

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Simulation des écoulements réactifs de rentrée atmosphérique avec adaptation automatique de maillage

Référence : **SNA-DMPE-2024-31**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : 1/10/2024

Date limite de candidature : 1/7/2024

Mots clés Adaptation de maillage, flux thermique, écoulement réactif choqué, schéma numérique cell-vertex, déconvolution

Profil et compétences recherchées candidat issu d'une école d'ingénieur, connaissances en modélisation, calcul scientifique, capacité à programmer et à tester des idées.

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

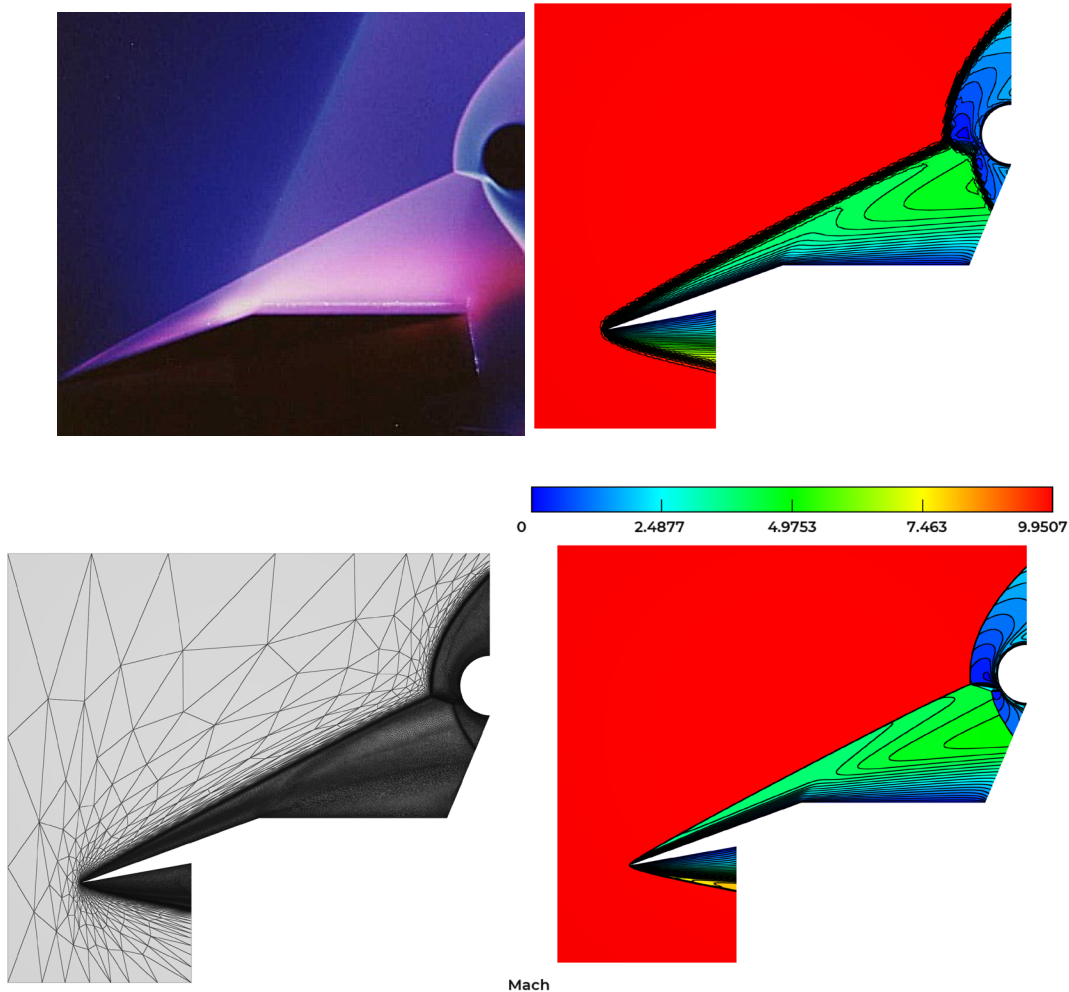
La rentrée atmosphérique consiste au retour sur Terre d'objets spatiaux, au premier rang desquels on retrouve les satellites en fin de vie. En effet, il est maintenant obligatoire que le retour sur Terre du satellite en fin de vie soit prévu et contrôlé afin de le détruire lors de la traversée des couches denses de notre atmosphère, mais également afin qu'il retombe sur un espace inhabité.

La simulation numérique de la rentrée atmosphérique est l'unique moyen de représenter la physique rencontrée et d'anticiper la destruction des objets. La rentrée se traduit par un retour sur Terre à grande vitesse, dans le régime hypersonique. A la traversée du choc et encore plus au voisinage de l'objet, l'écoulement ralentit et l'énergie cinétique est transformée en chaleur. Une partie de cette chaleur permet l'apparition de réactions chimiques de dissociation des espèces dioxygène et diazote de l'air. La chaleur restante est alors transmise à la paroi du satellite et c'est ce flux thermique reçu qui se transmet à la structure et participe à son échauffement. La simulation numérique requiert la construction d'un maillage afin de capturer au mieux la physique. Cependant, sur géométrie complexe et en présence d'une physique complexe (par ex. liée à des interactions choc/choc), la construction d'un tel maillage est un processus long et fastidieux. Il rend inopérante la possibilité de faire des simulations paramétriques sur une grande plage de la trajectoire car la position du choc et les transferts de quantité de mouvement et d'énergie dans la couche limite dépendent fortement des conditions de vol. En pratique, les quantités dimensionnantes de la rentrée atmosphérique sont la position du choc détaché autour de l'objet, phénomène essentiellement non visqueux, et la capture du flux thermique pariétal qui indique l'échauffement « reçu » (en pratique subi !) par la paroi.

Afin de simplifier le processus, nous proposons ici d'analyser l'intérêt de **l'adaptation de maillage**. Le principe de l'adaptation de maillage est de construire **automatiquement** le **maillage le mieux adapté** pour **capturer la physique**. L'idée est que la solution d'un calcul sur un maillage donné permet de construire un estimateur d'erreur, lequel permet de construire un nouveau maillage minimisant cette erreur. En relançant le calcul sur le nouveau maillage, on améliore la qualité de la solution. Le point clé est la capacité à générer un maillage adapté à la physique. Pour y parvenir, notre choix se porte sur l'utilisation de l'opérateur de cavité proposé par l'Inria et au cœur de l'équipe projet commune ONERA/Inria appelée GammaO. Cet opérateur ne gère que des triangles (en 2D) et des tétraèdres (en 3D). Les maillages obtenus sont fortement anisotropes et clairement impossibles à générer manuellement. Dans la communauté spécialiste, le recours aux hexaèdres et prismes semble être un prérequis au calcul du gradient de température dans la direction normale à la paroi. L'approche que nous proposons semble donc être en contradiction avec ce « best

practice ».

Pourtant, cette stratégie fonctionne nominalement pour les écoulements transsoniques du monde aéronautique [1]. Nous avons évalué positivement l'approche en 2023 dans le cadre d'un stage et d'activités de recherche concernant la modélisation de gaz parfait polytropique [2]. Nous avons montré notre capacité à restituer correctement le flux thermique pariétal sur un maillage non structuré anisotrope composé de simplexes (triangles et tétraèdres) et généré automatiquement, sans intervention humaine. Ici, on propose d'aller plus loin et de voir le niveau de performance d'une telle approche pour des **écoulements laminaires et réactifs**. Le focus sera alors mis sur la détermination du **flux thermique pariétal** qui est l'un des principaux critères dimensionnant de la rentrée. On commencera par effectuer des simulations 2D sur des corps cylindriques puis 3D.



Exemple d'interaction choc/choc dite Edney Type IV. En haut de gauche à droite : expérience dans la soufflerie R5Ch de l'ONERA, solution sur maillage régulier isotrope. En bas de gauche à droite : maillage anisotrope adapté et solution sur ce maillage adapté. L'écoulement est au nombre de Mach de 9,95.

Objectifs :

Pour y parvenir, on s'appuiera sur la librairie d'adaptation de maillage `feflo.a` de l'Inria GammaO, accessible via le module `pyAMG` ou appellable directement. Les outils numériques de type `cell vertex` apportent une très importante robustesse de l'approche et nous nous focaliserons sur le code prototype `Wolf` de l'Inria [1], puis sur le code `SoNICS`. En effet, le code `Wolf` apporte aujourd'hui toutes les modélisations numériques nécessaires, sauf l'extension multi-espèce pour le solveur direct et pour le solveur adjoint (permettant d'adapter le maillage par rapport à un critère surfacique, comme le flux thermique pariétal). La version `cell vertex` de `SoNICS` est en cours de développement et sera sans doute disponible durant la thèse. On pourra l'utiliser dès que les développements nécessaires seront intégrés et validés. Trois solveurs CFD disponibles au département pourront être utilisés et fourniront des solutions de référence (la plateforme `Cedre` [3], le code open source `SU2` [4], le prototype interne `DEEP-DIVE` développé dans l'unité de

recherche). Pour les écoulements réactifs, on pourra alors soit s'appuyer sur la librairie MUTATION++ développée par le VKI [5] et coupler le solveur et MUTATION++ pour la prise en compte des effets thermochimiques, soit mettre en œuvre directement un modèle de thermochimie sous forme de librairie. L'utilisation de l'adaptation de maillage nécessite de confirmer la convergence en maillage des solutions. Le point clé est donc la convergence de chaque solution sur chaque maillage généré, le moindre souci étant capté par l'adaptation et étant transmis au maillage suivant du processus. Il faut ici en particulier garantir la convergence des termes de chimie dans la phase implicite (à grand pas de temps) du solveur de mécanique des fluides. Enfin, il faudra analyser et modifier le problème adjoint permettant de choisir un paramètre « optimal » dédié à la capture du flux thermique. En fonction de l'avancement de la thèse, nous pourrons aller encore plus loin dans la modélisation en s'intéressant aux phénomènes physicochimiques à la paroi.

Organisation :

Au démarrage de la thèse, le (la) doctorant(e) devra commencer par se former à l'adaptation de maillage et aux outils à utiliser et sera amené(e) à interagir avec ses encadrants sur le développement de ces outils, mais également avec l'équipe GammaO responsable du développement de la librairie feflo.a et du code wolf, vu ici comme prototype. L'étudiant(e) devra comprendre le principe de fonctionnement de la boucle d'adaptation et la mettre en pratique sur les PC disponibles ou sur un supercalculateur. Le premier travail consistera à étendre la chaîne de calcul aux écoulements réactifs choqués et à valider les outils numériques. Les points clés resteront toujours la détermination du flux thermique pariétal et la capture de la couche limite (dynamique et thermique) au voisinage de l'objet. Il est d'ailleurs fort probable qu'il soit nécessaire d'améliorer le schéma permettant d'estimer le flux thermique pariétal. Ce travail se fera en étroite collaboration avec les directeurs de la thèse. Les premières simulations concerneront par exemple le cas du cylindre, de la sphère de Lobb [6] ou bien des écoulements de rentrée martienne. En fonction de l'avancement et des difficultés rencontrées, on pourra introduire des phénomènes pariétaux plus fins comme la catalycité ou la pyrolyse, et également rendre plus complexes les modèles thermochimiques (par exemple en ajoutant de nombreuses espèces minoritaires associées à une description très fine des réactions chimiques).

Nous prévoyons la préparation de 2 articles sur la durée de la thèse et la participation à des conférences. Si le choix de modélisation thermochimique porte sur MUTATION++, nous disposerons également d'un cadre de collaboration avec l'Institut von Karman (VKI) en charge du développement de cette librairie.

Références principales :

[1] F. Alauzet and L. Frazza, Feature-based and goal-oriented anisotropic mesh adaptation for RANS applications in aeronautics and aerospace, Journal of Computational Physics, Volume 439, 15 August 2021, 110340

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999121002357>

[2] A. Schotte, Adaptation de maillage en écoulement lumineux de rentrée atmosphérique, MSc, ONERA et ISAE/SupAero, 2023.

[3] <https://cedre.onera.fr>

[4] <https://su2code.github.io>

[5] J. B. Scoggins, V. Leroy, G. Bellas-Chatzigeorgis, B. Dias, T. E. Magin, Mutation: MULTicomponent Thermodynamic And Transport properties for IONized gases in C++, SoftwareX, Volume 12, July–December 2020, 100575

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352711020302880>

[5] LOBB, R.K.: Chapter 26 - experimental measurement of shock detachment distance on spheres fired in air at hypervelocities. In: W.C. NELSON (ed.) The High Temperature Aspects of Hypersonic Flow, AGARDograph, vol. 68, pp. 519–527, 1964

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978148319828650031X>

Collaborations envisagées

Thèse dans le cadre de l'Equipe Projet Commune GammaO, entre l'ONERA et l'Inria, sur l'adaptation de maillage pour les domaines de l'aéronautique, du spatial et de la défense cf <https://www.inria.fr/fr/parteneriat-onera-inria-aeronautique-spatial-defense>

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : DMPE

Lieu (centre ONERA) : Toulouse

Contact : Marta De La Llave Plata / Guillaume Puigt

Tél. : 0562252589 / 0562252940

Email : marta.de_la_llave_plata@onera.fr, guillaume.puigt@onera.fr

Directeur de thèse

Nom : Guillaume Puigt et Frédéric Alauzet

Laboratoire : ONERA/DMPE et GammaO, Inria/GammaO

Tél. : 0562252940

Email : guillaume.puigt@onera.fr

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