

# Etude du Transfert Thermique Jet Plasma /Particule Sphérique et Ellipsoïdique dans des Conditions de Projection Plasma.

Yacine HAMZA<sup>1</sup>, Yamina MEBDOUA<sup>1</sup> et Mohammed El GANAOU<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centre de Développement des Technologies Avancées Cité 20 Aout 1956 Baba Hassen, B. P 17, 16303, Alger, Algérie

<sup>2</sup> Université de Lorraine, Laboratoire d'Energétique (Antenne LERMAB). IUT Henri Poincaré de Longwy 186 Rue de Lorraine. 54400 Cosnes et Romain

**Résumé-** Ce travail consiste en une étude numérique de transfert thermique entre un jet plasma et une particule de forme sphérique et ellipsoïdique de matériaux composites. Des calculs ont été réalisés dans le cas de particules [1-2] composites de différentes tailles et de matériaux différents: un cœur métallique et une couche enveloppe céramique immergées dans un plasma d'argon pur. Les variations de température à la couche limite de la particule sont tenues en compte via des coefficients correctifs apportés au coefficient de traînée.

## Nomenclature

T	température, K	$d_0$	diamètre de la particule, $\mu\text{m}$
r	rayon de la particule, $\mu\text{m}$	Re	nombre de Reynolds
$k_p$	conductivité thermique de la particule, W/mK	Pr	nombre de Prandtl
$h$	coefficient du transfert thermique, W/m <sup>2</sup> K	$C_D$	coefficient de traînée
$T_\infty$	température du plasma, K	$\rho_g$	densité volumique du plasma, kg/m <sup>3</sup>
$T_s$	température de la surface de la particule, K	$\rho_p$	densité volumique de la particule, kg/m <sup>3</sup>
Nu	nombre de Nusselt	$V_g$	vitesse du plasma, m/s
$C_p$	capacité calorifique de la particule, (Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$V_p$	vitesse de la particule, m/s

## 1. Introduction

La projection thermique est un groupe de procédés de traitement de surfaces permettant de conférer une propriété nouvelle à la surface traitée, les revêtements élaborés par ce type de techniques sont considérés comme des couches épaisses dont l'épaisseur varie, généralement, de quelques dizaines de micromètres au millimètre.

Le principe de dépôt par projection plasma, consiste à introduire le matériau d'apport, finement divisé, dans le jet de plasma dont la température au cœur peut atteindre 18000 K. Les particules sont ainsi fondues et accélérées par le jet pour qu'elles soient propulsées vers la surface à traiter.

Afin d'obtenir une meilleure qualité de dépôt élaboré par ces techniques et avec les propriétés souhaitées, il est indispensable de mieux comprendre les phénomènes physiques qui interviennent lors des différentes étapes d'élaboration des dépôts. Nous nous intéressons donc, à l'interaction entre le jet énergétique et le matériau, cela permet d'accéder aux paramètres clefs contrôlant le procédé pour obtenir une meilleure reproductibilité.

Il s'agit donc, de résoudre les équations suivantes à une ou plusieurs dimensions :

- Equations de transfert de chaleur.
- Equations de mouvement de la particule depuis son injection.

Ces particules ont les caractéristiques suivantes :

- Une granulométrie allant de 5 à 120  $\mu\text{m}$
- une gamme de vitesse d'impact allant de 50 à 500  $\text{m. s}^{-1}$
- un nombre de particules injectées ( $10^7$  à  $10^9 \text{ s}^{-1}$ )
- une température au cœur du jet plasma pouvant atteindre 18 000 K

Dans ces conditions, les effets dynamiques et thermiques sont couplés et les particules peuvent prendre plusieurs trajectoires induisant des pertes de matière.

Le transfert thermique dans une particule ellipsoïdique en interaction avec le jet plasma consiste à tenir compte de l'aspect thermique mais aussi de l'aspect dynamique de la particule.

## 2. Formalisme

Dans le cas d'un régime stationnaire, l'équation qui décrit le transfert thermique par conduction dans la particule est donnée par l'équation [3] suivante :

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 k_p \frac{\partial T}{\partial r}) = 0 \quad (1)$$

Avec les conditions aux limites suivantes :

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (2)$$

$$k_p \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_0} = h(T_\infty - T_s) \quad (3)$$

Dans le cas d'une forme ellipsoïdique de la particule, nous considérons le rayon de la particule comme un rayon moyen d'une sphère déformée  $R_0$ .

Le coefficient de transfert thermique est relié au nombre de Nusselt défini par la relation suivante :

$$N_u = \frac{hd_0}{k_p} \quad (4)$$

Dans la littérature, une corrélation de Ranz-Marshall a été proposée pour calculer le nombre de Nusselt [4], elle est donnée par :

$$N_u = 2 + 0,6Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

Cette corrélation est valide pour  $Re < 200$  et  $0,5 < Pr < 1$ .

La trajectoire d'une particule est déduite de la résolution de l'équation du mouvement suivante [5-6] :

$$F_p = \frac{3}{4} C_D (\rho_g / \rho_p d_p) |V_g - V_p| (V_g - V_p) + F_x \quad (6)$$

$C_D = f(Re)$  ou différentes corrélations sont proposées dans la littérature.

$F_x$  : représente les forces qui peuvent agir sur la particule et qui sont liées aux différents phénomènes :

- La force gravitationnelle.
- La masse ajoutée liée au gradient de pression.
- La force de Basset (terme historique).
- Les forces externes (Electrique, Magnétique,...).

La méthode de résolution proposée est la méthode de Runge-Kutta<sup>1</sup>.

La force de traînée est la force la plus importante en ordre de grandeur, suivie par d'autres termes correctifs apportés au coefficient de traînée et ce, pour tenir compte des gradients thermiques existants dans la couche limite, de l'effet de raréfaction pour des particules dont le diamètre est inférieur à  $10 \mu m$  et de l'effet de l'évaporation.

La trajectoire peut être définie sans ambiguïté dans le cas de particules de granulométrie supérieure à  $15 \mu m$ . Les particules de granulométrie plus fine peuvent subir l'effet des fluctuations de l'arc électrique ainsi que les turbulences ayant lieu dans le jet de Plasma [7].

---

<sup>1</sup> Plusieurs techniques de calculs de Range-Kutta ont été élaborées et implémentées dans notre code de calcul.

Lorsque  $Re \ll 1$  (Régime de Stokes) le mode de transfert de la chaleur est purement conductif, ce qui correspond à un nombre de Nusselt qui tend vers 2 [8].

### 3. Résultats et Discussion

Les résultats présentés dans ce travail, sont obtenus à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics [9]. Ces simulations représentent la variation de la température d'une particule immergée dans le jet énergétique. Nous avons tenu compte de l'effet de la taille de la particule ainsi que le type du matériau utilisé: alumine et alumine/acier (composite), et l'argon comme gaz plasmagène. Les propriétés thermiques des matériaux utilisés sont présentées dans le tableau 1 :

	$T_{fusion}$	$T_{ebullition}$	$k_p$	$C_p$	$\rho_p$
	K	K	W/mK	$Jkg^{-1}K^{-1}$	$Kg.m^{-3}$
Alumine	2323	3800	6.3	1500	4000
Acier	1810	3135	40	1000	7960

Tableau 1 : Propriétés thermo physiques de l'alumine et de l'acier [9]

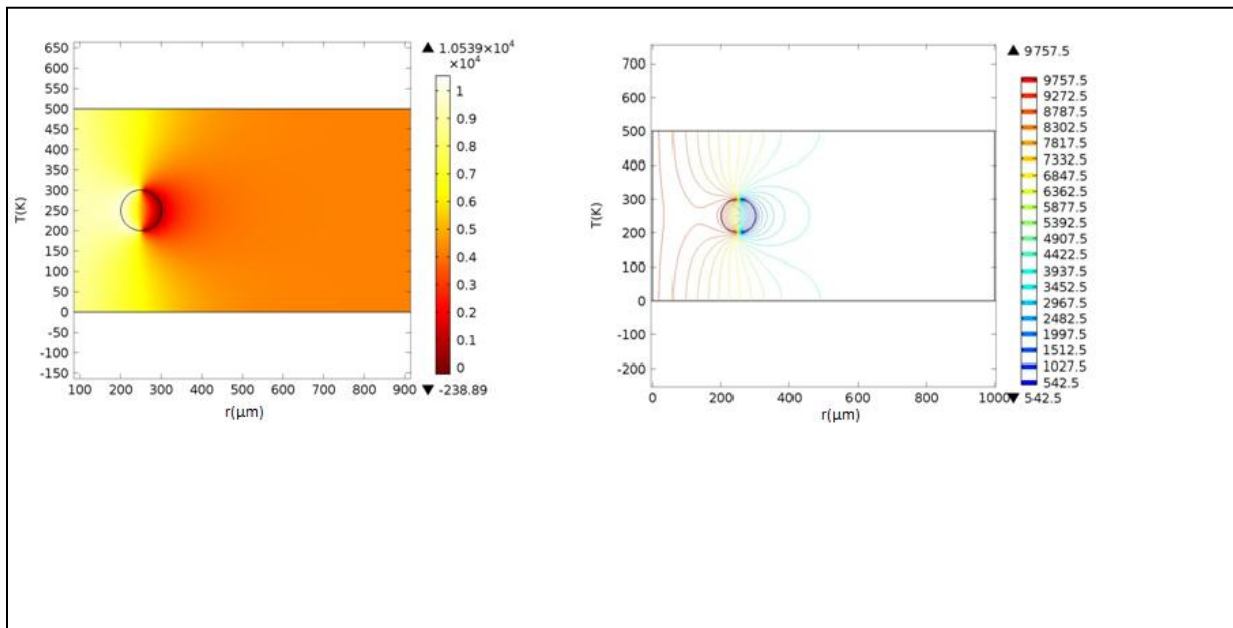


Figure 1 : Simulation d'un transfert de chaleur entre un plasma d'argon pur (Ar 100%) à température 10000K et une particule sphérique d'alumine ( $Al_2O_3$ ) à 300 K et les lignes isothermes

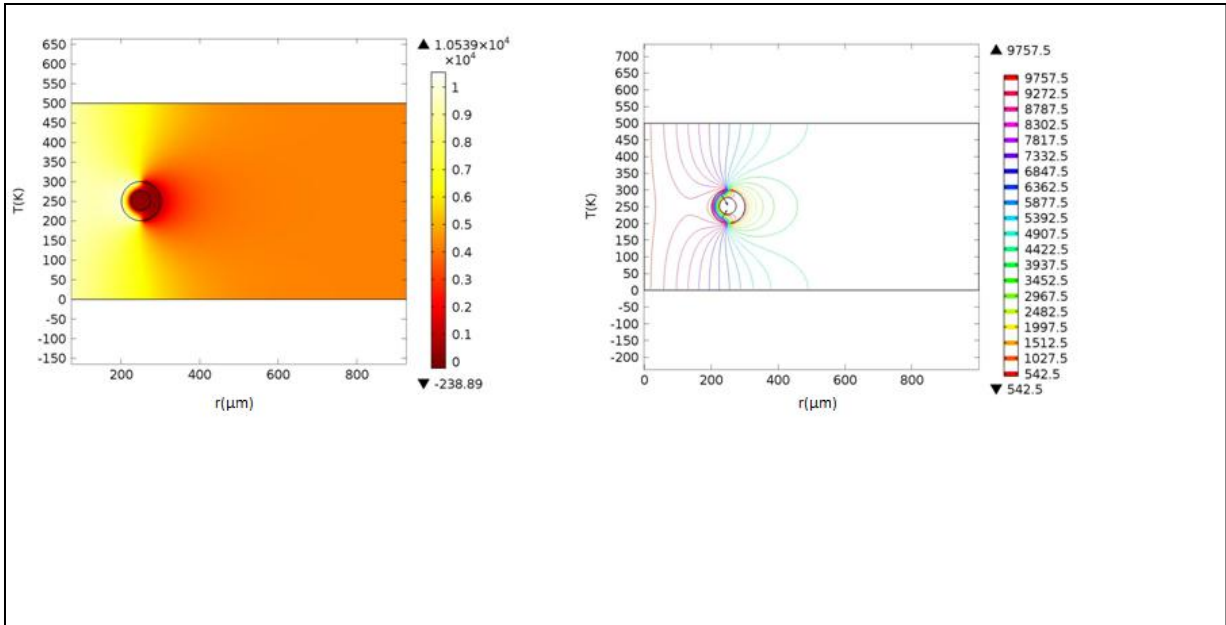


Figure 2 : Simulation d'un transfert de chaleur entre un plasma d'argon pur (Ar 100%) à température 10000K et une particule sphérique ( $Al_2O_3$ /Acier) à 300 K et les lignes isothermes

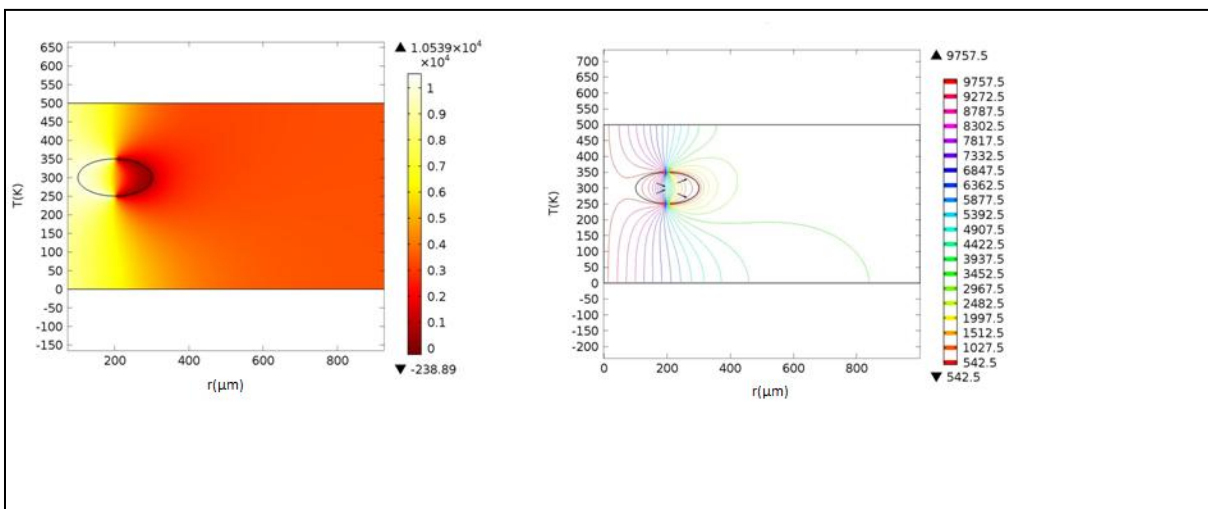


Figure 3 : Simulation d'un transfert de chaleur entre un plasma d'argon pur (Ar 100%) à température 10000K et une particule ellipsoïde d'alumine ( $Al_2O_3$ ) à 300 K et les lignes isothermes

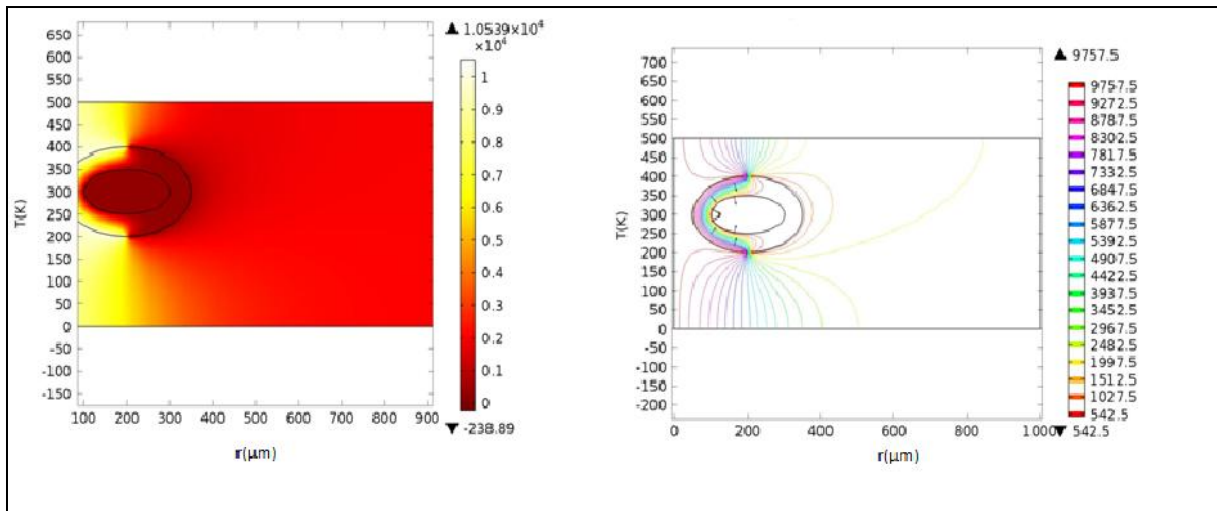


Figure 4 : Simulation d'un transfert de chaleur entre un plasma d'argon pur (Ar 100%) à température 10000K et une particule ellipsoïde ( $Al_2O_3$ /Acier) à 300 K et les lignes isothermes

La figure 1 présente le transfert de la chaleur d'une particule sphérique d'alumine immergée dans un plasma d'argon pur, dans ce cas, le flux de chaleur se dirige de façon radiale vers le centre, les lignes isothermes sont uniformes, contrairement au cas de la figure 2 (particule bicouche) où la chaleur est plutôt concentrée sur la couche d'alumine (sur la croûte de la particule) ceci s'explique par la faible valeur de la conductivité thermique de l'alumine qui est de l'ordre de 6.3 W/mK comparée à celle de l'acier qui est de l'ordre 40 W/mK. L'alumine constitue donc, une barrière thermique à l'acier. Quant à l'effet de la forme de la particule, le transfert se fait de façon uniforme dans le cas d'une particule sphérique mais il se dirige vers le point focal de l'ellipsoïde comme le montre les figures 3 et 4. Les lignes isothermes suivent la forme de particule. Elles sont moins uniformes dans le cas ellipsoïdique. La forme de la particule ainsi que la nature du matériau constituant la particule ont leur effet sur la distribution de la température dans les particules et donc sur la qualité de transfert de chaleur du jet vers le matériau.

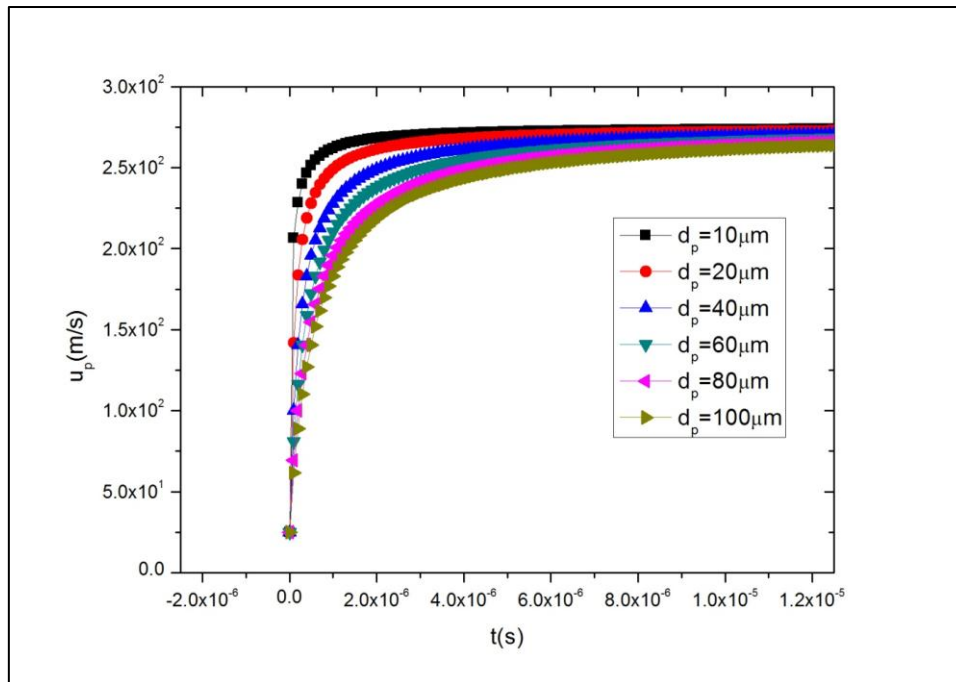


Figure 5 : Variation de la vitesse d'une particule d'alumine en fonction du temps pour différentes valeurs de diamètre  $d_p$

L'évolution de la vitesse des particules introduites dans le jet de plasma en fonction du temps est présentée sur la figure 5 et ce, pour différentes tailles de particules. La particule acquiert une énergie cinétique importante du jet où elle est accélérée jusqu'à une vitesse maximale et constante. Les particules au départ, sont dispersées dans le jet, celles ayant des trajectoires optimales se réarrangent dans le jet qui devient après une certaine longueur, un jet de particules à vitesse uniforme.

#### 4. Conclusion

Dans le présent travail, nous nous sommes intéressés à l'étude du transfert de la chaleur entre un plasma thermique et une particule de forme ellipsoïdique bicouches (alumine/acier) immergée dans un jet de plasma d'argon pur ainsi que la trajectoire de la particule le long de son parcours de projection.

L'équation de transfert de la chaleur dans une particule est résolue dans le cas stationnaire en utilisant le logiciel COMSOL MultiPhysics, Nous avons simulé le transfert de la chaleur pour deux types de matériaux pur et composite : alumine (monocouche) et alumine/acier (bicouches) et pour des formes sphérique et ellipsoïdique. Les trajectoires des particules sont calculées pour différentes tailles.

Le transfert de chaleur dépend de la géométrie de la particule ainsi que de la nature du matériau constituant.

Notons enfin que la validation des résultats théoriques s'avère très importante. En attendant, les présents résultats pourraient servir de guide aux expérimentateurs pour améliorer les techniques de projection.

## Références

- [1] M. Bouneder, Modélisation des transferts de chaleur et de masse dans les poudres composites métal/céramique en projection thermique : Application à la projection par plasma d'arc soufflé argon hydrogène, *PhD Thesis*, Limoges University (2006).
- [2] M. Bouneder, M. El Ganaoui, B. Pateyron and P. Fauchais, Relevance of a thermal contact resistance depending on the solid/liquid phase change transition for sprayed composite metal/ceramic powder by direct current plasma jets, *C. R. Mecanique.*, 336-7 (2008), 592-599.
- [3] H. S. Carslaw, *Conduction of Heat in Solids*, Sec Edi. (1959), p. 517. ISBN: 0-19-853368-3.
- [4] W. E. Ranz and W.R. Marshall, Evaporation from drops, *J. Chem. Eng. Prog.*, 48-3 (1952), 141-146.
- [5] A. Lewis and W. H. Gauvin, Motion of Particles Entrained in a Plasma Jet, *AIChE. J.*, 19-5(1973), 982–990.
- [6] A. Vardelle, P. Fauchais, B. Dussoubs, and N. J. Themelis, Heat Generation and Particle Injection in a Thermal Plasma Torch, *Plas .Chem. Plas. Proc.*, 18-4 (1998), 551–574.
- [7] Y.C. Lee, Trajectories and heating of particles injected into thermal plasma, *PhD Thesis*, University of Minnesota, USA (1984).
- [8] E. Bourdin, P. Fauchais and M. Boulos, Transient heat conduction under plasma conditions, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 26 (1983), 567-582.
- [9] R. W. Pryor, Multiphysics Modeling using COMSOL, *JONES and BARTLETT PUBLISHERS*, (2011), p. 871, ISBN: 0-7637-7999-7.