

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DÉPARTEMENT MÉTALLURGIE



Centre de Développement des Technologies Avancées

Mémoire de Projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des matériaux

Etude expérimentale et numérique du Cold Spray du cuivre

présenté par :

KACIMI Amira
LAZEREGUE Hiba

Présenté et soutenu publiquement le 20/09/2020 devant le jury composé de :

Président	M. DAIMELLAH Abderrahmane	MCA	ENP
Encadreur	Pr. HELLAL Fatah	Professeur	ENP
Co-Encadreur	Melle. BOUHELAL Nadjjet	Chercheur	CDTA
Examineur	M. KASSER Madjid	MCA	ENP
Examineur	M. SEDJAL Hamid	MCA	ENP

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DÉPARTEMENT MÉTALLURGIE



Centre de Développement des Technologies Avancées

Mémoire de Projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des matériaux

Etude expérimentale et numérique du Cold Spray du cuivre

présenté par :

KACIMI Amira
LAZEREGUE Hiba

Présenté et soutenu publiquement le 20/09/2020 devant le jury composé de :

Président	M. DAIMELLAH Abderrahmane	MCA	ENP
Encadreur	Pr. HELLAL Fatah	Professeur	ENP
Co-Encadreur	Melle. BOUHELAL Nadjjet	Chercheur	CDTA
Examineur	M. KASSER Madjid	MCA	ENP
Examineur	M. SEDJAL Hamid	MCA	ENP

ملخص :

الرش البارد هو طريقة للطلاء تستعمل غازاً أسرع من الصوت لرش جسيمات معدنية. هذه الجسيمات تُقَدَف في الحالة الصلبة على الركيزة لتُشكَل طلاءً كثيفاً. الجزء التجريبي في هذه الدراسة يعرض خصائص الطلاء بالنحاس على ركيزة من الفولاذ منخفض الكربون. النتائج التجريبية تؤكد على أذ الطلاء باستعمال الرش البارد يملك كثافة عالية، وأن صلابته ترتفع نتيجة القذف المستمر للجسيمات على الركيزة. النتائج الرقمية تؤكد على أذ سرعة التدفق تزيد عند استعمال غاز خفيف، مسخن مسبقاً، وذو ضغط مرتفع. كما أنها توضح دور فوهة دولافال في وصول التدفق إلى سرعة أكبر من سرعة الصوت.

الكلمات المفتاحية: الرش البارد، طلاء بالنحاس، فوهة دولافال،

Abstract :

Cold Spray is a coating process in which metallic particles are deposited using a supersonic propellant gas. The particles, projected in the solid state, impact the substrate to form a dense coating. The experimental part of this study shows the characteristics of copper coatings on a low-carbon steel substrate. Experimental results confirm that Cold Spray coatings have a high density, and are hardened by cold working caused by the bombarding of particles on the substrate. The numerical results prove that the flow velocity is accelerated when the gas used is light, preheated and projected with a high pressure. Simulations also confirm that the De Laval nozzle geometry plays an important role in the acceleration of the gas to a supersonic level.

Key word : Cold Spray, Copper coating, De Laval nozzle.

Résumé :

La projection dynamique à froid est un procédé de déposition de particules métalliques à l'aide d'un gaz de propulsion accéléré à une vitesse supersonique. Les particules sont projetées à l'état solide et impactent le substrat en formant un dépôt dense. La partie expérimentale de cette étude expose les caractéristiques des dépôts de cuivre réalisés sur un substrat en acier à faible teneur en carbone. Les résultats expérimentaux confirment que les dépôts obtenus sont dotés d'une grande densité, et qu'ils sont durcis par écrouissage à cause du bombardement des particules. Les résultats numériques prouvent que la vitesse de l'écoulement est accélérée quand le gaz utilisé est léger, préchauffé et projeté à haute pression. Les simulations confirment aussi le rôle de la géométrie de la tuyère de Laval dans l'accélération du gaz jusqu'à des valeurs supersoniques.

Mots clés : Projection dynamique à froid, Projection du cuivre, Tuyère de Laval.

Remerciements

Nous remercions Dieu le tout puissant pour nous avoir données la santé, la force et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire malgré les circonstances de cette situation sanitaire.

Nous tenons à remercier notre encadreur, le Professeur Fatah HELLAL, pour tous les efforts qu'il a consenti pendant des mois pour nous aider et nous guider malgré la situation globale particulière et les obstacles qu'elle a engendrés.

Nous souhaitons également à exprimer notre profonde reconnaissance à Madame Nadjat BOUHELAL sans laquelle ce travail n'aurait pas évolué convenablement.

Nous remercions chaleureusement Dr. Abderrahmane DAIMELLAH pour avoir accepté de présider notre jury, ainsi que Dr. Majid KASSER et Dr. Hamid SEDJAL qui ont accepté d'examiner notre travail. Nos remerciements vont aussi à toute l'équipe pédagogique de l'Ecole Nationale Polytechnique qui a contribué à notre formation d'ingénieur pendant cinq ans.

Enfin, nous exprimons notre gratitude envers nos familles qui nous ont soutenues au long des années, sans faille.



Table des matières

Table des abréviations et sigles

Liste des tableaux

Table des figures

Introduction générale	12
1 Étude bibliographique sur la projection à froid	14
1.1 Généralité sur le processus	15
1.1.1 Le processus	15
1.1.2 Origine	15
1.1.3 Description du procédé	16
1.2 Paramètres influençant la projection à froid	16
1.2.1 Effet de la vitesse	16
1.2.2 Effet de la température	19
1.2.3 Effet du type de gaz	20
1.2.4 Effet de la géométrie de la tuyère de Laval (dispositif)	22
1.2.5 Influence de l'angle du tir	23
1.2.6 Influence de la distance du tir	25
1.2.7 Autres paramètres influençant le cold spray	26
1.3 Avantages et limites de la projection à froid	29
1.3.1 Principaux avantages de la projection à froid	29
1.3.2 Principales limites de la projection à froid	29
1.4 Applications de la projection à froid	29
2 Les dépôts Cold Spray	31
2.1 Formation du dépôt	32
2.1.1 Paramètres régissant l'adhésion des particules	32
2.1.2 Mécanisme de la formation du dépôt	35
2.1.3 Étapes de création du dépôt	37
2.2 Caractéristique du dépôt	38
2.3 Microstructure du dépôt	39
2.3.1 Microstructure de la poudre	39
2.3.2 Microstructure des dépôts réalisés par cold spray	40
2.4 Etude de cas : Dépôt en cuivre	42
3 Etude Bibliographique sur la Simulation	46
3.1 Modélisation de l'impact	47
3.1.1 Étapes de l'impact d'une particule	47
3.1.2 Etude de l'effet de l'angle de projection par méthode numérique	48

3.2	Modélisation des phénomènes de la dynamique des fluides	50
3.2.1	Exemple de modélisation CFD : Effet de la géométrie de la tuyère	50
4	Méthodologie et Caractérisation	52
4.1	Matériaux utilisés	53
4.1.1	Matériau de la poudre déposée : Le cuivre	53
4.1.2	Matériau du substrat : acier AISI 1020	53
4.2	Paramètres étudiés	54
4.2.1	La température du gaz propulseur :	54
4.2.2	La pression du gaz propulseur :	54
4.2.3	La distance du tir :	54
4.2.4	La préparation de la surface :	54
4.2.5	Les paramètres fixés	54
4.2.6	Récapitulatif	54
4.3	Moyens de Caractérisation	55
4.3.1	Microscope électronique à balayage	55
4.3.2	Dureté du dépôt	56
4.3.3	Diffraction des rayons X	60
5	Résultats et discussion	62
5.1	Présentation des résultats	63
5.1.1	Les images MEB :	63
5.1.2	Courbes des essais de nanoindentation :	65
5.1.3	Porosités et épaisseurs des dépôts	68
5.1.4	Autres résultats de la littérature :	68
5.2	Analyse et discussion :	69
5.2.1	Observation microscopique :	69
6	Modélisation de l'écoulement d'un Gaz dans la tuyère de Laval	76
6.1	Type d'écoulement étudié	77
6.2	Paramètres de simulation	77
6.2.1	Nature du gaz de propulsion	77
6.2.2	Géométrie de la tuyère	77
6.2.3	Conditions de stagnation	78
6.3	Aspect Numérique	78
6.3.1	Conception :	78
6.3.2	Maillages	79
6.3.3	Résultats numériques	80
6.4	Discussion	91
	Conclusion générale	92
	Références	93

Table des Abréviations et sigles

Cold Spray	
γ	Indice adiabatique d'un gaz
R	Constante des gaz parfait
M_w	Masse molaire d'un gaz
T	Température du gaz propulseur
σ_u	contrainte à la rupture du matériau.
ρ	Densité
T_m	Température de fusion
T_R	la température de référence (293 <u>K</u> ^o)
c_p	la chaleur spécifique.
V_c	Vitesse critique
A	Air de la section de la tuyère
A_p	Air de la section de la particule
C_D	Coefficient de la traînée
V_p	Vitesse des particules
E_{aw}	Energie d'activation de substrat
M	Nombre de Mach



Liste des tableaux

1.1	Propriétés physiques et couts qualitatifs des gaz potentiels pour le cold spray	21
2.1	Caractéristiques des dépôts réalisés en Cold Spray	39
4.1	Composition chimique de l'acier AISI 1020	53
4.2	Tableau résumant les conditions et paramètre des dépôts	54
5.1	Tableau résumant les duretés et les modules de Young	68
5.2	Tableau résumant les porosité et les épaisseurs des dépôts	68
6.1	Tableau récapitulatif de l'effet de la nature du gaz	86
6.2	Tableau récapitulatif de l'effet de la pression et de la température	88
6.3	Tableau récapitulatif de l'effet de la géométrie de tuyère	90

Table des figures

1.1	Schéma du procédé de projection dynamique à froid . Source : [2]	15
1.2	Schéma du système du Cold Spray. Source : [23]	16
1.3	Microphotographie de trois substrats polis en cuivre après leur interaction avec les particules en aluminium. a) $v_{pm} = 730m/s$; (b) $v_{pm} = 780m/s$ et (c) $v_{pm} = 850m/s$.. Source : [24]	17
1.4	Courbe de la déposition des particules en fonction de la vitesse des particules, avec la fenêtre de déposition.. Source : [20]	17
1.5	L'efficacité de déposition pour la poudre d'aluminium, du cuivre, du nickel accélérée par un mélange d'air et d'hélium (1-3) et par l'air préchauffé (4-6) en fonction de la vitesse des particules. Les courbes d'aluminium (1,4), de cuivre (2,5), et de nickel (3,6).. Source : [25]	20
1.6	Températures calculées de l'air et des particules en fonction de la distance le long de la buse. Source : [3]	20
1.7	tuyère de Laval vu en coupe. Source : [2]	22
1.8	Schéma explicatif de l'effet de la géométrie de la tuyère sur le dépôt. Source : [26]	23
1.9	schéma du dispositif expérimental du cold spray qui permet la variation de l'angle. Source : [27]	23
1.10	diagramme schématique de l'efficacité du dépôt en fonction de l'angle de projection.. Source : [28]	24
1.11	Composantes normale et tangentielle de la vitesse d'impact d'une particule.. Source : [2]	25
1.12	Effet de l'angle du tir sur la microstructure.. Source : [27]	25
1.13	Influence de la distance du tir sur la température. Source : [29]	26
1.14	Porosité et l'épaisseur du dépôt par couche en fonction de la vitesse de balayage. Source : [18]	27
1.15	la température du substrat en fonction du temps pour chaque vitesse de balayage. Source : [18]	27
1.16	Exemple de rebondissement des particules (a) schématique (b) image MEB. Source : [19]	28
1.17	Schéma représentant l'influence de la rugosité du substrat et la taille des particules. Source : [19]	28

2.1	Déformation des particules en aluminium sur un substrat de cuivre sous différentes vitesses d'impact : $v_a = 625$ m/s, $v_b = 730$ m/s, and $v_c = 850$ m/s.. Source : [30]	32
2.2	le temps d'induction en fonction de la vitesse d'impact des particules d'aluminium projetées sur un substrat en cuivre, $d_{pm} = 30.2$ μm , l'angle = 10-8. Source : [30]	33
2.3	Une surface activée par le bombardement des particules. Source : [30] .	34
2.4	Interaction particule substrat à $t = 5, 20, 35, 50$ ns. Source : [2]	36
2.5	Courbes déformations-contraintes dans un solide en déformations : isotherme, adiabatique, et localisée.. Source : [6]	36
2.6	Schéma de la localisation de la déformation par cisaillement adiabatique, (a) l'impact d'une particule en Cold Spray, (b) le soudage par explosion et/ou pulse magnétique, (c) bande de cisaillement sous compression . Source : [6]	37
2.7	Déformation progressive des particules impactantes.. Source : [2]	38
2.8	Images par MEB de la poudre atomisée par gaz, (a) la morphologie de la poudre, (b) la structure de la surface. Source : [2]	39
2.9	(a) Image par EBSD, (b) image par MET montrant l'existence des dislocations.. Source : [6]	40
2.10	Déformation de la structure granulaire de la particule. Source : [6]	41
2.11	Image d'une coupe transversale d'une particule de cuivre déposée par CS. Source : [6]	41
2.12	Illustration schématique de la microstructure à l'interface interparticulaire. Source : [11]	42
2.13	Image par MEB de la poudre de cuivre. Source : [6]	43
2.14	Image par MEB d'un dépôt de cuivre, le substrat est noir et le dépôt gris. Source : [6]	43
2.15	Images par MEB de la surfaces du dépôt de cuivre dans le cas du gaz de propulsion sous température de : (a)100 °C, (b)200 °C, (c)400 °C, (d)600 °C. Source : [11]	44
2.16	Image par MET d'un dépôt de cuivre par CS. Source : [11]	44
3.1	Simulation 2D de l'impact d'une particule en cuivre. Source : [22]	47
3.2	Evolution temporelle d'une particule percutant un substrat à (a) 4,4 ns (b) 13,2 ns (c) 22 ns et (d) 30,8 ns, mise en évidence des jets de matière et des déformations plastiques du système particule-substrat. Source : [31]	48
3.3	Simulation par la méthode lagrangienne de la déformation plastique d'une particule de cuivre heurtant un substrat de cuivre à 500 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ avec un angle d'incidence de (a) 90° , (b) 80° , (c) 70° , et (d) 60° . Source : [32]	49
3.4	Simulation par la méthode SPH de la déformation plastique d'une particule de cuivre heurtant un substrat de cuivre à 500 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Source : [33]	49
3.5	Schéma des sections utilisées dans l'étude. Source : [34]	50
3.6	(a) pression du gaz (b) vitesse pour des géométries différentes . Source : [34]	51
4.1	Morphologie de la poudre de cuivre. Source : [6]	53
4.2	Appareil : Jeol JSM 6360.	55
4.3	Courbe charge-décharge de la nanonindentation. Source : [35]	56
4.4	Indent à géométrie Berkovich. Source : [35]	57

4.5	Indent à géométrie sphérique. Source : [35]	57
4.6	Indent à géométrie conique. Source : [35]	58
4.7	Nanoindentation tester (NHT) de CSM. Source : [35]	58
4.8	Schéma d'un Indent Berkovich pénétrant un échantillon. Source : [35]	59
4.9	Calcul de S à partir de la courbe. Source : [35]	60
4.10	diagramme de diffraction des rayons X d'un revêtement en CuSn6 réélisé par CS.	61
5.1	Images MEB G x150 : a) échantillon 1 b) échantillon 2 c) échantillon 3 d)échantillon 4.	63
5.2	Images MEB G x350 : a) échantillon 1 b) échantillon 2 c) échantillon 3 d)échantillon 4.	64
5.3	Images MEB G x1000 : a) échantillon 1 b) échantillon 2 c) échantillon 3 d)échantillon 4.	65
5.4	Echantillon 01.	66
5.5	Echantillon 02.	66
5.6	Echantillon 03.	67
5.7	Echantillon 04.	67
5.8	diagramme DRX du cuivre (à gauche) et du dépôt (à droite). Source : [20]	68
5.9	Image d'un dépôt Cu sur substrat en acier : (a) sans attaque chimique (b) avec attaque chimique. Source : [6]	69
5.10	Échantillon 4 x1000.	70
5.11	Échantillon 2 x1000.	70
5.12	Échantillon 3 x1000.	71
5.13	Image MEB d'une particules de Nickel qui décolle d'un substrat en acier 316L.	71
5.14	Micrographie des dépôts en cuivre déposés à des distances de : a) 10 mm b)30 mm d)70 mm e) 90 mm f) 110 mm. Source : [21]	73
5.15	Schéma descriptif de a) le flux du gaz dan la tuyère b) l'accélération d'une particule.	74
5.16	Vitesse des particules et coefficient de trainée en fonction du rapport A_e/A de la tuyère.	74
6.1	Géométrie de la tuyère 1.	79
6.2	Géométrie de la tuyère 2.	79
6.3	Maillage de la tuyère 1.	80
6.4	Maillage de la tuyère 2.	80
6.5	Variation du nombre de Mach.	81
6.6	Variation de la vitesse.	81
6.7	Variation de la pression.	82
6.8	Variation de la température.	82
6.9	Variation du nombre de Mach.	83
6.10	Variation de la vitesse.	83
6.11	Variation de la pression.	84
6.12	Variation de la température.	84
6.13	Variation du nombre de Mach.	85
6.14	Variation de la vitesse.	85
6.15	Variation de la pression.	86
6.16	Variation de la température.	86

6.17	Variation de la vitesse $P_0 = 1\text{Mpa}$ $T_0 = 300\text{ k}$	87
6.18	Variation de la vitesse $P_0 = 2.5\text{ Mpa}$ $T_0 = 600\text{ k}$	87
6.19	Variation de la vitesse $P_0 = 3\text{ Mpa}$ $T_0 = 700\text{ k}$	88
6.20	Variation du nombre $R_{s1} = 70\text{ mm}$	89
6.21	Variation de la vitesse $R_{s1} = 70\text{ mm}$	89
6.22	Variation du nombre de Mach $R_{s2} = 100\text{mm}$	90
6.23	Variation de la vitesse $R_{s2} = 100\text{mm}$	90



Introduction générale

Les traitements de surface sont des opérations chimiques, électrochimiques, mécaniques, ou physiques qui visent à améliorer les propriétés des surface des matériaux afin qu'ils soient mieux adaptés aux conditions dans lesquelles ils vont être utilisés, et ce dans le but de maximiser leurs durées de vie et d'optimiser leurs performances.

Les techniques de traitements de surface sont très variées : quelques-unes parmi elles sont basées sur l'accroissement de la teneur en un élément chimique particulier dans la couche superficielle de la pièce en question, comme : la boruration, la nitruration, la cémentation, etc.

D'autres méthodes, dont la projection thermique, font appel à un matériau d'apport qui doit être fondu puis projeté sur la surface de la pièce grâce à un gaz vecteur. Le dépôt est formé par empilement successif des gouttelettes du matériau projeté, et son adhérence est souvent assurée par voie mécanique.

La projection thermique englobe une famille de procédés : calorifiques (par flamme), électriques (par plasma ou arc électrique), et cinétiques (par projection à froid)

Tous les procédés de projection thermique, sauf la projection à froid, sont basés sur la déposition de particules en fusion, car au reste des traitements le cold spray se fait à de basse température.

Ce mémoire est consacrée à l'étude de la projection dynamique à froid, qui est un procédé de déposition de particules solides par projection à froid à l'aide d'un gaz propulseur de vitesse supersonique. Les particules projetées impactent la surface du substrat, se déforment, et forment un dépôt dense grâce aux mécanismes d'adhésion. L'intérêt de la projection dynamique à froid est dû à l'importance qu'elle a acquise grâce à ses nombreux avantages et applications dans l'industrie d'aujourd'hui.

Dans le premier chapitre, l'étude bibliographique explique le procédé de la projection à froid, et expose ses caractéristiques, les paramètres qui le gouvernent, et ses avantages et applications.

Le deuxième chapitre aborde avec plus de précision les dépôts réalisés par projection à froid en expliquant les mécanismes de leur formation et adhésion. Une étude des dépôts de cuivre par Cold Spray complète ce chapitre avec une description de leur microstructure. Dans le troisième chapitre, on expose brièvement les méthodes numériques de la simulation de la projection à froid.

Le quatrième chapitre est consacré à la partie expérimentale de cette étude. On y décrit les matériaux utilisés, les paramètres expérimentaux, et les outils employés pour la caractérisation des échantillons.

Les résultats expérimentaux sont présentés dans le cinquième chapitre, et les résultats de la simulation sont exposés dans le sixième chapitre.

Étude bibliographique sur la projection à froid

1.1 Généralité sur le processus

1.1.1 Le processus

La projection dynamique à froid, communément appelée « la projection à froid » ou « Cold Spray », est un procédé de projection thermique qui permet le revêtement des substrats métalliques et céramiques en donnant des structures denses et pures. Ce procédé est utilisé pour réaliser des dépôts en projetant un jet de particules fines (1-50 μ m) entraîné par un gaz comprimé à très hautes vitesses (300-1200 m/s), sans que le métal projeté atteigne la température de fusion. Le dépôt est obtenu grâce à l'empilement successif des particules solides aplaties.

La différence entre la projection à froid et les autres procédés de projection thermique réside essentiellement dans le fait que les particules soient projetées à l'état solide dans le cas de la projection à froid, et c'est la raison pour laquelle le terme « à froid » a été introduit en dépit du chauffage du gaz [1].

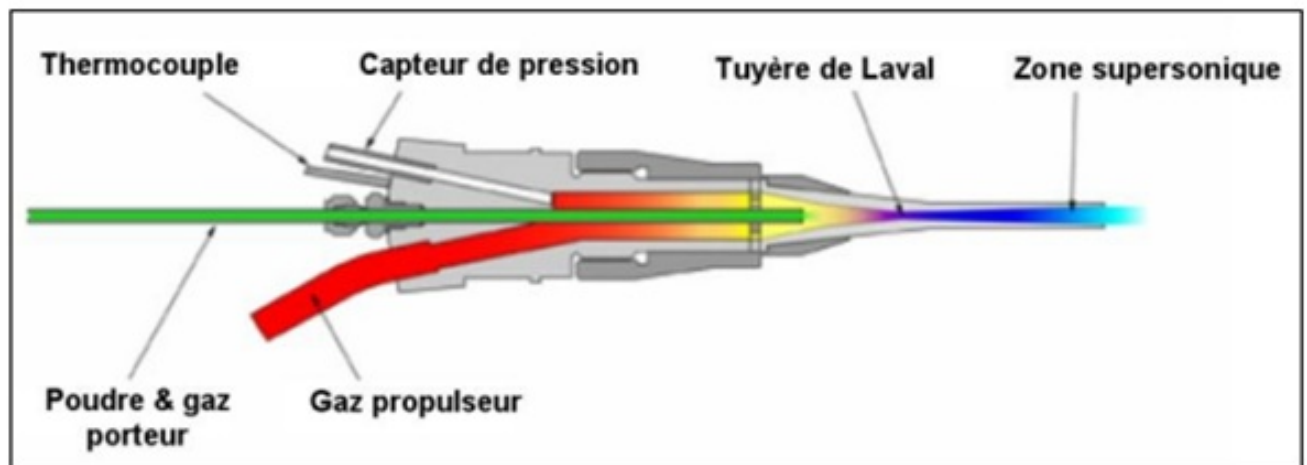


FIGURE 1.1 – Schéma du procédé de projection dynamique à froid . Source : [2]

1.1.2 Origine

La technologie de la projection à froid a été découverte dans les années 1980 dans l'Institut de Mécanique Théorique et Appliquée de la division sibérienne de l'Académie des sciences de Russie lors de l'étude des modèles soumis à des flux supersoniques biphasés.

Durant cette période, la communauté scientifique croyait que la fusion des particules était nécessaire pour la formation du dépôt. Or, la projection à froid a prouvé la possibilité de l'obtention de dépôts en travaillant dans des températures inférieures aux points de fusion des matériaux utilisés.

1.1.3 Description du procédé

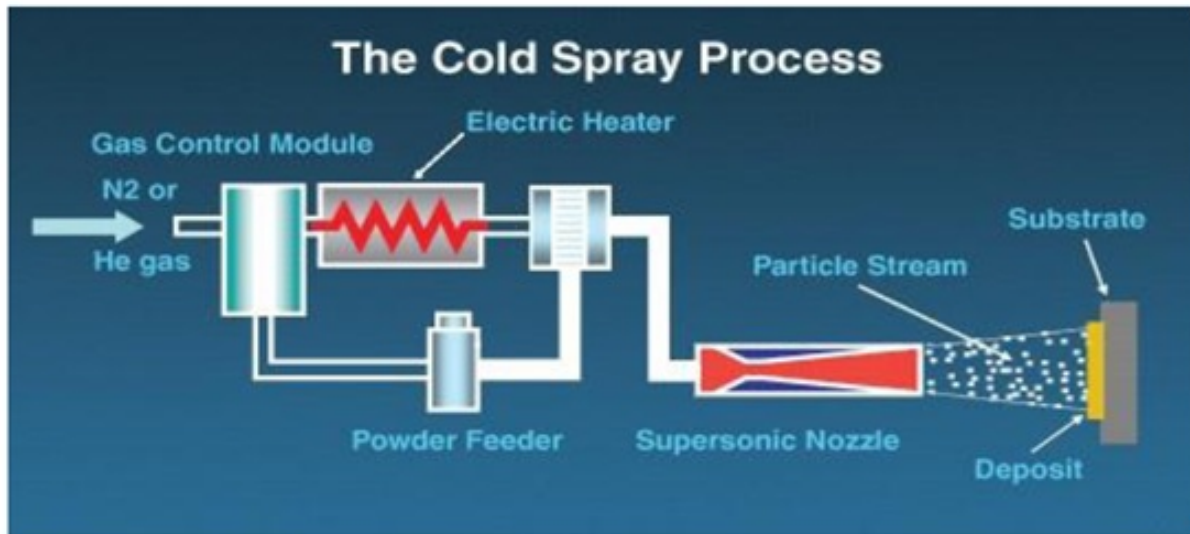


FIGURE 1.2 – Schéma du système du Cold Spray. Source : [23]

Le système du Cold Spray se compose d'un système d'amenée de gaz à haute pression, d'un système de chauffage de gaz, d'un distributeur de poudre et d'une console de contrôle (fig. 3). Le procédé de projection à froid utilise en général l'hélium, l'azote et /ou l'air en tant que gaz propulseurs. L'utilisation de l'azote est conseillée pour éviter l'oxydation du matériau, et l'hélium permet d'atteindre des vitesses plus élevées grâce à sa légèreté.

Le flux du gaz est d'abord préchauffé et comprimé, puis amené à travers une tuyère du type De Laval (convergente divergente) où il acquiert une vitesse supersonique. La poudre, délivrée par le distributeur de poudre vers la buse, est transportée par le jet de gaz vers la surface du substrat. Le temps de séjour des particules dans le gaz chaud est tellement bref que leur température reste toujours très inférieure à la température de préchauffage [2].

Les paramètres de contrôle du procédé (débit du gaz, la pression, le débit de la poudre, etc.) sont régis par la console de contrôle.

1.2 Paramètres influençant la projection à froid

1.2.1 Effet de la vitesse

Contrairement aux autres procédés de projection thermique, la projection à froid ne dépend que peu de l'énergie thermique, et se base surtout sur l'énergie cinétique. Dans ce cas, la formation du dépôt n'est pas effectuée par fusion de particules mais plutôt à cause de la déformation qu'elles subissent à l'impact grâce à leur vitesse supersonique.

L'étude de l'influence de la vitesse des particules a montré l'existence de deux domaines caractéristiques séparés par une vitesse critique v_{cr} . Pour des valeurs inférieures à v_{cr} , la projection des particules provoque l'érosion du substrat par la collision des particules solides avec le substrat à température ambiante. Cependant, quand la vitesse des particules atteint des valeurs supérieures à v_{cr} , les observations ont reporté l'existence d'un passage de l'érosion à la formation du dépôt avec une augmentation de l'efficacité de dépôt de 50 à 70% grâce à l'augmentation de la probabilité de l'accroche des particules due à l'amélioration de l'adhérence des particules accélérées au substrat (figure (1.3))

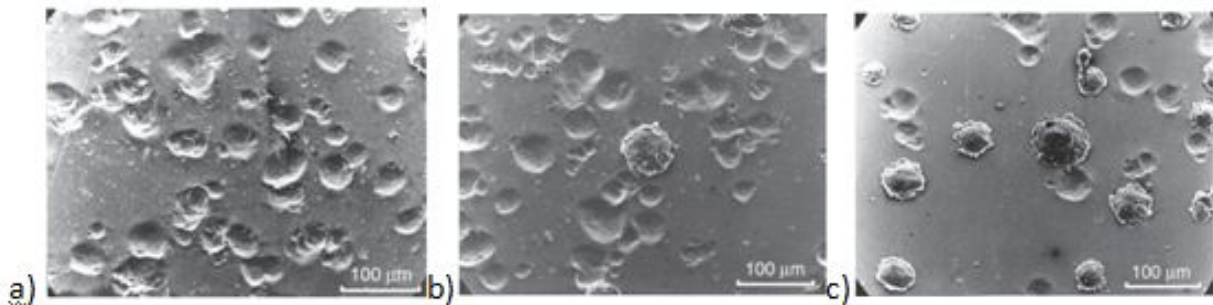


FIGURE 1.3 – Microphotographie de trois substrats polis en cuivre après leur interaction avec les particules en aluminium. a) $v_{pm} = 730\text{m/s}$; b) $v_{pm} = 780\text{m/s}$ et c) $v_{pm} = 850\text{m/s}$.. Source : [24]

Cependant, lorsque la vitesse des particules dépasse certaines valeurs, on remarque une érosion donc il y a la vitesse critique, et une vitesse maximale pour des valeurs supérieure à cette dernière il y a donc une érosion, on définit dans ce cas , une fenêtre de dépôt : c'est la courbe en (figure(1.4)).

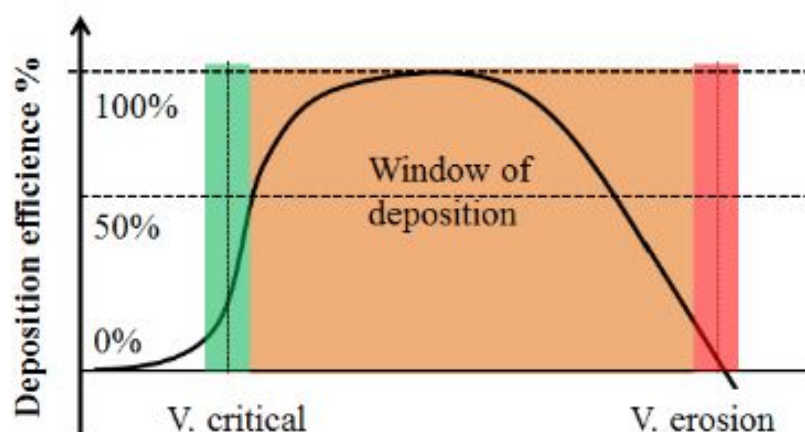


FIGURE 1.4 – Courbe de la dépôt des particules en fonction de la vitesse des particules, avec la fenêtre du dépôt.. Source : [20]

Plusieurs facteurs influencent la vitesse des particules, comme :

- La température du gaz propulseur.
- La pression du gaz propulseur.
- La taille des particules.
- L'interaction des particules avec l'onde de l'arc de choc à la surface du substrat.

La relation qui décrit la vitesse du son dans un gaz la tuyère est :

$$v = (\gamma RT / M_w)^{1/2} \quad (1.1)$$

Où :

- γ est l'indice adiabatique du gaz propulseur.
- R est la constante des gaz parfaits (8314 J/kmolK).
- T est la température du gaz propulseur.
- M_w est la masse moléculaire du gaz propulseur.

Donc pour augmenter la vitesse du gaz, et par conséquent la vitesse des particules, il suffit d'augmenter la température du gaz, sa pression ou alors choisir un gaz relativement léger tel que l'hélium. la vitesse critique dépend autant sur les conditions de déposition que sur les propriétés du matériau déposé, en effet Assidi et al par outils numérique a proposé une expression qui permet de prédire la vitesse critique [1]

$$V_c = 667 - 0.014\rho + 0.08(T_m - T_R) + 10^{-7}\sigma_u - 0.4(T_i - T_R). \quad (1.2)$$

Cette equation a été amélioré par Gram-Schmidt et al en tenant en compte les propriétés thermique ainsi que la taille des particules [17] :

$$V_c = \sqrt{\frac{4F_1\sigma_u}{\rho} \left(1 - \frac{T_i - T_R}{T_m - T_R}\right) + F_2c_p(T_m - T_i)}. \quad (1.3)$$

Avec

- σ_u est la contrainte à la rupture du matériau.
- ρ est la densité du matériau.
- T_i est la température initiale.
- T_m est la température de fusion.
- T_R est la température de référence (293 K°).
- c_p la chaleur spécifique.
- F_1 et F_2 sont des coefficients de calibration servant à se recalibrer sur des valeurs de vitesse mesurées.

1.2.2 Effet de la température

La température des particules est aussi importante que la vitesse critique, les deux servent à évaluer la possibilité de la production du dépôt. Pendant que la vitesse définit la quantité de l'énergie cinétique disponible pour provoquer la déformation plastique, la température des particules détermine leurs propriétés mécaniques au moment de l'impact.

[3]. L'utilisation d'un jet d'air pur à température ambiante ne permet pas la formation des dépôts pour la majorité des matériaux. Par conséquent, plusieurs investigations ont été conduites avec un jet d'air légèrement chauffé afin d'augmenter la vitesse du gaz, et donc celle des particules [1].

La température du flux du gaz est toujours inférieure au point de fusion du matériau utilisé en Cold Spray, et le dépôt résultant est formé à l'état solide. Et comme l'adhésion de la poudre métallique au substrat et la cohésion du matériau déposé sont accomplies à l'état solide, les caractéristiques du dépôt effectué par projection à froid sont uniques.

Les études montrent que l'augmentation de la température de stagnation fait accroître la vitesse du gaz qui entraîne les particules. L'énergie cinétique acquise grâce à cela est ensuite transformée en chaleur et en énergie de déformation assurant le succès de la formation du revêtement couche par couche. La température influe aussi sur les propriétés d'élasticité des matériaux, et peut provoquer un adoucissement du matériau facilitant le mécanisme d'adhérence, et ce soit en augmentant la température du gaz ou en préchauffant le substrat.

Ces observations ont permis de conclure que le préchauffage léger subis par le jet de gaz permet de baisser la valeur de la vitesse critique v_{cr} et d'élargir le domaine de matériaux projetables avec un jet d'air [1].

Pour appuyer ces conclusions, des études ont été effectuées pour comparer entre l'efficacité de l'utilisation d'un jet supersonique contenant un mélange d'air (azote) et d'hélium avec une température de stagnation de 300 K, et l'utilisation d'un jet d'air (azote) supersonique préchauffé ($T \leq 500 - 600$ K). Les résultats illustrés dans la (figure (1.5)) montrent l'utilité du préchauffage dans l'amélioration de l'efficacité de déposition. Remarquons que l'augmentation de la température du jet fait accroître la vitesse des particules et leur température, et favorise l'obtention de vitesses critiques plus petites.

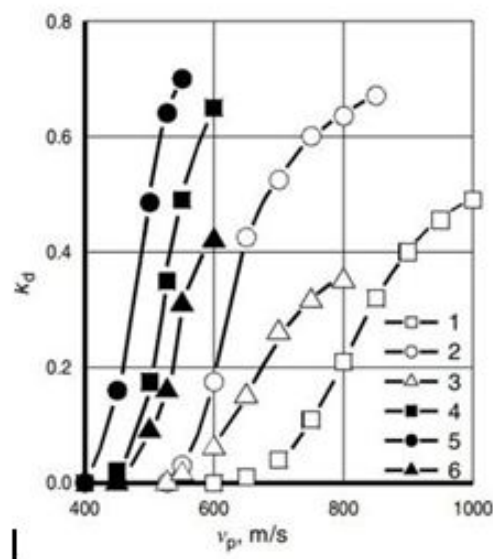


FIGURE 1.5 – L'efficacité de déposition pour la poudre d'aluminium, du cuivre, du nickel accélérée par un mélange d'air et d'hélium (1-3) et par l'air préchauffé (4-6) en fonction de la vitesse des particules. Les courbes d'aluminium (1,4), de cuivre (2,5), et de nickel (3,6).. Source : [25]

La figure (1.6) montre l'échauffement des particules en fonction de leur taille et distances de la buse, tel que les plus petites particules ($< 5\mu\text{m}$) se refroidissent au cours de leur passage par la tuyère, alors que les grosses particules ont des températures plus importantes que le reste.

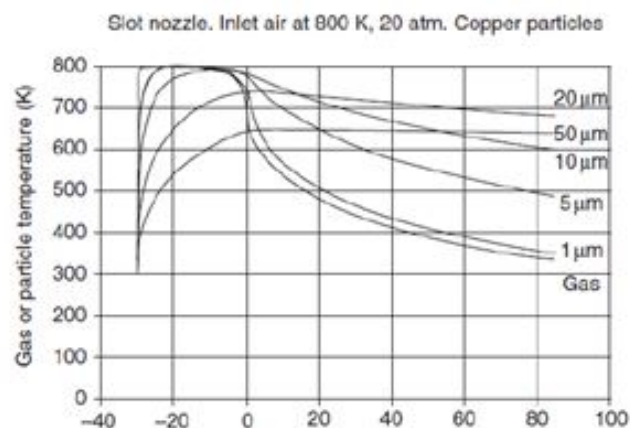


FIGURE 1.6 – Températures calculées de l'air et des particules en fonction de la distance le long de la buse. Source : [3]

1.2.3 Effet du type de gaz

Le gaz porteur est un facteur fondamental en cold spray, il permet le transport de la poudre, il accélère les particules de la poudre pour qu'ils atteignent une vitesse en dessus de la vitesse critique afin de réaliser le dépôt et la consolidation de la

poudre. Le gaz doit transférer aux particules, une énergie cinétique qui correspond à une vitesse super sonique, il doit aussi être inerte afin d'éviter le risque de réaction avec des poudre explosives. Le tableau ci-dessous résume les gaz qui peuvent être considérer pour le cold spray

:

Tableau 1.1 – Propriétés physiques et couts qualitatifs des gaz potentiels pour le cold spray

Gaz	Vitesse (m/s)	Densité du dépôt (kg/m^3)	Réactivité	Coût
Air	343	1.225	Réactif	Pas cher
Nitrogène (N_2)	349	1.185	Partiellement inerte	Pas cher
Hydrogène (H_2)	1303	0.085	Réactif	Cher
Argon (Ar)	319	1.69	Inerte	Cher
Hélium (He)	989	0.168	Inerte	Très cher

On remarque que la plus grande vitesse est atteinte si on utilise l'hydrogène, et pourtant c'est interdit de l'utiliser, et ce à cause du grand risque d'explosion ; À très grande vitesse et au contact avec l'air l'hydrogène se combure, en plus de ça son cout est cher. L'Argon est aussi cher et sa vitesse sonique est faible. En outre l'air et le moins cher mais il contient des gaz réactifs tel que l'oxygène. Donc les gaz les plus utilisé pour le cold spray sont l'Hélium et le Nitrogène. L'Hélium est un gaz inerte très léger, il peut donc atteindre de grande vitesse sans trop chauffer le gaz, mais il est très cher, ce qui ne le rend pas rentable pour des utilisations en industrie et en recherche scientifiques, le recyclage du gaz peut diminuer les couts mais il reste quand même couteux. En point de vu efficacité et qualité de dépôt, l'utilisation d'hélium donne les meilleures résultats, moins de porosités, plus d'efficacité et par conséquence des propriétés mécaniques meilleures.

Le nitrogène est rentable, il est abondant dans l'air (78% de l'air), mais à cause de son poids, il ne peut pas atteindre les vitesses critiques de certaines poudres. Il donc faut le chauffer à de hautes températures, ce qui représente un cout énergétique en plus, sans oublier les limitations techniques qui ne permet pas de dépasser un certain seuil de température (le point de fusion du matériau par exemple), en plus, à des températures élevées le nitrogène n'est plus inerte et il y a donc des risques de nitruration. Cela va donner des dépôts de qualités moyennes.

Comme solution, il faut trouver un compromis entre le cout, l'efficacité du processus, et la qualité du dépôt. Dans la littérature on trouve des articles qui proposent un mélange de gaz (He + N_2) comme la référence [4], ou on a trouvé qu'il y a un rapport de gaz optimal qui dépends des paramètres de la poudre. Ce mélange permet d'optimiser le processus, le cas d'une poudre d'aluminium est étudiier comme exemple, le mélange de gaz optimal pour cette poudre est à 49% d'hélium (respectivement 51% N_2).

1.2.4 Effet de la géométrie de la tuyère de Laval (dispositif)

En cold spray, le jet des particules passe dans une tuyère convergent-divergente dite tuyère de Laval,

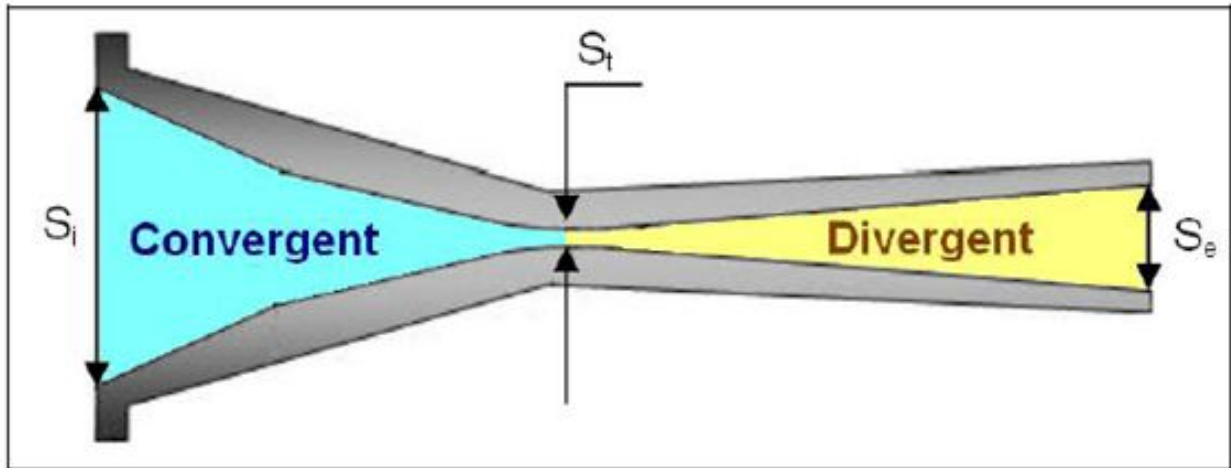


FIGURE 1.7 – tuyère de Laval vu en coupe. Source : [2]

La géométrie de la section de la partie convergente de la tuyère influence l'épaisseur du dépôt, en pratique la plus utilisée c'est la section ronde, car elle est facile à fabriquer, mais l'épaisseur du dépôt n'est pas uniforme. Pour améliorer la qualité et l'épaisseur du dépôt d'autres géométries ont été considérées mais leur fabrication est plus compliquée :

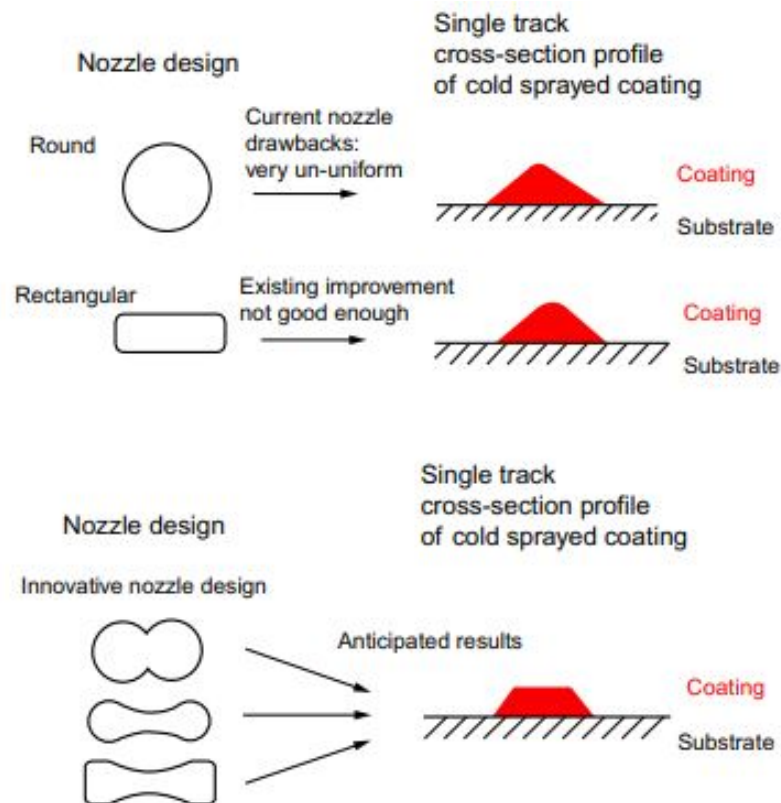


FIGURE 1.8 – Schéma explicatif de l'effet de la géométrie de la tuyère sur le dépôt. Source : [26]

1.2.5 Influence de l'angle du tir

Des travaux de recherche ont montré que l'angle du tir influe les caractéristiques du dépôt d'une manière remarquable, notamment l'article du C.-J. Li, W.-Y. Li et Y.-Y. Wang [5]. On a fait varier l'angle du tir en gardant une distance constante (figure 1.9), les poudres utilisées sont celle du cuivre ($15\text{-}37\ \mu\text{m}$) et celle du titane ($37\text{-}44\ \mu\text{m}$), projetées sur un substrat d'acier inoxydable.

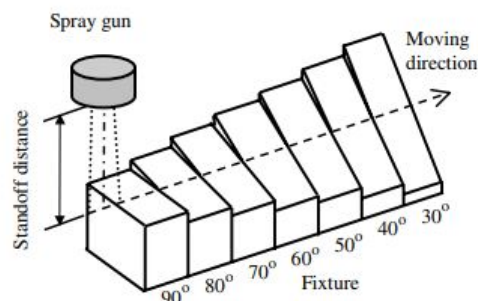


FIGURE 1.9 – schéma du dispositif expérimental du cold spray qui permet la variation de l'angle. Source : [27]

La caractéristique mesurée est le rendement du dépôt (efficacité du dépôt) ainsi que

la microstructure, pour cette dernière un microscope électronique à été utilisé. Les données ont permis d'avoir deux courbes de l'efficacité du dépôt en fonction de l'angle du tir $dpt = f(\theta)$, les deux courbes ont la même allure (figure (1.10)), Il y a trois domaines :

- Domaine d'angles sans dépôt : pour des angles compris entre 0° et un angle critique qui dépend de la poudre (20° - 40°) pour le cuivre et le titane).
- Domaine d'angles de transition : le dépôt commence à adhérer au substrat, sans pour autant atteindre les 100%. Il est délimité l'angle où l'efficacité n'est plus nulle, et l'angle où le dépôt est autour des 100%.
- Domaines d'angles avec une efficacité du dépôt maximale : le rendement à cet angle (90°) est à 100%.

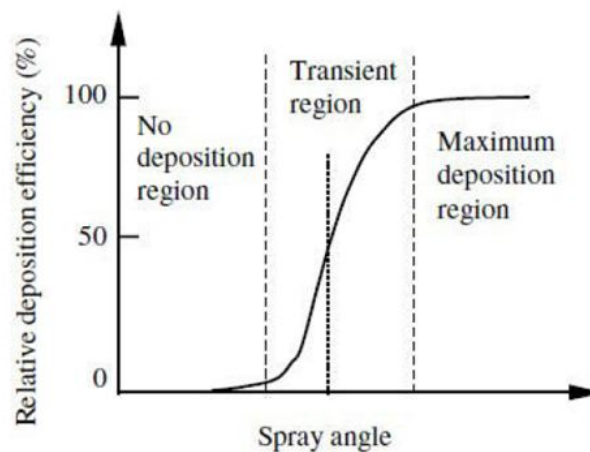


FIGURE 1.10 – diagramme schématique de l'efficacité du dépôt en fonction de l'angle de projection..
Source : [28]

Ce constat est expliqué par le fait qu'en cold spray, le dépôt dépend de la vitesse de la particule, il y a soit dépôt, soit érosion, pour le premier cas $v_p > v_{cr}$ et pour le deuxième $v_p < v_{cr}$. D'autre part, lorsque l'angle du tir par rapport au substrat n'est pas normal ($e.i \neq 90^\circ$) la vitesse de particule se décompose en deux composantes : une vitesse normale V_n et une vitesse tangentielle V_t (figure (1.11)) avec :

$$V_n = V_p \sin(\theta) \quad (1.4)$$

$$V_t = V_p \cos(\theta) \quad (1.5)$$

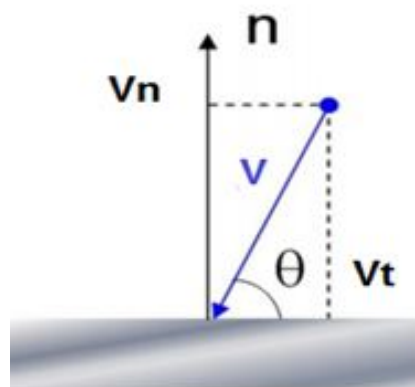


FIGURE 1.11 – Composantes normale et tangentielle de la vitesse d'impact d'une particule.. Source : [2]

l'effet de la vitesse tangentielle est supposé négligeable, la déposition va dépendre uniquement sur la vitesse normale, est donc le dépôt aura lieu que si : $V_n = V_p \sin(\theta) > v_c$. Pour une V_p donnée lorsque θ tend vers 0, V_n tend vers 0 aussi et d'où l'importance de l'angle du tir.

En ce qui concerne la microstructure, les images du MEB (figure 1.12) montrent que la direction de la déformation plastique des particules changes avec l'angle du tir.

En outre il est clair que l'angle du tir influence le comportement des particules à l'impact et la direction de la formation du dépôt.

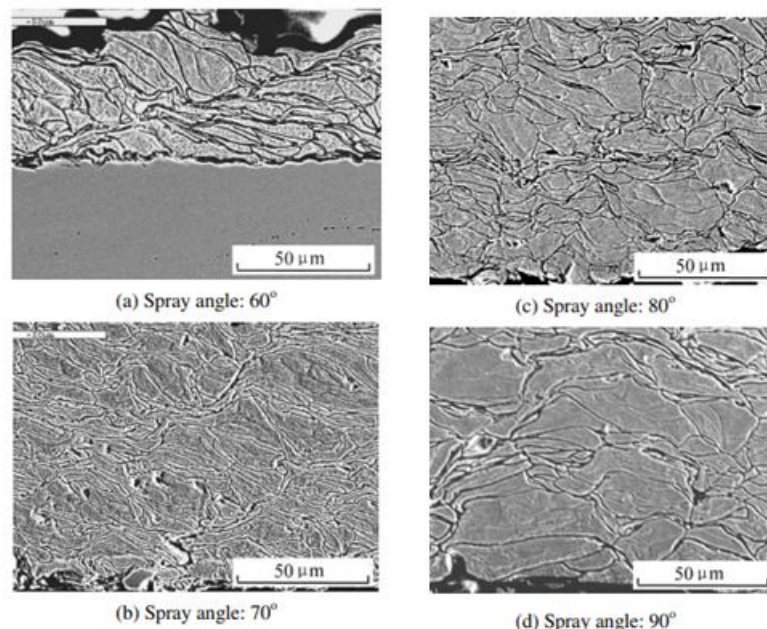


FIGURE 1.12 – Effet de l'angle du tir sur la microstructure.. Source : [27]

1.2.6 Influence de la distance du tir

Plusieurs travaux de recherche ont été effectués afin d'optimiser le processus cold spray notamment la distance du tir, une étude [6] menée sur des particules de 15 µm a donné

le résultat suivant (figure (1.13))

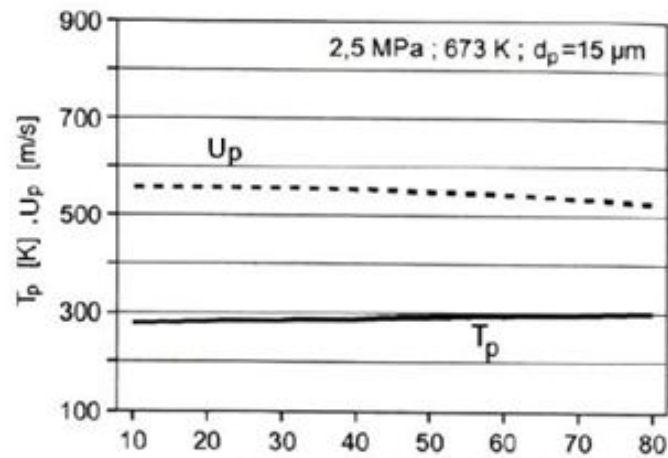


FIGURE 1.13 – Influence de la distance du tir sur la température. Source : [29]

On remarque que la vitesse et la température sont peu influencées par la distance, elles sont pratiquement constantes. Néanmoins, L'onde du choc entre le dépôt et l substrat, liée au flux supersonique, peut affecter le rendement, et afin de minimiser son effet il faut trouver la distance optimal pour laquelle, la vitesse des particules ne diminuent pas, cette distance est de 20mm [7].

1.2.7 Autres paramètres influençants le cold spray

b. Influence de la vitesse du balayage :

La vitesse du balayage est la vitesse avec laquelle le substrat est traversé par le pistolet de projection, selon une étude [18], le taux de porosité ainsi que l'épaisseur du dépôt en fonction de la vitesse de balayage ont été étudiés, les résultats sont présentée dans la courbe (1.14) :

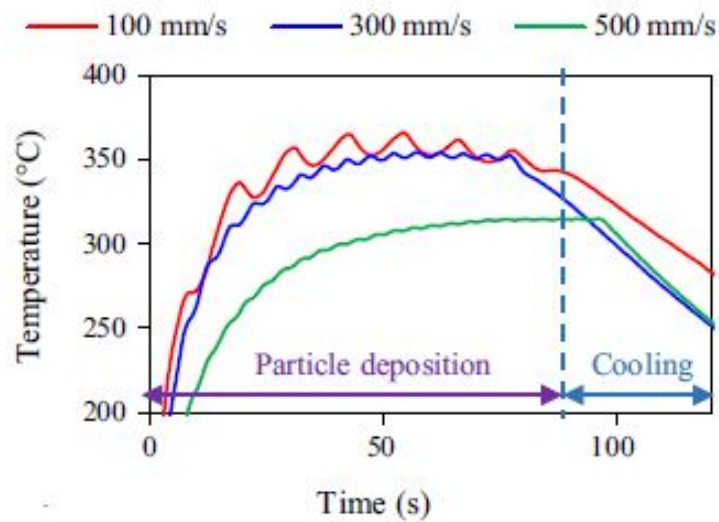


FIGURE 1.14 – Porosité et l'épaisseur du dépôt par couche en fonction de la vitesse de balayage. Source : [18]

Malgré le fait que plus la vitesse de balayage augmente plus la porosité augmente et l'épaisseur diminue, la qualité de l'interface et l'adhérence sont beaucoup plus élevées pour les dépôts réalisés à grande vitesse de balayage, cela est expliqué par l'élévation de la température du substrat comme le montre les courbes suivantes (figure (1.15)) :

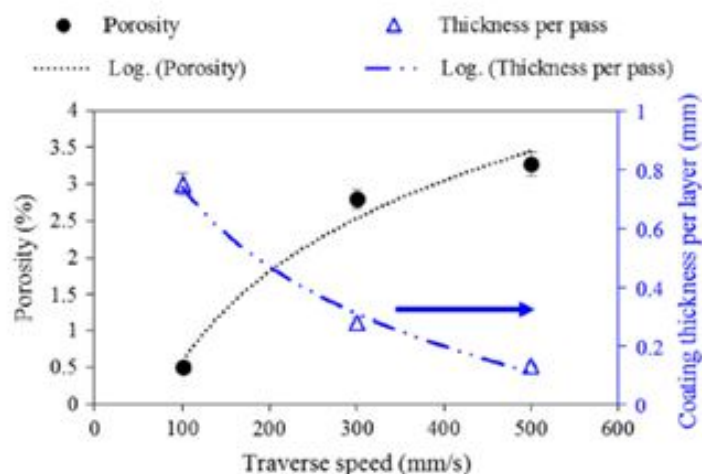


FIGURE 1.15 – la température du substrat en fonction du temps pour chaque vitesse de balayage. Source : [18]

Le temps entre le dépôt des particules et le refroidissement du substrat est inversement proportionnelle à la vitesse du balayage, car lorsque le pistolet traverse le substrat lentement, le fuseau des particules est focalisé pour plus de temps dans un point donné du substrat, donc ce dernier chauffe plus et il prend plus de temps afin de refroidir. dans le prochain paragraphe on explique l'effet de la température de substrat.

c. Influence de la Température du substrat :

La température du substrat peut influencer la qualité du dépôt lorsque elle est supérieure à T_g , le matériau devient dans ce cas mou voire liquéfier, une conjecture (de la littérature référence [19]) stipule que : lorsque la température du substrat est élevée jusqu'à la liquéfaction du substrat ($T > T_g$), ce dernier, donc, ne peut pas résister la force de rebondissement (figure 1.16) :

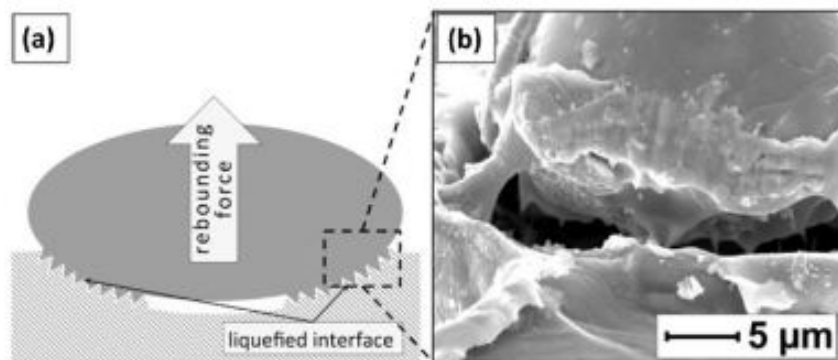


Figure 5 Exemple de rebondissement des particules (a) schématisation (b) image MEB

FIGURE 1.16 – Exemple de rebondissement des particules (a) schématisation (b) image MEB. Source : [19]

d. Influence de la rugosité du substrat :

La morphologie du substrat influence l'adhérence du dépôt, et ce en fonction de la taille des particules comme le montre la figure (1.17) :

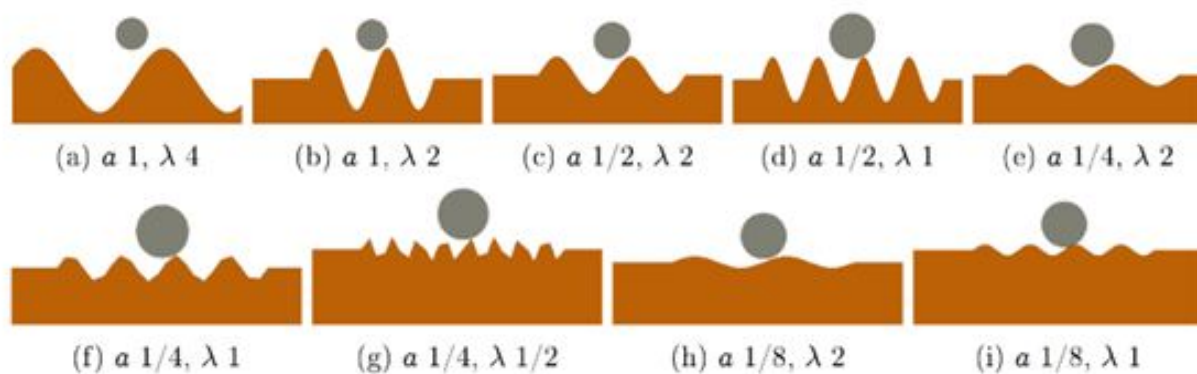


FIGURE 1.17 – Schéma représentant l'influence de la rugosité du substrat et la taille des particules. Source : [19]

La rugosité du substrat favorise l'adhérence car le mécanisme d'adhérence par ancrage mécanique aura lieu ce qui renforce la cohésion du dépôt.

1.3 Avantages et limites de la projection à froid

1.3.1 Principaux avantages de la projection à froid

a. Utilisation de températures proches de l'ambiante

Etant donné que la projection à froid est un procédé à basse température, les particules utilisées pour la déposition sont épargnées de l'oxydation, de la formation des phases métastables et de la croissance des grains dues aux hautes températures. De plus, cette propriété permet de travailler avec les matériaux sensibles à la température.

b. Haut degré de déformation plastique des particules

Dans le Cold Spray, les particules sont émises à une vitesse supersonique favorisant leur déformation à l'impact. Les particules se serrent les unes contre les autres en adhérant au substrat, et ferment les pores et les fissures qui existent dans le dépôt. De ce fait, les revêtements effectués par Cold Spray sont dotés d'excellentes propriétés de densité, de conductivité électrique et thermique, et de dureté.

c. Haute efficacité de déposition

Des conditions optimisées de projection telles que la sélection de la poudre et l'optimisation des paramètres de projection peuvent générer des dépôts avec une très grande efficacité de déposition¹ [8].

1.3.2 Principales limites de la projection à froid

Comme tout autre procédé, la projection à froid a certains inconvénients, dont :

- La réalisation du dépôt pour les pièces d'accès difficile n'est pas possible.
- L'exigence d'une haute pression de gaz.
- Les dépôts obtenus ont une faible ductilité et nécessitent un traitement ultérieur pour atteindre la ductilité requise.

1.4 Applications de la projection à froid

Grâce à ses caractéristiques uniques, la projection à froid est utilisée dans plusieurs domaines et pour différentes fins car elle donne des revêtements qui peuvent améliorer la résistance, la dureté, la résistance à la corrosion, et la conductivité électrique et thermique des matériaux revêtus.

Ce procédé est donc utilisé pour la fabrication des : aubes de turbines, pistons, valves, cylindres, pompes, arbres, etc. Il est aussi utilisé pour la production des matériaux en poudre compacte et la fabrication directe des composants [1]. voici alors quelques domaines d'application :

1. L'efficacité du dépôt ou rendement de dépôt, est définie comme étant le rapport de la masse de la poudre qui a adhéré au substrat sur la masse initiale de poudre utilisée.

- Impression 3D (Fabrication additive) :

En industrie aéronautique, spatial et fabrication des outil le cold spray est utilisé afin de fabriquer des pièces par impression 3D, et en alliages de Cuivre Aluminium Titane ainsi qu'en acier.

- Protection Cathodique :

Grace à l'homogénéité des dépôts à base de Ni et Ta, réalisé par cold spray et leurs non-oxydation, ces derniers sont utilisés contre la corrosion en protection cathodique.

- Protection Anodique :

Comme la protection Cathodique mais pour des dépôts à base de Zn et AL.

- Biomédical : pièces bio-compatibles

Dans la médecine, des pièces et dépôts de Ti sont utilisé pour leurs bio-compatibilité ainsi que pour les propriétés obtenues grâce au cold spray : l'homogénéité et la non-oxydation.

Les dépôts Cold Spray

2.1 Formation du dépôt

Le procédé de projection est généralement constitué de deux étapes : la première concerne la projection de la première couche des particules sur le substrat, tandis que la deuxième est relative à la croissance du dépôt.

La première étape est très importante et décisive car elle détermine la qualité de l'adhésion du revêtement. Durant cette étape, les premières particules impactent le substrat, et le résultat de l'impact – adhésion ou rebondissement- dépend de l'état de la surface et paramètres du substrat et des particules.

2.1.1 Paramètres régissant l'adhésion des particules

Plusieurs facteurs contrôlent l'adhésion des particules, comme : la surface de contact, la profondeur du cratère, la déformation plastique, la limite d'élasticité, la pression et la température sur la limite de contact. Mais, il semble que ces paramètres atteignent leurs valeurs critiques quand la vitesse d'impact est égale à v_{cr} , ce qui mène à rétrécir l'étude de l'adhésion des particules à un nombre limité de paramètres majeurs.

a. la vitesse d'impact

Généralement, on dit qu'il existe deux domaines caractéristiques pour l'interaction entre les particules et le substrat, mais on peut les étendre à trois domaines divisés par deux valeurs critiques de la vitesse des particules : v_{cr1} et v_{cr2} . D'une part, pour des vitesses inférieures à v_{cr1} , les particules ne peuvent pas s'accrocher au substrat et rebondissent loin de la surface en provoquant son érosion. D'autre part, les particules ayant des vitesses supérieures à v_{cr2} s'attachent directement à la surface.

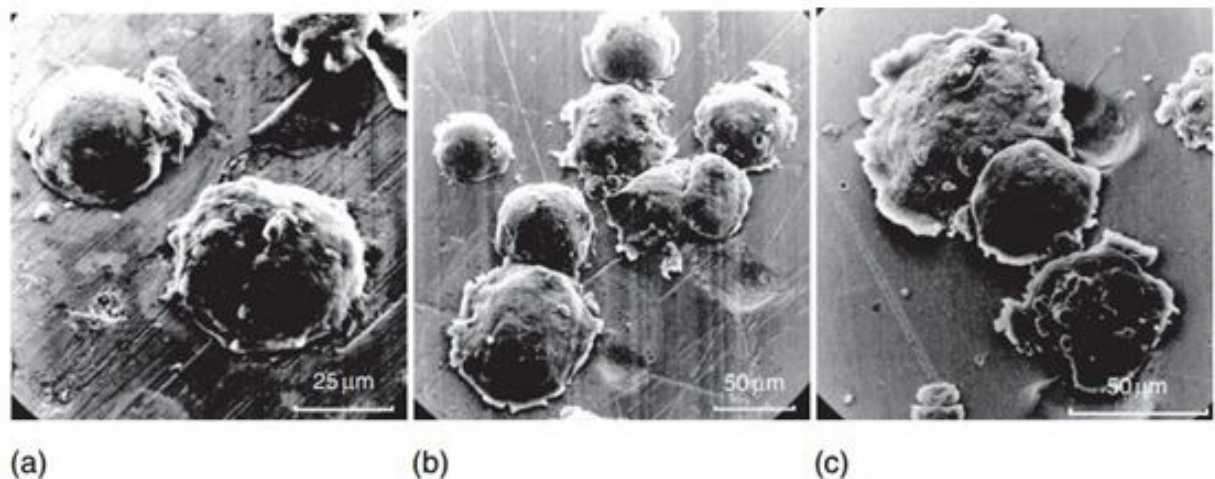


FIGURE 2.1 – Déformation des particules en aluminium sur un substrat de cuivre sous différentes vitesses d'impact : y a = 625 m/s, b = 730 m/s, and c = 850 m/s.. Source : [30]

Dans le domaine où les vitesses sont entre v_{cr1} et v_{cr2} , les particules commencent à s'attacher au substrat après un certain temps, dit « le temps d'induction », qui est le temps écoulé entre le début du bombardement des particules et leur attachement

à la surface du substrat. En premier lieu, les particules projetées ne s'accrochent pas au substrat, elles rebondissent de la surface et la préparent en agissant comme les grains de sable dans le sablage. Ce bombardement intensif nettoie la surface et crée un microrelief spécifique (figure 2.3) et favorise l'attachement des particules. Le temps d'incubation, nécessaire pour l'attachement des particules, diminue avec l'augmentation de la vitesse d'impact vers des valeurs proches de v_{cr2} (figure 2.2) selon l'expression :

$$t_i = a \left[\left(\frac{1}{\sqrt{v_p - v_{cr1}}} \right) - \left(\frac{1}{\sqrt{v_{cr2} - v_{cr1}}} \right) \right] \quad (2.1)$$

a est une constante

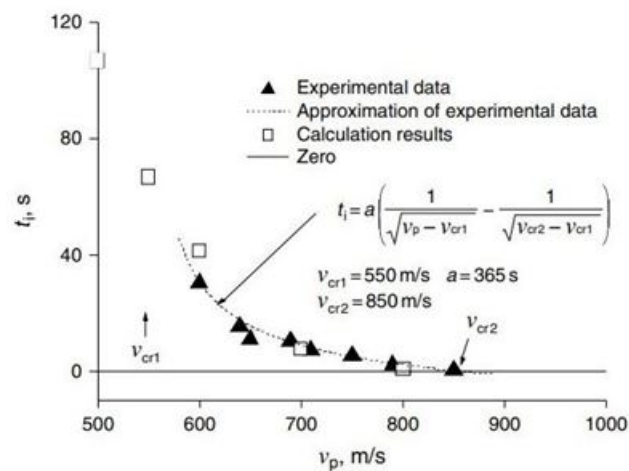


FIGURE 2.2 – le temps d'induction en fonction de la vitesse d'impact des particules d'aluminium projetées sur un substrat en cuivre, d_{pm} 30.2 μ m, l'angle = 10-8. Source : [30]

b. Energie d'activation

Le temps d'incubation requis pour l'adhérence des particules ayant des vitesses d'impact entre v_{cr1} et v_{cr2} est expliqué par le changement de la surface du substrat à cause du changement de l'énergie d'activation.

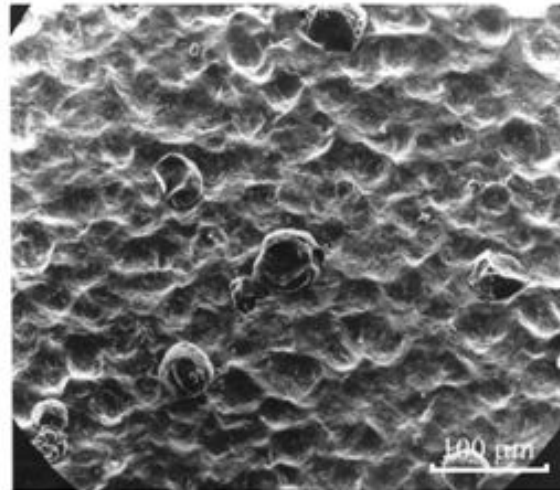


FIGURE 2.3 – Une surface activée par le bombardement des particules. Source : [30]

D'abord, l'énergie d'activation de la surface diminue à cause de l'impact des premières particules qui nettoie la surface, mais elle augmente aussitôt parce que le rebondissement de ces particules augmente la concentration des dislocations durant la déformation plastique ayant lieu durant la projection des particules ; les endroits où ces dislocations atteignent la surface agissent comme des centres de germination et abritent l'interaction chimique initiée entre la surface et les particules [9]. De plus, l'énergie d'activation peut encore diminuer jusqu'à une valeur typique au matériau des particules si celles-ci laissent un certain nombre d'atomes attachés à la surface après l'impact. Aussi, quand le nombre d'impacts augmente, l'énergie d'activation diminue, ce qui augmente la probabilité de l'attachement des particules aux alentours de ce point [1].

L'énergie d'activation caractérise l'interaction adhésive des matériaux et est déterminée dans un point particulier par l'équation :

$$E_a = K_{im} \frac{N_0 E_{aw} + N_{im} E_{ap}}{N_0 + N_{im}} \quad (2.2)$$

Où :

- K_{im} et N_0 : constantes expérimentales.
- N_{im} : le nombre d'impacts sur un point de la surface.
- E_{aw} l'énergie d'activation du substrat.
- E_{ap} l'énergie d'activation des particules.

c. La structure cristalline

D'après Vlcek, la cinétique de déformation est déterminée par les propriétés du matériau (principalement la structure cristalline) [2].

Le processus de déformation est déterminé par la mobilité des dislocations et leur interaction, ce qui implique que la structure cristalline, le type des liaisons, la structure et la taille des grains, les atomes et les phases étrangères déterminent la résistance à

la déformation. Une comparaison entre les propriétés de déformation de plusieurs matériaux montre que les métaux ayant la même structure cristalline et type de liaisons ont un mécanisme de déformation identique [1].

L'adhésion du dépôt par projection à froid exige que les matériaux utilisés soient dotés d'une grande plasticité pour garantir le pressage et la fixation des particules, cela mène à favoriser les métaux du réseau cristallin CFC (Cubique à Faces Centrées) qui a le plus grand nombre de plans de glissement, dont leur haute plasticité et leur convenance pour le Cold Spray.

Les métaux de structure CC (Cubique Centrée) sont plus difficiles à déposer parce que l'activation des dislocations spirales au sein de leur réseau demande 200 fois plus d'énergie que ceux du réseau CFC.

Les autres structures cristallines (hexagonale, tétragonale et trigonale, etc.) sont moins adéquates au procédé de projection à froid à cause de leur médiocre plasticité. Cependant, d'autres paramètres peuvent intervenir, tel que le point de fusion, pour compenser le manque d'aptitude à la déformation.

2.1.2 Mécanisme de la formation du dépôt

Théoriquement, la liaison entre deux composants est formée sans avoir besoin de chauffage, de fusion, ou d'entrecroisement mécanique (mechanical interlocking) quand les surfaces, exigées être propres et atomiquement plates, rentrent en contact [10].

Dans la pratique, cependant, les composants ont rarement des surfaces métalliques plates et sont couvertes par une couche d'oxyde qui doit être éliminée par déformation plastique pour permettre l'adhésion des deux solides. Le procédé de projection à froid est conçu selon ce type de déformation interfaciale qui assure l'adhésion entre les surfaces en contact sur le niveau atomique.

Il a été convenu par de nombreux chercheurs que le mécanisme d'adhésion en Cold Spray est comparable à celui du soudage par explosion ou par pulse magnétique. Dans ces procédés, l'adhésion résulte d'un impact à haute vitesse entre deux solides. Une caractéristique commune entre ces procédés est la formation et l'éjection d'un jet de matériau, issu du cisaillement adiabatique, et apparaissant à l'interface de l'interaction entre les deux corps [10].

Une étude expérimentale sur la projection des particules de cuivre de diamètres 5-25 μm sur un substrat de cuivre avec des vitesses d'impact de 550 -670 m/s, respectivement, a montré que plus de 80% des particules impactant la surface se sont attachées en formant un cercle, autour de la zone de contact, relatif à la formation du jet. Alors que les particules qui ont rebondi de la surface ont laissé des cratères sans trace de jet.

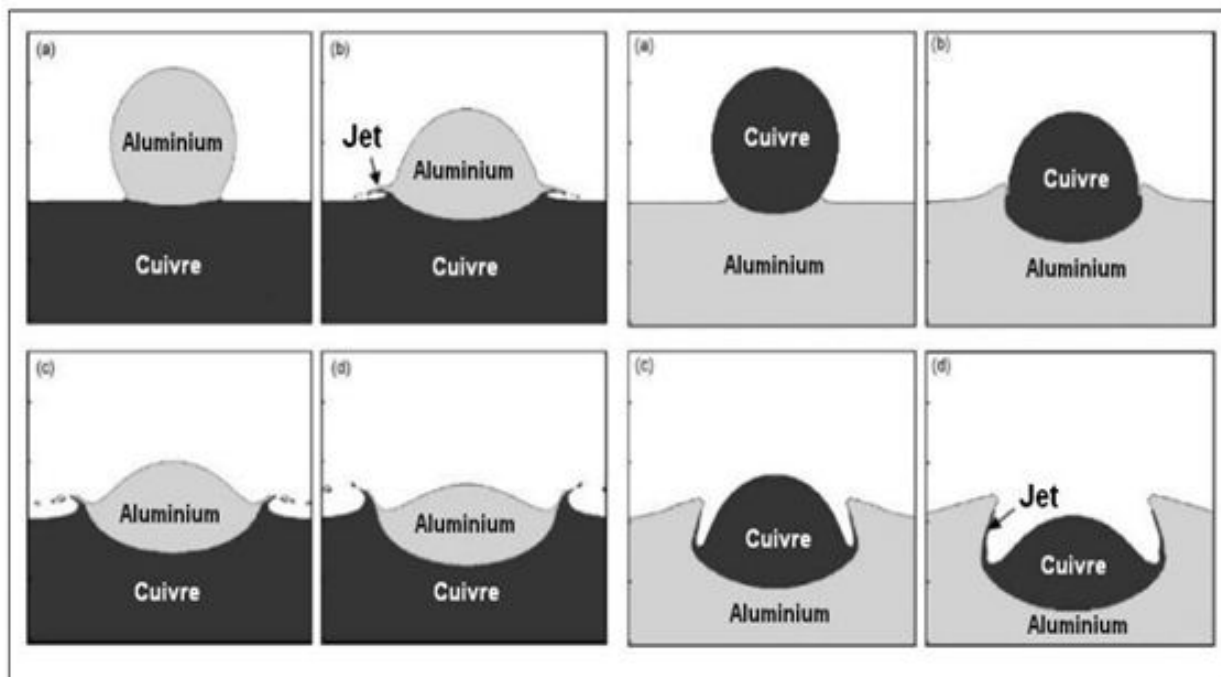


FIGURE 2.4 – Interaction particule substrat à $t = 5, 20, 35, 50$ ns. Source : [2]

D'autres travaux montrent que l'échauffement brutal des particules à l'impact provoque localement une transition du mode de déformation d'un phénomène plastique vers un phénomène plus visqueux. La résistance mécanique du matériau est alors plus faible et une instabilité structurelle apparaît, facilitant un cisaillement adiabatique [2].

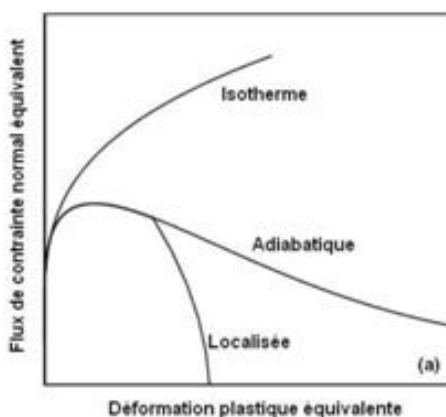


FIGURE 2.5 – Courbes déformations-contraintes dans un solide en déformations : isotherme, adiabatique, et localisée.. Source : [6]

Pour un matériau soumis à une déformation non-adiabatique, la contrainte croît monotonement avec l'augmentation de la déformation. Dans le cas de la déformation adiabatique, l'énergie de déformation plastique se transforme en chaleur et ramollit le matériau, et il en résulte que le taux de déformation diminue et que le flux de

contrainte atteint un maximum au-delà duquel il diminue constamment. Comme la structure des matériaux n'est pas idéale, le cisaillement et la chaleur se localisent dans un petit volume. La localisation de la déformation favorise un échauffement plus intense provoquant un ramollissement localisé plus important que le durcissement prévu, ce qui cause un grand accroissement de la température et la déformation avec la disparition de la contrainte sur l'ensemble de l'échantillon (cas de la déformation localisée), et c'est comme ça que la déformation plastique devient visqueuse. Le flux visqueux dans cette région génère un jet avec une température proche du point de fusion. Comme dans le soudage, les couches d'oxydes se rompent sous les hautes déformations, et les surfaces chaudes sont alors pressées ensemble en assurant l'adhésion.

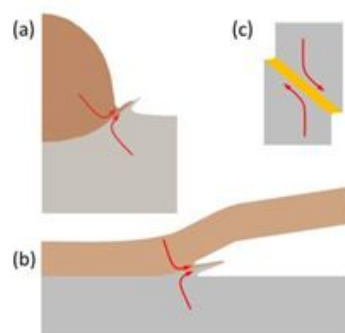


FIGURE 2.6 – Schéma de la localisation de la déformation par cisaillement adiabatique, (a) l'impact d'une particule en Cold Spray, (b) le soudage par explosion et/ou pulse magnétique, (c) bande de cisaillement sous compression . Source : [6]

Le cisaillement et le ramollissement localisés ont un rôle important dans la formation des liaisons entre les particules et le substrat dans le Cold Spray. La grande pression de contact et la formation du jet favorisent la formation de surfaces de contact conformes. Alors, quand les conditions du cisaillement localisé sont satisfaites, l'adhésion entre les particules et le substrat est établie.

Le matériau utilisé doit être ductile pour que la déformation puisse avoir lieu sans générer des fissures, et pour que le dépôt résultant puisse être dense.

2.1.3 Étapes de création du dépôt

Les différentes études et observations exposées permettent de récapituler la chronologie de la formation du dépôt en quatre étapes distinctes :

a. Activation du substrat

La déformation de la surface par le bombardement consécutif des particules, et l'apparition de cratères correspondant aux particules qui n'ont pas adhéré à la surface. La création des dislocations, la localisation du cisaillement et de la chaleur, et la rupture de la couche d'oxyde (grâce à la déformation plastique) permettent la formation de la première couche de dépôt.

b. Déformation et réarrangement des particules

Les particules possèdent des facettes qui prouvent l'existence de plusieurs collisions.

c. Réduction de la porosité

les liaisons métalliques interparticulaires commencent à apparaître quand les surfaces de contact sont suffisantes.

d. Densification et augmentation de la dureté

l'avancement de cette étape est de plus en plus prononcé à mesure que l'on s'approche du substrat.

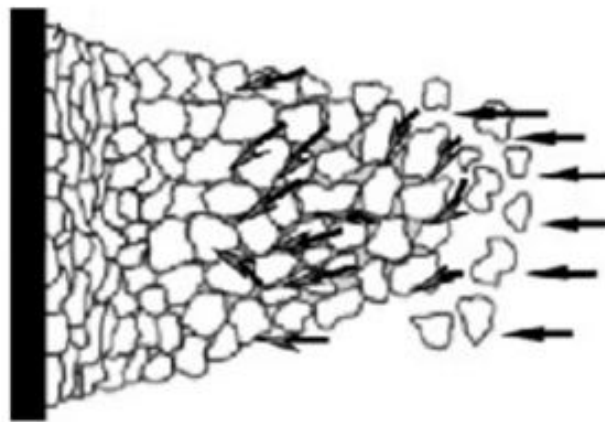


FIGURE 2.7 – Déformation progressive des particules impactantes.. Source : [2]

2.2 Caractéristique du dépôt

Comme indiqué dans le premier chapitre, le procédé de projection à froid est acclamé pour la qualité des dépôts qu'il produit, caractérisés essentiellement par leur grande densité, et par leur oxydation et changement de phases négligeables (tableau 2.1) :

Tableau 2.1 – Caractéristiques des dépôts réalisés en Cold Spray

	Gaz propulseur	Dureté	variation du taux d'oxygène	porosité
Acier 316L	(N ₂)	275 HV _{3N}	0	faible
Aluminium	(N ₂)	45 HV _{3N}	+0.02	Nulle
CuAl	(N ₂)	68 HV _{3N}	+0.09	faible
Cuivre	(N ₂)	150 HV _{3N}	0	très faible
MCrAly	(H ₂)	576 HV _{3N}	+0.06	faible
Nickel Chrome	air	non mesurable	+0.08	5%
Nickel Chrome	(N ₂)	304 HV _{3N}	+0.04	faible
Nickel Chrome	(H ₂)	445 HV _{3N}	+0.01	très faible
Titane	(N ₂)	non mesurable	+0.02	Elevée
Zinc	(N ₂)	35 HV _{3N}	0	faible

2.3 Microstructure du dépôt

En général, la microstructure des dépôts réalisés par CS est différente des dépôts réalisés par les méthodes de projection thermique conventionnelle. Comme les particules déposées ne sont pas directement chauffées par l'énergie thermique et sont projetées à l'état solide, le dépôt résultant est épargné des effets négatifs relatifs à l'utilisation de hautes températures, et presque aucune transformation de phase cristalline ou réaction chimique n'est induite, donc : l'oxydation, la recristallisation, les contraintes résiduelles, et les autres problèmes relatifs à la projection thermique sont soit limités soit éliminés dans le cas du Cold Spray.

2.3.1 Microstructure de la poudre

Le procédé de projection à froid utilise généralement des poudres atomisées par gaz.

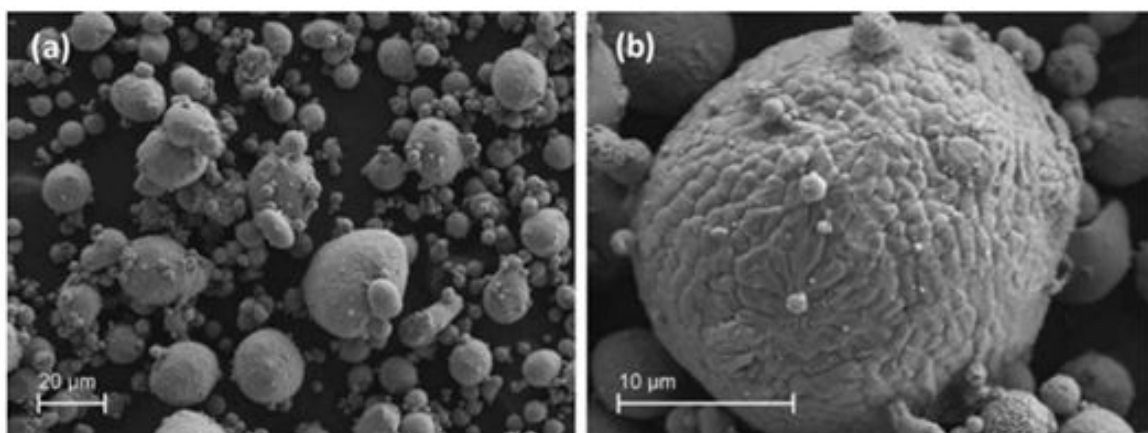


FIGURE 2.8 – Images par MEB de la poudre atomisée par gaz, (a) la morphologie de la poudre, (b) la structure de la surface. Source : [2]

Les observations par microscope électronique à balayage (MEB) indiquent que les particules ont une forme presque sphérique, et la distribution de la taille englobe les petites et grandes particules, tel que les plus petites s'agglomèrent sur les plus grandes durant la solidification (figure (2.8)).

D'autre part, l'observation microscopique de la structure des particules montre que les grains ont des formes et tailles non uniformes, avec la présence des dislocations (figure (2.9)).

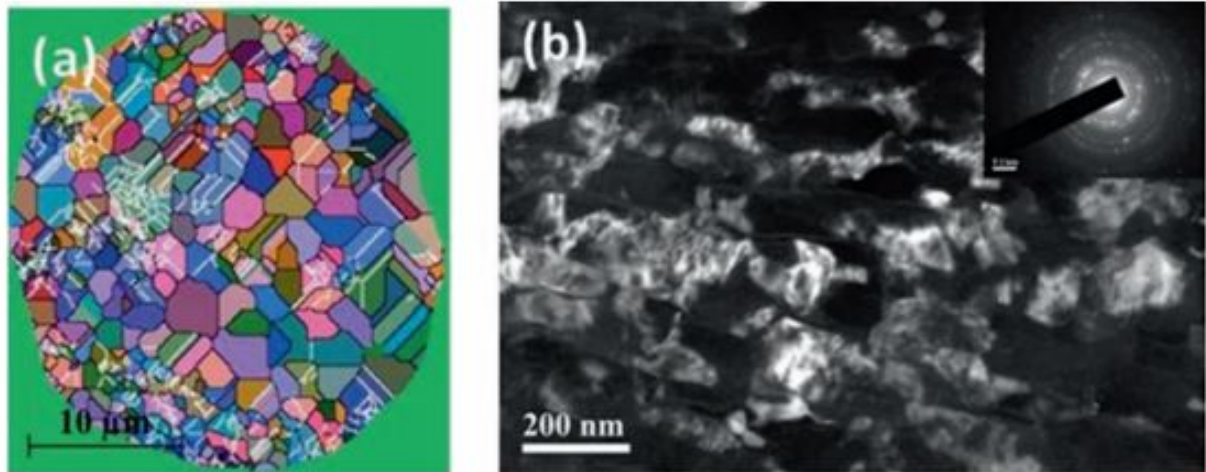


FIGURE 2.9 – (a) Image par EBSD, (b) image par MET montrant l'existence des dislocations.. Source : [6]

2.3.2 Microstructure des dépôts réalisés par cold spray

a. Généralités macroscopiques

Les investigations par microscope optique et MEB ont montré que les dépôts par projection à froid sont denses avec un taux de porosité négligeable (>1%). Les dépôts réalisés par projection à froid présentent une déformation hétérogène au sein des particules adhérentes, tel que les zones périphériques sont fortement déformées et les zones intérieures sont faiblement déformées (figure (2.10)).

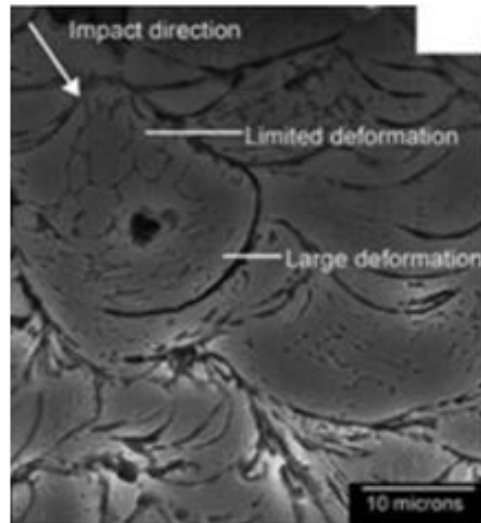


FIGURE 2.10 – Déformation de la structure granulaire de la particule. Source : [6]

b. Microstructure à petite échelle

Le taux de déformation d'une particule déposée (figure (2.11)) . augmente de A en D, tel que la partie D (périphérique et interfaciale) subit une déformation beaucoup plus grande que la partie A. Cela a des répercussions claires sur la microstructure des dépôts, tel que : en A et B, la morphologie des grains ressemble à celle de la matière première, alors que les parties C et D sont fortement déformées, et on peut distinguer leurs grains allongés et aplatis.

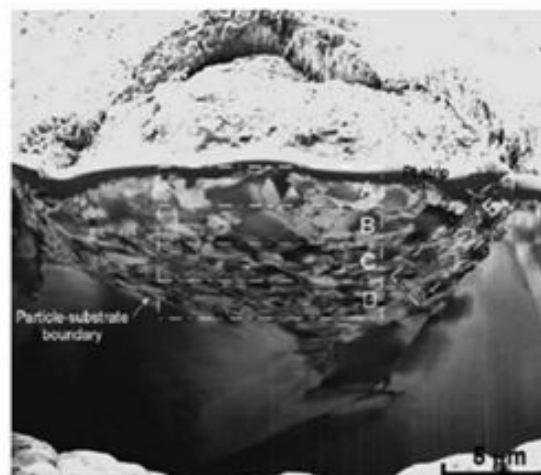


FIGURE 2.11 – Image d'une coupe transversale d'une particule de cuivre déposée par CS. Source : [6]

La figure (2.12). illustre la microstructure typique interparticulaire dans les dépôts réalisés par Cold Spray, et montre que le taux de déformation augmente quand on se rapproche de l'interface.

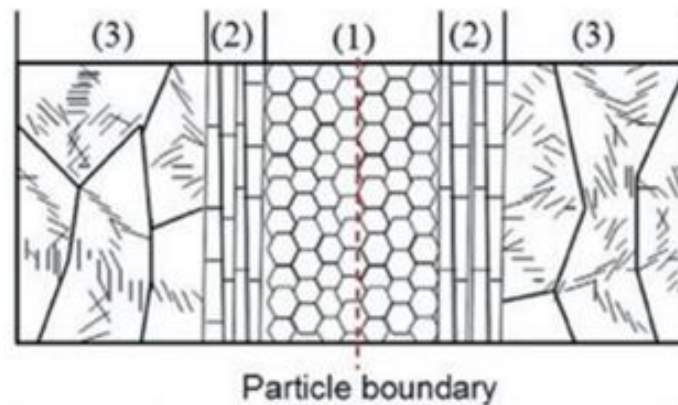


FIGURE 2.12 – Illustration schématique de la microstructure à l'interface interparticulaire. Source : [11]

L'illustration assume que les particules subissent une déformation plastique suffisante pour former une structure de grains ultrafins équiaxes à l'interface interparticulaire (région 1). Cette structure est due à la recristallisation totale d'un nombre de particules ayant subi une forte déformation et une grande chaleur à l'impact. La distribution des grains ultrafins et le degré de recristallisation dépendent des propriétés de la poudre, de l'énergie de défauts d'empilement, de l'énergie d'activation de la recristallisation et de la conductivité thermique.

La structure pancake (région 2), qui ressemble à une échelle, est caractérisée par des grains allongés et aplatis divisés par des sous-joints transversaux. Sa formation est attribuée au mécanisme de cisaillement adiabatique, effectué par glissement des systèmes dominants des plans denses.

A côté de la structure pancake apparaissent les particules qui ont subi une déformation interne modérée avec des cellules formées par des dislocations enchevêtrées (région 3). Des structures relatives à la restauration et la recristallisation statiques ont aussi été repérées dans des dépôts réalisés par CS.

2.4 Etude de cas : Dépôt en cuivre

Les dépôts de cuivre obtenus par projection à froid sont dotés d'une grande dureté due à l'écrasement de la zone déformée, vu que les particules projetées par Cold Spray subissent de très grandes déformations dans les régions interfaciales à cause de la vitesse de projection qui atteint des valeurs importantes, et dont l'énergie cinétique se convertit en déformation plastique à l'impact.

De plus, la localisation de la déformation cause un échauffement intense provoquant un grand accroissement de la température qui déclenche les procédés de restauration ou de recristallisation selon l'énergie des défauts d'empilement du matériau déposé. Dans le cas du cuivre, qui a une basse énergie des défauts d'empilement, la recristallisation peut avoir lieu durant ou après la déformation, et cause la formation de nouveaux grains par germination et croissance.

Les observations microstructurales des dépôts de cuivre par Cold Spray montrent que

ces dépôts sont généralement denses avec très peu de porosités (figure 2.14). Les particules sont très déformées, et perdent leur forme sphérique (figure 2.13) en s'écrasant sur la surface du substrat (figure 2.15).

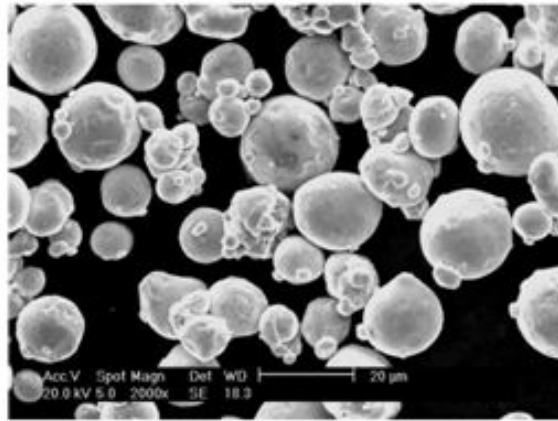


FIGURE 2.13 – Image par MEB de la poudre de cuivre. Source : [6]

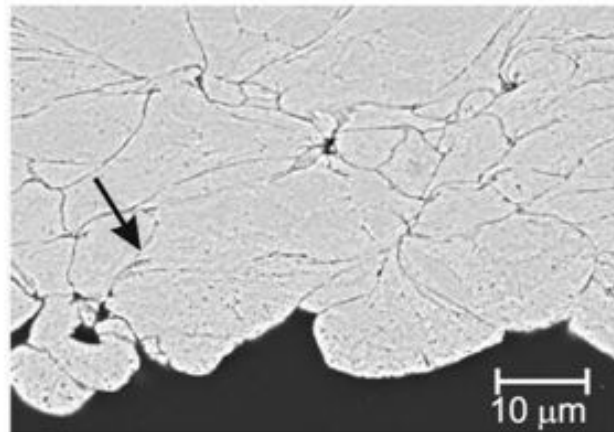


FIGURE 2.14 – Image par MEB d'un dépôt de cuivre, le substrat est noir et le dépôt gris. Source : [6]

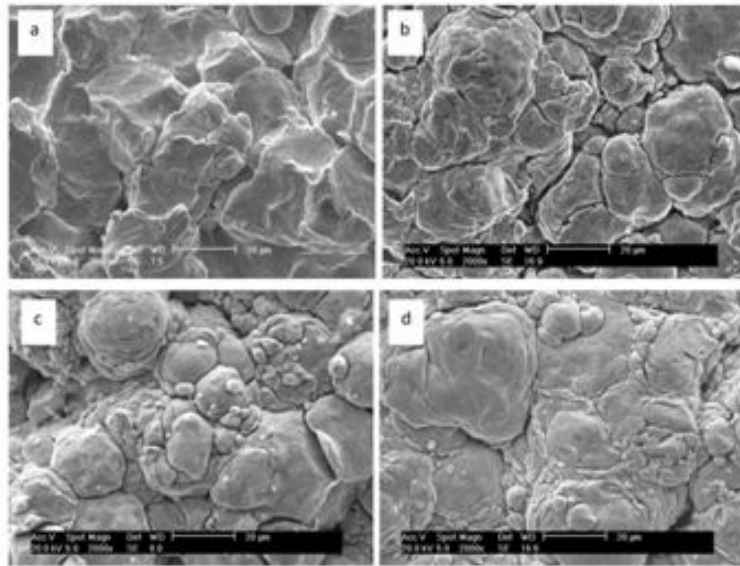


FIGURE 2.15 – Images par MEB de la surfaces du dépôt de cuivre dans le cas du gaz de propulsion sous température de : (a)100 °C, (b)200 °C, (c)400 °C, (d)600 °C. Source : [11]

La microstructure des dépôts de cuivre est non-uniforme avec des grains de tailles variant de quelques microns à des centaines de nanomètres, et des morphologies différentes (grains allongés, équiaxes et sous-grains). Cette hétérogénéité microstructurale peut être attribuée à l'augmentation de température localisée dans les endroits de grande déformation, et à la distribution non-uniforme du cisaillement sur la surface du dépôt [11].

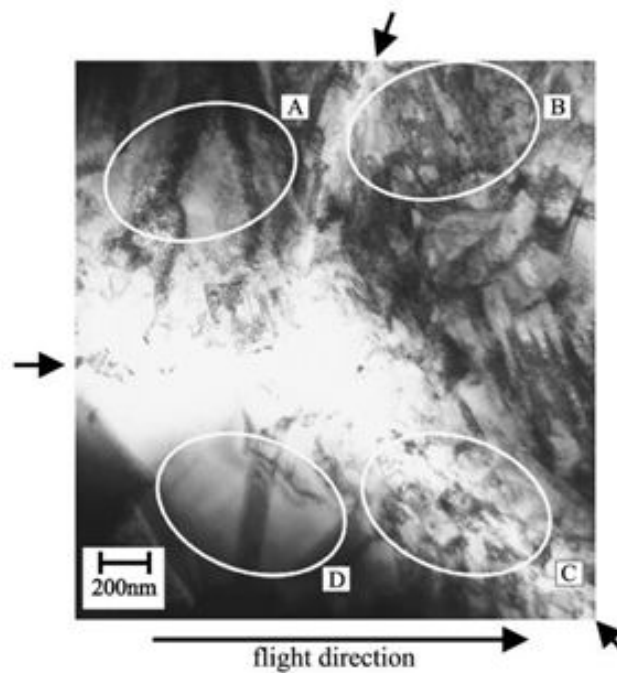


FIGURE 2.16 – Image par MET d'un dépôt de cuivre par CS. Source : [11]

Les caractéristiques des dépôts de cuivre (figure 2.16) présentent un point triple entre trois particules (les interfaces particule-particule sont indiquées par des flèches), tel que :

- la zone A : indique une région d'une haute densité de dislocations, avec des dislocations arrangées en murs, la taille des grains est supérieure à $1\mu\text{m}$.
- La zone B : indique des grains allongés et alignés, en présence de joints de grains hors équilibre caractérisés par une densité de dislocations très élevée.
- La zone C : montre des grains ultrafins, équiaxes, et de diamètre d'environ 100 nm. Ces grains présentent des zones fortement déformées avec une très haute densité de dislocations autour des joints de grains ; l'intérieur des grains est libre de dislocations.
- la zone D : elle est recristallisée avec des grains de taille supérieure à $1\mu\text{m}$, exempte de dislocations et présente des structures de macles.

Si le dépôt de cuivre passe ultérieurement par un traitement thermique, ses propriétés mécaniques et microstructurales vont changer, et la recristallisation sera plus prononcée dans l'échantillon.

Etude Bibliographique sur la Simulation

La simulation numérique est un outil important pour l'étude d'interaction particule/substrat et ce à cause de la dynamique non-linéaire de ce phénomène. Parmi les approches numériques utilisées :

- Approche Lagrangienne.
- Approche Eulerienne.
- Hydrodynamique de particule lissée (smoothed particle hydrodynamic).
- Dynamique des fluides numériques (computational fluid dynamic).

3.1 Modélisation de l'impact

Le model d'impact particule/substrat est basé sur le model de plasticité de Johnson-Cook, donnée par l'équation suivante :

$$\sigma = (A + B\bar{\epsilon}^n)[1 + C \log(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0})][1 - (\frac{T_3 - T_r}{T_m - T_r})^m] \quad (3.1)$$

Pour utiliser ce model, la surface du substrat est supposée plate et les particules sont supposées sphériques, autrement la modélisation sera très complexes. La figure 3.1 illustre la modélisation de l'impact d'une particule à des différentes vitesses, le résultat permet de voir que plus la vitesse augmente plus la concentration des contraintes augmente et plus l'impact est important, ce qui concorde avec les résultats expérimentaux et les observations en microscope électronique.

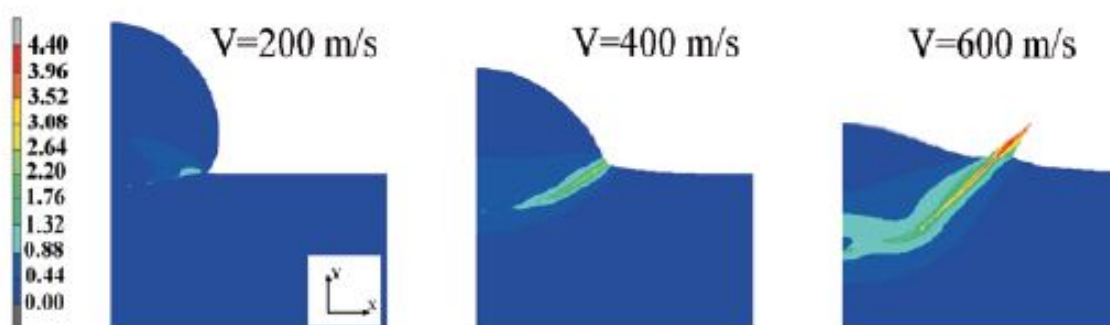


FIGURE 3.1 – Simulation 2D de l'impact d'une particule en cuivre. Source : [22]

3.1.1 Étapes de l'impact d'une particule

la modélisation numérique de l'impact a permis de voir les étapes de ce phénomène et la déformation plastique particule-substrat caractérisée par une instabilité par cisaillement adiabatique avec jet de matière près de la zone d'impact (figure 3.2).

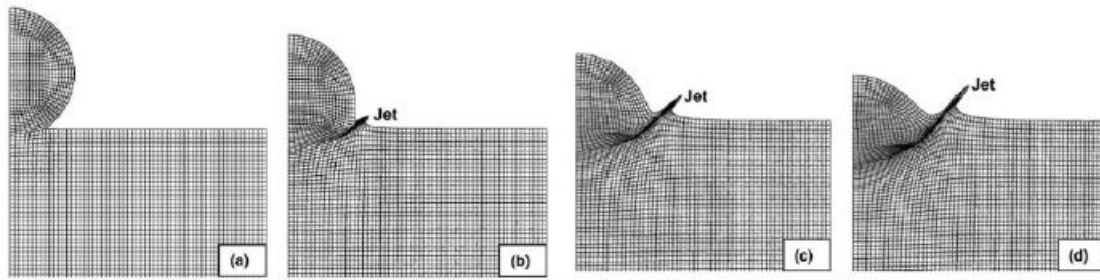


FIGURE 3.2 – Evolution temporelle d'une particule percutant un substrat à (a) 4,4 ns (b) 13,2 ns (c) 22 ns et (d) 30,8 ns, mise en évidence des jets de matière et des déformations plastiques du système particule-substra. Source : [31]

3.1.2 Etude de l'effet de l'angle de projection par méthode numérique

Dans le paragraphe 1.2.5 du Chapitre 1 , l'effet de l'angle de tir a été étudié expérimentalement, ceci est aussi possible en utilisant la méthode numérique comme c'est fait dans l'étude de LI W.-Y., YIN S., WANG X.-F. [13]

Ils ont validé leur modèle en comparant les résultats numériques avec les résultats expérimentaux [5]. (figure 1.12).

Ainsi ils ont pu comparer deux méthodes numériques : la méthode Hydrodynamique de particule lissée (smoothed particle hydrodynamic) (figure(3.4)), et l'approche Lagrangienne (figure (3.3))

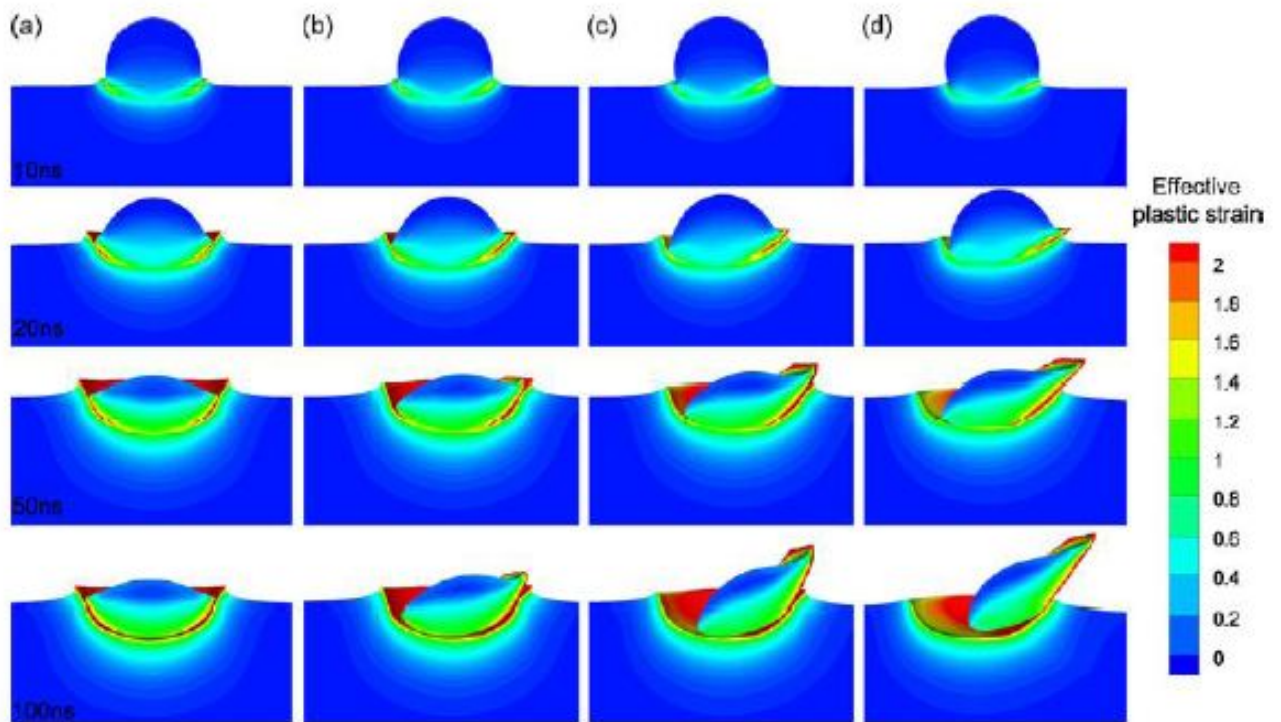


FIGURE 3.3 – Simulation par la méthode lagrangienne de la déformation plastique d'une particule de cuivre heurtant un substrat de cuivre à 500 m.s^{-1} avec un angle d'incidence de (a) 90° , (b) 80° , (c) 70° , et (d) 60° . Source : [32]

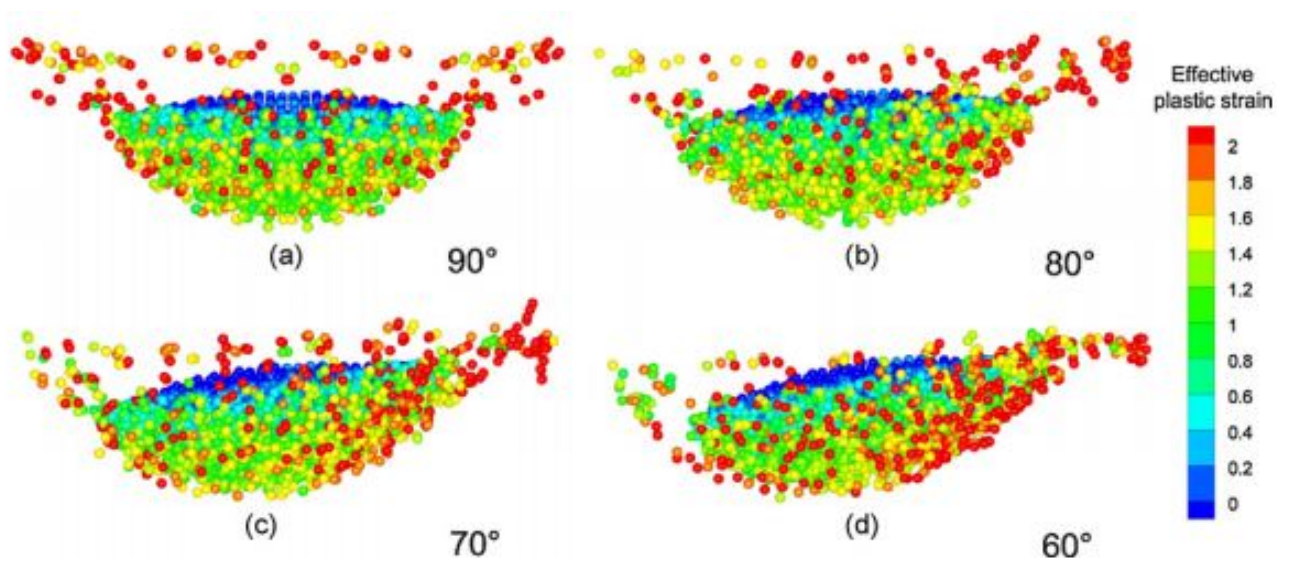


FIGURE 3.4 – Simulation par la méthode SPH de la déformation plastique d'une particule de cuivre heurtant un substrat de cuivre à 500 m.s^{-1} . Source : [33]

Pour la modélisation des microstructures et des phénomènes mécanique tel que l'impact entre la particule et le substrat, on utilise la méthode des éléments finis à travers des logiciels comme ABAQUS/Explicit. Par exemple les travaux suivants : ASSADI de l'université Tarbiat Modarres, Iran qui a simulé la déformation de la particule lors du contact avec le substrat. Wen-Ya Li de l'université polytechnique de Northwestern qui a examiné le comportement d'une particule de cuivre en utilisant la méthode des éléments finis.

3.2 Modélisation des phénomènes de la dynamique des fluides

Pour la modélisation des phénomènes de la dynamique des fluides on utilise des logiciels spéciaux pour ce domaine, les plus connus sont : Ansys fluent, openfoam et fluent, plusieurs travaux ont été faits dans ce sens.

le but principale de la simulation CFD est de voir l'effet des paramètres tel que : la géométrie de la tuyère , la pression et température d'entrée, les dimensions des particules. et aussi la variation du nombre du Mach au long de la tuyère.

3.2.1 Exemple de modélisation CFD : Effet de la géométrie de la tuyère

:

L'effet de la géométrie a été abordé dans le paragraphe 1.2.4. les travaux de Shuo Yin Xiao-fang et Wang Wen-ya Li [15] montre **par une méthode numérique** et en comparant deux géométrie de section (rectangulaire et éléptique (figure 3.5)) que la section de la tuyère affecte l'accélértation des particules et par conséquence la vitesse d'impact particule-substrat. (figure (3.6))

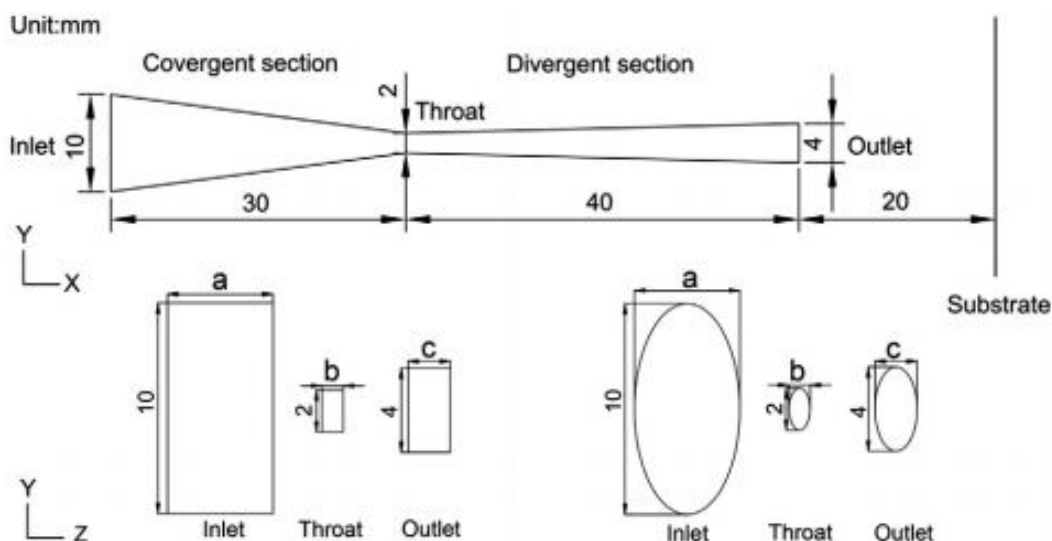


FIGURE 3.5 – Schéma des sections utilisées dans l'étude. Source : [34]

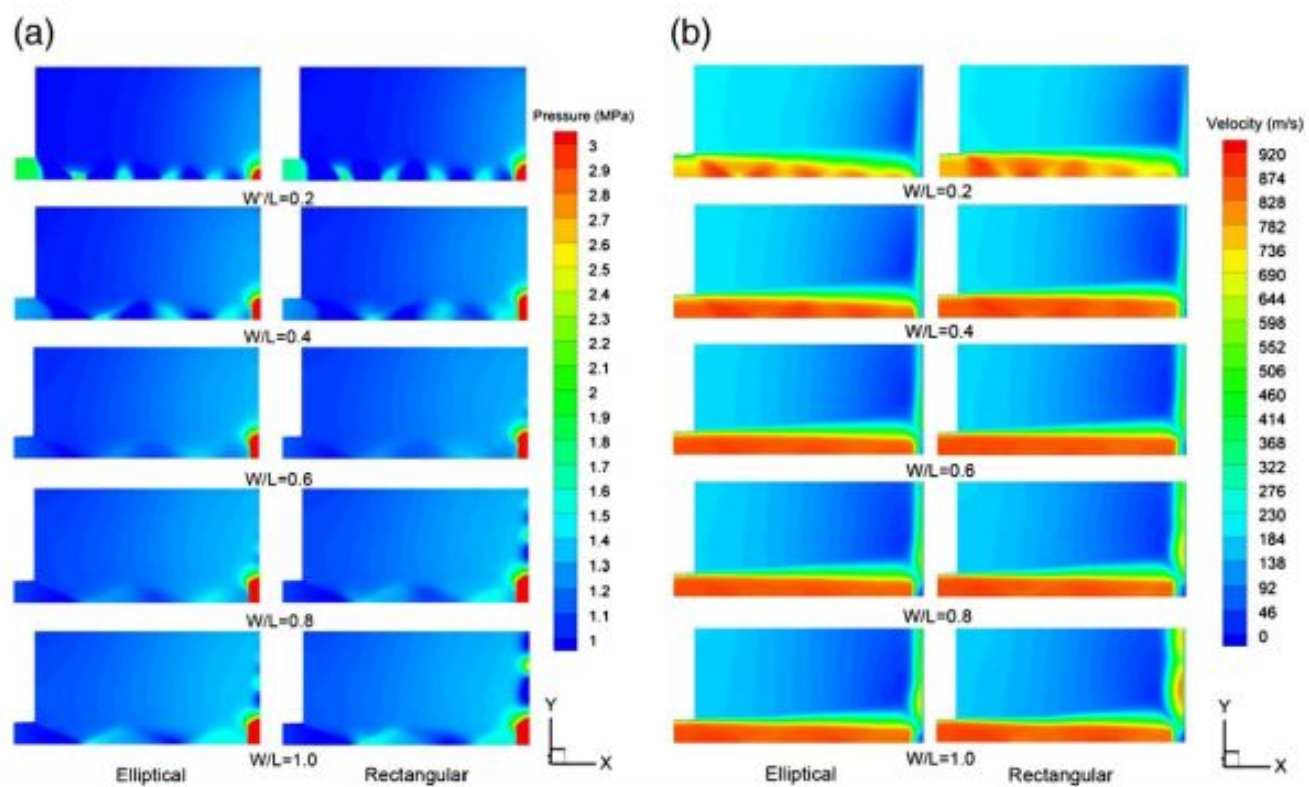


FIGURE 3.6 – (a) pression du gaz (b) vitesse pour des géométries différentes . Source : [34]

Méthodologie et Caractérisation

4.1 Matériaux utilisés

4.1.1 Matériau de la poudre déposée : Le cuivre

Le cuivre est très utilisé dans les dépôts réalisés par Cold Spray, à cause de sa ductilité à basse température, ainsi que sa grande conductivité électrique et thermique. Dans cette étude, on a utilisé une poudre de cuivre pur, obtenue par atomisation à gaz, et ayant une forme sphérique (figure 4.1).

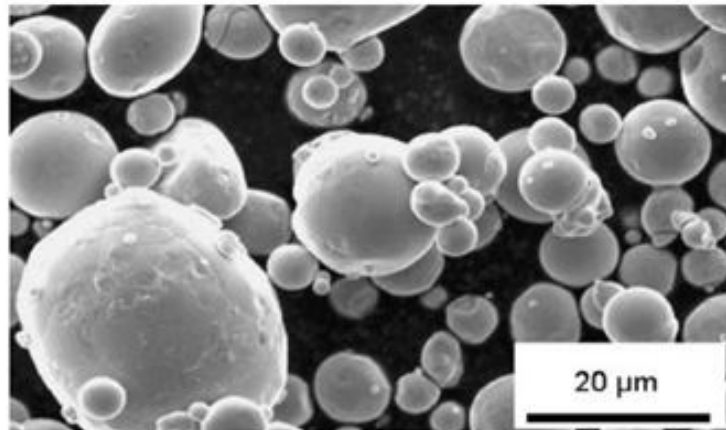


FIGURE 4.1 – Morphologie de la poudre de cuivre. Source : [6]

Les particules de cuivre utilisées dans cette étude expérimentale ont des tailles variant de 15 μm à 38 μm , dans la littérature [16] on trouve des études avec des particules de tailles variant entre 10 μm et 33 μm et qui ont une vitesse critique V_c allant entre 538 m/s et 520 m/s (selon la technique de mesure utilisée), c'est le cas le plus proche des paramètres de cette étude.

4.1.2 Matériau du substrat : acier AISI 1020

Les particules de cuivre sont projetées sur un substrat en acier à 0.2% de carbone (AISI 1020), sa composition chimique est présentée dans le tableau 4.1 :

Tableau 4.1 – Composition chimique de l'acier AISI 1020

C(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)
0.18-0.23	0.3-0.6	<0.04	<0.05

L'acier est largement utilisé comme substrat en Cold Spray, car il est suffisamment dur pour induire la déformation plastique des particules projetées, et garantir une bonne adhésion entre le substrat et le dépôt.

4.2 Paramètres étudiés

Dans ce mémoire, une étude paramétrique a été effectuée, afin d'étudier l'influence des paramètres du dépôt sur la microstructure et éventuellement sur les propriétés mécaniques on a quatre échantillon avec différents paramètres comme suit :

4.2.1 La température du gaz propulseur :

On a utilisé des températures de 300°C et 400 °C

4.2.2 La pression du gaz propulseur :

On a utilisé des pressions de 20 bar et 25 bar.

4.2.3 La distance du tir :

On a utilisé des distance de 30 mm et 40 mm

4.2.4 La préparation de la surface :

Avant la déposition, les surfaces des échantillon sont préparé (sablage), afin de faire varier Ra (Tableau 4.2).

4.2.5 Les paramètres fixés

a. La vitesse de balayage :

La vitesse de balayage est fixée à 500mm/s c'est une vitesse optimale pour la projection car elle limite le chauffage du substrat.

b. La taille des particules

La taille des particules est aussi fixé en se basant sur la littérature, comme mentionné dans 4.1.1, (15 - 38) μm .

4.2.6 Récapitulatif

Le tableau suivants résume les différents paramètres du dépôts pour les quatre échantillon :

Tableau 4.2 – Tableau résumant les conditions et paramètre des dépôts

Echantillon	Distance du tir (mm)	T (°C)	P (bar)	Rugosité (μm)
1	30	400	25	3,9
2	40	300	25	3,369
3	30	300	20	1,557
4	40	400	20	1,561

4.3 Moyens de Caractérisation

4.3.1 Microscope électronique à balayage

Afin d'observer la microstructure un microscope électronique à balayage a été utilisé, l'instrument est JSM-6360LV de la marque JEOL. Ce microscope est basé sur le principe du balayage synchrone d'un faisceau d'électrons (moins énergétiques) à la surface de l'échantillon. En chaque point, les électrons secondaires (rétrodiffusés) sont détectés et forment l'image de l'échantillon sur un écran à la résolution demandée (citehere) (agrandissement), (figure (4.2))

Caractéristiques :

- Filament W
- Grossissement standard de 5 à 60 000 fois
- Résolution :
- 3 nm en mode vide complet
- 4 nm en mode vide partiel



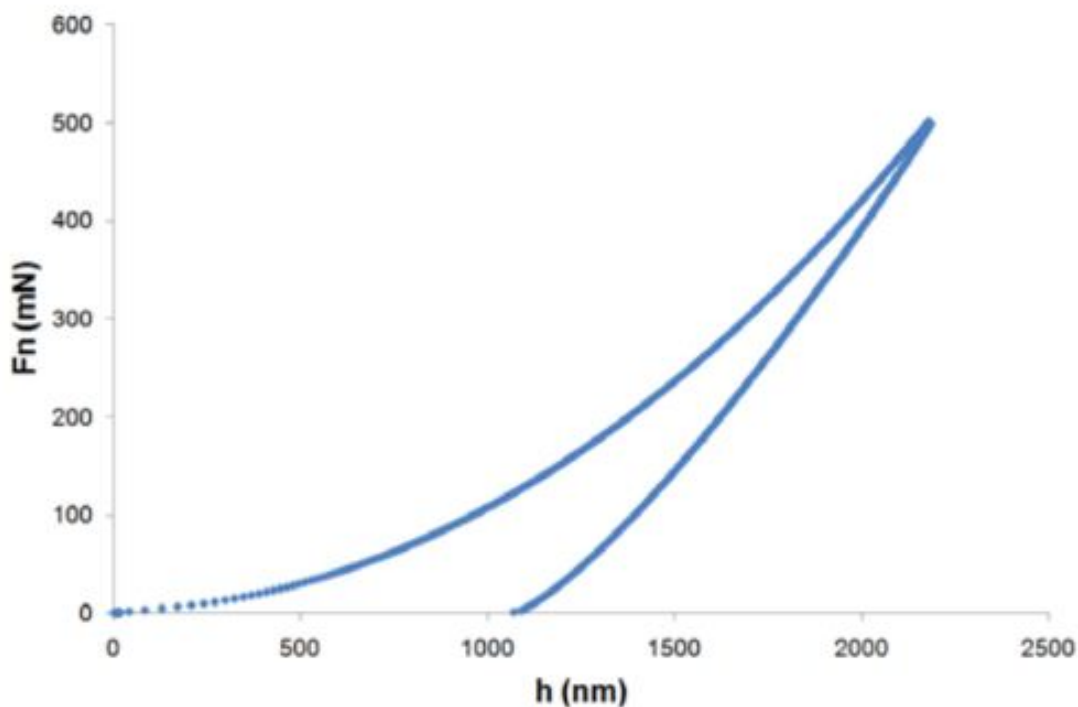
FIGURE 4.2 – Appareil : Jeol JSM 6360.

Pour cette étude on a obtenue pour chaque échantillon trois grossissements : x150, x350, et x1000

4.3.2 Dureté du dépôt

Nanoindentation :

La nano-indentation est une technique d'indentation qui permet de caractériser les propriétés d'un matériau aux échelles fines. Elle peut être appliquée aux matériaux massifs comme aux revêtements et aux couches minces. Son principe est comme celui d'autres essais de dureté, il consiste à appliquer une charge (l'indent qui pénètre la surface de l'échantillon) puis une décharge (figure (4.3)), la différence majeure est que la nanoindentation présente des gammes basses par rapport aux essais de dureté et micro dureté, (micronewton pour l'effort et l'échelle de nanomètre pour la profondeur de pénétration). La courbe charge/décharge en fonction de la profondeur de pénétration (figure (4.3)) est obtenue durant le test : en premier lieu, une charge qui augmente graduellement est appliquée, le système l'enregistre ainsi que la profondeur de pénétration, pareil pour la phase de décharge. Cette mesure continue permet d'avoir le tracé de la charge/décharge en fonction de la profondeur de pénétration le résultat (figure (4.3)).



Courbe charge - déplacement sur silice

FIGURE 4.3 – Courbe charge-décharge de la nanoindentation. Source : [35]

Types d'indents utilisés en nanoindentation

a. Indent de type Berkovich :

Une pyramide à base triangulaire (figure (4.4)).

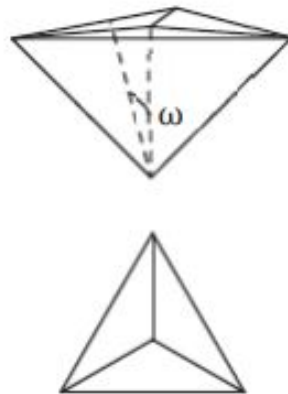


FIGURE 4.4 – Indent à géométrie Berkovich. Source : [35]

b. Indent sphérique :

Utilisé généralement dans le cas de matériaux mous(figure (4.5))

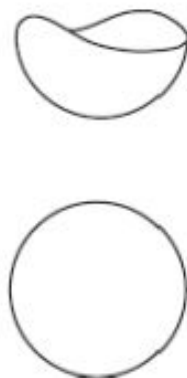


FIGURE 4.5 – Indent à géométrie sphérique. Source : [35]

c. Indent conique :

Très peu utilisé à cause de la difficulté à le fabriquer à petite échelle (figure (4.6)).

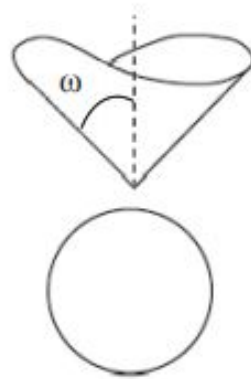


FIGURE 4.6 – Indent à géométrie conique. Source : [35]

Exploitation de la courbe et propriétés mesurées

Pour l'essai de nanoindentation l'appareillage utilisé est un nanoindentation tester (NHT) de la marque CSM (figure (4.8)), dans cet appareillage, la pointe est de type Berkovich (figure (4.7)).



FIGURE 4.7 – Nanoindentation tester (NHT) de CSM. Source : [35]

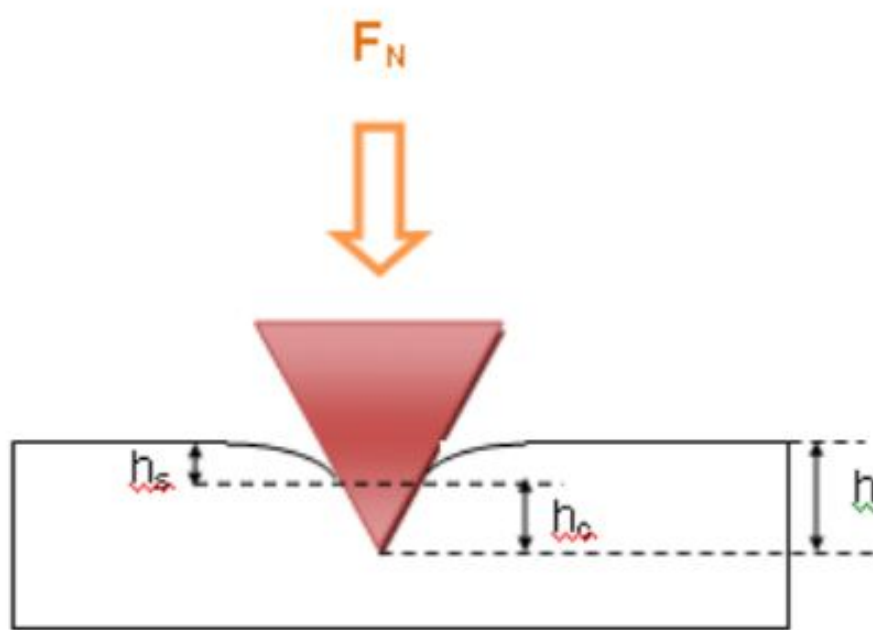


FIGURE 4.8 – Schéma d'un Indent Berkovich pénétrant un échantillon. Source : [35]

Après avoir eu la courbe (4.3), les deux propriétés principalement mesurées sont : Le module de Young (E), et la dureté (H), elles sont calculées en utilisant le modèle développé par Oliver et Pharr. Pour ce, on définit l'aire de contact A_c pour un indenteur Berkovich A_c est défini par :

$$A_c = 24,56h_c^2 \quad (4.1)$$

$$h_c = h_{max} - \varepsilon \cdot \frac{F_{max}}{S} \quad (4.2)$$

$$(4.3)$$

- Pour déterminer la dureté :

$$H = \frac{F_{max}}{A_c} \quad (4.4)$$

- Pour déterminer le module de Young :

$$S = \frac{\partial F}{\partial h} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot E_r \cdot \sqrt{A_c} \quad (4.5)$$

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu^2}{E} \quad (4.6)$$

"S" est calculé à l'aide de la courbe (4.3), (figure (4.9)).

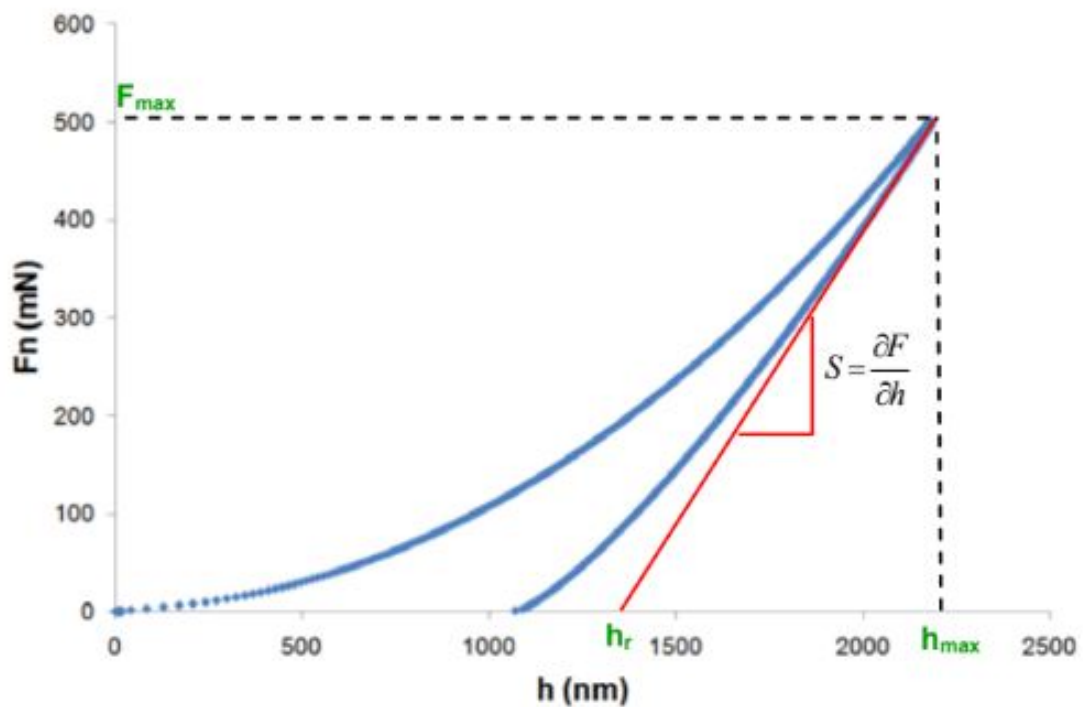


FIGURE 4.9 – Calcul de S à partir de la courbe. Source : [35]

. avec :

- E_r = module réduit.
- E_i = module de l'indenteur.
- E = module de l'échantillon.
- ν = coefficient de Poisson.

4.3.3 Diffraction des rayons X

La technique de diffraction des rayons X est utilisée afin de déterminer la distance entre les plans cristallographiques (distance interréticulaire d_{hkl}) et ce suivant la loi de Bragg : lorsque un matériau est irradié par un rayon monochromatique x chaque plan réticulaire (hkl) donne un faisceau diffracté :

$$n\lambda = 2d \sin(\theta) \quad (4.7)$$

avec :

- n est un nombre entier (ordre de diffraction).
- d est la distance interréticulaire.
- λ est la longueur d'onde des rayons X.
- θ est l'angle de Bragg.

la figure(4.10) illustre un exemple de résultat d'analyse DRX d'un revêtement $CuSn_6$.

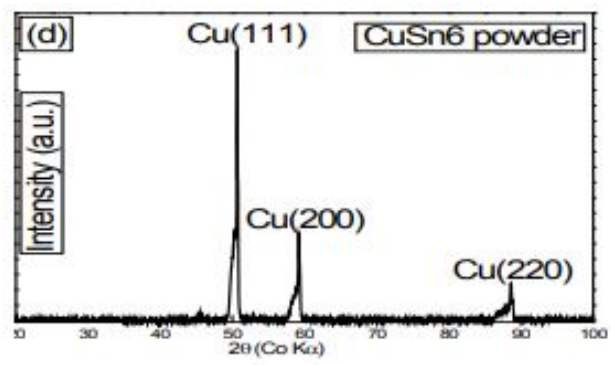


FIGURE 4.10 – diagramme de diffraction des rayons X d'un revêtement en CuSn6 réalisé par CS.

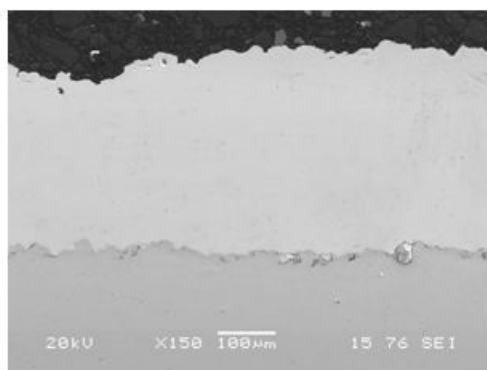
Résultats et discussion

5.1 Présentation des résultats

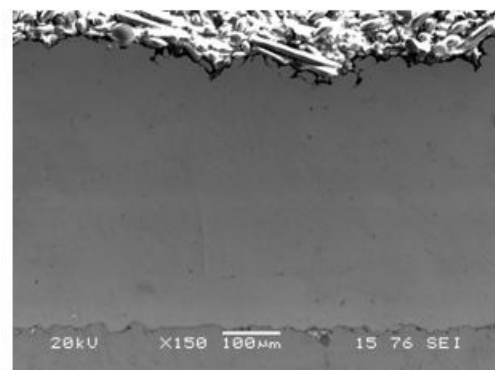
Après avoir réalisé le cold spray avec les paramètres mentionnés dans le tableau 4.2, pour chaque échantillon, on a effectué les caractérisations, on a obtenu les résultats qu'on présentera dans ce chapitre.

5.1.1 Les images MEB :

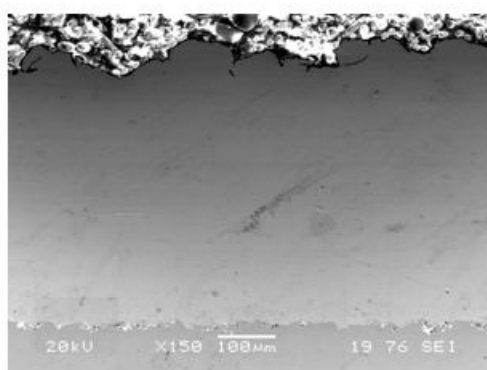
Ci-dessous les images des échantillons obtenues par MEB, pour chaque grossissement.



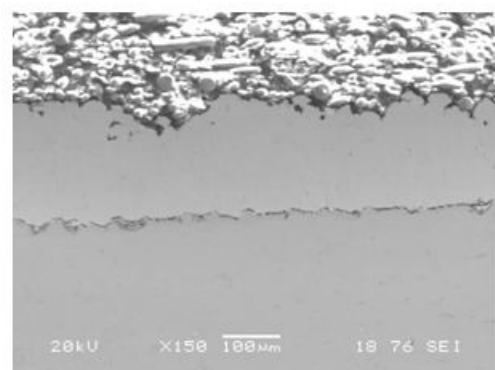
T= 400°C, P = 25 bar , d= 30 mm, Ra = 3.9 µm



T= 300°C, P = 25 bar , d= 40 mm, Ra = 3.369 µm

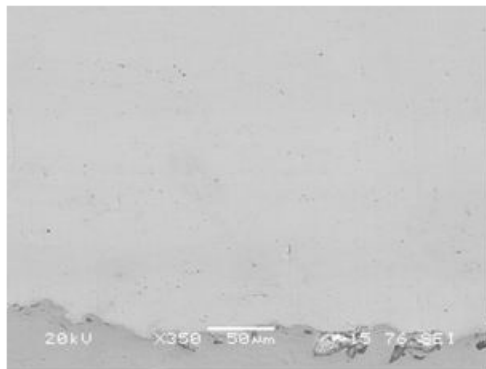


T= 300°C, P = 20 bar , d= 30 mm, Ra = 1.557 µm

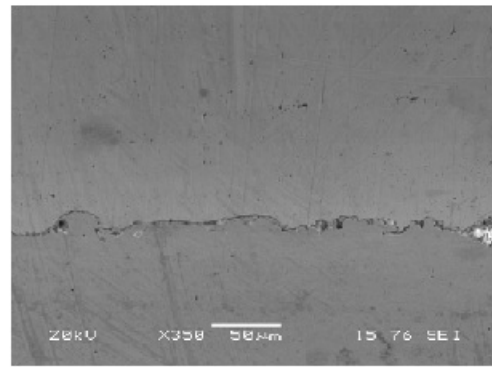


T= 400°C, P = 20 bar , d= 40 mm, Ra =1.561 µm

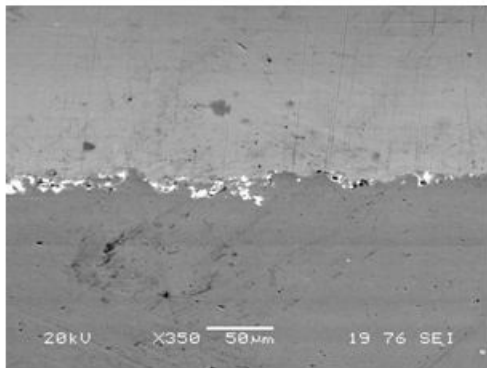
FIGURE 5.1 – Images MEB G x150 : a) échantillon 1 b) échantillon 2 c) échantillon 3 d)échantillon 4.



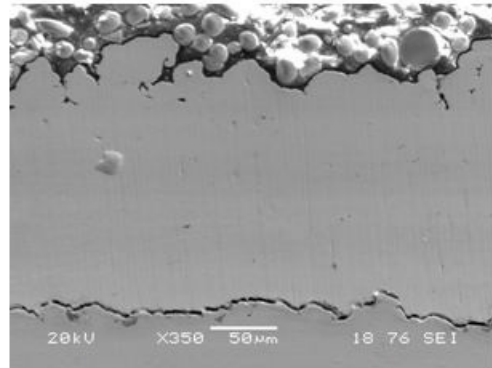
T= 400°C, P = 25 bar , d= 30 mm, Ra = 3.9 µm



T= 300°C, P = 25 bar , d= 40 mm, Ra = 3.369 µm



T= 300°C, P = 20 bar , d= 30 mm, Ra = 1.557 µm



T= 400°C, P = 20 bar , d= 40 mm, Ra = 1.561 µm

FIGURE 5.2 – Images MEB G x350 : a) échantillon 1 b) échantillon 2 c) échantillon 3 d)échantillon 4.

Dans la figure (5.1) on remarque bien les différences des épaisseurs des dépôts. un zoom nous permet de voir les différentes interface.

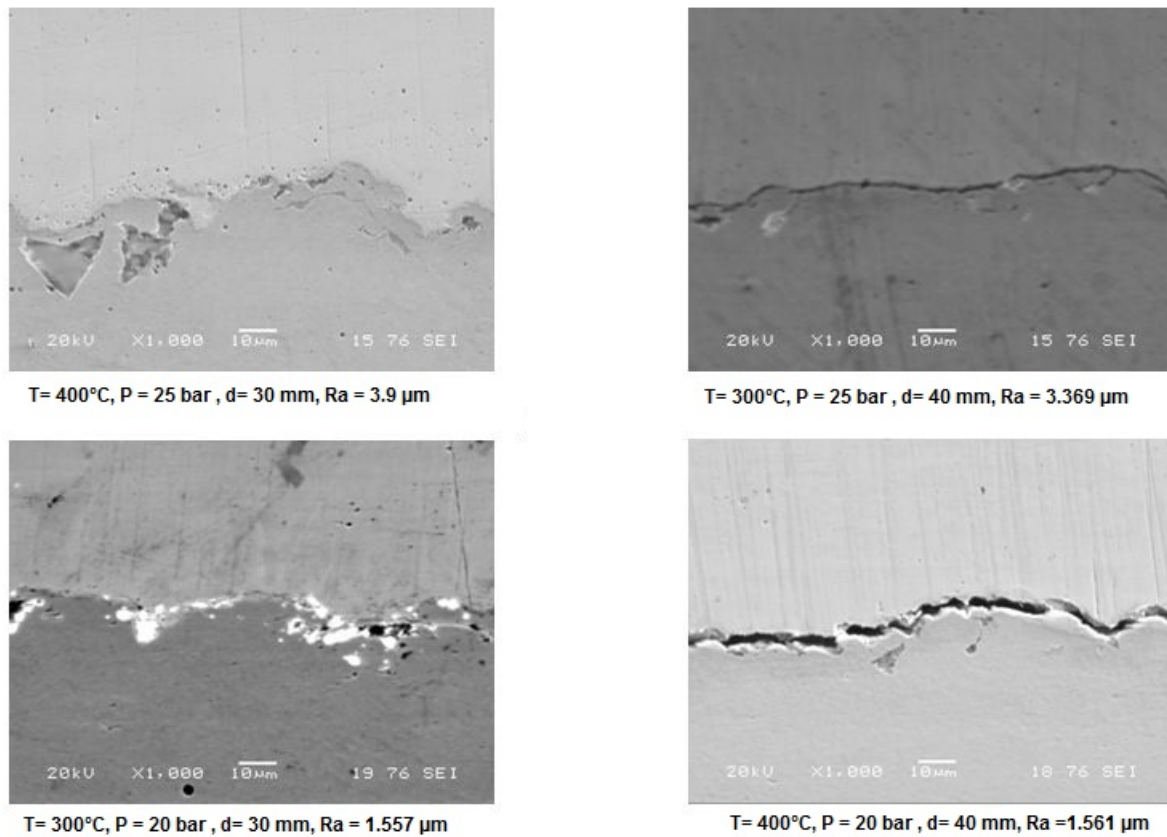


FIGURE 5.3 – Images MEB G x1000 : a) échantillon 1 b) échantillon 2 c) échantillon 3 d)échantillon 4.

5.1.2 Courbes des essais de nanoindentation :

Pour chaque échantillon on a obtenu une courbe de profondeur de pénétration en fonction de la charge/décharge , plusieurs propriétés sont calculées, nous nous intéressons uniquement aux : duretés et aux modules de Young.

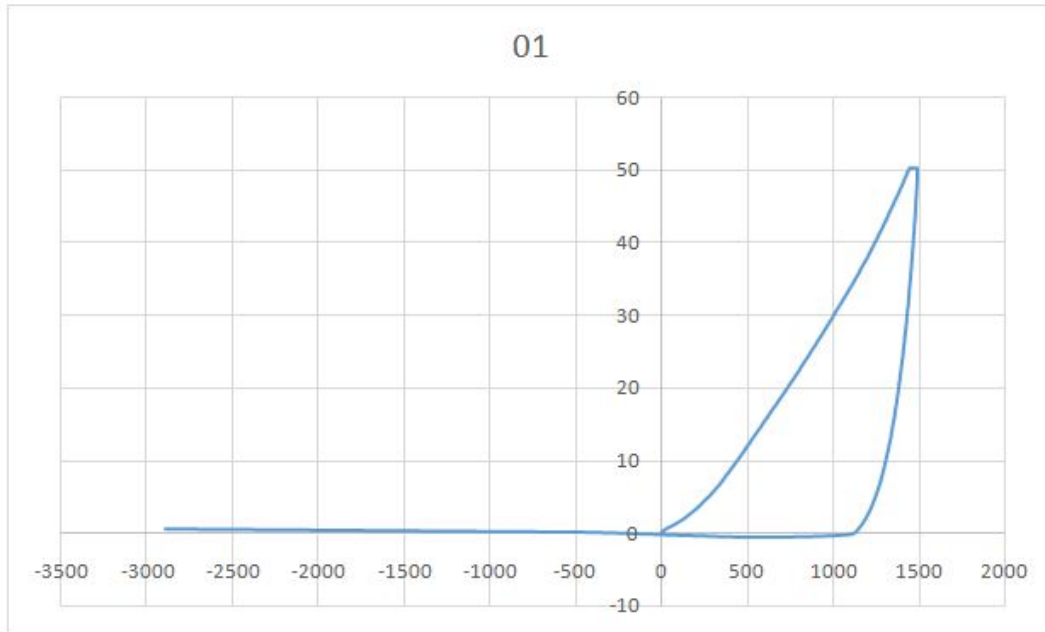


FIGURE 5.4 – Echantillon 01.

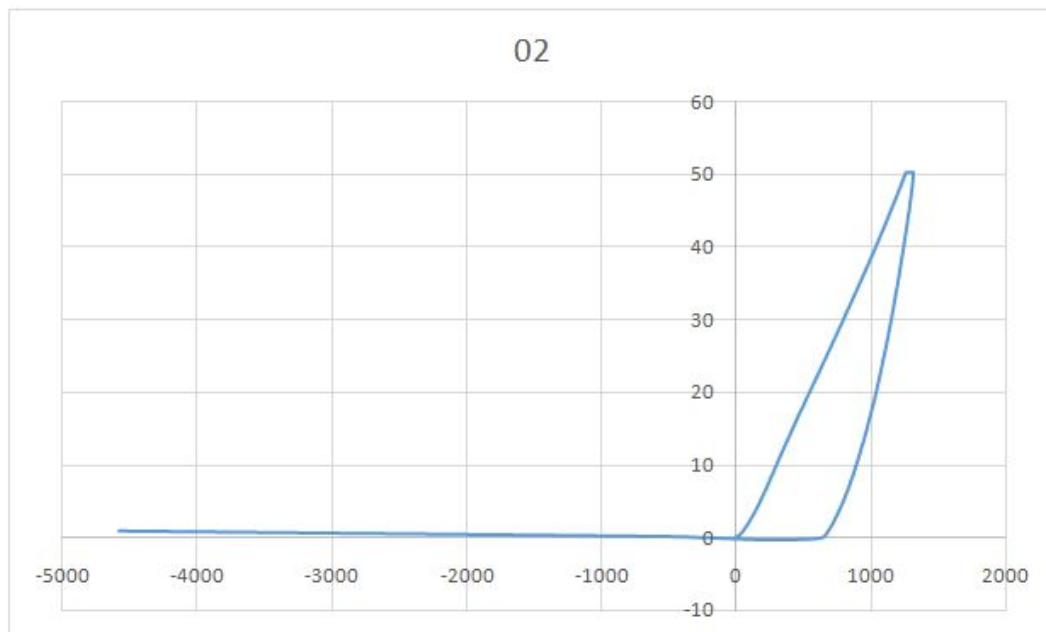


FIGURE 5.5 – Echantillon 02.

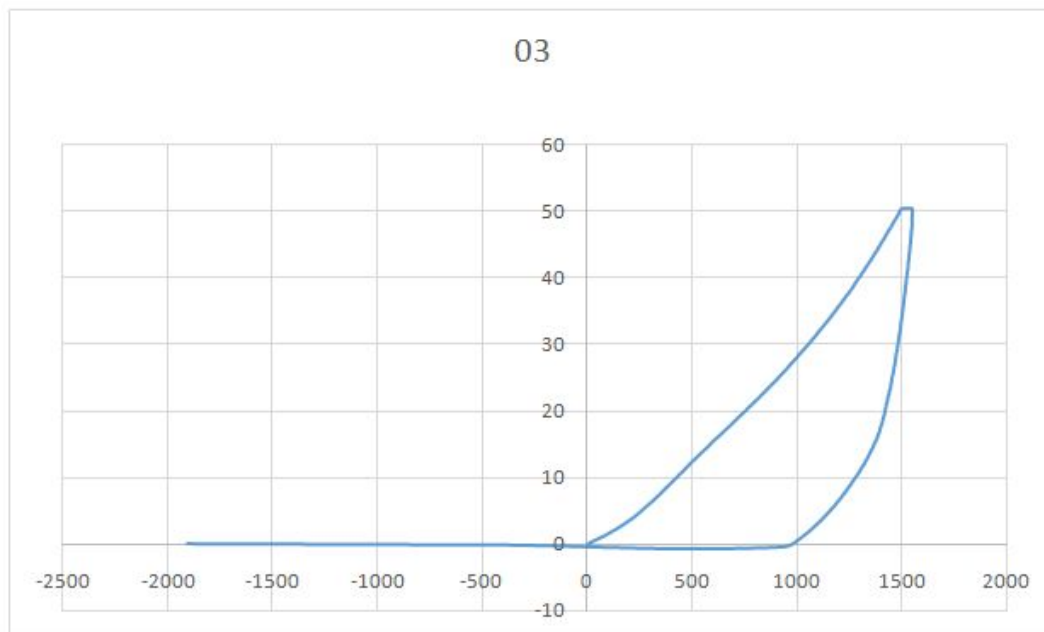


FIGURE 5.6 – *Echantillon 03.*

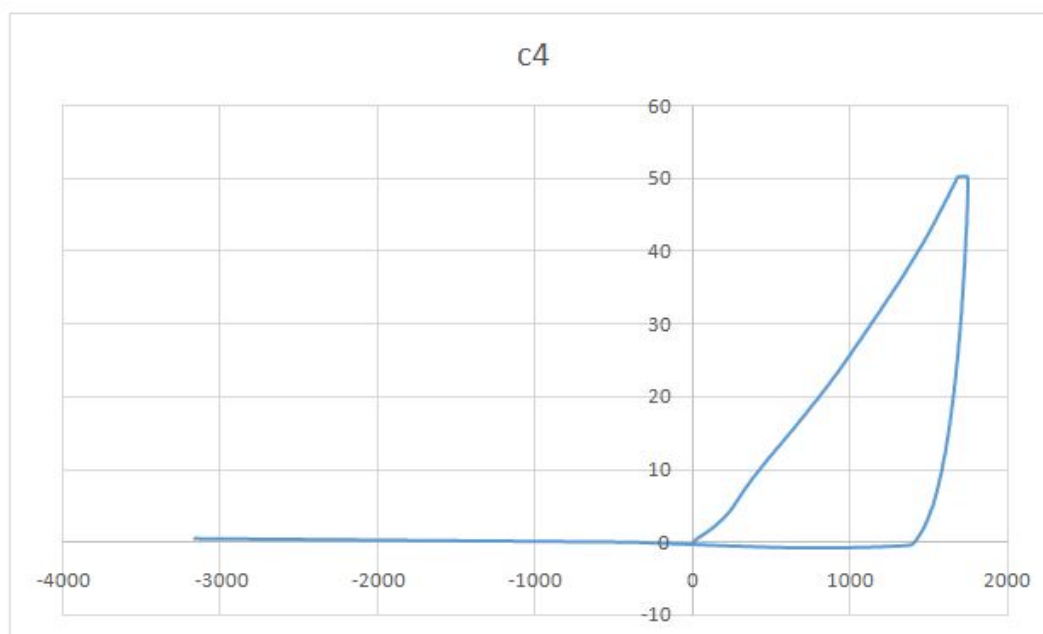


FIGURE 5.7 – *Echantillon 04.*

Le tableau suivant résume les duretés et les modules de Young pour chaque échantillon :

Tableau 5.1 – Tableau résumant les duretés et les modules de Young

Echantillon	Distance du tir (mm)	T (°C)	P (bar)	Dureté (Hv)	Young Modulus (GPa)
1	30	400	25	397.67	91.275
2	40	300	25	355.75	99.398
3	30	300	20	389.75	77.904
4	40	400	20	512.95	37.238

5.1.3 Porosités et épaisseurs des dépôts

Les porosités et les épaisseurs des dépôts peuvent être mesurées par un traitement d'image (images MEB), et en utilisant un outil numérique de traitement d'image.

Outil de traitement d'image :

L'outil software pour analyser et exploiter les images du MEB afin de quantifier la porosité et mesurer les épaisseurs des dépôts est le logiciel « imageJ ». Un logiciel du domaine publique « freeware » écrit en langage JAVA et créé par le National Institute of Health (NIH). Il permet une multitude de fonction de traitement d'images.

Tableau 5.2 – Tableau résumant les porosité et les épaisseurs des dépôts

Echantillon	Distance du tir (mm)	T (°C)	P (bar)	Porosités (%)	Epaisseurs (micro m)
1	30	400	25	0,510	334,68
2	40	300	25	1,012	544,14
3	30	300	20	0,43	480,89
4	40	400	20	0,219	201,14

5.1.4 Autres résultats de la littérature :

a. Diffraction des rayons X :

La diffraction des rayons X n'a pas été réalisée, mais on trouve dans la littérature des résultats pour les dépôts à base de cuivre qui confirment les observations MEB, c'est à dire l'homogénéité des dépôts et la similitude des dépôts à la poudre de cuivre projeté cela signifie que il n'y a pas d'oxydation [20].

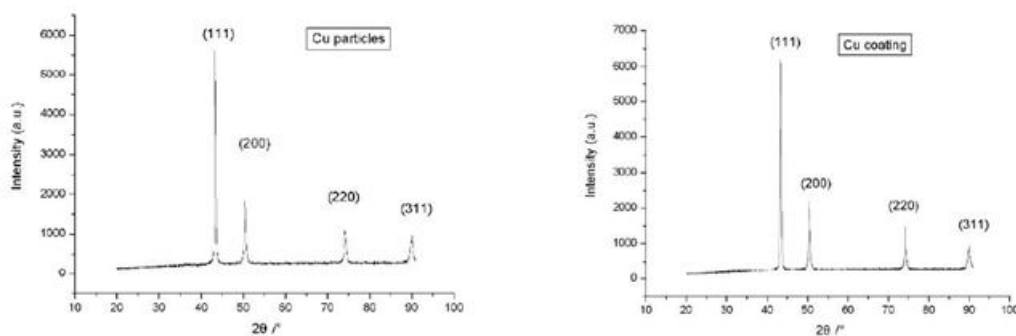


FIGURE 5.8 – diagramme DRX du cuivre (à gauche) et du dépôt (à droite). Source : [20]

5.2 Analyse et discussion :

5.2.1 Observation microscopique :

l'observation des images MEB nous a permis de voir l'aspect des dépôts et pour des grand grossissement, les interface, cependant ça ne permet pas de voir les phases qui existe ni la déformation des particules car il y a pas eu une attaque chimique. Une attaque chimique avant l'observation est préférable, cette dernière permettra de voir les joints de grains ainsi que la déformation des particules (figure 5.9)

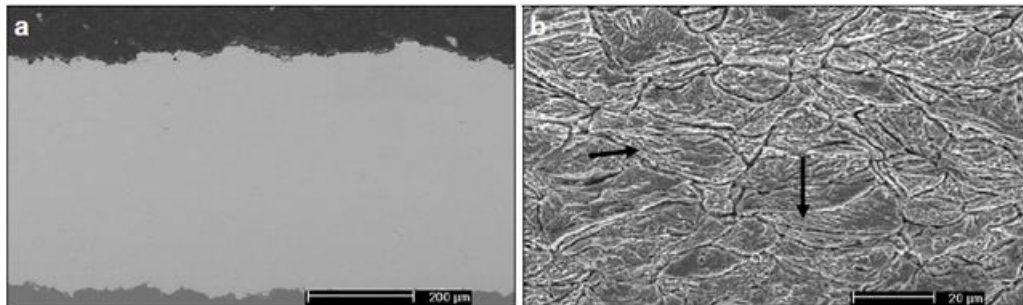


FIGURE 5.9 – Image d'un dépôt Cu sur substrat en acier : (a) sans attaque chimique (b) avec attaque chimique. Source : [6]

Pour les interface il y a deux choses qu'on observe, les fissures (figure (5.10) et (figure (5.11)).

Les deux échantillons présentant les fissures (e.i échantillon 02 et 04) ont la même distance du tir ($d = 40$ mm), la pression de l'échantillon (2) est de 25 bar, et celle de l'échantillon (4) est de 20 bar.

On peut aussi observer l'incrustation des particules dans les vallées du substrat (figure (5.12)).

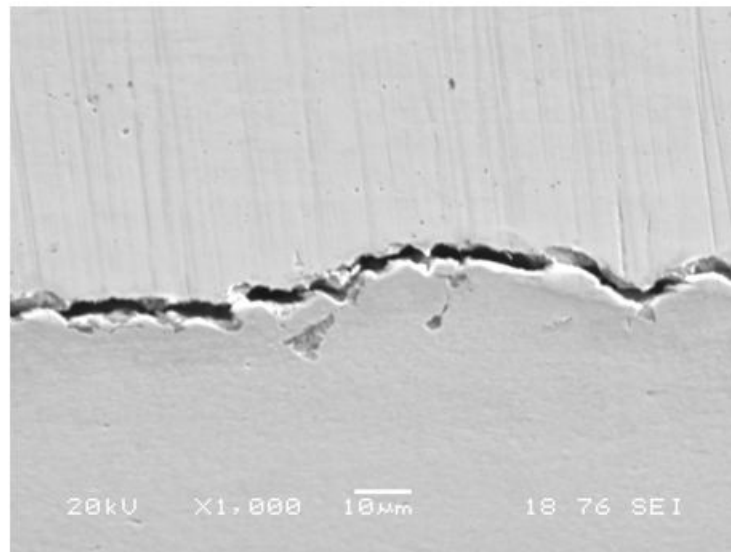


FIGURE 5.10 – Échantillon 4 x1000.

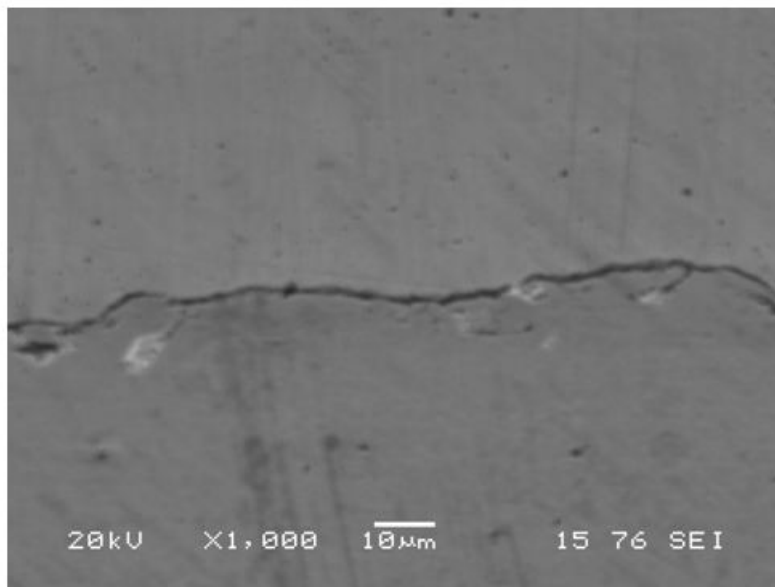


FIGURE 5.11 – Échantillon 2 x1000.

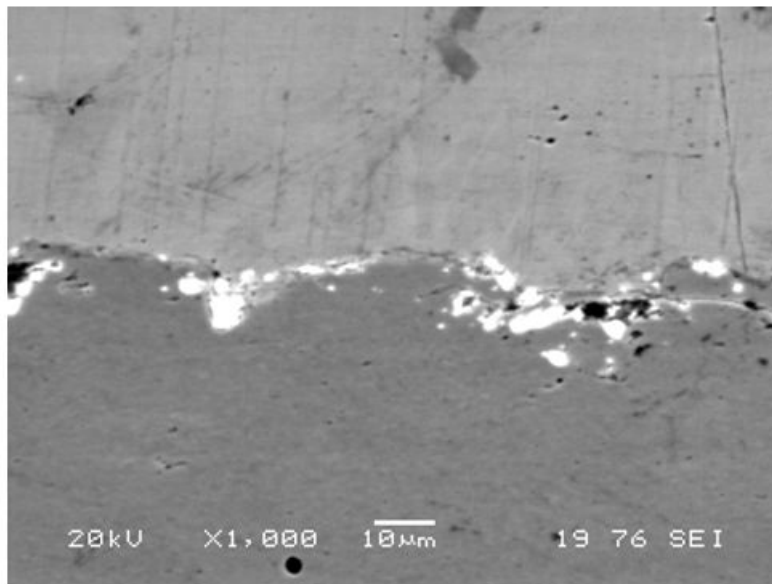


FIGURE 5.12 – Échantillon 3 x1000.

Le cold spray peut induire des contraintes internes qui causent le décollement du dépôt [2], le fait que le substrat soit constamment bombardé augmente les contraintes résiduelles, ce qui provoque une érosion. Les contraintes résiduelles dépendent des propriétés mécaniques des particules et du substrats, précisément quand les particules sont plus dures que le substrat.

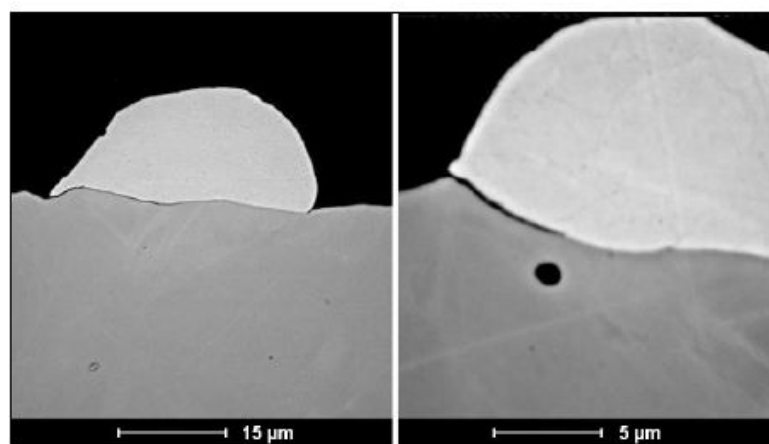


FIGURE 5.13 – Image MEB d'une particules de Nickel qui décolle d'un substrat en acier 316L.

8

Un autre paramètre, tout aussi important, est la vitesse des particules qui peut causer le décollement et le fait qu'il y ait pas suffisamment d'énergie cinétique permettant l'adhérence. ce qui est en commun entre les deux échantillons présentant des fissures à l'interface est la distance du tir qui est de 40 mm , est plus grande que les autres

échantillon Tableau (4.2).

En effet la vitesse des particules diminue entre la tuyère et le substrat, et plus cette distance est grande, plus la décélération est importante [21].

Ainsi ; dans [21], en variant la distance du tir la qualité du dépôt a changé, notamment l'épaisseur, en plus, le dépôt le plus épais a été obtenu à une distance de 30 mm pour les dépôts en cuivre (figure(5.14),

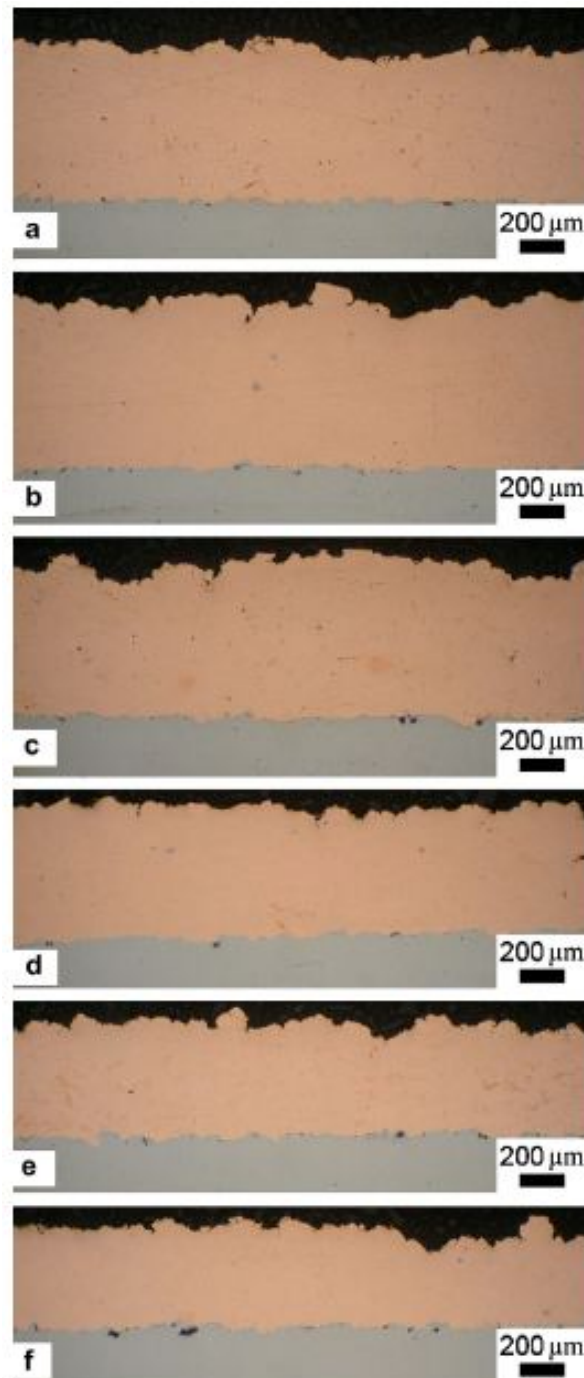


FIGURE 5.14 – Micrographie des dépôts en cuivre déposés à des distances de : a) 10 mm b)30 mm d)70 mm e) 90 mm f) 110 mm. Source : [21]

ce qui est conforme avec les résultats de cette étude (figure (5.1)).

Les fissures observées peuvent aussi être le résultat de la préparation des surfaces. Une forte rugosité favorise l'ancrage mécanique mais parfois les impuretés qui restent après le sablage peuvent empêcher l'adhésion des particules.

Les résultats montrent aussi que la dureté des dépôts de cuivre augmente considéra-

blement par rapport à la dureté du matériau brut (100 HV environ). Cela peut être expliqué par l'effet de la grande déformation plastique ayant lieu à l'impact, et du bombardement des particules sur la surface du substrat qui provoque son écrasement, et donc son durcissement.

Au final, les différentes conditions de traitement influence les caractéristiques des dépôts, et ce parce que ces paramètres influence principalement la vitesse et la température des particules portées par le gaz propulseur (figure (5.15)), ce gaz est lui même influencé par les paramètres de la tuyère de Laval.

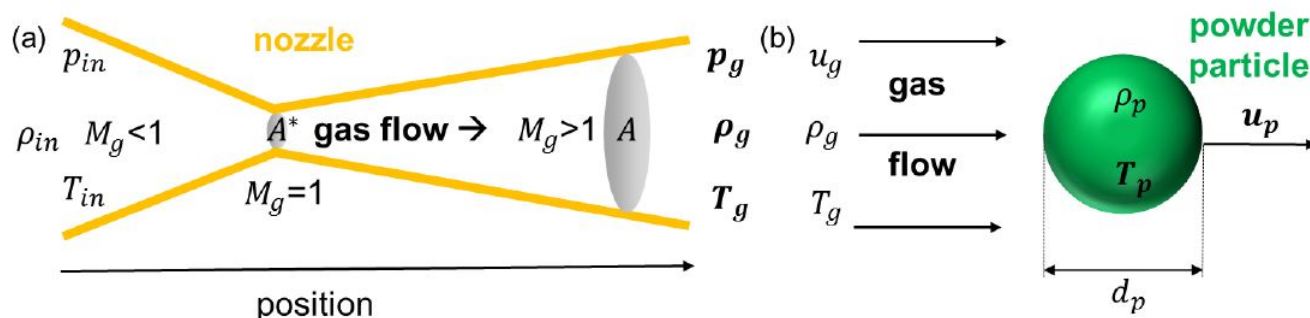


FIGURE 5.15 – Schéma descriptif de a) le flux du gaz dans la tuyère b) l'accélération d'une particule.

En effet la courbe (figure (5.16)), qui montre l'influence de du rapport de A_e/A^* sur la vitesse des particules.

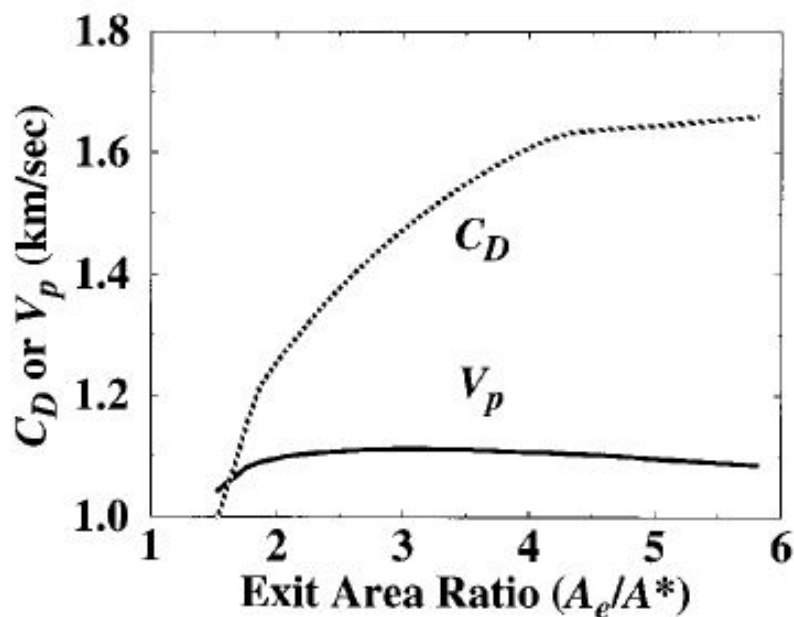


FIGURE 5.16 – Vitesse des particules et coefficient de traînée en fonction du rapport A_e/A de la tuyère.

C_D est le coefficient de la traînée d'une particule, c'est un coefficient aérodynamique qui dépend de la surface de contact entre les particule et le gaz, l'évolution de ce coefficient influence l'accélération des particules selon l'équation suivante :

$$ma_p = m \frac{dV_p}{dt} = mV_p \frac{dV_p}{dx} = \frac{C_D A_p \rho (V - V_p)^2}{2} \quad (5.1)$$

Pour bien comprendre l'aspect dynamique de fluide du procédé cold spray, on fait une simulation numérique CFD (computational fluid mechanics) afin de voir l'évolution du gaz propulseur dans une tuyère de Laval en fonction des paramètres de projection. ce qui fera l'objet du chapitre suivant.

Modélisation de l'écoulement d'un Gaz dans la tuyère de La- val

Dans cette partie, on vise à étudier l'effet de la géométrie de la tuyère, du type de gaz de propulsion et des paramètres d'entrée sur les propriétés du flux du gaz, afin de visualiser leur impact sur la vitesse d'écoulement des particules projetées.

6.1 Type d'écoulement étudié

Pour des vitesses supersoniques, l'écoulement du gaz connaît des variations de pression importantes provoquant des gradients de densité qui doivent être pris en considération, et donc, l'écoulement devient compressible. Cette précision est prise en compte dans l'étude numérique.

6.2 Paramètres de simulation

6.2.1 Nature du gaz de propulsion

Un gaz à haute pression est utilisé pour générer l'écoulement qui emporte les particules à déposer. Le gaz utilisé est souvent l'hélium, l'azote ou l'air. L'hélium est favorisé grâce à sa légèreté qui contribue à atteindre de plus grandes vitesses d'écoulement, mais comme son coût est trop élevé, on opte souvent pour l'azote ou l'air au détriment de la vitesse de projection.

6.2.2 Géométrie de la tuyère

Etant donné que l'écoulement du gaz passe énergétiquement supersonique dans la tuyère de Laval, on peut dire que la vitesse locale du gaz est supérieure à la vitesse du son dans ce gaz. Ce rapport est appelé « nombre de Mach », noté : M , et défini par :

$$M = \frac{\text{Vitesse locale du gaz}}{\text{Vitesse du son dans le gaz}} \quad (6.1)$$

- $M < 1$: écoulement subsonique.
- $M = 1$: écoulement sonique.
- $M > 1$: écoulement supersonique.
- $M > 5$: écoulement hypersonique.

L'utilisation des théories de la dynamique des fluides révèle que l'utilisation d'une tuyère convergente-divergente est requise pour accélérer l'écoulement gazeux.

jusqu'à des vitesses supersoniques. De plus, la vitesse locale du gaz dans la tuyère de Laval est gouvernée par la géométrie de la tuyère, tel que :

$$\left(\frac{dV}{V}\right)(1 - M^2) = -\left(\frac{dA}{A}\right) \quad (6.2)$$

$\frac{dA}{A}$ représente l'évolution de la section le long de la tuyère si : $\frac{dA}{A} < 0$ implique une diminution de la surface donc une partie convergente.

$\frac{dA}{A} > 0$ implique une augmentation de la section donc une partie divergente.

Pour $(1 - M^2) > 0$ ($M < 1$) (flux subsonique), la variation de la vitesse ($\frac{dV}{V}$) est de

signe inverse à la variation de la section, donc pour augmenter la vitesse il faut que diminuer la section d'où la convergence de la première partie de la tuyère.

Pour $(1 - M^2) > 0 (M < 1)$ (flux supersonique), la variation de la vitesse ($\frac{dV}{V}$) est de même signe que la variation de la section, donc pour augmenter la vitesse il faut augmenter la section, d'où la divergence de la deuxième partie de la tuyère.

6.2.3 Conditions de stagnation

Pour accélérer la vitesse d'écoulement du gaz utilisé, on joue sur les paramètres d'entrée, aussi appelés «conditions de stagnation », parce que la vitesse d'entrée de la tuyère est négligeable donc on considère le flux comme stagnant à ce point. Ces paramètres sont la température T_0 et la pression de stagnation P_0 . Comme l'écoulement est compressible, la densité du gaz n'est pas constante, et elle diminue le long de la tuyère quand le gaz s'étend. Pour surmonter cela, il est conseillé d'utiliser une haute pression de stagnation, qui peut aller jusqu'à 5 MPa, provoque l'augmentation de la densité du gaz et améliore la force d'entraînement de l'écoulement. La pression de stagnation est proportionnelle à la pression de décharge P_S et au nombre de Mach de sortie M_S , tel que :

$$\frac{P_0}{P_S} = \left[\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \right) M_S^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (6.3)$$

On voit bien que P_0 et M_S sont proportionnels. Rappelons que :

$$V = M.C \quad (6.4)$$

Tel que V est la vitesse du gaz, et M est le nombre de Mach et C est la vitesse du son. Donc l'augmentation de P_0 contribue à l'augmentation de la vitesse de sortie de l'écoulement et des particules projetées. D'autre part, l'augmentation de la température de stagnation T_0 fait augmenter la température du gaz dans la tuyère, et donc augmente la vitesse locale du gaz aussi. Sachant que le nombre de Mach est proportionnel à la température de stagnation T_0 :

$$\frac{T_0}{T} = \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} \right] M^2 \quad (6.5)$$

Donc, on voit bien que la vitesse de l'écoulement dépend de T_0 et P_0

6.3 Aspect Numérique

Afin de réaliser la modélisation de l'écoulement du gaz dans la tuyère de Laval, on a utilisé le logiciel Ansys Fluent (Ansys Student version 2020 R1, ANSYS, Inc.) qui permet d'effectuer des simulations spécialisées dans la mécanique des fluides.

6.3.1 Conception :

La conception de la géométrie de la tuyère est faite à l'aide de Ansys Design Modeler. Dans le but d'étudier l'effet de la géométrie sur la vitesse d'écoulement, on a élaboré deux géométries qui ont la même longueur et le même diamètre d'entrée, mais qui

sont différentes par leur diamètre de sortie (figures 6.1 et 6.2.

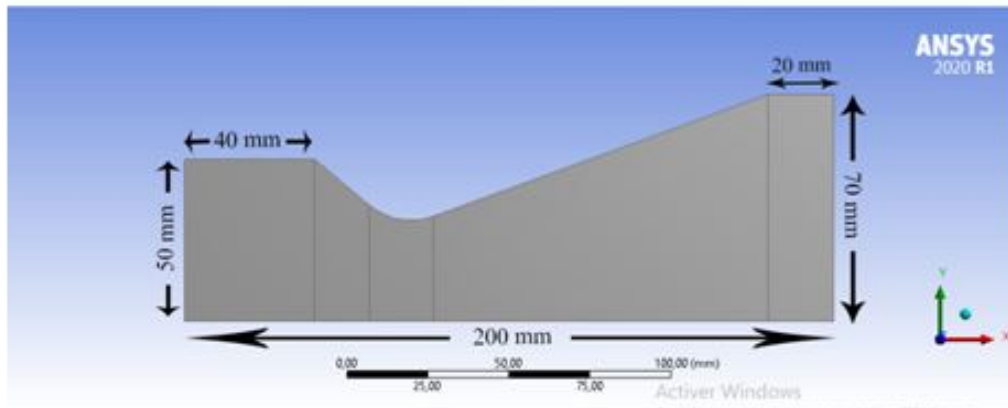


FIGURE 6.1 – Géométrie de la tuyère 1.

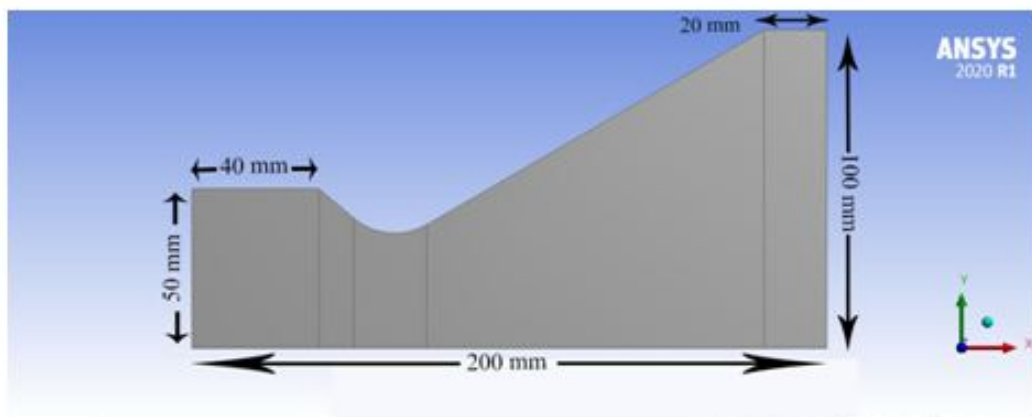
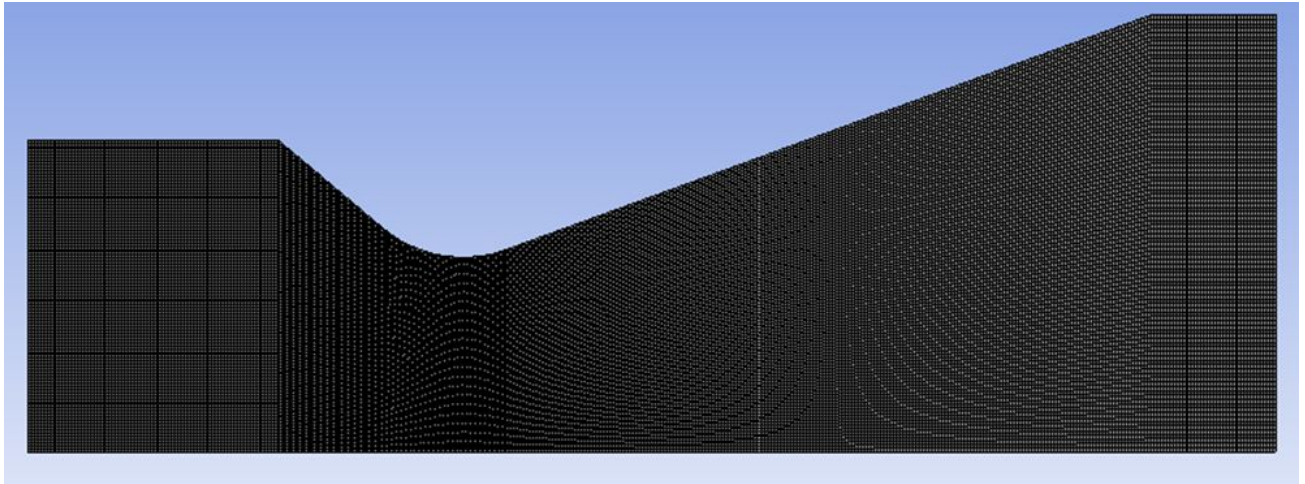
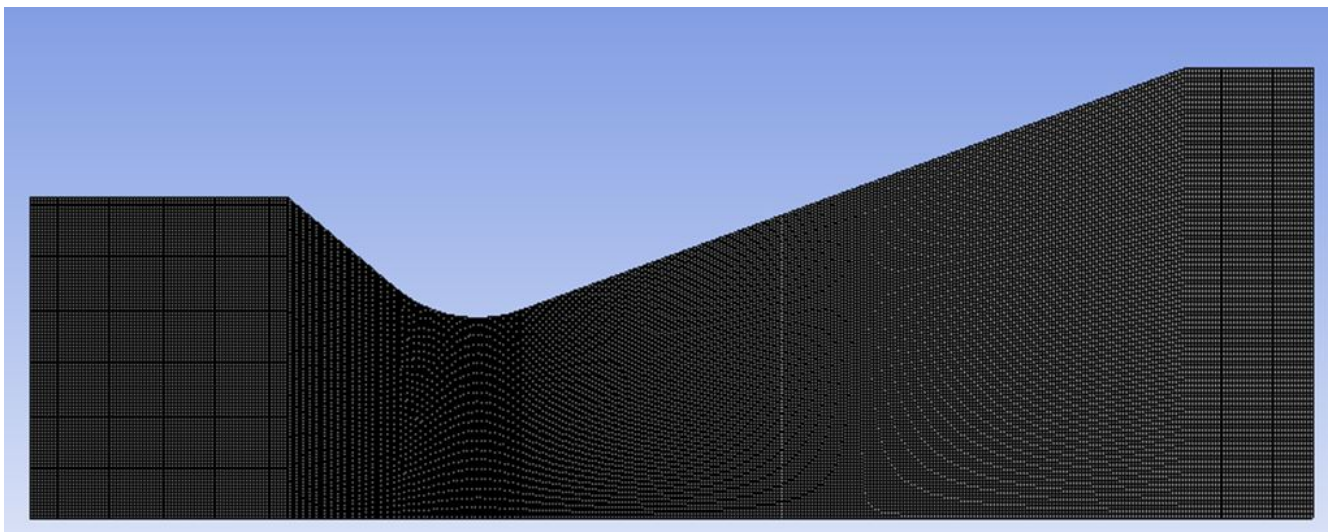


FIGURE 6.2 – Géométrie de la tuyère 2.

). Comme la géométrie des tuyères est symétrique, on a fait la conception de la moitié de la tuyère uniquement.

6.3.2 Maillages

Le maillage des tuyères a été fait avec AnsysMeshing, qui est l'outil de maillage de Ansys.

FIGURE 6.3 – *Maillage de la tuyère 1.*FIGURE 6.4 – *Maillage de la tuyère 2.*

6.3.3 Résultats numériques

a. Effet de la nature du gaz propulseur

Pour visualiser l'effet de la nature du gaz propulseur sur les propriétés de l'écoulement, on a utilisé la tuyère 1, avec les conditions de stagnation suivantes : P_0 2.5 MPa et $T_0 = 600$ K.

Cas de l'air

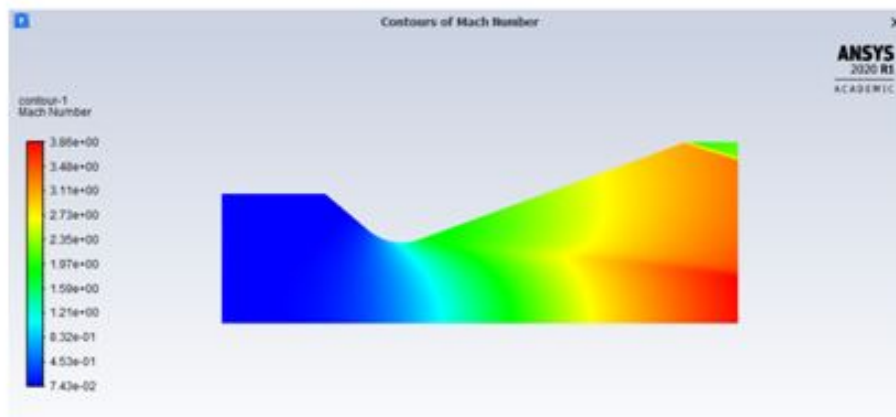


FIGURE 6.5 – Variation du nombre de Mach.

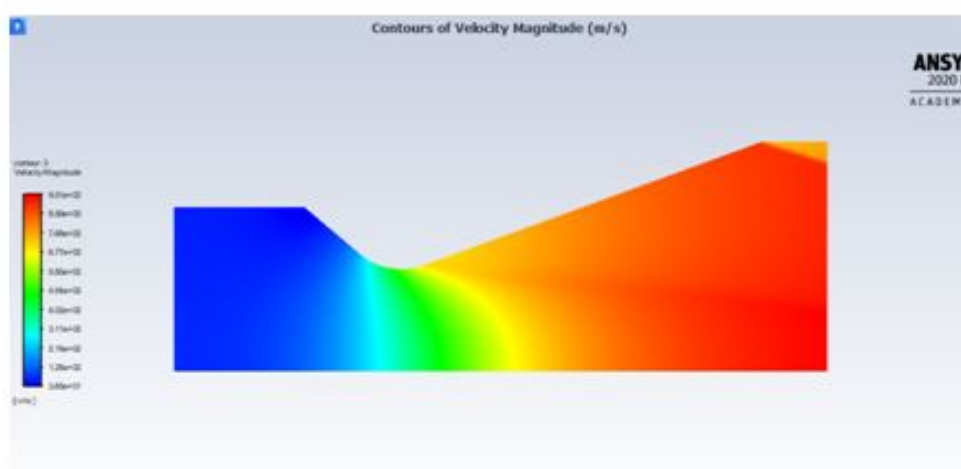


FIGURE 6.6 – Variation de la vitesse.

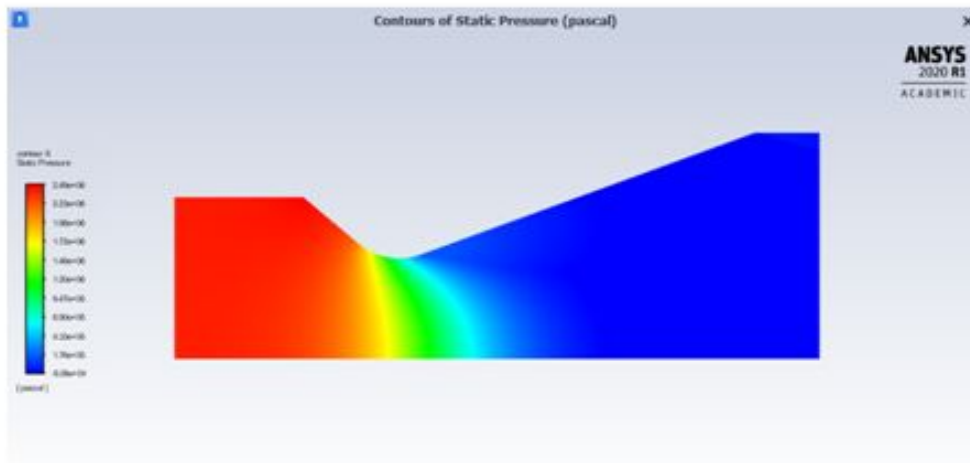


FIGURE 6.7 – Variation de la pression.

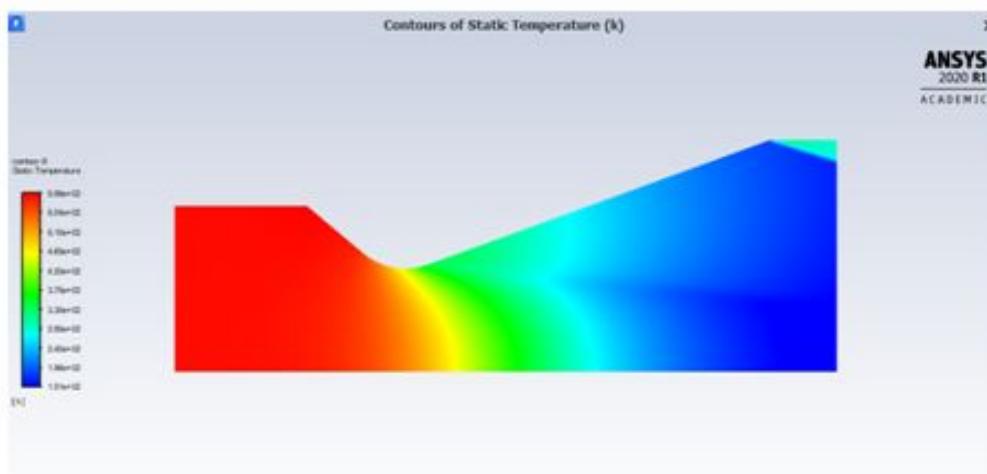


FIGURE 6.8 – Variation de la température.

Cas de l'azote

D. Cas de l'azote .

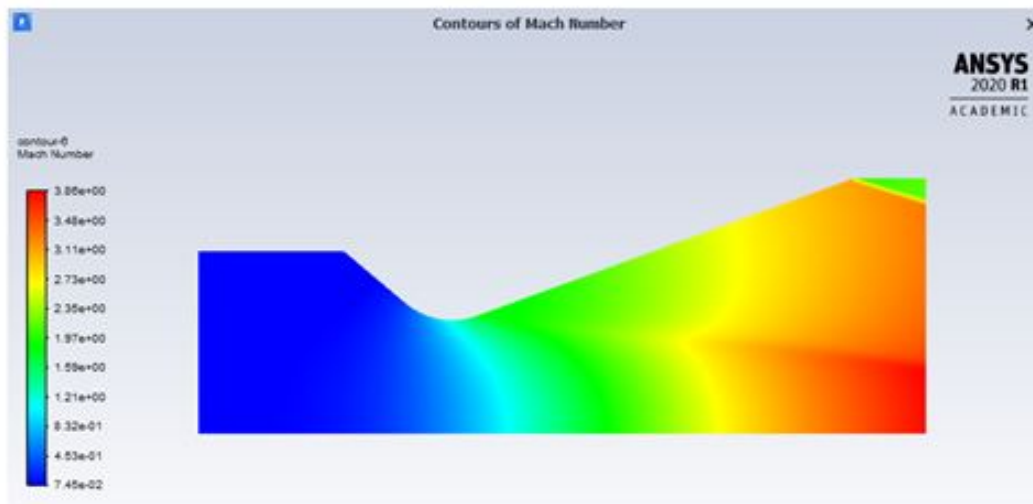


FIGURE 6.9 – Variation du nombre de Mach.

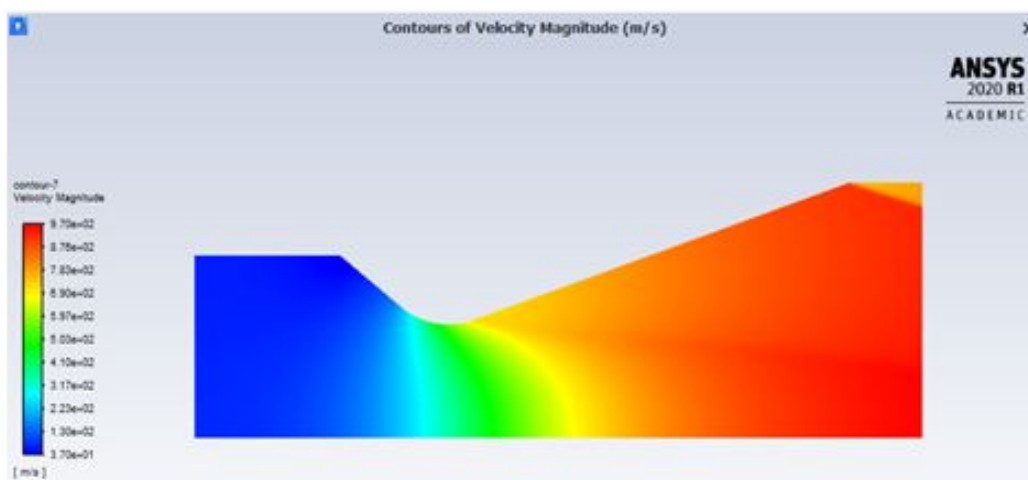


FIGURE 6.10 – Variation de la vitesse.

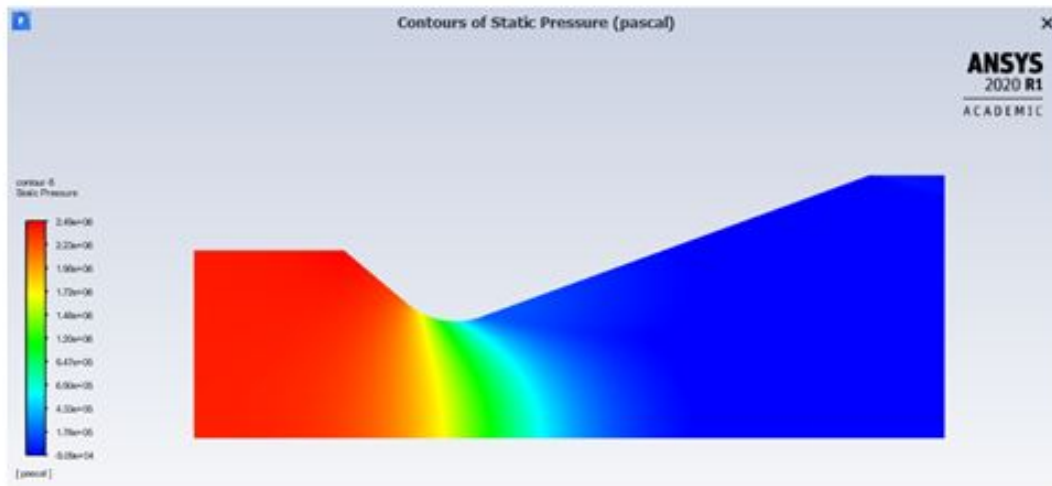


FIGURE 6.11 – Variation de la pression.

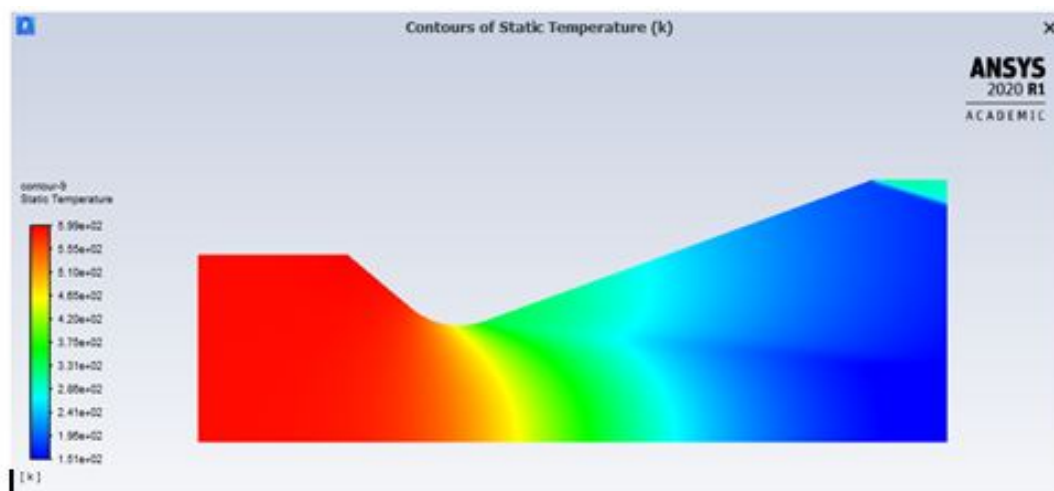


FIGURE 6.12 – Variation de la température.

Cas de l'hélium

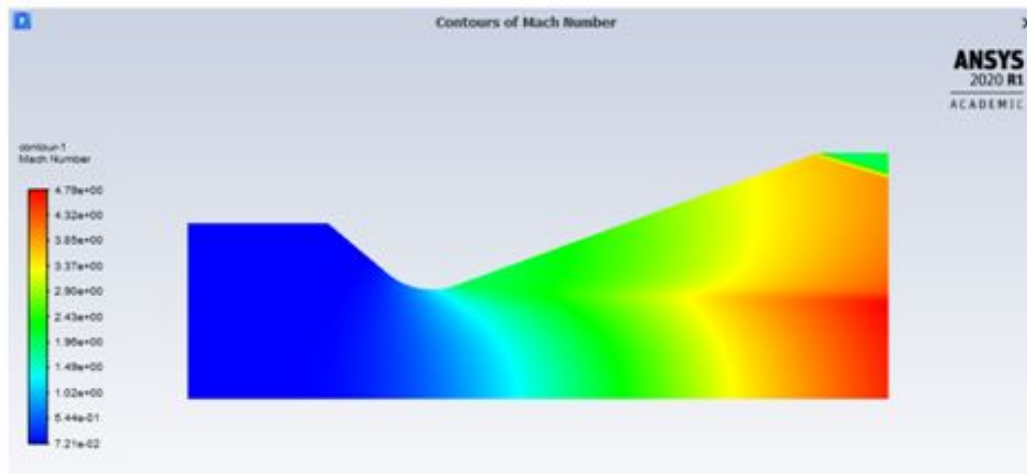


FIGURE 6.13 – Variation du nombre de Mach.

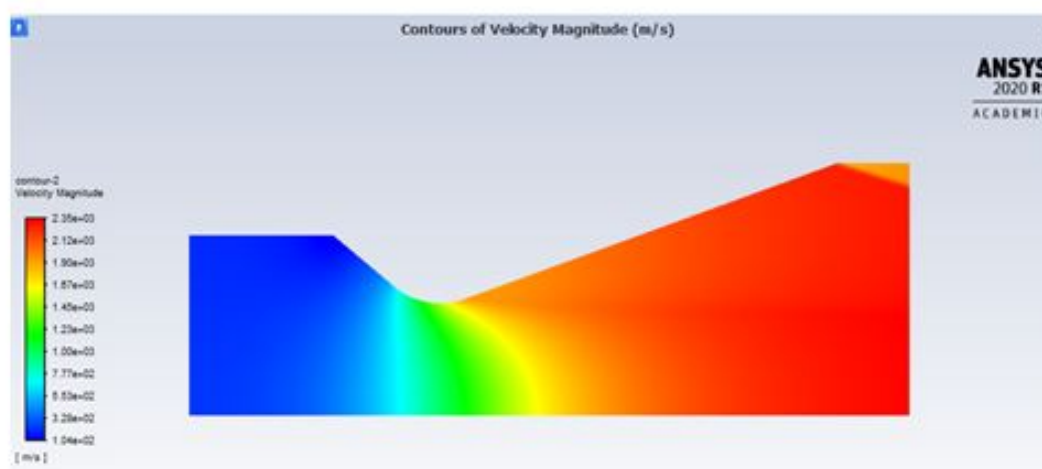


FIGURE 6.14 – Variation de la vitesse.

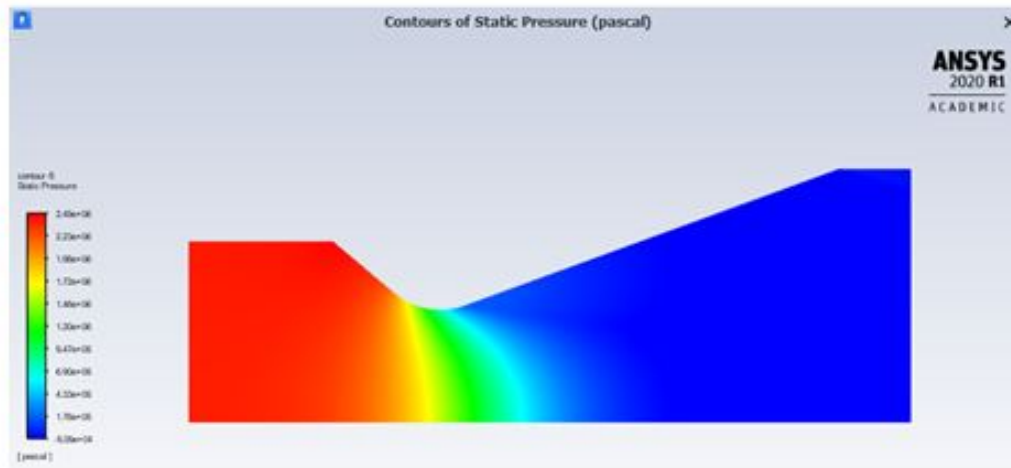


FIGURE 6.15 – Variation de la pression.

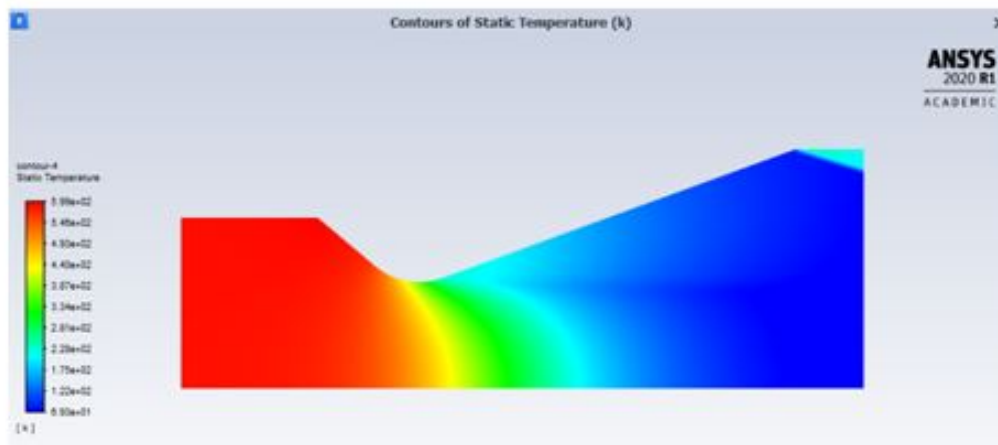


FIGURE 6.16 – Variation de la température.

Tableau récapitulatif

Tableau 6.1 – Tableau récapitulatif de l'effet de la nature du gaz

Gaz propulseur	Air	Azote	Hélium
Ms	3.86	3.86	4.79
Vs (m/s)	950.82	969.63	2347.49
Ts(k)	150.72	151.35	69.31

Commentaire

Comme prévu par la théorie, on voit bien que l'utilisation de l'hélium en tant que gaz propulseur accélère la vitesse de l'écoulement et augmente considérablement le nombre de Mach, tel que : $V_S(He) = 2.5V_S(N_2) = 2.5V_S(air)$ Et : $M_S(he) = 5$, qui veut dire que la vitesse de sortie du gaz est hypersonique.

De plus, on voit que les valeurs de pression et de température baissent dans les trois cas, mais leur baisse est plus considérable quand l'hélium est utilisé.

Visualisation des résultats

En utilisant la géométrie de la tuyère 1, on a fait varier les conditions de stagnation du gaz propulseur (N_2) afin de visualiser leur effet sur la vitesse d'écoulement.

a. Cas 1 : $P_0 = 1\text{MPa}$ $T_0 = 300\text{ k}^\circ$

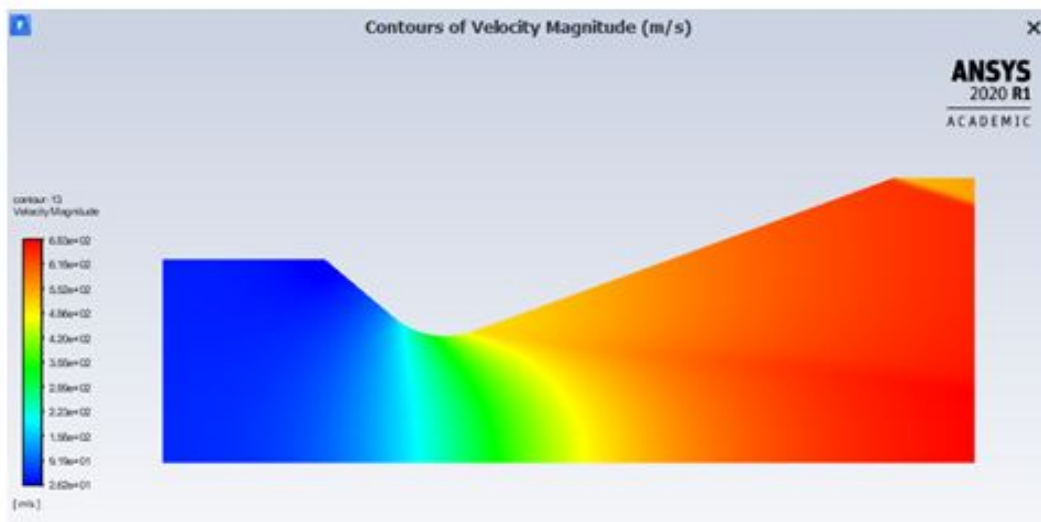


FIGURE 6.17 – Variation de la vitesse $P_0 = 1\text{Mpa}$ $T_0 = 300\text{ k}$.

b. Cas 2 : $P_0 = 2.5\text{ MPa}$ $T_0 = 600\text{ k}^\circ$

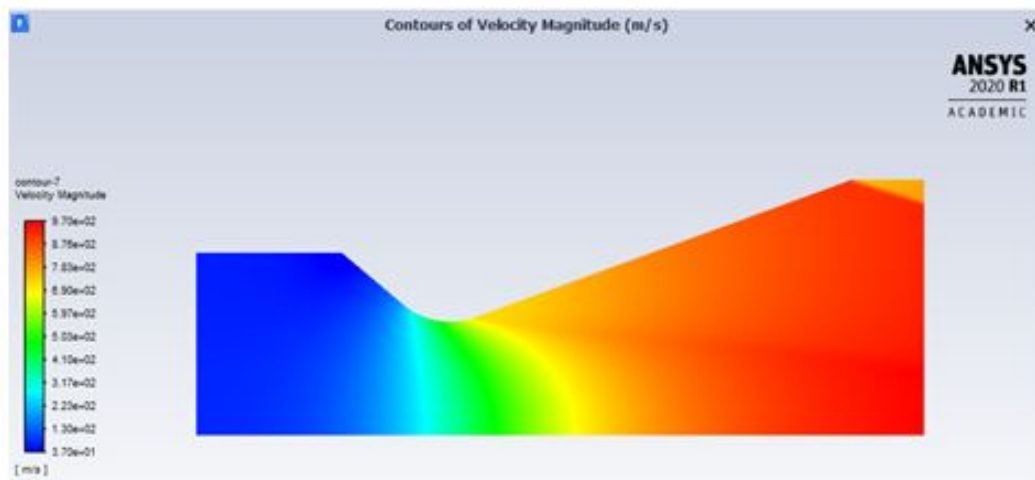


FIGURE 6.18 – Variation de la vitesse $P_0 = 2.5\text{ Mpa}$ $T_0 = 600\text{ k}$.

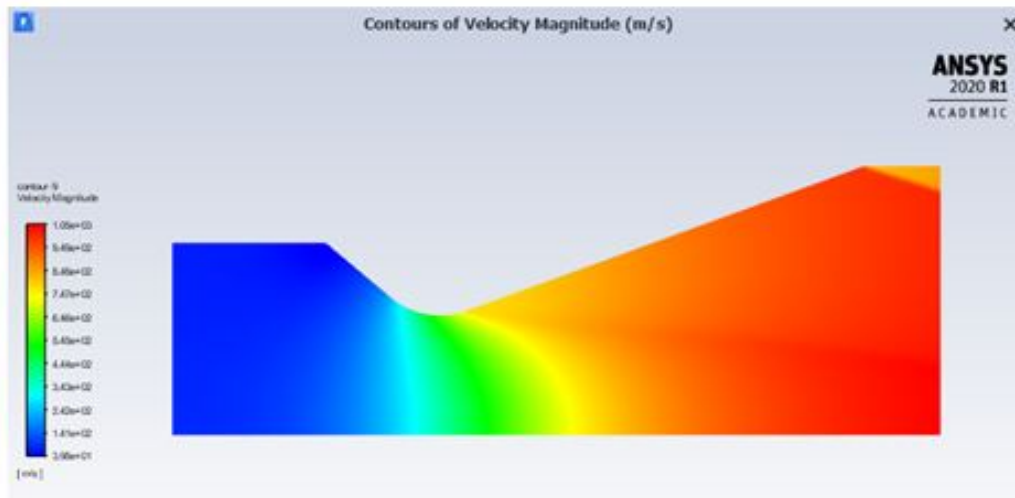
c. Cas 3 : $P_0 = 3 \text{ MPa}$ $T_0 = 700 \text{ k}^\circ$ FIGURE 6.19 – Variation de la vitesse $P_0 = 3 \text{ Mpa}$ $T_0 = 700 \text{ k}$.

Tableau récapitulatif

Tableau 6.2 – Tableau récapitulatif de l'effet de la pression et de la température

Conditions de stagnation	V_S (m/s)
$P_0 = 1 \text{ MPa}$, $T_0 = 300\text{k}$	683.29
$P_0 = 2.5\text{MPa}$, $T_0 = 600\text{k}$	969.62
$P_0 = 3\text{MPa}$, $T_0 = 700\text{k}$	1049.80

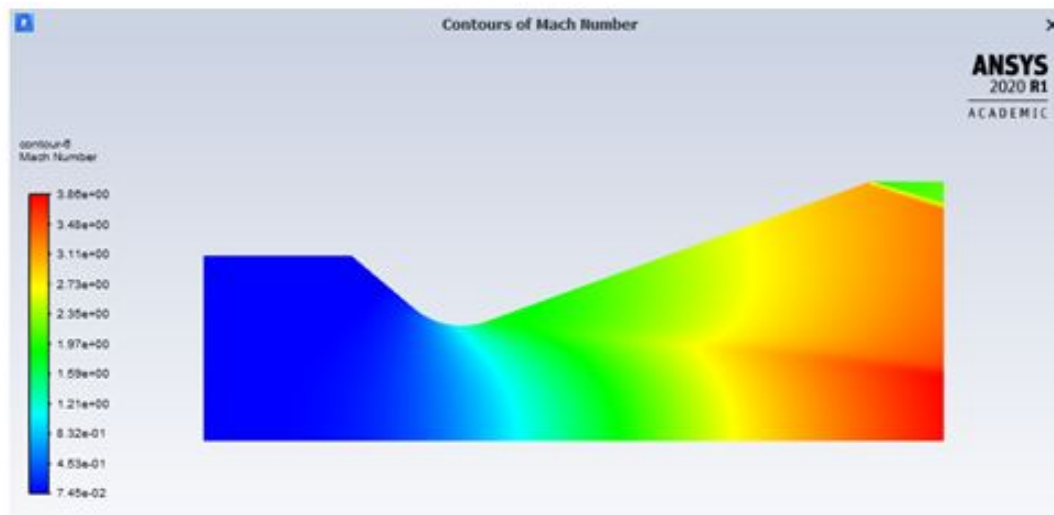
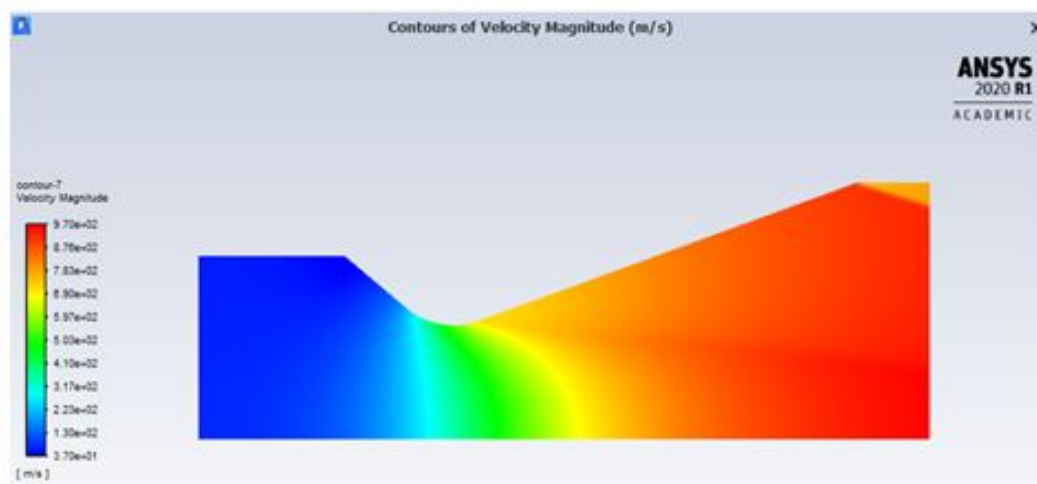
Commentaire

Les résultats numériques confirment la théorie, car on voit bien que les paramètres d'entrée impactent la vitesse d'écoulement : si on augmente la pression de stagnation et on préchauffe le gaz à l'entrée de la tuyère, on obtient des vitesses plus élevées.

Effet de la géométrie

Afin d'illustrer l'effet de la géométrie de la tuyère sur les propriétés de l'écoulement, on a utilisé deux géométries, ayant les mêmes longueurs et diamètres d'entrée avec : $R_{s1} = 70 \text{ mm}$ et $R_{s1} = 100 \text{ mm}$, comme rayons de sortie. La simulation est faite en utilisant l'azote comme gaz propulseur, et les conditions de stagnation : $P_0 = 2.5\text{MPa}$ et $T_0 = 600\text{k}$.

Visualisation des résultats

a. Cas de la tuyère 1 : $R_{s1} = 70 \text{ mm}$ FIGURE 6.20 – Variation du nombre $R_{s1} = 70 \text{ mm}$.FIGURE 6.21 – Variation de la vitesse $R_{s1} = 70 \text{ mm}$.

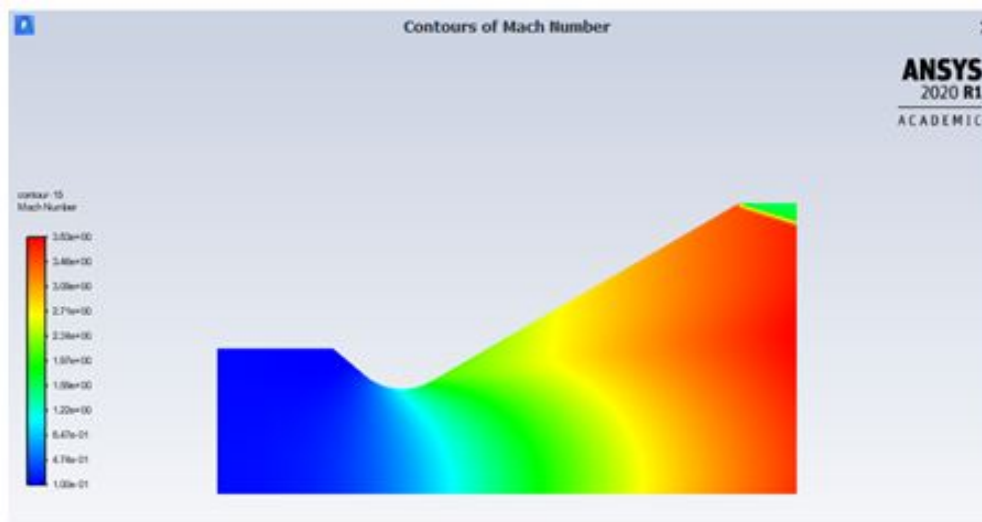
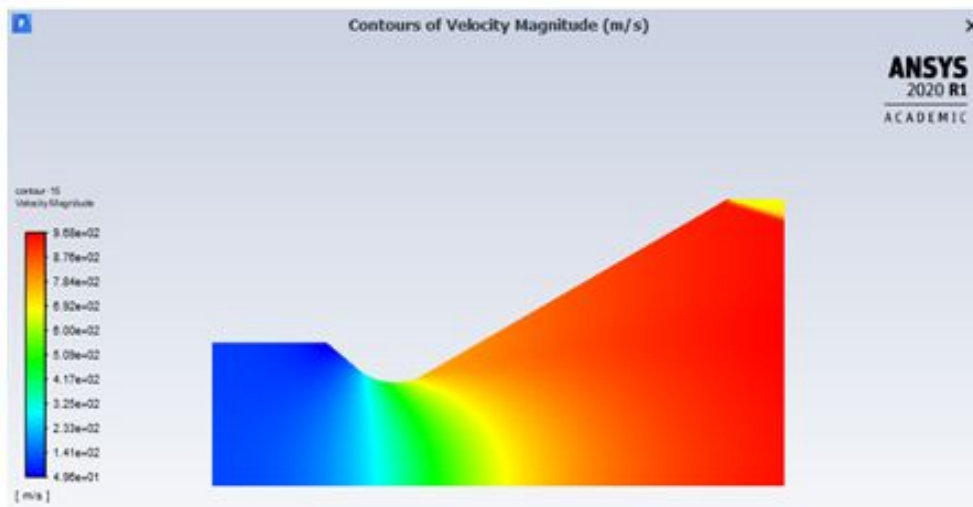
a. Cas de la tuyère 2 : $R_{s2} = 100$ mmFIGURE 6.22 – Variation du nombre de Mach $R_{s2} = 100$ mm .FIGURE 6.23 – Variation de la vitesse $R_{s2} = 100$ mm .

Tableau récapitulatif

Tableau 6.3 – Tableau récapitulatif de l'effet de la géométrie de tuyère

R_s (mm)	M_s	V_s (m/s)
70	3.86	969.62
100	3.83	967.77

Commentaire

D'après les résultats numériques, la géométrie de la tuyère impacte la vitesse de sortie et le nombre de Mach de façon minimale, cela ne contredit pas la théorie, mais signifie que pour avoir des valeurs plus importantes, il faut que le diamètre de sortie soit beaucoup plus petit.

6.4 Discussion

Les résultats numériques obtenus par les simulations nous ont permis de confirmer les lois et les études théoriques en rapport avec la déposition à froid.

D'abord, nous avons bien vu que la vitesse de l'écoulement atteint des vitesses supersoniques à la sortie de la tuyère, ces vitesses varient de 683 m/s à 2347 m/s selon le gaz de propulsion utilisé, les conditions de stagnation choisies, et la géométrie de la tuyère.

Ensuite, nous avons vérifié que l'évolution du nombre de Mach dans la tuyère de Laval obéit aux lois théoriques, car les modélisations numériques montrent que :

- Dans la partie convergente, l'écoulement est subsonique et $M < 1$.
- Dans le col, l'écoulement est sonique et $M = 1$.
- Dans la partie divergente, l'écoulement devient supersonique et $M > 1$.

Cela souligne l'influence de la géométrie convergente-divergente dans l'accélération de l'écoulement du gaz. De plus, les simulations ont aussi confirmé que l'accélération de l'écoulement est accompagnée par une baisse considérable de l'enthalpie (pression, température), car l'expansion de l'écoulement supersonique dans la partie divergente de la tuyère fait diminuer la température et la pression. Enfin, les résultats numériques montrent que pour avoir des vitesses importantes, il est conseillé :

- D'opter pour l'hélium comme gaz propulseur.
- De préchauffer le gaz de propulsion, et d'augmenter la pression de stagnation.
- De diminuer le diamètre de sortie de la tuyère.



Conclusion générale

L'objectif global de ce travail est l'étude des dépôts de cuivre réalisés par projection à froid à travers l'exploitation des résultats expérimentaux et numériques.

D'une part, la partie expérimentale a traité les dépôts de cuivre réalisés sur un substrat en acier à faible teneur en carbone. Nous avons analysé les échantillons en utilisant les méthodes de caractérisation suivantes : microscopie électronique à balayage et nano-indentations, afin de caractériser les propriétés suivantes :

- La porosité.
- La dureté
- Le module de Young.

Les résultats expérimentaux ont renforcé les résultats de la littérature, et les ont confirmés. Les porosités dans les échantillons obtenus sont faibles, la plus grande étant de l'ordre de 1%, et seulement deux échantillons ont présenté une fissure à l'interface, une faible adhérence et une faible masse de cuivre déposé (faible épaisseur).

Le dépôt qui présente des résultats optimaux, une forte adhérence et peu de porosités, est l'échantillon avec : $T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 25 \text{ bar}$, $d=30 \text{ mm}$ et $Ra= 3.9 \text{ }\mu\text{m}$. Cet échantillon a été obtenu en utilisant une température et une pression relativement élevées. La vitesse de projection atteinte dans ce cas est considérablement élevée, ce qui explique la bonne qualité du dépôt réalisé. Ce résultat est conforme avec la littérature qui décrit la vitesse d'impact comme le paramètre qui gouverne le procédé de projection à froid, et assure son adhésion et densité.

D'autre part, les résultats numériques obtenus par simulation de l'écoulement du gaz dans la tuyère de Laval, corroborent le choix des conditions opératoires considérées, à savoir la température, la pression d'entrée, la nature du gaz propulseur et la géométrie de la tuyère utilisée. Le but recherché est d'avoir un écoulement plus accéléré, et des vitesses d'impact plus importantes, afin d'obtenir des dépôts avec des caractéristiques améliorées.

Références

- [1] Anatolii PAPYRIN Vladimir KOSAREV Sergey KLINKOV, Anatolii ALKIMOV, Vasily fomin, *Cold Spray Technology*, 1st Edition : Elsevier Science, 2006, 336p.
- [2] François RALETZ, "Contribution au développement d'un procédé de P.D.F pour la réalisation de dépôts de nickel", Thèse de doctorat en matériaux céramiques et traitement de surface sous la direction de Michel VARDELLE, Université de LIMOGES, Faculté de Sciences et Techniques, 2005, 300p.
- [3] Xie, Jing and Nelias, Daniel and Berre, Helene and Ogawa, Kazuhiro and Ichikawa, Yuji. (2015). Simulation of the Cold Spray Particle Deposition Process. *Journal of Tribology*. 137. 041101-041101. 10.1115/1.4030257.
- [4] MacDonald, D., RAHMATI, S., JODOIN, B., BIRTCH, W. (2018). An Economical Approach to Cold Spray Using In-line Nitrogen–Helium Blending. *Journal of Thermal Spray Technology*, 28(1-2), 161–173. doi:10.1007/s11666-018-0813-0
- [5] LI, WANG, FUKANUMA ; Effect of spray angle on deposition characteristics in cold spraying ; International Thermal Spray Conference ; Orlando, USA ; 5-8 mai 2003 ; p 91-96.
- [6] STOLTENHOFF, VOYER, KREYE. Cold Spraying - State of the art and applicability. International Thermal Spray Conference and Exposition ; Essen Allemagne ; 4-6 mars 2002 ; p 366-374.
- [7] STOLTENHOFF, KREYE, RICHTER, ASSADI. Optimization of the cold spray process. *Thermal Spray 2001 : New Surfaces for a New Millennium*. Singapour. 28-30 mai 2001, p 409-416.
- [8] XUEPING Guo. Etude des procédés d'élaboration et caractérisation des revêtements de bronze et de ses composites préparés par projection à froid. Mécanique [physics.med-ph]. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2009. Français.
- [9] V.V. KUDINOC, P.YU. PEKSHEV, V.E. BELASHCHENKO, O.P. SOLONENKO, and V.A. SAFIULIN, *Coating Spraying by Plasma*, Nauka, Moscow, 1990, in Russian
- [10] ASSADI, H., KREYE, H., GARTNER, F., and KLASSEN, T. (2016). Cold spraying – A materials perspective. *Acta Materialia*, 116, 382–407
- [11] BORCHERS, GARTNER, F. and STOLTENHOFF, T. and ASSADI, and KREYE(2003). Microstructural and macroscopic properties of cold sprayed copper coatings. *Journal of Applied Physics*. p. 93.

- [12] GRUJICIC M., ZHAO C.L., DEROSSET W.S., HELFRITCH D., Adiabatic shear instability based mechanism for particles/substrate bonding in the cold-gas dynamic-spray process, *Materials and Design*, 25, 2004, p. 681-688
- [13] LI W.-Y., YIN S., WANG X.-F., Numerical investigations of the effect of oblique impact on particle deformation in cold spraying by the SPH method, *Applied Surface Science*, 256 (2010), p. 3725-3734
- [14] J. KOCIMSKI, E.MAEVA. Structure and Mechanical Properties of Thick Copper Coating Made by Cold Spray, *Journal of Thermal Spray Technology* 25 (2015) 113-122.
- [15] Computational analysis of the effect of nozzle cross-section shape on gas flow and particle analysis on cold spray
- [16] RALETZ, F., M. VARDELLE, and G. EZO'O. 2006. Critical particle velocity under cold spray conditions. *Surface and Coatings Technology* 201 (5) : 1942-1947.
- [17] T. SCHMIDT, F. GARTNER, H. ASSADI, and H. KREYE : Development of a Generalized Parameter Window for Cold Spray Deposition, *Acta Mater.* 54, 2006, p 729-742.
- [18] Adrian WEI-Yee, Tan, Wen SUN, *J Therm Spray Tech* (2017) 26 :1484-1497, Effects of Traverse Scanning Speed of Spray Nozzle on the Microstructure and Mechanical Properties of cold spray coating
- [19] LIST A, GARTNER F, MORI T, SCHULZE M, ASSADI H, KURODA S, KLASSEN T. Cold spraying of amorphous Cu₅₀Zr₅₀ alloys. *Journal of Thermal Spray Technology* 2014;24 :108-118.
- [20] YULIANG Liu, BAO Zebin, TIANYING XiONG, *Advanced Materials Research* Vols 314-316 (2011) pp 70-73 Online : 2011-08-16 (2011) Trans Tech Publications, Switzerland, Microstructure and Property of Cold Sprayed Copper Coating doi :[10.4028/www.scientific.net/AMR.314-316.70](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.314-316.70)
- [21] LI, W.-Y., ZHANG, C., GUO, X. P., Zhang,(2008). Effect of standoff distance on coating deposition characteristics in cold spraying. *Materials Design*, 29(2), 297-304.
- [22] Villafuerte, J. (Ed.). (2015). *Modern Cold Spray*. doi :[10.1007/978-3-319-16772-5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16772-5).
- [23] AMMENDOLA P, RAGNATI F, SCHERILLO F, SQUILLACE A, CHIRONE R, CARRINO L, ASTARITA A, and VISCUSI A,(2016) "High-efficiency mixing of fine powders via sound assisted fluidized bed for metal foam production by an innovative cold gas dynamic spray deposition method" in "Fluidization XV", Jamal Chaouki, Ecole Polytechnique de Montreal, Canada Franco Berruti, Wewstern University, Canada Xiaotao Bi, UBC, Canada Ray Cocco, PSRI Inc. USA Eds, ECI Symposium Series,
- [24] POPYRIN, High-velocity Interaction of Particles with the Substrate. Experiment and Modeling, *Discovery of the Cold Spray Phenomenon and its Basic Features*, Cold Spray Technology : Elsevier Science,2006, p36.
- [25] POPYRIN,Discovery of the Cold Spray Phenomenon and its Basic Features, *Discovery of the Cold Spray Phenomenon and its Basic Features*, Cold Spray Technology : Elsevier Science,2006, p27.

- [26] CELOTTO, S., PATTISON, J., HO, J. S., JOHNSON, A. N., and O'NEILL, W. (2007). The economics of the cold spray process. *The Cold Spray Materials Deposition Process*, 72–10
- [27] C-J Li, W. LI, Y. WANG, Effect of Spray Angle on Deposition Characteristics in Cold Spraying. *Thermal spray 2003*, p91-96
- [28] PAPYRIN, Discovery of the Cold Spray Phenomenon and its Basic Features, *Discovery of the Cold Spray Phenomenon and its Basic Features*, Cold Spray Technology : Elsevier Science, 2006, p27.
- [29] VIDALLER, GARTNER, F. and KLASSEN, Thomas, S. Guilemany, Jose MARIA. (2015). Single Impact Bonding of Cold Sprayed Ti-6Al-4V Powders on Different Substrates. *Journal of Thermal Spray Technology*. 24. 10.1007/s11666-014-0200-4.
- [30] PAPYRIN, High-velocity Interaction of Particles with the Substrate. Experiment and Modeling, *Discovery of the Cold Spray Phenomenon and its Basic Features*, Cold Spray Technology : Elsevier Science, 2006, p36.
- [31] GRUJICIC M., ZHAO C.L., DEROSSET W.S., HELFRITCH D., Adiabatic shear instability based mechanism for particles/substrate bonding in the cold-gas dynamic-spray process, *Materials and Design*, 25, 2004, p. 681-688
- [32] LI W.-Y., YIN S., WANG X.-F., Numerical investigations of the effect of oblique impact on particle deformation in cold spraying by the SPH method, *Applied Surface Science*, 256 (2010), p. 3725-3734
- [33] source LI W.-Y., YIN S., WANG X.-F., Numerical investigations of the effect of oblique impact on particle deformation in cold spraying by the SPH method, *Applied Surface Science*, 256 (2010), p. 3725-3734
- [34] YIN, XIAO-FANG and LI, WENYA. (2011). Computational analysis of the effect of nozzle cross-section shape on gas flow and particle acceleration in cold spraying. *Surface and Coatings Technology - SURF COAT TECH*. 205. 2970-2977. [10.1016/j.surfcoat.2010.11.002](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.11.002).
- [35] RESCOLL centre technology, Caractérisation mécanique par nanoindentation, www.rescoll.fr.