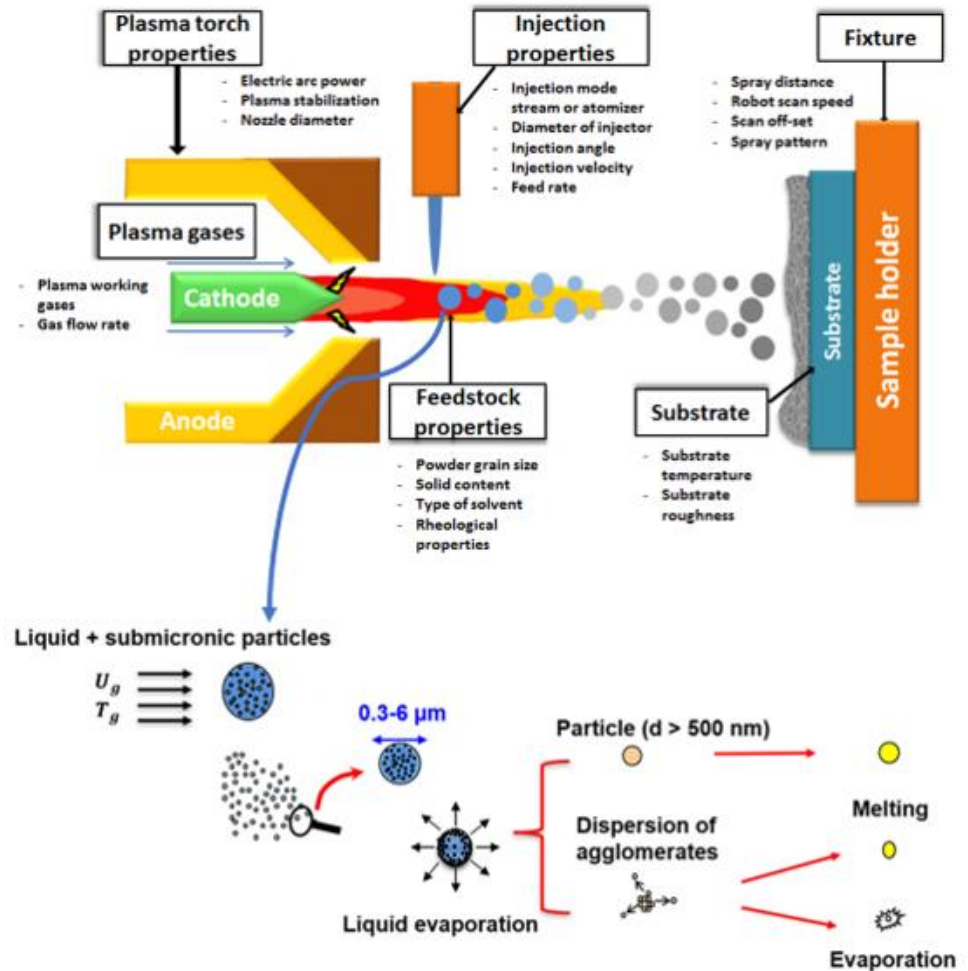




**Proposition de sujet de doctorat  
2026-2029**

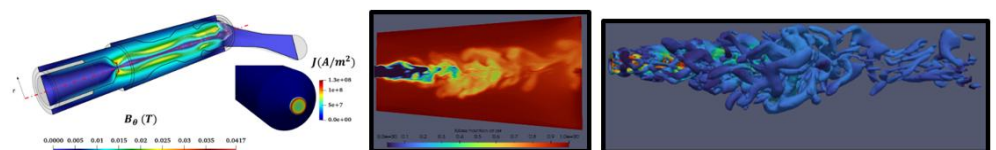


<b>TITRE (français)</b>	<b>Modélisation et simulation d'un procédé de projection plasma de suspension : interaction du jet de plasma turbulent avec le substrat et traitement de la suspension</b>
<b>TITRE (anglais)</b>	<b>Modeling and simulation of a suspension plasma spraying process: interaction of the turbulent plasma jet with the substrate and treatment of the suspension</b>
Description : contexte, objectifs, moyens ...	<p><b>Partenaires :</b> Institut de Recherche sur les Céramiques, (UMR CNRS 7315, IRCER), I2M INP Bordeaux (TREFLE), société Safran</p> <p><b>Domaine :</b> Modélisation et simulation numérique des procédés, traitements physiques des matériaux, mécanique des fluides diphasique, génie des procédés, projection thermique, CFD</p> <p><b>Field:</b> Modelling and digital simulation of processes, two-phase fluid mechanics, process engineering, thermal spraying, physical treatment of materials</p> <p><b>Mots clés :</b> suspension, matériau, revêtement, projection plasma, jumeau numérique, mécanique des fluides diphasique, CFD, modélisation, simulation, méthodes numériques, aéronautique</p> <p><b>Keywords :</b> suspension, material, coating, plasma spraying, digital twin, two-phase fluid mechanics, CFD, modeling, simulation, numerical methods, aeronautics</p> <p><b>Résumé :</b> La projection plasma de suspension permet d'obtenir des revêtements avec des microstructures fines et variées répondant à des applications exigeantes qui émergent au niveau industriel comme par exemple, des barrières thermiques de nouvelle génération pour l'aéronautique. Dans ce procédé, la suspension liquide contenant les particules submicroniques du matériau à déposer est injectée dans un jet de plasma thermique pour être fragmentée, évaporée libérant des particules submicroniques individuelles ou agglomérées qui sont alors accélérées et fondues et vont impacter et s'étaler sur la pièce à revêtir pour former le dépôt. La maîtrise du procédé nécessite la compréhension des mécanismes complexes et interdépendants qui régissent le traitement de la suspension et la construction du revêtement.</p>



**Figure 1 – Procédé de projection plasma de suspension**

Cette compréhension passe par la simulation du procédé en fonction de ses paramètres opératoires par un jumeau numérique, depuis la génération du jet de plasma jusqu'à la construction du dépôt. Les laboratoires IRCER et TREFLE de l'I2M se sont associés pour faire avancer cette problématique qui intéresse fortement la société Safran, leader international pour la réalisation de dépôts sur pièces aéronautiques. Ces travaux de modélisation sur la formation du jet de plasma, son développement turbulent, le traitement de la suspension et la construction du dépôt ont donné lieu à un premier projet et qui se poursuit avec le support de Safran et de la région Nouvelle-Aquitaine.



**Figure 2 – Simulation de la formation du plasma dans la torche et développement du jet turbulent dans l'air**

Le travail de ce doctorat consistera à poursuivre la modélisation du développement du jet de plasma turbulent instationnaire (LES/U-RANS) en présence d'un substrat mobile avec le Code de CFD Ansys\_Fluent, à optimiser les méthodes numériques pour augmenter la robustesse des simulations et diminuer leur durée, et à modéliser l'atomisation puis la fragmentation secondaire du jet de suspension et son traitement physique en interaction avec un autre doctorant du projet.

**Abstract :**

Suspension plasma spraying can be used to produce coatings with a variety of fine microstructures to meet the demanding requirements of emerging industrial applications, such as new-generation thermal barriers for the aerospace industry. In this process, the liquid suspension containing submicron particles of the material to be deposited is injected into a thermal plasma jet to be fragmented and evaporated, releasing individual or agglomerated submicron particles which are then accelerated and melted, impacting and spreading out on the part to be coated to form the coating. Mastering the process requires an understanding of the complex, interdependent mechanisms governing suspension processing and coating construction.

This understanding requires simulation of the process as a function of its operating parameters by a digital twin, from plasma jet generation to deposit construction. The IRCER and TREFLE laboratories at I2M have joined forces to make progress on this issue, which is of great interest to Safran, the international leader in the production of coatings for aeronautical parts. This modeling work on plasma jet formation, turbulent development, suspension treatment and deposit construction gave rise to an initial project, which is continuing with support from Safran and the Nouvelle-Aquitaine region.

The work of this PhD will consist of continuing to model the development of the unsteady turbulent plasma jet (LES/U-RANS) in the presence of a moving substrate with the Ansys\_Fluent CFD Code, optimizing numerical methods to increase the robustness of simulations and reduce their duration, and modeling the atomization then secondary fragmentation of the suspension jet and its physical treatment in interaction with another PhD student from the project.

#### **Descriptif :**

**Contexte :** La projection plasma de suspension permet d'obtenir des revêtements avec des microstructures fines et variées (colonnaires, denses, ...) répondant aux exigences d'applications qui émergent au niveau industriel comme par exemple, des barrières thermiques de nouvelle génération pour l'aéronautiques ou des électrolytes solides de piles à combustibles.

Dans ce procédé, la suspension liquide contenant les particules submicroniques du matériau à déposer est injectée dans un jet de plasma thermique pour être fragmentée et évaporée, libérant les particules submicroniques individuelles ou agglomérées qui sont alors accélérées et fondues et vont impacter et s'étaler sur la pièce à revêtir pour former un dépôt. Sa microstructure, et donc ses propriétés d'usage, dépendent d'un grand nombre de paramètres opératoires relatifs à la torche plasma, à la suspension, au substrat et à la cinématique torche-substrat. Aussi, la complexité de ce procédé impose-t-elle de nombreux tests pour réaliser un revêtement à propriétés contrôlées sur une pièce de forme complexe, ce qui freine son adoption par les industriels. La maîtrise du procédé nécessite la compréhension des mécanismes complexes et interdépendants qui régissent le traitement de la suspension et la construction du revêtement. Cette compréhension passe par la simulation du procédé par un jumeau numérique incluant la génération du jet de plasma par une approche MagnétoHydroDynamique (MHD) (1), le développement turbulent du jet avec l'injection et la fragmentation hydrodynamique de la suspension (2), le traitement des gouttes de suspension par le plasma (3), l'impact des particules fondues sur le substrat et la construction du dépôt (4) en fonction de ses paramètres opératoires.

L'étude proposée s'inscrit dans le projet Azurite cofinancé par la région, l'IRCER et Safran. Ce projet de jumeau numérique est porté par l'IRCER, l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M) de Bordeaux, la société Safran (2ème équipementier aéronautique, leader pour la réalisation de dépôts sur pièces aéronautique). Cette étude consiste à poursuivre les travaux de modélisation

débutés dans le cadre d'un précédent projet et qui a permis de poser les bases des modèles (1 à 4) et de développer en particulier le modèle n°2, pour lequel la modélisation de l'écoulement libre turbulent par une approche LES et son chaînage avec le modèle 1 a été bien avancée.

**Context:** Plasma spray coating allows for the creation of coatings with fine and varied microstructures (columnar, dense, etc.) that meet the requirements of emerging industrial applications, such as new-generation thermal barriers for aeronautics or solid electrolytes for fuel cells.

In this process, the liquid suspension containing the submicron particles of the material to be deposited is injected into a thermal plasma jet to be fragmented and evaporated, releasing individual or agglomerated submicron particles that are then accelerated and melted and will impact and spread over the part to be coated to form a deposit. Its microstructure, and therefore its usage properties, depend on a large number of operating parameters relating to the plasma torch, the suspension, the substrate, and the torch-substrate kinematics.

The complexity of this process requires numerous tests to achieve a coating with controlled properties on a complex-shaped part, which slows down its adoption by manufacturers. Mastering the process requires an understanding of the complex and interdependent mechanisms that govern the treatment of the suspension and the construction of the coating. This understanding requires simulation of the process using a digital twin, including the generation of the plasma jet using a magnetohydrodynamic (MHD) approach (1), the turbulent development of the jet with the injection and hydrodynamic fragmentation of the suspension (2), the treatment of the suspension droplets by the plasma (3), the impact of molten particles on the substrate, and the construction of the deposit (4) according to its operating parameters.

The proposed study is part of the Azurite project co-financed by the region, IRCER, and Safran. This digital twin project is led by IRCER, the Institute of Mechanics and Engineering (I2M) in Bordeaux, and Safran (the second largest aerospace equipment manufacturer and leader in the production of deposits on aerospace parts). This study consists of continuing the modeling work begun as part of a previous project, which laid the foundations for models 1 to 4 and developed model 2 in particular, for which the modeling of turbulent free flow using an LES approach and its chaining with model 1 is well advanced.

### **Objectifs :**

L'objectif ultime de ce travail de thèse est de développer un modèle robuste et prédictif implémenté dans le code de CFD Ansys\_Fluent, permettant de simuler le traitement de la suspension dans le jet de plasma en interaction avec un substrat mobile (2). Cet objectif passe par les sous-objectifs suivants :

- Simuler de façon prédictive le développement du jet de plasma turbulent en interaction cinématique et thermique avec un substrat mobile → champs d'écoulement
- Simuler l'atomisation et la fragmentation secondaire de la suspension lors de son interaction avec l'écoulement de plasma → distribution en tailles, positions, vitesses et trajectoires des gouttes
- Simuler le traitement physique d'un nombre important de gouttes dans les champs instationnaires simulés d'écoulement de plasma : i) d'abord par une approche simplifiée (approche multi-composante) ii) par intégration du modèle prédictif (sous-système 3) développé par un autre doctorant du projet au fur et à mesure de son développement →

distribution en taille, position, vitesse et température des particules juste avant impact afin d'alimenter le sous-système 4

### **Objectives:**

The ultimate objective of this thesis is to develop a robust and predictive model implemented in the Ansys\_Fluent CFD code, enabling the simulation of the treatment of the suspension in the plasma jet interacting with a moving substrate (2). This objective involves the following sub-objectives:

- Predictively simulate the development of the turbulent plasma jet in kinematic and thermal interaction with a moving substrate  $\Rightarrow$  flow fields
- Simulate the atomization and secondary fragmentation of the suspension during its interaction with the plasma flow  $\Rightarrow$  distribution of droplet sizes, positions, velocities, and trajectories
- Simulate the physical treatment of a large number of droplets in the simulated unsteady plasma flow fields: i) first using a simplified approach (multi-component approach) ii) by integrating the predictive model (subsystem 3) developed by another doctoral student on the project as it is developed  $\Rightarrow$  distribution of particle size, position, velocity, and temperature just before impact in order to feed subsystem 4

**Méthodologie/travail proposé :** La chronologie de l'étude suivra les objectifs successifs définis précédemment en interactions avec les avancées réalisées par les post-doctorant/doctorant responsables des modèles 1 et 3 notamment et en prenant soin à chaque étape de valider les calculs par des mesures (PIV, collecte de matériaux en vol ... etc.) réalisées en collaborations avec les expérimentateurs de l'IRCER.

En parallèle, un travail devra être fait sur l'initialisation des calculs et l'optimisation des méthodes numériques pour faciliter et accélérer la convergence et le chainage/couplage entre modèles ainsi que pour réduire les coûts CPU (U-RANS vs LES ?)

**Methodology/proposed work:** The study timeline will follow the successive objectives defined above in conjunction with the progress made by the postdoctoral/doctoral students responsible for models 1 and 3 in particular, taking care at each stage to validate the calculations through measurements (PIV, in-flight material collection, etc.) carried out in collaboration with IRCER experimenters.

At the same time, work will need to be done on initializing the calculations and optimizing the numerical methods to facilitate and accelerate convergence and chaining/coupling between models, as well as to reduce CPU costs (U-RANS vs. LES?).

**Résultats attendus :** définis dans les sous objectifs définis précédemment

### **Conditions de déroulement de la thèse/Collaborations :**

Cette thèse co-encadrée par l'IRCER et l'I2M, se déroulera en grande partie à l'IRCER et en étroite collaboration i) avec les chercheurs de l'IRCER qui travaillent

sur l'observation expérimentale du traitement des suspensions dans le jet de plasma et ii) les personnes de SAFRAN qui industrialisent le procédé de projection plasma de suspension et iii) les doctorants et post doc du projet Azurite. Le département TREFLE de l'I2M apportera son expertise en termes de modélisation des phénomènes physiques et leurs aspects numériques et veillera à l'adéquation des résultats avec le modèle de construction du dépôt qu'il développe.

**Conditions matérielles :**

Station de calcul

Accès à des bases de données bibliographiques

Accès à des formations spécifiques sur des outils de modélisation/  
programmation/ méthodes numériques

**Salaire :** Net mensuel : **1 768 €**, origine : 50% Safran, 50% AAP recherche Région NA 2025 Azurite

**Profil du candidat :** CFD, ingénierie mathématiques, ingénierie modélisation

Connaissances **et première expérience indispensable en modélisation**, méthodes numériques, programmation et physique, bon sens physique, capacité à communiquer avec les partenaires.

**Activités/Compétences du/de la doctorant(e) :**

- Développer un modèle CFD, implémenter le modèle 3 avec les schémas numériques adaptés dans l'environnement du code Ansys\_Fluent par des fonctions utilisateurs, réaliser des maillages avec Icem et gérer de maillages mobiles.
- Maîtriser les approches fluides diphasiques.
- Développer des programmes de traitement de données sous langage Python
- Interagir avec les chercheurs du laboratoire pour valider le modèle et avec les doctorants des étapes 1 et 3.

**Candidate profile:** CFD, mathematical engineering, modeling engineering

**Knowledge and initial experience** essential in modeling, numerical methods, programming and physics, good physical sense, ability to communicate with partners.

**Activities/Skills of the PhD student :**

- Develop a CFD model, implement model 3 with the appropriate numerical schemes in the Ansys\_Fluent code environment using user functions, create meshes with Icem and manage moving meshes.
- Master two-phase fluid approaches.
- Develop data processing programs in Python.
- Interact with laboratory researchers to validate the model and with PhD students in stages 1 and 3.

**Modalités d'encadrement, de suivi de la formation et d'avancement des recherches du doctorant :**

- Réunion avec les directeurs de thèse à minima tous les 15 jours
- Présentation et discussion avec tous les partenaires lors de COPIL ou séminaire du projet, tous les 3 mois
- Comité de suivi de thèse annuel par l'école doctorale

<b>Co-Financements de la thèse</b>	à indiquer (ANR acté, déposé, AAP région déposé, EU, Indust, ...) ACTE :  ENVISAGE : Dossier région :
<b>Cotutelle</b>	<input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non Etablissement : Ville : Pays :
<b>Directeur(s) de thèse (HDR)</b>	NOM : MARIAUX Prénom : Gilles Laboratoire : IRCER Axe 2 NOM : GLOCKNER Prénom : Stéphane Laboratoire : I2M dep Trèfle
<b>Co Encadrants</b>	NOM : Le BOT Prénom : Cédric Laboratoire I2M
<b>Personnes supports impliquées</b>	C. Ruelle, T. Niane, SafranTech, C. Rivière... Safran AircraftEngine Armelle Vardelle, IRCER
<b>Contact(s)</b>	NOM : MARIAUX Prénom : Gilles Tel : email : gilles.mariaux@unilim.fr
	<a href="https://adum.fr/as/ed/proposition.pl?site=unilimSI">https://adum.fr/as/ed/proposition.pl?site=unilimSI</a>

### Bibliography

- 1) E. Dalir, A. Dolatabadi and J. Mostaghimi, Modeling the Effect of Droplet Shape and Solid Concentration on the Suspension, Plasma Spraying, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 161, p 120317.
- 2) A. Djema, C. Chazelas, G. Mariaux, J. Pérambadur, Numerical Study of turbulence development in Suspension Spraying Process, International Thermal Spray Conference, April 28-May 1, 2024, ASM, Milan, Italy (oral).
- 5) Chergui, A., Lebot, C., Rat, V., Mariaux, G., & Denoirjean, A. (2024, April). Physical Mechanisms in Plasma Spray Processing of Suspensions. In *International Thermal Spray Conference* (Vol. 84864, pp. 298-309). ASM International.
- 6) J. K. Perambadur, V. Rat, T. Ngadia Niane, C. Chazelas, Simulation of The Axial III plus plasma torch and its arc fluctuations, Journal of Thermal Spray Technology, 2024, <https://doi.org/10.1007/s11666-024-01827-y>.
- 7) Gaudin, M., Goutier, S., Rivaud, G., Joulia, A., Béchade, E., Kéromnès, A. (2024). Diagnostic of the Liquid Injection Behavior in the Case of Axial Suspension Plasma Spray (ASPS). Journal of Thermal Spray Technology, 1-12, 2024, <https://doi.org/10.1007/s11666-024-01856-7>
- 8) V. Rat, C. Chazelas, S. Goutier, A. Keromnes, G. Mariaux, A. Vardelle, In-Flight Mechanisms in Suspension Plasma Spraying: Issues and Perspectives, Journal of Thermal Spray Technology 2022, 31 p 699–715 <https://hal.science/hal-03860806>