

## MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU JET DIPHASIQUE GAS/PARTICULES ISSU D'UNE BUSE COXIALE DE RECHARGEMENT LASER

Karim KHELOUFI et El-Hachemi AMARA

*Équipe : Traitement des Matériaux par Laser, Centre de Développement des Technologies Avancées  
(CDTA), Alger*

E-mail : [kkheloufi@cdda.dz](mailto:kkheloufi@cdda.dz)

**RÉSUMÉ :** La qualité et l'efficacité du rechargement laser par injection de poudre, ou le procédé de fabrication direct de pièces métalliques, dépend fortement de la structure du jet de poudre émis par la buse. Cette structure se caractérise principalement par le point focal du jet, la largeur de la zone cœur, et la concentration radiale de la masse dans le jet. La mesure de ces paramètres de jet est rendue difficile à cause de phénomènes complexes existant dans ce type de jet diphasique turbulent. Une simulation du jet de poudre sans flux laser issu d'une buse coaxiale, a été faite par une approche de dynamique des fluides (CFD-FLUENT). Le modèle de dispersion (Dispersed Turbulence Model), proposé par Fluent, est utilisable lorsque la concentration de la seconde phase est faible. Dans ce cas, les collisions entre particules sont négligeables. Ce modèle est applicable lorsqu'il y a clairement une phase primaire continue et une phase secondaire dispersée et diluée. Le modèle mathématique utilisé dans ce travail est basé sur les équations de Navier-Stokes. Comme les particules du métal en poudre sont entraînées par un flux gazeux, le gaz transporteur a été considéré comme la phase continue et la poudre comme la phase dispersée. Les trajectoires des particules de poudre et la concentration de distribution n'ont pas été évaluées en même temps. En règle générale, une solution de flux de gaz sans la deuxième phase est résolue, et l'injection de la phase dispersée est importée dans le champ d'écoulement. Le modèle lagrangien représente la phase dispersée comme un courant continu de particules se déplaçant à travers le milieu transporteur. Les équations régissant le fluide transporteur sont écrites dans le système de référence Eulérien, tandis que le mouvement des particules est décrit dans un système de coordonnées Lagrangien. Les résultats concernant l'effet de la vitesse du gaz secondaire sur la géométrie du jet, les dimensions de la zone cœur, ainsi que les concentrations radiales et axiales de particules sont présentés.

**MOTS-CLÉS :** rechargement laser, paramètres de contrôle, jet de poudre, écoulement diphasique, buse d'injection

### 1. Introduction

Plusieurs techniques de prototypage rapide (Rapid Prototyping RP) permettent la fabrication des pièces métalliques dense et solide. Des techniques telles que le dépôt laser de métaux directe (DMD), laser engineering net shaping (LENS) sont capables d'utiliser un modèle 3D CAD solide pour produire une pièce à partir de matériaux tels que les aciers et les superalliages au nickel, sans étapes intermédiaires [1,2]. Les procédés, quoi en pour technique de base le rechargement Laser par injection de poudre, utilisent un laser de forte puissance focalisé sur un substrat métallique pour créer une zone liquide à la surface. Une poudre métallique est ensuite injectée dans le bain de fusion (Fig.1). Le substrat est déplacé par rapport à la tête de dépôt pour générer un cordon du métal avec une largeur et une épaisseur finies. Enfin, cette procédure est répétée plusieurs fois, couche par couche, pour la génération de la pièce complète. La géométrie de la pièce est réalisée par le mouvement du substrat en X et Y et par le déplacement en Z de l'ensemble buse et laser. La pièce est alors fabriquée couche par couche à partir des données CAO. Ainsi la construction du mur se fait par des

allers et retours successifs de gauche à droite. A chaque point de rebroussement, la buse s'élève d'une certaine distance  $\Delta z$  égale à la hauteur de couche apparente du mur [3].

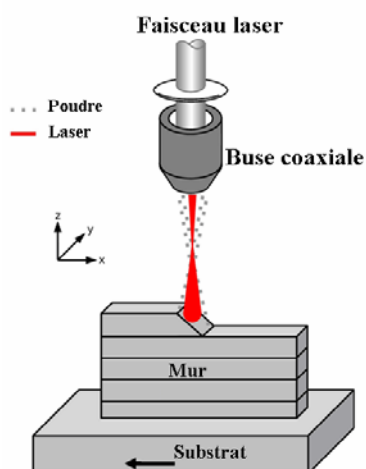


Figure 1 : Principe de fonctionnement de la projection laser

## 2. Méthodes d'injection de poudre

La buse de poudre peut avoir plusieurs configurations. Deux dispositifs de base sont montrés sur la figure (2). L'approvisionnement latéral en poudre (figure (2b)) et l'injection coaxiale. Fondamentalement, les buses latérales de poudre sont tout simplement des tubes ayant une longueur, et un diamètre appropriés.

Le développement de la buse coaxiale a eu un grand impact dans les procédés de dépôt par laser [4]. La première caractéristique importante de cette buse est l'indépendance de l'approvisionnement de la direction du mouvement de la pièce. L'alimentation coaxiale rendrait le processus omni-directionnelle et donc plus facile à utiliser.

Aussi, une nette amélioration de l'efficacité de l'utilisation de la poudre peut être obtenue par cette buse. L'approvisionnement coaxial en poudre peut être intégré avec le système optique du faisceau laser. D'autres avantages de l'approvisionnement coaxial sont: le chauffage commandé de la poudre avant qu'elle entre dans le bain fondu et l'efficacité élevée de poudre.

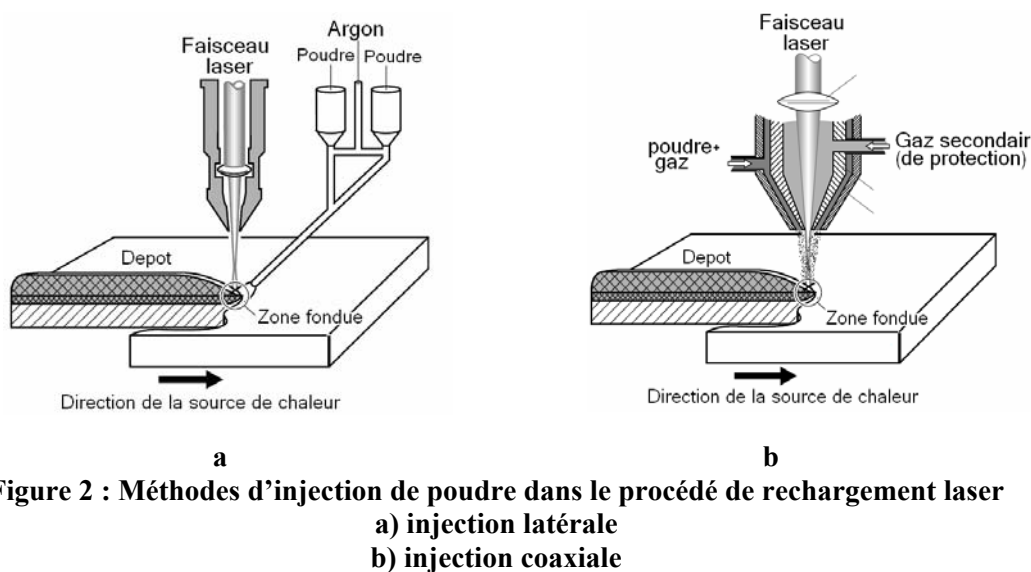


Figure 2 : Méthodes d'injection de poudre dans le procédé de rechargement laser  
 a) injection latérale  
 b) injection coaxiale

Tout problème d'instabilité dans la fourniture de la poudre métallique se répercute directement sur la qualité de la pièce réalisée par ce procédé. Ceci est dû au fait qu'assurer l'injection de manière efficace de la poudre métallique du jet de diamètre de même ordre de grandeur que le faisceau laser, dans le bain de fusion, est une tâche difficile.

La fourniture du matériel additif est donc l'un des facteurs clés contrôlant le processus. Les poudres utilisées pour les procédés de rechargement laser doivent avoir une granulométrie comprise entre 20 et 200 micromètres. Les meilleures propriétés d'alimentation sont obtenues avec une forme sphérique des particules, typique pour les poudres atomisées.

La structure de flux de poudre au dessous de la buse coaxiale est cruciale puisque la distribution spatiale des particules détermine l'atténuation laser ainsi que l'efficacité de l'utilisation de la poudre. Par conséquent, les paramètres opératoires, tels que la distance buse-substrat, doivent être optimisés en se basant sur la connaissance de la répartition de la concentration des particules.

Dans le cas d'une buse coaxiale, la structure du jet se caractérise principalement par le point focal du jet, la largeur de la zone cœur, et la concentration radiale de la masse dans le jet. La mesure de ces paramètres de jet est rendue difficile à cause des phénomènes complexes existant dans ce type de jet diphasique turbulent.

### 3. Configuration et géométrie de la buse étudiée

La configuration considérée dans ce travail consiste en une buse coaxiale de géométrie cylindrique, avec deux flux gazeux, l'un correspondant au gaz transporteur des particules de poudre, l'autre concentrique est un flux de gaz de protection.

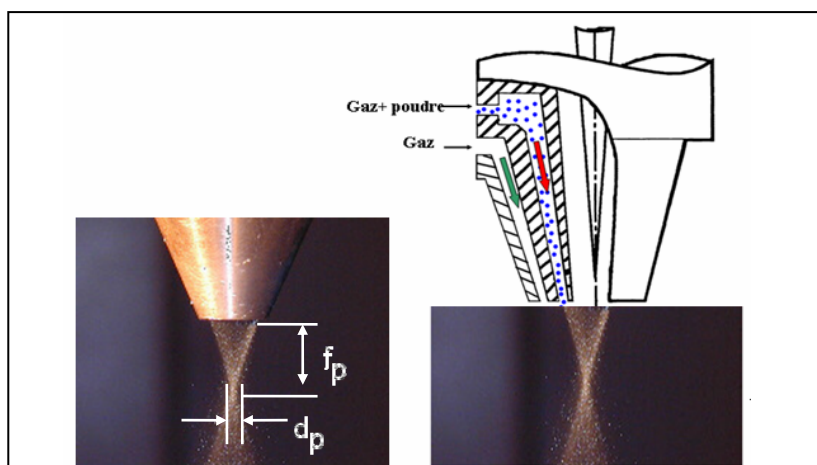


Figure 3 : Configuration et géométrie de la buse étudiée

### 4. Modélisation Mathématique de l'écoulement diphasique gaz /poudre

Le jet de poudre métallique est considéré comme un écoulement diphasique gaz-solide. La méthode numérique choisie pour modéliser cet écoulement multiphasique est la méthode d'Euler-Lagrange ou DPM (Dispersed phase model). Dans cette méthode, le gaz est considéré comme la phase continue et les particules solides sont considérées comme la phase discrète.

#### 4.1. Equations gouvernantes l'écoulement de la phase continue (air)

Le modèle d'écoulement turbulent k-ε est utilisé et l'équation générale de transport s'écrit sous la forme [5, 7] :

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{V}\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S \quad (1)$$

##### (1) Equation de conservation de masse (équation de continuité)

Dans ce cas les différents termes de l'équation générale prennent les valeurs suivantes : φ=1, Γ=0, S=0. L'équation (1) s'écrit

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{V}) = 0 \quad (2)$$

##### (2) Equations de conservation de quantité de mouvement (équations N-S)

φ=(u, v, w), Γ=η<sub>eff</sub> (viscosité effective), η<sub>eff</sub>=η<sub>t</sub>+η,  
 Où η<sub>eff</sub> est viscosité effective [8]

$$\eta = \frac{\rho V_{\infty} l}{\text{Re}} \quad \text{et} \quad \eta_t = \frac{c_{\mu} \rho k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

η viscosité du fluide(laminaire) et η<sub>t</sub> viscosité turbulente

$$u : S = -\frac{\partial(p)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \eta_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \eta_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (4)$$

$$v : S = -\frac{\partial(p)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \eta_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \eta_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (5)$$

$$w : S = -\frac{\partial(p)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \eta_{\text{eff}} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \eta_{\text{eff}} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta_{\text{eff}} \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (6)$$

##### (3) Equation de production de l'énergie cinétique de turbulence (equation de k)

Dans l'équation de k,

φ=k, Γ=η+ $\frac{\eta_t}{\sigma_k}$ , S=ρG<sub>k</sub>-ρε, G<sub>k</sub> est le terme de production de l'énergie turbulente [8]

$$G_k = \frac{\eta_t}{\rho} \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

##### (4) Equation de dissipation de l'énergie de turbulence (équation de ε)

Dans l'équation de ε, φ=ε, Γ=η+ $\frac{\eta_t}{\sigma_k}$ , et S= $\frac{\varepsilon}{k}(c_1\rho G_k - c_2\rho\varepsilon)$ .

Dans le modèle de turbulence à 2 equations k-ε, c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>, c<sub>μ</sub> et σ<sub>k</sub> sont des constantes empiriques. c<sub>1</sub>=1.44, c<sub>2</sub>=1.92, c<sub>μ</sub>=0.09 et σ<sub>k</sub>=1.0

#### 4.2. Equation dynamique de la phase dispersée (équation de mouvement d'une particule)

Le modèle aléatoire est utilisé pour la capture de mouvement des particules individuelles dans un référentiel Lagrangien. L'effet de collisions entre les particules n'est pas pris en compte vu la faible concentration de celles-ci dans la phase continue.

L'équation de mouvement d'une particule dans la direction x peut être écrite sous la forme :

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u_x - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (8)$$

Dans l'équation (8),  $u_p$  est la composante suivant x du vecteur vitesse de la particule,  $u_x$  est la composante suivant x de la vitesse de l'air,  $g_x$  la composante x du champ de gravitation et  $\rho_p$  est la densité de la poudre. Le coefficient  $F_D$  est la force de traînée par unité de masse de la poudre,

$$F_D = \frac{18\eta_t C_D Re_p}{\rho_p d_p^2} \quad (9)$$

Dans l'équation (8),  $d_p$  est le diamètre d'une particule,  $C_d$  coefficient de résistance et  $Re_p$  est le nombre de Reynolds relatif donné par

$$Re = \frac{\rho_p d_p |u - u_p|}{\eta_{eff}} \quad (10)$$

La trajectoire d'une particule est obtenue en résolvant l'équation (8) couplée avec l'équation de mouvement [7]

$$u_p = \frac{dx}{dt} \quad (11)$$

### 4.3. Conditions aux limites

La figure 4 indique les conditions limites pour l'écoulement de l'air et le mouvement des particules. Il est important de mentionner les conditions limites d'entrée des particules et de l'air ont été définis à l'intérieur de la buse la où le mélange air/poudre devient homogène. L'effet de la vitesse d'injection particules, qui a été fixé, sur le flux de particules à la sortie de la buse a été étudié pour différentes valeurs de celle ci. Il a été constaté qu'il n'y avait aucune différence dans le profil de la vitesse des particules, la raison étant que l'espace interne de la buse était suffisant pour permettre aux particules d'acquérir la vitesse de gaz transporteur.

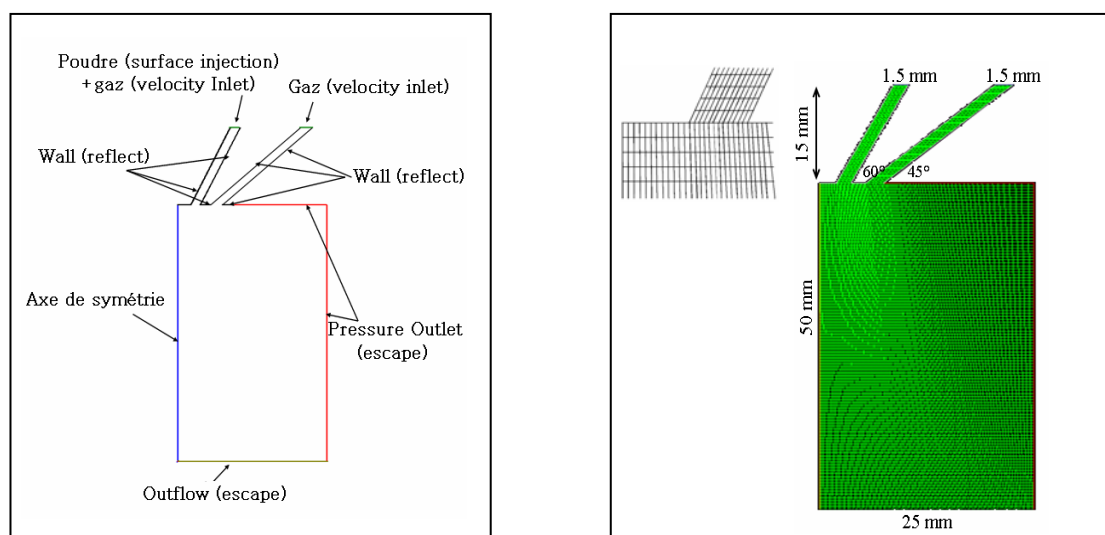


Figure 4 : Conditions aux limites et maillage du domaine

### 4. 4. Maillage du domaine et méthode de résolution

Le domaine de calcul comportant le volume interne de la buse et l'espace d'extension du jet libre a été maillé en utilisant des cellules quadratiques. Le nombre total de cellules est de 10980 cellules. Un test d'indépendance des résultats vis-à-vis de la densité du maillage a été fait avec raffinement de maillage. Comme les gradients de valeurs de vitesses et de concentration sont importants au voisinage de la zone d'expansion du jet, un maillage très fin à proximité de la sortie de la buse est nécessaire.

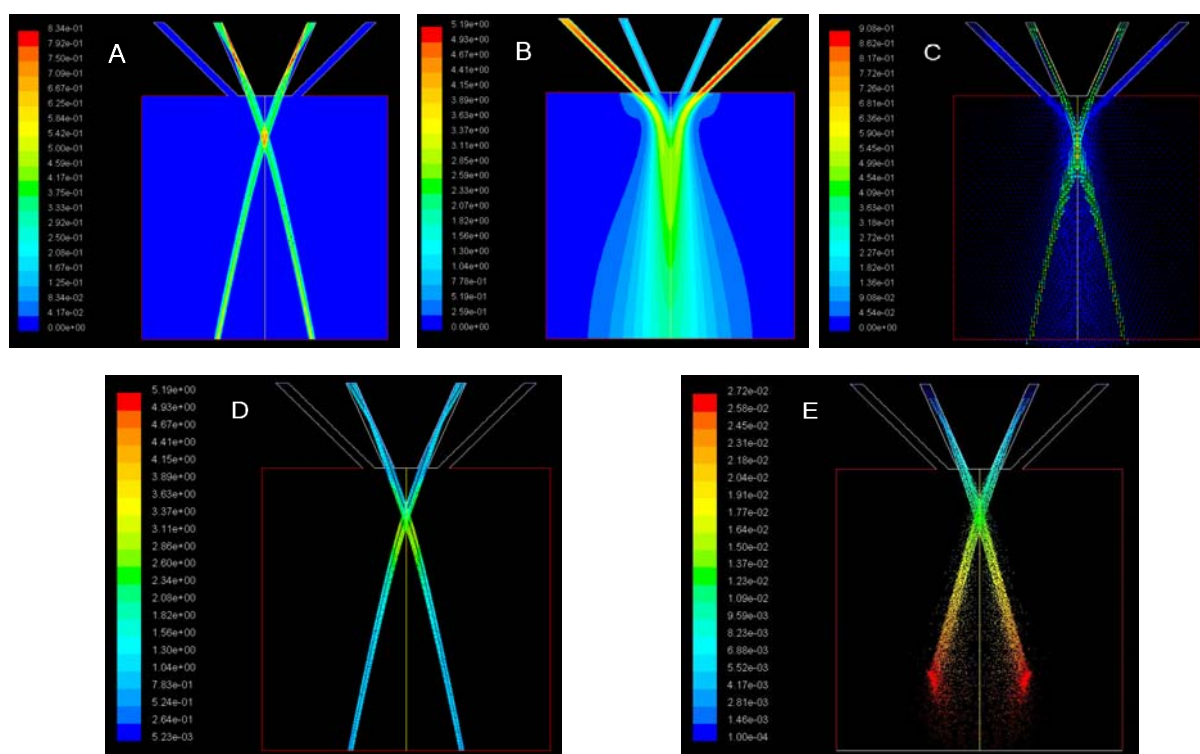
**Tableau 1 : Paramètres de l'injection utilisés dans la simulation**

Poudre	Gaz transporteur	Gaz secondaire
Acier $d_p=60 \mu\text{m}$ $m=0.6\text{g/s}$	$U_0=1 \text{ m/s}$	$U_g=0-2-4-6-8 \text{ m/s}$

Les équations de continuité et de vitesses ont été discrétisés utilisant le Schéma d'interpolation Upwind du second ordre.

### 5. Résultats et discussion

Sur la figure 5 sont présentés les différents type de résultats que peu fournir le model diphasique numérique du jet de poudre (distribution de densité de la phase dispersée, champ de vitesse de l'écoulement global, champs de vitesse de la phase dispersée, trajectoires de particules individuelle et localisation à des instants différents d'ensembles de particules du jet).

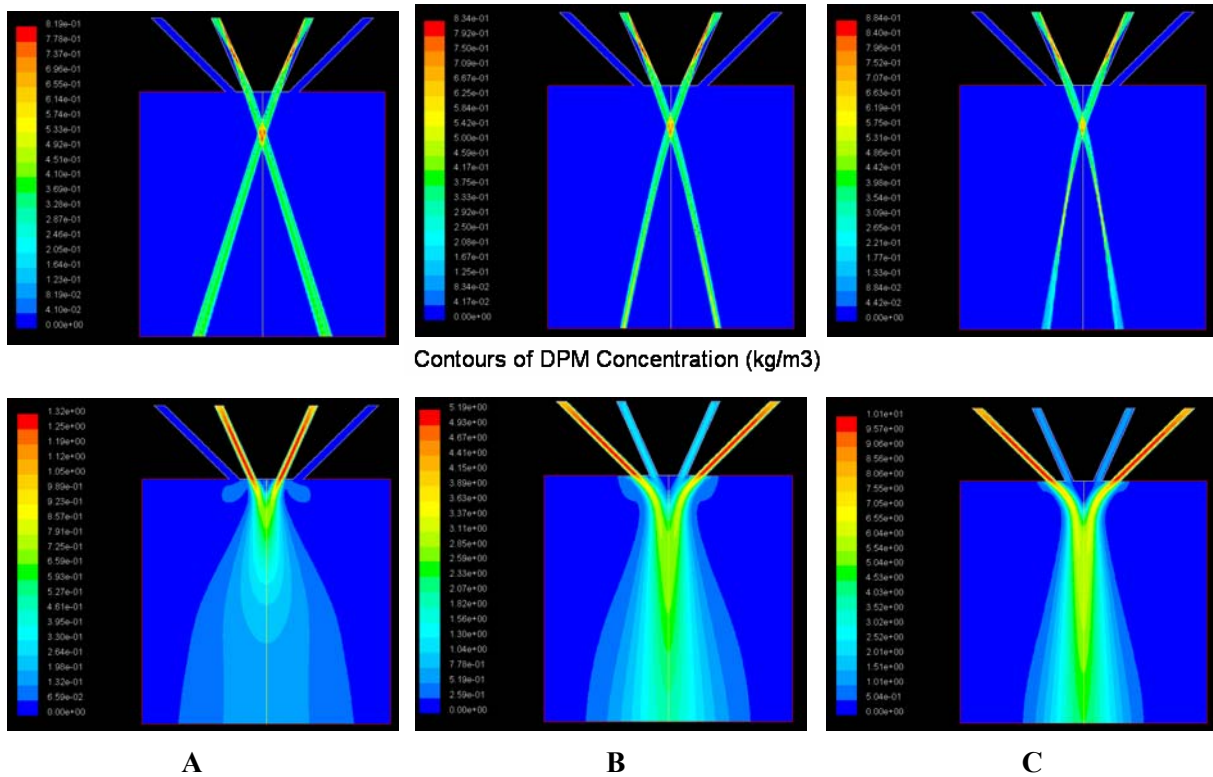


**Figure 5 : résultats fournir par le model diphasique numérique du jet de poudre (A : distribution de densité de la phase dispersée, B : champ de vitesse de l'écoulement global, C : champ de vitesse de la phase dispersée, D :trajectoires de particules individuelle, et E : localisation à des instants différents d'ensembles de particules du jet**

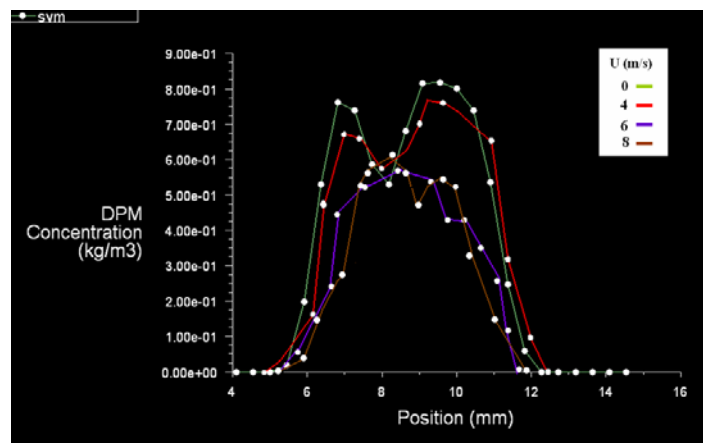
Sur la figure 6 sont représentés les profils du champ de vitesse et de la concentration de particules dans le jet pour différentes valeur du débit du gaz secondaire  $U_g=0, 4, 8 \text{ mm/s}$ . On note l'effet important de ce paramètre sur les caractéristiques du jet, à savoir la concentration maximale de la poudre, le point focal du jet, et la largeur de la zone cœur.

On note aussi que la distribution des particule dans la zone cœur n'est pas homogène (la concentration maximal ne se trouve pas sur l'axe de la buse, mais au voisinage de celui-ci. On constate que largeur de la zone coeur et concentration maximal dans cette zone varient en sens inverse avec le vitesse du gaz secondaire. L'absence du gaz secondaire rend le jet de poudre

large avec une zone cœur relativement large (donc surface traitée plus large) et une valeur de concentration maximale de 0.825 kg/m<sup>3</sup>. Pour un débit de gaz secondaire de 8m/s la concentration maximale du jet atteint 0.884 kg/m<sup>3</sup> avec une zone cœur plus étroite (meilleur efficacité d'utilisation de la poudre mais surface traitée de faibles dimensions



**Figure 6 : champ de la densité de la phase dispersée (particules de poudre) et champ de vitesse de l'écoulement global pour différentes valeur de la vitesse du gaz secondaire**  
 A)  $U_g=0$  m/s, B)  $U_g=4$  m/s, C)  $U_g=8$ m/s



**Figure 7 : Distribution axiale de la densité de la phase dispersée (particules de poudre) pour différentes valeur de la vitesse du gaz secondaire**

La figure7 représente la distribution axiale de la densité de particule de poudre, pour différentes valeurs de la vitesse du gaz secondaire ( $U_g=0,4,6,8$  m/s). On constate que cette distribution n'est pas monotone suivant l'axe du système buse- jet est caractérisée par la présence de deux pics (maxima). Pour les valeur  $U_g=0, 4$  m/s, le premier maxima est suivi d'un second, dont la valeur est plus grande, tandis que pour  $U_g=8$  m/s, la situation est renversé (la valeur maximal correspondant

au premier pique est plus importante). On constate aussi l'absence de cette structure pour la valeur de 6m/s, et le profile correspondant est caractérisé par une distribution plus régulière (absence des deux pics), et une structure plus compacte du jet (largeur moyenne de la distribution ou largeur de la zone cœur).

## 6. Conclusion

Un modèle numérique de l'écoulement du jet diphasique gaz/poudre fourni par une buse coaxiale de rechargement laser est représenté. Le modèle est basé sur l'approche DPM (discret phase model) des écoulement fluide turbulent avec une phase solide dispersée. Une géométrie simple de la buse est considérée pour dégager les premiers résultats. Elle consiste à une géométrie cylindrique avec l'écoulement d'un second gaz concentrique au jet de poudre. L'étude portant sur l'effet du débit de ce gaz sur la concentration de particule et les caractéristiques géométriques du jet (largeur de la zone cœur) a permis de mettre en évidence la sensibilité de ces caractéristiques aux paramètres opératoires, et l'importance des modèles numériques pour une meilleur efficacité du procédé de rechargement laser.

## References

- [1] Jacobs P F. Rapid Prototyping and Other RP&M Technologies: From Rapid Prototyping to Rapid Tooling. Society of Manufacturing Engineers SME-CASA, Dearborn, Mich., 119-148; (1996)
- [2] T. Wohlers, Wohlers Report—Rapid Prototyping, Tooling & Manufacturing State of the Industry, Wohlers Associates Inc., Colorado, 2003.
- [3] V. Malin, R.N. Johnson, F. Sciammarella, Laser cladding helps refurbish US Navy ship components, The AMPTIAC Quarterly 8 (3) (2005) 3–9.
- [4] Kannatey-asibu Elijah Jr.; Principles of laser materials processing; John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey (2009)
- [5] Patankar, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, New York (1980).
- [6] J. Nurminen, J. Näki, P. Vuorito, The Influence of Powder Parameters on Laser Cladding Process, Proceedings of ICALEO2004, pp104-107
- [7] *Fluent 6.1 User's Guide*, Fluent Inc. (2001).
- [8] Launder, B. E., and Spalding, D. B., *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press, London, England (1972).