

Etude en projection plasma des paramètres d'injection de poudres

Fadhel Ben Ettouil*, Bernard Pateyron, Nicolas Calvé, Mohammed El Ganaoui, Pierre Fauchais

SPCTS UMR 66 38 CNRS Université de Limoges. FST 123 Avenue Albert Thomas, 87060 Limoges.

* auteur correspondant : fadhel.ben@etu.unilim.fr

Résumé –En projection plasma, la dispersion, en tailles et en vitesses, des particules à la sortie de l'injecteur, détermine leurs trajectoires dans le jet plasma et leurs histoires dynamiques et thermiques (vitesses, état de fusion, taux de vaporisation ...). Lesquels sont les paramètres déterminants de la qualité de l'impact et du dépôt. Dans ce qui suit, est décrit un modèle, qui caractérise cette dispersion et qui tient compte de la distribution granulométrique de la poudre, des collisions inter-particulaires et des collisions avec les parois. Il permet d'obtenir la distribution en vitesses et en tailles des particules en sortie de l'injecteur.

Nomenclature :

A : constante (-)

C : constante (-)

C_D : coefficient de traînée (-)

d_p : diamètre de particule (m)

f : coefficient de frottement

k : constante de Karman (-)

k_4 : constante (-)

m_p : masse de la particule (kg)

r : rayon (m)

R : rayon de l'injecteur (m)

Re : nombre de Reynolds (-)

u : vitesse (m/s)

u_* : vitesse de frottement (m/s)

u^+ : vitesse adimensionnelle

U : nombre de similitude de l'effet des parois (-)

y = R-r distance aux parois (m)

Y : nombre de similitude combinant les variables intérieure et extérieure ;

y^+ : variable intérieure $y^+ = y.u^* / \nu$ (-)

Grec

δ : angle de dispersion (rad)

Φ : angle de dispersion azimutal (rad)

ρ : masse volumique (kg/m³)

μ : viscosité dynamique (Pa.s)

μ_{eff} : viscosité de la suspension (Pa.s)

ϵ_s : fraction volumique du solide (-)

ν : viscosité cinématique (m²/s)

τ_w : contrainte pariétale (N/m²)

ξ : variable extérieure $\xi = y / R$ (-)

Indice :

g : gaz

p : particule

1. Introduction

A la sortie de l'injecteur une particule peut être caractérisée par quatre paramètres :

- l'amplitude du vecteur vitesse,
- l'angle δ du vecteur vitesse et de l'axe de l'injecteur qui définit un cône de demi angle au sommet voisin de 20°,
- l'angle Φ du plan défini par le vecteur vitesse et l'axe de l'injecteur dans l'intervalle de 0° à 360°, (voir figure 1)
- la masse.

Pour montrer l'importance de ces dispersions angulaires, la figure 2 montre l'évolution de la température à la surface et au centre de deux particules de zircon de même diamètre 25 μ m, injectée avec la même vitesse de 40 m/s mais pour deux angles δ différents (respectivement $\delta_1=0^\circ$ et $\delta_2=10^\circ$). La modification d'un seul paramètre de tir implique une trajectoire différente et donc des histoires dynamiques et thermiques différentes. Le même constat est vrai pour les autres paramètres des particules et des conditions de tir (diamètre, vitesse, angle Φ), d'où l'importance de connaître et caractériser la dispersion des particules de

poudre en taille et en vitesse (module et direction) afin de pouvoir contrôler et prévoir la qualité du dépôt réalisé par projection plasma.

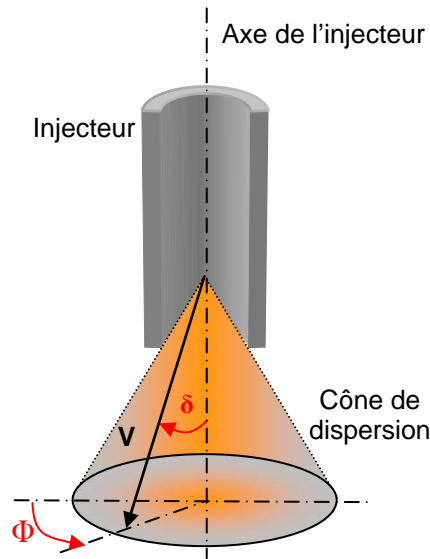


Figure 1 : Paramètres caractéristiques de la dispersion de la poudre à la sortie de l'injecteur.

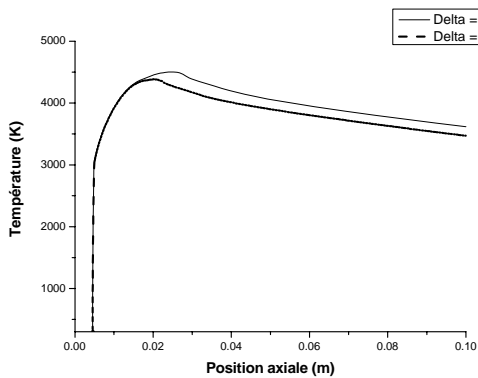


Figure 2.a : Température à la surface

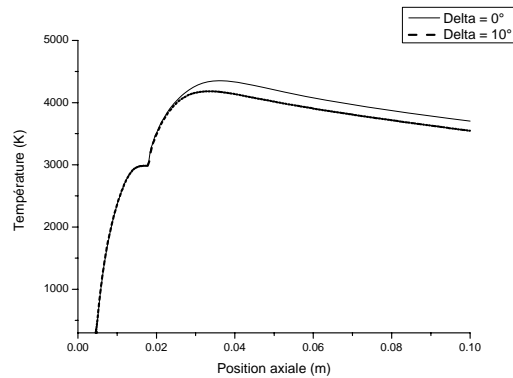


Figure 2.b : Température au centre

Figure 2 : Evolution de la température de deux particules de zircone injectées avec deux angles δ différents

Dans ce qui suit, la méthode de simulation de l'écoulement biphasique particules/gaz dans l'injecteur au cours du processus de projection plasma est présentée afin d'étudier la dispersion résultante à la sortie de l'injecteur. Le modèle développé génère une distribution granulométrique choisie, et simule son écoulement tout en tenant compte du débit de poudre et de gaz fixés.

La stratégie adoptée dans la simulation est la chaîne des opérations suivantes :

- calcul du profil radial de vitesse du gaz porteur,
- simulation d'une distribution granulométrique,
- génération de la distribution aléatoire et uniforme des particules sur la section d'entrée du domaine de calcul,
- génération de la distribution des vitesses initiales des particules à l'entrée du domaine de calcul,
- calcul de la trajectoire des particules,
- détection des collisions particule-particule et particule-parois,

- enregistrement des paramètres dynamiques des particules (vitesses, positions, ...) à la sortie du domaine de calcul

2. Modélisation

2.1 Calcul du profil radial de vitesse du gaz porteur

La connaissance de la viscosité effective de la suspension gaz-particule, en fonction de fraction volumique des particules solides, est nécessaire pour le calcul du profil de vitesse du gaz porteur. Dans le modèle présenté, la formule d'Einstein [1] est utilisée:

$$\mu_{eff} = \mu_g \cdot (1 + 2,5\varepsilon_s) \quad (1)$$

Le régime de l'écoulement est déterminé par le nombre de Reynolds :

$$Re_g = \frac{\rho_g u_g D}{\mu_{eff}} \quad (2)$$

Pour un écoulement turbulent ($Re > 2100$), l'auto-similarité de l'écoulement turbulent en conduite à paroi lisse [2] est postulée. Cette loi est fondée sur la loi log-trainée modifiée pour écoulement turbulent en conduite à paroi lisse [3], elle donne le profil de vitesse radiale des parois jusqu'à l'axe du tube. Le coefficient de frottement est donné par :

$$f = \frac{0.3164}{Re_g^{1/4}} \left(1 + \frac{Re}{4.31 \cdot 10^5} \right)^{1/8} \quad (3)$$

Le facteur de friction τ_w est défini par :

$$\tau_w = \frac{f}{8} \rho_g u_g^2 \quad (4)$$

La vitesse de cisaillement, dans ces conditions, s'écrit comme suit :

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_g}} \quad (5)$$

Soit u^+ une vitesse adimensionnelle définie par :

$$u^+ = \frac{u(r)}{u_*} \quad (6)$$

Le modèle considéré est construit sur deux nombres composés (U, Y) de la similitude, où Y est une combinaison de la variable intérieure y^+ et de la variable extérieure ξ , et U exprime l'effet pur des parois.

$$Y = y^+ \exp\left(-\frac{\xi^4}{4}\right) \quad (7)$$

$$U = A \cdot \arctg\left(\frac{Y}{A}\right) + \frac{A}{3} \cdot \arctg^3\left(\frac{Y}{A}\right) + k_4 \cdot \arctg^4\left(\frac{Y}{A}\right) + \ln\left[1 + \left(\frac{Y}{C}\right)^{\frac{1}{k}}\right] \quad (8)$$

Avec $A=7$, $C=107$, $k=0.43$ et $k_4=-0.52$

La vitesse adimensionnelle u^+ , mesurée par la vitesse de cisaillement u_* , s'écrit :

$$u^+ = U + 2 \cdot \sin^2\left(-\frac{\xi^4}{4}\right) \quad (9)$$

Ainsi, la vitesse moyenne à la distance y des parois est donnée par :

$$v(r) = u_* \left(U + 2 \cdot \sin^2\left(-\frac{\xi^4}{4}\right) \right) \quad (10)$$

2.1 Déplacement des particules

Dans le calcul de l'évolution des vitesses et des positions des particules, On suppose que :

- les particules sont sphériques;
- elles peuvent entrer en collisions entre elles et avec les parois de l'injecteur;
- elles sont soumises essentiellement à la force de traînée.

Dans ces conditions :

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = -C_D \cdot \pi \cdot \frac{d_p^2}{4} \rho_g \frac{|u_p - u_g| (u_p - u_g)}{2} \quad (11)$$

L'intégration de l'équation précédente permet de déterminer la vitesse de la particule et sa trajectoire. Le coefficient de traînée C_D , qui mesure l'efficacité du transfert de la quantité de mouvement à une surface dans la direction de l'écoulement, est défini comme étant le rapport de la force de traînée s'exerçant sur la particule par unité de surface, sur l'énergie cinétique de l'écoulement. Il est déterminé en fonction du nombre de Reynolds Re_p .

$C_D = C_{D0} = \frac{24}{Re}$	pour	$Re \leq 0,2$
$C_D = C_{D0} \left(1 + \frac{3Re}{16}\right)$	pour	$0,2 \leq Re \leq 2$
$C_D = C_{D0} (1 + 0,11 Re^{0,810})$	pour	$2 \leq Re \leq 20$
$C_D = C_{D0} (1 + 0,189 Re^{0,632})$	pour	$20 \leq Re \leq 200$

2.2 Traitement des Collisions.

2.2.1 Collision particule-paroi.

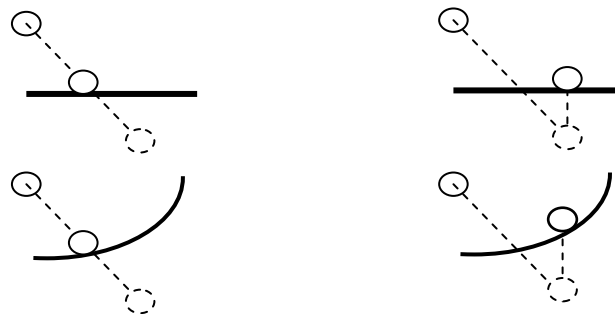


Figure 3 : Traitement des collisions particule paroi
 .a : Selon Milenkovic .b : Selon Faure et Galizzi

Le traitement des collisions particule-paroi est inspiré des méthodes de synchronisation des collisions dans les animations physiques. Deux méthodes sont possibles :

- Selon Milencovic, chaque objet s'arrête à sa première collision [5], la synchronisation des collisions et leurs traitements se fait à la fin de chaque pas de temps
- selon Faure et Galizzi, la rectification des positions et des vitesses est ultérieure à la collision [6].

2.2.2 Collision particule-particule.

Les collisions sont supposées élastiques et traitées selon le modèle des sphères rigides [6]. Les vitesses après collision sont déduites de celles avant collision et des masses des deux particules, par application des lois de conservation de quantité de mouvement et d'énergie cinétique.

3. Résultats

Dans ce qui suit sont présentés, les résultats de simulations du transport d'une population de 10000 particules de zircone 22-45, de diamètre moyen de 34µm distribuée selon la loi de Gauss (voir figure 4), transportée par un débit de 4l/min d'argon, dans un injecteur de diamètre 1.5 mm et long de 20 cm. Les propriétés de la zircone et l'argon sont résumées dans le tableau 1

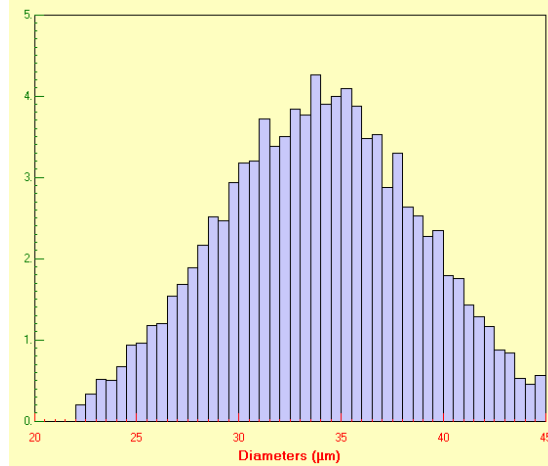


Figure 4 : Distribution granulométrique étudiée

	ρ	Débit	Viscosité
Gaz porteur : Argon	1,67 kg/m ³	4 l/min	2,09 E-5 Pa.s
Poudre : Zircon	5800 kg/m ³	1 kg/h	-

Tableau 1 : conditions opératoires

La figure 5 compare les dispersions initiale et finale des angles δ pour un premier calcul où les collisions particule-particule ne sont pas considérées. La dispersion initiale étant, arbitrairement choisie, aléatoire uniforme dans l'intervalle δ [-45°, 45°]. L'angle δ diminue et la dispersion se resserre. En effet $\delta = \arctg\left(\frac{u_{pr}}{u_{px}}\right)$ u_{px} composante axiale de la vitesse est entretenue par la poussée du gaz porteur, u_{pr} la composante radiale s'atténue par effet de traînée et par les collisions avec les parois.

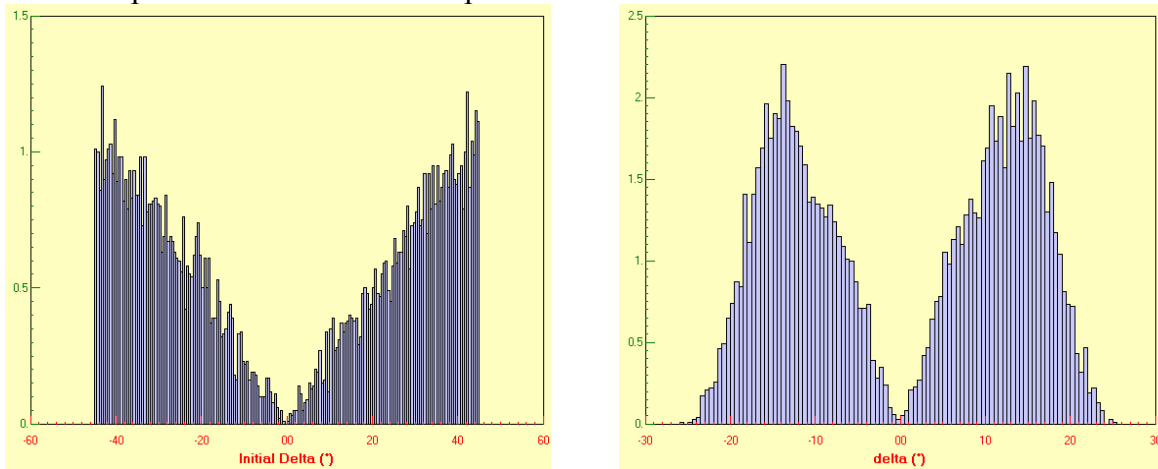


Figure 5 : Distribution de l'angle δ

a : Distribution initiale

b : Distribution finale

La figure 6 illustre la distribution statistique du module des vitesses des particules. La distribution a une allure de gaussienne centrée autour de 30 m/s. Plus la distance parcourue est grande, plus cette valeur de vitesse moyenne tend vers la vitesse moyenne du gaz (37 m/s). La figure 6 montre la distribution l'angle δ avec prise en compte des collisions particule-particule. Par rapport à la simulation faite sans prise en compte des collisions particule-particule, les trajectoires sont plus diaphragmées et la distribution prend une allure bimodale avec deux pics symétriques comme attendu vu la symétrie du système étudié. Il apparaît que les collisions particule-particule favorisent le centrage de la distribution plus que sa dispersion.

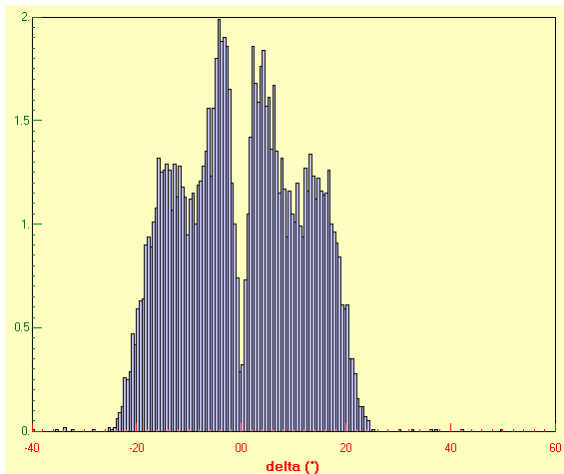


Figure 5 : Distribution de l'angle δ avec prise en compte des collisions particule-particule

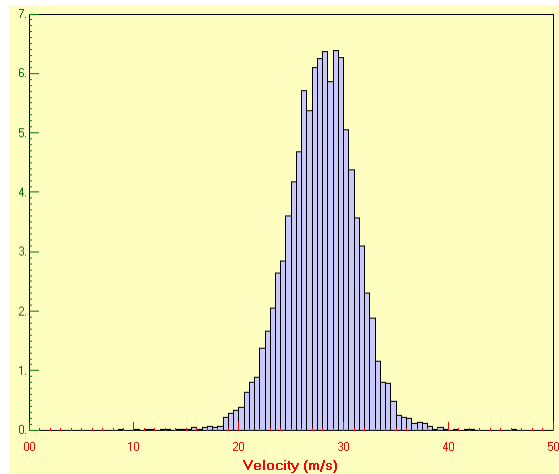


Figure 6 : Dispersion du module du vecteur vitesse des particules.

4. Conclusion

Le document présenté expose les premiers résultats d'un modèle simulant la dispersion des particules de poudres à la sortie de l'injecteur d'une torche plasma. Le modèle développé prend en compte la distribution granulométrique de la poudre, les collisions paroi-particule et particule-particule. Ce modèle sera exploité pour étudier l'effet des conditions de tir des particules en projection plasma (débit de poudre, du gaz porteur, géométrie de l'injecteur ...) et la dispersion évaluée sera introduite dans un modèle de projection plasma qui représente le traitement dynamique et thermique de la poudre ainsi que la construction du dépôt.

Remerciements : École Doctorale STS de l'Université de Limoges

Références :

- [1] T. Kiyoshi, F. Hisamoto, *Extension of Einstein's viscosity equation to that for concentrated dispersions of solutes and particles*, Journal of Bioscience and Bioengineering, 102 (2006) 524-528.
- [2] Guo. J. (2006). *Self-similarity of mean flow in pipe turbulence*, AIAA-2006-2885, 36th AIAA Fluid Dynamics Conference, San Francisco, CA.
- [3] Guo, J. and Julien, P. Y. *Modified Log-Wake Law for Turbulent Flow in Smooth Pipes, Reply to Discussion*. J. of Hydraulic Research, IAHR, 43(4), (2005) 431-434.
- [4] V. J. Milenkovic, H. Schmidl, *Optimization based animation*, Computer Graphics Proceedings, Annual conference series: (2001) 37-46
- [5] O. Galizzi, F. Faure, *Animation efficace de solides en contact par modèle physique*. Journée Francophones d'informatique graphique. AFIG (2002), 167-178.
- [6] <http://www.plasmaphysics.org.uk/feedback.htm>.