

## Titre : Modélisation fluide-structure de la rentrée atmosphérique d'un débris spatial

**Mots clés :** Rentrée atmosphérique, fragmentation mécanique, interactions fluide-structure, Design for Demise

**Résumé :** Dans le cadre de la loi relative aux opérations spatiales de 2008 (LOS), tout objet lancé depuis le territoire français doit présenter une menace minimale lors de sa retombée à travers l'atmosphère. Cependant, les phénomènes d'interactions fluide-structure dans les conditions sévères de la rentrée atmosphérique sont relativement peu connus et difficiles à modéliser. En effet, la prise en compte de tous les phénomènes physiques (aérodynamique, chimique, thermique et mécanique) nécessite des calculs CFD pour la modélisation de l'écoulement hypersonique.

Les calculs CFD demandent la génération d'un maillage de haute qualité pour s'assurer de bien capturer les gradients dans la couche limite. Or, dans le cadre de la rentrée atmosphérique d'un objet ou autre structure en mouvement/déformation, ces calculs sont nécessaires tout au long de sa trajectoire nécessitant un remaillage et des calculs CFD très coûteux en termes de temps de calcul et ingénieurs. Actuellement, ces calculs très complexes sont réalisés sur certains points de trajectoire avec les CFD permettant de déterminer les coefficients de pression et les flux sur des géométries complexes.

Jusqu'à présent, la réalisation de simulations numériques "haute-fidélité" de la rentrée atmosphérique des débris spatiaux tout au long de leur trajectoire n'a pas été possible en raison du temps de calcul trop important. De plus, aucune des approches simplifiées classiquement utilisées

ne permet de représenter correctement la dégradation des matériaux avec précision lorsque des phénomènes physiques complexes apparaissent dans l'écoulement (telle que l'interaction choc-choc...). Ces phénomènes ne peuvent être prédits par des approches simplifiées de ce type car ils prennent naissance dans le champ fluide pour interagir directement avec la paroi. Enfin, dans le cadre de la rentrée atmosphérique d'un objet ou autre structure en mouvement/déformation ces calculs sont nécessaires tout au long de sa trajectoire, nécessitant pour une approche classique un remaillage régulier de la structure pouvant être très coûteux en termes de temps de calcul et ingénieurs.

Néanmoins, avec l'essor des méthodes de traitement de maillages non conforme à la paroi plus des optimisations de couplage et les performances accrues des ordinateurs, cet objectif n'est plus inatteignable.

Cette thèse s'inscrit donc dans le cadre du développement d'un outil dit de "Haute-Fidélité" (selon la définition de l'Agence Spatiale Européenne, ESA) pour le calcul de rentrée de débris spatiaux. La thèse se focalise sur la modélisation du fluide, du comportement de la structure et de leur interaction dans un contexte de rentrée atmosphérique de structures assez volumineuses, allant de satellites, fragments de lanceurs à une station spatiale (rentrée de l'ISS prévue pour 2031).

## Titre : Fluid-structure modeling of the atmospheric reentry of space debris

**Keywords :** Atmospheric reentry, mechanical fragmentation, interaction fluide-structure, Design for Demise

**Abstract :** As part of the 2008 French law relative to spatial operations (LOS), any object launched from the French territory must represent a minimal threat during its atmospheric reentry. Yet, fluid-structure interaction phenomena under the severe conditions of atmospheric reentry are poorly understood and difficult to model. Indeed, taking into account all physical phenomena (aerodynamic, chemical, thermal, and mechanical) requires CFD calculations for the modeling of hypersonic flow.

CFD computations require the generation of a high-quality mesh to ensure that gradients in the boundary layer are accurately captured. However, in the context of the atmospheric reentry of an object or other moving/deforming structure, such calculations are necessary throughout its trajectory, requiring remeshing and CFD calculations that are very costly in terms of computation time and engineering resources. Currently, these very complex calculations are performed at certain trajectory points using CFD to determine the pressure coefficients and flow on complex geometries. So far, the realization of "high-fidelity" numerical simulations of the atmospheric re-entry of space debris throughout their trajectory has not been possible due to the excessive computation time. Moreover, none of the classically used simplified approaches can accurately

represent the degradation of materials when complex physical phenomena occur in the flow (such as shock-shock interaction, etc.). Simplified approach of this type cannot predict these phenomena because they originate in the fluid field and interact directly with the wall. Finally, in the context of atmospheric re-entry of an object or other moving/deforming structure, these calculations are necessary throughout its trajectory, requiring for a classical approach a regular remeshing of the structure, which can be very costly in terms of computation time and engineering resources. Nevertheless, with the rise of non-wall-conforming mesh treatment methods, along with coupling optimizations and the increased performance of computers, this goal is no longer unreachable. This thesis is part of the development of a so-called "High Fidelity" tool (according to the definition of the European Space Agency, ESA) for the calculation of the re-entry of space debris. The thesis focuses on the modeling of the fluid, the behavior of the structure, and their interaction in the context of atmospheric re-entry of relatively large structures, ranging from satellites and launcher fragments to a space station (the re-entry of the ISS is planned for 2031).