



**HAL**  
open science

## Influence des paramètres d'injection de poudres sur le traitement thermique des particules

Fadhel Ben Ettouil, Bernard Pateyron, Pierre Fauchais

► **To cite this version:**

Fadhel Ben Ettouil, Bernard Pateyron, Pierre Fauchais. Influence des paramètres d'injection de poudres sur le traitement thermique des particules. JITH 2007, Aug 2007, Albi, France. 5p. hal-00158066

**HAL Id: hal-00158066**

**<https://hal.science/hal-00158066>**

Submitted on 29 Aug 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# INFLUENCE DES PARAMETRES D'INJECTION DE POUDRES SUR LE TRAITEMENT THERMIQUE DES PARTICULES

Fadhel BEN ETTUAIL, Bernard PATEYRON, Pierre FAUCHAIS  
SPCTS UMR 6638 CNRS, FST 123 Av Albert Thomas, 87060 Limoges.  
[Fadhel.ben@etu.unilm.fr](mailto:Fadhel.ben@etu.unilm.fr)

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

**Mots clés :** Projection plasma, dispersion, écoulement gaz-solide

## 1. INTRODUCTION

Une particule peut être caractérisée, à la sortie de l'injecteur, par quatre paramètres :

- l'amplitude du vecteur vitesse,
- l'angle  $\delta$  du vecteur vitesse et de l'axe de l'injecteur qui définit un cône d'environ  $20^\circ$ ,
- l'angle  $\Phi$  du plan défini par le vecteur vitesse et l'axe de l'injecteur dans l'intervalle de  $0^\circ$  à  $360^\circ$ , (voir figure 1)
- la masse.

La figure 2 montre l'évolution de la température à la surface et au centre de deux particules de zircone de même rayon,  $25\mu\text{m}$ , injectée avec la même vitesse de 40 m/s mais avec deux angles  $\delta$  différents (respectivement  $\delta_1=0^\circ$  et  $\delta_2=10^\circ$ ). On note que 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 particule et conditions de tir (diamètre, vitesse, angle  $\Phi$ ), 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.

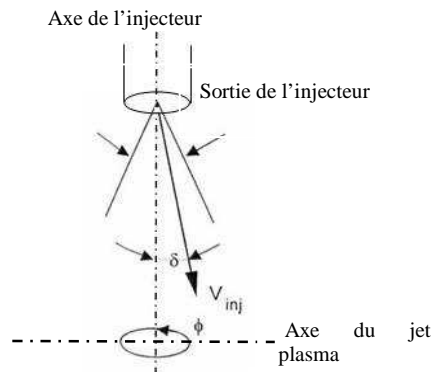


Figure 1 : paramètres angulaires caractéristiques de la dispersion de la poudre à la sortie de l'injecteur

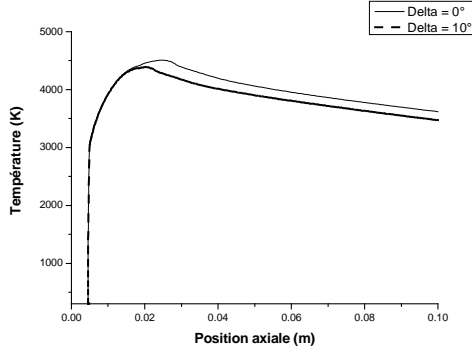


Figure 2.a : Température à la surface

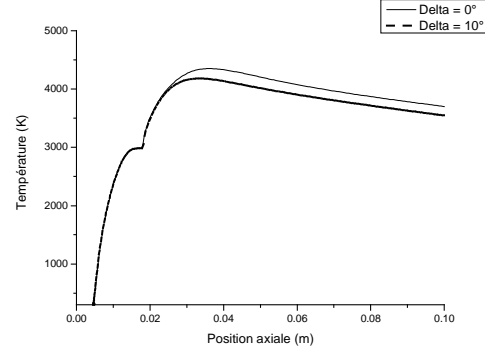


Figure 2.b : Température au centre

Figure 2 : Evolution de la température de deux particules de zircone injectées avec deux différents angles  $\delta$

## 2. MODELISATION

### 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 :

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

Pour un écoulement turbulent ( $Re > 2100$ ), l'auto-similarité de l'écoulement turbulent en conduite à paroi lisse [2] est postulé. 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  $\tau_w$ , il est défini par :

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

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  $\xi$ , 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 :

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

## 2.2 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 :

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

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  $Re_p$ .

## 2.3 Traitement des Collisions.

### 2.3.1 Collision particule-paroi.

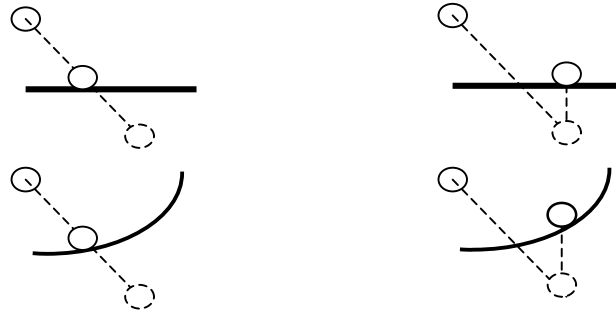


Figure 3.a : Selon Milenkovic

Figure 3.b : Selon Faure et Galizzi

Figure 3 : Traitement des collisions particule-paroi

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 vitesses est ultérieure [6]

Dans le présent modèle, c'est la première méthode qui a été utilisée.

### 2.3.2 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 collisions et des masses des deux particules, par application des lois de conservation de quantité de mouvement et d'énergie cinétique.

### 3. RESULTAS

Dans ce paragraphe, on présente deux simulations faites avec une poudre de zircone 45-22 (10000 particules) véhiculé par un débit de 4l/min d'argon comme gaz porteur avec, dans un injecteur de diamètre 1,5 mm et de longueur 7 cm. Les collisions particules-particules sont prisent en comptes seulement dans la deuxième simulation.

La figure 4 compare les distributions initiale et finale des angles  $\delta$  pour une simulation où les collisions particule-particule ne sont pas considérées. La dispersion initiale étant, arbitrairement choisie, aléatoire uniforme dans l'intervalle  $\delta$   $[-15^\circ, 15^\circ]$ . On remarque l'angle  $\delta$  diminue et que la dispersion se resserre. Ceci s'explique par l'augmentation de la composante axiale de la vitesse due à la poussé par le gaz porteur, et à la diminution de la composante radiale d'autre part, engendré par les collisions avec les parois.

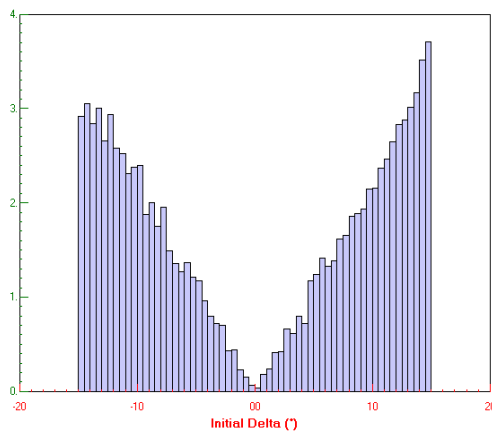


Figure 4.a : Distribution initiale

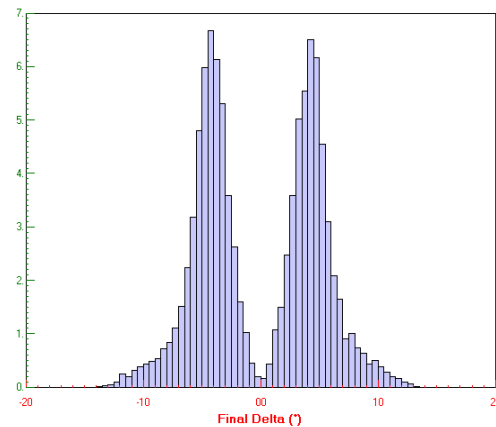


Figure 4.b : Distribution finale

Figure 4 : Distribution de l'angle  $\delta$

La figure 5 illustre la distribution de la vitesse en fonction des diamètres des particules. Dans le premier cas (sans collisions inter-particulaires, figure 5.a) les particules arrivent à la sortie de l'injecteur avec une vitesse inférieure à la vitesse moyenne du gaz (37 m/s), on note aussi que la vitesse moyenne des particules est la même ( $\approx 28$  m/s) pour toutes les classes de taille de particules. Les mêmes constatations sont valables dans le deuxièmes cas (avec collisions inetr-particulaire, figure 5.b) mais la dispersion est plus étendue, notamment pour les particules fines, ceci est du aux collisions inter-particulaires qui, par échange de quantité de mouvement, accélèrent certaines particules au détriment d'autres qui sont freiné.

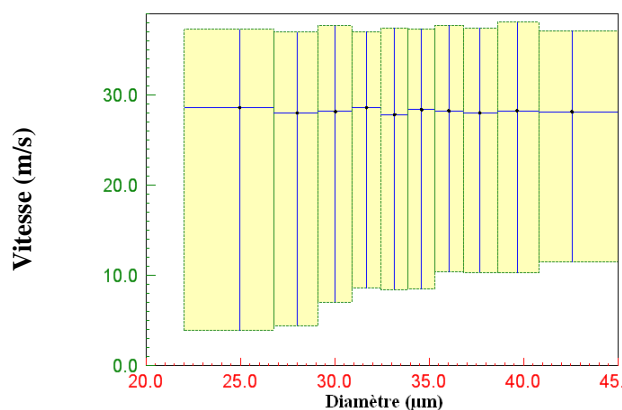


Figure 5.a : sans collisions inter-particulaire

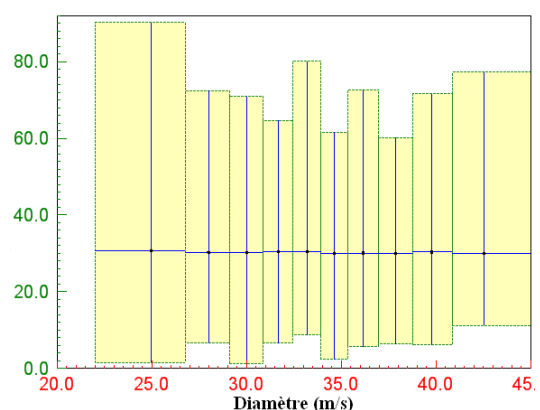


Figure 5.b : avec collisions inter-particulaire

Figure 5 : Distribution de la vitesse axiale en fonction de taille des particules

## 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 simule le traitement dynamique et thermique de la poudre ainsi que la construction du dépôt.

## Nomenclature

A : constante (-)	y = R-r distance aux parois (m)
C : constante (-)	Y : nombre de similarité combinant les variables intérieure et extérieure ;
CD : coefficient de traînée (-)	$y^+$ : variable intérieure $y^+ = y u^* / \nu$
dp : diamètre de particule (m)	Grec
f : coefficient de frottement (-)	$\delta$ : angle de dispersion ( $^\circ$ )
k : constante de Karman (-)	$\Phi$ : angle de dispersion ( $^\circ$ )
$k_4$ : constante (-)	$\rho$ : masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
m <sub>p</sub> : masse de la particule (kg)	$\mu$ : viscosité dynamique (kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )
r : rayon (m)	$\mu_{\text{eff}}$ : viscosité de la suspension (kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )
R : rayon de l'injecteur (m)	$\varepsilon_s$ : fraction volumique du solide(-)
Re : nombre de Reynolds (-)	$\nu$ : viscosité cinématique (m <sup>2</sup> /s)
u : vitesse du gaz (m/s)	$\tau_0$ : contrainte de pariétale (N/m <sup>2</sup> )
$u_*$ : vitesse de frottement (m/s)	$\xi$ : variable extérieure $\xi = y / R$
$u^+$ : vitesse adimensionnelle	Indice :
U : nombre de similarité représentant l'effet des parois	g : gaz
v : vitesse moyenne du gaz porteur (m/s)	p : particule

## Références

- [1] T. Kiyoshi, F. Hisamoto, Extension of Einstein's viscosity equation to that for concentrated dispersions of solutes and particles, *J. of Bioscience and Bioengineering*, 102, pp 524-528, 2006.
- [2] J. Guo, Self-similarity of mean flow in pipe turbulence, *Collection of Technical Paper*, 36<sup>th</sup> AIAA Fluid Dynamics Conference, 1, pp 244-259, 2006.
- [3] J. Guo, P. Y. Julien, Modified Log-wake law for turbulent flow in smooth pipes, *J. of Hydraulic Research*, 41(54), 493-501, 2003.
- [4] V. J. Milenkovic, H. Schmidl, Optimization based animation, *Computer Graphics Proceedings, Annual conference series*, pp 37-46, 2001.
- [5] O. Galizzi, F. Faure, Animation efficace de solides en contact par modèle physique. *Journée Francophones d'informatique graphique. AFIG*, pp 167-178, 2002.
- [6] <http://www.plasmaphysics.org.uk/feedback.htm>.