

Etude numérique du flux de chaleur par la méthode des éléments finis

Abderrahmane AISSA ^a, Mohamed ABDELOUAHAB ^a, Abdelkader NOUREDDINE ^b, Mohammed ELGANAOU ^d & Bernard PATEYRON ^c, Lotfi Tefiani ^a

^aLaboratoire de Modélisation des Systèmes Industriels, ^b Laboratoire de Mécanique Appliquée- USTO-MB, BP 1505 El M'Naouer, 31000 Oran, Algérie, ^c Science des Procédés Céramiques et de Traitements de Surface- Université de Limoges-(France)
Email : aissa86@gmail.com

Résumé : Simulation numérique de l'interaction entre particules sphériques et de gaz de plasma est effectuée. La motivation de cette étude est d'étudier le transfert thermique entre le gaz de plasma et de particules solides pendant le processus de pulvérisation de plasma et de valider la corrélation empirique de Ranz & type Marshall généralement utilisé pour éviter les calculs lourds de flux. Dans les conditions d'état fondu ou semi-fondu de substrat préparé, le milieu (par jets de plasma) affectés des vitesses élevées de particules. L'analyse computationnelle utilisant la simulation numérique directe par COMSOL Multiphysics de transfert de chaleur dans la pression atmosphérique et la mi-plage de température (6000 K - 12000 K) d'un flux de plasma sur une particule sphérique a été effectuée.

Mot clés : nombre de Nusselt, corrélation Ranz- Marshall, Comsol.

1. INTRODUCTION

La projection thermique est un traitement de surface par voie sèche visant à amender les propriétés du matériau support. La résistance à l'usure et au frottement, propriétés la protection thermiques, la protection contre la corrosion, la biocompatibilité, sont améliorées par ces traitements. En général les systèmes de projection thermique utilisent un gaz vecteur qui transporte et accélère de fines particules (typiquement 5 à 100 micromètres) d'un matériau fondu sur une surface à recouvrir. Les gouttelettes se déposent à la surface et se solidifient. C'est l'accumulation des particules sur le substrat qui crée le revêtement. Les liaisons entre le substrat et la couche déposée sont donc entièrement mécaniques. Le matériau déposer peut être sous forme de poudre, de fil ou de baguette. L'apport d'énergie peut se faire par flamme ou jet plasma d'arc électrique [1, 2, 3, 4, 5].

L'objet de ce travail est relatif aux échanges entre le gaz plasma et la particule. En effet, en projection plasma, des matériaux métalliques ou céramiques (de l'ordre du μm et en général entre 20 μm et 60 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 l'ordre de 100 à 500 m.s^{-1} , 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 fonction de l'histoire thermique et dynamique de la particule dans la flamme. Ce comportement dynamique est décrit par des simulations pour évaluer indépendamment l'écoulement axisymétrique du jet et le comportement de la particule injectée au sein de celui-ci [7, 8, 9, 10, 11]. Les calculs reposent sur des lois de

transfert semi empiriques. Cette étude numérique une meilleure compréhension des phénomènes des transferts et ainsi ou des domaines de validité des corrélations semi empiriques.

L'analyse adimensionnelle du problème tend à montrer que la couche limite thermique de la particule froide immergée dans le gaz plasma chaud est à l'image de la couche limite dynamique. C'est-à-dire que le nombre de Nusselt est caractéristique de la couche limite thermique de la particule de diamètre d_p qui reçoit sur toute sa surface S ($S = 4\pi d_p^2$) à la température T_p , un flux thermique $\Phi = S * h * (T_\infty - T_p)$ du plasma à la température T_∞ est une fonction universelle du nombre de Reynolds $Re = \frac{\rho V d_p}{\mu}$ qui caractérise l'écoulement du plasma de masse volumique ρ et de viscosité dynamique μ , autour de la particule à la vitesse V et du nombre de Prandtl caractéristique du plasma de chaleur spécifique C_p et de conductivité thermique K . Cette relation universelle est en général recherchée sous la forme de l'équation 1.

$$Nu = h \cdot \frac{d_p}{k} = A + c Re^m Pr^n \quad (1)$$

Dans la corrélation de Ranz & Marshall [8] il est postulé qu'à vitesse de fluide nulle le transfert de chaleur s'effectue uniquement par conduction, c'est-à-dire que $A=2$, et les coefficients sont estimés tels que $c = 0.6$, $m = 0.5$ et $n = 0.33$.

Des termes correctifs sont ajoutés pour prendre en compte les effets de gradients de température dans la couche limite et de non continuité spécifiques aux écoulements de plasma où le libre parcours moyen des molécules est voisin du diamètre des particules. La **Error! Reference source not found.** regroupe quelques-unes de ces corrélations du nombre de Nusselt [8, 9, 11, 12,13].

Pour tenir compte de la vitesse et de la convection forcée le nombre de Reynolds est introduit dans un terme additif et de même le nombre de Prandtl 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 inhomogénéité de 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. Notons que Kalganova [12] pondère le nombre de Nusselt du transfert conductif par le rapport des conductivités thermiques. Dans ce travail ces variantes de la corrélation de Ranz et Marshall et leurs domaines de validité sont examinées sur la base d'un modèle numérique en éléments finis obtenus avec Comsol multiphysics.

2. Modèle physique

Les forces qui s'exercent sur les particules dans le jet plasma et qui régissent leurs trajectoires sont principalement : la force de trainé, la force de gravité et la force de la masse ajoutée mais dans ce cas précis, la force de trainé est la plus importante. Elle peut être modifiée par l'évaporation de la particule et les effets de non continuité de la couche limite.

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

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.

Le modèle est axisymétrique sur la frontière de gauche et la condition au limite est convective à droite pour représenter la conduction et la convection de chaleur par le fluide entrant en bas avec la vitesse V_{in} et la température T_{in} .

$$\rho.c_p \frac{dT}{dt} + \rho.c_p.V\nabla T = \nabla.(k\nabla T) + q \quad (3)$$

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 :

$$q = -K\nabla T + \nabla c_p T.V \quad (4)$$

Les conditions aux limites sans dimension sont données comme suit (voir **Error! Reference source not found.**). La température de surface de la particule est maintenue à $T_w = 300$ K dans tous les calculs. V_{in} et T_{in} les vitesses et températures de gaz entrantes varient en sorte de faire varier le nombre de Reynolds et le nombre de Prandtl.

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 de températures et il est utile de les expliciter en fonction du mélange gazeux utilisé. Les gaz les plus utilisés sont des gaz monoatomique argon, hélium et gaz diatomiques hydrogène, 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 le gaz plasmagène Hélium, nous avons tracé les nombres de Nusselt obtenus par la simulation et ceux obtenus à partir des corrélations proposées par les auteurs cités dans la littérature. La corrélation de Ranz & Marshall donne des valeurs très supérieures à la plupart des autres corrélations sauf celle de Lee & Pfender elles sont aussi supérieures aux valeurs obtenues par simulation quelle que soit la valeur de $Re^{0.5} Pr^{0.33}$. Les valeurs obtenues avec le modèle de Fiszdon sont remarquablement très faibles, ce qui explique probablement pourquoi Lee & Pfender lui ont associée un correctif. Les valeurs obtenues avec la corrélation de Chen sont également trop faibles bien qu'elles semblent croître avec $Re^{0.5} Pr^{0.33}$. Les résultats obtenus à partir des corrélations proposées par Lewis & Gauvin et Kalganova sont proches des valeurs obtenues par la simulation. Il en est de même pour celles évaluées à partir de la corrélation de Lee & Pfender pour $Re^{0.5} Pr^{0.33} \geq 60$.

Pour hélium un autre gaz plasma monoatomique, la 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. Comme nous pouvons le remarquer chaque corrélation donne ses résultats propres qui diffèrent selon la nature du gaz.

Établissons celle-ci que nous recherchons sous la forme de l'équation

$$Nu = h d_p / K = A + c Re^m Pr^n Y^i \quad (5)$$

Les coefficients n et m inconnus sont obtenus par régression linéaire multiple sur l'expression

$$\log(Nu - 2) = \log(c) + m.\log(Re) + n.\log(Pr) \quad (6)$$

Il est alors possible d'évaluer la variable X

$$X = c.Re^m Pr^n \quad (7)$$

et l'inconnue A de l'équation **Error! Reference source not found.** est obtenue par régression linéaire simple des nombres de Nusselt de la simulation Comsol avec la variable X pour retrouver l'équation **Error! Reference source not found.**

Ces résultats **Error! Reference source not found.2** où les données de Nusselt des différentes corrélations y compris celle que nous proposons, nommée « modèle proposé », sont présentées en fonction des valeurs de Nusselt issues de la simulation avec COMSOL. Les résultats obtenus à partir de la formule proposée sont comparés avec ceux de la simulation pour tous les gaz utilisés sur figure 3, résume les données de toutes ces corrélations et pour tous les gaz plasmagènes. Nous remarquons que les résultats de la simulation se rapprochent des données de la formule que nous proposons. Les autres données restent relativement dispersées sauf pour Nu

(Comsol) ≤ 10. C'est pourquoi il semble nécessaire d'introduire le terme $Y = \left(\frac{\rho_\infty \mu_\infty}{\rho_w \mu_w}\right)$ dans la corrélation

puisque'il apparaît dans celles de Kalganova qui semble particulièrement efficace. Nous recherchons donc une nouvelle corrélation du type :

$$Nu = A.Re^m Pr^n Y^l \quad (8)$$

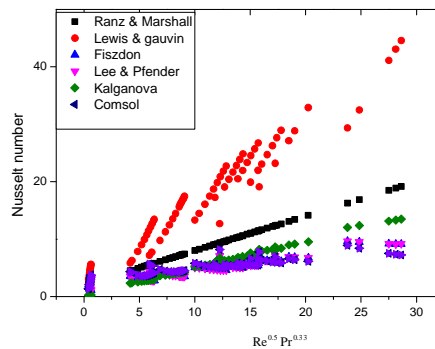


Figure 2. Correlation of Nusselt's number as function of Reynolds number and Prandtl's number for helium

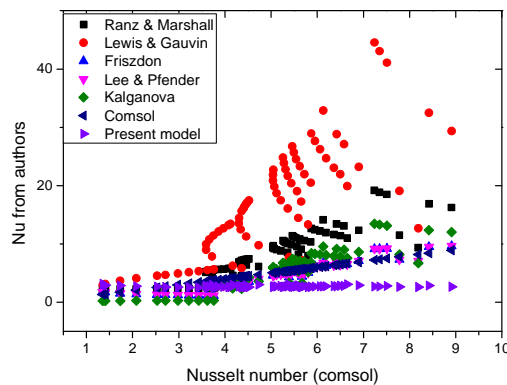


Figure 3. Different Correlation of Nusselt's number as function of Nusselt's number (Comsol) for Helium

4. Conclusion

Dans cet article, nous avons étudiés la validité des corrélations proposées par différents auteurs pour corriger la corrélation Ranz et Marshall qui caractérise le flux de chaleur entre une sphère et son atmosphère environnante à haute température pour différents gaz. Il apparaît que l'interaction du jet de plasma et de particules sphérique implique plusieurs mécanismes d'autant plus complexes que les propriétés des gaz sont non linéaires 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 ni pour toutes les gammes de vitesses et températures.

Reference

-
- 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 (2006) pp 4665– 4673
 - 3Li Mingheng, Panagiotis D. Christofides, Computational study of particle in-flight behavior in the HVOF thermal spray process, *Chemical Engineering Science* 61 (2006) 6540– 6552.
 - 4E. Pfender, Particle behaviour in thermal plasma, *Plasma Chem. And Plasma Proc* 9-1, (1989), pp 167-194.
 - 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 (2006), pp. 3757-3769
 - 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, 2005, *IEEE Transactions on Plasma Science* 33 (2 I) , pp. 414-415
 - 7 J.R. Rojas, M. Cruchaga. M .El Ganaoui, B Pateyron, Numerical simulation of the melting of particule injected in a plasma jet, *Ingeniare. Revistachilena de ingenieria*, vol 17 N3 2009 pp 300-302.
 - 8 W.E. Ranz and W.R. Marshall, Evaporation from drops. *Chem. Eng. Prog* vol 48 (1952), 141-146
 - 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 , 2004, *Proceedings of the International Thermal Spray Conference* , pp. 800-805
 - 14 B. Pateyron, G. Delluc, N.Calve, T&TWinner, 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], 2005, *Mécanique et Industries* 6 (6) pp. 651-654
 - 15B. Pateyron and G. Delluc, Logiciel TTWinner, ADEP Banque de données de l'Université de Limoges et du CNRS. (Ed.)
<http://www.ttwinner.free.fr>