

TRAITEMENT THERMIQUE D'UNE PARTICULE INJECTE DANS UN MILIEU PLASMAGENE

A. AISSA¹, M. ABDELOUAHAB¹, A. NOUREDDINE², M. EL-GANAOU³
et B. PATEYRON³

¹Laboratoire de Modélisation des Systèmes Industriels, ²Laboratoire de Mécanique Appliquée,
³SPCTS, Université de Limoges, France
E-mail: aissa86@gmail.com

ABSTRACT: This work relates to the making of materials with deposit of metal or ceramic drops. One is interested in the exchanges between plasma-producing gas and the particle. Indeed in projection plasma, of materials (about the μm) are projected at high speed, in a molten state or semi dissolve on beforehand prepared substrates.

KEYWORDS: plasma, nombre de Nusselt, dépôt, COMSOL

1. INTRODUCTION

Ce travail concerne l'élaboration de matériaux par dépôts de gouttes métalliques. On s'intéresse aux échanges entre le gaz plasmagène et la particule. En effet en projection plasma, des matériaux métalliques sont projetés à grande vitesse, dans un état fondu ou semi fondu sur substrats préalablement préparés. Le plasma permet des températures élevées (6000K à 12000K) qui assurent la fusion des particules des matériaux les plus réfractaires. La vitesse d'impact des gouttes est élevée et il est difficile de décrire leur comportement à l'impact sur le substrat. De façon certaine le comportement à l'impact est directement influencé par l'histoire thermique et dynamique de la particule. Ce comportement dynamique est décrit par des simulations pour évaluer indépendamment l'écoulement axisymétrique statique du jet de plasma et le comportement de la particule injectée au sein de celle-ci.

2. DESCRIPTION DES PROCÉDES DE PROJECTION THERMIQUES

Dans le procédé de projection plasma, il est possible de distinguer quatre systèmes fonctionnels :

- la génération du jet plasma par la conversion de l'énergie électrique en énergie thermique.
- l'injection de la poudre dans le jet.
- l'écoulement du jet plasma et l'interaction avec le gaz environnant et avec la poudre.
- l'élaboration du dépôt par empilement des lamelles sur le substrat.

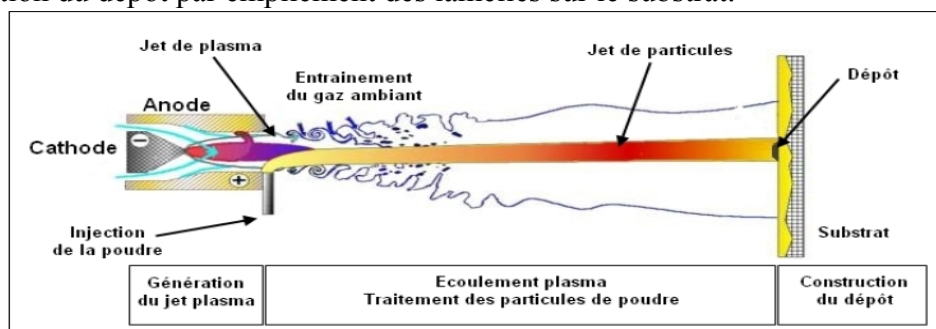


Figure 1: Principe de la projection plasma d'arc et ses principaux sous-systèmes Fonctionnels

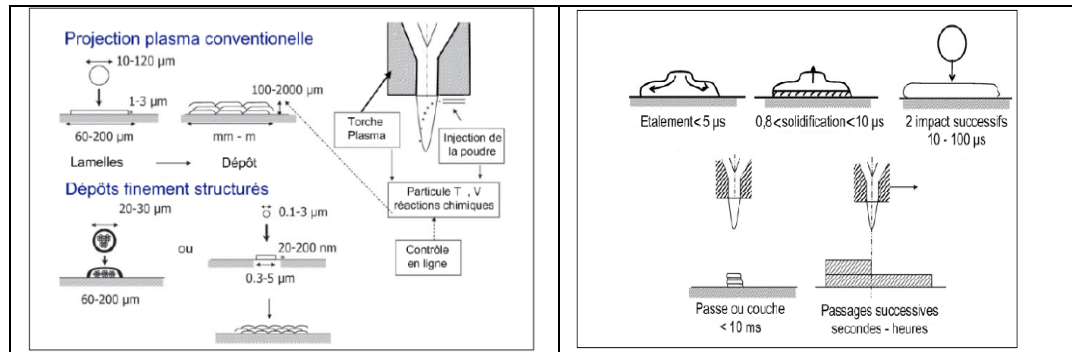


Figure 2 : Principe de formation de dépôt par projection plasma [1]

Transfert de chaleur, de masse et de quantité de mouvement :

La couche limite qui se développe autour de la particule se caractérise par un gradient important de température, la différence de température entre le gaz et la surface du particule peut atteindre 1000 K [1], ce qui se traduit par des phénomènes de diffusion dans la couche limite et implique un écart à l'équilibre chimique fonction de l'ordre de grandeur des vitesses des réactions chimiques et de la vitesse de diffusion.

Transfert de chaleur

Plusieurs travaux montrent qu'en absence de réactions chimiques à la surface, le chauffage par conduction convection dans la couche limite thermique est le mécanisme principal du chauffage de la particule dans le jet plasma. Alors que la particule, sous condition plasma, se refroidit par rayonnement vers le milieu ambiant, souvent le transfert radiatif du plasma vers la particule est négligé et le plasma est donc considéré comme optiquement mince [1].

En fonction du gaz plasmagène et de sa conductivité thermique, les particules sont soumises à des flux de chaleur très importants qui peuvent atteindre 108 W.m^{-2} , ce qui entraîne leur évaporation et modifie ainsi le transfert thermique vers elles, en effet :

- Le flux thermique reçu par une particule qui s'évapore diminue, puisqu'une partie du flux est convertie en enthalpie d'évaporation et que l'autre partie sert à chauffer les vapeurs et à les élever de la température de la surface de la particule à la température du gaz.
- L'évaporation des particules modifie le mélange gazeux et donc ses propriétés thermodynamiques et de transport dans la couche limite et dans le jet.

Le coefficient de transfert de chaleur h est classiquement calculé à l'aide de la corrélation de Ranz et Marshall [2] obtenue pour des gouttes liquides en mouvement de translation :

$$Nu = 2 + 6 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (1)$$

Transfert de quantité de mouvement :

Les forces qui s'exercent sur les particules dans le jet plasma et qui régissent leurs trajectoires sont principalement :

- la force de traînée : c'est la force la plus importante, elle peut être modifiée par l'évaporation de la particule et des effets de non continuité de la couche limite. Elle est donnée par :

$$F_D = -\frac{1}{2} c_D \cdot \pi \cdot \frac{d_p^2}{4} \cdot \rho_\infty \cdot |V_\infty - V_p| \cdot (V_\infty - V) \quad (2)$$

- la force de masse ajoutée : elle traduit l'accélération du fluide environnant due à l'accélération de la particule. Elle est exercée par le volume du fluide déplacé par la particule.

$$F_{ma} = -\frac{\pi}{6} d_p^2 \rho_\infty \frac{dV_\infty}{dt} \quad (3)$$

- la force liée à la rotation de la particule, résultat d'un gradient de vitesse de mouvement relatif jet plasma-particule :

$$F_r = -\frac{\pi d_p^3}{8} \rho_\infty \omega_p (V_\infty - V_p) \quad (4)$$

- La force de thermophorèse : liée au gradient de température dans la couche limite qui y induit des gradients de concentration :

$$F_{th} = \frac{12 \pi \mu_\infty v_\infty \frac{d_p}{2} \frac{c_p}{T_\infty} grad T}{(1 + 6 c_m \frac{\lambda}{d_p})(1 + 2 \frac{k_\infty}{k_p} + 4 c_r \frac{\lambda}{d_p})} \quad (5)$$

Où λ est le libre parcours moyen des molécules de fluide, C_t est la distance de saut pour les conditions limites de vitesse, C_s est le coefficient de glissement thermique.

La force de gravité :

$$F_g = -\frac{\pi d_p^3}{6} (\rho_p - \rho_\infty) \cdot g \quad (6)$$

Couplage avec la dynamique de la particule :

La trajectoire d'une particule isolée dans le jet plasma est calculée à partir du bilan des forces exercées sur celle-ci., les forces autres que les forces citées peuvent être négligées conformément aux résultats des études consacrées à leur importance relative. L'équation du mouvement est donnée par [5] :

$$m_p \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} c_D \pi \frac{d_p}{4} \rho_\infty |v_\infty - v_p| (v_\infty - v_p) \quad (7)$$

Les grandes variations de température et donc de propriétés du gaz dans la couche limite thermique qui entoure la particule, sont prises en compte par l'introduction d'un coefficient correctif au coefficient de traînée qui s'écrit comme suit :

$$c_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.11 Re^{0.81}) f' f'' \quad (8)$$

Où f' est le coefficient correctif proposé par Lee [5] pour tenir compte du gradient de température dans la couche limite, f'' est le facteur correctif correspondant à l'effet Knudsen. La dynamique d'une particule est contrôlée par la perte de masse due à l'évaporation.

3. MODELISATION DU TRAITEMENT D'UNE PARTICULE INJECTEE DANS UN JET DE PLASMA

Le modèle du transfert de chaleur plasma-particule et des changements de phase développés ici, doit être conforme au cahier des charges de «Jets & Poudres»[3], les différents changements de phase susceptibles de s'effectuer dans une particule sous conditions plasma. Ceci peut faire de la particule une succession plus ou moins complexe de phases, comme schématisé sur la Figure3a [4].

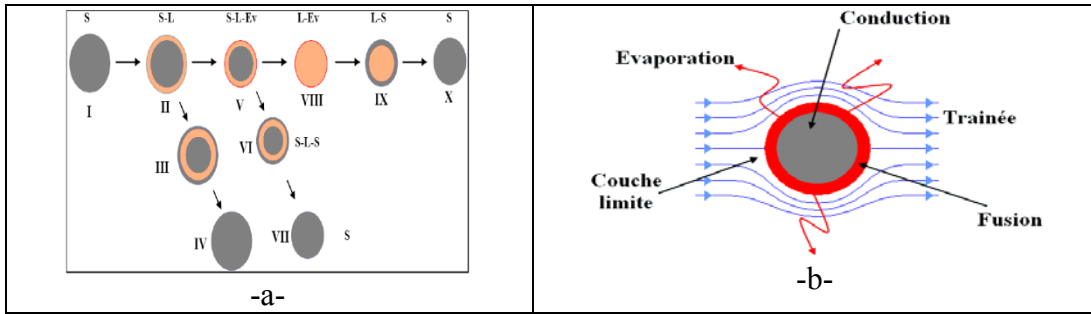


Figure 3: Transformations de phases (solide-liquide-vapeur) possibles pour une particule dans un jet de plasma Ar-H₂

Dans ce rapport on va étudier l'échange thermique d'une particule seul de silice dans un domaine par usage du logiciel COMSOL pour la simulation numérique. La particule, considérée comme immobile, est plongée dans un écoulement plasma à 6000 K et de vitesse V à l'infini. Elle est chauffée progressivement à travers une couche limite par un flux de chaleur d'origine conductive et convective en raison de l'écoulement du fluide.

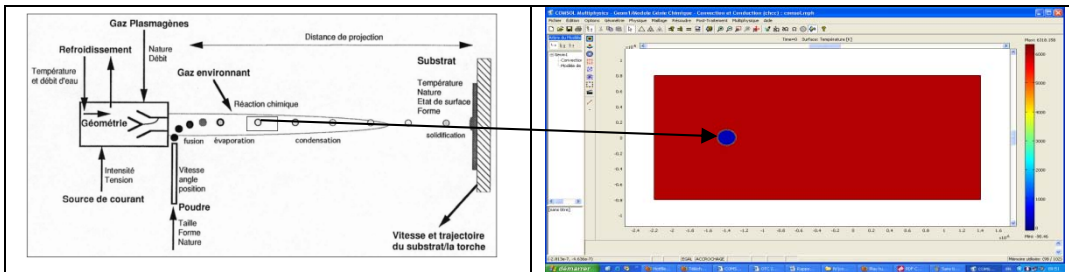


Figure 4 : Représentation schématiques des paramètres influents en projection thermique.

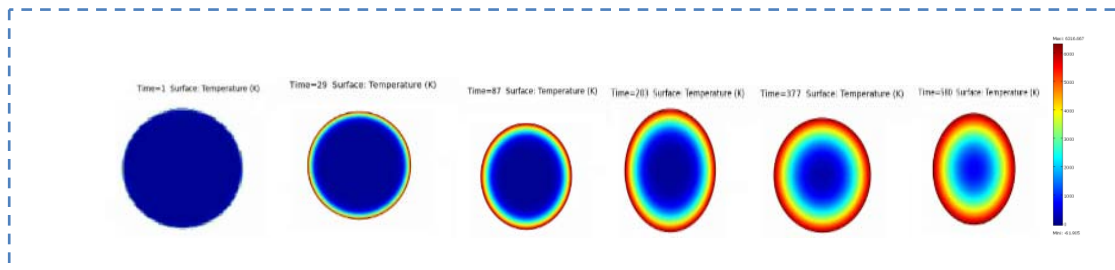


Figure 5: Les changements de phase obtenue par simulation (COMSOL).

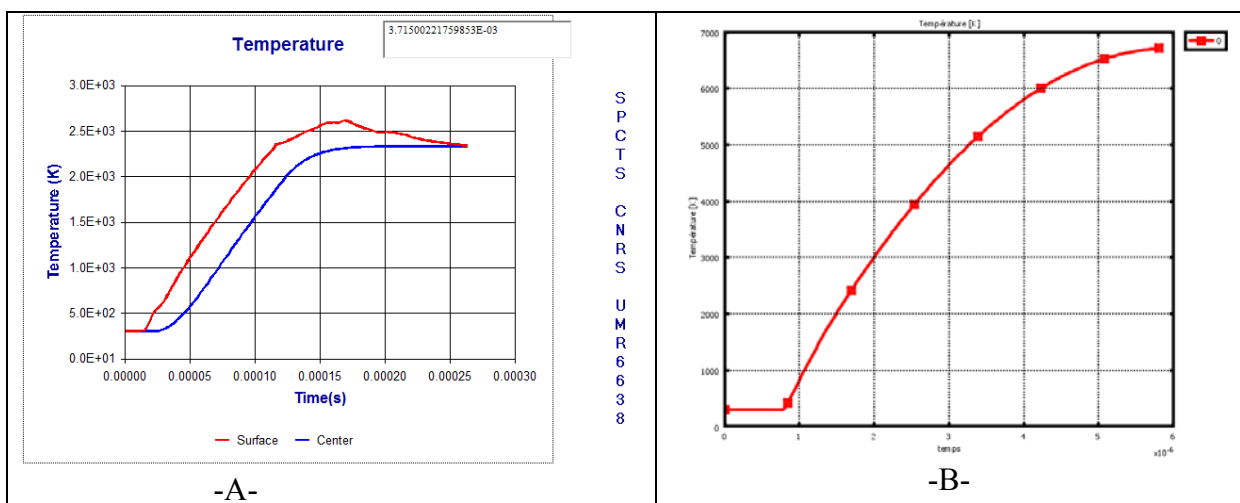


Figure 6: Modélisation du traitement d'une particule injectée dans un jet plasma.

La couche limite qui se développée autour de la particule se caractérisé par un gradient de température, La différence de la température entre le gaz et la surface de la particule peut atteindre 4000 K, Ce qui traduit l'augmentation progressive de la température de la surface vers l'intérieur de la particule et les changements de phase illustrée dans la figure 1.5 obtenu numériquement par logiciel COMSOL. La courbe de la figure 1.6 explicite le changement de phase de la particule injecté (solide, liquide et vapeur).

On a validé notre travail avec une étude expérimentale obtenu par laboratoire de SPCTS CNRS FANCE illustrée dans la figure 6.a [3].

4. CONCLUSION

Au terme de cette étude, il apparait que l'interaction d'une poudre avec un jet de plasma fait intervenir plusieurs mécanismes complexes. Nous retiendrons que lors de l'injection d'une poudre dans un jet de plasma, celle-ci peut être le siège de divers modes d'échanges de chaleur et de masse comme la conduction, la convection, le rayonnement, le changement de phase (fusion et solidification, évaporation) et l'oxydation. Bien sur la prépondérance d'un mode par rapport à un autre est tributaire de la taille des particules, de la nature du matériau et du milieu plasma mais aussi de la dynamique et thermique de l'écoulement du jet.

REFERENCES

- [1] J.R. Davis, Davis & Associates, *Handbook of Thermal Spray Technology*, the materials international society. 2004, pp.47.48
- [2] T. Klocker and T.W.Clyne; *J. Thermal Spray Technology In flight behavior of dense and hollow particles during plasma spraying: Part I- A numerical model*. 2003
- [3] B.Pateyron and G. Delluc, Logiciel Jets&Poudres. Téléchargeable à partir de <http://jets&poudres.free.fr>
- [4] F.bentouil ; Thèse de doctorat, *Céramiques et Traitement de Surfaces*, 2008, pp 77, 147
- [5] X.Chen, C.Lee; heat transfer to a particle under plasma conditions with vapor contamination from the particle, *plasma chemistry and plasma processing*. Vol .5 No.2, 1985