.

2 Couplage

La question de la procédure à mettre en œuvre pour coupler un calcul CFD et un calcul CSD a été abordée à plusieurs reprises dans la littérature au cours de ces dernières années [1][2]. La procédure la plus basique consiste en un couplage partitionné totalement explicite avec un échange entre les solveurs alternativement à chaque itération au niveau des conditions aux limites. Cette technique présente l'intérêt d'être aisée du point de vue de sa mise en œuvre puisque le choix des solveurs fluide et structure a priori indépendants peut être libre. Néanmoins elle ne garantit pas de bonnes propriétés en terme de stabilité. La principale raison qui conduit à une perte de stabilité est liée au décalage induit au niveau des résolutions fluide et solide par le

couplage explicite. Si l'itération n du solveur CFD se termine au temps t_{fn} au-delà du temps physique t_{sn} correspondant à la fin de l'itération n du solveur CSD, nécessairement la position de l'interface au pas de temps $t_{f(n+1)}$ doit être extrapolée. Cette extrapolation peut être faite à partir d'une variété d'interpolateurs (linéaire, cubique...) à partir de la position au temps t_{sn} mais selon toutes probabilités, la prédiction de la position de l'interface ne peut correspondre à la position calculée par le solveur CSD au temps $t_{s(n+1)}$. Dans certains cas extrêmes, cette non-coïncidence des positions de l'interface perçues par les deux solveurs peut conduire à une instabilité numérique comme illustré sur la FIG. 2.

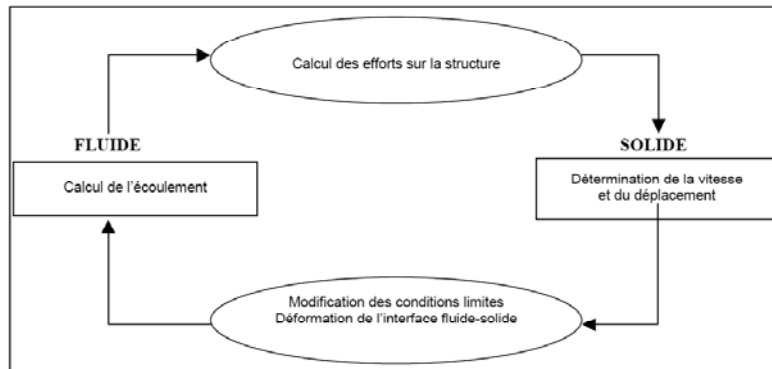


FIG. 1 – Echange de données entre deux solveurs CFS/CSD.

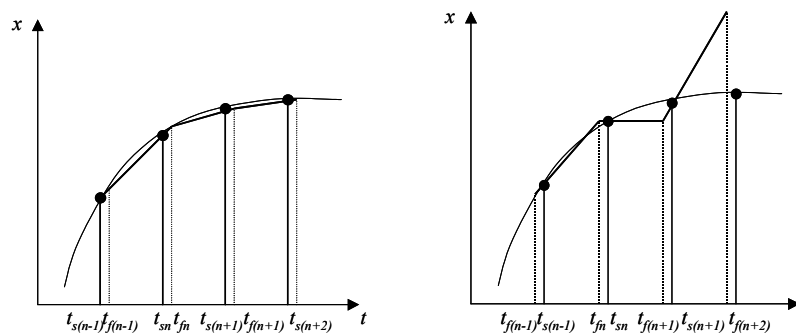


FIG. 2 – Procédure itérative de couplage explicite : cas stable (à gauche), cas instable (à droite).

A l'inverse, une procédure de couplage monolithique implicite permet d'envisager la résolution de toutes les inconnues simultanément aux mêmes instants et d'assurer une convergence vers la solution de façon optimale par résolution d'un système couplé complet sous la forme :

$$\begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sf} \\ K_{fs} & K_{ff} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_s \\ F_f \end{pmatrix}$$

où F_f et F_s représentent respectivement les chargements exercés par le fluide sur les parois de la structure et les contraintes induites dans le fluide sous l'effet de la dynamique de l'interface. Le couplage fort consiste à résoudre le système non linéaire discret couplé des équations de dynamique du fluide, du solide et de leur interface en un seule étape, la compatibilité de la discrétisation spatiale des interfaces pouvant également être forcée [1]. Cette procédure assure la convergence vers la solution mais elle n'est pas toujours compatible avec le processus de développement de codes CFD et CSD indépendants.

L'approche usuelle est intermédiaire et consiste à utiliser une procédure itérative permettant de satisfaire le mieux possible le principe d'action-réaction à chaque itération grâce à l'introduction d'une procédure de prédiction-correction sur la position de l'interface (FIG. 3) [3][4][5].

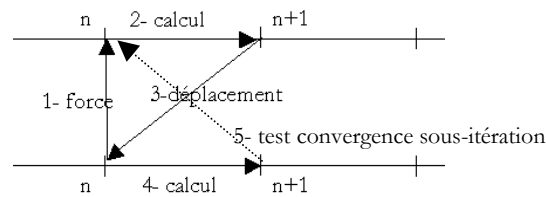


FIG. 3 – Rôle des procédures itératives de couplage.

3 Interface

Le couplage en espace est assuré par une interface dont la fonction est d'assurer la compatibilité des discrétisations en espace retenues à l'interface dans les deux codes CFD et CSD. Non seulement les maillages peuvent être incompatibles mais également les formulations. Si les formulations variationnelles des deux problèmes sont établies dans un espace vectoriel de dimension finie de fonctions de bases notées φ_f et φ_s , les termes échangés par les deux sous-systèmes prennent la forme générale d'une somme de

termes du type : $\int_{\Gamma_{IFS}} \varphi_s(\sigma) \varphi_s(\sigma) d\sigma$ où Γ_{IFS} représente l'interface entre les deux milieux (FIG. 4). Le

couplage en espace consiste alors à multiplier les valeurs des degrés de liberté d'un sous-système par la matrice associée à ce terme général ou à sa transposé puis à assurer la transmission de la donnée obtenue.

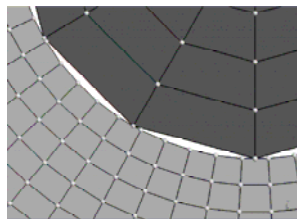


FIG. 4 – Projection de champs à l'interface [2].

En cas d'utilisation d'une formulation avec grille mobile ce qui est le cas du solveur CFS utilisé, le calcul de ces termes d'échange requiert une régularité maximale au niveau de la frontière. Aussi est-il utile d'introduire localement un coefficient de diffusion orthotrope de déformation de maillage afin de contrôler la régularité du maillage au voisinage des parois mobiles (FIG. 5) [3][6].

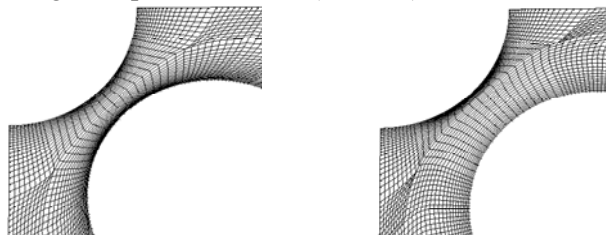


FIG. 5 – Contrôle de la dynamique de maillage à l'interface.

4 Inertie et confinement

Pour mettre en évidence l'effet des forces d'inertie qu'exerce un fluide sur les parois d'une structure vibrante, il est possible de négliger la compressibilité et la viscosité du fluide ainsi que tout effet lié à la pesanteur. Dans le cadre des petits déplacements, le système couplé constitué de l'équation de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de la condition de continuité sur les vitesses à l'interface fluide solide est linéaire et implique que la pression du fluide en paroi est proportionnelle à l'accélération du solide. Ainsi la force induite par le champ de pression correspond à une force d'inertie et se traduit par une augmentation de la masse apparente du solide immergé dans le fluide. La différence entre la masse apparente et la masse structurelle est appelée la masse ajoutée.

Ainsi en l'absence d'amortissement structural, la dynamique de la structure est régie par un système de la forme :

$$(M_s + M_a)\ddot{X}_s + K_s X_s = 0$$

où le terme $F_{fs} = -M_a \ddot{X}_s$ désigne la force d'inertie exercée par le fluide sur la structure.

Les coefficients inertiels dépendent de différents paramètres comme le rapport des masses volumiques fluide et solide, la forme du champ d'accélération initial imposé à la structure, les conditions aux limites ou encore la géométrie du domaine fluide. Ainsi le confinement du domaine a une influence sur les termes d'inertie. En effet, si l'énergie potentielle du système global n'est pas affectée par le fluide dans ce cas, l'énergie cinétique est composée des contributions des énergies cinétiques du fluide et du solide, soit dans le cas d'un mouvement de corps rigide :

$$E_c = \frac{1}{2} M_s \dot{X}_s^2 + \int_{\Omega_f} \frac{1}{2} \rho_s \dot{X}_f^2 d\Omega$$

Par suite, en vertu de l'équation de continuité, plus le confinement est grand, plus la vitesse du fluide est élevée et l'augmentation de l'énergie cinétique est quadratique par rapport à la diminution de volume de fluide. L'effet de masse ajoutée est donc accentué par le confinement (FIG. 6).

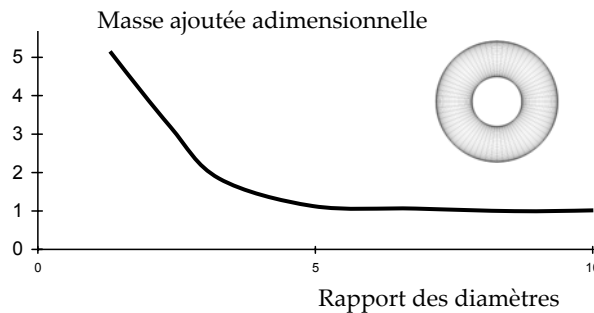


FIG. 6 – Reproduction de l'effet de confinement pour un nombre de Stokes infini avec le couplage de codes CFD/CSD [3].

5 Couplage inertiel

Lorsqu'un même volume de fluide baigne les parois de plusieurs structures vibrantes initialement indépendantes, il modifie leurs modes propres, non seulement par effet de masse ajoutée, mais également par un effet de couplage inertiel car l'oscillation d'une structure est généralement transmise à l'autre par l'intermédiaire du fluide. Ce phénomène est illustré sur la FIG. 7. Le système dynamique initial du système complet se retrouve couplé par l'intermédiaire de termes de couplages traduisant l'effet indirect du mouvement d'une structure sur les chargements pariétaux appliqués sur la structure voisine.

$$\begin{bmatrix} M_{s1} + M_{a1} & M_{a12} \\ M_{a21} & M_{s2} + M_{a2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_{s1} \\ \ddot{X}_{s2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{s1} & 0 \\ 0 & K_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{s1} \\ X_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

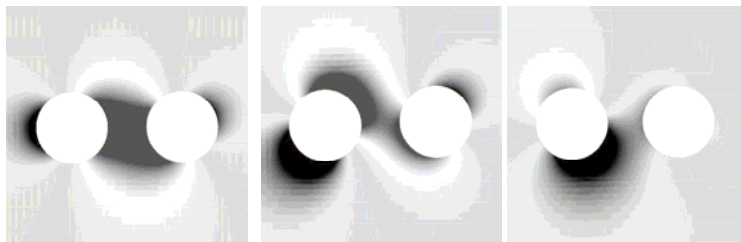


FIG. 7 – Reproduction de l'effet de couplage inertiel pour un nombre de Stokes infini avec le couplage de codes CFS/CSD [2].

6 Dissipation par viscosité

En présence de viscosité, le tenseur des contraintes du fluide comprend non seulement les termes de pression mais également les termes visqueux.

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \rho\nu \left(\frac{\partial \dot{X}_{fi}}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{X}_{fj}}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \dot{X}_{fi}}{\partial x_i} \right)$$

Le fluide induit des chargements fonctions de la vitesse de la paroi, créant ainsi un amortissement. Une analyse adimensionnelle montre que l'amortissement réduit dû à la viscosité du fluide est de l'ordre de :

$$\xi_v = \frac{M_a}{M_s + M_a} \sqrt{\frac{1}{S_v}} \text{ si } S_v \gg 1$$

$$\xi_v = \frac{M_a}{M_s + M_a} \frac{1}{S_v} \text{ si } S_v < 1$$

où $S_v = \frac{\omega L^2}{\nu}$ le nombre de Stokes caractérise l'importance relative de la viscosité par rapport à l'inertie, L étant l'échelle de variation de la vitesse dans la direction où le gradient de vitesse est maximal. L'importance de la dissipation dépend donc de la viscosité et du degré de confinement. Pour de grands nombres de Stokes, cette dissipation est très faible. Les effets combinés de la viscosité et du confinement sont illustrés sur la FIG. 8.

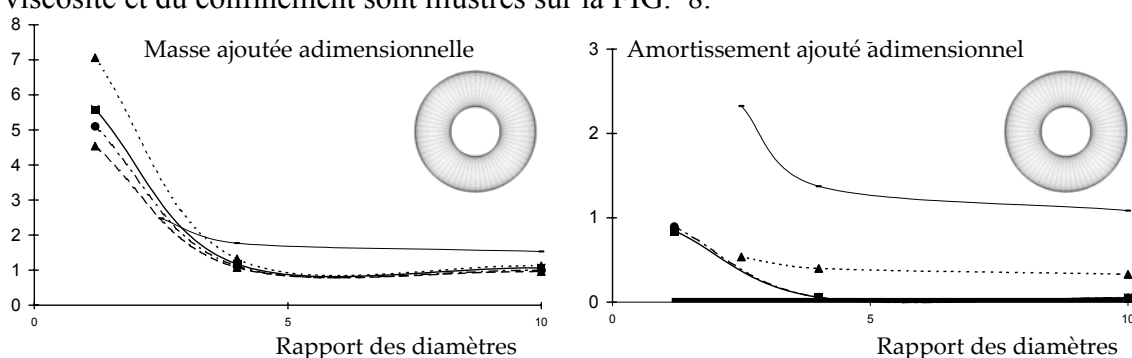


FIG. 8 – Reproduction de l'effet de dissipation par viscosité du fluide pour différentes valeurs du nombre de Stokes avec le couplage de codes CFS/CSD (par ordre d'amortissement croissant : Stokes infini, 5000, 100, 10) [3].

7 Flottement et instabilité

En présence d'un fluide en écoulement, les forces exercées par l'écoulement moyen sur les parois de la structure vibrante jouent également un rôle. A cet égard, la classe de problèmes avec écoulements non décollés est intéressante puisque dans certains cas, les forces fluide-élastiques pariétales peuvent se déduire à minima en première approximation des équations d'Euler. Cette hypothèse est légitime dans le cas d'un conduit souple parcouru par un écoulement interne car les forces de friction sont compensées le gradient de pression qui assure l'écoulement permanent à l'intérieur du conduit. Il est donc possible de les négliger. La force fluide-élastique est alors la contribution des termes suivants : un terme d'amortissement visqueux proportionnel à la vitesse débitante et à l'angle de flexion provenant de la force de Coriolis, un terme de raideur proportionnel à la pression dynamique et issu de la force centrifuge par courbure de la déformée du tube, un terme de raideur supplémentaire jouant le rôle d'une pré-contrainte.

Suivant les configurations, le premier mode du tube peut devenir instable par flambage et le second mode par amortissement négatif. Dans ce dernier cas, le flottement est illustré sur les FIG. 9 et FIG. 10.



(a) Cas stable



(b) Cas instable

FIG. 9 – Reproduction du flottement d'un conduit par parcouru par un fluide en écoulement avec le couplage de codes CFS/CSD : évolution au cours du temps de la pression et de la déformation du solide pour différentes vitesses réduites (a) cas stable (b) cas instable [2].

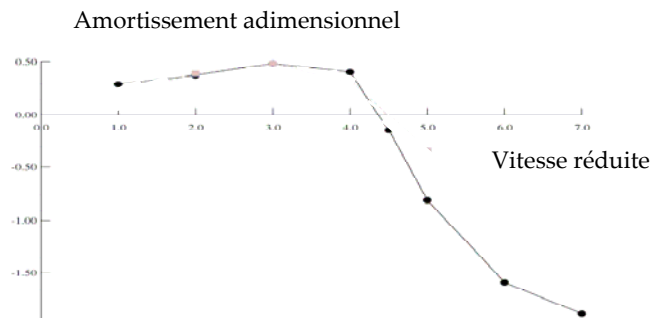


FIG. 10 – Reproduction de l'effet de production d'amortissement négatif avec le couplage de codes CFS/CSD [2].

Conclusion

Cet article présente le couplage entre un solveur fluide et un solveur structure de type poutre. Les principales méthodes mises en œuvre sont rappelées et leur application dans le cadre d'études de vibrations induites par écoulement de fluide est illustrée. Les principaux phénomènes intervenant dans le cadre de l'interaction entre un solide en mouvement et un fluide avec ou sans écoulement permanent en l'absence de turbulence sont reproduits. La prochaine étape porte sur l'extension des modèles d'interface à la turbulence, au caractère multi-phasique des écoulements ou encore à des fortes non-linéarités du comportement dynamique du solide.

References

- [1] Fernandez, M.A., Gerbeau, J.F., Grandmont, C., A projection algorithm for fluid structure interaction problems with strong added mass effect, *C.R. Acad. Sci. Paris, Ser. I*, 342, 379-284, 2006.
- [2] Huvelin, F., Couplage de codes en interaction fluide structure et applications aux instabilités fluide-élastiques, *Thèse de doctorat*, Université de Lille, 2008.
- [3] Longatte, E., Verreman, V., Souli, M., Time marching for simulation of fluid structure interaction problems, *Journal of Fluids and Structures*, 25, 95-111, 2009.
- [4] Piperno, S., Farhat, C., Larrouturou, Partitioned procedures for the transient solution of coupled aero-elastic problems Part I : model problem, theory and two-dimensional application, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 124, 79-112, 1995.
- [5] Piperno, S., Farhat, Partitioned procedures for the transient solution of coupled aero-elastic problems Part II : energy transfer analysis and three-dimensional applications, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 190, 3147-3170, 2001.
- [6] Schaefer, M., Fluid structure interaction : modelling, simulation, optimisation, Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co, Ed. 1, 2006.