

Etude du comportement d'une particule injectée dans un milieu gazeux à haute température

Abdelkader NOUREDDINE¹, Abderahmane AISSA², Mohamed ABDELOUAHAB²,
Bernard PATEYRON³, Mohamed EL GANAOU³

¹ Laboratoire de Mécanique Appliquée, ² Laboratoire de modélisation des systèmes industriels-USTO-MB,
³ SPCTS- Université de Limoges-(France)

redkanour@yahoo.fr,

Résumé : L'injection thermique est un moyen qui permet d'améliorer la résistance à l'usure et au frottement, la protection thermique et la protection contre la corrosion. En général les systèmes d'injection ou de projection thermique utilisent un gaz vecteur qui transporte et accélère des fines particules d'un matériau fondu sur une surface à recouvrir. En effet, en injection plasma, des matériaux (de l'ordre du μm) sont projetés à grande vitesse dans un état fondu sur des substrats préalablement préparés. Le gaz plasma atteint des températures élevées qui assurent la fusion des particules des matériaux les plus réfractaires. La vitesse d'impact des gouttes est également élevée et il est difficile de décrire leur comportement pendant l'impact sur le substrat. Le comportement au moment de l'impact est directement lié à l'évolution thermique et dynamique de la particule dans la flamme. Les calculs reposent sur des lois de transfert semi empiriques, ceci nous a permis de comprendre les phénomènes de transferts et d'identifier des domaines de validité des corrélations semi empiriques. Ce travail a été réalisé grâce à la simulation du comportement de la particule entre l'injection et l'impact sur le substrat.

Mots clés : Nombre de Nusselt, Comsol, plasma thermique, interaction, corrélation Ranz & Marshal

1. Introduction

L'injection thermique est un traitement de surface visant à améliorer les propriétés mécaniques du matériau support qui doit être revêtu. La résistance à l'usure et au frottement, la protection thermique et anticorrosion sont améliorées par ces revêtements. En général les systèmes de projection thermique en milieu plasmagène utilisent un gaz vecteur qui transporte avec une certaine accélération de fines particules (de l'ordre de 5 à 100 μm) d'un matériau fondu. Celles-ci suivent une trajectoire précise avant d'être déposées sur la surface à recouvrir. Les particules injectées sur le substrat créent le revêtement sur la base de liaisons physico-chimiques. Le matériau à déposer peut être sous forme de poudre, de fil ou de baguette, l'apport d'énergie peut se faire par flamme ou par jet plasma d'arc électrique [1, 2, 3, 4,5]. Les échanges énergétiques entre le gaz plasma et la particule constituent l'objet essentiel de cette étude. En projection thermique plasmagène, des matériaux métalliques ou céramiques (de l'ordre du μm) sont projetés à grande vitesse dans un état fondu ou semi fondu sur des substrats préalablement préparés. Le gaz plasma atteint des températures élevées (6000 °K à 12000 °K) qui assurent la fusion des particules des matériaux les plus réfractaires. La vitesse d'impact des gouttes est également élevée de 100 à 500m/s et il est difficile de décrire leur comportement pendant l'impact sur le substrat [6]. De façon certaine, le comportement à l'impact est directement lié à l'évolution thermique et dynamique de la particule dans le milieu plasmagène à travers la trajectoire suivie. Ce comportement de la particule est décrit par des simulations dans le but d'évaluer d'une part l'écoulement axisymétrique du jet et d'autre part, le comportement de la particule injectée au sein de celui-ci [2,5]. Les calculs reposent sur des lois de transfert semi empiriques [7, 8, 9, 10,11]. Cette simulation réalisée à l'aide du logiciel commercial COMSOL nous a permis une meilleure compréhension des phénomènes de transferts thermiques et d'identifier les domaines de validité des corrélations semi empiriques.

2. Position du problème :

Dans le procédé de projection plasma comme le montre la figure 1, il est possible de distinguer quatre systèmes fonctionnels qui sont :

- 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.

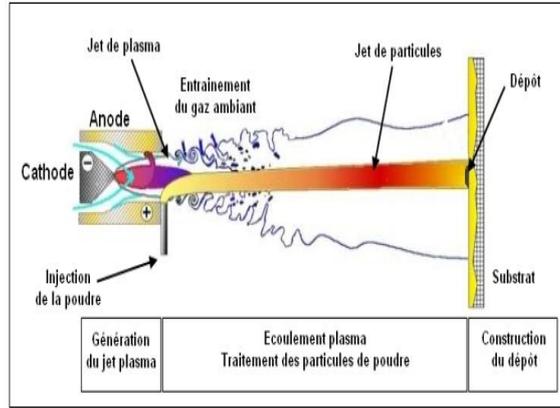


Figure 1 : Principe de la projection plasma d'arc et ses principaux sous-systèmes Fonctionnels.

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 de la particule peut atteindre 200 °K [1], ce qui se traduit par des phénomènes de diffusion dans la couche limite et implique un écart à l'équilibre chimique en fonction de l'ordre de grandeur des vitesses des réactions chimiques et de la vitesse de diffusion. 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 :

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

Dans la corrélation de Ranz & Marshall [8], il est postulé qu'à la vitesse du fluide nulle, le transfert de chaleur s'effectue uniquement par conduction, c'est-à-dire que $A=2$, et l'estimation des coefficients c , m et n est égale à 0.6, 0.5 et 0.33 respectivement. Des termes correctifs sont ajoutés pour prendre en compte les effets du gradient de température dans la couche limite et de la non continuité relative aux écoulements de plasma où le libre parcours moyen des molécules est voisin du diamètre des particules. Le tableau 1 regroupe quelques-unes de ces corrélations du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds et du nombre de Prandtl. Pour tenir compte de la vitesse et de la convection forcée, le nombre de Reynolds est introduit dans un terme additif ainsi que le nombre de Prandtl qui est utilisé pour caractériser la nature du gaz et sa capacité de stockage de la chaleur. En raison de l'épaisseur de la couche limite thermique et du fort gradient thermique dont il est le siège, lequel génère des inhomogénéités des propriétés des termes faisant intervenir des rapport de viscosité cinématique ou bien des rapports de produit de la viscosité dynamique par la masse volumique ou même des rapports de chaleur spécifique ont été utilisés.

Tableau 1 - Table des corrélations

Ranz & Marshall [8]	$Nu = 2 + 0.6Re^{0.5}Pr^{0.33}$
Lewis & Gauvin [13]	$Nu = (2 + 0.515Re^{0.5})(v_{\infty}/v_w)^{-0.15}$
Fiszdon [9,11]	$Nu = (2 + 0.6Re^{0.5}Pr^{0.33})\left(\frac{\rho_{\infty}\mu_{\infty}}{\rho_w\mu_w}\right)^{0.6}$
Lee & Pfender [11]	$Nu = (2 + 0.6Re^{0.5}Pr^{0.33})\left(\frac{\rho_{\infty}\mu_{\infty}}{\rho_w\mu_w}\right)^{0.6}\left(\frac{C_{p\infty}}{C_{pw}}\right)^{0.38}$
Kalganova [12]	$Nu = 2\frac{K_w}{K_{\infty}} + 0.5Re^{0.5}Pr^{0.4}\left(\frac{\rho_{\infty}\mu_{\infty}}{\rho_w\mu_w}\right)^{0.2}$

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 :

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

-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 :

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

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 plasmagène se refroidit par rayonnement vers le milieu ambiant. Le modèle est axisymétrique sur la frontière de gauche et la condition au limite est convective à droite. Pour modéliser la conduction et la convection de chaleur par le fluide entrant en bas avec la vitesse V_{in} et la température T_{in} , l'équation de la chaleur inclut également une limite convective comme suit :

$$\rho \cdot c_p \frac{dT}{dt} + \rho \cdot c_p V \nabla T = \nabla(k \nabla T) + q \quad (5)$$

Où V est le champ de vitesse calculé par le modèle Navier-stokes incompressible. Pour le transport par la conduction et la convection, le vecteur de flux thermique est donné par :

$$q = -KV \nabla T + \nabla c_p T \cdot V \quad (6)$$

La température de surface de la particule est maintenue à $T_w = 300$ K dans tous les calculs, les vitesses V_{in} et températures T_{in} des gaz entrantes varient en même temps que les nombres de Reynolds et de Prandtl. Les conditions aux limites sans dimension sont données comme suit :

Au niveau de la frontière d'entrée, le fluide entre en condition d'écoulement uniforme et le gradient de pression radial est nul.

$$V_x = 0, \quad V_y = V_\infty, \quad V_z = 0, \quad \frac{dp}{dx} = 0$$

A la surface de la sphère il y a une condition de non glissement du fluide et la température de surface est maintenue égale à T_w

$$V_x = V_y = V_z = 0, \quad r = r_x, \quad T = T_w$$

Dans le jet plasma et loin de la particule la température est uniforme à T_∞ . La pression à la sortie est définie constante ($p_s = p_\infty = p_{atm}$). Le traitement thermique des particules dans le plasma dépend non seulement des paramètres de fonctionnement de la torche mais également des propriétés thermodynamiques et de transport telles que la capacité calorifique, la conductivité thermique et la viscosité dynamique des gaz plasmagènes. Ces dernières, sont fortement non linéaires sur l'étendue de la gamme des températures et il est utile de les expliciter en fonction du mélange gazeux utilisé. Les gaz les plus utilisés sont des gaz monoatomiques tels que l'argon, l'hélium mais aussi les gaz diatomiques tels que l'hydrogène, l'azote et leurs mélanges binaires Ar-H₂, Ar-He, H₂-N₂, etc. Les données utilisées dans ce travail sont extraites de la base de données de T&TWinner (13, 14, 15).

3. Résultats et discussion

Pour l'argon qui est considéré comme un gaz plasma monoatomique, la figure 2 montre que toutes les corrélations se comparent bien avec nos résultats sur une large gamme du produit $Re^{0.5} Pr^{0.33}$ à l'exception de celle de Lewis & Gauvin ainsi que celles de Kalganova. Chaque corrélation donne ses propres résultats qui sont différents selon la nature du gaz plasmagène utilisé. Il est utile d'étudier la possibilité d'obtenir une formulation unique, valable quel que soit le gaz plasmagène utilisé. Pour cela, nous allons poser la corrélation de Nusselt sous la forme suivante :

$$Nu = h \frac{d_p}{k} = A + c \cdot Re^m Pr^n \cdot Y^i \quad (7)$$

$$\text{avec : } Re = \frac{\rho_\infty (V_\infty - V_p) d_p}{\mu} \quad Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad Y = \left(\frac{\rho_\infty \mu_\infty}{\rho_w \mu_w} \right)$$

Le terme Y introduit dans l'équation (7) apparaît aussi dans la corrélation de Kalganova qui semble donner de bons résultats. Les coefficients inconnus n , m et i peuvent être obtenus en utilisant une régression linéaire multiple sur l'expression suivante :

$$\text{Log}(Nu - 2) = \text{Log}(c) + m \text{Log}(Re) + n \text{Log}(Pr) + i \text{Log}(Y) \quad (8)$$

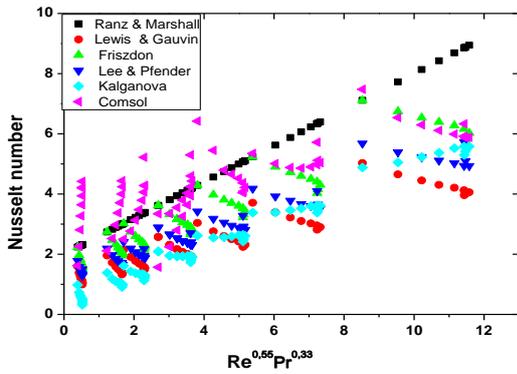


Figure 2- Corrélation du nombre du Nusselt en fonction de Re et Pr pour l'argon

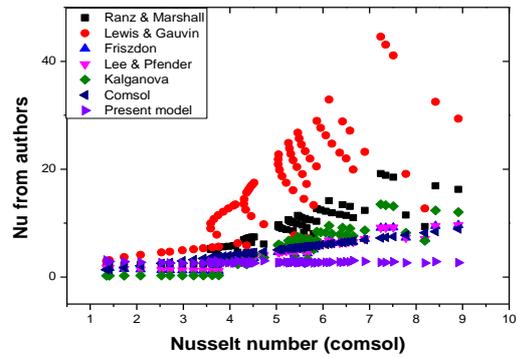


Figure 3- Différentes corrélations du nombre du Nusselt en fonction du nombre du Nusselt (COMSOL) pour l'hélium.

L'équation (7) peut aussi être mise sous la forme suivante $Nu = A + X$ et il est alors possible d'évaluer la variable X, telle que $X = c \cdot Re^m Pr^n \cdot Y^i$. L'inconnue A de l'équation (7) peut aussi être obtenue par une régression linéaire simple des nombres de Nusselt issue de la simulation avec X comme variable indépendante. Les résultats des figures 2 à 4 où apparaissent les données de Nusselt des différentes corrélations y compris celle que nous proposons sont présentées en fonction des valeurs de Nusselt issues de la simulation COMSOL. Les figures 3 et 4 montrent que pour les gaz plasmagènes monoatomiques (Hélium et Argon), les données des corrélations proposées par les différents auteurs y compris celle que nous proposons restent concentrées autour des valeurs de Nusselt (Comsol) sauf celles de Lewis & Gauvin pour des valeurs de Nusselt supérieur à 4. Les résultats obtenus à partir de la formule proposée (7) sont comparés avec ceux issus de la simulation numérique pour tous les gaz utilisés et sont illustrés par la figure 5. Cette dernière résume les données de toutes ces corrélations et pour tous les gaz plasmagènes utilisés. Ainsi elle nous montre que les résultats obtenus à l'aide de la relation que nous proposons restent très proches des données de la simulation. Les données des corrélations des auteurs cités ci-dessus restent relativement dispersées sauf pour Nu (Comsol) ≤ 10 .

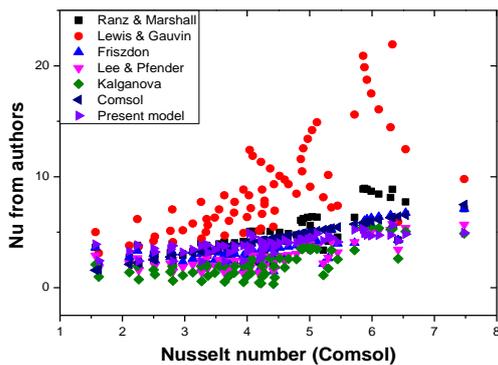


Figure 4 - Corrélation du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Nusselt (COMSOL) pour l'argon.

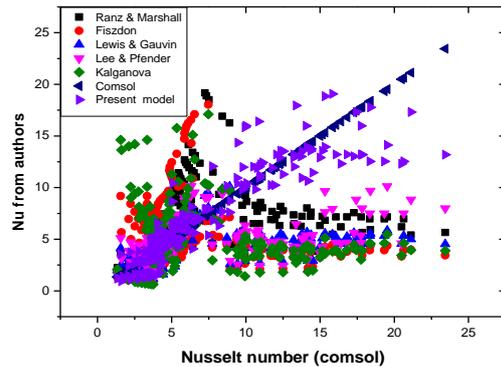


Figure 5 – Corrélation du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Nusselt (COMSOL) pour tous les gaz.

Le tableau 2 contient les valeurs des coefficients obtenues par une régression linéaire simple sur l'équation (7), celui-ci montre bien que chaque gaz a ses propres coefficients de corrélations. En effet, c'est ce qui nous a poussés à faire une régression linéaire qu'on a appelé « Present Model » sur l'ensemble des gaz et le résultat est mentionné dans la dernière ligne de ce même tableau.

Tableau 2 : Valeurs des constantes A, c, m et n proposées à partir du modèle simulé (COMSOL)

Gaz	A	c	m	n	I
argon	4.73	0.36	0.105	-0.254	-2.05
Helium	5.25	0.563	0.138	0.762	0.104
All gas (Present Model)	7.48	0.25	1.32	-1.1	-0.015

Conclusion

Notre étude est basée sur la validité des corrélations proposées par les différents auteurs et comparées à celle de Ranz & Marshall qui caractérise le flux de chaleur entre une sphère et son milieu environnant à haute température pour différents gaz. Il apparaît que l'interaction entre le jet de plasma et les particules sphériques contient plusieurs mécanismes d'autant plus complexes que les propriétés des gaz et plus particulièrement pour les constituants diatomiques. Nous pouvons conclure que ni les corrélations dérivées de Ranz & Marshall ni le modèle actuel ne sont valides pour toute la gamme de compositions gazeuses ainsi que pour toutes les gammes de vitesses et de températures. Néanmoins celle que nous proposons donne des résultats relativement meilleurs que les corrélations des auteurs cités ci-dessus y compris celle de Ranz & Marshall.

Nomenclature

Symbole	Nom, <i>unité</i>	t	temps, <i>s</i>
k	conductivité thermique, $W/m.K$	Symboles grecs	
h	coefficient de chaleur, $W m^{-2} K^{-1}$	ρ_{∞}	masse volumique du plasma, $kg.m^{-3}$
T	température, <i>K</i>	ρ_w	masse volumique du plasma, $kg.m^{-3}$
C_p	chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	μ	viscosité dynamique, $kg.m^{-1}.s^{-1}$
C_D	coefficient de	ν	viscosité cinématique, $m^2.s^{-1}$
d_p	diamètre de la particule, <i>m</i>	Exposant, Indices	
V	vitesse, $m.s^{-1}$	<i>p</i>	particule
V_{∞}	vitesse du plasma, $m.s^{-1}$	∞	plasma
p	pression, <i>Pa</i>	<i>s</i>	sortie
Nu	nombre de Nusselt	<i>w</i>	paroi de la particule
Re	nombre de Reynolds		
Pr	nombre de Prandtl		

Références

- [1] L. Pawlowski, The science and engineering of thermal spray coatings. J.Wiley, N.Y., USA, 1995
- [2] Y. Zhu, H. Liao, C. Coddet, Transient thermal analysis and coating formation simulation of thermal spray process by finite difference method, *J of Surface & Coatings Technology* 200 pp 4665– 4673, 2006.
- [3] Li Mingheng, Panagiotis D. Christofides, Computational study of particle in-flight behavior in the HVOF thermal spray process, *Chemical Engineering Science* 61 6540– 6552, 2006.
- [4] E. Pfender, Particle behaviour in thermal plasma, *Plasma Chem. And Plasma Proc* 9-1, , pp 167-194, 1989
- [5] S. Dyshlovenko, L. Pawlowski, B. Pateyron, I. Smurov, J.H, Modeling of plasma particle interactions and coating growth for plasma spraying of hydroxyapatite, *Surface and Coatings Technology*, 200, pp. 3757-3769, 2006
- [6] J. Cedelle, M. Vardelle, B., Pateyron, P., Fauchais Investigation of plasma sprayed coatings formation by visualization of droplet impact and splashing on a smooth substrate, , *IEEE Transactions on Plasma Science* 33 (2 I) , pp. 414-415, 2005
- [7] J.R. Rojas, M. Cruchaga. M .El Ganaoui, B Pateyron, Numerical simulation of the melting of particle injected in a plasma jet, *Ingeniare. Revista chilena de ingenieria*, vol 17 N3 pp 300-302, 2009.
- [8] W.E. Ranz and W.R. Marshall, Evaporation from drops. *Chem. Eng. Prog* vol 48 141-146, 1952.
- [9] F. Ben Ettouil, , O. Mazhorova, B. Pateyron, H. Ageorges, , M. El Ganaoui, P. Fauchais, , Predicting dynamic and thermal histories of agglomerated particles injected within a d.c. plasma jet, *Surface and Coatings Technology*, 202 (18), pp. 4491-4495, 2008.
- [10] T. Klocker and T.W. Clyne, In flight behavior of dense and hollow particles during plasma spraying: Part I-A numerical model. Submitted to *J. of Thermal Spray Technology*, 2003.
- [11] R. M. Young and E. Pfender, Nusselt Number Correlations for Heat Transfer to Small Spheres in Thermal Plasma Flows, *Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 7*, 1985.
- [12] I. V. Kalganova, and V. S. Klubnikin, "Heat Transfer to a Sphere in an Ionized Gas," *High Temp.* 14, 369, 1976.
- [13] G. Delluc, L. Perrin, H. Ageorges, P. Fauchais, B. Pateyron, Modelling of plasma jet and particle behaviour in spraying conditions , *Proceedings of the International Thermal Spray Conference* , pp. 800-805, 2004.
- [14] B. Pateyron, G. Delluc, N. Calve, T&T Winner, the chemistry of on-line transport properties in interval of 300 K to 20.000 K | [T&T Winner, la chimie et les propriétés de transports en ligne, dans l'intervalle de 300 K à 20000 K], *Mécanique et Industries* 6 (6) pp. 651-654, 2005.
- [15] B. Pateyron and G. Delluc, Logiciel TTWinner, ADEP Banque de données de l'Université de Limoges et du CNRS. (Ed.) <http://www.ttwinner.free>.