

INTERACTION FLUIDE-STRUCTURE SUR GRILLE CARTÉSIENNE

La résolution des phénomènes d'interaction fluide-structure est cruciale pour de nombreuses applications. Deux matériaux — ici un fluide compressible et un corps rigide — de lois de comportement très différentes, interagissent entre eux : l'écoulement du fluide est conditionné par la forme et le déplacement de la structure, tandis que le mouvement du solide est régi par les forces et moments de pression exercés à sa surface par le fluide. C'est un problème fortement couplé dont la résolution numérique à haut degré de précision demeure un défi, la précision allant souvent à l'encontre de la stabilité. Tirant parti du savoir-faire développé au CEA – DAM sur les schémas d'ordre arbitrairement élevé sur grille cartésienne, une méthode stable, robuste et précise permettant ce couplage est proposée en même temps que sont développés des outils numériques pour l'analyse de la stabilité des conditions aux bords **1**.

Les problèmes d'interaction fluide-structure interviennent dans de nombreux domaines abordés au CEA – DAM. Une des applications qui a motivé cette étude concerne la simulation des effets à courte et longue distance d'ondes de souffle, couvrant à la fois les champs proches (réponse de structures aux ondes de choc) et les champs lointains (infrasons et signature aéroacoustique). Notre laboratoire a développé un réel savoir-faire sur les schémas d'ordre très élevé sur grille cartésienne **2**, permettant à moindre coût de calcul de suivre l'évolution des ondes aéroacoustiques sur de longues distances. Il restait néanmoins à trouver une façon de les appliquer au voisinage d'obstacles à géométrie complexe (l'interface ne coïncide pas avec le maillage). Il s'agit d'un problème de couplage avec conditions aux bords réputé difficile sur le plan de l'analyse numérique, surtout lorsqu'il s'agit de concilier stabilité et précision, la montée en ordre s'accompagnant irrémédiablement d'oscillations parasites dont il faut absolument pouvoir contrôler l'amplitude. Si de nombreuses méthodes ont été proposées (voir **3** pour un état de l'art sur cette thématique), elles n'excédaient généralement pas l'ordre deux, jusqu'aux travaux de Tan *et al.* **4** : à partir d'une procédure dite de Lax-Wendroff inverse, les conditions aux bords sont satisfaites à l'ordre arbitrairement élevé mais l'algèbre impliquée est extrêmement lourde et devient vite prépondérante en matière de coût de calcul.

En revisitant leurs travaux et en adaptant cette procédure à nos souches de schéma numérique (en particulier au formalisme Lagrange-projection : pour chaque pas en temps, les équations sont d'abord discrétisées sur un maillage suivant la matière avant d'être projetées sur la grille eulérienne), l'algèbre se trouve grandement simplifiée et les coûts de calcul deviennent raisonnables. La question de la stabilité des opérateurs discrets qui sont construits aux bords étant cruciale et fort complexe à étudier analytiquement, des outils numériques d'analyse de stabilité sont développés et validés, en partant de cas d'école (advection linéaire puis systèmes linéaires 1D) pour aller vers les problèmes d'intérêt (systèmes non linéaires 2D du type équations d'Euler).

Dans ce travail, la partie fluide est résolue par les schémas hydrodynamiques GoHy d'ordre très élevé **2**. Afin d'appliquer ces schémas aux bords, il faut imposer différents champs dans les mailles dites fantômes (recouvrant une partie de la structure) afin de respecter la condition limite physique (vitesse normale nulle dans le cas des équations d'Euler). On définit donc des opérateurs de reconstruction *via* des développements de Taylor en espace sur l'interface fluide-structure qui est discrétisée par un collier de perles. Sur chaque perle, les coefficients de ces développements sont déterminés en utilisant les données dans la partie fluide ainsi que la condition au bord et un certain

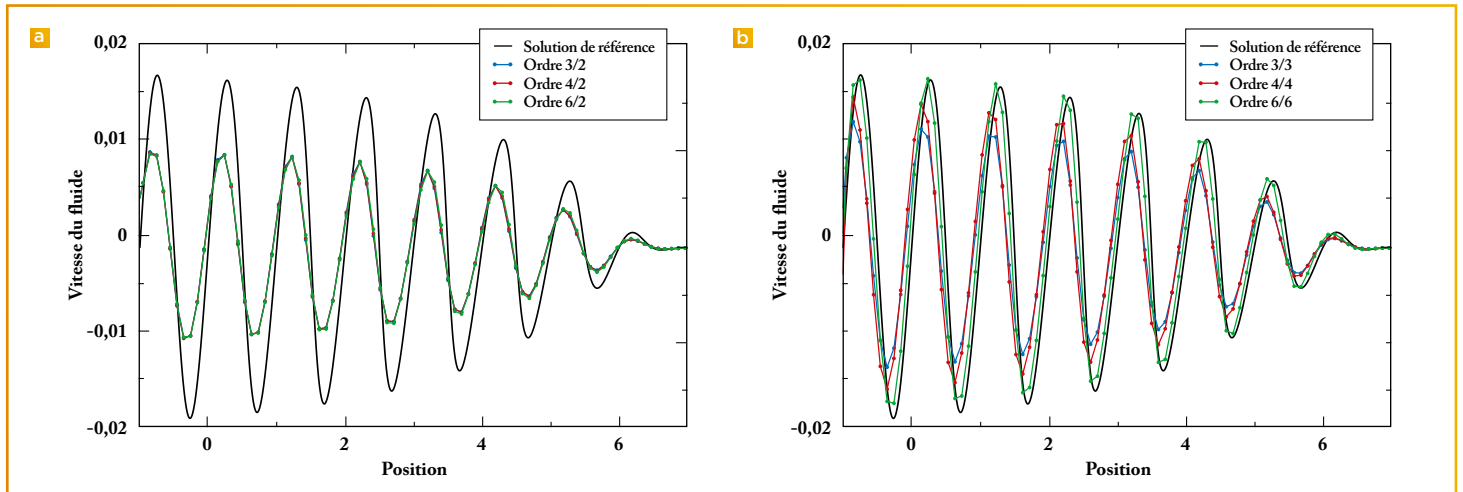


Figure 1

➔ Profils en vitesse de l'air à un instant donné. Un piston situé à la gauche du domaine et dont le mouvement s'amplifie au cours du temps oscille horizontalement et lance un train d'ondes se propageant dans l'air ambiant. La solution exacte de ce problème est représentée en noir. Les schémas intérieurs sont d'ordres 3, 4 et 6. (a) Discrétisation de la condition au bord à l'ordre 2 (cas usuel). (b) Discrétisation de la condition au bord aux ordres 3, 4 et 6 avec notre méthode. Le traitement proposé offre une bien meilleure restitution des profils, mettant en évidence l'intérêt de cette approche pour des problèmes d'aéroacoustique ou d'aéroélasticité.

nombre de ses dérivées temporelles (dérivées en espace et en temps sont liées par le jeu d'équations). Pour un ordre donné, on peut donc construire plusieurs opérateurs suivant le nombre de dérivées temporelles considéré. Tous ne sont pas stables : les outils numériques d'analyse de stabilité développés montrent sur un exemple qu'à l'ordre quatre il est nécessaire de considérer au moins deux dérivées temporelles. À la faveur de ces enseignements, la méthode est étendue aux équations d'Euler 1D (puis 2D par balayages directionnels) pour une condition limite de type vitesse normale imposée, permettant ainsi le couplage entre

un fluide compressible et un corps rigide indéformable de masse infinie. La **figure 1** montre l'apport de la montée en ordre sur la discrétisation des conditions aux bords pour ce type de problème.

Notre méthode fournissant une évaluation à l'ordre élevé de la pression et du champ de vitesse sur chaque perle de l'interface, les intégrales des forces et moments appliqués au solide sont aisément calculées sans perte d'ordre. Le couplage à l'ordre élevé en espace et en temps entre un fluide compressible et un corps rigide de masse finie – donc mobile – est alors naturel et immédiat (**figure 2**).

Une meilleure précision avec un nombre de mailles moindre étant atteinte, l'apport de l'ordre élevé pour les problèmes d'interaction fluide-structure (champ proche) a donc été prouvé, ouvrant ainsi la voie aux simulations complètes sur les effets des ondes de souffle. La méthode proposée s'étend naturellement en trois dimensions d'espace, dès lors que la surface de la structure est discrétisée par un nuage de perles.

RÉFÉRENCES

- 1 G. DAKIN, B. DESPRÉS, S. JAOUEN, "Inverse Lax-Wendroff boundary treatment for compressible Lagrange-remap hydrodynamics on Cartesian grids", *J. Comput. Phys.*, **353**, p. 228-257 (2018).
- 2 O. HEUZÉ, S. JAOUEN, H. JOURDREN, "Dissipative issue of high-order shock-capturing schemes with non-convex equations of state", *J. Comput. Phys.*, **228**, p. 833-860 (2009).
- 3 G. DAKIN, "Couplage fluide-structure d'ordre (très) élevé pour des schémas volumes finis 2D Lagrange-projection", Thèse de doctorat de l'université Pierre-et-Marie-Curie, soutenue le 9 novembre 2017.
- 4 S. TAN, C. W. SHU, "Inverse Lax-Wendroff procedure for numerical boundary conditions of conservation laws", *J. Comput. Phys.*, **229**, p. 8144-8166 (2010).



Figure 2

➔ Interaction fluide-corps rigide mobile (problème adimensionné). Un choc à Mach 3 venant de la gauche vient impacter un cylindre indéformable de masse finie initialement au repos sur le bord bas d'un canal. Les forces de pression qui s'exercent sur le cylindre (disque noir) vont le soulever et le déplacer au sein du canal. Les isovalues de densité du gaz, représentées à deux instants différents ($t_2 > t_1$), permettent d'appréhender la complexité du système d'ondes qui se met en place (chocs transmis et réfléchis, multiples réflexions sur les bords du canal, vortex se développant sous le cylindre, etc.).