

SUJET DE THESE

Encadrants

ISAE-SUPAERO

Dr. A. Urbano (annafederica.urbano@isae-supaeero.fr)
Dr. M. Bauerheim (michael.bauerheim@isae-supaeero.fr)

CERFACS

Dr. B. Cuenot (Directeur) (cuenot@cerfacs.fr)

Titre

Modèles de substitutions issus de simulations aux grandes échelles pour la conception multidisciplinaire des moteurs fusées réutilisables.

Sujet

Un moteur-fusée à ergols liquides est un système complexe. Sa conception fait intervenir un grand nombre de sous-systèmes interdépendants, qui doivent donc être conçus conjointement. En particulier, la description des écoulements fluides au niveau de la chambre de combustion, du système de refroidissement et d'alimentation revêt un rôle fondamental à ce niveau. De fait aujourd'hui le dimensionnement préliminaire du moteur se fait sur la base de modélisations des sous-systèmes à l'aide de corrélations semi-empiriques calibrées sur d'autres moteurs existants. La basse fidélité des modélisations entraîne des incertitudes importantes qui se propagent au niveau du dimensionnement global. Le développement du moteur doit ainsi s'appuyer en grande partie sur des études expérimentales, allant jusqu'à des tirs réels sur des bancs de test très coûteux. Augmenter la fiabilité des modélisations numériques est donc un enjeu stratégique pour réduire les coûts de développement de moteurs fusées innovants pour les futurs lanceurs, et donc garantir l'accès à l'espace.

La simulation numérique haute-fidélité, et en particulier la **simulation aux grandes échelles (LES)**, a démontré sa capacité à décrire finement des phénomènes physiques complexes dans les chambres de combustion des moteurs-fusée à ergols liquides [1, 2, 3]. Cependant la LES reste une méthode chère en coût calcul, et par conséquent en temps de restitution, ce qui peut limiter son utilisation systématique dans un contexte applicatif. La question de la meilleure manière d'exploiter cet outil pour la conception [4] se pose donc aujourd'hui. Pour répondre à cette question, une stratégie originale et innovante est proposée dans cette thèse. Il s'agit de construire des modèles de substitution [5], grâce à des techniques d'**apprentissage numérique** utilisant des bases de données issues de LES du système à modéliser. Ces modèles de substitution doivent être capables d'éviter le recours systématique à la simulation haute-fidélité dans une démarche d'optimisation du système, permettant d'abaisser significativement le coût calcul. Différents types de modèles de substitution sont à envisager, et on s'intéressera en particulier aux réseaux de neurones à convolution (apprentissage profond, « deep learning » en anglais) [6,7]. L'objectif visé à long terme est d'obtenir des modèles capables de décrire les différents sous-systèmes (injecteurs, tuyère, refroidissement régénératif...) et leurs interactions, et de les intégrer dans un outil d'analyse et d'optimisation multi-disciplinaire pour le moteur complet.

Ce projet de thèse se situe dans le contexte technologique des moteurs-fusée réutilisables, utilisant méthane et oxygène comme propergols. Ces choix technologiques sont clairement identifiés en Europe comme stratégiques afin de réduire le coût de production des moteurs et augmenter leur compétitivité face aux concurrents de plus en plus nombreux dans un marché international. Toutefois, ces choix induisent des contraintes qui apportent de nombreuses problématiques scientifiques. En particulier, la réutilisation implique la capacité du système à produire une poussée fortement variable, tout en garantissant les meilleures performances possibles sur une large gamme de conditions opératoires.

L'objectif principal de cette thèse est de développer des méthodologies pour construire des modèles de substitution pour une plaque d'injection, avec des injecteurs coaxiaux de méthane/oxygène gazeux, dans une chambre de combustion réutilisable, et de les intégrer dans un outil de conception multi-disciplinaire du moteur complet. Les trois points principaux à aborder concernent : (i) la dimension du modèle de substitution obtenu (grandeur globale, profil ou champ complet), (ii) la prise en compte de phénomènes instationnaires et (iii) la prédiction du comportement d'une chambre multi-injecteurs à l'aide de simulations mono-injecteur.

Un cas test expérimental simplifié mais représentatif d'un système réel, et déjà existant, sera sélectionné pour mettre au point et évaluer les méthodologies d'apprentissage numérique – il pourra s'agir par exemple des cas MASCOTTE ou CONFORTH étudiés à l'ONERA, ou encore des configurations développées à TU Munich. Le modèle devra être en mesure de reproduire la perte de charge, le rendement de combustion et la stratification en température dans la chambre, en fonction d'un certain nombre de paramètres géométriques et/ou de

fonctionnement pré-sélectionnés. Les données seront générées par LES avec le code AVBP développé au CERFACS. La thèse s'articulera de la manière suivante :

- Simulation multi-physiques LES d'une chambre multi-injecteurs, couplée avec la thermique dans la paroi. Validation par comparaison avec les mesures disponibles.
- Définition et analyse d'une configuration d'apprentissage, extraite de la simulation complète (un seul injecteur coaxial par exemple). Définition des paramètres géométriques et/ou de fonctionnement à tester, et de leur gamme de variation, ainsi que du plan d'expérience.
- Développement et évaluation de différentes méthodologies de construction de modèles de substitution : interpolations par fonctions radiales, Kriging, réseaux de neurones à convolution. L'objectif sera d'obtenir des modèles qui fournissent des réponses de dimensions différentes : scalaire, profil de flux thermique à la paroi, champs complets.
- Extension des modèles de substitution à des cas instationnaires (par exemple une variation rapide de débit).
- Modélisation de la chambre multi-injecteurs à l'aide des modèles de substitution pour un injecteur et comparaison à la simulation de référence.
- Comparaisons des différents modèles de substitution au sein d'un outil d'analyse et d'optimisation multi-disciplinaire pour la conception d'un moteur complet (outil développé à ISAE).

Références

- [1] D. Maestro, L. Selle and B. Cuenot, "Large Eddy Simulation of Combustion and Heat Transfer in a Single Element GCH₄/GO_x Rocket Combustor", *Flow, Turbulence and Combustion*, (2019)
- [2] A. Urbano, L. Selle, G. Staffelbach, B. Cuenot, T. Schmitt, S. Ducruix and S. Candel "Exploration of combustion instability triggering using Large Eddy Simulation of a multiple injector liquid rocket engine", *Combustion and Flame* 169:129-140, (2016).
- [3] H. Huo and V. Yang, "Large-eddy simulation of supercritical combustion: model validation against gaseous H₂-O₂ injector", *Journal of propulsion and power*, 33(5): 1272-1284, (2017)
- [4] X. Wang, S. Yeh, Y. Chang and V. Yang, "A high-fidelity design methodology using LES-based simulation and POD-based emulation: a case study of swirl injectors", *Chinese Journal of Aeronautics*, 31(9):1855-1869 (2018)
- [5] M. A. Bouhlel, J. T. Hwang, N. Bartoli, R. Lafage, J. Morlier and J. R.R.A. Martins, "A Python surrogate modeling framework with derivatives", *Advanced in Engineering Software* (2019)
- [6] Y. Zhang, W. Sung and D. Mavris, "Application of Convolutional Neural Network to Predict Airfoil Lift Coefficient" AIAA 2018-1903 (2018)
- [7] J. N. Kutz, "Deep learning in fluid dynamics", Focus on fluids, *J. of Fluid Mech*, v814 p1-4 (2017)