



Proposition de sujet de doctorat
Année 2025-2028



TITRE (français)	Modélisation et simulation du procédé de projection plasma de suspension : contribution à la compréhension du traitement physique de la suspension
TITRE (anglais)	Modeling and simulation of suspension plasma spraying process: a contribution to the understanding of the physical treatment of the suspension
Description : contexte, objectifs, moyens ...	<p>Partenaires : Institut de Recherche sur les Céramiques, (UMR CNRS 7315, IRCER), I2M INP Bordeaux (TREFLE), société Safran</p> <p>Domaine : Modélisation et simulation numérique des procédés, traitements physiques des matériaux, génie des procédés, projection thermique, CFD, mécanique des fluides diphasique</p> <p>Field: Modelling and digital simulation of processes, physical treatment of materials, process engineering, thermal projection, CFD, two-phase fluid mechanics</p> <p>Mots clés : projection plasma, suspension, revêtement pour l'aéronautique, jumeau numérique, mécanique des fluides, CFD, modélisation, simulation, méthodes numériques.</p> <p>Keywords : plasma spraying, suspension, coating for aerospace, digital twin, fluid mechanics, CFD, modeling, simulation, numerical method.</p> <p>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 maîtrise du procédé nécessite la compréhension des mécanismes complexes et interdépendants qui régissent le traitement de la suspension et la construction du revêtement.</p>

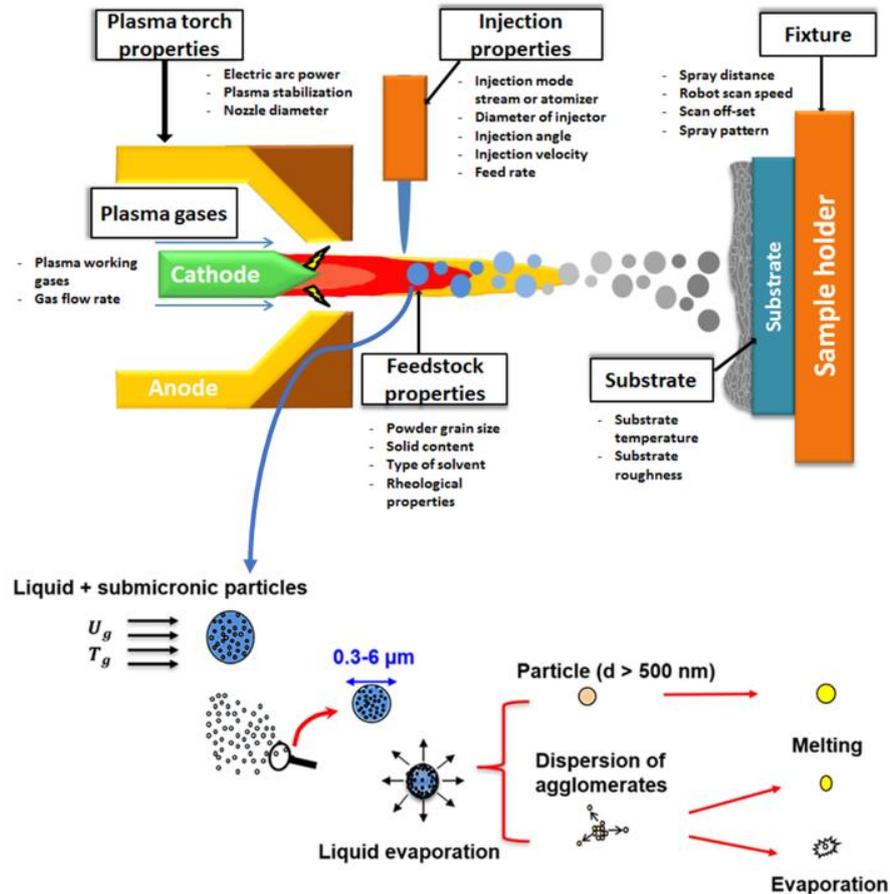


Figure 1 – Procédé de projection de suspension plasma

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.

Le travail de ce doctorat consistera à modéliser le comportement des particules submicrométriques au sein d'une goutte de suspension déjà fragmentée et soumise au flux de chaleur et au cisaillement de l'écoulement plasma et dont le liquide porteur s'évapore, se déforme et recircule en prenant en compte la diffusion et les forces sur/entre particules, et ce, de façon à prédire le nombre de particules résultant, leur taille voire leur forme, une goutte pouvant possiblement conduire à la naissance des plusieurs agrégats.

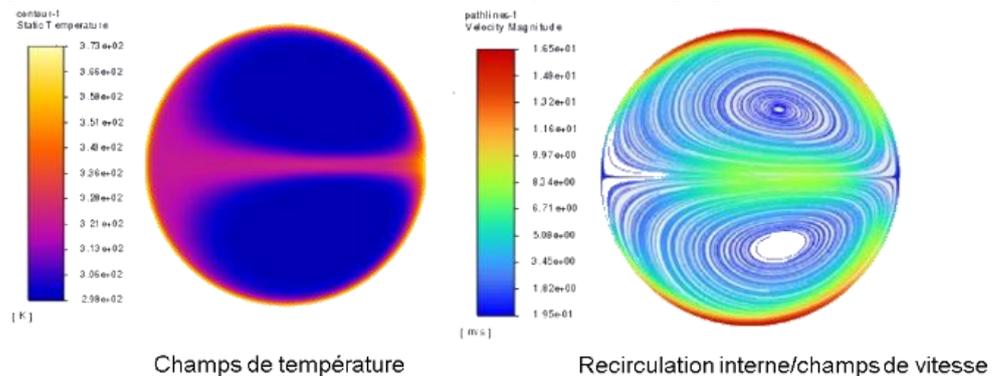


Figure 2 – Modélisation du comportement du liquide au sein de la goutte de

suspension dans l'écoulement de plasma

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 coating 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 aim of this PhD will be to model the behavior of submicrometer particles within an already fragmented suspension droplet, subjected to the heat flux and shear of the plasma flow, and whose carrier liquid evaporates, deforms and recirculates, taking into account diffusion and forces on/between particles, so as to predict the number of particles resulting, their size and even their shape, as one droplet could possibly lead to the birth of several aggregates.

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'aéronautique 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 (2^{ème}

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°3.

Objectifs : Le travail de thèse proposé vise à comprendre et modéliser le traitement thermique et physique d'une goutte de suspension de différentes tailles entièrement fragmentée par l'écoulement plasma (modèle 3) pour déterminer le nombre et la taille ou distribution en tailles des agglomérats et leur traitement thermique sous différentes conditions de cisaillement et d'enthalpie spécifique du plasma. Le modèle correspondant devra donc prendre en compte les phénomènes contrôlant le comportement des particules submicroniques au sein de la goutte et devra, à termes, être intégré au modèle 2 pour prévoir les paramètres des particules à l'impact pour un grand nombre de gouttes subissant des conditions plasma différentes et permettant d'alimenter le modèle de formation du revêtement (4) de façon prédictive.

Méthodologie/travail proposé : Par une analyse dimensionnelle, A. Chergui, doctorant à l'IRCER, a sélectionné les principaux phénomènes contrôlant le comportement des particules submicroniques au sein de la goutte et leur enchaînement : fragmentation hydrodynamique, recirculation interne du liquide, évaporation intense ... , puis diffusion des particules submicroniques (phénomène le plus lent). Son travail actuel consiste à modéliser et implémenter progressivement ces différents phénomènes au sein d'une gouttelette entièrement fragmentée représentée par un domaine 2D axisymétrique déformable dans le code de CFD Ansys_Fluent (ou code maison) sous différentes conditions de plasma réalistes fournies par le modèle 2. Le travail de thèse proposé consiste :

1) à poursuivre ces travaux de modélisation de A. Chergui et d'implémentation en prenant par exemple en compte les forces d'attraction/répulsion inter particulaires qui devraient permettre de prédire l'agglomération sélective des particules menant éventuellement à plusieurs agglomérats distincts, la possible formation d'une coque viscoélastique et sa déformation du fait des forces en présence, et finalement la forme, le nombre et la taille des agglomérats et leur état. Une comparaison en taille et forme avec des prélèvements de matériau en différents points du jet de plasma sera faite à chaque enrichissement du modèle. Des développements 3D sont également à prévoir en plus des modèles 2D axisymétriques

2) à implémenter le modèle précédent sous la forme d'une fonction utilisateur représentant les phénomènes les plus significatifs et donc rapide d'exécution dans le code relatif à l'écoulement plasma (modèle 2). Ceci permettra de modéliser un grand nombre de gouttes de parcours et traitements différents au sein du plasma et de fournir les paramètres à l'impact des particules sur le substrat pour alimenter le sous-système 4 à partir des paramètres opératoires torches et suspensions. Les vitesses d'impacts simulées seront validées par des mesures de PIV.

3) à interagir avec les doctorants responsables des modèles 2 et 4

Résultats attendus : définis dans la rubrique **méthodologie/travail proposé** définie précédemment. Notamment, les résultats obtenus devront servir de base d'entrée au modèle 4 en termes de distribution de vitesse et taille de particules à l'impact

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% IRCER, 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 et implémenter des modèles numériques (→ représenter la physique régissant les interactions goutte de suspension/plasma : approche diphasique Eulérienne (gaz/liquide), Lagrangienne (comportement des particules en suspensions dans la goutte),
- Connaitre les approches diphasiques
- Implémenter les schémas numériques adaptés à ces modèles.
- Interagir avec les chercheurs du laboratoire pour valider le modèle et avec les doctorants des étapes 2 et 4.

Candidate profile: CFD, mathematical engineering, modelling engineering

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

Activities/Skills of the doctoral student

- Developing and implementing numerical models (→ representing the physics governing suspension drop/plasma interactions: two-phase Eulerian approach (gas/liquid), Lagrangian approach (behaviour of particles suspended in the drop),
- Knowledge of two-phase approaches
- Implement numerical schemes adapted to these models.
- Interact with laboratory researchers to validate the model and with PhD students in stages 2 and 4.

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

	<ul style="list-style-type: none"> - Présentation et discussion avec tous les partenaires du consortium lors de comité de pilotage ou séminaire du projet, tous les 3 mois - Comité de suivi de thèse annuel par l'école doctorale
at	
Co-Financements de la thèse	à indiquer (ANR acté, déposé, AAP région déposé, EU, Indust, ...) ACTE : ENVISAGE : Dossier région :
Cotutelle	<input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non Etablissement : Ville : Pays :
Directeur(s) de thèse (HDR)	NOM : RAT Prénom : Vincent Laboratoire : IRCER Axe 2 NOM : LEBOT Prénom : Cédric Laboratoire : I2M dept Trèfle
Co Encadrants	NOM : MARIAUX PRENOM : GILLES IRCER NOM : Glockner Prénom : Stéphane
Personnes supports impliquées	C. Ruelle, B. Changeux, SafranTech, C. Rivière, Safran AircratEngine
Contact(s)	NOM : RAT Prénom : Vincent Tel : email : vincent.rat@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) I. Gulyaev, Phenomenological Model of the Suspension Droplets Evaporation in a Plasma Flow Considering Different Mass Transfer Mechanisms, Surface and Coatings Technology, 2020, 404, p 126454)
- 3) S.M. Javid, C. Moreau and J. Mostaghimi, Numerical Analysis of Buckling of a Single Suspension Droplet, J Therm Spray Tech, 2020, 29(3), p 344-357, 32 A
- 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>