I2M BORDEAUX

Proposition de sujet de doctorat
2025-2028

SAFRAN

TITRE (français)	**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**
TITRE (anglais)	**Modeling and simulation of a suspension plasma spraying process: interaction of the turbulent plasma jet with the substrate and treatment of the suspension**
Description : contexte, objectifs, moyens …	**Partenaires :** Institut de Recherche sur les Céramiques, (UMR CNRS 7315, IRCER), I2M INP Bordeaux (TREFLE), sociétés Safran **Domaine :** Modélisation et simulation numérique des procédés, traitements physiques des matériaux, mécanique des fluides diphasique, génie des procédés, projection thermique, CFD **Field:** Modelling and digital simulation of processes, two-phase fluid mechanics, process engineering, thermal spraying, physical treatment of materials **Mots clés** : suspension, matériau, revêtement, projection plasma, jumeau numérique, mécanique des fluides diphasique, CFD, modélisation, simulation, méthodes numériques, aéronautique **Keywords :** suspension, material, coating, plasma spraying, digital twin, two-phase fluid mechanics, CFD, modeling, simulation, numerical methods, aeronautics **Résumé :** 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 maitrise du procédé nécessite la compréhension des mécanismes complexes et interdépendants qui régissent le traitement de la suspension et la construction du revêtement.

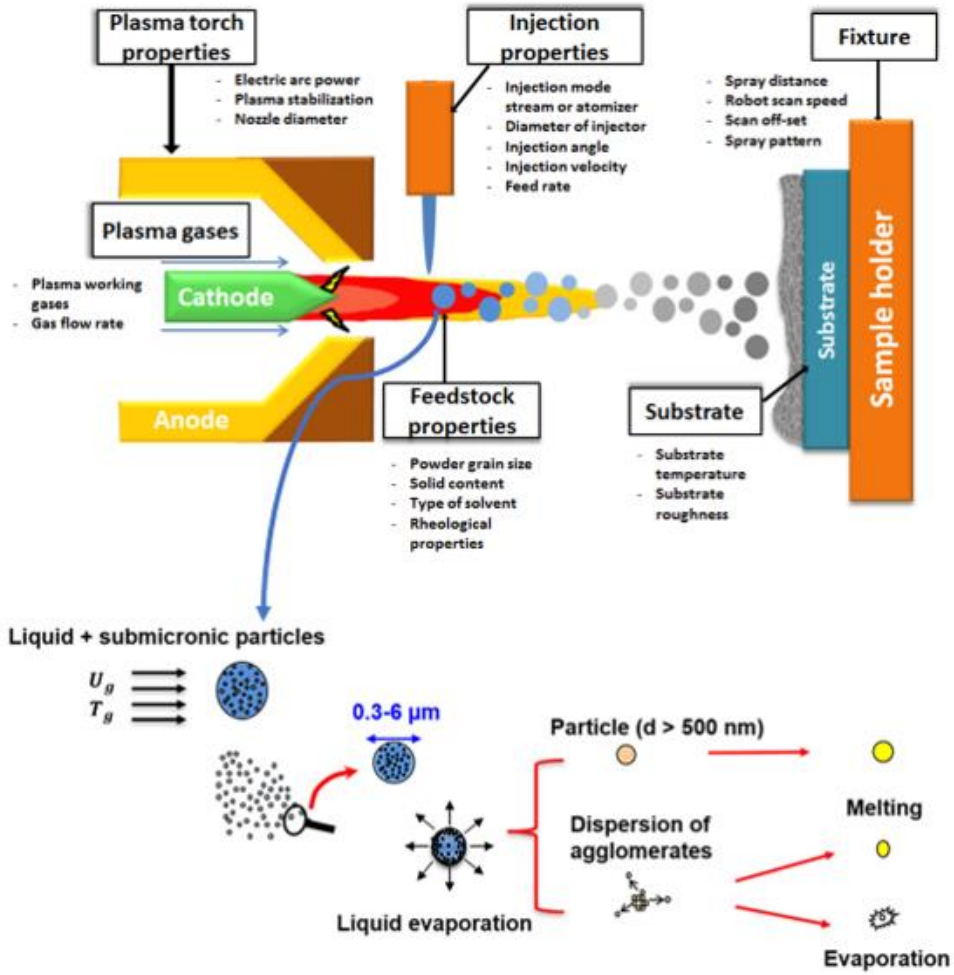

Figure 1 – Procédé de projection plasma de suspension

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.

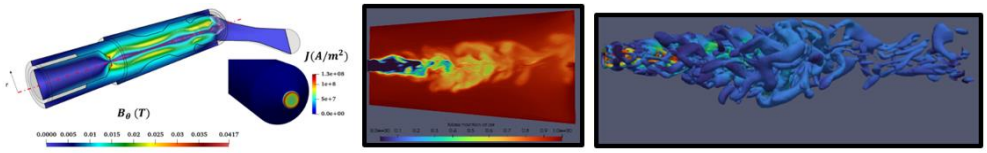

Figure 2 – Simulation de la formation du plasma dans la torche et développement du jet turbulent dans l'air

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 maitrise 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 MagnétoHydoDynamique (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 chainage avec le modèle 1 a été bien avancée.

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

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 couts CPU (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. • Maitriser 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
Co-Financements de la thèse	**à indiquer (ANR acté, déposé, AAP région déposé, EU, Indust, ….)** **ACTE :** **ENVISAGE :** **Dossier région :**
Cotutelle	☐ **oui** ☐ **non** **Etablissement :** **Ville :** **Pays :**
Directeur(s) de thèse (HDR)	**NOM : MARIAUX** **Prénom : Gilles** Laboratoire : IRCER Axe 2

	NOM : GLOCKNER **Prénom : Stéphane** Laboratoire : I2M dep Trèfle
Co Encadrants	**NOM : Le BOT** **Prénom : Cédric** **Laboratoire I2M**
Personnes supports impliquées	**C. Ruelle, T. Niane, SafranTech, C. Rivière… Safran AircraftEngine** **Armelle Vardelle, IRCER**
Contact(s)	**NOM : MARIAUX** **Prénom :** Gilles **Tel :** **email :** gilles.mariaux@unilim.fr

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