

Analyse de sensibilité pour les problèmes d'interaction fluide–structure

Nathalie NOUAIME, Université Paris-Saclay, CEA, Service de Thermo-hydraulique et de Mécanique des Fluides - 91191 Gif-sur-Yvette, France.

Maria Adela PUSCAS, Université Paris-Saclay, CEA, Service de Thermo-hydraulique et de Mécanique des Fluides - 91191 Gif-sur-Yvette, France.

L'analyse de sensibilité constitue un outil fondamental pour l'étude des systèmes gouvernés par des équations aux dérivées partielles dépendant de paramètres. Elle vise à caractériser la variation des solutions par rapport à des perturbations des données du modèle, et joue un rôle central en quantification d'incertitudes, en optimisation et en analyse de robustesse.

Dans ce travail, nous développons un cadre d'analyse de sensibilité pour des problèmes d'interaction fluide–structure formulés dans le cadre de l'approche Arbitrary Lagrangian–Eulerian (ALE), couramment utilisée pour traiter des domaines de calcul mobiles et déformables. La méthodologie proposée est basée sur la méthode directe de sensibilité, qui consiste à différencier les équations gouvernantes par rapport aux paramètres incertains [4]. Dans une première étape, nous nous concentrons sur l'analyse de sensibilité paramétrique, en supposant que les paramètres incertains n'affectent pas la géométrie. Les équations de sensibilité résultantes sont dérivées de manière cohérente et discrétisées à l'aide d'un schéma volumes–éléments finis (VEF) [1]. Cette stratégie de discrétisation est implémentée dans le code industriel open source TrioCFD, développé par le CEA. La méthode VEF est largement utilisée pour la discrétisation des équations aux dérivées partielles et garantit la conservation locale de la masse, une propriété particulièrement cruciale pour un couplage fluide–structure précis.

Dans une seconde étape, le cadre proposé est étendu à l'analyse de sensibilité de forme, où les paramètres incertains influencent directement la géométrie du domaine de calcul. L'analyse de sensibilité de forme [3] dans le contexte des formulations d'interaction fluide–structure basées sur l'approche ALE a été rarement étudiée dans la littérature [2] et représente un défi théorique et numérique important. Le présent travail met en évidence l'importance de cette extension et propose une nouvelle formulation pour cette classe de problèmes couplés. Enfin, plusieurs cas tests numériques sont présentés afin de valider l'approche proposée et d'évaluer ses performances par comparaison avec d'autres méthodes d'analyse de sensibilité.

- [1] M. Adela Puscas, P.-E. Angeli, N. Nouaime, E. Jamelot. *Description and convergence order analysis of the finite element-volume spatial discretization method*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, **97(9)**, 1189–1208, 2025.
- [2] R. A. Canfield, D. A. Sandler. *Continuum shape sensitivity analysis for aeroelastic gust using an arbitrary lagrangian-eulerian reference frame*. In *2018 AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, p. 1206, 2018.
- [3] R. Duvigneau, D. Pelletier. *A sensitivity equation method for fast evaluation of nearby flows and uncertainty analysis for shape parameters*. International Journal of Computational Fluid Dynamics, **20(7)**, 497–512, 2006.
- [4] C. Fiorini, B. Després, M. A. Puscas. *Sensitivity equation method for the navier-stokes equations applied to uncertainty propagation*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, **93(1)**, 71–92, 2021.