

Soutenance de thèse

Nicolas PERRON soutiendra sa thèse de doctorat préparée au sein de l'ISAE-ONERA EDyF et intitulée «*Modélisation de la dégradation thermo-structurale des débris spatiaux durant la rentrée atmosphérique*»

Le 14 avril à 2022 à 10h00, salle des thèses ISAE-SUPAERO

devant le jury composé de

| | | |
|-----------------------------|--|------------------------|
| Mme Marianne BALAT-PICHELIN | Directrice de recherche PROMES-CNRS | Directrice de thèse |
| M. Gérard VIGNOLES | Professeur Université de Bordeaux/LCTS | Rapporteur |
| M. Ludovic HALLO | Directeur de recherche CEA-CESTA | Rapporteur |
| Mme Ysolde PRÉVEREAUD | Ingénieure de Recherche ONERA | Co-directrice de thèse |
| M. Jean LACHAUD | Maître de conférences Université de Bordeaux/I2M | |
| M. Thierry MAGIN | Professeur VKI Belgique | |
| M. Nicolas DELLINGER | Ingénieur de Recherche ONERA | Co-encadrant de thèse |
| M. Julien ANNALORO | Docteur CNES | |

Résumé : Depuis 1957, on estime que plus de 1600 tonnes de débris spatiaux ont pu parvenir à la surface de la Terre après avoir effectué une rentrée atmosphérique, représentant un risque pour les biens et les personnes au sol. L'estimation du risque à l'impact est devenue un enjeu majeur pour tous les acteurs du spatial, et en particulier pour le CNES depuis le vote en 2008 et la mise en application en 2021 de la Loi sur les Opérations Spatiales (LOS) qui impose des contraintes fortes sur les débris spatiaux. La simulation numérique « haute fidélité » de la rentrée atmosphérique des débris spatiaux tout au long de leur trajectoire ne peut être mise en œuvre du fait d'un coût de calcul trop important et hors de portée des calculateurs actuels. Des modèles analytiques ou modèles réduits sont donc utilisés. Actuellement, le couplage fort entre les phénomènes physiques de l'écoulement et le niveau de dégradation du matériau n'est pas pris en compte dans ces modèles. De plus, l'utilisation de matériaux composites rend complexe les simulations car leurs réactions de dégradation sont multiples et leurs propriétés thermophysiques ne sont pas totalement caractérisées. L'objectif de cette thèse est donc de comprendre et modéliser les processus physiques dans les matériaux composites carbone/époxy et à leurs surfaces, pour une rentrée atmosphérique complète, tenant compte de la dégradation thermo-chimique, sur des géométries 3D représentatives des débris spatiaux. Pour atteindre cet objectif, un modèle de déplacement de maillage 3D des matériaux avec forte déformation a été développé et intégré dans le code matériau MoDeTheC de l'ONERA. Dans le même temps, le matériau composite carbone/époxy M55J/M18 fabriqué par Thales Alenia Space a été caractérisé avec les moyens d'essais de l'ONERA. Un modèle multi-constituants, permettant de rendre compte de l'évolution des propriétés du matériau en fonction de la température et de son niveau de dégradation, a été défini. L'utilisation de ces propriétés dans MoDeTheC, au sein du code de rentrée atmosphérique ARES (code intégrant les solveurs FAST, MUSIC, AtMoS et MoDeTheC), a permis de simuler la dégradation de réservoirs sphériques sur une trajectoire complète de rentrée. Enfin, pour quelques points de vol le long de ces trajectoires, les influences du soufflage et des réactions des gaz de pyrolyse sur le flux de chaleur convecto-diffusif ont été étudiées numériquement, avec le code Navier-Stokes CEDRE de l'ONERA.

Mots-clés : rentrée atmosphérique, écoulement hypersonique continu, matériaux composites, dégradation thermique, déplacement de maillage 3D, débris spatiaux

Summary: Depuis le lancement du premier satellite Spoutnik-1 le 4 octobre 1957, la population des débris en orbite n'a cessé de croître. Au cours des 40 dernières années, plus de 16 000 tonnes d'engins spatiaux ont effectué une rentrée atmosphérique terrestre. On estime que pendant cette même période, plus de 1600 tonnes de débris, représentant de 10 à 40% du poids avant la rentrée, a pu parvenir à la surface de la Terre, représentant ainsi un risque pour les biens et les personnes se trouvant sous le nuage de débris. L'estimation du risque à l'impact est devenue un enjeu majeur pour tous les acteurs du spatial. Cette estimation passe par une amélioration significative de la compréhension et de la modélisation de la dégradation thermique et structurelle des objets entrant dans l'atmosphère. L'ONERA développe des outils numériques permettant la simulation de l'interaction entre l'aérodynamique (écoulement hypersonique avec effets de cinétique chimique du gaz atmosphérique) et la réponse thermodynamique du matériau pour les points de vol de la trajectoire de rentrée. Des travaux récents menés à l'ONERA ont permis de développer des modèles numériques 2D sur maillage déformé quelconque permettant de décrire l'évolution des propriétés thermiques en fonction de l'état de dégradation et de la

température d'un matériau orthotrope, ainsi que la production et le transport des composés volatils générés lors de sa dégradation [1]. Cependant, la géométrie des débris spatiaux et les phénomènes physiques apparaissant lors de la rentrée sont 3D. De plus, la dégradation peut conduire jusqu'au perçage et/ou la fragmentation du matériau ; ce qui n'est pas pris en compte à l'heure actuelle. Par ailleurs, la simulation « haute fidélité » de la rentrée atmosphérique des débris spatiaux tout le long de leur trajectoire ne peut être mise en œuvre avec les modèles numériques du fait d'un coût de calcul trop important et hors de portée avec les calculateurs actuels. Pour la partie fluide, l'ONERA développe des modèles analytiques ou modèles réduits à faible temps de réponse à partir de bases de données issues de la littérature et surtout de simulations numériques avec ses propres outils pour différentes configurations (géométrie, points de vol, attitude) [2]. La dégradation du matériau dépend du flux de chaleur reçu à la paroi, qui est lui-même fortement dépendant des conditions aérothermodynamiques de rentrée et de l'interaction fluide-structure (dégazage, catalycité de la paroi, oxydation...). Il existe donc un couplage fort entre les phénomènes physiques de l'écoulement et le niveau de dégradation du matériau; ce qui n'est pas pris en compte actuellement. Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse est de modéliser les processus physiques au niveau de la surface des matériaux pour une rentrée atmosphérique complète tenant compte de la dégradation thermo-structurale des matériaux composites et des structures en sandwich de type C/C - alliage d'aluminium sur des géométries 3D représentatives des débris spatiaux (composants de lanceurs et satellites). Dans un premier temps, une modélisation purement numérique sera mise en place. L'établissement de bases de données CFD (simulations « haute fidélité ») permettra alors de proposer des modèles analytiques pour les parties fluide et solide. Les propriétés et le comportement des matériaux à haute température dans les conditions de rentrée (oxygène dissocié) seront issus des études menées au laboratoire PROMES-CNRS à Odeillo [3]. Une étude expérimentale complémentaire sera menée durant cette thèse à la fois au laboratoire PROMES ainsi qu'à l'ONERA sur les bancs BLADE et ATG (cinétique de dégradation sur échantillons) afin de déterminer les propriétés des matériaux composites qui seront étudiés. Dans un second temps, la thèse s'attachera au développement de modèles 3D thermo-ablatifs et aux comparaisons par rapport à des résultats de la littérature issus d'expériences de dégradation thermique sous torche plasma [4] afin de valider la dynamique de l'ablation sur des matériaux largement étudiés et référencés. Des méthodes numériques de déformation de maillage et de remaillage en 3D permettant de prendre en compte la modification de la géométrie seront développées au cours de cette phase. Par la suite, des études numériques couplées fluide-structure sur des géométries représentatives de débris endommagés seront réalisées avec les codes de mécanique des fluides CEDRE et de dégradation thermique MoDeTheC [1] qui pourront être couplés. Ces simulations permettront de réaliser une base de données pour le développement de modèles analytiques de distribution de flux thermique dépendant de la géométrie et d'un éventuel dégazage (modification du flux pariétal suite aux réactions chimiques pouvant être endothermiques ou exothermiques selon le matériau étudié). Enfin, un scénario complet de rentrée atmosphérique de débris (notamment de réservoirs) tenant compte à la fois des échanges thermiques du matériau, de la régression de surface, d'un endommagement par perçage, de la modification de l'aérodynamique du débris sera étudiée.

Keywords: atmospheric reentry, hypersonic continuum flow, composite material, thermal decomposition, 3D mesh displacement, space debris