



HAL
open science

Contributions à la modélisation géométrique du dépôt de matière pour l'élaboration d'un jumeau numérique du procédé WAAM

François Rouchon

► To cite this version:

François Rouchon. Contributions à la modélisation géométrique du dépôt de matière pour l'élaboration d'un jumeau numérique du procédé WAAM. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Paris-Saclay, 2022. Français. NNT : 2022UPAST088 . tel-03964838

HAL Id: tel-03964838

<https://theses.hal.science/tel-03964838>

Submitted on 31 Jan 2023

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.

Contributions à la modélisation géométrique du dépôt de matière pour l'élaboration d'un jumeau numérique du procédé WAAM

*Contributions to the geometric modeling of material deposition for
the development of a digital twin of the WAAM process*

Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay

École doctorale n° 579
Sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences (SMEMAG)
Spécialité de doctorat : Génie Mécanique
Graduate School : Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes, Référent : ENS Paris-Saclay

Thèse préparée au LURPA, (Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay) ,
sous la direction de Sylvain LAVERNHE, Professeur des Universités,
le co-encadrement de Christophe TOURNIER, Professeur des Universités
et la co-supervision de Xavier LORANG, IRT SystemX.

Thèse soutenue à Paris-Saclay, le 21 juin 2022, par

François ROUCHON

Composition du jury

Vincent Cheutet Professeur des Universités, INSA Lyon	Président
Matthieu Rauch Maître de Conférences HDR, Centrale Nantes	Rapporteur & examinateur
Frédéric Vignat Maître de Conférences HDR, Université Grenoble Alpes	Rapporteur & examinateur
Sébastien Campocasso Maître de Conférences, Université de Toulon	Examineur
Christophe Tournier Professeur des Universités, ENS Paris-Saclay	Examineur
Sylvain Lavernhe Professeur des Universités, Université Paris-Saclay	Directeur de thèse

Remerciements

Mes travaux de recherche ont été menés entre le Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée (LURPA), à l'ENS Paris-Saclay, et l'équipe du Projet WAS de l'Institut de Recherche Technologique SystemX (IRT SystemX) mandaté par le consortium Additive Factory Hub (AFH). Je remercie donc tous les acteurs qui ont permis de créer ce projet et m'ont offert cette opportunité de travailler dans ce domaine fascinant, en particulier Madame Pauline Le Borgne et Monsieur Xavier Gostiaux du côté d'AFH, Monsieur Xavier Lorang de l'IRT SystemX et Messieurs Sylvain Lavernhe et Christophe Tournier du côté LURPA.

Je remercie les membres du jury d'avoir accepté de lire et d'évaluer mon travail avant et pendant ma soutenance. Je souhaite remercier : Monsieur Vincent Cheutet de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury; Monsieur Matthieu Rauch et Monsieur Frédéric Vignat d'avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse; Monsieur Sébastien Campocasso pour avoir accepté de faire partie de ce jury en tant qu'examinateur.

Mes plus chaleureux remerciements vont tout naturellement à mon encadrement de thèse Sylvain Lavernhe, directeur, et Christophe Tournier, co-encadrant, pour leur aide précieuse, leur soutien sans faille et tout simplement pour la qualité de leur encadrement que ce soit sur le plan professionnel ou humain. Vous qui m'avez tant appris lorsque j'étais étudiant à Cachan, puis lors de ces trois années, vous avez su me conseiller et m'aiguiller d'une main de maître et avec toute la bienveillance et la patience que cela demande. Ce fut un réel plaisir de travailler à vos côtés et je ne saurais jamais assez vous remercier pour tout cela. Je vous dois ma réussite.

Je souhaite ensuite remercier l'IRT SystemX de m'avoir offert l'opportunité de faire cette thèse. Merci à Xavier d'avoir animé notre petite équipe et supervisé mon travail. Merci à Chiara, Chetra et Ramdane qui nous ont ensuite rejoints et avec qui ce fut toujours un plaisir de travailler ou tout simplement échanger autour de la machine à café. Enfin, je voudrais remercier mon ami Ali, toujours de bon conseil et sans qui mon expérience à l'IRT n'aurait pas été la même. J'adresse aussi mes remerciements à Quentin et Jeremy d'AFH dont l'aide a été précieuse au pied de la machine pour démêler ce sac de nœuds qu'est la fabrication additive par dépôt de fil à l'arc.

Je tiens aussi à remercier l'équipe du LURPA et plus largement l'équipe du Département Génie Mécanique de l'ENS. Merci à Philippe, Nicolas, Adrian, Benjamin, Francis et Rémi pour vos nombreux services. Merci à Bruno, Kévin, Fred, Nicolas et Baptiste pour leur aide précieuse pour la préparation de la soutenance. Merci à tous les doctorants que je ne saurais citer de peur d'en oublier, les plus anciens comme les nouveaux et même ceux en devenir, pour tous ces bons moments passés au laboratoire. Aussi ironique que cela puisse paraître, le tintement de cette maudite cloche annonçant nos pauses finira par me manquer. Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à mes anciens co-bureaux Kamel et Baptiste et à l'actuel, Clément, pour toutes ces discussions passionnantes autour de nos travaux mais aussi pour les nombreux fous rires qui, je l'espère, continueront à résonner dans ce bureau.

J'adresse ensuite mes remerciements à tous mes amis de tous horizons : les camarades de l'ENS, les coéquipiers de rugby de la grande ASPIQUE et du ROC Giffois, les copains de mon sud

ouest natal que j'ai hâte de rejoindre. Avec vous à mes côtés il ne peut rien m'arriver et j'espère, malgré la distance, continuer de partager de bons moments de vie avec vous. De plus, je remercie mes colocataires, passés comme présents. Marilou, Pierre, Jérémie, Margot, Marsel, Clémence et les nombreux habitants de la Bikok : j'ai adoré partager mon quotidien avec vous et je vous remercie de m'avoir supporté tout ce temps. Je chérirai ces moments, vous me manquerez.

Je souhaiterais conclure ces remerciements par ma famille qui m'a encouragé dans la poursuite des études et toujours soutenu. Merci ma chère sœur pour tout ce que tu as fait pour moi en me montrant la voie de l'ENS et même de la maison dans laquelle habiter ! Et surtout, merci Maman, toi qui a fait tant de sacrifices pour Cécile et moi, tu nous as tant donné et poussés à faire des études, cette réussite c'est aussi la tienne et tu peux être fière. Enfin, une dernière pensée émue à mon Tonton Bernard et mon Papi Louis, vous m'avez donné goût, à votre manière, au bricolage et à la mécanique et je suis sûr que si j'en suis arrivé ici aujourd'hui c'est grâce à vous.

Table des matières

Table des matières	v
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	xiii
Introduction Générale	3
1 Introduction	5
1 Procédés DED, WAAM et soudage	6
1.1 Les procédés DED dont le WAAM	6
1.2 Le soudage à l'arc	8
2 Processus d'élaboration en WAAM	15
2.1 Plateforme expérimentale	16
2.2 Les verrous du WAAM	17
2.3 Chaîne numérique	20
3 Jumeau numérique	25
3.1 Concepts	25
3.2 Proposition d'architecture	26
4 Problématiques	28
2 Mono cordons rectilignes	31
1 État de l'art sur la modélisation géométrique des monocordons	32
1.1 Modèle de cordons	32
1.2 Caractérisation et surfaces de réponse	33
1.3 Modèle physique	34
2 Caractérisation expérimentale d'un modèle géométrique de cordons pour l'acier G3Si	38
2.1 Campagne expérimentale	38
2.2 Méthodes de post-traitement	38
2.3 Observations et analyses	44
3 Caractérisation expérimentale d'un modèle géométrique de cordon pour l'acier X90-IG	48
3.1 Campagne expérimentale	48
3.2 Observations et analyses	49
3.3 Mono cordon rectiligne à dimensions variables	54
4 Synthèse	56
3 Repliement de cordon	57
1 Introduction	58
2 Campagne expérimentale	60
3 Modélisation des phénomènes observés	62
3.1 Comportement cinématique du robot	62
3.2 Trajectoire perçue	67
4 Campagne expérimentale complémentaire	71

4.1	Observations du cordon en cours de fabrication	72
4.2	Identification de la longueur de poursuite	78
4.3	Analyse du volume de matière déposée	79
5	Modèle de dépôt cumulatif de matière	87
5.1	Identification des paramètres	88
5.2	Modélisation des cordons autour des points de changement de direction	90
6	Synthèse	93
4	Assemblage de cordons	95
1	Introduction	96
2	Juxtaposition	100
2.1	Essais de juxtaposition	101
2.2	Décalage des cordons	102
2.3	Observations et Analyses	107
2.4	Modélisation de la juxtaposition	109
2.5	Synthèse	112
3	Empilement/Assemblage de cordons	113
3.1	Expérimentations	113
3.2	Mur mono-cordon	113
3.3	Murs épais	114
3.4	Traitement des données expérimentales et analyses	116
4	Modélisation de l'assemblage de cordons	126
5	Source électrique	131
5.1	Régulations possibles de la source FRONIUS	131
5.2	Modélisation de la source	132
5.3	Discussions	135
6	Synthèse	138
	Conclusion et perspectives	139
A	Plan d'expérience X90	I
1	Comparaison mode de transfert	I
1.1	Géométrie	I
1.2	Énergie linéique	I
2	Comparaison gaz	VII
2.1	Géométrie	VII
2.2	Energie linéique	VII
3	Comparaison diamètre fil	XIV

Liste des figures

1	Classification des procédés de fabrication additive [3]	1
2	Nouvelles fonctionnalités apportées par ajouts d’entités géométriques sur des pièces existantes	2
1.1	Classification des procédés de fabrication additive par DED [5]	6
1.2	Diagramme schématique d’une installation WAAM	7
1.3	Exemples de pièces fabriquées en WAAM	8
1.4	Schéma des procédés de soudage MIG/MAG (à gauche), TIG (au centre) et plasma (à droite) par [8]	9
1.5	Schéma détaillé du procédé MIG/MAG	9
1.6	Diagramme Ishikawa du procédé WAAM	10
1.7	Synthèse des plages de paramètres explorées dans la littérature pour des aciers	12
1.8	Exemples de cordons fabriqués avec un ratio λ de 4,8 : $V_f = 6$ m/min, $V_r = 1,25$ m/min (à gauche) et de 24 : $V_f = 6$ m/min, $V_r = 0,25$ m/min (à droite) lors de la campagne expérimentale détaillée chapitre 2 à partir d’un fil en acier X90-IG de diamètre 1 mm, en CMT avec le gaz d’intertage Arcal M14	13
1.9	Caractéristiques primaires et secondaires d’une source [19]	13
1.10	Modes de transfert du métal en soudage MIG/MAG [20]	14
1.11	Schéma du cycle CMT par [24]	15
1.12	Domaines reliant la vitesse d’avance, l’énergie de l’arc, et le taux de dépose en MIG/MAG, en CMT et en TIG [10]	15
1.13	Processus d’élaboration en WAAM	16
1.14	Équipement WAAM de la plateforme Additive Factory Hub	17
1.15	Artefact avec et sans évacuation de chaleur en cours de fabrication [25]	18
1.16	Déformation du substrat initialement plan après une fabrication en WAAM [6]	18
1.17	Exemple de défauts de remplissage observés et la trajectoire employée [26]	19
1.18	Exemples de lacunes et d’accumulations de matière lors du dépôt de cordons	19
1.19	Techniques alternatives d’amélioration du procédé WAAM	20
1.20	Chaîne numérique en WAAM	21
1.21	Démarche de tranchage multi-directions [33]	21
1.22	Démarche de tranchage par surfaces gauches [34]	22
1.23	Démarche de tranchage multi-axes [35]	22
1.24	Illustration de différentes trajectoires et du dépôt prédit. (a) et (b) trajectoire par contour. (c) et (d) trajectoire par MAT. (e) et (f) trajectoire par MAT adaptatif [48]	24
1.25	Organigramme de la stratégie de remplissage proposée [26]	24
1.26	Architecture d’un DT [55]	26
1.27	Architecture proposée du jumeau numérique du système WAAM	27
2.1	Association de différents modèles : parabolique (à gauche), sinusoïdal (au milieu) et gaussien (à droite), à un profil de section de cordon simple [16].	33
2.2	Macrographie de différents cordons (a) $\lambda = 29,3$ (b) $\lambda = 9,7$ [15]	33
2.3	Évolution des dimensions géométriques en fonction des paramètres procédé V_f et V_r [14]	34

2.4	Géométrie de la section du cordon par [59]	35
2.5	Comparaison des profils obtenus lors de l'association de différents modèles issus de la littérature à deux profils expérimentaux issus de la mise en œuvre de deux valeurs de λ	37
2.6	Cordons fabriqués en acier G3Si	38
2.7	Profil mesuré exprimé dans le repère caméra	39
2.8	Schéma de définition de la camera de suivi de joint FUJI CAM et sa position par rapport à la torche	40
2.9	Numérisation d'un cordon	41
2.10	Filtrages du nuage de points pour isoler uniquement les points appartenant au cordon	42
2.11	Filtrages du nuage de points pour isoler uniquement les points appartenant au cordon	43
2.12	Evolution des grandeurs électriques et de la vitesse fil issues du poste de soudage	44
2.13	Évolution des dimensions géométriques des cordons en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,2 mm, un gaz Arcal Speed, en CMT pour le matériau G3Si	45
2.14	Énergie linéique déposée en fonction de V_f et V_r pour le matériau G3Si avec un fil de $\varnothing 1,2$ mm	46
2.15	Évolution des paramètres géométriques du cordon par Plangger et al. [14] avec nos résultats superposés en traits gras avec le même code couleur	47
2.16	Cordons fabriqués en X90-IG	48
2.17	Lignes d'iso hauteur et iso largeur en fonction des vitesses fil et robot pour le fil de diamètre 1,0 mm de X90-IG, un gaz d'inertage M14 et la synergie CMT	50
2.18	Évolution des dimensions géométriques des cordons en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1 mm et un gaz M14	51
2.19	Macrographies des cordons déposés en CMT et pulsé avec un fil de diamètre 1 mm, un gaz d'inertage M14, $V_r = 0,75$ m/min et $V_f = 8$ m/min. Crédit : CETIM-Vallourec-AFH	52
2.20	Macrographies des cordons déposés en CMT et pulsé avec un fil de diamètre 1 mm, un gaz d'inertage M14, mettant en œuvre un $\lambda = 8$. Crédit : CETIM-Vallourec-AFH	53
2.21	Énergie linéique déposée en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1 mm et un gaz M14	53
2.22	Essais en escalier	55
3.1	Comparaison du même artefact fabriqué avec (à droite) et sans (à gauche) la méthode d'adaptation des paramètres procédé [27]	58
3.2	Méthode de correction pour la fabrication d'angle aigu par [62]	59
3.3	Schéma de la situation de juxtaposition pour une trajectoire hybride contouring/zig-zag	60
3.4	Cordons fabriqués présentant des changements de direction	61
3.5	Cordon fabriqué avec $V_f = 8$ m/min, $V_r = 0,75$ m/min, $\tau = 50$, $\alpha = 90^\circ$	62
3.6	Comparaison des trajectoires simulées et mesurées pour différents angles avec $V_r = 0,75$ m/min et $\tau = 50$	63
3.7	Évolution de la vitesse minimale relative (à gauche) et écart au contour (à droite) en fonction des paramètres α et τ	63
3.8	Méthode de génération de profil cinématique par filtrage FIR [66]	65
3.9	Influence du paramètre τ sur l'interpolation de la trajectoire et son comportement cinématique	66
3.10	Évolution de la vitesse d'avance en fonction du temps le long des trajectoires simulée et mesurée	67
3.11	Schéma de définition de la trajectoire de poursuite	68
3.12	Trajectoires de poursuite à la trajectoire mesurée pour différentes longueurs de poursuite	68
3.13	Trajectoire de poursuite calculée pour la longueur optimale identifiée pour un virage de 135° - zone de striction identifiée en rouge	69

3.14 Évolution de la hauteur le long de la trajectoire de poursuite par rapport à la hauteur moyenne mesurée sur les parties rectilignes (en rouge)	70
3.15 Sections extrudées selon la trajectoire de poursuite à la torche	70
3.16 Cordons fabriqués avec des angles variant entre 30° et 150° avec un pas de 15°	71
3.17 Montage expérimental de la caméra et image obtenue	72
3.18 Portions rectilignes des cordons fabriqués	73
3.19 Processus de détachement des taches de silicate	74
3.20 Animation de la fabrication du cordon S57 virage à 120° à droite (vitesse x0,5)	75
3.21 Cordon S57 virages à 150° à gauche puis à droite	75
3.22 Cordon S57 virage à 120° à gauche puis à droite	76
3.23 Cordon S57 virage à 90° à droite puis à gauche	76
3.24 Cordon S57 virage à 45° à gauche puis à droite	77
3.25 Cordon S58 virage à 120° à droite	77
3.26 Cordon S59 virage à 120° à droite	78
3.27 Évolution de la longueur de poursuite	79
3.28 Principales étapes du traitement du nuage de points	80
3.29 Géométrie cible avec en rouge le volume déposé 2 fois et en vert le raccord à ajouter	82
3.30 Décomposition du volume matière	83
3.31 Évaluation des différents volumes pour chaque virage avec : - S57 : $V_f = 8,0$ m/min, $V_r = 0,75$ m/min, $\tau = 50$ - S58 : $V_f = 8,0$ m/min, $V_r = 0,75$ m/min, $\tau = 100$ - S59 : $V_f = 8,0$ m/min, $V_r = 0,50$ m/min, $\tau = 100$	84
3.32 Décomposition du volume global en plusieurs effets pour caractériser l'accumulation de matière avec : - S57 : $V_f = 8,0$ m/min, $V_r = 0,75$ m/min, $\tau = 50$ - S58 : $V_f = 8,0$ m/min, $V_r = 0,75$ m/min, $\tau = 100$ - S59 : $V_f = 8,0$ m/min, $V_r = 0,50$ m/min, $\tau = 100$	86
3.33 Schéma de la forme du bain liquide : (a) elliptique, (b) goutte d'eau [28]	87
3.34 Modélisation par dépôt cumulatif de matière	88
3.35 Image du bain liquide et ses dimensions (en mm)	89
3.36 Projection de la fonction de répartition sur l'image du bain liquide	91
3.37 Simulation des géométries pour différents angles α sur la base de l'essai S57 : $V_r = 0,75$ m/min et $\tau = 50$	92
3.38 Positions successives de la fonction de répartition au cours de la simulation	93
4.1 Schéma du <i>Flat top Overlapping Model</i> par [16][15][70]	96
4.2 Schémas du <i>Tangent Overlapping Model</i> par [56]	97
4.3 Schéma <i>Double Tangent Overlapping Model</i> par [57]	98
4.4 Géométrie de la section du cordon par [59]	98
4.5 Influence des paramètres matériaux sur la forme du cordon simulé	99
4.6 Influence des deux paramètres géométriques sur l'allure de la modélisation du cordon	100
4.7 Illustration schématique de l'effet de décalage des cordons lors de la juxtaposition	100
4.8 Illustrations des tapis fabriquées	102
4.9 Cordons réalisés pour mettre en évidence le phénomène de décalage	102
4.10 Tapis fabriqué avec un λ de 5,33 et une distance de juxtaposition de $0,8 * w$	103
4.11 Illustration des cordons générés (à gauche) et section mesurée (à droite)	103
4.12 Allure des sections prélevées dans les zones 1 et 2 illustrées dans le même plan pour les 3 essais	104
4.13 Illustration des aires à comparer	105
4.14 Illustration des cordons générés (à gauche) et section mesurée (à droite)	106
4.15 Illustration des critères de parallélisme et de planéité calculés sur le profil moyen du tapis 1	108
4.16 Illustration d'un cas de juxtaposition lors de la modélisation d'assemblage de cordon	109
4.17 Modélisation des tapis pour les distances de juxtaposition extrêmes pour un ratio λ de 10,67	110

4.18	Modélisation des tapis pour les distances de juxtaposition extrêmes pour un ratio λ de 5,33	111
4.19	Schéma de la trajectoire mise en œuvre pour la fabrication de mur fin	114
4.20	Mur fin fabriqué	114
4.21	Schéma des trajectoires mises en œuvre pour la fabrication de murs épais	115
4.22	Murs épais fabriqués	116
4.23	Numérisation du mur mono cordon	117
4.24	Sections moyennes du mur mono cordon avec la hauteur programmée de la trajectoire	118
4.25	Évolution de la distance entre le tube contact et la pièce	118
4.26	Évolution de la vitesse fil moyenne au cours de la fabrication	119
4.27	Évolution de la tension et de l'intensité	119
4.28	Caractéristique secondaire de la source pour le mur mono cordon	120
4.29	Sections moyennes du mur épais fabriqué avec la trajectoire de type raster	121
4.30	Hauteur de chaque cordon déposé pour le mur fabriqué avec la trajectoire de type raster	122
4.31	Evolution de la distance tube contact/pièce pour le mur épais raster	122
4.32	Points de fonctionnement de la source pour le mur épais Raster	123
4.33	Sections moyennes du mur épais fabriqué avec la trajectoire de type contouring	124
4.34	Evolution de la distance tube contact/pièce pour le mur épais contouring	124
4.35	Points de fonctionnement de la source pour le mur épais contouring	125
4.36	Illustration d'un cas d'empilement lors de la modélisation d'assemblage de cordons	126
4.37	Illustration du cas particulier du dernier cordon d'une couche lors de la modélisation d'assemblage de cordon	127
4.38	Modélisation de 5 couches déposées avec une stratégie raster "one way"	128
4.39	Modélisation de l'empilement avec l'hypothèse des bords libres verticaux	129
4.40	Modélisation des 22 couches déposées avec une stratégie raster	130
4.41	Association du modèle physique de cordons comparée aux sections expérimentales pour les cinq premières couches du mur fin	130
4.42	Stabilisateur de pénétration	131
4.43	Trois réglages de longueur d'arc (0/0,5/2)	132
4.44	Schéma du système de soudure [20]	133
4.45	Évolution des grandeurs mesurées et simulées lors de la fabrication de la dernière couche du mur mono cordon	134
4.46	Caractéristiques de fusion du fil en MIG/MAG	136
4.47	Évolution de la distance tube contact pièce (en haut) et de la tension (en bas) au cours de la trajectoire lors de la fabrication du mur fin	137
4.48	Cartographie 3D de la distance tube contact pièce et de la tension sur la trajectoire du point piloté lors de la fabrication du mur épais	137
A.1	Évolution des dimensions des cordons en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1 mm et un gaz Arcal Speed	II
A.2	Évolution des dimensions des cordons en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,2 mm et un gaz M14	III
A.3	Évolution des dimensions des cordons en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,2 mm et un gaz ArcalSpeed	IV
A.4	Énergie linéique déposée en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1 mm et un gaz Arcal Speed	V
A.5	Énergie linéique déposée en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,2 mm et un gaz M14	V
A.6	Énergie linéique déposée en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,2 mm et un gaz Arcal Speed	VI
A.7	Évolution des dimensions des cordons en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,0 mm et un mode de transfert CMT	VIII

A.8 Évolution des dimensions des cordons en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,0 mm et un mode de transfert Pulsé	IX
A.9 Évolution des dimensions des cordons en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,2 mm et un mode de transfert CMT	X
A.10 Évolution des dimensions des cordons en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,2 mm et un mode de transfert Pulsé	XI
A.11 Énergie linéique déposée en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,0 mm et un mode de transfert CMT	XII
A.12 Énergie linéique déposée en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,0 mm et un mode de transfert Pulsé	XII
A.13 Énergie linéique déposée en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,2 mm et un mode de transfert CMT	XIII
A.14 Énergie linéique déposée en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,2 mm et un mode de transfert Pulsé	XIII
A.15 Évolution des dimensions des cordons en fonction de V_f et V_r pour un mode de transfert CMT et un gaz d'inertage M14	XV
A.16 Évolution des dimensions des cordons en fonction de V_f et V_r pour un mode de transfert CMT et un gaz d'inertage Arcal Speed	XVI
A.17 Évolution des dimensions des cordons en fonction de V_f et V_r pour un mode de transfert pulsé et un gaz d'inertage M14	XVII
A.18 Évolution des dimensions des cordons en fonction de V_f et V_r pour un mode de transfert pulsé et un gaz d'inertage Arcal Speed	XVIII

Liste des tableaux

1.1	Synthèse des caractéristiques de différentes technologies de fabrication additive . . .	7
1.2	Synthèse des plages de paramètres influant sur la géométrie du cordon dans la littérature.	11
1.3	Résumé des différents types de trajectoires	23
2.1	Modèles de cordons et leurs dimensions associées [56]	32
2.2	Synthèse des grandeurs programmées et mesurées pour les essais en G3Si. P : programmée, M : mesurée, E : erreur relative	46
2.3	Niveaux de chaque paramètre variable pour les essais de mono-cordons rectilignes	49
2.4	Macrographies de chaque cordon réalisé pour le fil de diamètre 1,0 mm de X90-IG, un gaz d'inertage M14 et la synergie CMT. Crédit : CETIM-Vallourec-AFH NB : <i>l'échelle n'est pas la même pour chaque image, cette figure ne rapporte que la géométrie des sections des cordons fabriqués</i>	52
2.5	Synthèse de l'énergie volumique moyenne mesurée pour l'ensemble des configurations des paramètres de diamètre fil, mode de transfert et de gaz d'inertage	53
3.1	Niveaux proposés de chaque paramètre pour les essais sur le repliement de cordon * <i>seulement pour 2 essais à $\tau = 0$ et $\tau = 100$ avec $V_r = 0,75$ m/min et $\lambda = 10,67$</i>	60
3.2	Contributions prises en compte dans l'évaluation de chacun des volumes	83
3.3	Dimensions du bain liquide pour deux vitesses d'avance du robot	89
4.1	Niveaux proposés de chaque paramètre pour les essais de juxtaposition de cordons	101
4.2	Tableau récapitulatif des essais sur l'étalement de cordon	106
4.3	Critères de planéité et de parallélisme calculés sur les sections moyennes pour les essais de tapis	107
4.4	Variations des différentes grandeurs entre la 1 ^{ère} et 22 ^{ème} couche	120

Introduction Générale

En contraste avec la fabrication soustractive, la fabrication additive se caractérise par une construction incrémentale couche par couche des entités géométriques composant une pièce. L'apparition de cette technologie remonte aux années 1980 sous le nom de prototypage rapide où son utilisation principale était la fabrication de maquettes et de prototypes pour des besoins de conception [1]. Aujourd'hui la fabrication additive s'inscrit comme une alternative prometteuse, mais aussi complémentaire, à la fabrication soustractive et devient de plus en plus populaire dans le paysage industriel. Les technologies de fabrication additive sont classifiées en sept catégories différentes par l'*International Organization of Standardization* (ISO) [2] schématisées figure 1.

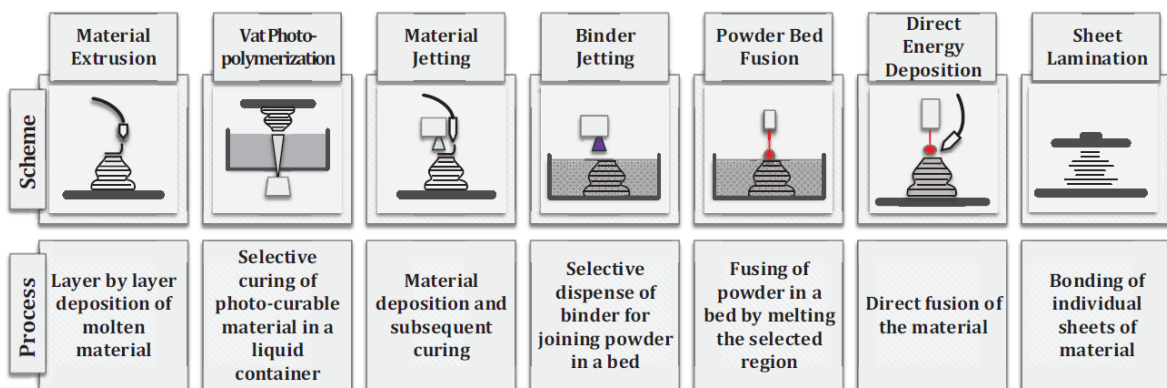
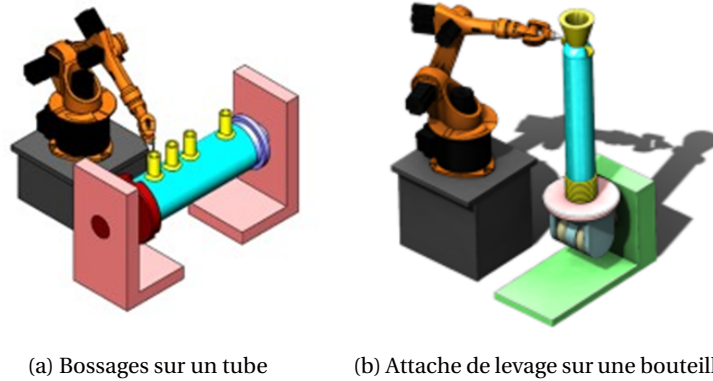


FIGURE 1 – Classification des procédés de fabrication additive [3]

Les procédés de fabrication additive sont particulièrement adaptés à la fabrication de petites séries de pièces finies ou quasi-finies où le faible temps de mise en place du processus de fabrication et la réduction du besoin d'outillages industriels supplémentaires représentent une économie substantielle. De plus, les capacités des technologies de fabrication additive pour fabriquer des pièces aux géométries complexes, avec un large éventail de matériaux, tout en réduisant les coûts de mise en œuvre représentent un potentiel industriel majeur. Néanmoins, les temps de cycle de fabrication avec ces technologies restent encore longs aujourd'hui et demandent une connaissance approfondie du processus de fabrication, mais aussi des propriétés des pièces fabriquées pour tendre vers une industrialisation à grande échelle [4].

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans ce contexte et sont issus de la collaboration entre l'Institut de Recherche Technologique SystemX mandaté par le consortium Additive Factory Hub (AFH) et le Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée (LURPA) de l'École normale supérieure Paris-Saclay. Le consortium francilien AFH réunit de nombreux acteurs académiques et industriels et a pour objectifs de centraliser et mutualiser les compétences et les moyens pour le développement, l'innovation et l'intégration de la fabrication additive dans l'écosystème industriel. AFH dispose, entre autres, d'une plateforme expérimentale exclusivement dédiée au procédé DED par dépôt de fil à l'arc (WAAM).



(a) Bossages sur un tube

(b) Attache de levage sur une bouteille

FIGURE 2 – Nouvelles fonctionnalités apportées par ajouts d’entités géométriques sur des pièces existantes

Pour les membres du consortium AFH partenaires du projet, tel que Vallourec, le CETIM, Air Liquide, EDF et Safran, les applications du WAAM pour la fabrication d’ébauches, l’ajout de fonctions par ajout d’entités géométriques et la réparation par rechargement de matière sont d’un intérêt majeur (figure 2). De plus, le large choix de matériaux compatibles avec le procédé WAAM et son taux de dépose élevé font partie des avantages de cette technologie. Néanmoins, au regard des cas d’usages envisagés et de leur secteurs d’applications, il est indispensable de maîtriser la géométrie déposée mais aussi ses caractéristiques mécaniques et sa microstructure.

L’Institut de Recherche Technologique SystemX se positionne comme un accélérateur de la transformation numérique de l’industrie, des services et des territoires. L’IRT SystemX opère des projets de recherches appliquées orientés autour de cas d’usages au sein de quatre axes principaux, à savoir : le transport autonome et la mobilité, la défense et la sécurité numérique, l’environnement et le développement durable ainsi que l’industrie du futur. L’IRT SystemX apporte des solutions d’architecture système, logicielle et son expertise en matière de développement d’outils numériques en vue du développement et de l’usage d’un jumeau numérique pour le procédé WAAM.

Le premier chapitre de cette thèse présente les procédés de fabrication additive par dépôt d’énergie concentré (DED), le WAAM et le procédé de soudage dont il est largement inspiré. Le processus d’élaboration des pièces en WAAM est ensuite présenté et les principaux verrous technologiques du WAAM sont identifiés. Une étude bibliographique sur la génération de trajectoires pour le WAAM est menée avant d’aborder le jumeau numérique d’un système de production. La définition et les caractéristiques spécifiques d’un tel jumeau font encore l’objet de débats au sein de la communauté spécialisée, néanmoins une architecture fonctionnelle du jumeau numérique de notre installation est proposée. Cette dernière est conçue en adéquation avec les moyens à disposition et se concentre sur l’amélioration et la maîtrise du processus de fabrication d’un point de vue géométrique. Cette architecture de jumeau est alimentée par les travaux menés pour répondre aux problématiques de ces travaux de thèse synthétisées à la fin de ce chapitre.

Le chapitre 2 présente la modélisation et la caractérisation du procédé dans le cadre de la production de mono cordons rectilignes pour deux nuances d’acier, deux gaz d’inertage régulièrement employés, deux diamètres de fil et deux modes de transfert de la matière. L’objectif est d’établir la relation entre les paramètres procédé employés et les dimensions géométriques des cordons générés. Pour chacune des configurations de ces paramètres, de larges plages de vitesse de fil dévidé et de vitesse d’avance du robot sont explorées. Les relations entre les paramètres du procédé et les dimensions géométriques des cordons fabriqués sont ainsi identifiées expérimentalement et capitalisées sous forme d’abaques. Les développements réalisés pour le traitement des

données expérimentales sont aussi présentés. Ces abaques permettent d'anticiper les dimensions géométriques des cordons en fonction des paramètres procédé et, à l'inverse, offrent la possibilité d'identifier les paramètres à mettre en œuvre pour fabriquer un cordon aux dimensions voulues. Enfin, la validité de ces abaques établies dans le cadre de mono cordons rectilignes est élargie à des cordons rectilignes fabriqués avec une vitesse d'avance du robot variable au cours de la trajectoire.

Le chapitre 3 se concentre sur la gestion des passages des points de la trajectoire qui présentent des changements de direction. Les variations locales du comportement cinématique du robot autour de ces points affectent aussi la géométrie des cordons fabriqués. Dans un premier temps, le comportement cinématique du robot est modélisé à partir de l'interpolation de la trajectoire nominale à l'aide de filtres à réponse impulsionnelle finie. Ensuite, le comportement géométrique des cordons est observé expérimentalement autour des points de changement de direction en fonction des paramètres cinématiques de la trajectoire et des paramètres procédé. L'accumulation de matière et ses origines sont ainsi caractérisées. Enfin, une modélisation géométrique du dépôt de matière dans les zones de changement de direction sur un substrat plan est proposée.

Le chapitre 4 porte sur l'assemblage de cordons que ce soit dans un contexte de juxtaposition ou d'empilement. Au travers de plusieurs campagnes expérimentales et de la fabrication d'artefacts simples, le comportement géométrique des cordons et leur assemblage sont étudiés en fonction des paramètres procédé et des paramètres de la trajectoire mise en œuvre. Une modélisation polynômiale de l'assemblage de cordons est ensuite proposée et comparée aux artefacts fabriqués. Cette modélisation permet de mieux appréhender les paramètres de la trajectoire tel que la distance de juxtaposition et la distance intercouche qui sont des paramètres indispensables à la programmation de la trajectoire. Enfin, le comportement de la source électrique est analysé en détail. Cette dernière apporte l'énergie et la matière nécessaires à la fabrication mais son fonctionnement et les régulations qu'elle propose demeurent complexes.

Pour finir, l'ensemble des travaux réalisés est synthétisé dans une conclusion suivie d'une présentation de plusieurs perspectives.

Chapitre 1

Introduction

Ce premier chapitre présente les procédés de fabrication additive par dépôt d'énergie concentrée (DED), le WAAM et le procédé de soudage dont il est largement inspiré. Le processus d'élaboration en WAAM est ensuite présenté et les principaux verrous technologiques du WAAM sont identifiés. Une étude bibliographique sur la génération de trajectoires pour le WAAM est menée avant d'aborder le jumeau numérique d'un système de production. Une architecture fonctionnelle du jumeau numérique de notre installation ayant pour objectif d'améliorer et de maîtriser le processus de fabrication d'un point de vue géométrique est proposée. Cette architecture de jumeau est alimentée par les travaux menés pour répondre aux problématiques de ces travaux de thèse synthétisées à la fin de ce chapitre.

Sommaire

1	Procédés DED, WAAM et soudage	6
1.1	Les procédés DED dont le WAAM	6
1.2	Le soudage à l'arc	8
2	Processus d'élaboration en WAAM	15
2.1	Plateforme expérimentale	16
2.2	Les verrous du WAAM	17
2.3	Chaîne numérique	20
3	Jumeau numérique	25
3.1	Concepts	25
3.2	Proposition d'architecture	26
4	Problématiques	28

1 Procédés DED, WAAM et soudage

1.1 Les procédés DED dont le WAAM

Parmi les différentes catégories de technologies de fabrication additive ([2]), les procédés par dépôt d'énergie concentrée (DED pour *Directed Energy Deposition*) se caractérisent par la présence d'une source d'énergie associée à un flux d'apport de matière coïncidant en un point focal, généralement sous une protection gazeuse. La densité d'énergie apportée permet au métal de fondre autour de ce point, formant ainsi un bain liquide qui, une fois solidifié, génère un cordon. Le mouvement relatif du point de convergence du flux d'apport de matière et d'énergie par rapport à la pièce peut être réalisé grâce à une structure mécanique articulée de type robot ou machine 5 axes.

Pour tous les procédés DED, le matériau d'apport est sous forme de poudre ou de fil. Les sources d'énergie explorées dans la littérature ([5][6]) sont principalement à laser, à plasma, à arc électrique ou à faisceau d'électrons. L'utilisation de sources laser prédomine dans la littérature principalement avec des matériaux d'apport sous forme de poudre tel que le procédé *Laser Metal Deposition* (LMD). Les sources à faisceau d'électrons ont pour avantage de pouvoir mettre en œuvre une plus grande variété de matériaux qu'ils soient sous forme de fil ou de poudre. Les sources à arc électrique sont moins contraignantes à utiliser et leurs emplois avec un matériau sous forme de fil sont très largement répandues car elles ont été historiquement développées dans le cadre du soudage à l'arc. La figure 1.1 synthétise la classification des procédés DED. La mise en œuvre d'un matériau d'apport sous forme de fil couplé avec une source de chaleur sous forme d'un arc électrique définit la technologie de dépôt de fil à l'arc ou *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM).

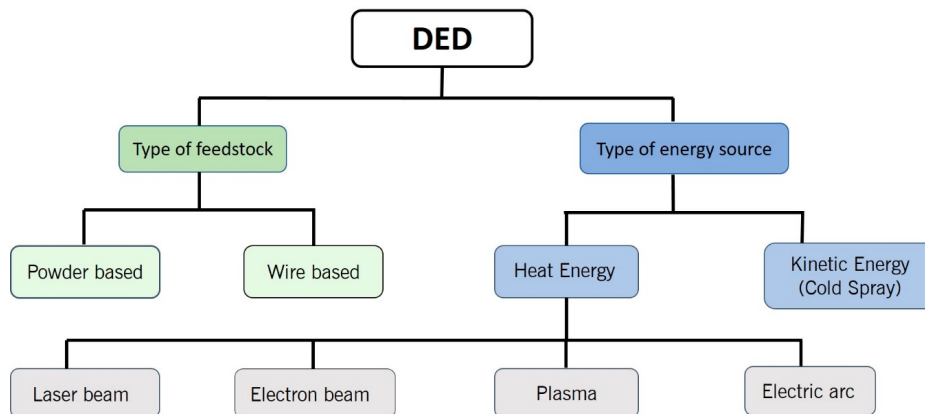


FIGURE 1.1 – Classification des procédés de fabrication additive par DED [5]

La combinaison d'un arc électrique comme source de chaleur et d'un métal d'apport sous forme de fil caractéristique du WAAM est étudiée dans le cadre de la fabrication additive depuis les années 1990 ([7]). Les installations WAAM utilisent des équipements industriels standards : une source électrique, une torche de soudage, un système d'apport de fil et une machine à commande numérique ou un robot anthropomorphe. La figure 1.2 illustre le diagramme typique d'une installation WAAM. Les trajectoires mises en œuvre et les paramètres procédé associés sont spécifiés lors de l'étape de Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO). Le contrôleur du robot est utilisé pour coordonner le mouvement du robot avec le procédé de soudage et leurs actions combinées permettent de fabriquer des pièces couche après couche.

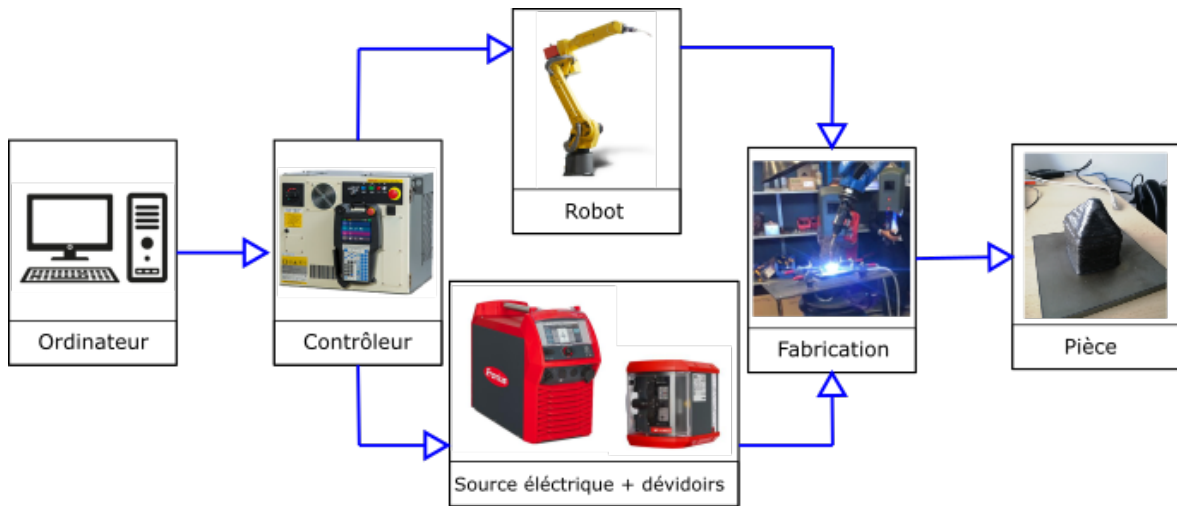


FIGURE 1.2 – Diagramme schématique d'une installation WAAM

Le tableau 1.1 compare les caractéristiques de différents procédés de fabrication additive. Comparativement aux autres technologies de fabrication additive telles que les procédés de fusion sur lit de poudre ou PBF (*Powder Bed Fusion*) et les autres procédés DED tels que le LMD (*Laser Metal Deposition*) ou le WLAM (*Wire Laser Additive Manufacturing*), le WAAM atteint des taux de dépose allant de 4 à 10 kg/h avec une efficacité élevée. En effet, pour les procédés à base de fil, les pertes matière sont très faibles contrairement aux procédés à base de poudre où les pertes sont bien plus élevées et où la gestion des risques HSE associés est plus contraignante. Du fait de ces taux de dépose élevés, le WAAM est particulièrement adapté à l'ébauche de pièces de grandes dimensions comme celles illustrées en figure 1.3.

Matériau d'apport	Procédé	Taux de dépose	Incertitude géométrique	Rendement	Références
Fil	WAAM	4 - 10 kg/h	0,2 mm	90-100%	[8] [9] [6] [10]
	WLAM	2 kg/h	0,1 mm		[8]
Poudre	LMD	1 kg/h	0,05 mm	10-60%	[11] [12]
	PBF	0,1 kg/h			[11] [9]

TABEAU 1.1 – Synthèse des caractéristiques de différentes technologies de fabrication additive



(a) Pont piéton MX3D [13]



(b) Aile pour essais en soufflerie [7]



(c) Composant pour grue [14]

FIGURE 1.3 – Exemples de pièces fabriquées en WAAM

1.2 Le soudage à l'arc

Les sources d'énergie et les systèmes d'apport de fil utilisés en WAAM sont issus du soudage. Parmi les différents systèmes de soudage, on retrouve le soudage MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*) à électrode fusible et ses variantes ainsi que le soudage à électrode non fusible tel que le TIG (*Tungsten Inert Gas*) et le soudage à source plasma (figure 1.4).

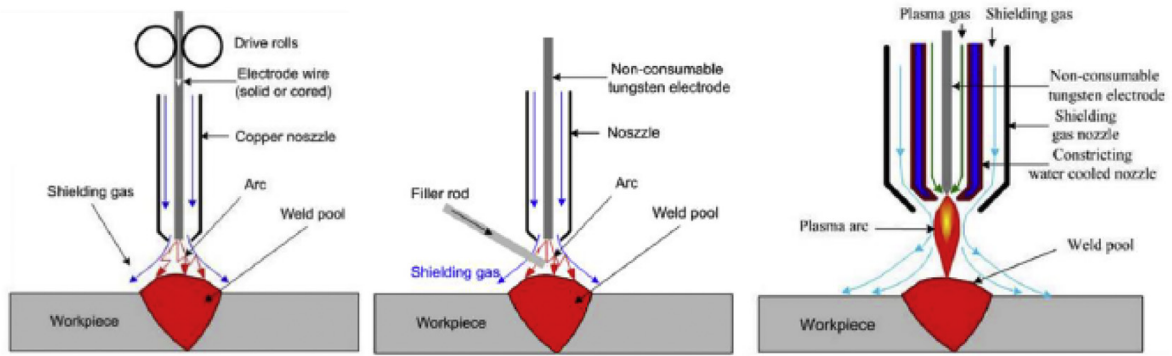


FIGURE 1.4 – Schéma des procédés de soudage MIG/MAG (à gauche), TIG (au centre) et plasma (à droite) par [8]

Dans le cadre du soudage MIG/MAG (illustré figure 1.5), l'arc électrique est donc directement établi entre le fil d'apport qui joue le rôle de cathode et la pièce jouant le rôle d'anode. Le fil est acheminé à l'aide de deux dévidoirs situés au niveau de la bobine et de la torche. Le fil d'apport est fondu grâce au passage du courant dans ce dernier depuis le tube contact et vient se déposer pour alimenter un bain liquide formé à la surface de la pièce. Le dépôt de matière se fait sous une protection gazeuse principalement composée d'argon ou d'hélium afin de limiter l'oxydation du métal au cours de sa solidification et de son refroidissement. La présence d'éléments oxydants tels que le dioxyde de carbone ou le dioxygène dans le gaz d'inertage différencie le MAG du MIG et implique d'utiliser un fil désoxydant.

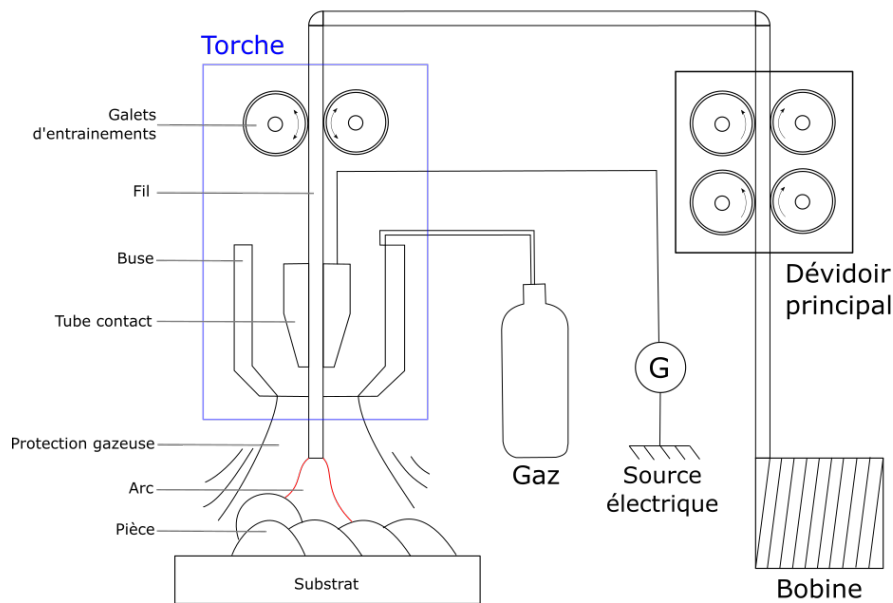


FIGURE 1.5 – Schéma détaillé du procédé MIG/MAG

Les procédés de soudage TIG et plasma utilisent des électrodes en tungstène non fusibles. L'apport en fil requiert donc un dispositif dédié et fait perdre à la torche son axisymétrie, ce qui complique la gestion de son orientation au cours de la trajectoire. La différence entre le soudage plasma et TIG réside dans le fait que pour le soudage plasma, l'arc est plus fin et plus énergétique, par conséquent les cordons déposés sont plus fins. Les soudages TIG et plasma sont compatibles avec une très grande variété de matériaux et ont l'avantage d'être adaptés au titane, contrairement au soudage MIG/MAG.

1.2.1 Cordon de soudure

L'analyse de la littérature nous a permis de synthétiser les paramètres du processus d'élaboration en WAAM. On retrouve trois grandes classes de paramètres illustrées figure 1.6 :

- Paramètres de la source et ses régulations : la source électrique développée par Fronius propose de régler de nombreux paramètres autour de l'arc électrique et de la gestion du fil d'apport qui influencent la géométrie du cordon déposé.
- Paramètres de la trajectoire : plusieurs paramètres du processus sont choisis pour et lors de la définition de la trajectoire de fabrication et relèvent donc du pilotage du robot.
- Paramètres matériaux et gaz : cette classe de paramètres regroupe tous ceux qui ne sont pas choisis lors du réglage de la source ou du choix de la trajectoire. On y retrouve notamment, la composition du fil d'apport et celle du gaz d'inertage.

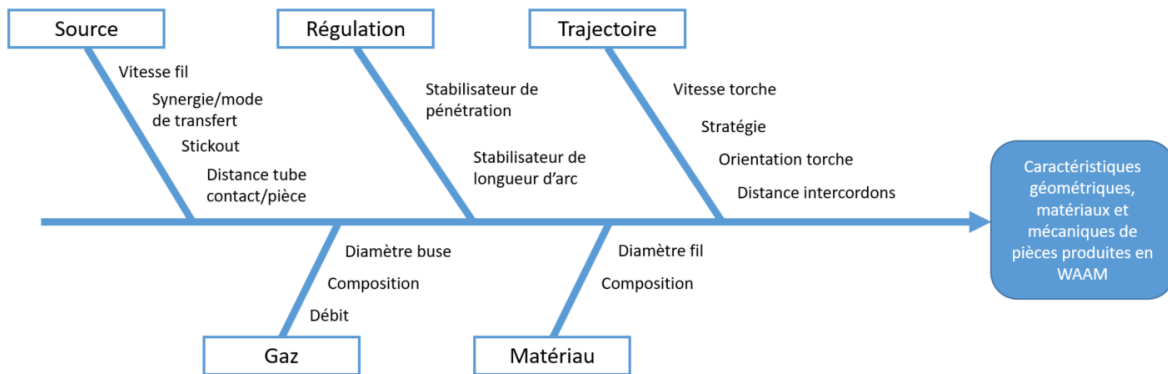


FIGURE 1.6 – Diagramme Ishikawa du procédé WAAM

La plupart des paramètres influant sur la géométrie des cordons déposés en WAAM sont fixes au cours de la fabrication. Entre l'allumage et l'extinction de l'arc électrique, seuls les paramètres liés à la trajectoire peuvent être amenés à évoluer. En effet, le réglage de la source étant manuel, ce dernier ne peut être changé en cours de fabrication. Cependant les éventuelles régulations mises en œuvre et l'intelligence de la source électrique peuvent l'amener à adapter certains de ces paramètres comme la vitesse fil par exemple. Il est tout à fait concevable de définir une stratégie demandant d'adapter le réglage de la source entre deux allumages d'arc, ce qui requiert une intervention de l'opérateur, mais cela n'est pas exploré dans ces travaux où toutes les entités fabriquées conservent le même réglage de la source entre la première et la dernière couche.

Il est important de noter que les paramètres de longueur de fil sorti (ou Stickout) et de distance tube contact/pièce influent de manière significative sur le comportement de la source et ne sont pas, par nature, fixés au niveau de la source. La distance entre le tube contact et la pièce, qui s'exprime comme la somme du Stickout et de la longueur d'arc, dépend directement de la position de la torche par rapport à la pièce. Ainsi ces paramètres sont liés à la trajectoire élaborée préalablement et à la géométrie fabriquée antérieurement.

Référence	Plage de vitesse fil (m/min)	Plage de vitesse robot (m/min)	Matériau fil	∅ (mm)	Gaz	Débit gaz (L/min)	Stick out (mm)	Robot	Source
Plangger et al. [14]	1.5 - 10.5	0.12 - 1.5	X 90-IG	?	M21-ArC-18	15	12	ABB IRB 140	Fronius TPS 400i
Xiong et al. [15]	2.8 - 6	0.15 - 0.45	C0.11Si(0.65– 0.95) Mn(1.8-2.1)Ni0.3Cr0.2	1.2	95%AR + 5% CO ₂	18	?	Motoman UP20	Fronius TPS 5000
Cao et al. [16]	?	1.02	AWSE70S-6	0.8	80%AR + 20% CO ₂	12	?	ABB IRB2400	?
Li et al. [17]	3.73	0.42	H08Mn2Si	1.2	95%AR + 5% CO ₂	18	12	Motoman HP20D	Panasonic YD-500FR
Ding et al. [18]	2 - 8	0.4 - 1	"copper coated steel"	1.2	82%AR + 18% CO ₂	22	18	?	?

TABLEAU 1.2 – Synthèse des plages de paramètres influant sur la géométrie du cordon dans la littérature.

Les deux paramètres prédominants sur la géométrie du cordon pour un matériau donné sont la vitesse de fil d'apport et la vitesse d'avance du robot. La table 1.2 regroupe les plages de valeurs balayées pour ces deux paramètres dans la littérature pour le procédé CMT (*Cold Metal Transfer*) et des aciers faiblement alliés. La technologie CMT est présentée en détail ultérieurement dans ce chapitre. Ces plages sont illustrées dans le diagramme figure 1.7.

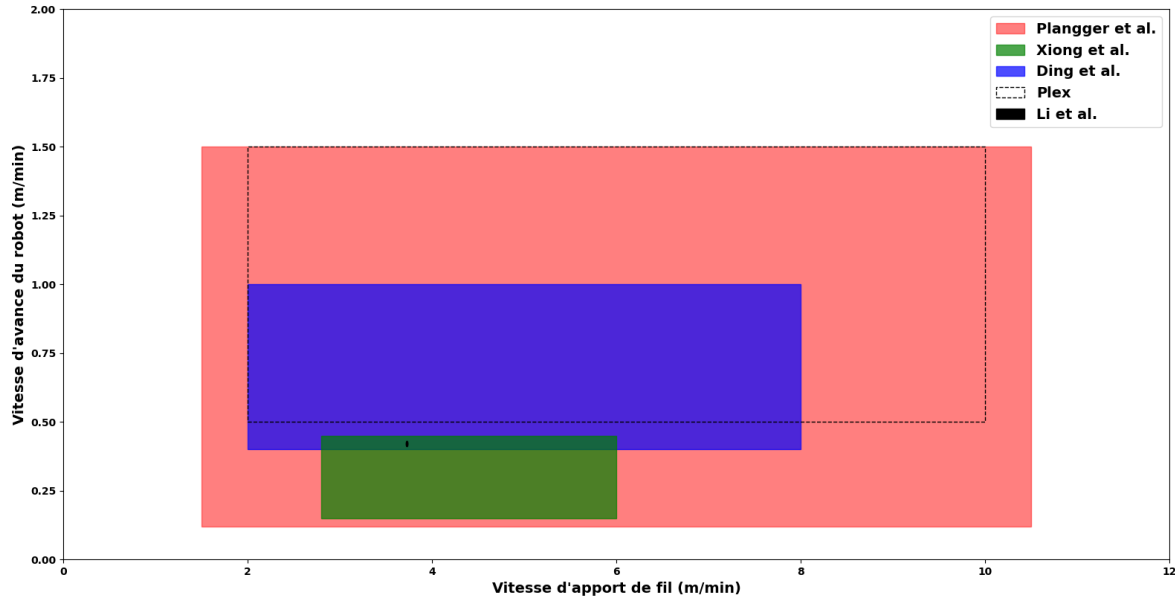


FIGURE 1.7 – Synthèse des plages de paramètres explorés dans la littérature pour des aciers

La figure 1.8 illustre les exemples de deux sections de cordons déposés mettant en œuvre deux ratios λ différents. λ s'exprime comme le ratio entre la vitesse d'apport en fil et la vitesse d'avance de la torche et conditionne la topologie des cordons fabriqués. Un ratio λ faible génère des cordons très évasés et relativement aiguisés tandis qu'un ratio λ élevé donne des cordons beaucoup plus bombés. La largeur L d'une section est définie comme étant la distance entre les deux points de contact du cordon et la surface du substrat. La hauteur H est définie comme la distance entre le point culminant de la section du cordon et le substrat. Ces deux paramètres géométriques associés à l'aire de la section du cordon permettent de caractériser empiriquement la géométrie du cordon.

Quel que soit le ratio λ mis en œuvre, l'observation des sections met en évidence certaines caractéristiques à l'intérieur de la matière. Tout d'abord une zone de refusion (ZRF) est observée entre la surface du substrat et la frontière de la racine du cordon. Cette frontière est particulièrement visible ici grâce au fait que les matériaux du substrat et du cordon n'ont pas tout à fait la même composition. Ensuite, une seconde frontière est visible sous le cordon au sein du substrat qui caractérise la zone affectée thermiquement (ZAT), où la texture de la matière du substrat est différente. Les dimensions de ces deux zones caractérisent la profondeur de l'arc, alors conditionnée par l'intensité lors du soudage.

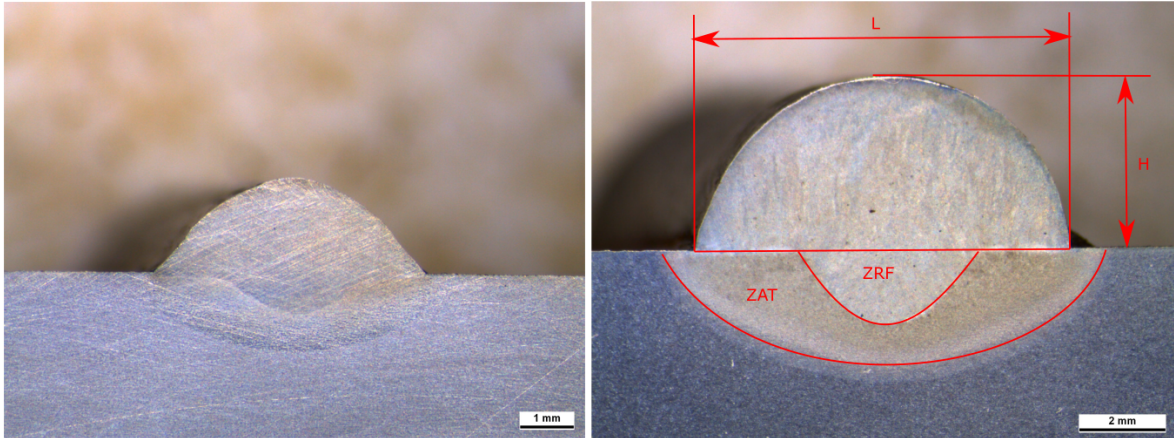


FIGURE 1.8 – Exemples de cordons fabriqués avec un ratio λ de 4,8 : $V_f = 6$ m/min, $V_r = 1,25$ m/min (à gauche) et de 24 : $V_f = 6$ m/min, $V_r = 0,25$ m/min (à droite) lors de la campagne expérimentale détaillée chapitre 2 à partir d'un fil en acier X90-IG de diamètre 1 mm, en CMT avec le gaz d'intertage Arcal M14

1.2.2 Arc électrique et modes de transfert de la matière

Les généralités du fonctionnement du soudage à l'arc décrites dans [19] sont vraisemblablement génériques à tout type de soudage à l'arc (TIG, MIG/MAG, électrode enrobée, etc...). Lors de l'amorçage d'un arc électrique entre une électrode et une pièce métallique reliées aux bornes d'un générateur, il existe une relation entre la tension U et l'intensité I dans le circuit ainsi formé qui définit la caractéristique de l'arc. Cette relation dépend de nombreux paramètres, dont les plus importants sont le gaz d'inertage, la nature et la forme des électrodes (*i.e.* : nuance de matériau et dimensions du fil) ainsi que la distance entre les deux électrodes. L'ensemble des relations entre U et I pour différents jeux de paramètres est représenté par un réseau de courbes appelé caractéristiques d'arc, illustré figure 1.9a. Pour une configuration de paramètres matériau et une longueur d'arc donnée, la caractéristique d'arc donne la relation entre la tension et l'intensité.

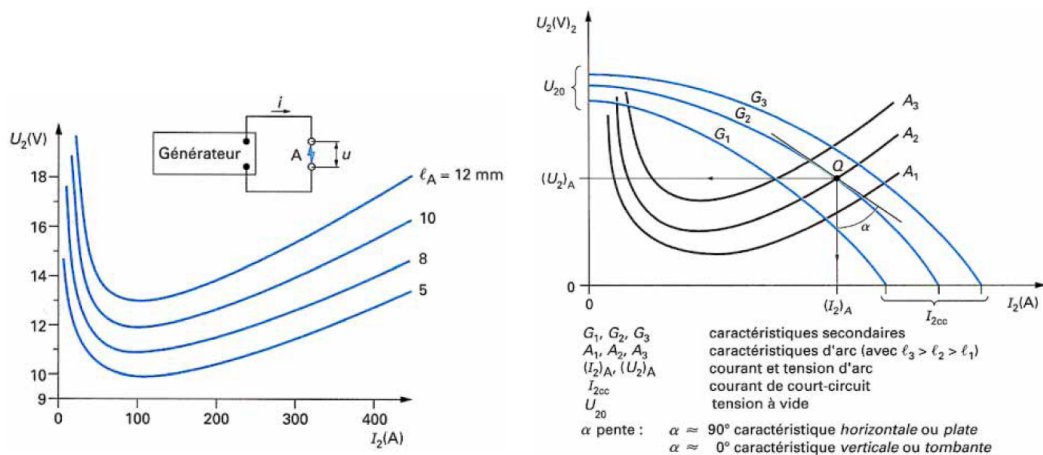


FIGURE 1.9 – Caractéristiques primaires et secondaires d'une source [19]

La caractéristique secondaire d'une source est définie comme l'ensemble des points de fonctionnement Q donnant le courant et la tension d'arc qui correspondent à un réglage de la source pour une longueur d'arc donnée (figure 1.9b).

Pour une longueur d'arc donnée, faire varier l'intensité permet de moduler la puissance de l'arc de soudage. Une augmentation de l'intensité entrainerait une augmentation de la tension aux bornes de l'arc ainsi que de sa puissance. La puissance de l'arc permet d'influer sur sa pénétration.

Pour un gaz donné, la tension de l'arc dépend de la distance séparant les électrodes et de l'intensité qui les traverse. Lorsque la longueur de l'arc augmente, la tension augmente aussi, et la mesure de la tension de l'arc donne donc une information sur sa longueur.

Dans le cadre d'une application de soudage, pour un matériau donné, l'énergie de l'arc résultant de l'intensité et de la tension mises en œuvre conditionne le mode transfert du métal dans l'arc électrique. La figure 1.10 illustre, à titre d'exemple, les différents modes de transfert du métal en soudage MIG/MAG. Dans le cadre de la fabrication additive, les modes de transfert privilégiés sont ceux à faible énergie, c'est-à-dire les régimes par court-circuit et pulsés.

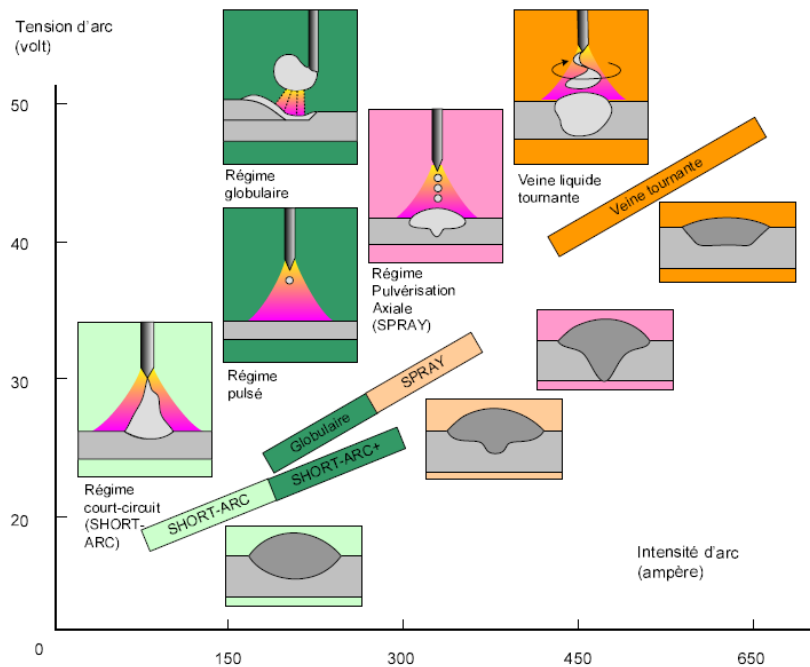


FIGURE 1.10 – Modes de transfert du métal en soudage MIG/MAG [20]

1.2.3 Cold Metal Transfer

La technologie *Cold Metal Transfer* (CMT) est dérivée du procédé MIG/MAG et est de plus en plus investiguée dans la littérature ([21] [22] [23]) du fait des faibles énergies qu'elle nécessite, tout en gardant des taux de dépose élevés avec moins de projections. Le soudage CMT est compatible avec de nombreux alliages d'aluminium, d'acier faiblement et fortement alliés, mais aussi certains alliages à base de nickel ([21]). Le principe du CMT repose sur le contrôle du mode de transfert de la goutte par court-circuit grâce à un pilotage du mouvement du fil. Pendant le soudage, le fil descend et est retiré dès lors qu'un court circuit se produit. Le cycle CMT se décompose en quatre étapes [6] illustrées figure 1.11 :

- a) Arc allumé : phase chaude où l'arc est établi entre l'extrémité du fil et la pièce avec une forte intensité et une forte tension. L'extrémité du fil atteint sa température de fusion et une goutte de métal fondu s'y forme.

- b) Effondrement de l'arc : la longueur de l'arc électrique est réduite mécaniquement par le mouvement du fil jusqu'au contact entre la goutte et la pièce, éteignant l'arc et créant ainsi une phase froide. La goutte de métal fondu est déposée dans le bain liquide.
- c) Court-circuit : le fil (solide) touche le bain liquide et est instantanément rétracté. Quasi-aucune chaleur par effet joule n'est observée grâce à la faible durée du court-circuit et le maintien d'une faible intensité durant cette phase par la source.
- d) Ré-allumage de l'arc : la tension et l'intensité de soudage sont augmentées pendant que le fil est rétracté du bain liquide. Il en résulte un ré-allumage de l'arc associé à une augmentation de la température globale. Le cycle est ensuite répété.

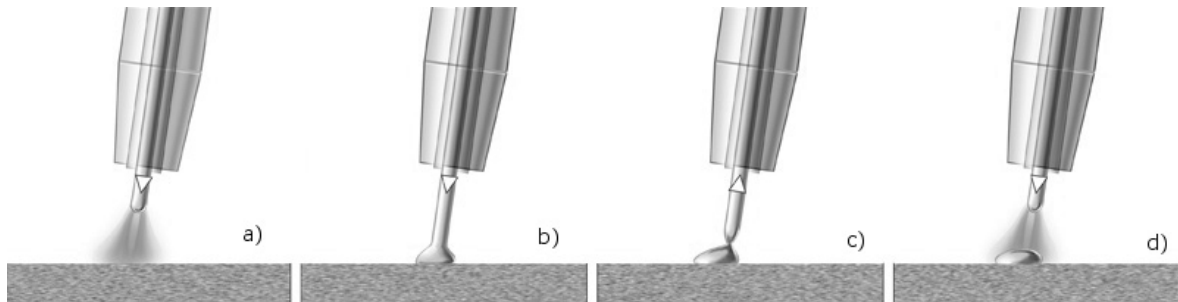


FIGURE 1.11 – Schéma du cycle CMT par [24]

L'innovation du CMT réside donc dans la rétractation du fil et le contrôle du courant lors de la phase de court-circuit, ce qui permet d'éviter des apports d'énergie non voulus et de maîtriser le transfert de matière. Les propriétés métallurgiques de la soudure sont ainsi améliorées tout en gardant un débit de matière compétitif. La figure 1.12 rapportée par Jafari et al. [10] illustre les taux de dépose observés dans la littérature pour le MIG/MAG (aussi noté GMAW pour *Gas Metal Arc Welding* selon l'ASME), le CMT et le TIG (aussi noté GTAW pour *Gas Tungsten Arc Welding*).

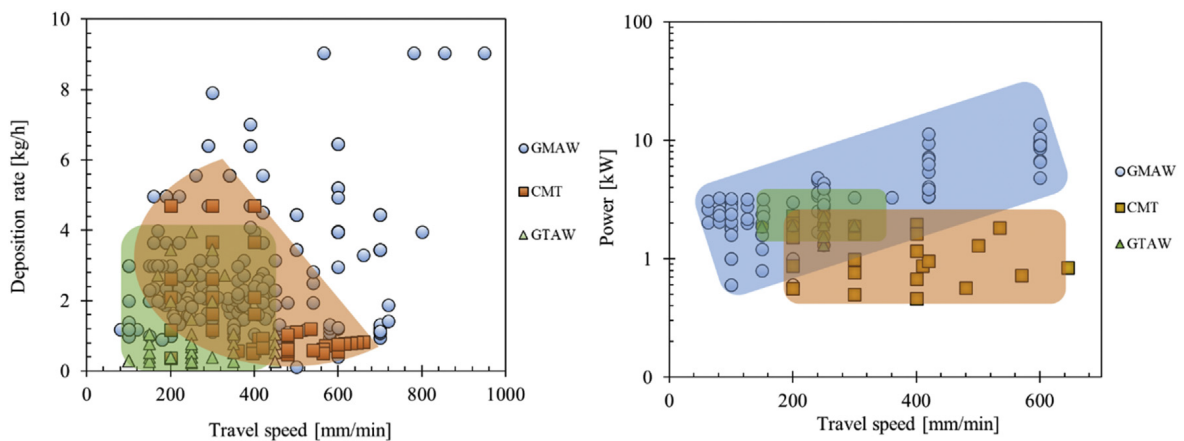


FIGURE 1.12 – Domaines reliant la vitesse d'avance, l'énergie de l'arc, et le taux de dépose en MIG/MAG, en CMT et en TIG [10]

2 Processus d'élaboration en WAAM

La fabrication additive par dépôt de fil à l'arc est un processus de fabrication permettant de créer des pièces par dépôt de fil fondu de manière incrémentale couche après couche. Les étapes

du processus d'élaboration en WAAM sont illustrées figure 1.13. Globalement, le processus comporte deux parties liées entre le monde numérique et le monde physique. Tout d'abord la partie numérique est composée de la chaîne numérique qui permet, à partir de la CAO des volumes à fabriquer, de générer la trajectoire que doit suivre le robot. Assujetti à cette chaîne, le monde numérique est constitué de l'ensemble des outils numériques permettant de modéliser et analyser les comportements de la cellule de fabrication. Les données mesurées des grandeurs physiques issues de l'instrumentation du système sont aussi à prendre en compte dans cette partie numérique. La partie physique est constituée de l'installation de fabrication avec tous ses équipements et de l'instrumentation associée aux phénomènes et grandeurs physiques que l'on souhaite surveiller ou piloter en utilisant le jumeau numérique.

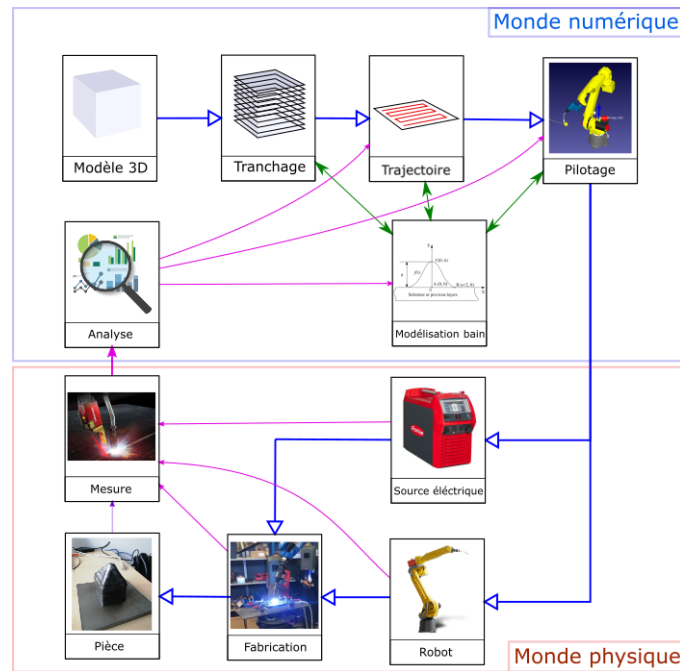


FIGURE 1.13 – Processus d'élaboration en WAAM

2.1 Plateforme expérimentale

L'installation de fabrication additive par dépôt de fil à l'arc du consortium Additive Factory Hub (illustrée figure 1.14) est constituée d'un robot anthropomorphe 6 axes Fanuc Arc Mate 120iC équipé d'un contrôleur R-30iB. Afin de pouvoir appréhender les géométries les plus complexes sur les pièces de grandes dimensions, la plateforme est munie d'un manipulateur 2 axes imbriqués ainsi que d'un retourneur horizontal. La plateforme dispose des sources électriques et des équipements de soudage CMT, TIG et plasma avec tous les accessoires pour les mettre en œuvre.

Le contrôleur comprend la gestion de l'alimentation électrique du robot, les commandes de l'opérateur, les circuits de contrôle ainsi que la mémoire et dirige le fonctionnement et les mouvements du robot et la communication avec les dispositifs externes. Le système de mouvement pilote les mouvements de tous les axes du robot et des différents manipulateurs. Pour programmer une trajectoire, il est possible de la créer directement au pied de la machine par apprentissage de chacun des points de passage ou, si la trajectoire a été préparée au préalable, d'importer le code TP de la trajectoire dans le contrôleur. Ce code issu de la chaîne numérique peut être importé depuis une clé USB ou en passant par un client FTP si le contrôleur est connecté à un ordinateur via un réseau ou encore directement via un câble RJ45.

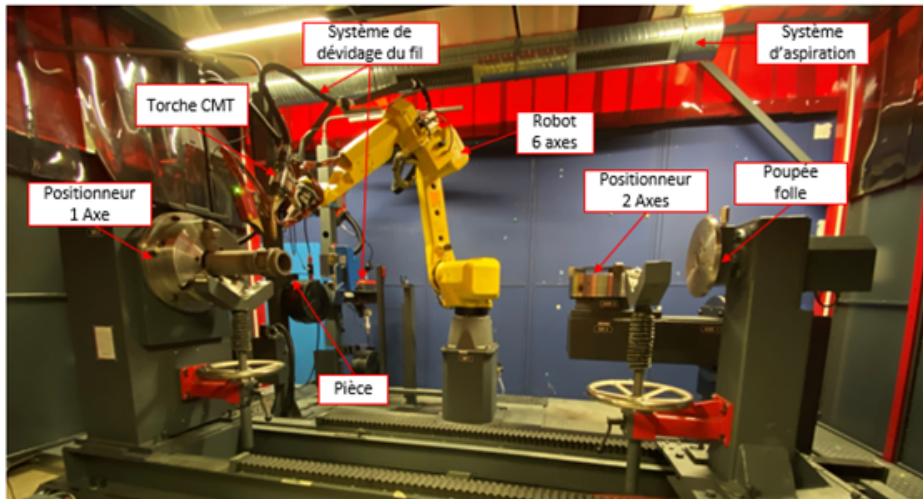


FIGURE 1.14 – Équipement WAAM de la plateforme Additive Factory Hub

Les sources électriques et les dévidoirs s'occupent de délivrer l'intensité, la tension et le fil nécessaire à la soudure. Elles régulent en permanence et de manière assez complexe les paramètres de soudage pour maintenir le procédé stable et obtenir une soudure satisfaisante. Sur une source, les paramètres de soudage sont regroupés au sein de synergies, images de la stratégie de soudage voulue, et les paramètres de soudage sont très fortement liés entre eux au sein d'une synergie. Ces synergies sont développées par le fournisseur de la source Fronius et demandent des compétences pointues en soudage pour être réglées finement. La source est connectée au contrôleur et, une fois réglée, c'est elle qui demande l'allumage ou l'extinction de l'arc électrique et du gaz d'inertage. En somme, le contrôleur centralise les commandes de tous les équipements de l'installation, donne les instructions et recueille des données via des entrées-sorties numériques.

2.2 Les verrous du WAAM

Le WAAM est un processus multi-physique complexe pouvant être affecté par différents phénomènes couplés. La mise en œuvre de paramètres procédé inappropriés influence grandement la géométrie et la qualité des cordons et des couches fabriquées, ce qui rend le processus de dépose de la matière difficile à contrôler. Ainsi la maîtrise de la géométrie et des caractéristiques mécaniques des pièces fabriquées en WAAM nécessite une grande expertise et des campagnes expérimentales chronophages et coûteuses.

Comparativement à d'autres technologies de fabrication additive, l'apport d'énergie est plus conséquent en WAAM. Ainsi, sa bonne gestion est impérative pour mener la fabrication à bien. Au fur et à mesure de la fabrication de chaque couche, la quantité de chaleur apportée dans la pièce s'accumule et s'évacue généralement moins bien. Plus la température de la pièce augmente, plus les bains liquides des cordons déposés sont grands et ont tendance à s'étaler, ce qui rend le contrôle de la géométrie des cordons plus difficile et peut aller jusqu'à l'effondrement de la structure en cours de fabrication. La figure 1.15 illustre les géométries finales d'un même artefact fabriqué avec et sans solution d'évacuation de la chaleur dans la pièce en cours de fabrication.

Comme pour tous les procédés de fabrication additive, les contraintes résiduelles et les distorsions occasionnées sont une source majeure de déformation des géométries de pièces. La répétition couche après couche de fusions puis refroidissements de la matière génère des gradients thermiques importants dans la pièce qui affectent sa géométrie, mais aussi ses caractéristiques mécaniques et sa microstructure. La figure 1.16 illustre les déformations de pièces fabriquées en

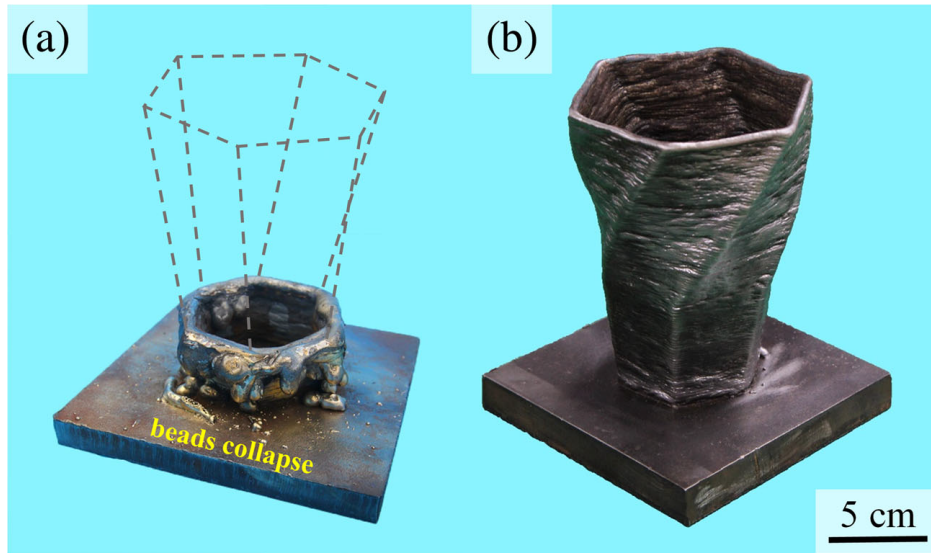


FIGURE 1.15 – Artefact avec et sans évacuation de chaleur en cours de fabrication [25]

WAAM, révélatrices de la présence de contraintes résiduelles importantes. Malgré l'existence de méthodes de post traitement thermique destinées à minimiser les contraintes résiduelles dans la matière, les déformations résiduelles restent une source d'incertitudes géométriques. La présence d'importantes contraintes résiduelles peut aussi entraîner l'apparition de fissures dans les pièces fabriquées. Ainsi le contrôle et la minimisation des déformations et des contraintes résiduelles font partie des problématiques importantes du WAAM.



FIGURE 1.16 – Déformation du substrat initialement plan après une fabrication en WAAM [6]

Pour fabriquer des pièces de qualité géométrique satisfaisante et dépourvues de défaut, il est primordial de maîtriser les dimensions géométriques des cordons déposés, mais aussi d'adapter la trajectoire à mettre en œuvre en fonction de la géométrie ciblée. La sélection des paramètres procédé est donc une première étape cruciale à l'élaboration d'une stratégie de fabrication puisque ces paramètres conditionnent directement la géométrie des cordons fabriqués. Dans un second temps, le choix de la trajectoire et ses paramètres associés est à déterminer en fonction de la géométrie à fabriquer et de la géométrie des cordons individuels. En effet, il est important de contrôler la quantité de matière apportée ainsi que la position où cette matière est apportée. Une mauvaise adéquation entre les paramètres procédé utilisés et la trajectoire mise en œuvre peut conduire localement à des lacunes ou à des accumulations de matière (illustrées figure 1.17) qui, lorsqu'elles ne sont pas maîtrisées, peuvent compromettre le bon déroulement de la fabrication ou l'intégrité physique de la pièce. Il est donc crucial de connaître le comportement géométrique des cordons lorsque ceux-ci sont déposés les uns sur les autres afin d'identifier les paramètres de la trajectoire

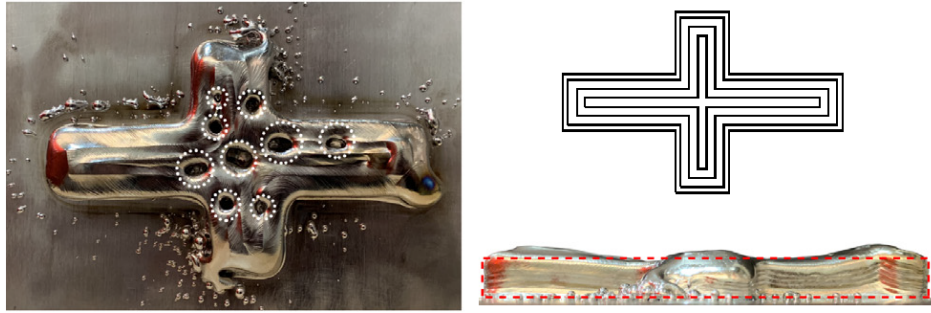
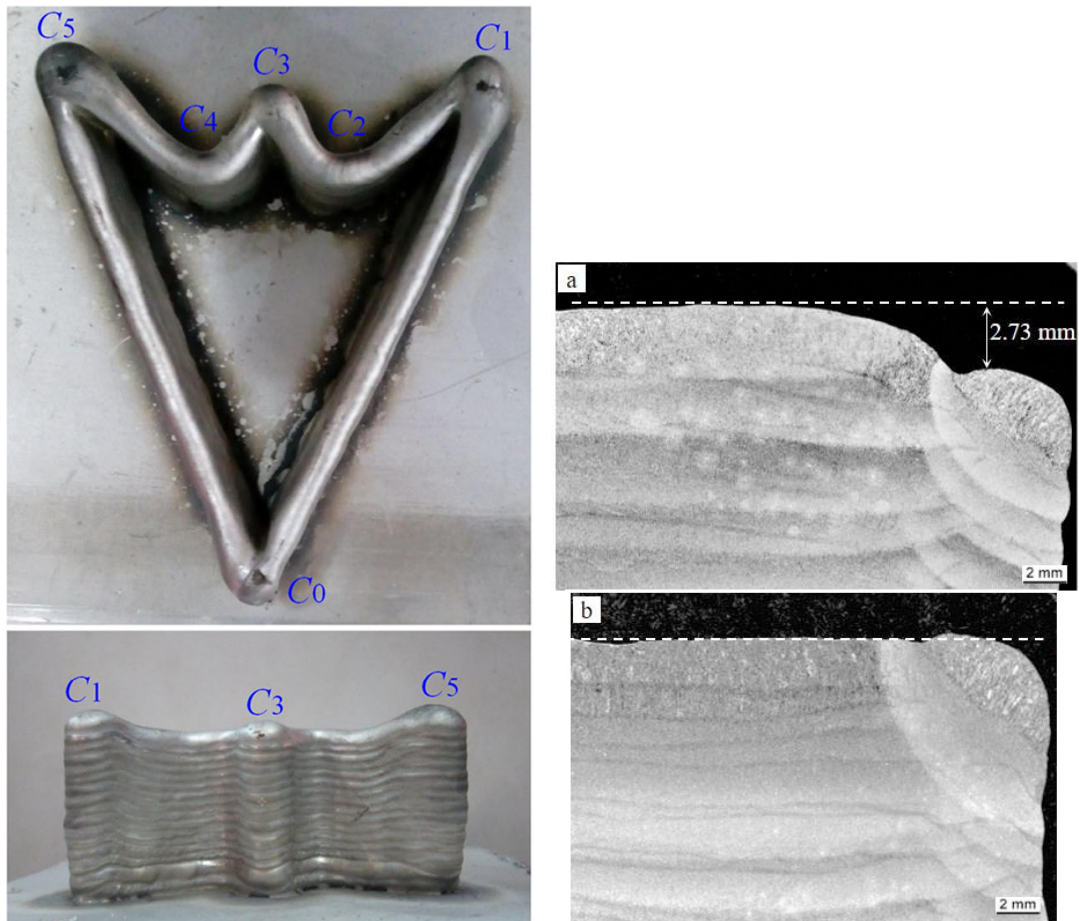


FIGURE 1.17 – Exemple de défauts de remplissage observés et la trajectoire employée [26]

les plus appropriés pour assurer de bonnes jonctions entre cordons et limiter les accumulations de matière. La propagation de ces irrégularités couche après couche risque de conduire à des géométries fabriquées trop éloignées de celles attendues. La figure 1.18b illustre l'affaissement du bord libre d'un mur lorsque la distance de juxtaposition n'est pas adaptée : la surface supérieure n'est plus plane. La figure 1.18a illustre quant à elle la propagation d'accumulation de matière.



(a) Accumulation de matière autour des points de changement de direction de la trajectoire [27] (b) Macrographie de mur pour un coefficient de juxtaposition de 0.738 (a) et 0.47 (b) [28]

FIGURE 1.18 – Exemples de lacunes et d'accumulations de matière lors du dépôt de cordons

L'ajout d'une ondulation dans le mouvement de la torche (weaving) autour de sa trajectoire rectiligne (figure 1.19b) est une technique alternative aussi explorée dans la littérature [29]. Cela permet d'accroître la planéité de larges surfaces déposées et de limiter l'anisotropie au niveau de sa microstructure. Toujours pour améliorer la microstructure, mais aussi réduire les porosités et les contraintes résiduelles et améliorer la géométrie finale, un laminage entre chaque couche (figure 1.19a) peut être envisagé et est investigué dans la littérature ([7] [30] [31]). Néanmoins, les stratégies compatibles avec le laminage inter couche sont limitées, ce qui réduit les possibilités en termes de géométries fabricables.

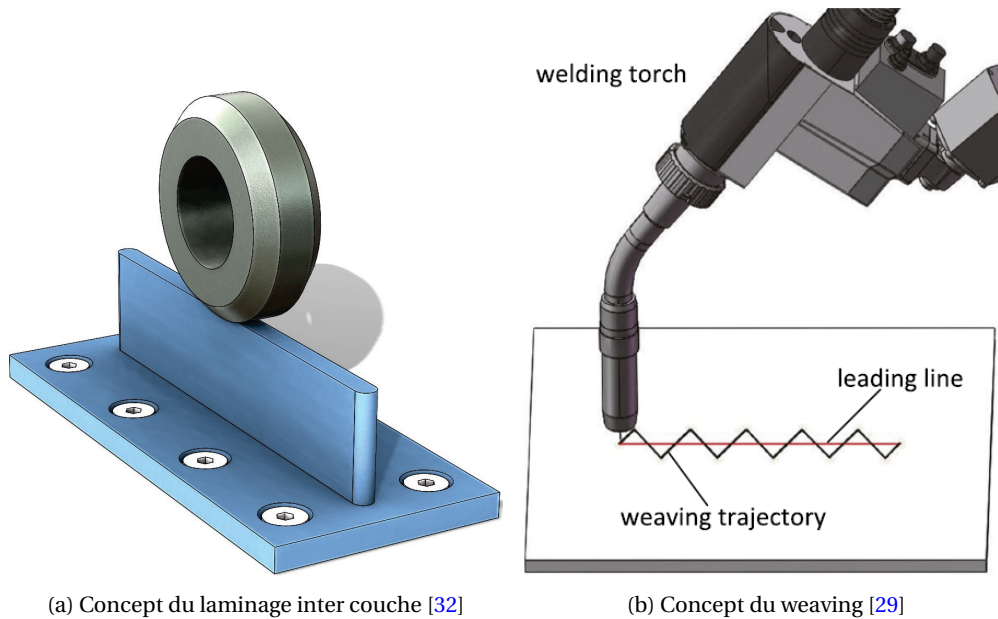


FIGURE 1.19 – Techniques alternatives d'amélioration du procédé WAAM

Les premiers artefacts fabriqués en WAAM restent relativement simples. L'enjeu majeur pour ce procédé repose ainsi sur son application à des pièces industrielles complexes. La flexibilité et la polyvalence qu'offre une installation WAAM classique en termes de génération de mouvement permet d'élaborer des stratégies de fabrication sans support requis tout en maîtrisant l'orientation de la torche et de la pièce par rapport à la verticale. Associée à cela, la gestion de l'apport d'énergie dans la pièce en cours de fabrication peut amener à complexifier significativement la trajectoire à mettre en œuvre pour laquelle il faut en plus prévenir d'éventuelles collisions et limiter les interruptions d'arc souvent sources de défauts géométriques. Ainsi cela requiert de développer des stratégies de fabrication multi axes pour aborder les stratégies les plus complexes.

2.3 Chaîne numérique

La chaîne numérique est définie comme l'ensemble des étapes et opérations menées pour obtenir, à partir du modèle 3D d'une pièce créée en Conception Assistée par Ordinateur (CAO), la trajectoire pouvant être interprétée par le contrôleur du robot utilisé pour la fabrication. Dans le cadre du paradigme de fabrication par ajout de matière, la première étape de tranchage consiste à découper le modèle CAO de la pièce en couches. La trajectoire à adopter pour remplir chacune de ces couches est définie lors de l'étape de remplissage. Ensuite, les spécificités relatives au système permettant de générer le mouvement relatif de la torche par rapport à la pièce sont prises en compte pour définir la trajectoire que ce dernier doit suivre. Enfin, la trajectoire est traduite par le post-processeur afin qu'elle soit interprétée par le contrôleur du robot. Le post-processeur est spécifique au robot utilisé pour réaliser la fabrication ainsi qu'au logiciel employé pour construire la trajectoire. La figure 1.20 schématise la chaîne numérique en WAAM.

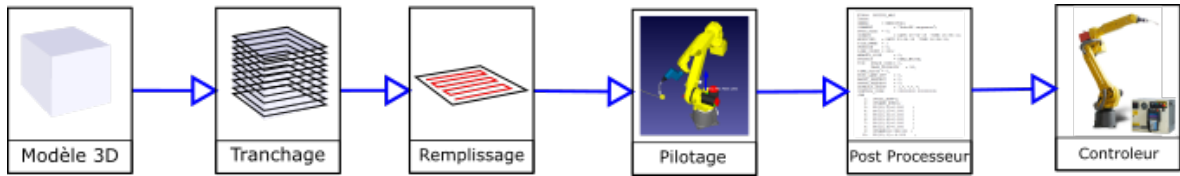


FIGURE 1.20 – Chaîne numérique en WAAM

2.3.1 Techniques de tranchage

L'étape de tranchage, qui fait partie intégrante du processus d'élaboration en WAAM, consiste à découper le modèle 3D de la pièce CAO en couches surfaciques. La stratégie développée initialement repose sur un tranchage selon des plans parallèles générant ainsi des couches d'épaisseur constante selon la direction de fabrication. Cette stratégie fonctionne bien dans le cas de surfaces verticales et donc perpendiculaires aux couches, mais dès lors qu'il s'agit de traiter des formes complexes avec des surfaces en dévers, elle génère des lacunes dans le dépôt.

Certaines technologies de fabrication additive, comme la fusion laser sur lit de poudre (LPBF) ou le *Binder jetting*, imposent techniquement d'adopter une stratégie de tranchage par plans parallèles. Mais dans le cadre du WAAM, il est tout à fait envisageable de générer des trajectoires où la direction de fabrication varie au cours de la fabrication. Dans cet esprit, Ding et al. [33] proposent une stratégie de tranchage multidirections illustrée figure 1.21. Pour cela, une décomposition en sous-volumes est d'abord effectuée. Ensuite chaque sous-volume est tranché selon des plans parallèles dans la direction principale de son volume. Enfin chaque tranchage est assemblé.

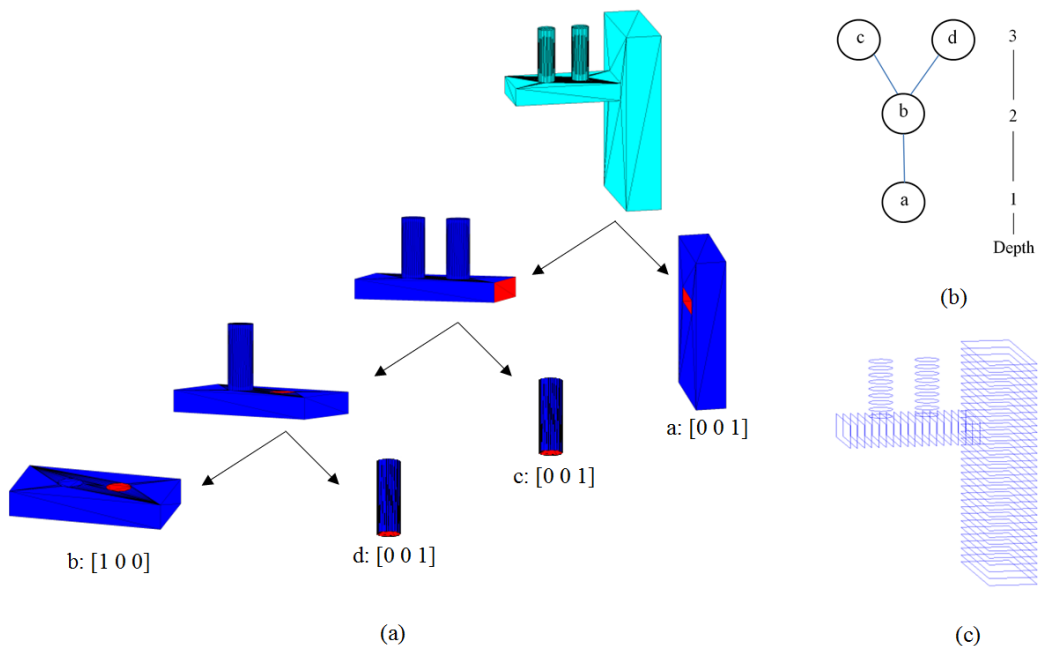


FIGURE 1.21 – Démarche de tranchage multi-directions [33]

On retrouve dans la littérature d'autres méthodes de tranchage générant des couches d'épaisseurs variables. Adopter ce genre de stratégie impose de faire varier la géométrie du cordon le long de la trajectoire générée, ce qui peut s'avérer difficile à mettre en œuvre. Par exemple Ruan et al. [34] développent une approche de tranchage multiaxes et une méthode empirique permettant de prédire l'épaisseur des couches (figure 1.22). Cela a pour objectif principal d'éliminer l'effet escalier caractéristique des surfaces obtenues par fabrication additive. Une fois l'épaisseur de chaque

couche déterminée le long de la trajectoire, faire varier les paramètres procédé pour obtenir les dimensions désirées ainsi qu'un dépôt stable constitue la principale difficulté.

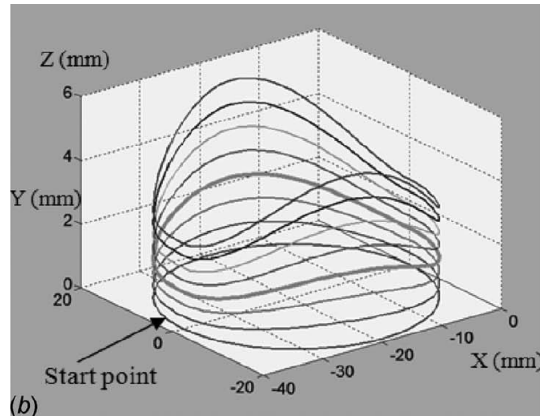


FIGURE 1.22 – Démarche de tranchage par surfaces gauches [34]

Comme il est tout de même souhaitable de maintenir des paramètres procédé constants le long de la trajectoire, Chalvin [35] propose une méthode de tranchage permettant de conserver une distance entre passes constante en calculant de manière incrémentale la position de chaque point d'une couche de telle sorte qu'ils soient à la même distance de la passe précédente comme illustrée figure 1.23.

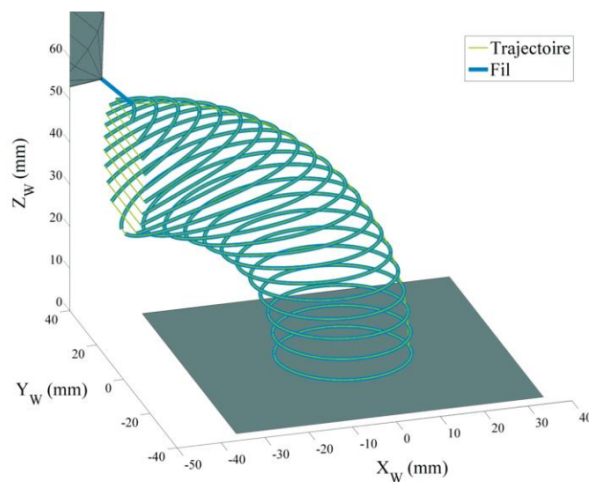


FIGURE 1.23 – Démarche de tranchage multiaxes [35]

2.3.2 Trajectoires







L'étape de remplissage du processus d'élaboration en WAAM consiste à définir la trajectoire de la torche pour remplir chaque couche de la pièce. On retrouve dans la littérature deux types de trajectoires : les trajectoires définies avec des paramètres procédé constants et celles définies avec des paramètres procédé variables. Le choix des paramètres procédé influe directement sur la géométrie du cordon déposé qui influe à son tour sur la trajectoire à suivre pour remplir une couche. Le choix de la stratégie de remplissage a également une influence directe sur les contraintes résiduelles et les propriétés mécaniques de la matière déposée.

De nombreux types de trajectoires définies avec des paramètres constants ont été développés pour différentes technologies de fabrication ainsi que pour certaines technologies de fabrication soustractive conventionnelle.

La stratégie de type raster consiste à remplir le plan selon des segments parallèles [36] et constitue la stratégie la plus répandue de par son implémentation simple et sa capacité à remplir n'importe quel contour. Dans la continuité de la stratégie de type raster, on retrouve le remplissage de type zigzag qui consiste à balayer le plan par des aller-retours successifs selon des lignes parallèles [37] [38]. Cette méthode est très populaire car elle permet de remplir le plan en minimisant les interruptions du procédé (arrêt d'arc en WAAM par exemple) le long de la trajectoire, ce qui en général permet de réduire les temps de fabrication et améliore la qualité de la pièce fabriquée.

Les trajectoires de type contour s'appuient sur des offsets des contours de la section à déposer [39] [40] [41]. Néanmoins, ce type de stratégie est plus difficile à mettre en œuvre pour le remplissage de sections avec de nombreux îlots. Les trajectoires en spirales ont été grandement appliquées en fraisage pour l'usinage de poches [42] [43].

On retrouve enfin les trajectoires s'inspirant et/ou combinant plusieurs types de stratégies élémentaires déjà détaillées. Ainsi les stratégies de remplissage continu cherchent à remplir la section sans interruption [44] [45] [46] et les stratégies hybrides essaient de combiner les avantages de différentes techniques en termes de qualité géométrique finale des surfaces extérieures et du remplissage [47]. Le tableau 1.3 illustre les différents types de stratégies à paramètres procédé constants mentionnés.

Type de trajectoire	Raster	Zigzag	Contour	Spirale	Continue	Hybride
Exemple						
Références	[36]	[37] [38]	[39] [40] [41]	[42] [43]	[44] [45] [46]	[47]

TABEAU 1.3 – Résumé des différents types de trajectoires

Certaines stratégies proposent de faire varier les paramètres procédé et donc la géométrie du cordon le long de la trajectoire afin d'améliorer la qualité du dépôt, du remplissage, des jonctions ou des propriétés mécaniques. Ding et al. [48] proposent une stratégie basée sur la transformation d'axe médian. La trajectoire est définie comme étant des boucles fermées avec des distances de juxtaposition générées à partir de l'axe médian de la géométrie de la section jusqu'aux limites extérieures de celle-ci. Cette méthode s'apparente à une stratégie de type contour, mais s'appuie ici sur des offsets de l'axe médian et non pas du contour extérieur. Elle permet d'obtenir un dépôt de bonne qualité sans défaut de remplissage. La figure 1.24 illustre la comparaison entre un remplissage d'une section par contour, par transformation d'axe médian sans variation de distance de juxtaposition et par transformation d'axe médian avec variation de distance de juxtaposition.

Michel et al. [26] proposent une stratégie modulaire, basée sur une décomposition en entités plus simples de la géométrie à remplir, permettant un dépôt de meilleure qualité. La première étape de cette méthode consiste à segmenter la couche en plusieurs sections élémentaires de formes simples. La forme des sections élémentaires ainsi que leurs positions relatives sont importantes puisqu'elles conditionnent la qualité du dépôt ainsi que les jonctions entre chaque entité. Ensuite, la trajectoire est définie pour chaque section et n'importe quel type de stratégie de remplissage peut être appliqué de manière individuelle pour répondre à d'éventuelles problématiques

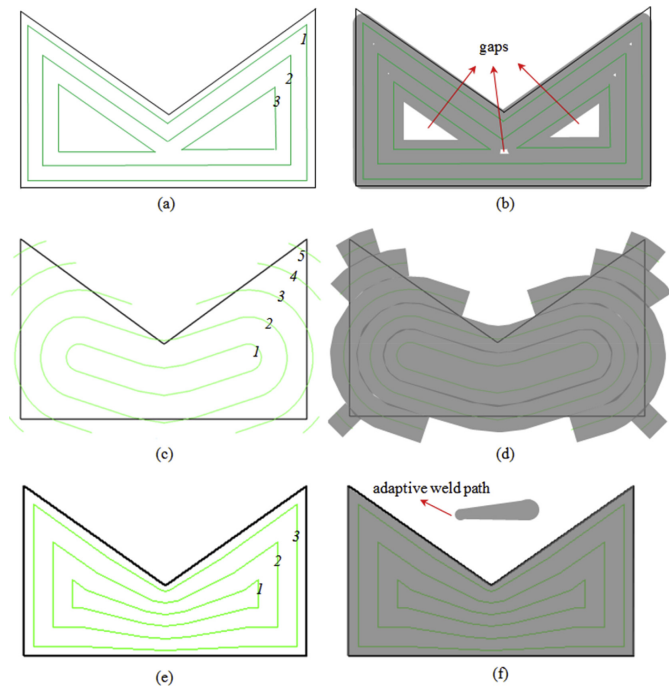


FIGURE 1.24 – Illustration de différentes trajectoires et du dépôt prédit. (a) et (b) trajectoire par contour. (c) et (d) trajectoire par MAT. (e) et (f) trajectoire par MAT adaptatif [48]

locales. Enfin pour mieux maîtriser le dépôt du cordon le long de chaque trajectoire, les paramètres procédé sont pilotés le long de chaque trajectoire de chaque section où la vitesse d’avance de la torche est notamment ajustée aux extrémités de chaque parcours. La démarche est illustrée figure 1.25 où les variations de couleur indiquent des vitesses d’avance différentes.

2.3.3 Synthèse

Cet état de l’art a permis de mettre en évidence que l’utilisation d’un robot anthropomorphe associé à un berceau inclinable pour générer le mouvement d’avance de la torche par rapport à la pièce offre une grande liberté dans l’élaboration de trajectoire pour la fabrication de pièce à géométrie complexe en WAAM. Cependant, la trajectoire mise en œuvre joue un rôle primordial sur la géométrie finale obtenue et sur les caractéristiques de la matière. Aussi il est indispensable de

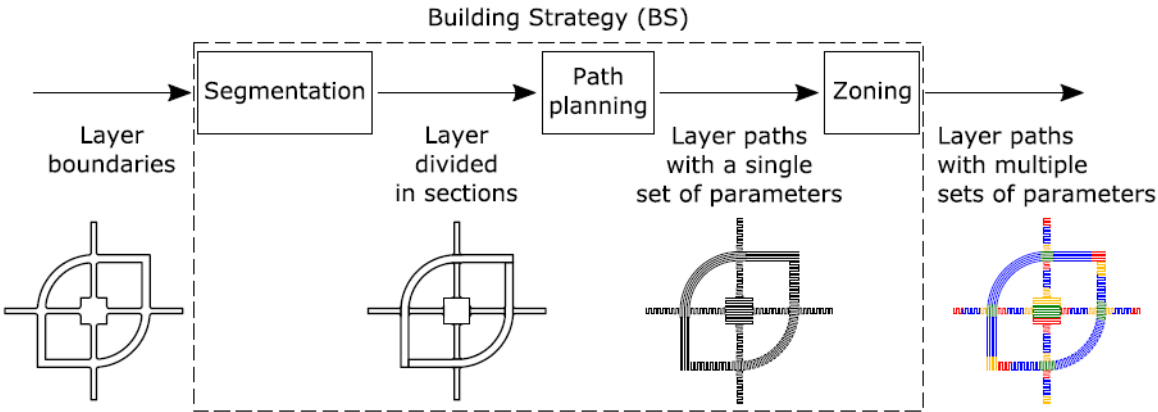


FIGURE 1.25 – Organigramme de la stratégie de remplissage proposée [26]

maîtriser les dimensions géométriques des cordons et leur assemblage pour pouvoir définir cette trajectoire. Ainsi, pour anticiper au mieux la géométrie générée et améliorer le calcul de trajectoire, il convient de modéliser finement la géométrie des cordons en lien avec les paramètres du procédé, le comportement du robot au cours de la trajectoire et l'assemblage de cordons.

Plusieurs logiciels propriétaires commencent à apparaître, le plus souvent dédiés à la fabrication additive par dépôt de poudre, et permettent de générer des trajectoires typiques de fabrication additive tels que PowerMill Additive[®], ESPRIT TNG[®] ou NX Additive Manufacturing[®]. Mais ils ne prennent pas toujours en compte les spécificités liées au procédé WAAM et, en dehors des méthodes proposées, offrent peu de possibilités de développement. Il existe aussi des logiciels dédiés à l'exploitation de cellules robotisées pour le soudage, comme Roboguide WeldPro[®], qui permettent de piloter et simuler le comportement de la cellule robotisée. Mais ils n'incluent aucune fonction permettant de générer des trajectoires de fabrication additive.

Ainsi la solution privilégiée pour mettre en œuvre l'installation d'AFH et sa chaîne numérique rapidement est d'utiliser une solution propriétaire, PowerMill entre autres. Comme ce logiciel intègre les stratégies de tranchage et de remplissage de base, il suffit pour générer différentes trajectoires d'artefact simple dans un premier temps. Par la suite, si le logiciel propriétaire ne permet pas de développer de nouvelles stratégies, il est envisageable de les développer avec d'autres logiciels en parallèle pour faire nos preuves de concepts. Par exemple le logiciel RoboDK permet de simuler et programmer des robots industriels et s'interface particulièrement bien avec Python. Il ne dispose pas de fonctionnalités dédiées spécifiquement à la génération de trajectoire pour le WAAM prenant en compte des spécificités liées au procédé, mais permet le développement de celles-ci au besoin. C'est à l'aide de ce logiciel et de Python 3.7 que les trajectoires de fabrication de nos artefacts et les différents algorithmes de traitement et d'analyses des données expérimentales sont développés.

3 Jumeau numérique

3.1 Concepts

Aujourd'hui, le terme *Digital Twin* renvoie à une copie numérique d'un système physique. Cependant, Deuter et al. [49] notent qu'il existe un nombre significatif de définitions de DT qui varient en termes de degré de détails, zone d'intérêt ou de technicité. Par exemple, le jumeau numérique d'une machine à commande numérique est différent de celui d'un système de freinage puisque les phénomènes simulés, prédits et mesurés sont différents par leur nature et leur complexité. Même si elle n'est pas universellement valide, la définition du concept de DT rapporté par Luo et al. [50] permet de cerner l'idée : «un jumeau numérique est une représentation numérique dynamique qui permet de comprendre, prévoir et optimiser les performances d'un système». Les principales caractéristiques d'un DT sont les suivantes :

- Un DT est un modèle numérique multi-domaine, multi-échelle, multi-physique et de très haute fidélité intégrant les aspects mécaniques, électriques, hydrauliques, thermiques et de commande du système.
- Un DT agit, comme son nom l'indique, comme un double du système physique dans le sens où il contient toutes les informations et connaissances. Il résulte d'un *mapping* du monde physique, rassemble les informations et reste cohérent par rapport au monde physique.
- Un DT est capable de percevoir son état et le met à jour régulièrement voir en temps réel avec les entités physiques afin de prédire le comportement du système et prendre des décisions aux regards de ces prédictions et de l'historique du système.

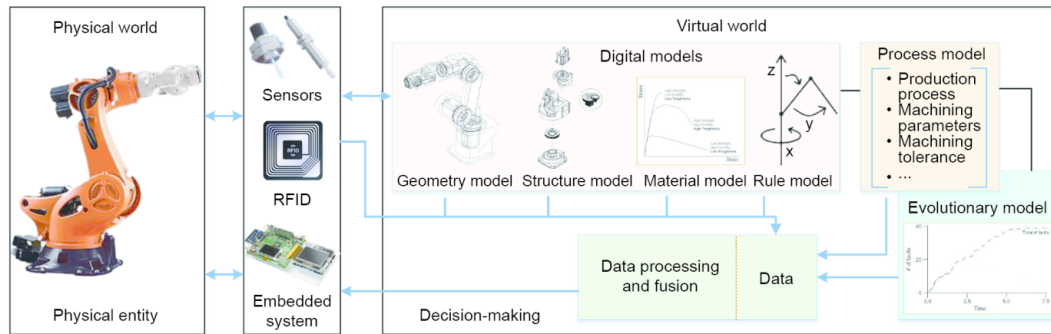


FIGURE 1.26 – Architecture d'un DT [55]

La plupart des recherches et utilisations du DT se font dans le cadre de la gestion du cycle de vie de produit ([50] [51] [52] [53] [54]). Dans le cas de l'intégration de DT pour un système unique (ici sont exclus les systèmes de systèmes), le DT est composé de trois organes principaux :

- Un modèle descriptif : ce bloc condense et regroupe les multiples modèles de comportement du système dupliqué qu'ils soient mécaniques, cinématiques thermiques ou autres. Ces modèles peuvent être, entre autres, de nature analytique ou stochastique et constituent la première brique du processus de simulation et prédiction du DT.
- Le mapping : constitue l'interface entre les mondes physique et numérique, cet organe permet d'alimenter le DT en données d'état du système physique acquises par les capteurs mis en place.
- L'analyse : c'est l'organe décisionnel du DT. En se basant sur les modèles descriptifs et des données issues du mapping, une analyse est faite afin de simuler et prédire le comportement du système. À l'issue de cette étape, la commande du système physique est adaptée afin de tendre vers le comportement souhaité.

Même s'ils sont scindés en trois blocs, ces organes ont nécessairement besoin d'une cohérence commune entre eux que ce soit par le format de données, les phénomènes pris en compte ou encore les capacités du système. La figure 1.26 illustre l'agencement d'un jumeau numérique avec les flux de données et d'informations parmi les différents blocs. Selon le système auquel est couplé un jumeau numérique, les besoins et les phénomènes observés, ce dernier n'a pas toujours la même allure ou la même représentation graphique.

L'objectif final de la mise en œuvre d'un jumeau numérique et de son utilisation est de proposer un outil d'aide à la prise de décision autonome ou non sur l'usage et le pilotage du système considéré. Son utilisation ne se restreint pas qu'au pilotage en temps réel pour vérifier la faisabilité, optimiser le processus et atteindre des exigences de fabrication. Il peut aussi servir pour la gestion de cycle de vie de la pièce en termes de traçabilité du produit et de ses caractéristiques matériaux dans une perspective de certification pour leur usage final, mais aussi du système de production pour tenir compte de son évolution et faire de la maintenance prédictive par exemple. Compte tenu du fait que le jumeau numérique englobe des modèles de la plupart des phénomènes importants autour du processus en question, il convient de mettre en œuvre ces modèles pour faire de la simulation et du *virtual testing*.

3.2 Proposition d'architecture

Dans le contexte de l'optimisation de la fabrication additive par dépôt de fil à l'arc, l'objectif du déploiement d'un jumeau numérique est d'améliorer la qualité de la pièce fabriquée. Tout d'abord, améliorer la qualité géométrique de la dépose : c'est-à-dire assurer une géométrie obtenue conforme à la géométrie cible en garantissant un remplissage satisfaisant. D'autre part, améliorer la qualité de la matière déposée : il nous faut alors déterminer et spécifier quels phénomènes

doivent être modélisés, mesurés et intégrés au jumeau numérique. L'objectif est donc d'identifier l'ensemble des phénomènes que nous souhaitons modéliser pour les intégrer à notre jumeau numérique en fonction de son usage prévu et des capacités de notre instrumentation.

La forme et les dimensions géométriques du cordon de soudure occupent un rôle central dans le processus d'élaboration en WAAM, et constituent l'entité élémentaire qu'il nous faut intégrer au jumeau numérique. Pour une configuration matériau donnée, les dimensions géométriques des cordons dépendent principalement de la vitesse d'apport en fil délivrée par la source électrique et la vitesse d'avance de la torche gérée par le robot. Ainsi il est indispensable de maîtriser le comportement de la source et du robot et de les intégrer au jumeau numérique. Enfin une des finalités du jumeau numérique étant de simuler la géométrie des entités fabriquées, la modélisation de l'assemblage des cordons prend tout son sens. L'assemblage de cordons dépend nécessairement de la géométrie des cordons élémentaires et donc par extension de tous les phénomènes qui l'affectent. Aussi cette interdépendance entre les phénomènes modélisés doit apparaître dans l'architecture du jumeau numérique.

Enfin, il est important de noter que le périmètre d'action du jumeau numérique proposé ici est limité à la géométrie des entités fabriquées et n'est pas destiné à améliorer la fabrication selon d'autres critères relatifs à la microstructure, à la santé matière en général ou à la thermique du procédé par exemple. Néanmoins, il demeure tout à fait possible de concevoir un jumeau numérique comprenant ces considérations, ce qui nécessiterait d'une part de modéliser les phénomènes en jeu en relation avec les paramètres dont ils dépendent, et d'autre part de pouvoir mesurer les grandeurs physiques pertinentes associées à l'aide d'une instrumentation adaptée.

Ainsi la figure 1.27 illustre pour nos travaux la proposition de l'architecture du jumeau numérique de l'installation WAAM pour l'amélioration des géométries fabriquées. Cette architecture s'articule autour du processus d'élaboration et intègre les trois principaux organes caractéristiques. Les phénomènes inclus dans le modèle descriptif du jumeau numérique sont explicités dans le but d'illustrer les interdépendances identifiées. L'organe décisionnel n'est pas détaillé et est représenté pour illustrer les leviers sur lesquels il est possible de jouer au sein des différentes étapes du processus d'élaboration pour améliorer la fabrication.

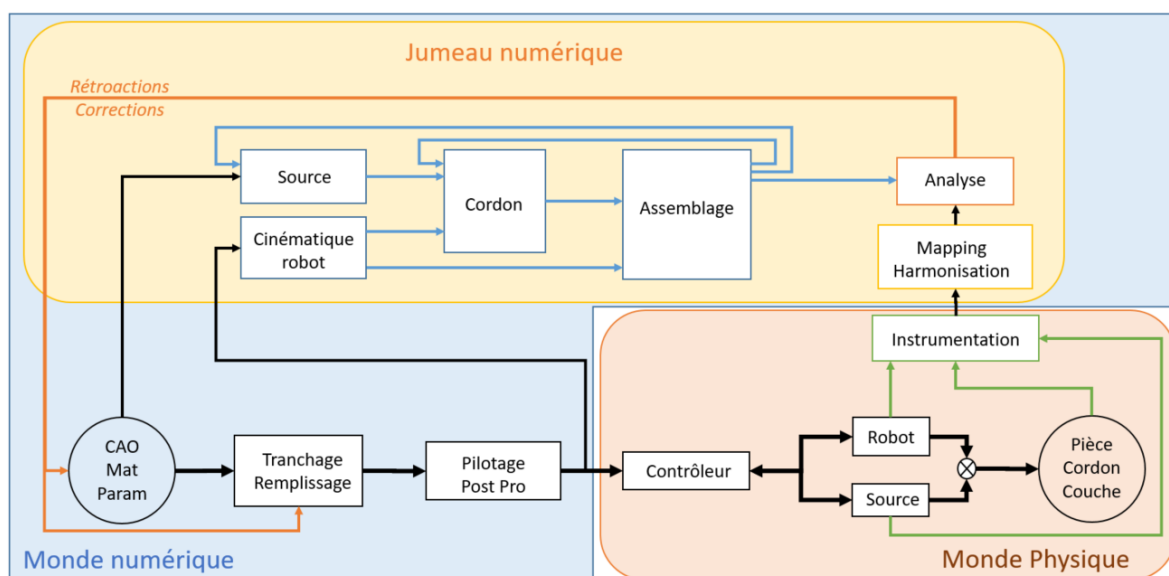


FIGURE 1.27 – Architecture proposée du jumeau numérique du système WAAM

4 Problématiques

La fabrication additive par dépôt de fil à l'arc est une technologie prometteuse pour la fabrication de pièces relativement complexes de grandes dimensions et a fait l'objet de nombreuses études ces dernières années. Néanmoins, des solutions intégrant tout le processus d'élaboration en WAAM et permettant de planifier l'intégralité de la trajectoire d'une pièce à fabriquer à partir de son modèle CAO restent à développer. En effet, les paramètres procédé tels que la vitesse d'apport du fil métallique, les paramètres électriques de la source et la vitesse d'avance de la torche ainsi que la trajectoire à adopter pour celle-ci conditionnent le résultat et la qualité du dépôt et sont, la plupart du temps, identifiés et déterminés de manière empirique. Aussi, dans le cadre de l'élaboration de pièces à géométrie complexe, un système capable de définir la trajectoire de la torche du robot avec ses paramètres procédé associés de manière quasi automatique en minimisant l'intervention humaine prend tout son sens. À l'heure actuelle, les logiciels dédiés à la fabrication additive ont été développés principalement pour les procédés à base de poudre et ne sont pas exploitables tels quels pour le WAAM. Ainsi, pour développer une solution capable d'automatiser le processus d'élaboration il est nécessaire d'en relever les principaux points problématiques.

Une pièce fabriquée en WAAM est constituée d'un ensemble de plusieurs couches, elles-mêmes composées d'un ou plusieurs cordons de dimensions constantes ou variables selon la géométrie ciblée et la stratégie choisie. Pour définir une stratégie permettant de réaliser la pièce sans engendrer de collision, tout en garantissant le bon déroulement du dépôt de matière d'une part puis d'obtenir une géométrie de pièce de qualité satisfaisante d'autre part, il apparaît comme nécessaire de maîtriser les dimensions géométriques des cordons déposés. En effet, la position que doit avoir chaque cordon par rapport à ses voisins directs précédemment déposés est intimement liée à ses dimensions géométriques. Ainsi les paramètres géométriques de la trajectoire tels que la distance de juxtaposition et l'épaisseur entre chaque couche, qui sont des prérequis indispensables à la programmation de celle-ci, sont conditionnés par les dimensions géométriques des cordons. Cependant, les dimensions géométriques des cordons ne font pas partie des paramètres du procédé qu'il ne tient qu'à nous de fixer, mais dépendent des paramètres procédé. Il est donc primordial d'identifier et de maîtriser la relation entre les paramètres du procédé et les dimensions géométriques des cordons ainsi générés. Cette étape, très souvent rapportée dans la littérature, est indispensable pour caractériser un procédé DED en fonction des matériaux employés et des paramètres spécifiques au procédé mis en œuvre. Ainsi cette relation est identifiée expérimentalement dans le cas des cordons simples rectilignes et déposés avec des paramètres procédés constants pour le procédé de dépôt de fil à l'arc et les matériaux utilisés ici.

Que ce soit dû à la complexité de la géométrie de la pièce à fabriquer, ou plus simplement par souci de limiter les interruptions d'arc au cours de la fabrication, la torche rencontre très souvent des points de changements de direction. Au passage de ces points, une période transitoire est observée lors de laquelle la vitesse d'avance du robot diminue localement et sa trajectoire ne coïncide parfois plus tout à fait avec celle programmée. En plus de ces effets locaux sur le comportement cinématique du robot, le comportement du bain est aussi affecté et la géométrie des cordons aux voisinages des points de changement de direction présente une accumulation de matière qui se traduit par une augmentation de la hauteur et un étalement plus important du cordon. Il est nécessaire de caractériser ce phénomène pour éviter des lacunes de matière au sein d'une couche. De plus, la superposition de ces accumulations de matière couche après couche induit l'apparition de défauts géométriques qui peuvent aller jusqu'à compromettre le bon déroulement du dépôt de matière et interrompre la fabrication.

Pour définir une trajectoire en prévision d'une fabrication, il est indispensable d'avoir quelques connaissances a priori telles que la distance de juxtaposition entre chaque cordon et l'épaisseur de chaque couche. Ces paramètres de la trajectoire sont à adapter, certes en fonction de la géométrie des cordons individuels déposés, mais surtout en fonction de comportement des cordons

lors de leur assemblage. Ainsi la modélisation de l'assemblage de cordons est intéressante pour identifier les paramètres de la trajectoire d'une part, mais permet aussi de simuler les géométries intermédiaires et finales de la pièce à fabriquer d'autre part. Cela permet de détecter d'éventuelles dérives de sa géométrie.

La mise en place de modèles autour des différents phénomènes abordés et le développement d'outils de traitement et d'analyse des données expérimentales ont pour but de contribuer à une meilleure compréhension du processus d'élaboration en WAAM, de faciliter la sélection des paramètres procédé ainsi que des stratégies de remplissage et d'anticiper la géométrie des cordons et des pièces ainsi fabriqués. Une première architecture fonctionnelle d'un jumeau numérique de notre système de production est ici proposée afin de mettre en évidence et structurer les interactions entre ces différents modèles.

La problématique générale de ces travaux de thèse est de modéliser le processus d'élaboration de la plateforme et du procédé de dépôt de fil à l'arc afin de contribuer au développement d'un jumeau numérique de l'installation. Compte tenu des concepts de base et de l'architecture proposée du jumeau numérique de notre installation, les travaux présentés ici ont pour objectif d'élaborer, en tout ou parties, des modèles descriptifs à intégrer dans le jumeau numérique en adéquation avec l'instrumentation disponible et utilisée. Ainsi le Chapitre 2 est consacré à l'étude et la modélisation des monocordons déposés à vitesse constante et présente aussi les méthodes de post-traitement génériques mises en œuvre pour exploiter les données issues de l'instrumentation. Le Chapitre 3 se concentre sur la gestion des passages de points de changement de direction le long de la trajectoire dans une approche aussi bien cinématique que géométrique. Le Chapitre 4 traite de l'assemblage des cordons entre eux.

Chapitre 2

Mono cordons rectilignes

Ce chapitre présente la modélisation et la caractérisation du procédé dans le cadre de mono cordons rectilignes en fonction de la vitesse fil dévidé et de la vitesse d'avance du robot pour deux nuances d'acier, deux gaz d'inertage régulièrement employés, deux diamètres de fil et deux modes de transfert de la matière. L'objectif est d'établir la relation entre les paramètres procédé employés et les dimensions géométriques des cordons générés. Les relations entre les paramètres du procédé et les dimensions géométriques des cordons fabriqués sont ainsi identifiées expérimentalement et capitalisées sous forme d'abaques. Les développements réalisés pour le traitement des données expérimentales sont aussi présentés. Ces abaques permettent d'anticiper les dimensions géométriques des cordons en fonction des paramètres procédé et, à l'inverse, offrent la possibilité d'identifier les paramètres à mettre en œuvre pour fabriquer un cordon aux dimensions voulues. Enfin, la validité de ces abaques établies dans le cadre de mono cordons rectilignes est élargie à des cordons rectilignes fabriqués avec une vitesse d'avance du robot variable au cours de la trajectoire.

Sommaire

1	État de l'art sur la modélisation géométrique des monocordons	32
1.1	Modèle de cordons	32
1.2	Caractérisation et surfaces de réponse	33
1.3	Modèle physique	34
2	Caractérisation expérimentale d'un modèle géométrique de cordons pour l'acier G3Si	38
2.1	Campagne expérimentale	38
2.2	Méthodes de post-traitement	38
2.3	Observations et analyses	44
3	Caractérisation expérimentale d'un modèle géométrique de cordon pour l'acier X90-IG	48
3.1	Campagne expérimentale	48
3.2	Observations et analyses	49
3.3	Mono cordon rectiligne à dimensions variables	54
4	Synthèse	56

1 État de l'art sur la modélisation géométrique des monocordons

1.1 Modèle de cordons

Plusieurs investigations ont été menées dans la littérature afin de corréler la géométrie du cordon avec les paramètres des procédés DED et du procédé WAAM en particulier. En effet, plusieurs paramètres comme la tension et l'intensité de l'arc, la vitesse d'apport de fil, la vitesse d'avance du robot et la distance entre le tube contact et le substrat influent sur la morphologie du cordon. Ding et al. [56] proposent trois fonctions différentes pour modéliser la géométrie de la section d'un cordon (tableau 2.1). La hauteur du bain h , sa largeur w et l'aire A de sa section y sont explicitées en fonction des paramètres des modèles a , b et c qui sont associés aux expérimentations. Un fil de diamètre 1,2 mm dont la composition n'est pas spécifiée précisément, un gaz d'inertage à base d'argon M21-ArC-18 (18 % CO_2 + 82 % Ar) et un mode de transfert pulsé ont été utilisés. Les vitesses fil V_f mises en œuvre varient de 2 à 8 m/min et les vitesses robot V_r varient de 0,4 à 1 m/min.

Modèles	Fonctions	Hauteur h	Largeur w	Aire A
Parabole	$y = ax^2 + c$	c	$2\sqrt{-\frac{c}{a}}$	$A_p = \frac{4c}{3}\sqrt{-\frac{c}{a}}$
Cosinus	$y = a.\cos(bx)$	a	$\frac{\pi}{b}$	$A_c = \frac{2a}{b}$
Arc de cercle	$y = \sqrt{a^2 - x^2} + b$	$a - b$	$2\sqrt{a^2 - b^2}$	$A_a = arccos(-\frac{b}{a}) - b\sqrt{a^2 - b^2}$

TABEAU 2.1 – Modèles de cordons et leurs dimensions associées [56]

Cao et al. [16] modélisent la géométrie du cordon à l'aide de fonctions gaussiennes, logarithme, paraboliques et sinusoïdales (figure 2.1) dont les expressions analytiques s'expriment :

- Fonction gaussienne : $y = ae^{-(x-b)^2/c^2}$
- Fonction logarithme : $\ln(y) = a + be^x + ce^{-x}$
- Fonction parabolique : $y = a + bx + cx^2$
- Fonction sinusoïdale : $y = a\sin(2\pi x/c + b)$

Ils soulignent que la fonction sinusoïdale se rapproche le plus des caractéristiques des profils mesurés. Néanmoins, puisqu'aucun paramètre procédé ne varie, cette conclusion n'est valable que pour les conditions expérimentales choisies. En effet, la comparaison des modèles est faite sur un seul cordon déposé avec un fil en acier ER70S-6 (0,06-0,15% C + 1,4-1,85% Mn + 0,8-1,15% Si) de diamètre 0,8 mm inerté avec un gaz à base d'argon (20 % CO_2 + 80 % Ar). Pour ce cordon, la vitesse fil V_f est fixé à 8 m/min et la vitesse robot V_r à 1 m/min. Xiong et al. [15] comparent la géométrie de cordons générés avec plusieurs jeux de paramètres expérimentaux aux trois fonctions mathématiques fréquemment utilisées (cf table 2.1). Les cordons sur lesquels se base cette comparaison sont fabriqués avec un fil d'acier (0,11% C + 0,65-0,95% Si + 1,8-2,1% Mn) de diamètre 1,2 mm inerté avec un gaz à base d'argon (5 % CO_2 + 95 % Ar). La vitesse fil V_f varie de 2,8 à 6 m/min et la vitesse robot V_r varie de 0,15 à 0,45 m/min. Ils constatent que le modèle optimal dépend largement du ratio λ de la vitesse d'apport du fil sur la vitesse robot. En effet, lorsque le ratio est élevé, le cordon est bombé et la géométrie s'apparente plus à un arc de cercle. Lorsque le ratio est faible, la section du cordon tend vers une forme triangulaire (figure 2.2) et le modèle le plus adapté est alors la fonction parabolique.

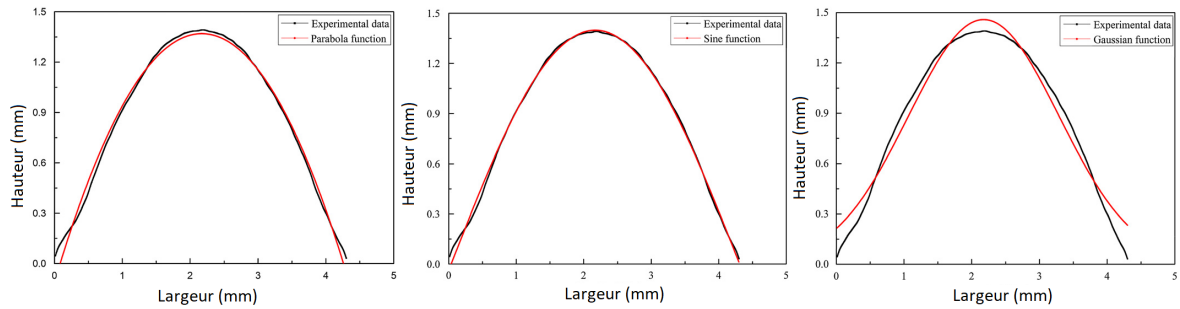


FIGURE 2.1 – Association de différents modèles : parabolique (à gauche), sinusoidal (au milieu) et gaussien (à droite), à un profil de section de cordon simple [16].

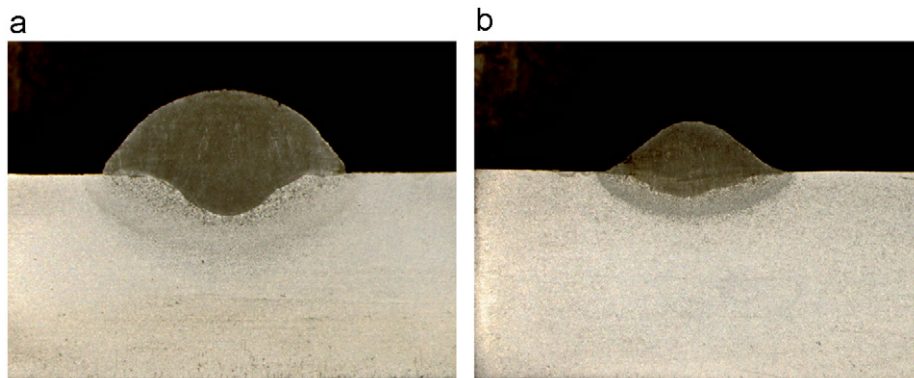


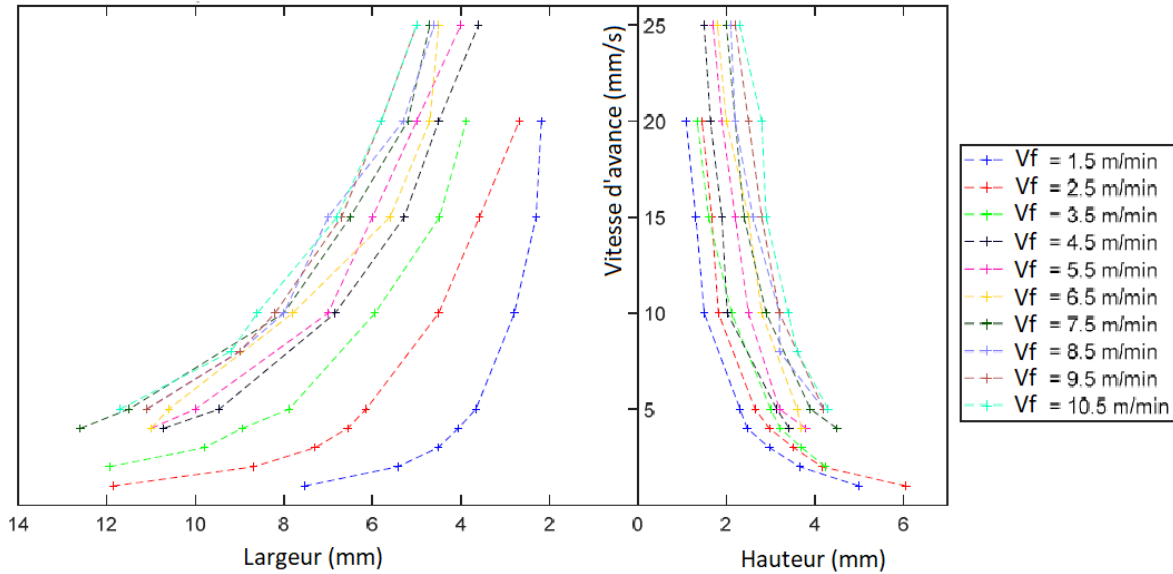
FIGURE 2.2 – Macrographie de différents cordons (a) $\lambda = 29,3$ (b) $\lambda = 9,7$ [15]

1.2 Caractérisation et surfaces de réponse

Pour identifier la relation entre les principaux paramètres du procédé, à savoir la vitesse d'avance du robot V_r , la vitesse de fil dévidé V_f et les dimensions géométriques du cordon pour une configuration matériau donnée, l'approche privilégiée dans la littérature est une approche empirique. Elle consiste à mettre en œuvre des combinaisons de paramètres du procédé et à évaluer les dimensions des cordons fabriqués afin de générer un modèle basé sur les surfaces de réponse décrivant les essais. Elle constitue la première étape de la plupart des travaux menés sur l'étude des dimensions géométriques des cordons et assemblage de cordons.

Plangger et al. [14] caractérisent les dimensions géométriques de cordons en acier Mn4Ni2CrMo (Boehler X90-IG) inertés avec un gaz M21-ArC-18 (18 % CO_2 + 82 % Ar) déposés en CMT (Cold Metal Transfert) avec une source Fronius TPS 400i. Les vitesses fil V_f mises en œuvre balayent une plage allant de 1,5 à 10,5 m/min et les vitesses d'avance du robot sont comprises entre 0,12 et 1,5 m/min. La figure 2.3 rapporte les dimensions géométriques identifiées par les auteurs pour l'ensemble de la zone de réglage des deux paramètres. Il se trouve que la configuration expérimentale employée dans cette étude est très proche de la configuration de la plateforme AFH sur laquelle nos essais sont menés (même matériau et inertage, source électrique similaire) et constitue par la suite une bonne base de comparaison. Cependant on peut noter qu'ils ne précisent pas leur méthode d'analyse des nuages de points mesurés pour extraire les dimensions géométriques des cordons ni le diamètre de fil utilisé.

De manière comparable, Suryakumar et al. [57] et Panchagnula et al. [58] caractérisent les dimensions géométriques de cordons fabriqués en CMT avec un fil en acier ER70S-6 (0,06-0,15% C + 1,4-1,85% Mn + 0,8-1,15% Si) de diamètre 0,8 mm. Les vitesses d'avance de la torche et de fil dévidé investiguées sont comprises respectivement entre 0,6 m/min et 1,1 m/min et entre 4,7 m/min et


 FIGURE 2.3 – Évolution des dimensions géométriques en fonction des paramètres procédé V_f et V_r [14]

10,4 m/min. Les dimensions géométriques des sections des cordons sont identifiées à partir des coefficients du modèle polynomial associé. Une fois identifiées, il est proposé de réaliser une régression par des fonctions coniques afin d'explicitier de manière continue l'évolution de la hauteur h et de la largeur w en fonction de la vitesse d'avance de la torche V_r et la vitesse de fil dévidé V_f . De manière totalement analogue pour la hauteur et la largeur, l'opération consiste à exprimer h (et w) tel que :

$$h(V_r, V_f) = C_1 + C_2 V_f + C_3 V_r + C_4 V_f^2 + C_5 V_r^2 + C_6 V_f V_r \quad (2.1)$$

Les coefficients C_i sont définis par minimisation de la fonction objectif :

$$f(C_i) = \sum_{essais} \|h(V_f, V_r) - h_{mesurée}\|^2 \quad (2.2)$$

Les coefficients de détermination R^2 du modèle polynomial proposé pour la hauteur et la largeur sont respectivement de 0,95 et 0,96, ce qui permet aux auteurs d'affirmer que l'association est satisfaisante. Finalement, les écarts relatifs entre les dimensions mesurées et les modèles associés varient entre -7,09 % et 6,61 % pour la hauteur et entre -7,92 % et 5,48 % pour la largeur.

1.3 Modèle physique

Alors que dans la partie précédente, les modèles géométriques de cordons étaient déterminés expérimentalement, il s'agit ici d'étudier un modèle analytique multi-physique. Mohebbi et al. [59] proposent de définir la géométrie du cordon comme celle du bain liquide et explicitent, dans le plan de section orthogonal à la direction d'avance, la solution de l'équation d'équilibre entre la pression hydrostatique et la tension de surface dans le cadre de mono cordons empilés en WAAM. Cependant, ce modèle peut également être exploité pour traiter le cas des mono cordons sur substrat plan. Le profil de l'empilement de cordons est représenté figure 2.4. En ne considérant que les contributions de la pression hydrostatique $P(z)$ et des forces de tension de surface $\gamma C(z)$, l'équation d'équilibre statique des forces s'exerçant sur le bain liquide s'exprime par :

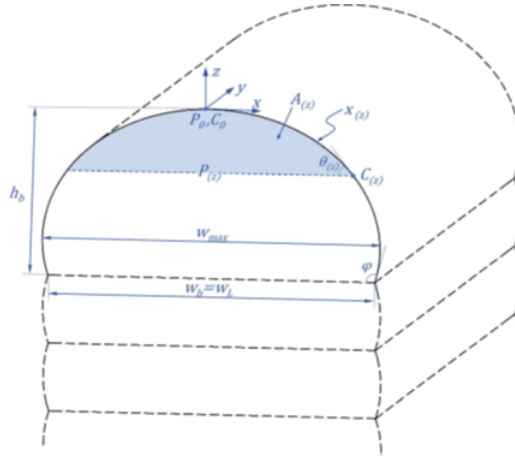


FIGURE 2.4 – Géométrie de la section du cordon par [59]

$$\gamma(C(z) - C_0) = -\rho_m g z \quad (2.3)$$

avec g l'accélération de pesanteur, ρ_m la masse volumique de l'acier évaluée à 7150 kg/m^3 , γ la tension de surface supposée constante ici et estimée à $1,8 \text{ N/m}$ et C_0 la courbure à l'origine $z = 0$.

Pour un point $M = \begin{bmatrix} x(z) \\ z \end{bmatrix}$ appartenant au profil, la courbure $C(z)$ s'écrit :

$$C(z) = \frac{\frac{d^2 x}{dz^2}}{\left[1 + \left(\frac{dx}{dz}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (2.4)$$

Injecter l'expression de la courbure dans l'équation d'équilibre statique donne une équation différentielle du second ordre qui à la suite de la première intégration et en fixant la condition limite sur l'origine (en $z = 0$; $\frac{dz}{dx} = 0$) donne la relation suivante :

$$\frac{z^2}{2\kappa} - C_0 z + \left(\frac{\frac{dx}{dz}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dz}\right)^2}} - 1 \right) = 0 \quad (2.5)$$

avec κ le rayon de capillarité défini tel que $\kappa = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho_m g}}$. La seconde intégration donne la relation entre x et z qui décrit la géométrie de la section du cordon :

$$x = \pm \frac{1}{\sqrt{\kappa^{-2} + 0,25C_0^2}} \left((2 + 0,5\kappa^2 C_0^2) \left[E\left(\psi, \sqrt{\frac{\kappa^{-2}}{\kappa^{-2} + 0,25C_0^2}}\right) - E\left(\frac{\pi}{2}, \sqrt{\frac{\kappa^{-2}}{\kappa^{-2} + 0,25C_0^2}}\right) \right] - (1 + 0,5\kappa^2 C_0^2) \left[F\left(\psi, \sqrt{\frac{\kappa^{-2}}{\kappa^{-2} + 0,25C_0^2}}\right) - F\left(\frac{\pi}{2}, \sqrt{\frac{\kappa^{-2}}{\kappa^{-2} + 0,25C_0^2}}\right) \right] \right) \quad (2.6)$$

avec le paramètre ψ défini tel que :

$$\psi = \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{\kappa^{-2}}{4} (z^2 - 2\kappa^2 C_0 z)} \right) \quad (2.7)$$

et les fonctions E et F les intégrales elliptiques du premier et second type :

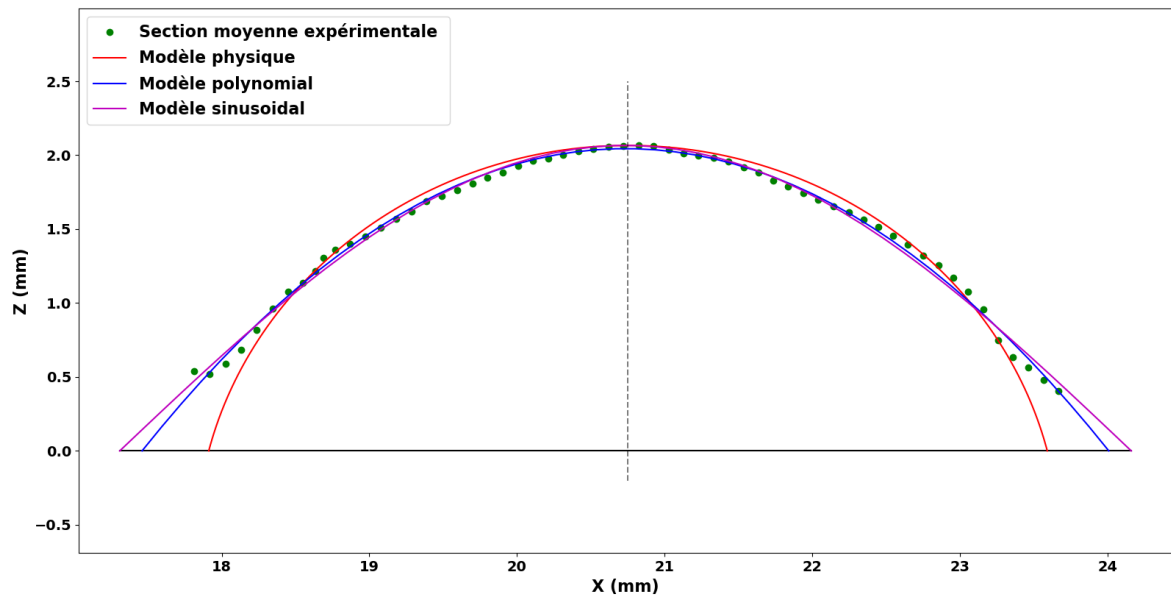
$$F(x, k) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 u}} du \quad \text{et} \quad E(x, k) = \int_0^x \sqrt{1 - k^2 \sin^2 u} du \quad (2.8)$$

Ainsi l'équation décrivant le profil d'un cordon dépend des paramètres ρ_m , γ et C_0 . Pour empiler les cordons, un paramètre supplémentaire φ est fixé afin de déterminer le point d'intersection du nouveau profil sur le précédent. Le paramètre φ désigne l'angle entre la tangente à la matière et l'horizontale au point de contact avec le cordon précédent et est équivalent au z_{min} sur le profil en question. L'expression de l'aire est fonction, en plus des paramètres matériaux γ et ρ_m , des paramètres géométriques C_0 et φ . Il serait plus pratique d'inverser cette dernière relation pour pouvoir déterminer φ et/ou C_0 en fonction de V_r , V_f et \emptyset_{fil} . Compte tenu de la complexité de l'expression du profil du cordon, il ne semble pas possible d'inverser cette relation analytiquement mais cela reste possible numériquement.

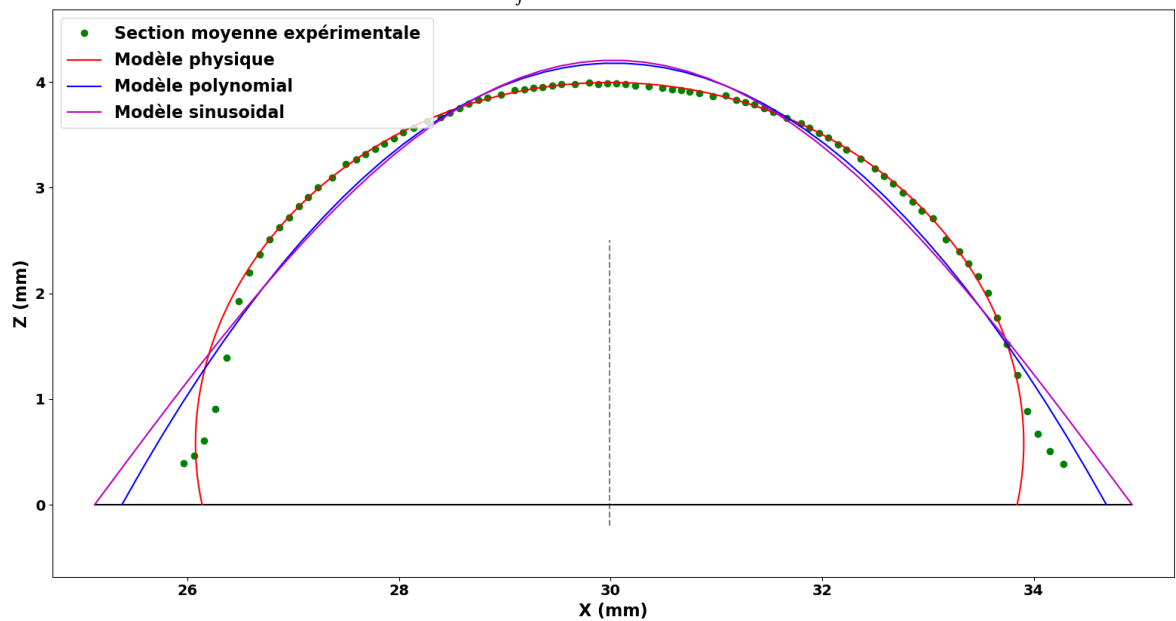
Comme évoqué précédemment, il est possible d'associer le modèle physique à la section expérimentale d'un mono cordon déposé sur un substrat plan en identifiant les paramètres minimisant la distance entre les points expérimentaux et le modèle. La figure 2.5 illustre l'association des modèles polynomial, sinusoïdal et physique à une même section expérimentale d'un cordon pour deux valeurs de λ différentes. Comme illustré précédemment par [16], les modèles polynomial et sinusoïdal sont proches. Le modèle physique donne une allure de cordon plus bombée que les deux autres modèles ce qui semble plus approprié pour décrire la géométrie des cordons avec des λ élevés mais ne rend pas bien compte de la géométrie du cordon aux niveaux des zones de contact avec le substrat pour les λ plus faibles.

En conclusion, deux approches d'élaboration de modèle prédictif de la géométrie des cordons sont revues de la littérature : une première phénoménologique reposant sur l'exploitation expérimentale et l'association d'un modèle mathématique pour expliciter l'expression de la section du cordon et une seconde approche analytique relativement complexe et pour laquelle une identification de paramètres géométriques à partir de données expérimentales est aussi requise. L'ensemble des approches propose une modélisation plane de la section des cordons fabriqués.

Pour la suite, le modèle retenu est celui de type polynomial qui est simple à manipuler et le plus communément employé dans la littérature. De plus, la majorité des cordons fabriqués et mesurés par la suite mettent en œuvre des λ moyens pour lesquels le modèle polynomial décrit globalement bien la section.



(a) $\lambda = 10,66$ ($V_f = 8$ m/min, $V_r = 0,75$ m/min)



(b) $\lambda = 24$ ($V_f = 6$ m/min, $V_r = 0,25$ m/min)

FIGURE 2.5 – Comparaison des profils obtenus lors de l'association de différents modèles issus de la littérature à deux profils expérimentaux issus de la mise en œuvre de deux valeurs de λ

2 Caractérisation expérimentale d'un modèle géométrique de cordons pour l'acier G3Si

La caractérisation de la géométrie des cordons est faite par une approche phénoménologique du procédé. Cette partie décrit les essais réalisés pour le matériau G3Si, le post traitement réalisé pour l'exploitation des données expérimentales puis les observations et analyses effectuées.

2.1 Campagne expérimentale

Pour cette première campagne, le fil utilisé est un acier non allié G3Si (EN ISO 14341-A G46 4 M21 3Si1) de diamètre 1,2 mm recouvert d'une fine couche protectrice de cuivre. Le gaz d'inertage employé est un mélange de 8% CO₂ et d'argon délivré avec un débit de 22L/min pour une buse de diamètre 20 mm. Les cordons sont déposés sur un substrat en acier S355 de dimensions 450x80x20 mm³.

Les cordons déposés ont une longueur de 150 mm et mettent en œuvre des vitesses robot de 0,5, 1 et 1,5 m/min et des vitesses de fil de 2, 4, 6, 8 et 10 m/min, soit un total de 15 cordons. Pour tous les cordons les paramètres d'inclinaison de la torche et la longueur tube contact - fil sont fixés avec des valeurs respectives de 0 degré et 17 mm. La synergie de la source utilisée est la CMT Universel 3638, développée par Fronius, dont le réglage et point de fonctionnement ne sont pas connus. Une synergie désigne les lois qui régissent les relations entre les grandeurs délivrées par la source (vitesse fil, intensité et tension), ainsi pour une vitesse fil programmée, la synergie associe une tension et une intensité nominale. La figure 2.6 illustre une partie des cordons fabriqués.



FIGURE 2.6 – Cordons fabriqués en acier G3Si

Une fois les cordons déposés, ils sont numérisés à l'aide de la caméra de suivi de joint FUJI CAM. Les grandeurs électriques ainsi que la vitesse de fil dévidé par la source sont obtenues directement au niveau du poste Fronius TPS 600i via le contrôleur qui centralise et synchronise ces informations avec les données cinématiques du robot.

2.2 Méthodes de post-traitement

Cette partie décrit les méthodes de post-traitement mises en œuvre sur les données expérimentales générées lors des essais liées à l'acquisition de la cinématique du robot et à la géométrie des artefacts fabriqués. Ces méthodes sont exploitées systématiquement lors du traitement des nuages de points pour l'étude du dépôt de cordons sur substrat plan et sont donc présentées ici de manière générique.

2.2.1 Acquisition de la cinématique du robot

L'acquisition du comportement cinématique du robot se fait directement au niveau du contrôleur du robot. Les données issues du contrôleur expriment les positions et orientations successives du repère lié à la bride du robot (flange) dans le repère monde du robot toutes les 12 ms. Ainsi la position et l'orientation du point piloté du robot, noté \mathbb{P} par rapport au repère pièce s'expriment :

$$\mathbb{P}(X_p, Y_p, Z_p, W_p, P_p, R_p) = \mathbb{T}_{piece \rightarrow world} \cdot \mathbb{T}_{world \rightarrow flange} \cdot \mathbb{T}_{flange \rightarrow outil} \quad (2.9)$$

avec X_p, Y_p et Z_p les coordonnées cartésiennes et W_p, P_p et R_p les angles de Tait Bryan avec comme convention retenue l'ordre des rotations extrinsèques (X - Y - Z). \mathbb{P} s'exprime :

$$\mathbb{P}(X_p, Y_p, Z_p, W_p, P_p, R_p) = \begin{bmatrix} CP_p \cdot CR_p & SW_p \cdot SP_p \cdot CR_p - CW_p \cdot SR_p & CW_p \cdot SP_p \cdot CR_p - SW_p \cdot SR_p & X_p \\ CP_p \cdot SR_p & CW_p \cdot CR_p - SW_p \cdot SP_p \cdot SR_p & CW_p \cdot SP_p \cdot SR_p - SW_p \cdot CR_p & Y_p \\ -SP_p & SW_p \cdot CP_p & CW_p \cdot CP_p & Z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

avec le cosinus (resp. sinus) de l'angle P_p , par exemple, noté CP_p (resp. SP_p).

Les matrices de transformation homogènes $\mathbb{T}_{piece \rightarrow world}$ et $\mathbb{T}_{flange \rightarrow outil}$ sont définies respectivement à partir de la position du repère pièce dans le repère monde du robot et l'expression du repère outil par rapport à la bride du robot. La matrice de transformation $\mathbb{T}_{world \rightarrow flange}$ représente la trajectoire du robot par rapport au repère monde. Elle est donc différente pour chaque point mesuré et est reconstruite à partir des données mesurées.

2.2.2 Acquisition de la géométrie

Les données issues de la caméra de suivi de joint FUJI CAM se présentent sous la forme de profils successifs exprimés dans le repère caméra (figure 2.7). Ces profils sont tout d'abord traités et exprimés dans un repère lié à la pièce. Le support de montage de la caméra est nominalement défini de sorte à ce que le plan laser soit confondu avec le plan (YZ) du repère caméra comme l'illustre la figure 2.8b. Ainsi les coordonnées d'un point exprimées dans le repère pièce (X_p, Y_p, Z_p) en fonction de ses coordonnées dans le repère caméra (Y_c, Z_c) s'écrivent :

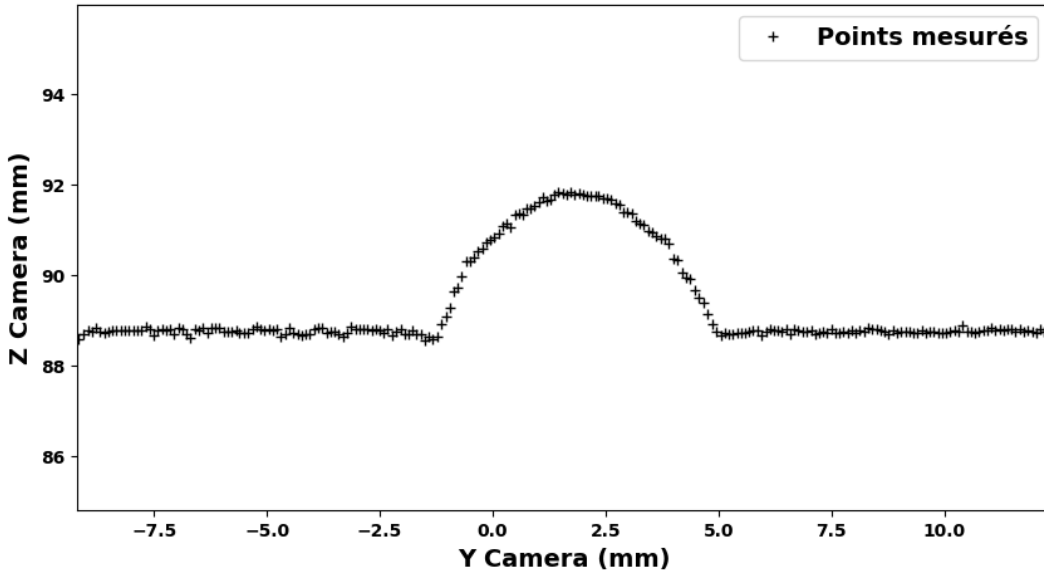


FIGURE 2.7 – Profil mesuré exprimé dans le repère caméra

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbb{T}_{piece \rightarrow outil} \cdot \mathbb{T}_{outil \rightarrow flange} \cdot \mathbb{T}_{flange \rightarrow camera} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

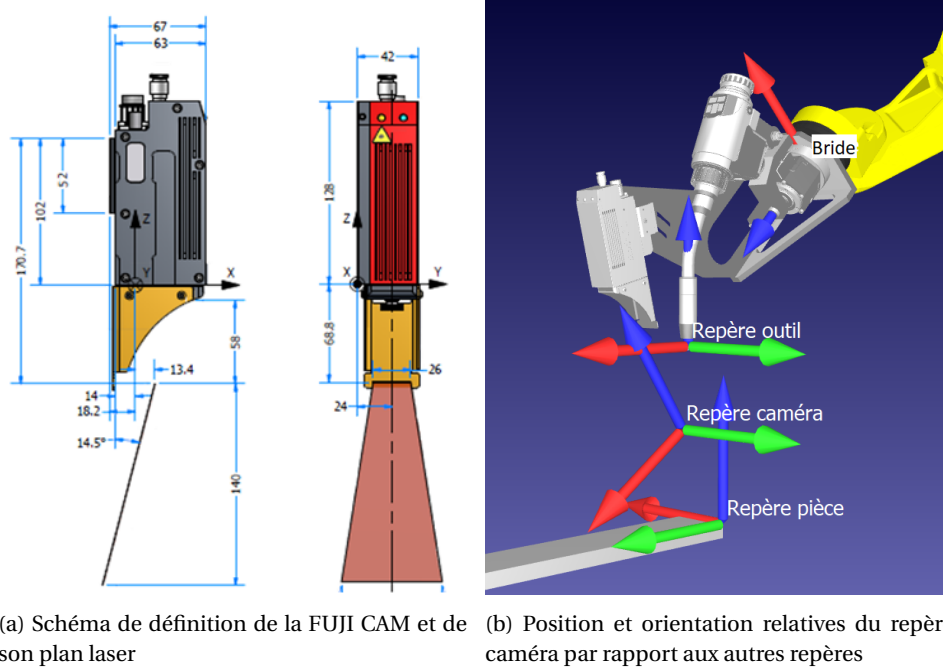


FIGURE 2.8 – Schéma de définition de la camera de suivi de joint FUJI CAM et sa position par rapport à la torche

Pour chacun des profils, la position et l'orientation de la caméra par rapport à la pièce changent et donc la matrice de passage du repère pièce au repère outil $\mathbb{T}_{pièce \rightarrow outil}$ est différente pour chaque profil. Les mesures de la trajectoire et de la géométrie sont horodatées, cependant les fréquences d'acquisition de la cinématique du robot ($f_{contrôleur} = 83,33$ Hz) et de la géométrie de la pièce ($f_{camera} = 60$ Hz) sont différentes. Ainsi, pour chaque profil, la position associée du robot est définie comme l'interpolation linéaire des deux positions du robot mesurées entre lesquelles le profil est mesuré. Soit i l'index du profil considéré, le pseudo index j (pas nécessairement un entier) de la position du robot associée s'écrit :

$$j = \frac{f_{contrôleur}}{f_{camera}} \cdot i + i_0 \quad (2.12)$$

avec i_0 l'index de la position robot correspondant au premier profil $i = 0$. Ainsi la coordonnée X_i du robot associée au profil i s'exprime :

$$X_i = (X_{Ent(j)+1} - X_{Ent(j)}) \cdot (j - Ent(j)) + X_{Ent(j)} \quad (2.13)$$

avec $Ent(j)$ la partie entière de j . Les autres coordonnées Y_i , Z_i , W_i , P_i et R_i s'expriment de la même façon. Ainsi la matrice de passage du repère pièce vers le repère outil associée au profil i s'exprime :

$$\mathbb{T}_{pièce \rightarrow outil}[i] = \mathbb{P}(X_i, Y_i, Z_i, W_i, P_i, R_i) \quad (2.14)$$

Le nuage de points ainsi reconstitué est illustré figure 2.9. Il est ensuite épuré, manuellement à l'aide du logiciel de métrologie adapté au traitement de grands nuages de points GOM Inspect afin de ne garder que les points appartenant au cordon considéré ou au plan du substrat autour du cordon. Les points manifestement aberrants sont aussi supprimés.

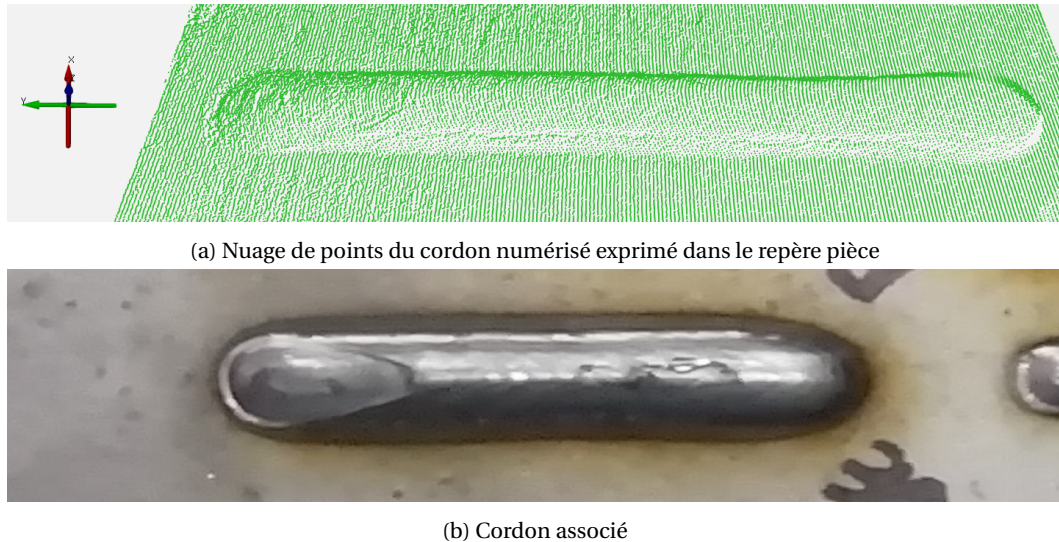


FIGURE 2.9 – Numérisation d'un cordon

2.2.3 Identification du plan du substrat et filtrage

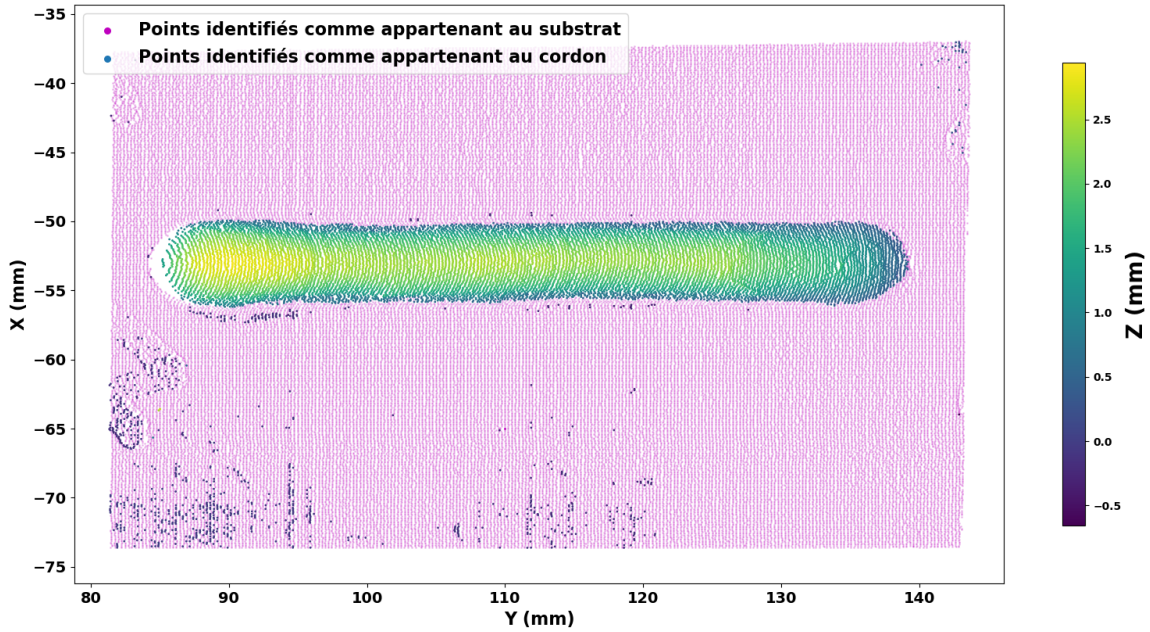
Dans le cadre de l'étude de la géométrie d'un mono cordon rectiligne déposé sur substrat plan, il est indispensable de pouvoir identifier ce plan qui fait office de référence et à partir duquel sont définies les dimensions géométriques du cordon. Cette partie décrit donc la méthode d'identification du plan du substrat et les différents filtrages mis en œuvre pour isoler de manière quasi automatique les points appartenant au cordon uniquement.

Dans le nuage de points considéré, le plan du substrat est identifié à l'aide d'un algorithme de type RANSAC (RANDOM SAMPLE CONSENSUS) [60]. Ce type de méthode itérative pour estimer les paramètres de certains modèles mathématiques est utilisé lorsque l'ensemble des données observées contient des éléments aberrants. La mise en œuvre d'un tel algorithme introduit un paramètre seuil permettant ainsi de classer les points en deux familles : la famille des "inliers" constituée des éléments dont la distribution peut être expliquée par un ensemble de paramètres d'un modèle (à savoir le plan ici) et la famille des "outliers" qui est constituée des éléments ne correspondant pas au modèle choisi, ici les points du cordon. Le paramètre seuil noté r_{th} (pour "residual threshold") fixe donc la distance maximale d'un point au plan identifié pour qu'il soit considéré comme faisant partie des points du plan.

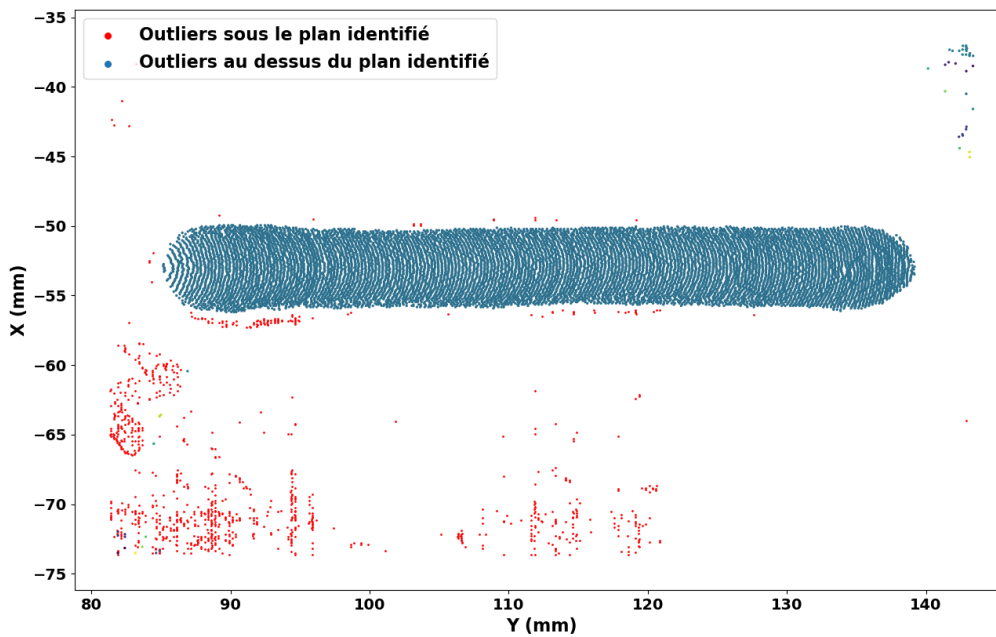
Une fois le plan du substrat identifié, un premier filtrage des points du nuage est réalisé selon la classification obtenue. Ce premier filtrage est illustré figure 2.10a. La famille des "outliers" est constituée de points réputés comme appartenant au cordon ou de points aberrants réputés comme appartenant au plan. La présence de ces derniers est en général due au fait que le nuage de points initial est bruité et ces points sont en minorité par rapport aux points du cordon et le plus souvent isolés.

Afin d'exclure les derniers points du substrat des points des cordons que l'on cherche à isoler, un partitionnement des "outliers" situés au dessus du plan identifié selon un critère de distance est réalisé et seule la famille comptant le plus grand nombre d'éléments est gardée, il s'agit des points des cordons. La figure 2.10b illustre ce partitionnement des outliers. Ce second partitionnement introduit un second paramètre géométrique seuil, noté d_{th} qui fixe la distance maximale admissible entre deux éléments de la même famille.

Une fois ces deux filtrages successifs réalisés, il est possible d'isoler les points réputés comme appartenant aux cordons des points réputés comme appartenant au substrat. Enfin, pour l'étude des dimensions géométriques des cordons et le calcul de leurs volumes, un balancement partiel est réalisé de manière à ce que dans le nouveau repère le plan $Z = 0$ corresponde au plan du substrat.



(a) Identification du plan du substrat et premier filtrage associé sur le nuage de points vu du dessus

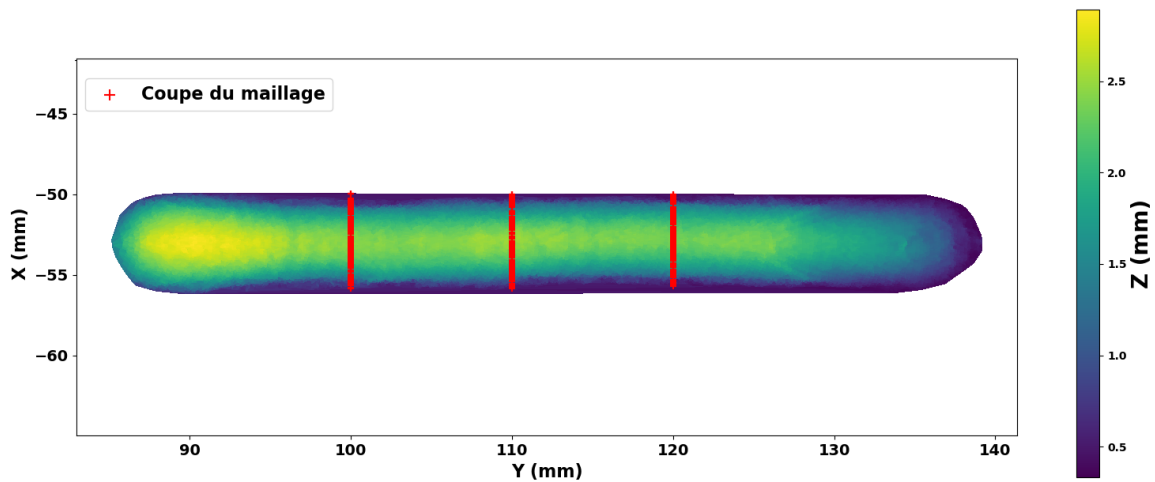


(b) Second filtrage des outliers et identification des points appartenant au cordon

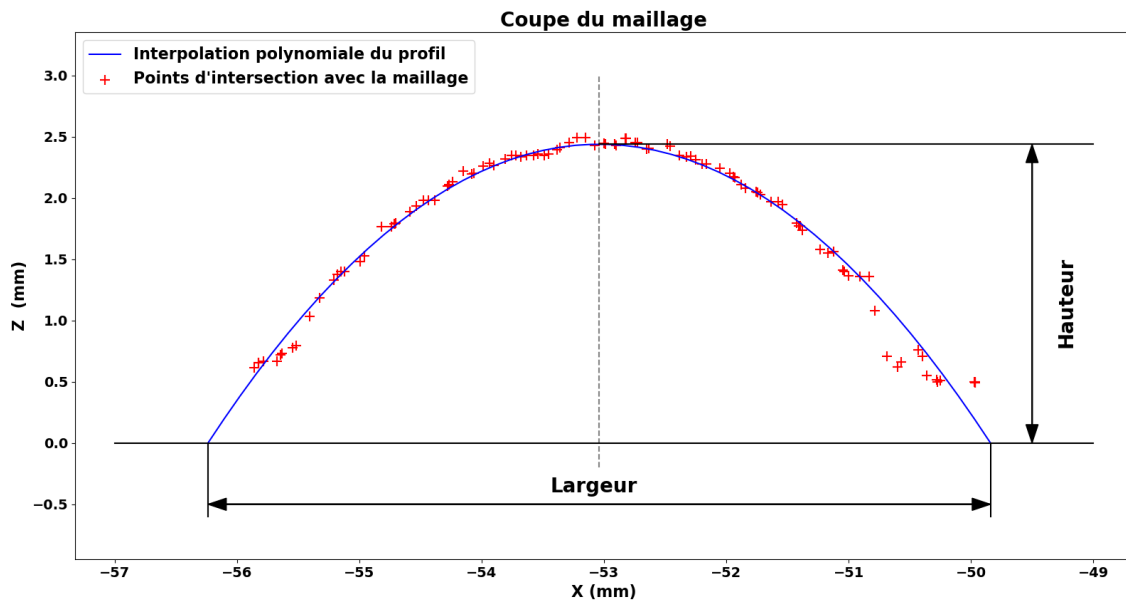
FIGURE 2.10 – Filtrages du nuage de points pour isoler uniquement les points appartenant au cordon

2.2.4 Mesures des dimensions géométriques et grandeurs électriques

Après avoir été filtré, le nuage de points du cordon est ensuite maillé par triangulation de type Delaunay. Il est alors possible de calculer l'intersection entre le maillage obtenu et un plan perpendiculaire à la direction longitudinale du cordon afin d'en extraire un profil (cf figure 2.11a). Les points du profil sont interpolés par une fonction polynomiale de degré deux (modèle parabole table 2.1) illustré figure 2.11b. Les dimensions géométriques de la section du cordon sont ensuite calculées à partir de cette fonction analytique. Les dimensions géométriques mesurées d'un cordon sont définies comme étant la moyenne des dimensions calculées sur plusieurs sections régulièrement réparties au milieu du cordon. La sélection de cette zone d'intérêt est faite manuellement pour chaque cordon et a pour objectif de ne pas prendre en compte les extrémités des cordons où l'allumage et l'extinction de l'arc électrique impactent la géométrie localement.



(a) Remaillage du cordon et coupe de section dans le repère pièce



(b) Interpolation polynomiale de la section du profil

FIGURE 2.11 – Filtrages du nuage de points pour isoler uniquement les points appartenant au cordon

Les grandeurs électriques et la vitesse de fil dévidé issues du poste de soudage et centralisées par le contrôleur sont par nature directement synchronisées avec la trajectoire. Ainsi il est possible d'observer leurs évolutions en fonction du temps ou de l'abscisse curviligne de la trajectoire (figure 2.12). Pour l'analyse et la comparaison des différents essais, les valeurs moyennes de ces grandeurs sont calculées sur la même région d'intérêt que pour la géométrie, c'est à dire au milieu du cordon. Là encore l'objectif est de s'affranchir des zones d'allumage et d'extinction d'arc où le comportement de la source est différent, particulièrement à l'allumage.

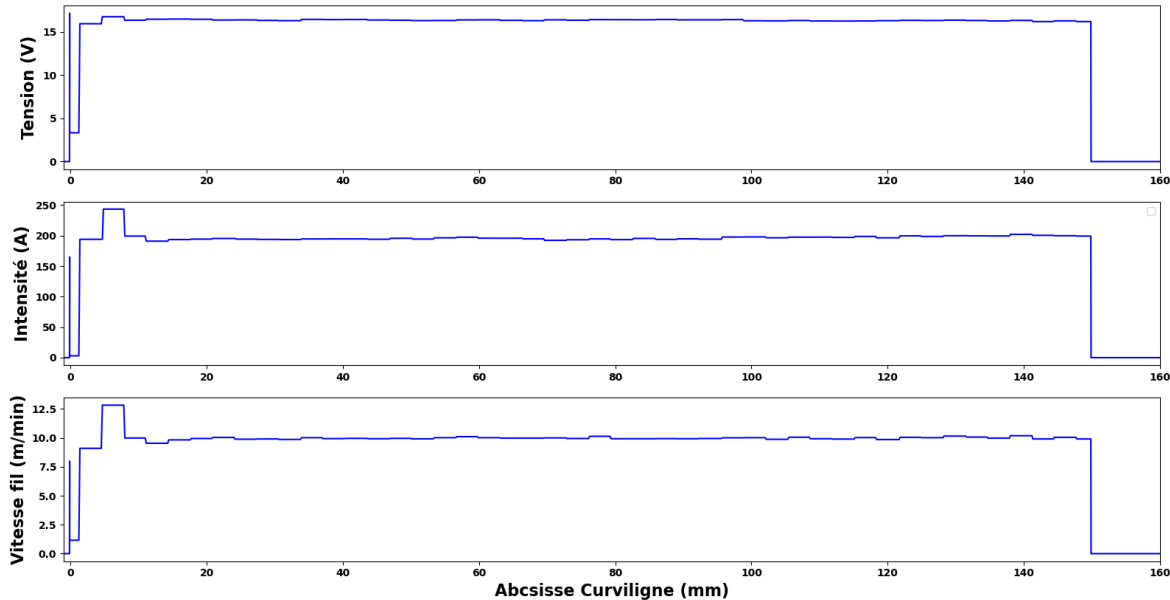


FIGURE 2.12 – Evolution des grandeurs électriques et de la vitesse fil issues du poste de soudage

2.3 Observations et analyses

La figure 2.13 illustre l'évolution des dimensions géométriques des cordons fabriqués en acier G3Si en fonction de la vitesse d'avance du robot et la vitesse de fil dévidé. Les lignes d'iso dimensions sont calculées à partir des interpolations bilinéaires des dimensions mesurées pour chaque essai. On constate naturellement que les dimensions géométriques des cordons sont directement conditionnées par le ratio λ . En effet, plus la quantité de matière apportée par unité de longueur est importante, plus les cordons sont hauts et larges. Ensuite, en fonction de la zone où se trouve le point de fonctionnement étudié dans le plan (V_f, V_r) , on constate que l'évolution du comportement géométrique des cordons est différente.

- Pour un lambda faible qui correspond à V_r élevée et V_f faible (zone en haut à gauche de l'abaque). Une variation de la vitesse robot V_r aura plus d'impact sur la hauteur du cordon que sur sa largeur alors qu'une variation de la vitesse fil V_f fera varier significativement la largeur du cordon et de manière moins marquée sa hauteur.
- Pour un lambda élevé qui correspond à V_r faible et V_f élevée (zone en bas à droite de l'abaque). La tendance s'inverse par rapport au cas précédent : une variation de vitesse robot V_r aura une influence significative sur la largeur du cordon et une influence plus modérée sur sa hauteur.
- Pour un lambda moyen : l'évolution du comportement géométrique des cordons dépend de la position du point de fonctionnement étudié sur l'abaque. En effet à faible vitesse (zone en bas à gauche), une variation de V_f impactera d'avantage la largeur du cordon et une variation de V_r influencera d'avantage la hauteur du cordon. A plus grande vitesse, ces influences des variations des différentes vitesses ont tendance à s'inverser.

Cette analyse permet de dire qu'un cordon a d'abord tendance à s'étaler puis à grandir lorsque la quantité de matière apportée augmente. Néanmoins, compte tenu du faible nombre de niveaux du paramètre vitesse robot, il est important de relativiser ces observations. Enfin on note que certains couples largeur/hauteur de cordons peuvent être obtenus par différents couples de vitesses V_r et V_f : par exemple il semble possible d'obtenir un cordon de 6 mm de largeur et 1,8 mm de hauteur aussi bien à $V_f = 4,4$ m/min et $V_r = 0,67$ m/min qu'avec $V_f = 8,5$ m/min et $V_r = 1,2$ m/min. Cependant d'autres couples largeur/hauteur de cordons ne peuvent pas être obtenus.

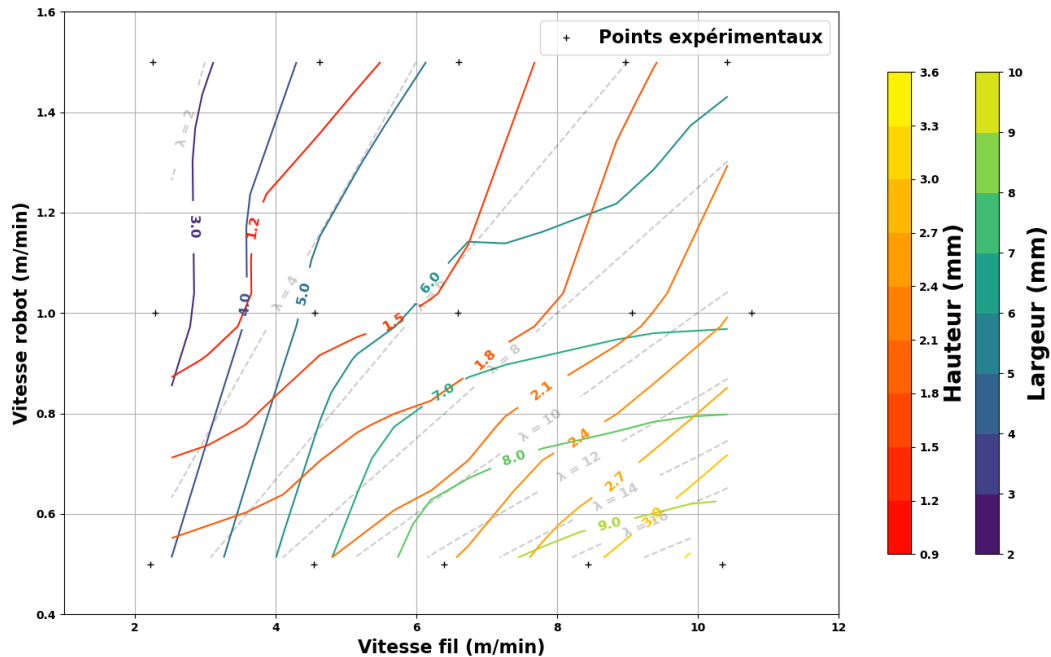


FIGURE 2.13 – Évolution des dimensions géométriques des cordons en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,2 mm, un gaz Arcal Speed, en CMT pour le matériau G3Si

Le tableau 2.5 rapporte les grandeurs moyennes mesurées et délivrées par le poste de soudage par rapport aux valeurs programmées ainsi que la vitesse robot mesurée. On constate que pour ces essais, la vitesse fil moyenne mesurée (M) est nettement supérieure à la valeur programmée (P). La vitesse robot mesurée quant à elle peut être considérée comme étant égale à la vitesse programmée. La mesure des grandeurs électriques permet d'estimer la quantité d'énergie apportée lors de la fabrication, ce qui peut avoir son importance par rapport à la gestion de la conduction de la chaleur, les températures d'interpasses, les temps de pause associés et les propriétés de la matière en cours et après fabrication. L'énergie linéique E_l déposée (ie : énergie déposée par unité de longueur, exprimée en J/mm) est calculée pour chaque cordon et s'exprime comme étant le produit de l'intensité I avec la tension U divisée par la vitesse d'avance du robot V_r :

$$E_l = \frac{U \cdot I}{V_r} \quad (2.15)$$

La figure 2.14 illustre l'évolution de l'énergie linéique déposée en fonction des paramètres procédé V_f et V_r . Logiquement, plus la vitesse fil est élevée plus l'énergie nécessaire pour fusionner la matière est importante. On note que les lignes iso énergies suivent les lignes d'iso lambda. En effet le ratio λ fixe la quantité de matière apportée par unité de longueur. Le procédé ne semble pas changer la quantité d'énergie apportée en fonction des gammes de vitesses mises en œuvre.

Essai	Tension (V)		Intensité (A)		Vitesse fil (m/min)			Vitesse robot mesurée (m/min)
	P	M	P	M	P	M	E	
1		12,49		81,94		2,23	11,5%	0,5
2	11,5	12,4	78	81,38	2	2,294	14,7%	1
3		12,44		82,68		2,26	13,0%	1,5
4		15,46		143,78		4,545	13,6%	0,5
5	13,5	15,65	146	151,9	4	4,56	14,0%	1
6		15,45		157,88		4,63	15,8%	1,5
7		17,6		194,14		6,39	6,5%	0,5
8	15,4	17,58	194	196,54	6	6,59	9,3%	1
9		17,49		196,54		6,6	10%	1,5
10		17,91		243,74		8,435	5,4%	0,5
11	16,5	18,48	255	247,18	8	9,06	13,3%	1
12		17,65		254,75		8,97	12,1%	1,5
13		18,2		288,45		10,35	3,5%	0,5
14	17,1	18,32	294	295,64	10	10,76	7,6%	1
15		18,29		297,48		10,41	4,1%	1,5

TABLEAU 2.2 – Synthèse des grandeurs programmées et mesurées pour les essais en G3Si.
P : programmée, M : mesurée, E : erreur relative

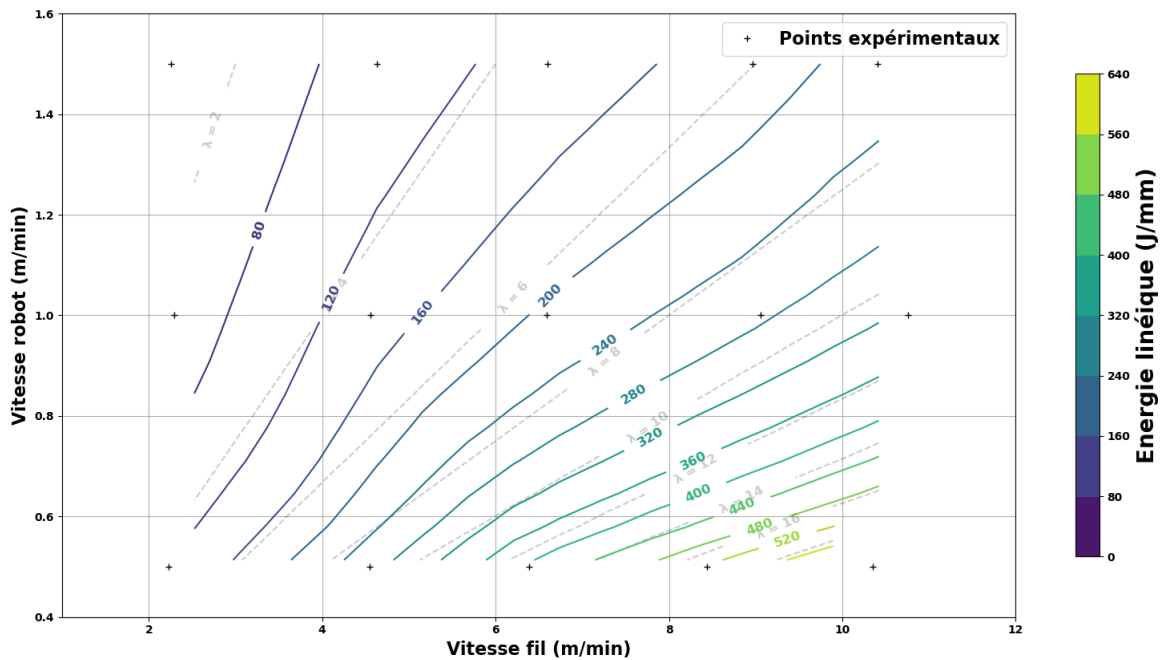


FIGURE 2.14 – Énergie linéique déposée en fonction de V_f et V_r pour le matériau G3Si avec un fil de $\phi 1,2$ mm

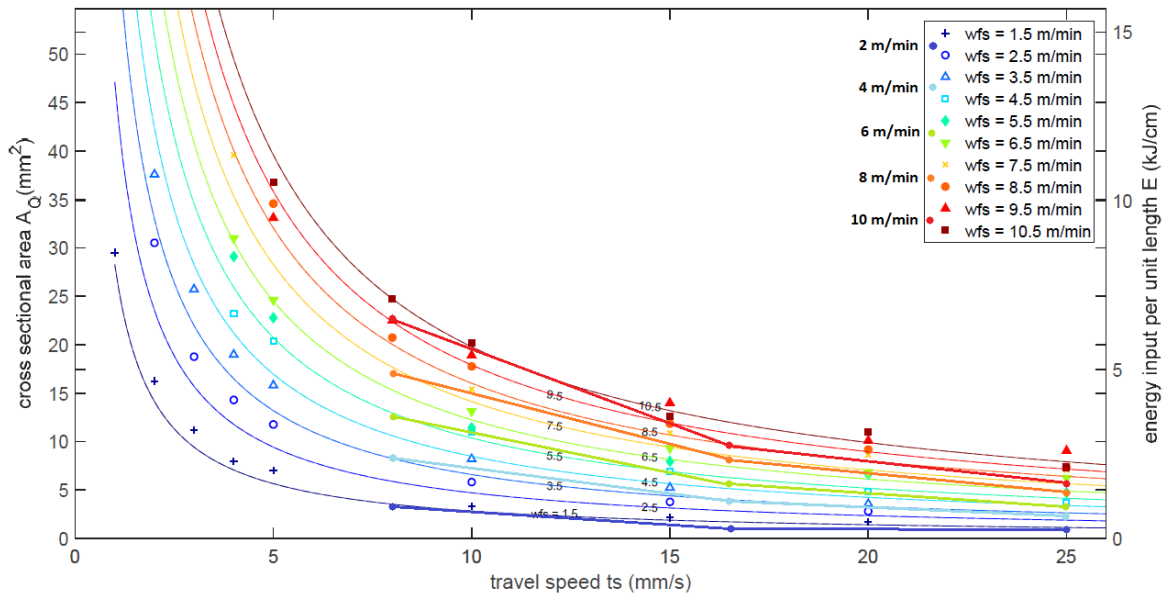
L'énergie volumique E_v déposée (ie : énergie déposée par unité de volume, exprimée en J/mm^3) s'exprime comme l'énergie linéique divisée par l'aire du cordon déposé A ou plus généralement comme la puissance divisée par le débit :

$$E_v = \frac{E_l}{A} = \frac{U.I}{A.V_r} = \frac{U.I}{\left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot V_f} \quad (2.16)$$

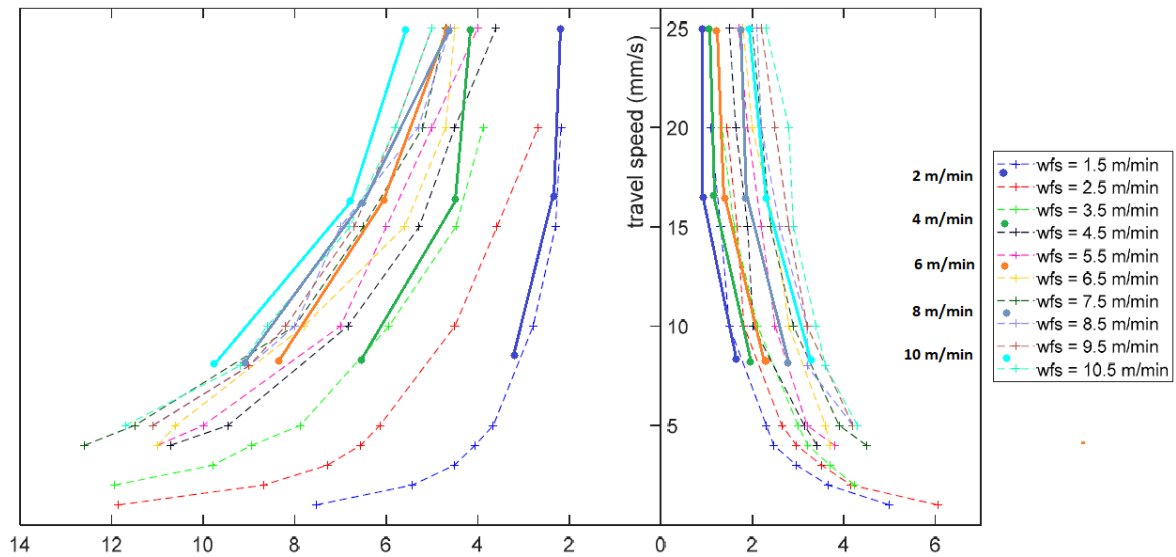
Sur l'ensemble des essais, l'énergie volumique délivrée varie peu et a une valeur moyenne de

26,6 J/mm³. A titre de comparaison, l'énergie nécessaire pour faire fondre un millimètre cube d'acier de densité 7,85 est de 12,6 J/mm³. Notre valeur moyenne est deux fois plus grande que cette valeur théorique car elle inclue aussi l'énergie délivrée par la source pour ioniser le gaz et créer l'arc ainsi que l'énergie nécessaire pour faire fondre une partie du substrat et assurer une bonne jonction du cordon.

Les surfaces de réponse des différentes grandeurs géométriques semblent cohérentes par rapport à ce que l'on peut trouver dans la littérature ([14]) comme l'illustre la figure 2.15 où sont superposés nos résultats. Une faible vitesse robot couplée à une forte vitesse fil forme de gros cordons tandis que de grandes vitesses robot avec de faibles vitesses fil donnent de petits cordons. Les surfaces de réponse ont donc une allure cohérente.



(a) Évolution de l'aire du cordon



(b) Évolution de la largeur en millimètre (à gauche) et hauteur en millimètre (à droite) du cordon

FIGURE 2.15 – Évolution des paramètres géométriques du cordon par Plangger et al. [14] avec nos résultats superposés en traits gras avec le même code couleur

3 Caractérisation expérimentale d'un modèle géométrique de cordon pour l'acier X90-IG

De manière similaire aux essais réalisés pour l'acier G3Si, cette partie décrit les essais menés pour caractériser la géométrie des cordons en acier X90-IG sur une plus grande base de paramètres d'entrée. La démarche de post traitement des données expérimentales est identique à celle présentée précédemment. Les observations et analyses sont ensuite présentées.

3.1 Campagne expérimentale

L'alliage en X90 IG est un acier faiblement allié mais comportant plus d'éléments d'addition que l'acier G3Si. Pour ce matériau, beaucoup plus de configurations sont testées afin de caractériser l'influence d'autres paramètres du procédé sur la géométrie des cordons. Le protocole expérimental est sensiblement le même que pour les essais en G3Si dans le sens où ils consistent en la fabrication de plusieurs mono cordons rectilignes déposés à vitesse constante qui sont ensuite numérisés pour en extraire les dimensions géométriques et ainsi établir la relation entre les paramètres procédé et les dimensions géométriques.

Pour ce matériau, les fils utilisés sont de diamètre 1,0 mm ou 1,2 mm. Les gaz d'inertage considérés ici sont l'Arcal Speed (Ar + CO₂ 8 %) et l'Arcal M14 (Ar + O₂ 1 % + CO₂ 3 %) dont le débit est fixé à 22L/min avec un diamètre de buse de 20 mm. Les cordons sont déposés sur un substrat en acier S355 sur une longueur de 50 mm, ce qui permet de maximiser le nombre de cordons déposés par substrat tout en permettant de dégager une zone suffisamment grande où le procédé est considéré comme stabilisé. Ainsi on s'exonère des phénomènes liés à l'allumage et l'extinction de l'arc qui apparaissent aux extrémités du cordon.



(a) Exemples de cordons réalisés dans le cadre du plan d'expérience en X90-IG

(b) Zoom sur certains cordons fabriqués dont certains présentent manifestement des défauts

FIGURE 2.16 – Cordons fabriqués en X90-IG

Les niveaux de vitesse de fil dévidé V_f étudiés ici balayent l'intégralité de la plage de vitesse offerte par la source FRONIUS TPS 600i et varient donc entre 2 m/min et 12 m/min. Les vitesses d'avance du robot V_r varient entre 0,25 m/min et 1,50 m/min ce qui englobe la plupart des valeurs

de vitesses mises en œuvre dans la littérature et permet ainsi de balayer l'intégralité de la plage de vitesses utiles en WAAM. Enfin, deux modes de transfert de gouttes sont considérés, le CMT et le pulsé. Cependant il est important de noter que pour le réglage de la source, le changement de diamètre de fil implique aussi de changer de synergie afin que les grandeurs électriques mises en œuvre par la source soient adaptées. Ainsi quatre synergies sont mises en œuvre ici, deux en mode pulsé, deux en mode CMT. Le tableau 2.3 récapitule les niveaux choisis pour chaque paramètre variable. Au total près de 200 essais sont réalisés, une partie des cordons obtenus est illustrée figure 2.16a.

Niveaux	1	2	3	4	5	6
V_r (m/min)	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50
V_f (m/min)	2	4	6	8	10	12
Diamètre fil (mm)	1,0	1,2				
Gaz	M14	Arcal Speed				
Mode de transfert	Pulsé	CMT				

TABEAU 2.3 – Niveaux de chaque paramètre variable pour les essais de mono-cordons rectilignes

La majorité des cordons fabriqués a une allure régulière et ne présente pas de défaut manifeste que ce soit avec un mode de transfert CMT ou pulsé. Les cordons les plus petits, où le λ est faible ce qui correspond à la mise en œuvre d'une vitesse robot élevée avec une vitesse fil faible, sont eux aussi réguliers et aucun phénomène de « humping » n'est observé. Cependant, plusieurs cordons présentent d'importantes avaries parmi ceux mettant en œuvre des λ élevés et tout particulièrement pour le mode de transfert pulsé. Par exemple les cordons numérotés 44 et 46 illustrés figure 2.16b ont été fabriqués avec un fil de diamètre 1,2 mm et le gaz d'inertage Arcal M14 en pulsé et sont considérés comme défectueux. Le cordon 44 a été déposé avec $V_f = 10$ m/min et $V_r = 1,5$ m/min et le cordon 46 avec $V_f = 12$ m/min et $V_r = 1,25$ m/min. Les cordons fabriqués avec les mêmes paramètres expérimentaux à l'exception du gaz d'inertage présentent le même type de défaut. Cela nous a poussé à exclure les cordons déposés en pulsé mettant en œuvre des vitesses fil importantes pour ce diamètre de fil lors du dépouillement des données expérimentales. On note toutefois que les cordons à grand λ déposés en pulsé avec un diamètre fil de 1 mm ne présentent pas ce genre de défaut. L'origine exacte de ce type de défaut n'est pas identifiée.

3.2 Observations et analyses

La figure 2.17 illustre l'évolution des dimensions géométriques des cordons en fonction de V_f et V_r pour le mode de transfert CMT avec un fil de diamètre 1 mm et le gaz d'inertage M14. Qualitativement le comportement géométrique des cordons est similaire à celui observé pour l'acier G3Si. Compte tenu du volume de données expérimentales traitées et du nombre de figures nécessaires pour rendre compte de l'intégralité du plan d'expérience, la plupart des figures sont proposées en annexe A.

Pour des besoins liés aux problématiques de santé matière et d'étude de la micro-structure des cordons fabriqués, des macrographies de chaque cordon ne présentant pas de défauts extérieurs visibles ont été réalisées par des partenaires du projet. Les cordons ont été découpés à la scie à ruban, puis plusieurs polissages successifs ont ensuite été réalisés avant de faire une attaque au nital pour mettre en évidence les différentes structures microcristallines de chaque section. Le tableau 2.4 rassemble les macrographies de chaque cordon réalisé pour le mode de transfert CMT avec un fil de diamètre 1 mm et le gaz d'inertage M14. Sans se plonger en détail dans l'analyse de la microstructure, ces macrographies permettent d'observer l'évolution de la géométrie de la section

des cordons en fonction des vitesses fil V_f et vitesses robot V_r mises en œuvre et donc en fonction du λ mis en œuvre. On constate que pour des cordons fabriqués avec des vitesses fil V_f faibles, les sections sont très bombées et les zones de refusion du substrat sont très peu marquées. Lorsque la vitesse fil V_f augmente, les cordons ont plus tendance à s'étaler et adoptent des sections d'allure polynomiale jusqu'à un certain point où lorsque la vitesse d'avance du robot V_r associée est faible, les cordons adoptent là encore une allure plus bombée et sont naturellement bien plus gros. Enfin on constate que tous les cordons fabriqués avec le même ratio λ programmé ont une allure très similaire à l'exception de ceux réalisés avec une vitesse fil programmée à 2 m/min comme l'illustre la figure 2.20 qui rassemble tous les cordons fabriqués avec un $\lambda = 8$.

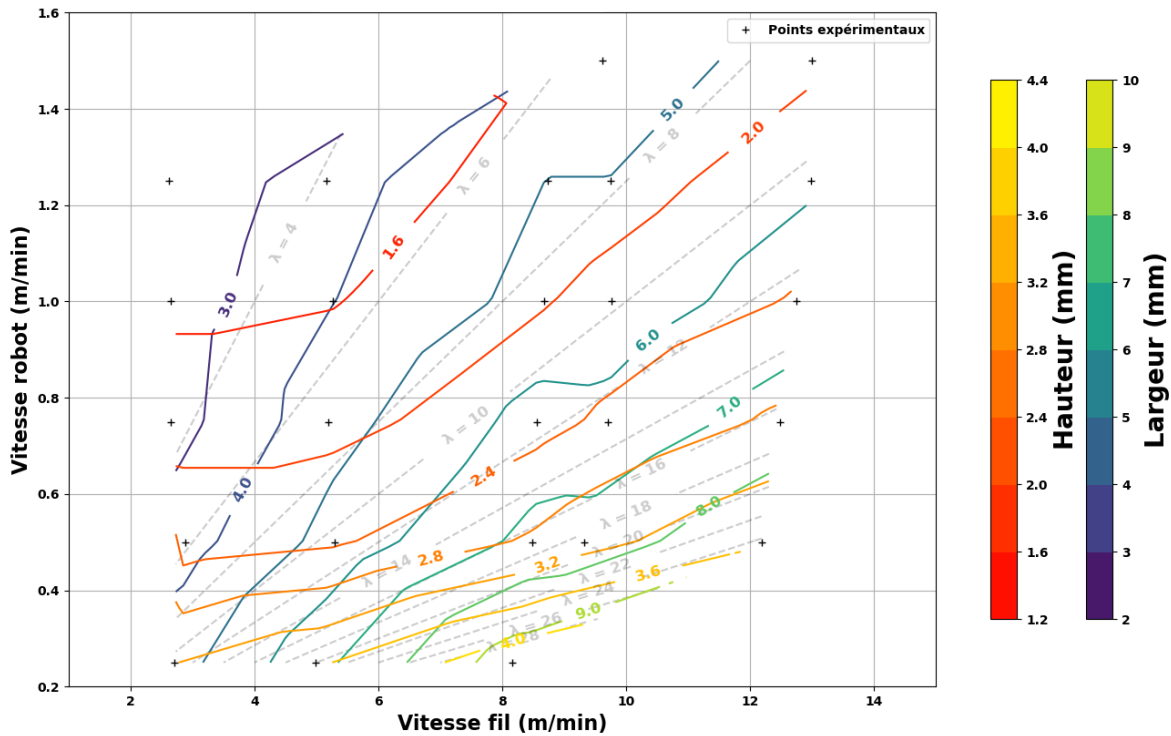
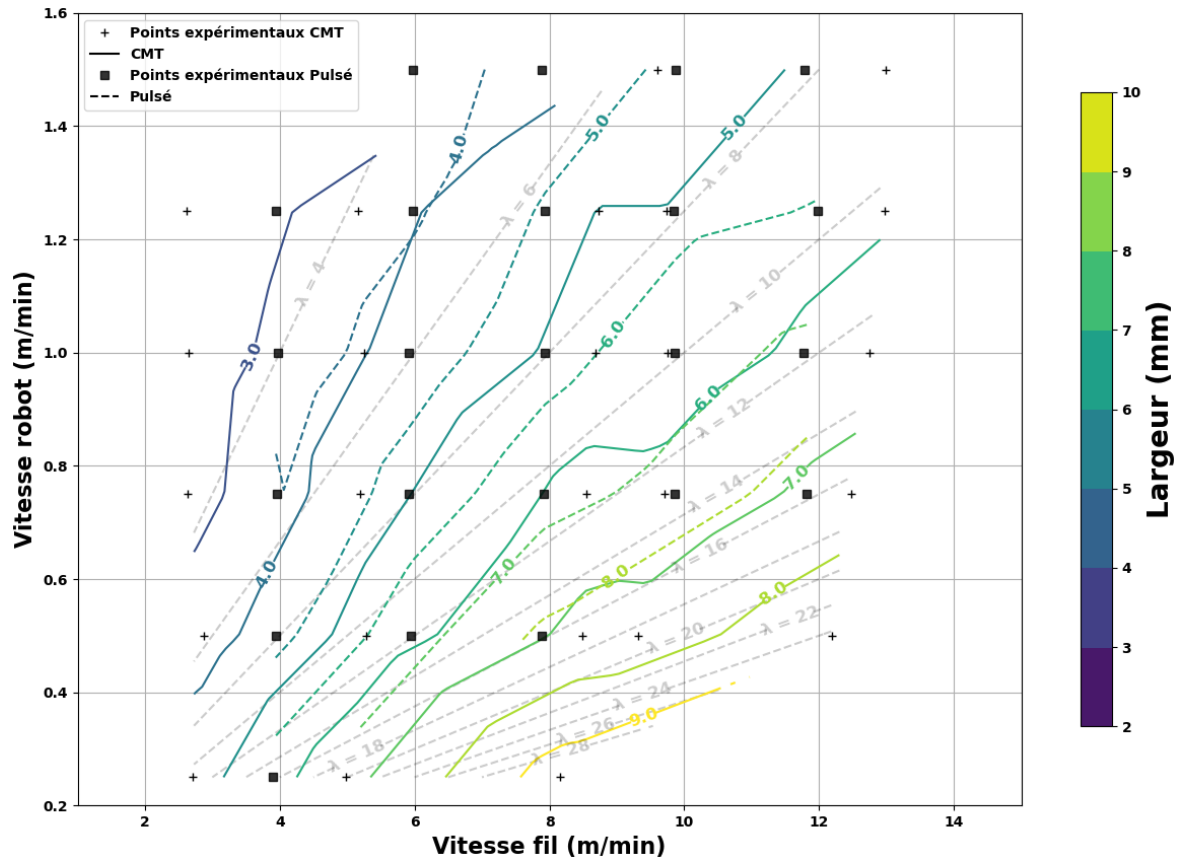


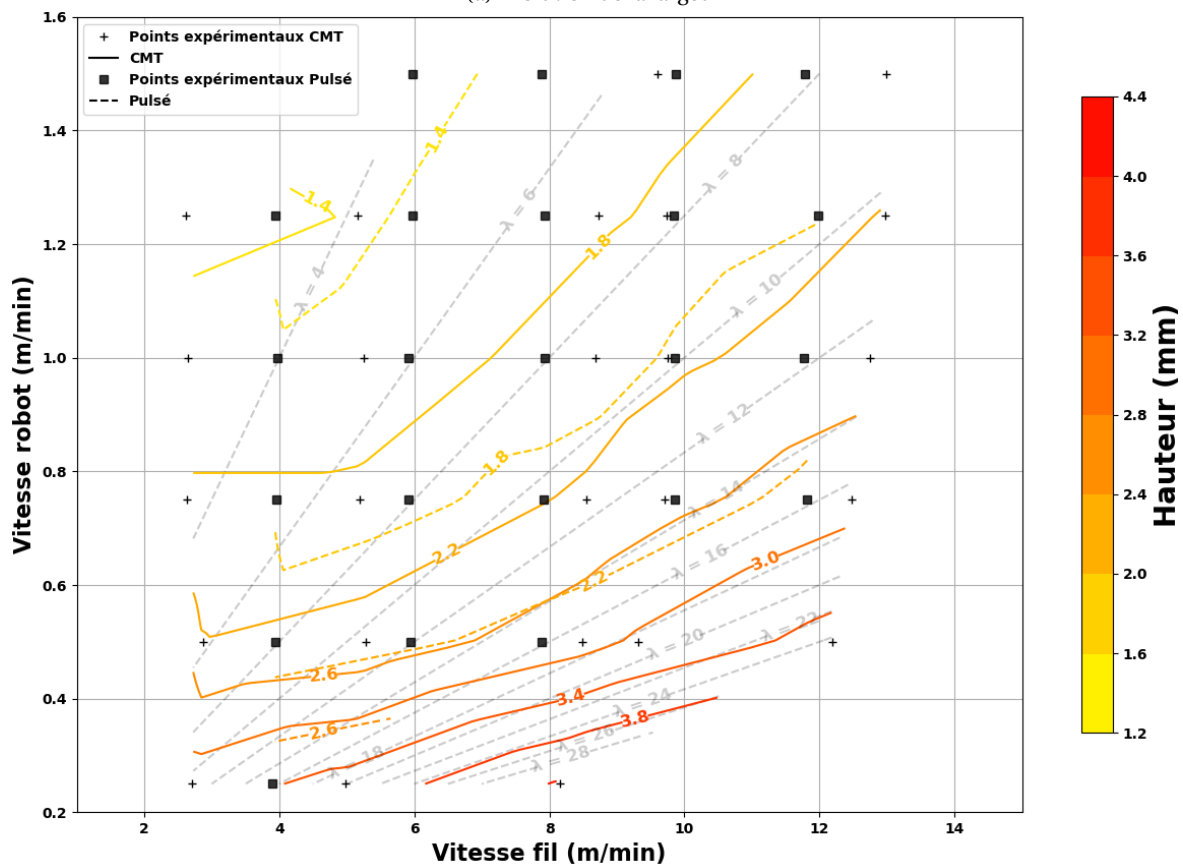
FIGURE 2.17 – Lignes d'iso hauteur et iso largeur en fonction des vitesses fil et robot pour le fil de diamètre 1,0 mm de X90-IG, un gaz d'inertage M14 et la synergie CMT

La figure 2.18 illustre les dimensions mesurées des cordons pour les deux modes de transfert avec un fil de diamètre 1 mm et le gaz d'inertage M14. Globalement, la géométrie évolue de la même manière en CMT qu'en pulsé, cependant on constate que pour un même couple (V_f, V_r) le cordon fabriqué en CMT a tendance à être moins large mais plus haut que celui en pulsé comme le montre la figure 2.19 qui illustre les macrographies de deux cordons fabriqués en CMT et pulsé avec les mêmes configurations de paramètres. On retrouve ces comportements pour les autres configurations de paramètres procédé même si l'on note toutefois que pour certains cas, dans certaines zones du plan (V_f, V_r) , les dimensions des cordons sont quasiment identiques pour les deux modes de transfert. La nature du gaz d'inertage quant à elle semble avoir une influence mineure sur la géométrie des cordons. En effet, les lignes d'iso dimension pour les deux gaz sont très proches les unes des autres et ce sur la majorité des plages de paramètres V_f et V_r (figures A.7, A.8, A.9 et A.10).

La figure 2.21 illustre l'évolution de l'énergie linéique déposée pour les deux modes de transfert. Comme on pouvait s'y attendre, l'énergie linéique déposée en CMT est nettement inférieure à celle déposée en pulsé puisque l'énergie apportée conditionne directement le mode de transfert mis en œuvre (figure 1.10 Chapitre 1). Aussi on observe, là encore, que les lignes d'iso énergie suivent les lignes d'iso lambda aussi bien pour le CMT que le pulsé. La nature du gaz d'inertage là



(a) Évolution de la largeur



(b) Évolution de la hauteur

FIGURE 2.18 – Évolution des dimensions géométriques des cordons en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1 mm et un gaz M14

V_f programmée	2 m/min	4 m/min	6 m/min	8 m/min	10 m/min
$V_r = 1,5$ m/min					
$V_r = 1,25$ m/min					
$V_r = 1$ m/min					
$V_r = 0,75$ m/min					
$V_r = 0,50$ m/min					
$V_r = 0,25$ m/min					

TABLEAU 2.4 – Macrographies de chaque cordon réalisé pour le fil de diamètre 1,0 mm de X90-IG, un gaz d’inertage M14 et la synergie CMT. Crédit : CETIM-Vallourec-AFH

NB : l’échelle n’est pas la même pour chaque image, cette figure ne rapporte que la géométrie des sections des cordons fabriqués

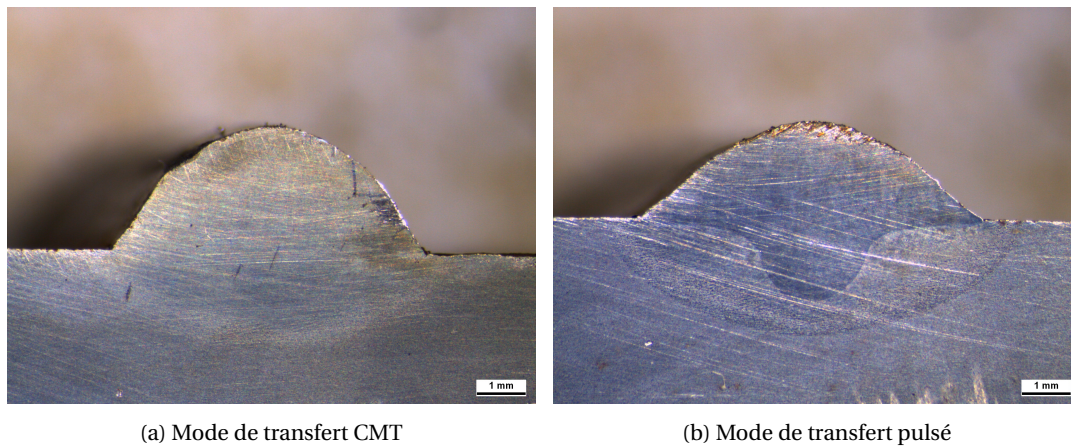
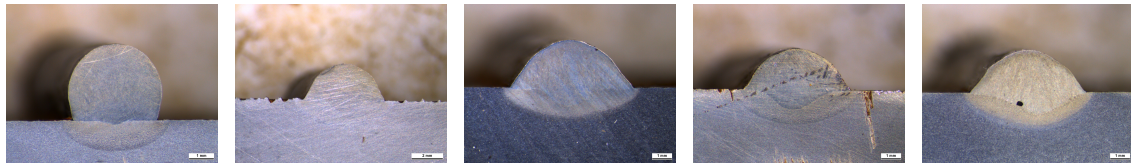


FIGURE 2.19 – Macrographies des cordons déposés en CMT et pulsé avec un fil de diamètre 1 mm, un gaz d’inertage M14, $V_r = 0,75$ m/min et $V_f = 8$ m/min. Crédit : CETIM-Vallourec-AFH

aussi n’a quasiment aucune influence sur la quantité d’énergie apportée en cours de fabrication. Le tableau 2.5 rapporte l’énergie volumique moyenne et ses bornes de variation délivrée par la source pour l’ensemble des cordons déposés avec les mêmes diamètre fil, mode de transfert et gaz d’inertage. On constate que la quantité d’énergie volumique dépend exclusivement du mode de transfert choisi.



(a) $V_r = 0,25$ m/min et $V_f = 2$ m/min (b) $V_r = 0,5$ m/min et $V_f = 4$ m/min (c) $V_r = 0,75$ m/min et $V_f = 6$ m/min (d) $V_r = 1$ m/min et $V_f = 8$ m/min (e) $V_r = 1,25$ m/min et $V_f = 10$ m/min

FIGURE 2.20 – Macrographies des cordons déposés en CMT et pulsé avec un fil de diamètre 1 mm, un gaz d’inertage M14, mettant en œuvre un $\lambda = 8$. Crédit : CETIM-Vallourec-AFH

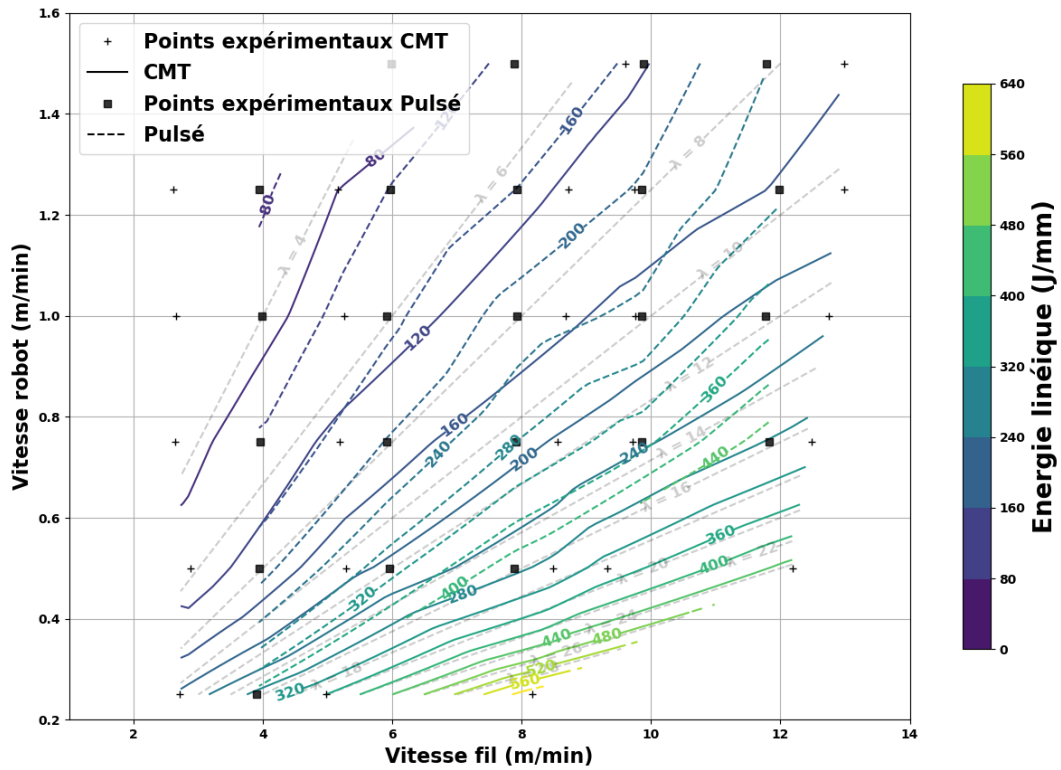


FIGURE 2.21 – Énergie linéique déposée en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1 mm et un gaz M14

Diamètre fil (mm)	Mode de transfert	Gaz d’inertage	Energie volumique (J/mm ³)		
			Moy	Min	Max
1,0	Pulsé	Arcal Speed	32,2	27,8	38,1
		M14	33,0	29,6	38,7
	CMT	Arcal Speed	23,3	20,4	24,5
		M14	23,1	21,6	24,7
1,2	Pulsé	Arcal Speed	34,2	30,7	37,0
		M14	34,9	31,3	38,9
	CMT	Arcal Speed	25,7	22,2	27,9
		M14	24,6	21,4	26,6

TABEAU 2.5 – Synthèse de l’énergie volumique moyenne mesurée pour l’ensemble des configurations des paramètres de diamètre fil, mode de transfert et de gaz d’inertage

3.3 Mono cordon rectiligne à dimensions variables

Que ce soit dans un scénario de correction de défaut en cours de fabrication ou de mise en œuvre de trajectoires avec des épaisseurs de couches non uniformes, il est indispensable de pouvoir piloter l'évolution de la géométrie au cours de la fabrication. Le pilotage des dimensions des cordons déposés passe par un pilotage des paramètres de vitesse fil V_f et de vitesse robot V_r au cours de la trajectoire. Cependant sur notre installation le réglage de la vitesse fil se fait manuellement directement au niveau de la source électrique et donc il n'est pas possible en l'état de piloter la vitesse de fil dévidé au cours de la trajectoire. Il est donc proposé ici de faire évoluer exclusivement la vitesse d'avance du robot au cours de la trajectoire pour générer des cordons aux dimensions non uniformes.

Pour pouvoir proposer des stratégies de pilotage des paramètres procédé et donc de piloter les dimensions des cordons fabriqués, il est nécessaire de maîtriser l'évolution des dimensions en fonction de l'évolution des paramètres procédé. Les parties précédentes nous ont permis de corréler les dimensions aux paramètres procédé dans le cadre de mono cordons rectilignes fabriqués à vitesse constante. Ainsi l'objectif ici est de vérifier si le comportement géométrique des cordons identifié à vitesse constante reste le même lorsque la vitesse varie. La démarche proposée consiste à fabriquer des cordons rectilignes avec une vitesse fil donnée en faisant varier au cours de la trajectoire la vitesse d'avance du robot. Dans un premier temps, nous mettons en œuvre une rampe de vitesse. Pour ce faire, deux approches sont envisagées :

- Réaliser un segment avec un profil de vitesse en escalier dont la hauteur et la largeur des marches sont à définir pour approximer de manière satisfaisante un profil en rampe.
- Réaliser un segment avec un profil de vitesse en rampe à l'aide de la fonction proposée par le contrôleur.

Compte tenu du type de variation de vitesse retenu pour cette étude, il semblerait plus adéquat de privilégier la fonction rampe proposée par le contrôleur, cependant celle-ci n'est pas détaillée dans la documentation technique [61]. De plus, en choisissant judicieusement les hauteurs et longueurs de chaque marche, il est possible d'approximer plus ou moins finement n'importe quel type de variation de vitesse par un profil en escalier.

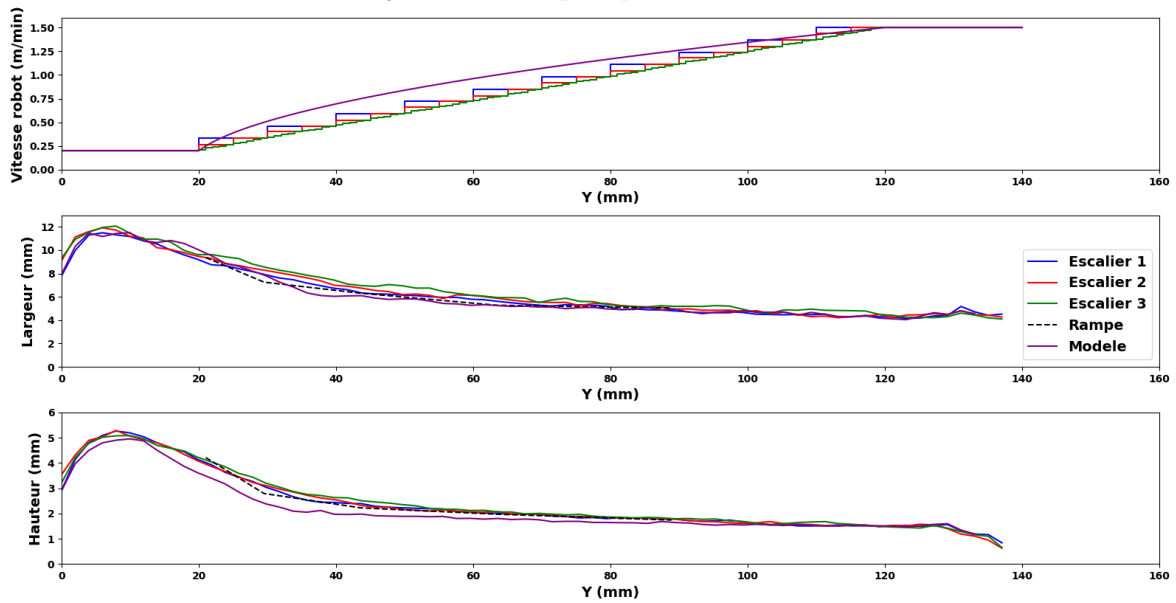
En fin de compte, quatre essais sont menés pour observer la géométrie des cordons fabriqués avec des trajectoires mettant en œuvre une évolution de la vitesse d'avance : trois essais en escalier de vitesse avec trois longueurs de marches différentes et un essai en rampe. La plage de vitesse robot balayée pour chaque essai est celle utilisée en WAAM et chaque cordon de longueur 150 mm fait varier la vitesse robot de 0,2 m/min à 1,5 m/min. Pour ces essais les longueurs de marche retenues sont de 10, 5 et 1 mm et afin de s'affranchir des phénomènes d'allumage et d'extinction de l'arc électrique, deux segments de 20 mm sont rajoutés aux extrémités des escaliers et de la rampe pour laisser le bain se stabiliser avant de faire varier la vitesse robot. La hauteur de marche est constante pour un escalier donné et est définie en fonction de la longueur de marche considérée et donc du nombre de marches associées.

Les cordons sont en acier X90iG sur le même substrat en S355, la vitesse d'apport en fil est fixée à 6 m/min et son diamètre est de 1 mm avec un mode de transfert CMT. Le gaz d'inertage est du mélange Arcal M14 à base d'argon avec 3%CO₂ et 1%O₂ avec un débit constant de 22 L/min. Les cordons sont ensuite numérisés puis les nuages de points sont post traités de manière similaire à celle exposée précédemment.

La figure 2.22b illustre l'évolution de la géométrie de la section le long du cordon pour les essais en escaliers pour différentes longueurs de marches (et donc hauteurs ajustées en conséquence). Le premier constat que l'on puisse faire est que les trois cordons ont une géométrie très proche,



(a) Image des cordons déposés pour les essais en escalier



(b) Évolution des dimensions des cordons pour les essais en escalier pour différentes longueurs de marches

FIGURE 2.22 – Essais en escalier

la longueur des marches de l'escalier de vitesse n'a donc que très peu d'influence sur la géométrie du cordon déposé. La géométrie du cordon d'un essai en rampe ainsi que la géométrie du modèle phénoménologique développé précédemment ont été superposées sur nos résultats. On constate que l'on retrouve globalement les dimensions identifiées dans le modèle pour des vitesses données sur nos cordons lorsqu'on les utilise. On remarque que les dimensions du cordon déposé en rampe de vitesse sont très proches de celles des escaliers en début et fin de cordon, avec un léger écart au milieu. Cela pourrait s'expliquer par le fait que la rampe de vitesse réalisée par le contrôleur soit en réalité une rampe linéaire en temps et non pas en position comme l'approxime les escaliers.

En conclusion, pour cette configuration de paramètres et en particulier pour une vitesse fil fixée à 6 m/min, l'évolution des dimensions des cordons déposés en faisant varier la vitesse d'avance en cours de fabrication suit la même évolution que les surfaces de réponse établies à partir de mono cordons déposés à vitesse constante. On peut donc dire qu'il est possible de s'appuyer sur ces abaques pour déterminer les paramètres procédé à mettre en œuvre pour élaborer des trajectoires avec des épaisseurs de couches non uniformes.

4 Synthèse

Pour les matériaux G3Si et X90-IG, les relations entre les paramètres procédé et les dimensions des cordons ont été identifiées pour deux gaz d'inertage régulièrement employés, deux diamètres de fil et deux modes de transfert. Naturellement, les paramètres de vitesse fil et de vitesse d'avance de la torche ont une influence majeure sur la géométrie des cordons puisqu'ils fixent le volume de matière déposée par unité de longueur. Ainsi il est tout à fait possible d'apporter ce même volume de matière par unité de longueur en mettant en œuvre différents paramètres procédé. La quantité d'énergie délivrée par la source est directement corrélée à la quantité de matière apportée pour la faire fondre et aussi faire fondre une partie du substrat sous le cordon et ainsi assurer une bonne jonction.

Que ce soit pour le G3Si ou le X90-IG, lors de l'utilisation de synergies de type CMT, on constate systématiquement une évolution de la vitesse fil nettement supérieure à la vitesse fil programmée. Cela impacte nécessairement la quantité de matière apportée et explique en tout ou partie pourquoi les cordons déposés en CMT sont généralement plus grands que ceux déposés en pulsé. L'origine de cette augmentation de la vitesse fil n'est pas tout à fait connue mais les retours d'expériences menées a posteriori de ces essais semblent indiquer que les synergies CMT employées n'ont pas été développées spécifiquement pour nos matériaux et que la distance entre le tube contact et la pièce joue un rôle majeur sur l'évolution de la vitesse fil en CMT. Cet aspect du problème sera investigué dans le chapitre 4.

Enfin, les abaques d'iso dimension établis ici permettent d'anticiper les dimensions des cordons fabriqués en fonction des paramètres procédé mis en œuvre. À l'inverse, ils offrent la possibilité d'identifier les paramètres procédé à régler pour générer un cordon aux dimensions voulues. De plus, bien qu'ils aient été établis à partir de l'observation de cordons fabriqués avec des paramètres procédé constants, les géométries de cordons déposés en faisant varier la vitesse d'avance au cours de la trajectoire suivent les abaques. Cependant, cela a été vérifié dans le cadre de variations de vitesse programmée relativement douces. Il nous faut vérifier le comportement géométrique du cordon dans le cas de variations brusques de la vitesse du robot comme on en rencontre souvent lors du passage de points de changement de direction le long d'une trajectoire. Cette étude fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 3

Repliement de cordon

Ce chapitre se concentre sur la gestion des passages de points de changement de direction le long de la trajectoire. Les variations locales du comportement cinématique du robot autour de ces points affectent aussi la géométrie des cordons fabriqués. Dans un premier temps, le comportement cinématique du robot est observé puis modélisé à partir de l'interpolation de la trajectoire nominale à l'aide de filtres à réponse impulsionnelle finie. Ensuite, le comportement géométrique des cordons est observé expérimentalement autour des points de changement de direction en fonction des paramètres cinématiques de la trajectoire et des paramètres procédé. L'accumulation de matière et ses origines sont ainsi caractérisées. Enfin, une modélisation géométrique du dépôt de matière dans l'espace en cours de fabrication est proposée.

Sommaire

1	Introduction	58
2	Campagne expérimentale	60
3	Modélisation des phénomènes observés	62
3.1	Comportement cinématique du robot	62
3.2	Trajectoire perçue	67
4	Campagne expérimentale complémentaire	71
4.1	Observations du cordon en cours de fabrication	72
4.2	Identification de la longueur de poursuite	78
4.3	Analyse du volume de matière déposée	79
5	Modèle de dépôt cumulatif de matière	87
5.1	Identification des paramètres	88
5.2	Modélisation des cordons autour des points de changement de direction	90
6	Synthèse	93

1 Introduction

En général, lors de la définition des trajectoires de fabrication en WAAM, on cherche à minimiser le nombre d'allumages et d'arrêts d'arc d'une part pour des raisons de productivité et d'autre part, ces événements sont le plus souvent synonymes de défauts dans la pièce fabriquée. C'est pourquoi la quasi totalité des trajectoires mises en œuvre pour fabriquer une pièce présentent des points de changement de direction. Cependant, aux passages de points de changement de direction, les paramètres du procédé ne sont pas toujours maintenus par le système à leurs valeurs programmées et le comportement géométrique de la matière déposée est différent de lorsqu'elle est déposée en ligne droite. Il en résulte l'apparition systématique d'accumulations de matière localisées au voisinage des points de changement de direction. La présence d'accumulations a pour conséquence de produire des couches d'épaisseur non uniforme ce qui peut compliquer la fabrication lors de la mise en œuvre de trajectoires issue de l'étape de tranchage. En effet, quelle que soit la méthode de tranchage, il est nécessaire de maîtriser la hauteur des cordons, qu'elle soit constante ou volontairement variable.

Li et al. [27] proposent une méthode pour adapter les paramètres procédé autour des points de changement de direction et minimiser ainsi les accumulations de matière dans ces zones. Pour cela, un réseau de neurones est employé pour prédire les dimensions géométriques des cordons en fonction des paramètres de vitesse fil et de vitesse robot, qui sont les paramètres pilotés ici. Néanmoins, le modèle sur lequel sont définies la largeur et la hauteur du cordon n'est pas explicité. Un modèle cinématique à jerk limité du robot est aussi exploité pour prédire le comportement du robot dans l'espace des tâches le long de la trajectoire. La figure 3.1 illustre l'artefact fabriqué avec et sans la méthode de pilotage des paramètres procédé.

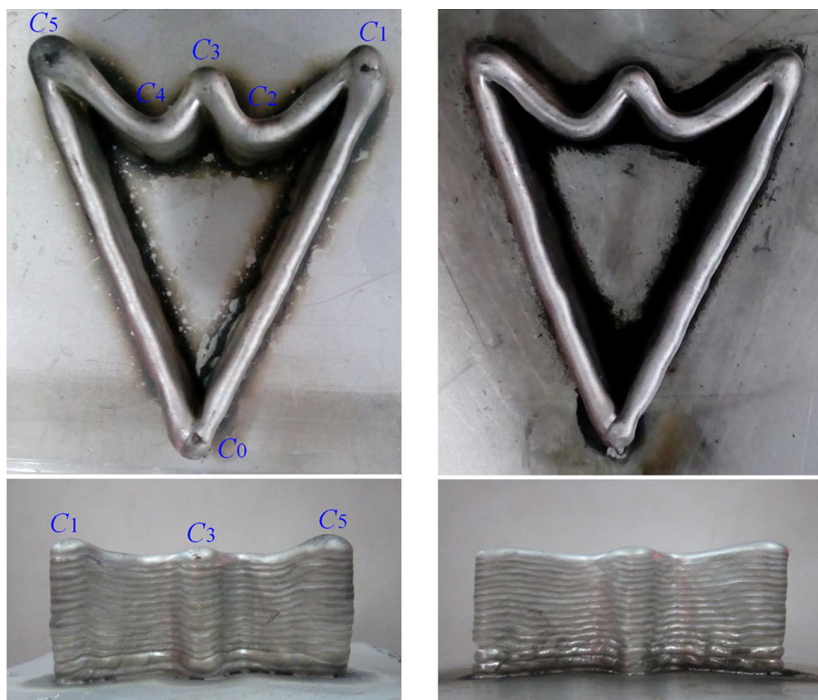
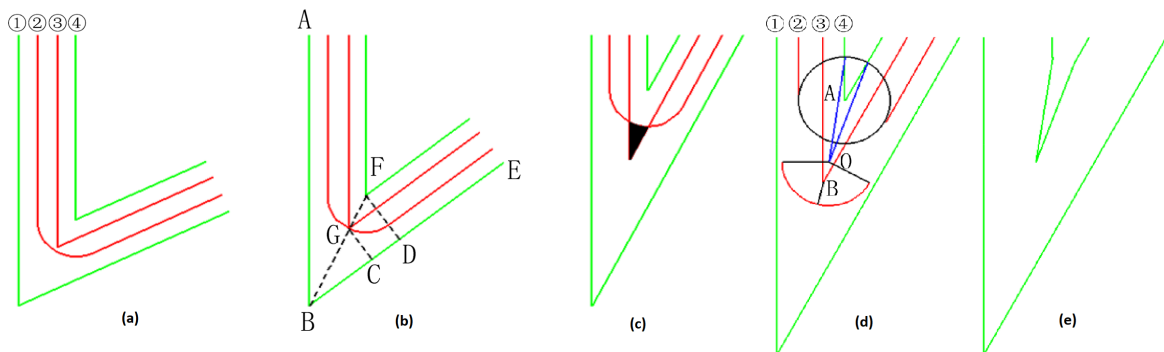


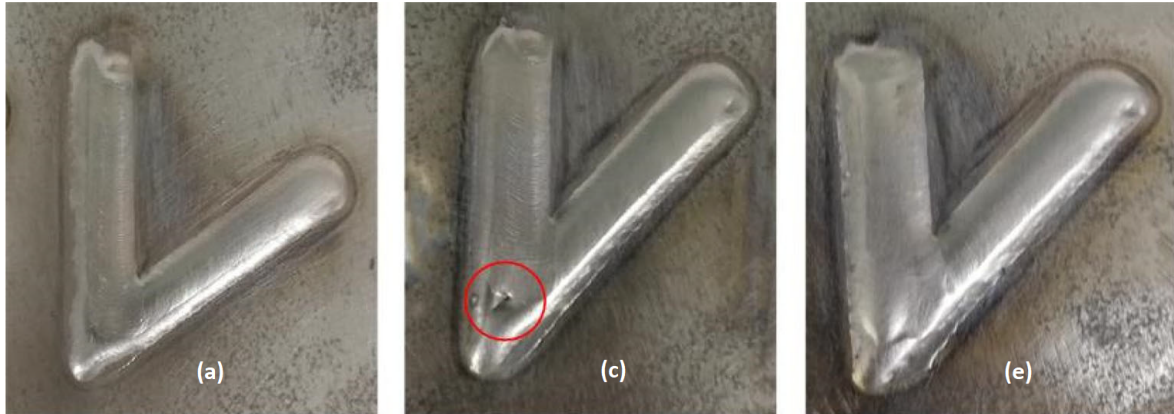
FIGURE 3.1 – Comparaison du même artefact fabriqué avec (à droite) et sans (à gauche) la méthode d'adaptation des paramètres procédé [27]

Outre les complications liées à la non uniformité des épaisseurs de couche lors de l'empilement de cordon, des lacunes de remplissage entre deux cordons peuvent être rencontrées spécifiquement au niveau de leurs virages. Liu et al. [62] identifient un angle critique pour lequel le remplissage n'est plus assuré au niveau des angles (figure 3.2) et proposent une méthode de correction

de la trajectoire pour assurer le remplissage. L'angle critique identifié est de 58.65° ; cependant on peut noter que pour le calculer, les auteurs ne considèrent que les surfaces balayées par chaque cordon et non leurs hauteur et topologie.



(a) Schéma d'une jonction au niveau d'un virage avec ① et ④ les trajectoires nominales des deux cordons juxtaposés, ② l'extérieur du cordon ④ et ③ l'intérieur du cordon ① : (a) l'angle du virage est plus grand que l'angle critique, (b) l'angle du virage est égal à l'angle critique, (c) l'angle du virage est plus petit que l'angle critique, (d) processus de correction, (e) trajectoire résultante



(b) Photographies des virages pour un angle supérieur à l'angle critique et un angle inférieur à l'angle critique sans et avec la méthode de correction proposée

FIGURE 3.2 – Méthode de correction pour la fabrication d'angle aigu par [62]

Nguyen et al. [28] calculent la distance de juxtaposition optimale pour remplir sans lacune la zone autour des points de changement de direction fréquemment rencontrés lors de la mise en œuvre de trajectoires hybrides mélangeant du contouring et du zig-zag. Pour définir la distance optimale dans ce cas précis, les auteurs calculent la distance pour laquelle le volume d'intersection des différents cordons est égal au volume manquant pour obtenir une surface plane. Le volume des cordons est défini comme le volume extrudé d'une section polynomiale le long de la trajectoire nominale. La figure 3.3 illustre la situation.

En résumé, les changements de direction au cours d'une trajectoire sont très fréquents et sont à l'origine d'accumulations de matière impliquant des variations d'épaisseur de couche potentiellement problématiques. Au sein d'une même couche, les lacunes de remplissage apparaissent souvent au niveau des jonctions des cordons autour des points de changement de direction. On constate que cette thématique est relativement peu abordée dans la littérature, c'est pourquoi ce chapitre porte sur l'étude et la modélisation de la géométrie des cordons au voisinage des points de changement de direction. Tout d'abord une première série d'essais est réalisée afin de constater le phénomène. À l'issue des premières observations, des modèles sont proposés pour pouvoir anticiper le comportement cinématique du robot et la trajectoire vue par le cordon associé. Néan-

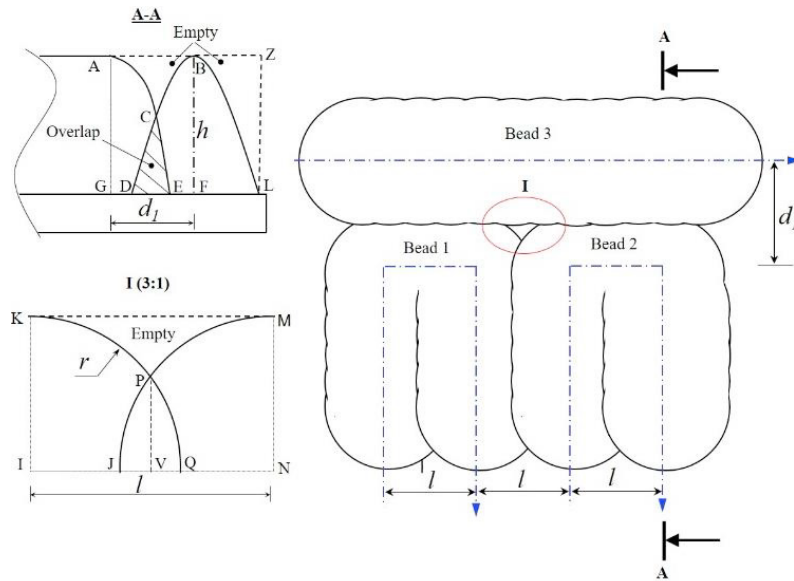


FIGURE 3.3 – Schéma de la situation de juxtaposition pour une trajectoire hybride contouring/zig-zag

moins, les limites du modèle par extrusion de section pour modéliser la géométrie des cordons autour des points de changement de direction nous pousse à réaliser une seconde série d'essais, plus détaillés et mieux instrumentés pour observer le bain liquide. Enfin une modélisation de la géométrie des cordons est proposée.

2 Campagne expérimentale

L'objectif des premiers essais est d'observer le comportement géométrique des cordons autour des points de changement de direction en fonction des paramètres procédé et tout particulièrement des paramètres cinématiques liés à la trajectoire. Les premiers essais réalisés (figure 3.4) mettent en œuvre chacun des paramètres résumés tableau 3.1 autour de la configuration de référence avec un angle α de $\frac{\pi}{2}$, une option de lissage τ de trajectoire du robot FANUC de 50 et une vitesse d'avance du robot de 0,75 m/min. L'option de lissage τ est un paramètre réglable entre 0 et 100 où 0 correspond à une trajectoire sans lissage (point à point) et 100 correspond à un lissage maximum de la trajectoire. Cette configuration de référence est issue du plan d'expériences mono cordon rectiligne précédemment réalisé et correspond à un cordon d'allure satisfaisante. Compte tenu des valeurs de vitesse d'avance V_r retenues pour ces essais, les valeurs de λ sont fixées de sorte à mettre en œuvre des valeurs de vitesse fil V_f déjà utilisées lors du précédent plan d'expériences. Les dix cordons sont réalisés avec un fil d'un millimètre de diamètre, un gaz d'inertage M14, une synergie CMT Universel 3248 et sont déposés sur un substrat en S355.

Paramètres	Niveaux			
α (rad)	0*	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{3\pi}{4}$
τ	0	50	100	
λ	5,33	10,67	12	
V_r (m/min)	0,5	0,75		

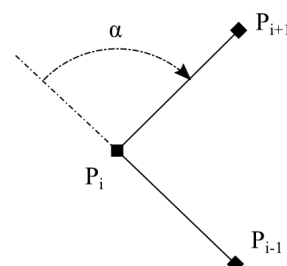


TABLEAU 3.1 – Niveaux proposés de chaque paramètre pour les essais sur le repliement de cordon

* seulement pour 2 essais à $\tau = 0$ et $\tau = 100$ avec $V_r = 0,75$ m/min et $\lambda = 10,67$

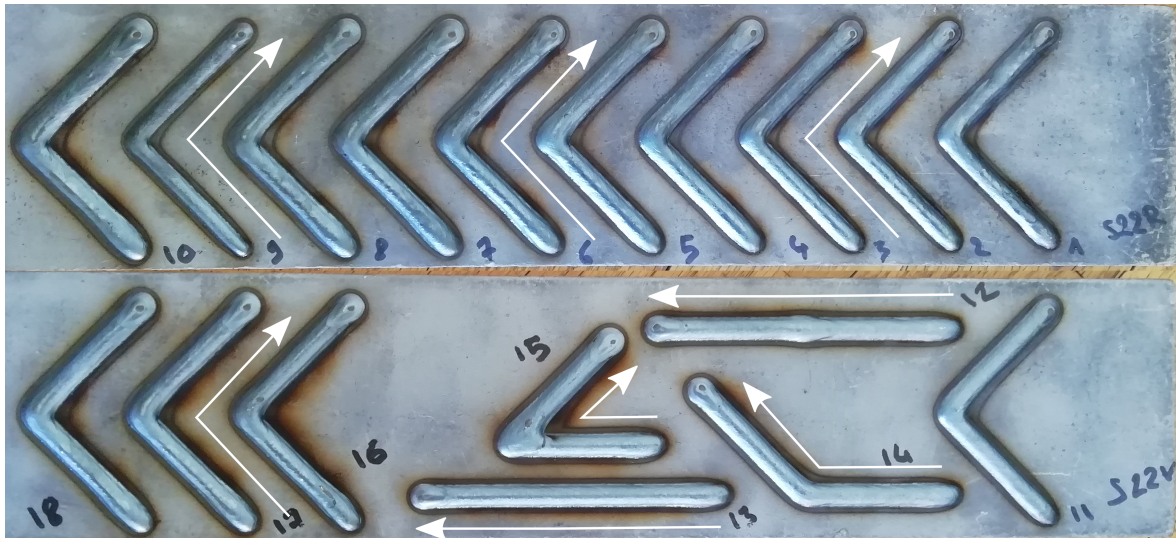


FIGURE 3.4 – Cordons fabriqués présentant des changements de direction

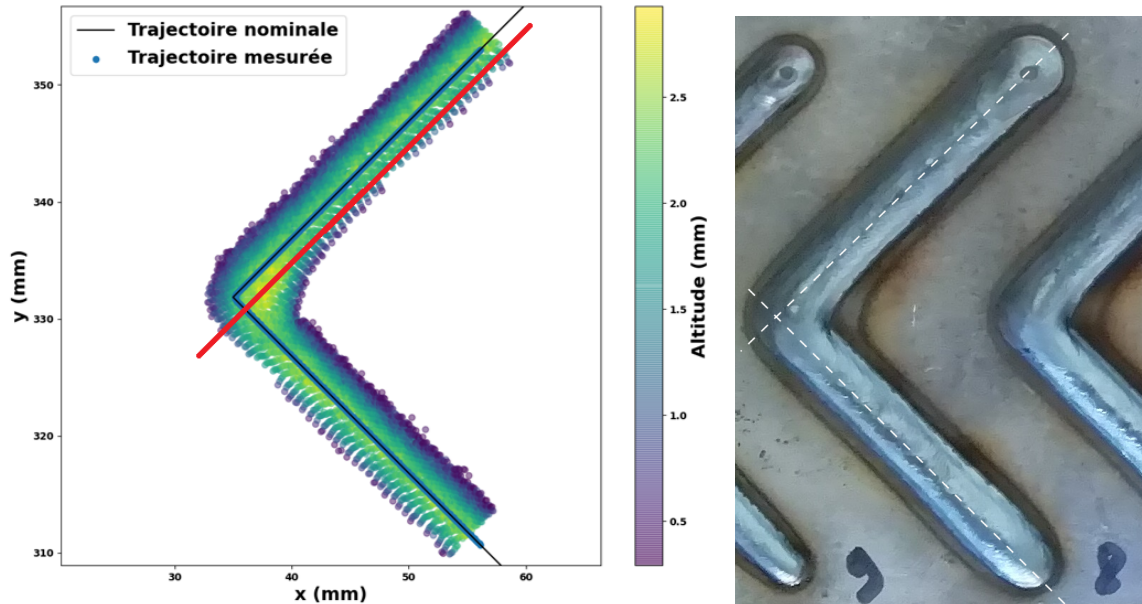
Pour chaque essai, les évolutions de la tension, de l'intensité et de la vitesse fil ainsi que les positions successives de la torche au cours de la fabrication ont été relevées. Les cordons ont ensuite été scannés à l'aide de la caméra de suivi de joint FUJI-CAM.

Globalement, l'allure générale des cordons fabriqués est satisfaisante et ne permet pas au premier abord de proscrire certaines configurations de paramètres procédé. Comme attendu, les configurations de paramètres impliquant les diminutions de vitesse les plus importantes produisent des cordons présentant des accumulations plus marquées autour du point de changement de direction. Les différences entre les cordons sont légères à l'œil nu, mais perceptibles au toucher. Le cordon fabriqué avec une trajectoire sans lissage (point à point) présente une accumulation plus importante que ceux fabriqués avec un lissage de 50 et 100, où la différence est beaucoup plus ténue. Lorsque l'angle α entre les deux segments de la trajectoire est obtus l'accumulation est nettement plus marquée que lorsqu'il est aigu, que ce soit au niveau de la hauteur de la bosse produite ou de l'étalement du cordon. En effet, on constate que la matière a tendance à arrondir l'angle malgré le fait que la torche décrive un angle franc. Enfin, par rapport à la quantité de matière déposée par unité de longueur (conditionnée par le paramètre λ), l'accumulation observée reste globalement la même relativement aux dimensions des cordons associés et ne semble pas sensiblement plus importante lorsque le cordon est plus bombé.

Les cordons numérotés 12 et 13 sur la figure 3.4 ont été fabriqués en mettant un angle α de 0° et des paramètres de lissage respectivement de 0 et 100 tout en laissant le point intermédiaire au milieu du cordon. Le cordon 13 a une allure régulière similaire à un mono cordon rectiligne. Le cordon 12 quant à lui présente une nette accumulation au niveau du point intermédiaire de la trajectoire puisqu'en parcourant la trajectoire point à point, le robot passe par le point intermédiaire en marquant un bref temps d'arrêt. Ce cordon illustre l'influence des variations de vitesse au cours de la trajectoire sur la géométrie des cordons fabriqués.

La figure 3.5 présente le cordon fabriqué avec la configuration expérimentale de référence ainsi que sa numérisation recalée sur les trajectoires nominale et mesurée. Cet exemple illustre le phénomène observé de décalage de la matière par rapport à la trajectoire de la torche. La mesure des dimensions géométriques du cordon se basant sur l'étude de sections orthogonales, ces trajectoires ne sont pas appropriées pour définir et extraire les sections à mesurer. En effet, au voisinage proche du changement de direction, que ce soit en amont ou en aval, la trajectoire décrite par le point piloté de la torche est encore (ou de nouveau) rectiligne, cependant les sections or-

thogonales associées ne sont pas révélatrices de la géométrie des cordons, comme par exemple la section en rouge sur la figure 3.5a. Aussi, la trajectoire décrite par le point piloté de la torche n'est pas adaptée pour modéliser la géométrie du cordon en extrudant une section le long de celle-ci. En effet cette trajectoire est peu révélatrice de la position du cordon et de la répartition de la matière autour des points de changement de direction, il est donc nécessaire de considérer une trajectoire alternative à celle du point piloté de la torche à associer au cordon.



(a) Géométrie du cordon par rapport aux trajectoires programmée et mesurée au voisinage d'un point de changement de direction. Exemple de section orthogonale à la trajectoire mesurée non révélatrice de la géométrie du cordon (en rouge)

(b) Photo du cordon

FIGURE 3.5 – Cordon fabriqué avec $V_f = 8$ m/min, $V_r = 0,75$ m/min, $\tau = 50$, $\alpha = 90^\circ$

La diminution de vitesse d'avance du robot ayant une influence indiscutable sur la géométrie des cordons fabriqués, il apparait comme indispensable de pouvoir prédire le comportement cinématique du robot afin de pouvoir anticiper son influence sur le comportement géométrique des cordons. C'est pourquoi un modèle cinématique du robot est présenté après avoir observé son comportement. Ensuite, à partir de la trajectoire décrite par la torche, le concept de trajectoire de poursuite à la torche est proposé pour mieux rendre compte de la trajectoire telle qu'elle est vue par le cordon.

3 Modélisation des phénomènes observés

Le développement de modèles prédictifs des différents phénomènes contribuant au processus d'élaboration en WAAM a pour objectif d'être intégré dans le jumeau numérique de notre système de fabrication.

3.1 Comportement cinématique du robot

Le point piloté du robot suit nécessairement une trajectoire \mathcal{C}^1 dans l'espace des tâches. Cela implique donc l'apparition d'une erreur de corde et/ou une diminution de la vitesse d'avance du point piloté par rapport à la trajectoire nominale décrite par des segments linéaires de continuité \mathcal{C}^0 . On se propose donc d'étudier l'influence des paramètres géométriques de la trajectoire et des

options de programmation associées sur le comportement cinématique du robot.

Lors de la programmation d'une trajectoire, à chaque point défini par le positionnement de la torche sont associés une vitesse d'avance programmée V_r et un paramètre τ de lissage de la trajectoire. Le paramètre de lissage τ peut varier de 0 à 100, définissant ainsi le compromis réalisé par le contrôleur du robot entre la diminution de vitesse et l'écart au contour. Plus ce paramètre est élevé, plus la trajectoire est lissée afin de conserver une vitesse proche de celle programmée au voisinage des points de changement de direction. Le comportement cinématique du robot est donc conditionné par ces deux paramètres ainsi que par l'angle α défini par les deux segments consécutifs de la trajectoire. Pour quantifier l'influence de ces paramètres, les deux grandeurs observées sont la vitesse minimum atteinte lors du franchissement du point de changement de direction et l'écart au contour ou distance minimale entre la trajectoire mesurée et ce point. Ces grandeurs permettent respectivement de caractériser la diminution de vitesse et l'importance du lissage de la trajectoire.

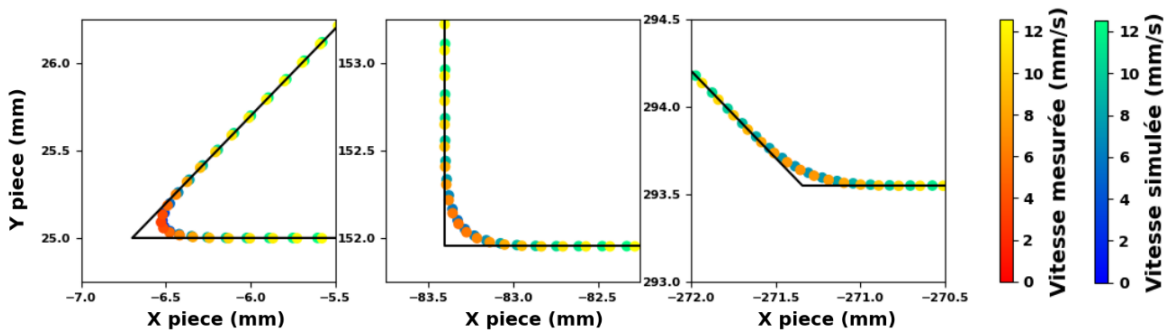


FIGURE 3.6 – Comparaison des trajectoires simulées et mesurées pour différents angles avec $V_r = 0,75$ m/min et $\tau = 50$

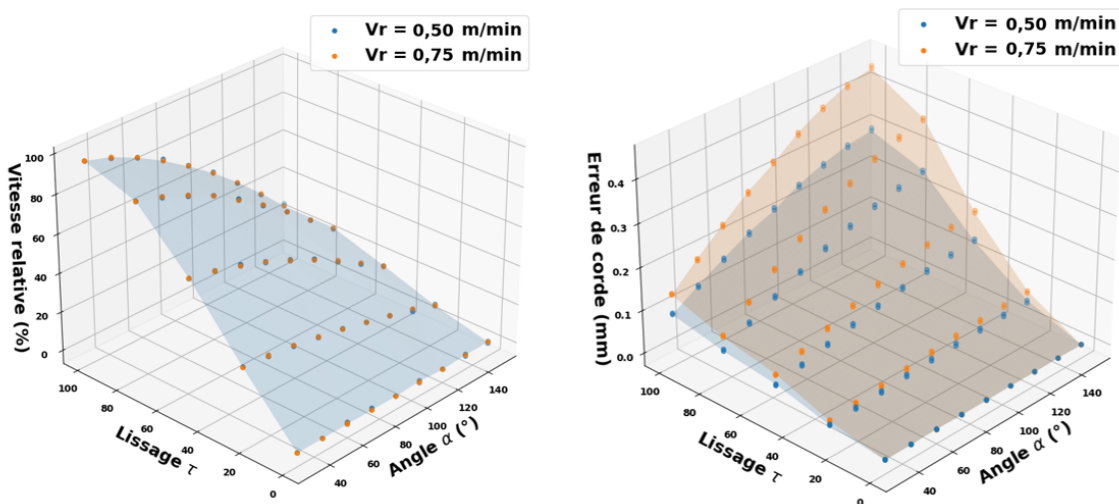


FIGURE 3.7 – Évolution de la vitesse minimale relative (à gauche) et écart au contour (à droite) en fonction des paramètres α et τ .

La figure 3.6 illustre, notamment, le comportement du robot au passage d'angles aigus, droits et obtus. Naturellement, plus l'angle de changement de direction est important, plus la diminution de vitesse est importante et plus l'écart au contour est important. La figure 3.7 illustre l'évolution de la vitesse minimale relative à la vitesse programmée et l'écart au contour en fonction de l'angle

α et du paramètre de lissage τ pour les vitesses V_r de 0,75 et 0,50 m/min.

Pour pouvoir anticiper la contribution du comportement cinématique du robot sur l'accumulation de matière rencontrée lors du passage de points de changement de direction, il est envisageable de simuler le parcours des trajectoires par le robot dans l'espace des tâches en utilisant un modèle d'interpolation à accélération ou à jerk limité ([63], [64]) ou un modèle à partir de filtres à réponse impulsionnelle finie (FIR) [65] pour connaître l'évolution de la vitesse effective de la torche. L'approche à base de filtre FIR a été retenue pour modéliser le comportement de notre robot. En effet, les premières observations du comportement du robot ont montré que toutes les durées de transition étaient identiques quelles que soient les trajectoires et les vitesses mises en œuvre. Ce phénomène est implicitement reproduit par l'approche à base de filtre FIR, mais il est difficile d'en rendre compte avec un modèle à jerk limité puisque cela demande d'adapter le profil de jerk en fonction de la trajectoire et des vitesses mises en œuvre.

Un filtre à réponse impulsionnelle finie du premier ordre est défini dans le domaine de Laplace par la fonction de transfert suivante :

$$M_i(s) = \frac{1}{T_i} \frac{1 - e^{sT_i}}{s}, i = 1 \dots N \quad (3.1)$$

où T_i est la constante de temps du $i^{\text{ème}}$ filtre FIR. Ainsi un filtre FIR est la combinaison d'un intégrateur ($1/s$) et d'un retard (e^{sT_i}) et réalise ainsi un filtre à moyenne flottante. La réponse impulsionnelle est évaluée par la transformée de Laplace inverse :

$$m(t) = L^{-1}(M_i(s)) = \frac{u(t) - u(t - T_i)}{T_i}, \text{ avec } u = \begin{cases} 1, & t \geq 0, \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

et devient un simple créneau d'une durée T_i et d'amplitude $1/T_i$. Cela implique que l'aire sous le créneau est unitaire, ainsi lorsqu'un signal est convolué avec un filtre FIR l'aire sous le signal d'origine reste la même. De plus, puisque le filtre a un intégrateur simple, il augmente le degré du signal filtré ; cette propriété est utilisée pour générer des trajectoires d'ordre élevé.

Considérons une trajectoire constituée de deux segments : une translation selon l'axe X puis une translation selon l'axe Y. Les deux segments sont de longueurs identiques et programmés pour être parcourus à la même vitesse. Cette trajectoire peut être vue comme un enchaînement de consignes de vitesse en créneau, chacune de durée T_A comme illustré Figure 3.8. Filtrer ce créneau avec un filtre FIR génère un profil de vitesse trapézoïdal. Ensuite un second filtrage par un filtre FIR de ce profil de vitesse trapézoïdal génère un profil d'accélération trapézoïdal. Enfin, le profil de déplacement \underline{Q} est obtenu en intégrant le profil de vitesse \underline{V} . Cependant, compte tenu des propriétés de l'intégration et de l'opération de convolution, le calcul du profil de déplacement (i.e. la trajectoire) peut se faire indifféremment avant ou après le filtrage par convolution [66].

Dans notre cas l'interpolation de la trajectoire programmée est réalisée avec deux filtres FIR en cascade dont les paramètres sont notés T_1 et T_2 . Ainsi la trajectoire interpolée s'exprime :

$$\underline{Q}_{\text{interp}} = m_2(t) * m_1(t) * \underline{Q}_{\text{CAO}}(t) = m_2(t) * m_1(t) * \int_{t_0}^t \underline{V}_{\text{CAO}}(u) du \quad (3.3)$$

où il convient de réaliser les convolutions successives sur les trois projections de la trajectoire programmée sur les axes du repère considéré. Les durées des filtres T_1 et T_2 sont identifiées en

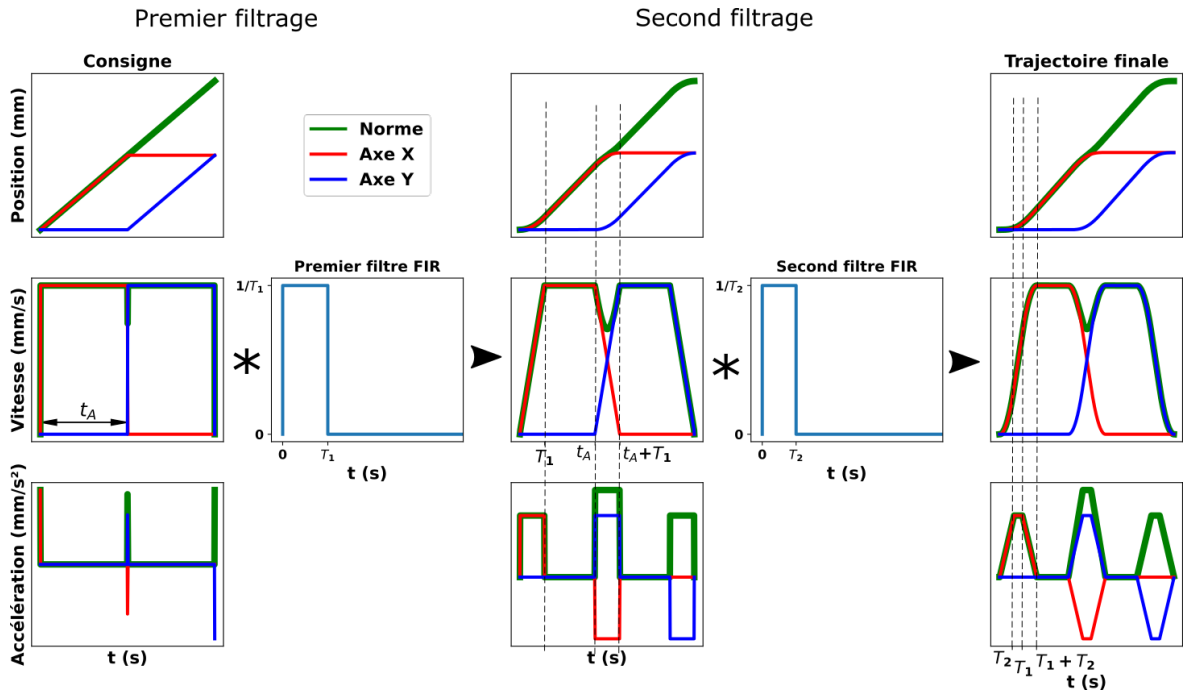


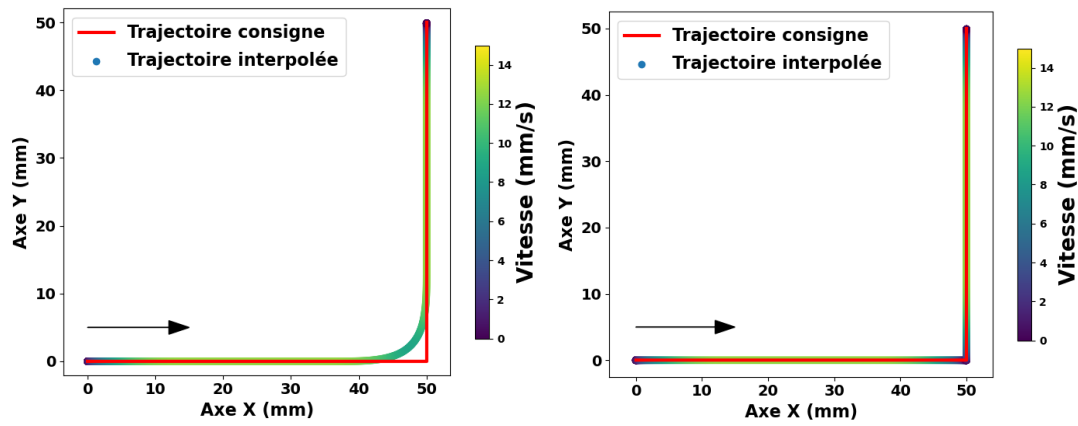
FIGURE 3.8 – Méthode de génération de profil cinématique par filtrage FIR [66]

comparant l'interpolation obtenue avec des données expérimentales pour des trajectoires planes comportant différents angles de changement de direction et mettant en œuvre un paramètre de lissage τ de 100. Ces durées sont respectivement de 132 ms et 84 ms. Sur les plages de vitesse étudiées ici, la vitesse d'avance programmée n'a pas d'influence sur les durées des filtres à mettre en œuvre pour interpoler la trajectoire nominale tel que le fait le contrôleur via cette cascade de filtres FIR.

Le paramètre de lissage τ définit le compromis réalisé par le contrôleur du robot entre la diminution de vitesse et l'erreur de corde. Lorsqu'il est fixé à 0, le point piloté du robot suit la trajectoire point à point pour laquelle la vitesse est nulle lors du passage d'un point de la trajectoire. Pour rendre compte de ce phénomène, il est indispensable d'injecter un temps de pause T_D après chaque consigne de vitesse lors de l'interpolation temporelle de la trajectoire nominale à chaque point. La durée de cette pause doit être égale à la somme des temps caractéristiques de chaque filtre mis en œuvre pour que l'interpolation passe par le point nominal de la trajectoire, soit 216 ms pour un paramètre τ nul. La figure 3.9 illustre les profils de consigne et les trajectoires interpolées associées pour un temps de pause nul ($\tau = 100$) et un temps de pause permettant de parcourir la trajectoire point à point ($\tau = 0$).

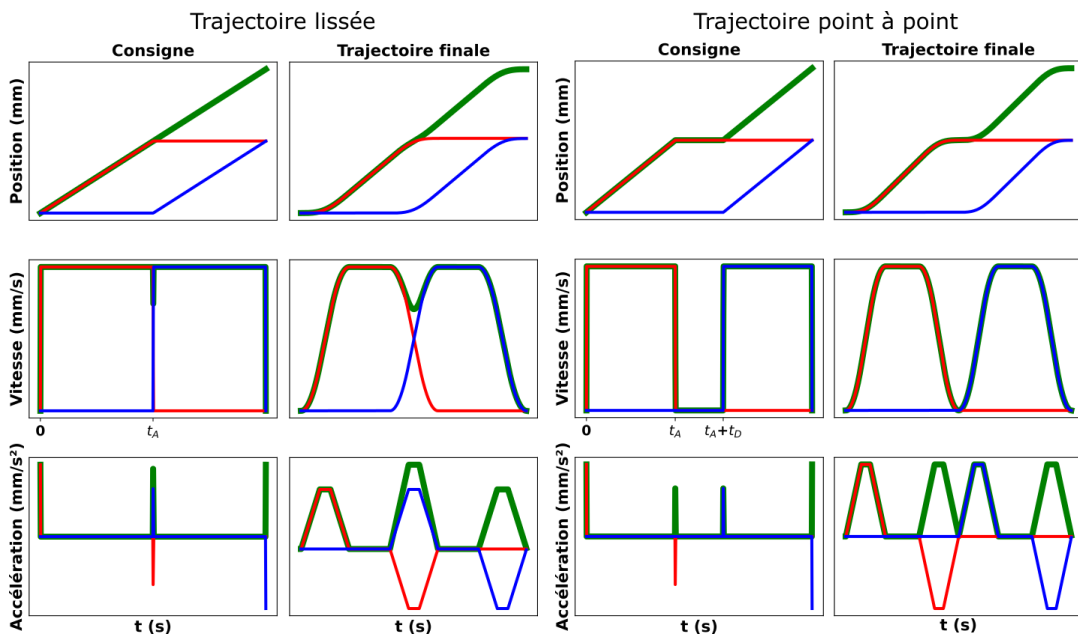
Pour les valeurs de lissage intermédiaires le délai de pause est à adapter. Il est identifié expérimentalement sur le même type de trajectoire avec des paramètres τ de 25, 50 et 75. On constate que l'évolution du délai de pause pour obtenir une interpolation de la trajectoire nominale au plus proche de la trajectoire décrite par le point piloté du robot n'est pas linéaire. Pour la suite, dans le contexte de l'interpolation d'une trajectoire mettant en œuvre un paramètre τ d'une valeur quelconque, la durée du délai à injecter à chaque point de passage de la trajectoire sera identifiée à partir de l'interpolation linéaire de ces points expérimentaux.

La figure 3.6 illustre la comparaison entre une trajectoire mesurée et une trajectoire simulée à l'aide d'un modèle à base de filtres à réponse impulsionnelle finie pour différents angles. Une fois les paramètres du modèle correctement identifiés, on constate que les positions successives de la trajectoire simulée sont très similaires aux positions de la trajectoire mesurée. Comme le montre



(a) Trajectoire interpolée avec paramètre de lissage $\tau = 100$ (pas de temps de pause)

(b) Trajectoire interpolée avec un paramètre de lissage $\tau = 0$ (point à point)



(c) Consigne et interpolation associée de la trajectoire avec $\tau = 100$

(d) Consigne et interpolation associée de la trajectoire point à point

FIGURE 3.9 – Influence du paramètre τ sur l’interpolation de la trajectoire et son comportement cinématique

la figure 3.10, la vitesse le long de la trajectoire simulée est quasiment identique à celle le long de la trajectoire mesurée.

En résumé, l’observation des trajectoires parcourues par le point piloté du robot en mettant en œuvre différents jeux de paramètres cinématiques a permis d’identifier expérimentalement la stratégie d’interpolation mise en œuvre au sein même du contrôleur et de quantifier les paramètres d’interpolation associés en fonction des paramètres cinématiques. Cette interpolation de trajectoire à l’aide de filtre FIR en cascade fait office de modèle cinématique de notre robot et nous permet d’anticiper l’évolution de la vitesse et de la position du point piloté lors de la mise en œuvre de trajectoires de fabrication. Cela permet en partie de mieux maîtriser la position et la quantité de matière apportée sur la pièce à fabriquer.

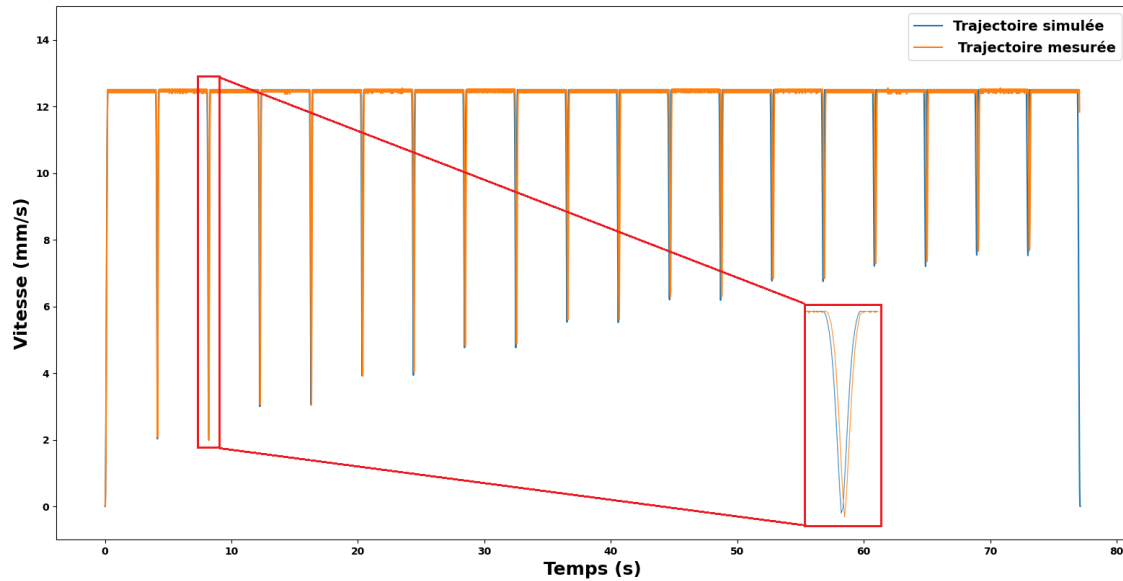


FIGURE 3.10 – Évolution de la vitesse d’avance en fonction du temps le long des trajectoires simulée et mesurée

3.2 Trajectoire perçue

Comme évoqué précédemment, la matière ne se répartit pas symétriquement de part et d’autre de la trajectoire de la torche mais a plutôt tendance à s’accumuler sur la corde du virage. Mesurer les dimensions de chaque section du cordon perpendiculaire à la trajectoire mesurée n’a plus de sens au voisinage proche du point de changement de direction, c’est pourquoi le concept de trajectoire perçue par le cordon est introduit ici. En effet, lors du dépôt de matière, la torche traîne derrière elle le bain liquide qui se solidifie au fur et à mesure fabriquant ainsi le cordon. En ligne droite, les trajectoires de la torche et du bain liquide se superposent, mais lors d’un virage la trajectoire du bain liquide coupe le virage et ne se superpose plus à la trajectoire de la torche. Nous proposons donc un modèle pour décrire ce phénomène.

L’allure du cordon et la répartition de la matière par rapport à la trajectoire décrite par le point piloté de la torche laissent à penser que le bain liquide représenté par le point M , générateur de la géométrie du cordon à sa solidification, suit le point piloté M_0 et décrit donc une trajectoire de poursuite. Cela se traduit par le fait que la tangente à la trajectoire suiveuse au point M est toujours orientée vers le point suivi M_0 comme l’illustre la figure 3.11. Ainsi, si l’on considère que la distance entre les points M et M_0 est constante et paramétrée par l , on a la relation :

$$\overrightarrow{OM}(s) + l \cdot \frac{d\overrightarrow{OM}(s)}{ds} = \overrightarrow{OM_0}(s) \quad (3.4)$$

où s représente l’abscisse curviligne de la trajectoire.

L’unicité de la solution à l’équation précédente est donnée par la valeur de la distance de poursuite l . On constate que ce type de trajectoire permet de décrire le caractère asymétrique de la géométrie du cordon déposé malgré la symétrie de la trajectoire décrite par le point piloté du robot (figure 3.12).

La longueur de poursuite caractéristique de la géométrie d’un cordon au voisinage d’un point de changement de direction est définie comme celle générant la trajectoire la plus proche de la

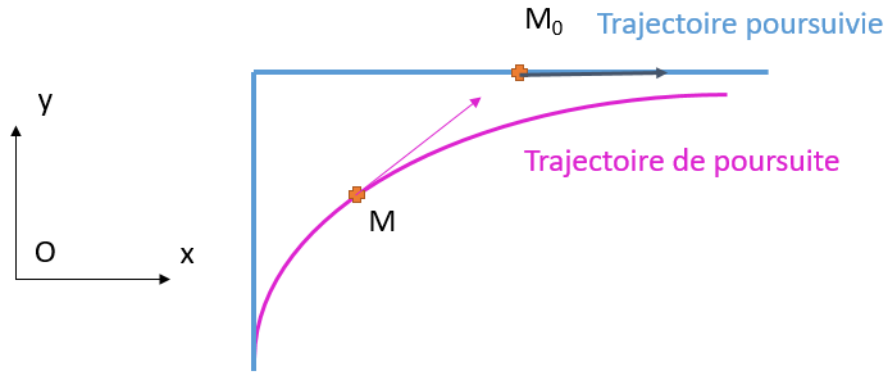


FIGURE 3.11 – Schéma de définition de la trajectoire de poursuite

ligne de crête du cordon. Rigoureusement, la ligne de crête est définie comme le lieu des points où le gradient d'altitude du cordon s'inverse selon l'une de ses 2 directions principales de courbure. Néanmoins, ici, les points appartenant à la ligne de crête P_{criste} sont définis comme ceux où la norme du gradient s'annule. Le gradient d'altitude est tout d'abord calculé à partir de l'interpolation du nuage de points du cordon sur une grille régulière. La longueur de poursuite est identifiée comme étant celle associée à la trajectoire $P_{\text{poursuite}}$ dont les points minimisent la fonction objectif suivante :

$$\min_L \sum_i \|P_{\text{criste}}[i] - P_{\text{poursuite}}(L)\|^2 \quad (3.5)$$

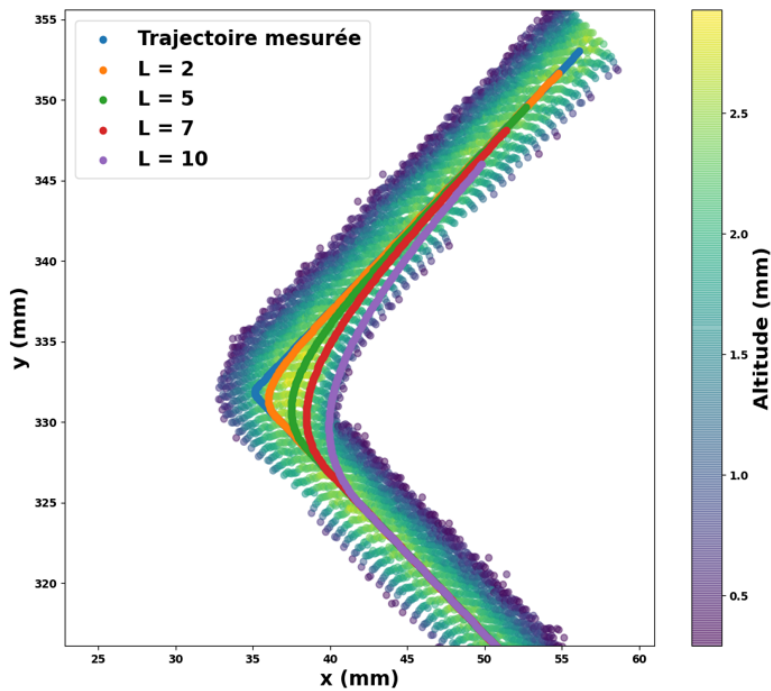


FIGURE 3.12 – Trajectoires de poursuite à la trajectoire mesurée pour différentes longueurs de poursuite

La figure 3.13 illustre la trajectoire de poursuite calculée pour la longueur de poursuite optimale passant donc au plus près des points de la ligne de crête. La géométrie du cordon est représentée ici par ses lignes d'iso-altitude et on constate que la trajectoire de poursuite intersecte les

boucles fermées d'iso-altitudes de manière quasi normale et suit plutôt bien la ligne de crête du cordon. On constate qu'en aval du changement de direction, la géométrie du cordon présente une striction à la suite de l'accumulation. Cette striction est aussi visible sur l'évolution de la hauteur le long de la trajectoire de poursuite. Cette striction semble être due à un retrait causé par l'effet masselotte dans le virage. La figure 3.14 illustre l'évolution de la hauteur du cordon le long de la trajectoire de poursuite identifiée pour des angles α de 45° , 90° et 135° . Pour le virage le plus serré ($\alpha = 135^\circ$) l'élévation de hauteur suivie de sa diminution due à la striction est la plus importante, que ce soit en termes d'altitude maximum puis minimum atteintes mais aussi en termes de longueur de la zone où le phénomène est observé le long de l'abscisse curviligne de la trajectoire de poursuite. Pour l'angle le moins serré ($\alpha = 45^\circ$) le phénomène est très ténu et quasiment indiscernable ici, puisqu'aucune variation de hauteur significative n'est observée. Le virage à angle droit ($\alpha = 90^\circ$) montre une élévation de la hauteur suivie d'une diminution comme dans le cas du virage à 135° , mais de manière moins marquée.

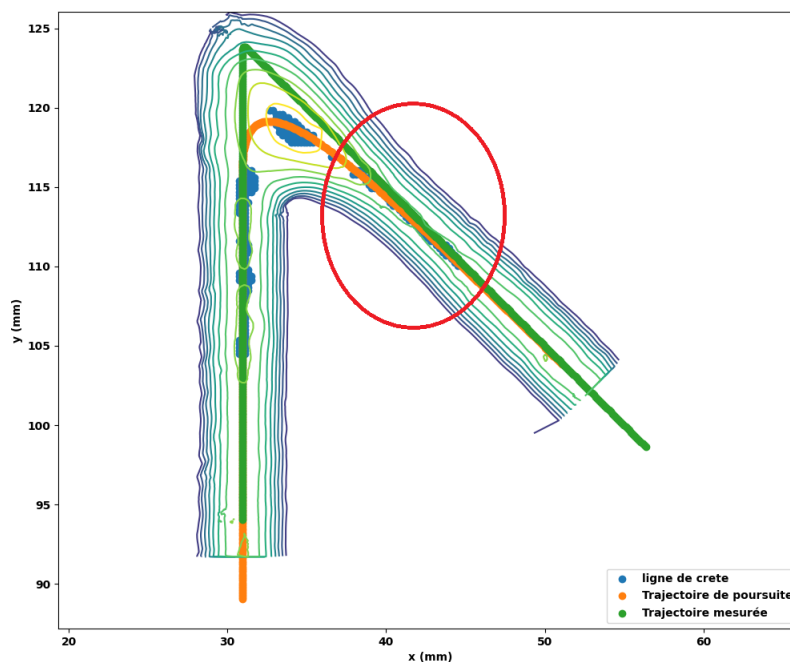


FIGURE 3.13 – Trajectoire de poursuite calculée pour la longueur optimale identifiée pour un virage de 135° - zone de striction identifiée en rouge

Cependant, même si la trajectoire de poursuite permet de mieux rendre compte de la position du cordon, elle ne permet pas de modéliser la géométrie des cordons autour des points de changement de direction par extrusion d'une section de manière satisfaisante comme l'illustre la figure 3.15. En effet on constate que l'extrusion d'une section constante génère un repli au niveau de la corde du cordon et ne permet pas de remplir l'extérieur du cordon. L'apparition de ce repli est due au fait que le rayon de courbure de la trajectoire de poursuite est inférieur à la demi-largeur de la section, aussi extruder une section dont les dimensions augmenteraient au niveau du virage pour mieux rendre compte de la géométrie du cordon à l'extérieur du virage amplifierait ce repli. Il semble donc nécessaire d'observer et de mieux comprendre comment la matière se comporte lorsqu'elle est déposée au passage de points de changement de direction si l'on souhaite développer un modèle de prédiction de la géométrie des cordons dans ces zones. C'est pourquoi une seconde campagne expérimentale instrumentée est réalisée.

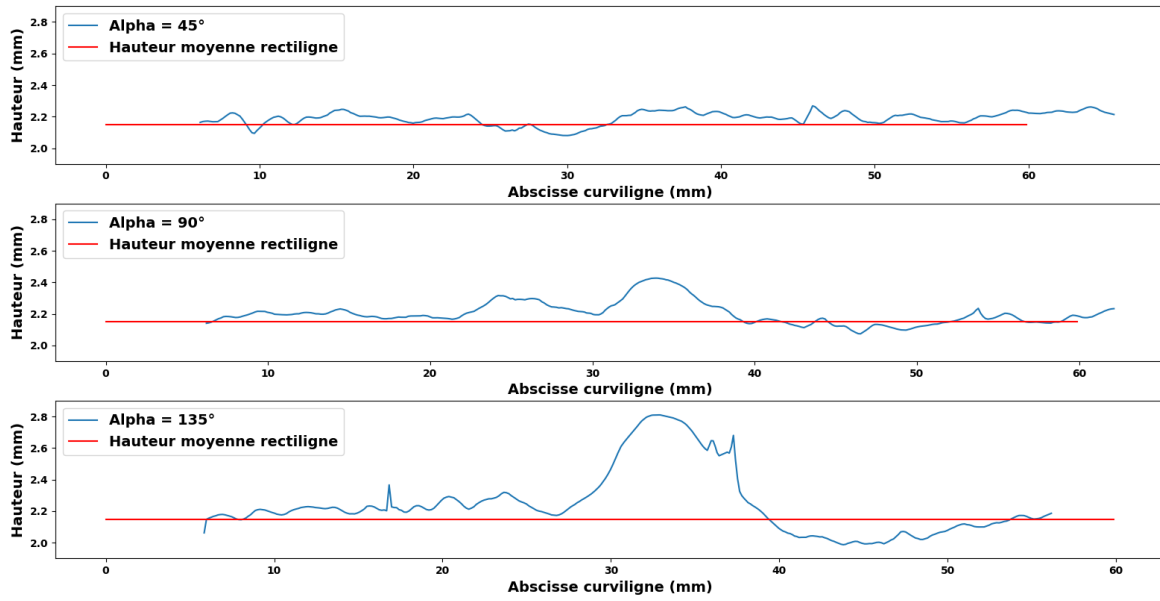


FIGURE 3.14 – Évolution de la hauteur le long de la trajectoire de poursuite par rapport à la hauteur moyenne mesurée sur les parties rectilignes (en rouge)

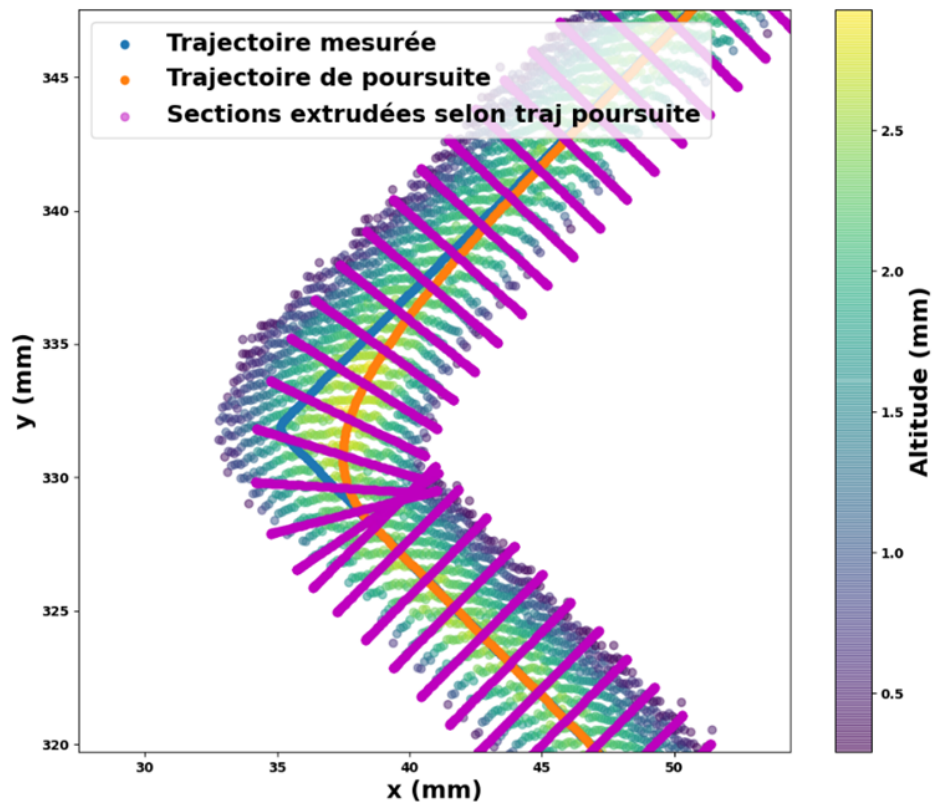
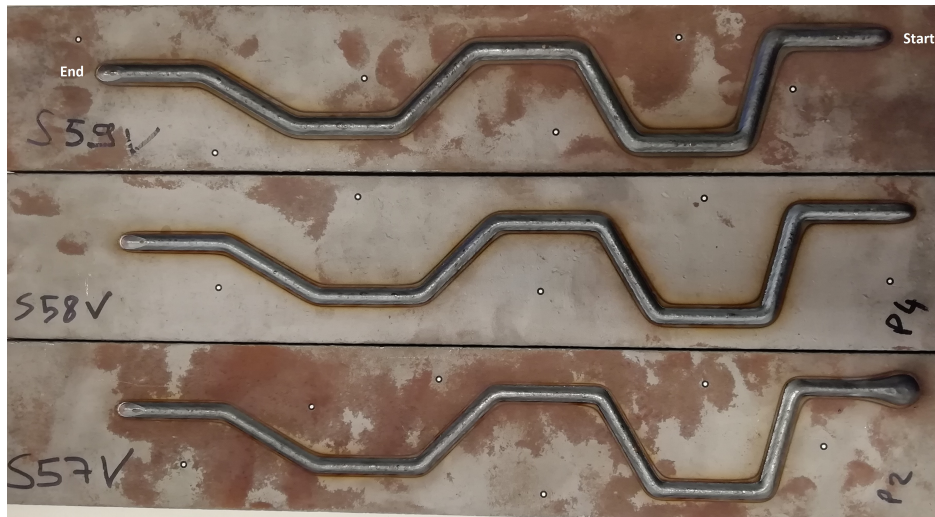


FIGURE 3.15 – Sections extrudées selon la trajectoire de poursuite à la torche

4 Campagne expérimentale complémentaire



(a) Angles α obtus



(b) Angles α aigus

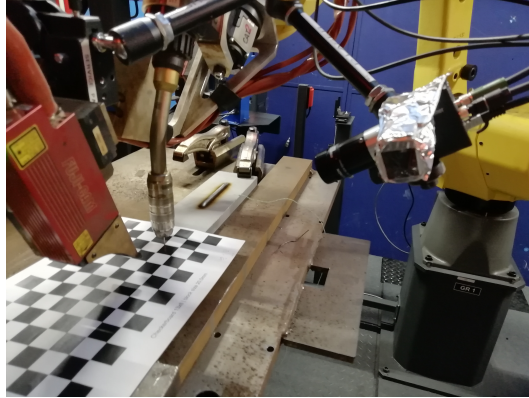
FIGURE 3.16 – Cordons fabriqués avec des angles variant entre 30° et 150° avec un pas de 15°

Une seconde série d'essais a été réalisée afin de mettre en œuvre des angles α entre deux segments consécutifs variant de 30° à 150° pour une vitesse fil V_f de $8,0$ m/min, des vitesses d'avance du robot de $0,50$ et $0,75$ m/min et des paramètres de lissage de 50 et 100 . Les trajectoires employées sont des polygones permettant de mettre en œuvre successivement plusieurs angles de changement de direction au cours du même essai. Chaque segment de ces polygones mesure au minimum 50 mm, ce qui permet au cordon de se stabiliser entre deux virages consécutifs. Au total trois configurations de paramètres procédé sont employées :

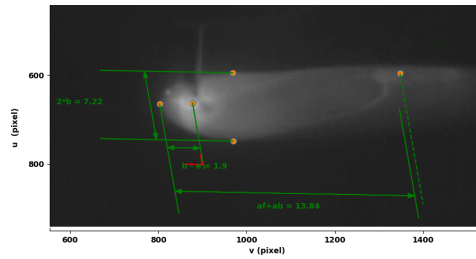
- S57 : $V_f = 8,0$ m/min, $V_r = 0,75$ m/min, $\tau = 50$
- S58 : $V_f = 8,0$ m/min, $V_r = 0,75$ m/min, $\tau = 100$
- S59 : $V_f = 8,0$ m/min, $V_r = 0,50$ m/min, $\tau = 100$

Il est à noter que par souci de place disponible sur les substrats, chaque essai est réalisé en deux temps avec les virages à angles α obtus sur le recto du substrat et les angles α aigus sur son verso. Les cordons ainsi fabriqués sont illustrés figure 3.16.

Là aussi, les évolutions de la tension, de l'intensité et de la vitesse d'apport en fil ainsi que la position de la torche au cours de la fabrication ont été relevées. Le bain liquide a été observé en cours de fabrication à l'aide d'une caméra montée sur la torche et protégée par un verre polarisé permettant de filtrer une grande partie de la lumière issue de l'arc électrique comme l'illustre la figure 3.17a. La figure 3.17b illustre le type d'image ainsi obtenue.



(a) Caméra permettant de filmer le bain liquide



(b) Image du bain liquide en cours de fabrication

FIGURE 3.17 – Montage expérimental de la caméra et image obtenue

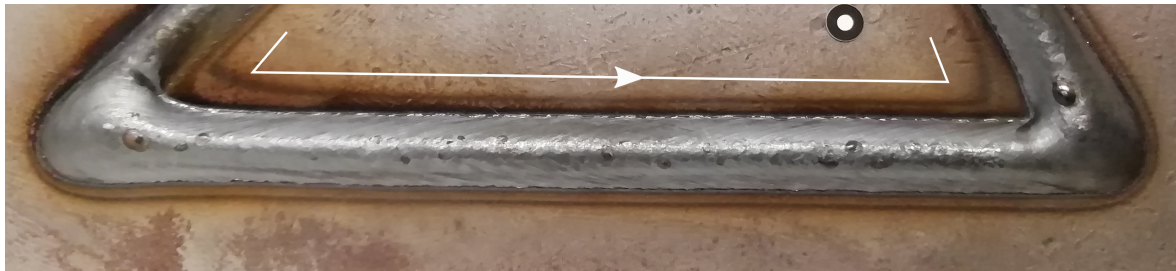
4.1 Observations du cordon en cours de fabrication

Les images issues de la caméra permettent d'observer le comportement du bain liquide au cours de la fabrication et en particulier au voisinage des points de changement de direction de la trajectoire. Les observations rapportées dans cette partie reposent à la fois sur l'analyse des cordons fabriqués ainsi que sur les films des bains liquides en cours de fabrication associés. Dans un premier temps, les observations se concentrent sur les parties rectilignes des cordons fabriqués puis les différents changements de direction sont abordés.

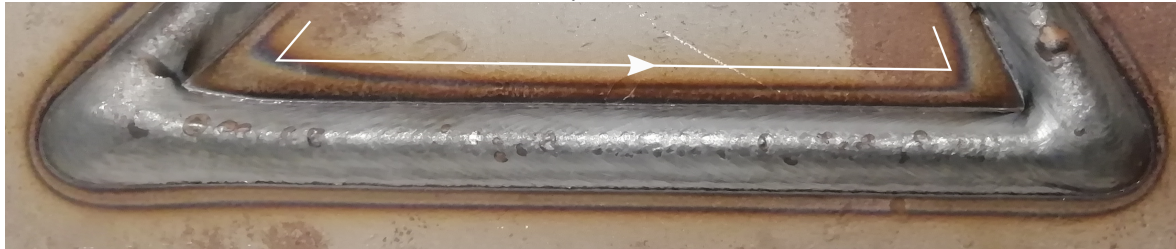
4.1.1 Parties rectilignes

Les trajectoires mises en œuvre dans le cadre de l'étude de la géométrie des cordons autour des points de changement de direction contiennent plusieurs portions rectilignes. Les premières observations vont donc se concentrer sur cette situation qui est la plus élémentaire. La figure 3.18 illustre des portions rectilignes des cordons S58 et S59. Le cordon S57 n'est pas explicitement illustré dans ce cas car le lissage τ n'influe pas dans les lignes droites. Les cordons fabriqués sont globalement homogènes et réguliers, néanmoins dans un cas comme dans l'autre on constate deux types d'irrégularités :

- Des îlots de silicates : les taches de couleur ocre présentes de manière disparate au sommet des cordons sont des accumulations d'oxyde de silicium. Le silicium est initialement présent dans l'alliage pour améliorer sa soudabilité (bonne fluidité du fer fondu, meilleur étalement et meilleure morphologie de cordon). Leur présence n'affecte pas la qualité des cordons fabriqués en termes de micro-structure et de caractéristiques mécaniques, mais, étant isolant, peut venir perturber l'arc électrique lors du dépôt de la couche suivante en particulier au niveau de l'amorçage de l'arc.
- Des stries : on constate dans les deux cas la présence d'aspérités régulières tout le long de la surface des cordons qui lui donnent ainsi une certaine rugosité. Ces stries sont inclinées de haut en bas dans la direction d'avance de la torche et permettent d'identifier directement le sens de dépose du cordon. L'observation du bain liquide en cours de formation laisse à penser que ces stries, issues de la solidification du bain liquide au fur et à mesure de la fabrication, sont dues aux légers mouvements à la surface du fluide induits, entre autres, par



(a) Cordon rectiligne S58 : $V_f = 8,0$ m/min, $V_r = 0,75$ m/min



(b) Cordon rectiligne S59 : $V_f = 8,0$ m/min, $V_r = 0,50$ m/min

FIGURE 3.18 – Portions rectilignes des cordons fabriqués

le flux de gaz d'inertage.

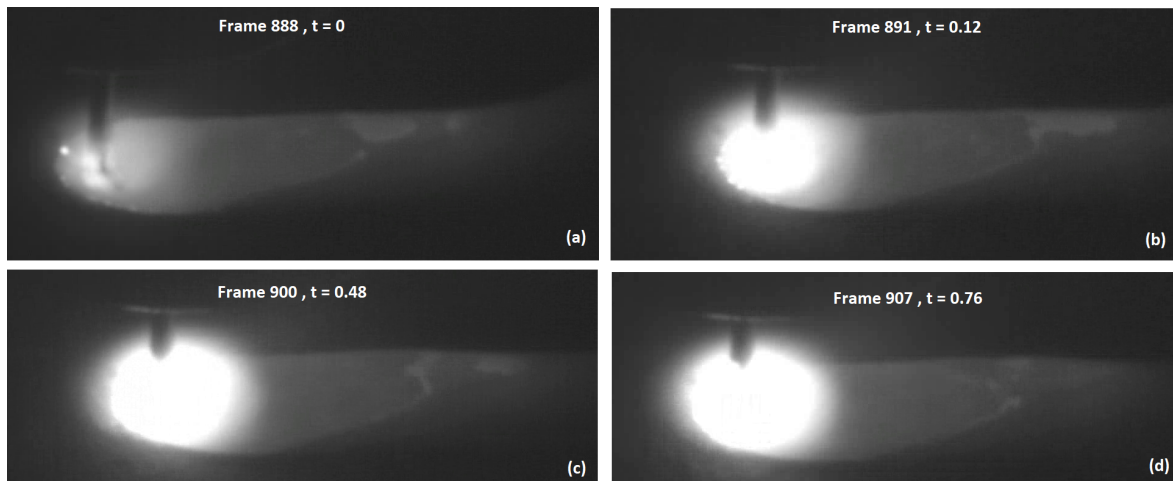
L'observation du bain liquide en cours de formation montre aussi le processus d'apparition des taches de silicates à l'état liquide au niveau de la queue du bain et leur détachement comme l'illustre la figure 3.19. La répartition des tâches de silicate semble assez aléatoire le long du cordon néanmoins on constate une plus forte occurrence de la présence de ces taches en aval des angles α obtus.

4.1.2 Voisinage des points de changement de direction

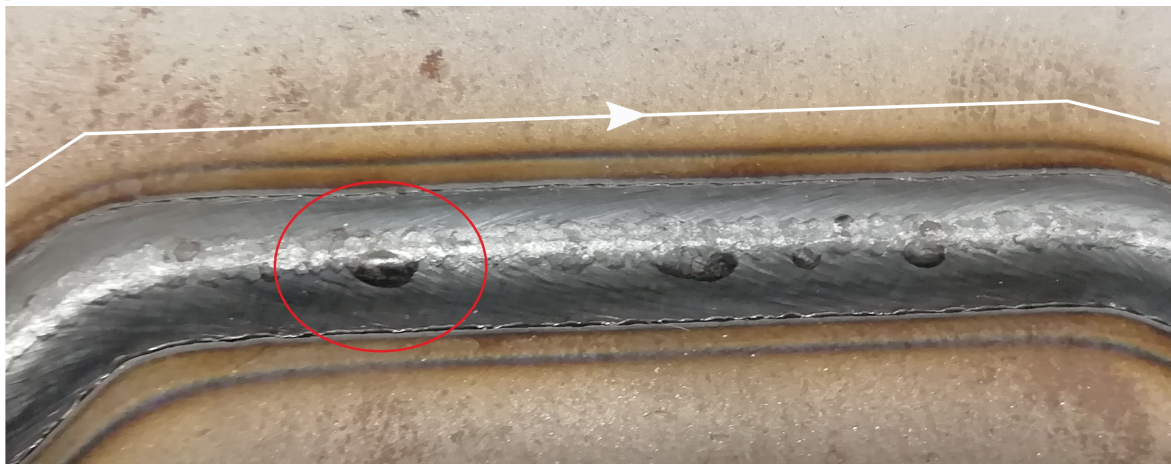
Le comportement du bain liquide et la formation du cordon associé lors du passage d'un point de changement de direction de la trajectoire se décompose en trois étapes distinctes :

- En amont du point de changement de direction : la longueur de chaque segment de la trajectoire est suffisamment grande pour que le bain liquide soit stabilisé, cette première étape s'apparente donc au cas rectiligne.
- Le passage du point : dès lors que le point piloté de la torche passe le point de changement de direction, la variation de la vitesse d'avance et de la direction d'avance entraînent une déformation plus ou moins marquée de la forme du bain selon la valeur de l'angle. Le bain peut prendre une forme triangulaire pour les angles α les plus obtus.
- En aval du point de changement de direction : quelle que soit la valeur de l'angle de changement de direction, le point piloté de la torche reprend très rapidement une trajectoire rectiligne uniforme en aval du changement de direction, cependant le bain met plus ou moins de temps à reprendre son allure « rectiligne ».

L'animation figure 3.20 illustre le ralenti du passage d'un angle de 120° et permet d'illustrer concrètement les trois principales étapes du passage d'un point de changement de direction. On retrouve ces trois étapes pour tout point de changement de direction et ce quelle que soit la valeur de l'angle, néanmoins la déformation du bain et la phase de retour au régime rectiligne est d'autant plus importante que l'angle α est obtus. L'observation des cordons solidifiés a posteriori de la fabrication semble mettre évidence trois comportements différents du bain liquide :



(a) Détachement d'une tache de silicate lors de la fabrication du cordon S58 : (a) accumulation significative de silicate en queue de bain, (b) et (c) détachement progressif de la tache de silicate, (d) la tache s'est détachée, le bain ne présente plus d'accumulation



(b) Tache de silicate observée sur le cordon (en rouge)

FIGURE 3.19 – Processus de détachement des taches de silicate

FIGURE 3.20 – Animation de la fabrication du cordon S57 virage à 120° à droite (vitesse x0,5)

- Recouvrement solide : la matière est déposée sur une partie du cordon déjà solidifiée
- Recouvrement liquide : la matière est déposée sur une partie du cordon encore liquide et semble se mélanger avec elle
- Sans recouvrement

4.1.3 Recouvrement solide (135° à 150°)



(a) Cordon solidifié

(b) Cordon en cours de fabrication à vitesse réelle

FIGURE 3.21 – Cordon S57 virages à 150° à gauche puis à droite

Pour des angles α très obtus, on remarque l'apparition de marques de silicates caractéristiques (dépôt de silicate que l'on ne voit pas spécialement sur les films contrairement à certaines taches), cela donne l'impression que la partie aval du cordon est posée sur le segment amont et ne forme pas tout à fait un seul et même cordon continu comme l'illustre la figure 3.21a. Il semblerait que cette marque de silicate apparaisse lorsque la matière est déposée sur la partie amont du cordon déjà solidifiée. Cette trace est ainsi révélatrice de la jonction de la partie aval sur la partie amont.

La figure 3.21b montre l'évolution de la forme du bain liquide du cordon S57 pour le passage d'un angle de 150°. On constate que le bain liquide se déforme fortement jusqu'à adopter une

forme triangulaire pendant un bref instant au niveau de la zone où l'accumulation est la plus importante le long du cordon. Aussi l'accumulation de matière au niveau du passage du coin apparaît plus claire et plus longtemps sur les images, ce qui indique que la matière reste liquide plus longtemps que par exemple sur les segments rectilignes. On remarque que le cordon refroidit d'abord à l'extrémité au niveau du point de changement de direction, puis le bain coupe le virage. Le refroidissement de cette accumulation est aussi plus long et fait effet de masselotte dans le coin du virage. En effet, on peut apercevoir une striction de la section du cordon en aval du virage. Cette striction est d'autant plus importante que l'angle α de la trajectoire est obtus.

Enfin, il est intéressant de noter l'augmentation significative de la zone affectée thermiquement (ZAT) en aval du virage de part et d'autre du cordon et tout particulièrement au niveau de la corde du virage.

4.1.4 Recouvrement liquide (90° à 120°)

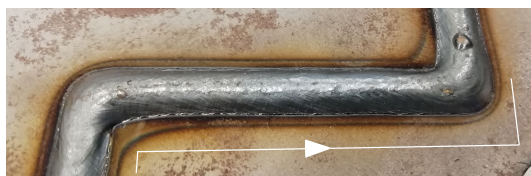
Pour ce qui est des angles α obtus compris entre 90° et 120°, on ne constate pas l'apparition de marques de silicate sur le cordon contrairement aux angles très obtus. Les figures 3.22a et 3.23a illustrent les cordons fabriqués avec des angles de 120° et 90° respectivement. Comme pour des angles très obtus, les films des bains (figures 3.22b et 3.23b) montrent que ceux-ci se déforment au passage d'un angle mais cependant dans une moindre mesure. Il semblerait qu'ici, lorsque le bain liquide repasse sur une zone déjà déposée, la matière n'est pas encore solidifiée. Le bain liquide se déforme alors, principalement sous l'effet de la tension superficielle, pour englober l'intégralité du fil fondu. Cela pousse donc le bain à « couper » le virage comme le montrent clairement les films.



(a) Cordon solidifié

(b) Cordon en cours de fabrication à vitesse réelle

FIGURE 3.22 – Cordon S57 virage à 120° à gauche puis à droite



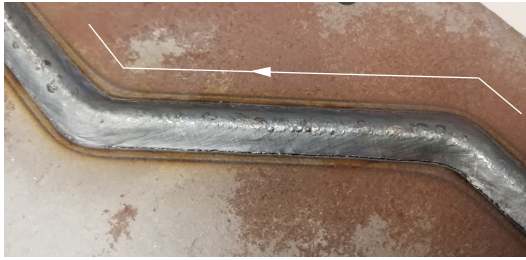
(a) Cordon solidifié

(b) Cordon en cours de fabrication à vitesse réelle

FIGURE 3.23 – Cordon S57 virage à 90° à droite puis à gauche

Ces situations d'angles α obtus génèrent aussi une accumulation de matière suivie d'une striction de la section du cordon, mais moins importante que pour les angles α très obtus. Là encore cette accumulation de matière joue le rôle de masselotte et génère ainsi un mouvement longitudinal de matière en refroidissant. Enfin, on constate que la taille de la ZAT est encore plus importante au niveau des virages, mais ici les couleurs prises par le substrat sont différentes.

4.1.5 Sans recouvrement (0° à 90°)



(a) Cordon solidifié

(b) Cordon en cours de fabrication à vitesse réelle

FIGURE 3.24 – Cordon S57 virage à 45° à gauche puis à droite

Le passage d'angles α aigus ne semble pas mettre en œuvre de situation de recouvrement manifeste comme l'illustre la figure 3.24. L'accumulation au niveau du virage ainsi que la striction de la section du cordon sont très peu marquées. La forme géométrique du bain liquide en cours de fabrication varie peu lors du passage du coin. Néanmoins, toujours à cause des effets de la tension superficielle, le bain liquide « coupe » le virage et le phénomène de poursuite est bel et bien observé.

Enfin, les limites de la ZAT de part et d'autre du cordon restent très proches des bords du cordon et celle-ci est moins colorée que pour des angles obtus observés précédemment.

4.1.6 Influence des paramètres de lissage τ et de vitesse d'avance V_r

Les cordons S58 et S59 mettent en œuvre des paramètres procédé différents ce qui nous permet de comparer les cordons fabriqués et les films des bains liquides associés et d'identifier l'influence des paramètres de lissage τ et de vitesse d'avance V_r sur le processus de formation du cordon.

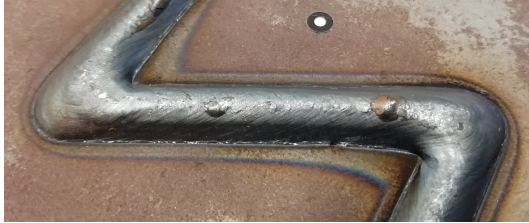


(a) Cordon solidifié

(b) Cordon en cours de fabrication à vitesse réelle

FIGURE 3.25 – Cordon S58 virage à 120° à droite

La figure 3.25 illustre la formation du cordon S58 pour un virage de 120° à droite. Par rapport au même virage sur le cordon S57 (figure 3.22a), seul le paramètre τ change ($\tau = 100$ et $\tau = 50$ respectivement), ainsi pour ce virage S58 la diminution de vitesse est beaucoup moins importante et donc l'accumulation de matière est moins marquée. Cependant cette différence sur le cordon final est ténue et durant la fabrication le comportement du bain liquide est globalement identique.



(a) Cordon solidifié

(b) Cordon en cours de fabrication à vitesse réelle

FIGURE 3.26 – Cordon S59 virage à 120° à droite

Le cordon S59 met en œuvre une vitesse d'avance de 0,5 m/min, la section du cordon fabriqué est donc plus grosse et plus bombée. Là aussi, globalement le comportement du bain liquide est similaire aux cas présentés précédemment même si les effets observés des passages de points de changement de direction sont plus importants ici en particulier la coloration de la ZAT.

4.2 Identification de la longueur de poursuite

Pour ces trois essais complémentaires, la longueur de poursuite pour laquelle la trajectoire de poursuite à la torche est la plus proche de la ligne de crête de chaque virage est calculée. La figure 3.27 illustre l'évolution de la longueur de poursuite en fonction de l'angle de changement de direction pour les différents essais. Même si on constate quelques variations sur des angles identiques (l'angle 150° par exemple où les longueurs de poursuite identifiées sont curieusement basses par rapport aux autres angles) et quelques longueurs vraisemblablement aberrantes, la tendance générale est que la longueur de poursuite diminue lorsque l'angle diminue. On constate aussi que les valeurs des longueurs de poursuite sont très similaires pour les trois jeux de paramètres mis en œuvre. Enfin, il semblerait que pour les angles α aigus, à partir de 75° la longueur de poursuite se stabilise aux environs de 4 mm.

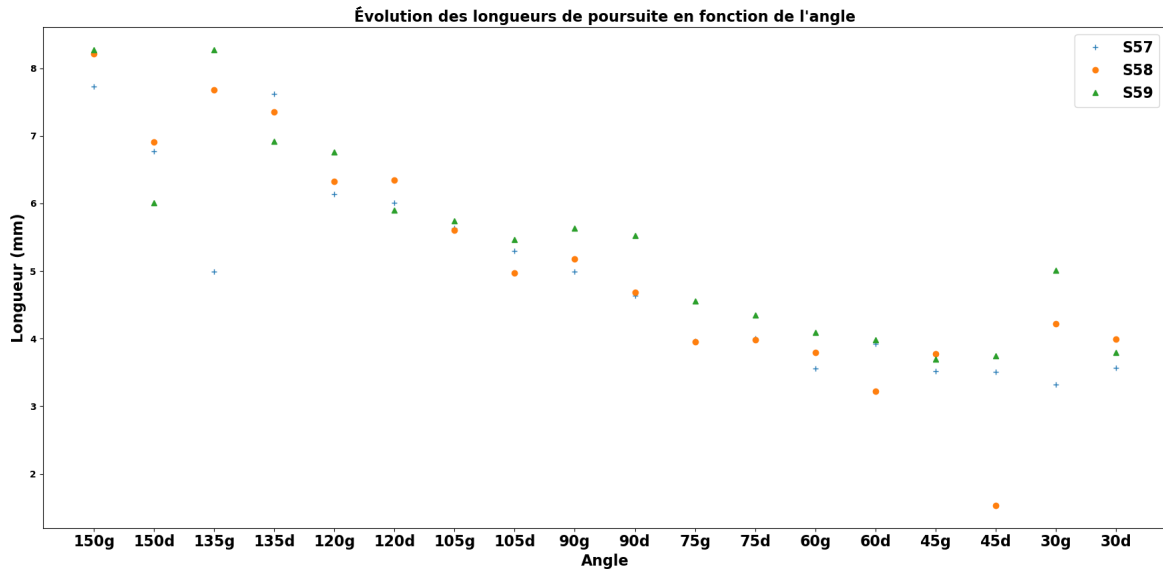


FIGURE 3.27 – Évolution de la longueur de poursuite

Les disparités constatées sur l'évaluation de la longueur de poursuite pourraient venir de la détermination des lignes de crête qui peut être remise en question. En effet, l'identification de la ligne de crête à partir de laquelle est calculée la longueur de poursuite pourrait être affinée.

4.3 Analyse du volume de matière déposée

Pour caractériser l'accumulation de matière observée en fonction de la situation mise en œuvre, il est proposé ici de quantifier le volume des accumulations et de le décomposer selon les sources supposées.

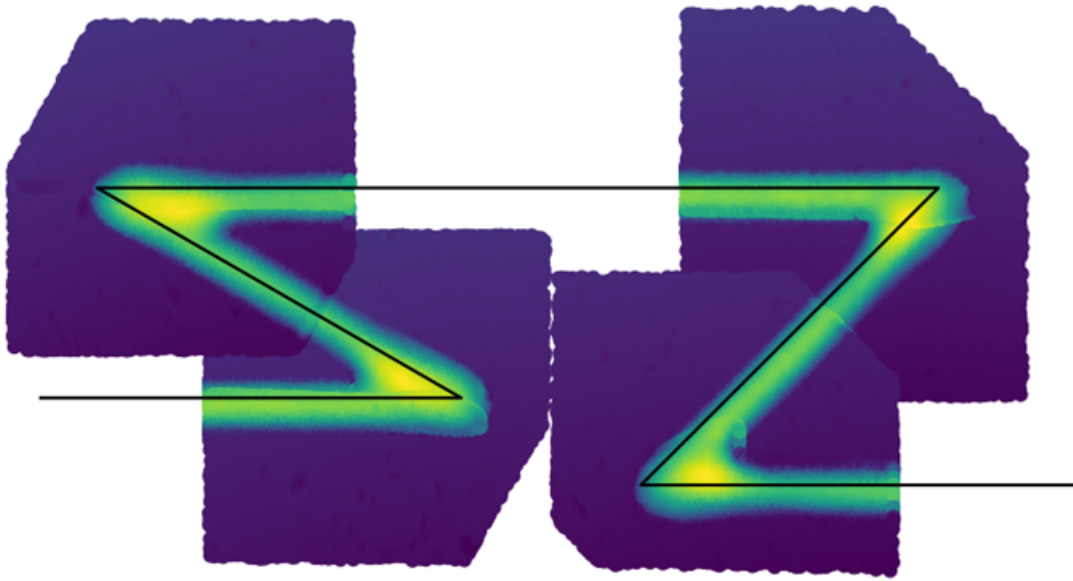
4.3.1 Méthode de traitement

Cette partie présente la méthode de traitement utilisée afin d'explicitier le processus permettant d'isoler les points du nuage global de chaque virage et d'obtenir des résultats. L'approche développée ici propose de balancer localement le nuage de points de chaque virage sur le substrat afin de s'affranchir des déformations du substrat liées aux forts gradients thermiques.

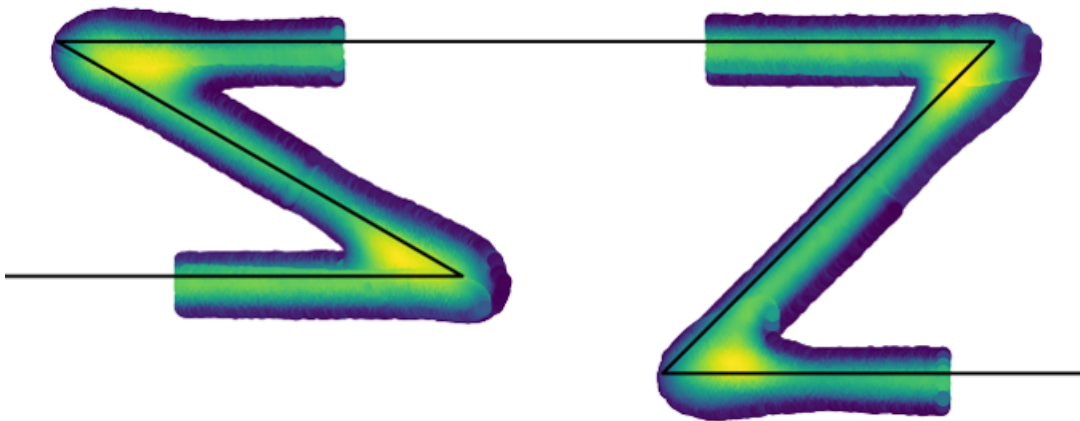
La première étape consiste à recalculer manuellement le nuage de points global du cordon déposé sur la trajectoire nominale. La transformation nécessaire est estimée visuellement aux millimètres et degrés près. Ensuite, pour chaque virage, les points du nuage au voisinage de chaque point de changement de direction sont isolés comme l'illustre la figure 3.28a.

L'étape suivante consiste à identifier localement le plan du substrat pour chaque virage. Puis il faut balancer le nuage de points de manière à ce que le plan du substrat corresponde au plan $Z = 0$ dans le nouveau repère, et filtrer ces points afin de ne garder que les points réputés comme appartenant au cordon comme l'illustre la figure 3.28b.

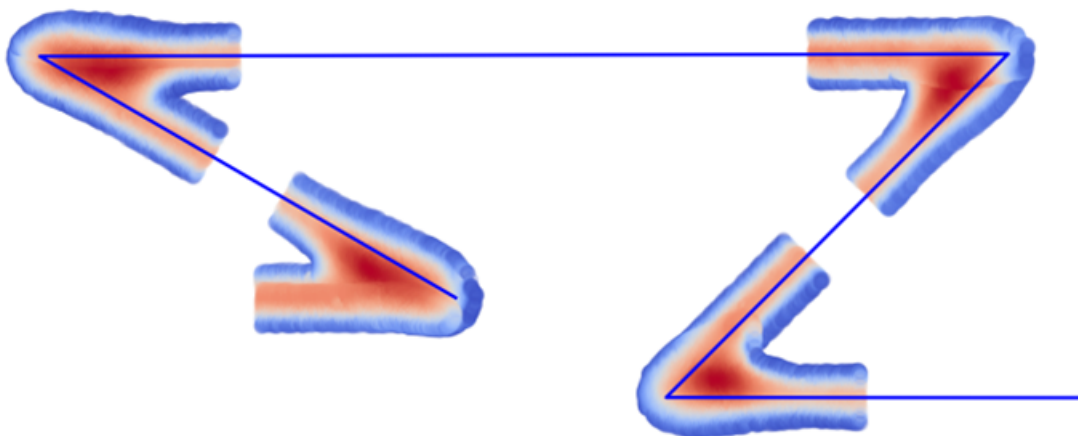
Pour recalculer plus précisément le nuage de points de chaque virage sur la trajectoire nominale, les milieux des portions rectilignes amont et aval du cordon sont identifiés et, en connaissant l'angle programmé entre les deux segments de trajectoire concernés, le nouveau point de changement de direction est identifié. En réalisant cette étape, les dimensions des portions du cordon en amont et en aval sont récupérées et moyennées et définissent les dimensions géométriques du cordon moyen. Enfin, la région d'intérêt du nuage de points recalculé et sa trajectoire mesurée associée sont isolées pour chaque virage et délimitées par les frontières fixées 20 mm en amont et 20



(a) Trajectoire nominale grossièrement recalée et isolement des points autour de chaque point de changement de direction de la trajectoire



(b) Balançage local et filtrage des nuages de points



(c) Recalage fin de la trajectoire nominale et sélection des points dans leurs ROI respectives

FIGURE 3.28 – Principales étapes du traitement du nuage de points

mm en aval du point de changement de direction comme l'illustre la figure 3.28c.

4.3.2 Évaluation du volume

L'objectif de cette analyse est de caractériser l'accumulation de matière constatée au passage de points de changement de direction. Pour cela, le volume du cordon est bien évidemment évalué, mais il est décomposé en différents volumes élémentaires, dont les définitions sont explicites, pour mettre en évidence les contributions des différents effets (géométrique, cinématique, corde, pertes).

Volume fil : il représente le volume de fil dévidé par la source lors de la fabrication. Il est calculé à partir du diamètre du fil utilisé et de la vitesse fil instantanée mesurée et s'exprime :

$$Vol_{\text{fil}} = \int_{t_{\text{amont}}}^{t_{\text{aval}}} V_f(t) \cdot \pi \cdot \left(\frac{\varnothing_{\text{fil}}}{2}\right)^2 dt \quad (3.6)$$

Ce volume constitue le volume de matière injecté et est nécessairement supérieur au volume mesuré et aux différents volumes théoriques équivalents. Il permet notamment de quantifier les pertes de matière liées aux projections et à la vaporisation.

Volume mesuré : c'est le volume de cordon déposé. Il s'exprime comme la somme du volume sous chaque maille du nuage de points du cordon dans la zone d'intérêt autour du point de changement de direction considéré. Ce volume rend compte de l'accumulation de matière déposée liée aux effets cinématiques et géométriques.

Volume extrudé selon la trajectoire nominale : ce volume est calculé en extrudant la section moyenne mesurée le long de la trajectoire nominale. Pour chaque virage et quels que soient les paramètres cinématiques mis en œuvre, la longueur de trajectoire nominale est la même et est fixée à 40 mm (20 mm en amont et 20 mm en aval). Puisque la section moyenne du cordon est la même pour tous les virages, identifiée lors du traitement du nuage de point, le volume extrudé selon la trajectoire nominale est le même pour tous les virages. Ce volume correspond au volume qui aurait été déposé sur un segment de 40 mm sans changement de direction, ce qui correspond au volume obtenu sans changement de vitesse et de trajectoire lors de la dépose.

Volume extrudé selon la trajectoire mesurée : à l'instar du volume précédent, ce volume est calculé en extrudant la section moyenne le long de la trajectoire mesurée. Au passage de points de changement de direction, la trajectoire est plus ou moins lissée en fonction des paramètres cinématiques mis en œuvre et donc la longueur de l'abscisse curviligne varie d'un virage à l'autre. Ce volume rend compte du volume déposé le long d'une trajectoire de même longueur que celle réalisée sans changement de vitesse. Il permet de rendre compte de l'influence du lissage de la trajectoire sur l'accumulation de matière. La trajectoire réellement parcourue étant nécessairement plus courte que la trajectoire nominale, ce volume est donc plus faible que celui extrudé le long de la trajectoire nominale.

Volume théorique ciblé : ce volume est défini par la géométrie ciblée et sert de référence. La géométrie cible retenue ici est celle obtenue par extrusion de la section du cordon le long de la trajectoire nominale à laquelle on ajoute une portion angulaire à l'extérieur du virage pour raccorder les deux volumes obtenus le long des deux segments. La figure 3.29 illustre la géométrie ciblée avec en vert le raccord angulaire à ajouter. Sur cette même figure, le volume en rouge est

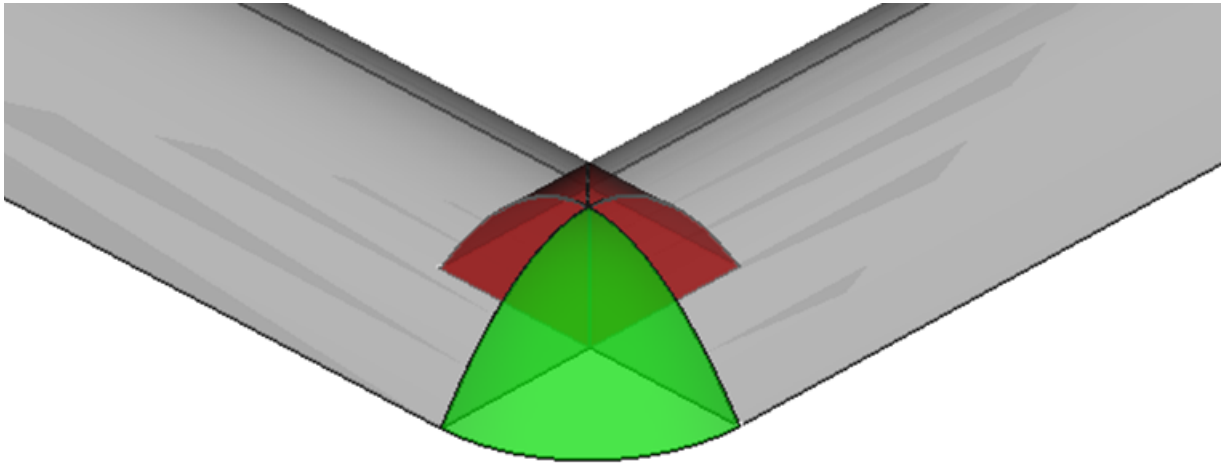


FIGURE 3.29 – Géométrie cible avec en rouge le volume déposé 2 fois et en vert le raccord à ajouter

l'intersection des géométries obtenues le long des deux segments et est donc déposé deux fois. Ainsi pour l'évaluation du volume de cette géométrie ciblée, il faut le soustraire une fois. Pour un cordon à section polynomiale, le volume lacunaire (en vert), le volume redondant (en rouge) et le volume théorique ciblé s'expriment :

$$Vol_{lacunaire} = \frac{H.L^2}{16} \cdot \alpha \quad (3.7)$$

$$Vol_{redondant} = \frac{H.L^2}{8} \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (3.8)$$

$$Vol_{theorique\ ciblé} = Vol_{extru\ nominale} - Vol_{redondant} + Vol_{lacunaire} \quad (3.9)$$

Le volume redondant est nécessairement supérieur au volume lacunaire quel que soit l'angle α . Ainsi le volume théorique ciblé est nécessairement inférieur au volume extrudé le long de la trajectoire nominale. Compte tenu de la faible variation de longueur de l'abscisse curviligne due au lissage de la trajectoire aux vitesses d'avance de la torche utiles en WAAM, le volume extrudé est aussi supérieur au volume théorique ciblé.

La comparaison de ces volumes permet de mettre en évidence les différents effets, qui, de manière individuelle ou combinée, contribuent à l'accumulation de matière. Ces différents effets sont définis de la façon suivante :

- L'accumulation de matière est définie comme étant l'écart entre le volume mesuré et le volume théorique ciblé.
- Les pertes : que ce soit par projections ou vaporisations, elles sont définies comme étant l'écart entre le volume fil et le volume mesuré.
- Effet de corde : l'effet de l'erreur de corde lors du lissage est défini comme la différence entre le volume extrudé le long de la trajectoire nominale et le volume extrudé le long de la trajectoire mesurée. Ce dernier ne prend donc pas en compte l'effet de la diminution de vitesse.
- Effet cinématique : l'effet de la diminution de vitesse est mis en évidence en exprimant l'écart entre le volume mesuré et le volume extrudé selon la trajectoire mesurée puisque pour ces deux volumes la trajectoire parcourue est la même et seule l'évolution de la vitesse varie.
- Effet géométrique : l'écart entre le volume extrudé selon la trajectoire nominale et le volume théorique ciblé caractérise la contribution de l'effet géométrique lors du pliement.

Effet	Mesuré	Théorique	Extrudé traj CAO	Extrudé traj mesurée	Fil
Géométrique (repliement)	Non	Oui	Non	Non	Non
Cinématique (ralentissement)	Oui	Non	Non	Non	Oui
Corde	Oui	Non	Non	Oui	Oui
Pertes	Oui	Oui	Oui	Oui	Non

TABLEAU 3.2 – Contributions prises en compte dans l'évaluation de chacun des volumes

La figure 3.30 schématise la contribution des effets sur l'accumulation totale. Le tableau 3.2 synthétise la prise en compte des différents effets dans l'évaluation de chaque volume.

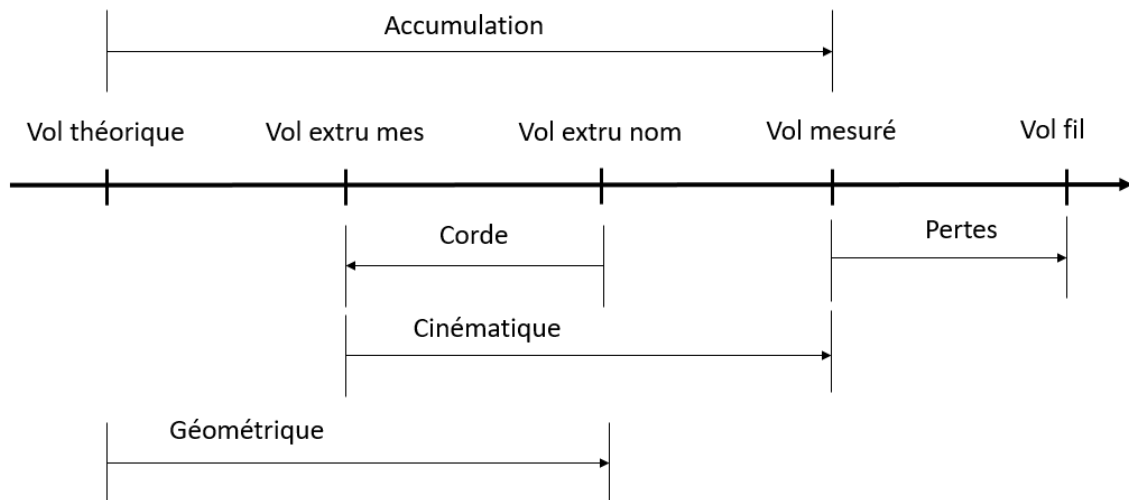


FIGURE 3.30 – Décomposition du volume matière

4.3.3 Résultats

Cette partie rapporte les évaluations des différents volumes de chaque virage pour 3 essais :

- S57 : $V_f = 8,0$ m/min, $V_r = 0,75$ m/min, $\tau = 50$
- S58 : $V_f = 8,0$ m/min, $V_r = 0,75$ m/min, $\tau = 100$
- S59 : $V_f = 8,0$ m/min, $V_r = 0,50$ m/min, $\tau = 100$

Les résultats pour chaque essai sont illustrés figure 3.31. À noter que les volumes pour les angles α obtus (de 150g à 90d) sont évalués sur le recto du substrat et les angles aigus (de 75g à 30d) sur le verso lors de deux traitements différents puisqu'à partir de deux nuages de points différents. Ainsi l'évaluation du cordon moyen fluctue plus ou moins (même si théoriquement il devrait être identique). Cela explique les variations, parfois non négligeables, des volumes extrudés selon les trajectoires nominale et mesurée.

On constate régulièrement sur l'ensemble des virages des différences de volume de fil dévidé entre les virages à gauche et ceux à droite pour une même configuration de paramètres mise en

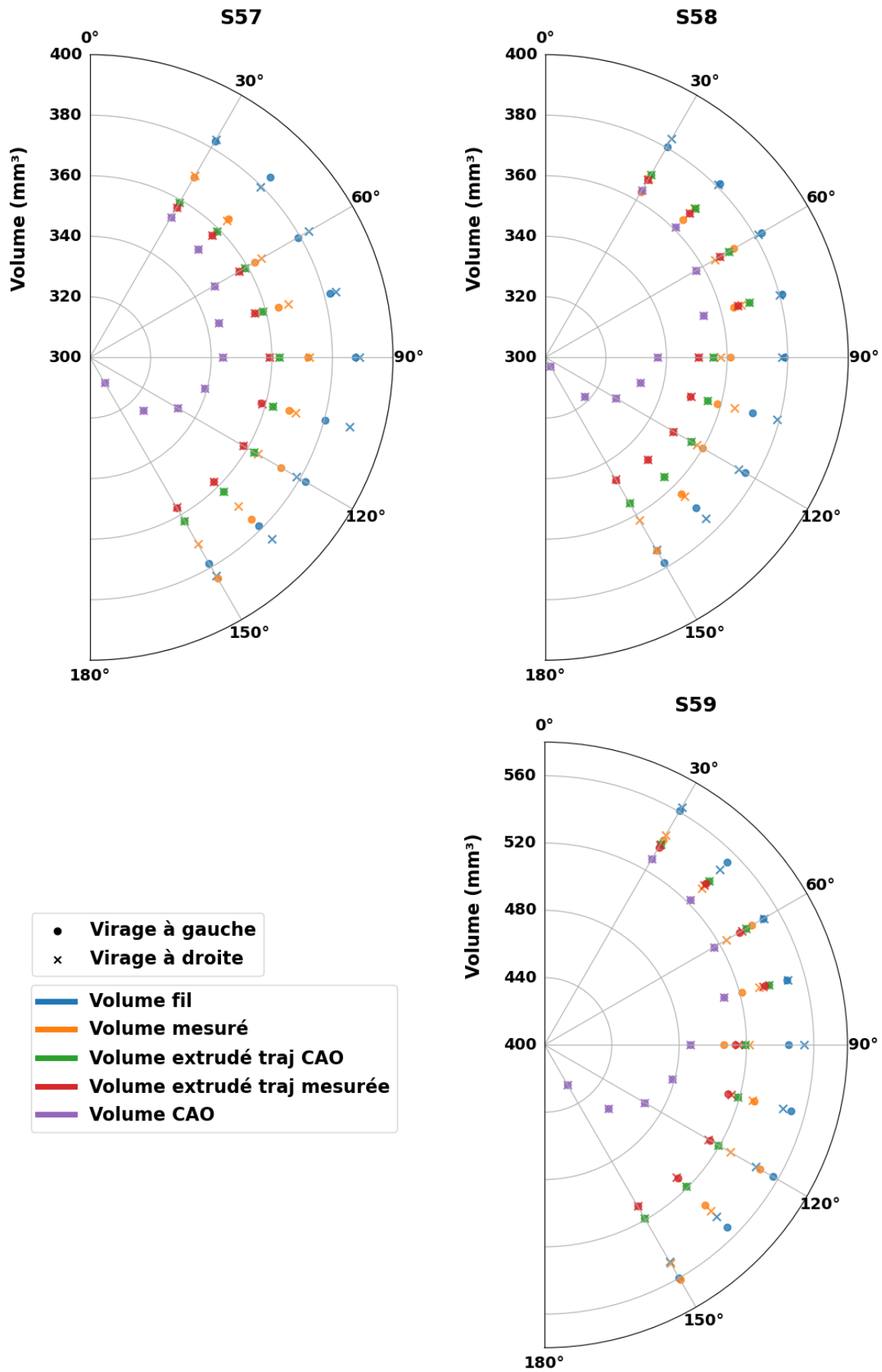


FIGURE 3.31 – Évaluation des différents volumes pour chaque virage avec :
 - S57 : $V_f = 8,0$ m/min, $V_r = 0,75$ m/min, $\tau = 50$
 - S58 : $V_f = 8,0$ m/min, $V_r = 0,75$ m/min, $\tau = 100$
 - S59 : $V_f = 8,0$ m/min, $V_r = 0,50$ m/min, $\tau = 100$

œuvre. Cela est dû au fait que la vitesse de fil dévidé est différente entre les deux virages. Aussi, pour chacun des substrats, les résultats semblent montrer quelques incohérences les rendant difficiles à exploiter. Par exemple pour l'angle α de 150° à gauche sur le cordon S57 lorsque le volume mesuré (orange) est supérieur au volume fil apporté (bleu) : ce résultat est a priori incohérent puisqu'il ne respecte pas la conservation de la matière même pour un rendement de 1. L'explication la plus probable est un mauvais déroulement du traitement (mauvaise identification du plan, comptage de mailles non représentatives du cordon dans le volume total, etc.) malgré les précautions prises. Cependant la source exacte est difficile à déterminer; comme dans le cas du virage problématique 150g du substrat S57 qui est illustré sur les figures 3.28a, 3.28b et 3.28c (virage en bas à gauche). On constate que le filtrage des points, le recalage local et la sélection des points du virage se déroulent correctement et le calcul du volume mesuré ne prend pas en compte de mailles aberrantes. Ce phénomène pourrait aussi venir d'un mouvement longitudinal de la matière le long de l'abscisse curviligne. On constate ce phénomène de volume mesuré supérieur au volume injecté uniquement pour les angles α très obtus (S57 et S59), où l'accumulation de matière est a priori la plus importante. Cette accumulation, en se refroidissant, pourrait faire effet de masselotte et entraîner un mouvement longitudinal de la matière initialement déposée en dehors de la zone d'intérêt. Enfin, dernière possibilité, la présence de porosités pourrait être importante.

La figure 3.32 illustre la décomposition des accumulations constatées pour chaque virage pour les essais S57, S58 et S59. Pour l'essai S57, hormis le virage 150g, l'ensemble des volumes semblent cohérent. Globalement, l'accumulation de matière telle qu'elle est définie diminue lorsque l'angle diminue, ce qui est tout à fait cohérent par rapport aux premières observations expérimentales. Néanmoins on remarque des valeurs surprenantes pour les virages 120d, 105g et 60g, où l'accumulation totale semble un peu faible par rapport à leurs virages symétriques respectifs et aux virages voisins. Pour les essais S58 et S59 on rencontre de nombreuses valeurs aberrantes, particulièrement pour les angles α aigus.

On constate naturellement une décroissance de la contribution de l'effet géométrique lorsque l'angle α est de plus en plus aigu, comme le prévoit l'expression du volume théorique cible. De la même manière, la contribution de l'écart au contour (qui est toujours négative puisque cela a tendance à raccourcir la longueur du parcours) devient de plus en plus faible. L'effet de la cinématique (en rouge) diminue lorsque l'angle α diminue puisque la diminution de vitesse est de plus en plus faible, mais on constate de nombreuses irrégularités. Ceci s'explique par le fait que les incertitudes de mesure et de la méthode de traitement des nuages de points se répercutent principalement sur cet effet précis et non sur les autres dont l'expression est analytique.

Globalement, l'accumulation de matière évolue de manière logique. D'une part plus l'angle est important, plus le repliement géométrique et l'écart au contour sont importants et donc la contribution est grande. D'autre part plus la diminution de vitesse est importante plus son effet sur le volume de matière déposé localement est important. Néanmoins, les nombreuses irrégularités observées ne permettent pas d'avoir une base solide pour expliciter un modèle de prédiction de l'accumulation de matière. À titre d'exemple, pour les virages 150g et 45d, les contributions de l'effet cinématique sont semblables et valent respectivement 9,39 et 8,40 mm³ alors que les diminutions relative de vitesse sont respectivement de 84% et 42%. Avoir des contributions comparables pour deux comportements cinématiques aussi différents est problématique.

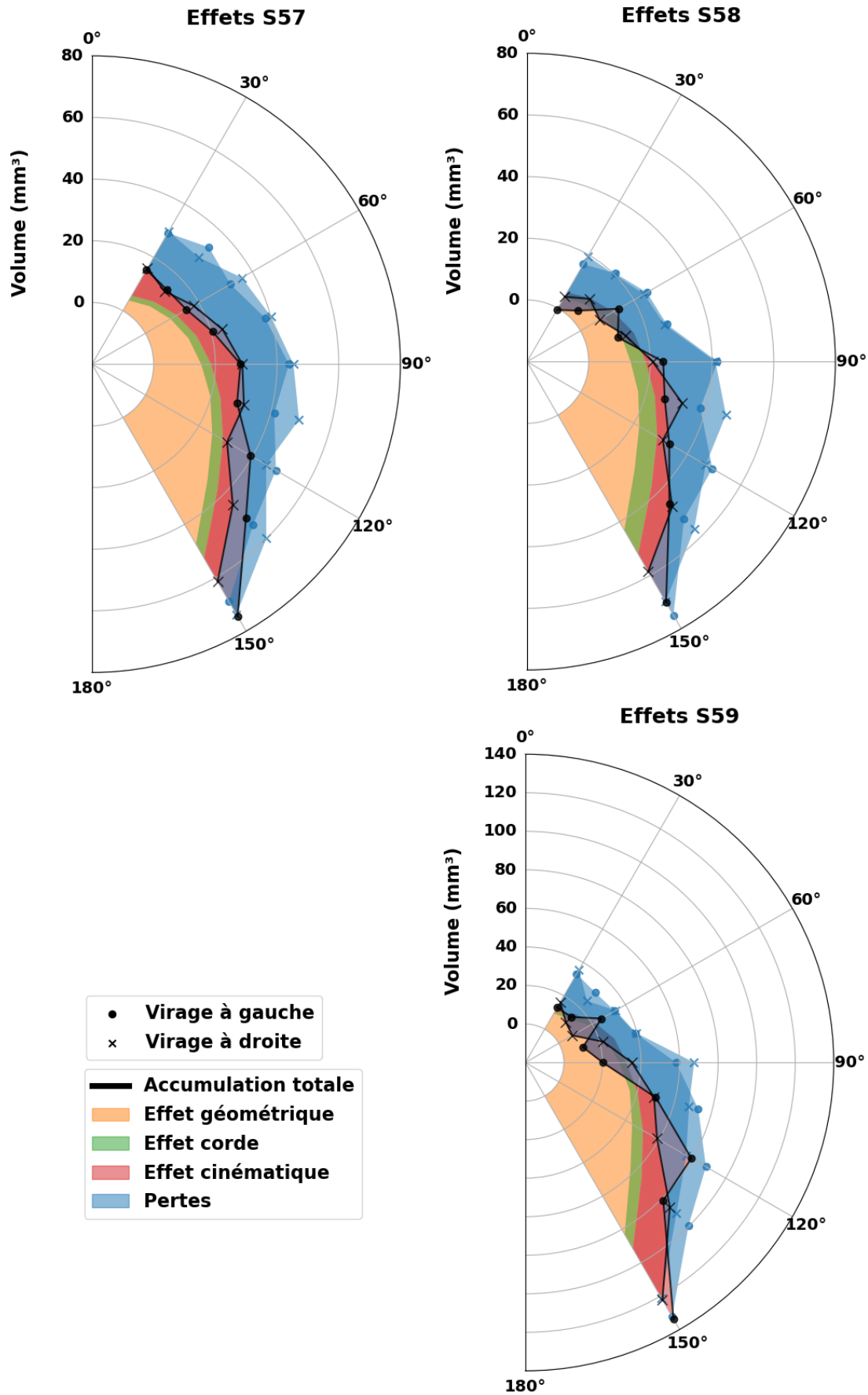


FIGURE 3.32 – Décomposition du volume global en plusieurs effets pour caractériser l'accumulation de matière avec :

- S57 : $V_f = 8,0$ m/min, $V_r = 0,75$ m/min, $\tau = 50$
- S58 : $V_f = 8,0$ m/min, $V_r = 0,75$ m/min, $\tau = 100$
- S59 : $V_f = 8,0$ m/min, $V_r = 0,50$ m/min, $\tau = 100$

5 Modèle de dépôt cumulatif de matière

L'objectif ici est de proposer une approche géométrique permettant de modéliser le processus de dépôt de matière et ainsi rendre compte plus fidèlement de la géométrie des cordons fabriqués autour des points de changement de direction. L'approche propose de s'inspirer de la forme du bain observée et de sa trajectoire. D'après la littérature ([28],[67],[68]), le bain liquide prend une forme elliptique lorsque la vitesse d'avance de la torche reste modérée et adopte une forme de goutte d'eau à plus grande vitesse (figure 3.33). Dans les deux cas, l'avant du bain liquide prend une forme d'arc de cercle.

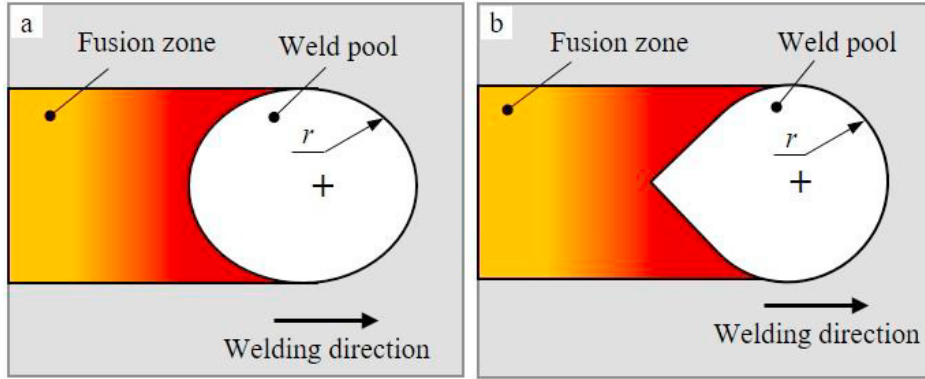


FIGURE 3.33 – Schéma de la forme du bain liquide : (a) elliptique, (b) goutte d'eau [28]

La modélisation proposée consiste à faire parcourir la trajectoire décrite par la torche à une fonction représentant la densité de répartition de la matière. Cette fonction étant asymétrique et son centre n'étant pas fixé sur le point piloté de la torche, son orientation est fixée par la trajectoire de poursuite. Pour chaque position m le long de la trajectoire, la fraction de volume déposée à l'extrémité de la torche depuis l'étape $m-1$ selon la répartition fixée par la fonction de densité $f_m(x, y)$ est ajoutée. Ainsi pour un point de l'espace $z[i, j]$ la quantité de matière déposée s'exprime :

$$z_{[i, j]} = \sum_m f_m(x_{[i, j]}, y_{[i, j]}) \cdot Vol_m \quad (3.10)$$

$$\text{avec } Vol_m = V_f \cdot \pi \cdot \left(\frac{\varnothing_f}{2}\right)^2 \cdot \Delta t_m \text{ et } \Delta t_m = \frac{s_m - s_{m-1}}{V_r}$$

On peut réécrire l'équation précédente comme suit :

$$z_{[i, j]} = \sum_m f_m(x_{[i, j]} - s_m, y_{[i, j]}) \cdot V_f \cdot \pi \cdot \left(\frac{\varnothing_f}{2}\right)^2 \cdot \frac{s_m - s_{m-1}}{V_r} \quad (3.11)$$

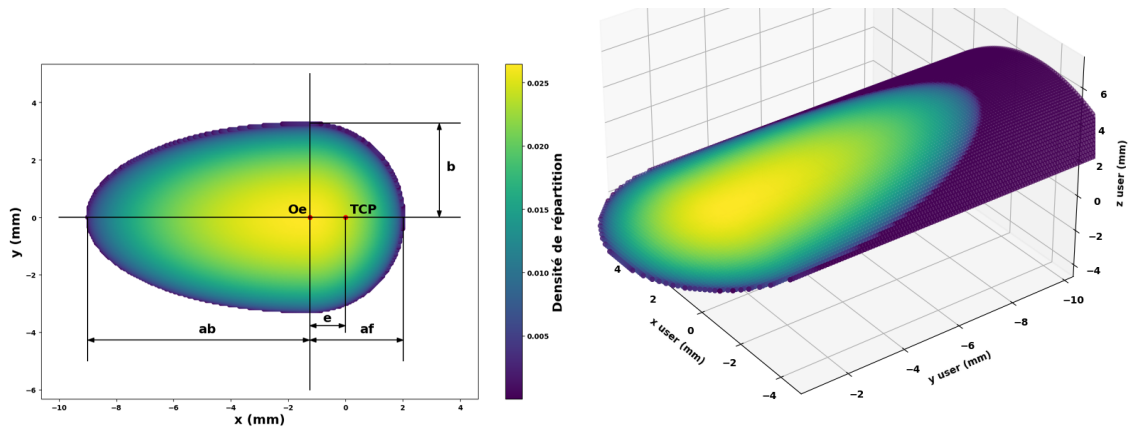
Ainsi, l'expression de la surface calculée peut être vue comme le produit de convolution de la fonction de densité avec la fonction indicatrice de la trajectoire Σ notée $\mathbf{1}_\Sigma$ (où $\mathbf{1}_\Sigma(X) = 1 \Leftrightarrow X \in \Sigma$) si on l'exprime de manière continue :

$$z(x, y) = \int_0^L f_m(x - s, y) \lambda \left(\frac{\varnothing_f}{2}\right)^2 \pi ds = \left(\frac{\varnothing_f}{2}\right)^2 \pi (\mathbf{1}_\Sigma * \lambda f_m)(x, y) \quad (3.12)$$

Il n'est pas aisé de déterminer analytiquement la fonction de répartition f_m permettant de générer un cordon de section polynomiale. Pour résoudre ce problème, la fonction de répartition proposée ici est un double ellipsoïde inspiré des modélisations des sources de chaleur de type Goldak, largement utilisées dans le domaine de la simulation du comportement thermo-mécanique du processus de soudage et plus récemment en fabrication additive [69]. L'hypothèse sous-jacente est de faire le parallèle entre la fonction de la source de chaleur et celle de la source de matière. La fonction de répartition de la matière s'exprime :

$$f_m(x, y) = \begin{cases} \frac{3}{(a_b + a_f).b.\pi} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a_{b,f}}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \\ 0 \end{cases} \quad (3.13)$$

avec b le demi-axe partagé par les deux ellipsoïdes et a_b et a_f respectivement les demi-axes de la partie aval (back) et amont (front) (figure 3.34a). Cette fonction de répartition est adimensionnée telle que le volume sous sa surface soit égal à 1.



(a) Fonction de répartition en double ellipsoïde et ses paramètres associés

(b) Répartition de densité de matière superposée au cordon en cours de dépôt

FIGURE 3.34 – Modélisation par dépôt cumulatif de matière

L'originalité de cette approche est de faire un parallèle entre la géométrie du bain liquide et la fonction de répartition de la matière. Aussi, sans chercher à connaître en détail l'évolution thermique de la matière au cours du dépôt, définir la fonction de répartition sur une isotherme semble pertinent en considérant que le solidus du bain suit ce contour. Ainsi l'identification des paramètres géométriques consiste à faire correspondre la définition de la fonction de répartition avec celui du solidus du bain liquide.

On peut remarquer que la densité la plus élevée de la fonction de répartition est située au centre du double ellipsoïde. Les observations de l'évolution du bain liquide en cours de dépôt ne permettent pas à ce stade d'établir un lien simple entre lieu de densité maximale et position de l'extrémité du fil (TCP).

La figure 3.34b illustre la modélisation d'un cordon rectiligne réalisée avec des paramètres identifiés dans la partie suivante. La fonction de répartition est illustrée dans sa dernière position reposant sur les contributions des étapes précédentes.

5.1 Identification des paramètres

Pour identifier les dimensions du bain liquide sur les portions rectilignes de la trajectoire, différents points caractéristiques sont relevés manuellement sur les images puis projetés sur la base

locale de la torche, identifiée grâce à un damier servant de mire de calibration (figure 3.17a). Les paramètres géométriques sont ensuite identifiés comme étant des combinaisons des dimensions estimées du bain (figure 3.35).

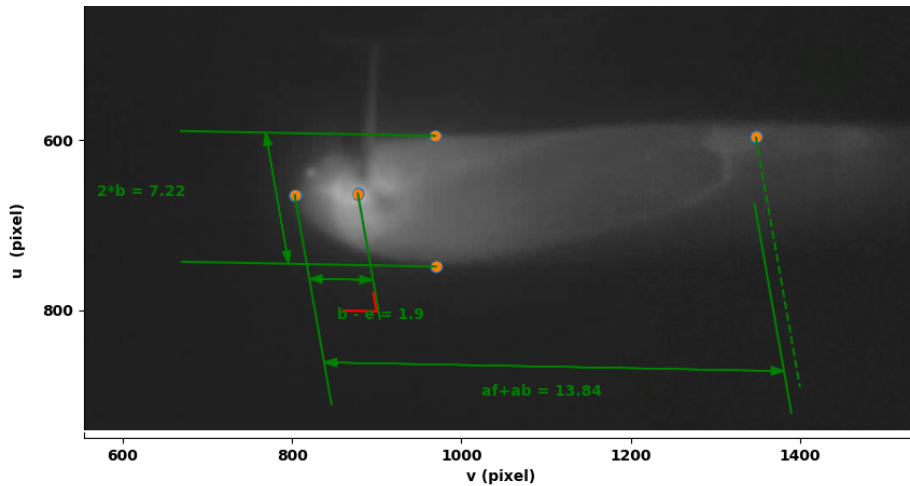


FIGURE 3.35 – Image du bain liquide et ses dimensions (en mm)

Le tableau 3.3 regroupe les valeurs moyennes identifiées des paramètres du modèle sur vingt images du cordon filmé, prises sur les portions rectilignes pour deux vitesses d'avance du robot différentes, la vitesse fil étant programmée à 8 m/min. Chaque essai est réalisé en deux parties sur les deux faces d'un même substrat et l'on constate une légère augmentation des dimensions du bain sur le verso. Cela vient probablement du fait que la température initiale du substrat n'est pas tout à fait la même pour chaque face. D'après les premières observations ainsi que la littérature traitant des sources de chaleur dont est inspirée la fonction de répartition, le demi ellipsoïde amont est considéré ici comme un cercle, ainsi $a_f = b$.

V_r (m/min)	a_f/b (mm)			a_b (mm)			e (mm)		
	min	max	moy	min	max	moy	min	max	moy
0,75	3,47	3,79	3,60	9,63	12,47	10,80	1,44	1,97	1,66
0,50	3,99	4,23	4,14	10,66	13,23	11,73	1,28	2,28	1,85

TABLEAU 3.3 – Dimensions du bain liquide pour deux vitesses d'avance du robot

Une partie de l'incertitude de mesure vient du fait que les points matériels sur lesquels on s'appuie pour faire la mesure sont identifiés manuellement sur l'image. Ainsi la position exacte retenue des limites du bain peut varier en termes de pixels. Sur la longueur du bain, un pixel correspond à 25 μm et sur sa largeur un pixel correspond à 46 μm .

En plus de permettre de mesurer les dimensions du bain liquide, le damier de la mire permet de calibrer la caméra et d'identifier la matrice de projection de celle-ci. À défaut de permettre des mesures tri-dimensionnelles puisqu'une seule caméra est à disposition, cela permet de projeter, à titre de vérification, des formes en trois dimensions sur l'image. Pour cela la matrice de projection \mathbf{P} de la caméra est identifiée. Pour chaque point de l'espace M_i , sa projection m_i sur le plan image s'exprime :

$$m_i = \mathbf{P}.M_i \quad (3.14)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \begin{bmatrix} su_i \\ sv_i \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} & (1) \\ & (2) \\ & (3) \end{cases} \quad (3.15)$$

d'où le système d'équations suivant :

$$(1) - (3)u_i : (P_{11} - u_i P_{31})X_i + (P_{12} - u_i P_{32})Y_i + (P_{13} - u_i P_{33})Z_i + P_{14} - u_i P_{34} = 0 \quad (3.16)$$

$$(2) - (3)v_i : (P_{21} - v_i P_{31})X_i + (P_{22} - v_i P_{32})Y_i + (P_{23} - v_i P_{33})Z_i + P_{24} - v_i P_{34} = 0 \quad (3.17)$$

On obtient ainsi un système de $2N$ équations linéaires à 12 inconnues P_{ij} . Cependant la matrice \mathbf{P} étant définie à un facteur multiplicatif près (s), P_{34} est fixé à 1. Pour identifier pleinement \mathbf{P} il suffit donc de connaître M_i et m_i pour 6 points non coplanaires pour résoudre le système à 11 inconnues suivant :

$$\begin{bmatrix} X_i & Y_i & Z_i & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_i X_i & -u_i Y_i & -u_i Z_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_i & Y_i & Z_i & 1 & -v_i X_i & -v_i Y_i & -v_i Z_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{12} \\ P_{13} \\ P_{14} \\ P_{21} \\ P_{22} \\ P_{23} \\ P_{24} \\ P_{31} \\ P_{32} \\ P_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Si A_i est de rang 11 (ce qui est le cas si l'on considère au moins 6 points non coplanaires), la résolution aux moindres carrés de ce système linéaire $A_i \mathbf{P} = B_i$ s'exprime :

$$\mathbf{P} = (A_i^t A_i)^{-1} A_i^t B_i \quad (3.19)$$

À titre de première vérification, le modèle proposé précédemment a été mis en œuvre sur une portion rectiligne avec les paramètres géométriques nouvellement identifiés. La fonction de répartition obtenue dans sa dernière position reposant sur les contributions des étapes précédentes est projetée sur l'image du bain liquide (figure 3.36). On constate que l'allure de la fonction de répartition épouse relativement bien les limites du bain liquide.

5.2 Modélisation des cordons autour des points de changement de direction

L'objectif ici est d'évaluer la pertinence et les performances de la modélisation proposée. Pour cela, chaque simulation de la géométrie de cordon autour d'un point de changement de direction est comparée à la géométrie du cordon fabriqué associé. Pour se rapprocher au plus près des conditions expérimentales et caractériser uniquement l'approche de modélisation, les différentes données d'entrées nécessaires à la simulation sont ici celles mesurées, à savoir :

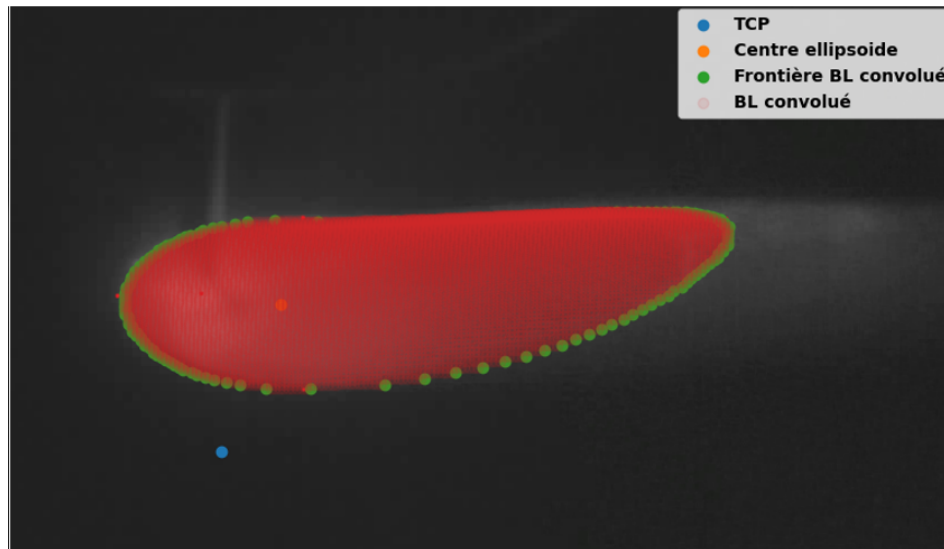


FIGURE 3.36 – Projection de la fonction de répartition sur l'image du bain liquide

- La trajectoire du point piloté mesurée
- La longueur de poursuite utilisée pour calculer la trajectoire de poursuite à la torche est celle mesurée pour chaque virage considéré
- La quantité de matière apportée est déterminée à partir de la vitesse fil mesurée associée à chaque point de la trajectoire mesurée
- Les dimensions géométriques de la fonction de répartition sont celles mesurées sur ces mêmes essais (tableau 3.3)

Afin de confronter les simulations avec les cordons réalisés, une distance signée entre chaque point mesuré et le point de la surface modélisée le plus proche est calculée. Une distance positive (resp. négative) indique que le point mesuré se situe à une altitude supérieure (resp. inférieure) de son voisin simulé le plus proche par rapport à la verticale. La figure 3.37 illustre les simulations de la géométrie pour les cordons pour différents angles α ainsi que la cartographie des distances associée.

On constate que sur les portions rectilignes en amont et en aval du point de changement de direction, les distances sont relativement faibles, ce qui indique que la simulation décrit de manière assez réaliste la géométrie des cordons mesurés. Ceci est particulièrement bien illustré figure 3.37f pour l'angle $\alpha = 135^\circ$ où l'amplitude de l'échelle des distances est plus importante du fait des écarts plus importants ailleurs sur la figure. On peut aussi noter qu'en aval, la similitude entre la géométrie simulée et mesurée est légèrement moins bonne qu'en amont, les distances aux voisins simulés le plus proches sont plus importantes et négatives (couleurs plus chaudes) ce qui indique que les points du cordon mesuré sont situés en dessous des points simulés. En effet la simulation ne retranscrit pas la striction de la section du cordon que l'on observe sur la géométrie mesurée.

Au niveau du point de changement de direction, la simulation montre une accumulation au centre du cordon associée à des lacunes de part et d'autre de celle-ci. En effet, les zones de couleurs froides sur les différentes cartographies révèlent des zones qui sont peu ou pas remplies, tandis que les zones de couleurs chaudes indiquent que les points simulés sont au-dessus des points mesurés. La simulation décrit une accumulation de matière, mais mal répartie sur le cordon. Le modèle ne décrit en effet pas l'étalement de la matière sur les périphéries du cordon observé.

Les dimensions de la fonction de répartition utilisée pour cette modélisation ont été identifiées sur une portion rectiligne du cordon et sont fixées comme constantes lors du calcul. Cela explique

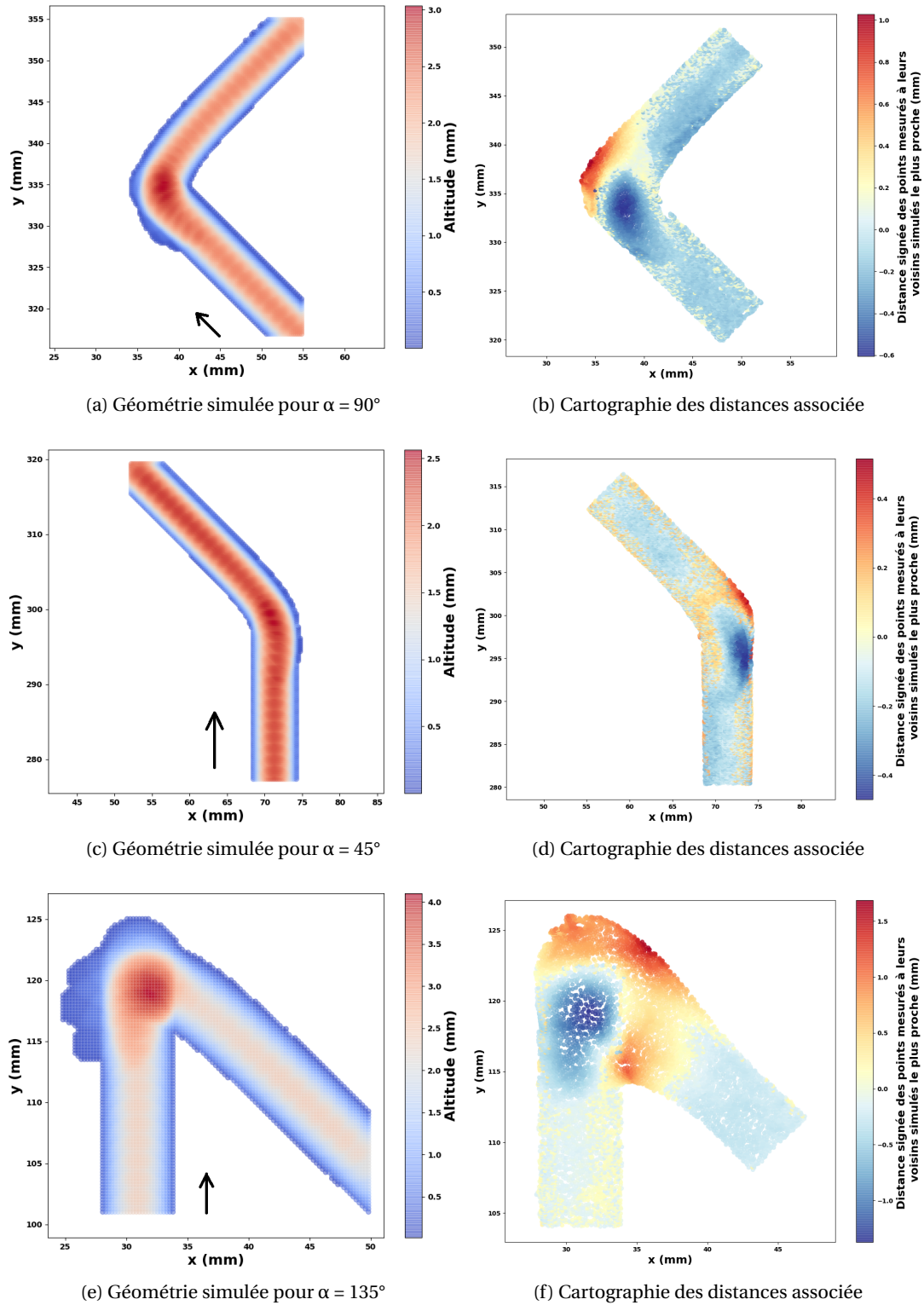


FIGURE 3.37 – Simulation des géométries pour différents angles α sur la base de l'essai S57 : $V_T = 0,75$ m/min et $\tau = 50$

la présence d'une zone à l'extérieur des cordons pour les angles α importants où la simulation dépose de la matière et qui n'est pas du tout fidèle à la réalité. La figure 3.38 illustre les positions successives de la fonction de répartition (aux dimensions constantes ici) au cours de la simulation pour un virage à angle droit où l'on devine que sa forme n'est pas adaptée au voisinage du virage. L'observation du bain liquide lors du franchissement d'un point de changement de direction montre une évolution de la géométrie du bain qui n'est pas retranscrite ici, ce qui peut donc expliquer tout ou partie des écarts observés en particulier dans cette zone. L'étude de l'évolution de la fonction de répartition au cours de la fabrication constitue la principale piste d'amélioration de ce modèle.

FIGURE 3.38 – Positions successives de la fonction de répartition au cours de la simulation

6 Synthèse

Hormis les plus rudimentaires, la plupart des trajectoires mettent en œuvre de nombreux changements de direction. L'apparition systématique d'une accumulation de matière a pu être observée et est d'autant plus marquée que l'angle α entre les deux segments consécutifs est grand. De nombreux cordons présentant des changements de direction ont été fabriqués en mettant en œuvre différentes configurations de paramètres cinématiques et procédé.

L'étude du comportement cinématique du robot au passage de ces points de changement de direction a permis de quantifier la diminution de vitesse et l'erreur de corde de la trajectoire effective du point piloté du robot. Une interpolation des points de la trajectoire nominale du robot avec une chaîne de filtre à réponse impulsionnelle finie permet de simuler sa trajectoire réelle de manière assez fine et ainsi anticiper les variations de la vitesse tangentielle de la torche et de maîtriser ses écarts à la trajectoire nominale. Ces développements viennent alimenter le modèle descriptif du jumeau numérique du système.

Néanmoins, la trajectoire suivie par la torche n'est pas révélatrice de la position du cordon. Pour remédier à cela, le concept de trajectoire de poursuite à la torche est proposé pour décrire le phénomène de trainage du bain liquide. Cette nouvelle trajectoire permet de rendre compte de la position du cordon en particulier autour des points de changement de direction de la trajectoire parcourue.

La trajectoire de la torche et sa trajectoire de poursuite sont ensuite utilisées dans notre proposition de modélisation du cordon en cours de fabrication. Cette modélisation consiste, pour chaque point de l'espace d'étude, à sommer l'ensemble des volumes de matière déposés au cours de la fabrication. La répartition du volume de matière est fixée par une fonction qui suit la trajectoire de la torche et est orientée par sa trajectoire de poursuite. Cette modélisation montre des résultats intéressants en ligne droite, mais peut encore être améliorée autour des points de changement de direction pour rendre mieux compte de la géométrie des accumulations de matière constatées.

Pour ces essais, le bain liquide a pu être observé en cours de fabrication grâce à une caméra montée directement sur la torche. Au passage d'un point de changement de direction, le bain se déforme de manière plus ou moins significative en fonction de l'angle formé par les deux segments consécutifs parcourus. L'allure des cordons au voisinage de ces points de changement de direction est similaire : on retrouve une accumulation suivie d'une striction de la section du cordon. Cependant l'importance des phénomènes observés est d'autant plus grande que l'angle α est obtus. Aussi pour les angles les plus obtus on retrouve sur le cordon final des marques de silicate caractéristiques qui n'apparaissent plus dès lors que l'angle parcouru est plus aigu. De plus, il a été observé que les paramètres du procédé ont peu d'influence d'un point de vue qualitatif sur le comportement du bain liquide aux passages de points de changement de direction.

Enfin, une analyse poussée des contributions sur l'accumulation de matière des différents effets rencontrés et observés lors du passage de points de changement de direction en fonction des paramètres cinématiques et procédé mis en œuvre a été menée. Cette analyse repose sur la comparaison des volumes de matière mesurés et calculés en prenant en considération ou non les contributions de certains effets pour pouvoir les isoler. La qualité de la quantification de ces différentes contributions est hélas tributaire des incertitudes de mesures des différentes grandeurs étudiées.

Chapitre 4

Assemblage de cordons

Ce chapitre porte sur l'assemblage de cordons que ce soit dans un contexte de juxtaposition ou d'empilement. Au travers de campagnes expérimentales et de la fabrication d'artefacts simples, le comportement géométrique des cordons et leur assemblage sont étudiés en fonction des paramètres procédé et des paramètres de la trajectoire mise en œuvre. Une modélisation polynômiale de l'assemblage de cordons est ensuite proposée et comparée aux artefacts fabriqués. Cette modélisation permet de mieux appréhender les paramètres de la trajectoire tel que la distance de juxtaposition et la distance intercouche qui sont des paramètres indispensables à la programmation de la trajectoire. Enfin, le comportement de la source électrique est analysé en détail. Cette dernière apporte l'énergie et la matière nécessaires à la fabrication mais son fonctionnement et les régulations qu'elle propose demeurent complexes.

Sommaire

1	Introduction	96
2	Juxtaposition	100
2.1	Essais de juxtaposition	101
2.2	Décalage des cordons	102
2.3	Observations et Analyses	107
2.4	Modélisation de la juxtaposition	109
2.5	Synthèse	112
3	Empilement/Assemblage de cordons	113
3.1	Expérimentations	113
3.2	Mur mono-cordon	113
3.3	Murs épais	114
3.4	Traitement des données expérimentales et analyses	116
4	Modélisation de l'assemblage de cordons	126
5	Source électrique	131
5.1	Régulations possibles de la source FRONIUS	131
5.2	Modélisation de la source	132
5.3	Discussions	135
6	Synthèse	138

1 Introduction

L'assemblage de cordons est au cœur du paradigme de fabrication en WAAM. En effet, toute entité géométrique à fabriquer est composée d'un assemblage itératif de plusieurs cordons. En fonction des géométries considérées, on retrouve deux grandes catégories d'assemblage de cordons, à savoir :

- L'empilement : le cordon est déposé sur le précédent ainsi la jonction entre deux cordons consécutifs se fait dans le sens de la direction de fabrication. Généralement, chaque cordon correspond à une couche.
- La juxtaposition : le cordon est déposé à côté du précédent, la jonction entre deux cordons consécutifs se fait orthogonalement à la direction de fabrication. Généralement, cela apparaît lors du remplissage d'une même couche.

Ainsi la très grande majorité des pièces fabriquées en WAAM sont composées d'un empilement de couches où chaque couche est composée d'une juxtaposition de cordons. Ces deux principes de l'assemblage de cordons sont conditionnés par la trajectoire mise en œuvre et les paramètres associés qu'il est impératif d'anticiper. C'est pourquoi on retrouve dans la littérature plusieurs études de ces phénomènes qui conduisent à l'élaboration de modèles permettant d'aider à fixer certains paramètres de la trajectoire. Cependant, on note une plus grande attention portée à la juxtaposition où plusieurs modèles ont été proposés qu'à l'empilement. Aussi tous les modèles abordés dans la littérature sont des modèles 2D plans.

Dans le cas de la juxtaposition de cordons il est primordial de déterminer la distance d à adopter entre deux cordons pour avoir un remplissage optimal ainsi qu'un état général correct de la surface déposée en vue du dépôt de la couche suivante. Un premier modèle de juxtaposition de cordons a été investigué dans la littérature ([16],[15], [70]), le *Flat-top Overlapping Model* (FOM). Il repose sur la conservation des aires entre la zone de chevauchement et la vallée créée entre deux cordons illustrée figure 4.1. La distance d optimale est obtenue lorsque la surface entre les deux cordons est plane et que l'aire de la zone de chevauchement est égale à l'aire de la vallée. Pour des cordons à sections polynomiale, le calcul théorique donne une valeur de d égale à $0,667w$ ce qui correspond à une surface supérieure tangente aux sommets des deux cordons. Cependant, la pratique a montré qu'il était impossible d'obtenir une surface parfaitement plate lors de la juxtaposition de cordons.

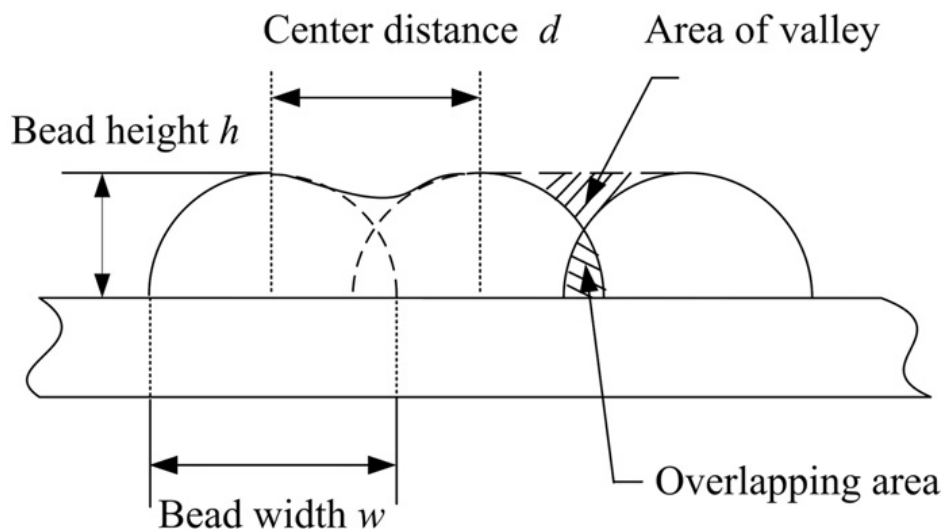


FIGURE 4.1 – Schéma du *Flat top Overlapping Model* par [16][15][70]

Ding et al. [56] proposent un modèle de juxtaposition se voulant plus réaliste dénommé *Tangent Overlapping Model* (TOM). Comme le montre la figure 4.2, le cordon 2 est déposé à une distance d du cordon 1 et ici la surface supérieure de la zone de vallée est tangente uniquement au sommet du cordon 2. La distance optimale d^* est la distance entre les deux cordons permettant de remplir la zone de vallée au maximum sans déformer le cordon 2 à cause d'un excédent de matière. En considérant que les cordons ont une forme parabolique, les auteurs déterminent cette distance optimale comme étant égale à $0,738w$. Lors d'expérimentations en utilisant cette valeur, les auteurs obtiennent un dépôt de cordon régulier et stable même si la surface obtenue n'est pas parfaitement plane.

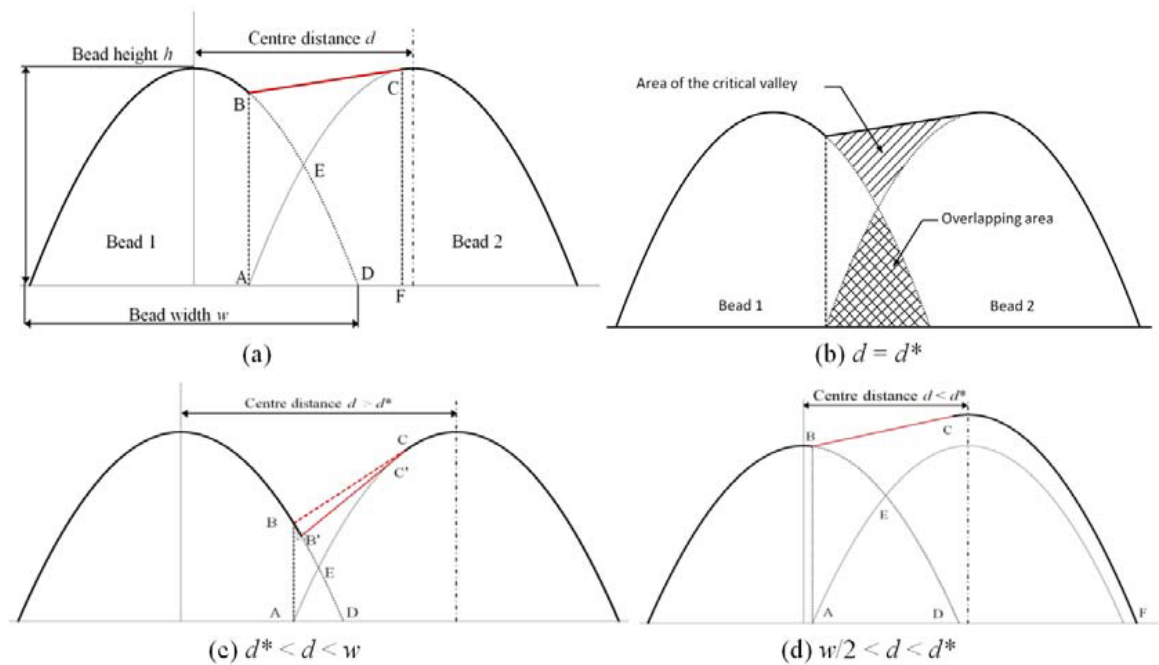


FIGURE 4.2 – Schémas du *Tangent Overlapping Model* par [56]

Suryakumar et al. [57] proposent d'affiner encore le modèle TOM en considérant que la surface supérieure est tangente aux deux cordons et forme donc un arc de cercle comme l'illustre la figure 4.3. Ce modèle repose là aussi sur la conservation de l'aire entre la zone de chevauchement et la zone de vallée entre deux cordons à sections polynomiales. La distance de juxtaposition optimale issue de ce modèle est la même que pour le modèle FOM mais sa valeur ajoutée réside dans sa capacité à pouvoir prédire plus finement la géométrie de la surface supérieure formée par la juxtaposition de deux cordons lorsque la distance de juxtaposition est différente de la distance optimale.

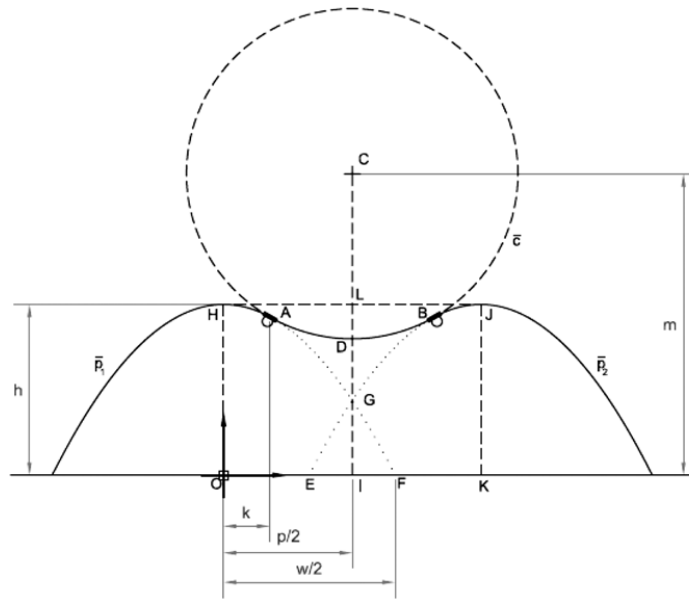


FIGURE 4.3 – Schéma *Double Tangent Overlapping Model* par [57]

Les modèles exposés permettent, à priori, de déterminer les dimensions des cordons et d'évaluer les paramètres de trajectoires indispensables à la génération de celles-ci. Dans la littérature, quels que soient le procédé et le matériau mis en œuvre, la distance entre chaque passe est le plus souvent comprise entre 0,66 et 0,75 fois la largeur du cordon déposé, ce qui correspond aux valeurs identifiées avec les modèles FOM et TOM. Il est important de noter que l'ensemble des modèles de juxtaposition issus de la littérature exposés ici sont présentés dans le cadre de cordons juxtaposés sur un substrat plan.

En matière de modélisation de l'empilement de cordons, la littérature semble bien moins fournie. On retrouve notamment le modèle analytique développé par Mohebbi et al. [59] déjà mentionné au chapitre 2. L'expression du profil est issue de la résolution de l'équilibre statique entre la pression hydrostatique et la tension de surface dans le cadre de l'empilement de cordons (rappel en figure 4.4). Cependant, le modèle développé ici se limite au cas d'un mur fin fabriqué en empilant des cordons seuls les uns sur les autres et ne se généralise pas directement à la modélisation de géométries plus élaborées avec notamment plusieurs cordons par couche.

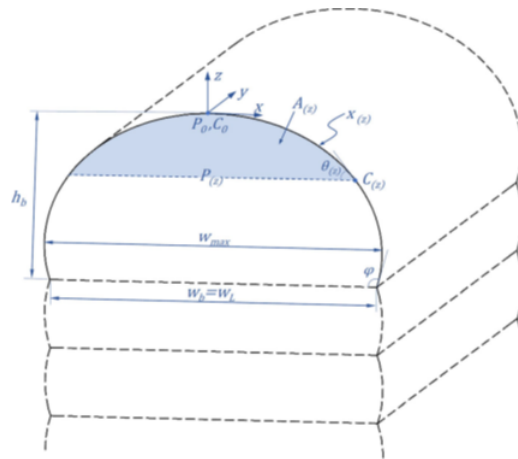


FIGURE 4.4 – Géométrie de la section du cordon par [59]

Pour rappel, d'après ce modèle, l'allure du profil dépend de plusieurs paramètres géométriques et matériaux à savoir : la tension superficielle γ , la masse volumique ρ , la courbure à l'origine C_0 et l'angle de contact φ défini ici par rapport à l'horizontale et identique des deux cotés par symétrie. Compte tenu de la difficulté d'identifier finement ces différents paramètres pour le matériau utilisé ici et les cordons réalisés, on se propose de mener un brève analyse de sensibilité des paramètres γ , ρ_m , C_0 et φ du modèle. La figure 4.5 illustre différents profils pour différents paramètres matériaux γ et ρ_m . Globalement les variations sur ces deux paramètres influencent peu l'allure du cordon modélisé ce qui autorise une certaine incertitude sur l'évaluation de ces paramètres, tout particulièrement la tension de surface considérée ici comme constante. Plus la masse volumique ρ_m est importante plus le cordon est aplati et à l'inverse plus la tension de surface γ est importante, plus le cordon a tendance à adopter une forme circulaire.

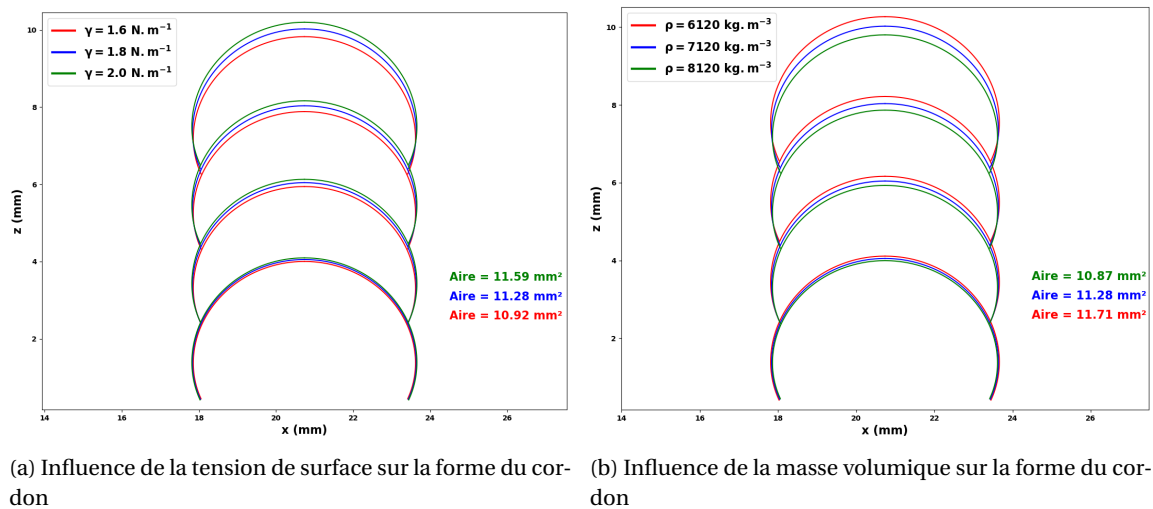
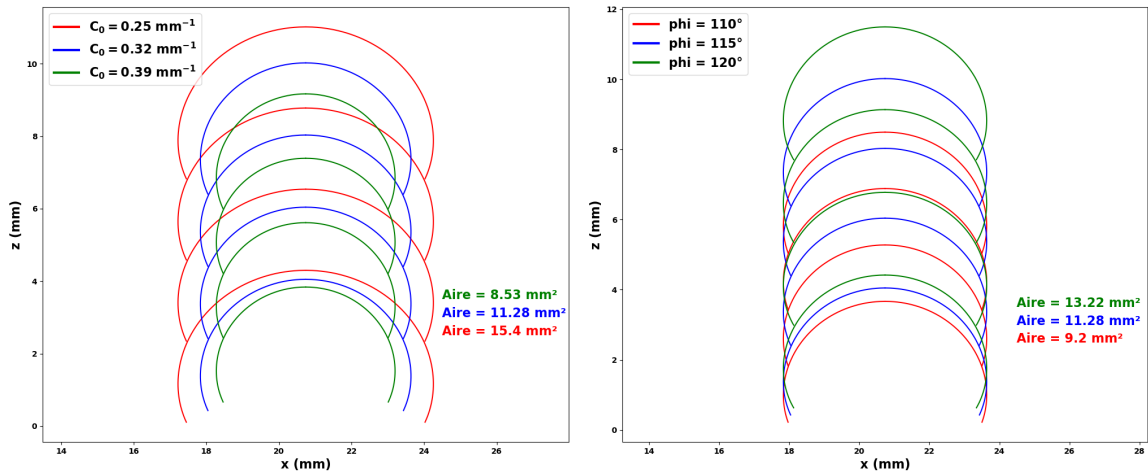


FIGURE 4.5 – Influence des paramètres matériaux sur la forme du cordon simulé

La figure 4.6 illustre différents profils pour différentes valeurs des paramètres géométriques C_0 et φ . Tout d'abord, on constate que seul le paramètre de courbure initiale C_0 permet de moduler la largeur des cordons dans la modélisation et une courbure initiale plus faible génère des cordons plus gros. Le paramètre φ , fixant l'orientation de la tangente au profil aux points de contact, ne change pas la forme du cordon mais fixe seulement l'une des bornes de définition de la modélisation. Ainsi plus l'angle φ est élevé plus le cordon est grand.

En somme, la modélisation de l'assemblage de cordons dans la littérature est relativement peu abordée dans un cadre général et se concentre principalement sur la juxtaposition de cordons sur un substrat plan ou sur l'empilement de mono-cordons et uniquement dans le plan. Ainsi il semble opportun de s'intéresser à la modélisation de l'assemblage avec plusieurs cordons par couche, mêlant ainsi empilement et juxtaposition, pour pouvoir aborder une plus vaste variété de géométries. Néanmoins, compte tenu de la complexité du problème, il convient dans un premier temps de rester sur une modélisation plane de la géométrie avant éventuellement d'envisager une modélisation dans l'espace. Dans ce chapitre, il est proposé d'étudier l'assemblage de cordons dans le cadre de la juxtaposition puis dans le cadre de l'empilement de mono-cordons pour la fabrication de murs fins puis enfin l'assemblage de cordons comprenant à la fois de la juxtaposition et de l'empilement pour la fabrication de murs épais. La démarche suivie consiste tout d'abord à réaliser des essais d'assemblage de cordons pour observer les géométries fabriquées. Puis sur la base de données issues de l'instrumentation, des modèles d'assemblage de cordons sont proposés.



(a) Influence du paramètre de courbure initiale sur l'allure du cordon (b) Influence du paramètre d'angle de contact sur l'allure du cordon

FIGURE 4.6 – Influence des deux paramètres géométriques sur l'allure de la modélisation du cordon

2 Juxtaposition

La juxtaposition de cordons constitue le premier type d'assemblage de cordons réalisé lors de la fabrication de pièce. Cette situation est largement rencontrée lors du remplissage de couches où il est important de la maîtriser et comprendre comment les cordons se joignent en fonction de leur topologie et de la distance qui les sépare.

Aussi le comportement du bain liquide dont résulte la géométrie du cordon fabriqué semble différent en présence d'un cordon adjacent déposé antérieurement. Li et al. [17] ont mis en évidence un effet d'étalement du cordon qui se traduit par un décalage du centre du cordon fraîchement déposé par rapport à la position de la trajectoire programmée comme l'illustre la figure 4.7.

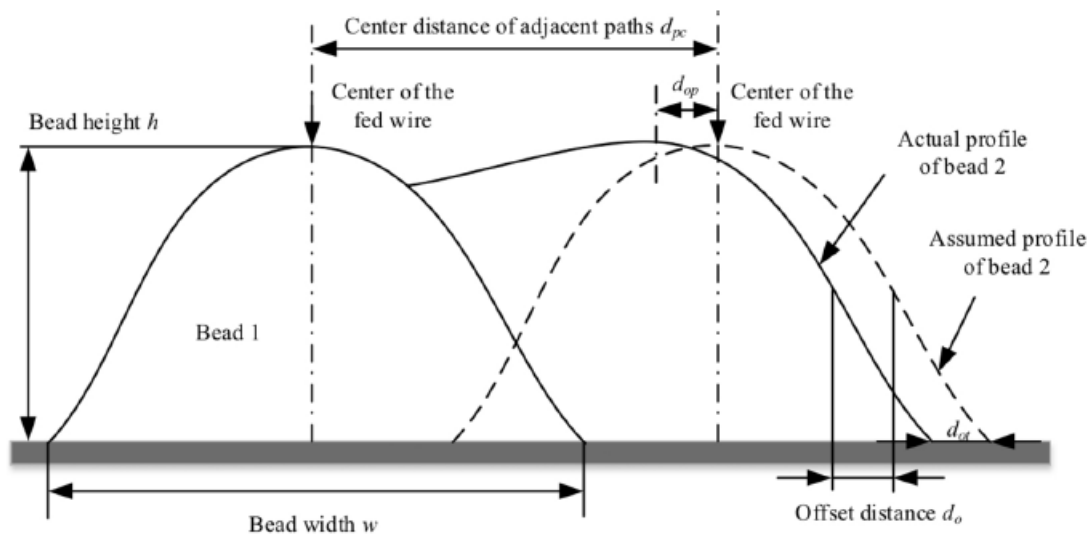


FIGURE 4.7 – Illustration schématique de l'effet de décalage des cordons lors de la juxtaposition

Dans cette partie il est proposé d'étudier la juxtaposition de cordons et ce phénomène de décalage rapporté dans la littérature au travers de plusieurs essais sur notre installation mettant en œuvre différentes distances de juxtaposition et topologies de cordons. L'objectif final étant de pou-

voir proposer un modèle prédictif de juxtaposition et ainsi aider au choix des paramètres de la trajectoire en fonction des paramètres procédé et de la géométrie de la pièce à fabriquer.

2.1 Essais de juxtaposition

L'objectif de ces essais est d'observer le comportement géométrique des cordons lors de la juxtaposition selon la distance d entre deux cordons et le ratio λ . La stratégie de dépôt consiste à déposer 4 cordons de front dans le même sens (et donc impliquant un arrêt d'arc) sur une longueur de 100 mm afin de permettre au bain liquide de se stabiliser et d'avoir une longueur d'analyse suffisante. On se place dans la même configuration que précédemment avec un fil d'un millimètre de diamètre, un gaz d'inertage M14, une synergie CMT Universel 3248 et une vitesse d'avance du robot V_r de 0,75 m/min.

Dans la littérature, la distance entre cordons d varie globalement entre 60 et 80 % de la largeur des cordons déposés. Il est donc proposé de réaliser 5 essais en balayant cette plage et en y incluant les valeurs optimales d^* des différents modèles. Afin de comparer le comportement géométrique de la juxtaposition en fonction de la topologie des cordons, les essais sont réalisés selon deux valeurs de λ . Les deux valeurs de λ sont choisies de manière à ce que les paramètres procédé à programmer correspondent à ceux déjà mis en œuvre durant la caractérisation expérimentale faite au chapitre 2 pour ce matériau. Ainsi les valeurs de λ retenues sont de 5,33 et 10,67 ce qui correspond à des vitesses fil V_f respectivement de 4 et 8 m/min. En se basant sur cette caractérisation expérimentale, les largeurs w attendues des cordons fabriqués devraient être de 4,8 mm et 6,54 mm respectivement et servent de références pour le calcul des distances de juxtaposition de chaque tapis. Le tableau 4.1 résume les valeurs des paramètres d et λ retenus.

Paramètres	Niveaux				
d (mm)	$0,6 * w$	$0,66 * w$	$0,70 * w$	$0,738 * w$	$0,8 * w$
λ	5,33	10,67			
V_f associée	4	8			

TABLEAU 4.1 – Niveaux proposés de chaque paramètre pour les essais de juxtaposition de cordons

Afin de vérifier s'il est possible de quantifier le décalage effectif du cordon déposé, il est proposé de réaliser 3 essais supplémentaires mettant en œuvre les distances entre cordons de $0,6$, $0,7$ et $0,8 * w$ comme précédemment, mais cette fois en prolongeant le second cordon afin d'observer le comportement géométrique d'un même cordon à la fois seul et juxtaposé. La longueur du premier cordon est fixée à 70 mm et celle du second à 140 mm. La vitesse d'avance du robot V_r est fixée à 0,75 m/min et la vitesse de fil dévidé V_f est programmée à 8 m/min.

Les tapis déposés, illustrés figure 4.8, sont ensuite scannés à l'aide de la caméra FUJI. Les profils successifs issus du scan sont ensuite recalés dans un espace 3D à l'aide d'un script Python puis le nuage de point est épuré manuellement sous GOM Inspect.

Les tapis fabriqués avec le λ le plus grand ($V_f = 8$ m/min, tapis numérotés de 1 à 5) ont une allure régulière pour toutes les distances de juxtaposition et ne présentent pas de défaut au niveau des jonctions entre cordons. En revanche, pour les tapis mettant en œuvre le λ faible ($V_f = 4$ m/min, tapis numérotés de 6 à 10), on observe de nombreux défauts dès lors que la distance de juxtaposition est supérieure à 70% de la largeur du cordon unitaire. Ces irrégularités au niveau des jonctions entre deux cordons adjacents sont ponctuelles et laissent à penser que le second cordon n'est pas lié au premier, il semblerait à ces endroits là qu'il n'y ait pas eu une refonte de la matière

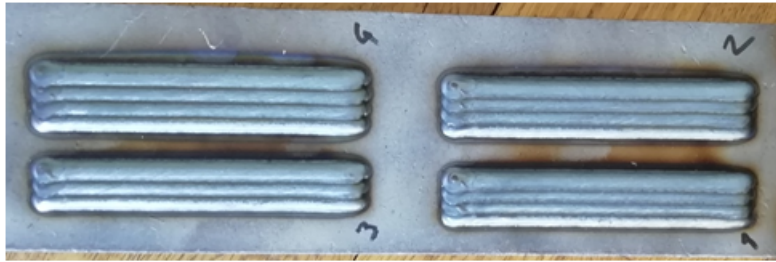


FIGURE 4.8 – Illustrations des tapis fabriqués

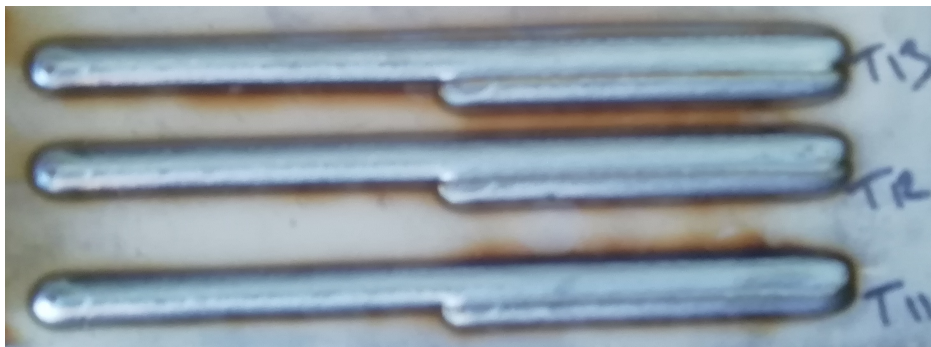


FIGURE 4.9 – Cordons réalisés pour mettre en évidence le phénomène de décalage

du premier cordon pour assurer une jonction uniforme. La figure 4.10 illustre le tapis réalisé avec un λ faible avec la distance de juxtaposition la plus grande (80% de la largeur du cordon seul étendu) où ces défauts sont le plus présent.

Pour les essais supplémentaires liés à l'observation du décalage du centre du cordon, les cordons fabriqués sont réguliers et la jonction ne présente pas en surface de défauts manifestes. A l'œil nu, aucun décalage du centre du second cordon entre la zone où il est adjacent au premier et celle où il est seul n'est perceptible.

2.2 Décalage des cordons

Cette partie porte sur l'analyse des trois essais réalisés pour mettre en évidence le phénomène d'étalement du cordon rapporté dans la littérature. La figure 4.11 illustre la configuration des cordons ainsi générés et les sections des cordons mesurées. Dans la zone 2 où le second cordon est déposé seul, il est mesuré à l'aide de la FUJI en prélevant 10 sections espacées de 5 mm et en moyennant les dimensions mesurées. La section de la seconde partie du cordon 2 est ensuite projetée dans le plan de la section prélevée dans la zone 1 afin de servir de référence. Pour une section de la zone 1, l'association des points du profil du cordon 1 par un modèle polynomial est tout d'abord réalisée. Les dimensions et le milieu du cordon 1 sont ainsi identifiés à partir de l'association obtenue. La distance d_m est définie comme la distance entre le centre du cordon 1 et le centre

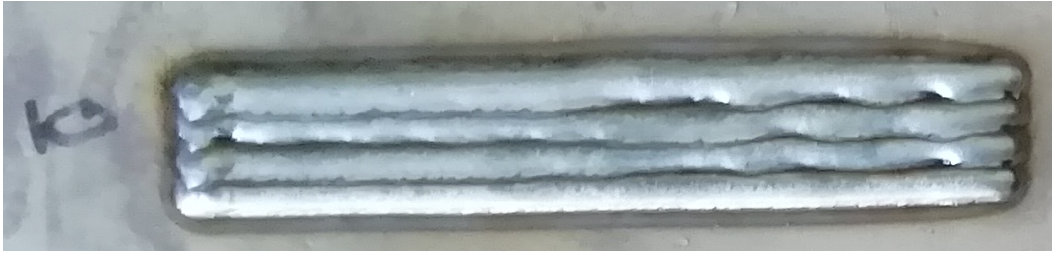


FIGURE 4.10 – Tapis fabriqué avec un λ de 5,33 et une distance de juxtaposition de $0,8 * w$.

de la fin du cordon 2.

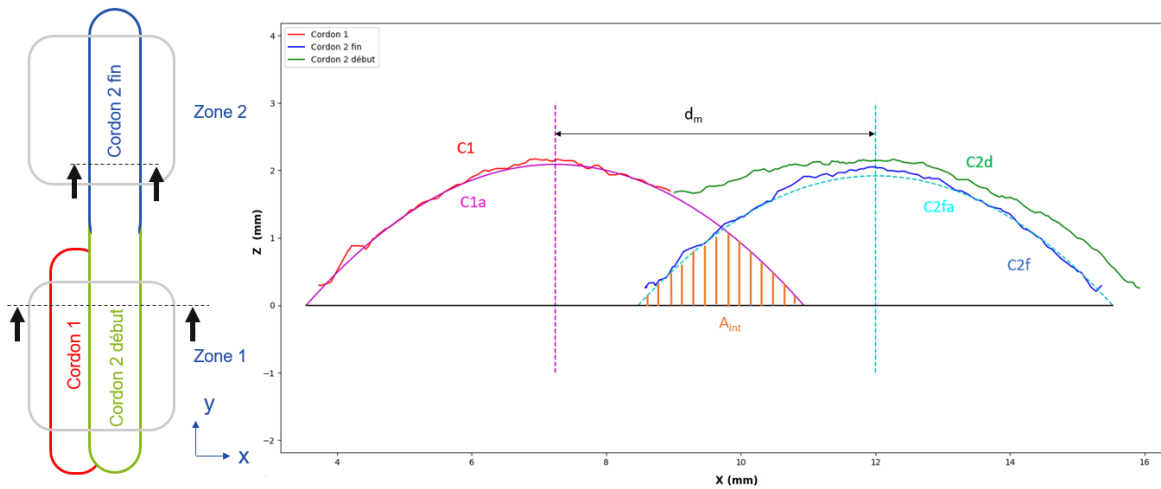


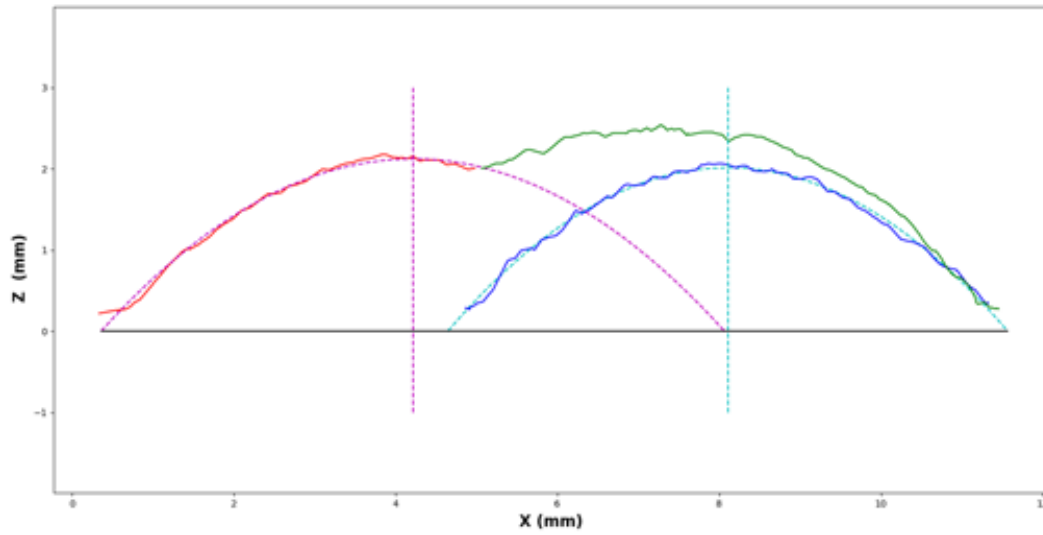
FIGURE 4.11 – Illustration des cordons générés (à gauche) et section mesurée (à droite)

La figure 4.12 illustre l'allure des sections de l'assemblage de cordons pour les 3 essais. Tout d'abord, la ligne moyenne du second cordon ne semble pas se décaler significativement lorsqu'il est juxtaposé par rapport à sa position lorsqu'il est seul. De plus, la position des points de contact des deux parties du second cordon avec le substrat (à droite) est identique pour les deux premiers essais, ce qui ne traduit pas de décalage particulier. Pour le dernier essai, si on considère l'écart observé entre les positions du point de contact des portions du second cordon, le décalage qu'il traduit est dans le sens opposé à celui rapporté dans la littérature. Néanmoins on constate que la répartition de la matière du second cordon lors de la juxtaposition évolue en fonction de la distance programmée entre les deux cordons. En effet, plus la distance de juxtaposition est faible, plus la matière a tendance à s'accumuler et ainsi générer un cordon avec une hauteur plus importante. Cela pourrait s'expliquer par l'augmentation des forces liées à la tension de surface du bain du côté du cordon déjà déposé lorsque la distance de juxtaposition diminue comme le rapportent Li et al. [17].

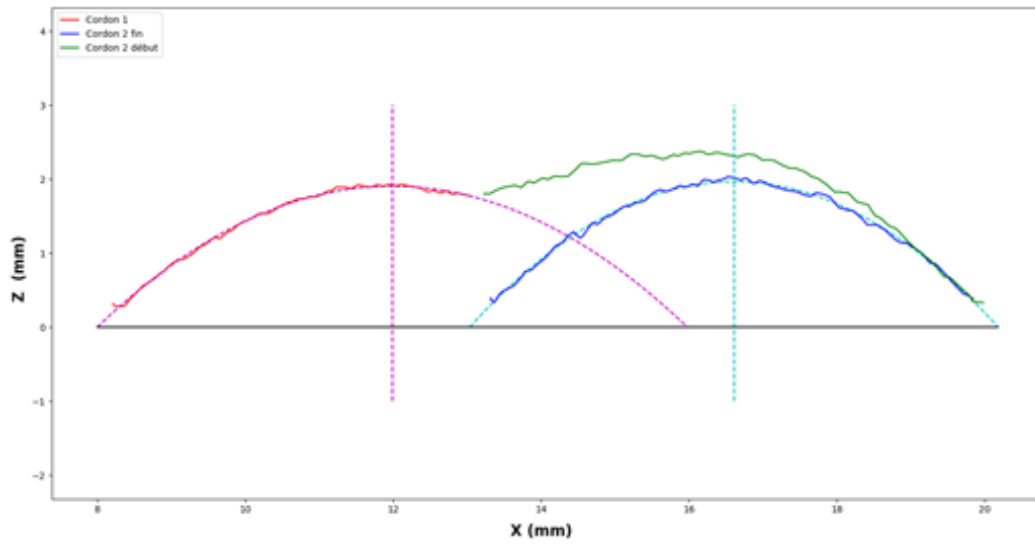
Il est intéressant de comparer l'aire de l'intersection (théorique) du cordon 1 et de la fin du cordon 2 avec l'aire de la partie supérieure du début du cordon 2 comme l'illustre la figure 4.13. La mesure de l'aire de chaque section peut se faire de deux façons :

- A partir d'une association d'un profil : il suffit de calculer l'aire sous le polynôme identifié, ainsi l'aire de la section s'exprime :

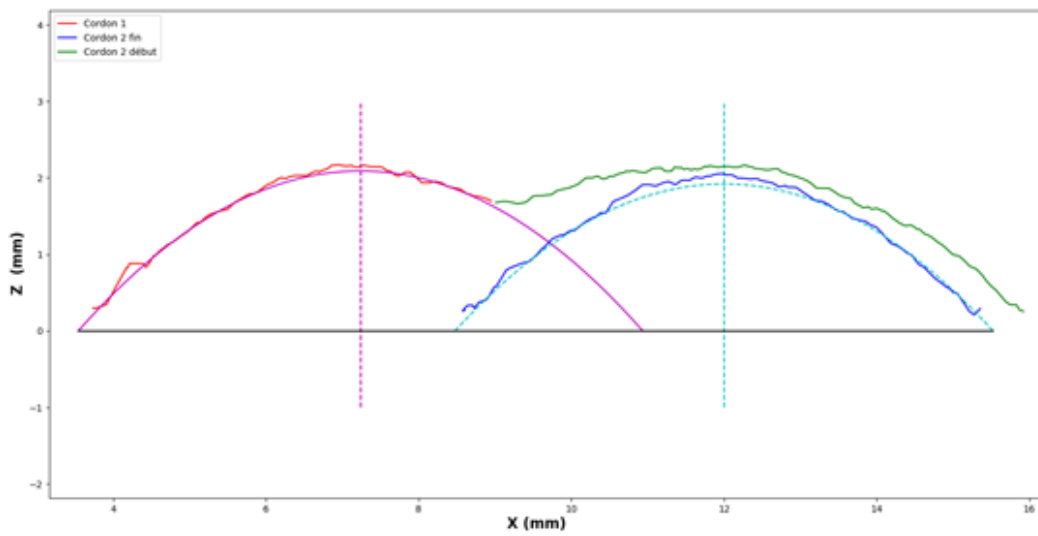
$$A = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} -\frac{4H}{L^2} x^2 + H dx = \frac{2HL}{3}$$



(a) Tapis A , $d = 0,6*w$



(b) Tapis B , $d = 0,7*w$



(c) Tapis C , $d = 0,8*w$

FIGURE 4.12 – Allure des sections prélevées dans les zones 1 et 2 illustrées dans le même plan pour les 3 essais

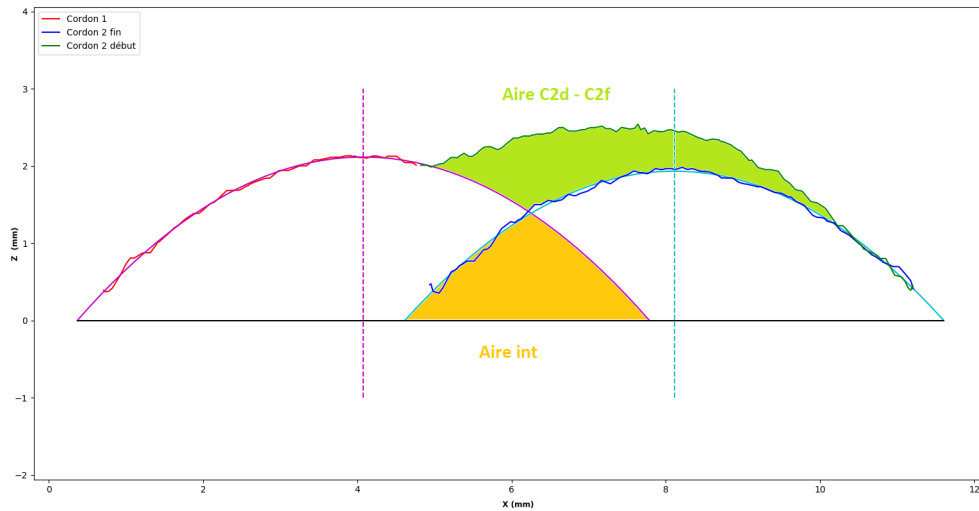


FIGURE 4.13 – Illustration des aires à comparer

- A partir d'un ensemble de points : en l'absence de fonction explicitement identifiée, il est possible d'approximer la surface sous un profil par une somme de Riemann, en l'occurrence la méthode dite des « rectangles à droite », ainsi l'aire A sous le profil f s'exprime :

$$A = \sum_{i=1}^N (x_i - x_{i-1}) \cdot f(x_i)$$

Les aires du cordon 1 et de la fin du cordon 2 sont calculées à partir de l'association de leurs profils respectifs. Les autres aires sont approximées par la somme de Riemann. L'aire des sections du début du cordon 2 est mesurée comme étant l'aire sous le profil des cordons 1 + 2 auquel on soustrait l'aire du cordon 1 calculée à partir du modèle identifié. Le tableau 4.2 récapitule l'ensemble des résultats. On constate naturellement que l'aire d'intersection théorique entre le cordon 1 et la fin du cordon 2 diminue lorsque la distance programmée entre les deux cordons augmente, cependant on ne retrouve pas l'équivalent de cette aire d'intersection lorsque l'on observe l'aire de la partie supérieure du début du cordon 2, noté aire C2d - C2f, la conservation de la matière n'est donc pas assurée. La dernière colonne du tableau montre l'écart relatif ε_A de l'aire C2d - C2f par rapport à l'aire d'intersection. Cela provient très certainement des incertitudes de mesures et des approximations faites tout au long de la méthode de traitement des données de mesures et des calculs d'aire.

L'observation des distances mesurées entre les deux cordons d_m et de leurs écarts relatifs ε_d par rapport à la distance programmée d_{prog} pour les trois essais est quelque peu surprenante. Tout d'abord pour les essais A et C, les valeurs identifiées sont assez loin des valeurs programmées et ensuite l'écart s'inverse pour les deux essais. La définition de la distance d_m est discutable car l'identification du milieu du cordon 1 est faite à partir de l'association d'une partie des points, ce qui la rend forcément moins fiable.

En conclusion, on ne retrouve pas, dans nos conditions expérimentales, ce phénomène d'étalement du cordon sur le précédent comme avaient pu le mettre en lumière Li et al. [17]. Néanmoins on observe une évolution de la géométrie des bains lorsque la distance programmée entre deux cordons change de manière conforme à la littérature.

N°	d_{prog} (mm)	d_m (mm)	ϵ_d (%)	C1a			C2fa			Aire C2d (mm ²)	Aire C1 + C2d (mm ²)	Aire int (mm ²)	Aire C2d - C2f (mm ²)	ϵ_A (%)
				L (mm)	H (mm)	A (mm ²)	L (mm)	H (mm)	A (mm ²)					
A	5,232	4,79	-8,4	7,38	2,06	10,17	7,09	1,92	9,09	10,22	19,72	1,55	1,01	-34,8
B	4,578	4,44	-3,0	7,20	2,02	9,81	7,19	2,00	9,59	10,97	19,22	1,29	1,35	4,7
C	3,924	4,05	3,2	7,21	2,01	9,71	7,17	2,02	9,64	10,94	18,8	1,10	1,26	14,5

TABLEAU 4.2 – Tableau récapitulatif des essais sur l'étalement de cordon

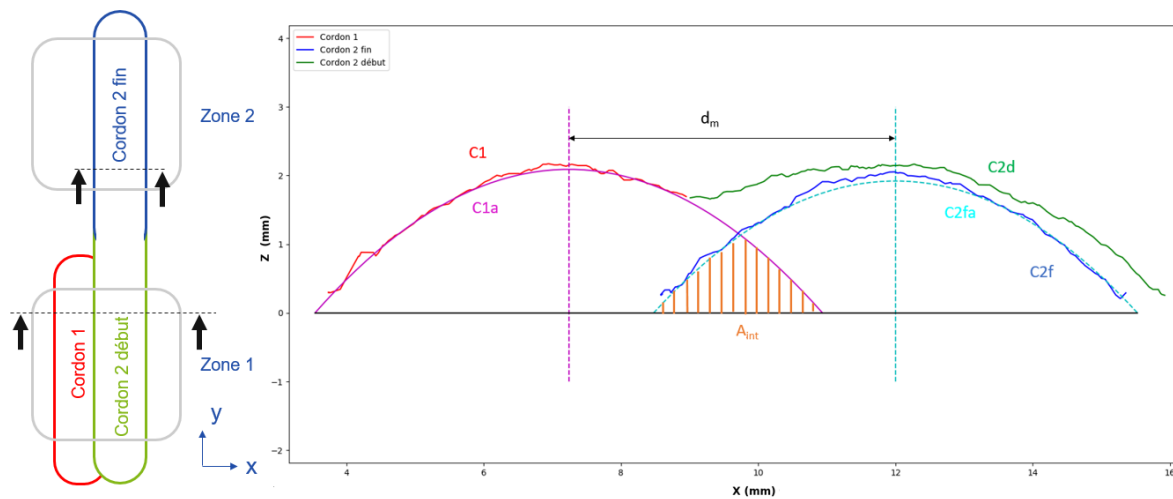


FIGURE 4.14 – Illustration des cordons générés (à gauche) et section mesurée (à droite)

2.3 Observations et Analyses

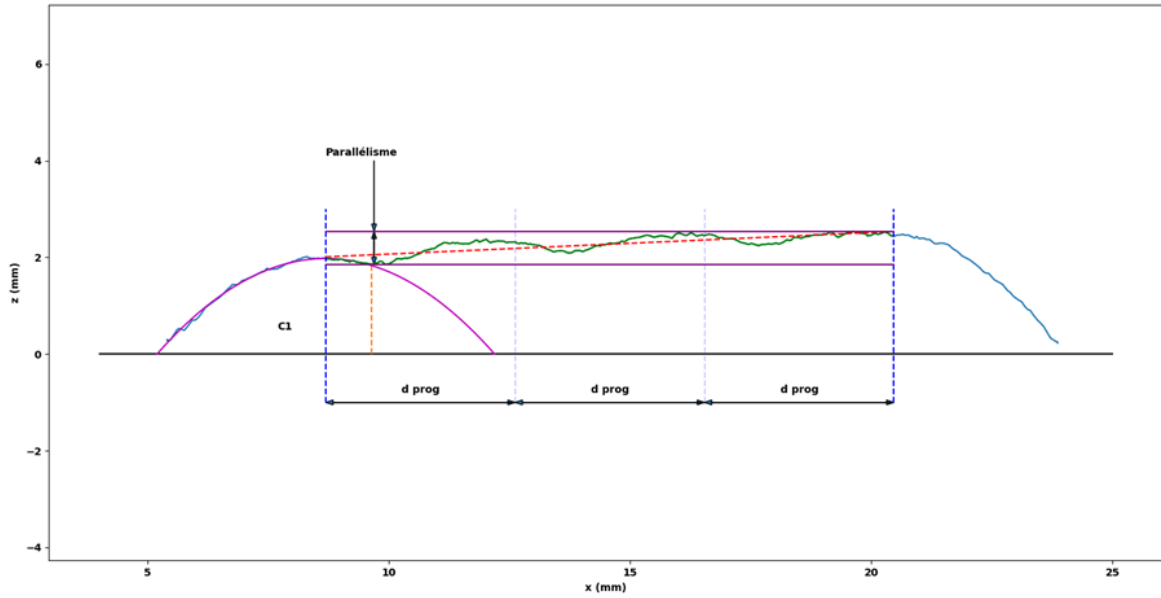
La première analyse menée propose de caractériser la surface supérieure des tapis fabriqués. Pour cela, deux paramètres issus de la spécification ISO, à savoir la planéité et le parallélisme par rapport au plan du substrat sont calculés sur le profil moyen du tapis déterminé sur une zone de 60 mm de longueur au centre des tapis afin de ne pas considérer les cordons dans les zones d'allumage et d'extinction de l'arc électrique. Le calcul de ces paramètres sur le profil moyen a été privilégié au calcul de paramètres surfaciques afin de d'affranchir des distorsions du substrat dues aux contraintes résiduelles dans les cordons déposés.

Le tableau 4.3 synthétise les valeurs calculées de planéité et de parallélisme des profils moyens des différents tapis comme l'illustre la figure 4.15 pour le tapis 1. Naturellement, pour chaque tapis, plus la distance entre cordons est importante, plus les sillons sont profonds. On constate aussi que plus la distance entre cordons est faible, plus la surface supérieure est inclinée. Néanmoins, en se basant exclusivement sur ces deux critères, il est difficile de dire quelle configuration est optimale pour la fabrication de pièce. En effet, la surface optimale visée peut être différente pour une couche intermédiaire où l'on va chercher à avoir une surface facilitant la dépose de la couche suivante ou pour la couche finale où on cherchera plutôt une surépaisseur constante en vue de la phase d'usinage si cette dernière est fonctionnelle.

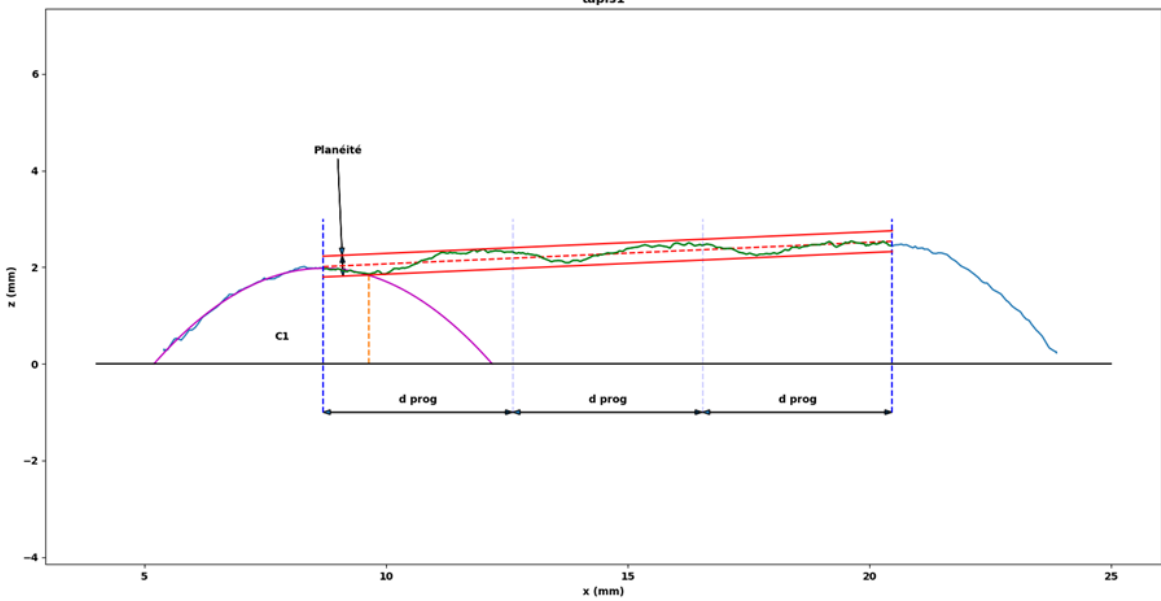
Afin d'étudier quelle configuration de paramètres est la plus optimale pour assembler des cordons, une modélisation est proposée ici tout d'abord pour la première couche à partir d'un substrat plan puis ensuite pour les couches suivantes à partir des couches déjà modélisées. Le modèle proposé reste en deux dimensions. L'objectif de la modélisation de l'assemblage de cordons est d'une part de prédire la géométrie à fabriquer et d'autre part de détecter d'éventuelles dérives de la géométrie globale au fur et à mesure des couches.

Tapis	d (mm)	λ	Mesurée (mm)		Simulée (mm)	
			Planéité	Parallélisme	Planéité	Parallélisme
1	$0,6*w$	10,67	0,36	0,61	0,63	0,69
2	$0,66*w$		0,36	0,47	0,62	0,64
3	$0,7*w$		0,41	0,49	0,66	0,75
4	$0,738*w$		0,47	0,46	0,68	0,75
5	$0,8*w$		0,71	0,69	0,86	0,86
6	$0,6*w$	5,33	0,44	0,50	0,58	0,7
7	$0,66*w$		0,30	0,31	0,48	0,5
8	$0,7*w$		0,55	0,53	0,46	0,52
9	$0,738*w$		0,56	0,56	0,51	0,58
10	$0,8*w$		0,45	0,43	0,53	0,56

TABEAU 4.3 – Critères de planéité et de parallélisme calculés sur les sections moyennes pour les essais de tapis



(a) Parallélisme sur le profil moyen du tapis 1



(b) Planéité sur le profil moyen du tapis 1

FIGURE 4.15 – Illustration des critères de parallélisme et de planéité calculés sur le profil moyen du tapis 1

2.4 Modélisation de la juxtaposition

La modélisation de l'assemblage de cordons proposée ici repose exclusivement sur des considérations géométriques et l'évaluation de la qualité de la modélisation est faite par comparaison avec les essais expérimentaux. L'assemblage de cordons est défini ici comme l'empilement et/ou la juxtaposition de cordons.

Les principales hypothèses de la modélisation plane consistent d'une part à approximer le cordon déposé par un polynôme de degré 2 et d'autre part à conserver l'aire de la section du cordon. Cependant, la seule équation de conservation de l'aire de la section ne suffit pas pour déterminer les trois coefficients du polynôme que l'on cherche à identifier et donc d'autres hypothèses sont nécessaires afin de résoudre le problème. Deux approches sont envisageables :

- Soit on présuppose la forme du polynôme : en d'autres termes cela revient à fixer les coefficients a et b du polynôme
- Soit on détermine deux points par lesquels passe le nouveau cordon. Ainsi on dispose de deux équations supplémentaires à vérifier pour déterminer les 3 coefficients du polynôme.

Ces deux choix d'hypothèses sont considérés ici selon la configuration du cordon déposé par rapport à ce sur quoi il s'appuie que ce soit un substrat plan ou des cordons précédents.

La situation de juxtaposition de cordons est rencontrée lorsque l'on dépose au moins 2 cordons sur la même couche. La figure 4.16 illustre une situation de juxtaposition. Dans cette situation le cordon déposé (C7) s'appuie sur le cordon précédent de la couche en cours (C6) et sur les cordons de la couche précédente (C3 et C4). Lorsqu'il s'agit de la première couche, le cordon est déposé directement sur le substrat (le plus souvent plan). Ici, on suppose que l'on connaît deux points par lesquels passe le polynôme. Ces deux points, d'abscisse x_1 et x_2 , sont identifiés comme étant l'intersection entre le profil généré à l'étape précédente et le cercle de rayon de la demi largeur du cordon seul équivalent et ayant pour centre le point du profil de la couche précédente au niveau de la trajectoire programmée (en orange).

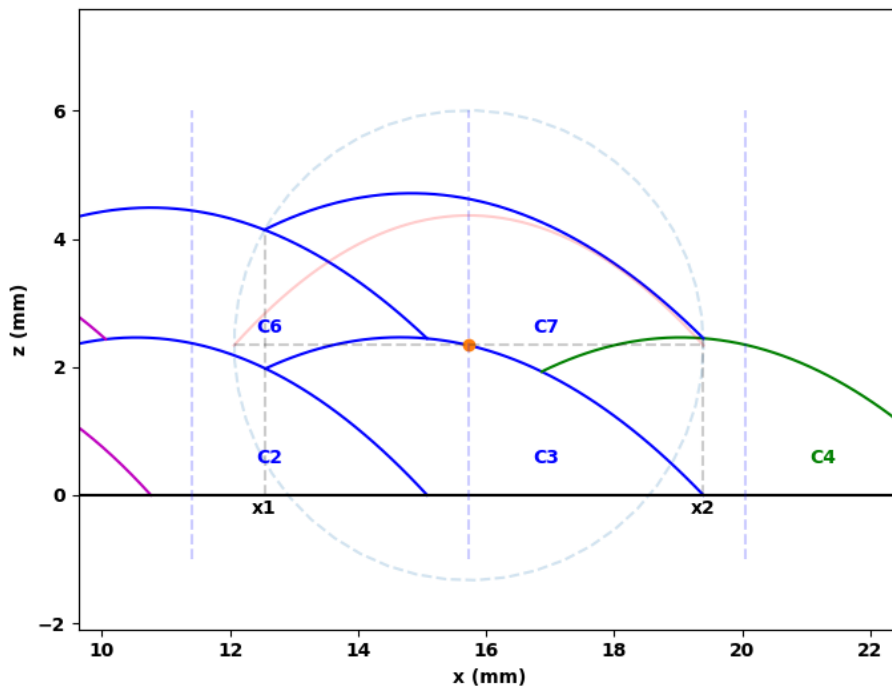


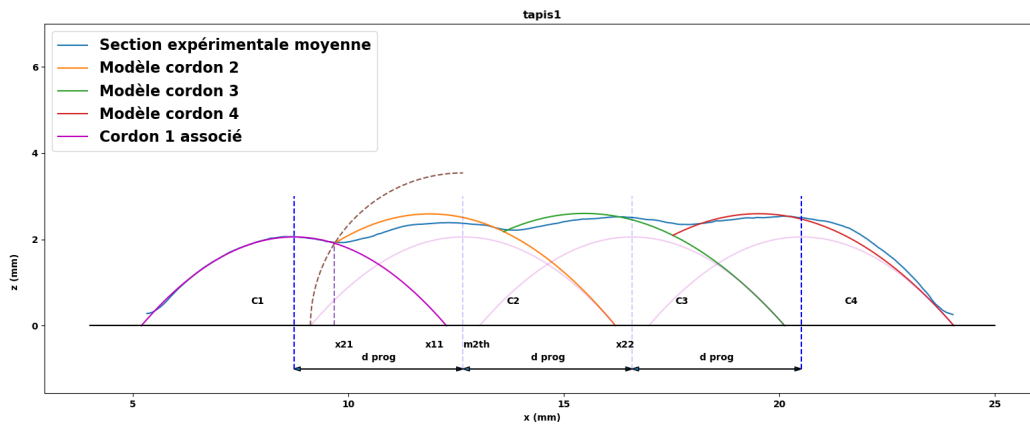
FIGURE 4.16 – Illustration d'un cas de juxtaposition lors de la modélisation d'assemblage de cordon

L'identification de ces deux points permet d'avoir deux équations supplémentaires afin de déterminer les coefficients du polynôme du nouveau cordon. Avec l'équation de conservation de l'aire le système d'équation pour la détermination du cordon 7, par exemple, comme l'illustre la figure 4.16, s'exprime :

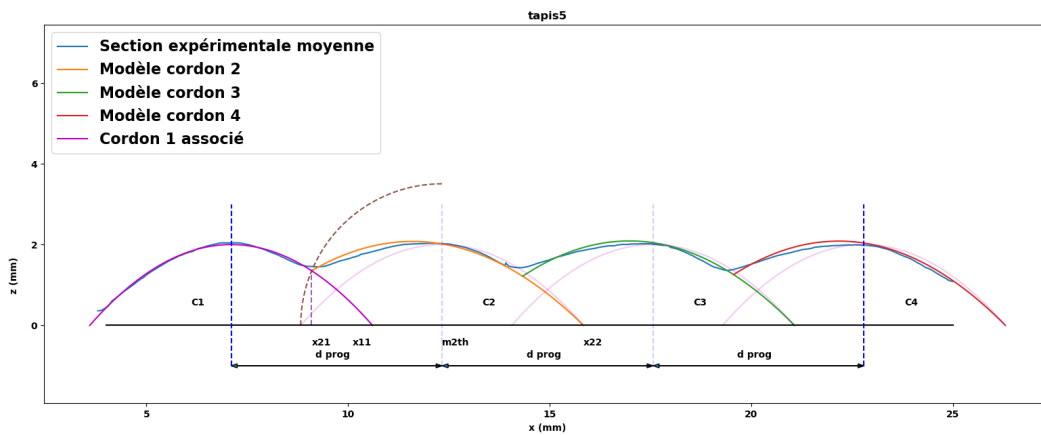
$$\begin{cases} a_7 \cdot x_1^2 + b_7 \cdot x_1 + c_7 = p_6(x_1) \\ a_7 \cdot x_2^2 + b_7 \cdot x_2 + c_7 = p_4(x_2) \\ \frac{a_7}{3} \cdot (x_2^3 - x_1^3) + \frac{b_7}{2} \cdot (x_2^2 - x_1^2) + c_7 \cdot (x_2 - x_1) = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{-c_1}{a_1}} \cdot c_1 + A(x_1, x_2) \end{cases}$$

avec a_7, b_7 et c_7 les coefficients du polynômes du cordon 7, x_1 et x_2 les abscisses des points d'intersection du cercle avec le profil déjà existant, $p_i(x_j)$ l'évaluation du polynôme i au point d'abscisse x_j et $A(x_1, x_2)$ l'aire sous le profil déjà existant entre les points x_1 et x_2 .

Le modèle proposé permet de simuler l'assemblage de cordons au sens où il est possible de les empiler et de les juxtaposer. Ce modèle est tout autant valable pour modéliser la dépose de la première couche que pour les suivantes. Avant de traiter les données expérimentales d'un assemblage de cordons sur plusieurs couches, on se propose de comparer la modélisation avec les tapis réalisés.

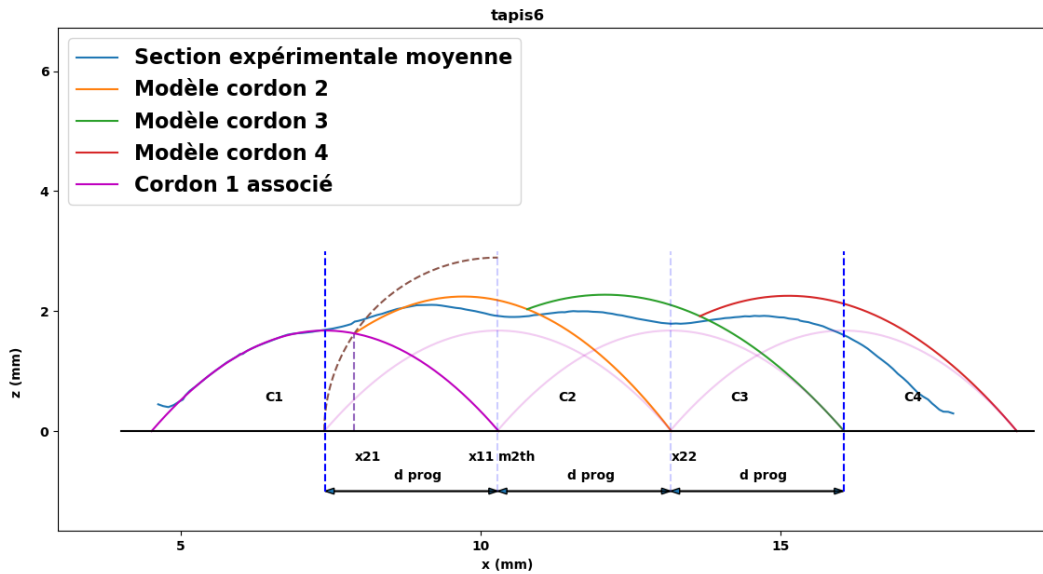


(a) Tapis 1, $d = 0,6 \cdot w$, $\lambda = 10,67$

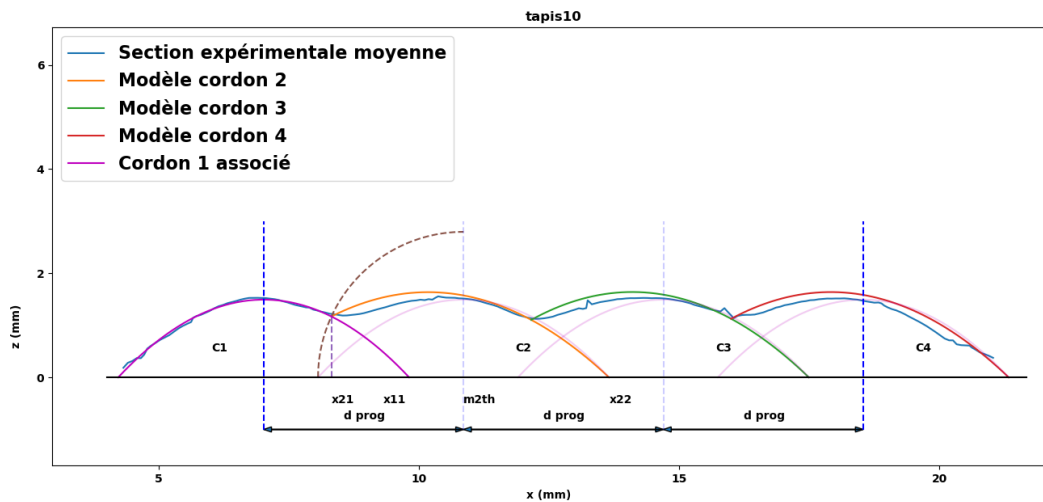


(b) Tapis 5, $d = 0,8 \cdot w$, $\lambda = 10,67$

FIGURE 4.17 – Modélisation des tapis pour les distances de juxtaposition extrêmes pour un ratio λ de 10,67



(a) Tapis 6, $d = 0,6*w$, $\lambda = 5,33$



(b) Tapis 10, $d = 0,8*w$, $\lambda = 5,33$

FIGURE 4.18 – Modélisation des tapis pour les distances de juxtaposition extrêmes pour un ratio λ de 5,33

Les figures 4.17 et 4.18 illustrent les modélisations des tapis pour les valeurs extrêmes de d et pour les deux valeurs de λ mises en œuvre. Ici les cordons seuls équivalents représentés sur les figures en magenta sont identifiés sur la portion visible du premier cordon de chaque tapis. Cela permet « d'étalonner » le modèle en fixant les dimensions et tout particulièrement l'aire de chaque cordon déposé.

Globalement, la modélisation effectuée avec les hypothèses détaillées précédemment produit des cordons dont l'allure est plutôt satisfaisante. On constate que pour les essais où la distance entre cordons est plus importante, la modélisation est plus proche des données expérimentales. Cela s'explique par le fait que l'identification du premier cordon permettant de fixer les dimensions du cordon seul équivalent est plus précise puisque la portion visible est plus grande. De manière similaire aux profils des tapis expérimentaux, les critères de planéité et de parallélisme des profils simulés sont calculés et rapportés tableau 4.3. Globalement, l'évolution de ces critères suivent la même tendance que pour les profils mesurés. Cependant, la planéité et le parallélisme des surfaces simulées sont nettement supérieures à celles mesurées. En effet, le creux des vallées entre chaque cordon est nettement plus marqué dans les simulations que sur les profils mesurés.

De plus, pour les distances de juxtaposition des plus faibles, les cordons simulés ont tendance à être plus haut que les cordons mesurés. En somme la modélisation ne semble pas aberrante mais demande de bien connaître les dimensions des cordons seuls équivalents.

2.5 Synthèse

Avec cette campagne dédiée à l'étude de la juxtaposition de cordons sur un substrat plan, l'influence de la topologie des cordons fabriqués et de la distance entre ceux-ci a pu être observée. Lorsque le cordon est peu bombé, il est préférable de privilégier une distance de juxtaposition faible pour éviter tout défaut de jonction. Les topologies de cordons plus bombées semblent assurer des jonctions sans défaut en surface pour des distances plus grandes. De plus, aucun effet de décalage marqué des cordons n'a pu être mis en évidence pour notre configuration expérimentale lors de la juxtaposition. Enfin, l'étude ici se concentre sur la juxtaposition de cordons sur un substrat plan, en pratique cette situation correspond à la fabrication de la première couche ce qui est peu représentatif de l'assemblage de cordons à l'échelle d'une pièce entière. Ainsi, même si la géométrie de la surface supérieure a pu être caractérisée, il est difficile de déterminer laquelle est à privilégier pour minimiser l'apparition de défauts et permettre le bon déroulement de la fabrication au fur et à mesure des couches. C'est pourquoi il est nécessaire de s'intéresser à l'empilement de cordons et d'étudier le dépôt de matière sur une géométrie antérieure quelconque, ce qui fait l'objet de la partie suivante.

3 Empilement/Assemblage de cordons

L'assemblage de cordons est au cœur du processus de fabrication en WAAM qu'il est nécessaire de maîtriser pour garantir la fabrication d'entité de manière satisfaisante. L'étude proposée dans cette partie se concentre donc sur l'empilement et plus largement l'assemblage (empilement et juxtaposition) de cordons au travers d'expérimentations menées et des observations associées à la fabrication d'artefacts élémentaires. La démarche consiste à fabriquer ces artefacts avec la même instrumentation que celle présentée précédemment afin de pouvoir observer le comportement géométrique de la pièce et le comportement du système au cours de la fabrication. Les données expérimentales ainsi générées sont ensuite traitées pour mettre en évidence ces comportements et servir de base de comparaison à l'élaboration d'un modèle d'assemblage de cordons.

3.1 Expérimentations

Les géométries retenues sont des parallélépipèdes droits, donc des géométries prismatiques, qu'il est possible de ramener dans le plan, ce qui est plus simple à manipuler et cohérent avec les modèles abordés dans la littérature. Malgré la simplicité des géométries ciblées, il est possible d'envisager pour des murs nécessitant de déposer plusieurs cordons par couche de nombreuses variantes de trajectoires en jouant sur l'ordre de dépose des cordons pour un même type de trajectoire.

Trois essais sont réalisés ici à savoir un mur fin destiné à étudier uniquement l'empilement de cordons et deux murs épais mettant en œuvre deux ordres de dépose des cordons de chaque couche différents pour étudier l'assemblage de cordons de manière plus générale.

3.2 Mur mono-cordon

Ce premier essai a pour objectif d'étudier l'empilement seul et consiste à superposer des mono-cordons rectilignes de 150 mm de longueur les uns sur les autres. Le mur a été fabriqué avec une vitesse fil programmée de 8 m/min. Le générateur a automatiquement associé en fonction du gaz d'inertage (Arcal M14 : Ar + O₂ 1 % +CO₂ 3 %) et de la nature du fil utilisé (diamètre 1,0 mm : EN 12534 :1999 G 89 6 M Mn4Ni2CrMo) une tension programmée de 17,15 V et une intensité de 165 A. La stabilisation de pénétration est réglée à ± 2 m/min et la stabilisation de longueur d'arc à 0 (désactivée). La vitesse d'avance du robot est programmée à 0,75 m/min, ainsi le cordon attendu a une largeur d'environ 7 mm et une hauteur de 2 mm. Sur la base de retours d'expériences, la distance entre chaque couche est fixée à 60% de la hauteur du cordon unitaire seul sur un substrat plan soit $\Delta h = 1,2$ mm dans l'objectif de maintenir une distance entre le tube contact et la pièce de 15 mm tout au long de la fabrication. Afin de limiter la propagation des défauts liés à l'allumage et l'extinction de l'arc, le sens des cordons est alterné entre chaque couche comme l'illustre la figure 4.19. Le mur est composé de 25 couches ce qui correspond à une hauteur attendue de 30 mm environ. Tout au long de la fabrication, la position du robot a été relevée ainsi que l'évolution des grandeurs électriques et de la vitesse fil délivrées par la source. La géométrie du mur a pu être numérisée après les cinq premières couches puis pour toutes les couches impaires au cours de la fabrication afin d'avoir une image des géométries intermédiaires successives et de pouvoir évaluer a posteriori l'évolution de la distance entre le tube contact et la pièce.

La fabrication de ce mur mono cordon est interrompue après la 22^{ème} couche car la distance entre le tube contact et la pièce est jugée trop faible ce qui représente un risque de collision. Cela implique que la distance programmée Δh entre chaque couche n'est pas appropriée pour ces paramètres procédé et demande à être revue à la hausse dans ce cas. Le mur fabriqué est illustré figure 4.20. On constate que malgré la décroissance critique de la distance tube contact pièce, l'allure générale du mur est globalement régulière et le mur ne présente pas d'effondrement ce qui

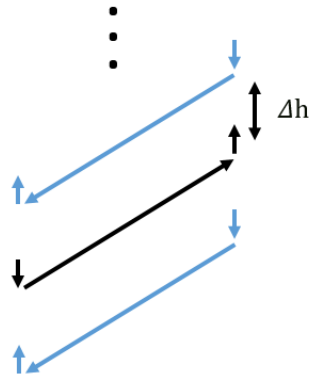


FIGURE 4.19 – Schéma de la trajectoire mise en œuvre pour la fabrication de mur fin

laisse à penser qu'avec une meilleure gestion de la distance tube contact/pièce, il aurait été possible d'empiler l'ensemble des 25 couches prévues et certainement plus. Néanmoins on constate quelques irrégularités aux extrémités, principalement liées aux allumages et arrêts d'arc, mais aussi au milieu du mur avec l'apparition de bourrelets créant ainsi ces ondulations sur les flans du mur final. On constate aussi que la hauteur du mur n'est pas uniforme sur toute sa longueur où son altitude est plus faible aux extrémités qu'au centre.



FIGURE 4.20 – Mur fin fabriqué

3.3 Murs épais

La fabrication de murs épais a pour objectif d'étudier l'assemblage de cordons de manière plus générale par rapport au mur fin qui reste un cas particulier. La configuration de paramètres utilisée pour fabriquer ces deux murs est la même que celle utilisée pour le mur fin ainsi le cordon unitaire attendu est le même. Les murs sont constitués de 25 couches et pour maintenir une distance entre le tube contact et la pièce constante de 15 mm tout au long de la fabrication, la distance entre chaque couche est fixée à $\Delta h = 1,85$ mm soit 92,5% de la hauteur du cordon unitaire seul attendu. La nécessité de déposer plusieurs cordons par couche offre plusieurs alternatives dans l'ordre de dépôt des cordons au sein d'une même couche, c'est pourquoi deux murs fabriqués avec deux trajectoires différentes sont proposés. Le premier mur met en œuvre une trajectoire de type « raster » où le premier cordon de chaque couche est empilé sur le premier cordon de la couche précédente, il en va de même pour les autres cordons. Afin de limiter la propagation des défauts liés à l'allumage et l'arrêt de l'arc très fréquents ici, le sens de dépôt des cordons est alterné à chaque

couche. Le second mur est quant à lui fabriqué avec une trajectoire de type « contouring » de l'intérieur vers l'extérieur. Ainsi au milieu du mur un séquençage des cordons alternatif est proposé par rapport à une trajectoire de type raster. La trajectoire, identique pour toutes les couches, est constituée de quatre rectangles dont la continuité est assurée par un segment dans un des coins. Pour ces deux trajectoires la distance de juxtaposition d entre deux cordons adjacents est fixée à 66% de la largeur du cordon seul attendu. La figure 4.21 schématise les trajectoires des murs épais. Au cours de la fabrication, chaque couche du mur raster a été numérisée et pour le mur en contouring les cinq premières couches puis toutes les couches impaires ont été numérisées.

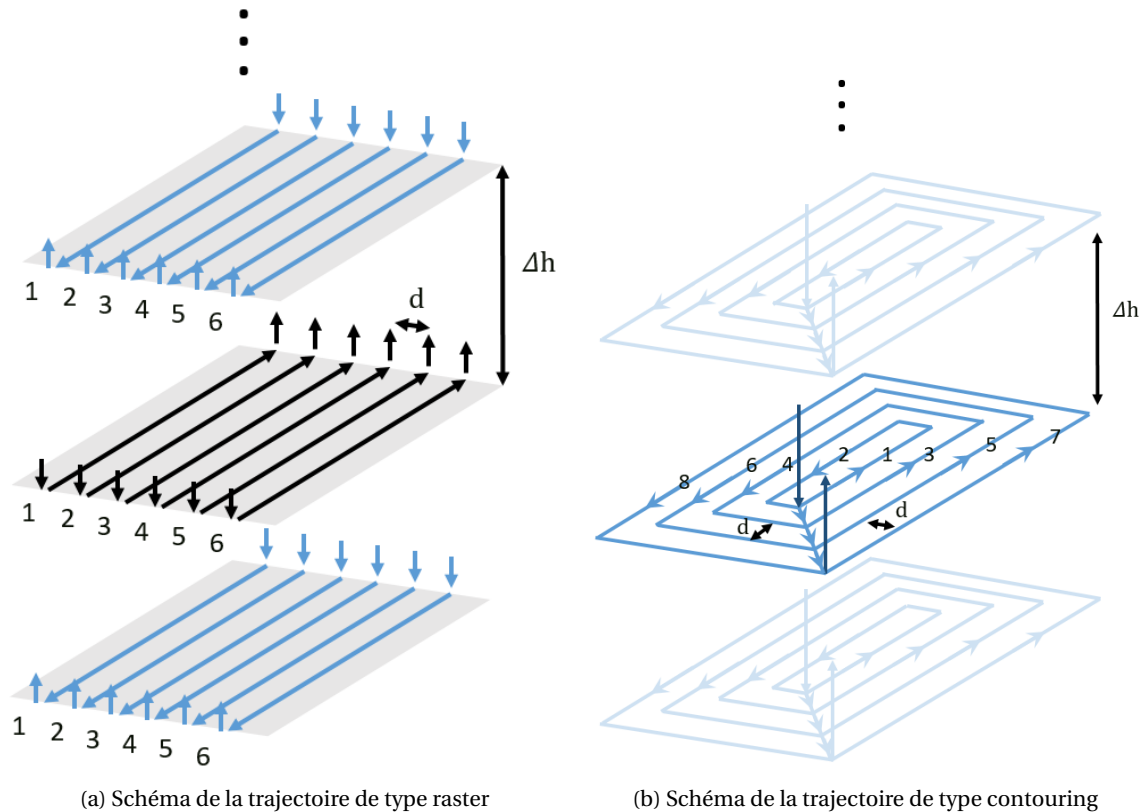
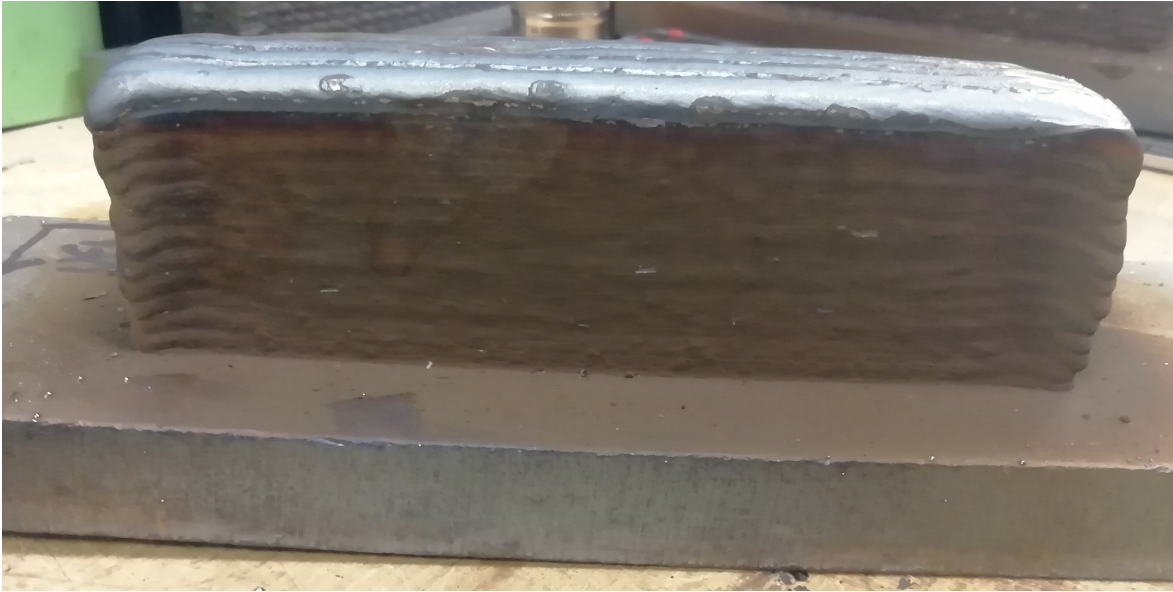
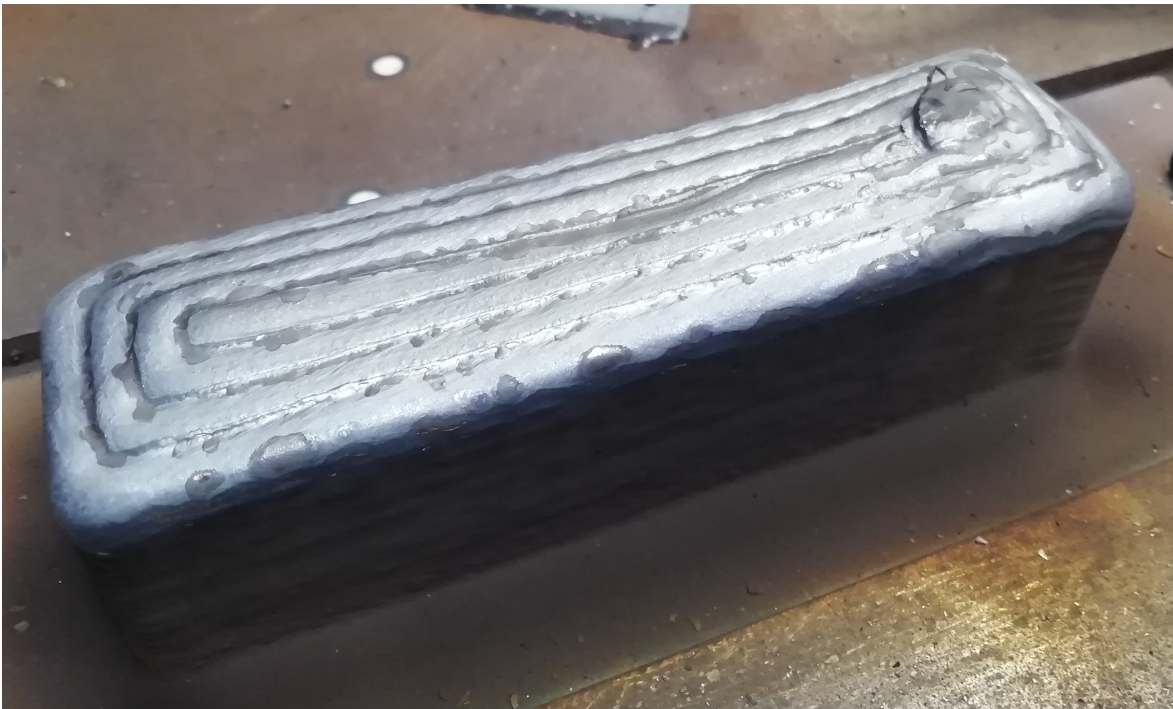


FIGURE 4.21 – Schéma des trajectoires mises en œuvre pour la fabrication de murs épais

La figure 4.22 illustre les deux murs épais fabriqués. L'allure générale des deux murs est plutôt régulière même si l'on constate un affaissement des bords sur le mur raster que ne présente pas le mur en contouring. Il est à noter que la fabrication du mur contouring a été interrompue après la 20^{ème} couche car là encore la distance entre le tube contact et la pièce est devenue trop faible ce qui présentait un risque de collision. Aussi on remarque sur cette 20^{ème} couche un défaut vraisemblablement lié au décrochage d'une accumulation de particules au niveau de la buse de la torche. Malgré la superposition des allumages et arrêts d'arc et des segments de jonction entre chaque contour, la zone concernée présente une accumulation relativement peu importante. Au niveau des autres coins des contours, les jonctions des cordons semblent correctes en surface et ne présentent pas de lacunes.



(a) Mur fabriqué avec la trajectoire de type raster



(b) Mur fabriqué avec la trajectoire de type contouring

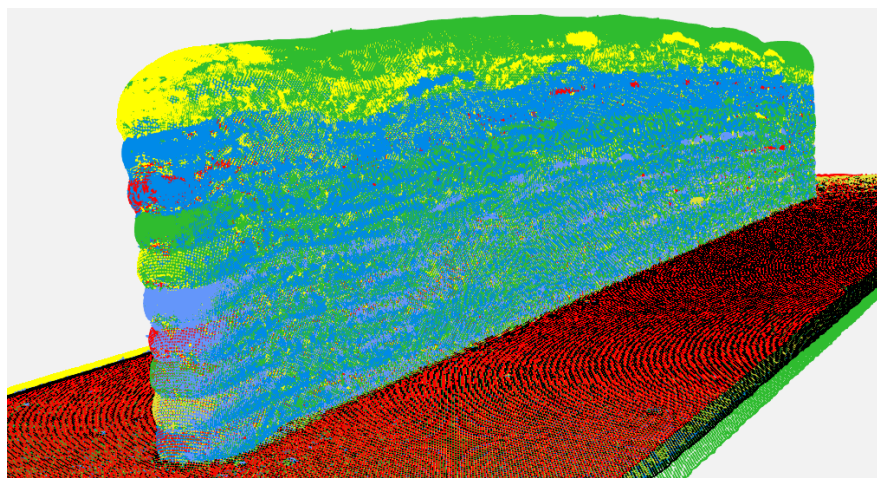
FIGURE 4.22 – Murs épais fabriqués

3.4 Traitement des données expérimentales et analyses

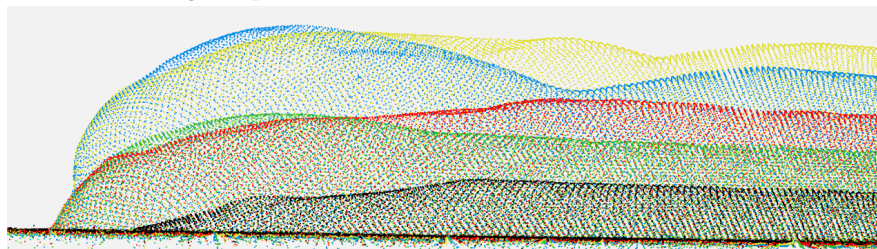
3.4.1 Mur mono-cordon

Comme évoqué précédemment, les géométries intermédiaires des murs ont été numérisées au cours de la fabrication. Par exemple la figure 4.23a illustre l'ensemble des couches numérisées lors de la fabrication du mur mono-cordon, à savoir les cinq premières couches puis toutes les couches impaires. L'observation de ces nuages de points permet d'avoir des renseignements sur l'évolution de la géométrie du mur qui n'est plus observable à posteriori puisque la fabrication est terminée. La figure 4.23b illustre les nuages de points des cinq premières couches à une extrémité du mur. Au niveau de cette extrémité, compte tenu de la stratégie mise en œuvre, on observe la fin

du premier, troisième et cinquième cordon (respectivement de couleur noir, rouge et jaune) et le début du deuxième et quatrième cordon (respectivement de couleur vert et bleu). On constate que les nuages de points s'intersectent à leurs extrémités, ce qui traduit le fait que l'altitude du mur est plus faible au niveau de l'extinction de l'arc après avoir déposé la couche en question qu'avant. Cela est dû à la refonte partielle de la couche précédente lors du dépôt de la couche actuelle. Cela illustre aussi le fait qu'il y ait vraisemblablement des mouvements longitudinaux de matière à l'état liquide au niveau du bain. Il est possible que l'on rencontre ces mouvements de matière ailleurs dans le mur mais cela n'est pas mis en évidence ici. Au milieu du mur les cordons ont une allure régulière une fois la zone d'allumage/d'extinction de l'arc passée. Enfin on note d'occasionnelles variations significatives de la géométrie du mur juste après la zone d'allumage comme, par exemple, sur la numérisation de la quatrième couche (en bleu sur la figure 4.23b) mais ces variations ne semblent pas se propager couche après couche et altérer la géométrie globale du mur.



(a) Nuages de points des couches numérisées du mur mono cordon



(b) Zoom sur les nuages de points des 5 premières couches du mur mono cordon

FIGURE 4.23 – Numérisation du mur mono cordon

Afin d'évaluer à posteriori la distance moyenne entre le tube contact et la pièce lors du dépôt de chaque couche, la section moyenne de chacune de ces couches est calculée, dans une zone d'intérêt choisie arbitrairement pour se positionner loin des zones d'allumage et d'extinction de l'arc, en utilisant comme méthode de régression locale la méthode LOWESS (Locally weighted scatterplot smoothing) [71]. La figure 4.24 illustre la section du mur après chaque couche où la numérisation est disponible. La hauteur de la trajectoire programmée mise en œuvre pour déposer chacun des cordons numérisés est représentée par la ligne horizontale de la même couleur.

La distance entre le tube contact et la pièce est calculée par rapport à l'altitude maximale de la section moyenne de la couche précédente. La figure 4.25 illustre l'évolution de la distance entre le tube contact et la pièce calculée a posteriori de la fabrication. La distance tube contact/pièce décroît au fur et à mesure de la fabrication et n'est à sa valeur programmée (15 mm) que pour le premier cordon.

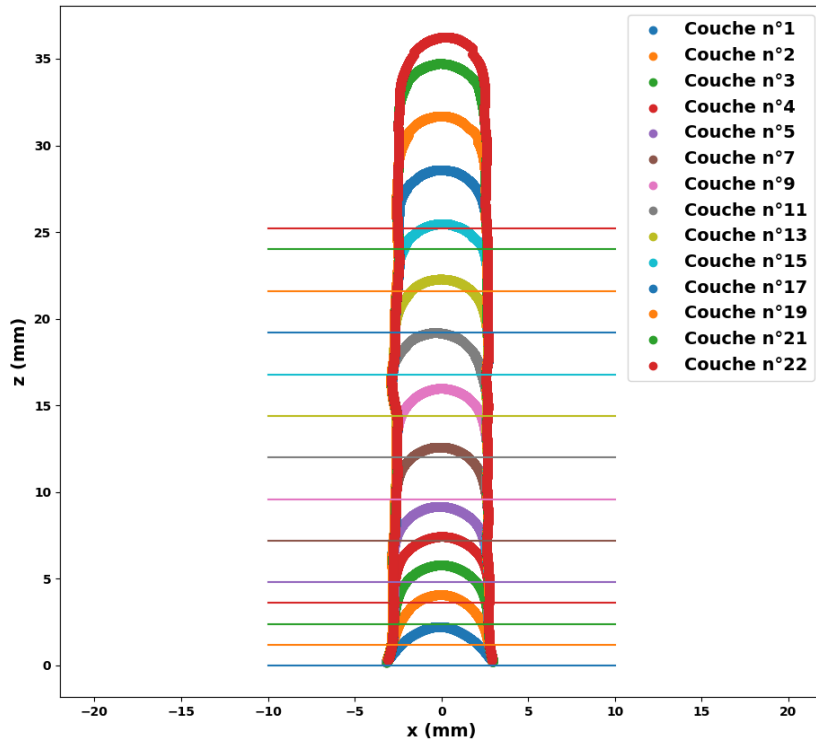


FIGURE 4.24 – Sections moyennes du mur mono cordon avec la hauteur programmée de la trajectoire

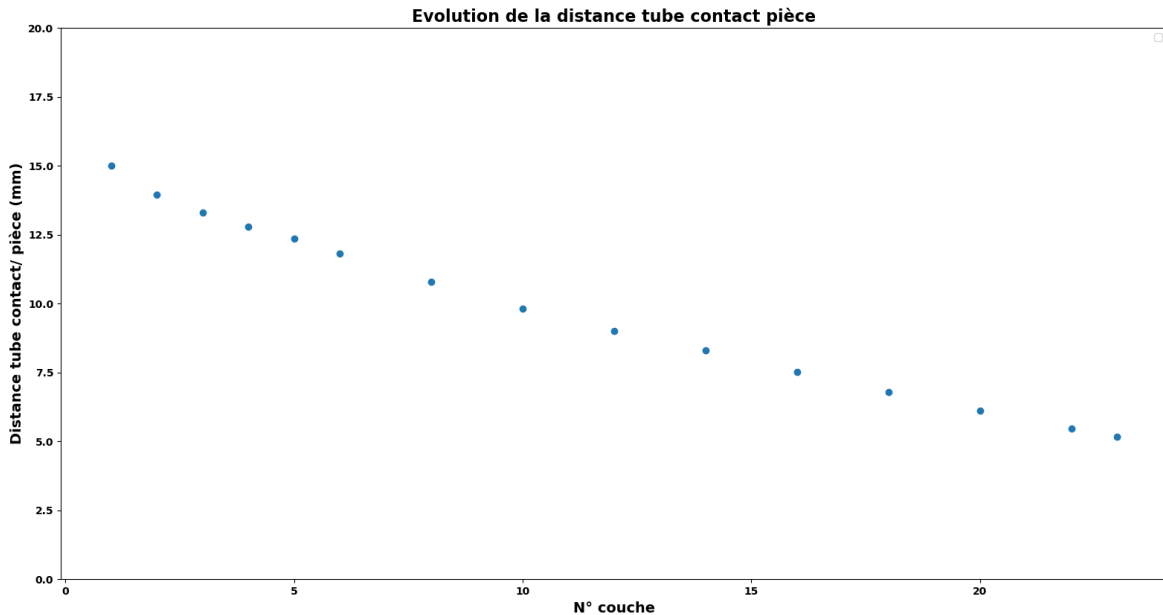


FIGURE 4.25 – Évolution de la distance entre le tube contact et la pièce

La figure 4.26 illustre l'évolution de la vitesse fil moyenne au fur et à mesure de la dépose de chaque couche. On constate d'une part que la vitesse fil est très largement supérieure à la vitesse fil programmée en particulier pour la première couche où les conditions expérimentales sont normalement les mieux maîtrisées. D'autre part on constate que la vitesse fil décroît à mesure que le mur grandit et atteint à peine la vitesse programmée à la 22^{ème} couche où la fabrication a ensuite été interrompue afin d'éviter une collision, la distance entre le tube contact et la pièce ayant été

jugée trop faible. Il semblerait que la synergie utilisée ne soit pas tout à fait adaptée au matériau employé. Les synergies disponibles dans la source sont développées par le fabricant pour un matériau et un gaz donné.

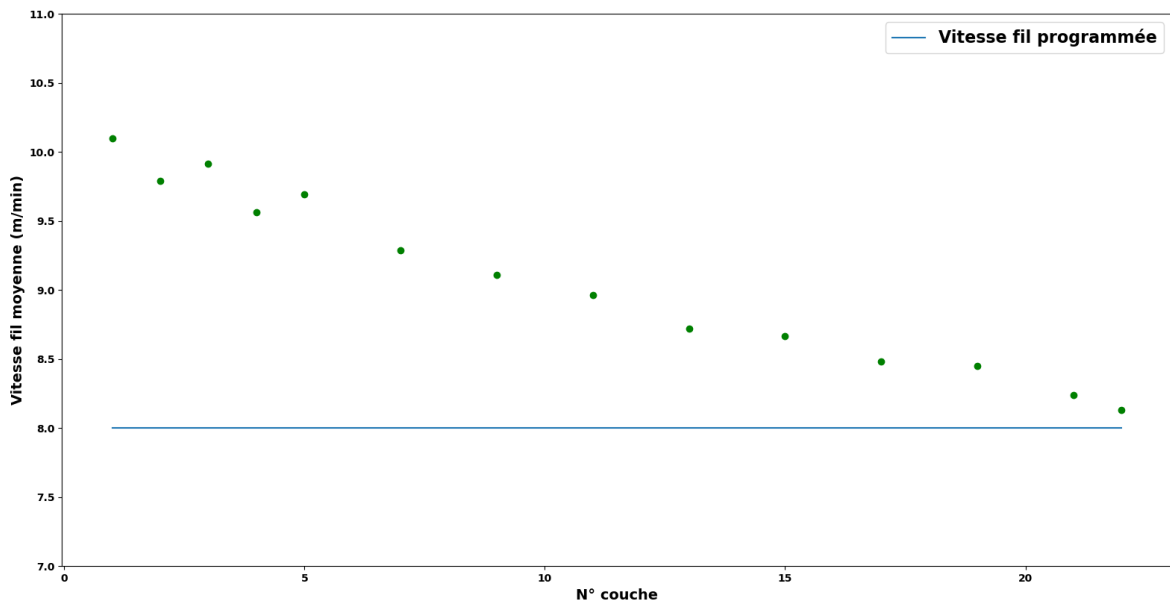


FIGURE 4.26 – Évolution de la vitesse fil moyenne au cours de la fabrication

La figure 4.27 illustre l'évolution de la tension et de l'intensité au cours de la fabrication. On constate qu'au fur et à mesure que la distance entre le tube contact et la pièce diminue, la tension a tendance à décroître tandis que l'intensité a tendance à augmenter. Là encore on constate que l'intensité mesurée est nettement supérieure à la valeur programmée de 165 A associée à une vitesse fil programmée de 8 m/min.

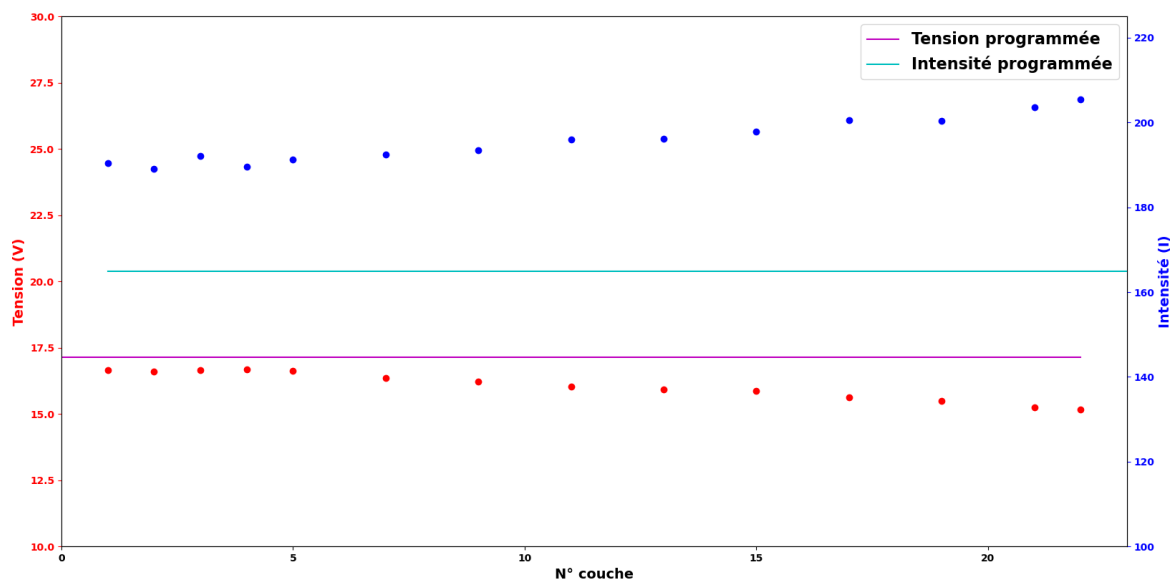


FIGURE 4.27 – Évolution de la tension et de l'intensité

Le tableau 4.4 quantifie les variations observées pour chaque grandeur entre la première et la dernière couche. On constate que les variations de tension et d'intensité sont à peu près du même

	1 ^{ère} Couche	22 ^{ème} Couche	Variation	Programmée
Vitesse fil (m/min)	10,10	8,13	- 20 %	8,0
Tension (V)	16,65	15,17	- 8,8 %	17,15
Intensité (A)	190	205	+ 7,9 %	165
DTCP (mm)	15	5,47	- 64 %	15,0

TABLEAU 4.4 – Variations des différentes grandeurs entre la 1^{ère} et 22^{ème} couche

ordre de grandeur et de plus ou moins 8%. Dans l'interprétation des données, si l'on considère que l'intensité et la tension restent constantes au fur et à mesure des couches, on retrouve le comportement de la source tel qu'il est décrit dans la documentation : une tension constante implique une longueur d'arc constante ainsi une diminution de la distance tube contact/pièce implique une diminution du Stickout et donc une diminution de la résistance. Si l'intensité reste constante, la baisse de résistance entraîne une diminution de la vitesse de fonte ce qui force le système à diminuer la vitesse fil.

Dans le cas où l'intensité et la tension ne sont pas considérées comme constantes, une diminution de la tension signifie une diminution de la longueur d'arc. L'augmentation de l'intensité suggère quant à elle une augmentation du Stickout. Cela est possible si et seulement si l'augmentation du Stickout est moins importante que la diminution de la longueur d'arc afin que la distance tube contact/pièce diminue aussi. Étant donné qu'il n'est pas possible de mesurer directement la longueur d'arc et le Stickout, il est difficile d'affirmer si l'équivalence précédente est vérifiée. Aussi la variation de la distance tube contact observée est tellement importante qu'il semble peu plausible que le Stickout augmente bel et bien. Ainsi l'augmentation de l'intensité n'est pas clairement expliquée, d'autres aspects sont à considérer pour comprendre cette évolution comme l'évolution thermique de la pièce par exemple. Néanmoins, on se propose de s'attarder sur le fonctionnement de la source électrique ultérieurement pour essayer de mieux comprendre son comportement.

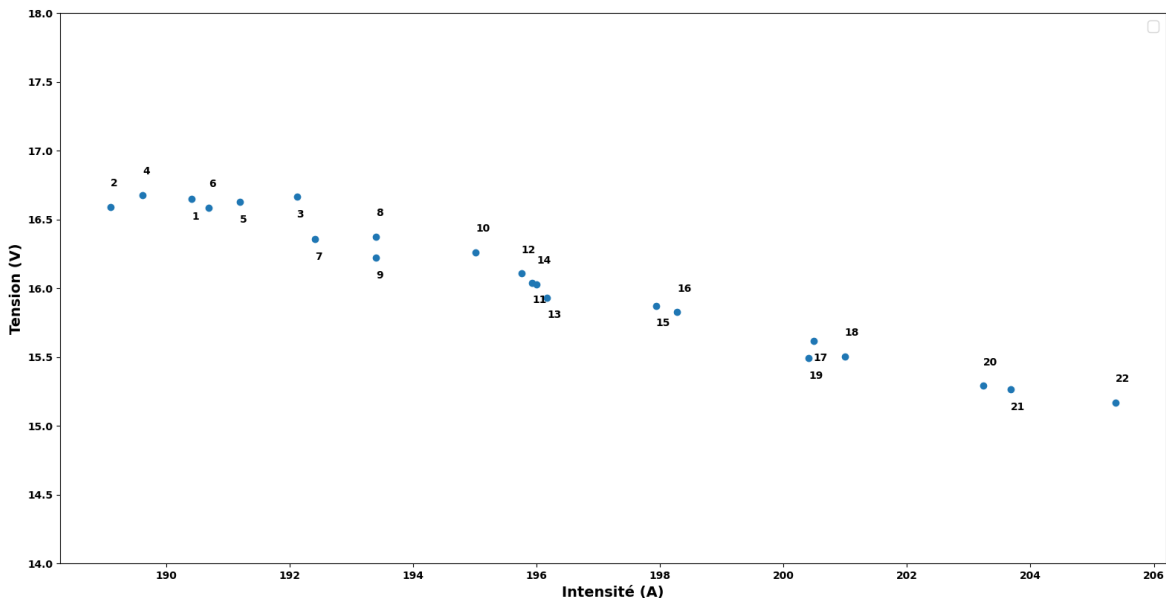


FIGURE 4.28 – Caractéristique secondaire de la source pour le mur mono cordon

La figure 4.28 illustre les points de fonctionnement Q_i de toutes les couches. Si on considère

que la longueur d'arc est constante, nous avons alors la caractéristique secondaire de notre générateur. La secondaire est relativement plate ce qui est cohérent avec les éléments traitant du fonctionnement d'une source en soudage MIG/MAG présentés plus haut. Là encore, on remarque que les points de fonctionnement mis en œuvre sont loin du point de fonctionnement programmé.

3.4.2 Mur épais

Pour le mur épais fabriqué avec la stratégie de type raster, la géométrie a été numérisée après chaque couche. La figure 4.29 illustre l'ensemble des sections moyennes calculées avec la méthode LOWESS. Comme observé sur la pièce finale, le premier et dernier cordon de chaque couche ont une altitude inférieure à ceux situés au centre du mur et ce, de manière distincte, dès les premières couches. Le phénomène se propage au fur et à mesure des couches. La figure 4.30 illustre l'évolution de la hauteur de chaque cordon dans le mur. Hormis pour la première couche, les cordons ont globalement la même hauteur partout dans le mur. Cependant on remarque que les cordons aux extrémités ont une hauteur significativement plus faible sur les cinq premières couches avant de retrouver une hauteur similaire aux autres cordons du mur au delà de la sixième couche. Cela implique que l'affaissement observé des cordons situés aux extrémités des couches s'installe dans ces cinq premières couches et se propage ensuite sans empirer dans les couches suivantes.

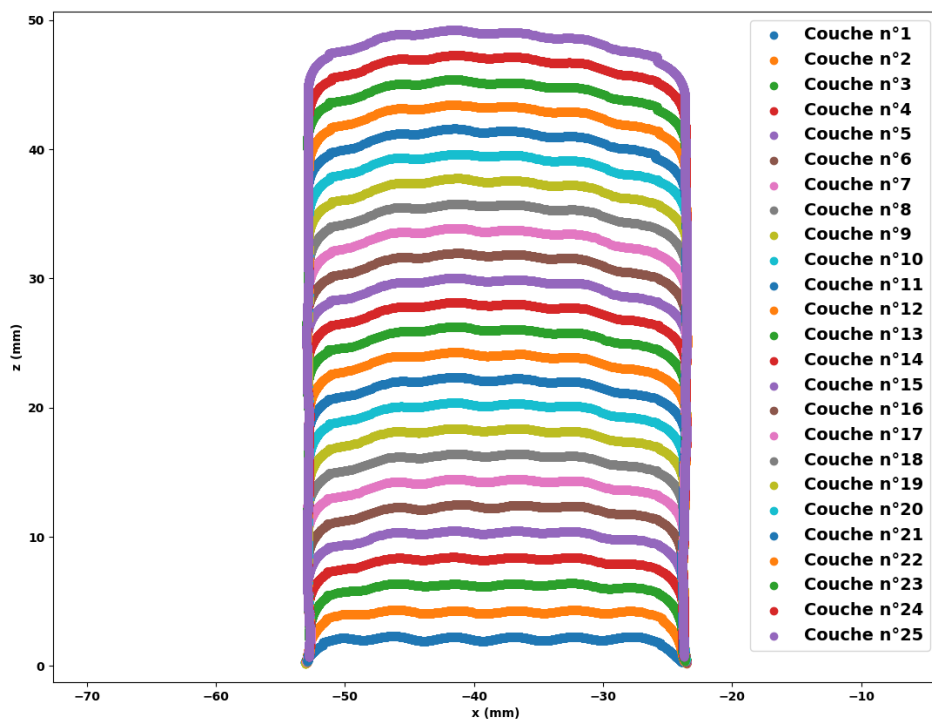


FIGURE 4.29 – Sections moyennes du mur épais fabriqué avec la trajectoire de type raster

La figure 4.31 illustre l'évolution de la distance entre le tube contact et la pièce pour chaque cordon au fur et à mesure des couches. On constate que cette distance diminue lentement ce qui permet de mener à bien la fabrication des 25 couches initialement prévues. On remarque aussi que la distance tube contact/pièce est plus importante pour les cordons 1 et 6 situés sur les bords de chaque couche ce qui traduit une hauteur de ces cordons plus faible que les cordons situés au centre tout au long de la fabrication. La distance tube contact/pièce est relativement stable tout au long de la fabrication, ainsi la vitesse fil et les grandeurs électriques restent elles aussi relativement stables.

La figure 4.32 illustre l'ensemble des points de fonctionnement de la source pour le mur épais

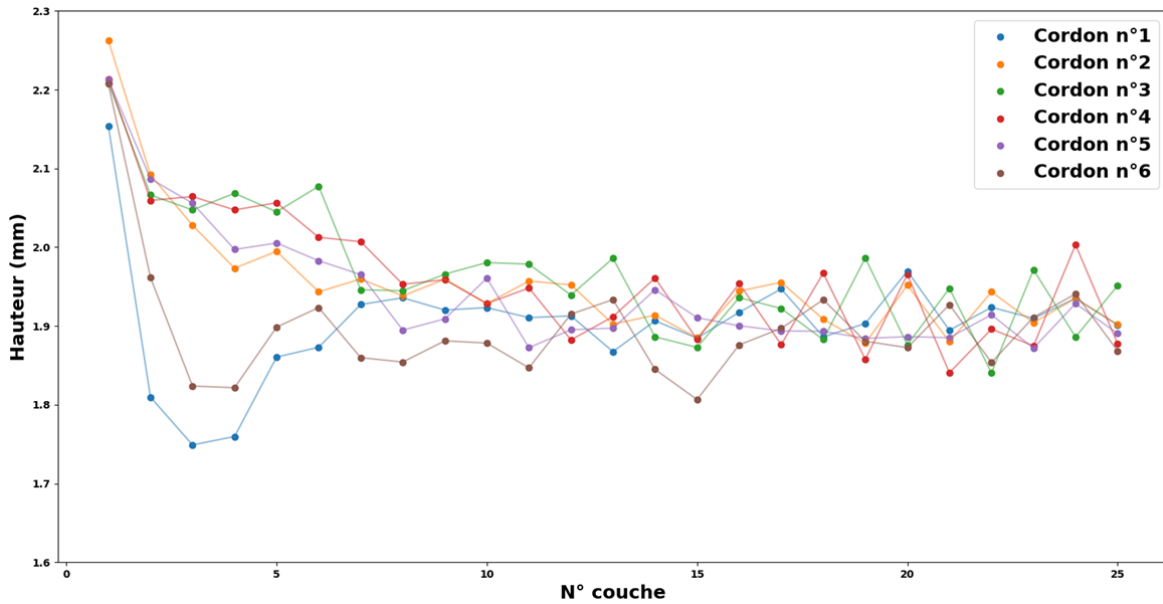


FIGURE 4.30 – Hauteur de chaque cordon déposé pour le mur fabriqué avec la trajectoire de type raster

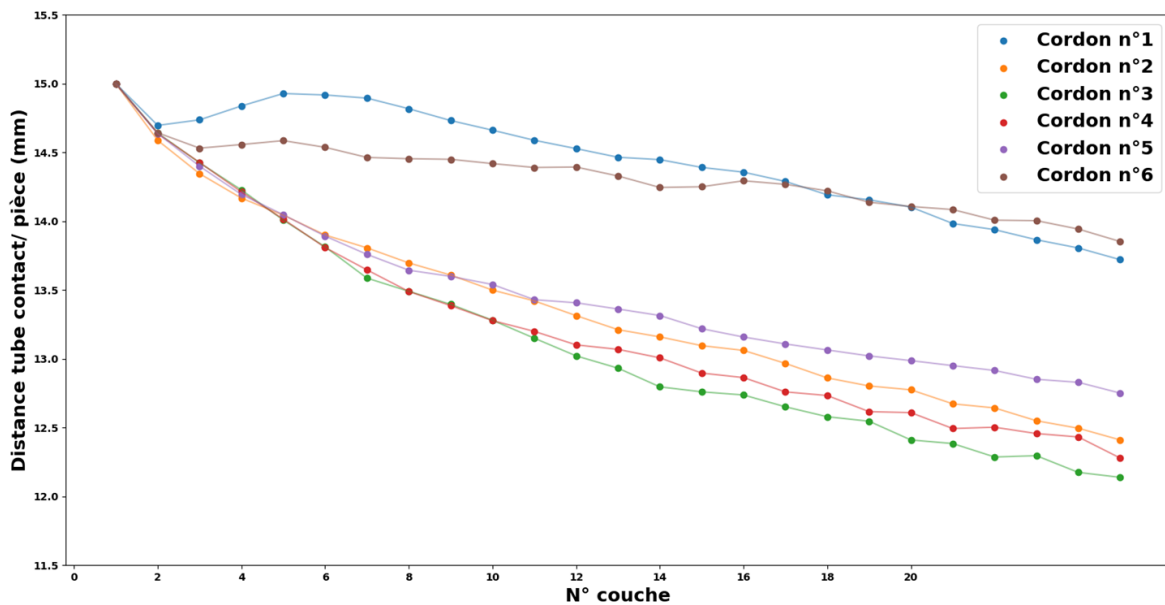


FIGURE 4.31 – Evolution de la distance tube contact/pièce pour le mur épais raster

dans le plan UI pour chaque cordon de chaque couche. Les six cordons de la première couche, mis en évidence sur la figure, sont très proches ce qui signifie que les conditions expérimentales vues par la source sont similaires pour ces cordons, puis au fur et à mesure des couches les points de fonctionnements ont tendance à s'étaler horizontalement dans le plan UI (en d'autres termes c'est l'intensité de soudage qui varie principalement). On peut noter que cet « étalement » (dû à l'évolution de l'intensité) n'est pas monotone et ce ne sont pas nécessairement les points des cordons de la dernière couche que l'on retrouve aux extrémité du nuage de point. Aussi on note que les points de fonctionnement bougent principalement vers la gauche (diminution de l'intensité) mais aussi à droite (augmentation de l'intensité) pour les cordons intermédiaires (n°2, 3, 4 et 5). Pour les cordons 1 et 6 situés aux extrémités de chaque couche, leurs points de fonctionnement se déplacent exclusivement vers la gauche par rapport au point initial de la première couche et

de manière encore plus prononcée pour les derniers cordons de chaque couche, pour lesquels vraisemblablement l'état de la pièce d'un point de vue géométrique mais éventuellement aussi thermique, pousse la source à diminuer la tension et l'intensité de soudage malgré le fait que la distance tube contact/pièce soit similaire à celle du premier cordon.

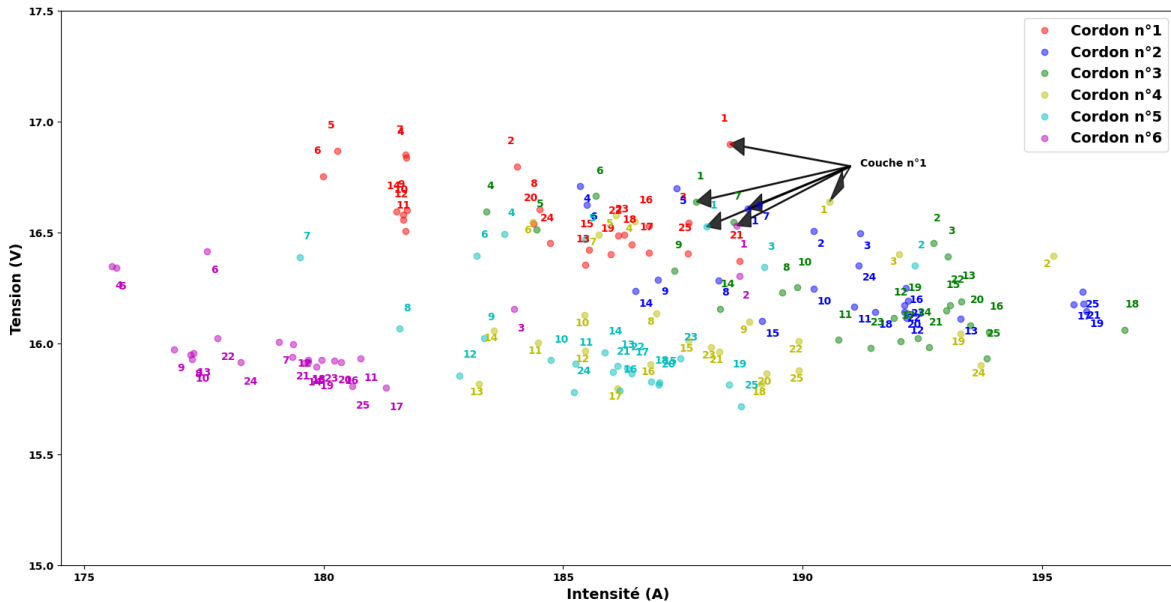


FIGURE 4.32 – Points de fonctionnement de la source pour le mur épais Raster

Enfin, on note aussi que la plage d'intensité balayée par les cordons du mur épais est nettement plus importante que celle du mur mono cordon. En effet, pour le mur mono cordon, si on ne considère que les 5 premières couches où la distance tube contact/pièce est comprise entre 15 et 12 mm (comme pour l'ensemble des cordons du mur épais), l'intensité varie grossièrement entre 188 et 192 A. Pour le mur épais, sur l'ensemble des cordons, l'intensité varie entre 176 et 195 A. Cela met en exergue l'impact de la géométrie antérieure de la pièce sur le comportement de la source et de la régulation mise en œuvre.

La démarche de traitement des données expérimentales issues de la fabrication du mur épais avec la trajectoire de type contouring est analogue à celle mise en œuvre pour le mur fabriqué avec la trajectoire de type raster. La figure 4.33 illustre les profils moyens des couches qui ont été numérisées pour ce dernier mur. Là encore on constate que l'altitude des cordons situés sur les bords libres du mur est légèrement plus faible que celle des cordons situés dans la matière même si globalement la surface supérieure de chaque couche est bien moins bombée que pour le mur raster.

La figure 4.34 illustre l'évolution de la distance entre le tube contact et la pièce. Ici encore, la distance tube contact/pièce diminue lentement au fur et à mesure des couches à l'image du mur raster. Aussi puisque l'altitude des cordons situés au niveau des bords libres du mur est moins importante que pour ceux situés dans la matière, la distance entre le tube contact et la pièce est plus importante pour ces cordons.

Enfin la figure 4.35 illustre l'ensemble des points de fonctionnement de la source pour le mur épais dans le plan UI pour chaque cordon de chaque couche. Globalement les plages d'intensité et de tension sur lesquelles s'étalent chaque point de fonctionnement pour chaque cordon sont identiques à celles pour le mur raster. On constate aussi, de manière moins marquée, que les points de fonctionnement des cordons situés aux extrémités (cordon n° 7 et 8) ont des intensités

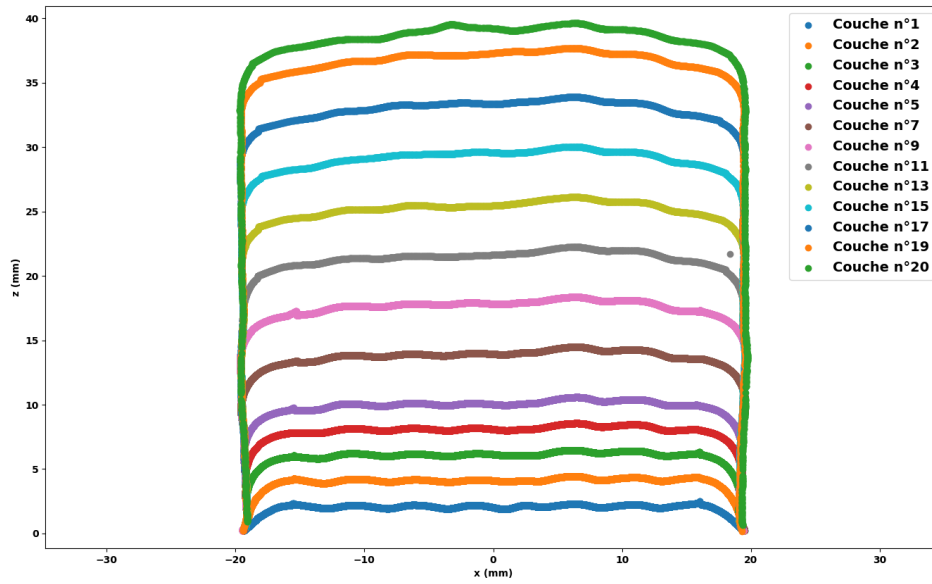


FIGURE 4.33 – Sections moyennes du mur épais fabriqué avec la trajectoire de type contouring

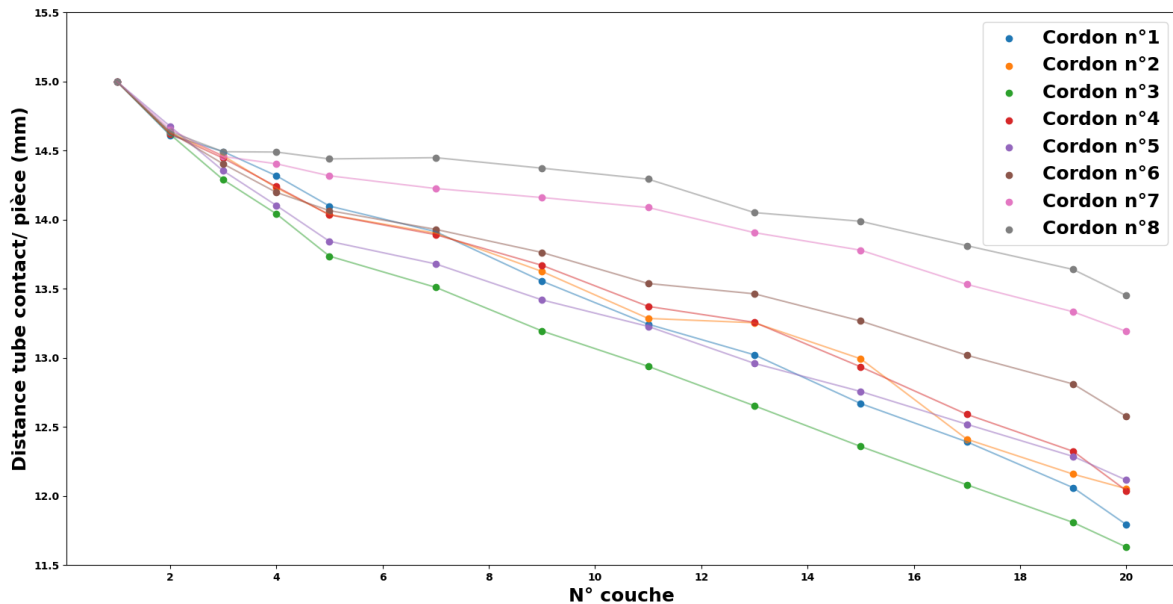


FIGURE 4.34 – Evolution de la distance tube contact/pièce pour le mur épais contouring

plus faibles que les cordons situés à l'intérieur du mur qui eux s'étalent plus autour du point de fonctionnement de la première couche.

D'un point de vue géométrique, on observe un comportement similaire entre les deux murs où les cordons situés aux niveaux des bords libres du mur ont une altitude inférieure par rapport aux autres cordons situés dans le mur. Cet affaissement se manifeste dès les premières couches et se stabilise au fur et à mesure des couches sans pour autant se résorber. Au niveau des signaux électriques, là aussi le comportement est globalement identique entre les deux murs. Néanmoins, très certainement en lien avec la géométrie, le comportement de la source semble différent pour les cordons situés au niveau des bords libres du mur. Ces cordons en particuliers constituent donc des cas particuliers auxquels il faut adapter localement la stratégie de fabrication afin de minimiser leurs impacts sur la géométrie globale de la pièce. Hormis la gestion des cordons situés sur les bords libres, l'ordre de dépose des cordons n'a pas d'influence majeure sur le comportement

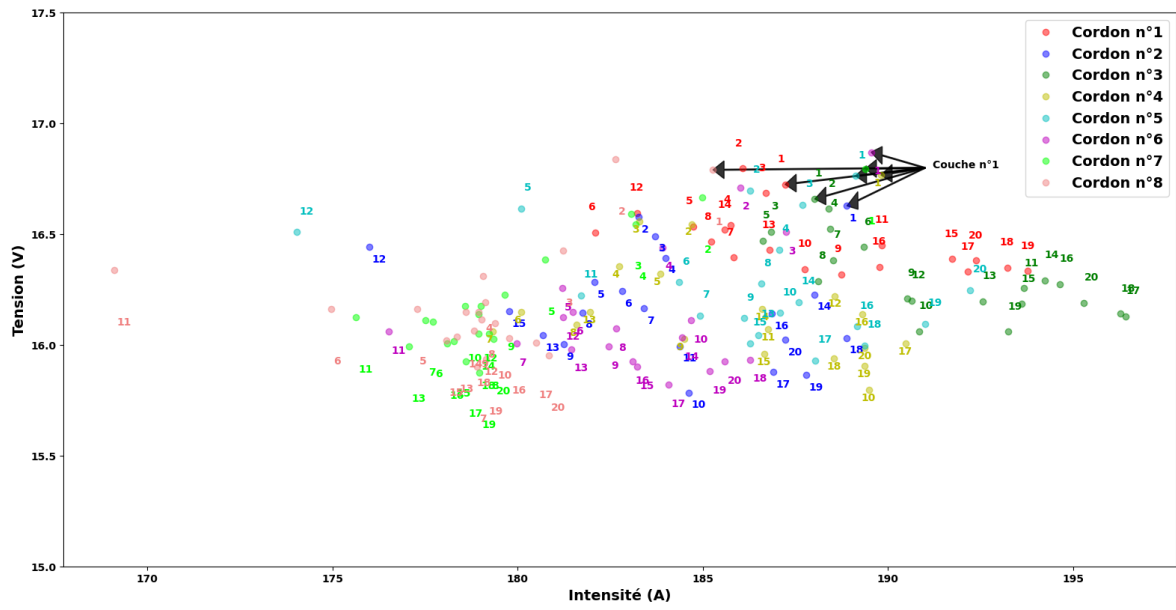


FIGURE 4.35 – Points de fonctionnement de la source pour le mur épais contournant

géométrique de la pièce finie et le comportement de la source électrique associé.

4 Modélisation de l'assemblage de cordons

La modélisation de l'assemblage de cordons proposée ici repose exclusivement sur des considérations géométriques et l'évaluation de la qualité de la modélisation est faite par comparaison avec les essais expérimentaux. L'assemblage de cordons est défini ici comme l'empilement et/ou la juxtaposition de cordons.

Les hypothèses principales de la modélisation plane proposée consistent d'une part à approximer le cordon déposé par un polynôme de degré 2 et d'autre part à conserver l'aire de la section du cordon. Cependant, la seule équation de conservation de l'aire de la section ne suffit pas pour déterminer les trois coefficients du polynôme que l'on cherche à identifier et donc d'autres hypothèses sont nécessaires afin de résoudre le problème. Deux approches sont envisageables :

- Soit on présuppose la forme du polynôme : cela revient à fixer les coefficients a et b du polynôme
- Soit on détermine deux points par lesquels passe le nouveau cordon. Ainsi on dispose de deux équations supplémentaires à vérifier pour déterminer les trois coefficients du polynôme.

Ces deux choix d'hypothèses sont considérés ici selon la configuration du cordon déposé par rapport à ce sur quoi il s'appuie, un substrat plan ou des cordons précédents.

La situation d'empilement est rencontrée lorsqu'un cordon est déposé sur un ou plusieurs cordons précédents, typiquement cela correspond au premier cordon d'une couche que ce soit pour un mur fin ou épais. Dans ce cas, l'hypothèse supplémentaire à la conservation de l'aire faite ici consiste à fixer l'allure du nouveau cordon, puisque celui-ci est vraisemblablement le premier cordon d'une couche. De plus il est considéré que les bords libres à droite et/ou à gauche sont parfaitement verticaux. Ensuite il ne reste plus qu'à déterminer le dernier coefficient du polynôme du nouveau cordon vérifiant l'équation de conservation de l'aire. La figure 4.36 illustre une situation d'empilement du premier cordon d'une nouvelle couche sur une couche précédente.

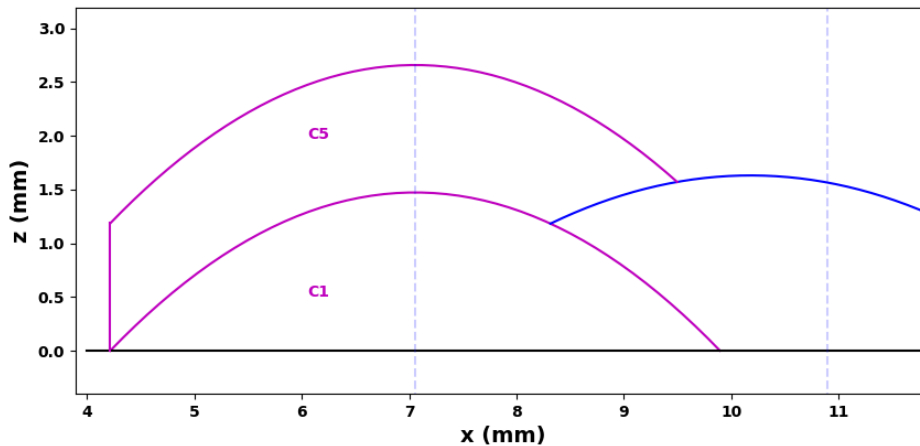


FIGURE 4.36 – Illustration d'un cas d'empilement lors de la modélisation d'assemblage de cordons

Le dernier cordon d'une couche est un cas particulier du modèle de juxtaposition proposé précédemment dans la mesure où l'un des deux points par lesquels doit passer le polynôme à identifier est libre. Ce point libre est fixé à une demie largeur du cordon seul équivalent à la même ordonnée que le point du profil de la couche précédente à l'abscisse de la trajectoire programmée. Ce point se situe donc à la verticale du point extrême de la couche précédente ce qui est en accord avec l'hypothèse des bords libres parfaitement verticaux. La figure 4.37 illustre cette modélisation d'un tel cordon.

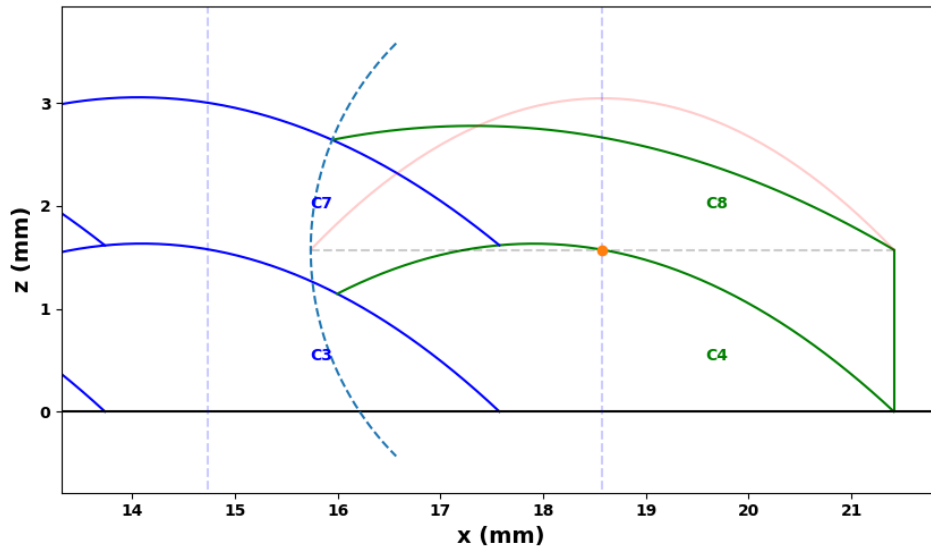


FIGURE 4.37 – Illustration du cas particulier du dernier cordon d'une couche lors de la modélisation d'assemblage de cordon

Le modèle proposé permet de simuler l'assemblage de cordons au sens où il est possible de les empiler et de les juxtaposer. Ce modèle est tout autant valable pour modéliser la dépose de la première couche que pour les suivantes. Malgré certaines hypothèses fortes, ce modèle d'assemblage se base uniquement sur la géométrie des cordons seuls équivalents déposés sur un substrat plan, la distance de juxtaposition entre deux cordons adjacents et l'ordre de dépose de ceux-ci relatif au type de trajectoire mis en œuvre. La distance programmée entre chaque couche n'est pas une variable de ce modèle, on peut donc utiliser la modélisation pour déterminer la distance inter couche à programmer afin de mieux appréhender la gestion de la distance tube contact pièce qui est, comme illustrée par les essais, cruciale pour mener la fabrication à bien. Les dimensions géométriques des cordons seuls équivalents déposés sur substrat plan ont quant à elles été caractérisées au chapitre 2.

Le second intérêt de la modélisation de l'assemblage de cordons est d'identifier les éventuelles dérives géométriques au cours de la fabrication. La figure 4.38 illustre la modélisation de cinq couches déposées avec une stratégie de type raster. On constate que dès la cinquième couche, la surface supérieure commence à se déformer de manière significative notamment car les cordons aux extrémités de chaque couche culminent à des hauteurs plus faibles que les autres. La modélisation semble donc pouvoir mettre en évidence des dérives géométriques lors de l'assemblage de plusieurs couches néanmoins il nous faut vérifier si cela est toujours le cas pour un nombre plus important de couches.

La figure 4.39a illustre la modélisation de l'empilement des 22 cordons les uns sur les autres en considérant que les bords des cordons sont parfaitement droits. Cette modélisation est comparée aux sections mesurées du mur fin. On constate rapidement que la modélisation n'est pas adap-

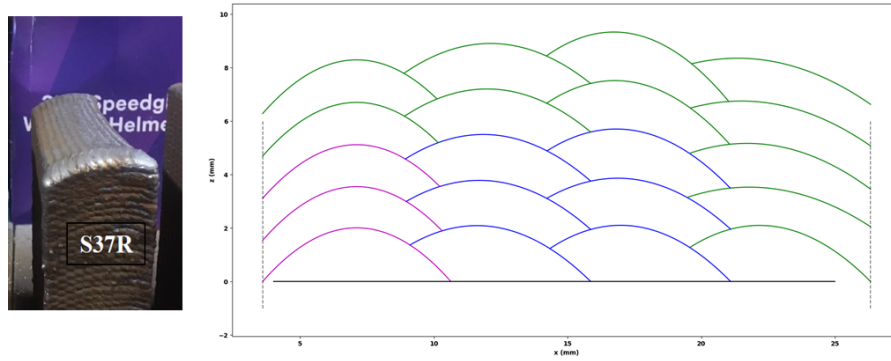
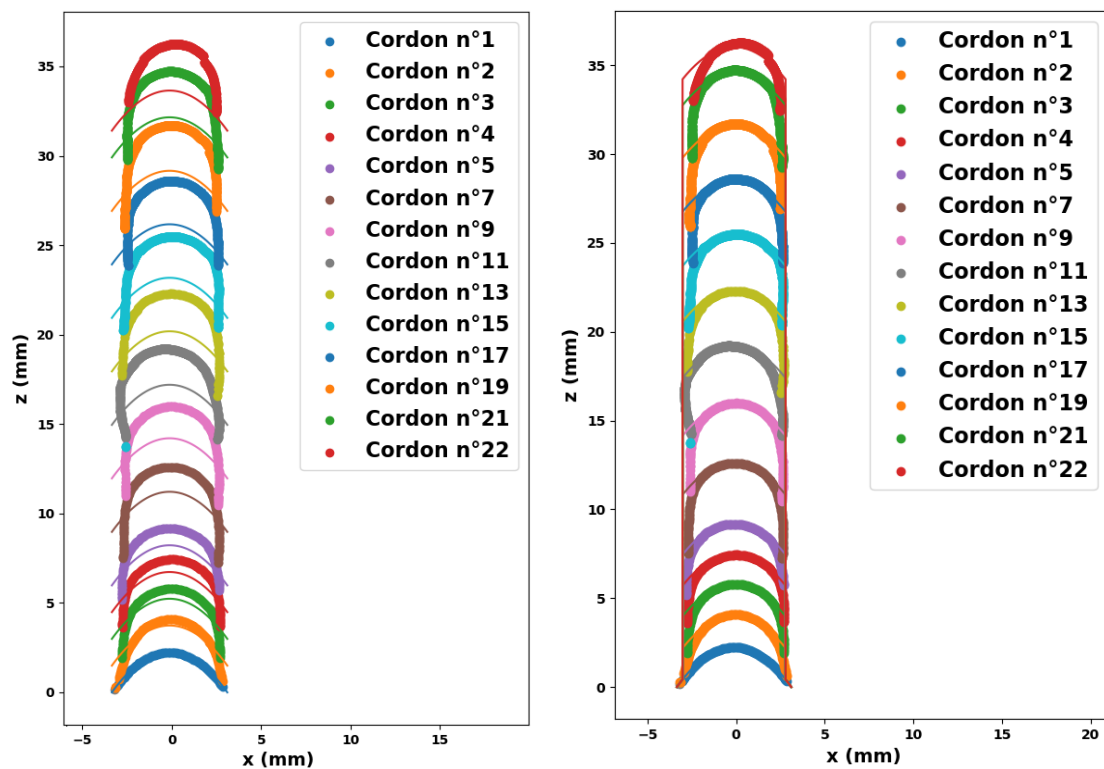


FIGURE 4.38 – Modélisation de 5 couches déposées avec une stratégie raster "one way"

tée du fait que la différence d'altitude entre les essais expérimentaux et la modélisation est très importante et ce après quelques couches seulement. Cela s'explique par le fait que la largeur du mur est plus petite que celle du premier cordon et ce dès les premières couches, la modélisation « déborde » de part et d'autre du mur. Pour remédier à cela et traduire cette diminution de largeur au sein de la modélisation, il est proposé de considérer que la largeur du mur est égale à 90% de la largeur du premier cordon tout en gardant sa forme. La figure 4.39b illustre la modélisation ainsi obtenue. On constate que la largeur du mur simulé reflète mieux la largeur du mur mesuré ce qui entraîne ensuite un positionnement de chaque couche simulée nettement plus proche de leur couche mesurée associée. De plus, chaque cordon a une hauteur de 1,61 mm ce qui correspond environ à 80 % de la hauteur du cordon seul équivalent. Cette distance intercouche semble plus appropriée par rapport à celle mise en œuvre lors de la fabrication de ce mur et devrait limiter le risque de collision et éviter une interruption de fabrication. Néanmoins, cette modélisation peut certainement être améliorée pour mieux rendre compte de la géométrie du mur au niveau des dernières couches en reconsidérant l'hypothèse des bords verticaux.

La figure 4.40 illustre la modélisation du mur épais fabriqué avec la stratégie de type raster. Globalement, la géométrie modélisée est relativement proche de la géométrie mesurée au fur et à mesure des couches. Cependant, on devine une dégénérescence de la simulation au niveau du cinquième cordon dans les dernières couches où ce dernier adopte une forme peu réaliste.

Le modèle physique proposé par Mohebbi et al. [59] rapporté précédemment semble décrire de manière plus fidèle la géométrie des murs fins fabriqués, ce qui constitue une piste d'amélioration de la modélisation de l'assemblage des cordons, en particulier au niveau des bords libres des entités fabriquées. La figure 4.41 illustre l'association de ce modèle physique aux sections expérimentales du mur fin. Pour rappel, le modèle explicite l'équation du profil du cordon en fonction de paramètres matériaux et géométriques. Ici les paramètres géométriques sont identifiés comme étant ceux permettant de minimiser la distance entre la courbe issue du modèle et les points de la section expérimentale de chaque cordon. L'allure des associations de chaque cordon est plutôt convaincante et décrit très bien la surface supérieure de chaque cordon. Néanmoins, le modèle a du mal à décrire la géométrie de la section au niveau de la zone de contact avec la section précédente. Dans le cadre de la modélisation d'un mur épais, la formulation analytique n'est pas adaptée et il est donc difficile d'intégrer ce modèle pour palier aux difficultés rencontrées au niveau des bords libres. Cependant, la résolution numérique de l'équation d'équilibre dont découle la formulation analytique proposée par Mohebbi et al. pourrait être une solution pour parvenir à modéliser l'assemblage de cordons.



(a) Modélisation de l'empilement du mur fin avec une largeur égale à la largeur du premier cordon

(b) Modélisation de l'empilement du mur fin avec une largeur égale à 90% de la largeur du premier cordon

FIGURE 4.39 – Modélisation de l'empilement avec l'hypothèse des bords libres verticaux

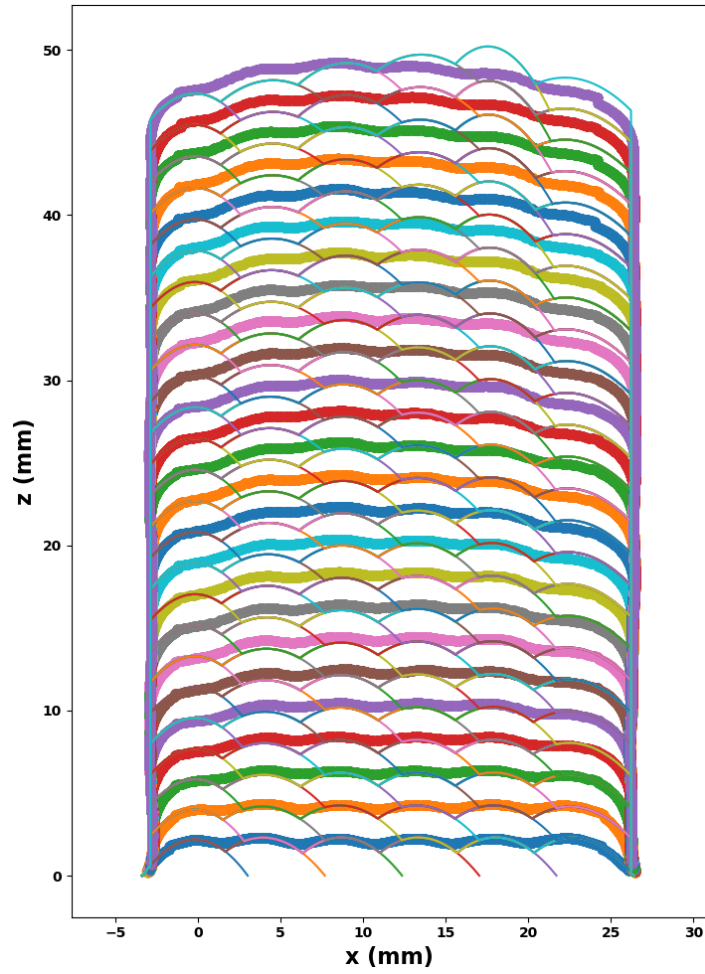


FIGURE 4.40 – Modélisation des 22 couches déposées avec une stratégie raster

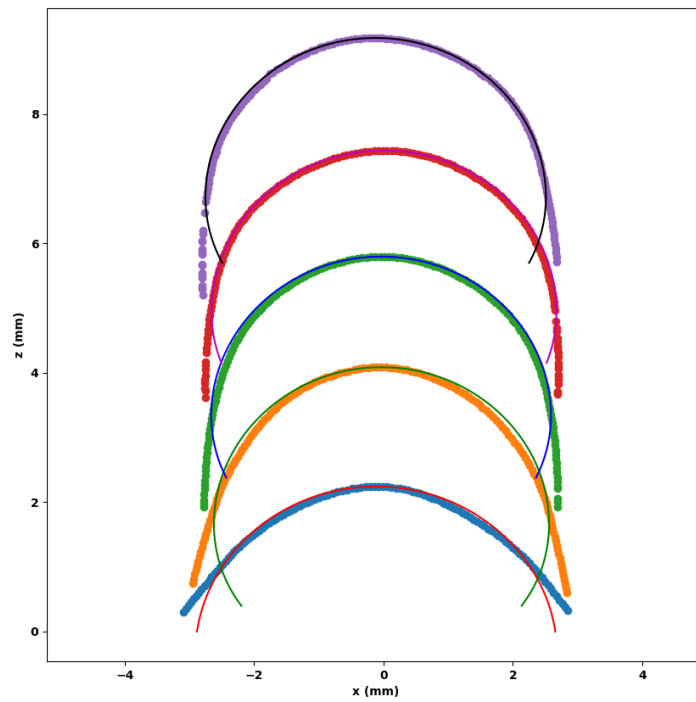


FIGURE 4.41 – Association du modèle physique de cordons comparée aux sections expérimentales pour les cinq premières couches du mur fin

5 Source électrique

Comme évoqué précédemment, le comportement de la source électrique n'est pas clairement identifié. Lors de la fabrication de murs, il a été observé qu'une diminution de la distance entre le tube contact et la pièce poussait la source à diminuer la vitesse fil et la tension délivrées mais aussi à augmenter l'intensité. Cela impactant directement la quantité de matière apportée au cours de la fabrication et donc la géométrie fabriquée, il semble important de comprendre comment la source et ses régulations fonctionnent.

5.1 Régulations possibles de la source FRONIUS

La source FRONIUS™ permet de réaliser du soudage en CMT qui correspond au mode de transfert de goutte en court circuit forcé en soudage MIG/MAG. Cette source offre plusieurs types de régulations actives du processus ([72]) en jouant sur la vitesse fil, la tension ou l'intensité au cours de la fabrication en fonction de la régulation mise en œuvre afin de proposer des soudures de meilleure qualité.

Le stabilisateur de pénétration permet le réglage de la modification maximale autorisée de la vitesse d'avance du fil afin de maintenir l'intensité de soudage et donc une pénétration d'arc stable. En effet, la source utilisée a avant tout été conçue pour le soudage pour lequel la pénétration de l'arc et de la soudure résultante est un enjeu majeur. Des variations de l'intensité peuvent apparaître en cas de changement de la distance entre le tube contact et la pièce (CTWD ou CT) et donc de variation de longueur de fil sorti (ou Stickout).

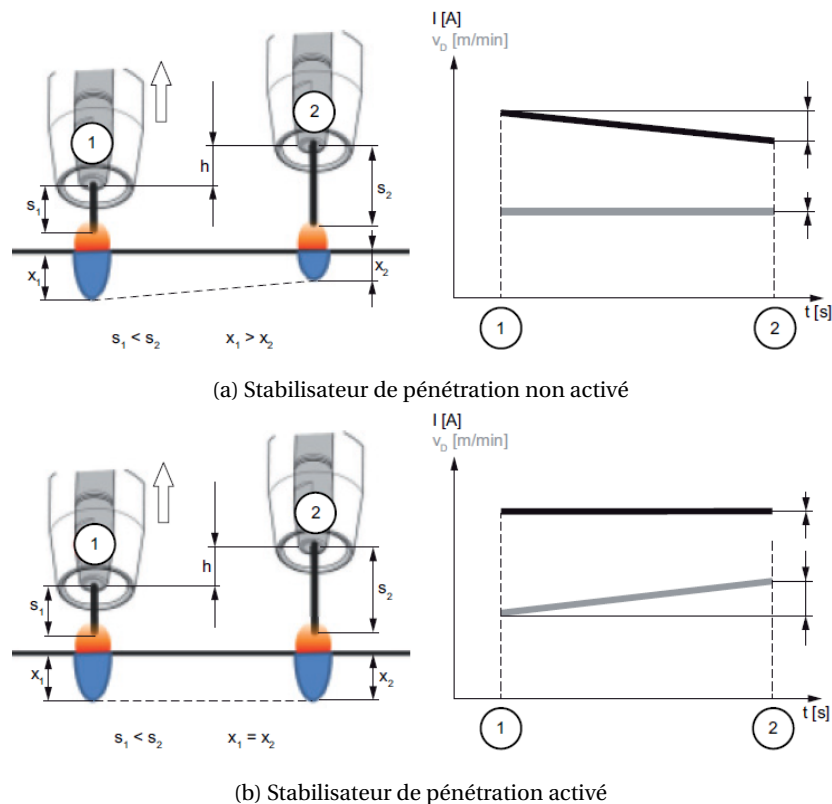


FIGURE 4.42 – Stabilisateur de pénétration

La figure 4.42a illustre le comportement du processus lorsque la stabilisation de pénétration n'est pas activée. La régulation de la tension d'arc constante pour une longueur d'arc constante est mise en œuvre. Ainsi une augmentation (h) de la distance tube contact pièce entraîne :

- une augmentation du Stickout ($S_2 > S_1$) en considérant une longueur d'arc constante ici
- ce qui provoque une augmentation de la résistance dans le circuit
- ce qui entraîne une diminution de l'intensité ($I_2 < I_1$) et donc une diminution de la pénétration ($x_2 < x_1$)

Lorsque la stabilisation de pénétration d'arc est activée, elle autorise en cas de modification du Stickout (et donc de la distance tube contact pièce), une modification de la vitesse fil pour garder une intensité de soudage constante (et donc une pénétration constante) comme l'illustre la figure 4.42b. Ainsi une augmentation (h) de la distance tube contact pièce entraîne :

- une augmentation du Stickout ($S_2 > S_1$) en considérant une longueur d'arc constante ici
- ce qui provoque une augmentation de la résistance dans le circuit
- mais pour garder une intensité constante ($I_2 = I_1$) et donc une pénétration d'arc constante ($x_2 = x_1$), la vitesse fil augmente

Le stabilisateur de longueur d'arc force le processus, en régulant les courts-circuits, à générer des arcs électriques courts et favorables au soudage, en les maintenant stables même en cas de variations du Stickout dues à des variations de distance tube contact pièce. L'activation de la stabilisation de longueur d'arc réduit la longueur de l'arc et régule la fréquence des court circuits. La figure 4.43 illustre le comportement de la source en fonction de la valeur du paramètre de stabilisation de longueur d'arc (varie entre 0 et 5, sans unité). Plus le paramètre augmente plus la longueur d'arc est faible.

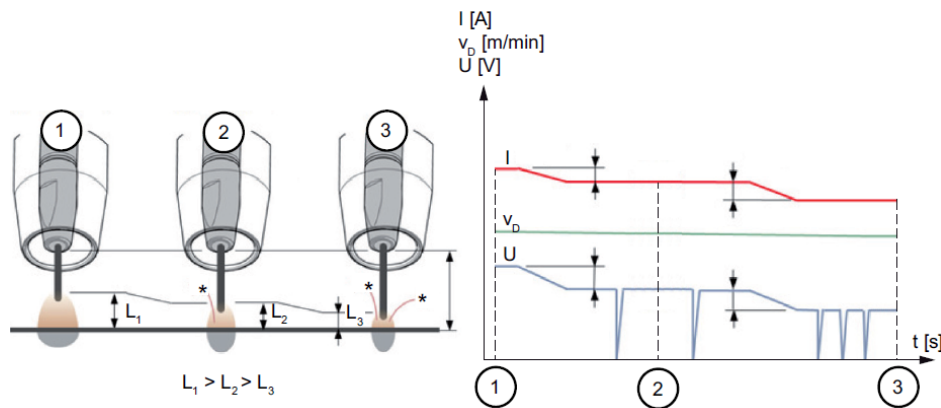


FIGURE 4.43 – Trois réglages de longueur d'arc (0/0,5/2)

5.2 Modélisation de la source

Dans cette partie, il est proposé de s'intéresser à la modélisation de la source de soudage où l'expression explicite des équations régissant le système permet de mieux comprendre l'évolution des grandeurs physiques lorsque certains paramètres sont amenés à changer, en particulier la distance entre le tube contact et la pièce. Planckaert et al. [20] et Naidu et al. [73] proposent une modélisation du transfert de la goutte en mode court-circuit présenté figure 4.44.

La loi des mailles pour le système nous donne :

$$\frac{dI}{dt} = \frac{U - R_l I - V_{arc} - R_s I}{L_s} \quad (4.1)$$

avec U la tension de la source, R_l la résistance de l'électrode, R_s la résistance de la source, L_s l'inductance de la source et V_{arc} la tension de l'arc donnée par l'expression :

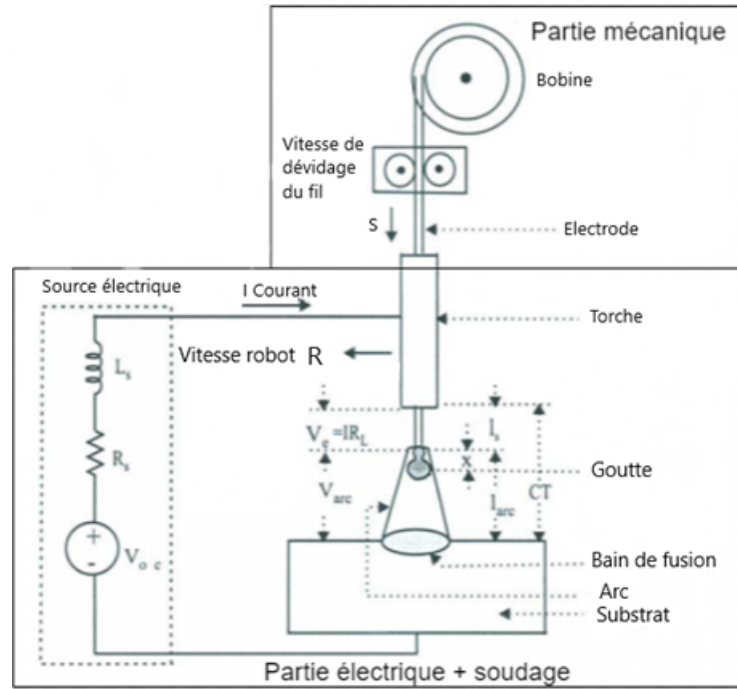


FIGURE 4.44 – Schéma du système de soudure [20]

$$V_{arc} = V_0 + R_a I + E_a (CT - l_s) \quad (4.2)$$

où V_0 est la constante de tension d'arc, R_a la résistance de l'arc, E_a le facteur de longueur d'arc et CT la distance entre le tube contact et la pièce.

La résistance de l'électrode R_l s'exprime :

$$R_l = \rho(l_s + r_d + x) \approx \rho l_s \quad (4.3)$$

avec ρ la résistivité de l'électrode, l_s le Stickout et x la position du centre de la goutte.

Le débit de fonte du fil M_R est déterminé par :

$$M_R = C_2 I^2 \rho l_s + C_1 I \quad (4.4)$$

avec C_1 et C_2 des constantes du débit de fusion.

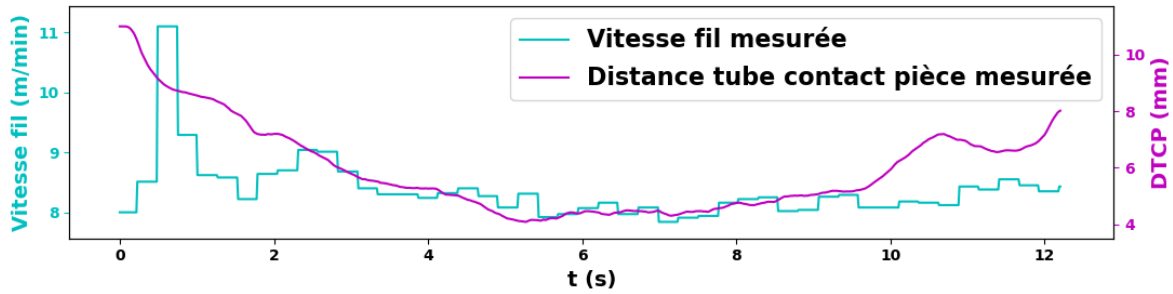
Enfin l'évolution du Stickout est évaluée telle que :

$$\frac{dl_s}{dt} = V_f - \frac{M_R}{\pi \left(\frac{\varnothing_{fil}}{2}\right)^2} \quad (4.5)$$

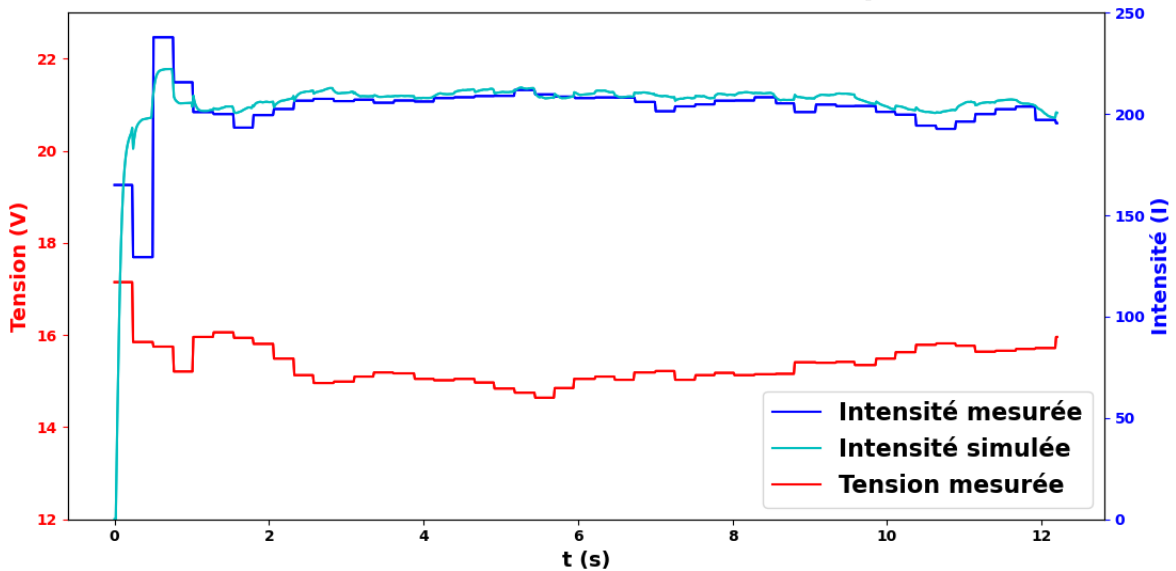
En injectant les équations 4.2 et 4.3 dans l'équation 4.1 et l'équation 4.4 dans l'équation 4.5, on obtient les équations régissant le comportement de l'intensité et du Stickout :

$$\frac{dl_s}{dt} = V_f - \frac{C_2 I^2 \rho l_s + C_1 I}{\pi \left(\frac{\varnothing_{fil}}{2}\right)^2} \quad (4.6)$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{U - (R_l + R_s + \rho l_s)I - V_0 - E_a (CT - l_s)}{L_s} \quad (4.7)$$



(a) Évolution de la vitesse fil et de la distance entre le tube contact et la pièce mesurées



(b) Évolution de la tension et de l'intensité mesurées et de l'intensité simulée

FIGURE 4.45 – Évolution des grandeurs mesurées et simulées lors de la fabrication de la dernière couche du mur mono cordon

Avec cette formulation, l'évolution du Stickout et de l'intensité est fonction des paramètres physiques mais aussi de la vitesse de fil dévidé, de la tension de la source et de la distance entre le tube contact et la pièce qui sont des variables d'entrées. La résolution numérique de ce système d'équations est implémentée sous Python. Afin d'évaluer la capacité de ce modèle à décrire la dynamique du courant telle qu'elle est observée, on se propose de comparer l'intensité mesurée et celle simulée à l'aide de la vitesse fil, la tension de la source et la distance tube contact pièce mesurée lors de la fabrication de la dernière couche du mur fin. Cette couche a l'intérêt de présenter des variations significatives de la distance tube contact pièce plus importantes aux extrémités du mur qu'en son centre. La tension et l'intensité suivent la même tendance au cours de la fabrication que celle observée précédemment sur les signaux moyennés à chaque couche : lorsque la distance tube contact pièce diminue, la tension diminue avec la vitesse fil et l'intensité augmente. Les évolutions de toutes ces grandeurs lors de la fabrication de la dernière couche du mur sont illustrées figure 4.45.

L'intensité simulée suit relativement bien l'intensité mesurée au cours de la fabrication. Cela est encourageant quant à la capacité de ce modèle à refléter la réalité du procédé CMT tel que nous l'observons. Ce modèle permet donc d'apporter des éléments de compréhension sur le fonctionnement de la source et explicite la relation entre l'intensité, la tension et la vitesse fil délivrées par la source. Il est donc possible, à partir de ce modèle, de prédire l'évolution d'une de ces grandeurs en fonction des deux autres, de la distance tube contact ainsi que les paramètres matériaux. Néanmoins, il ne suffit pas pour expliquer la stratégie de pilotage de l'intensité, de la vitesse fil et de la

tension délivrée par la source pour assurer un bon déroulement du procédé.

En résumé, cette section présente des généralités sur le fonctionnement des sources de soudage en particulier autour de la relation entre la tension et l'intensité sur le circuit en fonction de paramètres influents. Des éléments spécifiques au soudage MIG/MAG ont permis d'identifier la relation entre la vitesse fil et l'intensité de soudage. L'étude de la documentation technique de la source mise en œuvre ici a permis de comprendre l'impact de la stabilisation de pénétration d'arc et de la stabilisation de longueur d'arc sur le comportement de la source lorsqu'elles sont mises en œuvre. Enfin, une modélisation brièvement vérifiée expérimentalement de la source est présentée ce qui permet, en s'appuyant sur les équations explicites régissant le comportement du système, d'identifier et découpler l'impact de variation de certains paramètres.

5.3 Discussions

Lors des essais réalisés, la stabilisation de pénétration est mise en œuvre sans la stabilisation de longueur d'arc. Cependant, cette configuration n'est pas abordée dans la documentation technique. Or, il est observé expérimentalement que lorsque la distance entre le tube contact et la pièce diminue, la tension et la vitesse fil diminuent et l'intensité augmente et ce malgré la stabilisation de pénétration d'arc.

Si on considère le cas d'une augmentation de la distance tube contact pièce avec une longueur d'arc fixée (figure 4.42) : la longueur d'arc est constante (eq 4.2, $(CT - l_s)$ reste constant) et l'évolution du Stickout est positive (eq 4.5) donc la vitesse fil V_f est nécessairement supérieure à la vitesse de fonte M_R . Compte tenu du fait que la résistivité R_l augmente (eq 4.3), il reste 2 possibilités pour vérifier l'inégalité entre V_f et M_R :

- soit V_f augmente et/ou I diminue : cela revient au cas illustré figure 4.42a où seule l'intensité diminue et implique que pour garder une tension d'arc constante (image de la longueur d'arc) la tension au borne du générateur V_0 augmente (eq 4.2).
- soit I reste constant et V_f augmente : ce cas revient à stabiliser la pénétration d'arc figure 4.42b où la vitesse fil augmente de manière plus importante que la vitesse de fonte (qui croit aussi eq 4.4).

En considérant les mêmes hypothèses vis-à-vis de l'arc, le modèle décrit de manière cohérente la dynamique de la source avec ou sans stabilisation de la pénétration. Pour ce qui est de la stabilisation de la longueur d'arc, l'exemple de la documentation (figure 4.43) suggère qu'une diminution de la longueur d'arc s'accompagne d'une diminution de la tension et de l'intensité tout en gardant une vitesse fil et une distance tube contact pièce constantes. Là aussi, le modèle décrit de manière cohérente le comportement suggéré : pour une longueur d'arc plus faible, le Stickout est plus important et donc la résistivité aussi (eq 4.3). Pour garder une vitesse fil constante et donc une vitesse de fonte constante (eq 4.5 en stationnaire), l'augmentation de la résistivité implique une diminution de l'intensité (eq 4.4). Ce qui entraîne une diminution de la tension (eq 4.2).

L'article [19] explique qu'un poste de soudage MIG/MAG a des caractéristiques secondaires plates et que son réglage porte sur la tension de l'arc. A la tension d'arc réglée est associée une longueur d'arc et l'intensité est fixée par le réglage de la vitesse fil. La figure 4.46 illustre vraisemblablement la relation entre la vitesse fil et l'intensité pour une tension donnée (cela n'est pas explicite). Ainsi, pour une longueur d'arc fixée, le graphe laisse penser qu'une augmentation de la vitesse fil implique nécessairement une augmentation de l'intensité de soudage associée, ce qui n'est pas tout à fait cohérent avec les comportements décrits dans la documentation de la source vis-à-vis de la stabilisation de pénétration.

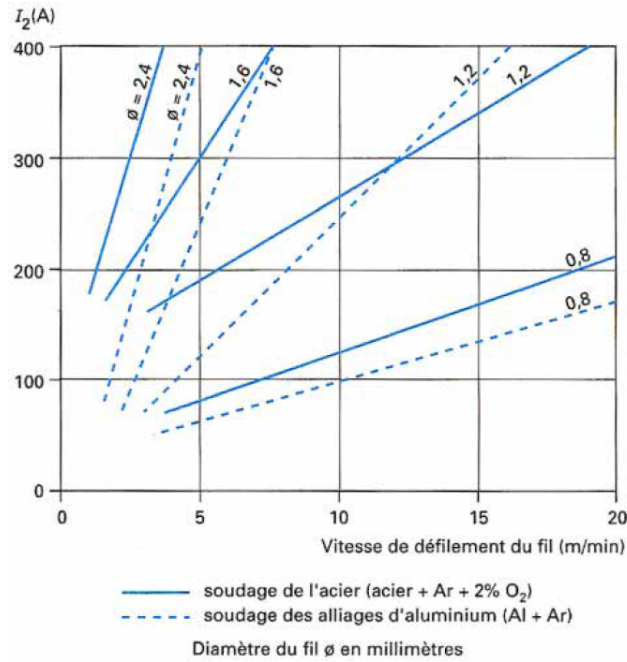


FIGURE 4.46 – Caractéristiques de fusion du fil en MIG/MAG

Enfin, dans le cas de l'absence de régulation de longueur d'arc (ou en l'absence d'hypothèse sur la longueur d'arc), le comportement du système n'est pas vraiment décrit et demeure difficile à qualifier à partir des équations du modèle. En effet pour chaque explication théorique, un des signaux est toujours considéré comme constant, en particulier la longueur d'arc. Cependant, lors des campagnes expérimentales, la stabilisation de pénétration est mise en œuvre mais pas la stabilisation de longueur d'arc.

Si on néglige les variations d'intensité et de tension observées, la source a un comportement similaire à celui décrit dans la documentation lorsque la stabilisation de pénétration est activée. La diminution de vitesse est alors la conséquence de la diminution de la distance tube contact pièce lorsque la pénétration de l'arc est maintenue constante. Cependant, en prenant en compte les variations d'intensité et de tension, le comportement de la source reste difficile à interpréter. Néanmoins, la diminution de vitesse fil constatée demeure liée au processus de stabilisation de la pénétration d'arc.

Toutefois, l'observation des différents signaux afin de mieux comprendre le fonctionnement de la source a permis de constater une analogie entre l'évolution de la distance tube contact pièce et la tension. En effet, tout d'abord observée sur les moyennes des signaux au cours de la fabrication des différents murs, la tension délivrée par la source semble suivre une évolution similaire à la distance entre le tube contact et la pièce au cours de la fabrication d'une couche. La figure 4.47 illustre leur évolution au cours de la trajectoire suivie par le point piloté du robot lors de la fabrication du mur fin. Hormis aux niveaux des allumages de l'arc où le comportement de la source est différent, l'évolution de la tension est globalement corrélée avec l'évolution de la distance entre le tube contact et la pièce. Ainsi, dans le cadre du contrôle du procédé, le monitoring de la tension de la source peut donner une bonne indication de la distance entre le tube contact et la pièce.

La figure 4.48 illustre l'évolution de la distance entre le tube contact et la pièce et de la tension au cours de la trajectoire du point piloté lors de la fabrication du mur épais. Là encore une corrélation entre l'évolution de la distance tube contact pièce et celle de la tension est visible.

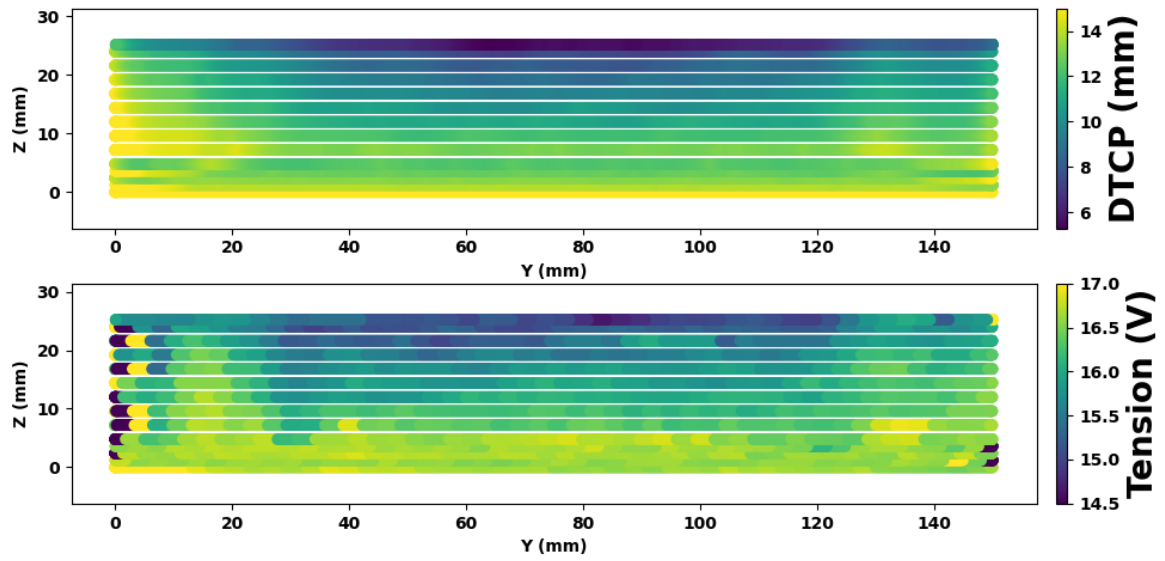
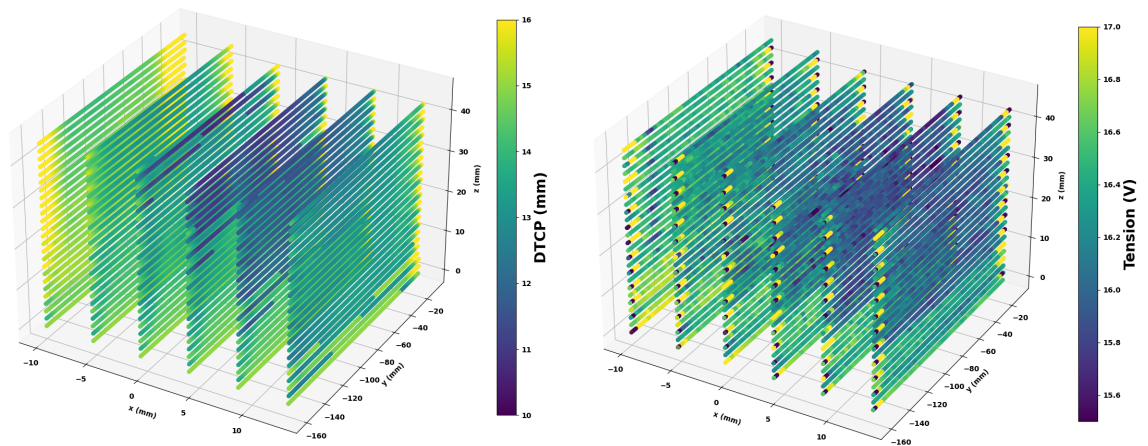


FIGURE 4.47 – Évolution de la distance tube contact pièce (en haut) et de la tension (en bas) au cours de la trajectoire lors de la fabrication du mur fin



(a) Évolution de la distance tube contact pièce lors de la fabrication du mur épais (b) Évolution de la tension lors de la fabrication du mur épais

FIGURE 4.48 – Cartographie 3D de la distance tube contact pièce et de la tension sur la trajectoire du point piloté lors de la fabrication du mur épais

6 Synthèse

L'assemblage de cordons constitue la base de la fabrication en WAAM et il apparaît donc comme indispensable de maîtriser le comportement géométrique de cet assemblage afin d'une part de mener la fabrication à bien et d'autre part de maîtriser la qualité géométrique des ébauches fabriquées. L'étude de l'assemblage a été décomposée en deux parties distinctes à savoir la juxtaposition et l'empilement pour lesquelles plusieurs expérimentations ont été menées afin d'évaluer l'influence des paramètres relatifs à l'assemblage sur la géométrie fabriquée.

L'étude de la juxtaposition a permis d'observer l'influence de la géométrie des cordons mis en œuvre et la distance entre ceux-ci sur la géométrie de la couche déposée. Plusieurs défauts ont pu être observés lorsque la distance de juxtaposition est grande et la topologie des cordons peu bombée. Les cordons plus bombés semblent se juxtaposer plus facilement. La surface supérieure des tapis fabriqués a été caractérisée selon les deux critères proposés. Néanmoins, la première couche étant peu représentative de la géométrie à l'échelle de la pièce, il reste compliqué de déterminer quelles configurations de paramètres permet de minimiser l'apparition et la propagation de défauts à l'échelle de toute une pièce. Il semble nécessaire de déposer plusieurs couches les unes sur les autres et d'étudier l'empilement de cordons.

Plusieurs géométries prismatiques ont été fabriquées pour servir de base d'étude à l'empilement de cordons. Cependant, plusieurs difficultés ont été rencontrées au cours de la fabrication de ces murs et ont mené à des interruptions prématurées du processus. Cela illustre le besoin de connaître a priori certains paramètres de la trajectoire en particulier la hauteur entre couches. Néanmoins, sur l'ensemble des couches déposées sur tous les murs fabriqués, l'évolution de la géométrie et des signaux de la source électrique a pu être observée après la fabrication. Ces essais ont mis en évidence l'influence notable de la distance entre le tube contact et la pièce sur le comportement de la source, principalement sur la quantité de matière délivrée. Il a été observé que les cordons situés au niveau des bords libres des entités fabriquées constituent des cas particuliers pour lesquels une attention particulière est requise afin de limiter l'apparition et la propagation de défauts géométriques. Les cordons situés dans la matière ont globalement un comportement comparable et ce pour les deux types de trajectoires étudiées.

Une modélisation de l'assemblage de cordons dans le plan a été proposée. Elle repose sur des hypothèses géométriques et de conservation de l'aire et propose, à l'instar des modèles de section mono cordon déposé sur substrat plan, de décrire les sections de cordons par des polynômes de degré deux. Cette modélisation a l'avantage d'être relativement simple à mettre en œuvre puisqu'on ne manipule que des polynômes et décrit relativement bien la juxtaposition de cordons sur substrat plan. Cependant, elle ne rend pas compte de la géométrie des surfaces verticales des murs ce qu'un modèle physique issu de la littérature pourrait permettre.

Enfin, l'observation et l'analyse des signaux électriques issus de la source et de l'évolution de la géométrie en cours de fabrication a permis de mettre en évidence une corrélation entre la tension et la distance entre le tube contact et la pièce. La bonne gestion de cette distance est primordiale pour mener la fabrication à son terme et éviter toute collision. Ainsi, dans une optique de contrôle du procédé en cours de fabrication, la surveillance de la tension de la source présente un intérêt.

Conclusion et perspectives

Conclusion générale

La fabrication additive et en particulier les procédés par dépôt d'énergie concentrée permettent la fabrication de pièces de grandes dimensions et de formes complexes. Malgré un intérêt croissant de la part des acteurs académiques comme industriels ces dernières années, l'industrialisation à grande échelle requiert encore une compréhension approfondie du processus de fabrication. Avec l'émergence du concept d'industrie 4.0, le développement et l'utilisation d'outils numériques tel que le jumeau numérique s'inscrit comme un moyen de lever les verrous technologiques posés par la fabrication additive. Même si les concepts autour du jumeau numérique ne sont pas encore tout à fait universellement fixés, ce dernier demande de mettre en œuvre un modèle numérique multi-physique et multi-échelle du procédé physique jumelé. Ces travaux de thèse proposent donc des contributions à la modélisation du procédé de dépôt de fil à l'arc pour l'élaboration d'un jumeau numérique.

Le Chapitre 1 dresse un état de l'art des procédés DED et en particulier du WAAM ainsi que sur le fonctionnement du soudage à l'arc dont ce dernier est largement inspiré. Cela a permis de mettre en exergue que le WAAM est un processus multi-physique complexe pouvant être affecté par différents phénomènes complexes. Le contrôle du procédé, de la géométrie des cordons déposés et de la gestion de l'apport d'énergie au cours de la fabrication apparaît comme indispensable pour maîtriser la fabrication en WAAM. En effet, les problématiques liées à la santé matière, les caractéristiques de sa microstructure, l'état des contraintes résiduelles dans la matière et leur influence sur la géométrie des pièces finies ainsi que la maîtrise de l'assemblage et la jonction de cordons en cours de fabrication font partie des verrous du WAAM. Avec les paramètres du procédé, la trajectoire de construction fait partie des leviers sur lesquels il est possible d'opérer pour améliorer les performances du WAAM. Un état de l'art sur les méthodes de génération de trajectoires dédiées au WAAM a donc été mené. Enfin, avec la volonté de contribuer à la modélisation du procédé de dépôt de fil à l'arc pour l'élaboration d'un jumeau numérique, une architecture de ce dernier est donc proposée. Les caractéristiques de ce jumeau numérique sont nécessairement spécifiques à notre installation, en adéquation avec les capacités de l'instrumentation disponible et en fonction des besoins et usages envisagés au sein du projet.

Le Chapitre 2 traite de l'étude et de la modélisation des monocordons déposés à vitesse constante. Conditionnant le choix de la stratégie à mettre en œuvre et la génération de la trajectoire associée, la maîtrise des dimensions géométriques des cordons fabriqués en fonction des paramètres procédé mis en œuvre est indispensable. Cette étape de caractérisation du procédé a donc été menée expérimentalement pour les matériaux G3Si et X90-IG, deux gaz d'inertage régulièrement utilisés, deux diamètres de fil et deux modes de transfert de la matière sur des plages de vitesse d'avance du robot et de vitesse de fil dévidé importantes. Les nombreux essais réalisés ont permis de dresser différents abaques permettant d'anticiper les dimensions géométriques des cordons fabriqués en fonction des paramètres procédé mis en œuvre. En s'appuyant sur un modèle polynomial de la section des cordons fabriqués, ces abaques viennent alimenter le jumeau numérique de notre système pour contribuer à la simulation de la géométrie fabriquée et aider à

la génération de la trajectoire. Plusieurs outils de traitement des données issues de l'instrumentation ont aussi été développés. Ces outils viennent également alimenter l'interfaçage du jumeau numérique avec le système physique.

Le Chapitre 3 se concentre sur l'étude et l'analyse du comportement géométrique des cordons au voisinage de points de changement de direction. L'apparition systématique d'accumulation de matière au passage de ces points a pu être observée expérimentalement. Le comportement cinématique du robot a une influence majeure sur l'accumulation de matière. Il dépend des paramètres liés à la trajectoire tels que l'angle formé par les deux segments consécutifs autour du point considéré, la vitesse d'avance du robot et le paramètre de lissage de la trajectoire, fixant un compromis entre la diminution de vitesse et l'écart au contour au passage du point de changement de direction. Ainsi, en se basant sur les observations expérimentales, le comportement cinématique du robot a été modélisé au moyen de filtres à réponse impulsionnelle finie pour effectuer l'interpolation temporelle de la trajectoire nominale. Il a également été constaté que la trajectoire suivie par la torche n'est pas révélatrice de la position du cordon autour des points de changement de direction. Pour palier à cela le concept de trajectoire de poursuite à la torche est proposé pour décrire le phénomène observé de trainage du bain liquide. Enfin, en se basant sur les observations du bain liquide en cours de fabrication, une modélisation du cordon en cours de fabrication est présentée. Cette modélisation consiste, tout au long de la trajectoire parcourue, à sommer l'ensemble des volumes de matière déposés au cours de la fabrication. La répartition du volume de matière est fixée par une fonction qui suit la trajectoire de la torche et est orientée par sa trajectoire de poursuite.

Dans le Chapitre 4, une étude expérimentale est menée sur la juxtaposition de cordons, l'empiement et de manière plus générale sur l'assemblage de cordons à travers la fabrication de murs fins et épais. L'influence de la distance de juxtaposition entre deux cordons consécutifs et de la géométrie des cordons mis en œuvre sur les caractéristiques de la surface ainsi fabriquée a été quantifiée dans le cadre de tapis déposés sur un substrat plan. Un modèle de juxtaposition des sections des cordons se basant exclusivement sur des considérations géométriques et sur la conservation de la matière a été proposé. La fabrication des différents murs a permis de mettre en évidence le comportement complexe et difficilement interprétable de la source électrique employée. En effet, l'évolution de la distance entre le tube contact et la pièce au cours de la fabrication a une influence directe sur le comportement de la source électrique et notamment sur la quantité de matière apportée. Il semblerait que la source électrique régule activement ses signaux pour adapter, en notre faveur, la quantité de matière apportée. Néanmoins, cette stratégie de régulation n'est pas identifiée clairement. Enfin, une généralisation de la modélisation des sections développée pour la juxtaposition, en l'adaptant aux différentes situations d'assemblage, est proposée pour pouvoir simuler la section de la géométrie fabriquée. Dans le cadre de l'élaboration de la stratégie de fabrication, ce type de modélisation permet de mieux identifier les paramètres de la trajectoire tels que la hauteur entre couches et la distance inter-cordons qui sont indispensables à la programmation de toute trajectoire et limite les risques d'interruptions de fabrication dues à d'éventuelles dérives de la distance tube contact pièce.

Perspectives

Les géométries considérées ici pour étudier les situations d'assemblages de cordons sont relativement simples, il conviendra donc d'élargir notre étude à des géométries plus complexes, à l'image de pièces industrielles, présentant par exemple des situations de porte-à-faux ou fabriquées à partir de substrats non plans. Ainsi, l'amélioration et l'affinage des différents modèles proposés pour qu'ils soient capables de mieux appréhender la fabrication de pièces à géométrie complexe constitue une des principales perspectives de ces travaux. Par exemple, une fonction de répartition de la matière évoluant au cours de la trajectoire pourrait permettre de mieux rendre compte de la réalité dans le modèle de dépôt cumulatif proposé.

Les trajectoires mises en œuvre pour la fabrication de telles pièces demandent de piloter un ou plusieurs axes supplémentaires de notre installation et dont il nous faut intégrer le comportement cinématique. La modélisation du comportement cinématique du robot dans l'espace des tâches faite ici a été validée dans le cas de mouvements de translation rectilignes. Néanmoins, ce modèle demande d'être validé pour des mouvements de rotation de la torche et incluant des mouvements des axes supplémentaires.

L'ensemble des études réalisées au travers des différentes campagnes expérimentales a apporté de multiples éléments de compréhension autour du processus de fabrication en WAAM. La génération de cordons par dépôt de fil à l'arc est un procédé complexe mettant en action des phénomènes mécaniques et thermiques couplés. Les différents modèles et méthodes de traitement des données expérimentales ont pour objectif d'alimenter un jumeau numérique. La mise en œuvre d'un tel jumeau pour l'élaboration en amont de la fabrication puis pour l'optimisation des stratégies de fabrication en fonction du comportement physique réel observé fait partie des principales perspectives de ces travaux de thèse. Ainsi le développement de stratégies de pilotage des paramètres procédé et de la trajectoire pour maîtriser la géométrie fabriquée couche après couche s'inscrit dans cette optique.

Les études menées sur le comportement de la source électrique lors de la fabrication ont montré une corrélation entre l'évolution de la tension délivrée et celle de la distance entre le tube contact et la pièce. Dans le cadre de l'utilisation du jumeau numérique, ce comportement offre des perspectives intéressantes en matière de surveillance et de contrôle du moyen de production. De plus, l'intégration dans le jumeau numérique d'autres phénomènes ayant une influence significative sur le processus de fabrication, tels que ceux liés à la thermique, contribue à l'enrichissement du jumeau numérique. Pour cet exemple, il serait nécessaire de modéliser le comportement thermique de la pièce en cours de fabrication, mais aussi de mettre en œuvre une instrumentation spécifique et cohérente avec les grandeurs physiques à suivre en cours de fabrication.

La capacité du jumeau numérique à piloter et optimiser la fabrication en fonction des données simulées et mesurées réside dans son organe décisionnel. Le pilotage des paramètres procédé et de la trajectoire du robot passe par une analyse et une interprétation de ces données par le jumeau. Cette étape de traitement des informations est un pré-requis indispensable à toute interaction, si caractéristique au concept de jumeau numérique, avec la commande du processus de fabrication. Le développement de cette intelligence est donc indispensable pour devenir, dans un premier temps, un outil d'aide à la prise de décision puis, à plus long terme, tendre vers une plus grande autonomie et constitue une des perspectives de ces travaux de thèse. Une attention particulière devra être portée à la capacité de cet organe décisionnel à réagir à des situations inédites.

Références

- [1] K.V. Wong, A. Hernandez, N. Anifantis, and F. Findik. A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, pp 208760, 2012. (cité en page 1)
- [2] ISO 17296-2. Additive manufacturing - general principles - part 2 : Overview of process categorie and feedstock. Technical report, International Organization for Standardization, 2015. (cité en pages 1 et 6)
- [3] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, and M. Dolen. The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, pp 545–554, 2017. (cité en pages vii et 1)
- [4] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, and C. Emmelmann. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, pp 371–392, 2016. (cité en page 1)
- [5] A. Dass and A. Moridi. State of the art in directed energy deposition : From additive manufacturing to materials design. *Coatings*, 9(7), 2019. (cité en pages vii et 6)
- [6] K. S. Derekar. A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium. *Materials Science and Technology*, 34(8), pp 895–916, 2018. (cité en pages vii, 6, 7, 14 et 18)
- [7] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, and P. Colegrove. Wire + arc additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 32(7), pp 641–647, 2016. (cité en pages 6, 8 et 20)
- [8] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li. Wire-feed additive manufacturing of metal components : technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(1), pp 465–481, 2015. (cité en pages vii, 7 et 9)
- [9] J. Liu, Y. Xu, Y. Ge, Z. Hou, and S. Chen. Wire and arc additive manufacturing of metal components : a review of recent research developments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111(1), pp 149–198, 2020. (cité en page 7)
- [10] D. Jafari, T. H.J. Vaneker, and I. Gibson. Wire and arc additive manufacturing : Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts. *Materials & Design*, 202, pp 109471, 2021. (cité en pages vii, 7 et 15)
- [11] I. Taberero, A. Paskual, P. Álvarez, and A. Suárez. Study on arc welding processes for high deposition rate additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 68, pp 358–362, 2018. (cité en page 7)
- [12] A. Azarniya, X. Garmendia Colera, M. J. Mirzaali, S. Sovizi, F. Bartolomeu, M. K. St Węglowski, W. W. Wits, C. Y. Yap, J. Ahn, G. Miranda, F. S. Silva, H. R. Madaah Hosseini, S. Ramakrishna, and A. A. Zadpoor. Additive manufacturing of Ti–6Al–4V parts through laser metal deposition (LMD) : Process, microstructure, and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 804, pp 163–191, 2019. (cité en page 7)

- [13] C. Buchanan and L. Gardner. Metal 3D printing in construction : A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. *Engineering Structures*, 180, pp 332–348, 2019. (cité en page 8)
- [14] J. Plangger, P. Schabhüttl, T. Vuherer, and N. Enzinger. CMT additive manufacturing of a high strength steel alloy for application in crane construction. *Metals*, 9(6), 2019. (cité en pages vii, viii, 8, 11, 33, 34 et 47)
- [15] J. Xiong, G. Zhang, H. Gao, and L. Wu. Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(2), pp 417–423, 2013. (cité en pages vii, ix, 11, 32, 33 et 96)
- [16] Y. Cao, S. Zhu, X. Liang, and W. Wang. Overlapping model of beads and curve fitting of bead section for rapid manufacturing by robotic MAG welding process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(3), pp 641–645, 2011. (cité en pages vii, ix, 11, 32, 33, 36 et 96)
- [17] Y. Li, Y. Sun, Q. Han, G. Zhang, and I. Horváth. Enhanced beads overlapping model for wire and arc additive manufacturing of multi-layer multi-bead metallic parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 252, pp 838–848, 2018. (cité en pages 11, 100, 103 et 105)
- [18] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, S. van Duin, and N. Larkin. Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 39, pp 32 – 42, 2016. (cité en page 11)
- [19] R. Cazes. Soudage à l’arc. *Techniques de l’ingénieur*, 1995. (cité en pages vii, 13 et 135)
- [20] J. P. Planckaert. *Modélisation du soudage MIG/MAG en mode short-arc*. Thèse, Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2008. (cité en pages vii, x, 14, 132 et 133)
- [21] S. Selvi, A. Vishvaksean, and E. Rajasekar. Cold metal transfer (CMT) technology - an overview. *Defence Technology*, 14(1), pp 28–44, 2018. (cité en page 14)
- [22] C.G. Pickin, S.W. Williams, and M. Lunt. Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(3), pp 496–502, 2011. (cité en page 14)
- [23] P. Almeida and S Williams. Innovative process model of Ti–6Al–4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT). *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp 25–36, 2010. (cité en page 14)
- [24] V. Wesling, A. Schram, and M. Kessler. Low heat joining – manufacturing and fatigue strength of brazed, locally hardened structures. *Advanced Materials Research*, 137, pp 347–374, 2010. (cité en pages vii et 15)
- [25] X. Lu, Y. F. Zhou, X. L. Xing, L. Y. Shao, Q. X. Yang, and S. Y. Gao. Open-source wire and arc additive manufacturing system : formability, microstructures, and mechanical properties. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(5), pp 2145–2154, 2017. (cité en pages vii et 18)
- [26] F. Michel, H. Lockett, J. Ding, F. Martina, G. Marinelli, and S. Williams. A modular path planning solution for wire + arc additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 60, pp 1–11, 2019. (cité en pages vii, 19, 23 et 24)
- [27] F. Li, S. Chen, Z. Wu, and Z. Yan. Adaptive process control of wire and arc additive manufacturing for fabricating complex-shaped components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(1), pp 871–879, 2018. (cité en pages viii, 19 et 58)

- [28] L. Nguyen, J. Buhl, and M. Bambach. Multi-bead overlapping models for tool path generation in wire-arc additive manufacturing processes, 23rd international conference on material forming. *Procedia Manufacturing*, 47, pp 1123–1128, 2020. (cité en pages ix, 19, 59 et 87)
- [29] G. Ma, G. Zhao, Z. Li, M. Yang, and W. Xiao. Optimization strategies for robotic additive and subtractive manufacturing of large and high thin-walled aluminum structures. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(5), pp 1275–1292, 2019. (cité en page 20)
- [30] P. A. Colegrove, F. Martina, M. J. Roy, B. A. Szost, S. Terzi, S. W. Williams, P. J. Withers, and D. Jarvis. High pressure interpass rolling of wire + arc additively manufactured titanium components. *Advanced Materials Research*, 996, pp 694–700, 2014. (cité en page 20)
- [31] J.R. Hönnige, P.A. Colegrove, S. Ganguly, E. Eimer, S. Kabra, and S. Williams. Control of residual stress and distortion in aluminium wire + arc additive manufacture with rolling. *Additive Manufacturing*, 22, pp 775–783, 2018. (cité en page 20)
- [32] J.R. Hönnige, S. W. Williams, M. Roy, P.A. Colegrove, and S. Ganguly. Residual stress characterization and control in the additive manufacture of large scale metal structures. 2016. (cité en page 20)
- [33] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, N. Larkin, and S. Duin. Multi-direction slicing of STL models for robotic wire-feed additive manufacturing. *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2015. (cité en pages vii et 21)
- [34] J. Ruan, L. Tang, F. Liou, and R. G. Landers. Direct three-dimensional layer metal deposition. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 132, pp 064502, 2010. (cité en pages vii, 21 et 22)
- [35] Maxime Chalvin. *Fabrication additive de tubulures par dépôt de fil robotisé multi-axes : génération et optimisation de trajectoires*. Theses, Université de Toulon, July 2020. (cité en pages vii et 22)
- [36] M.R. Dunlavey. Efficient polygon-filling algorithms for raster displays. *ACM Trans. Graph.*, 2, pp 264–273, 1983. (cité en page 23)
- [37] S.C. Park and B.K. Choi. Tool-path planning for direction-parallel area milling. *Computer-Aided Design*, 32(1), pp 17–25, 2000. (cité en page 23)
- [38] V T. Rajan, Vijay Srinivasan, and Konstantinos Tarabanis. The optimal zigzag direction for filling a two-dimensional region. *Rapid Prototyping Journal*, 7, pp 231–241, 2001. (cité en page 23)
- [39] R.T. Farouki, T. Koenig, K.A. Tarabanis, J.U. Korein, and J.S. Batchelder. Path planning with offset curves for layered fabrication processes. *Journal of Manufacturing Systems*, 14(5), pp 355–368, 1995. (cité en page 23)
- [40] Y. Yang, H.T. Loh, J.Y.H. Fuh, and Y.G. Wang. Equidistant path generation for improving scanning efficiency in layered manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 8, pp 30–37, 2002. (cité en page 23)
- [41] H. Li, Z. Dong, and G.W. Vickers. Optimal toolpath pattern identification for single island, sculptured part rough machining using fuzzy pattern analysis. *Computer-Aided Design*, 26(11), pp 787–795, 1994. (cité en page 23)
- [42] H. Wang, P. Jang, and J. A. Stori. A metric-based approach to two-dimensional (2D) tool-path optimization for high-speed machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 127(1), pp 33–48, 2005. (cité en page 23)

- [43] F. Ren, Y. Sun, and D. Guo. Combined reparameterization-based spiral toolpath generation for five-axis sculptured surface machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(7), pp 760–768, 2009. (cité en page 23)
- [44] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li. A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(1), pp 173–183, 2014. (cité en page 23)
- [45] R. Dwivedi and R. Kovacevic. Automated torch path planning using polygon subdivision for solid freeform fabrication based on welding. *Journal of Manufacturing Systems*, 23(4), pp 278–291, 2004. (cité en page 23)
- [46] M. Bertoldi, M. A. Yardimci, C. M. Pistor, and S. I. Guceri. Domain decomposition and space filling curves in toolpath planning and generation. *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 1998. (cité en page 23)
- [47] Y. Zhang, Y. Chen, P. Li, and A. T. Male. Weld deposition-based rapid prototyping : a preliminary study. *Journal of Materials Processing Technology*, 135(2), pp 347–357, 2003. (cité en page 23)
- [48] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, and N. Larkin. Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation. *Journal of Cleaner Production*, 133, pp 942–952, 2016. (cité en pages vii, 23 et 24)
- [49] A. Deuter and F. Pethig. The digital twin theory. *Industrie 4.0 Management*, pp 27–30, 2019. (cité en page 25)
- [50] W. Luo, T. Hu, C. Zhang, and Y. Wei. Digital twin for CNC machine tool : modeling and using strategy. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(3), pp 1129–1140, 2019. (cité en pages 25 et 26)
- [51] R. Rosen, G. Wichert, G. Lo, and K. D. Bettenhausen. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), pp 567–572, 2015. 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing. (cité en page 26)
- [52] D. Botkina, M. Hedlind, B. Olsson, J. Henser, and T. Lundholm. Digital twin of a cutting tool. *Procedia CIRP*, 72, pp 215–218, 2018. 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems. (cité en page 26)
- [53] M. Ayani, M. Ganebäck, and H.C. Ng Amos. Digital twin : Applying emulation for machine reconditioning. *Procedia CIRP*, 72, pp 243–248, 2018. 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems. (cité en page 26)
- [54] R. Magargle, L. Johnson, P. Mandloi, P. Davoudabadi, O. Kesarkar, S. Krishnaswamy, J. Batteh, and A. Pitchaikani. A simulation-based digital twin for model-driven health monitoring and predictive maintenance of an automotive braking system. *Proceedings of the 12th International Modelica Conference*, 132(3), pp 35–46, 2017. (cité en page 26)
- [55] F. Tao, Q. Qi, L. Wang, and A.Y.C. Nee. Digital twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0 : Correlation and comparison. *Engineering*, 5, pp 653–661, 2019. (cité en pages vii et 26)
- [56] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (waam). *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 31, pp 101–110, 2015. (cité en pages ix, xiii, 32 et 97)

- [57] S. Suryakumar, K.P. Karunakaran, A. Bernard, U. Chandrasekhar, N. Raghavender, and D. Sharma. Weld bead modeling and process optimization in hybrid layered manufacturing. *Computer-Aided Design*, 43(4), pp 331–344, 2011. (cité en pages [ix](#), [33](#), [97](#) et [98](#))
- [58] J.S. Panchagnula and S. Simhamdhatla. Inclined slicing and weld-deposition for additive manufacturing of metallic objects with large overhangs using higher order kinematics. *Virtual and Physical Prototyping*, 11, pp 1–10, 2016. (cité en page [33](#))
- [59] M.S. Mohebbi, M. Kühn, and V. Ploshikhin. A thermo-capillary-gravity model for geometrical analysis of single-bead wire and arc additive manufacturing (waam). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109(3), pp 877–891, 2020. (cité en pages [viii](#), [ix](#), [34](#), [35](#), [98](#) et [128](#))
- [60] M. A. Fischler and R. C. Bolles. Random sample consensus : A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Commun. ACM*, 24(6), pp 381–395, 1981. (cité en page [41](#))
- [61] FANUC American Corporation. *SYSTEM R-30iB and R-30iB Mate HandlingTool and MATE HandlingTool Setup and Operations Manual, Version 8.30 series*, MAROBHT8304141E REV E edition, 2016. (cité en page [54](#))
- [62] H. H. Liu, T. Zhao, L. Y. Li, W. J. Liu, T. Q. Wang, and J. F. Yue. A path planning and sharp corner correction strategy for wire and arc additive manufacturing of solid components with polygonal cross-sections. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(11), pp 4879–4889, 2020. (cité en pages [viii](#), [58](#) et [59](#))
- [63] X. Beudaert, S. Lavernhe, and C. Tournier. 5-axis local corner rounding of linear tool path discontinuities. *int j mach tools manuf. International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 73, pp 9–16, 10 2013. (cité en page [64](#))
- [64] K. Erkorkmaz and Y. Altintas. High speed cnc system design. part i : jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(9), pp 1323–1345, 2001. (cité en page [64](#))
- [65] S. Tajima, B. Sencer, and E. Shamoto. Accurate interpolation of machining tool-paths based on fir filtering. *Precision Engineering*, 52, pp 332–344, 2018. (cité en page [64](#))
- [66] L. Biagiotti and C. Melchiorri. Fir filters for online trajectory planning with time- and frequency-domain specifications. *Control Engineering Practice*, 20(12), pp 1385–1399, 2012. (cité en pages [viii](#), [64](#) et [65](#))
- [67] S. Ríos, P. A. Colegrove, F. Martina, and S. W. Williams. Analytical process model for wire + arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 21, pp 651–657, 2018. (cité en page [87](#))
- [68] R. Trivedi, S. A. David, M. A. Eshelman, J. M. Vitek, S. S. Babu, T. Hong, and T. DebRoy. In situ observations of weld pool solidification using transparent metal-analog systems. *Journal of Applied Physics*, 93, pp 4885–4895, 2003. (cité en page [87](#))
- [69] J. Goldak, A. Chakravarti, and M. Bibby. A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical Transactions B*, 15(2), pp 299–305, 1984. (cité en page [88](#))
- [70] W. Aiyiti, W. Zhao, B. Lu, and Y. Tang. Investigation of the overlapping parameters of mpaw-based rapid prototyping. *Rapid Prototyping Journal*, 12, pp 165–172, 2006. (cité en pages [ix](#) et [96](#))
- [71] W.S. Cleveland. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, 74(368), pp 829–836, 1979. (cité en page [117](#))

- [72] Fronius. *Documentation technique TPS 320i / 400i / 500i / 600i*, 2019. (cité en page [131](#))
- [73] D. S. Naidu, S. Ozcelik, and K. L. Moore. Chapter 2 - gas metal arc welding : Modeling. In Desineni Subbaram Naidu, Selahattin Ozcelik, and Kevin L. Moore, editors, *Modeling, Sensing and Control of Gas Metal Arc Welding*, pp 9–93. Elsevier Science Ltd, Oxford, 2003. (cité en page [132](#))

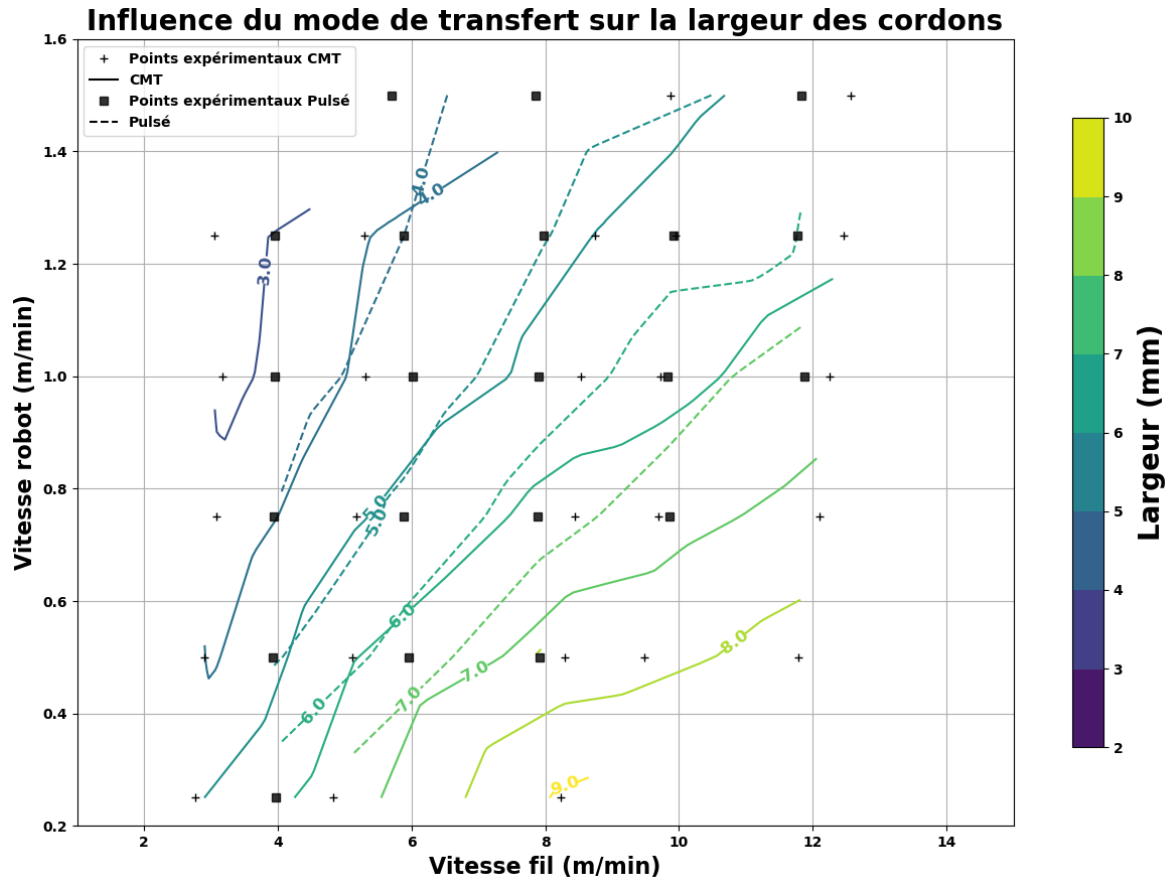
Annexe A

Plan d'expérience X90

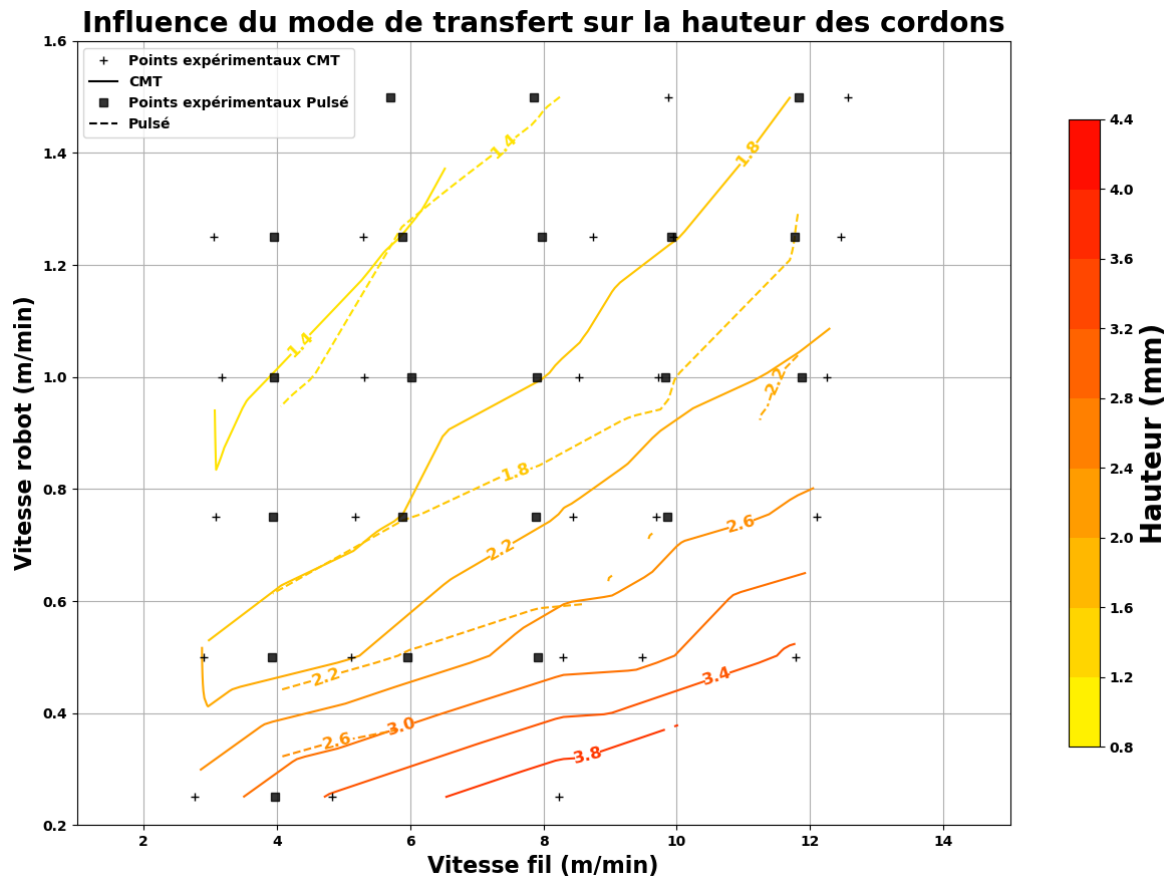
1 Comparaison mode de transfert

1.1 Géométrie

1.2 Énergie linéique

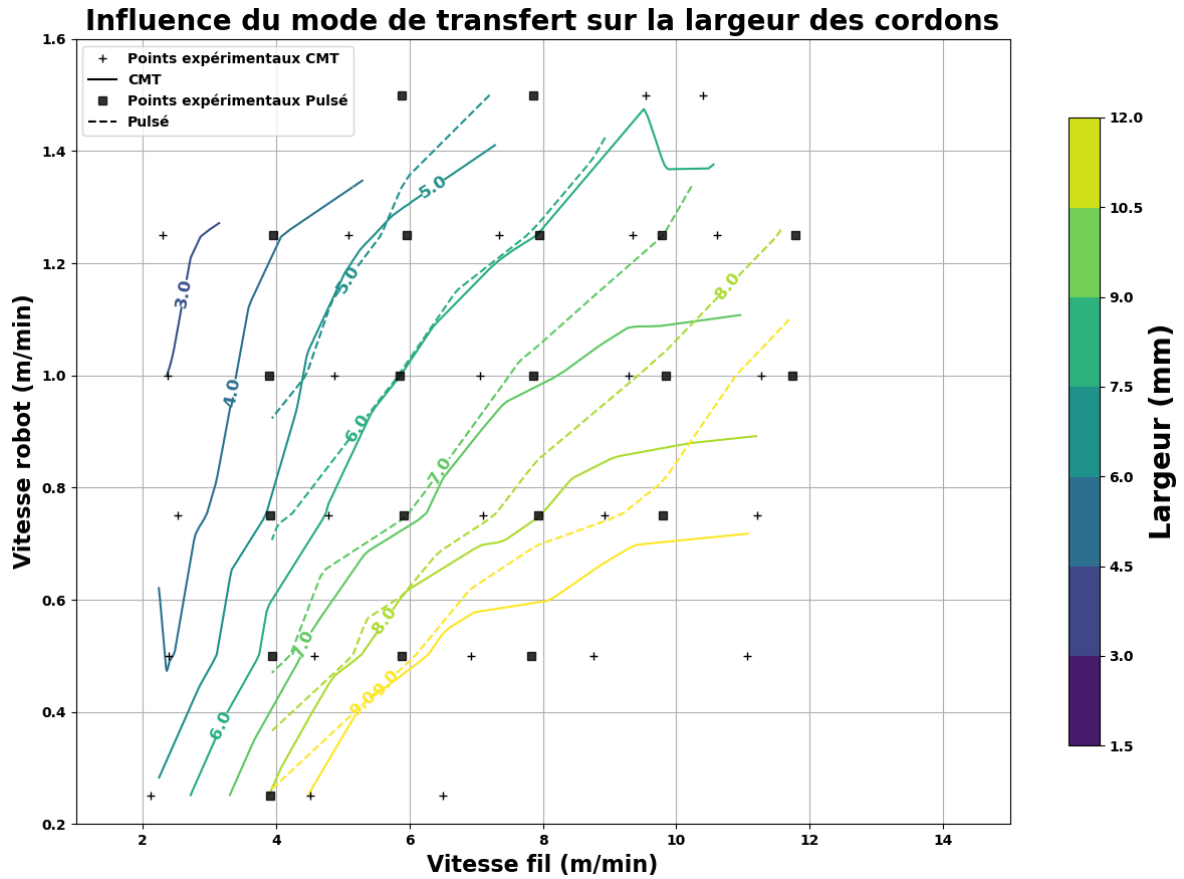


(a) Évolution de la largeur

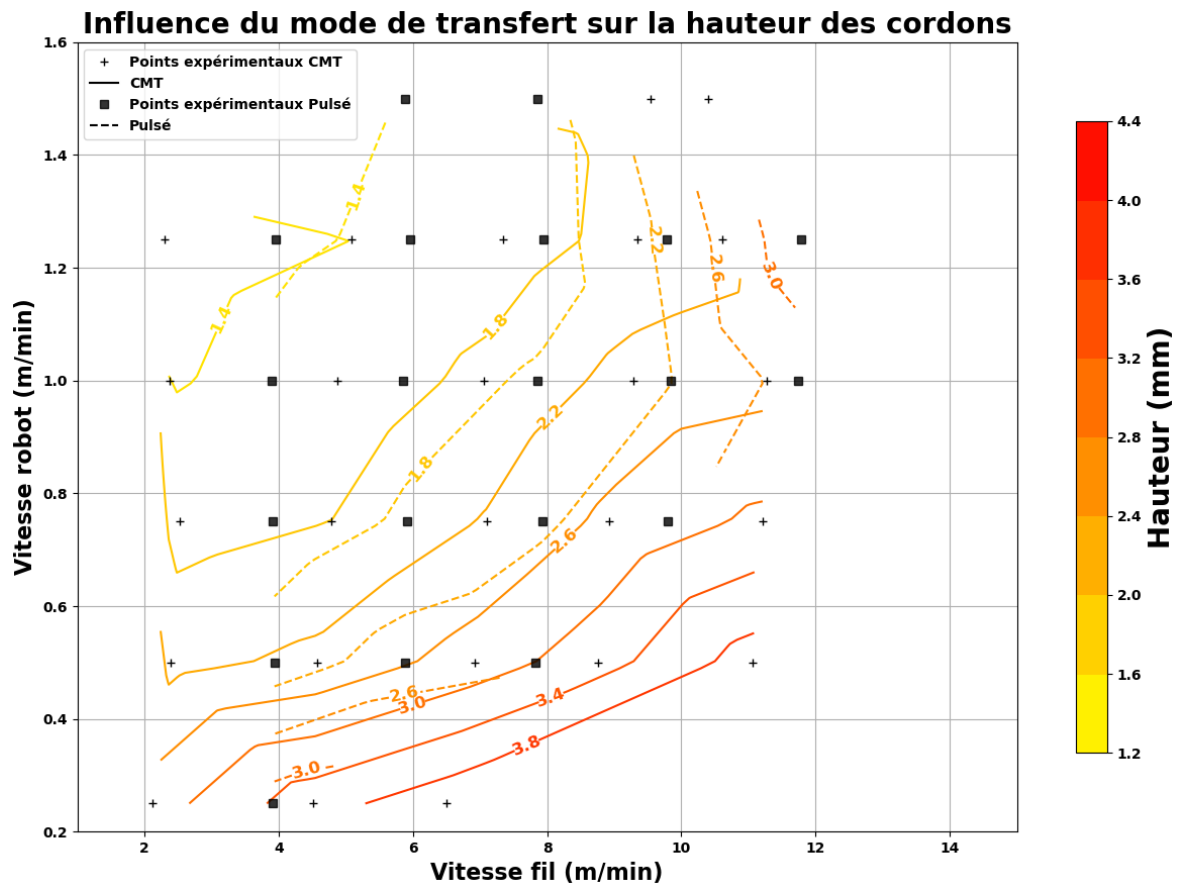


(b) Évolution de la hauteur

FIGURE A.1 – Évolution des dimensions des cordons en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1 mm et un gaz Arcal Speed

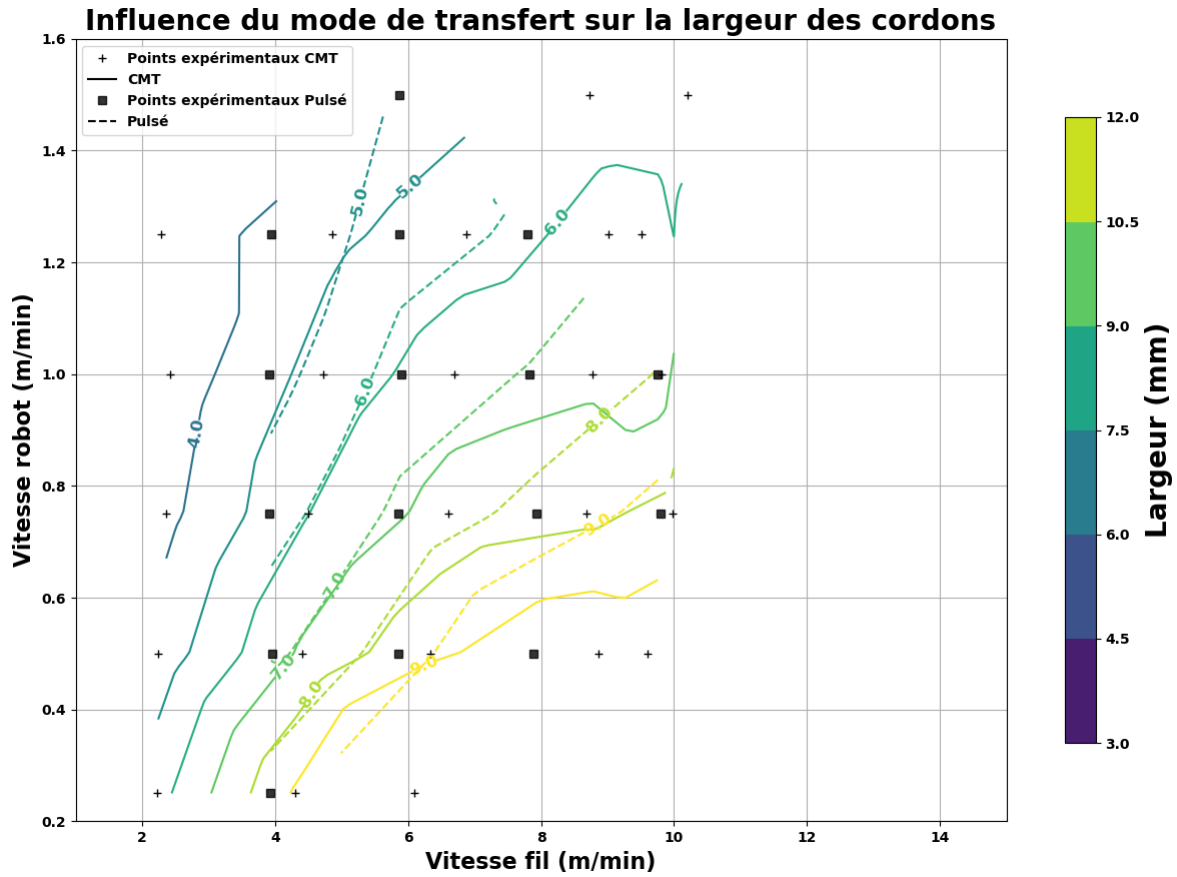


(a) Évolution de la largeur

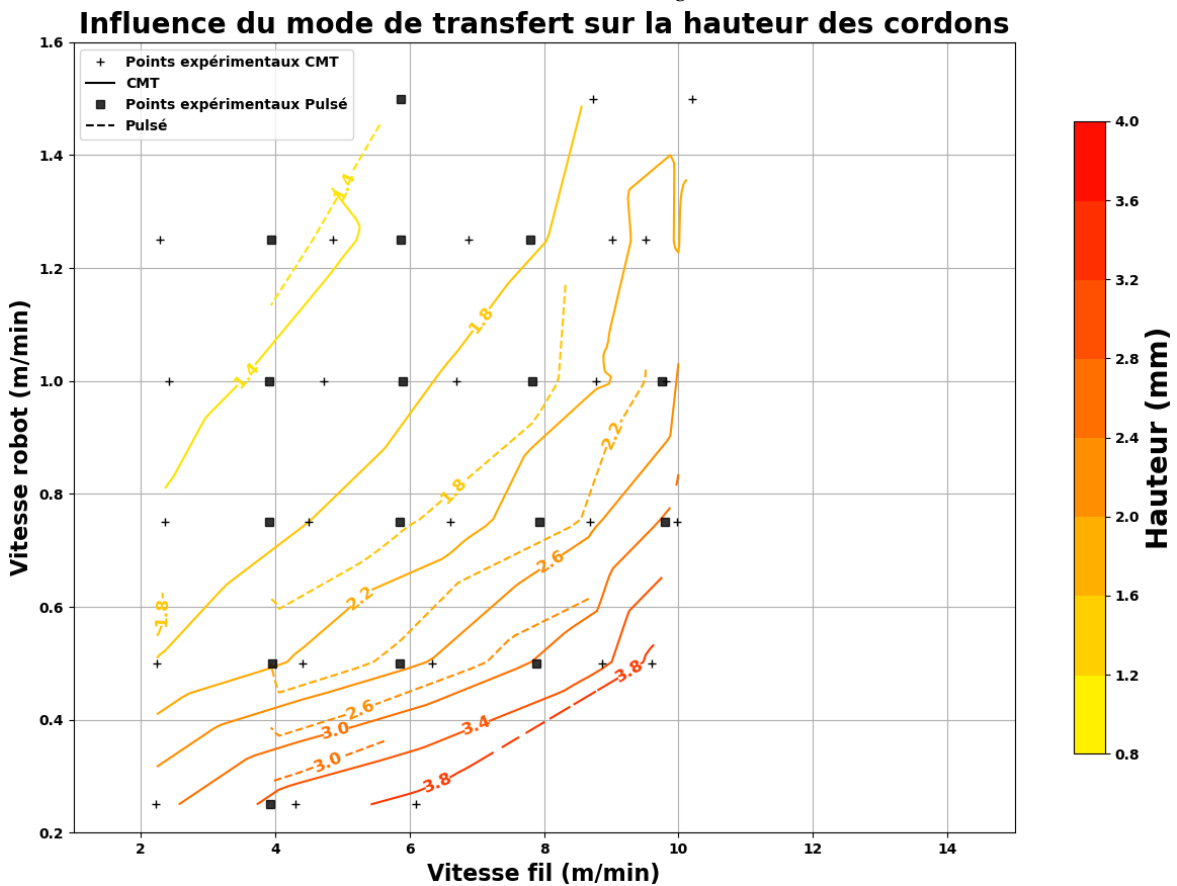


(b) Évolution de la hauteur

FIGURE A.2 – Évolution des dimensions des cordons en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,2 mm et un gaz M14



(a) Évolution de la largeur



(b) Évolution de la hauteur

FIGURE A.3 – Évolution des dimensions des cordons en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,2 mm et un gaz ArcalSpeed

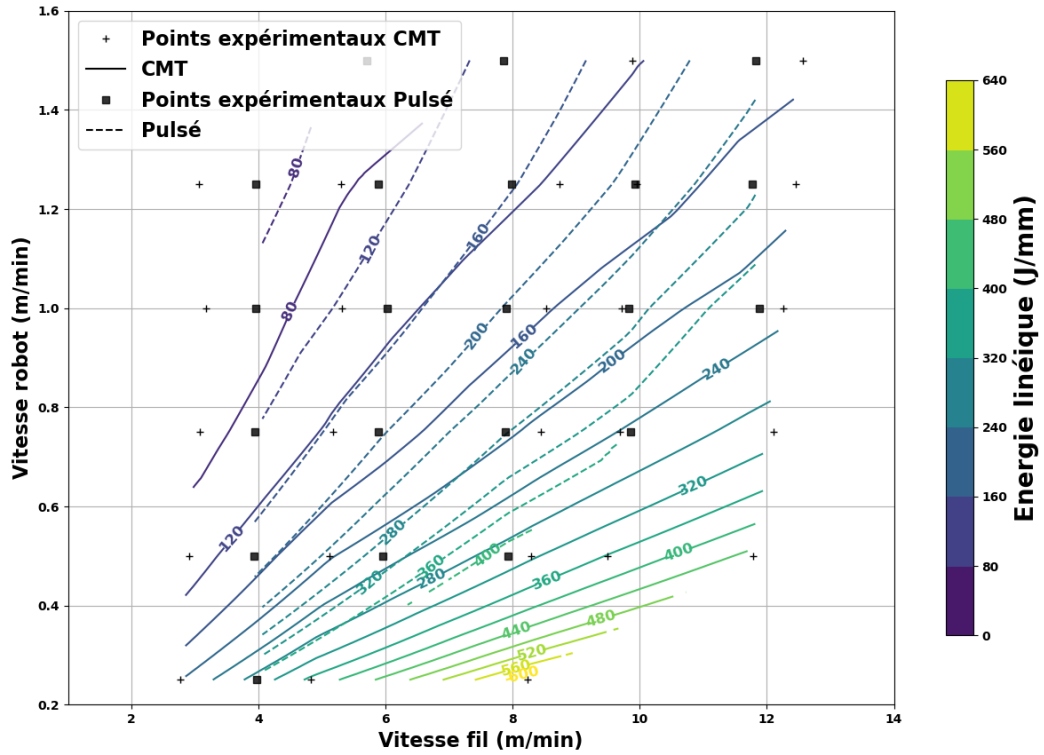


FIGURE A.4 – Énergie linéique déposée en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1 mm et un gaz Arcal Speed

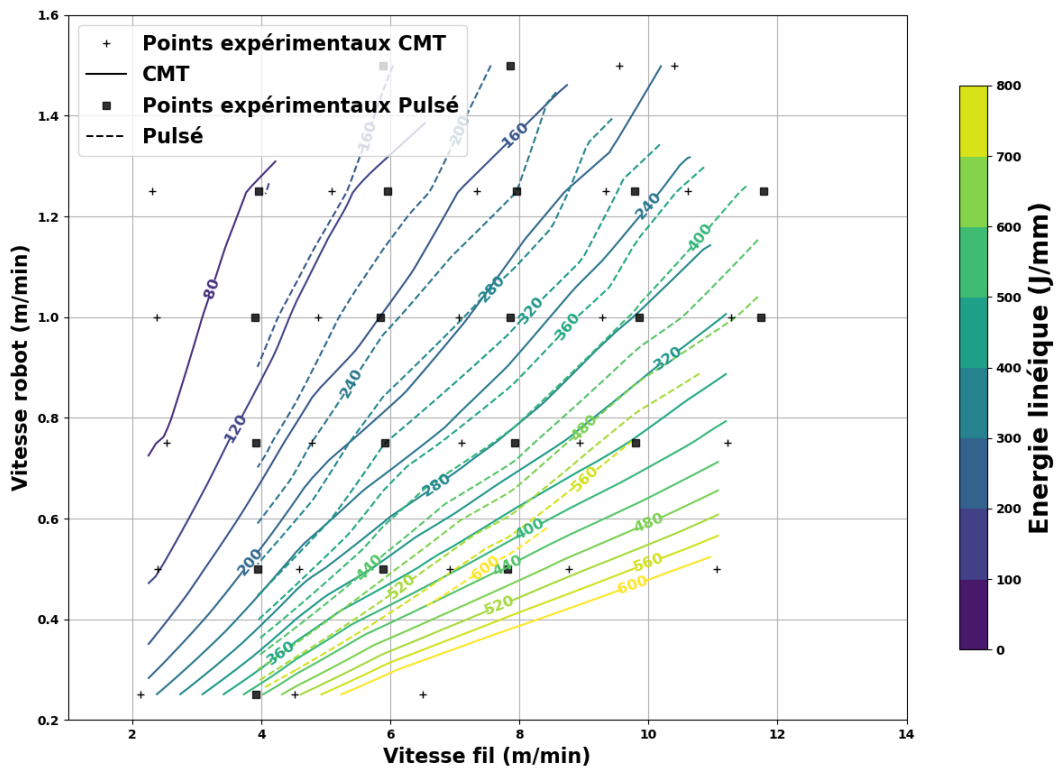


FIGURE A.5 – Énergie linéique déposée en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,2 mm et un gaz M14

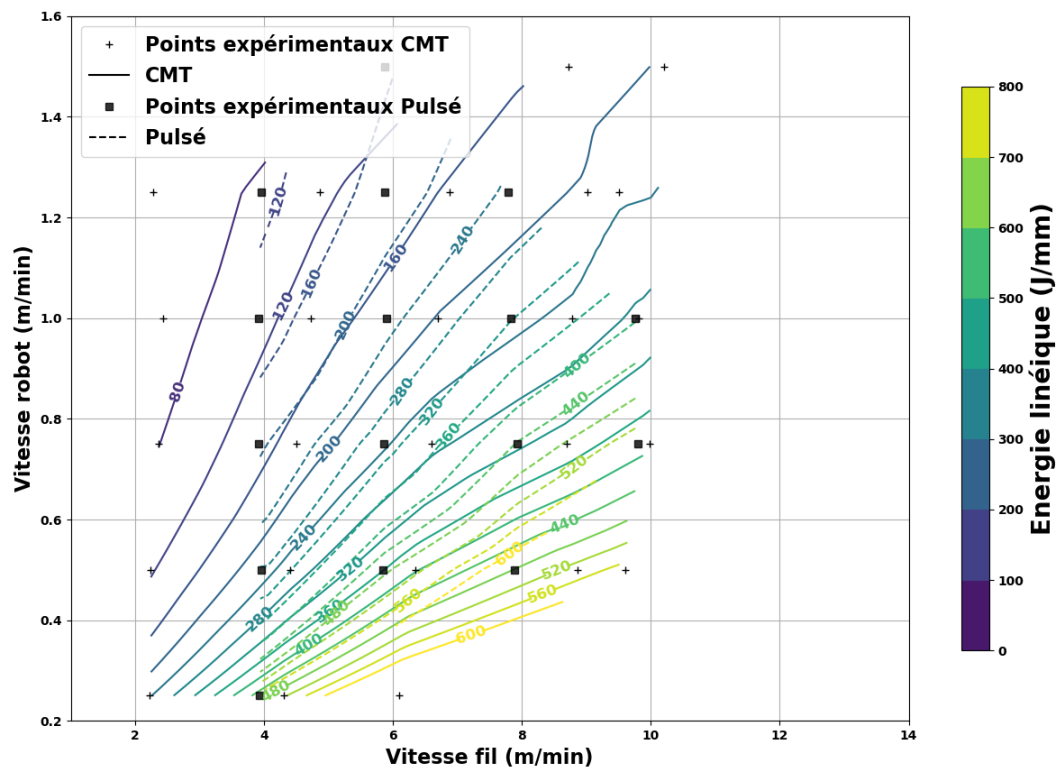


FIGURE A.6 – Énergie linéique déposée en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,2 mm et un gaz Arcal Speed

2 Comparaison gaz

2.1 Géométrie

2.2 Energie linéique

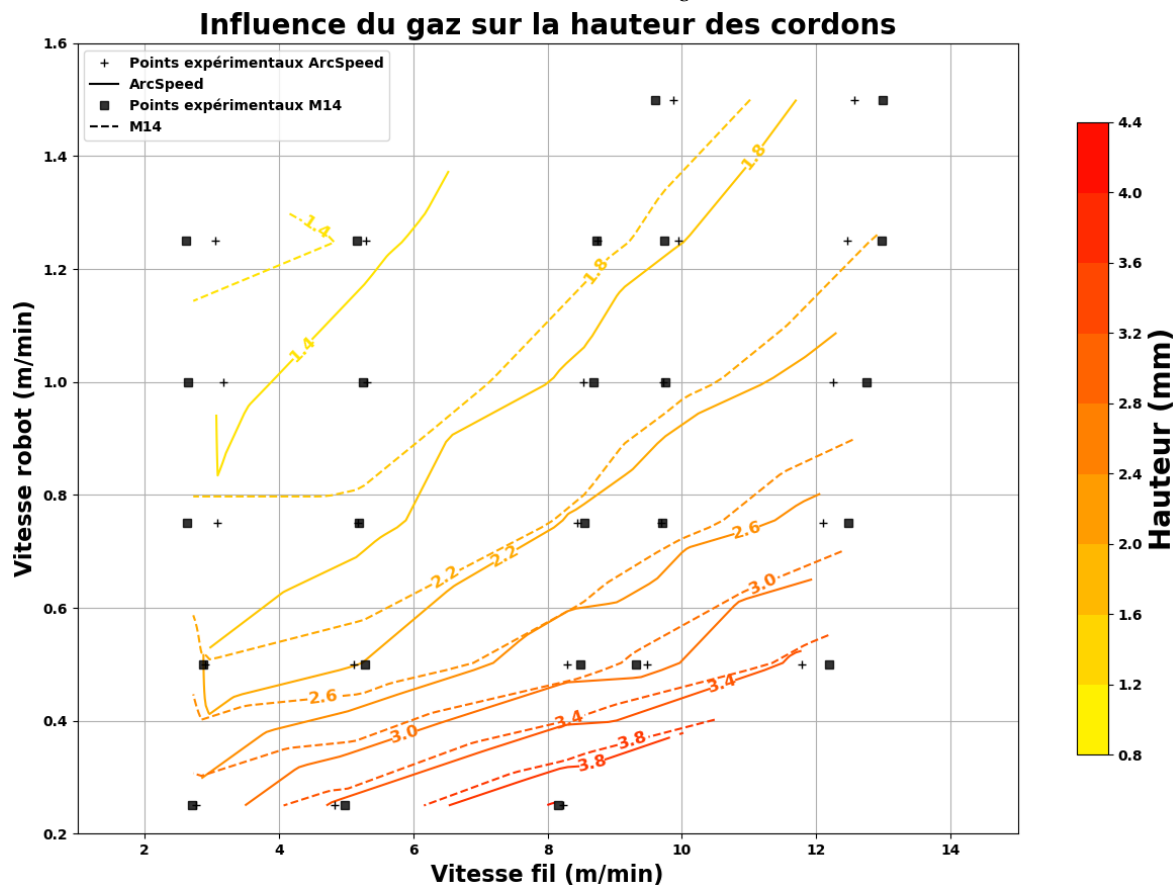
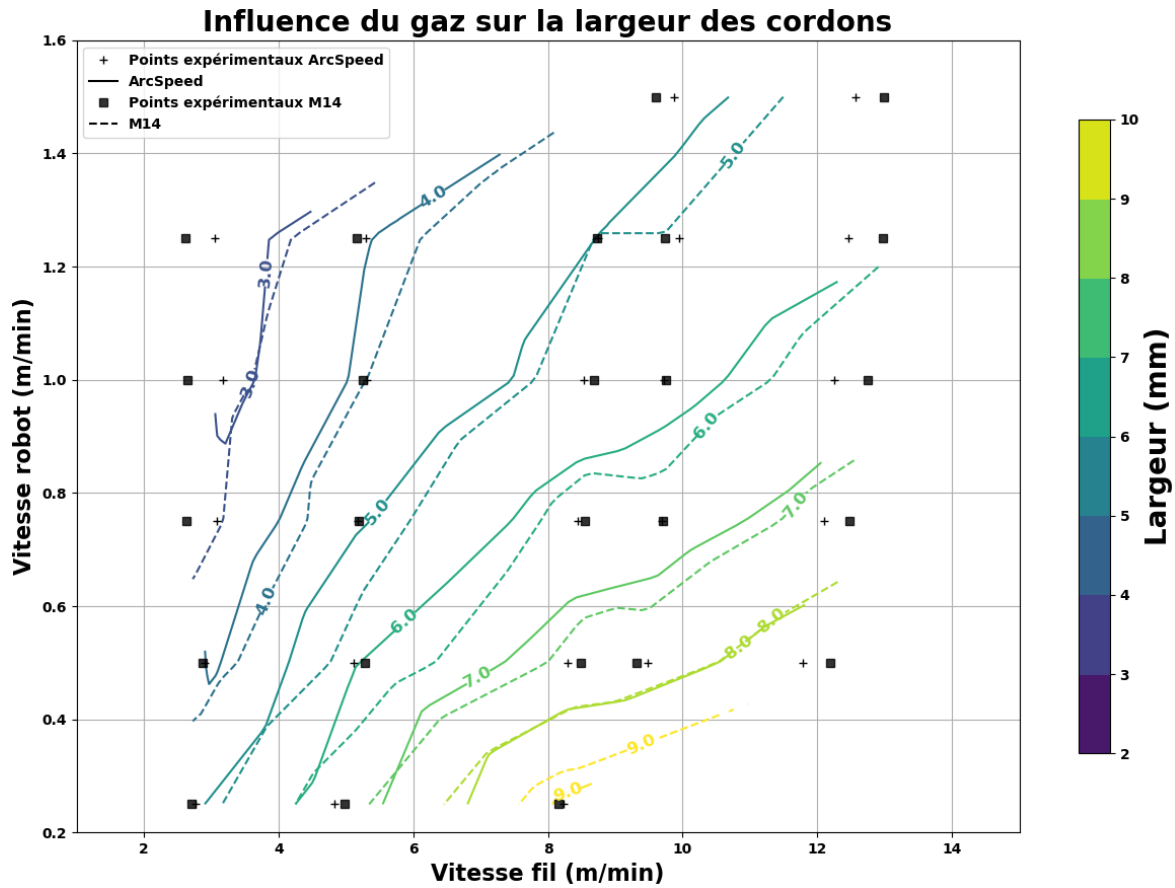


FIGURE A.7 – Évolution des dimensions des cordons en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,0 mm et un mode de transfert CMT

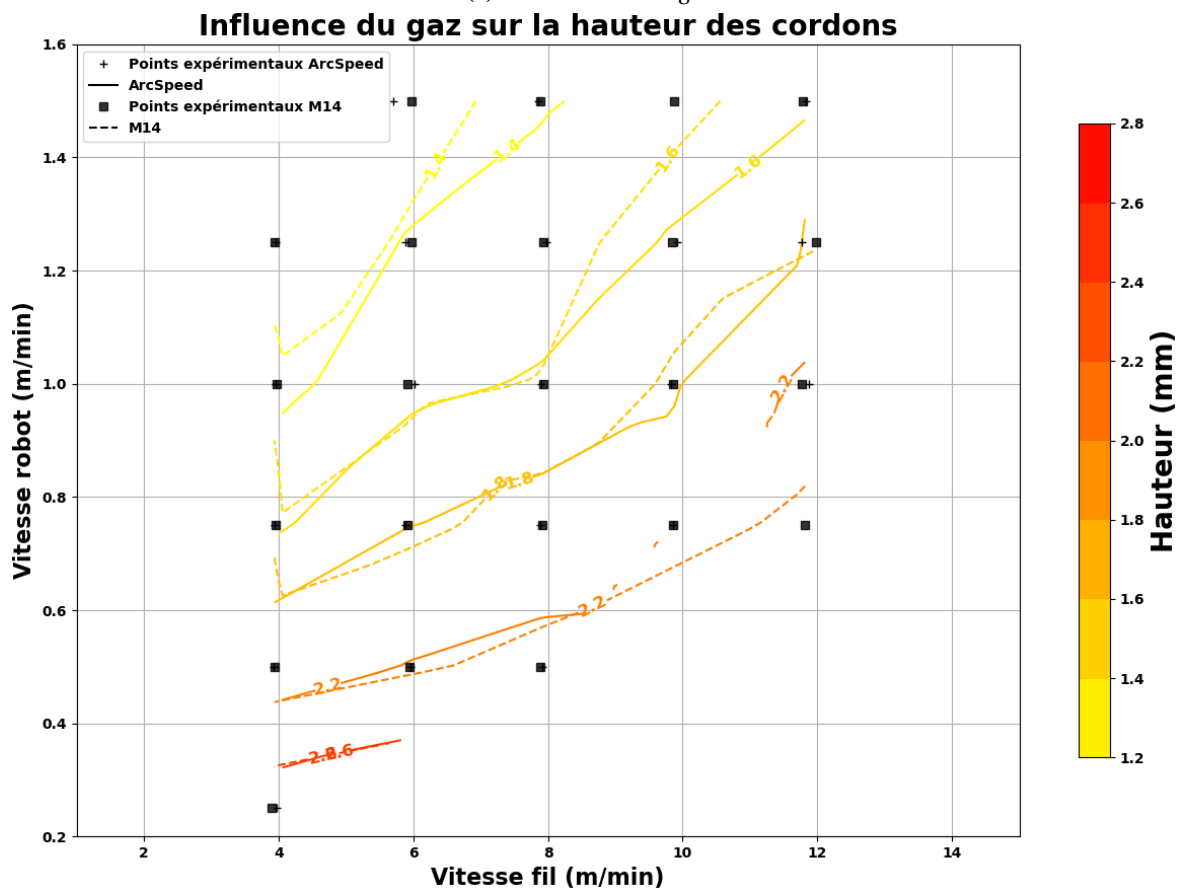
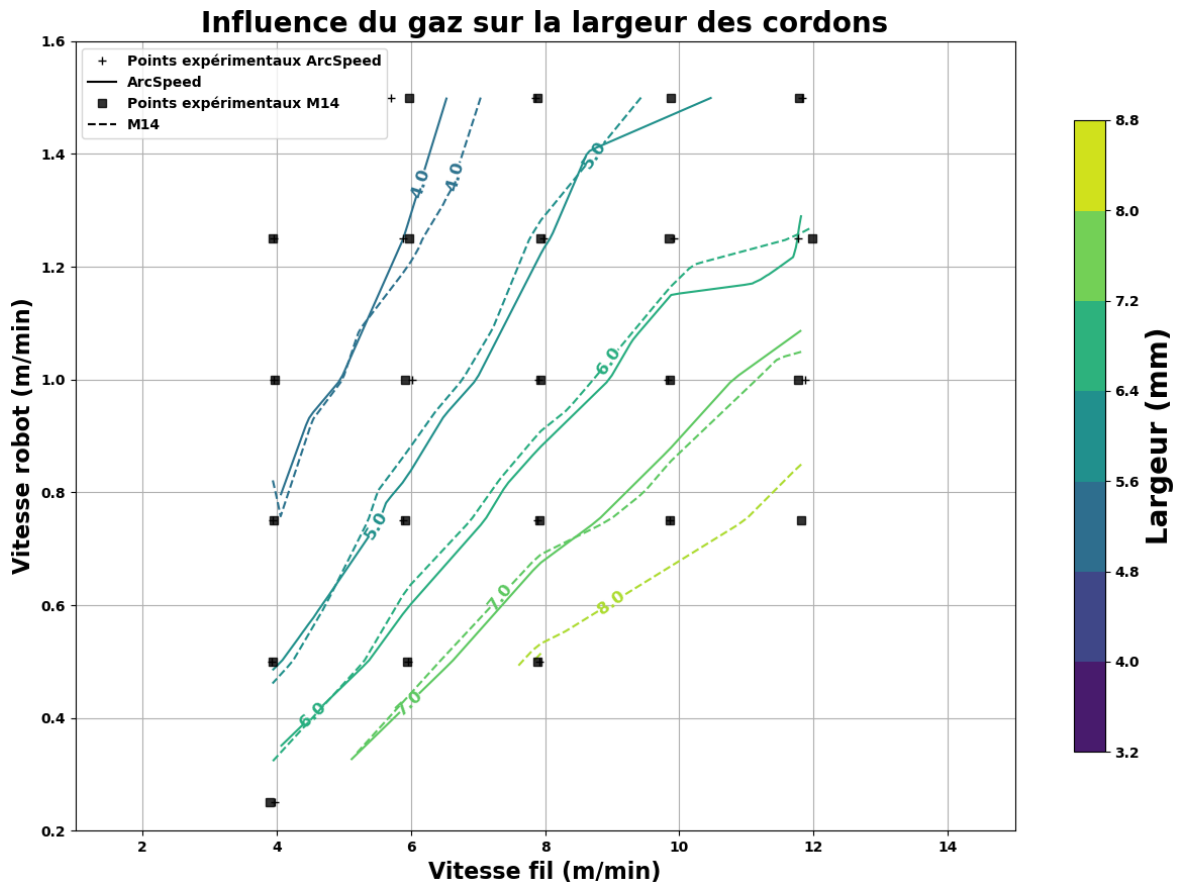


FIGURE A.8 – Évolution des dimensions des cordons en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,0 mm et un mode de transfert Pulsé

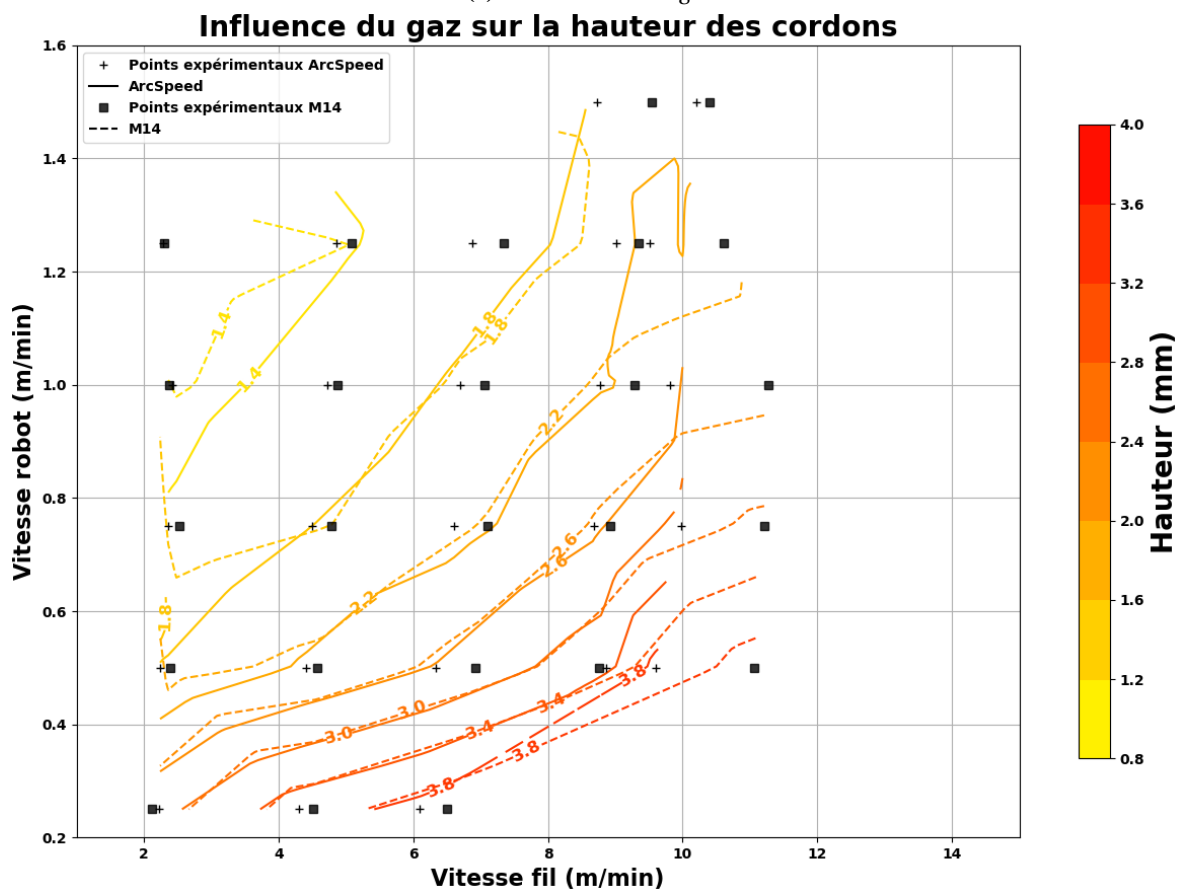
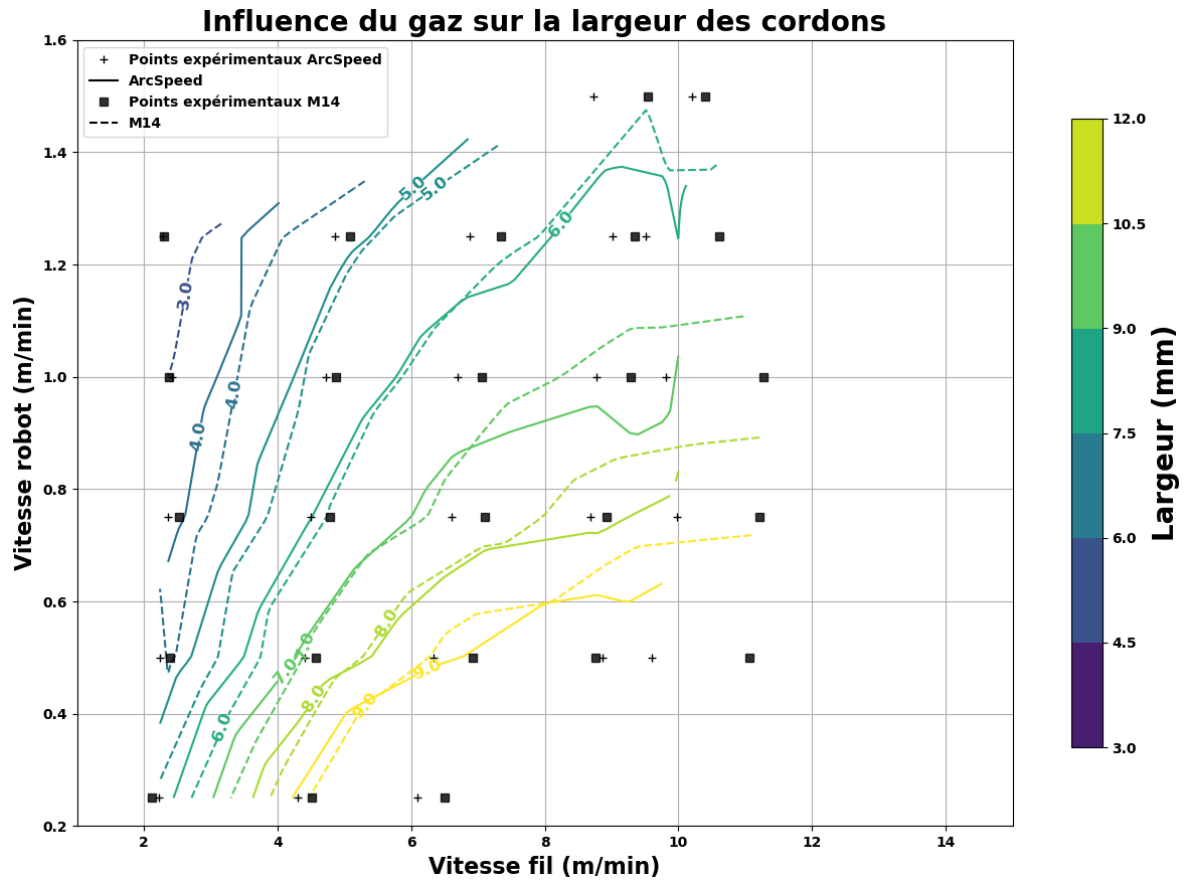
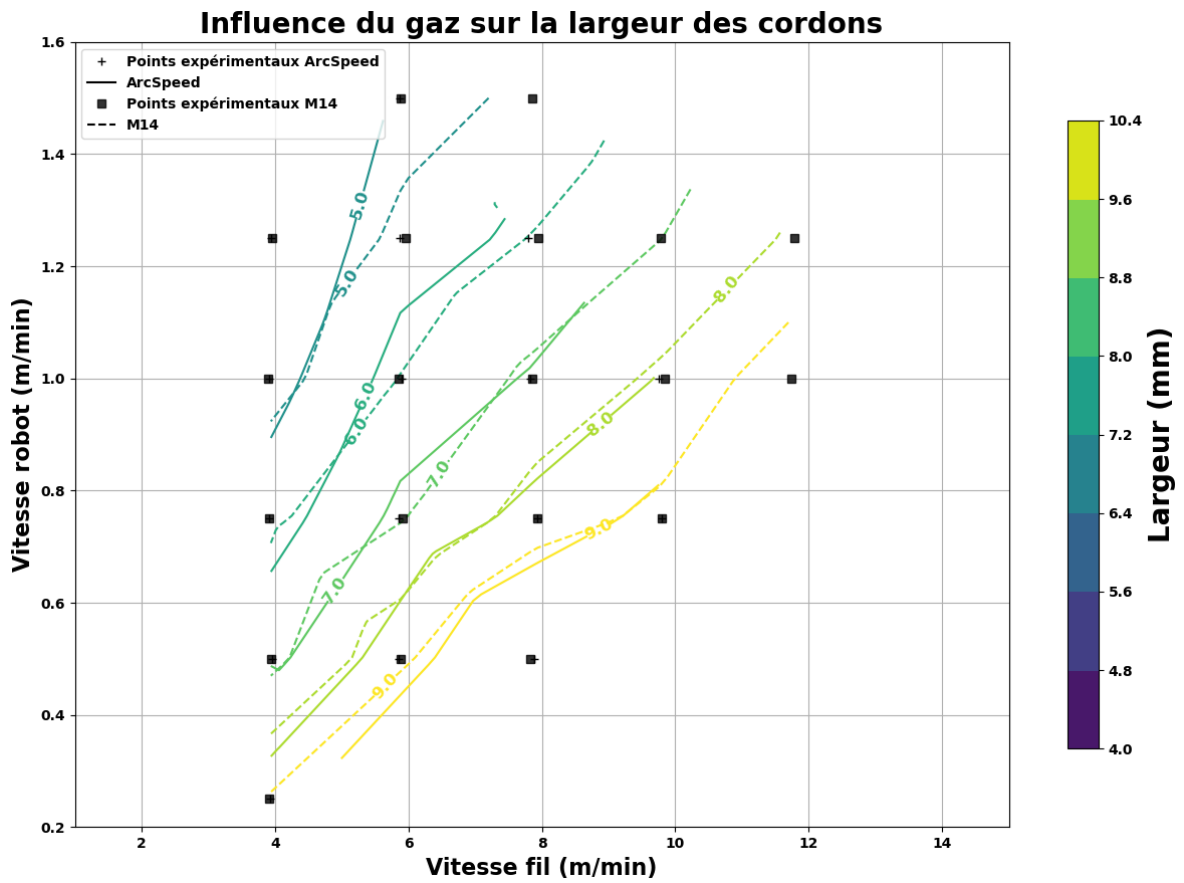
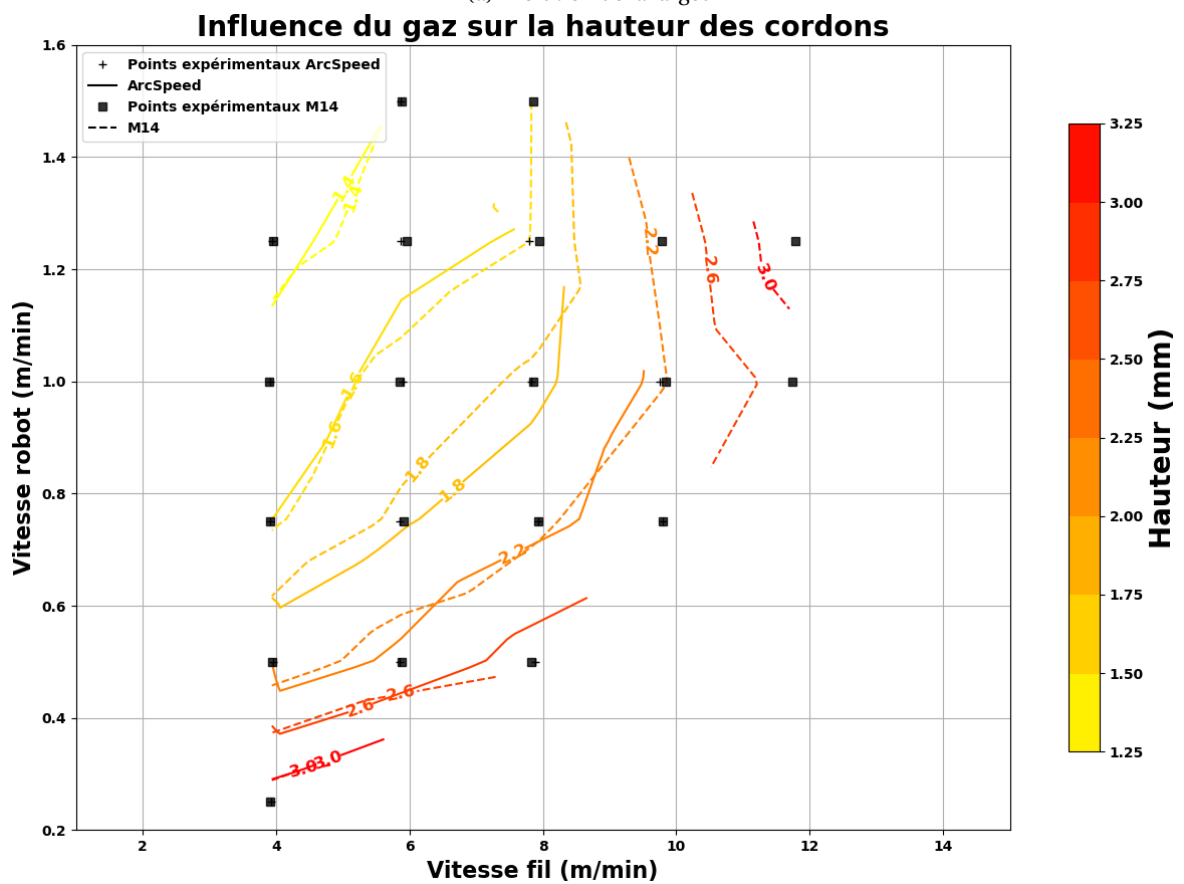


FIGURE A.9 – Évolution des dimensions des cordons en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,2 mm et un mode de transfert CMT



(a) Évolution de la largeur



(b) Évolution de la hauteur

FIGURE A.10 – Évolution des dimensions des cordons en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,2 mm et un mode de transfert Pulsé

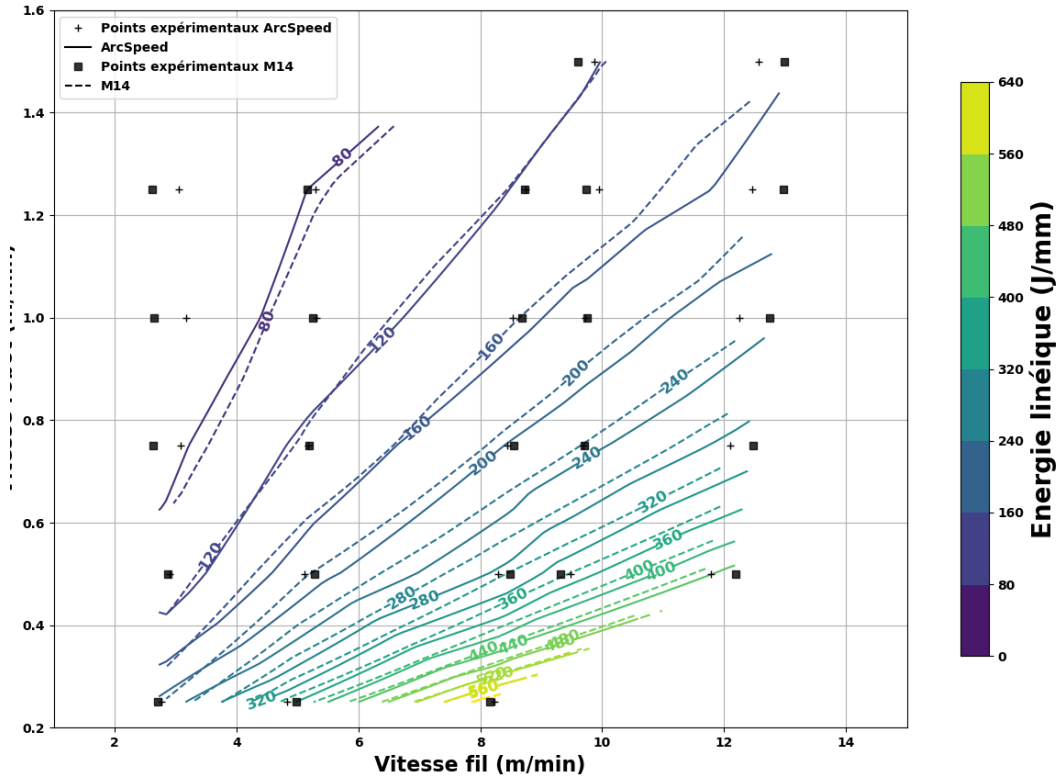


FIGURE A.11 – Énergie linéique déposée en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,0 mm et un mode de transfert CMT

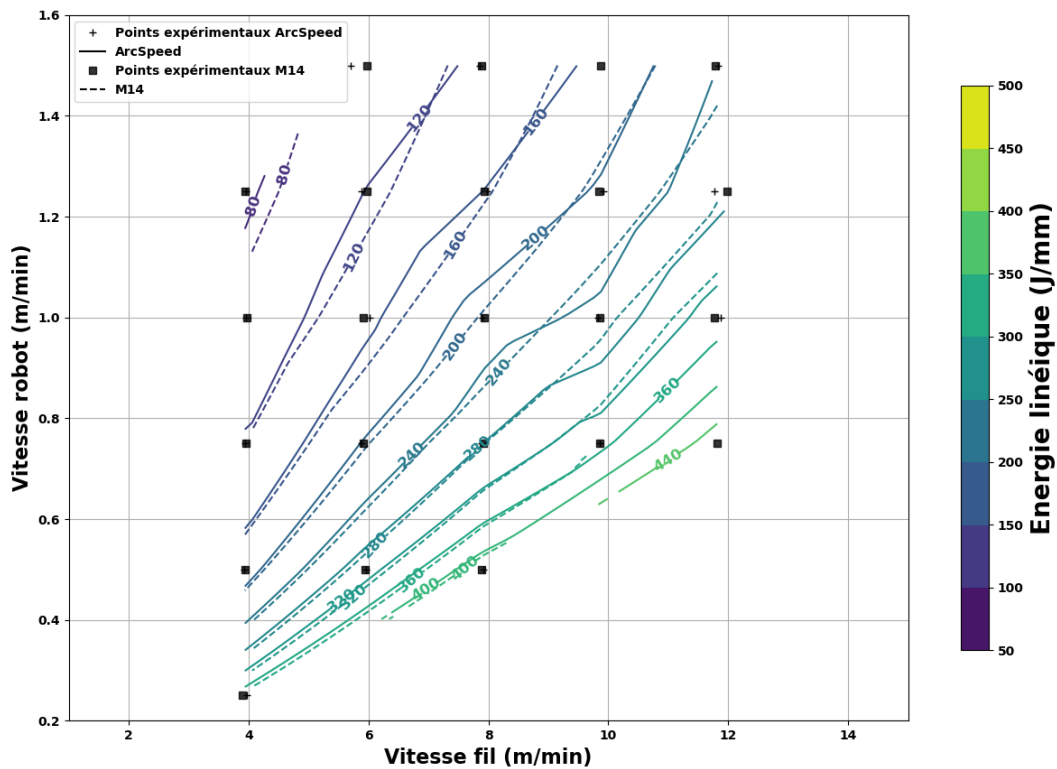


FIGURE A.12 – Énergie linéique déposée en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,0 mm et un mode de transfert Pulsé

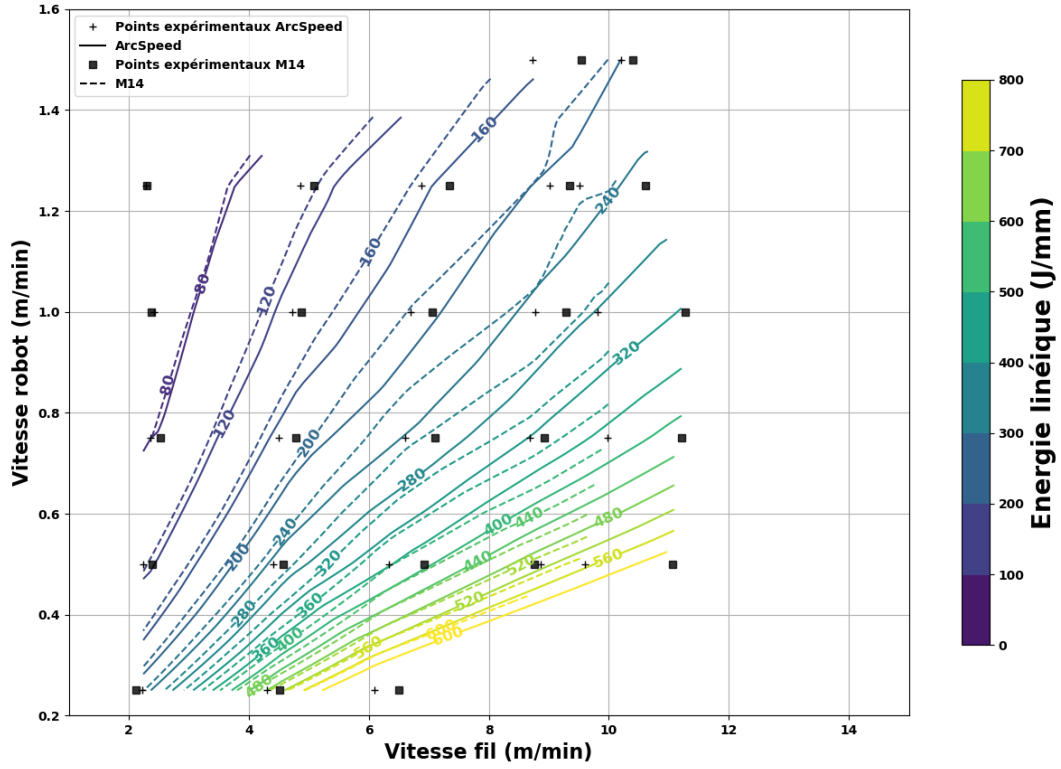


FIGURE A.13 – Énergie linéique déposée en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,2 mm et un mode de transfert CMT

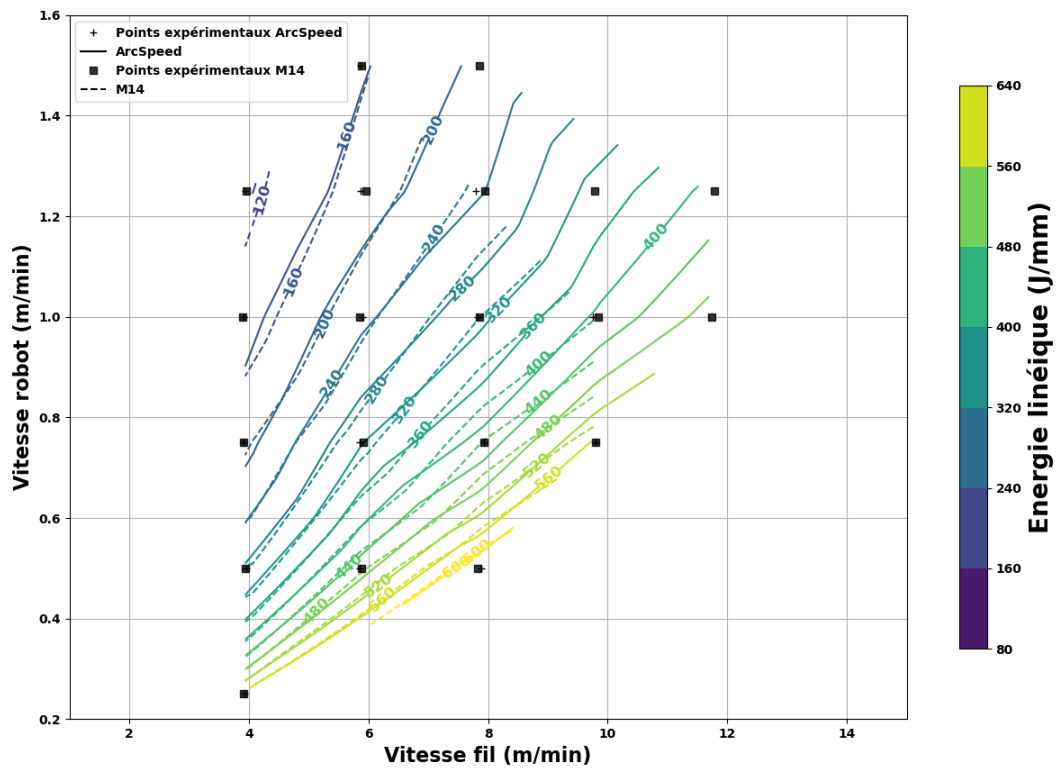
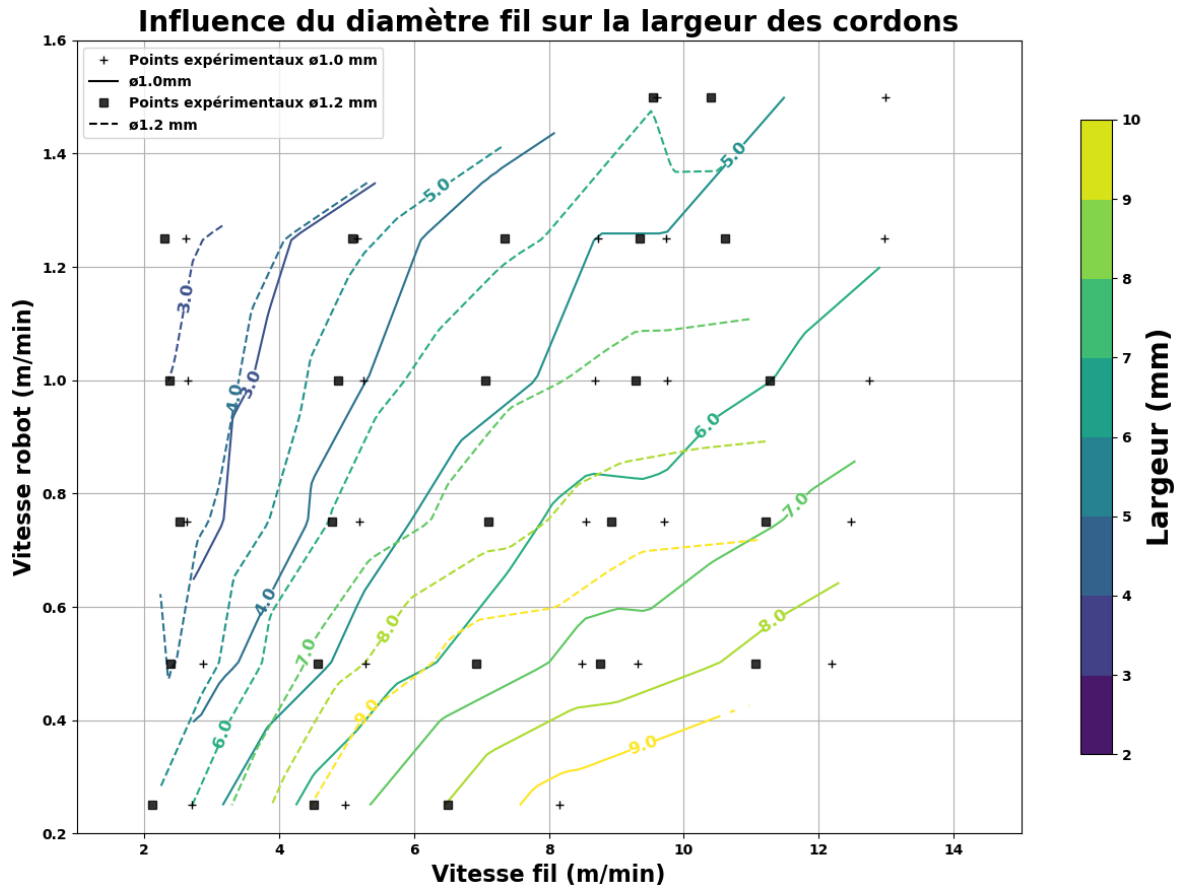
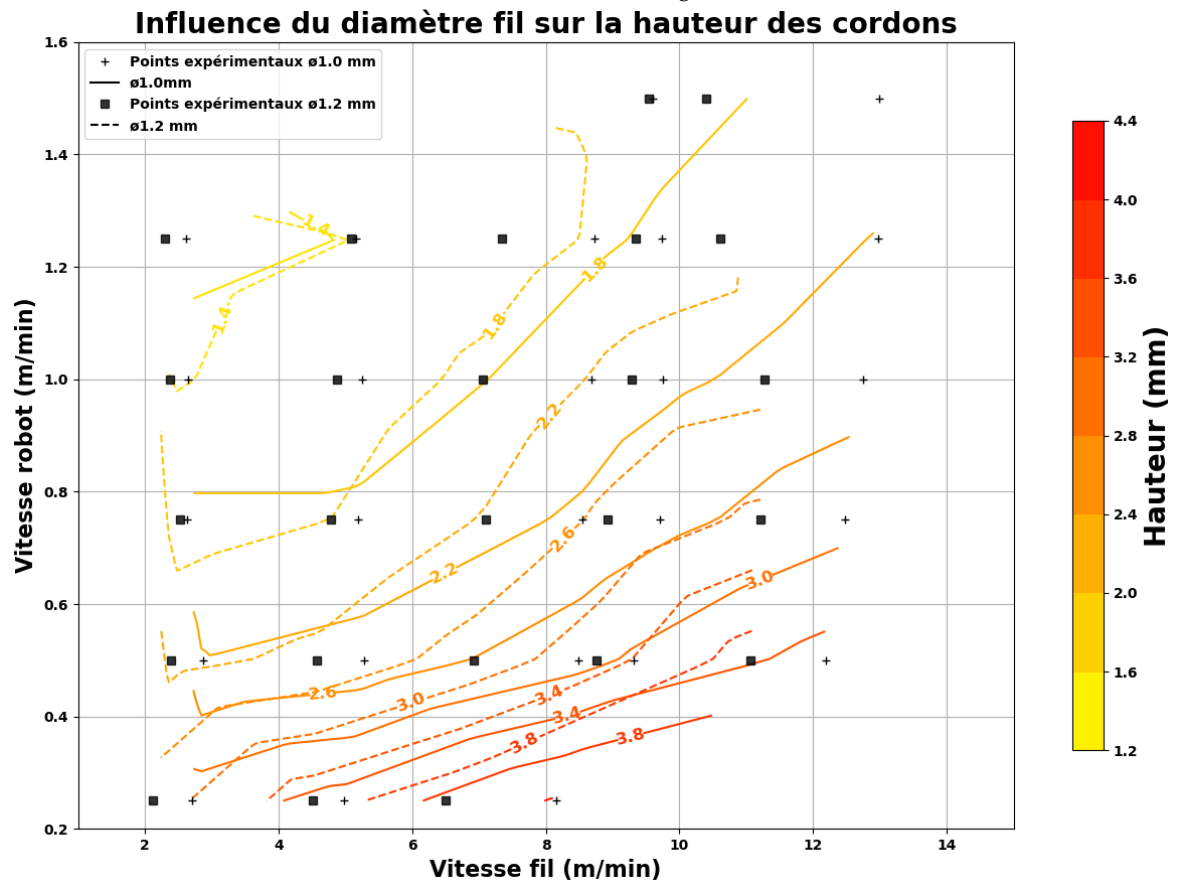


FIGURE A.14 – Énergie linéique déposée en fonction de V_f et V_r pour un fil de diamètre 1,2 mm et un mode de transfert Pulsé

3 Comparaison diamètre fil

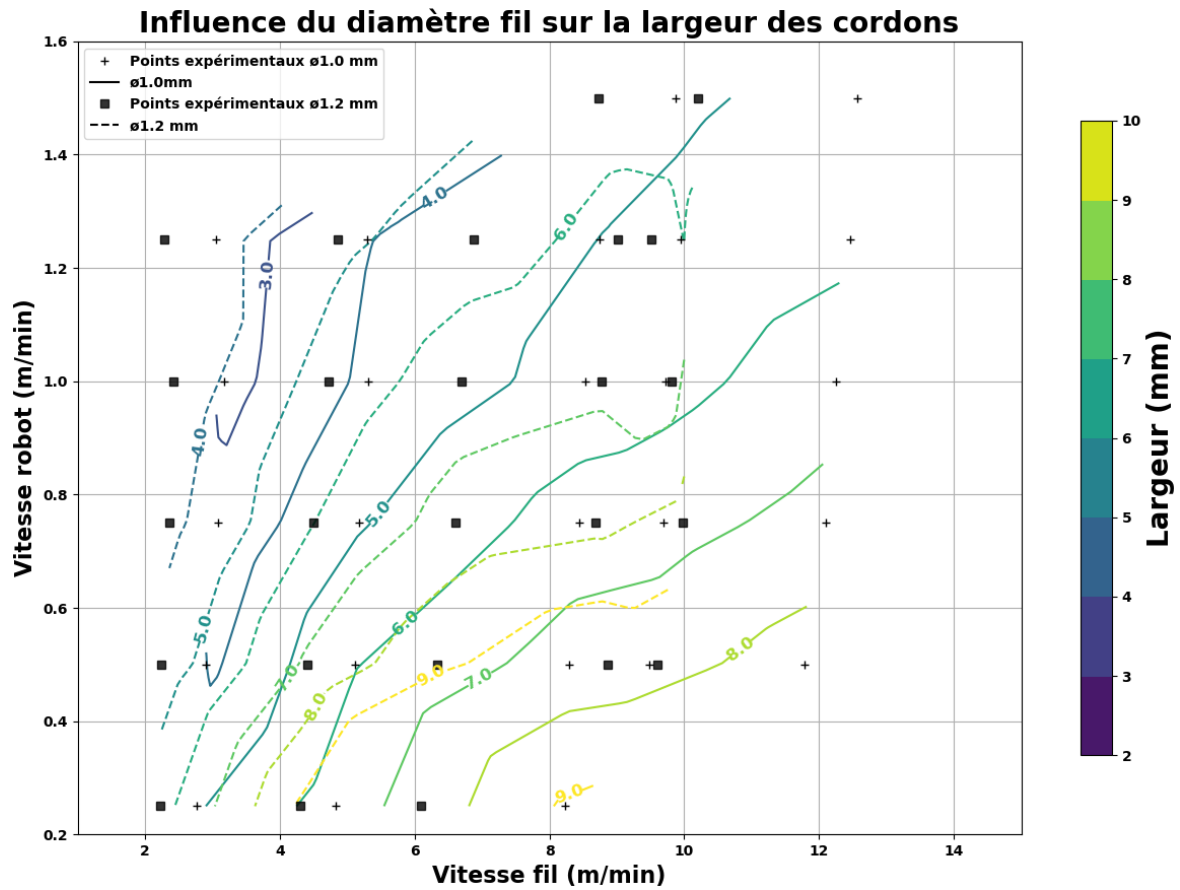


(a) Évolution de la largeur

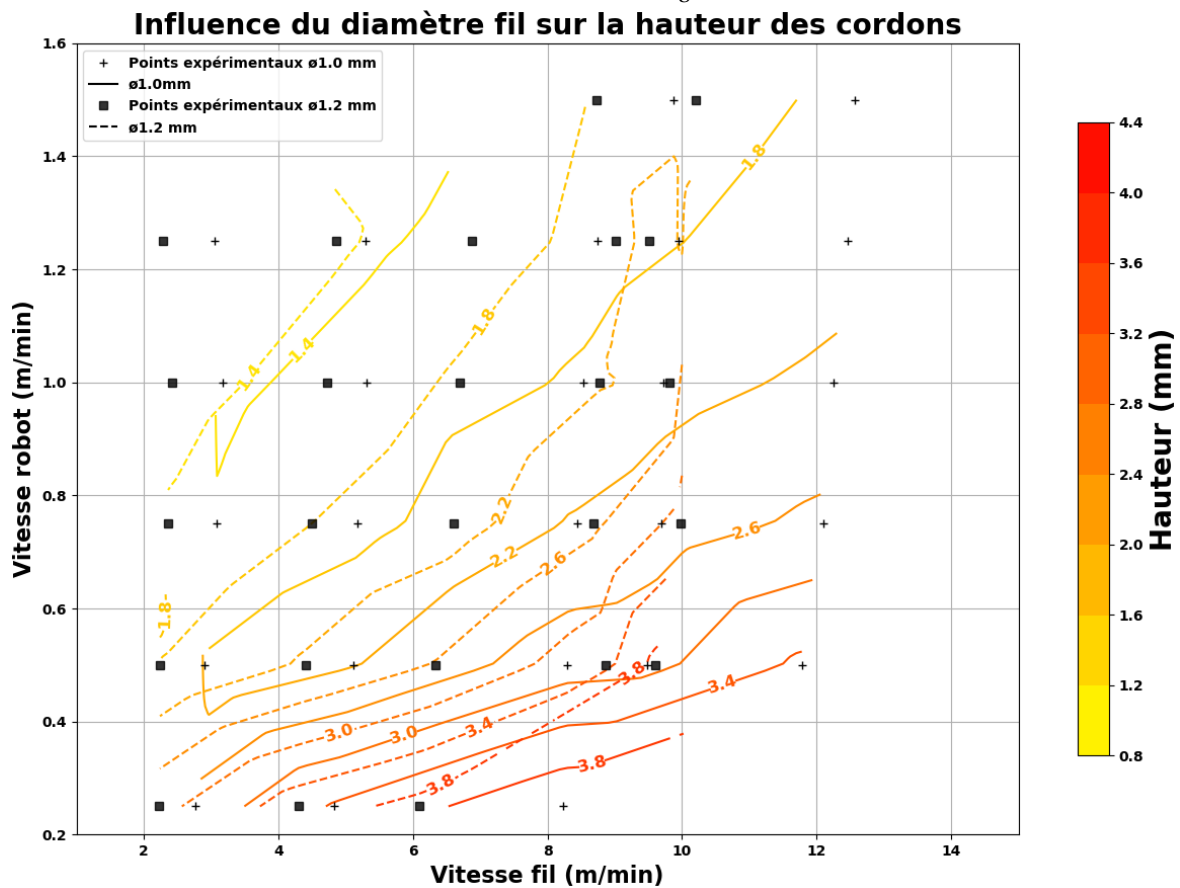


(b) Évolution de la hauteur

FIGURE A.15 – Évolution des dimensions des cordons en fonction de V_f et V_r pour un mode de transfert CMT et un gaz d'inertage M14

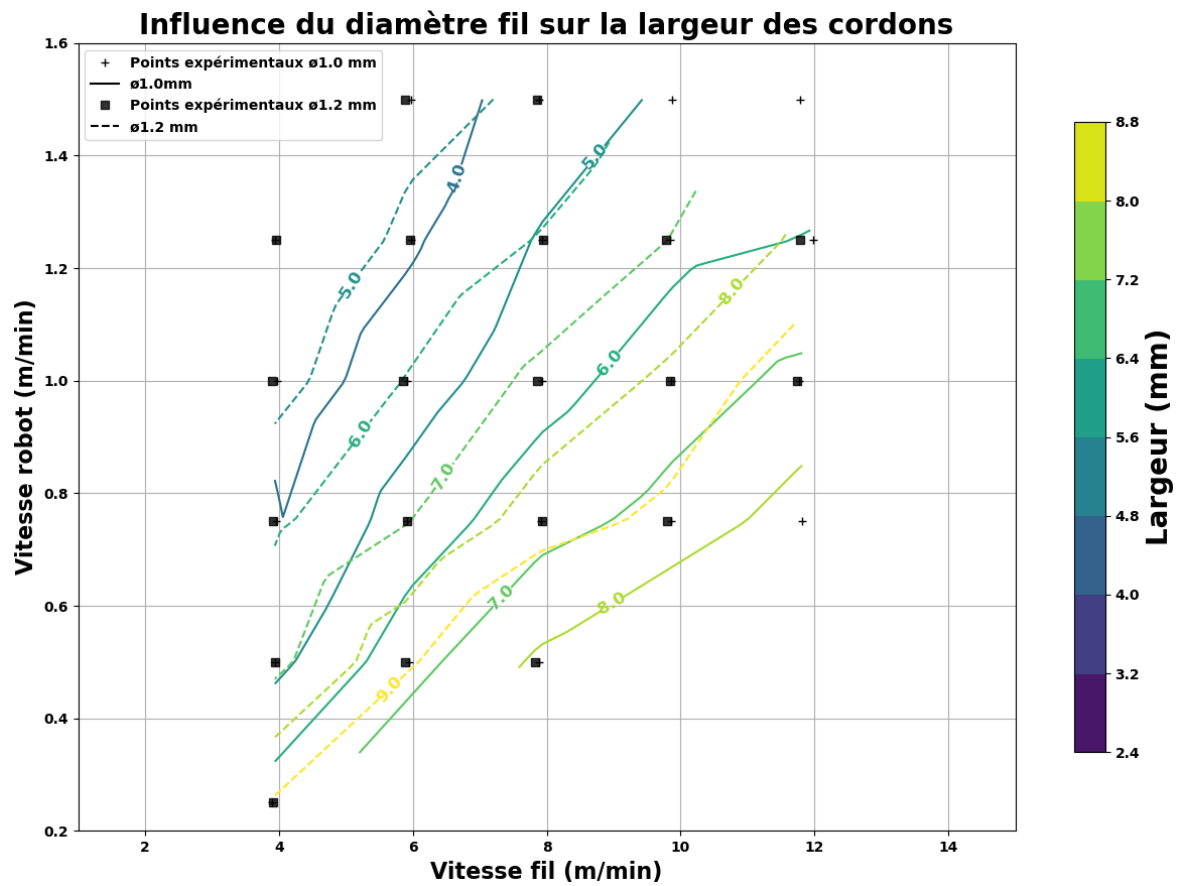


(a) Évolution de la largeur

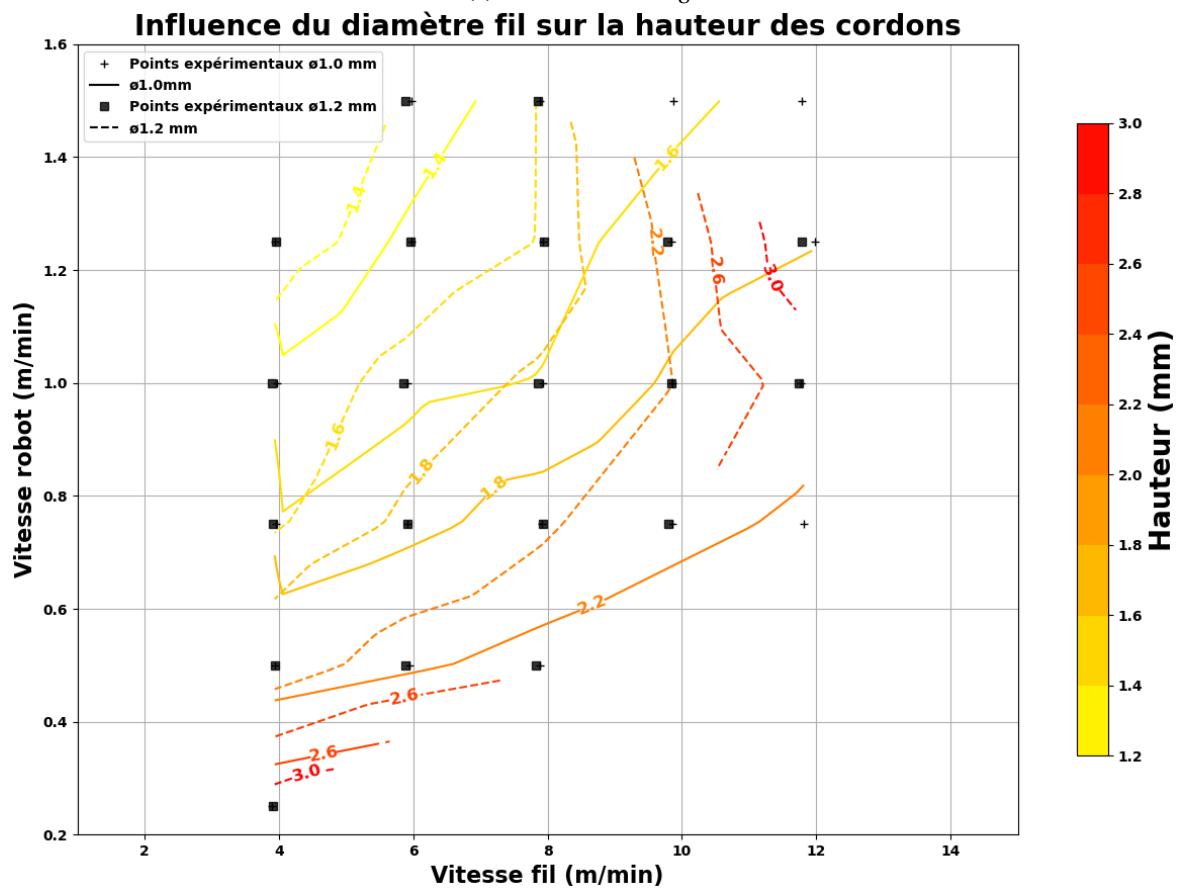


(b) Évolution de la hauteur

FIGURE A.16 – Évolution des dimensions des cordons en fonction de V_f et V_r pour un mode de transfert CMT et un gaz d'inertage Arcal Speed

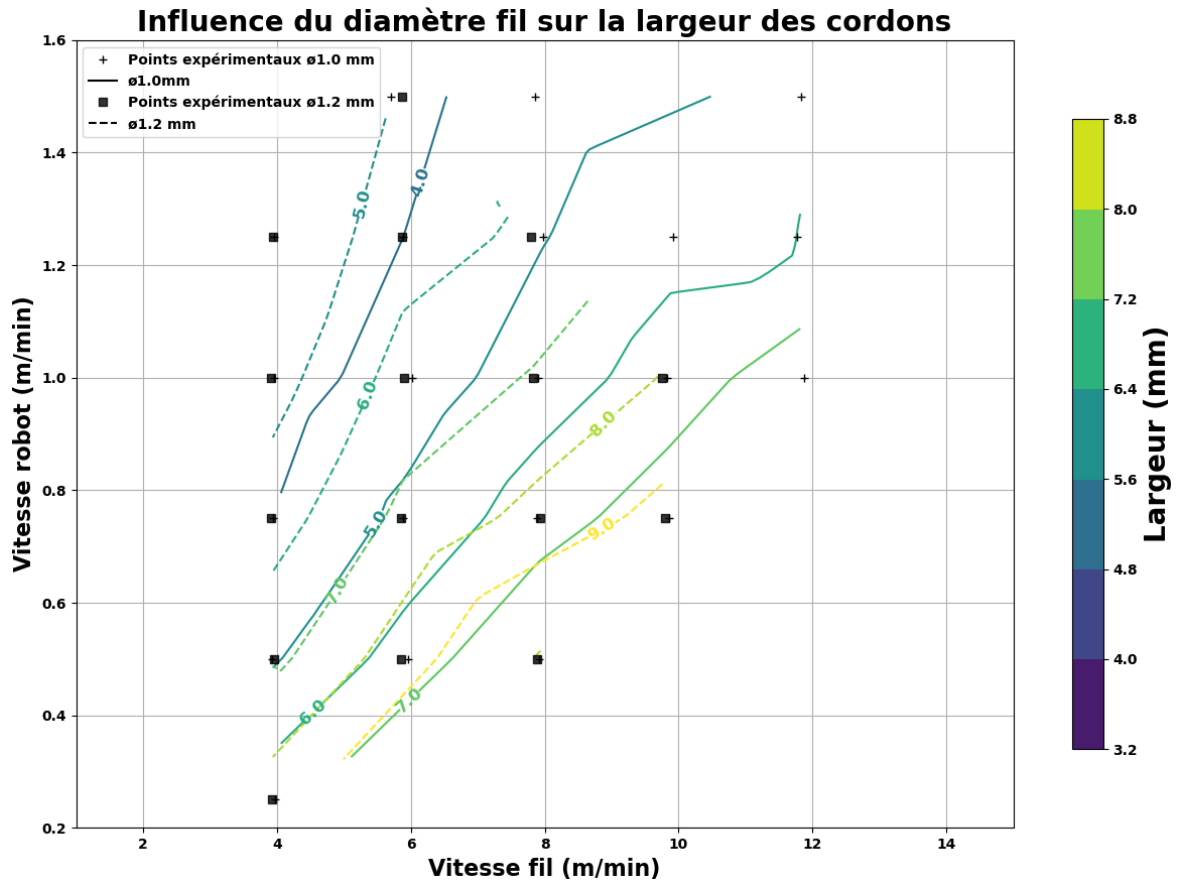


(a) Évolution de la largeur

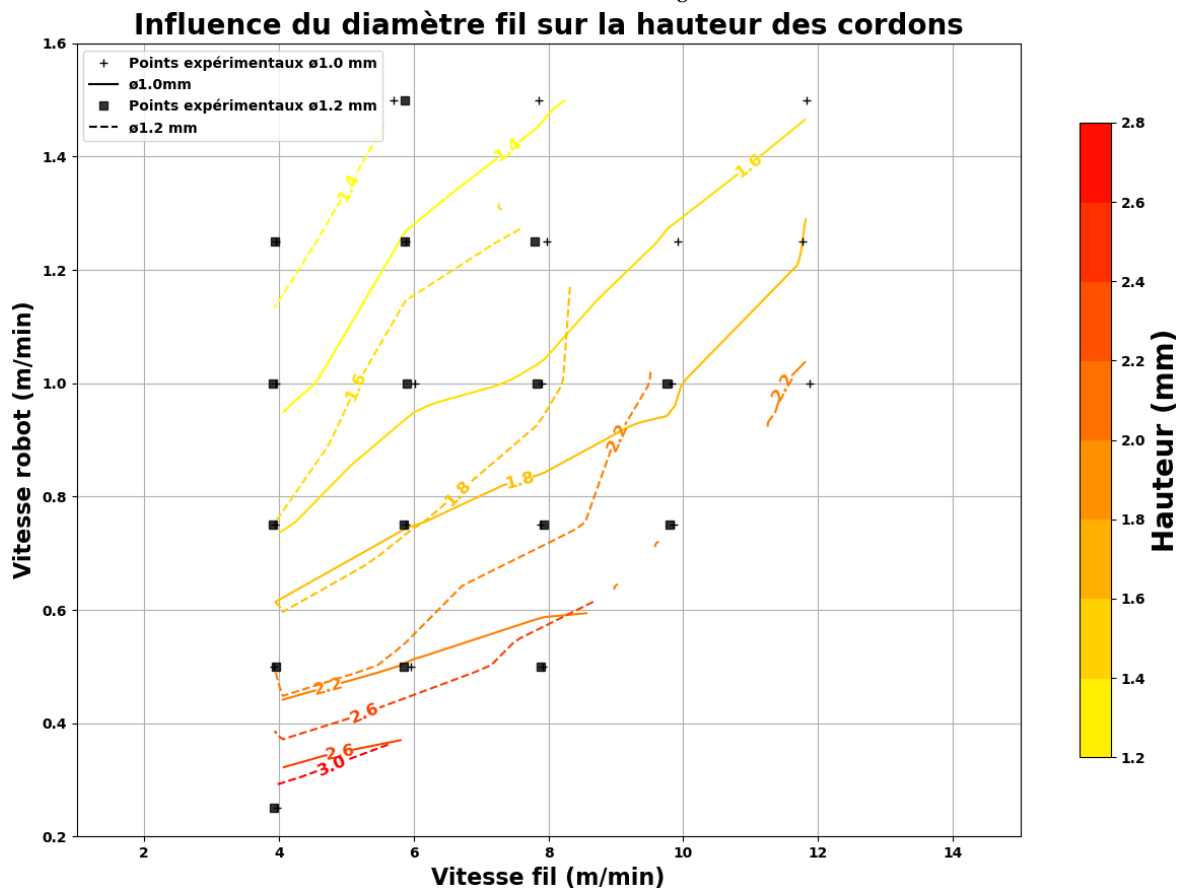


(b) Évolution de la hauteur

FIGURE A.17 – Évolution des dimensions des cordons en fonction de V_f et V_r pour un mode de transfert pulsé et un gaz d'inertage M14



(a) Évolution de la largeur



(b) Évolution de la hauteur

FIGURE A.18 – Évolution des dimensions des cordons en fonction de V_f et V_r pour un mode de transfert pulsé et un gaz d'inertage Arcal Speed

Titre : Contributions à la modélisation géométrique du dépôt de matière pour l'élaboration d'un jumeau numérique du procédé WAAM

Mots clés : Fabrication additive, WAAM, Modélisation géométrique, Jumeau numérique

Résumé : Les procédés de fabrication additive par dépôt de fil métallique sont en plein essor car ils proposent des taux de dépose matière très élevés et minimisent les problématiques HSE liées à l'exploitation de poudres métalliques. Si ce procédé issu du soudage est bien connu, son exploitation sur des cellules robotisées pour fabriquer des pièces de grande taille ou ajouter des fonctionnalités par rechargement nécessite de développer des stratégies de fabrication adaptées aux entités à fabriquer pour garantir l'efficacité du procédé tout en minimisant les déformations. Le développement de telles stratégies requiert une connaissance approfondie du processus de fabrication, mais aussi des propriétés des pièces fabriquées pour tendre vers une industrialisation à grande échelle. Les travaux de thèse portent sur la modélisation du processus d'élaboration en WAAM et du procédé de dépôt de fil à l'arc afin de contribuer au développement d'un jumeau numérique du système de production. La mise en œuvre d'un tel jumeau a pour objectif d'améliorer et de maîtriser la géométrie des pièces fabriquées. L'approche scientifique s'appuie sur des campagnes expérimentales afin

d'observer et de caractériser le comportement géométrique des cordons déposés en fonction des paramètres du procédé. Cette analyse est par la suite menée au voisinage des points de la trajectoire de dépôt présentant des changements de direction, où l'évolution du bain liquide est influencée par la cinématique réelle de la torche, et du robot, par rapport au substrat. Enfin, l'assemblage de cordons est étudié à travers la fabrication d'entités géométriques simples afin d'établir un modèle permettant de prédire et simuler la géométrie fabriquée. Cette modélisation permet de mieux appréhender les paramètres de la trajectoire tels que la hauteur de couche et la distance de juxtaposition afin de limiter les dérives géométriques, garantir la faisabilité et éviter toute collision. L'ensemble de ces travaux contribue à l'élaboration d'un jumeau numérique du procédé WAAM dont une architecture fonctionnelle est proposée à partir de concepts issus de la littérature. Le travail de recherche s'inscrit dans le cadre de la plateforme francilienne de fabrication additive « Additive Factory Hub » impliquant des partenaires industriels et des académiques.

Title : Contributions to the geometric modeling of material deposition for the development of a digital twin of the WAAM process

Keywords : Additive manufacturing, WAAM, Digital Twin, Geometric modeling

Abstract : Wire and arc additive manufacturing processes are rising as they offer high deposition rates and minimize environmental and security issues due to the use of metal powders. Even if the process derived from welding is well-known, its use on robot to manufacture large parts or add features by refilling needs to elaborate manufacturing strategies to ensure process efficiency while minimizing deformations. The development of such strategies requires an in-depth knowledge of the manufacturing process, but also of the properties of the manufactured parts in order to move towards large-scale industrialisation. This thesis work focuses on the modelling of the WAAM process and the arc wire deposition process in order to contribute to the development of a digital twin of the production system. The implementation of such a twin aims to improve and control the geometry of the manufactured parts. The scientific approach is based on experimental campaigns to observe and characterise the influence of process parameters

on the geometric behaviour of single beads manufactured on a flat substrate. Then, this study is extended to corners where the evolution and the behaviour of the bead pool is observed and modelled with the kinematic behaviour of the robot. Finally, the assembly of beads is studied through the manufacturing of simple geometric entities in order to establish a model allowing the prediction and simulation of the manufactured geometry. This model allows a better understanding of the essential parameters of the tool path such as the layer height and the inter-bead distance in order to limit geometric drift, guarantee feasibility and avoid any collision. All this work contributes to the development of a digital twin of the WAAM process, whose functional architecture is proposed based on concepts from the literature. The research work is part of the Ile-de-France additive manufacturing platform "Additive Factory Hub" involving industrial and academic actors.