



HAL
open science

Couplage éléments-finis/volumes-finis pour de l'interaction fluide compressible/structures-immersées en dynamique transitoire

Olivier Jamond, Vincent Faucher, Alberto Beccantini

► **To cite this version:**

Olivier Jamond, Vincent Faucher, Alberto Beccantini. Couplage éléments-finis/volumes-finis pour de l'interaction fluide compressible/structures-immersées en dynamique transitoire. 12e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2015, Giens, France. hal-01517293

HAL Id: hal-01517293

<https://hal.science/hal-01517293>

Submitted on 3 May 2017

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.

Public Domain

Couplage éléments-finis/volumes-finis pour de l'interaction fluide-compressible/structures-immergées en dynamique transitoire

O. Jamond^{1,2}, V. Faucher^{1,2}, A. Beccantini^{1,2}

¹ CEA, DEN, DM2S, SEMT, DYN, Gif sur Yvette, France, F-91191

² IMSIA, UMR 8193, CNRS-EDF-CEA-ENSTA, Université Paris Saclay, 828 Bd des Maréchaux, Palaiseau, France
olivier.jamond@cea.fr; vincent.faucher@cea.fr

Résumé — Dans ces travaux, on s'intéresse à la simulation de transitoires rapides pour un fluide non-visqueux compressible en interaction avec des structures minces. Le problème fluide est traité en volumes-finis. Le problème structure est traité en éléments-finis de type plaque. On propose une formulation de couplage fluide/structure permettant l'utilisation de maillages indépendants pour le fluide et la structure.

Mots clés — couplage fluide/structure, dynamique transitoire, frontières immergées.

1 Eléments de contexte

La simulation des transitoires brutaux issus de situations accidentelles dans des réacteurs nucléaires requiert fréquemment la modélisation simultanée de fluides (liquides ou gaz), en interaction avec des structures pouvant se déformer jusqu'à la ruine. Ceci conduit à la volonté de coupler des modélisations/discrétisations différentes, telles que des éléments-finis, des volumes-finis ou des particules SPH pour le fluide, et des éléments-finis volumiques ou surfaciques, des particules SPH ou des éléments discrets pour la structure. Le code explicite EUROPLEXUS (EPX, <http://www-epx.cea.fr/>) fédère un certain nombre de possibilités de couplage entre ces différentes modélisations/discrétisations. Notamment, il offre la possibilité de coupler par multiplicateurs de Lagrange un fluide en éléments-finis avec des structures immergées en éléments-finis (cf. [1]). Il permet aussi de coupler par multiplicateurs de Lagrange un fluide en volume-finis avec une structure en éléments-finis, mais dont le maillage est conforme avec celui du fluide, en suivant l'approche proposée dans [2].

Les travaux relatifs à cette note concernent des situations où l'on souhaite s'affranchir de contraintes de maillage (la géométrie de la structure est complexe et/ou subit de grands déplacements) et avoir une discrétisation volumes-finis du problème fluide (présence de chocs forts). On propose ici une formulation de couplage entre un fluide compressible en volume-finis et une structure mince immergée en éléments-finis. Les développements associés sont implémentés en 3D dans EPX et portés en parallèle.

2 Formulation du problème considéré

On s'intéresse à un fluide non-visqueux compressible occupant un domaine $\Omega \subset \mathbb{R}^3$. Dans ce fluide est plongée une structure mince dont on ne représente explicitement que la fibre moyenne. Cette fibre moyenne occupe la surface Γ . La dynamique du fluide est gouvernée par les équations d'Euler, écrites sous forme conservative locale :

$$\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\partial_t (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\mathbf{u} \otimes (\rho \mathbf{u}) + p \mathbf{I}) = \mathbf{0} \quad (2)$$

$$\partial_t (E) + \nabla \cdot ((E + p) \mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

où \mathbf{u} est la vitesse du fluide, ρ la densité, p la pression et E l'énergie totale volumique. La dynamique de la structure est gouvernée par l'équation d'équilibre, écrite sous forme locale :

$$\rho \ddot{\mathbf{v}} + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{f} \quad (4)$$

où \mathbf{v} est la vitesse de la structure, $\boldsymbol{\sigma}$ est le tenseur de contrainte de Cauchy et \mathbf{f} une densité volumique d'effort. En pratique, on cherche des solutions de formes intégrales ou faibles des équations (1)-(4) afin de s'autoriser des solutions de plus faible régularité.

Un couplage entre les problèmes fluide et structure résulte d'une condition d'égalité des vitesses normales au niveau de la fibre moyenne de la structure :

$$\forall \mathbf{x} \in \Gamma, [\mathbf{v}(\mathbf{x}) - \mathbf{u}(\mathbf{x})] \cdot \mathbf{n}(\mathbf{x}) = 0 \quad (5)$$

où $\mathbf{n}(\mathbf{x})$ est le vecteur normal à Γ en \mathbf{x} . Par ailleurs, on s'assure de la conservation de la quantité de mouvement pour le système global fluide/structure au niveau de ce couplage.

Les équations fluide (1)-(3) sont discrétisées et intégrées en temps suivant un schéma explicite de type Godunov sur un maillage eulérien volumique de Ω noté \mathcal{T}_f . L'équation structure (4) est discrétisée par éléments-finis suivant une modélisation de type plaque sur un maillage lagrangien de la fibre moyenne de Γ noté \mathcal{T}_s . Elle est intégrée en temps en utilisant le schéma explicite des différences centrées.

3 Formulation discrète du couplage

Le couplage est traité en remplaçant, pour le problème fluide, la structure mince par un volume Ω_Γ englobant cette structure. Le domaine de calcul pour le fluide est alors $\Omega \setminus \Omega_\Gamma$. Une condition de vitesse normale imposée, calculée à partir de la vitesse de la structure, est appliquée sur l'interface $\partial\Omega_\Gamma$. Par ailleurs, le flux de quantité de mouvement du fluide vers le volume Ω_Γ est retransmis localement sur la structure.

3.1 Discrétisation en espace

Dans la suite, on désigne par C^i la cellule indexée i du maillage fluide \mathcal{T}_f et F^{ij} la face communes aux cellules C^i et C^j . Le volume Ω_Γ est la réunion des cellules de \mathcal{T}_f qui sont intersectées par la fibre moyenne de la structure Γ . On note \mathcal{T}_Γ l'ensemble de ces cellules : $\mathcal{T}_\Gamma = \{C^i \in \mathcal{T}_f, C^i \cap \Gamma \neq \emptyset\}$.

Le problème discret fluide est résolu en introduisant une condition de paroi mobile pour chaque face F^{ij} sur l'interface Ω_Γ , c'est à dire telle que $C^k \in \mathcal{T}_\Gamma, C^l \notin \mathcal{T}_\Gamma, (k, l) \in \{i, j\}^2, k \neq l$. En supposant $k = j$, on attribue à cette paroi la vitesse normale moyenne de la structure sur la cellule C^k :

$$v_\Gamma^{ik} = \frac{\int_{\Gamma \cap C^k} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \, d\mathbf{x}}{\int_{\Gamma \cap C^k} d\mathbf{x}} \quad (6)$$

A la manière de ce qui est proposé dans [3], le flux numérique Φ^{ik} résultant de cette condition de paroi mobile sur la face F^{ik} est obtenue à partir de la solution en $x/t = 0$ du problème de Riemann pour cette face, en ayant remplacé l'état U^k de la cellule C^k par un état dit fantôme $U^{\bar{i}}$, défini en variable primitives par : (ici, u_n désigne la vitesse normale à la face, u_t la vitesse tangentielle, et e l'énergie interne)

$$\begin{cases} \rho^{\bar{i}} = \rho^i \\ u_n^{\bar{i}} = 2v_\Gamma^{ik} - u_n^i \\ \mathbf{u}_t^{\bar{i}} = \mathbf{u}_t^i \\ e^{\bar{i}} = e^i \end{cases} \quad (7)$$

La solution de ce problème de Riemann est notée $U_{\mathcal{R}}^{\bar{i}\bar{i}}(x/t = 0)$.

Le flux de quantité de mouvement Φ_q^{ik} transmis par le fluide à la structure par la face F^{ik} est obtenu à partir de la solution du problème de Riemann $U_{\mathcal{R}}^{\bar{i}\bar{i}}(x/t = v_\Gamma^{ik})$. Ce flux de quantité de mouvement est retransmis à la structure sous la forme d'une densité d'effort de surface :

$$\mathbf{f}_s(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i, C^i \in \mathcal{T}_\Gamma} (\Phi_q^{ik} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}}{\int_{\Gamma \cap C^k} d\mathbf{x}}, \mathbf{x} \in C^k \quad (8)$$

Cette densité d'effort est intégrée classiquement pour donner de le vecteur d'effort dû au couplage pour le problème éléments finis structure :

$$\mathbf{F}_S = \int_{\Gamma} \mathbf{N}(\mathbf{x})^T \cdot \mathbf{f}_s(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} \quad (9)$$

On note que l'intégrande est a priori discontinue au niveau de chaque élément fini du problème structure. Son calcul efficace, ainsi que le calcul des intersections $\Gamma \cap C^i$, $C^i \in \mathcal{T}_f$, repose sur des outils géométriques avancés.

Enfin, lorsqu'une cellule fluide quitte \mathcal{T}_Γ , parce que la structure s'est déplacée, et se retrouve ainsi dans le domaine de calcul fluide, il faut lui attribuer un état. Différentes approches sont à l'étude.

3.2 Discrétisation en temps

On cherche à résoudre le problème fluide-structure entre t^n et t^{n+1} . Pour le problème structure, on calcule, suivant le schéma des différences centrées, la position de la structure Γ^{n+1} à t^{n+1} et la vitesse $v^{n+1/2}$ à $t^{n+1/2} = (t^{n+1} + t^n)/2$ uniquement à partir de l'accélération \dot{v}^n à t^n . Pour le problème fluide, on utilise la position de la structure Γ^{n+1} pour calculer les intersections $\Gamma \cap C^i$, $C^i \in \mathcal{T}_f$. On utilise la vitesse de la structure v^{n+1} pour le calcul de la vitesse d'interface dans l'équation (6). Enfin, l'accélération structure \dot{v}^{n+1} est calculée en introduisant l'effort de couplage (9) dans l'équation d'équilibre discrète.

4 Illustrations numériques

La figure 1 illustre l'utilisation du couplage proposé dans cette note sur un cas de détente d'un gaz dans une boîte carrée et compare qualitativement la solution obtenue à une solution de référence calculée en ALE (pas de frontières immergées) à 2 instants de la simulation. Les deux instants correspondent chacun à une ligne de la figure. La première colonne montre la pression pour le couplage proposé. La seconde colonne montre la pression pour la solution de référence ALE. La troisième colonne montre la structure déformée pour le couplage proposé en bleu, et pour la solution de référence ALE en rouge. On observe que les structures déformées sont quasiment confondues, ce qui atteste de la validité du

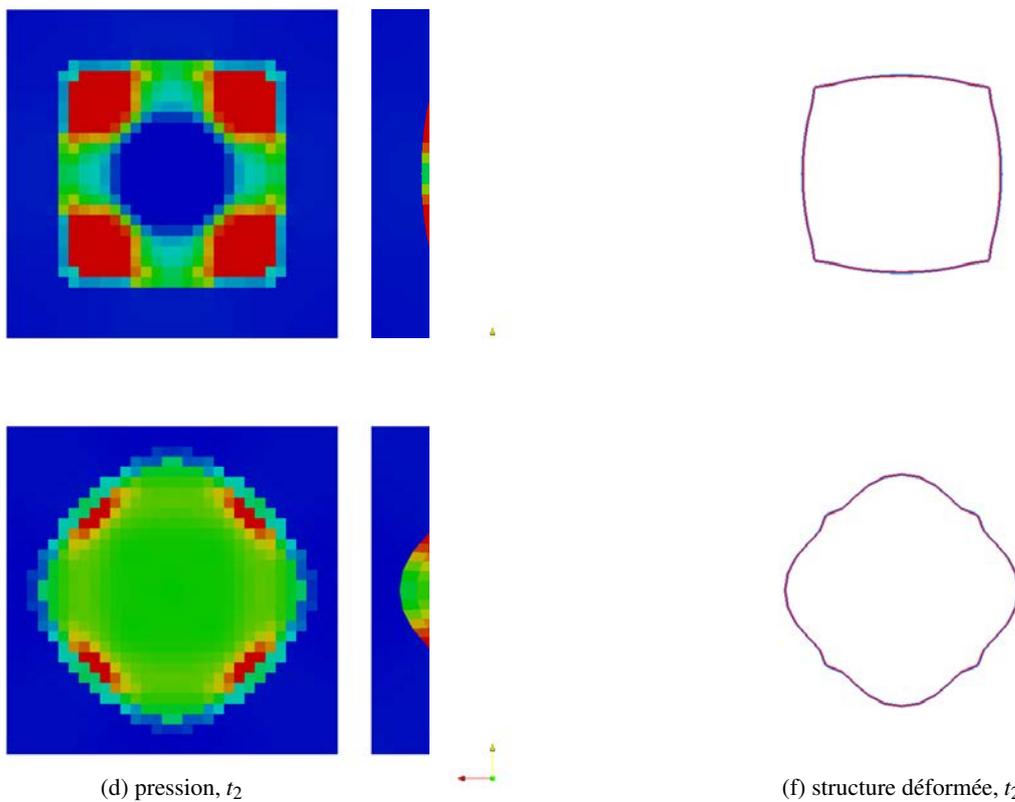


FIGURE 1 – Comparaison de la solution obtenue avec le couplage proposé et une solution de référence ALE à 2 instants d'une simulation de détente d'un gaz dans une boîte carrée.

Références

- [1] V. Faucher. *Méthodes numériques et algorithmes parallèles pour la dynamique rapide des systèmes fluide-structure fortement couplés*, rapport d'HDR, INSA de Lyon, 2014.
- [2] F. Casadei, N. Leconte. *Coupling finite elements and finite volumes by Lagrange multipliers for explicit dynamic fluid-structure interaction*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 86(1), 1-17, 2011.
- [3] R. Löhner, J. R. Cebal, F. E. Camelli, S. Appanaboyina, J. D. Baum, E. L. Mestreau, O. A. Soto. *Adaptive embedded and immersed unstructured grid techniques*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 197(25), 2173-2197, 2008