

Invitation à la soutenance de thèse

Modélisation de l'influence de la dégradation thermochimique des matériaux composites sur le flux de chaleur convecto-diffusif lors de la rentrée atmosphérique des débris spatiaux

Lalande Maxime

Le 01/12/2025 à 10h
Dans l'auditorium de l'ONERA
2 Avenue Marc Pégélin
31400 Toulouse

Devant le jury composé de :

- Thierry Magin, Rapporteur
- Alexandre Martin, Rapporteur
- Céline Baranger, Examinatrice
- Pietro Marco Congedo, Examineur
- Olivier Roustant, Examineur
- Nathalie Bartoli, Directrice de thèse
- Ysolde Prévereaud, Co-directrice de thèse
- Nicolas Dellinger, Encadrant de thèse

Résumé

Au cours des 40 dernières années, 16.000 tonnes de débris spatiaux ont effectué une rentrée atmosphérique terrestre. On estime qu'entre 10% et 40% de la masse rentrante a atteint la surface de la Terre, ce qui représente une menace potentielle pour la sécurité au sol. La prévision du risque au sol devient un enjeu majeur pour les acteurs du spatial qui doivent se conformer à la Loi n° 2008-518 relative aux Opérations Spatiales, votée en 2008 et appliquée depuis 2021. Cette loi concerne les opérateurs français ou les opérateurs étrangers exerçant depuis le sol Français, tel que le Centre Spatial Guyanais.

Depuis plusieurs années, l'ONERA développe des outils de simulation numérique 3D pour la dynamique des fluides (CEDRE/CHARME) et la dégradation thermique des matériaux (MoDeTheC). Cependant, effectuer des simulations "haute-fidélité" de rentrées atmosphériques complètes (pour chaque point de vol le long de la trajectoire de descente) à l'aide de ces outils est trop coûteux numériquement, en particulier pour la partie CFD (CEDRE/CHARME). Pour cette raison, l'ONERA a également développé des modèles réduits entraînés sur des simulations numériques "haute-fidélité". Ces modèles réduits sont implémentés dans le logiciel ARES de l'ONERA qui permet de simuler l'ensemble de l'entrée atmosphérique des débris spatiaux. Un outil similaire, nommé PAMPERO, est développé par le CNES. Même si la simulation de rentrée atmosphérique est possible, certains phénomènes physiques majeurs ne sont pas pris en compte, ou seulement partiellement.

Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse est de modéliser les phénomènes physiques fluide-structure jouant un rôle majeur dans la dégradation thermochimique des débris spatiaux composites de type CFRP lors de l'entrée dans l'atmosphère.

La majeure partie de la dégradation des débris spatiaux se passe au niveau des couches denses supérieures de l'atmosphère (entre 40 et 70km d'altitude), au sein desquelles l'écoulement est qualifié d'hypersonique continu. Dans ce régime, la température du gaz derrière le choc peut être suffisamment élevée pour induire des réactions chimiques de dissociation et de recombinaison dont les produits diffusent vers la paroi à travers la couche limite. Plusieurs phénomènes se produisent à la paroi (recombinaison catalytique, sublimation, oxydation, nitruration), et ont un effet sur la composition chimique de l'écoulement, la géométrie de surface, le flux de chaleur convecto-diffusif et donc sur la réponse thermochimique du matériau. Rétroactivement, la dégradation interne de la matrice organique génère des gaz de pyrolyse qui sont dégazés dans la couche limite sous l'effet du gradient de pression. Finalement, le soufflage conjugué des produits d'ablation surfacique et volumique perturbe la stabilité de la couche limite pouvant induire une transition laminaire-turbulent précoce, modifie la composition chimique de l'écoulement et affecte le flux de chaleur reçu par la paroi par blocage convectif. Un couplage physique très important existe donc entre l'écoulement et la réponse du matériau.

Tout d'abord, les principaux phénomènes physiques fluide-structure ont été modélisés et simulés avec une attention particulière portée sur l'effet du dégazage (débit, composition, déséquilibre chimique). Par la suite, une base de données composée de simulations CFD a été générée. Différentes méthodes d'apprentissage par Krigeage ont été mises en place afin de développer des modèles réduits prenant en compte l'effet du dégazage sur la modification du flux de chaleur convecto-diffusif à la paroi. Ces modèles ont été implémentés dans le code ARES de l'ONERA et appliqués à des cas de rentrée atmosphérique. Ainsi, un scénario complet de rentrée atmosphérique de débris spatiaux prenant en compte la pyrolyse a été réalisé.

Mots clés :

Aérodynamique, Rentrée atmosphérique, Dégradation thermochimique des composites, Débris spatiaux, Modèles réduits, Processus Gaussiens