

Phénomènes et régimes d'écoulement supersonique qui gouvernent la fabrication additive par projection à froid.

Phenomena and regimes of supersonic flow governing the cold spray additive manufacturing.

Rija Nirina RAOELISON*, Libin Lalu KOITHARA, Sophie COSTIL

Université de Bourgogne Franche-Comté - UTBM, Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR 6303 CNRS, 90100 Belfort, France.

*(auteur correspondant : rija-nirina.raoelison@utbm.fr)

Résumé – L'écoulement diphasique gaz/poudres gouverne la fabrication additive par projection à froid. A l'aide d'une visualisation expérimentale par ombroscopie à illumination laser nanoseconde, on montre que le jet de poudre à la sortie de la buse adopte deux régimes : un confinement axial en sortie immédiate de la buse, puis un régime dispersé caractérisé par une distribution de plus en plus éparse des poudres à cause d'une déviation radiale de leur trajectoire. Une simulation numérique CDF DNS permet de comprendre les phénomènes à l'origine de cette déviation. En sortie immédiate de buse, l'écoulement supersonique du gaz détendu dans l'atmosphère ambiante développe un régime de turbulence oscillatoire entretenu depuis l'intérieur de la buse vers l'extérieur. Le jet de gaz cisaille le milieu ambiant externe en développant alternativement, sur les parties inférieure et supérieure de l'écoulement, des tourbillons qui provoquent une oscillation du jet devenant alors complètement instable au-delà d'une certaine distance. On distingue ainsi, un écoulement plus stable avant cette distance, et après celle-ci une oscillation permanente. En conséquence, l'interaction avec les poudres produit une dispersion imputable à un effet Magnus provoqué par la turbulence de l'écoulement supersonique. C'est un phénomène indésirable car il peut altérer l'inter-cohésion des poudres pendant la croissance additive de la structure élaborée. Cette connaissance phénoménologique de l'écoulement supersonique permet d'identifier des conditions opératoires efficaces.

Mots-clés : Cold spraying ; Ecoulement ; Turbulence ; Simulation CFD DNS, Cinématique poudres.

Abstract – The phenomenological behaviours of the supersonic gas flow and particles motion during low pressure cold spraying have been characterized. A high-speed laser shadowgraph observation shows two regimes of particles flow: a confinement of the particles inside a straight jet over a short distance ahead the nozzle exit, and then, a progressive dispersion of the particles towards a very sparse jet along the flow direction. This flow pattern is explained by a Magnus lift force that deviates the particles trajectory when the gas flow becomes highly turbulent while developing a vorticity shedding.

Keywords : Cold spraying; Flow; Turbulence; CFD DNS analysis, Particles kinematics.

1. Introduction

La projection à froid (Cold Spraying) est une nouvelle voie de fabrication additive qui offre plusieurs perspectives d'innovations majeures en fonctionnalisation de surface et récemment, dans la production en série de pièce massive [1,2]. La structure additive est obtenue par une auto-consolidation de poudres micrométriques pendant une collision balistique sur un support. On utilise un gaz pressurisé puis détendu à travers une buse de type De Laval pour produire un écoulement supersonique. Les poudres sont injectées dans la buse où elles sont entraînées par

cet écoulement qui les projette à des vitesses de plusieurs centaines de mètres par seconde sur le support cible, pour créer un revêtement ou un dépôt massif. Les vitesses de projection sont en général maximales lorsque la pressurisation du gaz se fait à haute pression et haute température. La pressurisation à basse pression et basse température, c'est-à-dire sur une plage opératoire de 5-10bar, et 20-500°C respectivement, est une autre avancée majeure. On parle de projection à basse pression (LPCS), laquelle a permis de nouveaux développements comme la restauration des structures métalliques à l'aide d'un système compact portatif, la métallisation de composants polymères, le travail des matériaux thermiquement sensible, et bien d'autres [2,3]. Aujourd'hui, le procédé LPCS souffre toutefois d'un taux de rejet de poudres trop important (>60%) à cause d'une déficience cinématique pour la granulométrie des poudres préconisées, malgré plusieurs études exploratoires [4-8]. Le comportement de l'écoulement est l'une des principales caractéristiques qui confèrent aux poudres des vitesses élevées de façon à promouvoir une bonne liaison mécanique lors de la collision balistique en réduisant en cela leur taux de rejet. Pour optimiser l'efficacité de déposition, il est alors indispensable de mieux cerner le comportement de l'écoulement du gaz compressible en projection à froid. Dans la littérature, quelques travaux ont été consacrés à l'analyse phénoménologique de cet écoulement. On consacrera une partie pour une restitution brève de l'ensemble des connaissances fondamentales qui en résultent afin de positionner la contribution de ce papier dont le contenu consiste à analyser la dynamique de l'écoulement supersonique fluide/particule lors de la projection à froid pour bien appréhender les meilleures conditions de projection à basse pression.

2. Revue succincte sur le comportement fluide de la projection LPCS

Dans la littérature de la projection à froid, le comportement phénoménologique de l'écoulement supersonique a beaucoup été étudié expérimentalement au moyen d'une observation strioscopique. Efficace depuis les premières modernisations de la projection à froid dans les années 1990, cette méthode ne permet toutefois d'observer que les discontinuités de densité au sein de l'écoulement compressible, ce qui a conduit malgré cela, à une caractérisation riche des phénomènes d'onde de chocs qui se produisent à cause de la détente du gaz depuis l'intérieur de la buse jusqu'à l'extérieur. Des descriptions claires sur la formation des ondes de choc et de leurs structures dans l'écoulement ont été établies [4-7]. On a pu identifier des discontinuités abruptes révélant plusieurs structures dont les chocs obliques, les chocs incidents, les ondes de compression ou de détente, et les disques de Mach caractérisent l'écoulement compressible de la projection à froid en trois natures distinctes : l'écoulement sur-détendu, l'écoulement sous-détendu et le cas intermédiaire dit écoulement isentropique car sans présence d'onde de choc et en conséquence exempte de discontinuité brutale de vitesse et de température le long de l'écoulement. En travaillant à atmosphère ambiante à la sortie de la buse, la projection LPCS est en général de nature isentropique ou sur-détendu auquel cas les discontinuités apparaissent à l'intérieur de la buse, pouvant provoquer une forte élévation de température et ses conséquences indésirables comme le colmatage. Le cas isentropique est une situation de travail adéquat à obtenir en ajustant convenablement les paramètres de pressurisation du gaz, à l'aide d'essai virtuel à défaut de moyen d'observation strioscopique. La simulation numérique s'impose alors comme outil d'aide cruciale pour la recherche des conditions expérimentales favorables à une cinématique optimale des poudres avant leurs collisions balistiques sur le support. L'étude paramétrique à partir du modèle analytique d'écoulement isentropique 1D est une approche très répandue permettant de coupler facilement plusieurs données caractéristiques de buse, de poudres et de conditions opératoires, dans un calcul rapide pour établir différentes variantes de réponses [8,9]. C'est toutefois un moyen plutôt adapté à un prétraitement qu'à une analyse de l'écoulement réel laquelle requiert une simulation CFD.

Dans la littérature, les essais virtuels CFD utilisent souvent un calcul stationnaire basé sur une formulation RANS $k-\varepsilon$ pour prendre en compte la turbulence de l'écoulement. En général, cette approche donne une bonne description des ondes de chocs à l'extérieur de la buse [4,10–13], et une visualisation virtuelle des ondes de chocs interne comme celles en projection LPCS [12–14]. La simulation RANS $k-\varepsilon$ est en cela un outil d'aide à coût de calcul avantageux pour une identification phénoménologique d'un écoulement isentropique [13,14]. Cependant, dans les écoulements sur-détendus, les simulations couplant RANS $k-\varepsilon$ et phase discrète pour modéliser le comportement en vol des poudres montrent que les chutes brutales de vitesse dues aux ondes de choc n'affectent pas la cinématique des poudres lesquelles conservent leur énergie cinétique en poursuivant leur vol jusqu'à l'extérieur de la buse. Cette réponse est corroborée par plusieurs confrontations concordantes entre vitesse simulée des poudres et mesure vélocimétrique expérimentale à l'aide de système laser DVP2000. Les vitesses axiales des poudres sont souvent bien caractérisées ou prédites avec une incertitude de plus ou moins 20% en général. La simulation RANS $k-\varepsilon$ ne permet pas toutefois de reproduire le comportement turbulent réel de l'écoulement. La formulation à variable moyennée devient inadéquate pour simuler les fluctuations spatiales de l'écoulement dont l'influence phénoménologique sur la cinématique des poudres mérite un approfondissement. Cette limitation de l'approche RANS $k-\varepsilon$ permet d'envisager une simulation DNS pour bien cerner les turbulences et la réponse des poudres. Une analyse virtuelle de l'écoulement diphasique gaz/poudres est proposée dans ce papier. Elle est couplée à une observation dynamique par technique d'imagerie laser qui permet de visualiser les poudres dans le jet supersonique expérimental à la sortie de la buse. Ces investigations apporteront davantage de connaissances phénoménologiques sur la projection LPCS vers une identification des conditions opératoires pour un rendement de dépôt amélioré.

3. Caractérisation expérimentale du comportement réel des poudres

On peut caractériser le comportement des poudres micrométriques dans l'écoulement supersonique grâce à une visualisation dynamique ombroscopique (SprayCam). Les poudres sont rétro-éclairées à l'aide d'une lumière intense afin de générer une ombre projetée sur un capteur CCD pour une visualisation par imagerie haute résolution. La source lumineuse est produite par une série d'impulsion laser gérée par une diode (durée d'impulsion de 40 ns). Elle est synchronisée avec l'obturateur électronique à grande vitesse du capteur CCD (1024 pixels carrés avec une résolution spatiale de $16\mu\text{m}/\text{pixel}$) et avec un stroboscope pour permettre les captures des images rétro-éclairées. La visualisation des particules est effectuée avec un temps d'obturation de $1\mu\text{s}$ et une fréquence d'acquisition maximale de 20fps, c'est-à-dire une image toutes les 50ms. Ce dispositif convient pour des poudres de taille supérieure à $20\mu\text{m}$ et une vitesse maximale de 500m/s. Notre étude porte sur des poudres de cuivre sphérique de granulométrie à taille moyenne $d_{50}=50\mu\text{m}$ et un écoulement supersonique d'azote. Le jet de poudres est visualisé sur une fenêtre de $15\times 15\text{mm}^2$, incrémentée de 15mm à chaque observation pour couvrir en six zones une distance de 90mm en sortie de buse. La projection est réalisée sur un système portable travaillant à basse pression (DYMET 423), comprenant un pistolet de projection compact équipé d'un composant de chauffage par induction connecté à une buse De Laval qui peut préchauffer l'azote. Les poudres sont injectées radialement dans la buse par une aspiration créée au point d'injection. Les conditions opératoires de pressurisation de l'azote sont : une pression de 6bar et une température de préchauffage de 400°C .

Les images ombroscopiques permettent la visualisation des positions instantanées des poudres. Elles sont confinées en jet axial en sortie immédiate de la buse (Figure 1a). La taille du jet correspond à la prolongation du diamètre interne de la buse le long de l'écoulement. Au-delà d'une certaine distance, la position des poudres à l'extérieur de ce jet révèle une déviation radiale qui forme un jet progressivement dispersé (Figure 1b,c) vers une distribution

complètement éparse des poudres lors de la progression de l'écoulement dans l'atmosphère ambiante (Figure 1d-f). Cette cinématique évolutive caractérise un comportement phénoménologique décrit par un régime de confinement suivi d'un régime de dispersion le long de l'écoulement. Le régime de confinement forme un jet à diamètre quasi-uniforme et stable au voisinage immédiat de la buse puisque les poudres restent dans ce jet sur une courte distance (Figure 1a). Bien que le jet axial demeure dense en poudres, cette uniformité s'atténue dans une zone intermédiaire à cause d'une dispersion radiale et aléatoire de poudres (Figure 1b). Ce comportement phénoménologique marque la transition entre le jet confiné régulier et le régime dispersé aléatoire qui persiste en formant le jet très épars où les poudres sont très éparpillées (Figure 1c-f). C'est un comportement générique puisque les mêmes régimes de jet uniforme, dispersé et éparse se reproduisent dans d'autres cas de poudres [15]. Cette réponse cinématique des poudres en sortie de buse est un résultat nouveau dans la littérature de la projection à froid. Aussi, la compréhension des phénomènes qui la gouvernent apporte une contribution complémentaire. C'est l'objectif de cette étude qui privilégie un rôle de la turbulence de l'écoulement en cherchant à identifier des phénomènes prédominant à l'aide d'une simulation numérique CFD DNS comprenant une interaction fluide/poudres qui considère les poudres comme une phase discrète.

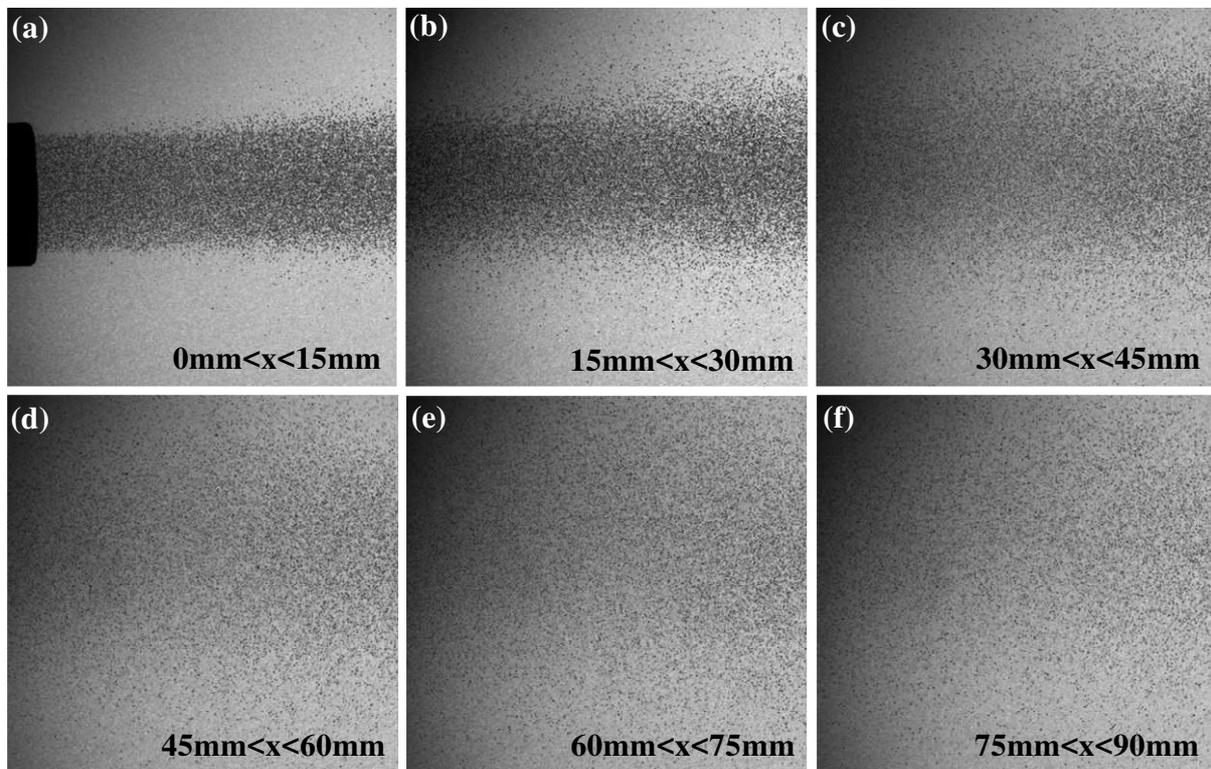


Figure 1 : Superposition d'images instantanées sur 5ms (100 images) montrant un jet quasi-uniforme en sortie immédiate de la buse (a), le début de déviation radiale de poudres (b), et le développement de jet éparse (c-e).

4. Turbulences de l'écoulement supersonique en sortie de buse

Le comportement des poudres dispersées en sortie de buse amène à étudier la nature de l'écoulement supersonique à cet endroit. La simulation CFD DNS présente l'intérêt particulier de pouvoir fournir des détails phénoménologiques des turbulences qui gouvernent cet écoulement, modélisé en 2D dans cette étude pour ne pas alourdir le temps de calcul. Le choix de la discrétisation spatio-temporelle du problème va également dans ce sens. Se mettre aux échelles caractéristiques décrites par le principe de Kolmogorov n'est pas envisageable en

raison des ressources trop substantielles imposées par une telle simulation. Le maillage du domaine d'écoulement est toutefois extrêmement raffiné pour simuler au mieux les turbulences phénoménologiques lors de la détente supersonique du gaz depuis l'intérieur de la buse vers l'extérieur, soit sur une longueur totale d'écoulement de 230mm. Avec un raffinement uniforme de 70 μ m, le domaine de calcul compte plus de 8.10⁵ nœuds. Le pas de temps de calcul est aussi fixé à une valeur extrêmement faible (10⁻⁶s) pour décrire au mieux l'évolution temporelle de la turbulence. Avec ce niveau de discrétisation, un calcul pour un temps total de 0.05s dure environ 36h sur un cluster dont les performances sont indiquées dans le tableau 1. La simulation CFD DNS de l'écoulement compressible est réalisée avec le code aux éléments finis Fluent, en utilisant le solveur basé sur la densité. La variation de la densité de l'azote obéit à la loi des gaz parfaits. L'azote est aussi modélisé par un fluide newtonien décrit par une viscosité thermo-dépendante selon la loi de Sutherland. L'équation de conservation de l'énergie utilise la formulation enthalpique.

Performance de calcul		Données de discrétisation			Temps de calcul et enregistrement			
RAM	Coeurs	Vitesse	Noeuds	Δt	Durée	Temps CPU	Fréquence	Volume
144GB	96	66 Tflops	$\sim 8.10^5$	1 μ s	0.05s	~ 36 Hrs	1ms	~ 25 GB

Tableau 1 : *Données de simulation et performance utilisées sur le cluster "Lumière" de la structure "Mésocentre de calcul" à l'université de Franche-Comté.*

L'écoulement en projection à froid est turbulent en général à cause du régime supersonique. Bien que la turbulence démarre à l'intérieur de la buse à cause du développement de couches limites pariétales, elle ne fait que s'amplifier en sortie de buse en raison du cisaillement provoqué par le jet supersonique. Il s'établit une interface cisailée entre le jet supersonique et le milieu ambiant développant une instabilité permanente tant que le jet supersonique est entretenu, c'est-à-dire, pendant l'opération de projection. A la sortie immédiate de la buse, les couches cisailées sur les parties inférieure et supérieure du jet supersonique génèrent des tourbillons confinés à variation chaotique dans le temps (Figure 2a,b), en évoluant de manière alternée en haut et en bas de l'écoulement. La variation temporelle des vitesses à ces endroits montre une fluctuation irrégulière avec une amplitude plus importante sur la partie haute que sur la partie basse alors que la vitesse dans la zone centrale du jet varie à faible amplitude puisqu'elle est éloignée de la zone cisailée (Figure 3). La récurrence de ce régime instable à la sortie immédiate de la buse entraîne une déformation continue du jet laquelle demeure toutefois faible et assez stable en raison de la vitesse axiale élevée du jet à cet endroit qui y force l'écoulement axialement. Ce régime de jet stable s'établit sur une courte distance de façon analogue au régime de jet uniforme de poudres observé expérimentalement. Il s'en suit une transition brutale vers un régime de jet chaotique. L'écoulement supersonique développe brutalement un jet fortement oscillatoire caractérisé par la formation d'une allée de vortex (Figure 4a) où le taux de rotation varie jusqu'à 10⁵/s (Figure 4b) révélant ainsi une variation cinématique sévère. Cette zone fortement turbulente correspond à la zone expérimentale de dispersion des poudres. Ces corroborations mettent en évidence un rôle essentiel de la turbulence phénoménologique de l'écoulement supersonique dans le comportement en vol des poudres. C'est bien un effet phénoménologique qui développe les régimes successifs de jet uniforme de poudres puis de jet progressivement éparés. Toutefois, la turbulence de l'écoulement uniquement ne permet pas d'expliquer ces régimes de comportement des poudres. Avec une formulation d'interaction standard fluide/particule gouvernée par une force de traînée, la trajectoire des poudres demeure rectiligne le long de l'écoulement. La composante radiale de la vitesse du fluide dans la zone turbulente ne parvient pas à dévier les poudres de manière à ce qu'elles soient dispersées radialement à l'extérieur de l'écoulement (Figure 4c). Il existe une autre force inertielle à identifier.

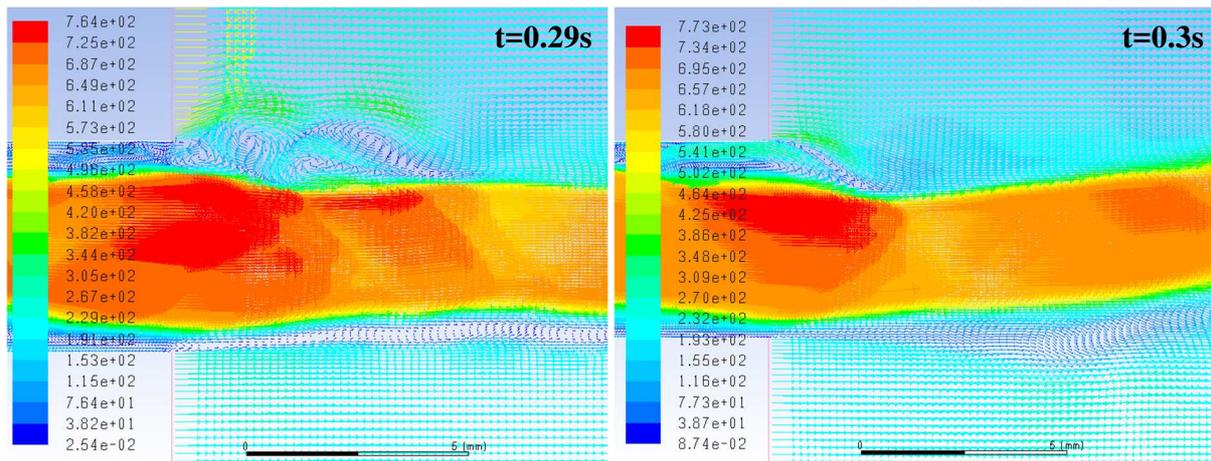


Figure 2 : Isovaleurs de vitesse (m/s) montrant des couches cisailées sur les parties extérieures du jet supersonique qui génèrent des tourbillons confinés à variation chaotique dans le temps.

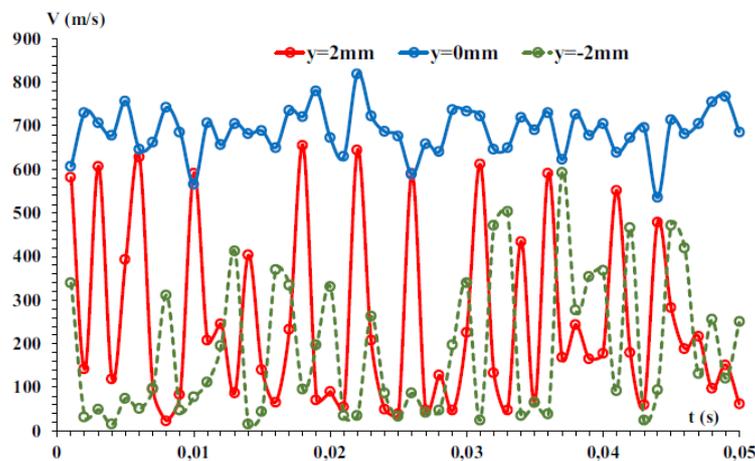


Figure 3 : Variation temporelle de vitesse et gradient radial à la section de sortie de la buse.

5. Analyse phénoménologique de l'interaction cinématique fluide/poudres

Les notions de physique ont montré qu'une sphère peut dévier sa trajectoire curviligne si elle tourne sur elle-même dans son mouvement. La déviation est due à une différence de pression créée autour de la sphère par cette rotation. On parle d'effet Magnus dont le modèle de force de portance se distingue fondamentalement du modèle standard de force de trainée par deux paramètres : un coefficient de portance rotationnelle et une vitesse angulaire relative fluide-particule (voir équation 1). Bien qu'il soit difficile de mettre en évidence un gradient de pression sur les distances infinitésimales à l'échelle des poudres micrométriques en projection à froid, on peut toutefois envisager cette force inertielle de Magnus gouvernée par la distribution de vitesse rotationnelle au sein de l'écoulement dont le taux de variation que nous avons déjà indiqué est très élevé (Figure 4b). L'ajout de cette force complémentaire à la force de trainée permet de reproduire le comportement phénoménologique des poudres observé expérimentalement (Figure 4d). On retrouve clairement le régime de jet de poudre uniforme sur une courte distance en sortie de buse, et le jet progressivement éparse qui s'en suit. La simulation numérique reproduit aussi la tendance prédominante de déviation ascendante. Les poudres de taille supérieure s'agglomèrent préférentiellement vers le haut. Les images ombroscopiques montrent la même tendance en affichant une dispersion plus dense dans la partie supérieure de la fenêtre d'observation lorsque les poudres commencent à sortir du jet central initialement dense. Cette comparaison concordante suggère un rôle physiquement

réaliste d'un effet Magnus sur le comportement cinématique des poudres. La trajectoire des poudres est déviée par une force inertielle gouvernée par une vitesse rotationnelle.

$$\vec{F}_{ML} = \frac{\pi D_p^2}{8} \rho_g C_{ML} \frac{|\vec{V}|}{|\vec{\Omega}|} (\vec{V} \wedge \vec{\Omega}) \quad (1)$$

où D_p , ρ_g , C_{ML} , V et Ω représente respectivement le diamètre de la particule, la densité du gaz, le coefficient de portance par effet Magnus, la vitesse relative gaz/poudre, et la vitesse relative de rotation gaz/poudre.

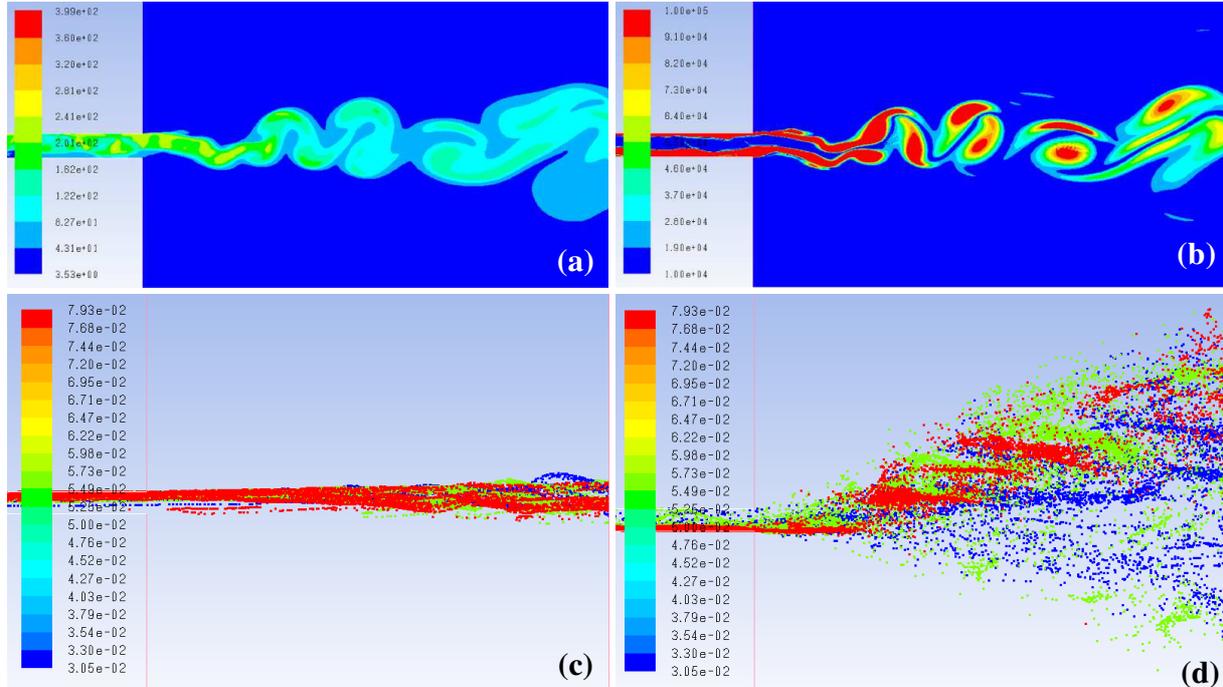


Figure 4 : Turbulence chaotique révélée par le champ thermique en °C (a) et le champ de taux de rotation en s^{-1} (b). Effet sur le comportement des poudres. Simulation sans effet Magnus (c) et avec effet Magnus (d). La légende sur les figures (c) et (d) désigne la taille des poudres en μm .

6. Conclusion

Cette étude porte sur la caractérisation phénoménologique de l'écoulement supersonique du gaz et des poudres micrométriques en projection à froid, à l'aide d'une observation expérimentale par ombroscopie dynamique couplée à une simulation CFD DNS. En dehors de la buse, l'écoulement oscille faiblement sur une certaine distance avant de devenir complètement instable à cause d'un développement de couche cisailée à l'interface du jet sortant de la buse et l'atmosphère ambiante. L'amplitude des oscillations augmente subitement montrant une transition nette entre la zone de faible instabilité et une zone à forte turbulence. Ces observations sont corroborées par la visualisation expérimentale du jet de poudres. Leur distribution est d'abord confinée en sortie de buse avant d'être éparse lorsqu'on s'en éloigne d'une certaine distance pour devenir complètement dispersée. Cette dispersion est directement liée à la turbulence en sortie de buse puisqu'elle débute au même endroit d'apparition de l'oscillation entretenue par l'écoulement cisailé où prévaut un taux de rotation fluctuant jusqu'à $10^6 s^{-1}$. Le jet dispersé des poudres est imputable à cette rotation qui crée alors un effet Magnus déviant la trajectoire des poudres. La simulation avec une force de Magnus reproduit clairement le régime de jet de poudres uniforme sur une courte distance en sortie de buse, et le jet progressivement épars qui s'en suit. Elle met aussi en évidence une sensibilité de la déviation à la taille des poudres qui mérite davantage d'approfondissement.

Références

- [1] R.N. Raelison, Coeval Cold Spray Additive Manufacturing Variance and Innovative Contributions, *Cold-Spray Coatings: Recent Trends and Future Perspectives*, Springer International Publishing, Cham, (2018), 57–94.
- [2] R.N. Raelison, Ch. Verdy, H. Liao, Cold gas dynamic spray additive manufacturing today: Deposit possibilities, technological solutions and viable applications, *Mat. Des.*, 133 (2017), 266–287.
- [3] R.N. Raelison, Y. Xie, T. Sapanathan, M.P. Planche, R. Kromer, S. Costil, C. Langlade, Cold gas dynamic spray technology: A comprehensive review of processing conditions for various technological developments till to date, *Additive Manufacturing*. 19 (2018), 134–159.
- [4] X.-J. Ning, J.-H. Jang, H.-J. Kim, The effects of powder properties on in-flight particle velocity and deposition process during low pressure cold spray process, *Applied Surface Science*. 253 (2007), 7449–7455.
- [5] Y.T.R. Lee, H. Ashrafizadeh, G. Fisher, A. McDonald, Effect of type of reinforcing particles on the deposition efficiency and wear resistance of low-pressure cold-sprayed metal matrix composite coatings, *Surface and Coatings Technology*. 324 (2017), 190–200.
- [6] M. Kulmala, P. Vuoristo, Influence of process conditions in laser-assisted low-pressure cold spraying, *Surface and Coatings Technology*. 202 (2008), 4503–4508.
- [7] G. Huang, H. Wang, X. Li, L. Xing, J. Zhou, Deposition efficiency of low pressure cold sprayed aluminum coating, *Materials and Manufacturing Processes*. 0 (2017), 1–7.
- [8] R.N. Raelison, E. Aubignat, M.-P. Planche, S. Costil, C. Langlade, H. Liao, Low pressure cold spraying under 6bar pressure deposition: Exploration of high deposition efficiency solutions using a mathematical modelling, *Surface and Coatings Technology*. 302 (2016), 47–55.
- [9] R.N. Raelison, Analytical description of solid particles kinematics due to a fluid flow and application to the depiction of characteristic kinematics in cold spraying, *Powder Technology*. 319 (2017), 191–203.
- [10] B. Samareh, O. Stier, V. Lüthen, A. Dolatabadi, Assessment of CFD Modeling via Flow Visualization in Cold Spray Process, *J Therm Spray Tech.*, 18 (2009), 934–943.
- [11] J. Pattison, S. Celotto, A. Khan, W. O’Neill, Standoff distance and bow shock phenomena in the Cold Spray process, *Surface and Coatings Technology*. 202 (2008), 1443–1454.
- [12] X.-J. Ning, Q.-S. Wang, Z. Ma, H.-J. Kim, Numerical Study of In-flight Particle Parameters in Low-Pressure Cold Spray Process, *J Therm Spray Tech.*, 19 (2010), 1211–1217.
- [13] M.-W. Lee, J.-J. Park, D.-Y. Kim, S.S. Yoon, H.-Y. Kim, S.C. James, S. Chandra, T. Coyle, Numerical Studies on the Effects of Stagnation Pressure and Temperature on Supersonic Flow Characteristics in Cold Spray Applications, *J Therm Spray Tech.*, 20 (2011), 1085–1097.
- [14] M.W. Lee, J.J. Park, D.Y. Kim, S.S. Yoon, H.Y. Kim, D.H. Kim, S.C. James, S. Chandra, T. Coyle, J.H. Ryu, W.H. Yoon, D.S. Park, Optimization of supersonic nozzle flow for titanium dioxide thin-film coating by aerosol deposition, *Journal of Aerosol Science.*, 42 (2011), 771–780.
- [15] L.L. Koithara, R.N. Raelison, S. Costil, Flow phenomenon of micron-sized particles during cold spray additive manufacturing: High-speed optic observation and characterization, *Advanced Powder Technology*. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.12.037>.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à la structure “Mésocentre de calcul” de l’université de Franche-Comté pour l’accès crucial au cluster “Lumière” qui a permis d’obtenir les résultats présentés dans ce manuscrit.