

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Méthode des frontières immergées en écoulement réactif dans une méthode d'ordre élevée de type Différences Spectrales

Référence : **SNA-DMPE-2025-11**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 1/11/2025

Date limite de candidature :

Mots clés : schémas d'ordres élevées, Discontinuous Galerkin, Immersed Boundary Conditions, combustion, analyse numérique

Profil et compétences recherchées : Le candidat doit avoir un certain gout pour la programmation et l'analyse numérique.

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

L'objectif de la thèse est le développement d'une méthode numérique permettant de capturer des phénomènes physiques de petites échelles qui pilotent soit la transition en régime hypersonique sur des parois ablatées, soit la combustion dans les milieux poreux.

En effet, il est primordial de fidèlement capturer la transition en régime hypersonique pour déterminer les flux de chaleur pariétaux.

L'intérêt de la combustion dans des milieux poreux réside par exemple, dans l'accroissement de la vitesse de flamme, ce qui permet de mettre en œuvre une combustion en régime très pauvre, c'est-à-dire à très faible richesse, réduisant ainsi les émissions de polluants.

Le point commun entre ces deux configurations est la difficulté de générer un maillage de bonne qualité au sens du contrôle de la taille des mailles dans des pores très tortueux ou pour les rugosités. La génération d'un maillage qui épouse la forme des parois et qui permet de discrétiser les phénomènes physique est très délicate pour ces configurations. Afin de surmonter cette difficulté, le maillage ne sera plus adapté à la paroi et l'action de celle-ci sur l'écoulement sera modélisée par des termes de forçage. On parle dans ce cas de Méthode de Frontières Immergées (IBC en anglais).

Cette approche a été développée dans le cas d'écoulements d'un gaz idéal sur paroi isotherme lors de la thèse de E. Dayer (collaboration ONERA-CERFACS). Les développements ont été réalisés dans le code JAGUAR, qui est un solveur commun entre le CERFACS et l'ONERA dédié à l'approche des Différences Spectrales (SD en anglais). Les premières applications ont concerné la simulation d'écoulements turbulents, soit sur parois rugueuses, soit dans des milieux poreux. Les bons résultats obtenus montrent l'intérêt de ce type de méthode.

Les schémas SD font partie des méthodes dites Discontinuous Galerkin, dans lesquelles la solution est représentée sous forme d'un polynôme sur chaque élément du maillage ; aucune contrainte de continuité de la solution n'est imposée aux interfaces entre les éléments. Dans le cas des schémas SD, les polynômes sont représentés par des points de collocation. L'évolution temporelle de la solution en ces points est directement obtenue par résolution des équations de Navier-Stokes sous forme forte. Ces schémas sont donc naturellement d'ordre élevé et offrent la possibilité d'adapter l'ordre de la solution à l'écoulement.

Le code JAGUAR a été étendu aux écoulements réactifs [6] et de nombreux travaux ont permis d'améliorer sa robustesse : il a ainsi été utilisé pour le calcul réactif du brûleur PRECCINSTA [7] dans le cadre d'un benchmark entre différents codes CFD.

La présente thèse concerne l'extension des IBC aux écoulements réactifs.

Dans le cas de combustion dans des milieux poreux, la présence de flammes proche des parois va générer de forts gradients au voisinage des IBC, ce qui peut conduire à des problèmes de stabilité lié à certaines hypothèses faites dans la thèse de E. Dayer.

Dans un premier temps, nous étudierons l'influence de termes de forçage [3,5] non pris en compte dans la thèse de E. Dayer, mais susceptibles d'influencer la précision des calculs ainsi que la robustesse [4]. Pour

évaluer la précision, l'étude classique de la diffraction d'une onde acoustique sur un cylindre est un bon candidat ; la robustesse sera vérifiée par l'imposition d'un fort gradient thermique pour simuler l'écoulement autour d'un cylindre.

La présence d'équations d'évolution pour les espèces chimiques conduit à imposer des conditions limites spécifiques de type Neumann [1]. La discrétisation temporelle de cette pénalisation particulière sera soigneusement étudiée pour garantir son efficacité. Une voie possible est l'introduction d'un pas de temps dual [1].

Enfin, un calcul démonstratif de combustion dans un milieu poreux sera mis en œuvre.

[1] J. Wang and C. Zhang, the variable-extended immersed boundary method for compressible gaseous reactive flows past solid body, Numerical Method in Engineering Vol 122 Issue 9, 2001

[2] Q. Liu and O. Vasilyev, A Brinkman penalization method for compressible flows in complex geometries, Journal of Computational Physics Vol 227, 2007

[3] F. Miralles and B. Koobus, The immersed boundary approach. A review, <https://imag.umontpellier.fr/~koobus/NORMA.d/Delivrables.d/IBM-biblio.pdf>

[4] L. Ménez, P. Parnaudeau, M. Beringhier, E. Goncalves Da Silva, Assessment of volume penalization and immersed boundary method for compressible flows with various thermal boundary conditions, Journal of Computational Physics Vol 493, 2023

[5] I. Abalakin, O. Vasilyev, N. Zhdanova, T. Kozubskaya, Characteristic based volume penalization method for numerical simulation of compressible flows on unstructured meshes, Computational Mathematics and Mathematical Physics, 2021, Vol. 61, No 8, 2021

[6] T. Marchal, H. Deniau, J.-F. Bousuge, B. Cuenot and R. Mercier, Extension of the Spectral Difference method to premixed laminar and turbulent combustion. Flow Turbulence and Combustion, 111, 2023.

[7] Roux et al., Studies of mean and unsteady flow in a swirled combustor using experiments, acoustic analysis, and large eddy simulations, Combustion and Flame 2004.

Collaborations envisagées : Demi-financement CERFACS. La/le doctorant(e) sera sur les deux sites toulousains de l'onera et du Cerfacs

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Multi-Physique pour l'Energétique

Lieu (centre ONERA) : Toulouse

Contact : JM Senoner

Tél. : 0562252819

Email : senoner@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : deniau

Laboratoire : DMPE

Tél. : 0562252807

Email : hugues.deniau@onera.fr

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>

