

Diagnostiques optiques et modélisation du procédé de projection plasma de nanomatériaux en voie liquide

La projection plasma de suspension de particules nanométriques permet d'obtenir des dépôts nanostructurés de faible épaisseur permettant d'améliorer les fonctions des pièces revêtues. Cette technique utilise une veine gazeuse à haute vitesse et haute température, générée par une torche plasma, dans laquelle est injectée une suspension du matériau fonctionnel. Les interactions entre le gaz à haute température et le liquide chargé sont nombreuses (fragmentation, évaporation du liquide, traitement thermique des particules) et complexes à analyser du fait des vitesses et du fort rayonnement lumineux généré par le plasma. En simulation numérique directe et sans hypothèse réductrice, les premières images de modélisation d'un train de gouttes et d'un jet continu d'eau pénétrant dans un jet plasma restituent complètement les séquences de fractionnement visualisées en caméra rapide au Laboratoire de projection thermique. Cette étape ouvre des voies prometteuses d'analyse de l'influence des différents paramètres intervenant dans le procédé.

E. Meillot • D. Damiani • C. Caruyer CEA - Le Ripault

S. Vincent • J.-P. Caltagirone Institut de mécanique et d'ingénierie, École nationale supérieure de chimie, de biologie et de physique, Pessac

La projection plasma est un procédé pertinent pour déposer des matériaux nanostructurés sur des pièces industrielles de grandes dimensions de façon à améliorer leurs propriétés fonctionnelles. Elle utilise une source thermique (une torche à plasma, **figure 1**) pour accélérer et chauffer à haute température un jet gazeux dans lequel sont introduites les particules qui vont générer le dépôt par empilement successif. Les particules nanométriques sont mises en suspension dans un milieu aqueux ou un

solvant pour être introduites dans le jet plasma. On parle ainsi de projection en voie liquide. L'optimisation du traitement des particules nécessite, d'une part, le diagnostic des interactions entre le jet liquide chargé et l'écoulement plasma et, d'autre part, entre cet écoulement et l'atmosphère environnante responsables du refroidissement de jet plasma par engouffrement d'air. Ce diagnostic peut être effectué par deux voies complémentaires, la visualisation et la modélisation.

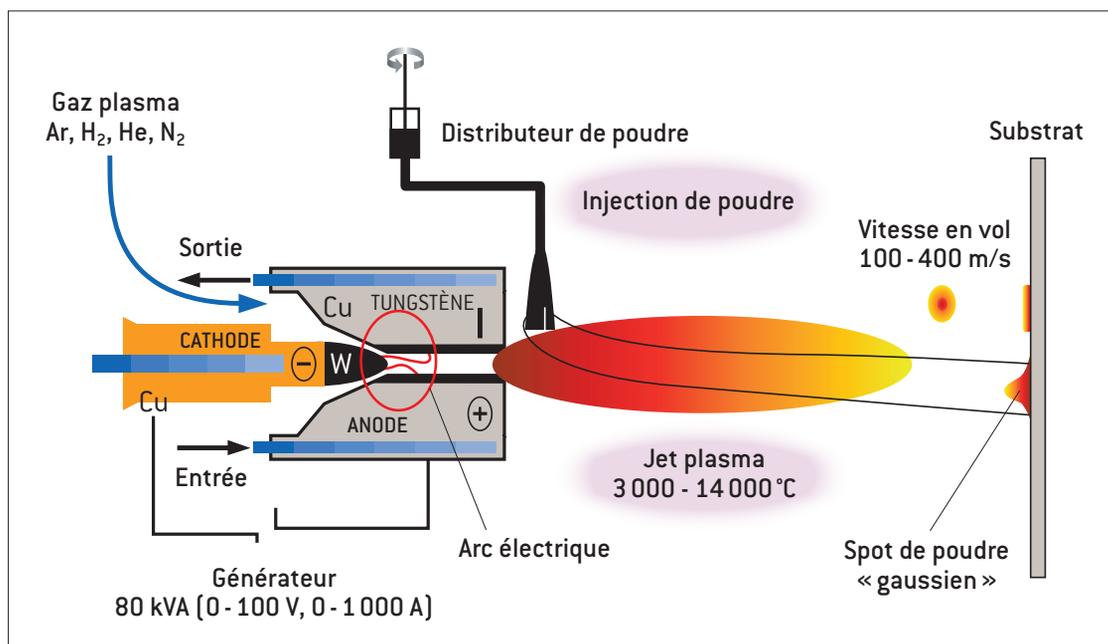


Figure 1. Schéma de principe de la projection plasma.

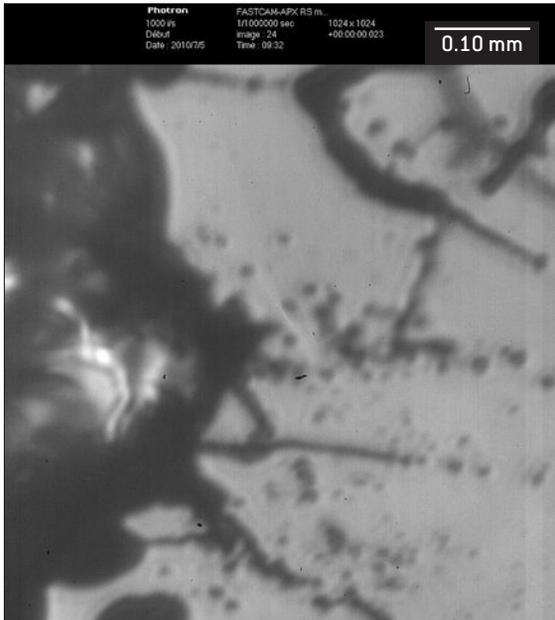


Figure 2. Image des ligaments et des gouttelettes obtenue en cinématographie rapide.

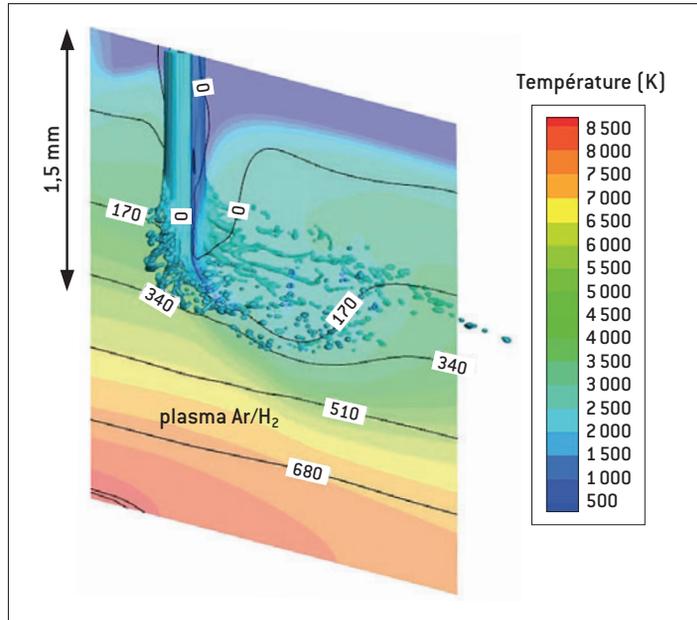


Figure 3. Injection d'un jet liquide dans un jet plasma Ar/H₂ représenté par ses isothermes et ses isolignes de vitesse.

Visualisation du jet liquide et du plasma

L'interaction entre le jet liquide et le plasma thermique est observée par ombroscopie à l'aide d'un dispositif constitué d'une caméra rapide et d'une lampe flash (durée 100 ns) présentant une intensité lumineuse supérieure à la luminosité du plasma. La résolution spatiale de 0,6 µm par pixel permet de visualiser finement la fragmentation du liquide (figure 2). La cinétique de fragmentation est observée avec une cadence de 20 000 images par seconde.

Modélisation numérique

Les calculs sont menés dans une configuration 3D avec un modèle instationnaire de l'écoulement plasma. La colonne plasma à l'intérieur de la torche est simulée par un modèle simple dénommé «modèle enthalpique» (basé sur l'échauffement du gaz par effet Joule); la forme de la colonne évolue en fonction du temps à travers le signal instantané de la tension d'arc [1]. Les aspects compressibles du plasma sont pris en compte à travers un modèle développé dans notre laboratoire [2]. La description des modèles complets et des hypothèses est accessible dans [3,4]. La résolution des équations de Navier-Stokes intégrées dans la bibliothèque THETIS est effectuée, en collaboration avec l'Institut de mécanique de l'ENSCBP à Pessac, sur les ordinateurs du centre de calcul de recherche et technologie (CCRT) du CEA-DAM Île-de-France.

Discussion

Les deux images (figure 2 et figure 3) représentent le comportement d'un jet liquide (diamètre 200 µm et vitesse d'injection 22 m/s) analysées par visualisation expérimentale et par simulation numérique (temps 45 µs). Les modes de fragmentation sont fonction du nombre de Weber (qui traduit le rapport de la déformation inertielle du fluide à

la tension de surface). Le comportement du jet liquide est particulièrement bien simulé: le mode «catastrophique» est ainsi correctement reproduit avec la génération des ligaments puis de leur désintégration sous l'effet du cisaillement intense dû au jet de plasma. Cette simulation apporte également les informations suivantes: le jet pénètre relativement peu dans le jet plasma (diamètre du jet 6 mm); son fractionnement commence à moins d'un millimètre et pour des vitesses relativement faibles (environ 170 m/s). Les gouttes générées sont donc loin du cœur du plasma visualisé par les températures supérieures à 8000 K en bas à gauche de la figure 3. L'injection de gouttes isolées modifie le mécanisme de fragmentation et la valeur du nombre de Weber: si le début du fractionnement se situe dans les mêmes zones, le fractionnement en mode «sac» est également correctement restitué avec la disparition de l'étape de formation des filaments.

RÉFÉRENCES

- [1] E. MEILLOT *et al.*, "From D.C. Time-dependent Thermal Plasma Generation To Suspension Plasma Spraying Interactions", *J. Therm. Spray Technol.*, **18**(5-6), p. 857-886 (2009).
- [2] C. CARUYER *et al.*, "A two-phase LES compressible model for plasma-jet interaction", Proc. of Turbulence et Interactions 2009, Ste LUCE, France, 2009 in Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Springer, **110**, p. 95-102 (2010).
- [3] S. VINCENT *et al.*, "Eulerian-Lagrangian multiscale methods for solving scalar equations - Application to incompressible multiphase and multicomponent flows", *J. Comput. Phys.*, **229**(1), p. 73-106 (2010).
- [4] C. CARUYER *et al.*, "Modeling the first instant of the interaction between a liquid and a plasma jet with a compressible approach", *Surf. Coat. Technol.*, **205**(4), p. 974-979 (2010).