



HAL
open science

Contributions à la fabrication additive par projection à froid : simulation de la formation et planification des trajectoires de projection dans le cas de pièces de formes complexes

Wenbo Li

► To cite this version:

Wenbo Li. Contributions à la fabrication additive par projection à froid : simulation de la formation et planification des trajectoires de projection dans le cas de pièces de formes complexes. Autre. Université Bourgogne Franche-Comté, 2023. Français. NNT : 2023UBFCA005 . tel-04524764

HAL Id: tel-04524764

<https://theses.hal.science/tel-04524764>

Submitted on 28 Mar 2024

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

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



**THESE DE DOCTORAT DE L'ETABLISSEMENT UNIVERSITE BOURGOGNE
FRANCHE-COMTE
PREPAREE A L'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBELIARD**

Ecole doctorale n° 37
Sciences physiques pour l'ingénieur et microtechniques - SPIM

Doctorat de Sciences pour l'Ingénieur

Par
M. LI Wenbo

Contributions à la fabrication additive par projection à froid : simulation de la formation et planification des trajectoires de projection dans le cas de pièces de formes complexes

Thèse présentée et soutenue à l'UTBM, Site de Sévenans, le 5 juin 2023

Composition du Jury :

M. AUBRY Pascal	Directeur de recherche, Université Paris-Saclay	Rapporteur
M. ADJALLAH Kondo Hloindo	Professeur, Université de Lorraine	Rapporteur
M. BEAREE Richard	Professeur, École nationale supérieure d'Arts et Métiers	Examineur (président)
M. DELLORO Francesco	Chargé de recherche, Mines Paristech	Examineur
M. KROMER Robin	Maitre de conférence, Université de Bordeaux	Examineur
Mme. COSTIL Sophie	Professeure, UTBM	Directeur de thèse
M. DENG Sihao	Maitre de conférence-HDR, UTBM	Codirecteur de thèse

Remerciement

Cette thèse n'aurait pas été possible sans la générosité et la patience de mes directeurs Madame Sophie COSTIL et Monsieur Sihao DENG et je veux vivement leurs exprimer ma profonde reconnaissance de m'avoir accueilli dans le laboratoire et d'avoir suivi ce travail avec rigueur. Le temps et la confiance qu'ils m'ont accordé tout au long de ces années de thèse, d'avoir cru en mes capacités et de m'avoir fourni de bonnes conditions de travail m'ont permis alors de mener à bien ce travail.

Mes plus sincères remerciements vont aussi à Monsieur Hanlin LIAO pour son soutien dans mes recherches et dans ma vie. Je remercie également Monsieur Christophe VERDY pour sa disponibilité et son aide pour mon étude de cold spray. Mes plus chaleureux remerciements s'adressent aussi aux personnels de la plateforme plus précisément Monsieur Christian ADAM, Monsieur Charles BERNAGE, Monsieur Éric GETE et Monsieur Joël CHAUVELOT d'avoir été présents à tous moment et surtout de m'avoir supporté. Je tiens également à remercier Madame Sophie LAPRADE et Madame Farida BAADACHE-SADOUNI du laboratoire pour leur aide dans mon travail.

Une pensée émue pour tous les doctorants ou chercheurs permanents avec qui j'ai partagé un bureau, un café ou un repas durant ces années : Libin, Frank, Mohamed, Shuohong, Améla, Hongjian, Shaowu, ... Je n'oublierai pas les aides et financements reçus du China Council Scholarship et de l'Ecole doctorale SPIM.

Enfin, mes remerciements s'adressent à la fin à ma famille qui m'a toujours épaulé dans ce projet, et surtout supporté durant les moments les plus difficiles de la rédaction.

Table des matière

Introduction générale	1
Chapitre 1 Etat de l'art sur la fabrication additive par cold-spray robotisé.....	5
1.1 Les technologies de fabrication additive.....	6
1.1.1 La petite histoire de la Fabrication Additive	6
1.1.2 Les matériaux susceptibles d'être utilisés en FA	7
1.1.3 Les procédés et équipements.....	7
1.2 La technologie cold spray	11
1.2.1 Les Applications.....	14
1.2.2 Installations et équipements	17
1.2.3 Principe d'élaboration d'un revêtement.....	20
1.2.4 Influence des paramètres du procédé	25
1.2.5 La fabrication additive par cold-spray	33
1.3 La technologie de fabrication robotique	34
1.3.1 Programmation robotique	35
1.3.2 Application à la fabrication additive assistée par robot	36
1.4 Conclusions et objectifs	39
Références.....	41
Chapitre 2 Concept modulaire intégré du système de Fabrication Additive par Cold Spray.	59
2.1 Introduction.....	60
2.2 La composante matérielle	62
2.2.1 Le module de prétraitement	62
2.2.2 Le module de projection	63
2.2.3 Le module robot.....	66
2.2.4 Le module de surveillance en ligne in situ.....	68
2.2.5 Le module soustractif.....	69
2.2.6 Le module de post-traitement	70
2.3 La composante logicielle	71
2.3.1 Le prétraitement des données.....	71
2.3.2 La modélisation et la simulation numérique du dépôt de matière	72
2.3.3 La planification et génération des trajectoires de projection	73
2.3.4 Le module d'intelligence artificielle	74
2.3.5 Le post-traitement des données.....	75

2.4 Échange d'informations	76
2.5 Conclusion	77
Références.....	79
Chapitre 3 Protocole d'expériences.....	85
3.1 La conception d'expériences.....	86
3.2 Les matériaux et les méthodes expérimentales	86
3.2.1 Les sélections des matériaux et préparations de substrats	86
3.2.2 Le processus de projection.....	87
3.2.3 Contrôles du processus de projection.....	88
3.2.4 Mesures des propriétés des revêtements	88
3.2.5 Effet des paramètres de projection sur le rendement	90
3.2.6 Effet des paramètres de projection sur les propriétés des revêtements.....	95
3.3 Conclusion	98
Références.....	100
Chapitre 4 Modélisation et simulation numérique du dépôt de matière.....	103
4.1 Expériences préliminaires	104
4.2 Méthodologie de modélisation des dépôts	106
4.2.1 La modélisation de la géométrie du jet statique.....	106
4.2.2 Modélisation du jet de matière.....	107
4.2.3 Modélisation d'un dépôt continu	110
4.2.4 La stratégie de projection FACS	113
4.2.5 Vérification du modèle de géométrie du jet statique	113
4.2.6 Vérification du modèle de dépôt continu	114
4.3 Conclusion	117
Références.....	118
Chapitre 5 Planification et génération des trajectoires de projection.....	119
5.1 Préparation du modèle 3D par « tranchage ».....	120
5.1.1 La méthode de tranchage	120
5.1.2 La processus de tranchage.....	121
5.2 Planification des trajectoires	129
5.2.1 Générations des FPs et CPs.....	130
5.2.2 Génération des LPs entre les caractéristiques de forme.....	132
5.3 Expériences préliminaires	134
5.3.1 Sélection des matériaux et préparation du substrat.....	134

5.3.2 Le processus de projection.....	134
5.4 Conclusion	139
Références.....	141
Conclusions et perspectives	143

Liste des figures

Figure 1.1 Divers matériaux susceptibles d'être utilisés en FA.....	7
Figure 1.2 Divers processus de FA : (a) Jet de liant [25] ; (b) Extrusion de matériau [26] ; (c) Dépôt d'énergie dirigée [27] ; (d) Fusion sur lit de poudre [28] ; (e) Fabrication de objets laminés [30] ; (f) Photopolymérisation en cuve [31] ; (g) Impression à jet d'encre 3D [29].	9
Figure 1.3 Illustrations des applications potentielles de la FA dans diverses industries : (a) Création de la structure interne d'une purée de pomme de terre par impression 3D [33] ; (b) Textiles fabriqués par FA [34]; (c) Structures d'ailes d'avion fabriquées de manière additive [36] ; (d) support de pylône pour un avion [39] ; (e) structures fabriquées à l'aide de macromères biodégradables [45] ; (f) Mors de filet (à droite) et sa reproduction (à gauche) [54] ; (g) modèles de crâne fabriqués par FA [49].	10
Figure 1.4 Divers revêtements fonctionnels développés par CS : (A) revêtement résistant aux hautes températures [71,77,78]; (B) revêtement résistant à la corrosion [81,86,87]; (C) revêtement résistant à l'usure [88–90]; (D) revêtement biologique et biomédical [94,99,108].	15
Figure 1.5 Exemples d'applications CS en réparation : (a) couvercle de tube d'huile pour application d'hélicoptère CH47 ; (b) carter de boîte de vitesses d'un hélicoptère UH-60 ; (c) actionneur de direction d'une roue avant d'avion [111].	16
Figure 1.6 Exemples d'applications du procédé CS en fabrication additive : (a) Cartouche pour l'élimination des combustibles usés [118] ; (b) Paroi intérieure d'un anneau de pression pour machine de transformation des aliments [119].	17
Figure 1.7 Schéma de principe des systèmes CS (a) haute pression et (b) basse pression.	17
Figure 1.8 (A) Les différents types de buses utilisées en CS : (a) buse à sortie ronde conventionnelle [124], (b) buse à canon convergent [125], (c) buses aplaties (rectangulaires et elliptiques) [126], (d) buse de type cloche [127], (e) buse en trèfle [128] ; (B) Schéma de distributeurs de poudre (a) doseur de poudre de type tambour, (b) doseur de doseur de poudre [123] ; (C) Schéma d'un réchauffeur ohmique tubulaire de gaz [123].	19
Figure 1.9 Principe général d'accélération du gaz dans la buse du procédé CS.	20
Figure 1.10 Effets de l'emplacement et de la géométrie de la structure sur les particules en vol : (A) Schéma d'impact d'un jet de gaz supersonique sur un obstacle plat sans restriction [141] ; (B) Simulation de la répartition des particules en sortie dans le cas d'une buse (a) circulaire ; (b) carrée ; (c) de forme elliptique [140] ; (C) Effet de la forme de la section transversale de la buse sur la vitesse moyenne d'impact des particules [126] ; (D) Schéma de principe de la buse à canon convergent [125]; (E) Distribution des particules en fonction de (a) la sortie et (b) la hauteur de la gorge [138].	22
Figure 1.11 Effet de la distance de projection sur le rendement.	23
Figure 1.12 Effet des paramètres de fonctionnement sur les particules en vol : (A) Photographie Schlieren du jet libre [145] ; (B) Vitesses des particules de ZK61 et de cuivre en fonction de la nature du gaz porteur [151] ; (C) Effet de la pression, de la température et du type de gaz sur le diamètre de sortie optimal de la buse [124] ; (D) Vitesse critique des poudres en fonction de la température et de la pression du gaz de la chambre [131].	24
Figure 1.13 Effet de la sélection des matériaux sur les particules en vol : (A) Fraction de vitesse des particules sphériques (a) et dendritiques (b) dans le flux de projection avec différentes conditions de projection [155] ; (B) Influence de la teneur en oxygène des poudres de Cu avec : (a) 0,14 %	

en poids ; (b) 0,38 % en poids [153] ; (C) Effet de la taille des particules et du gaz porteur sur la vitesse d'impact des particules [154].	25
Figure 1.14 Classification des paramètres du procédé de CS.	26
Figure 1.15 (A) Effets de la nature des gaz propulseurs (a), (b) Influence de la température et la pression des gaz sur le DE [150] ; (B) Effets des gaz porteurs sur la pression (a) [159] et sur la vitesse des particules (b) [151].	27
Figure 1.16 Effets de (A) la taille des particules [129] et (B) la morphologie des particules [160] sur la vitesse des particules ; (C) images en coupe transversale de particules déposées : (a) particule avec une teneur en oxygène de 0,001 % en poids, (b) 0,012 % en poids, (c) 0,023 % en poids, (d) 0,045 % en poids [161]; (D) microstructures en coupe transversale des revêtements avec la température de préchauffage des particules : (a) 298 K, (b) 473 K, (c) 673 K et (d) 873 K [162].	28
Figure 1.17 (a) Effet de l'état du substrat sur la force de liaison des dépôts de titane projetés à une pression de gaz de 29 bars [179] ; (b) Force d'adhérence en fonction de la préparation de surface : grenailage (GB), texture 1 (LST1, grands espacements entre les trous laser) et texture 2 (LST2, petits espacements entre les trous laser) [181] ; (c) DE selon différentes conditions de gaz et températures de surface mesurées [184].	29
Figure 1.18 Paramètres cinématiques impliqués lors du processus CS.	30
Figure 1.19 (A) Effet de la vitesse de déplacement sur le rendement du revêtement : (a) effet non pertinent [193], (b) corrélation négative [211], (c) corrélation positive [212] ; (B) Effet de l'angle de projection sur le DE du revêtement [202] ; (C) Effet de la distance de projection [205] ; (D) Effet de l'étape de balayage sur l'uniformité du revêtement [206,209] ; (E) quatre trajectoires de projection typiques : (a) motif en zigzag, (b) motif en croix, (c) motif parallèle, (d) motif en spirale [210].	32
Figure 1.20 Fabrication additive par cold spray de pièces non rotatives : (a) stratégie de fabrication additive par tessellation triangulaire [213] ; (b) parois droites déposées couche par couche [208] ; (c) fabrication de pièces à structure complexe à base de substrats spécialement fabriqués [219].	34
Figure 1.21 Architecture de la plateforme de programmation hors ligne hybride [233].	36
Figure 1.22 Schémas de fabrication hybride.	38
Figure 1.23 Technologie de fabrication additive assistée par robot : (a) fil arc [240] ; (b) dépôt direct de métal par laser [241] ; (c) laminage de feuilles [242] ; (d) béton architectural [243] ;(e) cold spray [244].	38
Figure 2.1 Schéma de principe du système FACS conventionnel.	60
Figure 2.2 Schéma de principe du système FACSH.	61
Figure 2.3 Les systèmes de projection utilisés dans cette thèse : (a) système CSHP développé au laboratoire ; (b) système CSBP (Dycomet).	63
Figure 2.4 Différentes stratégies de dépôt proposées pour FACS : (A) Fabrication du dissipateur thermique des réseaux d'ailettes pyramidales FACS [26] ; (B) Fabrication d'une pièce fabriquée à l'aide de CS et de la technologie d'optimisation de la topologie [25] ; (C) Tessellation triangulaire pour la production de formes primitives [24] ; (D) Pièces élaborées avec une stratégie d'un mode de tricotage sur les bords [27].	65
Figure 2.5 Schéma de la stratégie de construction d'un revêtement multicouche.	66
Figure 2.6 ABB IRB 2400 : (a) composants d'un manipulateur à 6 axes et d'un système de contrôle ;	

(b) enveloppe de travail.	67
Figure 2.7 Schéma conceptuel du système FACSH.	68
Figure 2.8 Principe de mesure du profileur laser 3D (a) composants ; (b) plage de mesure.	69
Figure 2.9 Utilisation du module de surveillance en ligne in situ : (a) dans le processus de projection ; (b) dans le processus de mesure ; (c) collecte et traitement des données.	69
Figure 2.10 Le processus de fraisage.	70
Figure 2.11 Acquisition du modèle numérique de la pièce à fabriquer : (A) Scanner 3D de bureau ; (B) Acquisition du modèle numérique.	72
Figure 2.12 Post-traitement des données : (a) modèle 3D de la pièce à fabriquer ; (b) le dépôt manufacturé ; (c) modèle 3D du dépôt construit par rétro-ingénierie ; (d) dépôt après post- traitement.	76
Figure 2.13 Concept modulaire intégré du système FACS.	77
Figure 3.1 (a) Photo MEB de poudres Cu+Al ₂ O ₃ ; (b) Distribution granulométrique des poudres Cu+Al ₂ O ₃	87
Figure 3.2 Moyens expérimentaux employés au laboratoire lors de l'expérience CSBP.	87
Figure 3.3 Points de mesure enregistrés sur le dépôt.	89
Figure 3.4 Positions de mesure de la rugosité du dépôt.	89
Figure 3.5 Vue d'un échantillon (a) et sa coupe transversale (b).	89
Figure 3.6 Microstructures d'un dépôt de cuivre/Al ₂ O ₃ élaboré à 10 mm après 8 passes et 100 mm/s de vitesse de balayage. Vue générale et effet de zoom avec : 1-particule de céramique, 2-pores, 3- revêtement de cuivre.	90
Figure 3.7 Epaisseur du dépôt en fonction de différents paramètres : SoD de 5 mm (1), 10 mm (2), 15 mm (3) : différentes passes de balayage pour une vitesse de pièce de 50 mm/s (a), 100 mm/s (b), 150 mm/s (c), 200 mm/s (d).	92
Figure 3.8 Evolution de la quantité de matière déposée suivant le nombre de passes, la distance de projection et la vitesse de balayage (1), SoD (2)	94
Figure 3.9 Rendement de projection selon le nombre de balayages (1), la distance de projection et la vitesse de déplacement (2).	95
Figure 3.10 Effet du nombre de passes, de la vitesse et de la distance de projection sur la micro-dureté des revêtements.	96
Figure 3.11 Effet du nombre de passages, de la vitesse et du SoD sur la rugosité du dépôt.	97
Figure 3.12 Mur épais et vertical de cuivre réalisé par projection cold-spray à basse pression sur un substrat plat d'aluminium.	98
Figure 4.1 Profils de revêtement sous différents angles de projection.	105
Figure 4.2 Effet de l'angle de projection sur le RDE.	106
Figure 4.3 Modèle de la géométrie du jet statique.	107
Figure 4.4 Visualisation du jet de particules en sortie de buse [296].	107
Figure 4.5 Schéma en coupe de deux modèles du jet de matière dans les deux systèmes de coordonnées 3D x-y-z (courbe rouge) et x-y1-z1 (ligne bleue).	108
Figure 4.6 Processus de modélisation d'un modèle du jet de matière : (a) création des intersections ; (b) création des points de revêtement ; (c) création du modèle du jet de matière.	109
Figure 4.7 Modèle du jet de matière à différents angles de projection.	110
Figure 4.8 (a) Modèle de dépôt par points de chemin discrets ; (b) Modèle de dépôt continu.	111
Figure 4.9 (a) Modèle de dépôt continu à différentes vitesses de déplacement ; (b) Modèle de dépôt	

continu sous différents angles de projection (mm).	112
Figure 4.10 Modèle de dépôt continu : (a) Sur une surface sphérique ; (b) Sur une pièce avec un effet d'ombre (mm).	112
Figure 4.11 Schéma de la stratégie de construction d'un revêtement multicouches.	113
Figure 4.12 Profil de dépôt basé sur différents modèles de géométrie du jet statique : (a) Distribution conique ; (b) Distribution cylindrique ; (c) Résultat expérimental (mm).	114
Figure 4.13 Epaisseur du dépôt mesuré au fur et à mesure de la construction du revêtement (mm).	115
Figure 4.14 Forme géométrique de la topologie à différentes couches (mm).	116
Figure 4.15 Profil d'un dépôt élaboré après 20 couches.	116
Figure 5.1 (a) Un modèle 3D avec plusieurs caractéristiques de forme ; (b) Intersection du modèle avec une tranche.	120
Figure 5.2 Filtrage des facettes triangulaires pour l'intersection des tranches.	121
Figure 5.3 Dépistage des points d'intersection : (a) Trois sommets pour chaque facette triangulaire se trouvent sur la tranche ; (b) Deux sommets pour chaque facette triangulaire se trouvent sur la tranche ; (c) Un sommet pour chaque facette triangulaire se trouve sur la tranche ; (d) Aucun des sommets de chaque facette triangulaire ne se trouve sur la tranche.	123
Figure 5.4 Organigramme du processus de découpage.	125
Figure 5.5 Résultat de l'intersection de la tranche et du modèle : (a) Points d'intersection de chaque caractéristique de forme ; (b) Connexions directes entre les points d'intersection sans regroupement ni tri ; (c) Contour de chaque caractéristique de forme après regroupement et tri.	126
Figure 5.6 Organigramme pour regrouper et trier les points d'intersection.	128
Figure 5.7 Contours avec toutes les couches pour le modèle avec plusieurs caractéristiques de forme.	129
Figure 5.8 Stratégie d'empilement du matériau.	130
Figure 5.9 Planification des trajectoires pour les FP et les CP.	130
Figure 5.10 Intersections de lignes parallèles et de points discrets : (a) Cas où le groupe actuel de lignes parallèles ne peut pas être utilisé ; (b) Cas où le groupe actuel de lignes parallèles peut être utilisé.	131
Figure 5.11 Organigramme pour les intersections de lignes parallèles et de points discrets.	132
Figure 5.12 Génération de LPs pour 3 caractéristiques de forme.	133
Figure 5.13 (a) Photo MEB de poudres d'Al ; (b) Distribution granulométrique de la poudre.	134
Figure 5.14 Image en coupe d'une seule couche de dépôt.	135
Figure 5.15 Environnement de projection virtuel pour une Fabrication Additive par Cold-Spray.	136
Figure 5.16 Résultat de la simulation des trajectoires sans les LP conçus pour le modèle avec plusieurs caractéristiques de forme.	137
Figure 5.17 Résultat de la simulation de trajectoires avec les LP conçus du modèle avec plusieurs caractéristiques de forme : (a) Une seule caractéristique de forme ; (b) Plusieurs caractéristiques de forme ; (c) Trajectoire finale du modèle.	137
Figure 5.18 Comparaison des dimensions du modèle (a) et du dépôt (b).	138
Figure 5.19 Résultats expérimentaux du dépôt avec plusieurs caractéristiques de forme : (a) avec des LP conçus ; (b) sans LP conçus.	139
Figure 5.20 Vue d'une main en cuivre élaborée par projection cold-spray.	139

Liste des tableaux

Tableau 1-1 Comparaison de procédé de cold spray et d'autres procédés de dépôt.	12
Tableau 1-2 Comparaison des propriétés des dépôts et des matières premières.....	14
Tableau 2-1 Spécification de mouvement d'axe du robot ABB IRB 2400.	67
Tableau 3-1 Paramètres cinématiques de projection retenue pour la poudre Cuivre-Alumine.....	88
Tableau 3-2 Propriété de la première pièce réalisée en FA par projection cold spray basse pression (CSBP).....	98
Tableau 4-1 Paramètres cinématiques de projection retenus pour la projection de poudre Cuivre-Alumine.....	104
Tableau 4-2 Erreur absolue et relative de la hauteur du dépôt comparées entre la simulation et les résultats expérimentaux	116
Tableau 5-1 Paramètres cinématiques de projection retenus pour la projection de Aluminium.....	135
Tableau 5-2 Analyse d'erreur de dimension pour le modèle et le dépôt.....	139

Liste des abréviations

FA	Fabrication additive
CAO	Conception assistée par ordinateur
SLM	Fusion laser sélective
SLS	Frittage laser sélectif
EBM	Fusion par faisceau d'électrons
CS	Cold spray
ASI	Instabilité de cisaillement adiabatique
FACS	Fabrication Additive par Cold-Spray
OLP	Programmation hors ligne
FP	Chemin de remplissage
CP	Chemin de compensation
LP	Chemin de transfert
FDM	Dépôt de fil fondu
DMLS	Frittage laser direct de métal
STL	Standard Triangle Language ou Standard Tessellation Language
DED	Dépôt d'énergie dirigée
PBF	Fusion sur lit de poudre
LOM	Fabrication d'objets laminés
VPP	Photopolymérisation en cuve
CSHP	Cold spray à haute pression
CSBP	Cold spray à basse pression
GB	Grit-blasting
LST	Laser surface texturing
DE	Rendement
AAM	Fabrication additive à l'arc
FACSH	Fabrication additive par cold spray hybride
RRT	Rapidly-Exploring Random Tree
RNA	Réseau de neurones artificiels
FS	Fabrication soustractive
SoD	Distance de projection
RDE	Rendement relatif
PT	Projection thermique
DPPI	Intervalle de points de chemin discret
SLA	Stéréolithographie
3DP	Impression tridimensionnelle
RRT	Rapidly Exploring Random Tree

Introduction générale

La fabrication additive (FA) ou l'impression 3D est la construction d'un objet en trois dimensions à partir d'un modèle de la conception assistée par ordinateur (CAO) ou d'un modèle numérique 3D. En tant que processus de fabrication, basé sur une stratégie couche par couche, il peut être réalisé dans une variété de processus dans lesquels des matériaux (tels que des polymères, des métaux, des céramiques ou des liquides) sont assemblés, solidifiés ou déposés sous contrôle informatique. Comme les principales différences entre les processus sont la manière dont les couches sont déposées pour fabriquer des pièces, la FA peut être regroupée en plusieurs catégories, telles que le jet de liant, le dépôt d'énergie dirigée, l'extrusion de matériau, le jet de matériau, la fusion sur lit de poudre, le laminage de feuilles et la photopolymérisation en cuve. Considérant ses nombreux avantages, la FA commence maintenant à faire des percées significatives, en particulier dans le travail des métaux. Actuellement, les technologies de fabrication des métaux, telles que la fusion laser sélective (SLM), le frittage laser sélectif (SLS), le laser cladding et la fusion par faisceau d'électrons (EBM), ont été largement utilisés pour fabriquer des pièces. Cependant, le rayonnement laser à haute fréquence ou le faisceau d'électrons à haute puissance peuvent modifier les propriétés des matières premières voire induire des effets néfastes tels qu'une oxydation, la croissance de grains, des contraintes thermiques résiduelles et/ou la transformation de phases.

En parallèle, le procédé cold spray (CS) ou projection dynamique de gaz froid est une technique de projection de particules à l'état solide ou semi-solide. Les particules de poudre sont en effet injectées dans un jet de gaz supersonique et accélérées à une vitesse comprise entre 300 et 1500 m/s tout en limitant leur température à un niveau inférieur à leur température de fusion. Une déformation plastique sévère et hautement localisée se produit alors lorsque les particules heurtent la surface du substrat pour créer une liaison entre les matériaux. Cependant, les mécanismes d'accroche sous-jacent pour un tel procédé restent encore controversés. Par exemple, une liaison réussie entre les particules nécessite une déformation localisée et une instabilité de cisaillement adiabatique (ASI). Contrairement à cela, il est avancé qu'une plasticité hydrodynamique causée par l'interaction de fortes ondes de pression avec la surface libre au niveau des bords des particules affecte la liaison plutôt que l'ASI. Il n'en demeure pas moins que de tels traitements permettent l'élaboration de couches adhérentes présentant des caractéristiques particulièrement attrayantes d'un point de vue structural et métallurgique.

C'est pour toutes ces raisons que le procédé de projection à froid apparaît donc aujourd'hui comme une nouvelle option en FA. En particulier, la Fabrication Additive par Cold-Spray (FACS) semble tout à fait appropriée pour le traitement de matériaux sensibles à l'oxydation. Largement étudiée dans de nombreux domaines comme l'aérospatiale, l'automobile, l'énergie, le médical, la marine..., il apparaît malgré tout aujourd'hui un besoin croissant d'un concept systématique afin de réaliser des pièces de diverses structures pour atteindre véritablement la liberté de conception attendue par FACS. Il apparaît nécessaire en particulier d'optimiser les étapes de conception et de planification de la trajectoire de protection requises pour créer l'objet 3D. En même temps, l'optimisation des paramètres du procédé et la manière de prédire avec précision l'évolution et la forme finale des dépôts sont également des problèmes urgents à

résoudre. C'est précisément pour étayer de telles notions que ce travail de thèse a justement été initié. Considérant des pièces aux formes complexes ou plusieurs caractéristiques de forme, l'objectif de ce travail a consisté donc à développer une modélisation et simulation numérique du dépôt de matière afin de planifier la génération de trajectoires de projection. C'est pourquoi, cette thèse propose un concept intelligent intégré au système de fabrication additive par cold-spray, comprenant à la fois des composants matériels et logiciels. Le composant matériel est conçu et organisé pour permettre des évolutions (le système FACS hybride). Le composant logiciel quant à lui comprend principalement deux parties de modélisation et de simulation numérique du dépôt de matière ainsi qu'une planification et génération des trajectoires de projection. Plusieurs chapitres sont envisagés pour aborder les différentes étapes d'un tel projet.

Le premier chapitre présente l'état de l'art sur la FA par cold-spray robotisé. Au cours des dix dernières années, la FA a connu une croissance significative dans le domaine technologique. Par conséquent, le développement et les différents processus de la famille FA sont d'abord introduits. Ensuite, la technologie de CS, y compris les paramètres de projection et les applications, sont introduits. Avec l'avènement de la quatrième révolution industrielle, la tendance dans les technologies de fabrication s'oriente vers une automatisation et un échange de données plus élevés. C'est précisément pour cette raison que les robots industriels ont démontré de fortes perspectives d'applications. La programmation hors ligne (OLP) dans les méthodes de programmation des robots permet par exemple un premier travail indépendamment de la cellule robotique réelle. Il permet la robotisation de la production de petites séries. De plus, à l'aide de simulateurs robotiques, le mouvement du robot, son accessibilité peuvent permettre la détection de collisions et aborder de façon plus fiable les temps de cycles. A cette fin, l'outil RobotStudio™ sera alors présenté dans ce chapitre.

Le deuxième chapitre propose ensuite un concept modulaire intégré au système de fabrication additive par cold-spray. Pour ce faire, la FACS utilise en effet une technique de projection avec un certain nombre de caractéristiques comme un débit d'alimentation en poudre élevé, un rendement élevé et une grande diversité de matériaux potentiels. Afin d'intégrer tous ces éléments, un concept modulaire, intégrant y compris les composants matériels et logiciels, se doit donc d'être développé. Le composant matériel comprend le module de prétraitement, le module de projection, le module robot, le module de surveillance en ligne in situ, le module soustractif et le module de post-traitement. Le composant logiciel quant à lui comprend le prétraitement des données pour le modèle 3D de la pièce de fabrication, la modélisation et la simulation numérique du dépôt de matière, la planification de la trajectoire de projection du robot ainsi que le post-traitement des données. De plus, l'échange d'informations du concept intelligent entre les deux composants est également indispensable. Cette modularité du concept, basée sur un concept hybride, réalise ainsi l'ensemble du processus de production de la pièce.

Le troisième chapitre présente ensuite le protocole d'expériences. Avec le procédé FACS, il est primordial en effet d'étudier l'impact des paramètres sur le dépôt de matière et ses propriétés. Les paramètres de projection tels que la température et la pression du gaz comprimé, le débit d'alimentation en poudre et les paramètres cinématiques tels que la distance de projection, la vitesse de déplacement, le nombre de passages de numérisation sont donc à étudier. Par conséquent, afin de vérifier la faisabilité du concept intelligent développé, les deux

systèmes, CS à haute pression et à basse pression, ont été étudiés.

Le quatrième chapitre détaille ensuite la modélisation et la simulation numérique du dépôt de matière basée sur la stratégie de reconstruction. Sur la base de la distribution des flux de particules de poudre dans le processus CS réel, un modèle de la géométrie du jet statique a alors été proposé. Un modèle du jet de matière a ensuite été développé dans MATLAB afin d'accéder à un modèle de dépôt continu construit sur la base d'un empilement de cordons. De plus, afin de se rapprocher le plus possible de la réalité, différentes formes ont aussi été simulées. La comparaison de la simulation avec les résultats expérimentaux permettra de vérifier l'efficacité de la méthodologie de modélisation proposée.

Pour aller plus loin, le cinquième chapitre détaille la planification de la trajectoire de projection pour les pièces à géométrie complexe. D'abord basé sur un modèle 3D de la pièce à fabriquer, un nouvel algorithme paramétrique de découpage en couches a été proposé pour générer les points d'intersection des contours du modèle. Pendant ce temps, ces points doivent être regroupés et triés afin que le polygone de tous les points connectés puisse servir de base à la génération de la trajectoire de projection. Ensuite, sur la base des contours générés du modèle, la planification de la trajectoire sera alors effectuée en intégrant le chemin de remplissage (FP) (pour empiler le matériau couche par couche), le chemin de compensation (CP) (pour compenser la perte de bord du dépôt et assurer la perpendiculaire des bords souhaités), le chemin de transfert (LP) (pour le transfert entre les caractéristiques de forme). Ainsi, la trajectoire de projection de la pièce à fabriquer pourra être générée de manière précise et rapide.

Pour terminer, le dernier chapitre donne enfin une généralisation et un résumé des autres chapitres qui prennent en charge ce concept intelligent du système FACS pour réaliser la pièce. Il sera présenté alors étape par étape la pièce à fabriquer du modèle 3D au dépôt souhaité, en particulier pour les pièces à structures complexes ou à caractéristiques multiples. Une nouvelle méthode de production alternative sera ainsi présentée.

Chapitre 1

Etat de l'art sur la fabrication additive par cold-spray robotisé

1.1 Les technologies de fabrication additive

La technologie de Fabrication Additive (FA, également connue sous le nom d'impression 3D) est un processus de fabrication d'un objet 3D à partir d'une conception assistée par ordinateur (CAO) ou d'un modèle numérique 3D. Cela peut être fait par une variété de processus dans lesquels les matériaux (sous formes liquides, feuilles, fils ou poudres) sont solidifiés, assemblés ou déposés sous contrôle informatique, généralement couche par couche. Le terme d'impression 3D fait généralement référence aux technologies polymères dans la plupart des esprits tandis que le terme FA est plus susceptible d'être utilisé dans les contextes de production de pièces métalliques. C'est au début des années 2010 que les termes impression 3D et FA ont ensuite évolué pour devenir des termes génériques alternatifs pour toutes les technologies additives (l'un étant utilisé dans le langage populaire par les communautés de consommateurs et les médias, l'autre utilisé plus formellement par l'utilisation finale industrielle). Comparativement aux méthodes de fabrication soustractives comme le fraisage, le tournage, le meulage, etc., ou formatives comme le moulage, le forgeage, etc., la FA est une nouvelle technologie de fabrication avec un grand potentiel. Dans l'industrie manufacturière, le manque d'innovation pour la fabrication de nouveaux produits est devenu aujourd'hui son goulot d'étranglement. Avec la fabrication traditionnelle, toute la chaîne d'approvisionnement peut prendre des mois et nécessiter parfois un investissement considérable qui ne peut être atténué que par une production à volume élevé. A l'inverse, avec la FA, une grande partie des étapes intermédiaires de la chaîne d'approvisionnement peuvent être supprimées. En effet, un produit peut être fabriqué directement selon le modèle 3D de CAO.

1.1.1 La petite histoire de la Fabrication Additive

Les premiers équipements et matériaux de fabrication additive ont été développés dans les années 1980 par Hideo Kodama, qui travaillait à l'Institut municipal de recherche industrielle de Nagoya [1]. Cependant, la technologie FA utilisée aujourd'hui par la plupart des imprimantes 3D basées sur le dépôt de fil fondu (FDM), a été développée en 1988 par S. Scott Crump et commercialisée par la société Stratasys, qui a marqué sa première machine FDM en 1992 [2]. Au milieu des années 1990, le développement de lasers capables de fournir de grandes quantités d'énergie a permis ensuite d'élargir le champ des applications au traitement des poudres métalliques. Un procédé connu sous le nom de frittage laser direct de métal (DMLS) a alors été développé. À la fin des années 1990, Arcam (Suède) a introduit aussi une source d'énergie thermique à faisceau d'électrons pour la FA métallique.

C'est en 2009 que les brevets d'impression FDM ont alors expiré. Cela a ouvert la porte alors à de nombreuses entreprises, telles que AON3D, INTAMSYS, ROBOZE and 3D GENCE, qui ont pu développer le procédé FDM. Au fur et à mesure que les divers procédés additifs mûrissaient, de nombreux produits pouvaient être fabriqués par des procédés de fabrication additive plutôt que par des procédés traditionnels, en particulier pour les pièces métalliques. Depuis 2020, les machines de FA ont atteint un niveau de qualité et de prix qui permet à la plupart des acteurs d'entrer dans le monde de la FA (des machines de qualité peuvent être trouvées pour moins de 200 dollars américains pour les machines d'entrée de gamme). La FA offre ainsi de grandes opportunités pour l'industrie manufacturière.

1.1.2 Les matériaux susceptibles d'être utilisés en FA

Les matériaux ont des caractéristiques intrinsèques de forme et de performances, qui jouent un rôle crucial dans les processus de FA. Leurs besoins peuvent être influencés par divers facteurs en termes de matériaux comme : caractéristiques de la matière brute, nécessité d'un traitement ou d'un post-traitement, nécessité de performances de service. Ainsi, une large gamme de matériaux peut être envisagée comme l'illustre la Figure 1.1. Avec le développement rapide de la technologie au cours des 30 dernières années, les matériaux naturels, polymères, métaux et céramiques ont tous été largement utilisés par les différents procédés de fabrication [3–7]. Cependant, les matériaux homogènes conventionnels restent toujours limités face à la demande de complexité géométrique qui tend à s'accroître ainsi que les performances fonctionnelles à améliorer pour les objets imprimés en 3D. C'est pourquoi, divers matériaux hétérogènes, y compris les composites (composites traditionnels et matériaux à gradient fonctionnel) et les multi-matériaux, ont été développés ces dernières années pour accéder ainsi à de nouvelles propriétés, plus de fonctions, voire des performances personnalisées [8–11]. Avec le développement technologique de la Fabrication Additive, les matériaux dits intelligents (tels que les matériaux à mémoire de forme, les matériaux magnétostrictifs, les fibres bi-composants) ont reçu une attention particulière de la part de la communauté scientifique en raison de leur capacité à modifier leur comportement de manière systématique en réponse à un stimulus extérieur [12–14].

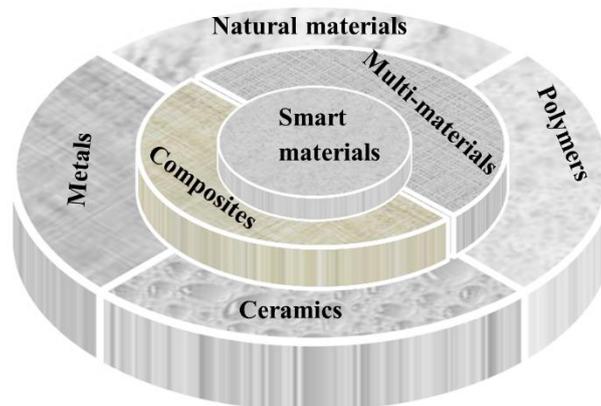


Figure 1.1 Divers matériaux susceptibles d'être utilisés en FA.

Aujourd'hui, afin de réduire les coûts des matériaux, des machines, des traitements de finition, de plus en plus de nouveaux matériaux ont donc été conçus et viennent élargir la gamme de matériaux potentiellement utilisables dans ce domaine en particulier pour de la fabrication de pièces à base de métal [15–17]. Cependant, un grand défi reste à relever pour ces nouveaux matériaux utilisés dans ce domaine par manque de connaissance et de maîtrise des processus de transformation. De nouvelles études complètes de la conception des matériaux aux besoins restent encore à réaliser.

1.1.3 Les procédés et équipements

Depuis l'invention de la FA, cette technologie a été appliquée dans de nombreux domaines, tels que l'automobile, l'aérospatiale, la marine et le biomédical [18–21]. Il convient de noter

que pour toutes ces technologies, il n'y a généralement pas besoin de masques, de moules ou de matrices pour fabriquer des composants 3D. Dans le processus, des modèles imprimables en 3D peuvent être créés avec un package CAO (Conception Assistée par Ordinateur) ou par ingénierie inverse via un scanner 3D. Le modèle est alors exporté vers la machine sous un format de fichier STL (Standard Triangle Language ou Standard Tessellation Language) avec les coordonnées des sommets de chaque facette triangulaire du modèle 3D. La résolution de l'objet fabriqué en 3D peut ensuite être réalisée en contrôlant le nombre de facettes triangulaires ; plus le nombre de facettes triangulaires est élevé, plus la résolution est élevée [22–24].

Pour répondre aux besoins des différentes fabrications, divers processus de fabrication additive ont été développés. Selon la norme ASTM F2792, des processus comme : le jet de liant, l'extrusion de matériaux, le dépôt d'énergie dirigée (DED), l'impression à jet d'encre 3D, la fusion sur lit de poudre (PBF), la fabrication d'objets laminés (LOM) et la photopolymérisation en cuve (VPP) sont donc apparus (Figure 1.2). Le jet de liant [25] correspond au dépôt d'un agent adhésif liant sur des couches de matériaux, généralement de la poudre. Les matériaux peuvent être à base de céramique ou de métal. L'extrusion d'un matériau par FA (également connue sous le nom de modélisation par dépôt de fil fondu ou fabrication de filaments fondus) [26] utilise un polymère thermoplastique sous la forme d'un filament solide comme matériau de construction. Le DED [27] quant à lui est un processus dans lequel une matière première sous forme de poudre ou de fil est délivrée en surface d'un substrat sur lequel une source d'énergie telle qu'un faisceau laser, un faisceau d'électrons ou un plasma/arc électrique est simultanément focalisé. Il se forme ainsi une petite masse fondue ou un dépôt de matière en continu, couche par couche. Par PBF [28], le matériau de base se trouve sous forme de poudre et les pièces sont construites par frittage ou fusion du lit de poudre couche par couche en utilisant un laser ou un faisceau d'électrons comme source d'énergie. Par rapport au DED, le PBF présente une exigence de poudre plus élevée (plusieurs kilogrammes), de composition homogène et est applicable aux composants de petites tailles et de formes très complexes. Parmi les technologies PBF sont référencées la fusion laser sélective (SLM), le frittage laser sélectif (SLS), le frittage laser direct de métal (DMLS) et la fusion par faisceau d'électrons (EBM). Le processus d'impression à jet d'encre 3D [29] implique quant à lui la génération de gouttelettes de matériaux, qui sont déposées sur un substrat sous contrôle numérique et ensuite solidifiées pour produire le produit final. Enfin, le LOM [30] est un processus dans lequel des couches de stratifiés de papier, de plastique, de métal ou de céramique enduits d'adhésif sont successivement collées ensemble et découpées à la forme avec un couteau ou un cutter laser. Pour terminer, le VPP [31] est une catégorie de FA qui utilise une source lumineuse pour durcir la surface d'une cuve remplie de résine photopolymère liquide. Grâce à une polymérisation sélective activée par la lumière, le photopolymère liquide se trouve alors solidifié en une forme 3D préconçue.

semaines à fabriquer [35–38]. Enfin, dans le monde moderne, il est très important de remplacer les pièces d'équipement endommagées. Le transport de pièces endommagées vers l'unité de réparation spécialisée la plus proche ou le transport de grandes quantités de pièces de rechange peut avoir un impact financier certain. C'est pourquoi, il devient intéressant d'équiper largement les unités de production ou de combat de machines FA pour déployer des tactiques plus créatives et efficaces [39–42]. Dans l'industrie médicale aussi, la FA a une contribution significative compte tenu des données personnelles des patients. Cela permet ainsi la création d'implants médicaux, d'outils et d'instruments parfaitement adaptés aux besoins [43–47]. Enfin, l'utilisation de la FA pour soutenir l'éducation est loin d'être nouvelle. Par exemple, une utilisation importante de la FA dans les universités apparait en sciences, où des modèles 3D sont créés pour faciliter le travail des étudiants [48–50]. De plus, les technologies de FA sont de puissants outils de préservation des objets et des artefacts des galeries, des bibliothèques, des musées et des archives, évitant des dommages permanents aux collections [51–54]. Les applications dans diverses industries sont illustrées Figure 1.3.

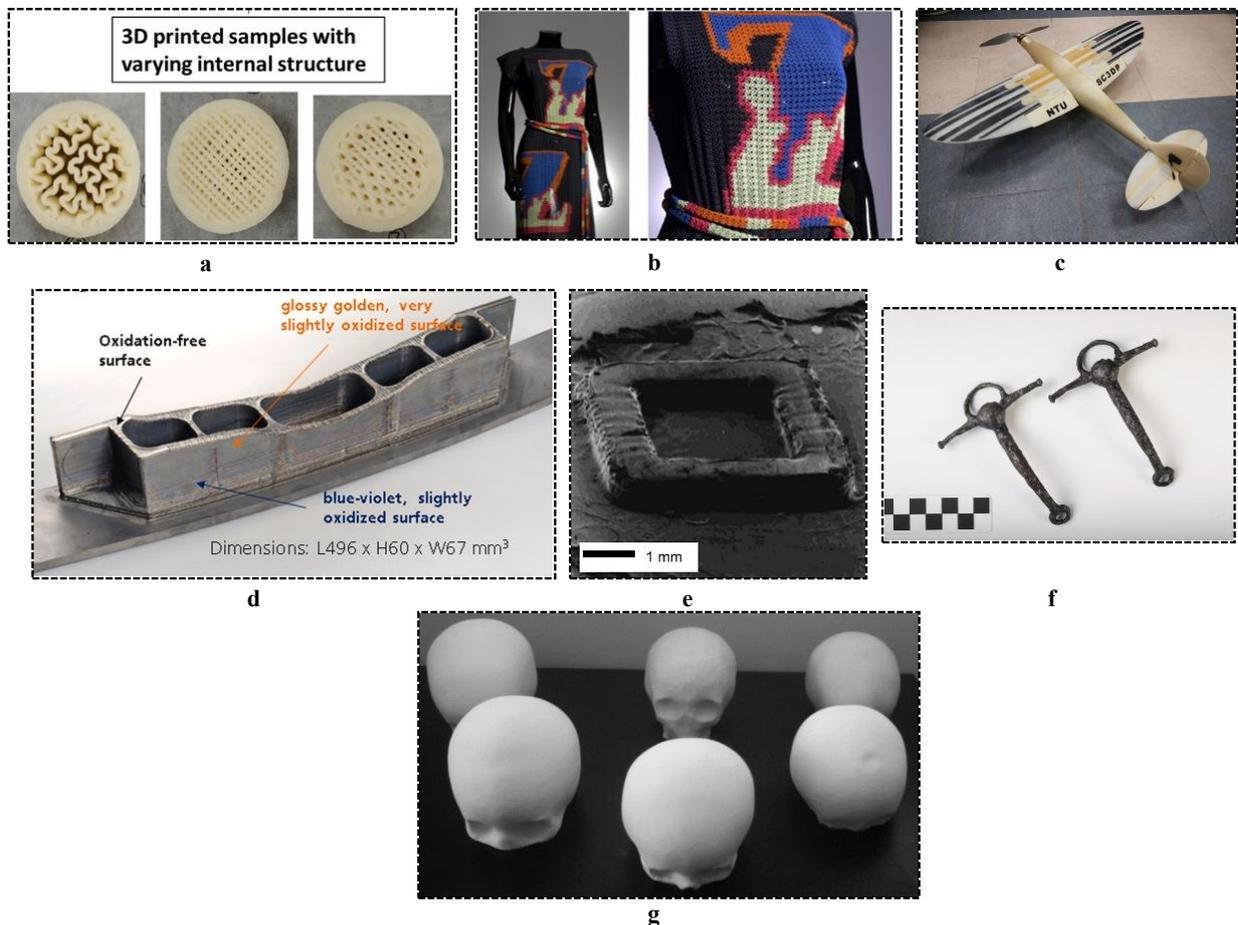


Figure 1.3 Illustrations des applications potentielles de la FA dans diverses industries : (a) Création de la structure interne d'une purée de pomme de terre par impression 3D [33] ; (b) Textiles fabriqués par FA [34]; (c) Structures d'ailes d'avion fabriquées de manière additive [36] ; (d) support de pylône pour un avion [39] ; (e) structures fabriquées à l'aide de macromères biodégradables [45] ; (f) Mors de filet (à droite) et sa reproduction (à gauche) [54] ; (g) modèles de crâne fabriqués par FA [49].

Ainsi, un marché significatif apparaît pour tous les procédés de fabrication additive. Avec les générateurs numériques il devient possible d'améliorer la compétitivité industrielle en termes d'efficacité de production à grande échelle, de contrôle de la qualité et de flexibilité sur la base de la personnalisation des produits. Cependant, aujourd'hui, il subsiste toujours une demande pour un rendement toujours plus élevé, la fabrication de pièces de toujours plus grande dimension avec réduction de la consommation d'énergie. C'est précisément pour répondre à de tels besoins que le procédé cold spray est entré dans le champ de vision des chercheurs scientifiques en tant que nouveau procédé de Fabrication Additive.

1.2 La technologie cold spray

Le cold spray (CS), également connu sous le nom de projection cinétique ou projection dynamique à gaz froid est l'un des procédés en pleine croissance dans le domaine de la projection thermique. Découvert au cours du 20ème siècle, cette technologie consiste à projeter des particules "froides" à haute vitesse pour produire un revêtement homogène en surface [55,56]. Lors de ce processus, des gaz comprimés à haute pression et haute température (généralement de l'azote, de l'air ou de l'hélium) sont utilisés comme gaz propulseur pour accélérer des particules de poudre (généralement des métaux, des composites à matrice métallique) à un niveau élevé de vitesse (typiquement de 300 à 1500 m/s). Le revêtement se construit alors lors de l'impact des particules sur le substrat (généralement des métaux) [56–58]. Cependant, contrairement aux procédés de dépôt à haute température conventionnels, la formation d'un revêtement par CS repose largement sur l'énergie cinétique des particules avant l'impact plutôt que sur leur énergie thermique. Par exemple, dans la projection plasma, un matériau (poudre, liquide, suspension ou fil) est introduit dans un jet de plasma à une température d'environ 10 000 K. Le matériau fondu est projeté sur un substrat et se solidifie rapidement pour former un revêtement. De même, lors de la projection à la flamme, à la flamme supersonique et à l'arc, le matériau est également chauffé jusqu'à un état semi-fondu, voire complètement fondu.

Tableau 1-1 compare de manière synthétique le CS avec d'autres procédés de dépôt thermique afin de mettre en évidence leurs atouts et limitations. D'un point de vue matériel, pour les procédés de fabrication additive chaleur, il est difficile de déposer des matériaux hautement réfléchissants en utilisant du laser comme source de chaleur ; alors qu'il est difficile de déposer des matériaux non conducteurs en utilisant de l'E-faisceau. Les matériaux à haute réactivité ou mauvaise conductivité thermique ne conviennent pas au WAAM. La FACS ne convient pas à la fabrication additive de matériaux de haute dureté. Mais les matériaux dégradés peuvent être déposés via FACS. Dans le détail, les matériaux premières des PBF et FACS doivent être des poudres, tandis que pour le DED, un fil métallique comme apport de matériau. Dans les procédés PBF et DED, le matériau est à l'état fondu, un atmosphère protectrice est donc nécessaire, alors que la FACS est exactement le contraire. De plus, la FACS présente des avantages par rapport à d'autres procédés de dépôt de par sa grande efficacité économique (faibles coûts d'énergie et d'équipement), ses nombreuses applications possibles (il peut être utilisé pour la préparation de pièces, la fabrication additive sans limite théorique de taille), son taux de fabrication élevé et grande flexibilité des équipements. Il convient de mentionner que

la FACS peut également être utilisé pour réparer des équipements ou des composants endommagés sans introduire les effets néfastes de la solidification, tels que les microstructures à ségrégation de composition et les contraintes de rétrécissement. Néanmoins, il convient de mentionner que la FACS présente des défauts inhérents. La résolution des produits est limitée en raison de la taille du « point de projection », qui est généralement de plusieurs millimètres. Pour atteindre les propriétés mécaniques des produits fabriqués comparables aux propriétés des matériaux en vrac, un post-traitement peut être nécessaire.

Tableau 1-1 Comparaison de procédé de cold spray et d'autres procédés de dépôt

Procédé	PBF		DED			CS
	Fusion sélective par laser	Fusion par faisceau d'électrons	DED par laser	DED par E-faisceau	Fabrication additive par arc-fil (WAAM)	Fabrication additive par cold-spray
Mode d'alimentation en matériau	Poudre	Poudre	Poudre/Fil	Poudre/Fil	Poudre/Fil	Poudre
Limites des matières	Matériaux hautement réfléchissants et peu fluides	Matériaux non conducteurs	Matériaux hautement réfléchissants	Matériaux non conducteurs	Matériaux à haute réactivité ou mauvaise conductivité thermique	Matériaux de haute dureté
	Multi-matériaux et matériaux dégradés					
Atmosphère protectrice	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
Fusion des matériaux	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
Consommation d'énergie	Haut	Haut	Haut	Haut	Haut	Faible
Taille du produit	Limité	Limité	Limité	Limité	Grand	Grand
Temps de production	Long	Long	Long	Long	Court	Court
Flexibilité de l'équipement	Faible	Faible	Faible	Faible	Haut	Haut
Prix des appareils milieu de gamme, €	200K +	500K +	100K +	500K +	100K +	100K +
Réparation	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Précision dimensionnelle	Haut	Haut	Haut	Haut	Faible	Faible
Propriétés mécaniques	Haut	Haut	Haut	Haut	Faible	Faible

La particularité du CS réside sur l'état du matériau précurseur qui reste à l'état solide (ou semi-solide) pendant tout le processus de projection, garantissant ainsi les propriétés de la matière première inchangées. C'est précisément pourquoi le procédé CS apparait donc particulièrement adapté aux matériaux sensibles à l'oxygène et à la température. Le développement de nouvelles surfaces avec des propriétés améliorées couvrant un large éventail de fonctionnalités redevient donc accessible par CS avec une large variété de combinaisons possibles. Cela comprend les métaux (Cu, Ag, acier, etc.), les céramiques (TiO₂, SiC, WO₃, etc.), les composites à matrice métallique (W/Cu, Ti/Al, Nd₂Fe₁₄B/Al, etc.), les polymères (PEEK, FRPC, CFRP, etc.) et les poudres nano-structurées (Ni-20Cr, WC-Co, etc) [59]. Étant donné que l'objectif principal de cette thèse est d'explorer la simulation de la formation et planification des trajectoires de projection dans le cas de pièces de formes complexes par FACS, plutôt que les propriétés du dépôt, les poudres d'aluminium et de cuivre conventionnelles sont donc utilisées comme matières premières à dépôt.

Le Tableau 1-2 compare des propriétés des dépôt et dépôt-recuit avec le matériau massif. Il est à remarquer que la dureté des dépôts de poudre de cuivre ou d'aluminium obtenus par FACS est supérieure à celle du matériau massif. Cela est dû à la déformation par impact des particules à grande vitesse, qui génère une forte densité de dislocations et un écrouissage sévère à l'intérieur de la couche déposée. Néanmoins, après le traitement thermique, la dureté, la résistance à la traction et la porosité sont considérablement réduites et se rapprochent même de celles du matériau massif. Au contraire, la ductilité est significativement améliorée. De plus, la conductivité thermique, le module élastique et la conductivité électrique du dépôt déposé par poudre de cuivre sont également améliorés. Il convient de mentionner qu'en projection à froid basse pression, afin d'améliorer le rendement et d'éviter le colmatage de la buse, le dépôt de poudre mixte (c'est-à-dire respectivement l'ajout d'alumine à ces poudres) a été exploré. Il en va de même pour de nombreuses autres nuances de matière comme Ag, TiO₂, hydroxyapatite [60–64].

Tableau 1-2 Comparaison des propriétés des dépôts et des matières premières

Matériaux	Propriétés	Dépôt	Dépôt- recuit	Matériau massif	Réf.
Cu	Conductivité thermique (W/mK)	200	350	380	[65]
	Module élastique (GPa)	125	130	110	
	Micro-dureté (HV _{0.3N})	175	50	50	
	Conductivité électrique (MS/m)	20	48	52	[66]
	Résistance à la traction (MPa)	425	300	380	[67]
	Allongement à la rupture (%)	2	25	48	
	Porosité (%)	0.18	0.05	/	[66]
Al	Micro-dureté (HV _{0.3N})	50	30	36	[68]
	Résistance à la traction (MPa)	93.3	60	80	[69]
	Allongement à la rupture (%)	2.5	8	42	
	Porosité (%)	0.97	0.5	/	

1.2.1 Les Applications

En termes d'applications, la technologie CS est largement complémentaire aux autres procédés de projection thermique connus et ne remplace donc aucune d'entre elles. Dans diverses industries telles que l'automobile, l'aérospatiale, la marine, le médical, l'électronique et la pétrochimie ce procédé est couramment utilisé pour élaborer des revêtements présentant diverses fonctions. Compte tenu du fait que le CS peut conserver les propriétés du matériau sans être modifiée et sa grande capacité de formage, il peut également être utilisé pour réparer tous types de défauts de pièces et d'équipements et fabriquer de manière additive des produits qui répondent à la demande.

En termes d'applications, la technologie CS est largement complémentaire aux autres procédés de projection thermique connus et ne remplace donc aucune d'entre elles. Dans diverses industries telles que l'automobile, l'aérospatiale, la marine, le médical, l'électronique et la pétrochimie, ce procédé est couramment utilisé pour élaborer des revêtements présentant diverses fonctions. Néanmoins, compte tenu du fait que le CS affecte peu les propriétés du matériau et présente une grande capacité de formage, il peut également être utilisé pour réparer tous types de défauts de pièces et d'équipements et fabriquer de manière additive des produits qui répondent à la demande.

Les propriétés de surface des matériaux modernes sont en effet généralement inadéquates face aux contraintes qui leur sont imposées ce qui justifie justement souvent quelques modifications [70]. Plusieurs fonctionnalités peuvent alors être envisagées pour des applications décoratives, fonctionnelles voire les deux.

À l'heure actuelle, de nombreux revêtements fonctionnels sont développés par CS, comme le montre la Figure 1.4:

- revêtements résistants aux hautes températures : MCrAlY [71–76], FeCrAl [77], CuCrAl [78];
- revêtements résistants à la corrosion : Ti [79–81], Ni [82,83], Zn [84,85], Inconel 718 [86], alliages à haute entropie CoCrFeNi [87];
- revêtements résistants à l'usure : alliages à base d'Al-Sn [88], Inconel 625 [89], stellite [90,91], CoCr2FeNiMo [92];
- revêtements biologiques et biomédicaux : Cu [93,94], Ti (Ti-Mg, Ti-Al, Ti-Ta) [95–97], Ta [98,99], oxyde de graphène réducteur-Ag nanoparticule-Al [100], acier inoxydable [101,102], TiO₂ [103,104], HA [105–108], Zn-Al-Mg-TiO₂ [109] et CS-Cu/Al [110].

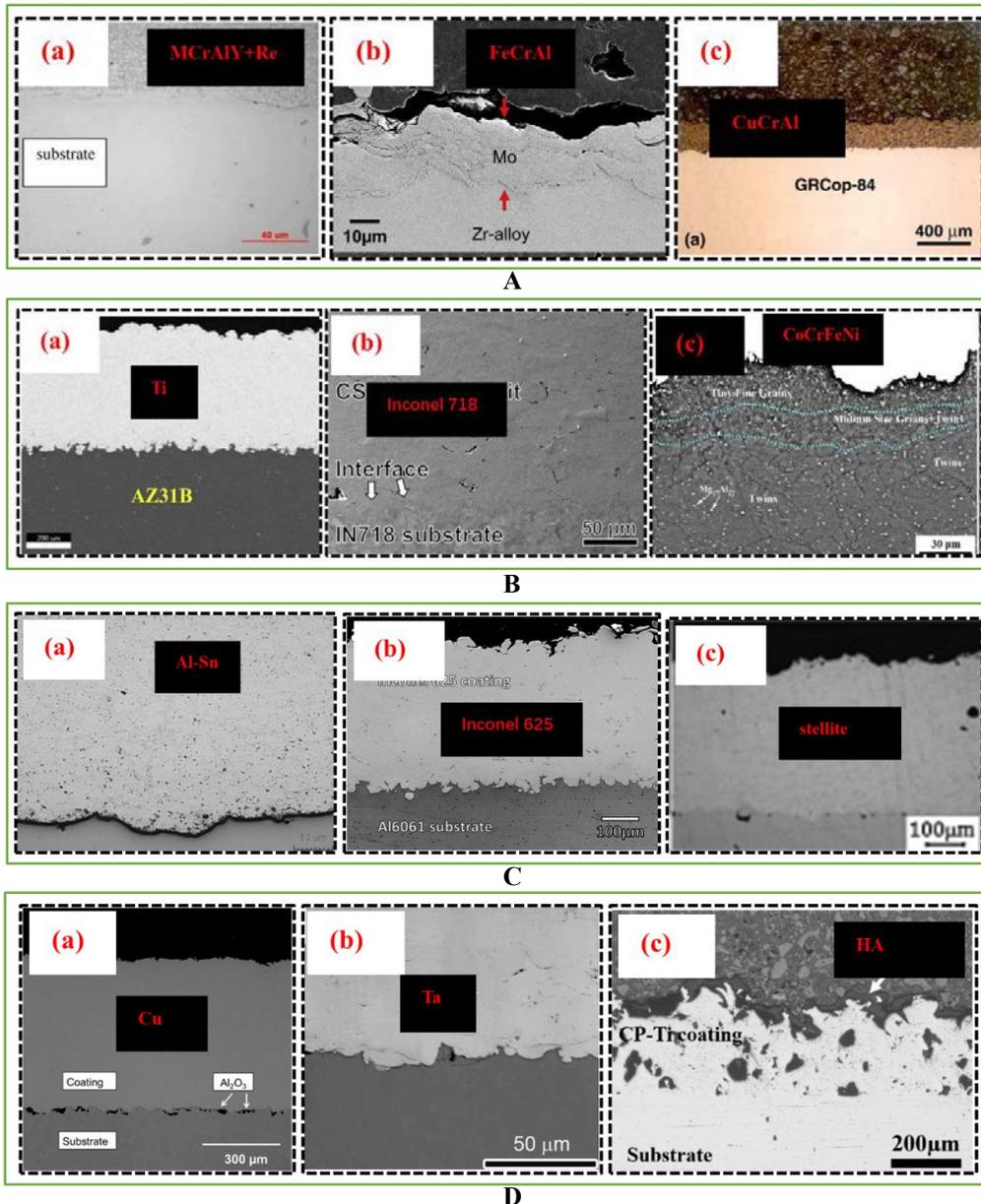


Figure 1.4 Divers revêtements fonctionnels développés par CS : (A) revêtement résistant aux hautes températures [71,77,78]; (B) revêtement résistant à la corrosion [81,86,87]; (C) revêtement résistant à l'usure [88–90]; (D) revêtement biologique et biomédical [94,99,108].

Compte tenu justement des basses températures de mise en œuvre, l'usage du procédé CS peut aussi être envisagé pour réparer les dommages induits sur des composants ou des équipements. Actuellement, face souvent au manque de méthodes efficaces, les composants ou équipements endommagés se retrouvent remplacés car il n'existe pas de filière de récupération/recyclage. Dans un contexte environnemental de plus en plus fort, la projection à froid présente donc aujourd'hui un grand potentiel dans la réparation de pièces endommagées grâce à sa capacité de conservation des propriétés d'origine du matériau précurseur et permettant aussi de limiter les dommages thermiques imposés aux pièces lors de leur réparation.

Les composants aéronautiques par exemple sont sensibles à la corrosion et à l'usure en raison de leur exposition constante à la rotation à grande vitesse et à l'air humide. De nombreux articles ont justement rapporté l'intérêt significatif d'une réparation par CS de ces composants [111–114] (Figure 1.5). De plus, dans l'industrie automobile, la projection CS a aussi été appliquée pour réparer les moteurs de carters de pompe à huile en alliage d'aluminium corrodés [111]. Un nouveau concept de réparation intelligent a d'ailleurs récemment été proposé [115] en intégrant l'adaptation de la géométrie normalisée des défauts, le prétraitement d'usinage, le parcours des outils de projection CS et le réglage des paramètres. Une nouvelle stratégie de réparation par CS se trouve donc proposée pour la réparation de composants endommagés.

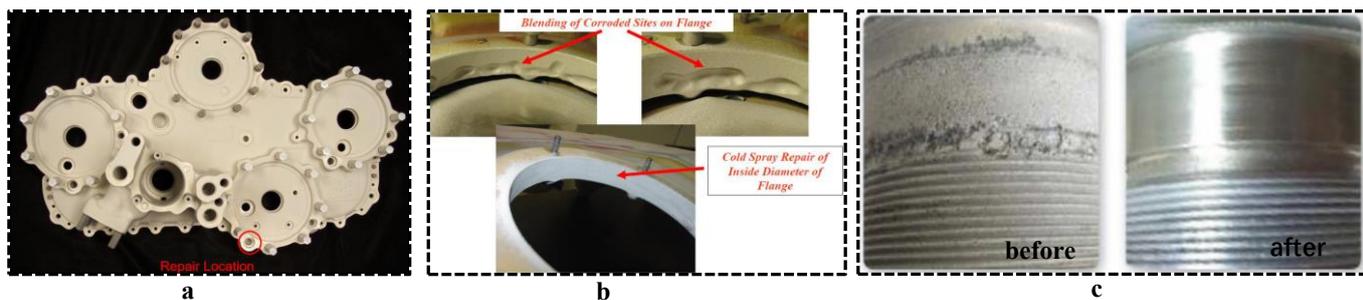


Figure 1.5 Exemples d'applications CS en réparation : (a) couvercle de tube d'huile pour application d'hélicoptère CH47 ; (b) carter de boîte de vitesses d'un hélicoptère UH-60 ; (c) actionneur de direction d'une roue avant d'avion [111].

Avec une grande capacité de formage, et des rendements élevés de traitement, le procédé cold-spray apparaît donc tout à fait pertinent comme technologie de fabrication additive pour le développement de nouvelles pièces. La fabrication additive par cold spray (FACS) peut en effet constituer une nouvelle méthode de production alternative. Comme le montre la Figure 1.6, divers exemples d'application de Fabrication Additive par Cold-Spray existent aujourd'hui pour des composants à symétrie de rotation tels que des parois de cylindre, des tubes et des brides [116–119].

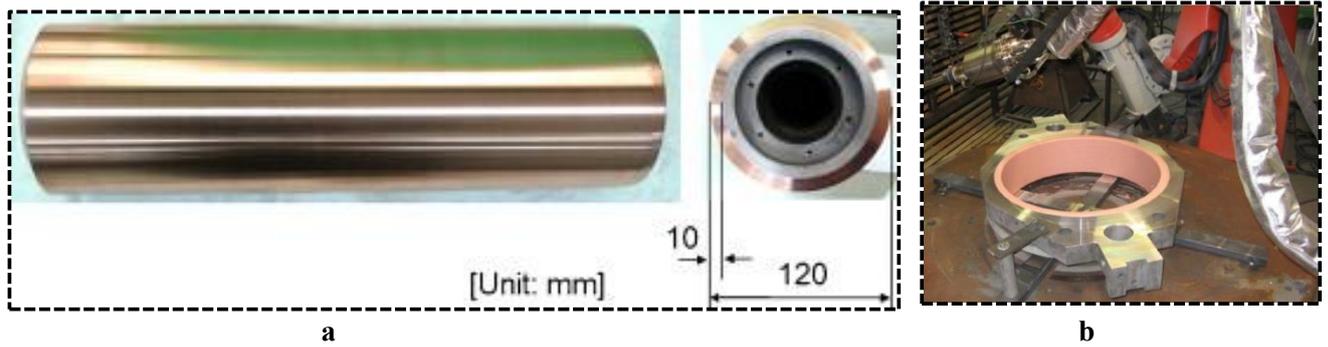


Figure 1.6 Exemples d'applications du procédé CS en fabrication additive : (a) Cartouche pour l'élimination des combustibles usés [118] ; (b) Paroi intérieure d'un anneau de pression pour machine de transformation des aliments [119].

1.2.2 Installations et équipements

Pour ce faire, deux catégories de systèmes de projection sont développées selon la pression de projection ou plus exactement la pression du gaz propulseur. On distingue donc le cold spray à haute pression (CSHP) pour lequel la pression est supérieure à 20 bars [120–122] et le cold spray à basse pression (CSBP) proche de 10 bars (Figure 1.7).

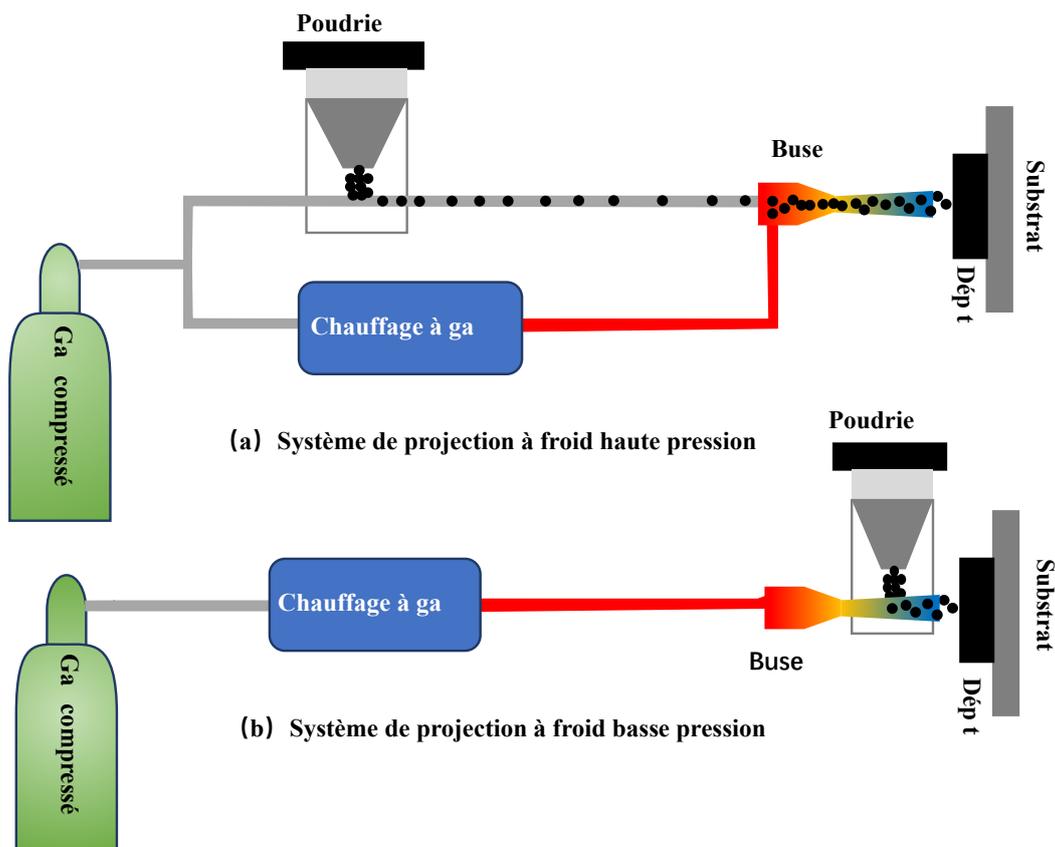


Figure 1.7 Schéma de principe des systèmes CS (a) haute pression et (b) basse pression.

Pour le CSHP, se distinguent les principaux éléments de l'unité de projection composée

d'une préchambre et d'une buse supersonique, d'un poudrier, d'un réchauffeur de gaz, d'une source de gaz comprimé. Pour la buse, la configuration doit garantir une large plage de variation de vitesse en vol des particules de poudre (200-1200 m/s) ; une concentration uniforme des particules dans le jet et des paramètres technologiques constants (pression et température de stagnation). Pour illustrer, la Figure 1.8 (A), (a)-(d) montre justement les différents types de buses utilisés pour ce procédé. Il existe de nombreuses conceptions, optimisées pour diverses propriétés de revêtements voire pour l'injection d'un liquide atomisé (comme indiqué en (d) de la Figure 1.8 (A)). Concernant le distributeur de poudre, il doit fournir une alimentation contrôlée uniforme de la poudre dans la préchambre de la buse. Un distributeur de poudre de type tambour a par exemple été développé (Figure 1.8 (B) (a)). La Figure 1.8 (B) (b) montre quant à elle le schéma d'un doseur, qui permet l'injection d'une quantité prescrite ($< 0,2$ g) de poudre ou d'une certaine quantité de particules dans le flux de gaz pendant une courte période (< 1 s). Ce chargeur de poudre est très pratique dans l'étude de l'interaction des particules individuelles avec le substrat [123]. Quant au réchauffeur de gaz, il est utilisé pour chauffer le gaz propulseur avec un certain débit à une température nécessaire. L'appareil de chauffage doit répondre aux exigences suivantes : simple à fabriquer, fiable et pratique à exploiter ; ne pas introduire de résistance hydrodynamique significative dans le conduit ; avoir les dimensions minimales possibles, et être le moins énergivore [123], comme le montre la Figure 1.8 (C).

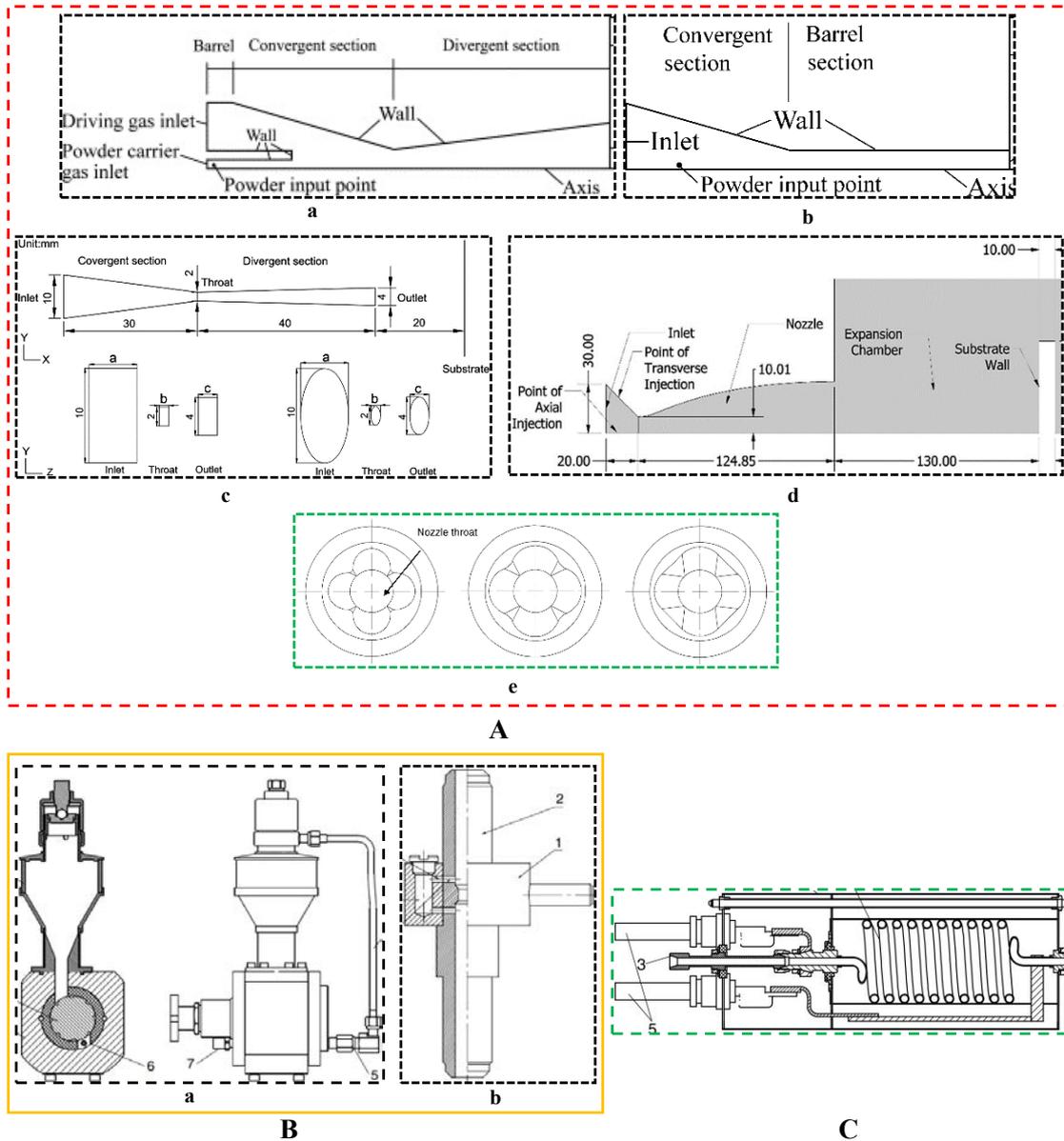


Figure 1.8 (A) Les différents types de buses utilisées en CS : (a) buse à sortie ronde conventionnelle [124], (b) buse à canon convergent [125], (c) buses aplaties (rectangulaires et elliptiques) [126], (d) buse de type cloche [127], (e) buse en trèfle [128] ; (B) Schéma de distributeurs de poudre (a) doseur de poudre de type tambour, (b) doseur de doseur de poudre [123] ; (C) Schéma d'un réchauffeur ohmique tubulaire de gaz [123].

D'une manière générale, la technologie CS implique que le système doit être disponible dans autant de situations que possible, telles que les espaces ouverts, les endroits difficiles d'accès et les réservoirs intérieurs. Cependant, le système CSHP est entravé dans une large mesure par les capacités limitées de l'équipement dans son ensemble. C'est pourquoi, d'autres systèmes ont été développés tels que le système CSBP qui se compose de deux unités portables et d'un doseur de poudre. L'une des unités (unité de projection) est réalisée sous la forme d'un outil portable avec télécommande. Il comprend la partie buse, la partie chauffage du gaz et les

pièces auxiliaires, telles que le capteur thermique. L'autre unité (unité de contrôle et de surveillance de la projection) comprend un système relié par un câble électrique avec des éléments chauffants électriques, un système de contrôle de verrouillage (alimenté par la source de gaz comprimé) relié par des conduites pneumatiques avec le réchauffeur de gaz, le doseur de poudre et les manomètres, ainsi que l'indicateur de température des gaz [123]. Ainsi, suivant les diverses spécificités offertes par les deux systèmes de projection, une grande diversité de matériaux pour différentes applications pourra être traitée.

1.2.3 Principe d'élaboration d'un revêtement

Suivant la Figure 1.9, une illustration schématique du procédé de projection à froid est proposée. Basé sur la différence de pression entre l'entrée de la buse et la sortie de la buse, le gaz s'écoule à travers la tuyère de Laval à une vitesse subsonique dans la "partie convergente" et est accéléré à une vitesse supersonique lorsque les flux se dilatent dans la "partie divergente". Les dimensions et le type de buse, la température, la pression du gaz déterminent le débit de gaz, qui à son tour détermine le comportement des particules en vol. Les caractéristiques les plus importantes des dimensions de la tuyère sont la section de gorge, la section de sortie et la longueur de la "partie divergente". La buse est généralement suffisamment longue (ou la zone existante est suffisamment grande) pour que la pression dans l'entrée de la buse soit réduite à la pression existante à l'extérieur de la buse. C'est sous cette condition, $P_e = P_a$, que les particules peuvent atteindre alors la vitesse maximale. Lorsque P_e est supérieur à P_a , la buse est sous-dilatée, c'est-à-dire que la longueur de la buse peut être allongée ou que le rapport de dilatation (zone existante/zone de gorge) peut être augmenté. Dans le cas contraire, il est sur-dilaté, le jet peut se séparer de la buse.

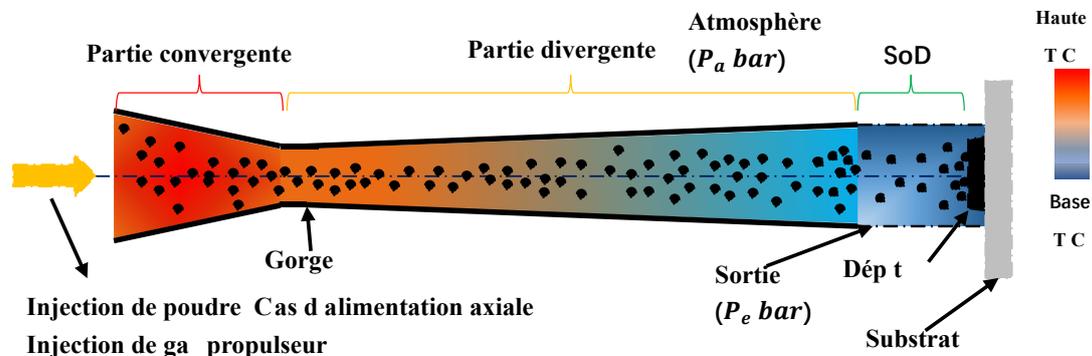


Figure 1.9 Principe général d'accélération du gaz dans la buse du procédé CS.

La vitesse critique v_{cri} est définie comme la vitesse d'impact ou limite des particules de sorte que les particules de poudre puissent juste être déposées sur le substrat. Concrètement, il existe donc une fenêtre de tir où :

- lorsque la vitesse d'impact est inférieure à v_{cri} , un manque d'adhérence est observé ;
- lorsque la vitesse d'impact est supérieure à v_{cri} , une forte érosion de la surface est alors notée.

La vitesse critique dépend bien évidemment à la fois du substrat (degré d'oxydation, température, matériau) et de la poudre (matériau, teneur en oxygène, température, morphologie et taille). Il est de notoriété publique qu'une bonne liaison particule-substrat et particule-

particule exige que la vitesse d'impact des particules soit supérieure à la vitesse critique pour un matériau donné [129–131]. La simulation par éléments finis du comportement d'impact des particules semble être une bonne méthode pour révéler la vitesse critique et explorer le mécanisme de liaison [132–136]. Selon des études antérieures, la théorie du dépôt est principalement basée sur la déformation plastique des particules pour obtenir un auto-blocage entre les particules [137]. Se sont donc les caractéristiques en vol des particules qui régissent principalement la formation du dépôt, sa croissance et les propriétés du dépôt final. Ainsi, l'analyse du comportement des particules en vol est importante. De nombreuses études antérieures se sont concentrées sur la manière d'améliorer la vitesse d'impact. D'une manière générale, il existe quatre facteurs pour influencer les particules : la structure de la buse de projection (principalement le taux d'expansion et la longueur divergente), l'emplacement et la géométrie du substrat, les paramètres de fonctionnement (principalement la température et la pression du gaz et la catégorie de gaz), choix des matériaux (principalement les caractéristiques de la poudre et du substrat).

La limite ultime de la vitesse des particules de projection est la vitesse du gaz . Trois modifications pourraient être apportées pour réduire la différence de vitesse entre la particule et le gaz. Il s'agit d'augmenter le débit de gaz, de réduire la taille des particules ou d'allonger la buse. Simultanément, lors de l'analyse des vitesses des particules, les effets des couches limites et zones de haute pression locales le long de la paroi interne de la buse doivent être pris en compte. Plus la taille des particules est petite, plus leur effet est grand. Sur la base de ces effets, la taille optimale de la buse peut donc être estimée. Par exemple, par simulation d'un canon convergent, on constate que les particules peuvent atteindre une vitesse relativement plus faible mais une température plus élevée. Plus tard, des investigations incluant l'optimisation géométrique de la tuyère de Laval en faisant varier la longueur et le taux d'expansion [139,140]. De la même façon, en jouant sur la forme de la buse (circulaires, carrées et elliptiques), les résultats montrent que par rapport à la section transversale elliptique, les sections transversales circulaires et carrées présentent une distribution de poudre la moins dispersée avec les plus grandes vitesses moyennes de particules [126,138,140]. La taille de la buse a un effet sur la distribution des particules, en particulier la hauteur de la gorge affecte de manière significative la distribution et la vitesse des particules qui peut être améliorée. La Figure 1.10 montre les effets de la structure de la buse de projection sur les particules en vol.

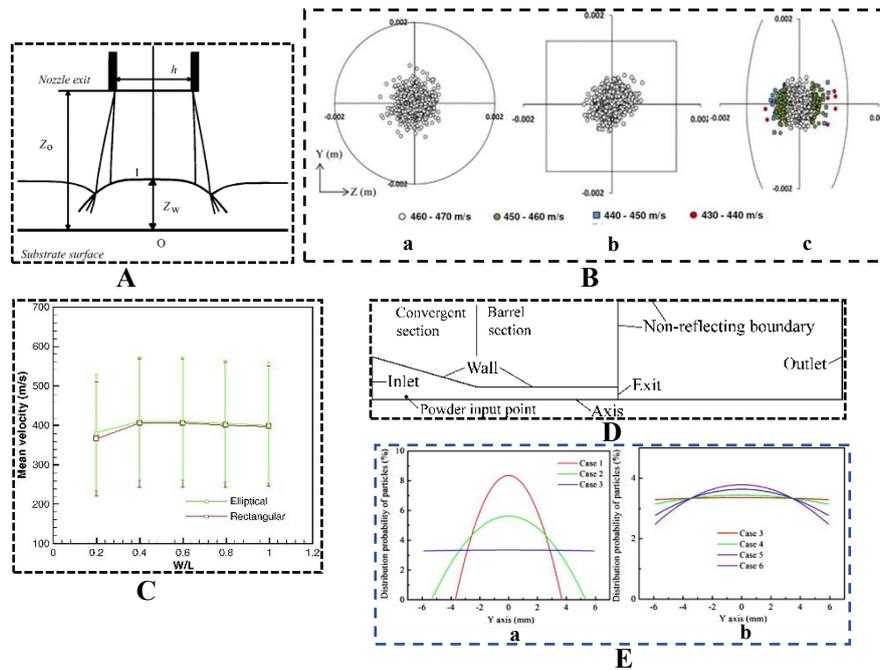


Figure 1.10 Effets de l'emplacement et de la géométrie de la structure sur les particules en vol : (A) Schéma d'impact d'un jet de gaz supersonique sur un obstacle plat sans restriction [141] ; (B) Simulation de la répartition des particules en sortie dans le cas d'une buse (a) circulaire ; (b) carrée ; (c) de forme elliptique [140] ; (C) Effet de la forme de la section transversale de la buse sur la vitesse moyenne d'impact des particules [126] ; (D) Schéma de principe de la buse à canon convergent [125]; (E) Distribution des particules en fonction de (a) la sortie et (b) la hauteur de la gorge [138].

Les effets de l'emplacement et de la forme du substrat sur la vitesse et la trajectoire des particules ont donc été étudiés [142,143]. Par exemple, il apparaît que les particules les plus petites (moins de $25 \mu\text{m}$) sont les plus affectées par les gradients de pression et les chocs induits à la surface du substrat. Il existe en effet une relation directe entre la distance de projection et le rendement en raison de l'influence de l'onde de choc sur la vitesse des particules. Trois conditions semblent ainsi affecter le rendement, comme le montre la Figure 1.1 :

- zone à la distance de projection petite, où la présence de l'onde de choc affecte négativement le rendement ;
- zone à la distance de projection moyenne, où de l'onde de choc a disparu ;
- zone à la distance de projection grande, où la vitesse du gaz est tombée en dessous de la vitesse des particules (force de traînée négative) et les particules commencent à décélérer.

De même, l'épaisseur du film d'oxyde sur la surface du substrat s'est avérée avoir un effet significatif sur le comportement d dépôt [144]. La vitesse critique des particules dépend en effet de l'état du substrat, puisqu'un substrat oxydé peut augmenter la vitesse critique par rapport à un substrat non oxydé.

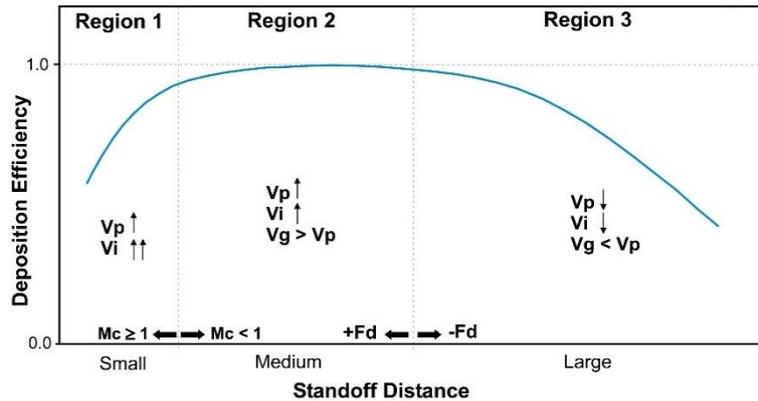


Figure 1.11 Effet de la distance de projection sur le rendement.

Ainsi, le jet devient instable à une certaine distance de la sortie de la buse où des oscillations de flexion se développent [145]. Pour contrer de tels phénomènes, un modèle numérique montre que le gaz propulseur à base d'hélium peut augmenter la vitesse des particules et que l'augmentation de sa pression facilite l'accélération des particules [146–149]. Parce que sa constante molaire des gaz est beaucoup plus élevée que celle de l'azote et de l'air ([150]), plus la constante de gaz est grande, plus la vitesse des particules de poudre augmente. De même, le gaz a un effet sur la conception du diamètre de sortie de buse, qui doit être augmenté avec l'augmentation de la pression du gaz principal et diminué avec l'augmentation de la température [124]. De plus, par rapport à l'azote, l'Hélium a une grande influence sur la vitesse critique des particules de poudre, qui diminue avec l'augmentation de la température du gaz [131]. La Figure 1.12 montre les effets des paramètres de fonctionnement sur les particules en vol.

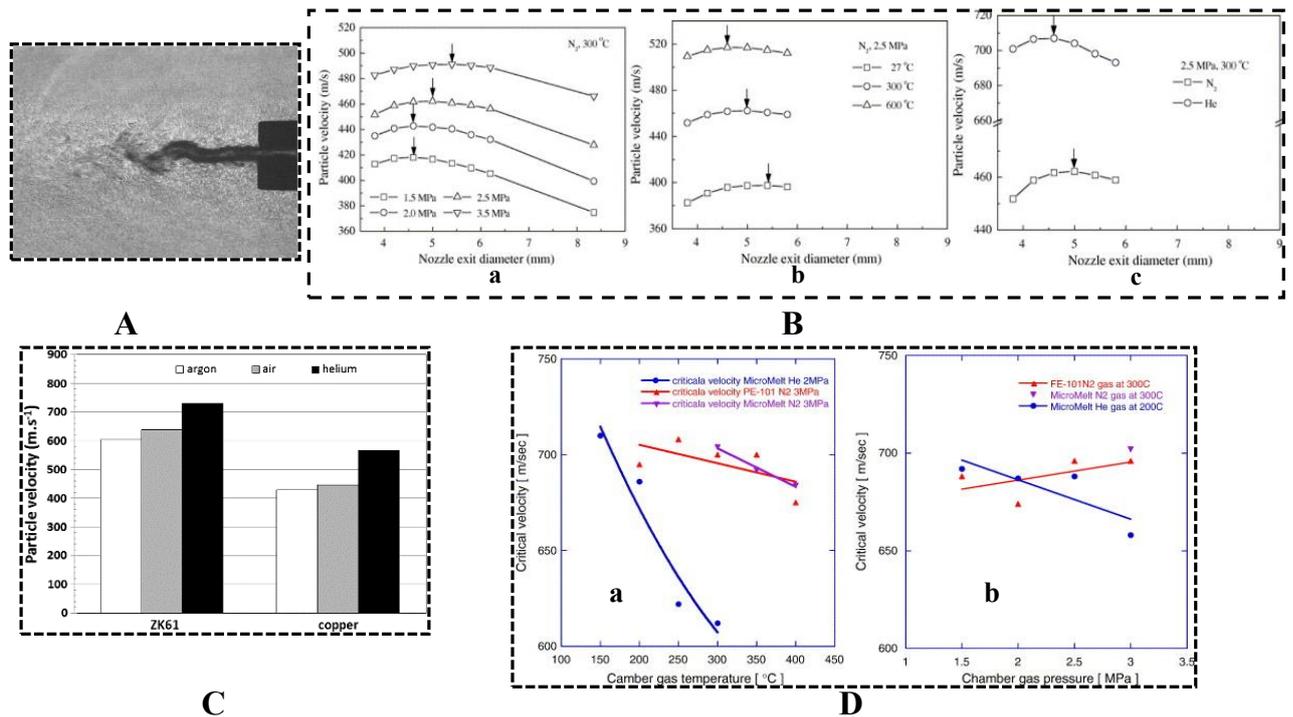


Figure 1.12 Effet des paramètres de fonctionnement sur les particules en vol : (A) Photographie Schlieren du jet libre [145] ; (B) Vitesses des particules de ZK61 et de cuivre en fonction de la nature du gaz porteur [151] ; (C) Effet de la pression, de la température et du type de gaz sur le diamètre de sortie optimal de la buse [124] ; (D) Vitesse critique des poudres en fonction de la température et de la pression du gaz de la chambre [131].

D'un point de vue des poudres, l'influence de l'état des particules sur le processus d'impact à grande vitesse a été étudié [137,152–154]. Un résultat de simulation montre que la vitesse critique diminue avec l'augmentation de la température initiale de la poudre. De même, les poudres dendritiques semblent plus adaptées au CS basse pression que les poudres sphériques. Elles permettent en effet d'obtenir une vitesse critique plus faible et une vitesse de vol plus élevée. La teneur en oxygène de la poudre affecte également de manière significative la vitesse critique des particules. Ainsi, la vitesse critique, au-dessus de laquelle le dépôt par CS se forme, est associée à diverses conditions liées aux matériaux (particules et substrat). La Figure 1.13 présente par exemple l'effet des matériaux sur la vitesse des particules. La Figure 1.13 (A) montre que les particules dendritiques peuvent atteindre des vitesses plus élevées par rapport aux particules sphériques. La Figure 1.13 (B) montre quant à elle qu'une teneur élevée en oxygène pour une poudre de cuivre engendre une vitesse critique élevée des particules, ce qui rend la poudre plus difficile à déposer ou à impacter le substrat. Enfin, la Figure 1.13 (C) montre que les vitesses d'impact des particules de trop gros diamètre et de trop forte densité ou trop petites et trop légères seront relativement faibles et que les vitesses d'impact maximales seront atteintes par des particules de taille (et de poids) optimales.

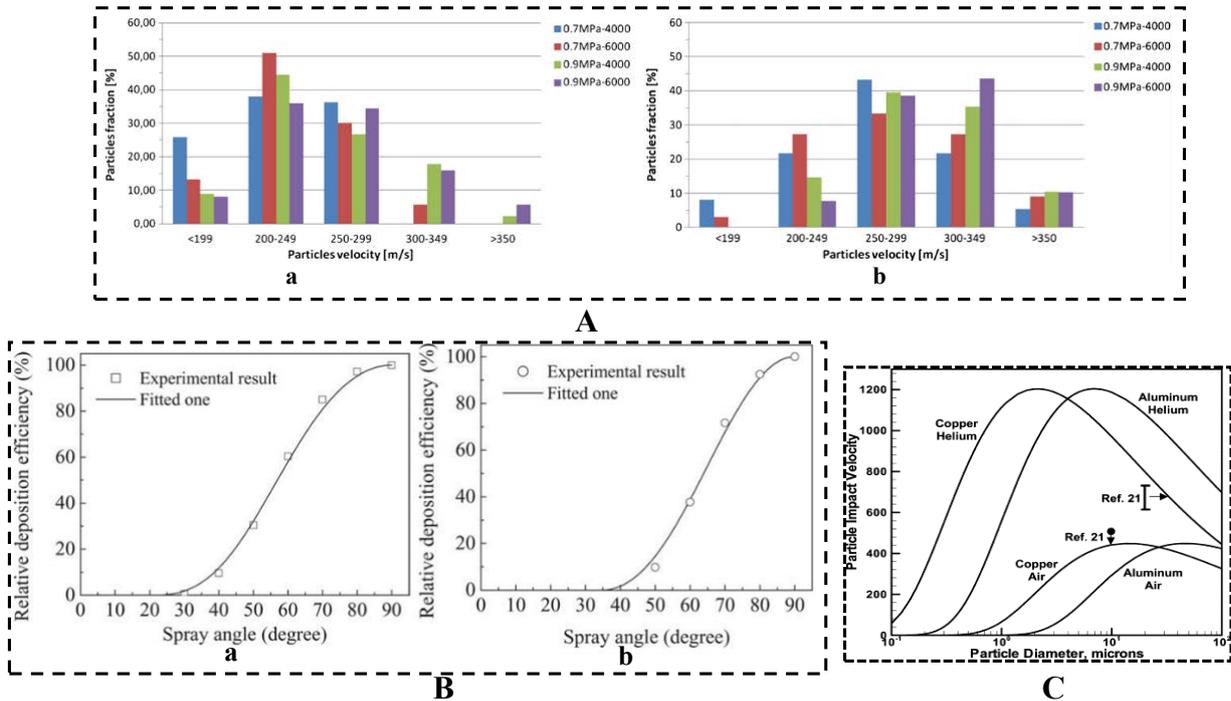


Figure 1.13 Effet de la sélection des matériaux sur les particules en vol : (A) Fraction de vitesse des particules sphériques (a) et dendritiques (b) dans le flux de projection avec différentes conditions de projection [155] ; (B) Influence de la teneur en oxygène des poudres de Cu avec : (a) 0,14 % en poids ; (b) 0,38 % en poids [153] ; (C) Effet de la taille des particules et du gaz porteur sur la vitesse d'impact des particules [154].

Ainsi, de nombreux facteurs influents peuvent être identifiés dans le processus de construction d'un revêtement par projection à froid. Sur la base des nombreux critères matériels, il en découle de nombreux paramètres importants à étudier.

1.2.4 Influence des paramètres du procédé

Dans une démarche d'optimisation, tous les paramètres influents du procédé doivent être étudiés. Pour débiter, le rendement de projection par exemple (Deposition Efficiency DE) est fonction de plusieurs facteurs, qui peuvent être divisés en deux catégories principales :

- les paramètres de projection, y compris le gaz propulseur et le gaz vecteur (type, température et pression), la poudre (matériau, taille, oxydation, température et débit) et le substrat (matériau, état de surface et température) ;
- les paramètres cinématiques, y compris la vitesse de déplacement, l'angle de projection, la distance de projection, l'étape de balayage et la trajectoire de projection, comme illustré Figure 1.14.

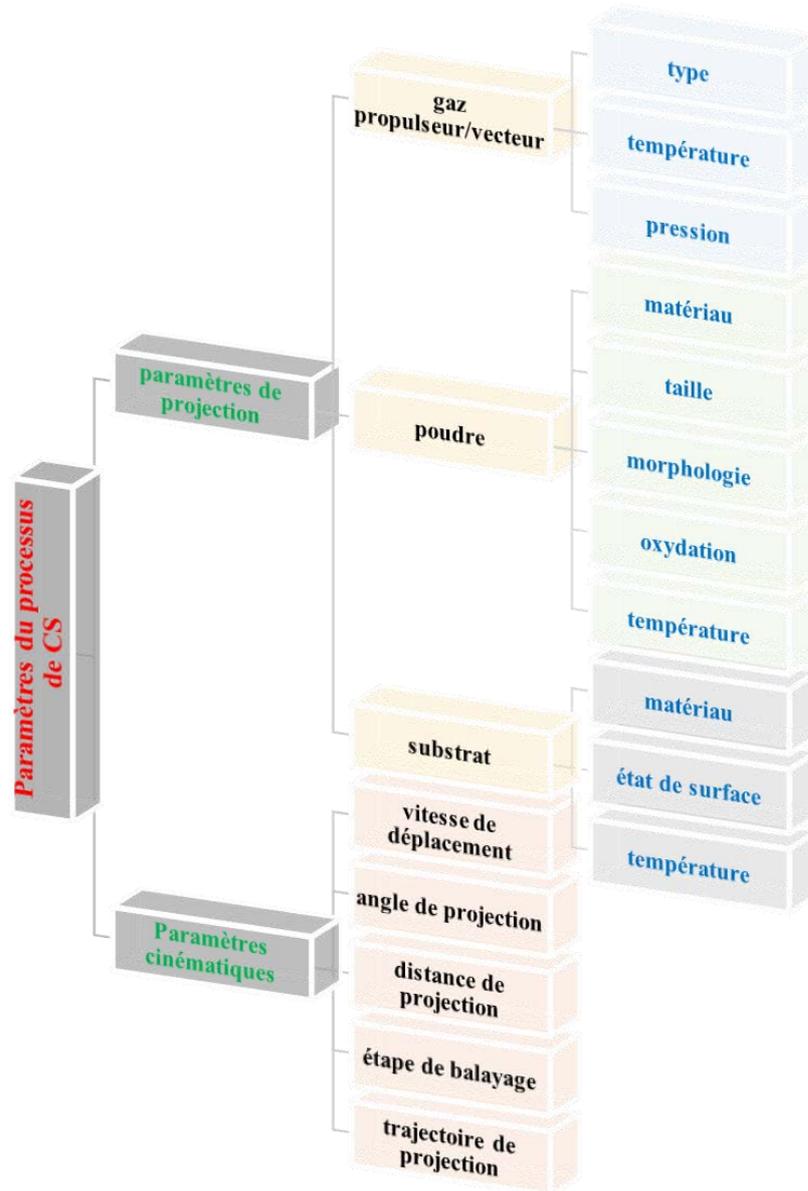


Figure 1.14 Classification des paramètres du procédé de CS.

1.2.4.1 Cas des paramètres de projection

Le gaz utilisé en projection est divisé en deux flux lors de son entrée dans le système CS. Un flux (gaz comprimé) appelé gaz propulseur passe à travers un réchauffeur de gaz, où il est chauffé à une température élevée. En même temps, le deuxième flux (gaz comprimé pour HP, gaz atmosphérique pour BP) nommé gaz porteur passe dans le doseur de poudre, où il est rempli de particules de poudre. Le gaz propulseur détermine donc directement la vitesse d'impact des particules de poudre et les propriétés des revêtements. Le gaz porteur quant à lui agit pour transporter la poudre et empêcher son oxydation dès lors que le gaz porteur utilisé est inerte (généralement de l'azote, de l'argon ou de l'hélium).

En général, les gaz propulseurs utilisés en CS peuvent être de l'air, de l'azote et/ou de l'hélium. Suivant la nature du gaz (et donc son poids moléculaire), une variation de la

température du gaz et de sa pression apparait et entraîne un changement dans le rendement de projection (Figure 1.15 (A)). Comme attendu, L'hélium est le moyen le plus efficace pour améliorer le rendement de projection, mais le coût du gaz est également beaucoup plus élevé ce qui le rend donc moins attractif. En parallèle, l'augmentation de la température du gaz semble aussi un facteur efficace, plus même que l'augmentation de la pression du gaz [146,147,156,156,157]. L'effet du gaz porteur sur l'accélération des particules et la formation du revêtement a de fait attiré l'attention croissante des chercheurs [158]. En particulier par CSHP, une différence entre la pression du gaz porteur et la pression du gaz propulseur se doit d'être supérieure à zéro pour empêcher l'accumulation de matière et le colmatage du tube d'injection de poudre par des particules. Plus la différence est grande (positive), plus la vitesse des particules est faible [151] (Figure 1.15 (B)).

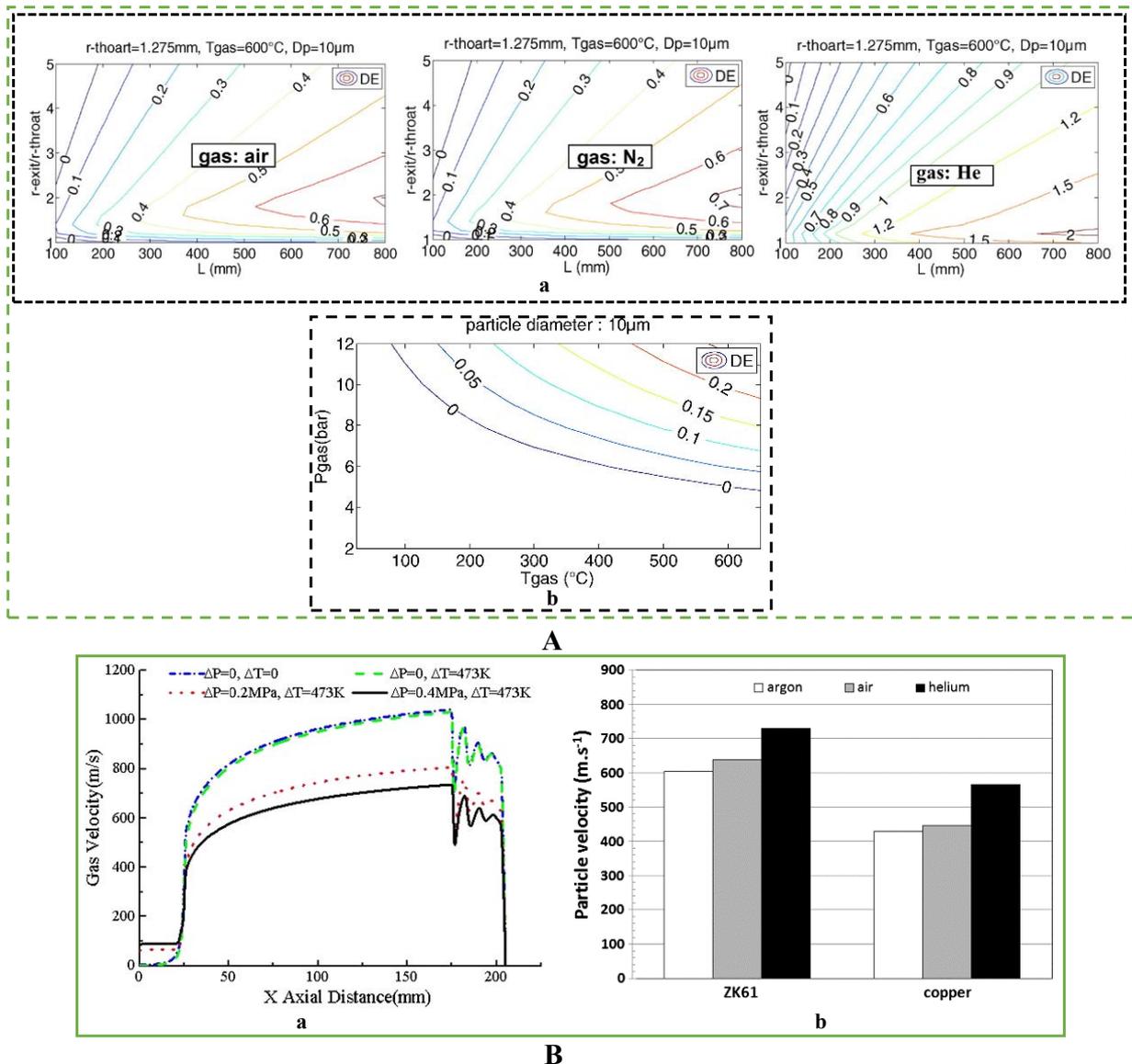


Figure 1.15 (A) Effets de la nature des gaz propulseurs (a), (b) Influence de la température et la pression des gaz sur le DE [150] ; (B) Effets des gaz porteurs sur la pression (a) [159] et sur la vitesse des particules (b) [151].

Comme évoqué préalablement, différents matériaux peuvent aussi créer une multitude d'opportunités intéressantes lorsqu'ils sont mis en forme par projection à froid. Comme le montre la Figure 1.16, la taille des particules de poudre, leur morphologie, taux d'oxydation et température influent sur la vitesse et le dépôt des particules de poudre.

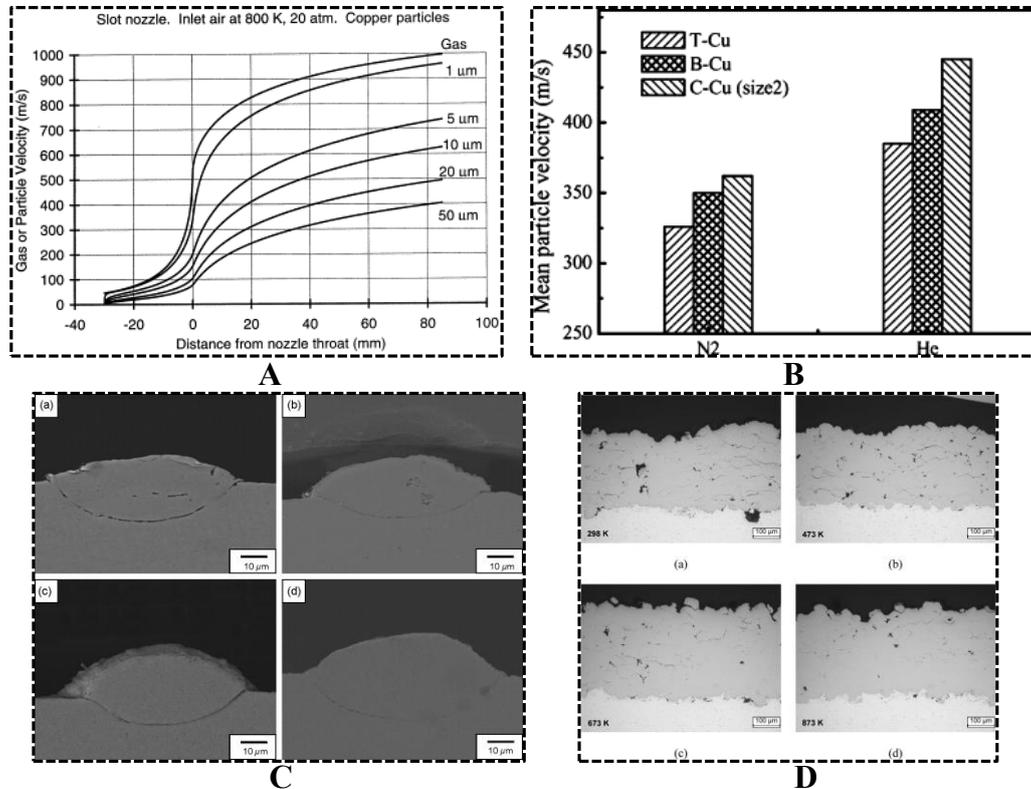


Figure 1.16 Effets de (A) la taille des particules [129] et (B) la morphologie des particules [160] sur la vitesse des particules ; (C) images en coupe transversale de particules déposées : (a) particule avec une teneur en oxygène de 0,001 % en poids, (b) 0,012 % en poids, (c) 0,023 % en poids, (d) 0,045 % en poids [161]; (D) microstructures en coupe transversale des revêtements avec la température de préchauffage des particules : (a) 298 K, (b) 473 K, (c) 673 K et (d) 873 K [162].

La taille et la morphologie des particules sont les paramètres de poudre les plus contrôlables. En général, plus la taille des particules est petite, plus il est facile d'obtenir une accélération élevée [129,146,160,163]. De même, la morphologie irrégulière des particules confère une vitesse plus importante que pour des morphologies sphériques à taille identique [160,163,164]. Le principal inconvénient dans ce cas (poudre irrégulière) devient néanmoins la porosité induite au cœur du revêtement [165].

De même, l'oxydation des particules influe fortement aussi le processus de projection. Li et al. [166] et de nombreux autres auteurs ont révélé par exemple qu'à forte teneur en oxygène, une grande partie de l'énergie cinétique d'une particule est consommée pour casser le film d'oxyde lors de l'impact [161,165,167].

Enfin, la température des particules reste aussi un facteur influent qui peut être influencée par plusieurs facteurs. Le plus simple est d'augmenter la température du gaz propulseur.

Cependant, il existe parfois des limitations physiques sur les éléments chauffants du système CS. Une autre méthode consiste alors à modifier le rapport de la poudre et du gaz porteur dès lors que le gaz vecteur est généralement à température ambiante. Cela réduit donc la température de la poudre sortant de la buse. Ainsi, l'utilisation de réchauffeurs sur les conduits d'alimentation en poudre devient donc une autre option qui chauffe le gaz porteur et ensuite les particules. Cependant, le gaz porteur chaud rend généralement les particules plus ductiles, ce qui peut entraîner potentiellement une mauvaise coulabilité de la poudre [168]. Néanmoins, le préchauffage de la poudre avant impact sur le substrat semble être une méthode envisageable [162,169,170].

Il en va de même bien entendu de la nature du substrat utilisé en CS. Après impact des particules, la liaison entre les deux matériaux (substrat-particule) se produit par ancrage mécanique et liaison métallurgique. Ce sont les spécificités des deux matériaux qui déterminent alors quel mode de liaison domine [171]. Le verrouillage mécanique se produit toujours par pénétration des particules dans les anfractuosités du substrat et ce quel que soit le couple de matériaux envisagé [171–173]. La liaison métallurgique quant à elle se produit par contact intime entre les particules et le substrat par recristallisation dynamique [174], mélange interfacial [175], dislocation accrue [176] ou amorphisation localisée [177]. Le comportement à l'impact sur le substrat varie donc en fonction des propriétés physiques et mécaniques du substrat. Comme le montre la Figure 1.13, l'état de surface et la température du substrat influent sur la force de liaison entre le revêtement et le substrat.

Pour commencer, l'état de surface initial du substrat (rugosité) a un effet important sur la force de liaison entre le revêtement et le substrat, comme le montre la Figure 1.17. Certains chercheurs pensent d'ailleurs que les revêtements construits sur des substrats lisses de polissage ou par meulage présentent des forces de liaison plus élevées que ceux construits sur des substrats sablés [178–180]. Inversement, d'autres travaux expérimentaux ont rapporté que le grenailage d'un substrat, la texturation de surface par laser entraînent une force de liaison plus élevée [181–183]. De plus, pour compléter ce critère, l'augmentation de température de la surface du substrat pendant l'étape de projection peut aussi conduire à une amélioration de l'adhérence interfaciale. De nombreux auteurs ont par exemple illustré cet effet par l'usage d'un laser de puissance (cold-spray assisté par laser LACS) [184–188].

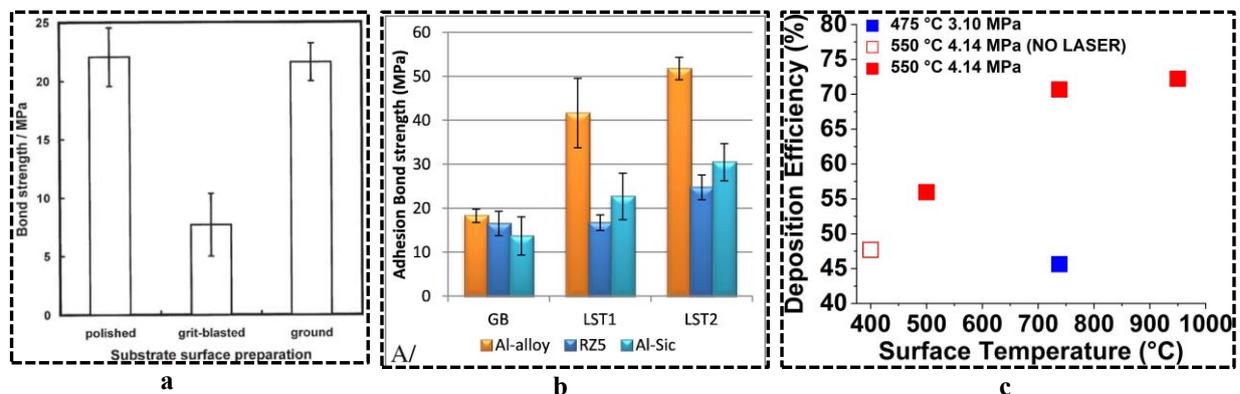


Figure 1.17 (a) Effet de l'état du substrat sur la force de liaison des dépôts de titane projetés à une pression de gaz de 29 bars [179] ; (b) Force d'adhérence en fonction de la préparation de

surface : grenailage (GB), texture 1 (LST1, grands espacements entre les trous laser) et texture 2 (LST2, petits espacements entre les trous laser) [181] ; (c) DE selon différentes conditions de gaz et températures de surface mesurées [184].

1.2.4.2 Cas des paramètres cinématiques

Dans le cas du procédé cold spray, l'épaisseur et les propriétés du revêtement dépendent largement des paramètres cinématiques en raison de la grande stabilité et de la précision de fonctionnement et de mouvement du robot [189–191]. La Figure 1.18 illustre le processus de construction d'un revêtement et les paramètres cinématiques impliqués.

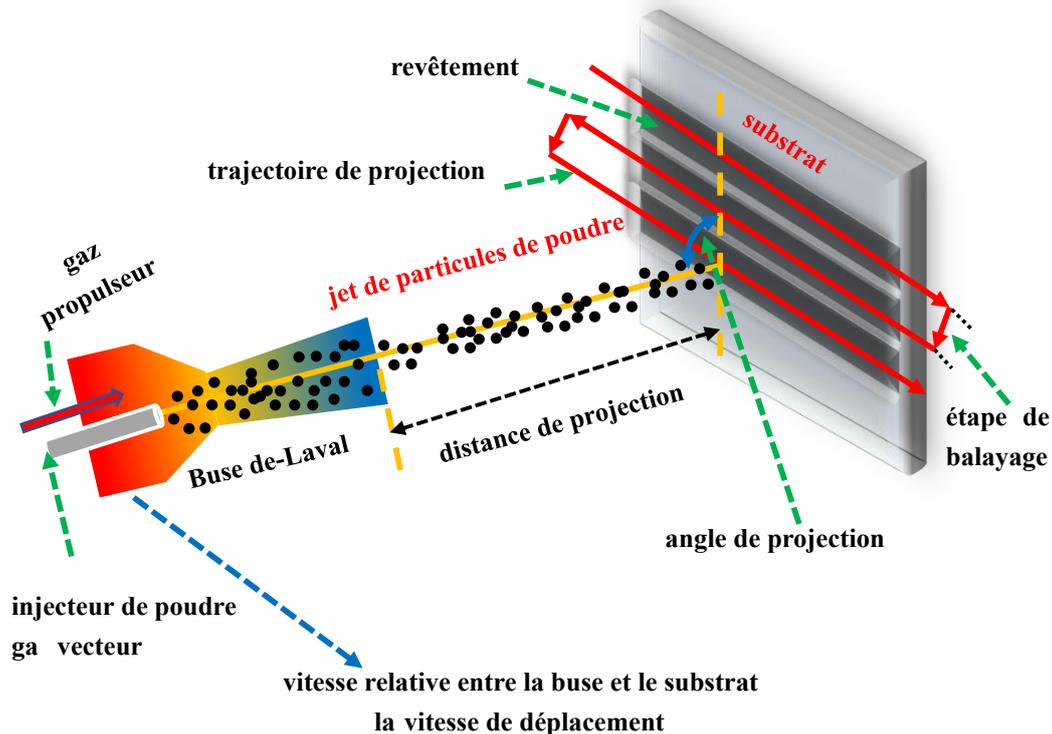


Figure 1.18 Paramètres cinématiques impliqués lors du processus CS.

La vitesse de déplacement représente la vitesse de déplacement relative entre le pistolet et le substrat généralement imposée par le mouvement du pistolet (tenu par le robot). Cependant, si le substrat est tenu par le robot, cela signifie la vitesse du substrat. Il est bien connu que l'épaisseur du revêtement diminue avec l'augmentation de la vitesse de déplacement [191–193] et peut avoir une influence sur le DE [193–195]. Pour expliquer de telles tendances, il est à noter en effet qu'avec la vitesse de balayage, le temps de séjour du gaz chaud sur le substrat par unité de longueur peut devenir plus long, ce qui peut augmenter le DE. De même, une diminution de la vitesse de déplacement améliore la fraction de particules qui impactent le substrat. Mais inversement, plus le pistolet se déplace lentement, plus l'exposition de la source de chauffage sur la même zone de la surface du substrat devient longue, ce qui peut entraîner une détérioration des matériaux en raison d'une surchauffe locale et/ou générer des contraintes résiduelles. C'est pourquoi, il est encore difficile aujourd'hui de conclure sur l'effet de la vitesse de déplacement sur le revêtement DE.

L'angle de projection quant à lui est l'angle ($\leq 90^\circ$) entre la buse et le substrat, comme

illustré Figure 1.18. En règle générale, la buse doit être maintenue perpendiculairement à la surface du substrat pour avoir un DE maximal [196–200]. Lorsque les particules sont projetées à des angles non normaux par rapport à la surface du substrat, la composante normale de la vitesse des particules diminue. Une optimisation des angles de projection par rapport à la morphologie de la pièce à revêtir s'impose donc [201]. Il a été reconnu par exemple qu'il existe trois plages d'angles typiques lors de la construction du revêtement : la plage d'angles maximale (80°-90°), la plage d'angles transitoire (50°-80°) et la plage d'angles inefficace (<50°) [202].

D'un point de vue distance de projection, on note aussi comme facteur influent la distance entre la buse et la surface du substrat. Il détermine le temps pendant lequel les particules sont affectées par le courant gazeux et la mesure dans laquelle le courant gazeux interagit avec le substrat. Durant cette trajectoire, les particules se déplaçant le long de l'axe du jet à l'intérieur de la buse sont accélérées selon la loi du mouvement de Newton et chauffées par transfert de chaleur par convection. Deux régions de vitesse ont pu être identifiées en sortie de buse : initiale et principale [203,204]. Dans la région initiale, juste au-delà du bord de la tuyère, la vitesse du flux d'air est conservée tandis que dans la région principale, la vitesse médiane de l'air chute brusquement. À ce stade, la vitesse des particules dépasse la vitesse du flux d'air, provoquant une décélération des particules. Dans ces conditions, il a été relevé que le rendement peut augmenter lorsque la distance de projection augmente [205]. Néanmoins, lorsque la distance de projection dépasse un certain point, le rendement diminue. En effet, lorsque la buse est proche de la surface, les chocs existant sur le substrat sont forts. L'onde de choc à proximité du substrat empêche donc les particules de plus petite taille de pénétrer et de participer à la construction du revêtement. C'est pourquoi, la distance de projection doit augmenter jusqu'à une valeur optimale de façon à permettre aux petites particules d'atteindre une vitesse suffisante. Néanmoins, au fur et à mesure que la distance de projection augmente, le rendement diminue car les particules n'ont plus alors assez d'énergie cinétique pour adhérer à la surface comme ce fût démontré par de nombreuses études [190,193,206]. Cependant, il a été constaté dans d'autres études que le rendement d'une poudre de moindre densité (Al, Ti) diminuait aussi systématiquement avec l'augmentation de la distance de projection par rapport à celui d'une poudre de Cu [129,206,207]. On peut donc attribuer le fait que ces différences sont causées par les différents comportements d'accélération et la vitesse critique des différentes poudres.

L'étape de balayage fait ensuite référence à l'intervalle imposé entre deux balayages de torche comme illustré Figure 1.18. On peut remarquer que l'épaisseur du revêtement et la planéité de la surface dépendent justement de cette étape de balayage [208] notamment pour la constitution d'un dépôt de fabrication additive par cold spray, qui s'obtient par un balayage sur toute la surface cible ligne par ligne et couche par couche selon une trajectoire prédéfinie. En d'autres termes, le dépôt est produit par l'empilement de nombreux cordons de matière.

En règle générale, l'optimisation du pas de balayage dépend de la largeur d'un cordon, qui dépend de la taille de la sortie de la buse, de la distance de projection et de l'angle de projection [193]. Selon certains, l'étape de balayage est toujours définie comme un tiers de la largeur d'une seule piste pour assurer la planéité de la surface du revêtement [209].

Ainsi, la trajectoire de projection se définit comme la trajectoire que le pistolet ou le

substrat (tenu par le robot) effectuée pendant le processus CS. Le principe de base de la définition de la trajectoire est de s'assurer que la forme et les propriétés souhaitées des revêtements sont obtenues. En général, un simple aller-retour est toujours adopté lors de la projection sur des substrats plats. Pour compléter une telle approche, 3 autres trajectoires de projection ont aussi été suggérées comme : un motif croisé, un motif parallèle et un motif en spirale [210]. Les résultats ont montré que la trajectoire de projection pouvait entraîner une différence de microstructure et de propriétés mécaniques des revêtements ce qui justifie alors de nombreuses études. Ainsi, comme l'illustre la Figure 1.19, les effets des différents paramètres cinématiques sur les revêtements peuvent être relevés.

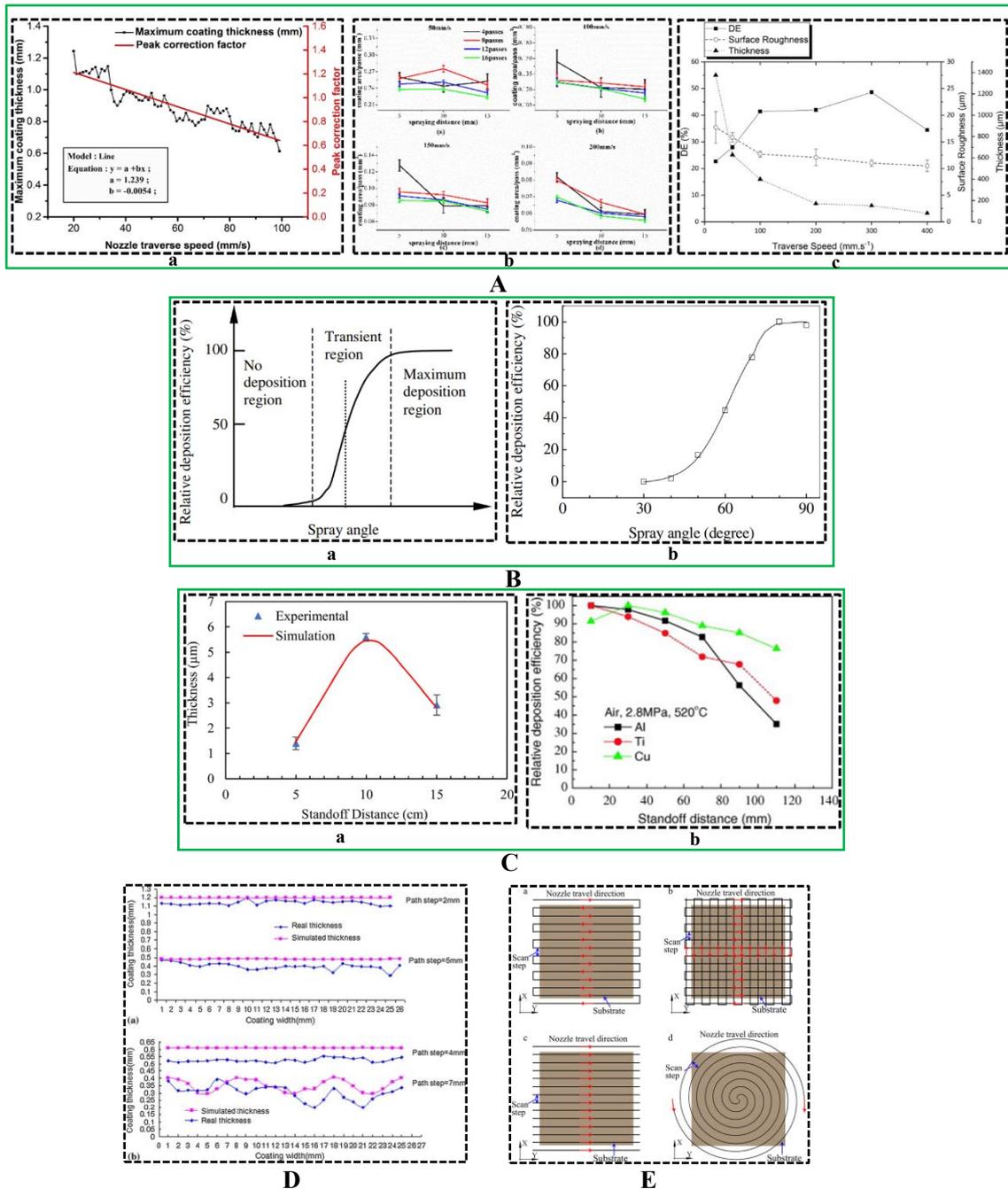


Figure 1.19 (A) Effet de la vitesse de déplacement sur le rendement du revêtement : (a) effet

non pertinent [193], (b) corrélation négative [211], (c) corrélation positive [212] ; (B) Effet de l'angle de projection sur le DE du revêtement [202] ; (C) Effet de la distance de projection [205] ; (D) Effet de l'étape de balayage sur l'uniformité du revêtement [206,209] ; (E) quatre trajectoires de projection typiques : (a) motif en zigzag, (b) motif en croix, (c) motif parallèle, (d) motif en spirale [210].

Ainsi il semble clair que les paramètres du processus présentent une influence certaine sur la formation du revêtement. Quel que soit l'application retenue cold spray, des paramètres précis et stables se doivent d'être définis pour obtenir des dépôts de haute qualité et de surcroît pour des applications en fabrication additive.

1.2.5 La fabrication additive par cold-spray

Comme indiqué précédemment, la technologie cold spray a montré un grand potentiel dans la fabrication additive compte tenu des multiples formes pouvant être envisagées, des rendements considérables atteints comme du maintien de la santé structurale et chimique des matériaux. Une variété de composants a d'ores et déjà été fabriquée ou réparée par fabrication additive par cold-spray au cours des dernières années [213–216].

En tant que nouveau membre de la famille de la fabrication additive, la fabrication additive par cold spray (FACS) présente tous les avantages de la technologie de cold spray. Par rapport aux autres procédés de fabrication additive, les avantages les plus importants sont : des temps de production plus courts, une taille de produit illimitée, une grande flexibilité et une aptitude à la réparation de composants endommagés. De plus, la FACS est particulièrement adaptée aux métaux à haute réflectivité tels que le cuivre et l'aluminium, qui sont très difficiles à fabriquer à l'aide des procédés de fabrication additive conventionnels comme par laser. Cependant, il existe aujourd'hui divers exemples d'applications de la FACS comme le montre la Figure 1.6 pour des pièces de géométrie simple ou à symétrie de rotation. Pour la fabrication de parois intérieures, le procédé de fabrication varie en fonction du diamètre recherché. Si le diamètre est suffisamment grand, le processus de fabrication est le même que celui utilisé pour la fabrication de parois extérieures. En revanche, pour une paroi interne de plus petit diamètre, la buse doit être légèrement inclinée pour s'adapter à un espace limité ou utiliser une micro-buse [119,217,218]. De plus, compte tenu du mode de fabrication par parois verticales, au fur et à mesure que les particules de poudre s'accumulent, le profil final du dépôt tend à se triangulariser avec une perte de bord. C'est pourquoi une technique de tessellation triangulaire pour créer une paroi verticale a été proposée [213], comme le montre la Figure 1.20 (a). Cependant, un dépôt en forme de triangle engendre de faibles rendements de projection. Pour ce faire, une stratégie de construction couche par couche pour la formation de formes 3D a donc été proposée [208], comme le montre la Figure 1.20 (b). Les résultats de la simulation et des expériences ont vérifié la fiabilité et la précision de la stratégie mais ne s'appliquent pas aux pièces plusieurs caractéristiques de forme et de formes complexes. Ainsi, une méthode combinant l'optimisation de la topologie et la fabrication additive pour concevoir et fabriquer des composants structurels complexes est donc proposée, comme le montre la Figure 1.20 (c). Cependant, pour fabriquer ce composant, un substrat spécial doit être conçu, ce qui augmente considérablement la complexité du processus.

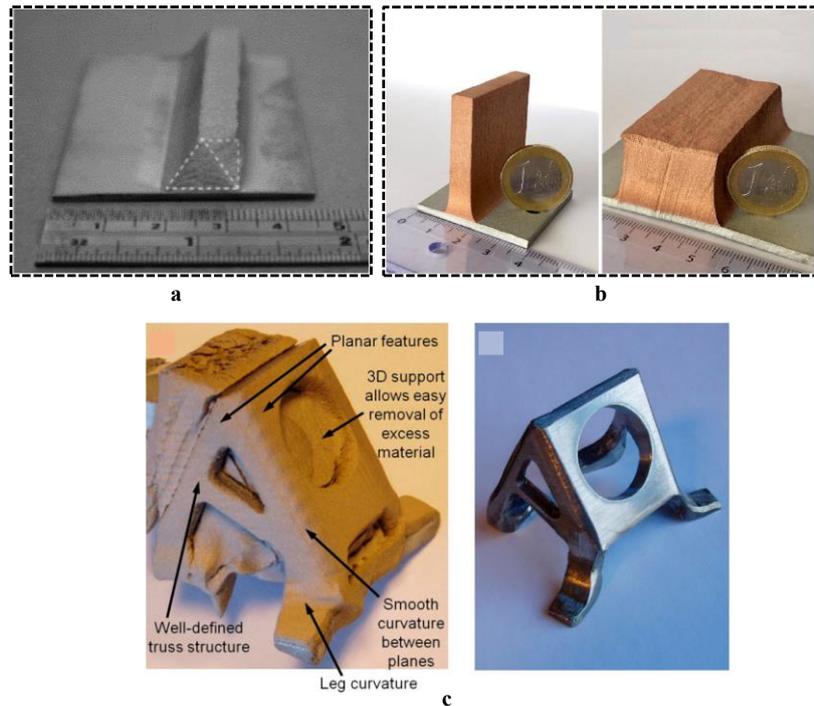


Figure 1.20 Fabrication additive par cold spray de pièces non rotatives : (a) stratégie de fabrication additive par tessellation triangulaire [213] ; (b) parois droites déposées couche par couche [208] ; (c) fabrication de pièces à structure complexe à base de substrats spécialement fabriqués [219].

Ainsi, les composants fabriqués sont de faible résolution et nécessitent souvent des processus d'usinage post-traitement. En particulier pour la fabrication de certains composants de grande taille ou à structure complexe, la manipulation manuelle est difficile pour garantir les exigences prédéfinies. C'est pourquoi, en raison du degré élevé de liberté et de précision de contrôle des robots industriels, l'utilisation de tels outils peut permettre une planification précise des trajectoires et venir compléter ainsi la fabrication de pièces aux formes complexes. De même, le couplage mutuel et la coopération de plusieurs robots peuvent aussi ajuster la forme de la pièce en temps réel et post-traiter la pièce après sa fabrication. L'assistance robotisée garantit donc non seulement la qualité du dépôt, mais fournit également un environnement d'exploitation sûr et inoffensif pour l'opérateur ce qui laisse envisager alors toute une nouvelle gamme de fabrications.

1.3 La technologie de fabrication robotique

De nos jours, le processus de fabrication nécessite une plus grande efficacité de production, une meilleure qualité des produits et une plus grande satisfaction des clients. Les technologies de la quatrième révolution industrielle (Industrie 4.0), y compris les systèmes physiques de réseaux, les systèmes cloud, la réalité augmentée et la simulation, l'internet des objets et la robotique, rendent alors les processus de fabrication plus intelligents [220]. Dans le processus de vulgarisation de l'Industrie 4.0, l'amélioration technique du niveau d'automatisation et de la productivité du système est extrêmement importante. Ce progrès technique passe bien

évidemment par l'utilisation de robots industriels qui améliorent l'efficacité de la production [221].

1.3.1 Programmation robotique

À l'ère de la mondialisation, les industries manufacturières sont confrontées à une dynamique croissante d'innovations, à des cycles de vie des produits raccourcis et à une diversification continue de la gamme de produits à considérer tout en préservant les matières premières. C'est pourquoi, l'introduction des robots industriels peut apparaître comme une solution efficace. Par exemple, la programmation manuelle d'un système de soudage à l'arc robotisé pour la fabrication d'une grande coque de véhicule prend plus de huit mois, alors que le temps de cycle du processus de soudage lui-même n'est que de 16 h. Dans ce cas, le temps de programmation est d'environ 360 fois le temps d'exécution ce qui démontre alors toute l'importance des études en programmation robotique. Pour ce faire, il existe deux grandes catégories de méthodes de programmation robotique, à savoir la programmation en ligne et la programmation hors ligne.

1.3.1.1 La programmation en ligne

La programmation en ligne consiste à guider le robot à travers les chemins souhaités, généralement via un opérateur qualifié utilisant un dispositif d'apprentissage (teach-pendant). Généralement, les étapes de programmation sont les suivantes :

- définition de la trajectoire,
- instructions des mouvements.

La méthode de programmation en ligne est largement utilisée en raison de sa simplicité d'utilisation mais elle présente certains inconvénients. En effet, l'utilisation d'un dispositif d'apprentissage pour déplacer le robot jusqu'au point de trajectoire souhaité n'est pas intuitive car l'opérateur doit surveiller le robot en temps réel, ce qui l'expose également à un environnement dangereux. De plus, les trajectoires générées par la programmation en ligne manquent de flexibilité et doivent être répétées autant de fois qu'il y a des trajectoires différentes.

Pour remédier à de telles contraintes, plusieurs auteurs ont fait quelques suggestions. Sugita et al. [222] ont par exemple développé un dispositif d'aide à l'enseignement de type bras, qui a montré une capacité de précision suffisante. Choi et al. [223] ont développé aussi un capteur de force/moment qui peut être utilisé dans l'apprentissage intuitif d'un robot à six axes. Nicholson et al. [224] ont développé quant à eux une méthode de programmation rapide utilisant des données d'image pour les travaux de réparation de soudure.

Bien que de grands progrès aient été réalisés pour rendre la programmation en ligne plus intuitive, moins dépendante de l'opérateur et plus automatisée, la plupart des résultats de recherche restent néanmoins uniquement destinés à l'enseignement et non à un usage commercial. C'est pourquoi, une autre méthode peut être appréhendée.

1.3.1.2 La programmation hors ligne

La programmation hors ligne (OLP) est une technique de génération de programmation automatique qui n'utilise pas de robot réel [225]. Les méthodes OLP peuvent généralement être divisées en deux catégories basées sur la CAO ou sur la vision [226].

L'OLP basée sur la CAO fait référence à la génération de programmes robots basés sur le

modèle CAO de la pièce et il existe pour cela deux méthodes. Le premier type fait référence à l'adoption des logiciels OLP commerciaux (par exemple, ABB RobotStudio et KUKA.Sim) où le programme du robot peut être généré automatiquement ou manuellement en important le modèle CAO de la pièce. De plus, cet OLP basé sur la CAO permet aux utilisateurs de simuler et de détecter la trajectoire prévue et d'estimer le temps nécessaire au robot pour fonctionner. Cependant, ces logiciels nécessitent souvent que les utilisateurs aient des compétences en programmation. Bien que très chère [227], cette méthode qui utilise des logiciels CAO commerciaux [228] ou développe une plate-forme logicielle pour extraire des informations géométriques du modèle CAO d'une pièce [356], convertit les informations en commandes robot [229].

Inversement, les approches OLP basées sur la vision utilisent différents types de capteurs de vision pour capturer les caractéristiques géométriques des pièces et générer ainsi les programmes dédiés [230–232]. Moins consommateur de temps pour créer un modèle CAO de la pièce, l'OLP basé sur la vision reste néanmoins très sensible à la résolution de l'image c'est pourquoi la première méthode basée sur la CAO peut être une meilleure option, en particulier pour les pièces à structure complexe. A ce titre, la Figure 1.21 montre par exemple une méthode OLP hybride, intégrant les deux méthodes basées sur la CAO et la vision pour surmonter les limites des techniques actuelles de génération automatique de programmes [233].

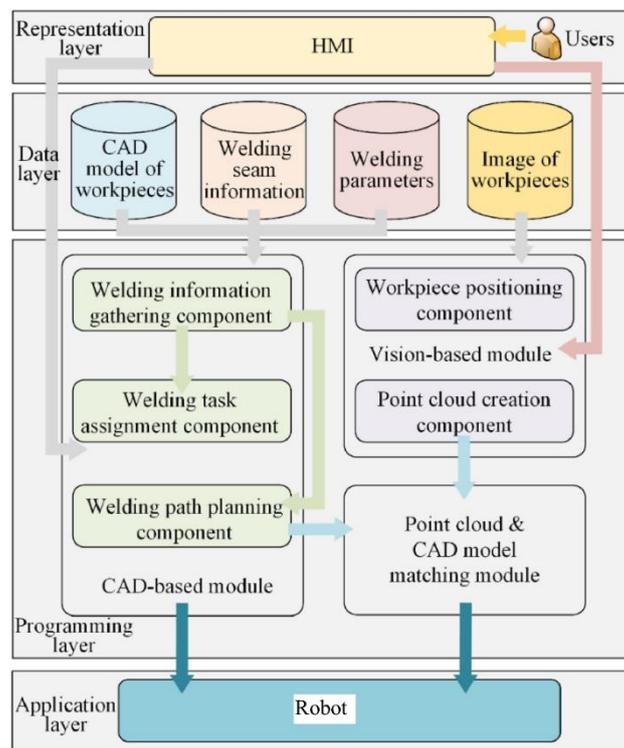


Figure 1.21 Architecture de la plateforme de programmation hors ligne hybride [233].

Ainsi, sur la base d'une telle méthode de programmation hors ligne, la planification des trajectoires de projection complexes peut être réalisée.

1.3.2 Application à la fabrication additive assistée par robot

L'application d'un robot dans la fabrication additive présente de nombreux avantages d'un

point de vue industriel :

- il augmente la flexibilité du système pour produire des pièces complexes basées sur les caractéristiques des axes multiples,
- il aide à accélérer le processus en créant des pièces compliquées plus facilement, avec une meilleure précision, plus adaptée aux nouvelles conceptions [234–238].

La fabrication hybride [239] est une terminologie utilisée pour la combinaison de la fabrication additive et soustractive. La fabrication additive est une technologie de fabrication couche par couche qui produit des composants sans gaspiller de matière. Cependant, les exigences de haute précision et de tolérances strictes ne sont souvent pas atteintes avec une telle méthode. À l'inverse, se présente la fabrication soustractive, une technologie qui produit le composant final en éliminant les copeaux de matières premières tout en préservant les propriétés d'origine. C'est pourquoi aujourd'hui, la fabrication hybride qui combine les avantages de ces deux technologies de fabrication a attiré l'attention de nombreux chercheurs. Comme le montre la Figure 1.22, la fabrication additive peut créer des pièces originales avec des caractéristiques géométriques et dimensionnelles proches de la forme initiale, et les opérations de fabrication soustractives ultérieures peuvent être utilisées pour affiner les précisions dimensionnelles et de finition de surface souhaitées. Cependant, la méthode de fabrication hybride n'est pas réalisable pour la technologie du lit de poudre car elle endommage la poudre non traitée et rend les couches suivantes impossibles. De plus, certaines technologies de fabrication additive telles que l'EBM fonctionnent dans des conditions de vide poussé, ce qui la rend donc inappropriée. Ainsi, il existe un réel besoin pour développer une nouvelle méthode de fabrication hybride. Pour ce faire, la Figure 1.23 illustre par exemple différentes méthodes de fabrication additive basées sur l'assistance d'un robot. On distingue le processus de fabrication additive à l'arc effectué par robot manipulateur (ABB IRB 1660ID) avec une torche de soudage (Fronius WF 60i Robacta Drive) (Figure 1.23 (a)) ou encore un processus de dépôt direct de métal par laser assisté par robot 8 axes (Figure 1.23 (b)). Avec la méthode LOM (Laminated Object Manufacturing), la matière déposée à partir d'un rouleau continu est découpée en couches par laser, comme illustré à la Figure 1.23 (c). La Figure 1.23 (d) montre quant à elle l'application d'un système de fabrication additive mobile qui offre une évolutivité aux processus de fabrication additive. Parmi ces dernières, avec l'aide du procédé Cold-Spray, les paramètres du processus et la planification des trajectoires peuvent être contrôlés avec précision pour obtenir des pièces avec la forme et les propriétés souhaitées.

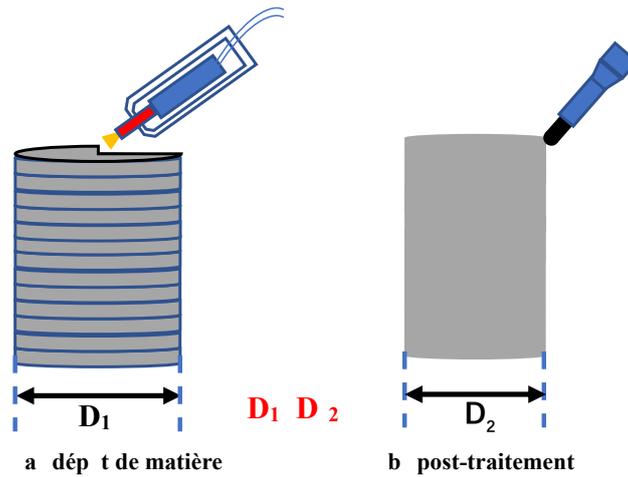


Figure 1.22 Schémas de fabrication hybride.

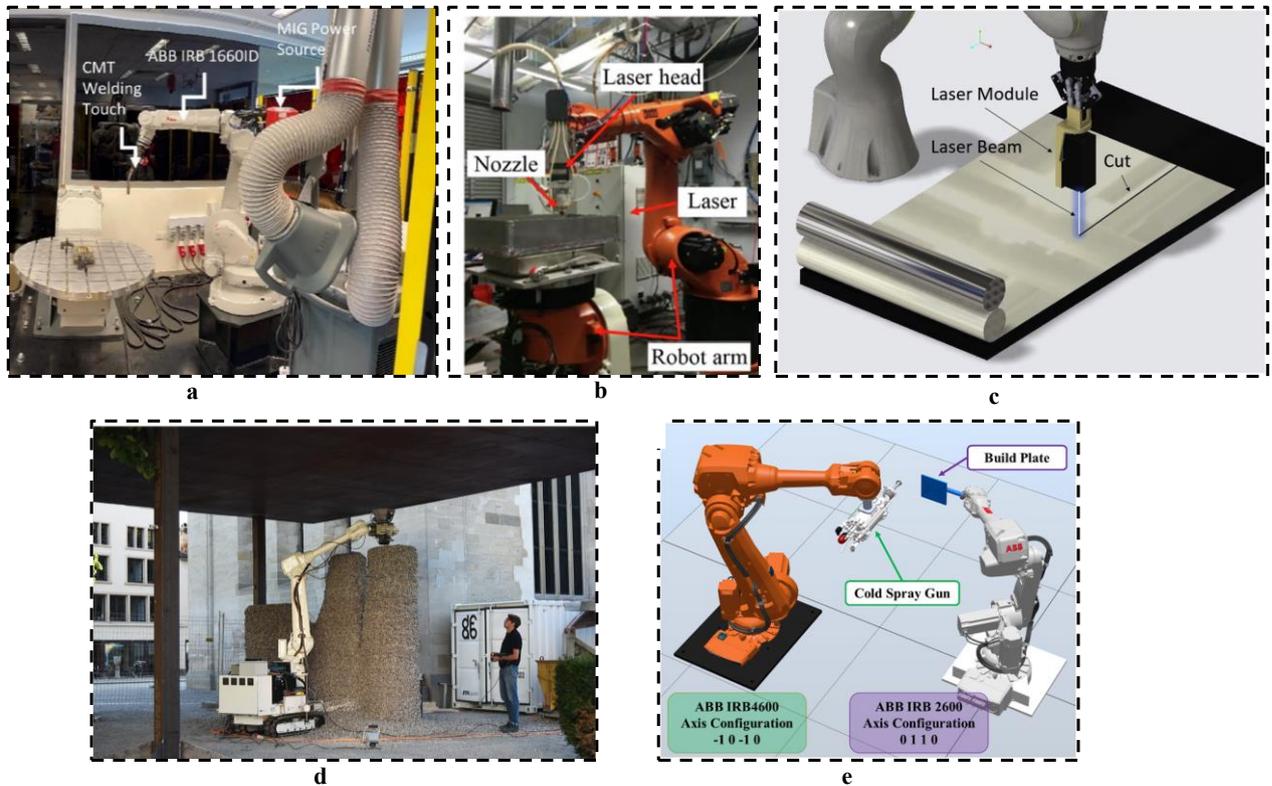


Figure 1.23 Technologie de fabrication additive assistée par robot : (a) fil arc [240] ; (b) dépôt direct de métal par laser [241] ; (c) laminage de feuilles [242] ; (d) béton architectural [243] ;(e) cold spray [244].

Cependant, dans le domaine de la fabrication additive par cold spray, il n'existe actuellement aucune méthode de planification de trajectoire de projection efficace pour des pièces à structure complexe, en particulier des pièces à plusieurs caractéristiques de forme. C'est justement tout l'intérêt de ce travail de thèse.

1.4 Conclusions et objectifs

Le cold-spray est une technique de projection de matériaux à l'état solide nouvellement développée. Appliqué à une large gamme de matériaux dont les matériaux métalliques (métaux et alliages conventionnels, alliages à haute entropie, etc.), le dépôt se construit sur la base de liaisons métallurgiques locales tant au niveau du substrat qu'au sein du revêtement dès lors qu'une vitesse critique des particules est assurée par les conditions de mise en œuvre. Cependant, le mécanisme de construction est toujours controversé. Selon certains, une liaison réussie des particules impactantes nécessite une déformation localisée et une instabilité de cisaillement adiabatique (ASI). Inversement, il est avancé qu'une plasticité hydrodynamique, causée par l'interaction de fortes ondes de pression avec la surface libre au niveau des bords des particules, affecte la liaison plutôt que l'ASI. Contrairement au procédé de projection thermique où divers phénomènes défavorables peuvent voir le jour (oxydation, transformation de phase), le CS permet cependant de s'affranchir de tous ces points potentiellement bloquant par limitation déjà des flux thermiques et autres transformations induites.

C'est précisément pour ces nombreuses raisons donc que le CS a justement été développé avec succès en tant que technologie de FA pour restaurer les composants endommagés et fabriquer de nouveaux composants. Comparativement aux autres technologies de fabrication additive basées sur la fusion telles que la fusion laser sélective (SLM), la fusion par faisceau d'électrons (EBM) et la fabrication additive à l'arc (AAM), la fabrication additive par cold-spray (FACS) a ses propres avantages (aucun changement des propriétés de la matière première, taille de produit illimitée, grande flexibilité). Cependant, les processus de fabrication d'aujourd'hui exigent une productivité plus élevée, une meilleure qualité des produits et une plus grande satisfaction des clients. L'application de robots industriels a donc pour ce faire considérablement amélioré le niveau de fiabilité du processus de fabrication. En particulier, la technologie de programmation hors ligne réduit considérablement la participation humaine aux opérations de production et améliore l'efficacité de la production. Appliqué à la Fabrication Additive par Cold-Spray, l'usage d'un robot permet déjà de contrôler précisément tous les paramètres influents de l'étape de projection (cinématiques, distance de projection, angle de projection, vitesse du pistolet, ...). De plus, les dépôts fabriqués par CS ne permettent pas de garantir les aspects dimensionnels (en particulier sur les bords) ce qui nécessite généralement des compensations. C'est pourquoi, les paramètres de compensation tels que la distance de décalage, l'angle de déviation du pistolet de projection (ou de la pièce tenue par un robot) et la distance de recul deviennent aussi très importants. Il peut être néanmoins difficile de déterminer ces paramètres sur la base de la méthode conventionnelle d'essais et d'erreurs, qui est longue et coûteuse. De nombreux développements en modélisation et simulation numérique restent alors encore nécessaires pour appliquer le CS dans le domaine FA. De plus, la plupart des applications FACS impliquent le développement de pièces toujours plus compliquées. Contrairement à certaines autres technologies FA, l'alimentation en poudre reste aussi constante tout au long de la fabrication, ce qui nécessite alors aujourd'hui le développement d'une méthodologie efficace de planification et de génération de trajectoire de projection spécifique au processus.

Dans ce contexte, le travail principal de cette thèse est de développer un concept modulaire de système de fabrication additive par cold spray comprenant une partie matérielle et une partie logicielle pour le composant à structure complexe. L'objectif est d'atteindre véritablement la liberté de conception attendue par FACS, en particulier pour traiter la manière dont des objets 3D spécifiques peuvent être fabriqués. Par conséquent, plusieurs étapes se doivent d'être développées et constituent justement le déroulé de cette étude. Le deuxième chapitre propose par exemple le concept modulaire intégré du système de fabrication additive par cold spray et le présente en détail. Ensuite, sur la base d'un protocole d'expériences (troisième chapitre), la modélisation et simulation numérique du dépôt de matière (quatrième chapitre) permet alors la planification et génération des trajectoires de projection (cinquième chapitre).

Références

- [1] H. Kodama, Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer, *Review of Scientific Instruments*. 52 (1981) 1770–1773. <https://doi.org/10.1063/1.1136492>.
- [2] C. Barnatt, 3D printing: the next industrial revolution, *ExplainingTheFuture.com*, Nottingham, England?, 2013.
- [3] S.C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, R. Mülhaupt, Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing, *Chem. Rev.* 117 (2017) 10212–10290. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00074>.
- [4] M. Layani, X. Wang, S. Magdassi, Novel Materials for 3D Printing by Photopolymerization, *Advanced Materials*. 30 (2018) 1706344. <https://doi.org/10.1002/adma.201706344>.
- [5] A.R.C. Santos, H.A. Almeida, P.J. Bártolo, Additive manufacturing techniques for scaffold-based cartilage tissue engineering, *Null*. 8 (2013) 175–186. <https://doi.org/10.1080/17452759.2013.838825>.
- [6] J.J. Lewandowski, M. Seifi, Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties, *Annual Review of Materials Research*. 46 (2016) 151–186. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070115-032024>.
- [7] Y. Lakhdar, C. Tuck, J. Binner, A. Terry, R. Goodridge, Additive manufacturing of advanced ceramic materials, *Progress in Materials Science*. 116 (2021) 100736. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100736>.
- [8] J. Sun, D. Ye, J. Zou, X. Chen, Y. Wang, J. Yuan, H. Liang, H. Qu, J. Binner, J. Bai, A review on additive manufacturing of ceramic matrix composites, *Journal of Materials Science & Technology*. (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.06.039>.
- [9] D. Han, H. Lee, Recent advances in multi-material additive manufacturing: methods and applications, *Current Opinion in Chemical Engineering*. 28 (2020) 158–166. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.03.004>.
- [10] Y. Wang, S. Konovalov, X. Chen, R.A. Singh, S. Jayalakshmi, Research on plasma arc additive manufacturing of Inconel 625 Ni–Cu functionally graded materials, *Materials Science and Engineering: A*. 853 (2022) 143796. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143796>.
- [11] V. Boggarapu, R. Gujjala, S. Ojha, S. Acharya, P. Venkateswara babu, S. Chowdary, D. kumar Gara, State of the art in functionally graded materials, *Composite Structures*. 262 (2021) 113596. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113596>.
- [12] N. Shehata, M.A. Abdelkareem, E.T. Sayed, D.E. Egirani, A.W. Opukumo, Smart Materials: The Next Generation, in: A.-G. Olabi (Ed.), *Encyclopedia of Smart Materials*, Elsevier, Oxford, 2022: pp. 288–299. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815732-9.00062-0>.
- [13] K. Sagdic, I. Eş, M. Sitti, F. Inci, Smart materials: rational design in biosystems via artificial intelligence, *Trends in Biotechnology*. 40 (2022) 987–1003. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2022.01.005>.
- [14] M. Ammar, A. Haleem, M. Javaid, S. Bahl, S.B. Garg, A. Shamoan, J. Garg, Significant applications of smart materials and Internet of Things (IoT) in the automotive industry, *Materials Today: Proceedings*. (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.180>.
- [15] J.H. Martin, B.D. Yahata, J.M. Hundley, J.A. Mayer, T.A. Schaedler, T.M. Pollock, 3D printing of

- high-strength aluminium alloys, *Nature*. 549 (2017) 365–369. <https://doi.org/10.1038/nature23894>.
- [16] P. Kürnstener, M.B. Wilms, A. Weisheit, B. Gault, E.A. Jäggle, D. Raabe, High-strength Damascus steel by additive manufacturing, *Nature*. 582 (2020) 515–519. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2409-3>.
- [17] T. Zhang, Z. Huang, T. Yang, H. Kong, J. Luan, A. Wang, D. Wang, W. Kuo, Y. Wang, C.-T. Liu, In situ design of advanced titanium alloy with concentration modulations by additive manufacturing, *Science*. 374 (2021) 478–482. <https://doi.org/10.1126/science.abj3770>.
- [18] J.S. Mohammed, Applications of 3D printing technologies in oceanography, *Methods in Oceanography*. 17 (2016) 97–117. <https://doi.org/10.1016/j.mio.2016.08.001>.
- [19] M. Meng, J. Wang, T. Sun, W. Zhang, J. Zhang, L. Shu, Z. Li, Clinical applications and prospects of 3D printing guide templates in orthopaedics, *Journal of Orthopaedic Translation*. 34 (2022) 22–41. <https://doi.org/10.1016/j.jot.2022.03.001>.
- [20] M.R. Nichols, How does the automotive industry benefit from 3D metal printing?, *Metal Powder Report*. 74 (2019) 257–258. <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2019.07.002>.
- [21] V. Mohanavel, K.S. Ashraff Ali, K. Ranganathan, J. Allen Jeffrey, M.M. Ravikumar, S. Rajkumar, The roles and applications of additive manufacturing in the aerospace and automobile sector, *Materials Today: Proceedings*. 47 (2021) 405–409. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.596>.
- [22] B.C. Gross, J.L. Erkal, S.Y. Lockwood, C. Chen, D.M. Spence, Evaluation of 3D Printing and Its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Sciences, *Anal. Chem*. 86 (2014) 3240–3253. <https://doi.org/10.1021/ac403397r>.
- [23] J. Huang, Q. Qin, C. Wen, Z. Chen, K. Huang, X. Fang, J. Wang, A dynamic slicing algorithm for conformal additive manufacturing, *Additive Manufacturing*. 51 (2022) 102622. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102622>.
- [24] K. Kuzmenko, N. Ducoulombier, A. Feraille, N. Roussel, Environmental impact of extrusion-based additive manufacturing: generic model, power measurements and influence of printing resolution, *Cement and Concrete Research*. 157 (2022) 106807. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106807>.
- [25] M. Ziaee, N.B. Crane, Binder jetting: A review of process, materials, and methods, *Additive Manufacturing*. 28 (2019) 781–801. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.031>.
- [26] M.P. Serdeczny, R. Comminal, D.B. Pedersen, J. Spangenberg, Experimental validation of a numerical model for the strand shape in material extrusion additive manufacturing, *Additive Manufacturing*. 24 (2018) 145–153. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.09.022>.
- [27] M. Ansari, E. Jabari, E. Toyserkani, Opportunities and challenges in additive manufacturing of functionally graded metallic materials via powder-fed laser directed energy deposition: A review, *Journal of Materials Processing Technology*. 294 (2021) 117117. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117117>.
- [28] A. Nouri, A. Rohani Shirvan, Y. Li, C. Wen, Additive manufacturing of metallic and polymeric load-bearing biomaterials using laser powder bed fusion: A review, *Journal of Materials Science & Technology*. 94 (2021) 196–215. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.03.058>.
- [29] S. Barui, S. Mandal, B. Basu, Thermal inkjet 3D powder printing of metals and alloys: Current status and challenges, *Current Opinion in Biomedical Engineering*. 2 (2017) 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2017.05.010>.

- [30] B. Dermeik, N. Travitzky, Laminated Object Manufacturing of Ceramic-Based Materials, *Advanced Engineering Materials*. 22 (2020) 2000256. <https://doi.org/10.1002/adem.202000256>.
- [31] F. Zhang, L. Zhu, Z. Li, S. Wang, J. Shi, W. Tang, N. Li, J. Yang, The recent development of vat photopolymerization: A review, *Additive Manufacturing*. 48 (2021) 102423. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102423>.
- [32] Recent advances and future perspective in additive manufacturing of foods based on 3D printing, *Current Opinion in Food Science*. 35 (2020) 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.01.009>.
- [33] Z. Liu, B. Bhandari, S. Prakash, M. Zhang, Creation of internal structure of mashed potato construct by 3D printing and its textural properties, *Food Research International*. 111 (2018) 534–543. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.05.075>.
- [34] M. Bloomfield, S. Borstrock, Modeclix. The additively manufactured adaptable textile, *Materials Today Communications*. 16 (2018) 212–216. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.04.002>.
- [35] C. Zhong, J. Liu, G. Backes, T. Zhao, T. Schopphoven, A. Gasser, 3D printing of large-scale components of titanium alloys under open atmosphere, *Materials Today Communications*. 28 (2021) 102688. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102688>.
- [36] J.P. Greene, 19 - Additive Manufacturing in Automotive, in: J.P. Greene (Ed.), *Automotive Plastics and Composites*, William Andrew Publishing, 2021: pp. 325–335. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818008-2.00003-9>.
- [37] R. Sheng, Chapter 2 - 3-D printing in the aerospace industry, in: R. Sheng (Ed.), *3D Printing*, Academic Press, 2022: pp. 3–12. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99463-7.00002-5>.
- [38] B.T. Phillips, J. Alder, G. Bolan, R.S. Nagle, A. Redington, T. Hellebrekers, J. Borden, N. Pawlenko, S. Licht, Additive manufacturing aboard a moving vessel at sea using passively stabilized stereolithography (SLA) 3D printing, *Additive Manufacturing*. 31 (2020) 100969. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100969>.
- [39] M. Kim, S. Kim, N. Ahn, Study of Rifle Maintenance and Parts Supply via 3D Printing Technology During Wartime, *Procedia Manufacturing*. 39 (2019) 1510–1516. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.297>.
- [40] G.D. Goh, S. Agarwala, G.L. Goh, V. Dikshit, S.L. Sing, W.Y. Yeong, Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): Challenges and potential, *Aerospace Science and Technology*. 63 (2017) 140–151. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.12.019>.
- [41] S.C. Kim, M. Kim, N. Ahn, 3D Printer Scheduling for Shortest Time Production of Weapon Parts, *Procedia Manufacturing*. 39 (2019) 439–446. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.451>.
- [42] N. Muralidharan, V.G. Pratheep, A. Shanmugam, A. Hariram, P. Dinesh, B. Visnu, Structural analysis of mini drone developed using 3D printing technique, *Materials Today: Proceedings*. 46 (2021) 8748–8752. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.053>.
- [43] Mohd. Javaid, A. Haleem, Additive manufacturing applications in orthopaedics: A review, *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*. 9 (2018) 202–206. <https://doi.org/10.1016/j.jcot.2018.04.008>.
- [44] A. Haleem, M. Javaid, A. Saxena, Additive manufacturing applications in cardiology: A review, *The Egyptian Heart Journal*. 70 (2018) 433–441. <https://doi.org/10.1016/j.ehj.2018.09.008>.
- [45] F.P.W. Melchels, J. Feijen, D.W. Grijpma, A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering, *Biomaterials*. 31 (2010) 6121–6130. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2010.04.050>.

- [46] M. Salmi, K.-S. Paloheimo, J. Tuomi, J. Wolff, A. Mäkitie, Accuracy of medical models made by additive manufacturing (rapid manufacturing), *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*. 41 (2013) 603–609. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2012.11.041>.
- [47] S. Khalil, J. Nam, W. Sun, Multi-nozzle deposition for construction of 3D biopolymer tissue scaffolds, *Rapid Prototyping Journal*. 11 (2005) 9–17. <https://doi.org/10.1108/13552540510573347>.
- [48] I. Verner, A. Merksamer, Digital Design and 3D Printing in Technology Teacher Education, *Procedia CIRP*. 36 (2015) 182–186. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.041>.
- [49] C.L. Cheung, N.R. Saber, Chapter 9 - Application of 3D Printing in Medical Simulation and Education, in: W.A. Farhat, J. Drake (Eds.), *Bioengineering for Surgery*, Chandos Publishing, 2016: pp. 151–166. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100123-3.00009-9>.
- [50] S. Ford, T. Minshall, Invited review article: Where and how 3D printing is used in teaching and education, *Additive Manufacturing*. 25 (2019) 131–150. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.028>.
- [51] I. Cáceres-Criado, P. Triviño-Tarradas, J.M. Valderrama-Zafra, D.F. García-Molina, Digital preservation and virtual 3D reconstruction of “The Baker’s house” in the archaeological site of Torreparedones (Baena, Cordoba-Spain), *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. 24 (2022) e00218. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2022.e00218>.
- [52] D. Abate, R. Ciavarella, G. Furini, G. Guarnieri, S. Migliori, S. Pierattini, 3D modeling and remote rendering technique of a high definition cultural heritage artefact, *Procedia Computer Science*. 3 (2011) 848–852. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2010.12.139>.
- [53] P.F. Wilson, J. Stott, J.M. Warnett, A. Attridge, M.P. Smith, M.A. Williams, Museum visitor preference for the physical properties of 3D printed replicas, *Journal of Cultural Heritage*. 32 (2018) 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.02.002>.
- [54] B. Arendt, E. Johnson, A. Mueller, W. Rourk, Artifacsimile –3D printed preservation at Monticello, *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. 24 (2022) e00216. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2022.e00216>.
- [55] Thurston S.H., Method of Impacting One Metal Upon Another, US706701A, 1902.
- [56] E. Irissou, J.-G. Legoux, A.N. Ryabinin, B. Jodoin, C. Moreau, Review on Cold Spray Process and Technology: Part I—Intellectual Property, *J Therm Spray Tech*. 17 (2008) 495–516. <https://doi.org/10.1007/s11666-008-9203-3>.
- [57] A.A. P, A Method of Cold Gas-Dynamic Deposition, *Sov. Phys. Dokl*. 35 (1990) 1047–1049.
- [58] A. Papyrin, V. Kosarev, S. Klinkov, A. Alkimov, V. Fomin, Chapter 1 - Discovery of the cold spray phenomenon and its basic features, in: A. Papyrin, V. Kosarev, S. Klinkov, A. Alkimov, V. Fomin (Eds.), *Cold Spray Technology*, Elsevier, Oxford, 2007: pp. 1–32. <https://doi.org/10.1016/B978-008045155-8/50001-6>.
- [59] A. Moridi, S.M. Hassani-Gangaraj, M. Guagliano, M. Dao, Cold spray coating: review of material systems and future perspectives, *Surface Engineering*. 30 (2014) 369–395. <https://doi.org/10.1179/1743294414Y.0000000270>.
- [60] K. Spencer, V. Luzin, N. Matthews, M.-X. Zhang, Residual stresses in cold spray Al coatings: The effect of alloying and of process parameters, *Surface and Coatings Technology*. 206 (2012) 4249–4255. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.04.034>.
- [61] N.M. Chavan, M. Ramakrishna, P.S. Phani, D.S. Rao, G. Sundararajan, The influence of process

- parameters and heat treatment on the properties of cold sprayed silver coatings, *Surface and Coatings Technology*. 205 (2011) 4798–4807. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.04.063>.
- [62] J. Tang, Z. Zhao, N. Li, X. Qiu, Y. Shen, X. Cui, H. Du, J. Wang, T. Xiong, Influence of feedstock powder on microstructure and mechanical properties of Ta cold spray depositions, *Surface and Coatings Technology*. 377 (2019) 124903. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.124903>.
- [63] M. Winnicki, L. Łatka, M. Jasiorski, A. Baszczuk, Mechanical properties of TiO₂ coatings deposited by low pressure cold spraying, *Surface and Coatings Technology*. 405 (2021) 126516. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126516>.
- [64] J.H. Lee, H.L. Jang, K.M. Lee, H.-R. Baek, K. Jin, K.S. Hong, J.H. Noh, H.-K. Lee, In vitro and in vivo evaluation of the bioactivity of hydroxyapatite-coated polyetheretherketone biocomposites created by cold spray technology, *Acta Biomaterialia*. 9 (2013) 6177–6187. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2012.11.030>.
- [65] D. Seo, K. Ogawa, K. Sakaguchi, N. Miyamoto, Y. Tsuzuki, Parameter study influencing thermal conductivity of annealed pure copper coatings deposited by selective cold spray processes, *Surface and Coatings Technology*. 206 (2012) 2316–2324. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.10.010>.
- [66] P. Sudharshan Phani, D. Srinivasa Rao, S.V. Joshi, G. Sundararajan, Effect of Process Parameters and Heat Treatments on Properties of Cold Sprayed Copper Coatings, *J Therm Spray Tech*. 16 (2007) 425–434. <https://doi.org/10.1007/s11666-007-9048-1>.
- [67] F. Gärtner, T. Stoltenhoff, J. Voyer, H. Kreye, S. Riekehr, M. Koçak, Mechanical properties of cold-sprayed and thermally sprayed copper coatings, *Surface and Coatings Technology*. 200 (2006) 6770–6782. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.10.007>.
- [68] A. Loganathan, S. Rengifo, A.F. Hernandez, C. Zhang, A. Agarwal, Effect of nanodiamond reinforcement and heat-treatment on microstructure, mechanical and tribological properties of cold sprayed aluminum coating, *Surface and Coatings Technology*. 412 (2021) 127037. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127037>.
- [69] Q. Wang, W. Niu, X. Li, P. Han, X. Mao, J. Yang, M.-X. Zhang, Tuning the microstructure and mechanical properties of additive manufactured aluminum matrix composites by cold spray, *Surface and Coatings Technology*. 428 (2021) 127847. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127847>.
- [70] M. Mozetič, Surface Modification to Improve Properties of Materials, *Materials*. 12 (2019) 441. <https://doi.org/10.3390/ma12030441>.
- [71] A. Bonadei, T. Marrocco, Cold sprayed MCrAlY+X coating for gas turbine blades and vanes, *Surface and Coatings Technology*. 242 (2014) 200–206. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.08.019>.
- [72] D. Guo, Y. Wang, R. Fernandez, L. Zhao, B. Jodoin, Cold spray for production of in-situ nanocrystalline MCrAlY coatings – Part I: Process analysis and microstructure characterization, *Surface and Coatings Technology*. 409 (2021) 126854. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126854>.
- [73] P. Richer, M. Yandouzi, L. Beauvais, B. Jodoin, Oxidation behaviour of CoNiCrAlY bond coats produced by plasma, HVOF and cold gas dynamic spraying, *Surface and Coatings Technology*. 204 (2010) 3962–3974. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.03.043>.
- [74] W.R. Chen, E. Irissou, X. Wu, J.-G. Legoux, B.R. Marple, The Oxidation Behavior of TBC with Cold Spray CoNiCrAlY Bond Coat, *J Therm Spray Tech*. 20 (2011) 132–138. <https://doi.org/10.1007/s11666-010-9601-1>.

- [75] A. Manap, A. Nakano, K. Ogawa, The Protectiveness of Thermally Grown Oxides on Cold Sprayed CoNiCrAlY Bond Coat in Thermal Barrier Coating, *J Therm Spray Tech.* 21 (2012) 586–596. <https://doi.org/10.1007/s11666-012-9749-y>.
- [76] E. Leshchinsky, A. Sobiesiak, R. Maev, Intermetallic Al-, Fe-, Co- and Ni-Based Thermal Barrier Coatings Prepared by Cold Spray for Applications on Low Heat Rejection Diesel Engines, *J Therm Spray Tech.* 27 (2018) 456–470. <https://doi.org/10.1007/s11666-017-0681-z>.
- [77] H. Yeom, B. Maier, G. Johnson, T. Dabney, J. Walters, K. Sridharan, Development of cold spray process for oxidation-resistant FeCrAl and Mo diffusion barrier coatings on optimized ZIRLO™, *Journal of Nuclear Materials.* 507 (2018) 306–315. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.05.014>.
- [78] S.V. Raj, C. Barrett, J. Karthikeyan, R. Garlick, Comparison of the cyclic oxidation behavior of cold sprayed CuCrAl-coated and uncoated GRCop-84 substrates for space launch vehicles, *Surface and Coatings Technology.* 201 (2007) 7222–7234. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.01.034>.
- [79] T. Hussain, D.G. McCartney, P.H. Shipway, Impact phenomena in cold-spraying of titanium onto various ferrous alloys, *Surface and Coatings Technology.* 205 (2011) 5021–5027. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.05.003>.
- [80] T. Hussain, Cold Spraying of Titanium: A Review of Bonding Mechanisms, Microstructure and Properties, *Key Engineering Materials.* 533 (2013) 53–90. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.533.53>.
- [81] M. Daroonparvar, M.U. Farooq Khan, Y. Saadeh, C.M. Kay, R.K. Gupta, A.K. Kasar, P. Kumar, M. Misra, P.L. Menezes, H.R. Bakhsheshi-Rad, Enhanced corrosion resistance and surface bioactivity of AZ31B Mg alloy by high pressure cold sprayed monolayer Ti and bilayer Ta/Ti coatings in simulated body fluid, *Materials Chemistry and Physics.* 256 (2020) 123627. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123627>.
- [82] Y.-K. Wei, X.-T. Luo, X. Chu, Y. Ge, G.-S. Huang, Y.-C. Xie, R.-Z. Huang, C.-J. Li, Ni coatings for corrosion protection of Mg alloys prepared by an in-situ micro-forging assisted cold spray: Effect of powder feedstock characteristics, *Corrosion Science.* 184 (2021) 109397. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109397>.
- [83] S. Tripathy, A. Behera, S. Pati, S. Roy, Corrosion resistant nickel coating on mild steel by cold gas dynamic spraying, *Materials Today: Proceedings.* 46 (2021) 4395–4399. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.668>.
- [84] H.-L. Yao, X.-Z. Hu, Z.-H. Yi, J. Xia, X.-Y. Tu, S.-B. Li, B. Yu, M.-X. Zhang, X.-B. Bai, Q.-Y. Chen, H.-T. Wang, Microstructure and improved anti-corrosion properties of cold-sprayed Zn coatings fabricated by post shot-peening process, *Surface and Coatings Technology.* 422 (2021) 127557. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127557>.
- [85] G. Vinay, N.M. Chavan, S. Kumar, A. Jyothirmayi, B.R. Bodapati, Improved microstructure and properties of cold sprayed zinc coatings in the as sprayed condition, *Surface and Coatings Technology.* 438 (2022) 128392. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128392>.
- [86] K. Wu, W. Sun, A.W.-Y. Tan, S.C. Tan, E. Liu, W. Zhou, High temperature oxidation and oxychlorination behaviors of cold sprayed Inconel 718 deposits at 700 °C, *Corrosion Science.* 207 (2022) 110536. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110536>.
- [87] J. Zhu, X. Cheng, L. Zhang, X. Hui, Y. Wu, H. Zheng, Z. Ren, Y. Zhao, W. Wang, S. Zhu, X. Wang, Microstructures, wear resistance and corrosion resistance of CoCrFeNi high entropy alloys coating

- on AZ91 Mg alloy prepared by cold spray, *Journal of Alloys and Compounds*. 925 (2022) 166698. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166698>.
- [88] X.-J. Ning, J.-H. Kim, H.-J. Kim, C. Lee, Characteristics and heat treatment of cold-sprayed Al–Sn binary alloy coatings, *Applied Surface Science*. (2009) 7.
- [89] K. Wu, W. Sun, A.W.-Y. Tan, I. Marinescu, E. Liu, W. Zhou, An investigation into microstructure, tribological and mechanical properties of cold sprayed Inconel 625 coatings, *Surface and Coatings Technology*. 424 (2021) 127660. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127660>.
- [90] G. Lucchetta, R. Giusti, S. Vezzù, P.F. Bariani, Investigation and characterization of Stellite-based wear-resistant coatings applied to steel moulds by cold-spray, *CIRP Annals*. 64 (2015) 535–538. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.031>.
- [91] P. Magarò, A.L. Marino, C. Maletta, M. Tului, A.D. Schino, Tribological properties of wear-resistant coatings obtained by cold gas dynamic spray, *Procedia Structural Integrity*. 9 (2018) 287–294. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.06.030>.
- [92] Y. Fu, C. Huang, C. Du, J. Li, C. Dai, H. Luo, Z. Liu, X. Li, Evolution in microstructure, wear, corrosion, and tribocorrosion behavior of Mo-containing high-entropy alloy coatings fabricated by laser cladding, *Corrosion Science*. 191 (2021) 109727. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109727>.
- [93] V. Champagne, K. Sundberg, D. Helfritsch, Kinetically Deposited Copper Antimicrobial Surfaces, *Coatings*. 9 (2019) 257. <https://doi.org/10.3390/coatings9040257>.
- [94] F.S. da Silva, N. Cinca, S. Dosta, I.G. Cano, J.M. Guilemany, C.S.A. Caires, A.R. Lima, C.M. Silva, S.L. Oliveira, A.R.L. Caires, A.V. Benedetti, Corrosion resistance and antibacterial properties of copper coating deposited by cold gas spray, *Surface and Coatings Technology*. 361 (2019) 292–301. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.01.029>.
- [95] A.M. Vilardell, N. Cinca, N. Garcia-Giralt, S. Dosta, I.G. Cano, X. Nogués, J.M. Guilemany, Osteoblastic cell response on high-rough titanium coatings by cold spray, *J Mater Sci: Mater Med*. 29 (2018) 19. <https://doi.org/10.1007/s10856-018-6026-8>.
- [96] M. Gardon, A. Latorre, M. Torrell, S. Dosta, J. Fernández, J.M. Guilemany, Cold gas spray titanium coatings onto a biocompatible polymer, *Materials Letters*. 106 (2013) 97–99. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.04.115>.
- [97] G. Zeng, S.H. Zahiri, S. Gulizia, Y. Chen, C. Xu, X.-B. Chen, I. Cole, A comparative study of cell growth on a cold sprayed Ti–Ta composite, *Journal of Alloys and Compounds*. 826 (2020) 154014. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154014>.
- [98] H. Koivuluoto, J. Näkki, P. Vuoristo, Corrosion Properties of Cold-Sprayed Tantalum Coatings, *J Therm Spray Tech*. 18 (2009) 75–82. <https://doi.org/10.1007/s11666-008-9281-2>.
- [99] J. Tang, Z. Zhao, X. Cui, J. Wang, T. Xiong, Microstructure and bioactivity of a cold sprayed rough/porous Ta coating on Ti6Al4V substrate, *Sci. China Technol. Sci*. 63 (2020) 731–739. <https://doi.org/10.1007/s11431-019-1446-0>.
- [100] Z. Zhao, F. Meng, J. Tang, H. Liu, H. Liu, L. Yang, J. Wang, T. Xiong, A novel method of fabricating an antibacterial aluminum-matrix composite coating doped graphene/silver-nanoparticles, *Materials Letters*. 245 (2019) 211–214. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.02.121>.
- [101] B. AL-Mangour, R. Mongrain, E. Irissou, S. Yue, Improving the strength and corrosion resistance of 316L stainless steel for biomedical applications using cold spray, *Surface and Coatings Technology*. 216 (2013) 297–307. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.11.061>.

- [102] B. AL-Mangour, P. Vo, R. Mongrain, E. Irissou, S. Yue, Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Stainless Steel 316L Coatings Produced by Cold Spray for Biomedical Applications, *J Therm Spray Tech.* 23 (2014) 641–652. <https://doi.org/10.1007/s11666-013-0053-2>.
- [103] K. Schmidt, S. Buhl, N. Davoudi, C. Godard, R. Merz, I. Raid, E. Kerscher, M. Kopnarski, C. Müller-Renno, S. Ripperger, J. Seewig, C. Ziegler, S. Antonyuk, Ti surface modification by cold spraying with TiO₂ microparticles, *Surface and Coatings Technology.* 309 (2017) 749–758. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.10.091>.
- [104] H. Hajipour, A. Abdollah-zadeh, H. Assadi, E. Taheri-Nassaj, H. Jahed, Effect of Feedstock Powder Morphology on Cold-Sprayed Titanium Dioxide Coatings, *J Therm Spray Tech.* 27 (2018) 1542–1550. <https://doi.org/10.1007/s11666-018-0782-3>.
- [105] A.C.W. Noorakma, H. Zuhailawati, V. Aishvarya, B.K. Dhindaw, Hydroxyapatite-Coated Magnesium-Based Biodegradable Alloy: Cold Spray Deposition and Simulated Body Fluid Studies, *J. of Materi Eng and Perform.* 22 (2013) 2997–3004. <https://doi.org/10.1007/s11665-013-0589-9>.
- [106] J.H. Lee, H.L. Jang, K.M. Lee, H.-R. Baek, K. Jin, J.H. Noh, Cold-spray coating of hydroxyapatite on a three-dimensional polyetheretherketone implant and its biocompatibility evaluated by in vitro and in vivo minipig model, *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials.* 105 (2017) 647–657. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.33589>.
- [107] J. Tang, Z. Zhao, H. Liu, X. Cui, J. Wang, T. Xiong, A novel bioactive Ta/hydroxyapatite composite coating fabricated by cold spraying, *Materials Letters.* 250 (2019) 197–201. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.123>.
- [108] A.M. Vilardell, N. Cinca, N. Garcia-Giralt, S. Dosta, I.G. Cano, X. Nogués, J.M. Guilemany, Functionalized coatings by cold spray: An in vitro study of micro- and nanocrystalline hydroxyapatite compared to porous titanium, *Materials Science and Engineering: C.* 87 (2018) 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.02.009>.
- [109] K. Wang, S. Wang, T. Xiong, D. Wen, G. Wang, W. Liu, H. Du, Properties of Zn-Al-Mg-TiO₂ coating prepared by cold spraying, *Surface and Coatings Technology.* 387 (2020) 125549. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125549>.
- [110] N. Sanpo, S.M. Ang, P. Cheang, K.A. Khor, Antibacterial Property of Cold Sprayed Chitosan-Cu/Al Coating, *J Therm Spray Tech.* 18 (2009) 600. <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9391-5>.
- [111] C. Howe, Cold Spray Repair of the CH-47 Accessory Cover, (n.d.) 21.
- [112] Z. Thomas, S. Chaplan, V. Zilberstein, N. Goldfine, Nondestructive Evaluation of Cold Spray Repairs, (2013) 20.
- [113] B. Deforce, T. Eden, J. Potter, V. Champagne, P. Leyman, D. Helfritch, Application of Aluminum Coatings for the Corrosion Protection of Magnesium by Cold Spray, (n.d.).
- [114] V.K. Champagne, P.F. Leyman, D.J. Helfritch, Magnesium Repair by Cold Spray, (n.d.) 34.
- [115] H. Wu, S. Liu, X. Xie, Y. Zhang, H. Liao, S. Deng, A framework for a knowledge based cold spray repairing system, *J Intell Manuf.* (2021). <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01770-7>.
- [116] A. Sova, S. Grigoriev, A. Okunkova, I. Smurov, Potential of cold gas dynamic spray as additive manufacturing technology, *Int J Adv Manuf Technol.* 69 (2013) 2269–2278. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5166-8>.
- [117] B. Barnett, M. Trexler, V. Champagne, Cold sprayed refractory metals for chrome reduction in gun

- barrel liners, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 53 (2015) 139–143. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2015.07.007>.
- [118] H.-J. Choi, M. Lee, J.Y. Lee, Application of a cold spray technique to the fabrication of a copper canister for the geological disposal of CANDU spent fuels, *Nuclear Engineering and Design*. 240 (2010) 2714–2720. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.06.038>.
- [119] S. Yin, Cold spray additive manufacturing and repair_ Fundamentals and applications, *Additive Manufacturing*. (2018) 23.
- [120] E. Bakan, G. Mauer, Y.J. Sohn, A. Schwedt, M.W. Rackel, F. Riedlberger, F. Pyczak, J.O. Peters, M. Mecklenburg, T.M. Gartner, R. Vaßen, Cold gas spraying of Ti-48Al-2Cr-2Nb intermetallic for jet engine applications, *Surface and Coatings Technology*. 371 (2019) 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.11.092>.
- [121] C. Huang, A. List, L. Wiehler, M. Schulze, F. Gärtner, T. Klassen, Cold spray deposition of graded Al-SiC composites, *Additive Manufacturing*. 59 (2022) 103116. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103116>.
- [122] T.B. Mangalarapu, S. Kumar, M. Ramakrishna, P. Gandham, K. Suresh, Precipitation behavior of cold sprayed Al6061 coatings, *Materialia*. 24 (2022) 101510. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101510>.
- [123] A. Papyrin, V. Kosarev, S. Klinkov, A. Alkimov, V. Fomin, Chapter 4 - Cold spray equipments and technologies, in: A. Papyrin, V. Kosarev, S. Klinkov, A. Alkimov, V. Fomin (Eds.), *Cold Spray Technology*, Elsevier, Oxford, 2007: pp. 179–247. <https://doi.org/10.1016/B978-008045155-8/50004-1>.
- [124] W.-Y. Li, H. Liao, G. Douchy, C. Coddet, Optimal design of a cold spray nozzle by numerical analysis of particle velocity and experimental validation with 316L stainless steel powder, *Materials & Design*. 28 (2007) 2129–2137. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.05.016>.
- [125] W.-Y. Li, H. Liao, H.-T. Wang, C.-J. Li, G. Zhang, C. Coddet, Optimal design of a convergent-barrel cold spray nozzle by numerical method, *Applied Surface Science*. 253 (2006) 708–713. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.12.157>.
- [126] S. Yin, X. Wang, W. Li, Computational analysis of the effect of nozzle cross-section shape on gas flow and particle acceleration in cold spraying, *Surface and Coatings Technology*. 205 (2011) 2970–2977. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.11.002>.
- [127] K. Harihara Sudhan, G. Krishna Prasad, N.K. Kothurkar, A.R. Srikrishnan, Studies on supersonic cold spray deposition of microparticles using a bell-type nozzle, *Surface and Coatings Technology*. 383 (2020) 125244. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125244>.
- [128] N. Prociw, C. Briens, F. Berruti, J. McMillan, Effect of spray nozzle attachment geometry on rate of liquid released from agglomerates produced by gas-atomized liquid injection into a fluidized bed, *Powder Technology*. 325 (2018) 280–288. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.11.020>.
- [129] T.H. Van Steenkiste, J.R. Smith, R.E. Teets, J.J. Moleski, D.W. Gorkiewicz, R.P. Tison, D.R. Marantz, K.A. Kowalsky, W.L. Riggs, P.H. Zajchowski, B. Pilsner, R.C. McCune, K.J. Barnett, Kinetic spray coatings, *Surface and Coatings Technology*. 111 (1999) 62–71. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(98\)00709-9](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(98)00709-9).
- [130] H. Assadi, F. Gärtner, T. Stoltenhoff, H. Kreye, Bonding mechanism in cold gas spraying, *Acta Materialia*. 51 (2003) 4379–4394. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00274-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00274-X).

- [131] H. Fukanuma, N. Ohno, B. Sun, R. Huang, In-flight particle velocity measurements with DPV-2000 in cold spray, *Surface and Coatings Technology*. 201 (2006) 1935–1941. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.04.035>.
- [132] M. Yu, W.-Y. Li, F.F. Wang, H.L. Liao, Finite Element Simulation of Impacting Behavior of Particles in Cold Spraying by Eulerian Approach, *J Therm Spray Tech*. 21 (2012) 745–752. <https://doi.org/10.1007/s11666-011-9717-y>.
- [133] A. Joshi, S. James, Molecular Dynamics Simulation Study on Effect of Process Parameters on Coatings during Cold Spray Process, *Procedia Manufacturing*. 26 (2018) 190–197. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.026>.
- [134] M. Grujicic, C.L. Zhao, W.S. DeRosset, D. Helfritsch, Adiabatic shear instability based mechanism for particles/substrate bonding in the cold-gas dynamic-spray process, *Materials & Design*. 25 (2004) 681–688. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.03.008>.
- [135] R. Chakrabarty, J. Song, A modified Johnson-Cook material model with strain gradient plasticity consideration for numerical simulation of cold spray process, *Surface and Coatings Technology*. 397 (2020) 125981. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125981>.
- [136] S. Barradas, V. Guipont, R. Molins, M. Jeandin, M. Arrigoni, M. Boustie, C. Bolis, L. Berthe, M. Ducos, Laser Shock Flier Impact Simulation of Particle-Substrate Interactions in Cold Spray, *J Therm Spray Tech*. 16 (2007) 548–556. <https://doi.org/10.1007/s11666-007-9069-9>.
- [137] X. Suo, S. Yin, H. Li, R. Lupoi, Numerical and Experimental Investigation on Bonding Behavior of Cold Sprayed Porous WC-17Co Particles onto Different Substrates, *Coatings*. 8 (2018) 367. <https://doi.org/10.3390/coatings8100367>.
- [138] X.K. Suo, T.K. Liu, W.Y. Li, Q.L. Suo, M.P. Planche, H.L. Liao, Numerical study on the effect of nozzle dimension on particle distribution in cold spraying, *Surface and Coatings Technology*. 220 (2013) 107–111. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.09.029>.
- [139] W.-Y. Li, C.-J. Li, Optimal Design of a Novel Cold Spray Gun Nozzle at a Limited Space, *Journal of Thermal Spray Technology*. 14 (2005) 391–396. <https://doi.org/10.1361/105996305X59404>.
- [140] H. Tabbara, S. Gu, D.G. McCartney, T.S. Price, P.H. Shipway, Study on Process Optimization of Cold Gas Spraying, *J Therm Spray Tech*. 20 (2011) 608–620. <https://doi.org/10.1007/s11666-010-9564-2>.
- [141] A.P. Alkhimov, V.F. Kosarev, S.V. Klinkov, The features of cold spray nozzle design, *J Therm Spray Tech*. 10 (2001) 375–381. <https://doi.org/10.1361/105996301770349466>.
- [142] B. Samareh, A. Dolatabadi, A Three-Dimensional Analysis of the Cold Spray Process: The Effects of Substrate Location and Shape, *J Therm Spray Tech*. 16 (2007) 634–642. <https://doi.org/10.1007/s11666-007-9082-z>.
- [143] J. Pattison, S. Celotto, A. Khan, W. O'Neill, Standoff distance and bow shock phenomena in the Cold Spray process, *Surface and Coatings Technology*. 202 (2008) 1443–1454. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.06.065>.
- [144] Y. Ichikawa, Effect of Substrate Surface Oxide Film Thickness on Deposition Behavior and Deposition Efficiency in the Cold Spray Process, *Journal of Thermal Spray Technology*. (n.d.) 8.
- [145] S.P. Kiselev, V.P. Kiselev, S.V. Klinkov, V.F. Kosarev, V.N. Zaikovskii, Study of the gas-particle radial supersonic jet in the cold spraying, *Surface and Coatings Technology*. 313 (2017) 24–30. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.046>.
- [146] D.L. Gilmore, R.C. Dykhuizen, R.A. Neiser, M.F. Smith, T.J. Roemer, Particle velocity and

- deposition efficiency in the cold spray process, *J Therm Spray Tech.* 8 (1999) 576–582. <https://doi.org/10.1361/105996399770350278>.
- [147] S. Yin, M. Zhang, Z. Guo, H. Liao, X. Wang, Numerical investigations on the effect of total pressure and nozzle divergent length on the flow character and particle impact velocity in cold spraying, *Surface and Coatings Technology.* 232 (2013) 290–297. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.05.017>.
- [148] A. Sova, S. Klinkov, V. Kosarev, N. Ryashin, I. Smurov, Preliminary study on deposition of aluminium and copper powders by cold spray micronozzle using helium, *Surface and Coatings Technology.* 220 (2013) 98–101. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.09.036>.
- [149] X. Meng, J. Zhang, J. Zhao, Y. Liang, Y. Zhang, Influence of Gas Temperature on Microstructure and Properties of Cold Spray 304SS Coating, *Journal of Materials Science & Technology.* 27 (2011) 809–815. [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(11\)60147-3](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(11)60147-3).
- [150] R.N. Raelison, E. Aubignat, M.-P. Planche, S. Costil, C. Langlade, H. Liao, Low pressure cold spraying under 6bar pressure deposition: Exploration of high deposition efficiency solutions using a mathematical modelling, *Surface and Coatings Technology.* 302 (2016) 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.05.068>.
- [151] X. Suo, S. Yin, M.-P. Planche, T. Liu, H. Liao, Strong effect of carrier gas species on particle velocity during cold spray processes, *Surface and Coatings Technology.* 268 (2015) 90–93. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.04.039>.
- [152] Y. Li, X. Wang, S. Yin, S. Xu, Influence of Particle Initial Temperature on High Velocity Impact Process in Cold Spraying, *Procedia Environmental Sciences.* 12 (2012) 298–304. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.281>.
- [153] C.-J. Li, W.-Y. Li, H. Liao, Examination of the Critical Velocity for Deposition of Particles in Cold Spraying, *Journal of Thermal Spray Technology.* 15 (2006) 212–222. <https://doi.org/10.1361/105996306X108093>.
- [154] M. Grujcic, C.L. Zhao, C. Tong, W.S. DeRosset, D. Helfritch, Analysis of the impact velocity of powder particles in the cold-gas dynamic-spray process, *Materials Science and Engineering: A.* 368 (2004) 222–230. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.312>.
- [155] M. Winnicki, A. Małachowska, G. Dudzik, M. Rutkowska-Gorzycza, M. Marciniak, K. Abramski, A. Ambroziak, L. Pawłowski, Numerical and experimental analysis of copper particles velocity in low-pressure cold spraying process, *Surface and Coatings Technology.* 268 (2015) 230–240. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.11.059>.
- [156] S. Yin, M. Meyer, W. Li, H. Liao, R. Lupoi, Gas Flow, Particle Acceleration, and Heat Transfer in Cold Spray: A review, *J Therm Spray Tech.* 25 (2016) 874–896. <https://doi.org/10.1007/s11666-016-0406-8>.
- [157] R. Huang, H. Fukanuma, Study of the Influence of Particle Velocity on Adhesive Strength of Cold Spray Deposits, *J Therm Spray Tech.* 21 (2012) 541–549. <https://doi.org/10.1007/s11666-011-9707-0>.
- [158] C. Zhang, Q. Chen, J. Liu, W. Tang, K. Wang, J. Song, Numerical study on the effect of the cold powder carrier gas on powder stream characteristics in cold spray, *Surface and Coatings Technology.* 294 (2016) 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.03.069>.
- [159] W. Tang, J. Liu, Q. Chen, X. Zhang, Z. Chen, The effects of two gas flow streams with initial

- temperature and pressure differences in cold spraying nozzle, *Surface and Coatings Technology*. 240 (2014) 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.12.019>.
- [160] X.-J. Ning, J.-H. Jang, H.-J. Kim, The effects of powder properties on in-flight particle velocity and deposition process during low pressure cold spray process, *Applied Surface Science*. 253 (2007) 7449–7455. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.03.031>.
- [161] K. Kang, S. Yoon, Y. Ji, C. Lee, Oxidation dependency of critical velocity for aluminum feedstock deposition in kinetic spraying process, *Materials Science and Engineering: A*. 486 (2008) 300–307. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.09.010>.
- [162] Y. Xie, M.-P. Planche, R. Raelison, P. Hervé, X. Suo, P. He, H. Liao, Investigation on the influence of particle preheating temperature on bonding of cold-sprayed nickel coatings, *Surface and Coatings Technology*. 318 (2017) 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.09.037>.
- [163] B. Jodoin, L. Ajdelsztajn, E. Sansoucy, A. Zúñiga, P. Richer, E.J. Lavernia, Effect of particle size, morphology, and hardness on cold gas dynamic sprayed aluminum alloy coatings, *Surface and Coatings Technology*. 201 (2006) 3422–3429. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.232>.
- [164] H. Fuknuma, N. OHno, B. Son, R. Huang, The Influence of particle Morphology on In-Fright Particle Velocity in Cold Spray, (n.d.) 5.
- [165] A. Małachowska, M. Winnicki, Ł. Konat, T. Piwowarczyk, L. Pawłowski, A. Ambroziak, M. Stachowicz, Possibility of spraying of copper coatings on polyamide 6 with low pressure cold spray method, *Surface and Coatings Technology*. 318 (2017) 82–89. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.02.001>.
- [166] C.-J. Li, H.-T. Wang, Q. Zhang, G.-J. Yang, W.-Y. Li, H.L. Liao, Influence of Spray Materials and Their Surface Oxidation on the Critical Velocity in Cold Spraying, *J Therm Spray Tech*. 19 (2010) 95–101. <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9427-x>.
- [167] A.A. Hemeda, C. Zhang, X.Y. Hu, D. Fukuda, D. Cote, I.M. Nault, A. Nardi, V.K. Champagne, Y. Ma, J.W. Palko, Particle-based simulation of cold spray: Influence of oxide layer on impact process, *Additive Manufacturing*. 37 (2021) 101517. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101517>.
- [168] T. Van steenkiste, 8 - The role of particle temperature and velocity in cold spray coating formation, in: V.K. Champagne (Ed.), *The Cold Spray Materials Deposition Process*, Woodhead Publishing, 2007: pp. 127–147. <https://doi.org/10.1533/9781845693787.2.127>.
- [169] M. Yu, W.-Y. Li, F.F. Wang, X.K. Suo, H.L. Liao, Effect of particle and substrate preheating on particle deformation behavior in cold spraying, *Surface and Coatings Technology*. 220 (2013) 174–178. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.04.081>.
- [170] Y. Xie, N. Fan, J. Yang, W. Li, R. Lupoi, X. Guo, R. Huang, S. Yin, Improvement of tensile strength of cold sprayed Fe deposits via in-process powder preheating, *Materials Letters*. 316 (2022) 132090. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132090>.
- [171] H. Zhou, S. Jiang, X. Li, C. Li, Deposition behavior and bonding mechanism during cold spraying of Ti6Al4V on different substrates, *Surfaces and Interfaces*. 33 (2022) 102237. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102237>.
- [172] S.T. Oyinbo, T.-C. Jen, Feasibility of numerical simulation methods on the Cold Gas Dynamic Spray (CGDS) Deposition process for ductile materials, *Manufacturing Rev*. 7 (2020) 24. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2020023>.
- [173] D. Seo, M. Sayar, K. Ogawa, SiO₂ and MoSi₂ formation on Inconel 625 surface via SiC coating

- deposited by cold spray, *Surface and Coatings Technology*. 206 (2012) 2851–2858. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.12.010>.
- [174] X. Song, X.-Z. Jin, W. Zhai, A.W.-Y. Tan, W. Sun, F. Li, I. Marinescu, E. Liu, Correlation between the macroscopic adhesion strength of cold spray coating and the microscopic single-particle bonding behaviour: Simulation, experiment and prediction, *Applied Surface Science*. 547 (2021) 149165. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149165>.
- [175] K.H. Ko, J.O. Choi, H. Lee, Intermixing and interfacial morphology of cold-sprayed Al coatings on steel, *Materials Letters*. 136 (2014) 45–47. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.07.142>.
- [176] S. Temitope Oyinbo, T.-C. Jen, Molecular Dynamics Simulation of Dislocation Plasticity Mechanism of Nanoscale Ductile Materials in the Cold Gas Dynamic Spray Process, *Coatings*. 10 (2020) 1079. <https://doi.org/10.3390/coatings10111079>.
- [177] K.H. Ko, J.O. Choi, H. Lee, Y.K. Seo, S.P. Jung, S.S. Yu, Cold spray induced amorphization at the interface between Fe coatings and Al substrate, *Materials Letters*. 149 (2015) 40–42. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.02.118>.
- [178] T. Hussain, D.G. McCartney, P.H. Shipway, D. Zhang, Bonding Mechanisms in Cold Spraying: The Contributions of Metallurgical and Mechanical Components, *J Therm Spray Tech*. 18 (2009) 364–379. <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9298-1>.
- [179] T. Marrocco, D.G. McCartney, P.H. Shipway, A.J. Sturgeon, Production of titanium deposits by cold-gas dynamic spray: Numerical modeling and experimental characterization, *J Therm Spray Tech*. 15 (2006) 263–272. <https://doi.org/10.1361/105996306X108219>.
- [180] J. Wu, J. Yang, H. Fang, S. Yoon, C. Lee, The bond strength of Al–Si coating on mild steel by kinetic spraying deposition, *Applied Surface Science*. 252 (2006) 7809–7814. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.09.015>.
- [181] R. Kromer, S. Costil, C. Verdy, S. Gojon, H. Liao, Laser surface texturing to enhance adhesion bond strength of spray coatings - Cold spraying, wire-arc spraying, and atmospheric plasma spraying, *Coatings Technology*. (2018) 12.
- [182] V. Kumar, R. Verma, S. Kango, V.S. Sharma, Recent progresses and applications in laser-based surface texturing systems, *Materials Today Communications*. 26 (2021) 101736. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101736>.
- [183] S. Kumar, Influence of substrate roughness on bonding mechanism in cold spray, *Coatings Technology*. (2016) 14.
- [184] D.J. Barton, V.S. Bhattiprolu, G.B. Thompson, L.N. Brewer, Laser assisted cold spray of AISI 4340 steel, *Surface and Coatings Technology*. 400 (2020) 126218. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126218>.
- [185] B. Li, Y. Jin, J. Yao, Z. Li, Q. Zhang, X. Zhang, Influence of laser irradiation on deposition characteristics of cold sprayed Stellite-6 coatings, *Optics & Laser Technology*. 100 (2018) 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.09.034>.
- [186] W.A. Story, D.J. Barton, B.C. Hornbuckle, K.A. Darling, G.B. Thompson, L.N. Brewer, Laser assisted cold spray of Fe–Ni–Zr oxide dispersion strengthened steel, *Materialia*. 3 (2018) 239–242. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2018.08.028>.
- [187] R. Lupoi, A. Cockburn, C. Bryan, M. Sparkes, F. Luo, W. O'Neill, Hardfacing steel with nanostructured coatings of Stellite-6 by supersonic laser deposition, *Light Sci Appl*. 1 (2012) e10–

- e10. <https://doi.org/10.1038/lssa.2012.10>.
- [188] M. Bray, A. Cockburn, W. O'Neill, The Laser-assisted Cold Spray process and deposit characterisation, *Surface and Coatings Technology*. 203 (2009) 2851–2857. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.02.135>.
- [189] D. Fang, Diagnostic et adaptation des trajectoires robotiques en projection thermique, Theses, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2010. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00598778> (accessed September 20, 2022).
- [190] Z. Cai, Programmation robotique en utilisant la méthode de maillage et la simulation thermique du procédé de la projection thermique, phdthesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2014. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01005406> (accessed September 20, 2022).
- [191] C. Chen, Research and realization of assistant off-line programming system for thermal spraying, (n.d.) 159.
- [192] S. Deng, Programmation robotique hors-ligne et contrôle en temps réel des trajectoires : développement d'une extension logicielle de "Robotstudio" pour la projection thermique, These de doctorat, Besançon, 2006. <https://www.theses.fr/2006BESA2035> (accessed September 20, 2022).
- [193] H. Wu, X. Xie, M. Liu, C. Chen, H. Liao, Y. Zhang, S. Deng, A new approach to simulate coating thickness in cold spray, *Surface and Coatings Technology*. 382 (2020) 125151. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125151>.
- [194] W. Wong, A. Rezaeian, E. Irissou, S. Yue, Cold Spray Characteristics of Commercially Pure Ti and Ti-6Al-4V, (2009) 7.
- [195] C. Chen, Modelling of coating thickness distribution and its application in offline programming software, *Coatings Technology*. (2017) 11.
- [196] K. Binder, J. Gottschalk, M. Kollenda, F. Gärtner, T. Klassen, Influence of Impact Angle and Gas Temperature on Mechanical Properties of Titanium Cold Spray Deposits, *J Therm Spray Tech*. 20 (2011) 234–242. <https://doi.org/10.1007/s11666-010-9557-1>.
- [197] R. Singh, K.-H. Rauwald, E. Wessel, G. Mauer, S. Schrufer, A. Barth, S. Wilson, R. Vassen, Effects of substrate roughness and spray-angle on deposition behavior of cold-sprayed Inconel 718, *Surface and Coatings Technology*. 319 (2017) 249–259. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.072>.
- [198] D.H.L. Seng, Z. Zhang, Z.-Q. Zhang, T.L. Meng, S.L. Teo, B.H. Tan, Q. Loi, J. Pan, Influence of spray angle in cold spray deposition of Ti-6Al-4V coatings on Al6061-T6 substrates, *Surface and Coatings Technology*. 432 (2022) 128068. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.128068>.
- [199] S. Yin, X. Suo, J. Su, Z. Guo, H. Liao, X. Wang, Effects of Substrate Hardness and Spray Angle on the Deposition Behavior of Cold-Sprayed Ti Particles, *J Therm Spray Tech*. 23 (2014) 76–83. <https://doi.org/10.1007/s11666-013-0039-0>.
- [200] Q. Blochet, F. Delloro, F. N'Guyen, F. Borit, M. Jeandin, K. Roche, G. Surdon, Influence of spray angle on cold spray with Al for the repair of aircraft components, in: *ITSC 2014, DVS, Barcelone, Spain, 2014*: pp. 69–74. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01055104> (accessed September 20, 2022).
- [201] S. Deng, Z. Cai, D. Fang, H. Liao, G. Montavon, Application of robot offline programming in thermal spraying, *Surface and Coatings Technology*. 206 (2012) 3875–3882. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.03.038>.
- [202] G. Wkh, L. Wkh, R. Dqg, Effect of Spray Angle on Deposition Characteristics in Cold Spraying,

- (n.d.) 6.
- [203] A. Momber, ed., *Blast Cleaning Technology*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73645-5>.
- [204] N. Rajaratnam, S.A.H. Rizvi, P.M. Steffler, P.R. Smy, An experimental study of very high velocity circular water jets in air, *Journal of Hydraulic Research*. 32 (1994) 461–470. <https://doi.org/10.1080/00221689409498746>.
- [205] Z. Sayyar, J. Rahbar Shahrouzi, A.A. Babaluo, Experimental studies and numerical simulation of cold spray technique to investigate the effect of operating parameters on the thickness of Fe/TiO₂ self-cleaning film, *Powder Technology*. 403 (2022) 117320. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117320>.
- [206] W.-Y. Li, C. Zhang, X.P. Guo, G. Zhang, H.L. Liao, C.-J. Li, C. Coddet, Effect of standoff distance on coating deposition characteristics in cold spraying, *Materials & Design*. 29 (2008) 297–304. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.02.005>.
- [207] J. Karthikeyan, C.M. Kay, J. Lindeman, R.S. Lima, C.C. Berndt, Cold Spray Processing of Titanium Powder, in: *ASM International, 2000*: pp. 255–262. <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2000p0255>.
- [208] H. Wu, X. Xie, M. Liu, C. Verdy, Y. Zhang, H. Liao, S. Deng, Stable layer-building strategy to enhance cold-spray-based additive manufacturing, *Additive Manufacturing*. 35 (2020) 101356. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101356>.
- [209] Z. Cai, S. Deng, H. Liao, C. Zeng, G. Montavon, The Effect of Spray Distance and Scanning Step on the Coating Thickness Uniformity in Cold Spray Process, *J Therm Spray Tech*. 23 (2014) 354–362. <https://doi.org/10.1007/s11666-013-0002-0>.
- [210] H. Wu, C. Huang, X. Xie, S. Liu, T. Wu, T. Niendorf, Y. Xie, C. Deng, M. Liu, H. Liao, S. Deng, Influence of spray trajectories on characteristics of cold-sprayed copper deposits, *Surface and Coatings Technology*. 405 (2021) 126703. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126703>.
- [211] W. Li, H. Wu, C. Verdy, S. Costil, H. Liao, S. Deng, Study of Low-Pressure Cold Spray Additive Manufacturing: Investigation of Kinematic Spray Parameters on Deposition and Properties, *3D Printing and Additive Manufacturing*. (2022). <https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0260>.
- [212] R.A. Seraj, The effect of traverse speed on deposition efficiency of cold sprayed Stellite 21, *Coatings Technology*. (2019) 11.
- [213] J. Pattison, S. Celotto, R. Morgan, M. Bray, W. O'Neill., Cold gas dynamic manufacturing: A non-thermal approach to freeform fabrication, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 47 (2007) 627–634. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2006.05.001>.
- [214] V.P. Lyalyakin, A.Yu. Kostukov, V.A. Denisov, Special features of reconditioning the housing of a Caterpillar diesel oil pump by gas-dynamic spraying, *Welding International*. 30 (2016) 68–70. <https://doi.org/10.1080/09507116.2015.1030152>.
- [215] C.A. Widener, M.J. Carter, O.C. Ozdemir, R.H. Hrabe, B. Hoiland, T.E. Stamey, V.K. Champagne, T.J. Eden, Application of High-Pressure Cold Spray for an Internal Bore Repair of a Navy Valve Actuator, *J Therm Spray Tech*. 25 (2016) 193–201. <https://doi.org/10.1007/s11666-015-0366-4>.
- [216] M. Yandouzi, S. Gaydos, D. Guo, R. Ghelichi, B. Jodoin, Aircraft Skin Restoration and Evaluation, *J Therm Spray Tech*. 23 (2014) 1281–1290. <https://doi.org/10.1007/s11666-014-0130-1>.
- [217] A. Kudryavtsev, A. Shershnev, O. Rybdylova, Numerical simulation of aerodynamic focusing of particles in supersonic micronozzles, *International Journal of Multiphase Flow*. 114 (2019) 207–218.

- <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.03.009>.
- [218] A. Sova, A. Okunkova, S. Grigoriev, I. Smurov, Velocity of the Particles Accelerated by a Cold Spray Micronozzle: Experimental Measurements and Numerical Simulation, *J Therm Spray Tech.* 22 (2013) 75–80. <https://doi.org/10.1007/s11666-012-9846-y>.
- [219] M.E. Lynch, W. Gu, T. El-Wardany, A. Hsu, D. Viens, A. Nardi, M. Klecka, Design and topology/shape structural optimisation for additively manufactured cold sprayed components: This paper presents an additive manufactured cold spray component which is shape optimised to achieve 60% reduction in stress and 20% reduction in weight, *Virtual and Physical Prototyping.* 8 (2013) 213–231. <https://doi.org/10.1080/17452759.2013.837629>.
- [220] E. Oztemel, S. Gursev, Literature review of Industry 4.0 and related technologies, *J Intell Manuf.* 31 (2020) 127–182. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>.
- [221] P.J. Alhama Blanco, F.J. Abu-Dakka, M. Abderrahim, Practical Use of Robot Manipulators as Intelligent Manufacturing Systems, *Sensors.* 18 (2018) 2877. <https://doi.org/10.3390/s18092877>.
- [222] S. Sugita, T. Itaya, Y. Takeuchi, Development of robot teaching support devices to automate deburring and finishing works in casting, *Int J Adv Manuf Technol.* 23 (2004) 183–189. <https://doi.org/10.1007/s00170-003-1602-5>.
- [223] M.H. Choi, W.W. Lee, A force/moment sensor for intuitive robot teaching application, in: *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164)*, 2001: pp. 4011–4016 vol.4. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2001.933244>.
- [224] A. Nicholson, J. Norrish, P.D. Pietro, Rapid Adaptive Programming using Image Data (RAPID), *Faculty of Engineering - Papers (Archive)*. (2005). <https://ro.uow.edu.au/engpapers/3024>.
- [225] V. Santos Bottazzi, J.F. Cruz Fonseca, Off-Line Robot Programming Framework, in: *Joint International Conference on Autonomic and Autonomous Systems and International Conference on Networking and Services - (Icas-Isns'05)*, 2005: pp. 71–71. <https://doi.org/10.1109/ICAS-ICNS.2005.70>.
- [226] Z. Liu, W. Bu, J. Tan, Motion navigation for arc welding robots based on feature mapping in a simulation environment, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.* 26 (2010) 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2009.09.002>.
- [227] Z. Pan, J. Polden, N. Larkin, S. Van Duin, J. Norrish, Recent progress on programming methods for industrial robots, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.* 28 (2012) 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2011.08.004>.
- [228] P. Neto, N. Mendes, Direct off-line robot programming via a common CAD package, *Robotics and Autonomous Systems.* 61 (2013) 896–910. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.02.005>.
- [229] Y. Liu, Q. Tang, X. Tian, A discrete method of sphere-pipe intersecting curve for robot welding by offline programming, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.* 57 (2019) 404–411. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.12.018>.
- [230] A.K. Bedaka, J. Vidal, C.-Y. Lin, Automatic robot path integration using three-dimensional vision and offline programming, *Int J Adv Manuf Technol.* 102 (2019) 1935–1950. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-03282-w>.
- [231] Z. Pei, L. Chen, Welding component identification and solder joint inspection of automobile door panel based on machine vision, in: *2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 2018: pp. 6558–6563. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2018.8408283>.

- [232] X. Li, X. Li, S.S. Ge, M.O. Khyam, C. Luo, Automatic Welding Seam Tracking and Identification, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 64 (2017) 7261–7271. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2694399>.
- [233] C. Zheng, Y. An, Z. Wang, H. Wu, X. Qin, B. Eynard, Y. Zhang, Hybrid offline programming method for robotic welding systems, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 73 (2022) 102238. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102238>.
- [234] P.F. Yuan, H. Meng, L. Yu, L. Zhang, Robotic Multi-dimensional Printing Based on Structural Performance, in: D. Reinhardt, R. Saunders, J. Burry (Eds.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016*, Springer International Publishing, Cham, 2016: pp. 92–105. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26378-6_7.
- [235] B. Felbrich, F. Wulle, C. Allgaier, A. Menges, A. Verl, K.-H. Wurst, J.H. Nebelsick, A novel rapid additive manufacturing concept for architectural composite shell construction inspired by the shell formation in land snails, *Bioinspir. Biomim.* 13 (2018) 026010. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/aaa50d>.
- [236] C. Gosselin, R. Duballet, Ph. Roux, N. Gaudillière, J. Dirrenberger, Ph. Morel, Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders, *Materials & Design*. 100 (2016) 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097>.
- [237] E. Barnett, C. Gosselin, Large-scale 3D printing with a cable-suspended robot, *Additive Manufacturing*. 7 (2015) 27–44. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.05.001>.
- [238] F. Bonaccorso, L. Cantelli, G. Muscato, An Arc Welding Robot Control for a Shaped Metal Deposition Plant: Modular Software Interface and Sensors, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 58 (2011) 3126–3132. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2114311>.
- [239] B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A.E. Tekkaya, R. Neugebauer, D. McIntosh, Hybrid processes in manufacturing, *CIRP Annals*. 63 (2014) 561–583. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.003>.
- [240] Development and performance evaluation of a hybrid-wire arc additive manufacturing system based on robot manipulators, *Materials Today: Proceedings*. (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.608>.
- [241] Emerging trends in robotic aided additive manufacturing, *Materials Today: Proceedings*. 62 (2022) 7231–7237. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.680>.
- [242] A robotic cell for performing sheet lamination-based additive manufacturing, *Additive Manufacturing*. 27 (2019) 278–289. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.002>.
- [243] Additive Manufacturing using mobile robots: Opportunities and challenges for building construction, *Cement and Concrete Research*. 158 (2022) 106772. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106772>.
- [244] A. Vargas-Uscategui, P.C. King, S. Yang, C. Chu, J. Li, Toolpath planning for cold spray additively manufactured titanium walls and corners: Effect on geometry and porosity, *Journal of Materials Processing Technology*. 298 (2021) 117272. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117272>.

Chapitre 2
Concept modulaire intégré du système de
Fabrication Additive par Cold Spray

2.1 Introduction

En cold spray à haute pression (CSHP), une large gamme de matériaux, de métaux et d'alliages peut être déposée. Par cold spray à basse pression (CSBP), en raison des paramètres du procédé comme la température de préchauffage et la pression relativement basses, le faible rendement de poudre augmente les coûts de production. De plus, les propriétés des dépôts élaborés par CSBP ne sont généralement pas aussi satisfaisantes. Cependant, comparé à l'équipement CSHP, l'équipement CSBP est portable et peu coûteux. Ceci est particulièrement avantageux pour l'entretien dans certaines zones, par exemple, la réparation d'équipements militaires extérieurs. De plus, bien qu'utilisé à l'origine comme technologie de revêtements, la projection à froid peut réaliser aussi des traitements de matériaux en couches sans limite de taille. En comparaison avec d'autres méthodes de FA, le CS n'implique ni processus à haute température, ni processus chimique écologiquement gênant. Par conséquent, c'est une technologie capable de créer des formes 3D de différentes géométries de plus en plus attrayante.

Le système FACS conventionnel se compose de deux modules, un module de projection et un module robotique, comme illustré Figure 2.1. Le module robot implique un bras industriel à six axes (ABB IRB 2400 comme utilisé dans cette thèse). Pour ce qui est du module de projection, le système CSHP ou CSBP peut être utilisé pour déposer la poudre sur le substrat. Cependant, étant donné que les produits fabriqués par FACS présentent généralement une surface rugueuse et un manque de précision dimensionnelle, les applications restent alors limitées. C'est pourquoi, la fabrication additive par cold spray hybride (FACSH) a été développée en combinant différentes technologies afin de surmonter la limitation de ces processus et bénéficier des avantages inhérents à chacun des procédés.

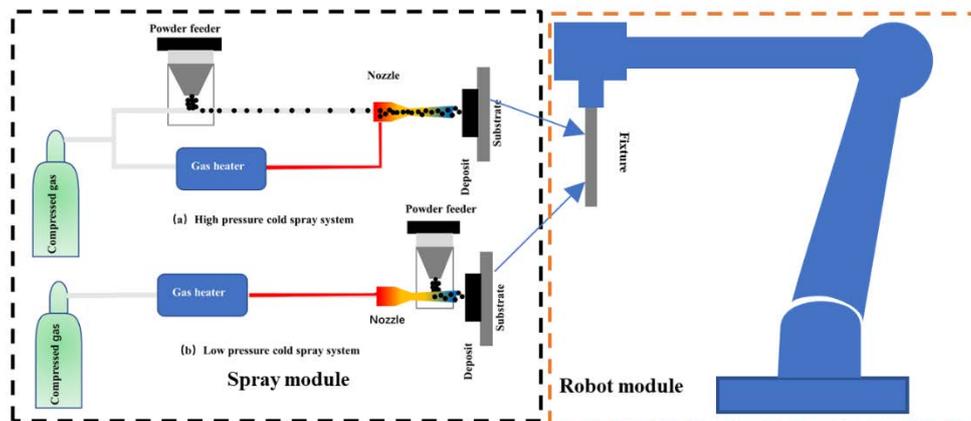


Figure 2.1 Schéma de principe du système FACS conventionnel.

Le développement initial du système FACSH est basé sur la combinaison du système FACS avec des processus soustractifs, tels que le tournage et le fraisage. Les processus soustractifs peuvent être utilisés pour la finition finale des pièces. De plus, ils peuvent également être utilisés pour corriger la forme de la pièce en cours de fabrication en temps réel grâce à la stratégie de fabrication couche par couche [1]. De plus, un module de surveillance en ligne in situ peut également être ajouté au système ; le module est capable alors de suivre

l'évolution de la forme du dépôt. De plus, des modules de prétraitement (pour les poudres et les substrats) tout comme de post-traitement (pour les pièces fabriquées) peuvent également être intégrés au système. La Figure 2.2 montre ainsi le diagramme schématique du système de Fabrication Additive par projection à froid hybride (FACSH).

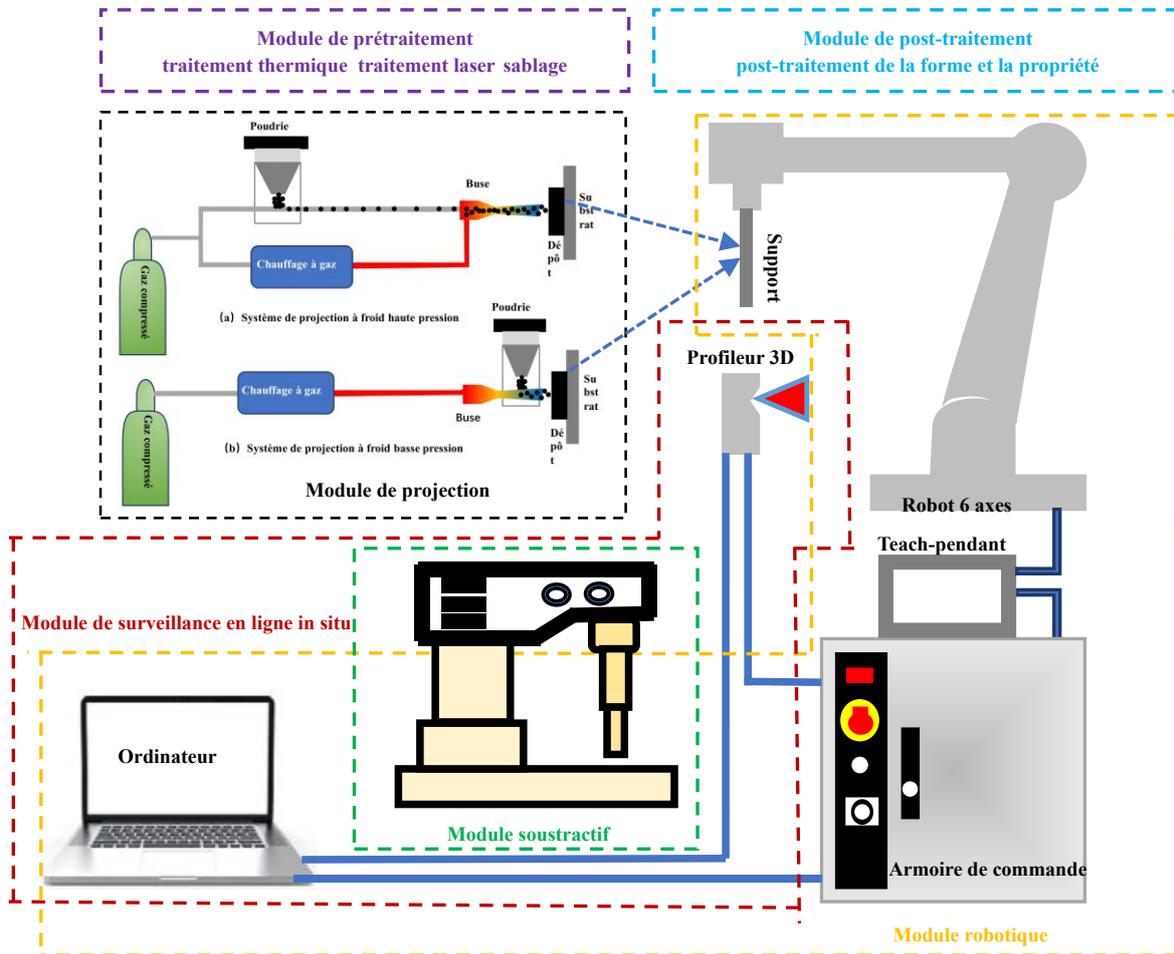


Figure 2.2 Schéma de principe du système FACSH.

Actuellement, le délai de mise sur le marché d'un produit peut grandement affecter sa rentabilité. Pour accélérer alors un tel processus, diverses étapes impliquant l'ensemble du processus de fabrication, de la conception à la livraison, peuvent être intégrées. Pour ce faire, un concept modulaire comprenant deux composantes matériels et logiciels se doit d'être développé. Les modules, inhérents à chaque composante, ne fonctionnent pas indépendamment mais sont couplés les uns aux autres par des liens physiques directs ou indirects décentralisés et événementiels. Des échanges d'informations entre la partie matérielle et la partie logicielle se créent ainsi au fur et à mesure de l'avancée du processus de façon à garder en temps réel une maîtrise du process. Chaque module sera brièvement présenté ci-dessous. Il convient de noter néanmoins que pour un système complet, il peut être intégré autant de modules et d'idées que nécessaires, même si dans le cadre de cette étude seuls certains modules seront présentés en détail.

2.2 La composante matérielle

La composante matérielle est conçue et organisée comme un concept ouvert et modulaire, comme le montre la Figure 2.2. Selon les caractéristiques du procédé de FACS, six modules peuvent alors être considérés : le module de prétraitement (travail envisagé), le module de projection, le module robot, le module en ligne in situ (travail envisagé), le module soustractif et le module de post-traitement (travail envisagé).

2.2.1 Le module de prétraitement

L'ancrage mécanique et l'adhésion métallurgique sont généralement considérés comme les deux mécanismes mis en jeu pour garantir la tenue d'un revêtement élaboré par projection à froid. Afin d'optimiser l'adhérence interfaciale, un prétraitement avant l'étape de projection est souvent nécessaire.

Comme démontré préalablement, la vitesse critique d'impact des particules diminue avec l'augmentation de la température initiale des poudres. Il existe de fait plusieurs façons d'augmenter la température de ces particules [2]. Le plus simple est d'augmenter la température des gaz propulseurs. Cependant, il existe parfois des limitations physiques sur les éléments chauffants du système CS. Une autre méthode consiste alors à modifier le rapport de la poudre et du gaz porteur. Puisque le gaz vecteur est généralement à température ambiante, cela réduit la température de la poudre sortant de la buse. Ainsi, l'utilisation de réchauffeurs sur les conduites d'alimentation en poudre devient une autre option qui chauffe le gaz porteur de poudre et chauffe ainsi les particules dans ce flux de gaz. Cependant, le gaz porteur chaud rend généralement les particules plus ductiles/visqueuses ce qui peut entraîner une mauvaise coulabilité de la poudre voire un colmatage de la buse de projection [3]. Néanmoins, le préchauffage de la poudre avant impact sur le substrat semble être une méthode envisageable [4,5].

Deuxièmement, plusieurs études ont montré que le traitement thermique des poudres peut considérablement densifier le revêtement et augmenter l'adhérence entre les particules [6,7]. Par projection à froid, il a été démontré en effet que l'oxyde de surface de la poudre réduit non seulement le rendement, mais détériore également les propriétés du dépôt en raison de son effet sur la liaison inter particulaire. Par conséquent, l'utilisation d'un traitement spécifique pour éliminer l'oxyde en surface des particules peut être un moyen efficace pour améliorer le rendement et élaborer des revêtements métalliques de haute performance [8]. Par exemple, le broyage à billes peut être efficace pour cet effet [9]. De même, le prétraitement du substrat a également suscité l'intérêt de nombreux chercheurs. Les particules peuvent adhérer à un substrat si les particules sont ancrées mécaniquement par déformation importante induite lors de l'impact en surface. Mais la nature des matériaux devient alors un critère crucial pour favoriser de tels effets. Lors de la projection de particules malléables sur un substrat dur, la contribution de la déformation du substrat à l'ancrage mécanique est généralement négligeable puisque la déformation du substrat est généralement limitée [10,11]. Par conséquent, le prétraitement du substrat joue un rôle très important dans l'adhérence de la poudre. Parmi les nombreux procédés potentiels, on dénombre le polissage [12,13], le grenailage [14], la texturation de surface [15] voire l'augmentation de la température de surface du substrat [16]

pour améliorer ainsi significativement les propriétés du revêtement.

Ainsi, lors de l'utilisation du procédé cold spray, en particulier lorsque le CS est appliqué dans le domaine de la fabrication additive, le prétraitement devient une partie essentielle au processus d'optimisation.

2.2.2 Le module de projection

Le module de projection est bien évidemment lui aussi un module central dans le composant matériel. Ce module est utilisé pour réaliser des revêtements avec contrôle des paramètres de projection. En fonction des différentes exigences industrielles ou des objectifs de recherche, différents systèmes de projection peuvent être utilisés. Dans le cas d'un système à haute pression (CSHP), les principaux éléments de l'unité de projection sont composés d'une préchambre et d'une buse supersonique, d'un alimentateur de poudre, d'un réchauffeur de gaz et d'une source de gaz comprimé [17]. Cependant, l'application du système CSHP est entravée dans une large mesure par les capacités limitées de l'équipement dans son ensemble. Cela est dû à la grande taille de l'équipement du système CSAM. En parallèle, un système à basse pression (CSBP) est une solution efficace quant à lui de par sa portabilité. Le système se compose de deux unités portables et d'un doseur de poudre. L'une des unités (unité de projection) est réalisée sous la forme d'un outil portable avec télécommande. Normalement, il comprend la partie buse, la partie chauffage du gaz et les pièces auxiliaires, telles que le capteur thermique. L'autre unité (unité de contrôle et de surveillance de la projection) comprend un système relié par un câble électrique avec des éléments chauffants électriques, un système de contrôle de verrouillage (alimenté par la source de gaz comprimé) relié par des conduites pneumatiques avec le réchauffeur de gaz, le doseur de poudre et les manomètres, ainsi que l'indicateur de température du gaz [18]. La Figure 2.3 illustre les deux systèmes de projection utilisés dans ce travail.

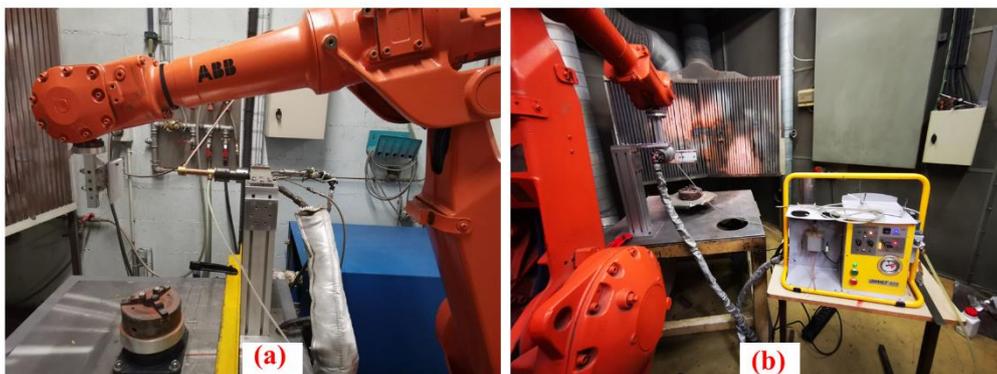


Figure 2.3 Les systèmes de projection utilisés dans cette thèse : (a) système CSHP développé au laboratoire ; (b) système CSBP (Dycomet).

Dans le module de projection, comme mentionné dans la section 1.2.5, les paramètres procédés incluent les paramètres de projection et les paramètres cinématiques. Tous ces paramètres affectent significativement la forme et les propriétés du dépôt comme sa porosité, ses forces d'adhésion, sa rugosité de surface, sa dureté, etc. Bien évidemment, le cold spray à haute pression (CSHP) et le cold spray à basse pression (CSBP) possèdent leurs propres

spécificités et offrent ainsi divers scénarios applicables. Aujourd'hui, avec l'application croissante du CS dans le domaine de la FA, l'optimisation des paramètres est particulièrement nécessaire. En effet, en raison de la large gamme de matériaux potentiels, y compris les métaux, les alliages et les composites métalliques, il existe actuellement un grand nombre d'études notamment appliquées au CSHP, et relativement peu en CSBP. Or, les appareils CSBP sont portables et peu coûteux par rapport aux appareils CSHP. Ceci est ce qui les rend particulièrement avantageux pour la maintenance de certains équipements et permet ainsi de placer le cold spray particulièrement attractif dans le domaine de la FA. Cependant, les performances des dépôts élaborés par CSBP sont généralement insatisfaisantes, c'est pourquoi il est important encore aujourd'hui de les étudier.

C'est justement l'objectif de cette thèse qui propose un protocole d'expériences basé sur le CSBP pour améliorer l'intégration d'un tel procédé en FA en étudiant en particulier l'effet des paramètres sur les propriétés des dépôts. La compréhension de ces paramètres peut ainsi aider à développer les stratégies de traitements et envisager ainsi de nouveaux produits.

Au cours du processus de projection par cold spray, les différences de trajectoires peuvent entraîner des variations dans la microstructure et les propriétés entre autres mécaniques des dépôts. Quatre trajectoires de projection typiques - chemin en zigzag, croisée, parallèle et hélicoïdale - ont été conçues pour préparer les revêtements de Cu. Il est à noter que les résultats expérimentaux montrent que les trajectoires de projection affectent l'ampleur et la distribution des contraintes résiduelles dans les revêtements. Une bonne planification de la trajectoire contribue donc à l'uniformisation des contraintes résiduelles. En outre, les revêtements présentent une anisotropie mécanique de par le processus de projection. Des trajectoires croisées et/ou hélicoïdales peuvent donc être envisagées pour réduire cette anisotropie mécanique [19–21]. C'est pourquoi une stratégie de traitement appropriée est très importante. À l'heure actuelle, de nombreux chercheurs ont proposé différentes stratégies de dépôt pour FACS [1,22–27], comme le montre la Figure 2.4. Dans la Figure 2.4 (A), les résultats ont montré que la FACS peut être réalisée à l'aide de différents masques spécialement conçus pour empêcher le dépôt de matériau redondant et permettre uniquement le dépôt du motif souhaité. Cependant, la fabrication de pièces de formes différentes nécessite la conception de masques spécifiques. La Figure 2.4 (B) montre par exemple une méthode d'optimisation structurelle avancée qui utilise la topologie et le FACS pour concevoir et fabriquer efficacement des composants complexes. Cependant, la conception et l'usinage post-FACS du substrat présentent de grands défis. Par exemple, la Figure 2.4 (C) montre un schéma de pavage triangulaire pour créer des revêtements épais ou des murs verticaux. Cependant, un dépôt typique en forme de triangle peut se construire avec un faible rendement de poudre. Pour tenter de résoudre ce problème, une stratégie de construction couche par couche pour former des formes 3D a donc été proposée récemment [1]. Les résultats de la simulation et des expériences ont vérifié la fiabilité et la précision de cette stratégie comme illustré justement Figure 2.4 (D). Pour construire des pièces de volume important, la stratégie traditionnelle de traitement peut donc être appliquée pour la zone centrale et un mode de tricotage sur les bords. À cette fin, la stratégie de tricotage signifie que la buse effectue un mouvement circulaire au niveau du substrat. Et à chaque couche du dépôt, la torche remonte légèrement pour compenser la distance

de projection. Cependant, on peut constater que le dépôt formé représente une forme cylindrique arrondi à la surface supérieure. C'est pourquoi, la stratégie de fabrication couche par couche mérite tout son intérêt.

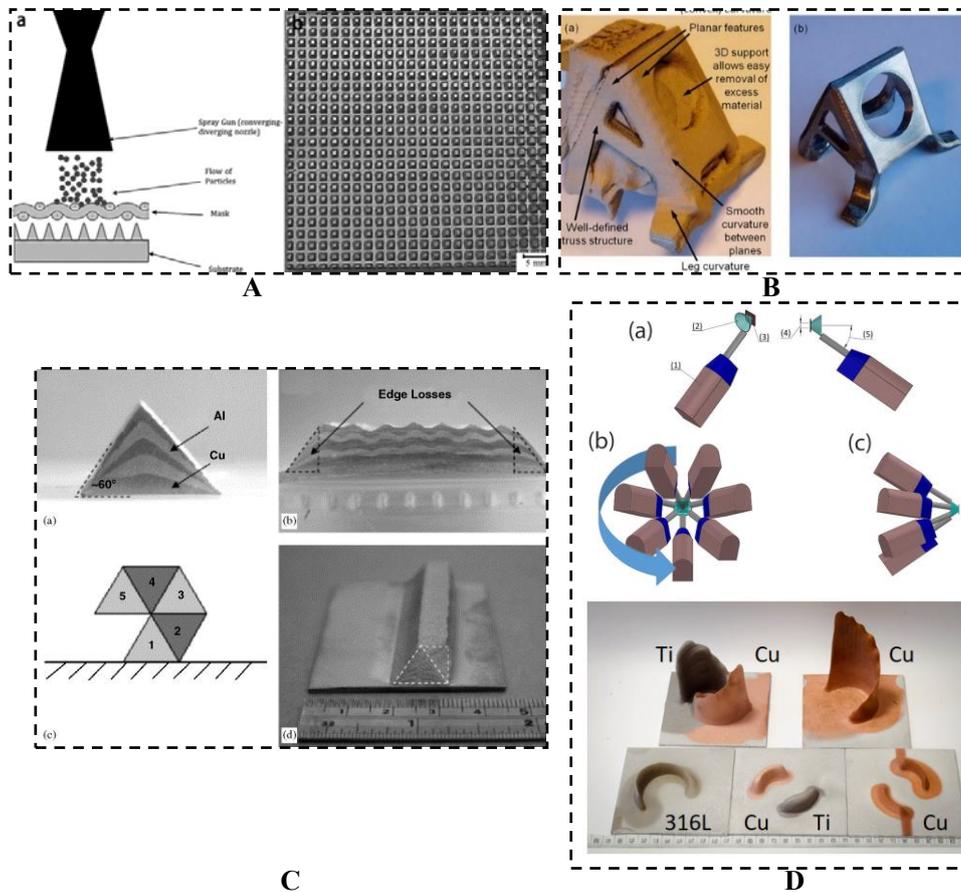


Figure 2.4 Différentes stratégies de dépôt proposées pour FACS : (A) Fabrication du dissipateur thermique des réseaux d'ailettes pyramidales FACS [26] ; (B) Fabrication d'une pièce fabriquée à l'aide de CS et de la technologie d'optimisation de la topologie [25] ; (C) Tessellation triangulaire pour la production de formes primitives [24] ; (D) Pièces élaborées avec une stratégie d'un mode de tricotage sur les bords [27].

La Figure 2.5 montre le schéma d'une stratégie de construction d'un revêtement multicouche. La projection perpendiculaire permet de déposer le matériau en surface du substrat pour former un cordon de forme gaussienne. Cependant, même si le nombre de balayages augmente, le dépôt n'augmente plus après une certaine hauteur et sa forme adopte plutôt les allures d'un cordon triangulaire. Par conséquent, la buse doit être déviée de θ degrés pour compenser les deux côtés et assurer ainsi la perpendiculaire sur les bords. Pour obtenir une paroi de revêtement épaisse et verticale, trois paramètres de compensation doivent être déterminés : la distance de décalage d_s , l'angle de déflexion θ et la distance de recul d_t (épaisseur de couche). Pour chaque couche, la pièce est d'abord projetée verticalement le long de la piste médiane, puis déviée de θ degrés et décalée de d_s le long de la piste gauche et de la piste droite, respectivement, pour compenser les bords du revêtement. Ensuite, le substrat

recule d'une distance d_t pour projeter la couche suivante. De cette façon, la surface de la couche devient alors adaptée pour la projection de la couche suivante, et le dépôt peut se construire couche par couche de manière stable. Un parfait contrôle des trajectoires de projection s'impose donc.

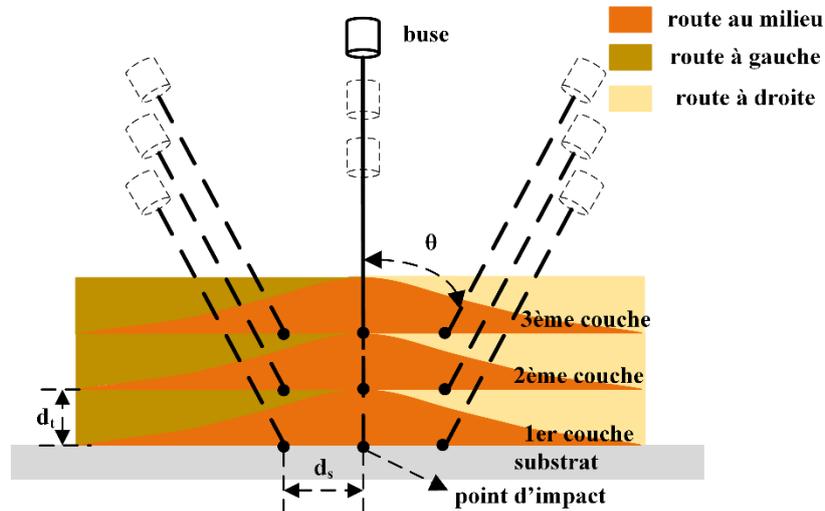


Figure 2.5 Schéma de la stratégie de construction d'un revêtement multicouche.

2.2.3 Le module robot

Comme mentionné précédemment, le robot industriel joue un rôle important dans le processus cold spray et devient donc un module essentiel. Normalement, le module robot se compose d'un robot industriel et d'une armoire de commande. Dans le cas du robot industriel IRB 2400 utilisé pour le CSHP dans ce travail, comme le montre la Figure 2.6 (a), il se compose d'un manipulateur à 6 axes et d'un système de contrôle. La Figure 2.6 (b) affiche l'enveloppe de travail du robot. L'amplitude de mouvement du robot dépend des différentes propriétés du robot telles que la longueur/le diamètre de chaque composant d'articulation. De plus, l'enveloppe de travail est importante pour une application particulière. Pour les applications CS, la trajectoire et le mouvement du robot doivent être contrôlés dans les limites de l'enveloppe. Comme le montre le tableau 2-1, chaque axe du robot a sa vitesse articulaire correspondante et l'axe 6 a la vitesse d'axe maximale soit les performances de mouvement les plus sensibles. Considérant que la programmation hors ligne ne nécessite pas d'utilisation dans un système robotique réel, elle diminue alors considérablement le temps d'arrêt requis pour la programmation du système. Ainsi, L'application d'un robot dans la fabrication additive présente donc de nombreux avantages d'un point de vue industriel. Il augmente la flexibilité pour produire des pièces complexes basées sur les caractéristiques des axes multiples. Il aide à accélérer le processus, à construire une pièce avec une précision élevée, à s'adapter aux nouveaux changements de conception et à réduire les déchets [28–30].

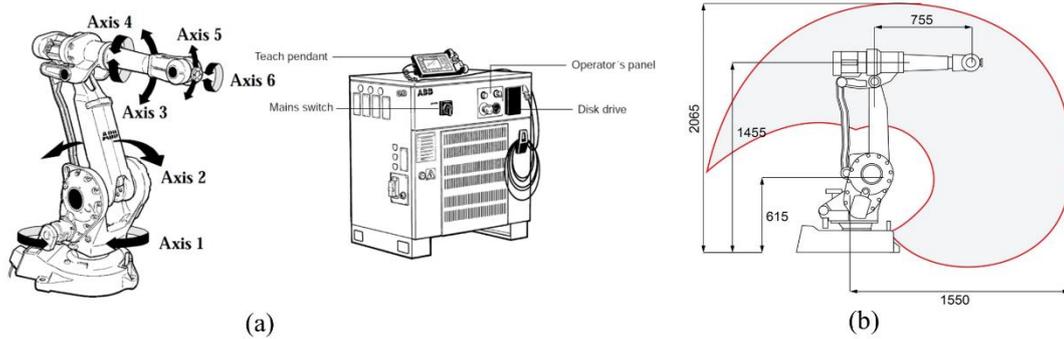


Figure 2.6 ABB IRB 2400 : (a) composants d'un manipulateur à 6 axes et d'un système de contrôle ; (b) enveloppe de travail.

Tableau 2-1 Spécification de mouvement d'axe du robot ABB IRB 2400.

Axis	Gamme de mouvement, °	Vitesse maximale de l'axe, °/s	Accélération maximale de l'axe, °/s ²
1	+180 to -180	150	298.734
2	+110 to -100	150	84.959
3	+65 to -60	150	356.740
4	+200 to -200	360	638.927
5	+120 to -120	360	637.599
6	+400 to -400	450	830.221

Généralement en cold spray, le pistolet est tenu par un robot, et le substrat est fixé sur la table. Cette configuration est particulièrement adaptée à la projection de pièces de grandes dimensions. Cependant, certains tuyaux sont connectés au pistolet, tels que les conduites de poudre, les conduites de gaz et les conduites de signal. Le mouvement violent du robot entraîne donc le mouvement de ces tuyaux, ce qui peut affecter la stabilité de la distribution de poudre ainsi que la sortie du signal. De plus, lorsqu'il s'agit de projection à angles variables, la poudre peut être projetée dans n'importe quelle direction dans l'atelier, ce qui n'est pas propice à l'entretien des équipements. En particulier, lors de l'exécution de la fabrication additive, cette configuration ne permet pas au substrat de se déplacer. C'est pourquoi, un nouvel agencement se doit d'être envisagé.

Dans le cadre de ce travail justement, la configuration de projection propose de placer le substrat sur le robot et le pistolet fixé sur la table. En redéfinissant le système de coordonnées de la pièce (tenue par le robot) et le système de coordonnées de l'outil (fixé sur la table), des précisions de positionnement et de cinématique peuvent être garanties. De plus, comme le pistolet est fixe, le débit de poudre devient donc plus stable, évitant les contraintes sur le mouvement du robot causées par les tuyaux du pistolet. Cette configuration permet également des mouvements plus complexes du substrat (tenu par le robot) pour construire des composants à structure complexe. Un tel agencement devient donc plus pratique pour l'application FACS, en particulier pour le transfert de composants fabriqués entre différents processus. C'est

pourquoi, cette configuration répond mieux aux besoins de notre procédé hybride proposé.

Dans le système FACSH, le module robot peut en effet être considéré comme un pont entre plusieurs modules de processus (comme illustré Figure 2.7), reliant le module de projection, le module soustractif, le module en ligne in situ et même le module de prétraitement du substrat ou le module de post-traitement de la pièce.

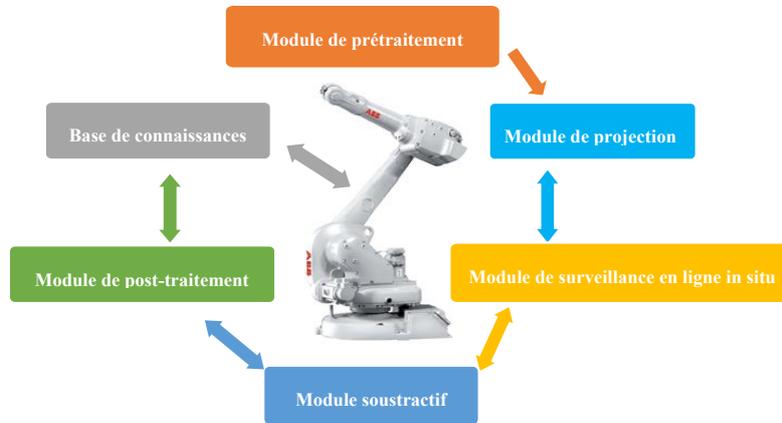


Figure 2.7 Schéma conceptuel du système FACSH.

2.2.4 Le module de surveillance en ligne in situ

Lors du procédé de Fabrication Additive par Cold-Spray (FACS), l'évolution du dépôt fait intervenir multiples paramètres. Lors de la projection couche par couche, une forme inattendue de dépôt peut en effet apparaître. C'est précisément ce manque d'assurance qualité qui devient le principal obstacle technologique au développement du processus FACS. La mise en œuvre de la surveillance en ligne in situ et du contrôle de rétroaction adaptatif semble donc être une stratégie puissante pour résoudre un tel problème [31,32]. C'est pourquoi, un module de surveillance en ligne in situ est inclus dans le composant matériel. Dans cette thèse, un profileur laser 3D à grande vitesse (LJ-V7060, Keyence, Japon) est utilisé pour effectuer la numérisation des contours, l'acquisition et le traitement des données. Le tout étant connecté à l'armoire de commande du robot via un ordinateur (Figure 2.8). Le profileur laser irradie la surface cible, puis reçoit des changements réfléchifs de la lumière initiale pour mesurer des profils (formes en coupe) tels que la hauteur, et la largeur des produits en cours de construction. La forme 3D de la cible est obtenue alors par traitement d'images des données de contour acquises en continu. La plage de mesure est illustrée Figure 2.8(b) avec une précision de mesure de la tête du capteur dans les directions des axes X et Z de 0,4 et 5 μm , respectivement. Un tel module de surveillance en ligne in situ comprend un profileur 3D, les accessoires correspondants et un logiciel d'exploitation, comme illustré Figure 2.9.

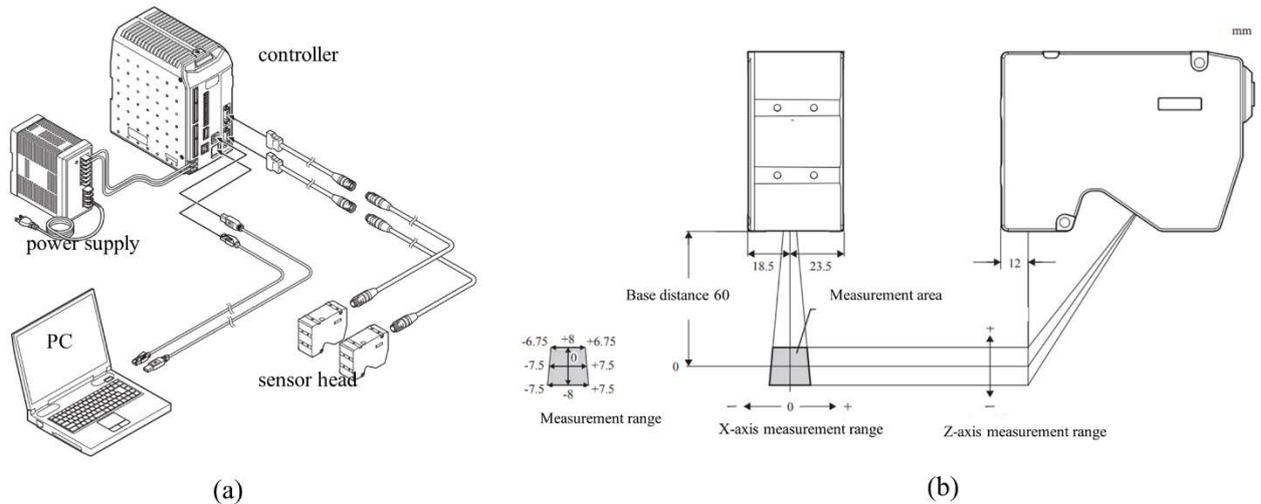


Figure 2.8 Principe de mesure du profileur laser 3D (a) composants ; (b) plage de mesure.

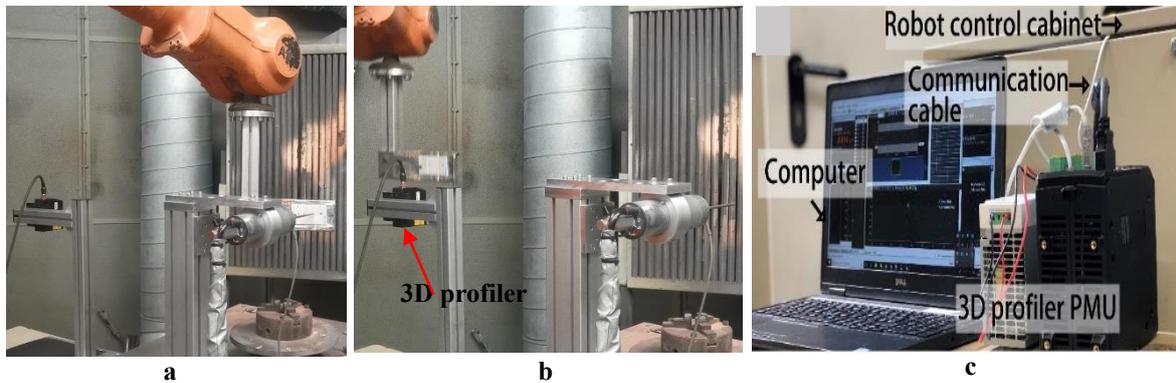


Figure 2.9 Utilisation du module de surveillance en ligne in situ : (a) dans le processus de projection ; (b) dans le processus de mesure ; (c) collecte et traitement des données.

L'utilisation du module de surveillance en ligne in-situ est la suivante : premièrement, la surface du substrat avant la projection est scannée par le profileur 3D, pour obtenir sa position et ses informations géométriques. Par la suite, l'évolution du dépôt est suivie couche par couche. En général, les paramètres cinématiques de projection restent inchangés pendant le processus de projection. Cependant, lors du processus FACS proprement dit, l'évolution du dépôt peut ne pas croître directement couche par couche selon la trajectoire de projection prédéterminée. Si la croissance du revêtement ne peut pas être surveillée et ajustée en temps réel, la forme finale du dépôt est susceptible donc de s'écarter fortement des attentes, entraînant d'énormes pertes économiques. C'est pourquoi, le profileur 3D se doit d'être utilisé pour mesurer, enregistrer et traiter les données du processus de projection. De cette façon, les paramètres et la trajectoire de projection peuvent être ajustés en temps réel.

2.2.5 Le module soustractif

Comme mentionné précédemment, la résolution de la pièce fabriquée par FACS est généralement faible. De plus, le procédé CS a la caractéristique de "one-stroke", ce qui signifie

que le dépôt ne peut pas être interrompu pendant le processus de projection. En raison de l'effet d'inertie du mouvement du robot, la vitesse du pistolet est donc considérablement réduite lors du changement de direction du mouvement, ce qui peut entraîner alors une surépaisseur du revêtement. Pendant ce temps, la croissance du dépôt peut également être affectée par accumulation de chaleur, ce qui conduit à de grands écarts en termes de qualité et de précision géométrique du revêtement par rapport aux attentes. Par conséquent, l'application d'un processus soustractif pendant le processus de projection devient aussi indispensable.

Pour ce faire, un fraisage (VEVOR Air Cooled Spindle Motor) peut donc être utilisé pour éliminer les parties du revêtement redondantes, comme le montre la Figure 2.10. Lorsque la qualité de surface du dépôt manufacturé n'est plus celle attendue, en fonction des écarts dimensionnels obtenus par le profileur 3D, la fraise élimine donc les éléments indésirables. Il convient de mentionner que la vitesse de déplacement de la pièce, la vitesse de rotation de la fraise et la distance d'alimentation de la pièce pour chaque fraisage sont les paramètres clés du processus. De plus, étant donné que le mouvement à grande vitesse de la fraise génère beaucoup de chaleur pendant le processus de fraisage, un dispositif de refroidissement est nécessaire. Néanmoins, le module soustractif permet d'ajouter de la flexibilité au processus de traitement et élargit alors le potentiel des applications de la Fabrication Additive par Cold -Spray.

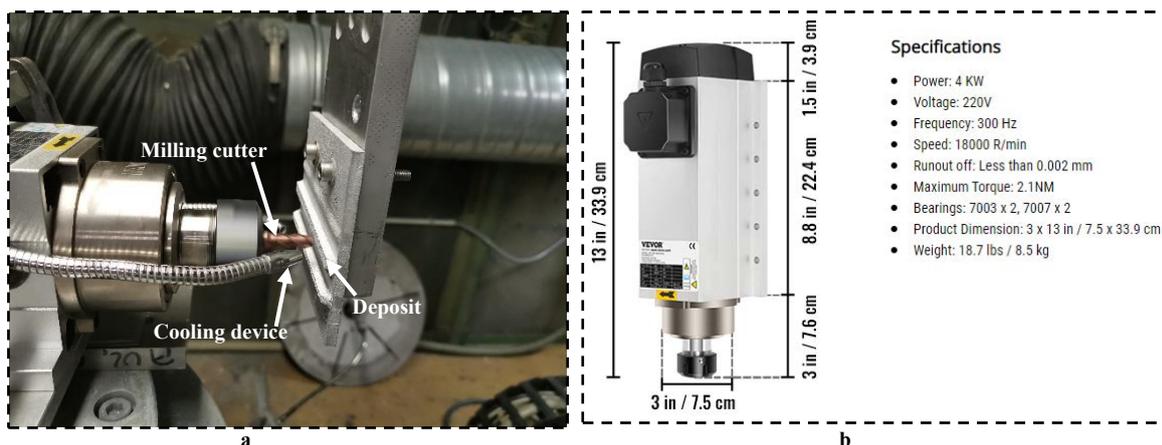


Figure 2.10 Le processus de fraisage.

2.2.6 Le module de post-traitement

Les dépôts CS ont été traditionnellement utilisés pour des applications non structurales. Alors que l'avenir de la technologie CS s'oriente vers la fabrication de composants structurels porteurs, le post-traitement de la pièce projetée devient donc une méthode efficace. Typiquement, le post-traitement comprend des post-traitements de forme (pour affiner la rugosité de surface) et des post-traitements de propriété. Parmi les post-traitements de la forme sont compris le tournage, le meulage, le fraisage, le polissage et le rodage, pour obtenir la forme de dépôt souhaitée et réduire sa rugosité de surface. D'un point de vue propriétés, plusieurs procédés et/ou actions peuvent être envisagés. Le grenailage par exemple, est une méthode importante pour améliorer la résistance à la fatigue et la résistance à la corrosion des revêtements [33,34]. Leurs surfaces sont ainsi soumises à des contraintes de compression et la surface du revêtement peut être aplanie et sa porosité fermée. En complément, divers effets liés

à la température par traitement thermique ou traitement laser peuvent être envisagés. En effet, les revêtements élaborés par CS présentent souvent des limites d'adhérence entre les particules qui ne sont pas liées métallurgiquement. Ces interfaces non optimales peuvent agir donc comme des initiateurs de fissures lors d'un effort de traction. C'est précisément pour palier à de telles fragilités que des post-traitements thermiques appropriés sont parfois envisagés non seulement pour améliorer la cohésion du matériau [35] voir augmenter la résistance à l'usure (cas des revêtements Ti-6Al-4V [36]), la résistance à la corrosion [37].

Cependant, lors du processus de fabrication additive par cold spray et en particulier pour le dépôt de structures complexes, la simulation en temps réel du processus d'évolution des dépôts et la planification des trajectoires de projection sont des éléments très importants à considérer. C'est pourquoi, une composante logicielle pour mettre en œuvre ces fonctions est donc aussi nécessaire.

2.3 La composante logicielle

Les technologies numériques renforcent la transformation vers la servicisation en intégrant des produits et des services ouvrant la voie aux « Product Service Systems » [38]. Ces nouvelles technologies numériques permettent en effet de créer de la valeur et de renforcer la relation client en accélérant le processus de servicisation dans la fabrication. Par conséquent, une mégatendance sur la numérisation utilisant les technologies numériques pour soutenir la transformation et la mise à niveau de l'industrie manufacturière peut être observée.

La fabrication additive par cold spray (FACS) est une technologie de dépôt de matériaux bien établie qui s'est avérée adaptée à la FA. Cependant, la fabrication de composants autonomes reste encore aujourd'hui un défi, en particulier pour la fabrication de composants avec des structures rotatives spéciales, des structures complexes ou des caractéristiques de forme. Une filière FACS mature devrait donc comprendre au moins les modules suivants : l'acquisition du modèle numérique (3D) du produit fabriqué et le prétraitement des données ; la modélisation et simulation numérique du dépôt de matière ; la planification et génération de trajectoire de projection, le module d'intelligence artificielle (travail envisagé) ainsi que le post-traitement des données du produit initialement fabriqué.

2.3.1 Le prétraitement des données

Le prétraitement des données fait référence à l'acquisition et au prétraitement du modèle numérique de l'objet fabriqué. La maquette numérique de l'objet de fabrication est la base en effet de la FACS. Pour une pièce à structure simple, elle peut être modélisée sur la base des dimensions données connues ou de la méthode de mesure. Dans de nombreux cas, cependant, le dessin de la pièce à fabriquer est inconnu ou difficile à obtenir par mesure. Par conséquent, la numérisation de la pièce physique à l'aide d'un capteur de vision sans contact, combiné à la technologie d'ingénierie inverse (II), est une approche qui peut être envisagée pour la modélisation. Un modèle numérique haute résolution de la pièce peut donc être obtenu grâce à une série de prétraitements et de reconstructions du modèle. Dans cette étude, c'est un scanner 3D commercialisé par le bureau EinScan SE (SHINING 3D en Chine) qui est utilisé pour effectuer l'ingénierie inverse de la pièce comme illustré Figure 2.11. Un tel scanner fonctionne en deux modes : balayage libre et balayage du plateau tournant avec des plages de balayage

maximales correspondantes respectivement de 700×700×700 mm et 200×200×200mm. La taille du plus petit objet qu'il peut numériser est 30×30×30 mm et la précision de numérisation est inférieure à 0,1mm.

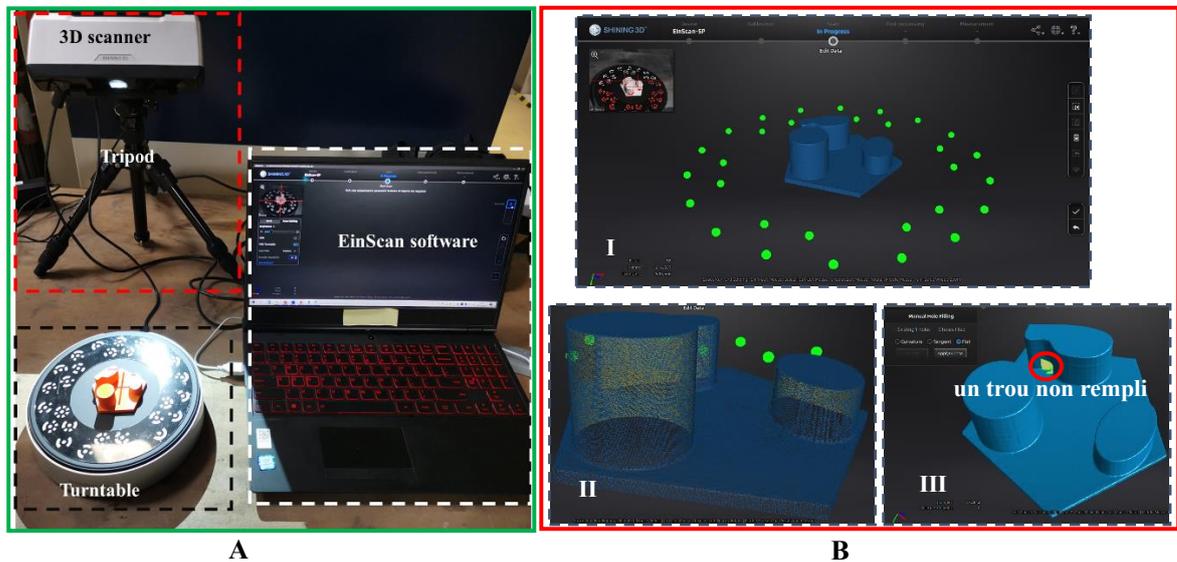


Figure 2.11 Acquisition du modèle numérique de la pièce à fabriquer : (A) Scanner 3D de bureau ; (B) Acquisition du modèle numérique.

La Figure 2.11 illustre le résultat d'une numérisation. Le modèle initial est constitué de nuages de points collectés qui peuvent être utilisés pour l'ajustement de la surface afin d'obtenir un modèle 3D au format STL. Sur cet exemple, on peut remarquer qu'il y a un "trou" dû à l'effet d'ombrage dans certaines parties de la pièce, ce qui empêche sa numérisation. Le trou peut néanmoins être rempli avec la propre fonction de réparation des défauts du logiciel. L'efficacité et la précision de la reconstruction d'une surface restent donc satisfaisantes malgré l'écart du modèle ajusté par rapport à la pièce réelle. En outre, pour un meilleur effet d'ajustement, il existe diverses méthodes, telles que la déviation de la hauteur de la corde, le filtrage homogène et la suppression statistique des valeurs aberrantes, qui peuvent être utilisées pour reconstruire le modèle 3D [39–41].

2.3.2 La modélisation et la simulation numérique du dépôt de matière

L'épanouissement du CS en tant que technologie de FA avec une productivité élevée est encore limité par un contrôle géométrique insuffisant de la forme du dépôt. Par conséquent, des développements substantiels dans la modélisation et la simulation numérique sont encore nécessaires. Au cours du processus de FACS, la forme finale du dépôt est affectée par les paramètres cinématiques de projection, tels que la distance de projection, l'angle de projection et la vitesse de déplacement du pistolet [42–44]. En particulier dans le processus d'accumulation de poudre couche par couche, la possibilité d'observer le dépôt de particules en temps réel peut faciliter l'optimisation des paramètres du procédé. Ainsi, afin d'obtenir un dépôt plus conforme à la forme géométrique attendue, le processus de modélisation et de simulation numérique du dépôt de matière est indispensable.

L'analyse de paramètres du procédé est essentiellement phénoménologique. C'est

pourquoi, quelques modèles multi-physiques existent déjà sur la modélisation numérique du revêtement [45–48]. Un modèle thermomécanique a par exemple été développé pour prédire le comportement du dépôt et l'évolution de la déformation de surface des particules [45]. Une méthode de simulation de revêtements de centaines de micromètres basée sur des vitesses et des tailles de particules de poudre obtenues expérimentalement a aussi été développée [46]. Six modèles de matériaux capables de simuler le comportement en déformation de poudres de cuivre pures lors de la projection à froid sont passés en revue [47]. Afin de contrôler la géométrie du dépôt lors du processus de FACS, un modèle 3D capable de simuler le profil de dépôt a donc été développé [48]. Cependant, ces modèles ne conviennent qu'à la simulation de particules uniques ou de revêtements minces dès lors qu'il ne peut gérer l'empilement des couches suivantes. C'est pourquoi, un modèle de revêtement épais, adapté à diverses pièces de forme libre, a donc été développé avec un logiciel de programmation hors ligne [49]. Dans cette étude, la modélisation du revêtement a été développée avec l'outil Robotstudio™, un logiciel de programmation hors ligne spécifique aux robots ABB.

Par conséquent, afin de développer une méthode générale de modélisation numérique des dépôts, qui peut non seulement être appliquée à la simulation de dépôts sur des substrats de différentes géométries, mais aussi simuler efficacement des dépôts de grande taille ou de forme complexe, cette thèse propose alors une méthodologie numérique générale. Une méthodologie de modélisation de dépôt basée sur une stratégie de reconstruction de géométrie de maillage implémentée dans le code MATLAB est tout d'abord présentée. L'idée de cette méthodologie est de simuler l'évolution couche par couche des dépôts sur la base d'une méthode de modélisation et de certains paramètres clés (vitesse de mouvement de la buse, rendement relatif, etc.) obtenus à partir de pré-expériences. La faisabilité et l'efficacité de cette méthodologie ont également été vérifiés par des expériences et détaillés au chapitre 4.

2.3.3 La planification et génération des trajectoires de projection

Comme dans tous les autres domaines de fabrication additive (SLM, EBM ou AAM), la fabrication additive par cold spray (FACS) nécessite le développement d'une méthodologie efficace de planification et de génération des trajectoires de projection spécifiques au processus. La plupart des applications FACS impliquent l'empilement de matière pour fabriquer une pièce structurée. Par conséquent, les trajectoires de projection FACS doivent être capables de générer une trajectoire 3D complète pour les plateformes de mouvement à 5 ou 6 axes afin d'orienter le pistolet de projection normalement à la surface du substrat à tout moment. De plus, contrairement à certaines autres technologies de FA, l'alimentation en poudre doit rester constante tout au long d'une fabrication. L'alimentation ne peut pas être brusquement arrêtée ou finement contrôlée (délai important pour les changements de débit). Par conséquent, la forme du dépôt est très sensible à la cinématique de la plateforme de mouvement robotique.

Une optimisation multiaxe de l'outil basée sur une stratégie délibérée de "sur-projections" peut donc être proposée [50]. La pointe de l'outil de projection se doit donc de se déplacer hors de la pièce pour effectuer les changements brusques de direction. Cependant, cela peut réduire le rendement de matière, en particulier pour la réalisation de grandes pièces. Actuellement, la trajectoire des pièces aux formes complexes est programmée en code fixe en générant manuellement des points sur la trajectoire. La trajectoire de projection doit donc être repensée

à chaque fois pour les pièces de différentes formes. Il manque néanmoins dans ce domaine de la FACS une méthodologie efficace de planification des trajectoires pour les composants aux formes complexes avec plusieurs caractéristiques de forme. Des recherches supplémentaires sont alors nécessaires pour l'application robotique. C'est précisément l'objectif ici de cette thèse qui propose une méthodologie pour la planification robotique des trajectoires de projection de pièces à plusieurs caractéristiques de forme, élargissant ainsi les perspectives d'application du CS dans le domaine de la FA. Tout d'abord, sur la base du modèle 3D au format Standard Triangle Language (.STL) d'un composant à fabriquer, un algorithme de découpage d'épaisseur de couches uniformes amélioré et efficace a donc été proposé. Dans l'algorithme, un ensemble de plans horizontaux font des intersections avec le modèle 3D de la pièce [51,52]. De nombreux points de données discrets pour chaque couche ont donc été obtenus par découpage, et les points ont été regroupés et triés en fonction des caractéristiques de forme auxquelles ils appartenaient. Ensuite, la planification de la trajectoire a été effectuée pour chaque caractéristique de forme et la transition entre les caractéristiques de forme pour chaque couche du modèle. La trajectoire de chaque caractéristique comprend un chemin de remplissage (FP) et un chemin de compensation (CP). Le chemin entre les caractéristiques est difficile à définir en raison du caractère spécifique du cold spray (le dépôt ne pouvant pas être interrompu pendant le processus de projection) et de l'incapacité de croiser les chemins de projection les uns avec les autres. Par conséquent, un algorithme de Rapidly-Exploring Random Tree (RRT) [53] pour générer le chemin de transition (LP) entre les caractéristiques de forme a été appliqué. Sur la base des trajectoires générées pour chaque couche du modèle, le logiciel Robotstudio™ a été utilisé pour simuler l'évolution du dépôt et vérifier ainsi la fiabilité et la précision des trajectoires de projection robotique. La faisabilité et l'efficacité de cette méthodologie ont également été vérifiées par des expériences et seront discutées en détail dans le chapitre 5.

2.3.4 Le module d'intelligence artificielle

La méthode de conception de Taguchi est la méthode la plus largement utilisée pour estimer les influences des paramètres du procédé sur les propriétés des revêtements [54]. Cependant, il reste difficile par cette méthode de définir les paramètres optimaux précis car la qualité du revêtement est normalement influencée par un effet combiné de nombreux paramètres du processus. Pour compléter un tel travail, la modélisation et la simulation numériques peuvent également être utilisées pour simuler et contrôler le processus de projection [55]. Cependant, en raison du phénomène multi-physique complexe du procédé de projection thermique, la modélisation numérique reste encore limitée pour modéliser les comportements réels. Par conséquent, une méthode d'analyse, de prédiction et d'optimisation minutieuse des revêtements est nécessaire.

Aujourd'hui, l'utilisation de la fabrication intelligente est rendue possible en promouvant des technologies de capteurs et des méthodes de calculs nouvelles et précises à la pointe de l'intelligence. La fabrication intelligente bénéficie de l'intelligence artificielle, qui surveille, analyse et prend les bonnes décisions, en complément des opérations humaines [56]. Sur la base des résultats de détection en temps réel du module de surveillance, le module d'intelligence artificielle peut alors analyser les données et apporter les ajustements appropriés

aux paramètres du processus et aux trajectoires de projection selon les besoins. En prenant le réseau de neurones artificiels (RNA) comme exemple, il peut s'autoréguler et s'adapter à diverses non-linéarités dans la série de données grâce à la formation et à l'apprentissage, ce qui fournit une méthode de haute qualité efficace pour calculer les conditions optimales des processus de fabrication. Cette méthode est principalement utilisée lorsque la relation entre les variables étudiées est complexe ou lorsque la connaissance des corrélations physiques est limitée. Les processus impliqués dans la génération de contraintes résiduelles ou encore les réactions thermodynamiques existantes en projection à froid doivent donc être étudiés à l'aide de modèles informatiques puissants tels que les modèles RNA. Cependant, il est difficile ou coûteux de capturer suffisamment de données sur les procédés CS et les revêtements associés. C'est pourquoi, l'application de l'intelligence artificielle attire de plus en plus d'attention dans ce domaine de la projection à froid (CS).

2.3.5 Le post-traitement des données

L'industrie 4.0 promeut l'utilisation de la fabrication additive pour répondre aux différents défis de fabrication. La FA ne remplacera pas la fabrication soustractive traditionnelle (FS) qui est moins chère et nécessite moins de temps de traitement par rapport à la Fabrication Additive. Cependant, il existe des niches dans lesquelles la FA est plus compétitive ou non remplaçable. C'est pourquoi, la FA est de plus en plus associée à la FS pour bénéficier des avantages synergiques de la combinaison de ces deux technologies et surmonter leurs inconvénients [57,58]. Dans le cas de la FACS par exemple, étant donné que la précision des pièces fabriquées ne peut souvent pas répondre aux exigences, un post-traitement supplémentaire (comme décrit au section 2.2.6) est souvent nécessaire. C'est-à-dire qu'en fonction de la différence de taille entre le dépôt fabriqué et le modèle de pièce, les données du dépôt et du modèle doivent d'abord être post-traitées pour obtenir les paramètres nécessaires au traitement de post-soustraction.

De la même manière, sur la base du modèle numérique du revêtement, les caractéristiques à usiner peuvent être déterminées et les trajectoires d'outils alors générées pour restaurer la résolution du dépôt au même degré que celle de la pièce (Figure 2.12). On peut voir ainsi que pour réaliser la fabrication intelligente en cold spray, l'échange d'informations entre la composante matérielle et la composante logicielle est essentielle.

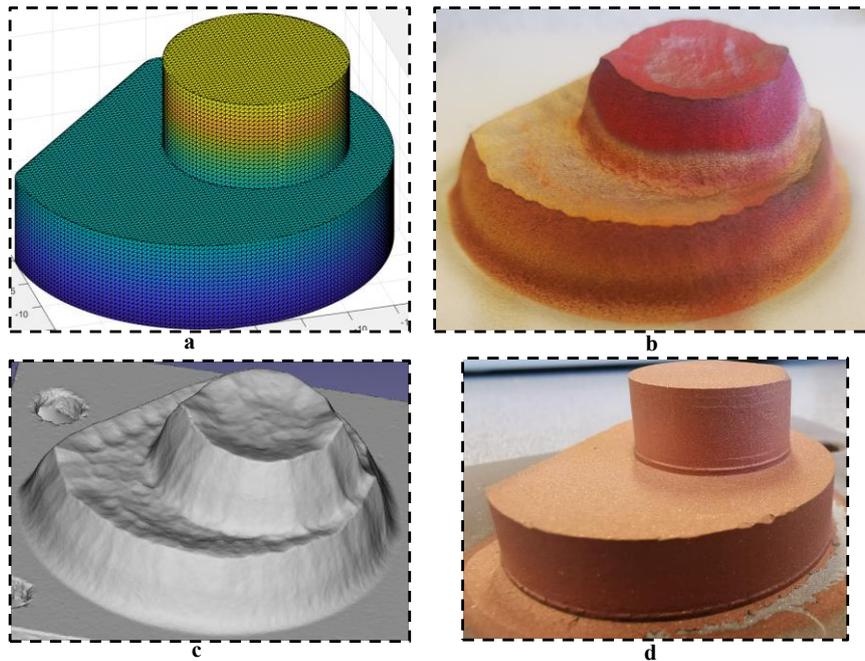


Figure 2.12 Post-traitement des données : (a) modèle 3D de la pièce à fabriquer ; (b) le dépôt manufacturé ; (c) modèle 3D du dépôt construit par rétro-ingénierie ; (d) dépôt après post-traitement.

2.4 Échange d'informations

Alors que les conditions du marché continuent d'évoluer, la FACS est confrontée au défi d'un cycle de vie des produits de plus en plus court et d'une demande croissante de produits personnalisés. Cela nécessite alors que les entreprises soient capables de s'adapter aux changements ce qui augmente la demande de systèmes de fabrication flexibles [59]. La capacité à réagir aux changements liés aux produits et aux processus de production est une exigence essentielle pour un système FACS flexible. Avec l'avènement de l'ère numérique, l'information est un facteur de production important. Par conséquent, un échange d'informations efficace et efficient dans le concept modulaire intégré du système FACS est un aspect clé pour la production des produits. Cela inclut l'échange d'informations entre les modules pour chaque composant et entre deux composants. La Figure 2.13 illustre par exemple le concept modulaire intégré du système FACS. L'échange d'informations entre les deux composants comprend :

- la trajectoire de projection qui est générée dans la composante logicielle et saisie dans le module robot ;
- les informations du dépôt fabriqué dans le module de projection qui sont remontées à la composante logicielle pour le post-traitement des données,
- les données traitées qui sont entrées dans le module soustractif pour finition.

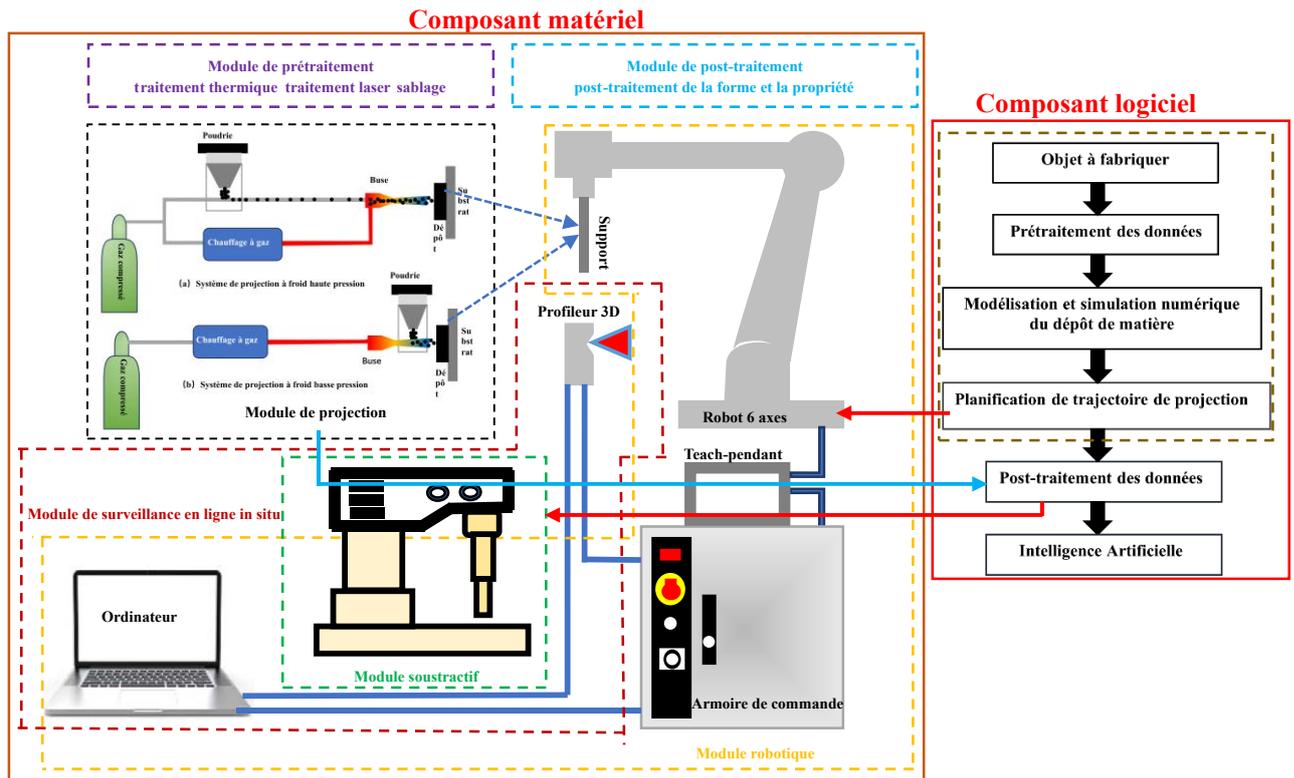


Figure 2.13 Concept modulaire intégré du système FACS.

2.5 Conclusion

Dans le contexte de l'industrie 4.0, l'application du cold spray dans les industries manufacturières génère des données massives qui nécessitent une surveillance et un traitement permanent. C'est précisément l'objectif de ce chapitre de thèse qui présente un nouveau concept modulaire intégré du système de Fabrication Additive par cold spray (FACS). Le concept modulaire de composants est proposé pour mettre en œuvre l'échange d'informations entre les composants du système et les modules au sein des composants. Le composant matériel est utilisé pour mettre en œuvre la fabrication requise pour une pièce conforme. Il comprend 6 modules de prétraitement, projection, robot, surveillance en ligne in situ, traitement soustractif et post-traitement. Dans le même temps, il convient de noter que la fabrication est indissociable du support des données et d'informations par la composante logicielle. La composante comprend alors 5 modules de prétraitement des données, modélisation du dépôt, planification de la trajectoire, intelligence artificielle et post-traitement des données. Il est important néanmoins de mentionner ici que, dans cette composante logicielle, un modèle numérique permettant de suivre l'évolution du revêtement a été développé. De plus, une méthodologie générale de fabrication de la pièce à structure complexe par définition des trajectoires de projection a aussi été proposée.

Le système FACS développé ici permet ainsi de réduire les coûts, d'augmenter la productivité et la flexibilité, d'améliorer la qualité et la durabilité avec une certaine gestion du cycle de vie des pièces. L'exploration des paramètres du procédé devient donc essentielle dans ce cas à la fois dans le composant matériel et dans la composante logicielle. C'est pourquoi, un

protocole d'expériences sur la base des paramètres du procédé est abordé dans le chapitre suivant.

Références

- [1] H. Wu, X. Xie, M. Liu, C. Verdy, Y. Zhang, H. Liao, S. Deng, Stable layer-building strategy to enhance cold-spray-based additive manufacturing, *Additive Manufacturing*. 35 (2020) 101356. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101356>.
- [2] Y. Li, X. Wang, S. Yin, S. Xu, Influence of Particle Initial Temperature on High Velocity Impact Process in Cold Spraying, *Procedia Environmental Sciences*. 12 (2012) 298–304. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.281>.
- [3] T. Van steenkiste, 8 - The role of particle temperature and velocity in cold spray coating formation, in: V.K. Champagne (Ed.), *The Cold Spray Materials Deposition Process*, Woodhead Publishing, 2007: pp. 127–147. <https://doi.org/10.1533/9781845693787.2.127>.
- [4] M. Yu, W.-Y. Li, F.F. Wang, X.K. Suo, H.L. Liao, Effect of particle and substrate preheating on particle deformation behavior in cold spraying, *Surface and Coatings Technology*. 220 (2013) 174–178. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.04.081>.
- [5] Y. Xie, N. Fan, J. Yang, W. Li, R. Lupoi, X. Guo, R. Huang, S. Yin, Improvement of tensile strength of cold sprayed Fe deposits via in-process powder preheating, *Materials Letters*. 316 (2022) 132090. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132090>.
- [6] M. Khan, M. Zunaid, Q. Murtaza, Simulation of cold spray coating for powder pre-heat and impact velocity, *Materials Today: Proceedings*. 46 (2021) 10837–10844. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.780>.
- [7] Q. Mi, W. Guo, Y. Huang, Z. Xing, H. Wang, Microstructure and properties of vacuum cold sprayed lead zirconate titanate coating with different pre-annealing of the powder, *Vacuum*. 206 (2022) 111517. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111517>.
- [8] Y.-J. Li, X.-T. Luo, C.-J. Li, Improving deposition efficiency and inter-particle bonding of cold sprayed Cu through removing the surficial oxide scale of the feedstock powder, *Surface and Coatings Technology*. 407 (2021) 126709. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126709>.
- [9] S.V. Klinkov, V.F. Kosarev, V.S. Shikalov, T.M. Vidyuk, A.E. Chesnokov, A.V. Smirnov, Influence of preliminary heat treatment and ball milling of copper powder on cold spray process, *Materials Today: Proceedings*. 25 (2020) 360–362. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.090>.
- [10] R. Ortiz-Fernandez, B. Jodoin, Hybrid Additive Manufacturing Technology: Induction Heating Cold Spray—Part II: Coating Mechanical Properties, *J Therm Spray Tech*. 29 (2020) 700–713. <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01006-9>.
- [11] G. Bae, Y. Xiong, S. Kumar, K. Kang, C. Lee, General aspects of interface bonding in kinetic sprayed coatings, *Acta Materialia*. 56 (2008) 4858–4868. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2008.06.003>.
- [12] T. Marrocco, D.G. McCartney, P.H. Shipway, A.J. Sturgeon, Production of titanium deposits by cold-gas dynamic spray: Numerical modeling and experimental characterization, *J Therm Spray Tech*. 15 (2006) 263–272. <https://doi.org/10.1361/105996306X108219>.
- [13] J. Wu, J. Yang, H. Fang, S. Yoon, C. Lee, The bond strength of Al–Si coating on mild steel

- by kinetic spraying deposition, *Applied Surface Science*. 252 (2006) 7809–7814. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.09.015>.
- [14] S. Kumar, Influence of substrate roughness on bonding mechanism in cold spray, *Coatings Technology*. (2016) 14.
- [15] R. Kromer, S. Costil, C. Verdy, S. Gojon, H. Liao, Laser surface texturing to enhance adhesion bond strength of spray coatings - Cold spraying, wire-arc spraying, and atmospheric plasma spraying, *Coatings Technology*. (2018) 12.
- [16] M. Bray, A. Cockburn, W. O’Neill, The Laser-assisted Cold Spray process and deposit characterisation, *Surface and Coatings Technology*. 203 (2009) 2851–2857. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.02.135>.
- [17] S. Bagherifard, Fatigue performance of cold spray deposits_ Coating, repair and additive manufacturing cases, *International Journal of Fatigue*. (2020) 18.
- [18] A. Papyrin, V. Kosarev, S. Klinkov, A. Alkimov, V. Fomin, Chapter 4 - Cold spray equipments and technologies, in: A. Papyrin, V. Kosarev, S. Klinkov, A. Alkimov, V. Fomin (Eds.), *Cold Spray Technology*, Elsevier, Oxford, 2007: pp. 179–247. <https://doi.org/10.1016/B978-008045155-8/50004-1>.
- [19] H. Wu, C. Huang, X. Xie, S. Liu, T. Wu, T. Niendorf, Y. Xie, C. Deng, M. Liu, H. Liao, S. Deng, Influence of spray trajectories on characteristics of cold-sprayed copper deposits, *Surface and Coatings Technology*. 405 (2021) 126703. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126703>.
- [20] H. Seiner, J. Cizek, P. Sedlák, R. Huang, J. Cupera, I. Dlouhy, M. Landa, Elastic moduli and elastic anisotropy of cold sprayed metallic coatings, *Surface and Coatings Technology*. 291 (2016) 342–347. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.02.057>.
- [21] S. Yin, Microstructure and mechanical anisotropy of additively manufactured cold spray copper deposits, (n.d.) 20.
- [22] S. Yin, Cold spray additive manufacturing and repair_ Fundamentals and applications, *Additive Manufacturing*. (2018) 23.
- [23] R.N. Raoulison, Ch. Verdy, H. Liao, Cold gas dynamic spray additive manufacturing today: Deposit possibilities, technological solutions and viable applications, *Materials & Design*. 133 (2017) 266–287. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.07.067>.
- [24] J. Pattison, S. Celotto, R. Morgan, M. Bray, W. O’Neill., Cold gas dynamic manufacturing: A non-thermal approach to freeform fabrication, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 47 (2007) 627–634. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.05.001>.
- [25] M.E. Lynch, W. Gu, T. El-Wardany, A. Hsu, D. Viens, A. Nardi, M. Klecka, Design and topology/shape structural optimisation for additively manufactured cold sprayed components: This paper presents an additive manufactured cold spray component which is shape optimised to achieve 60% reduction in stress and 20% reduction in weight, *Virtual and Physical Prototyping*. 8 (2013) 213–231. <https://doi.org/10.1080/17452759.2013.837629>.
- [26] Y. Cormier, P. Dupuis, B. Jodoin, A. Corbeil, Net Shape Fins for Compact Heat Exchanger Produced by Cold Spray, *J Therm Spray Tech*. 22 (2013) 1210–1221. <https://doi.org/10.1007/s11666-013-9968-x>.

- [27] R.F. Vaz, V. Albaladejo-Fuentes, J. Sanchez, U. Ocaña, Z.G. Corral, H. Canales, I.G. Cano, Metal Knitting: A New Strategy for Cold Gas Spray Additive Manufacturing, *Materials*. 15 (2022) 6785. <https://doi.org/10.3390/ma15196785>.
- [28] B. Felbrich, F. Wulle, C. Allgaier, A. Menges, A. Verl, K.-H. Wurst, J.H. Nebelsick, A novel rapid additive manufacturing concept for architectural composite shell construction inspired by the shell formation in land snails, *Bioinspir. Biomim.* 13 (2018) 026010. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/aaa50d>.
- [29] C. Gosselin, R. Duballet, Ph. Roux, N. Gaudillière, J. Dirrenberger, Ph. Morel, Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders, *Materials & Design*. 100 (2016) 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097>.
- [30] E. Barnett, C. Gosselin, Large-scale 3D printing with a cable-suspended robot, *Additive Manufacturing*. 7 (2015) 27–44. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.05.001>.
- [31] M. Khanzadeh, S. Chowdhury, M.A. Tschopp, H.R. Doude, M. Marufuzzaman, L. Bian, In-situ monitoring of melt pool images for porosity prediction in directed energy deposition processes, *IISE Transactions*. 51 (2019) 437–455. <https://doi.org/10.1080/24725854.2017.1417656>.
- [32] J.-B. Forien, N.P. Calta, P.J. DePond, G.M. Guss, T.T. Roehling, M.J. Matthews, Detecting keyhole pore defects and monitoring process signatures during laser powder bed fusion: A correlation between in situ pyrometry and ex situ X-ray radiography, *Additive Manufacturing*. 35 (2020) 101336. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101336>.
- [33] Z. Yang, J. Zheng, K. Zhan, C. Jiang, V. Ji, Surface characteristic and wear resistance of S960 high-strength steel after shot peening combing with ultrasonic sprayed graphene oxide coating, *Journal of Materials Research and Technology*. 18 (2022) 978–989. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.124>.
- [34] H.-L. Yao, X.-Z. Hu, Z.-H. Yi, J. Xia, X.-Y. Tu, S.-B. Li, B. Yu, M.-X. Zhang, X.-B. Bai, Q.-Y. Chen, H.-T. Wang, Microstructure and improved anti-corrosion properties of cold-sprayed Zn coatings fabricated by post shot-peening process, *Surface and Coatings Technology*. 422 (2021) 127557. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127557>.
- [35] W. Wong, E. Irissou, J.G. Legoux, P. Vo, S. Yue, Powder Processing and Coating Heat Treatment on Cold Sprayed Ti-6Al-4V Alloy, *Materials Science Forum*. 706–709 (2012) 258–263. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.706-709.258>.
- [36] P. Sirvent, M.Á. Garrido, J. Sharp, W.M. Rainforth, P. Poza, Improving the oscillating wear response of cold sprayed Ti-6Al-4V coatings through a heat treatment, *Surface and Coatings Technology*. 399 (2020) 126128. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126128>.
- [37] A. Sova, S. Grigoriev, A. Okunkova, I. Smurov, Cold spray deposition of 316L stainless steel coatings on aluminium surface with following laser post-treatment, *Surface and Coatings Technology*. 235 (2013) 283–289. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.07.052>.
- [38] D. Romero, P. Gaiardelli, G. Pezzotta, S. Cavalieri, The Impact of Digital Technologies on Services Characteristics: Towards Digital Servitization, in: F. Ameri, K.E. Stecke, G.

- von Cieminski, D. Kiritsis (Eds.), *Advances in Production Management Systems. Production Management for the Factory of the Future*, Springer International Publishing, Cham, 2019: pp. 493–501. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30000-5_61.
- [39] D.-Y. Chang, Y.-M. Chang, A Freeform Surface Modelling System Based on Laser Scan Data for Reverse Engineering, *Int J Adv Manuf Technol.* 20 (2002) 9–19. <https://doi.org/10.1007/s001700200118>.
- [40] K.H. Lee, H. Woo, T. Suk, Data Reduction Methods for Reverse Engineering, *Int J Adv Manuf Technol.* 17 (2001) 735–743. <https://doi.org/10.1007/s001700170119>.
- [41] F. Yang, Z. Cai, Y. Chen, S. Dong, C. Deng, S. Niu, W. Zeng, S. Wen, A Robotic Polishing Trajectory Planning Method Combining Reverse Engineering and Finite Element Mesh Technology for Aero-Engine Turbine Blade TBCs, *J Therm Spray Tech.* 31 (2022) 2050–2067. <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01434-9>.
- [42] T. Suhonen, T. Varis, S. Dosta, M. Torrell, J.M. Guilemany, Residual stress development in cold sprayed Al, Cu and Ti coatings, *Acta Materialia.* 61 (2013) 6329–6337. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.06.033>.
- [43] S.T. Oyinbo, T.-C. Jen, Investigation of the process parameters and restitution coefficient of ductile materials during cold gas dynamic spray (CGDS) using finite element analysis, *Additive Manufacturing.* 31 (2020) 100986. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100986>.
- [44] P. Magarò, A.L. Marino, A. Di Schino, F. Furgiuele, C. Maletta, R. Pileggi, E. Sgambitterra, C. Testani, M. Tului, Effect of process parameters on the properties of Stellite-6 coatings deposited by Cold Gas Dynamic Spray, *Surface and Coatings Technology.* 377 (2019) 124934. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.124934>.
- [45] T. Yu, M. Chen, Z. Wu, Experimental and numerical study of deposition mechanisms for cold spray additive manufacturing process, *Chinese Journal of Aeronautics.* 35 (2022) 276–290. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.02.002>.
- [46] A. Trinchi, Y.S. Yang, A. Tulloh, S.H. Zahiri, M. Jahedi, Copper Surface Coatings Formed by the Cold Spray Process: Simulations Based on Empirical and Phenomenological Data, *J Therm Spray Tech.* 20 (2011) 986–991. <https://doi.org/10.1007/s11666-011-9613-5>.
- [47] S. Rahmati, A. Ghaei, The Use of Particle/Substrate Material Models in Simulation of Cold-Gas Dynamic-Spray Process, *J Therm Spray Tech.* 23 (2014) 530–540. <https://doi.org/10.1007/s11666-013-0051-4>.
- [48] D. Vanerio, J. Kondas, M. Guagliano, S. Bagherifard, 3D modelling of the deposit profile in cold spray additive manufacturing, *Journal of Manufacturing Processes.* 67 (2021) 521–534. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.013>.
- [49] H. Wu, X. Xie, M. Liu, C. Chen, H. Liao, Y. Zhang, S. Deng, A new approach to simulate coating thickness in cold spray, *Surface and Coatings Technology.* 382 (2020) 125151. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125151>.
- [50] I.M. Nault, G.D. Ferguson, A.T. Nardi, Multi-axis tool path optimization and deposition modeling for cold spray additive manufacturing, *Additive Manufacturing.* 38 (2021) 101779. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101779>.
- [51] P. Mohan Pandey, N. Venkata Reddy, S.G. Dhande, Slicing procedures in layered

- manufacturing: a review, *Rapid Prototyping Journal*. 9 (2003) 274–288. <https://doi.org/10.1108/13552540310502185>.
- [52] W. Liu, L. Chen, G. Mai, L. Song, Toolpath planning for additive manufacturing using sliced model decomposition and metaheuristic algorithms, *Advances in Engineering Software*. 149 (2020) 102906. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2020.102906>.
- [53] C. Yuan, G. Liu, W. Zhang, X. Pan, An efficient RRT cache method in dynamic environments for path planning, *Robotics and Autonomous Systems*. 131 (2020) 103595. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103595>.
- [54] W.H. Yang, Y.S. Tarn, Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method, *Journal of Materials Processing Technology*. 84 (1998) 122–129. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00079-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00079-X).
- [55] W. Fang, T.Y. Cho, J.H. Yoon, K.O. Song, S.K. Hur, S.J. Youn, H.G. Chun, Processing optimization, surface properties and wear behavior of HVOF spraying WC–CrC–Ni coating, *Journal of Materials Processing Technology*. 209 (2009) 3561–3567. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.08.024>.
- [56] W.-Y. Li, C. Zhang, H. Liao, J. Li, C. Coddet, Characterizations of cold-sprayed Nickel–Alumina composite coating with relatively large Nickel-coated Alumina powder, *Surface and Coatings Technology*. 202 (2008) 4855–4860. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.04.076>.
- [57] U.M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, M. Dolen, Current trends and research opportunities in hybrid additive manufacturing, *Int J Adv Manuf Technol*. 113 (2021) 623–648. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06688-1>.
- [58] M. Moussa, H. ElMaraghy, Multiple platforms design and product family process planning for combined additive and subtractive manufacturing, *Journal of Manufacturing Systems*. 61 (2021) 509–529. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.09.019>.
- [59] M. Dotoli, A. Fay, M. Miśkiewicz, C. Seatzu, An overview of current technologies and emerging trends in factory automation, *International Journal of Production Research*. 57 (2019) 5047–5067. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1510558>.

Chapitre 3

Protocole d'expériences

3.1 La conception d'expériences

Comme le cold spray (CS) est de plus en plus appliqué dans le domaine de la fabrication additive (FA), la recherche des paramètres cinématiques de projection est extrêmement importante. En basse pression (CSBP), compte tenu des conditions de projection restreintes tant en termes de température (630 °C maximale) que de pression (12 bars), il est possible alors de traiter les matériaux de façon limitée et contrôlée pour différents domaines d'application. De plus, en raison du rendement élevé accessible en CSHP (jusqu'à 90 %) [1], il est difficile de contrôler avec précision la croissance du dépôt voire même les déplacements du robot [2,3]. C'est pourquoi, occasionnellement, un rendement modérément faible peut devenir acceptable en particulier dans le domaine de la FA malgré les propriétés fluctuantes et les sur-coûts de production engendrés par les baisses de rendements.

C'est justement l'objectif de ce chapitre qui propose un protocole d'expériences pour faciliter l'application du CS en FA en étudiant l'influence des paramètres du procédé (la température et la pression du gaz comprimé) et les paramètres de projection (la distance de projection, la vitesse de déplacement et le nombre de balayages) sur le rendement (DE) de la poudre et les propriétés du dépôt. Les deux procédés à haute et basse pression (CSBP et CSHP) ont leurs propres avantages dans le domaine de la FA et permettent néanmoins de valider le concept modulaire du système FACS.

Sur la base de nombreux travaux développés en particulier en FACSHP, ce chapitre mène ici une expérience préliminaire pour la fabrication additive justement par basse pression pour déterminer les paramètres de projection cinématiques optimaux. Il fait référence à la stratégie de projection précédemment rapportée pour la formation de couches stables [4]. Dans ce chapitre, les effets de la température et de la pression du gaz, de la distance de projection (SoD), de la vitesse de déplacement du pistolet et du nombre de balayages et enfin les propriétés du dépôt, ont été étudiés.

3.2 Les matériaux et les méthodes expérimentales

3.2.1 Les sélections des matériaux et préparations de substrats

En raison des faibles paramètres de pression et de température fixés en CSBP, l'application d'un mélange de poudre métal-céramique est souvent recommandée [5,6]. La poudre de céramique évite en effet le colmatage des buses, active la surface métallique du substrat en éliminant les oxydes, durcit le dépôt et diminue la porosité par compactage. Un mélange de poudre, disponible dans le commerce, de cuivre dendritique (à 70 % en poids) et d'alumine angulaire (à 30 % en poids) (Obninsk, Russie) a été utilisé pour la projection [6,7]. Les tailles de particules varient de 10 à 36 μm avec une granulométrie médiane centrée autour de 20 μm . Les Figures 3.1 (a) et (b) montrent respectivement la microstructure et la distribution granulométrique de la poudre retenue pour ces travaux.

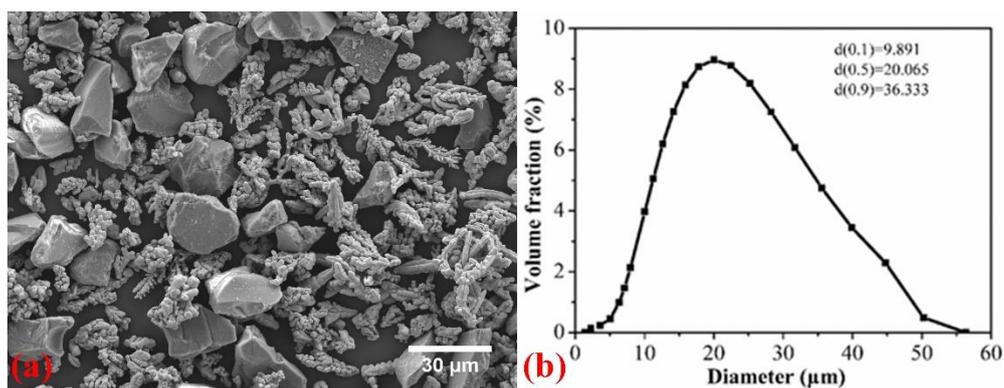


Figure 3.1 (a) Photo MEB de poudres Cu+Al₂O₃ ; (b) Distribution granulométrique des poudres Cu+Al₂O₃.

Par soucis de simplicité, le substrat utilisé dans cette étude est de l'aluminium de série 2017 avec des dimensions de 90 mm × 50 mm × 2 mm. La surface du substrat a été prétraitée par sablage avec des particules d'Al₂O₃ (diamètre : 250 µm) sous une pression de 3 bars pour améliorer l'adhérence de la poudre de cuivre sur le substrat.

3.2.2 Le processus de projection

Un système CSBP avec une buse convergente-divergente optimale de type de Laval, tel qu'illustré Figure 3.2, a ensuite été utilisé pour les expériences. Le système portable DYMET 423 fourni par DYCOMET Corporation se compose d'un poudrier vibrant, d'une unité de commande et d'un pistolet de projection avec un réchauffeur de gaz et une buse supersonique. L'appareil est capable de fonctionner à des pressions de gaz et des températures allant jusqu'à 12 bars et 630 °C, respectivement. La buse a une sortie ronde avec un diamètre interne de 5 mm et un taux d'expansion d'environ 1,37. Pour permettre la fabrication additive de pièces et le bon fonctionnement e du robot, la configuration de projection se propose de placer le substrat sur le robot (IRB4400, ABB, Suède) et de fixer le pistolet sur la table. Ainsi, un profil de dépôt monotrace peut être obtenu par balayage continu du substrat.

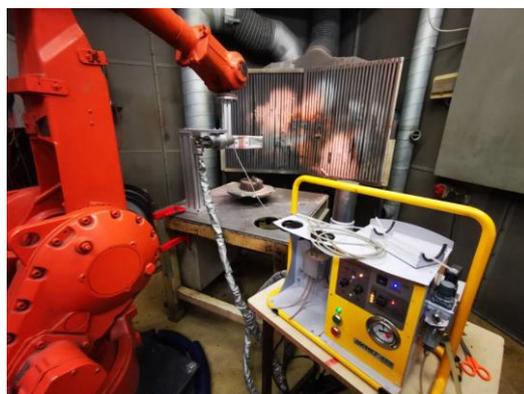


Figure 3.2 Moyens expérimentaux employés au laboratoire lors de l'expérience CSBP.

Pour mener à bien de tels travaux, de l'azote comprimée à basse pression a été utilisé comme gaz propulseur à une pression d'entrée de 9 bars (la pression maximale que

l'environnement expérimental actuel peut atteindre). En raison de la ductilité de la poudre de cuivre, une température maximale de 400 °C a été fixée afin d'éviter toute obstruction du pistolet de projection. Les paramètres cinématiques de projection sont répertoriés dans le Tableau 3-1.

Tableau 3-1 Paramètres cinématiques de projection retenue pour la poudre Cuivre-Alumine

Paramètres	Valeur
Gaz	azote
Pression (bar)	9
Température (°C)	400
Angle de projection (°)	90
SoD (mm)	5, 10, 15
Vitesse de déplacement (mm/s)	50, 100, 150, 200
Nombre de balayages	4, 8, 12, 16

3.2.3 Contr les d u processus de projection

Le procédé cold-spray repose principalement sur les vitesses des particules pour déformer les grains de poudre lors de leur impact et les lier à la surface du substrat [8,9]. Bien évidemment, en raison de la plus faible énergie cinétique des particules acquise en CSBP par rapport au CSHP, le rendement de projection est souvent moindre (moins de 30% [10]). C'est pourquoi, il est toujours crucial de déterminer les paramètres optimaux de projection en particulier avec le processus à basse pression.

Lors de l'étape de projection, l'épaisseur d'un point ou même de plusieurs points sur le profil de dépôt ne peut pas vraiment indiquer le dépôt, et la masse de chaque couche n'est pas pratique à mesurer. C'est pourquoi, cette étude a proposé de caractériser la masse du dépôt par la surface du profil des échantillons (profileur 3D (LJ-V7060, Keyence, Japon) pour différents paramètres tels que la distance de travail (SoD), le nombre de balayages et la vitesse de déplacement des pièces. Parallèlement, une zone de dépôt par passe a été considérée pour caractériser le rendement de projection.

3.2.4 Mesures des propriétés des revêtements

Selon le scénario d'application de la pièce, il est très important de déterminer ses performances. La dureté, la rugosité et la porosité des dépôts ont donc été caractérisées dans cette étude.

La micro-dureté transversale a tout d'abord été mesurée à l'aide d'un indenteur Vickers appliqué avec une charge de 200 g pour un temps de chargement de 15 s. Sept mesures ont été enregistrées à différents endroits sur le dépôt mais placés à la même hauteur pour obtenir une valeur moyenne $HV_{0,2}$, comme le montre la Figure 3.3 et estimer ainsi son homogénéité.

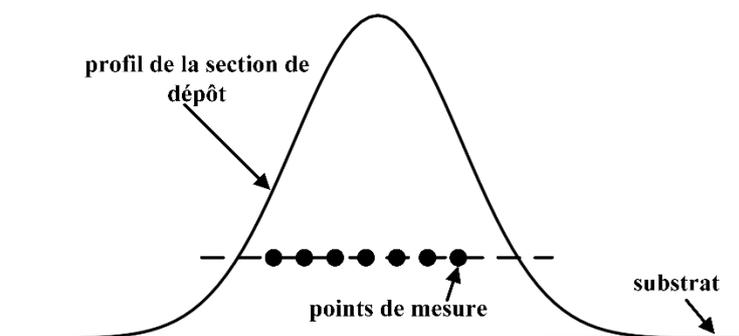


Figure 3.3 Points de mesure enregistrés sur le dépôt.

La rugosité du dépôt est également une propriété importante à mesurer qui peut affecter la résistance à l'usure du matériau alors élaboré. Dans ce chapitre, la rugosité du dépôt a donc été mesurée à l'aide d'un rugosimètre SurfTest SJ-210 (Mitutoyo, Japon) à 7 positions différentes sur la surface du dépôt de façon à extraire ici aussi une valeur Ra moyenne (Figure 3.4).

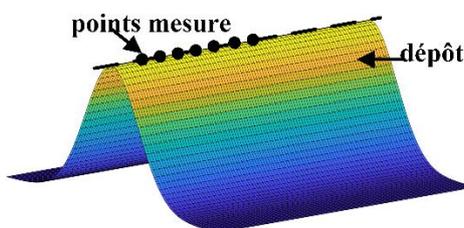


Figure 3.4 Positions de mesure de la rugosité du dépôt.

Ensuite, afin d'aborder la microstructure des revêtements, des coupes transversales ont été examinées à l'aide d'un microscope numérique (VHX-7000, Keyence, Japon), comme illustré Figure 3.5 après découpe et polissage suivant une routine (Kit de papier de verre : grain 400, 800, 1200, 2500 ; MD-Mol ; OP-Chem)).

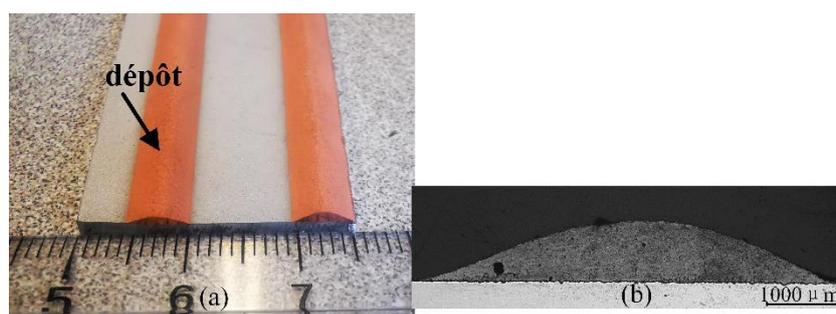


Figure 3.5 Vue d'un échantillon (a) et sa coupe transversale (b).

Les mesures microstructurales de tous les échantillons ont été traitées et analysées à l'aide du logiciel d'analyse d'images open source basé sur Java, Image J, développé par les National Institutes of Health (USA). L'image moyenne de cinq images à un grossissement de 200X a donc été utilisée pour estimer la porosité. La Figure 3.6 montre la microstructure d'un échantillon élaboré à 10 mm de distance de projection, après 16 passages et une vitesse de

balayage de 100 mm/s. Comme illustré, il est possible de distinguer les particules d'alumine (zone noire) des porosités qui se révèle alors inférieure à 1 % (taux de porosité). Cependant, considérant qu'il est difficile de distinguer précisément l'alumine et les pores dans la microstructure d'un dépôt et facile d'éliminer les pores lors du polissage, le résultat statistique de la porosité peut ne pas être précis. La porosité de la poudre de cuivre pur est par contre inférieure à 1 % [11]. De plus, l'effet fortifiant apporté par les particules de céramique réduit significativement la porosité du dépôt comme en témoignent les travaux de Yang et al. [12] et Winnicki et al. [13] (de 25,2 à 4,8 % après ajout de particules d'alumine). La valeur de porosité plus élevée par rapport à celle obtenue dans le présent travail peut être attribuée à la plus grande taille des particules de cuivre (-50 + 10 μm).

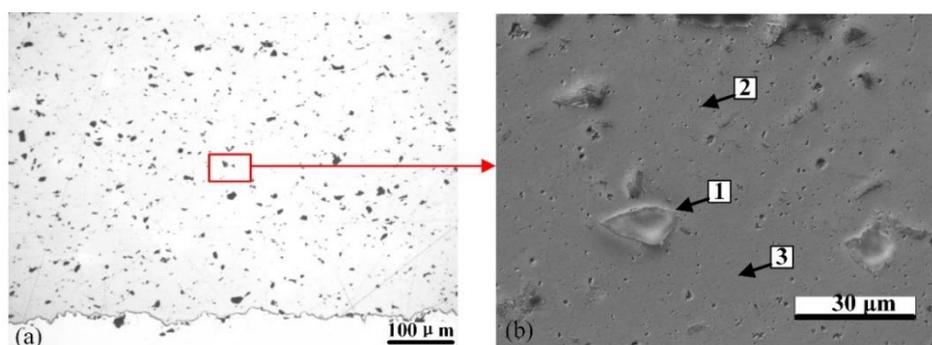
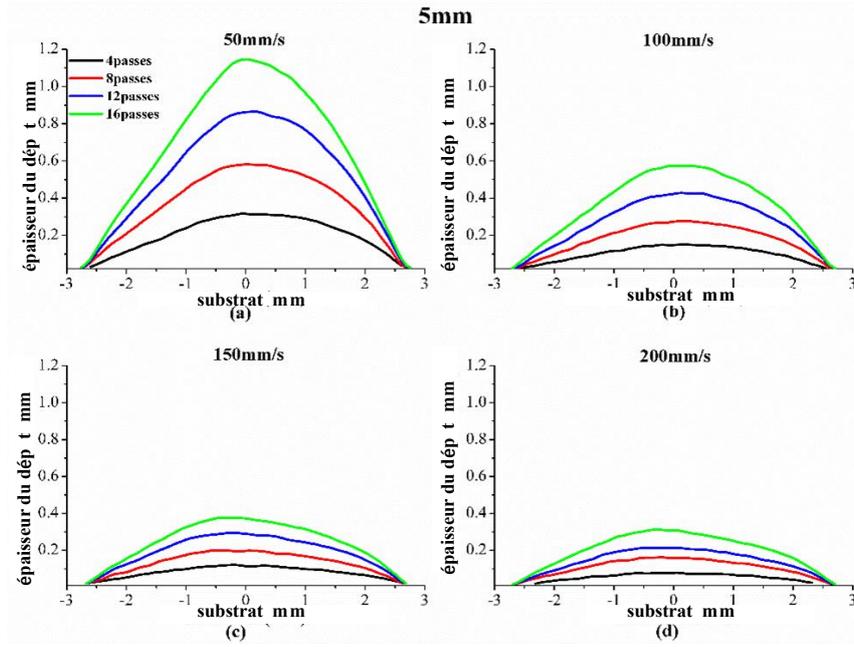


Figure 3.6 Microstructures d'un dépôt de cuivre/ Al_2O_3 élaboré à 10 mm après 8 passes et 100 mm/s de vitesse de balayage. Vue générale et effet de zoom avec : 1-particule de céramique, 2-pores, 3- revêtement de cuivre.

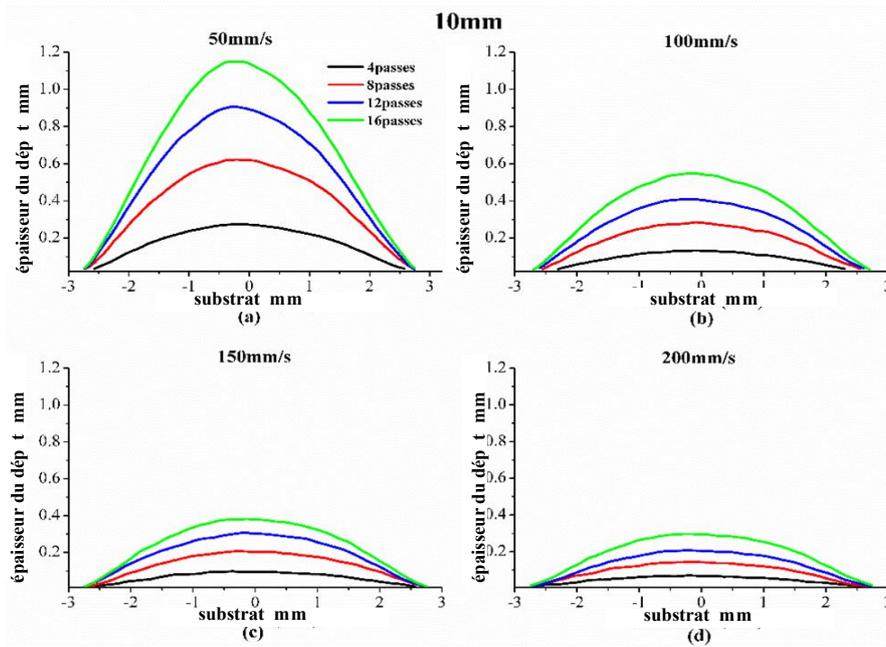
Ainsi, fort de tous ces résultats et ces outils d'investigation, il devient possible alors d'étudier l'influence des paramètres de projection.

3.2.5 Effet des paramètres de projection sur le rendement

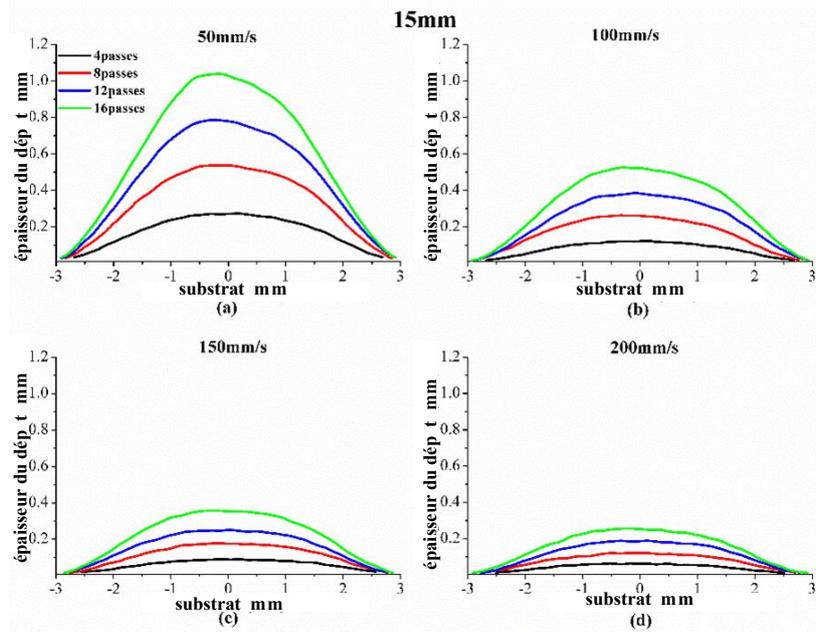
Comme précisé précédemment, les profils de dépôt suivant les paramètres de projection ont pu être déterminés à l'aide du profileur 3D (Figure 3.7).



(1)



(2)

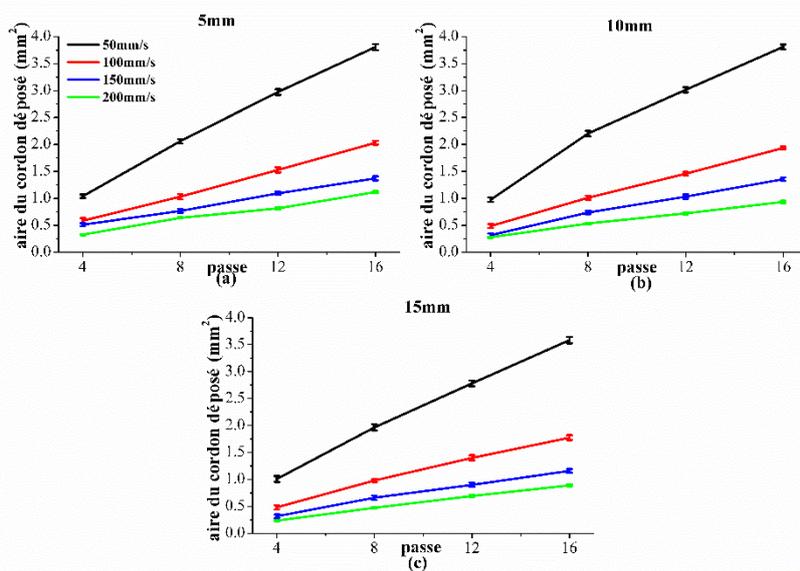


(3)

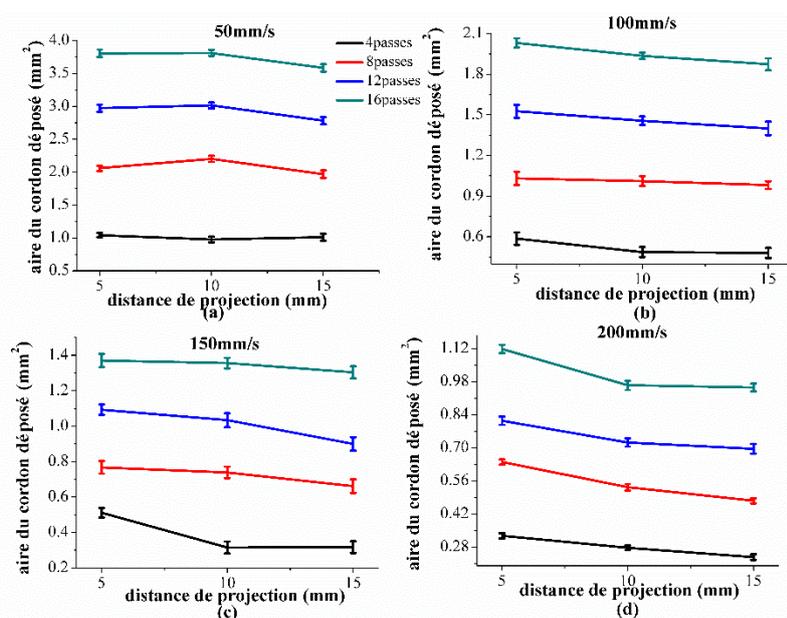
Figure 3.7 Epaisseur du dépôt en fonction de différents paramètres : SoD de 5 mm (1), 10 mm (2), 15 mm (3) : différentes passes de balayage pour une vitesse de pièce de 50 mm/s (a), 100 mm/s (b), 150 mm/s (c), 200 mm/s (d).

De même, la Figure 3.8 illustre les effets du balayage et de la vitesse sur les caractéristiques géométriques du dépôt. D'une façon générale, lorsque le nombre de balayages augmente, l'épaisseur du dépôt augmente tandis qu'elle diminue avec l'augmentation de la vitesse de déplacement. Il est à noter que la tendance croissante des dépôts n'est pas exactement linéaire ce qui semble indiquer une certaine interaction entre les deux paramètres (vitesse de balayage et nombre de passes), partie qui sera discutée ultérieurement

Pour ce qui est de la distance de projection (SoD) (Figure 3.8 (2)), il est évident que la quantité de matière déposée diminue avec une l'augmentation du SoD (ici de 5 à 15 mm) qui peut être certainement attribué à la diminution de l'énergie cinétique des particules [14]. Un écart est néanmoins perceptible par rapport à la tendance générale lors des traitements avec une vitesse de 50 mm/s (a). En effet, considérant que les particules disposent d'une certaine distance d'accélération après avoir quitté la buse de projection, il devient d'autant plus difficile aux particules lors de courtes distances (5mm) et faibles vitesses de balayage (50mm/s) pour atteindre leur vitesse critique propice à l'adhérence au substrat. De tels effets laissent entendre ainsi les résultats alors obtenus.



(1)



(2)

Figure 3.8 Evolution de la quantité de matière déposée suivant le nombre de passes, la distance de projection et la vitesse de balayage (1), SoD (2)

En projection à basse pression, il est généralement admis que le rendement est généralement très faible [13,15,16], environ proche de 30 %. C'est pourquoi, il est indispensable d'étudier les effets des paramètres cinématiques de projection, en particulier lorsque le CSBP est utilisé pour la FA. Comme le montre la Figure 3.9, le taux de dépôt peut être représenté par la surface de dépôt par passe. Deux facteurs peuvent affecter un tel critère : l'accumulation de chaleur et l'angle d'impact de la poudre [2,17]. En effet, à mesure que le nombre de passages augmente, l'accumulation de chaleur augmente au sein de la matière et l'angle d'impact de la poudre diminue compte tenu du profil du cordon qui tend à se rapprocher d'un triangle.

Comme le montre la Figure 3.9 (1), le rendement diminue avec une augmentation du nombre de passes mais pour une distance de 5 mm (distance insuffisante comme démontré préalablement). A l'inverse, à 10 et 15 mm, deux phénomènes semblent co-exister suivant le nombre de balayages (de part et d'autre de 8 passages). De 4 à 8 passages, une augmentation du rendement est à noter et qui pourrait s'expliquer par une certaine accumulation de chaleur au sein du matériau. Au-delà, à mesure que le nombre de passages augmente, il en résulte une forte diminution de l'angle d'impact des particules de poudre, ce qui apparaît alors défavorable au dépôt.

Pour mieux présenter l'effet du SoD sur le rendement de projection, les mêmes données sont utilisées, comme le montre la Figure 3.9 (2). Il apparaît ici que le rendement diminue avec l'augmentation du SoD et la diminution de la vitesse d'impact des particules pour (b), (c) et (d). On peut également noter que le taux de dépôt diminue également avec l'augmentation de la vitesse de balayage comme illustré Figure 3.9 (2). En effet, à des vitesses plus faibles, le

temps de séjour du gaz chaud sur le substrat par unité de longueur est plus long, ce qui tend à augmenter ainsi la quantité de matière déposée en surface [18].

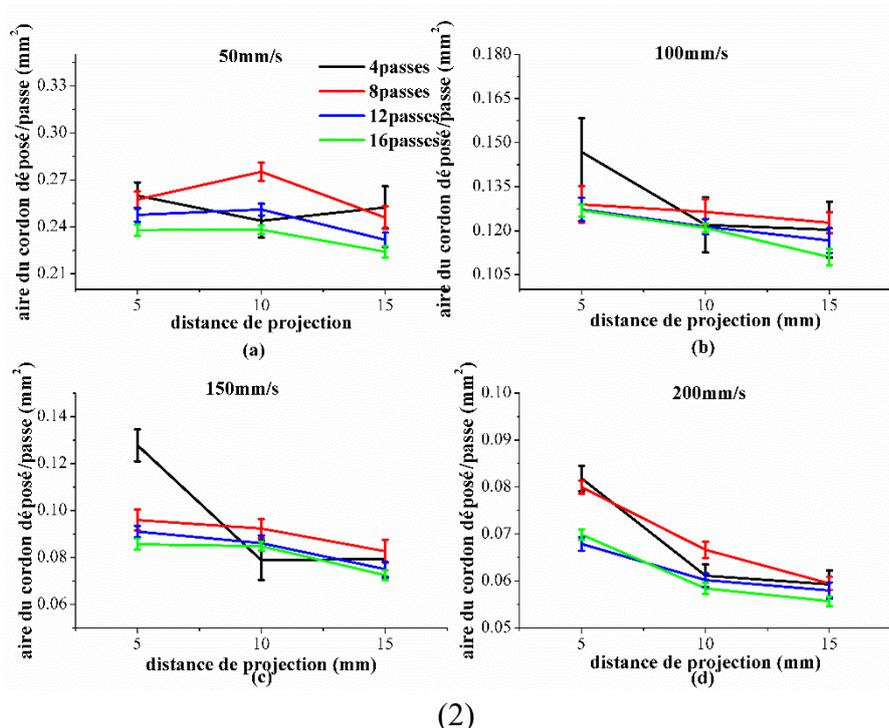
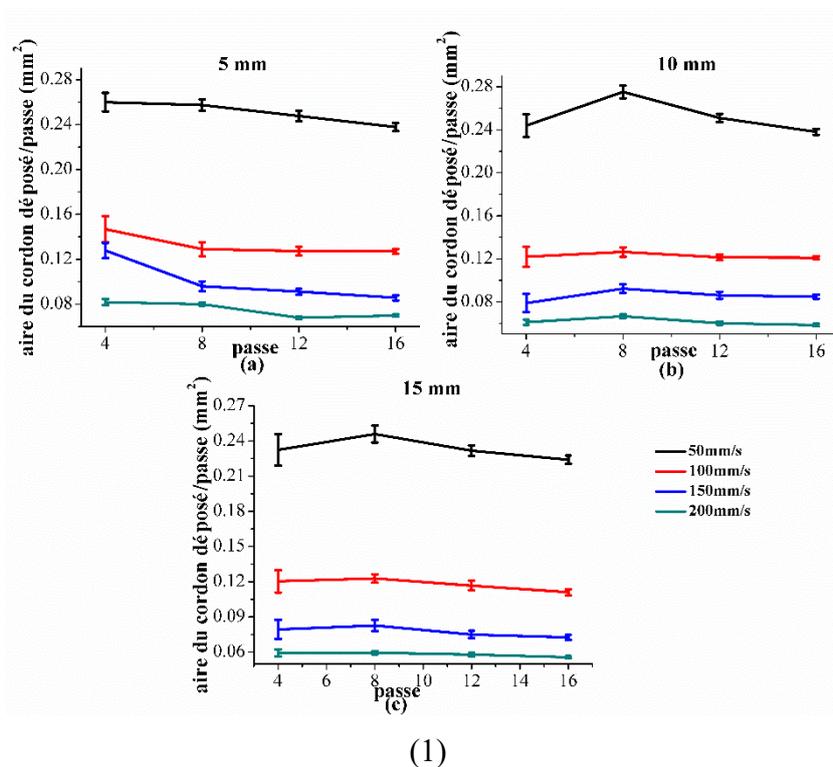


Figure 3.9 Rendement de projection selon le nombre de balayages (1), la distance de projection et la vitesse de déplacement (2).

3.2.6 Effet des paramètres de projection sur les propriétés des revêtements

La Figure 3.10 montre l'effet des paramètres cinématiques de projection sur la micro-

dureté du dépôt. D'une façon générale, quelques soient les conditions d'élaboration, une même tendance est à relever avec une augmentation de la dureté avec le nombre de passages pour se stabiliser ensuite au-delà des 8 passes. Dans certains cas, quelques points viennent à manquer dès lors que le dépôt n'est pas suffisamment épais pour mesurer une telle grandeur (à 200 mm/s avec 4 passes). Néanmoins, il est à relever l'effet du compactage de la poudre qui semble donc presque maximal au-delà des 8 balayages.

Il est possible de distinguer aussi la relation entre la micro-dureté et la vitesse de balayage. En effet, entre 4 et 8 passes de balayage, une augmentation de la vitesse entraîne une diminution de la micro-dureté qui peut s'expliquer par la diminution progressive de la masse de la poudre déposée et donc un compactage moindre. A l'inverse, entre 12 et 16 passes, la compaction ayant atteint son maximum, il n'y a pas de changement significatif de la micro-dureté. Il se confirme donc que c'est bien le nombre de passages de balayage qui affecte la micro-dureté plutôt que la vitesse de déplacement. De la même façon, la Figure montre que le SoD n'a pas d'effet significatif sur la micro-dureté.

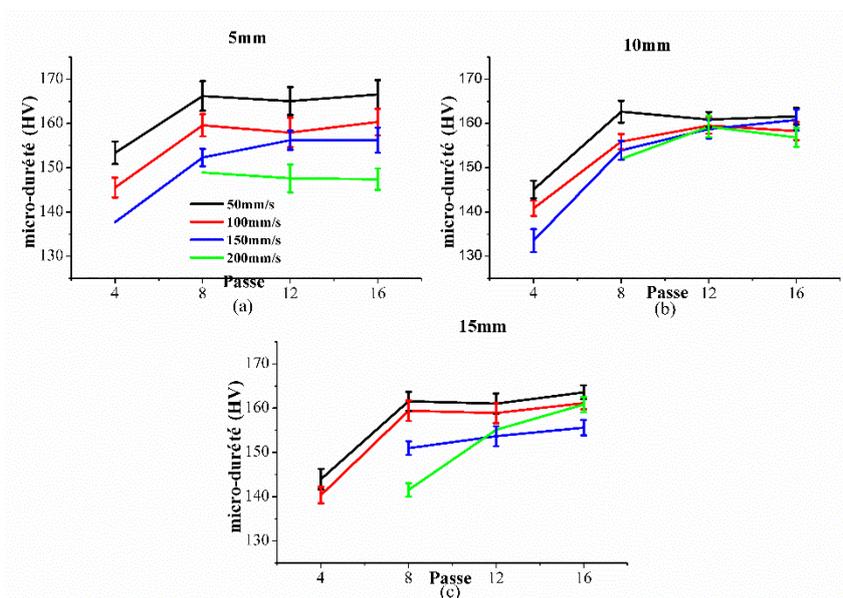


Figure 3.10 Effet du nombre de passes, de la vitesse et de la distance de projection sur la micro-dureté des revêtements.

Pour compléter ces données, la Figure 3.11 montre que la rugosité du dépôt diminue avec l'augmentation de la vitesse de déplacement. En revanche, la rugosité du dépôt ne semble pas liée au nombre de passes de balayage et au SoD.

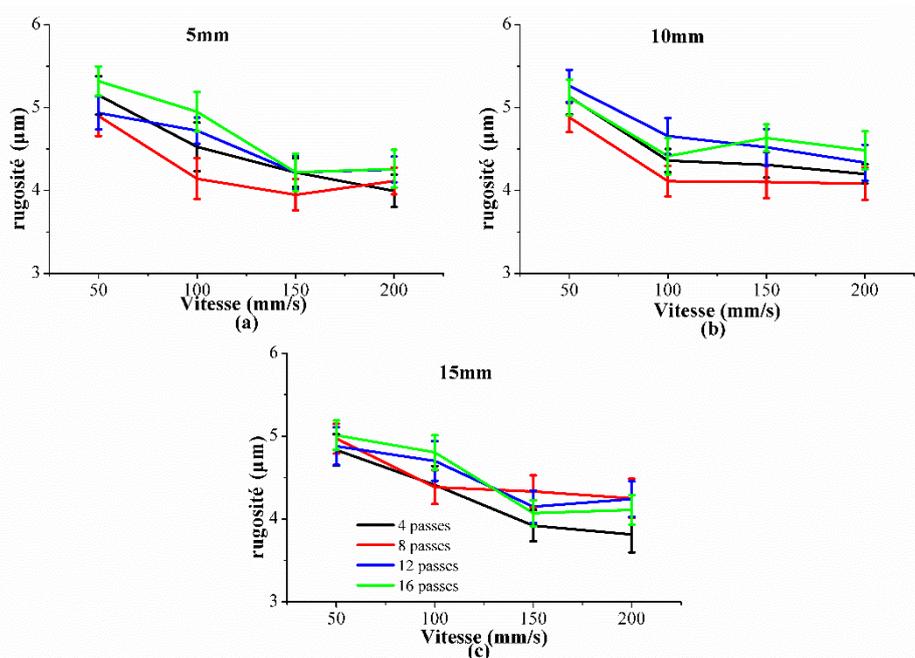


Figure 3.11 Effet du nombre de passages, de la vitesse et du SoD sur la rugosité du dépôt.

Ainsi, c'est sur la base de tous ces résultats que les prémices de la Fabrication Additive par Cold-spray basse pression ont pu être réalisés. La Figure 3.12 montre un mur épais et vertical réalisé à partir des paramètres optimisés sélectionnés préalablement (10 mm, 8 passes et 100 mm/s). Il est à noter malgré tout une légère perte de bord du dépôt sous la forme d'un triangle comme illustré Figure 3.12 (a). Néanmoins, la Figure 3.12 (b) présente le dépôt avec une meilleure verticalité et uniformité après optimisation des conditions d'élaboration par compensation des bords. Les résultats quant aux propriétés de cette première pièce sont présentés quant à eux dans le Tableau 3-2. Il est noté ici une porosité de 0,86 %, une microdureté moyenne de 162,32 HV_{0,2} et une rugosité de surface de 4,61 µm ce qui indique que l'uniformité de la surface du dépôt est acceptable et bénéfique pour la poursuite du dépôt des particules de poudre.

Tableau 3-2 Propriété de la première pièce réalisée en FA par projection cold spray basse pression (CSBP)

	Porosité %	Micro-dureté HV ^{0.2}	Rugosité μm
Valeur	0.86	162.32	4.61
Ecart-type	0.05	4.01	0.26

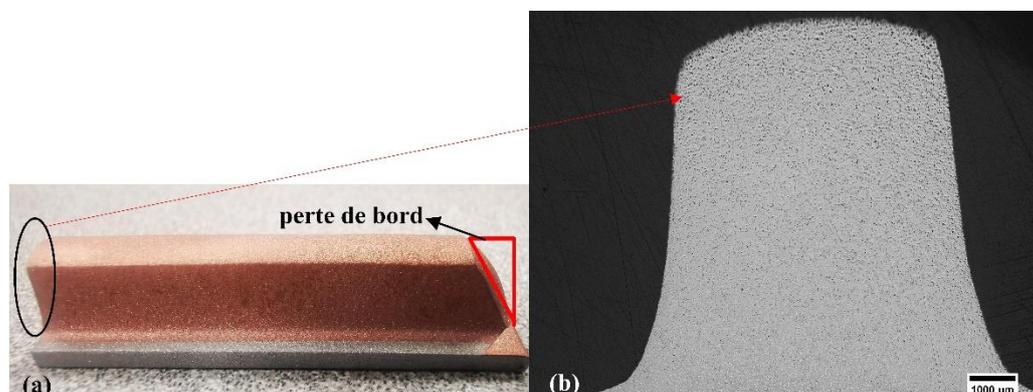


Figure 3.12 Mur épais et vertical de cuivre réalisé par projection cold-spray à basse pression sur un substrat plat d'aluminium.

3.3 Conclusion

Les effets des paramètres cinématiques de projection cold-spray basse pression (CSBP), y compris le nombre de balayages, la vitesse de déplacement de la pièce et la distance de projection, sur le dépôt et les propriétés de ce dernier ont été étudiés dans cette partie. Les résultats expérimentaux fournissent alors une série d'options de paramètres pour la FACSBP et les principales conclusions tirées de cette section sont les suivantes :

(1) La nombre de balayage a un effet positif sur le dépôt, dès lors que l'épaisseur du dépôt diminue avec l'augmentation de la vitesse de la pièce. Quant à la distance de projection, l'épaisseur du dépôt diminue avec l'augmentation du SoD, sauf à 50 mm/s où le dépôt est maximal à une distance de 10 mm. De plus, à des vitesses de 100, 150 et 200 mm/s, la vitesse de dépôt peut être réduite en augmentant le SoD. C'est pourquoi, une distance de projection de 10 à 15 mm semble plus appropriée dans ces conditions représentées ici dans ce travail.

(2) La vitesse de dépôt est principalement affectée par deux facteurs : l'accumulation de chaleur et l'angle d'impact de la poudre. Le rendement de projection diminue en effet avec l'augmentation du nombre de balayages à 5 mm de SoD. A l'inverse, pour les SoD de 10 et 15 mm, le rendement semble augmenter avec le nombre de passes (en particulier de 4 à 8), mais diminue ensuite au-delà. Ainsi, un rendement de projection optimal peut être obtenu lorsque le nombre de passages de balayage est compris entre 4 et 8.

(3) La micro-dureté du dépôt est principalement affectée par le nombre de balayages. Elle augmente avec l'augmentation du nombre de passages (de 4 à 8) pour se stabiliser ensuite au-delà. La vitesse de déplacement et le SoD n'ont quant à eux pas d'effet significatif sur la micro-dureté.

(4) La rugosité du dépôt est principalement affectée par la vitesse de déplacement où elle diminue avec l'augmentation de la vitesse de la pièce. Cependant, les vitesses élevées ne sont pas bénéfiques pour le contrôle robotique. Ainsi, compte tenu des limitations mécaniques du robot, la plage de vitesse de déplacement à privilégier devra se situer entre 50 et 100 mm/s. Pendant ce temps, la rugosité du dépôt ne semble pas influencée par le nombre de balayages et le SoD.

Ainsi, sur la base de la stratégie de projection retenue dans cette étude (en FACSBP [8]) et des propriétés acquises du revêtement, les paramètres optimaux enregistrés pour ce couple de matériaux apparaissent comme :

- 10 à 15 mm de distance de projection,
- 4 à 8 passes,
- 50 à 100 mm/s.

Références

- [1] X. Xie, Z. Tan, C. Chen, Y. Xie, H. Wu, X. Yan, S. Gao, Z. Li, G. Ji, H. Liao, Synthesis of carbon nanotube reinforced Al matrix composite coatings via cold spray deposition, *Surface and Coatings Technology*. 405 (2021) 126676. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126676>.
- [2] H. Wu, X. Xie, M. Liu, C. Chen, H. Liao, Y. Zhang, S. Deng, A new approach to simulate coating thickness in cold spray, *Surface and Coatings Technology*. 382 (2020) 125151. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125151>.
- [3] X. Yan, C. Huang, C. Chen, R. Bolot, L. Dembinski, R. Huang, W. Ma, H. Liao, M. Liu, Additive manufacturing of WC reinforced maraging steel 300 composites by cold spraying and selective laser melting, *Surface and Coatings Technology*. 371 (2019) 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.03.072>.
- [4] H. Wu, X. Xie, M. Liu, C. Verdy, Y. Zhang, H. Liao, S. Deng, Stable layer-building strategy to enhance cold-spray-based additive manufacturing, *Additive Manufacturing*. 35 (2020) 101356. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101356>.
- [5] M. Winnicki, A. Małachowska, M. Rutkowska-Gorczyca, P. Sokołowski, A. Ambroziak, L. Pawłowski, Characterization of cermet coatings deposited by low-pressure cold spraying, *Surface and Coatings Technology*. 268 (2015) 108–114. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.12.070>.
- [6] H. Koivuluoto, J. Lagerbom, M. Kylmalahti, P. Vuoristo, Microstructure and Mechanical Properties of Low-Pressure Cold-Sprayed (LPCS) Coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*. (n.d.) 7.
- [7] H. Koivuluoto, P. Vuoristo, Effect of Powder Type and Composition on Structure and Mechanical Properties of Cu + Al₂O₃ Coatings Prepared by using Low-Pressure Cold Spray Process, *Journal of Thermal Spray Technology*. 19 (2010) 1081.
- [8] C. Singhal, Q. Murtaza, Parvej, Simulation of Critical Velocity of Cold Spray Process with Different Turbulence Models, *Materials Today: Proceedings*. 5 (2018) 17371–17379. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.150>.
- [9] S. Kumar, A.A. Rao, Influence of coating defects on the corrosion behavior of cold sprayed refractory metals, *Applied Surface Science*. 396 (2017) 760–773. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.11.022>.
- [10] X.-J. Ning, J.-H. Jang, H.-J. Kim, The effects of powder properties on in-flight particle velocity and deposition process during low pressure cold spray process, *Applied Surface Science*. 253 (2007) 7449–7455. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.03.031>.
- [11] S. Singh, P. Singh, H. Singh, R.K. Buddu, Characterization and comparison of copper coatings developed by low pressure cold spraying and laser cladding techniques, *Materials Today: Proceedings*. 18 (2019) 830–840. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.509>.
- [12] X. Yang, W. Li, S. Yu, Y. Xu, K. Hu, Y. Zhao, Electrochemical characterization and microstructure of cold sprayed AA5083/Al₂O₃ composite coatings, *Journal of Materials Science & Technology*. 59 (2020) 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.04.041>.
- [13] M. Winnicki, A. Małachowska, A. Baszczuk, M. Rutkowska-Gorczyca, D. Kukla, M. Lachowicz, A. Ambroziak, Corrosion protection and electrical conductivity of copper coatings deposited by low-pressure cold spraying, *Surface and Coatings Technology*. 318 (2017) 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.12.101>.
- [14] W.-Y. Li, C. Zhang, X.P. Guo, G. Zhang, H.L. Liao, C.-J. Li, C. Coddet, Effect of standoff distance on

- coating deposition characteristics in cold spraying, *Materials & Design*. 29 (2008) 297–304. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.02.005>.
- [15] G. Huang, Deposition efficiency of low pressure cold sprayed aluminum coating, (n.d.) 8.
- [16] R.N. Raoelison, E. Aubignat, M.-P. Planche, S. Costil, C. Langlade, H. Liao, Low pressure cold spraying under 6bar pressure deposition: Exploration of high deposition efficiency solutions using a mathematical modelling, *Surface and Coatings Technology*. 302 (2016) 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.05.068>.
- [17] R.A. Seraj, The effect of traverse speed on deposition efficiency of cold sprayed Stellite 21, *Coatings Technology*. (2019) 11.
- [18] V. Katranidis, S. gu, B. Allcock, S. Kamnis, Experimental study of high velocity oxy-fuel sprayed WC-17Co coatings applied on complex geometries. Part A: Influence of kinematic spray parameters on thickness, porosity, residual stresses and microhardness, *Surface and Coatings Technology*. 311 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.015>.

Chapitre 4
Modélisation et simulation numérique du dépôt de
matière

4.1 Expériences préliminaires

Considérant le procédé cold spray à base pression (CSBP) utilisé dans ce chapitre principe de reconstruction du modèle de dépôt est basé sur un flux de particules impactant le substrat (ou le dépôt) et une certaine hauteur de revêtement qui croît sur la position d'impact. Il est connu que la hauteur de revêtement maximale est atteinte lorsque le flux présente un angle d'impact de 90° et que sa hauteur diminue à mesure que l'angle d'impact diminue. C'est pourquoi, il est nécessaire d'étudier l'effet de l'angle de projection sur le profil du revêtement.

Dans ce travail, les flux de particules sont distribués selon un cylindre (le modèle de cylindre sera expliqué en détail plus loin) ce qui explique pourquoi lors de la projection verticale, les angles d'impact de tous les flux de particules sont de 90°. Un rendement relatif (RDE) est alors défini comme le rapport de la masse du revêtement à tout angle de projection autre que 90° sur la masse du revêtement projeté à 90°. Ensuite, lorsque l'angle d'impact du flux de particules est inférieur à 90°, le RDE du flux de particules est multiplié par la hauteur du revêtement à 90° pour obtenir la hauteur réelle générée. Étant donné que la hauteur du revêtement à un angle de projection de 90° peut être mesurée aisément sur la base du profil de la section transversale du revêtement, la clé est donc l'acquisition du RDE par flux de particules. C'est pourquoi dans ce chapitre sont menées des expériences préliminaires de cordons de matière avec différents angles de projection pour déterminer le RDE. De plus, la hauteur de revêtement générée par le flux de poudre de particules à n'importe quel angle peut être obtenue pour faire un modèle du jet de matière.

D'un point de vue projection, le système portable DYMET 423 équipé d'une buse convergente-divergente de type Laval a été utilisé. La buse a une sortie ronde avec un diamètre interne de 5 mm et un taux d'expansion d'environ 1,37. Afin de faciliter toutes les manipulations du robot, la configuration de projection propose alors de placer le substrat sur le robot (IRB4400, ABB, Suède) et le pistolet sur la table. De l'azote comprimé basse pression a été utilisé comme gaz propulseur sous une pression d'entrée de 9 bars avec une consigne de 400°C pour limiter tout problème de colmatage de la buse. Les paramètres cinématiques de projection sont répertoriés dans le Tableau 4-1.

Tableau 4-1 Paramètres cinématiques de projection retenus pour la projection de poudre
Cuivre-Alumine

Paramètres	Valeur
Gaz	Azote
Pression (bar)	9
Température (°C)	400
Angle de projection (°)	90, 80, 70, 60, 50, 40
SoD (mm)	10
Vitesse de déplacement (mm/s)	25
Nombre de balayages	5

Lors de la projection des particules, le jet de matière peut être exprimé par une approximation gaussienne comme suit [1,2] :

$$\varphi = \frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{(x-x\mu)^2}{2\sigma^2} + \frac{(y-y\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Les paramètres gaussiens du modèle, y compris un facteur d'amplitude (A) lié au débit réel de la charge d'alimentation et un écart type (σ) lié au rayon du cylindre de projection, ont été obtenus. Sur la base de la mesure de la hauteur du revêtement à plusieurs positions de section transversale à un angle de projection de 90° , les paramètres gaussiens peuvent alors être obtenus pour définir le profil du modèle sur la base de l'équation (Eq. 4.1). Quel que soit le changement de position de la buse par rapport au substrat, le flux de particules émis peut alors impacter soit le substrat non revêtu, soit le dépôt. Cela signifie que l'angle d'impact du flux de particules n'est pas constamment de 90° et le RDE pas toujours égal à 1. Il est donc important de déterminer la fonction entre le RDE de chaque flux de particules et son angle d'impact pour déterminer la hauteur de revêtement réelle provenant de la buse à cet endroit.

Les profils de revêtement ont été mesurés à l'aide d'un profileur 3D (LJ-V7060, Keyence, Japon) comme l'illustre la Figure 4.1. On peut remarquer que la réduction de l'angle de projection réduit l'épaisseur maximale du revêtement. L'asymétrie du profil devient de plus évidente puisque le pic du profil tend à se déplacer vers la direction de déviation de la buse.

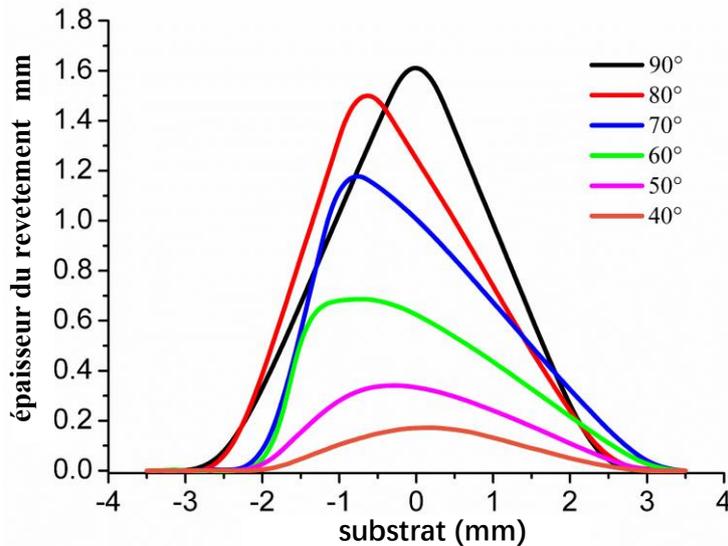


Figure 4.1 Profils de revêtement sous différents angles de projection.

Ainsi, l'effet de l'angle de projection sur le RDE est illustré Figure 4.2. Il démontre qu'un angle de projection décroissant diminue le RDE en particulier lorsqu'il est inférieur à 80° . En effet, lorsque l'angle de projection diminue, la composante de vitesse des particules de poudre perpendiculairement à la surface du substrat diminue. Lorsque la valeur de la vitesse critique ne peut être atteinte, les particules ne peuvent donc pas se déposer/adhérer sur le substrat [3–6]. Comme le montre la Figure 4.2, un polynôme du quatrième ordre est nécessaire pour ajuster la fonction de l'angle de projection au RDE. De cette façon, la hauteur du revêtement produite par n'importe quel flux de particules à n'importe quel angle d'impact peut être calculée pour simuler l'évolution du dépôt.

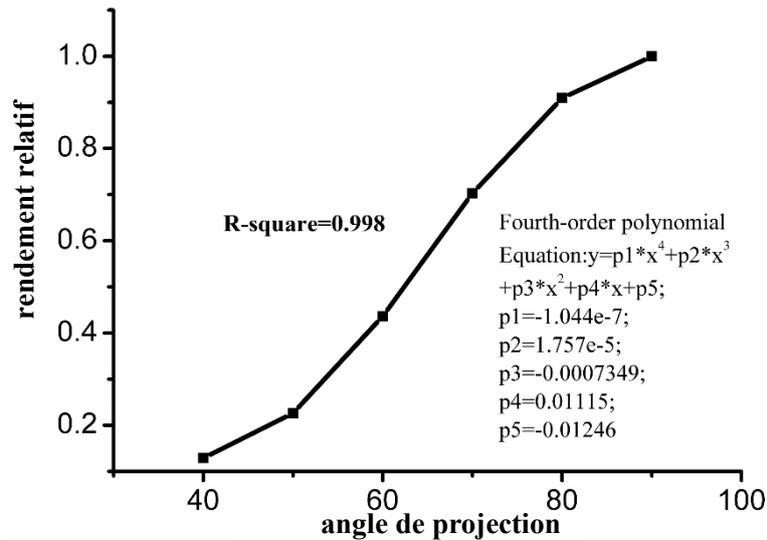


Figure 4.2 Effet de l'angle de projection sur le RDE.

4.2 Méthodologie de modélisation des dépôts

Pour mener à bien tous ces développements, la modélisation et la simulation numérique du dépôt de matière basées sur la stratégie de reconstruction de la pièce seront présentées en détail.

4.2.1 La modélisation de la géométrie du jet statique

En projection thermique (PT), le flux des particules de poudre présente une distribution conique en vol. Cependant, compte tenu des distances de travail radicalement différentes entre la projection thermique et la projection à froid, il est possible de distinguer les profils de matière entre ces deux techniques. La Figure 4.3 montre par exemple deux modèles géométriques du jet statique pour une distribution cylindrique et une distribution conique des flux de particules. En particulier en FA, le modèle du jet de particules est donc bien évidemment essentiel à étudier. A faible épaisseur de dépôt (après quelques couches projetées), aucune différence dans le profil de section transversale du revêtement n'est décelable entre les deux modèles. Il faut une épaisseur plus importante pour que la géométrie basée sur les deux modèles soit significativement différente.

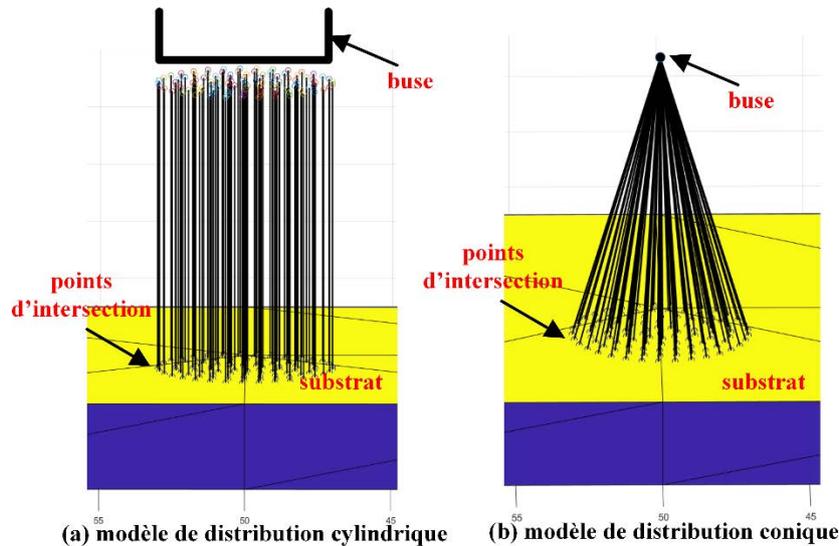


Figure 4.3 Modèle de la géométrie du jet statique.

Lors du processus CS, il est possible d'acquérir une visualisation globale de l'écoulement des particules par compilation d'images [7]. Comme en témoigne la Figure 4.4, presque toutes les particules de poudre sortant de la buse présentent une distribution cylindrique. De ce fait, une distribution cylindrique semble alors plus appropriée qu'une distribution conique pour le modèle de la géométrie du jet statique.

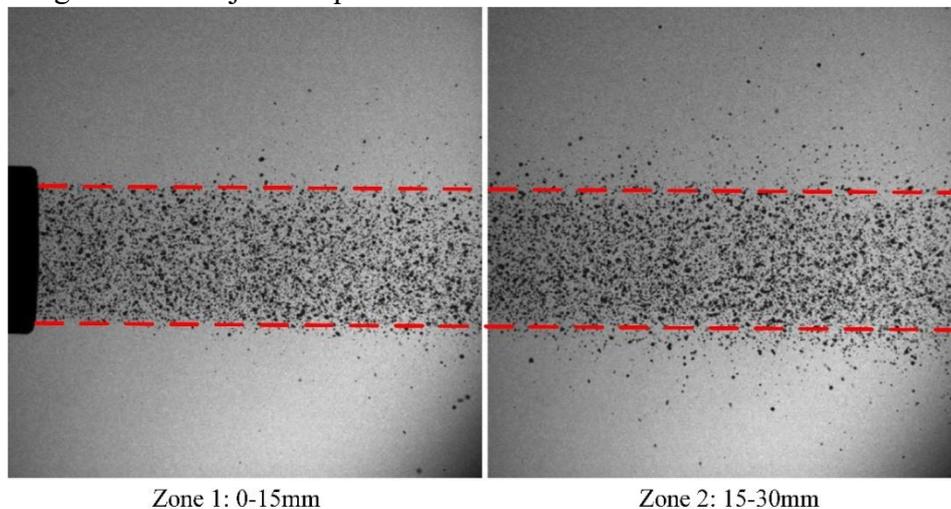


Figure 4.4 Visualisation du jet de particules en sortie de buse [296].

4.2.2 Modélisation du jet de matière

Pour poursuivre le processus, le modèle du jet de matière basé sur la distribution gaussienne a ensuite été développé (Figure 4.5). Dans le plan y-z du système de coordonnées cartésien x-y-z, une série de rayons de projection parallèles à l'axe central (Oz) de la buse sont alors émis depuis la buse. Du fait de la projection verticale, la longueur de projection (la répartition de la masse de poudre sur ce rayon) générée par chaque flux de particules est donc égale à la hauteur de revêtement au point d'impact correspondant. Bien évidemment, la longueur de projection devient plus courte en dehors de la ligne médiane. Par exemple, lorsque

le rayon ab subit une rotation θ autour de l'axe $O-z$ vers le rayon a_1b_1 , la longueur de projection AB devient égale à la longueur A_1B_1 . Cependant, la répartition massique de chaque flux de particules de poudre à l'extérieur de la buse est constante, même si le substrat est incliné. Comme le montre la Figure 4.6, où le plan $z-y$ est tourné autour de l'axe x vers le plan z_1-y_1 , lorsque le point D et le point B sont à la même distance de l'axe central, la longueur de projection C_1D est toujours égale à la longueur AB . Cependant, la hauteur de revêtement CD au point D et la hauteur AB au point B ne sont pas égales. Bien que la distribution de la masse de poudre aux deux points soit la même, les différents angles d'impact des flux de particules entraînent des RDE différents et donc des hauteurs de revêtement différentes. Ainsi, le développement du modèle du jet de matière est donc basé sur deux parties : la longueur de projection produite par chaque flux de poudre de particules, c'est-à-dire la hauteur de revêtement produite par le flux à un angle de projection de 90° , et l'angle d'impact du flux. Différents angles d'impact peuvent en effet conduire à différents RDE du flux de particules.

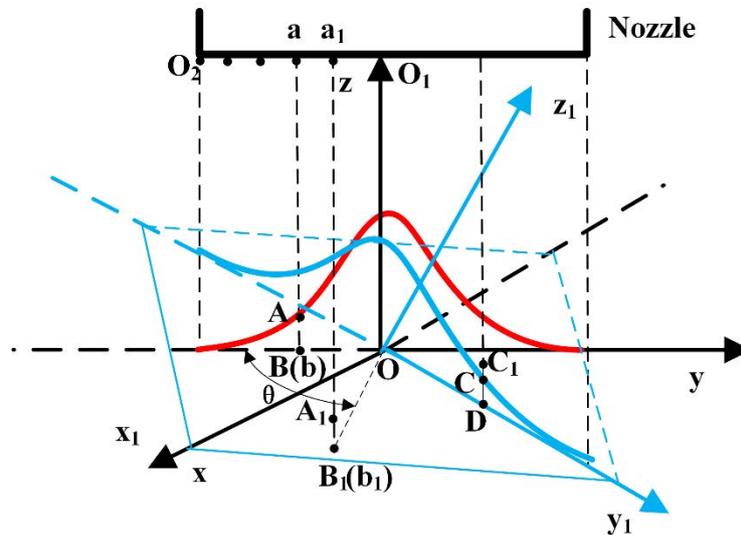


Figure 4.5 Schéma en coupe de deux modèles du jet de matière dans les deux systèmes de coordonnées 3D $x-y-z$ (courbe rouge) et $x-y_1-z_1$ (ligne bleue).

Pour pouvoir développer un modèle du jet de matière à usage général, cette thèse propose le concept de modélisation suivant : premièrement, un nombre limité de rayons parallèles à l'axe de la buse sont émis par la buse, et chaque rayon correspond à un flux de poudres, comme le montre la Figure 4.6 (a). Les intersections de ces rayons et de la surface triangulée du substrat (ou dépôt) sont alors obtenues. Ensuite, sur la base des hauteurs de revêtement résolues à partir de l'équation (4.1) de tous les flux de particules à l'angle de projection de 90° et des RDE correspondants, la hauteur de revêtement réelle aux intersections peut être obtenue. Comme le montre la Figure 4.6 (a), les RDE de tous les flux de particules sont égaux à 1 puisque l'angle d'impact de tous les flux est égal à 90° . Les coordonnées 3D des points de projection sont calculées dans la direction opposée aux directions de projection des flux de particules, comme illustré à la Figure 4.6 (b). Enfin, ces points de projection sont reliés par un patch triangulaire, comme illustré Figure 4.6 (c) qui illustre également la coupe transversale du modèle du jet de matière. Le modèle est composé de plusieurs triangles, et non d'une entité, ce qui augmente

considérablement la vitesse de calcul et de simulation.

Dans le processus de projection, comme le montre la Figure 4.5, un certain nombre de points (par exemple, le point a et le point a_1) sont dispersés à intervalles réguliers sur le rayon O_1O_2 de la buse, chaque point est tourné autour de l'axe OO_1 pour générer les points émis de la Figure 4.6 (a), et chaque point émis génère un flux de particules. Plus l'intervalle est petit, plus le nombre de points émis est grand, ce qui donne des résultats de simulation plus précis mais aussi un temps de simulation plus long. Un grand nombre de résultats de simulation ont montré que, tant que l'intervalle ne dépasse pas 0,2 mm, la précision de la simulation ne changera pas de manière significative. C'est pourquoi, l'intervalle utilisé dans la simulation pour l'ensemble de cette thèse est de 0,2 mm. Il convient également de mentionner que, puisque le modèle est construit en connectant des facettes triangulaires entre des points de projection, c'est-à-dire que les particules de poudre sont considérées comme pointues sans forme ni taille, le modèle reste adapté donc à la simulation de tout dépôt de poudre.

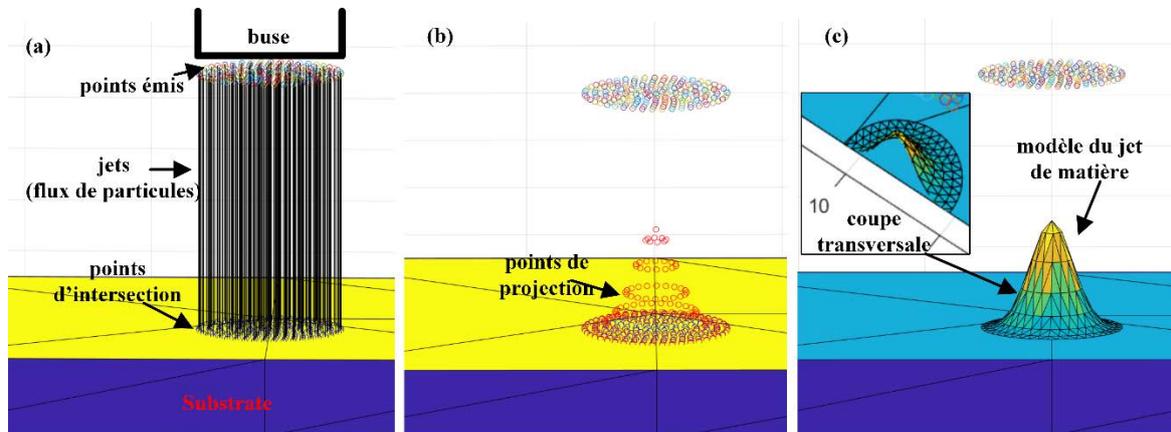


Figure 4.6 Processus de modélisation d'un modèle du jet de matière : (a) création des intersections ; (b) création des points de revêtement ; (c) création du modèle du jet de matière.

En FACS, il est généralement nécessaire de dévier le pistolet (ou la pièce tenue par un robot) pour compenser la perte de bord du dépôt. En effet, dans la plupart des cas, les particules n'impactent pas verticalement le substrat (ou le revêtement déjà déposé). La modélisation du modèle du jet de matière à différents angles de projection est donc nécessaire. Comme en témoigne la Figure 4.7, le point culminant du revêtement diminue avec l'angle de projection et la position du pic se déplace suivant la déviation du pistolet toujours située sur l'axe central de répartition des particules de poudre. Lorsque l'angle de projection est égal à 50° , seule une très faible quantité de particules de poudre se dépose sur le substrat, c'est pourquoi, il ne sera pas considéré dans le processus de modélisation au-delà de cette valeur.

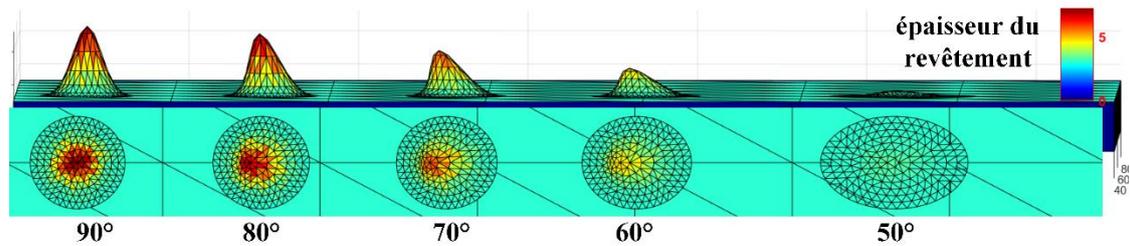


Figure 4.7 Modèle du jet de matière à différents angles de projection.

4.2.3 Modélisation d'un dépôt continu

Afin de constituer alors le revêtement complet, la topographie finale est ensuite générée à partir d'empilements de modèles de jets de matière. La superposition des cordons de matière, est donc à considérer. Pour ce faire, le mouvement continu du robot doit être intégré au modèle mais le logiciel de simulation ne pouvant pas collecter et traiter les données de façon continue, la conversion du modèle en un modèle discret est donc nécessaire. C'est pourquoi dans le processus de simulation, le mouvement est généralement discrétisé en un ensemble de points mobiles pour exprimer le processus de projection du revêtement. Dans ce travail, les coordonnées spatiales, les données de quaternion, la vitesse de déplacement de la pièce et chaque point de déplacement ont donc été dérivés de la simulation sous le logiciel de programmation hors ligne Robotstudio™. Parmi eux, chaque point mobile représente une position en temps réel de la buse, ce qui signifie qu'un modèle du jet de matière peut être généré. Ensuite, avec l'outil MATLAB, le modèle de dépôt continu peut alors être développé à partir des données (Figure 4.8).

Comme représenté sur le modèle, lorsque la buse se trouve à la position du deuxième point de trajet, une quantité égale de particules est émise pour se croiser avec les facettes triangulaires du substrat et le premier modèle du jet de matière. Ainsi, la hauteur de revêtement correspondante augmente aux points d'intersection. Les nouveaux points de revêtement générés sont alors à nouveau impliqués dans la reconstruction du dépôt. Cependant, en raison des irrégularités du jet de matière, l'angle de projection du flux de particules au point d'intersection peut être généré de manière aléatoire. En utilisant la fonction du RDE en fonction de l'angle de projection (Figure 4.2), la hauteur de revêtement de n'importe quel flux de particules à n'importe quel angle de projection peut donc être obtenue. Ainsi, l'uniformité du revêtement peut être contrôlée en ajustant la distance entre les deux pics, c'est-à-dire l'intervalle de points de chemin discret (DPPI). Le DPPI est un produit de la vitesse à laquelle la pièce se déplace entre deux points de trajectoire et du pas de temps du robot. Puisque le pas de temps d'un robot donné est constant, le DPPI dépend de la vitesse de déplacement. Il faut mentionner que lorsque la vitesse de déplacement est trop rapide, l'espacement entre les points de trajet adjacents augmente, ce qui entraîne une surépaisseur non-souhaitée. C'est pourquoi une interpolation entre des points de trajet adjacents devient nécessaire. Selon de nombreux tests de simulation, si le DPPI ne dépasse pas σ ($\sigma = 1,2$ mm), un modèle de dépôt continu proche de la géométrie réelle du revêtement peut être obtenu. Dans ce cas, si le DPPI est supérieur à σ , une interpolation devient donc nécessaire entre deux points du chemin mobile jusqu'à ce que le DPPI soit inférieur à σ ; sinon, le DPPI d'origine est utilisé. Pour poursuivre

le processus d'élaboration, la Figure 4.8 (b) montre la modélisation du dépôt continu sous des paramètres de projection cinématiques constants. On constate que l'uniformité est acceptable lorsque le DPPI ne dépasse pas σ ; c'est-à-dire que la topographie du dépôt généré par des points de chemin discrets dans la simulation peut être utilisée pour prédire la topographie réelle de la couche de matière.

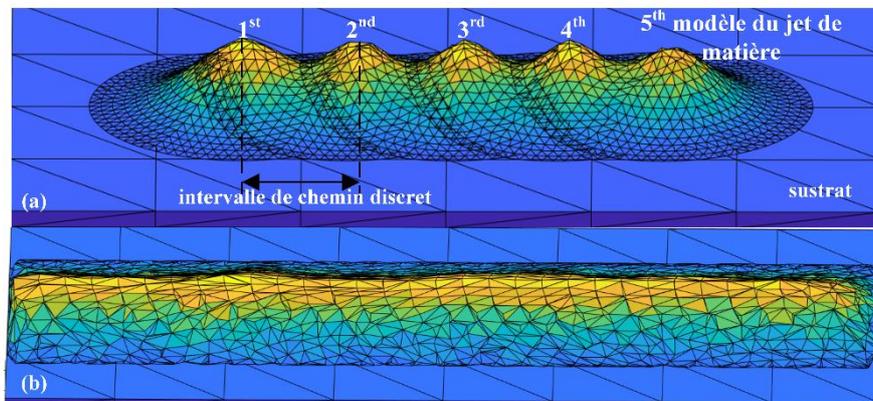


Figure 4.8 (a) Modèle de dépôt par points de chemin discrets ; (b) Modèle de dépôt continu.

Comme il est déjà établi en projection, la croissance d'un dépôt est toujours influencée par de nombreux paramètres cinématiques de projection, tels que l'angle de projection, le SoD et la vitesse de déplacement. L'étude de l'effet de ces paramètres sur le dépôt est donc toujours essentielle. Considérant que le SoD doit être constant pendant le processus FACS, l'objectif de cette thèse est donc de montrer l'effet de l'angle de projection et de la vitesse de déplacement sur l'évolution du dépôt. Comme le montre la Figure 4.9 (a), pour deux vitesses de balayage (25 mm/set 50 mm/s), et après soustraction de l'épaisseur du substrat (de 0,30 mm), l'épaisseur du revêtement évolue donc de 0,76 mm et 0,38 mm, respectivement. Le résultat est cohérent avec la conclusion selon laquelle l'épaisseur du revêtement est inversement proportionnelle à la vitesse de déplacement [30,31]. La Figure 4.9 (b) montre quant à elle l'évolution du modèle de dépôt continu, car l'angle de déviation du canon par rapport au substrat varie de -45° à 45° dans le plan y-o-z et se déplace de manière synchrone dans la direction de l'axe x (rouge ligne). Il est à noter que la hauteur maximale de dépôt augmente progressivement puis diminue, et l'angle de projection correspondant augmente jusqu'à 90° puis diminue progressivement. La symétrie de la distribution des dépôts change bien évidemment avec la direction de projection et ces résultats sont cohérents avec l'évolution du dépôt.

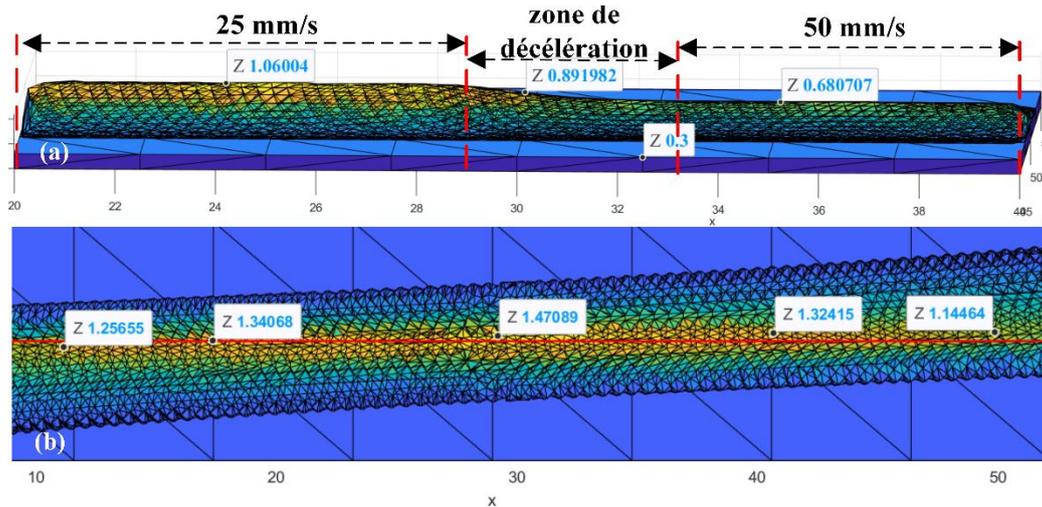


Figure 4.9 (a) Modèle de dépôt continu à différentes vitesses de déplacement ; (b) Modèle de dépôt continu sous différents angles de projection (mm).

Le modèle de dépôt continu peut également être construit sur d'autres substrats de topographies différentes. La Figure 4.10 (a) par exemple illustre l'application du modèle sur une surface sphérique, où la surface sphérique se déplace à une vitesse constante avec un angle de projection de 90° . La Figure 4.10 (b) montre ensuite l'application du modèle de dépôt continu sur une pièce avec un effet d'ombre où chaque ligne noire représente la ligne centrale de la buse lorsque la pièce se déplace vers une certaine position. Dans ce cas, la pièce peut être divisée en trois zones :

- lorsque la pièce passe de la zone 1 à la zone 3, à mesure que le SoD s'allonge, l'épaisseur du dépôt h_z diminue (557,4 mm au point d'impact de la zone 1 et 471,6 mm au point d'impact de la zone 3). De telles évolutions ont déjà été démontrées préalablement où avec une distance de projection optimale de 10 mm (SoD), il a été constaté qu'au-dessus ou en dessous de cette valeur, le rendement diminue [8,9].
- Lorsque la pièce passe de la zone 1 à la zone 2, le SoD augmente et l'angle de projection est réduit de 60° à 30° . De fait, une chute importante de l'épaisseur du dépôt h_x jusqu'à 22,3 mm est mesurée.

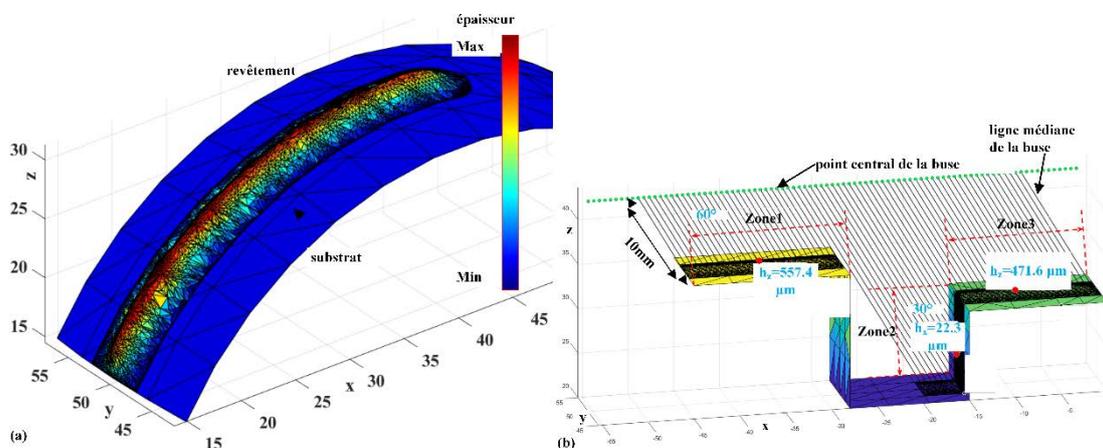


Figure 4.10 Modèle de dépôt continu : (a) Sur une surface sphérique ; (b) Sur une pièce avec

un effet d'ombre (mm).

4.2.4 La stratégie de projection FACS

Ainsi, sur la base du modèle établi, une prédiction précise de l'évolution de la topographie du dépôt peut être faite et appliquée à la Fabrication Additive par Cold-spray (FACS). Pour faciliter une telle application, il est essentiel néanmoins de rappeler que la pièce se constitue par l'empilement de parois de revêtement épaisses et verticales. La Figure 4.11 montre par exemple la stratégie de construction d'un revêtement multicouche. Pour obtenir une paroi épaisse et verticale, il faut déterminer alors trois paramètres de compensation : la distance de décalage d_s , l'angle de déflection θ (pour éviter un dépôt au profil de type triangulaire), et la distance de recul du substrat d_t (pour assurer un SoD constant). Pour chaque couche, la matière est donc en premier lieu projetée à 90° , puis déviée de θ et décalée de d_s le long du cordon gauche et du cordon droite, respectivement, pour compenser les bords du revêtement. Ensuite, le substrat recule d'une distance d_t pour projeter la couche suivante. De cette façon, la surface de la couche courante devient lisse pour faciliter la projection de la couche suivante, et les dépôts peuvent être empilés alors couche par couche de manière stable.

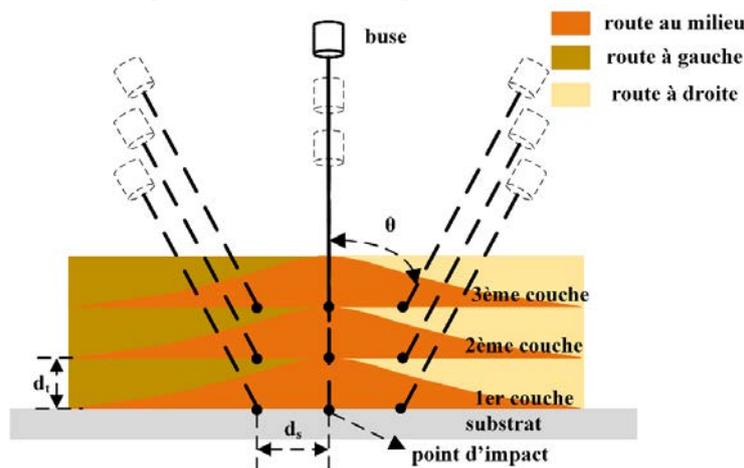


Figure 4.11 Schéma de la stratégie de construction d'un revêtement multicouche.

Afin de simuler un tel traitement et valider la stratégie de projection, un dépôt de 20 couches a été fabriqué avec la stratégie de projection FACS préalablement citée. Sur la base du modèle de dépôt, les simulations multicouche ont donc été réalisées et comparées aux résultats expérimentaux pour vérifier la fiabilité et la précision de la méthodologie de modélisation proposée.

4.2.5 Vérification du modèle de géométrie du jet statique

Pour vérifier l'exactitude du modèle de la géométrie du jet statique, des distributions coniques et cylindriques de matière ont tout d'abord été appliquées au modèle du jet statique. La Figure 4.12 montre pour cela le profil en coupe d'un revêtement construit sur la base de 20 couches à distribution conique et cylindrique, respectivement. Sur la base des mesures alors accessibles (Figure 4.12 (c)), il apparaît que la largeur du dépôt, dans la direction y (de 21,0 mm (a), 11,9 mm (b) et 10,2 mm (c)), ainsi que la hauteur dans la direction z (8,947 mm (a), 7,970 mm (b) et 7,838 mm (c)). Évidemment, la largeur de base du dépôt, estimée par

distribution conique, est beaucoup plus grande que celle du dépôt réel (10,2 mm). Comme le montre la Figure 4.12 (a), la distance entre la sortie de la buse et le substrat augmente avec le nombre de couches déposées. Puisque les particules de poudre sont réparties suivant un cône (théoriquement), la zone où la poudre est susceptible de se déposer continue en effet d'augmenter ce qui n'est pas le cas en réalité. C'est pourquoi la largeur simulée du dépôt, basée sur le modèle de géométrie de jet statique à distribution conique, est anormalement grande et beaucoup plus grande que celle du dépôt réel. En revanche, la topographie du dépôt, basée sur le modèle de géométrie du jet statique à distribution cylindrique (Figure 4.12 (b)), est plus cohérente avec la distribution réelle des particules. De tels résultats jettent donc les bases du modèle du processus d'évolution du dépôt.

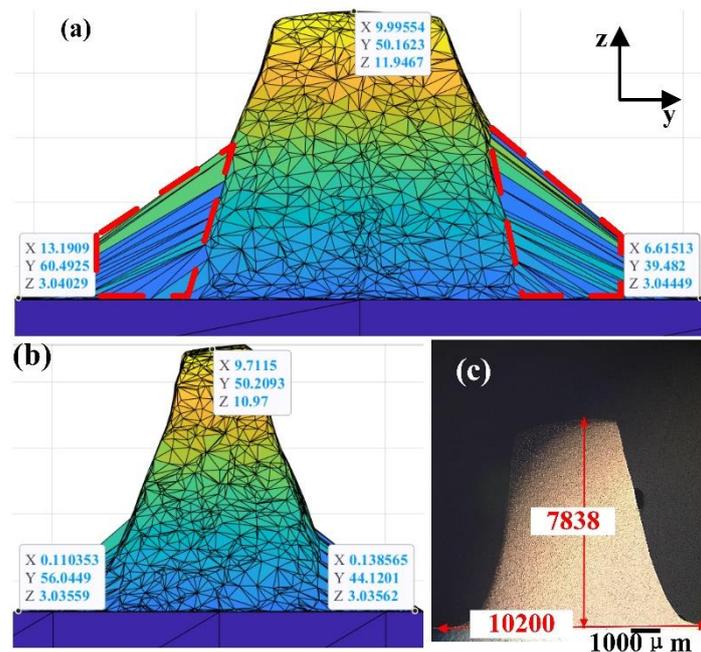


Figure 4.12 Profil de dépôt basé sur différents modèles de géométrie du jet statique : (a) Distribution conique ; (b) Distribution cylindrique ; (c) Résultat expérimental (mm).

4.2.6 Vérification du modèle de dépôt continu

Sur la base du modèle de dépôt continu, le processus d'évolution des dépôts multicouches peut donc être simulé. Comme en témoigne la Figure 4.13, la hauteur moyenne des différentes couches augmente de façon régulière avec le nombre de balayages tout en laissant apparaître un changement de pente après la 17^{ème} couche. Or, dans le processus de dépôt de poudre, il est reconnu que le DE est affecté par deux facteurs principaux : l'accumulation de chaleur et l'angle d'impact de la poudre. Des évolutions en cours de projection peuvent donc être supposées pour expliquer de telles tendances.

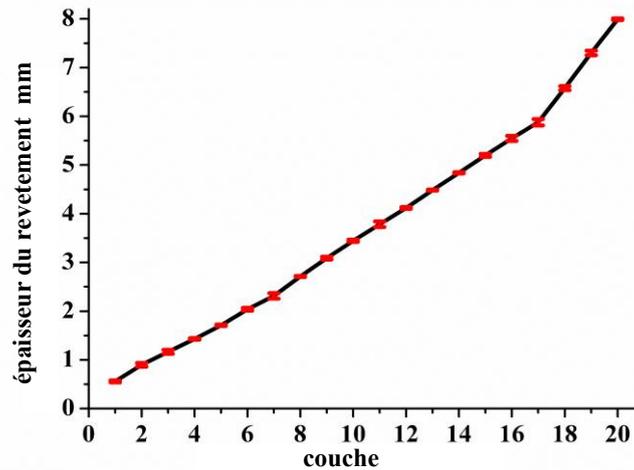


Figure 4.13 Epaisseur du dépôt mesuré au fur et à mesure de la construction du revêtement (mm).

Considérant différentes géométries de topologie de couches basées sur le modèle du jet statique à distribution cylindrique (Figure 4.14), il est à remarquer que la perte de bord du dépôt devient de plus en plus évidente avec l'augmentation des couches. Cela peut s'expliquer par la localisation de la buse en bordure du substrat (ou dépôt) où les particules de poudre ne pouvant se déposer, les points de revêtement participant à la reconstruction de la topologie ne peuvent alors pas être générés. Avec l'augmentation continue du nombre de couches, la poudre frappe donc la surface du dépôt avec un angle d'inclinaison progressivement croissant, provoquant ici une diminution continue du DE. Ainsi, la perte de bord du dépôt augmente avec l'augmentation des couches. Mais de tels effets existent aussi lors du processus réel de projection, comme en témoigne la Figure 4.15. Ainsi, en comparant le modèle de topologie de la Figure 4.14 (d) avec la géométrie expérimentale du dépôt de la Figure 4.15, le modèle de topologie multicouche apparaît cohérent avec la géométrie réelle du dépôt ; c'est-à-dire que le modèle de dépôt continu peut bien simuler l'évolution du dépôt multicouche.

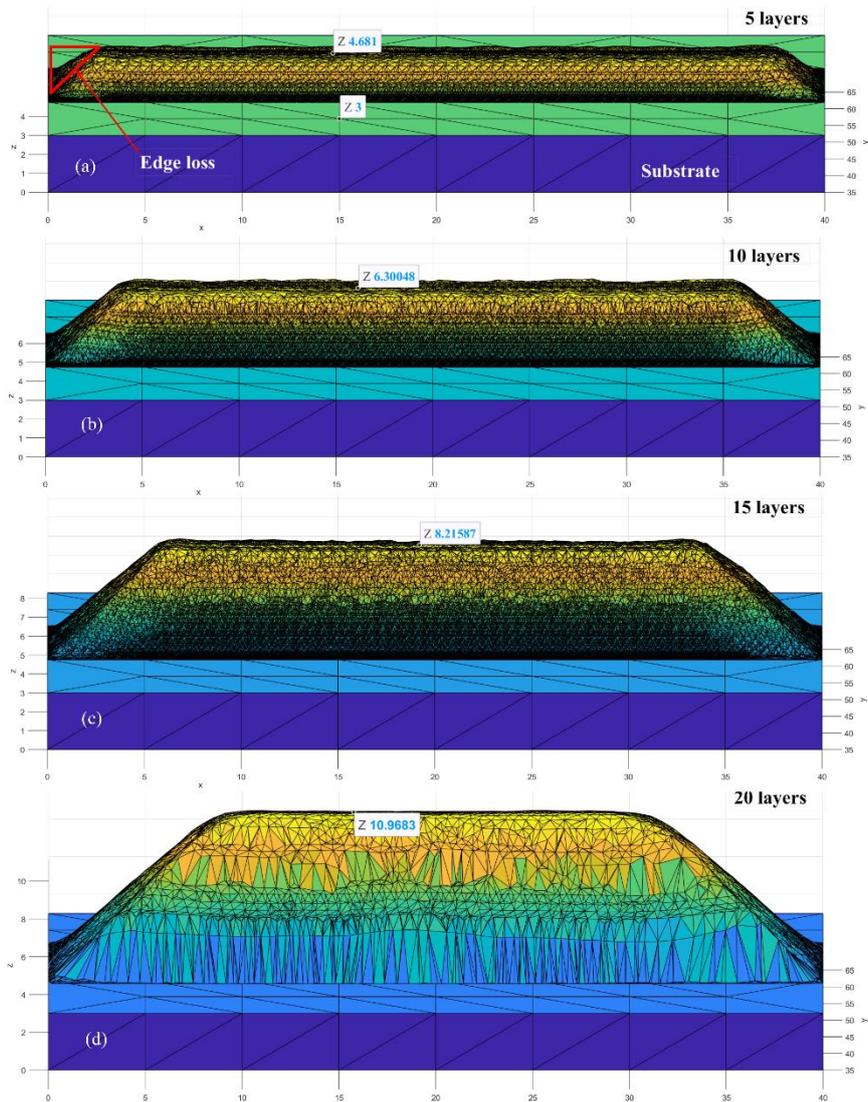


Figure 4.14 Forme géométrique de la topologie à différentes couches (mm).

On peut constater de plus que la hauteur du revêtement simulé est proche de celle obtenue par l'expérience dans la plage d'erreur admissible (Tableau 4-2). La fiabilité et la précision du modèle de l'géométrie du jet statique à distribution cylindrique et du modèle de dépôt continu sont donc validées.



Figure 4.15 Profil d'un dépôt élaboré après 20 couches.

Tableau 4-2 Erreur absolue et relative de la hauteur du dépôt comparées entre la simulation et

les résultats expérimentaux

Hauteur de dépôt (mm)		Erreur absolue (mm)	Erreur relative (%)
Simulation	Expérience		
7.968	7.838	0.13	1.66

4.3 Conclusion

Selon un principe couche par couche de fabrication additive, ce chapitre a présenté une méthodologie de modélisation numérique de dépôt par MATLAB basée sur une stratégie de reconstruction de géométrie de maillage. Sur la base de la distribution des flux de particules de poudre, un modèle de la géométrie du jet statique avec une distribution cylindrique des particules en vol a été proposé. Par rapport au modèle à distribution conique, aucune différence du profil du revêtement entre les deux modèles est à remarquer pour les faibles épaisseurs. En revanche, lorsqu'un revêtement multicouche est considéré, la géométrie de la topologie devient significativement différente suivant les deux approches avec des résultats plus adaptés pour la distribution cylindrique. Ainsi, un modèle de la géométrie du jet de matière a donc été développé dans MATLAB. De plus, les coordonnées spatiales, les données de quaternion, la vitesse de déplacement de la pièce et chaque point de chemin discret ont été dérivés de la simulation sous le puissant logiciel de programmation hors ligne RobotstudioTM, puis un modèle de dépôt continu pour simuler le processus de croissance du dépôt a été établi. La comparaison de la simulation et des résultats expérimentaux a permis de vérifier l'efficacité de la méthodologie proposée. Les résultats ont montré alors que cette méthodologie de modélisation pouvait simuler avec précision l'évolution du dépôt au cours du processus FACS.

Une variété de composants a été fabriqué ou réparé avec succès par FACS au cours des dernières années. Les tests de caractérisation des propriétés et des performances ont confirmé que les propriétés mécaniques des produits FACS sont suffisantes pour être utilisés dans une grande variété d'applications. Ainsi, en raison du grand potentiel que représente le CS dans la FA, à la fois pour la fabrication de composants individuels et la réparation de composants endommagés, cette méthodologie de modélisation démontre bien toute l'importance pratique d'un tel travail.

Références

- [1] C. Chen, Modelling of coating thickness distribution and its application in offline programming software, *Coatings Technology*. (2017) 11.
- [2] Z. Cai, S. Deng, H. Liao, C. Zeng, G. Montavon, The Effect of Spray Distance and Scanning Step on the Coating Thickness Uniformity in Cold Spray Process, *J Therm Spray Tech*. 23 (2014) 354–362. <https://doi.org/10.1007/s11666-013-0002-0>.
- [3] H. Assadi, F. Gärtner, T. Stoltenhoff, H. Kreye, Bonding mechanism in cold gas spraying, *Acta Materialia*. 51 (2003) 4379–4394. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00274-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00274-X).
- [4] G. Bae, S. Kumar, S. Yoon, K. Kang, H. Na, H.-J. Kim, C. Lee, Bonding features and associated mechanisms in kinetic sprayed titanium coatings, *Acta Materialia*. 57 (2009) 5654–5666. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.07.061>.
- [5] H. Fukanuma, N. Ohno, B. Sun, R. Huang, In-flight particle velocity measurements with DPV-2000 in cold spray, *Surface and Coatings Technology*. 201 (2006) 1935–1941. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.04.035>.
- [6] T. Schmidt, F. Gartner, H. Assadi, H. Kreye, Development of a generalized parameter window for cold spray deposition, *Acta Materialia*. (2006) 14.
- [7] L.L. Koithara, R.N. Raelison, S. Costil, Flow phenomenon of micron-sized particles during cold spray additive manufacturing: High-speed optic observation and characterization, *Advanced Powder Technology*. 31 (2020) 1060–1079. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.12.037>.
- [8] H. Wu, X. Xie, M. Liu, C. Chen, H. Liao, Y. Zhang, S. Deng, A new approach to simulate coating thickness in cold spray, *Surface and Coatings Technology*. 382 (2020) 125151. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125151>.
- [9] W. Li, H. Wu, C. Verdy, S. Costil, H. Liao, S. Deng, Study of Low-Pressure Cold Spray Additive Manufacturing: Investigation of Kinematic Spray Parameters on Deposition and Properties, *3D Printing and Additive Manufacturing*. (2022). <https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0260>.

Chapitre 5

Planification et génération des trajectoires de projection

5.1 Préparation du modèle 3D par « tranchage »

Comme d'autres méthodes traditionnelles de fabrication additive, telles que la stéréolithographie (SLA), dépôt de fil fondu (FDM), impression tridimensionnelle (3DP), frittage sélectif par laser (SLS) et fabrication d'objets laminés (LOM), la méthode d'empilement de matière par couches proposée par cold spray (FACS) est aussi à considérer. Pour ce faire, le traitement de chaque couche est basé sur les données du profil en coupe obtenues après découpage du modèle tridimensionnel de conception assistée par ordinateur (CAO) pour former la trajectoire de traitement. Que le modèle 3D du composant soit généré à l'aide d'un logiciel de modélisation CAO ou de rétro-ingénierie, dans tous les processus FA, le modèle doit être superposé en tranches avant que les données puissent être entrées dans le système. Ainsi, l'algorithme utilisé pour générer le découpage en couches est un élément clé du processus de fabrication. De nombreux chercheurs ont étudié comment générer les données du profil à partir du modèle 3D [1–3]. Dans cette thèse, un algorithme amélioré permettant la définition des tranches d'épaisseur uniforme a été proposé afin de définir rapidement les points d'intersection, puis les regrouper et les trier.

5.1.1 La méthode de tranchage

À titre d'exemple, la planification de trajectoires pour un modèle 3D avec plusieurs caractéristiques de forme est illustrée Figure 5.1 (a). La base du modèle est un prisme pentagonal avec trois caractéristiques de forme de hauteur inégale : un cylindre elliptique d'une hauteur de 10 mm, un cylindre d'une hauteur de 20 mm et un composant de forme irrégulière d'une hauteur de 15 mm. Ce modèle a une hauteur totale de 25 mm et est composé de 122,774 facettes triangulaires. Dans la Figure 5.1 (a), une zone marquée en rouge est agrandie pour montrer la triangulation du modèle. Sur la base d'une épaisseur de couche uniforme, une tranche perpendiculaire à l'axe Z est utilisée pour croiser le modèle, comme illustré sur la Figure 5.1 (b). L'intersection de chaque facette triangulaire avec la tranche est utilisée alors pour générer les chemins de cette couche. Le processus de découpage est ensuite répété de bas en haut du modèle 3D pour obtenir la trajectoire du robot couche par couche.

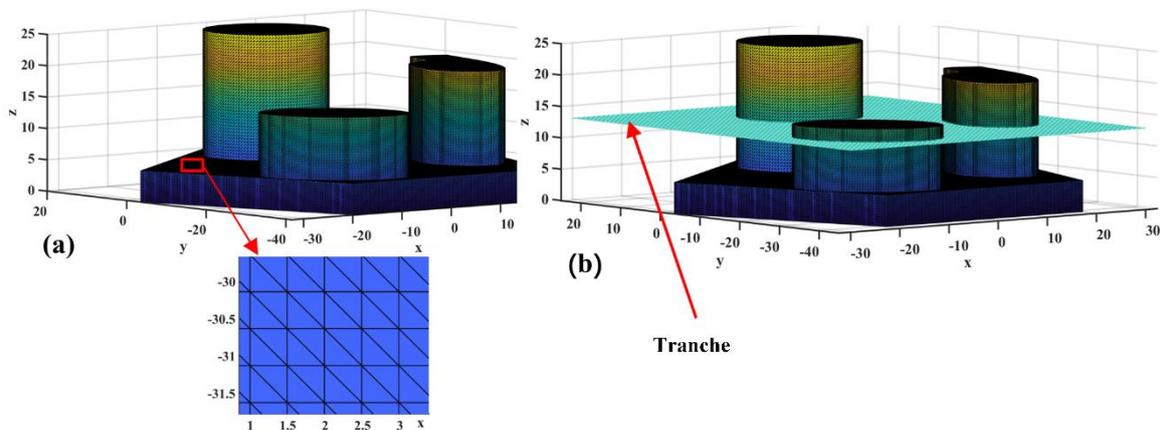


Figure 5.1 (a) Un modèle 3D avec plusieurs caractéristiques de forme ; (b) Intersection du

modèle avec une tranche.

5.1.2 Le processus de tranchage

5.1.2.1 La recherche de facettes triangulaires sécants

La lecture du modèle 3D par MATLAB permet d'obtenir de nombreuses informations, notamment le numéro de série des facettes triangulaires, les coordonnées tridimensionnelles de chaque sommet de facette triangulaire et le numéro de série de chaque sommet. Les coordonnées tridimensionnelles des trois sommets de toutes les facettes triangulaires du modèle 3D sont triées par valeur de Z dans l'ordre croissant et placées dans une matrice (sommets). Le jeu de données est finalement arrangé comme suit (Eq. 5.1) :

$$vertices = \begin{bmatrix} v_{1ax} & v_{1ay} & v_{1az} & v_{1bx} & v_{1by} & v_{1bz} & v_{1cx} & v_{1cy} & v_{1cz} \\ v_{2ax} & v_{2ay} & v_{2az} & v_{2bx} & v_{2by} & v_{2bz} & v_{2cx} & v_{2cy} & v_{2cz} \\ v_{3ax} & v_{3ay} & v_{3az} & v_{3bx} & v_{3by} & v_{3bz} & v_{cx} & v_{cy} & v_{cz} \\ \vdots & \vdots \\ v_{nax} & v_{nay} & v_{naz} & v_{nbx} & v_{nby} & v_{nbz} & v_{ncx} & v_{ncy} & v_{ncz} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

avec n facettes triangulaires répertoriées par les lignes de la matrice ($vertices$). Chaque facette triangulaire (une rangée) est représentée par trois sommets (a, b et c , respectivement), et chaque sommet contient trois coordonnées (x, y et z , respectivement). Par exemple, v_{1ax} indique la valeur X-valeur du premier sommet (v_{1a}) de la première facette triangulaire (v_1) dans la matrice $vertices$, $v_{1az} < v_{1bz} < v_{1cz}$.

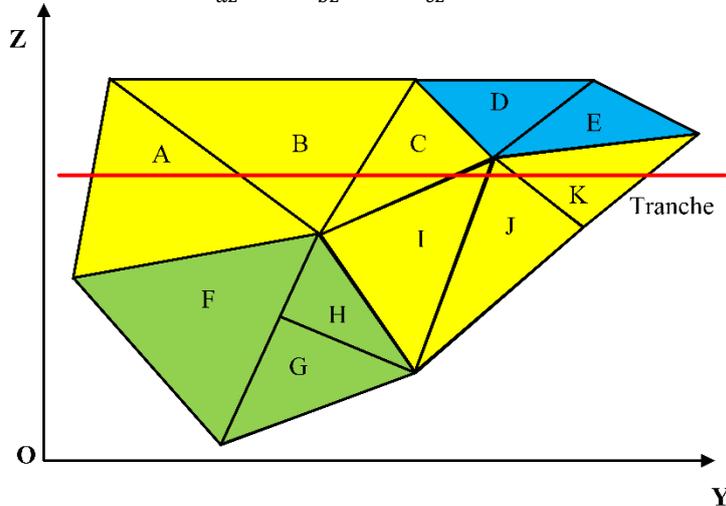


Figure 5.2 Filtrage des facettes triangulaires pour l'intersection des tranches.

Pour chaque couche, pour obtenir toutes les facettes triangulaires coupant la tranche à une hauteur spécifique, certaines facettes doivent être éliminées de l'ensemble d'origine ; une facette triangulaire doit être supprimée alors des données lorsque la valeur Z maximale ou minimale des sommets de la facette triangulaire est inférieure ou supérieure à la hauteur de la tranche. La Figure 5.2 montre par exemple le résultat du filtrage d'une tranche avec un ensemble de facettes triangulaires. Les facettes triangulaires F, G et H (représentées par des facettes triangulaires vertes sur la Figure 5.2) ont été supprimées car les valeurs Z maximales des sommets sont inférieures à la hauteur de la tranche. Les facettes triangulaires D et E

(représentées par des facettes triangulaires bleues sur la Figure 5.2) ont également été supprimées car les valeurs Z minimales des sommets sont supérieures à la hauteur de la tranche. Les facettes triangulaires restantes (représentées par des facettes triangulaires jaunes sur la Figure 5.2) peuvent alors être croisées avec la tranche.

5.1.2.2 Rechercher des contours d'intersection

Sur la base des facettes triangulaires sécantes identifiées, le numéro de série et les coordonnées de chaque sommet peuvent être obtenus pour chaque facette triangulaire. Les points d'intersection sur ces facettes triangulaires doivent encore être calculés. La Figure 5.3 (a) montre pour cela une intersection entre une tranche et la surface supérieure d'un cylindre. Le contour à déterminer (ou les points d'intersection à obtenir) va du sommet A au sommet F . Cependant, lorsque tous les sommets de ces facettes triangulaires sont sur la tranche (c'est-à-dire les valeurs Z des sommets de toutes les facettes triangulaires sont égales à la hauteur de la tranche), les points d'intersection incluent également les sommets G , H et I . Il en résulte un contour incorrect lorsque ces points d'intersection sont joints en séquence. Lorsqu'une tranche est intersectée avec le modèle, il y a quatre cas possibles :

- les trois sommets d'une facette triangulaire se trouvent sur la tranche (comme le montre la Figure 5.3 (a)) ;
- deux sommets de la facette triangulaire se trouvent sur la tranche (comme indiqué avec les sommets B et C ou les sommets E et F sur la Figure 5.3 (b)) ;
- un sommet de la facette triangulaire se trouve sur la tranche (comme indiqué avec le sommet C ou E sur la Figure 3 (c));
- aucun des sommets de la facette triangulaire ne se trouve sur la tranche (comme le montre la Figure 5.3 (d)).

L'étape suivante consiste ensuite à rechercher les points d'intersection trouvés lorsque les facettes triangulaires coupent la tranche.

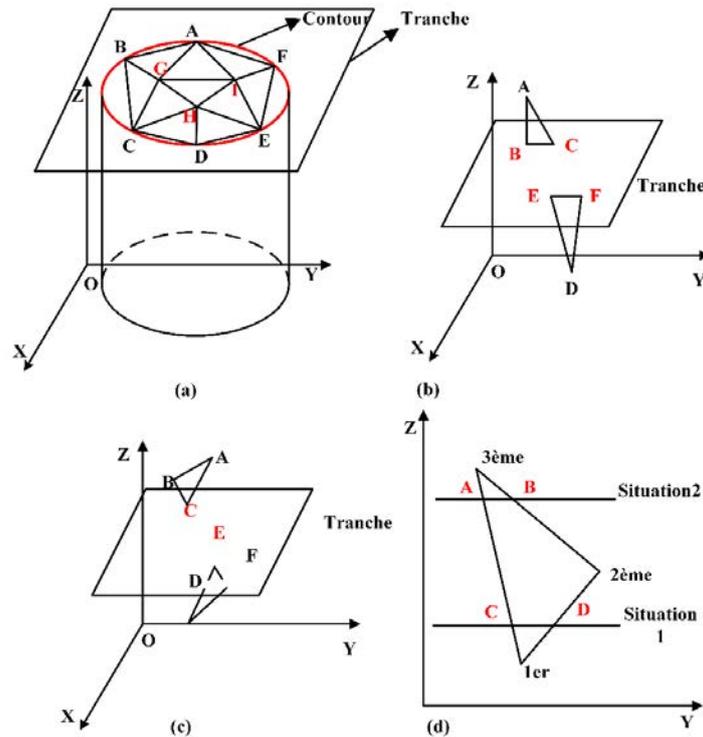


Figure 5.3 Dépistage des points d'intersection : (a) Trois sommets pour chaque facette triangulaire se trouvent sur la tranche ; (b) Deux sommets pour chaque facette triangulaire se trouvent sur la tranche ; (c) Un sommet pour chaque facette triangulaire se trouve sur la tranche ; (d) Aucun des sommets de chaque facette triangulaire ne se trouve sur la tranche.

Une nouvelle matrice nommée $P_intersections$ a été créée pour stocker tous les points d'intersection possibles. Dans le cas où les trois sommets d'une facette triangulaire se trouvent sur la tranche, la facette doit être supprimée de l'ensemble de données $vertices$ (Eq. 5.1). Lorsque deux sommets d'une facette triangulaire se trouvent sur la tranche, les deux sommets peuvent être directement indexés, puis placés dans la matrice $P_intersections$, et la facette triangulaire doit être supprimée de l'ensemble des données $vertices$. Pour le troisième cas, lorsqu'il n'y a qu'un seul sommet de la facette triangulaire sur la tranche (c'est-à-dire que la valeur Z du sommet le plus bas ou le plus haut de la facette triangulaire est égale à la hauteur de la tranche), ce sommet unique (point sécant) peut être placé dans la matrice $P_intersections$.

Pour le dernier cas, où aucun des sommets n'est sur la tranche, comme le montre la Figure 5.3 (d), il y a deux situations qui doivent être traitées. Une situation est lorsque la hauteur de la tranche est inférieure au deuxième sommet de la facette triangulaire (comme mentionné précédemment, les trois sommets sont disposés dans l'ordre croissant par valeur Z) ; dans ce cas, les deux arêtes sécantes sont composées du sommet le plus bas (1st) connecté respectivement aux deux autres sommets (Situation 1 sur la Figure 5.3 (d)). La deuxième situation est lorsque la hauteur de la tranche est supérieure au deuxième sommet ; alors les deux arêtes qui se croisent sont composées du sommet le plus élevé (le 3rd) connecté aux deux autres sommets (Situation 2 sur la Figure 5.3 (d)). Les deux points d'intersection (points C et

D ou points A et B) peuvent être calculés. Tous les points d'intersection sont placés dans la matrice *P_intersections*.

En fin de compte, les points d'intersection de toutes les facettes triangulaires qui croisent la tranche peuvent être trouvés et placés dans la matrice *P_intersections*. Cependant, étant donné que les arêtes communes de deux facettes triangulaires peuvent provoquer des points d'intersection répétés, ces redondances doivent être supprimées de la matrice *P_intersections*. La Figure 5.4 montre enfin l'organigramme du processus de découpage. Comme la hauteur de la tranche est incrémentée couche par couche, tous les points d'intersection de l'ensemble du modèle peuvent être trouvés. L'acquisition de ces points d'intersection fournit ainsi la base de la planification de trajectoire robotique.

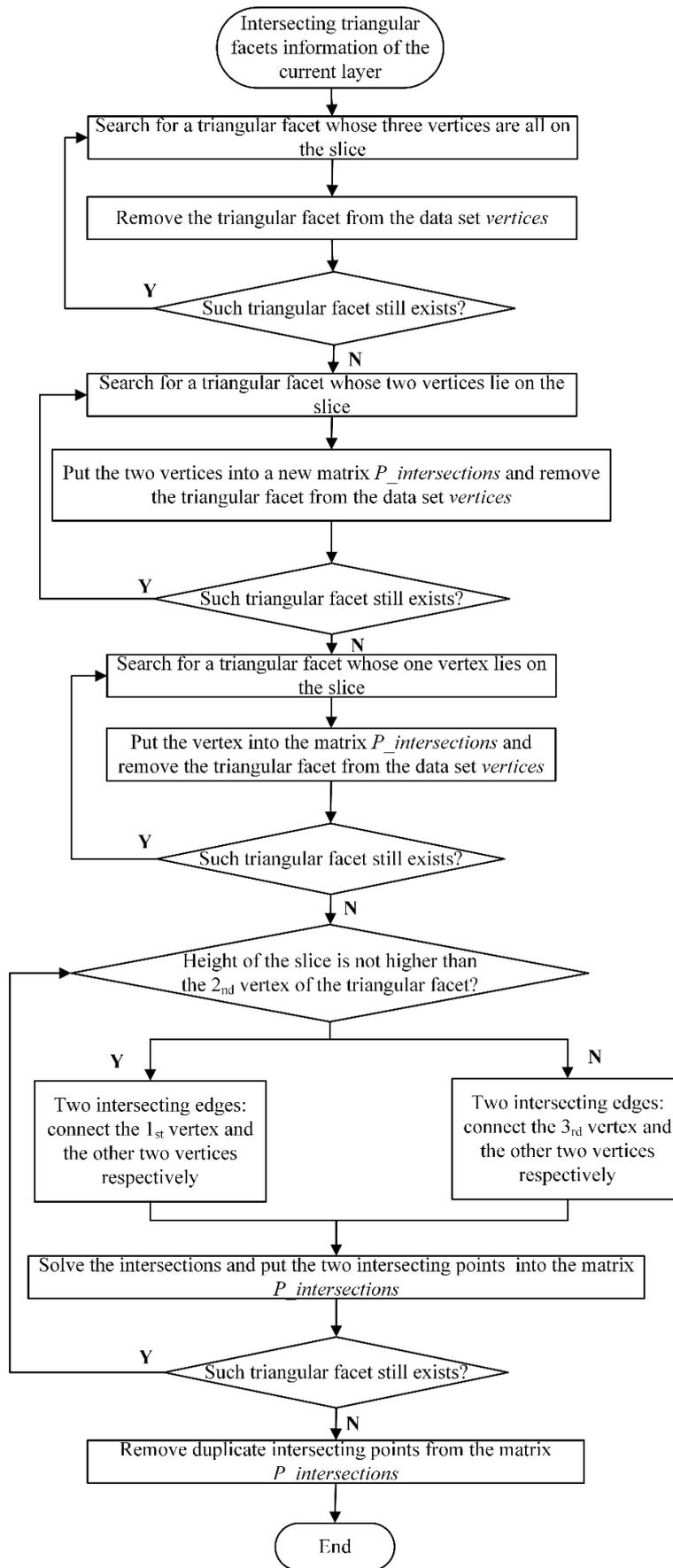


Figure 5.4 Organigramme du processus de découpage.

5.1.2.3 La regroupement et tri des points d'intersection

Tous les points d'intersection doivent être regroupés et classés en fonction des entités auxquelles ils appartiennent. Cela permet de créer la trajectoire de projection pour chaque caractéristique de forme. Cependant, ces points sont souvent dans le désordre, en particulier lorsque plusieurs entités se trouvent sur une couche particulière du modèle. La Figure 5.5 (a) par exemple montre les points d'intersection à une certaine hauteur du modèle qui contient trois entités. La Figure 5.5 (b) quant à elle montre les contours générés en reliant successivement tous les points de cette couche. Les points d'intersection ne sont ni groupés ni triés ; certains points d'une caractéristique de forme sont connectés à certains points de l'autre caractéristique de forme. Le polygone créé ainsi en connectant tous les points ne peut donc pas être utilisé comme base pour la génération de la trajectoire de projection. Ainsi, il est nécessaire de regrouper et de trier ces points d'intersection.

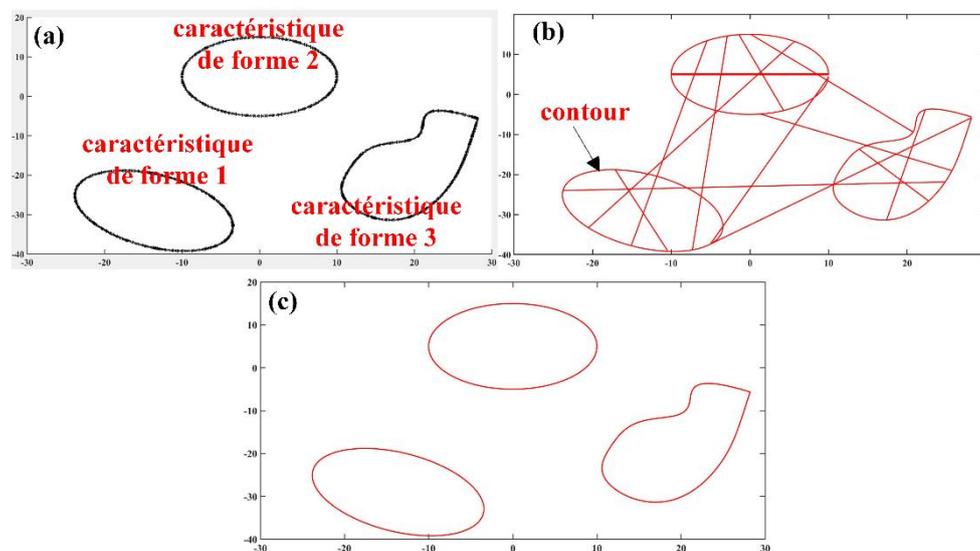


Figure 5.5 Résultat de l'intersection de la tranche et du modèle : (a) Points d'intersection de chaque caractéristique de forme ; (b) Connexions directes entre les points d'intersection sans regroupement ni tri ; (c) Contour de chaque caractéristique de forme après regroupement et tri.

Un algorithme de regroupement hiérarchique [4] basé sur la métrique de distance euclidienne est utilisé pour regrouper les points d'intersection dans la matrice $P_{intersections}$. Comme le montre la Figure 5.5 (c), trois clusters sont identifiés en fonction du nombre de caractéristique de forme. Un tableau de cellules nommé $P_{intersections_cluster}$ contenant le même nombre de clusters est créé pour placer tous les points d'intersection de chaque cluster dans l'ensemble correspondant. Dans ce cas, le tableau de cellules se compose de trois ensembles puisque la tranche produit trois clusters à cette couche. Ensuite, les points d'intersection non ordonnés de chaque caractéristique de forme sont triés à l'aide de la méthode de la distance la plus courte. Par exemple, un point d'intersection nommé M est sélectionné au hasard dans le premier cluster et placé dans le premier ensemble d'un nouveau tableau de cellules nommé $P_{intersections_sorted}$. Ensuite, les données restantes du cluster sont parcourues pour rechercher un point avec la distance la plus courte de

M. Le point trouvé est placé dans *P_intersections_sorted* et supprimé de *P_intersections_cluster*. De même, un autre point avec la distance la plus courte du second dans l'ensemble doit être trouvé, jusqu'à ce que tous les points d'intersection du premier cluster soient réordonnés et placés dans le premier ensemble de *P_intersections_sorted*. Le même processus est effectué pour les points des deux autres clusters jusqu'à ce que tous les points soient classés dans chaque ensemble du nouveau tableau de cellules. La Figure 5.6 montre ainsi l'organigramme pour regrouper et trier les points d'intersection. Ce processus permet de représenter le contour de chaque cluster dans l'ordre. La Figure 5.7 montre un résultat de découpage des contours avec toutes les couches pour le modèle avec plusieurs caractéristiques de forme. La planification de la trajectoire peut être effectuée en regroupant et en triant les points d'intersection à chaque couche du modèle.

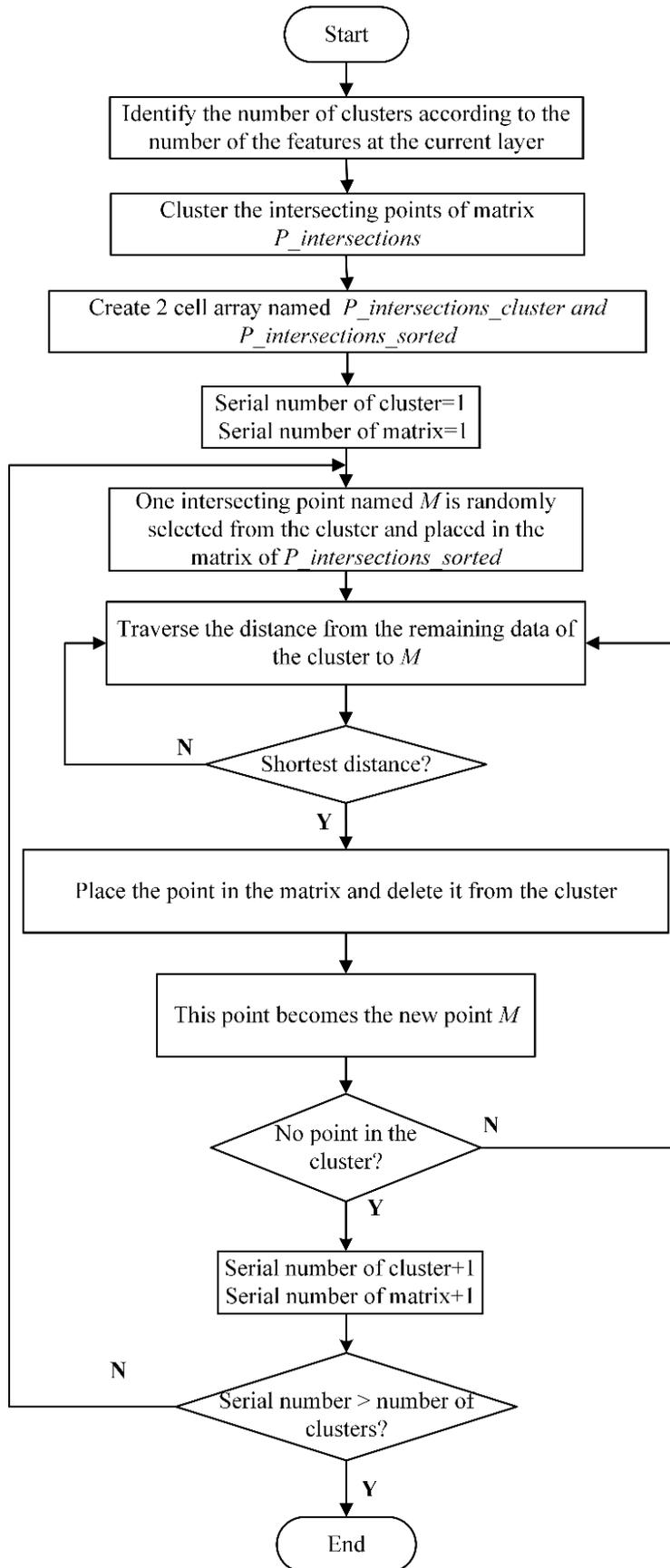


Figure 5.6 Organigramme pour regrouper et trier les points d'intersection.

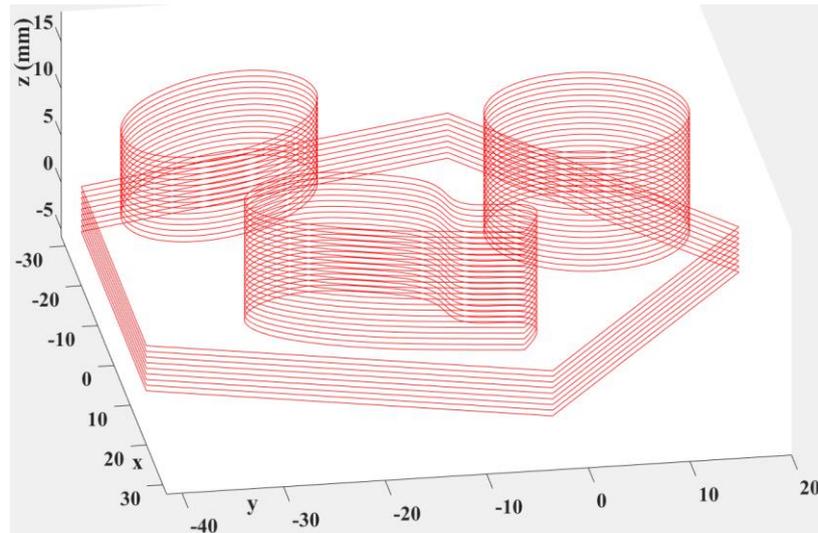


Figure 5.7 Contours avec toutes les couches pour le modèle avec plusieurs caractéristiques de forme.

5.2 Planification des trajectoires

La trajectoire de chaque couche peut alors être planifiée à partir des contours générés du modèle. Comme l'illustre la Figure 5.8, lors du procédé FACS, le dépôt se forme couche par couche en remplissant le chemin (FP) et en utilisant une méthode de chemin en zigzag. Il y aura donc une perte de matière le long des bords pendant le processus ; cette perte deviendra plus évidente au fur et à mesure que l'épaisseur générale de la pièce augmentera, affectant ainsi la forme finale du dépôt. Par conséquent, la buse doit être déviée de θ degrés pour compenser les bords et afin aussi d'assurer la perpendicularité souhaitée. La planification du chemin de compensation (CP) est donc nécessaire. Cependant, différentes stratégies de planification de trajectoire doivent être mises en œuvre pour des modèles de complexité variable. Pour les composants à plusieurs caractéristiques de forme, la planification du chemin entre les plusieurs caractéristiques de forme est essentielle, d'autant plus que le dépôt ne peut pas être interrompu et que les trajectoires de projection ne peuvent pas se croiser. S'il n'y a qu'une seule caractéristique de forme dans une couche, la planification de la trajectoire de cette caractéristique de forme inclut uniquement FP et CP. Cependant, s'il existe plusieurs caractéristiques de forme, le chemin de transfert (LP) qui permet le transfert entre les caractéristiques de forme doit également être planifié. La planification de trajectoire est détaillée dans les sections suivantes.

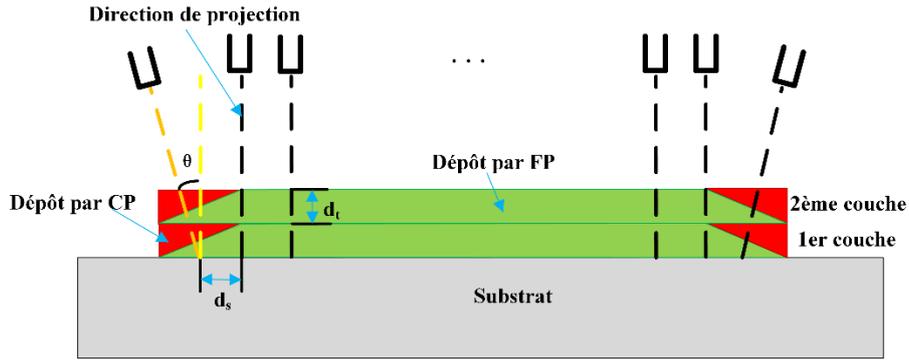


Figure 5.8 Stratégie d'empilement du matériau.

5.2.1 Générations des FPs et CPs

Lorsqu'il n'y a qu'une seule caractéristique de forme pour une couche, le robot se déplace d'abord le long du FP, puis se déplace vers le CP, comme illustré en Figure 5.9. Pour la génération des FP, les points du chemin sont déterminés par l'intersection d'un ensemble de lignes parallèles avec le contour de la caractéristique de forme, comme illustré Figure 5.10. Une condition préalable à l'utilisation de la méthode en zigzag est qu'il n'y ait qu'une ou deux intersections entre chaque ligne parallèle et le contour. Lorsqu'il y a plus de deux intersections (comme illustré à la Figure 5.10 (a) où la ligne verte coupe quatre fois le contour), le groupe de lignes parallèles ne peut pas être utilisé. Ainsi, pour trouver une solution possible, le vecteur directeur du groupe de lignes parallèles doit être ajusté. Le vecteur directeur est automatiquement adapté jusqu'à ce que le nombre d'intersections de chaque ligne parallèle avec le contour ne dépasse pas deux, comme le montre la Figure 5.10 (b).

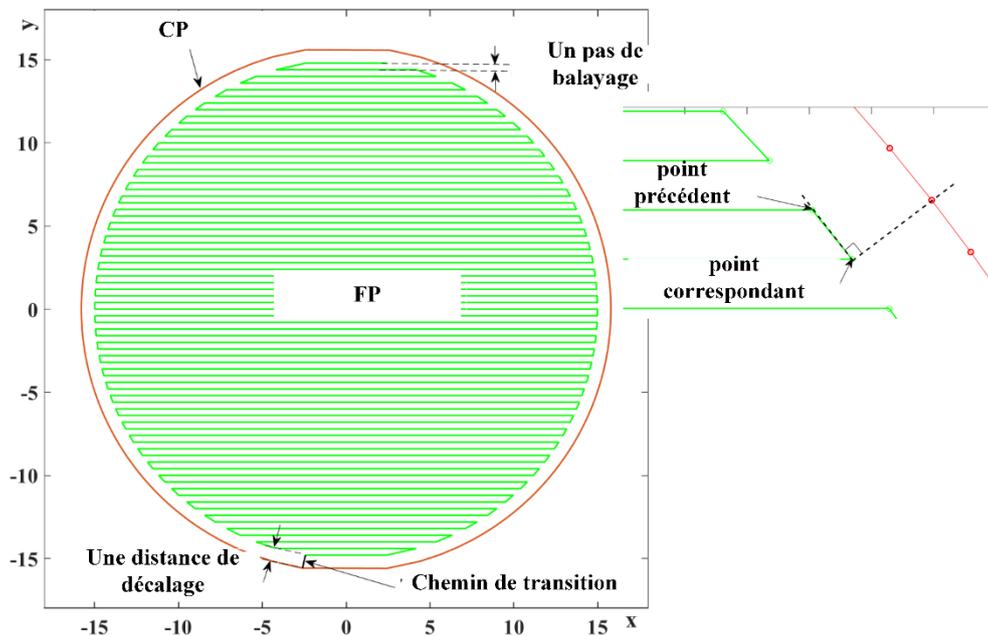


Figure 5.9 Planification des trajectoires pour les FP et les CP.

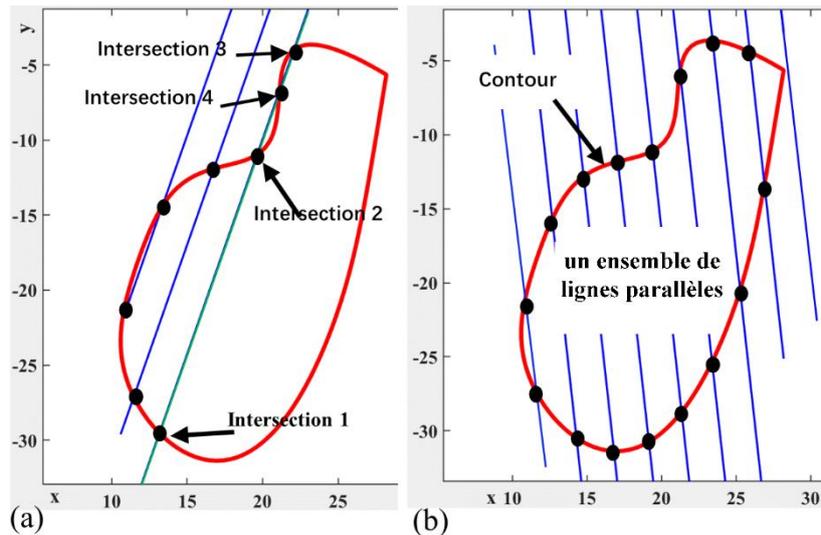


Figure 5.10 Intersections de lignes parallèles et de points discrets : (a) Cas où le groupe actuel de lignes parallèles ne peut pas être utilisé ; (b) Cas où le groupe actuel de lignes parallèles peut être utilisé.

De plus, il est très difficile de trouver les intersections en résolvant les équations des droites parallèles et du contour car le contour n'a pas d'expression fonctionnelle explicite. En fait, le contour est composé de nombreux points discrets, et tous les deux points discrets adjacents constituent un segment de droite. Il est possible alors de résoudre l'équation d'une droite parallèle et de tous les segments parcourus pour obtenir les intersections correspondant à la droite parallèle, puis d'effectuer tour à tour le traitement sur le groupe de droites parallèles. Cependant, étant donné qu'il faut beaucoup de temps de calcul pour parcourir tous les segments de droite pour chaque droite parallèle afin de résoudre les équations, nous avons développé une règle de changement de signe pour obtenir toutes les intersections du FP. Les étapes détaillées sont illustrées Figure 5.11. Lorsque toutes les intersections de la caractéristique de forme sont générées, elles peuvent être utilisées comme points de chemin de la caractéristique de forme (pour chaque point de trajectoire du FP, l'angle de projection est constant à 90°).

Pour la génération de CP, chaque point de chemin d'un CP a une distance de décalage par rapport au point correspondant sur le FP, et le segment de ligne joignant les deux points est perpendiculaire à une ligne joignant le point correspondant et le point précédent, comme indiqué dans l'image agrandie de la Figure 5.9. Pour chaque point de trajectoire du CP, l'angle de projection est l'angle résiduel de son angle de déviation θ .

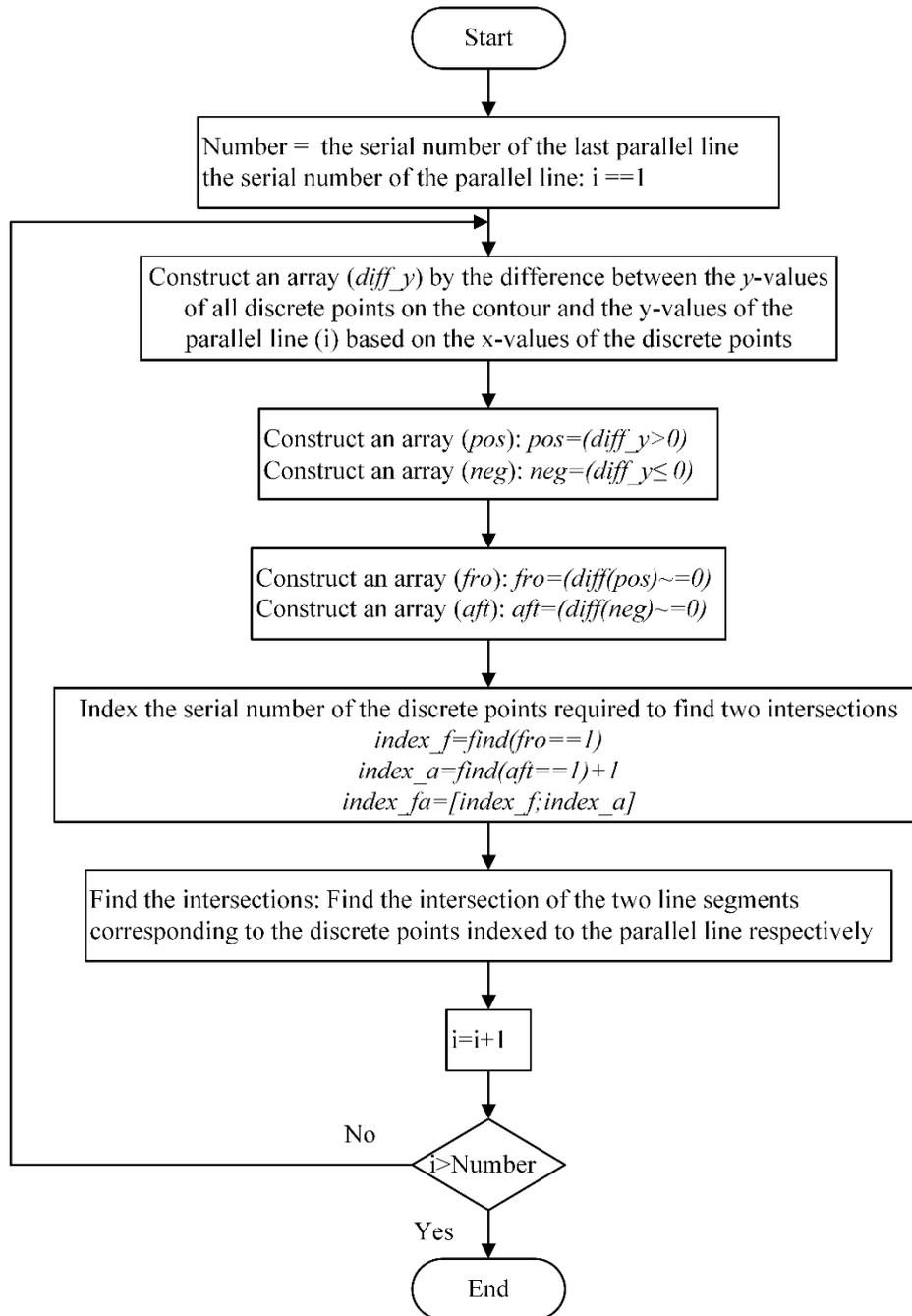


Figure 5.11 Organigramme pour les intersections de lignes parallèles et de points discrets.

5.2.2 Génération des LPs entre les caractéristiques de forme

Il y a eu beaucoup moins d'études sur la planification des trajectoires pour les composants à plusieurs caractéristiques de forme dans le domaine de la FACS par rapport à d'autres processus de FA majeurs, tels que la fusion sur lit de poudre. En raison de la caractéristique « one-stroke » du procédé CS, lorsque la projection est transférée d'une caractéristique de forme à un autre, la planification des LP entre les caractéristiques de forme est indispensable. Plus précisément, il y a deux cas dans la planification des LP qui doivent être considérés. Lorsque le pistolet est transféré du dernier point de trajectoire de la caractéristique de forme actuelle au premier point de trajectoire de la caractéristique de forme suivante, les deux points

peuvent être reliés par une ligne droite pour générer un LP si le pistolet ne traverse aucune caractéristique de forme précédemment projetée. Dans le cas contraire, le matériau se déposera sur des caractéristiques de forme préalablement projetées, ce qui affectera la planéité de la surface supérieure et donc la forme finale de la caractéristique de forme. Par conséquent, la conception des LP est importante pour les composants à plusieurs caractéristiques de forme.

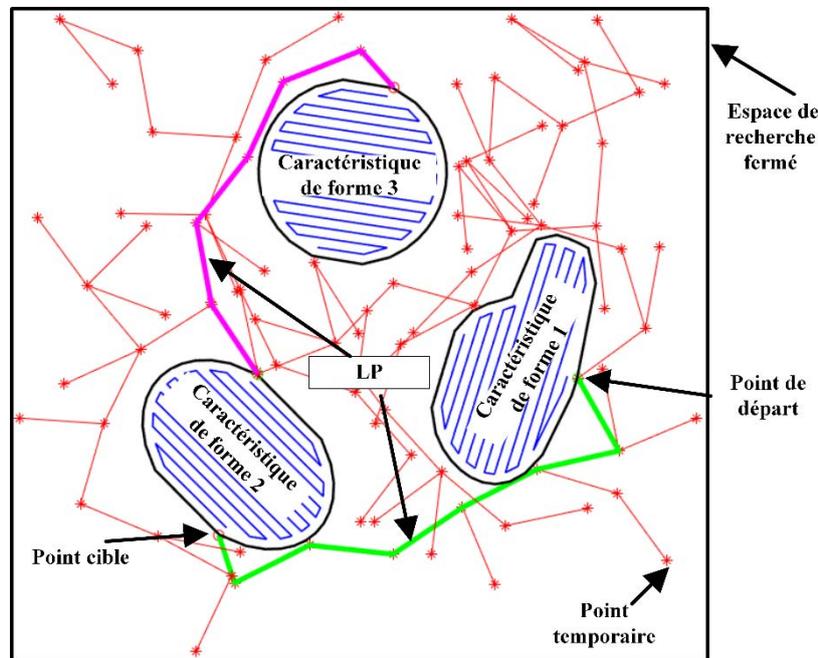


Figure 5.12 Génération de LPs pour 3 caractéristiques de forme.

Dans cette thèse, un algorithme de Rapidly Exploring Random Tree (RRT) [5–9] a été appliqué pour générer les LP entre les caractéristiques de forme et éviter le problème de sur-dépôt. L'algorithme peut être appliqué à la planification de trajectoire pour différentes formes. Comme le montre la Figure 5.12, il existe trois caractéristiques de forme basées sur l'intersection de la tranche et du modèle. Tout d'abord, la zone « sans entrée » doit être définie pour chaque caractéristique de forme ; il s'agit du contour du CP (comme indiqué par les lignes bleues sur la Figure 5.12). Un espace de recherche fermé contenant toute la caractéristique de forme doit également être défini (comme indiqué avec un carré noir sur la Figure 5.12). L'algorithme commence alors au point de départ (le dernier point du chemin de la caractéristique de forme 1 sur la Figure 5.12) et génère aléatoirement un point temporaire dans l'espace de recherche. Si le point temporaire se trouve dans les zones de non-entrée, l'algorithme en cherchera un nouveau dans l'arbre d'exploration. Le processus de croissance de cet arbre se poursuit ensuite jusqu'à ce qu'il arrive au point cible (le premier point de chemin de la Caractéristique de forme 2 sur la Figure 5.12). En connectant ces points de recherche en séquence, le LP entre les deux premières caractéristiques de forme est générée et est représenté par la ligne verte sur la Figure 5.12. Le LP entre les caractéristiques de forme 2 et 3 est généré de la même manière et est représenté par la ligne rose sur la Figure 5.12. Étant donné que le LP est composé d'une série de points intermédiaires, lorsque le robot se déplace le long de ces points avec une grande précision, la vitesse de déplacement peut être réduite, ce qui peut

entraîner un dépôt excessif indésirable dans certaines zones. En fait, le robot n'a pas besoin d'atteindre précisément ces points sur le LP. Par conséquent, un paramètre de mouvement de robot approprié (appelé « zone data ») doit être défini pour garantir que le robot se déplace en douceur à travers le LP. Le paramètre empêche le robot d'arriver précisément aux points mais assure que la vitesse du robot ne diminue pas trop. Une caractéristique notable des LP générés est qu'ils ne traversent pas la zone de dépôt souhaitée des motifs, assurant ainsi la précision du composant en cours de fabrication. Sur la base de la stratégie de planification de trajectoire, la trajectoire de toutes les couches du modèle, y compris les FP, CP et LP, peut ainsi être générée.

5.3 Expériences préliminaires

Dans cette thèse, l'épaisseur de chaque couche retenue pour fabriquer le composant est identique. C'est pourquoi la détermination d'une épaisseur de couche uniforme est nécessaire. Comme indiqué précédemment, le concept modulaire du système proposé est universel et n'est pas seulement limité par le choix du système de projection (cold spray), mais convient également à presque tous les matériaux qui peuvent être déposés par cold spray. Étant donné que le système de CSHP présente le rendement le plus élevé en FA, le système de CSHP a donc été choisi en premier lieu afin de réaliser le dépôt de poudres d'aluminium pur et de cuivre pur.

5.3.1 Sélection des matériaux et préparation du substrat

Le matériau substrat utilisé dans cette partie est de l'aluminium de série 1050A avec une taille de $100 \times 100 \times 6$ mm. Il a été préparé pour le FACS par sablage sous une pression de 3 bars pour renforcer l'adhérence à l'interface avec la première couche du composant fabriqué ; cela empêche le dépôt de s'écailler.

Question projectile, une poudre d'aluminium disponible dans le commerce avec une granulométrie moyenne de $29 \mu\text{m}$ (Toyal Europe) a été utilisée. La Figure 5.13 montre respectivement la microstructure et la distribution granulométrique de la poudre.

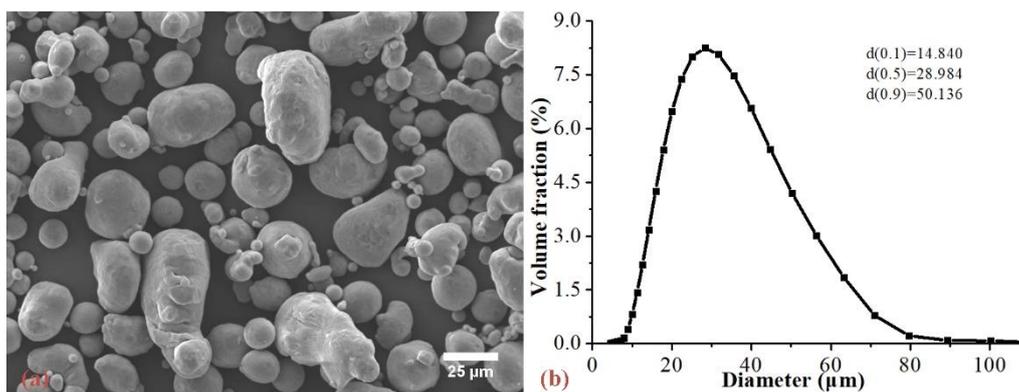


Figure 5.13 (a) Photo MEB de poudres d'Al ; (b) Distribution granulométrique de la poudre.

5.3.2 Le processus de projection

Un système CSHP développé en interne, équipé d'une buse convergente-divergente de type de-Laval, a été utilisé pour la projection. Pour permettre un fonctionnement pratique et flexible du robot et pour maintenir la direction de projection de la poudre, la configuration de projection propose de placer le substrat sur le robot (IRB2400, ABB, Suède) et de fixer le pistolet sur la table. La distribution de la section transversale d'un seul point de projection obéit

à la distribution gaussienne. La largeur de la zone de dépôt est d'environ 6σ , où σ représente l'écart type de la distribution gaussienne. La description détaillée de la distribution peut être trouvée dans la réf. [10]. En ce qui concerne les FP, un pas de balayage de σ , une vitesse de déplacement de 50 mm/s et un angle de projection de 90° ont été définis. Pour les CP, la distance de décalage, la vitesse de déplacement et l'angle de projection sont respectivement de σ , 25 mm/s et 60° . Les résultats des tests montrent que lorsque la vitesse de déplacement du robot lors de la construction des CP est la moitié de la vitesse du robot en construction des FP, le dépôt peut obtenir un meilleur effet de compensation. Étant donné que les dépôts formés par les LP ne sont pas attendus, la vitesse de déplacement du robot peut donc être relativement rapide. L'angle de projection est réglé sur 90° pour faciliter le mouvement du robot et la transition vers le FP de la caractéristique de forme suivante. Les paramètres détaillés de la cinématique de projection sont répertoriés dans le Tableau 5-1.

Tableau 5-1 Paramètres cinématiques de projection retenus pour la projection de Aluminium

Paramètres	Valeur
Gaz propulseur	Air
Gaz vecteur	Argon
Pression (bar)	28
Température (°C)	400
SoD (mm)	30
Débit (g/min)	11
Distance de décalage (mm)	σ
Un pas de balayage (mm)	σ
Angle de projection (°)	90 (FPs), 60 (CPs), 90 (LPs)
Vitesse de déplacement (mm/s)	50 (FPs), 25 (CPs), 100 (LPs)

La Figure 5.14 montre l'image en coupe d'une seule couche de dépôt. La surface du dépôt est uniforme, plane et se situe dans une plage d'erreur acceptable, ce qui signifie que l'alimentation en poudre est continue et stable. L'épaisseur moyenne du dépôt examinée au microscope numérique était de 1,25 mm. Par conséquent, l'épaisseur d'une seule couche a été fixée à 1,25 mm. Sur la base de l'algorithme de découpage d'épaisseur de couche uniforme présenté dans les sections précédentes, le modèle a donc été découpé couche par couche et les trajectoires pour chaque couche ont été générées automatiquement. La simulation et l'expérimentation pour tester les trajectoires prévues pour le modèle avec plusieurs caractéristiques de forme ont été réalisées simultanément.

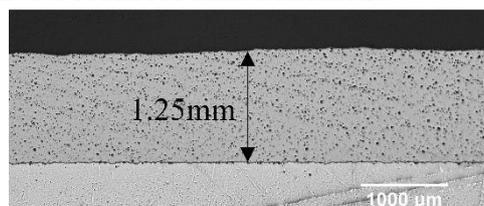


Figure 5.14 Image en coupe d'une seule couche de dépôt.

Le logiciel Robotstudio™, développé par la société suédoise ABB, permet de simuler le

mouvement des trajectoires générées, comme le montre la Figure 5.15. En fait, la trajectoire générée par MATLAB est composée de points de chemin comprenant les coordonnées 3D, l'orientation et la vitesse de déplacement pour chaque point du chemin. Par conséquent, après avoir importé le fichier des points de trajectoire pour la fabrication de composants avec plusieurs caractéristiques de forme dans Robotstudio™, le substrat saisi par le robot se déplace le long des points de trajectoire en fonction des configurations de posture correctes du robot.

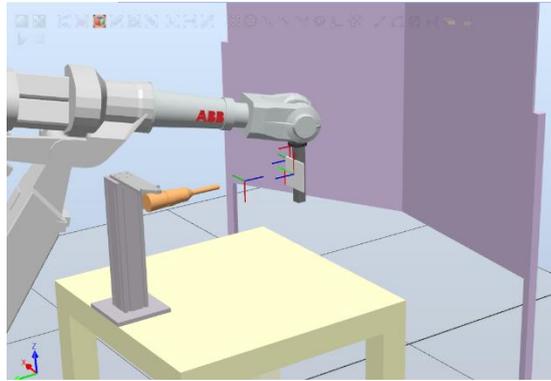


Figure 5.15 Environnement de projection virtuel pour une Fabrication Additive par Cold-Spray.

La Figure 5.16 montre la simulation des trajectoires pour le modèle avec plusieurs caractéristiques de forme lorsque des LP droits ont été utilisés et que le dépôt n'a pas été évité. La forme du dépôt simulé est en grande partie conforme au modèle. Les différentes couleurs de la trajectoire représentent la hauteur des points du chemin et indiquent que les surfaces supérieures des trois caractéristiques de forme ont des hauteurs différentes. Cependant, comme il n'y a pas de planification LP optimale entre les caractéristiques de forme, le robot ira simplement du point final d'une caractéristique de forme au point de départ de la caractéristique de forme suivante. Le LP traverse les caractéristiques de forme qui ont déjà été projetées, comme illustré à la Figure 5.16. Il est concevable que certains dépôts indésirables se constituent, ce qui pourrait affecter la planéité de la surface supérieure et donc la forme finale de la caractéristique de forme.

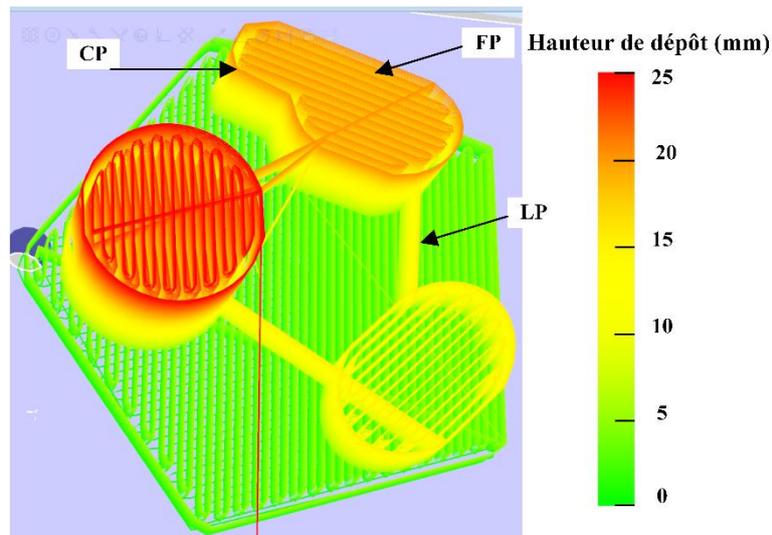


Figure 5.16 Résultat de la simulation des trajectoires sans les LP conçus pour le modèle avec plusieurs caractéristiques de forme.

La Figure 5.17 montre les résultats de la simulation des trajectoires avec des LP conçus. La Figure 5.17 (a) montre le résultat lorsqu'il n'y a qu'une seule caractéristique de forme, c'est-à-dire que la trajectoire ne comprend que des FP et des CP. La Figure 5.17 (b) montre que lorsqu'il y a plus d'une caractéristique de forme, les LP sont générés entre les caractéristiques de forme. Pour assurer une forme précise du dépôt, les LP ne traversent aucune caractéristique de forme précédemment projetée. La Figure 5.17 (c) montre ainsi la trajectoire de l'ensemble du modèle avec plusieurs caractéristiques de forme, y compris les FP, les CP et les LP pour chaque couche. Il convient de noter qu'après avoir projeté une caractéristique de forme, le robot ne se déplace généralement pas vers la caractéristique de forme suivante dans un mouvement linéaire lors de la création du LP (comme illustré dans le cas 2 de la Figure 5.17 (c)). En revanche, comme pour le cas 1 de la Figure 5.17 (c), les deux caractéristiques de forme peuvent être reliées par une ligne droite. Étant donné que le LP ne traverse pas les caractéristiques de forme précédemment projetées (les surfaces supérieures des caractéristiques de forme), un composant de forme quasi nette peut être fabriqué à l'aide des LP conçus. Sur la base des résultats de la simulation, une projection réelle peut donc être envisagée.

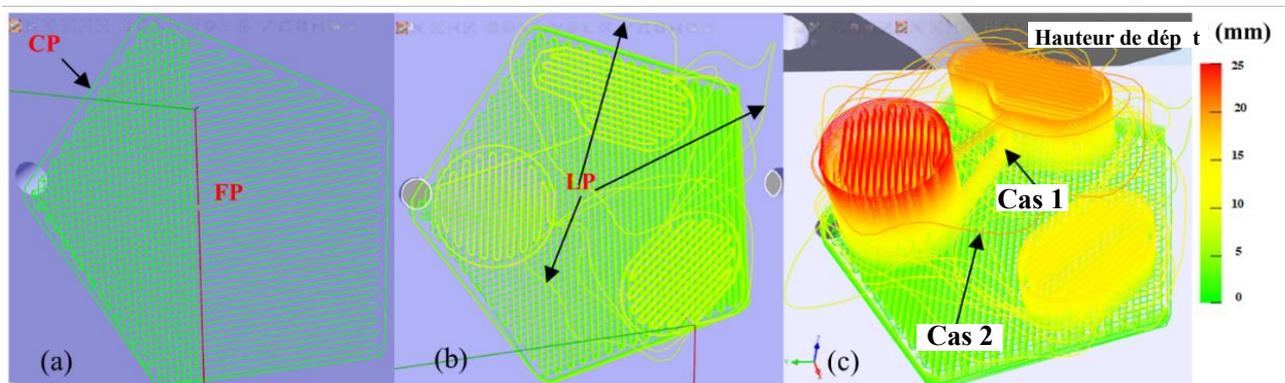


Figure 5.17 Résultat de la simulation de trajectoires avec les LP conçus du modèle avec

plusieurs caractéristiques de forme : (a) Une seule caractéristique de forme ; (b) Plusieurs caractéristiques de forme ; (c) Trajectoire finale du modèle.

Selon la trajectoire générée sur la Figure 5.17 (c), une expérience de FACS a donc été réalisée pour fabriquer le composant avec plusieurs caractéristiques de forme. La Figure 5.18 montre les dimensions du modèle et du dépôt, et les détails sont présentés dans le Tableau 5-2. Les hauteurs et les distances maximales entre deux points sur chaque contour (nommés $d_{2points}$) du dépôt sont plus grandes que celles du modèle. Il y a donc une erreur positive, mais il y a une certaine tolérance pour un usinage ultérieur. La Figure 5.19 montre quant à elle les résultats expérimentaux du dépôt avec plusieurs caractéristiques de forme en fonction des différentes stratégies de dépôt. Les Figures 5.19 (a) et (b) montrent le dépôt avec et sans les LP conçus, respectivement. Il n'y a pas de dépôts inattendus ou indésirables dans la Figure 5.19 (a) par rapport aux dépôts illustrés dans la Figure 5.19 (b). Cependant, la planéité des surfaces supérieures de ces caractéristiques de forme de la Figure 5.19 (a) semble meilleure. En général, l'utilisation de LP conçus réduit considérablement le besoin d'usinage post-FACS, ce qui se traduit par un processus plus efficace et des pièces qui répondent mieux aux exigences de conception. Par conséquent, la planification du chemin entre les caractéristiques de forme est indispensable lors d'une fabrication complexe. Pour vérifier la faisabilité d'une telle méthodologie (de planification de trajectoire), la Figure 5.20 montre par exemple le résultat d'un dépôt avec plusieurs caractéristiques de formes. C'est un exemple de main projetée à l'aide de poudres de cuivre (poudre sphérique, $d_{50}=30 \mu\text{m}$). Grâce au rendement important du procédé cold spray, cette main en cuivre pur de 145 mm de haut, 95 mm de large et 2,3 kg a été fabriquée en 70 minutes au laboratoire.

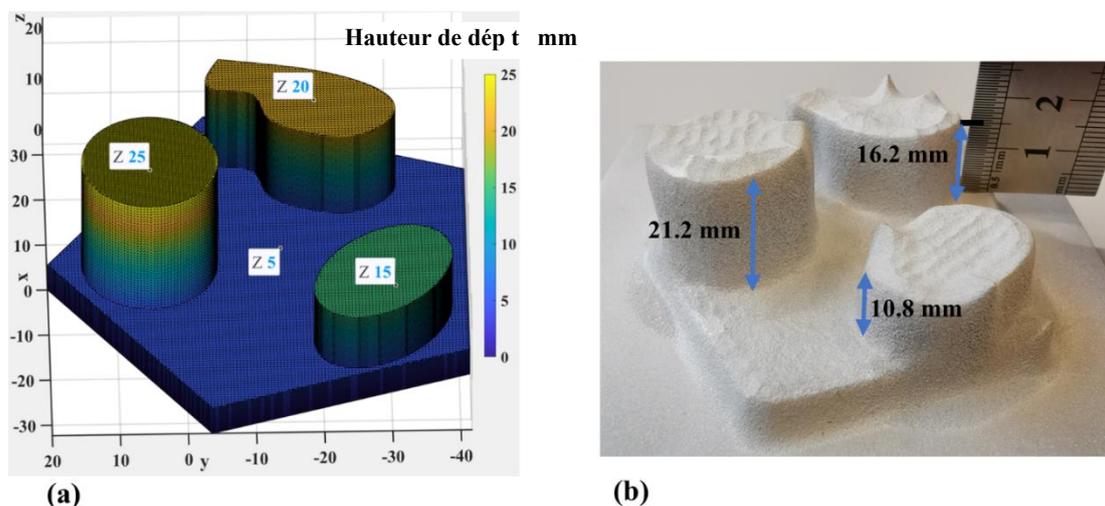


Figure 5.18 Comparaison des dimensions du modèle (a) et du dépôt (b).

Tableau 5-2 Analyse d'erreur de dimension pour le modèle et le dépôt

Caractéristique de forme	Hauteur		$d_{2points}$	
	Erreur absolue (mm)	Erreur relative (%)	Erreur absolue (mm)	Erreur relative (%)
Cylindre	1.2	5.7	3.1	13.4
Cylindre elliptique	0.8	7.4	2.5	9.4
Composant de forme irrégulière	1.2	7.4	3.4	10.6

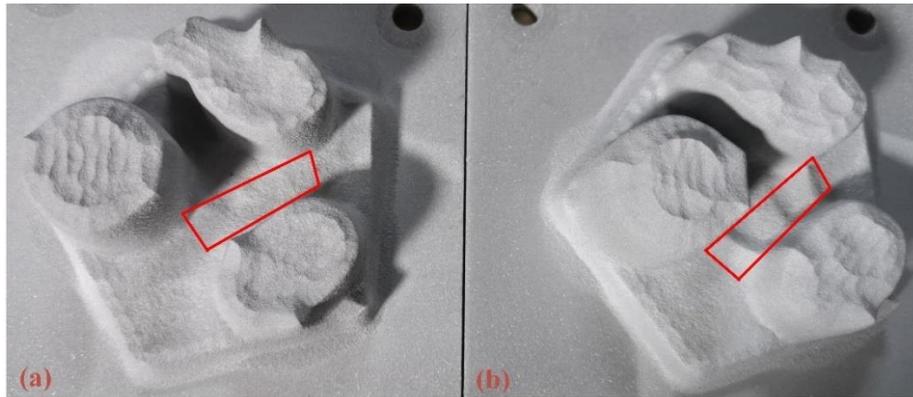


Figure 5.19 Résultats expérimentaux du dépôt avec plusieurs caractéristiques de forme : (a) avec des LP conçus ; (b) sans LP conçus.



Figure 5.20 Vue d'une main en cuivre élaborée par projection cold-spray.

Grâce à cette méthode de planification de trajectoire, cette main de 140 mm de haut a été fabriquée avec succès par projection à froid.

5.4 Conclusion

Lors du processus de fabrication additive par cold-spray, pour les composants aux formes complexes, la planification des trajectoires est une étape très importante. La génération précise

et rapide de la trajectoire de chaque couche devient donc les prémices du FACS. Malheureusement, lorsqu'un composant avec plusieurs caractéristiques de forme est fabriqué, les trajectoires de projection entre les caractéristiques de forme ne peuvent pas être créées facilement en raison du caractère « one-stroke » du procédé de projection à froid. Les trajectoires de projection ne peuvent pas être croisées et le dépôt ne peut pas être interrompu pendant le processus de projection. De plus, le pistolet ou le substrat tenu par le robot doit généralement être dévié d'un certain angle pour compenser la perte de dépôt le long des bords. Pour ces raisons, le développement de la trajectoire générale du robot pour un modèle 3D avec plusieurs caractéristiques de forme avec des géométries complexes peut être difficile. C'est pourquoi, cette thèse présente une méthode précise et efficace de planification de trajectoires de projection qui peut être utilisée pour générer des composants aux géométries complexes en FACS robotisée.

Tout d'abord, sur la base d'un modèle 3D du composant à fabriquer, un nouvel algorithme de découpage paramétrique en couches a été appliqué pour générer les points d'intersection des contours du modèle. Un point dur réside dans le fait que les points de chaque couche sont souvent dans le désordre. Surtout lorsqu'il y a plusieurs caractéristiques de forme dans une couche, certains points d'une caractéristique de forme sont connectés alors à certains points des autres caractéristiques de forme. C'est précisément l'objectif de cette thèse qui consiste alors à regrouper et trier ces points afin que le polygone de tous les points connectés puissent servir de base à la génération de la trajectoire de projection.

Ensuite, sur la base des contours générés du modèle, la planification de la trajectoire a été effectuée comme suit : le chemin de remplissage (FP) a été utilisé pour empiler le matériau couche par couche ; le chemin de compensation (CP) a été utilisé pour compenser la perte de dépôt le long des bords et assurer la perpendicularité souhaitée des bords ; le chemin de transfert (LP) généré par un algorithme de Rapidly Exploring Random Tree (RRT) a été utilisé pour le transfert entre les caractéristiques de forme.

Enfin, la trajectoire de projection du composant à fabriquer peut-être générée de manière précise et rapide. La simulation et les résultats expérimentaux ont révélé que la planification de la trajectoire de projection peut fabriquer efficacement un dépôt de forme quasi nette. Une telle méthodologie démontre donc toute sa pertinence pour l'application du procédé cold-spray en Fabrication Additive.

Références

- [1] P. Haipeng, Z. Tianrui, Generation and optimization of slice profile data in rapid prototyping and manufacturing, *Journal of Materials Processing Technology*. 187–188 (2007) 623–626. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.221>.
- [2] S.H. Choi, K.T. Kwok, Hierarchical slice contours for layered-manufacturing, *Computers in Industry*. 48 (2002) 219–239. [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(02\)00040-4](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(02)00040-4).
- [3] S.L. Thrower, K.A. Al Feghali, D. Luo, I. Paddick, P. Hou, T. Briere, J. Li, M.F. McAleer, S.L. McGovern, K.D. Woodhouse, D.N. Yeboa, K.K. Brock, C. Chung, The Effect of Slice Thickness on Contours of Brain Metastases for Stereotactic Radiosurgery, *Advances in Radiation Oncology*. 6 (2021) 100708. <https://doi.org/10.1016/j.adro.2021.100708>.
- [4] S.C. Johnson, Hierarchical clustering schemes, *Psychometrika*. 32 (1967) 241–254. <https://doi.org/10.1007/BF02289588>.
- [5] Rodriguez, X. Tang, J.-M. Lien, N.M. Amato, An obstacle-based rapidly-exploring random tree, in: *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, 2006: pp. 895–900. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2006.1641823>.
- [6] S.M.L. and J.J. Kuffner, *Rapidly-Exploring Random Trees: Progress and Prospects*: Steven M. LaValle, Iowa State University, A James J. Kuffner, Jr., University of Tokyo, Tokyo, Japan, in: *Algorithmic and Computational Robotics*, A K Peters/CRC Press, 2001.
- [7] B. Li, B. Chen, An Adaptive Rapidly-Exploring Random Tree, *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 9 (2022) 283–294. <https://doi.org/10.1109/JAS.2021.1004252>.
- [8] P. Cheng, S.M. LaValle, Resolution complete rapidly-exploring random trees, in: *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292)*, 2002: pp. 267–272 vol.1. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2002.1013372>.
- [9] M. Jordan, A. Perez, *Optimal Bidirectional Rapidly-Exploring Random Trees*, (n.d.).
- [10] H. Wu, X. Xie, M. Liu, C. Verdy, Y. Zhang, H. Liao, S. Deng, Stable layer-building strategy to enhance cold-spray-based additive manufacturing, *Additive Manufacturing*. 35 (2020) 101356. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101356>.

Conclusions et perspectives

Le cold spray est de plus en plus utilisé aujourd'hui dans la fabrication additive de forme dès lors qu'un tel procédé peut déposer rapidement de la matière première sans dépasser sa température de fusion ce qui en fait donc un procédé particulièrement adapté aux matériaux sensibles à l'oxydation par exemple. De fait, de nombreuses applications peuvent être envisagées dans de plus en plus de domaines comme l'aérospatiale, l'automobile, l'énergie, le médical, la marine, ... ce qui justifie alors un besoin croissant d'évolutions pour réaliser en particulier la fabrication de pièces de diverses structures. C'est précisément l'objectif de ce travail de thèse qui vise à développer un tel système afin de fabriquer des pièces de formes complexes ou plusieurs caractéristiques de forme à la demande. Pour atteindre cet objectif, divers travaux sont alors nécessaires pour développer la modélisation et la simulation numérique du dépôt de matière ainsi que la planification et la génération des trajectoires de projection.

Dans le contexte de l'Industrie 4.0, il est à noter que l'application du cold-spray dans les industries manufacturières génère des données massives qui nécessitent une surveillance et un traitement permanent. C'est pourquoi, un des premiers objectifs de cette thèse a consisté à développer un nouveau concept modulaire intégré au système de FACS, comprenant la composante matérielle et la composante logicielle. La composante matérielle comprend tout d'abord le module de prétraitement, le module de projection, le module robot, la surveillance en ligne in situ, le module soustractif et le module de post-traitement. La composante logicielle quant à elle comprend le prétraitement des données pour le modèle 3D de la pièce de fabrication, la modélisation et la simulation numérique du dépôt de matière, la planification de la trajectoire de projection du robot ainsi que le post-traitement des données. Bien évidemment, l'échange d'informations du système entre les deux composantes est indispensable. Cette modularité du système, basée sur un concept hybride, réalise donc l'ensemble du processus de production de la pièce en cours de fabrication.

Selon le principe couche par couche de fabrication additive des pièces, une méthodologie de modélisation numérique du dépôt (au moyen du logiciel MATLAB) et basée sur une stratégie de reconstruction de géométrie par maillage pour simuler précisément le processus de dépôt de matière a donc tout d'abord été envisagée. Sur la base de la distribution des flux de particules de poudre lors du processus de projection, un modèle de la géométrie du jet statique avec une distribution cylindrique des particules en vol a donc été proposé dès lors que aucune différence est à relever par rapport au modèle de géométrie du jet statique à distribution conique dans le profil de section transversale du revêtement. Cependant, lorsqu'un revêtement multicouche est projeté, la topologie, basée sur les deux modèles, est significativement différente. Les résultats ont révélé en effet que la distribution cylindrique est plus adaptée que la distribution conique (meilleur respect des formes). Ainsi, sur la base de la géométrie du jet, un modèle du dépôt de matière a donc été développé par MATLAB. Les coordonnées spatiales, les données de quaternion, la vitesse de déplacement de la pièce et chaque point de chemin discret ont donc été dérivés de la simulation avec l'aide du logiciel de programmation hors ligne RobotstudioTM, puis un modèle de dépôt continu pour simuler le processus de croissance du revêtement a ensuite été établi. La comparaison de la simulation et des résultats expérimentaux a permis comme il se doit de vérifier l'efficacité d'une telle méthodologie pour

simuler avec précision l'évolution du dépôt au cours du processus de fabrication additive par cold-spray.

Pour les pièces de géométrie complexe, une planification des trajectoires de projection est donc nécessaire. Pour cela, à partir du modèle 3D du composant à fabriquer, un nouvel algorithme paramétrique de découpage en couches a été proposé pour générer les points d'intersection des contours du modèle. Ces points doivent être regroupés et triés afin que le polygone de tous les points connectés puisse servir de base à la génération de la trajectoire du pistolet de projection. Ensuite, sur la base des contours générés du modèle, la planification de la trajectoire a donc été effectuée comme suit :

- le chemin de remplissage (FP) a été utilisé pour empiler le matériau couche par couche ;
- le chemin de compensation (CP) a été utilisé pour compenser la perte de bord du dépôt afin d'assurer la perpendicularité des bords souhaités ;
- le chemin de transfert (LP) généré par un algorithme de Rapidly Exploring Random Tree (RRT) a été utilisé pour le transfert entre les caractéristiques de forme.

Ainsi, la trajectoire de projection de la pièce à fabriquer peut-être générée de manière précise et rapide. Tous ces outils de simulation complétés des résultats expérimentaux ont donc permis la planification des trajectoires de projection pour démontrer la capacité de fabrication de pièces de géométrie complexe aux contours acceptables. Une telle méthodologie avec tous ses développements démontre ainsi sa parfaite application à la Fabrication Additive par Cold-Spray.

Cependant, dans l'économie numérique actuelle, le délai de mise sur le marché d'un produit peut grandement affecter sa rentabilité. Une mise sur le marché plus rapide de produits répondant aux attentes des consommateurs est donc devenue aujourd'hui une bataille constante entre les entreprises en concurrence. Dans le domaine de la fabrication additive par cold-spray par exemple, pour rendre le processus de fabrication plus intelligemment intégré l'ensemble des étapes de fabrication, de la conception à la livraison, est au centre de cette étude. Un nouveau concept modulaire intégré au système de FACS a donc été proposé pour fabriquer des pièces de formes complexes ou plusieurs caractéristiques de forme à la demande. Cependant, d'autres travaux de recherche et d'exploration sont encore nécessaires pour poursuivre le développement d'un tel système.

A l'heure actuelle, divers revêtements ont d'ores et déjà été développés au moyen du procédé CS, mais les matériaux utilisés pour la FACS sont principalement le cuivre et l'aluminium. Une des perspectives consistera donc à poursuivre le travail avec de nouveaux matériaux qui doivent être mis en œuvre et testés pour explorer la pertinence du CS dans le domaine de la FA.

De même, une compréhension approfondie des paramètres cinématiques de projection est toujours l'un des axes de recherche à poursuivre dès lors que leurs effets sur les propriétés du dépôt ne sont pas entièrement connus. Un schéma de sélection standard des paramètres pour obtenir une forme et des propriétés optimales du dépôt doit être développé.

De plus, le modèle actuel développé dans ce travail pour simuler l'évolution de la croissance des couches est possible aujourd'hui encore avec une faible rapidité. Effectuer un travail de simulation avec précision et à grande vitesse est donc toujours une orientation des

prochains travaux de recherche.

La méthodologie actuellement développée dans ce travail pour générer les trajectoires de projection est d'ailleurs encore incomplète. Des limitations lorsque la pièce en cours de fabrication présente des caractéristiques concaves multiples importantes persistent et en font donc un prochain sujet d'exploration.

De la même façon, les propriétés des revêtements générés par FACS ne sont pas encore étudiées en détail. En particulier, avec le principe d'accumulation couche par couche des jets de matière, les effets interactifs des divers paramètres paramétriques peuvent entraîner des changements importants dans les propriétés des dépôts. En outre, appliquer et développer des méthodes de post-traitement plus avancées (par exemple, traitement de surface au laser, pressage isostatique à chaud, grenailage de surface) pour améliorer les propriétés des produits FACS peuvent donc être envisagées.

Ce travail a d'ailleurs intégré la fabrication additive soustractive dans le système mais n'applique actuellement que quelques post-traitements simples. Lorsqu'il s'agit de trajectoires d'usinage complexes, la coopération multirobot peut donc devenir une direction prometteuse.

Dans le nouveau concept modulaire intégré du système de FACS, l'échange d'informations opportun et précis entre la composante matérielle et la composante logicielle est bien évidemment essentiel. L'intelligence artificielle peut donc être d'une grande aide dans ce développement.

Il n'existe de même pas de norme disponible pour la conception d'équipements FACS facilement adoptables par les industriels, ce qui constitue un inconvénient majeur quant à son application industrielle. C'est pourquoi une conception standard de l'équipement FACS est donc indispensable.

Enfin, il est possible de considérer la fabrication additive par cold-spray comme une technologie « verte », dès lors que les pièces peuvent être remises à neuf et réparées par le biais d'un tel processus plutôt que remplacées. Il devient possible ainsi d'économiser à la fois des coûts et de l'énergie tout en améliorant la durabilité à long terme des actifs industriels de grande valeur. Comme pour toute nouvelle technique industrielle, il peut y avoir des risques. La fabrication durable dans le respect de l'environnement reste donc une direction de recherche clé pour l'avenir.

Title: Contributions to cold spray additive manufacturing: simulation of formation and planning of spraying trajectories in the case of parts with complex shapes

Keywords: cold spray additive manufacturing; robot; modeling; simulation; trajectory

Abstract: Cold Spray (CS) is a thermal spray process commonly used in the field of surface treatment. Although CS has become established in recent years, especially for repairs, it is still in its infancy as an Additive Manufacturing (AM) process. Therefore, there is a growing need for a systematic concept to realize parts of various structures in order to achieve the design freedom expected from Cold Spray Additive Manufacturing (CSAM).

This is precisely the objective of this thesis, which aims to develop an integrated modular system to manufacture parts with complex or multifeatured shapes on demand. Depending on the shape, the objective of this work was to develop a numerical model of the deposit in order to plan and generate of spraying trajectories. Thus, an intelligent concept integrated in the CSAM system, including

the hardware and software components was developed. The hardware component is designed and organized as an open and modular concept. Furthermore, it should be noted that the manufacturing is inseparable from the data and information support by the software component. In this software component, a numerical model for simulating the deposit growth process has therefore been established. In addition, a precise and efficient method of planning the spraying trajectories has been proposed in order to fabricate components with complex geometries in robotic CSAM.

This modularity of the system, based on a hybrid concept, thus carries out the entire production process of the part. The cold spray additive manufacturing process then represents a new alternative production method.

Titre : Contributions à la fabrication additive par projection à froid : simulation de la formation et planification des trajectoires de projection dans le cas de pièces de formes complexes

Mots clés : fabrication additive par cold spray ; robot ; modélisation ; simulation ; trajectoire

Résumé : La projection à froid (Cold Spray) est un procédé de projection thermique couramment utilisé dans le domaine des traitements de surfaces. Si le Cold Spray (CS) s'est imposé ces dernières années, notamment pour les réparations, il n'en est encore qu'à ses balbutiements en tant que procédé de Fabrication Additive (FA). C'est pourquoi, il apparaît aujourd'hui le besoin croissant d'un concept systématique afin de réaliser des pièces de diverses structures pour atteindre véritablement la liberté de conception attendue en Fabrication Additive par Cold-Spray (FACS).

C'est précisément l'objectif de cette thèse qui vise à développer un système modulaire intégré afin de fabriquer des pièces de formes complexes ou plusieurs caractéristiques de forme à la demande. Selon la forme, l'objectif de ce travail a consisté donc à développer une modélisation et simulation numérique du dépôt de matière afin de planifier la génération de trajectoires de

projection. Ainsi, un concept intelligent, intégré au système de FACS, comprenant la composante matérielle et la composante logicielle a été développé. La composante matérielle est conçue et organisée comme un concept ouvert et modulaire. De plus, il convient de noter que la fabrication est indissociable du support des données et d'informations par la composante logicielle. Dans cette composante logicielle, un modèle numérique permettant de simuler le processus de croissance du dépôt a donc été établi. Ainsi, une méthode précise et efficace de planification des trajectoires de projection a donc été proposée afin de générer des composants aux géométries complexes en FACS robotisée.

Cette modularité du système, basée sur un concept hybride, réalise ainsi l'ensemble du processus de production de la pièce. Le procédé de Fabrication Additive par Cold-Spray (FACS) représente alors une nouvelle méthode de production alternative.