

Optimisation de la distance de tir en projection cold spray

FRANÇOIS RALETZ^{1,a}, GUILLAUME EZO'O¹, SAMUEL GERMAIN², MICHEL VARDELLE²
ET GILLES MARIAUX²

¹ CM2T Ingénierie-LORIUS, ZAC du Petit Breuil, PIA des 3 frontières, 54400 Longwy, France

² SPCTS-Université de Limoges, Centre Européen de la Céramique, 12 rue Atlantis, 87068 Limoges Cedex, France

Reçu le 14 juin 2011, accepté le 21 septembre 2011

Résumé – La projection cold spray utilise principalement l'énergie d'impact des particules pour former des revêtements denses. L'étalement et l'adhésion des particules étant liés à l'énergie cinétique et donc à la vitesse des particules, il est primordial de maximiser leur accélération pour obtenir un rendement de dépôt élevé. Ce transfert de quantité de mouvement peut être optimisé en modifiant les paramètres de fonctionnement du système de projection mais également en choisissant une distance tuyère-substrat adéquate. Cet article décrit un modèle 2D mis en œuvre avec le logiciel de CFD Fluent pour simuler le comportement d'un flux de particules de titane dans un écoulement supersonique. Ses résultats montrent que les particules n'atteignent pas leur vitesse maximale en sortie de tuyère mais environ 90 mm en aval de celle-ci. C'est donc à cette distance que le substrat doit être placé pour optimiser la projection. La précision de ces calculs est confirmée expérimentalement et les variations significatives d'épaisseurs des dépôts montrent l'influence drastique de la distance de tir sur le rendement de dépôt.

Mots clés : Cold spray / distance de tir / modélisation 2D / rendement de dépôt / titane

Abstract – **Optimisation of the standoff distance in the cold spray process.** The cold spray process uses mainly the impact energy of the particles to achieve dense coatings. As the kinetic energy is directly linked to the particles velocity, it is crucial to maximize their acceleration to obtain a high deposition efficiency. The momentum transfert can be optimized by modifying the set of parameters of the spraying system and also by using a correct standoff distance. This paper describes a 2D numerical model used with Fluent software that permits to compute the behavior of a jet of titanium particles inside a supersonic flow. The results show that the maximum velocity is not obtained at the exit of the nozzle but 90 mm downstream. This is the standoff distance that must be used to optimize the spraying process. The accuracy of the numerical computations is checked by an experimental procedure and the variations of the coating thickness clearly show the drastic influence of the standoff distance on the deposition efficiency.

Key words: Cold spray / standoff distance / 2D numerical model / deposition efficiency / titanium

1 Introduction

La projection thermique est un ensemble de procédés qui utilisent l'énergie thermique pour chauffer des matériaux à une température proche ou supérieure à celle de fusion. Il en résulte la formation de gouttelettes de matière fondue ou semi-fondue qui sont accélérées par un flux gazeux et projetées sur la pièce à revêtir. À l'impact, les particules s'étaient pour former de fines lamelles qui adhèrent à la surface sans la fondre. L'énergie nécessaire à cette fusion peut être fournie par la combustion d'une

flamme ou l'utilisation d'un arc électrique comme dans le cas de la projection plasma.

Découverte dans les années quatre-vingt à « l'Institut de Mécanique Théorique et Appliquée » de l'Académie Russe des Sciences de Novosibirsk, la technologie cold spray (ou projection dynamique à froid) diffère de ces techniques car elle utilise l'énergie cinétique des particules pour permettre leur adhésion. Le matériau projeté demeure donc constamment à l'état solide ce qui permet une parfaite conservation de sa composition chimique. Cette caractéristique est essentielle dans la mise en œuvre de poudres sensibles à l'oxydation (titane, tantale, cuivre...) [1, 2].

^a Auteur pour correspondance :
francois.raletz@cm2t.com

Nomenclature

A_t	aire du col de la tuyère
A	aire de la tuyère au point considéré
d_p	diamètre de la particule
F	force
M	nombre de Mach
m_p	masse de la particule
p_0	pression initiale du gaz
R	constante spécifique du gaz
T	température du gaz
T_0	température initiale du gaz
u_g	vitesse du gaz
u_p	vitesse de la particule
x	distance col sonique-point considéré
γ	rapport des chaleurs spécifiques
ρ_p	masse volumique de la particule

Afin d'obtenir un rendement de dépôt (rapport masse projetée sur masse déposée) élevé, il est important de maximiser la vitesse d'impact des particules. En effet, pour qu'elles puissent adhérer, celles-ci doivent dépasser une vitesse limite (appelée vitesse critique) propre au matériau considéré. La vitesse d'impact dépend des paramètres du procédé (nature, température et pression des gaz), de la tuyère utilisée mais aussi de la distance entre la sortie de tuyère et le substrat. L'utilisation de modèles numériques montre que les particules n'acquièrent pas leur vitesse maximale en sortie de tuyère mais quelques dizaines de millimètres en aval de celle-ci [3].

2 La projection cold spray (ou projection dynamique à froid)

Ce procédé permet de réaliser des dépôts en exposant un substrat à un jet de fines particules (1–50 μm) entraînées à très haute vitesse (300–1200 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) par un gaz comprimé supersonique. Les gaz propulseurs utilisables sont l'hélium, l'azote, l'air et leur mélange, comprimés à une pression de 2 à 4 MPa. Ce flux gazeux circule dans une tuyère de De Laval (convergente-divergente) où il se détend et acquiert une vitesse supersonique (Fig. 1).

2.1 Écoulement gazeux

L'équation (1) montre que le nombre de Mach M de l'écoulement dans une tuyère ne dépend que des dimensions des sections de celle-ci et du rapport des chaleurs spécifiques γ du gaz. Plus simplement, le nombre de Mach ne dépend que de la géométrie de la partie divergente et du type de gaz utilisé (pas de sa température ou de sa pression). Pour une même tuyère, M sera donc supérieur en utilisant un gaz monoatomique comme l'hélium ($\gamma = 1,66$) à la place d'un gaz diatomique type azote ($\gamma = 1,4$).

$$\frac{A}{A_t} = M \left(\frac{2}{\gamma + 1} + \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} M^2 \right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \quad (1)$$

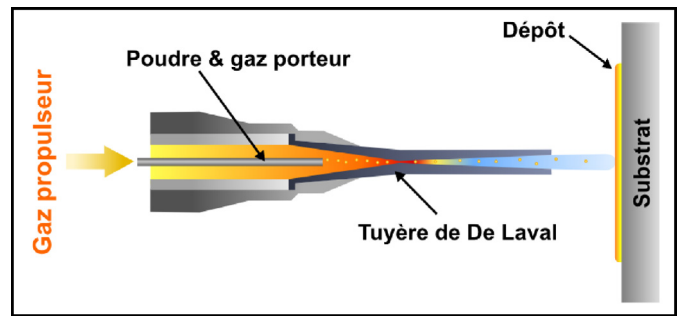


Fig. 1. Schéma de principe du procédé cold spray.

L'équation (2) indique que la vitesse du gaz u_g dans une tuyère dépend de la température T du gaz, de sa constante spécifique R , de son rapport de chaleurs spécifiques γ et du nombre de Mach M de la tuyère. Cela implique que le gaz peut être introduit à température ambiante mais il est préférable de le chauffer (aux alentours de 200 à 800 $^{\circ}\text{C}$) afin d'en augmenter la vitesse. Cette augmentation de température a une influence négligeable sur la déformation plastique des particules lors de l'impact (la détente du gaz dans la partie divergente de la tuyère provoque une baisse importante de sa température).

$$u_g = M \sqrt{\gamma R T} \quad (2)$$

avec

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \quad (3)$$

L'azote (N_2) est le gaz procédé par excellence, il évite toute oxydation du matériau (contrairement à l'air) et, à la température de travail, les nitrurations et décompositions sont rarissimes. Cependant l'utilisation d'hélium (He) ou son mélange avec l'azote (He – N_2) permet d'atteindre des vitesses de particules plus élevées ($R_{\text{He}} \gg R_{\text{N}_2}$ et $\gamma_{\text{He}} > \gamma_{\text{N}_2}$) et donc de projeter des matériaux plus réfractaires. Mais son coût d'utilisation onéreux limite son usage à la réalisation de pièces à fortes valeurs ajoutées [4–8].

2.2 Accélération des particules dans l'écoulement gazeux

Les particules à projeter sont introduites axialement en amont de la partie convergente de la tuyère et se trouvent accélérées au moment où le gaz s'expande.

$$u_p = \frac{u_g}{1 + 0,85 \sqrt{\left(\frac{d_p}{x} \sqrt{\rho_p \frac{u_g^2}{p_0}} \right)}} \quad (4)$$

D'après l'équation (4) (approximation d'Alkhimov [9]), la vitesse d'une particule en un point x interne au divergent dépend de sa morphologie (diamètre d_p , masse volumique ρ_p), de la vitesse et de la pression initiale du gaz (u_g, p_0).

Tableau 1. Dimensions caractéristiques d'une tuyère 24 TC.

Diamètre entrée (mm)	Diamètre col (mm)	Diamètre sortie (mm)	Longueur convergent (mm)	Longueur divergent (mm)
18	2,7	6,6	54	130

Ceci démontre qu'augmenter la pression du gaz permet d'augmenter la vitesse des particules.

On pourra donc retenir que la vitesse des particules dépend du design de la tuyère (influence M), de la nature du gaz propulseur (influence M et la vitesse du gaz), de la température de ce gaz (qui influence la vitesse du gaz), de sa pression initiale (qui influence le transfert de quantité de mouvement) et des caractéristiques de la particule (masse et volume jouent sur le transfert de quantité de mouvement).

Les temps de séjour des particules dans le gaz chaud sont tellement brefs que leur températures restent toujours très inférieures à la température de préchauffage. Les calculs montrent que l'énergie cinétique de la particule à l'impact reste insuffisante pour fournir l'énergie minimale de fusion totale de celle-ci [1, 10–13].

3 Modélisation numérique 2D

3.1 Écoulement gazeux

Les calculs sont réalisés en utilisant le code de mécanique des fluides compressibles Fluent. Les hypothèses utilisées pour la modélisation de l'écoulement de l'azote dans la tuyère sont :

- Milieu continu
- Fluide visqueux newtonien
- Gaz respectant la loi des gaz parfaits
- Écoulement compressible
- Écoulement turbulent (la turbulence est modélisée par le modèle $K-\epsilon$ standard)
- Géométrie 2D avec axe de symétrie par rapport à l'axe de la tuyère
- Écoulement inerte à deux espèces (azote comme gaz propulseur et porteur de la poudre et air ambiant)
- Les propriétés thermodynamiques et de transport de gaz sont calculées à partir de la température, de la pression et de lois de mélange des gaz
- Les parois de la tuyère sont en carbure de tungstène
- Modèle sans substrat.

La tuyère utilisée est un modèle 24 TC fabriquée par Cold Gas Technology GmbH dont les dimensions caractéristiques sont données par le tableau 1.

La modélisation est réalisée pour étudier l'évolution du champ de vitesse du gaz dans la tuyère pour une pression de 2,4 MPa et une température de 500 °C. Au niveau du col, on trouve une vitesse d'environ 400 m.s⁻¹ qui correspond à la vitesse du son pour l'azote dans ces conditions de pression et de température. En sortie de tuyère, la vitesse du fluide est maximale et atteint 1075 m.s⁻¹.

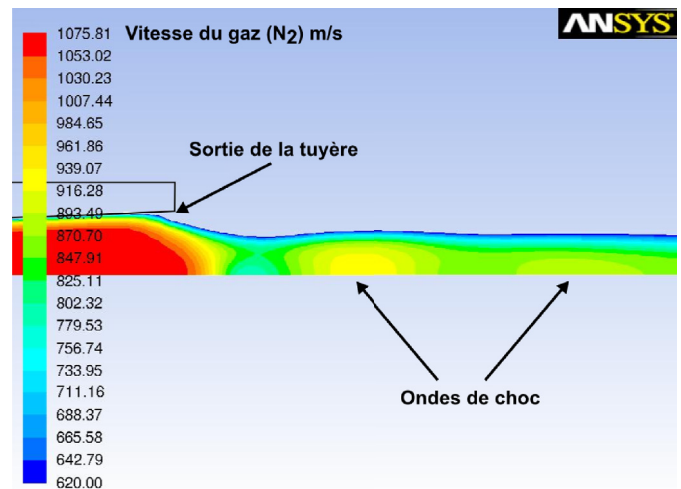


Fig. 2. Modélisation d'un écoulement d'azote dans une tuyère 24 TC (2,4 MPa, 500 °C).

Elle diminue ensuite avec l'apparition de deux ondes de choc liées à la détente rapide des gaz (Fig. 2). Celles-ci se forment lorsque le flux d'azote n'est plus confiné par la tuyère et devient libre de se détendre brutalement dans l'atmosphère extérieure. Après chaque choc oblique on observe une brutale chute de la vitesse, les chocs étant de moins en moins marqués au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la sortie de tuyère et que l'écart de pression entre le jet et son environnement s'atténue.

3.2 Modélisation du jet de particules

Les hypothèses utilisées pour la modélisation de l'injection et du transport des particules (assimilées à des entités lagrangiennes par le code Fluent) sont décrites ci-dessous :

- Leur forme est supposée sphérique.
- Elles sont soumises à la force de traînée, de gravité et de gradient de pression.
- Elles sont soumises à la dispersion turbulente.
- La vitesse initiale des particules correspond à la vitesse du fluide lorsque l'écoulement est établi.

Le modèle de comportement dynamique est basé sur l'application de la relation fondamentale de la dynamique à chaque particule en prenant en compte les forces de traînée, de gravité et de gradient de pression,

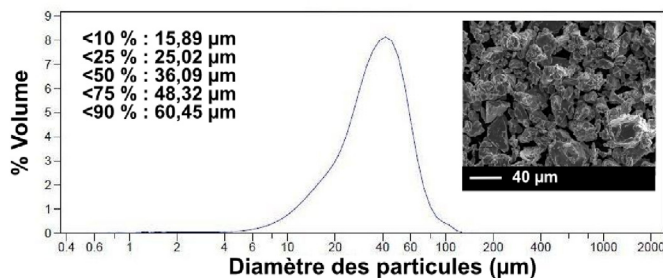


Fig. 3. Courbe granulométrique et image MEB de la poudre utilisée.

température... et en reconstruisant la vitesse instantanée du fluide vue par les particules (Éq. (5)).

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_{\text{traînée}} + F_{\text{gradient}} + F_{\text{gravité}} \quad (5)$$

La poudre utilisée est une poudre de titane pur dont la plage de distribution granulométrique s'étend de $15 \mu\text{m}$ (d_{10}) à $60 \mu\text{m}$ (d_{90}) avec une valeur moyenne de $36,09 \mu\text{m}$. Sa morphologie est angulaire et sa masse volumique de $4,51 \text{ g.cm}^{-3}$ (Fig. 3).

Le modèle décrit précédemment est utilisé pour calculer la vitesse de ces particules dans un écoulement d'azote soumis à une pression de 2,4 MPa et une température de $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Sur la figure 4 on peut voir la dispersion des vitesses de particules en fonction de leur diamètre. La vitesse maximale obtenue en sortie de tuyère est comprise entre 515 m.s^{-1} pour les particules de plus grand diamètre ($60 \mu\text{m}$) et 675 m.s^{-1} pour celles ayant le plus faible diamètre ($15 \mu\text{m}$).

Il est notable que ces vitesses sont généralement atteintes en moyenne à 90 mm en aval de la sortie de tuyère : c'est la distance de tir optimale pour ces conditions de projection. Par rapport à un substrat positionné à 40 mm de la tuyère, l'accroissement de vitesse des particules est d'environ 7 % dans ces conditions. Cela va également permettre de réduire l'onde de choc présente au niveau du substrat. En effet, la proximité du substrat favorise l'établissement d'un important gradient de pression à sa surface. La trajectoire des particules de petites dimensions est alors fortement affectée entraînant leur déviation et leur éjection de la zone d'impact avec l'écoulement d'azote.

4 Vérification expérimentale

4.1 Procédure utilisée

Afin de mesurer expérimentalement la distance optimale de tir, une série d'essais est effectuée. Pour cela, un dépôt de titane est réalisé en utilisant un appareil Kinetics 4000 (Cold Gas Technology GmbH). À l'aide d'un robot (REIS SRVL30-26) le pistolet de projection est placé à diverses distances d'une plaque en acier E24 et reste en position durant trois secondes. Il se forme alors un

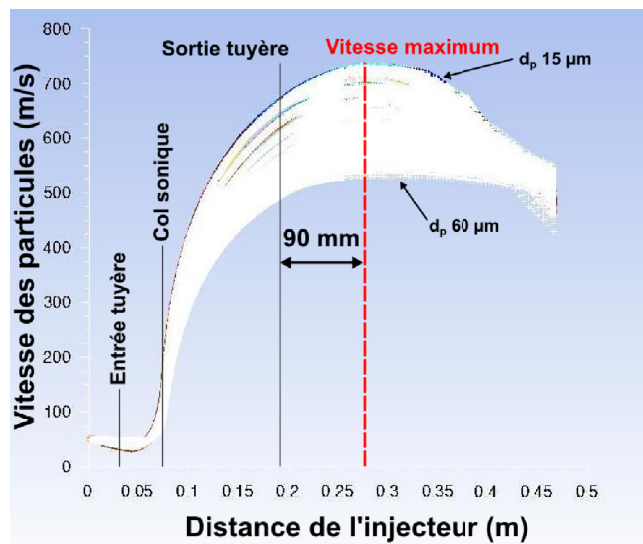


Fig. 4. Vitesse des particules en fonction de leur distance de l'injecteur (azote, 2,4 MPa, $500 \text{ }^\circ\text{C}$).

Tableau 2. Épaisseurs des dépôts en fonction de la distance de tir.

Distance de tir (mm)	40	60	80	90	100	120
Épaisseur du dépôt (mm)	1,99	2,48	6,81	9,51	8,53	7,33

dépôt conique dont la hauteur donne une indication du taux de particules déposées et permet donc de comparer les vitesses de croissance. La pression d'azote est fixée à 2,4 MPa, sa température à $500 \text{ }^\circ\text{C}$ et le débit massique de poudre à 30 g.min^{-1} .

4.2 Résultats

Les résultats des essais sont synthétisés dans le tableau 2. L'épaisseur du dépôt croît lorsqu'on augmente la distance tuyère-substrat, elle passe par une valeur maximale à une distance de 90 mm puis décroît au-delà. Ce résultat empirique coïncide parfaitement avec la valeur obtenue par modélisation 2D.

On peut noter que la vitesse de croissance obtenue dans le cas d'une distance optimisée est près de cinq fois supérieure au plus mauvais résultat. À plus ou moins dix millimètres autour de l'optimum, ce taux peut varier de plus de 20 %. Il est donc évident que la distance de tir influence considérablement le rendement de dépôt.

5 Conclusion

Cette étude montre que le comportement de particules introduites dans l'écoulement gazeux d'une tuyère cold spray peut être modélisé avec suffisamment de

précision pour déterminer la distance de tir optimale d'une poudre. Cette méthode prenant en compte la distribution granulométrique des particules, permet, pour un même matériau, d'adapter cette distance aux caractéristiques spécifiques de la poudre utilisée. En effet, pour une fourniture de référence identique, la distribution granulométrique peut varier d'un lot à l'autre.

Les résultats expérimentaux valident ces calculs et montrent l'importance d'une optimisation de la distance de tir pour obtenir des rendements de dépôt optimaux. La géométrie de la tuyère peut également être optimisée (rapport d'expansion, longueur de la partie divergente) notamment pour atténuer les ondes de choc et favoriser l'accélération des particules.

Remerciements. Cette étude a été réalisée dans le cadre du programme de recherche « Zircospray » soutenu et financé par le Fonds Européen de Développement Économique et les régions Lorraine et Limousin.

Références

- [1] R.C. Dykhuizen, M.F. Smith, Gas dynamic principles of cold spray, *J. Therm. Spray. Techn.* 7 (1998) 205–212
- [2] T.H. Van Steenkiste, Kinetic spray: a new coating process, *Key Eng. Mat.* 197 (2001) 59–86
- [3] B. Jodoin, F. Raletz, M. Vardelle, Cold spray flow modeling and validation in International Thermal Spray Conference 2005: Explore its surfacing potential!, Bâle, Suisse, 2005, pp. 165–169
- [4] T. Stoltenhoff, H. Kreye, H.J. Richter, H. Assadi, Optimization of the cold spray process, *Thermal spray 2001: new surfaces for a new millennium*, Singapour, 2001, pp. 409–416
- [5] T.H. Van Steenkiste, J.R. Smith, R.E. Teets, J.J. Moleski, D.W. Gorkiewicz, R.P. Tison, D.R. Marantz, K.A. Kowalsky, W.L. Riggs, P.H. Zajchowski, B. Pilsner, R.C. McCune, K.J. Barnett, Kinetic spray coating, *Surf. Coat. Tech.* 111 (1999) 62–70
- [6] B. Pateyron, M.F. Elchinger, G. Delluc, P. Fauchais, Sound velocity in different reacting thermal plasma systems, *Plasma Chem. Plasma Proc.* 16 (1996) 39–57
- [7] B. Pateyron, G. Delluc, N. Calve, T&T Winner, The chemistry of on-line transport properties in interval of 300 K to 20 000 K, *Mécanique & Industries* 6 (2005) 651–654
- [8] G. Delluc, H. Ageorges, B. Pateyron, P. Fauchais, Fast modelling of plasma jet and particle behaviours in spray conditions, *High Temp. Mater. Pro.* 9 (2005) 211–226
- [9] A.P. Alkhimov, V.F. Kosarev, S.V. Klinkov, The Features of Cold Spray Nozzle Design, *J. Therm. Spray Tech.* 10 (2001) 375–381
- [10] B. Jodoin, Effects of sock waves on impact velocity of cold spray particles in thermal spray 2001: new surfaces for a new millennium, Singapour, 2001, pp. 399–407
- [11] F. Raletz, Contribution au développement d'un procédé de projection dynamique à froid (P.D.F.) pour la réalisation de dépôts de nickel, Thèse, Université de Limoges, 2005
- [12] F.B. 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, *Surf. Coat. Technol.* 202 (2008) 4491–4495
- [13] G. Mariaux, P. Fauchais, A. Vardelle, B. Pateyron, Modeling of the plasma spray process: From powder injection to coating formation, *High Temp. Mater. Process.* 5 (2001) 61–85