



HAL
open science

Procédé de fabrication additive par dépôt de fil fondu : modèle, méthodes et stratégies pour la correction de défaut de pièce mécanique

Valentine Cazaubon

► To cite this version:

Valentine Cazaubon. Procédé de fabrication additive par dépôt de fil fondu : modèle, méthodes et stratégies pour la correction de défaut de pièce mécanique. Mécanique [physics]. Université de Bordeaux, 2021. Français. NNT : 2021BORD0288 . tel-03551010

HAL Id: tel-03551010

<https://theses.hal.science/tel-03551010>

Submitted on 1 Feb 2022

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.

THÈSE PRÉPARÉE À L'ESTIA ET PRÉSENTÉE

EN VUE D'OBTENIR LE GRADE DE

**DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX**

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR

SPÉCIALITÉ MÉCANIQUE

Par Valentine CAZAUBON

**PROCEDE DE FABRICATION ADDITIVE PAR DEPOT DE
FIL FONDU : MODELES, METHODES ET STRATEGIES
POUR LA CORRECTION DE DEFAUT DE PIECE
MECANIQUE**

Sous la direction de : Xavier FISCHER

Présentée le 26 Novembre 2021

Membres du jury :

M. ROUCOULES, Lionel	Professeur, ENSAM Centre Aix-en-Provence	Rapporteur
M. VIGNAT, Frédéric	MCF HDR, Université Grenoble Alpes	Rapporteur
Mme LARTIGUE, Claire	Professeure, Université Paris-Saclay, Cachan	Présidente
Mme POIRSON, Emilie	Professeure, Ecole Centrale de Nantes	Examinatrice
M. SEBASTIAN, Patrick	MCF HDR, Université de Bordeaux	Examinateur
Mme RIAS, Anne-Lise	Docteure, Consultante innovation	Examinatrice
M. MICHAUD, Pierre	Docteur, Responsable Plateforme Addimadour	Invité
Mme. ABI AKLE, Audrey	Enseignante-chercheuse, ESTIA	Encadrante
M. FISCHER, Xavier	Professeur, ESTIA	Directeur

« Aura, sidus mare adjuvant me »

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, mes remerciements s'adressent à Messieurs Lionel Roucoules, Professeur à l'ENSAM Centre Aix-en-Provence, et Frédéric Vignat, Maître de Conférence HDR à l'Université de Grenoble Alpes, pour avoir accepté de juger ce travail en votre qualité de rapporteur.

Je remercie également Madame Claire Lartigue, Professeure à l'Université Paris-Saclay, Madame Emilie Poirson, Professeure à l'École Centrale de Nantes, Monsieur Patrick Sébastien, Maître de Conférence HDR à l'Université de Bordeaux, et Madame Anne-Lise Rias, Consultante Innovation, pour avoir accepté de juger ce travail en tant qu'examineurs. Je remercie aussi Monsieur Pierre Michaud pour avoir accepté l'invitation pour participer à ce jury de thèse.

Je remercie les partenaires et les acteurs du projet Addimafil ainsi que l'équipe d'Addimadour, notamment Pierre et Fabien pour leur disponibilité tant pour la phase expérimentale que pour la phase de développement du modèle de simulation.

Merci à l'ESTIA et son directeur Monsieur Patxi Ellissalde ainsi qu'ESTIA Recherche pour leur accueil durant ces années de thèse.

Je souhaite aussi remercier mon directeur de thèse Monsieur Xavier Fischer. En retenant ma candidature tu m'as permis d'obtenir la clé si précieuse pour pouvoir mener à bien mon projet professionnel mais aussi personnel. Je remercie chaleureusement mon encadrante de thèse Madame Audrey Abi Akle pour ta rigueur, ton honnêteté et ta proximité. Autant de raisons qui font qu'aujourd'hui je suis fière de ces travaux de recherche. Je t'en suis reconnaissante.

Merci à mes collègues de l'ESTIA. Ceux avec qui j'ai passé du temps au sein de ces locaux. Je vous ai eu comme professeurs puis comme collègues de travail.

Merci particulièrement aux Doctarés. Nous sommes passés par bien des noms mais je pense que celui-là reflète assez bien la folie qu'il faut pour se lancer dans cette entreprise. L'avantage de cette folie c'est que nous nous sommes trouvés. Merci à « La Mécanique C'est Fantastique » et aux « Bombas Latinas » !

Merci à mes amis « Kangourous » : Sacha, Yougo, Fouiny, MS et Sauvage.

Merci à la « Mouette ». Je ne vous remercierai jamais assez pour tout ce que vous m'avez apporté. Votre bienveillance, votre respect, votre écoute, vos avis mais également nos repas font que je suis en partie aujourd'hui donc de façon simple : merci !

Merci Christine pour m'avoir fait passer d'un Motiv4 à Motiv100 en quelques mois.

Enfin je terminerai par remercier ma famille, Maman, Olivier, Sarah et Pao. Ces dernières années n'ont pas toujours été de tout repos mais vous m'avez toujours soutenu. Je vous aime !
Merci Mamie pour les mercredis : pause bienvenue du milieu de semaine !

Merci « Matassao » !

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	V
LISTE DES FIGURES	IX
LISTE DES TABLEAUX	XIII
NOMENCLATURE	XV
1. CHAPITRE 1 : CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE	1
1.1 La fabrication additive.....	2
1.1.1 Définitions de la fabrication additive	2
1.1.2 Les enjeux écologiques.....	3
1.1.3 Les procédés de la fabrication additive	4
1.2 La correction de défauts géométriques à l'aide de la fabrication additive	6
1.3 La conception pour la fabrication additive	9
1.4 Les difficultés de la fabrication additive	12
1.4.1 Un problème multiphysiques.....	12
1.4.2 Les erreurs inhérentes au procédé	13
1.4.3 La correction des erreurs	14
1.5 Notre procédé LMD-w étudié	17
1.6 Synthèse et plan du manuscrit	19
2. CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART ET POSITIONNEMENT DES TRAVAUX DE RECHERCHE	21
2.1 Modèles numériques des procédés de fabrication additive	22
2.1.1 Introduction des modèles de simulations numériques dits « indirects »	22
2.1.2 Les modèles thermomécaniques.....	23
2.1.3 Modélisation du problème mécanique.....	24
2.1.4 Modélisation du problème thermique.....	24
2.1.5 Modélisation du dépôt de matière	32
2.1.6 Synthèse.....	33
2.2 Modèles de prédiction de sorties géométriques en fonction de paramètres d'entrée dits « directs »	34
2.2.1 Les réseaux de neurones et la fabrication additive	34
2.2.2 Les régressions et la fabrication additive	38
2.2.3 Données en entrée des modèles de prédiction	40
2.2.4 Synthèse.....	41
2.3 Aide à la conception pour la correction en fabrication additive.....	42
2.3.1 Exploration de l'espace de conception	42
2.3.2 Représentation graphique pour l'espace de conception.....	43

2.3.3	Sélection d'une solution optimale	45
2.3.4	Stratégies pour la correction en fabrication additive	47
2.3.5	Synthèse.....	49
2.4	Synthèse et positionnement de nos travaux de recherche.....	50
2.4.1	Synthèse.....	50
2.4.2	Positionnement de nos travaux de recherche.....	51
2.4.3	Notre plan de résolution	53
3.	CHAPITRE 3 : DEVELOPPEMENT DU MODELE DE COMPORTEMENT	55
3.1	Introduction Chapitre 3	56
3.2	Etude préliminaire de validation sur la répétabilité de la mesure au microscope.....	56
3.2.1	Définition de la répétabilité de la mesure	56
3.2.2	Démarche de l'étude de répétabilité	57
3.2.3	Phase 1 et phase 2 de la démarche.....	57
3.2.4	Phase 3 : analyse des résultats	59
3.3	Identification des relations entre les paramètres machine et les variables géométriques	61
3.3.1	Nature des paramètres et des variables mis en jeu	61
3.3.2	Méthodologie et expérimentation.....	62
3.3.3	Résultats et analyses	67
3.4	Impacts des paramètres machine sur les variables géométriques	71
3.4.1	Méthodologie expérimentale	72
3.4.2	Résultats et analyses	72
3.5	Etude de l'influence de l'incertitude de mesure sur les relations entrées/sorties	76
3.5.1	Définition de la reproductibilité	77
3.5.2	Protocole expérimental.....	77
3.5.3	Analyse des résultats	79
3.5.4	Application des résultats à l'espace de conception.....	81
3.6	Conclusion.....	83
4.	CHAPITRE 4 : DEVELOPPEMENT DU METAMODELE NUMERIQUE	87
4.1	Introduction Chapitre 4	88
4.2	Développement d'un réseau de neurones pour la prédiction pour le procédé LMD-w	88
4.2.1	La base de cas	88
4.2.2	Modèle prédictif direct : le réseau de neurones	90
4.2.3	Résultats et analyses	94
4.3	Modèle de simulation thermomécanique du procédé LMD-w	96
4.3.1	Modèle numérique par éléments finis	97
4.3.2	Etape 1 : Modèle de préchauffe du fil	99

4.3.3	Etape 2 : Modèle de soudage et refroidissement	104
4.3.4	Résultats et analyse.....	109
4.4	Conclusion.....	113
5.	CHAPITRE 5 : DEVELOPPEMENT D'UNE METHODE POUR L'EXPLORATION DES ESPACES DE SOLUTIONS POUR LA CORRECTION EN FABRICATION ADDITIVE	115
5.1	Introduction Chapitre 5	116
5.2	La correction de défauts géométriques en fabrication additive	116
5.2.1	Le problème de correction.....	116
5.2.2	Les variables de performances	117
5.2.3	Les stratégies proposées pour la correction de défaut en fabrication additive	118
5.3	Algorithme de génération de solutions non dominées au sens de Pareto	120
5.3.1	Rappel du principe de dominance	120
5.3.2	Algorithme de génération développé.....	121
5.4	Résolution du problème de défaut « volumique ».....	126
5.4.1	Expressions des objectifs.....	126
5.4.2	Résultats et analyse.....	130
5.4.3	Exploration et Exploitation du Design Space.....	132
5.5	Conclusion.....	136
6.	SYNTHESE ET PERSPECTIVES.....	138
6.1	Synthèse et originalité des travaux	138
6.2	Perspectives	141
7.	ANNEXES.....	144
7.1	La variance	144
7.1.1	Méthode de l'analyse.....	144
7.1.2	Définition du test de Snedecor	145
7.1.3	Table de snedecor	147
7.2	Tableaux coefficients de variances.....	148
7.2.1	Echantillon 1.....	148
7.2.2	Echantillon 2.....	149
7.2.3	Echantillon 3.....	150
7.3	Variabilité de la mesure par sortie et par opérateur.....	151
7.3.1	Variabilité de l'échantillon 1	151
7.3.2	Variabilité de l'échantillon 2	152
7.3.3	Variabilité de l'échantillon 3	153
7.4	Les propriétés thermomécaniques du TA6V	154
7.4.1	Propriétés mécaniques du TA6V	154

7.4.2	Propriétés thermiques du TA6V	156
8.	CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES	158
9.	BIBLIOGRAPHIE	160

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Procédés de fabrication additive selon Frazier, 2014 (en haut) [4] et Vaneker <i>et al.</i> , 2020 (en dessous) [7]	2
Figure 1.2 Représentation de la consommation de matière avec les procédés soustractifs (en haut) et les procédés de fabrication additive (en bas) selon Lundbäck et Lindgren, 2017	3
Figure 1.3 Classement des procédés de fabrication additive métallique par familles en fonction de l'état de la matière première (poudre, fil ou feuille) et de la source de chaleur	4
Figure 1.4 Pièce mécanique à corriger après l'usinage pour la préparation de la surface d'impression ..	6
Figure 1.5 Représentation schématique des étapes constituant le processus de correction en fabrication additive	8
Figure 1.6 Niveau A0 du diagramme SADT pour la correction en fabrication additive.....	8
Figure 1.7 Détails du niveau A0 avec les niveaux A1 à A5 pour le processus de correction en fabrication additive sur le diagramme SADT	9
Figure 1.8 Sources d'erreurs lors du développement d'un modèle de calcul selon Vaneker <i>et al.</i> [7]... 11	11
Figure 1.9 Diagramme d'interactions entre les physiques mis en jeu lors des procédés de fabrication additive	12
Figure 1.10 Réduction du taux de porosités dans une pièce issue du procédé de fabrication additive WAAM après traitement HIP, Zhong <i>et al.</i> (2016) [43]	15
Figure 1.11 Schémas des différentes méthodes pour le interpass cold rolling : (a) méthode verticale, (b) méthode verticale directement après le passage de la source de chaleur, (c) méthode horizontale, (d) méthode avec un profil inversée pour les couches épaisses, Colegrove <i>et al.</i> (2017) [44]	16
Figure 1.12 Schéma du procédé LMD-W avec les trois variables, également appelées « paramètres d'entrée », Cazaubon <i>et al.</i> [49]	18
Figure 1.13 Capture d'écran lors de l'acquisition vidéo du procédé LMD-w.....	18
Figure 1.14 Coupe transversale d'un cordon de fabrication additive LMD-w et ses sorties géométriques (LEICA DM1750M, x5), Cazaubon <i>et al.</i> [51]	19
Figure 1.15 Diagramme de contextualisation de nos travaux de recherche dans le domaine de la fabrication additive.....	20
Figure 2.1 Diagramme d'interactions entre le problème mécanique, métallurgique et thermique au cours du procédé de fabrication additive métallique.....	22
Figure 2.2 Effecteur du robot avec le fil en sortie de buse.....	25
Figure 2.3 Repères pour étudier le déplacement de la source de chaleur Depradeux [24].....	26
Figure 2.4 Représentation de la distribution gaussienne de la source de chaleur laser, Depradeux [24]	27
Figure 2.5 Intensité du laser en fonction de la hauteur selon l'axe z (distance buse/pièce)	28
Figure 2.6 Représentation schématique du double ellipsoïde de Goldak <i>et al.</i> [72].....	29
Figure 2.7 Avance du fil jusqu'à son interaction avec le laser.....	31
Figure 2.8 Méthode des éléments discrets et application de la source de chaleur pas à pas	32

Figure 2.9 Représentation schématique de la structure d'un neurone formel, Cagin [81].....	34
Figure 2.10 Exemple d'un réseau de neurones à 3 couches.....	35
Figure 2.11 Représentation des différentes fonctions de transferts, Cagin [81].....	35
Figure 2.12 Représentation des architectures de (a) Li <i>et al.</i> [83], (b) Peng <i>et al.</i> [82] et (c) Xiong <i>et al.</i> [84]	37
Figure 2.13 Cartographie du procédé par dépôt de fil fondu pour l'Inconel 625 dans Abioye <i>et al.</i> [75] à l'aide d'un scatterplot simple	44
Figure 2.14 Illustration d'un scatterplot matrix dans les exemples de R (http://www.sthda.com/english/wiki/scatter-plot-matrices-r-base-graphs)	44
Figure 2.15 Illustration d'un parallel coordinates plot pour le procédé LMD-w avec des données issus de l'expérimental	45
Figure 2.16 Exemple d'un front de Pareto avec des solutions dominées (rond domine croix qui domine triangle) dans Yoo et Harman [100].....	47
Figure 2.17 Trajectoires couramment utilisées en fabrication additive, Ding <i>et al.</i> [105]	48
Figure 2.18 Phénomènes naissant lors du recouvrement horizontal en fonction de la distance d entre les centres des deux cordons, selon Ding <i>et al.</i> [106]	49
Figure 2.19 Relations entre nos paramètres d'entrée et nos sorties étudiées pour le procédé LMD-w, sous forme de boîte noire	51
Figure 2.20 Modèle de prédiction proposé pour l'étude du procédé LMD-w	52
Figure 2.21 Interaction entre le laser et le fil et entre le laser et le substrat pendant la phase de soudage du procédé LMD-w	52
Figure 2.22 Plan de résolution par question de recherche pour répondre à notre problématique de recherche	54
Figure 3.1 Relations entre les paramètres d'entrée et les sorties étudiées pour le procédé LMD-w	62
Figure 3.2 Robot KUKA KR60-HA et la tête Precitec CoaxPrinter	63
Figure 3.3 Algorithme du code python proposé pour déterminer les triplets de fabrication	66
Figure 3.4 Exemples de relations linéaires, non linéaires, monotones, non monotones et exemples d'absence de liaisons	68
Figure 3.5 Matrice des coefficients de corrélation par la méthode de Pearson entre les paramètres d'entrée et les sorties	69
Figure 3.6 Pourcentage d'influence des paramètres d'entrée sur les sorties	71
Figure 3.7 Processus de préparation du substrat et des échantillons pour le procédé LMD-w pour les campagnes expérimentales 1 et 2	72
Figure 3.8 A gauche : courbe théorique et courbe expérimentale obtenues pour la hauteur de cordon, A droite : courbe théorique et courbe expérimentale obtenues pour la largeur de cordon.....	74
Figure 3.9 Hauteur de dilution en fonction de la largeur de dilution	75
Figure 3.10 Limite du domaine pour le contrôle de la relation entre la hauteur de dilution et la largeur de dilution.....	76

Figure 3.11 Emplacement des points A, B et C pour (a) la largeur de cordon, (b) la hauteur de cordon, (c) la largeur de dilution, (d) la hauteur de dilution et (e) l'angle de contact pour les mesures au microscope	78
Figure 3.12 Ordre des tâches de l'opérateur pour l'étude sur l'influence de la mesure	78
Figure 3.13 A gauche : la hauteur de cordon en fonction de la puissance du laser avec l'incertitude de 0.38%, A droite : la hauteur de dilution en fonction de la puissance du laser avec l'incertitude de mesure de 6.25%	82
Figure 3.14 Largeur de dilution en fonction de la largeur du cordon avec leur incertitude de mesure (0.88% pour h_c et 1.21% pour h_d).....	83
Figure 3.15 Organisation des études pour répondre à la question de recherche 1.....	84
Figure 3.16 Diagramme d'interaction entre les paramètres d'entrée et les sorties géométriques du cordon	85
Figure 3.17 Exemples de graphique des effets avec une relation non linéaire entre le facteur A et la réponse Y (gauche) et une relation linéaire négative entre le facteur A et la réponse Y (droite).....	145
Figure 3.18 Principe du test de Snedecor	146
Figure 4.1 Schéma des dimensions du substrat, du cordon, et les plans de coupe.....	89
Figure 4.2 Représentation de la fonction tangente sigmoïde.....	91
Figure 4.3 Représentation de la fonction linéaire.....	91
Figure 4.4 Architecture du réseau de neurones, RN.....	92
Figure 4.5 Enchaînement des modèles réseau de neurones et thermomécanique	96
Figure 4.6 Entrées et sorties du modèle de simulation thermomécanique	96
Figure 4.7 Représentation graphique des données d'entrée et de sortie entre le modèle de préchauffe et le modèle de soudage et refroidissement formant le modèle de simulation thermomécanique du procédé LMD-w.....	97
Figure 4.8 Attribution du matériau sain (verts) et dénaturé (gris) aux éléments pour l'état intermédiaire	99
Figure 4.9 Interaction du fil avec le laser à simuler pour déterminer la température T_{fil}	100
Figure 4.10 Géométrie du fil à mailler pour le modèle de préchauffe de fil	101
Figure 4.11 Application du matériau, des conditions initiales et des conditions aux limites pour le modèle de préchauffe de fil.....	102
Figure 4.12 Application du flux de chaleur pour une altitude z comprise entre 0 et 3.....	103
Figure 4.13 Forme du faisceau laser en fonction de la hauteur Z	104
Figure 4.14 Position du cordon déposé sur le substrat	105
Figure 4.15 Représentation graphique des conditions aux limites pour la simulation du soudage et du refroidissement pour le procédé LMD-w	106
Figure 4.16 Conditions aux limites appliquées à la géométrie simulée pour l'étape de soudage	107
Figure 4.17 Interaction entre le laser, le fil, le cordon et le substrat pendant l'étape de soudage du procédé LMD-w.....	107

Figure 4.18 Variation du diamètre interne de la couronne lors d'une interaction avec le fil.....	108
Figure 4.19 Application de la température T_{fil} et du flux en fonction de la zone	108
Figure 4.20 Déplacement du substrat observé sur une pièce après le la fabrication d'un cordon.....	109
Figure 4.21 Modèle de réseau de neurones et modèle de simulation thermomécanique du procédé LMD-w pour la prédiction des sorties géométriques et du déplacement du substrat en fonction des paramètres d'entrée du procédé	114
Figure 5.1 Géométrie du défaut à corriger	117
Figure 5.2 Phénomènes naissant lors du recouvrement horizontal en fonction de la distance d entre les centres des deux cordons, selon Ding <i>et al.</i> [105].....	119
Figure 5.3 Les différentes trajectoires en fabrication additive, selon Ding <i>et al.</i> [104]	120
Figure 5.4 Différentes orientations du front de Pareto en fonction des objectifs par variables de performances	121
Figure 5.5 Génération aléatoire d'un triplet pour les paramètres machine du procédé LMD-w.....	122
Figure 5.6 Utilisation des paramètres machine générés pour obtenir les paramètres de conception ..	123
Figure 5.7 Différents résultats issus du calcul des performances.....	124
Figure 5.8 Architecture de l'algorithme de Pareto pour la correction d'un défaut donné.....	125
Figure 5.9 Différentes trajectoires pour les quatre scénarios pour la correction d'un défaut surfacique. (a) Scénario 1, (b) Scénario 2, (c) Scénario 3 et (d) Scénario 4	126
Figure 5.10 Schématisation de la longueur pour revenir en position initiale pour imprimer une couche n+1.....	128
Figure 5.11 Espace des solutions candidates des scenarios 1, 2, 3 et 4 formants le front de Pareto pour le problème bi-objectif	131
Figure 5.12 Parallel coordinates plot pour l'exploration de l'espace de conception (Design Space en anglais).....	132
Figure 5.13 Plages de valeurs sélectionnées pour les critères avec en bleues les points conception retenus et en gris les points de conception exclus.....	133
Figure 5.14 Plage de valeurs sélectionnée pour réduire le temps machine	134
Figure 5.15 Solution optimale retenue par l'ingénieur pour son problème de conception après exploration de son espace de conception.....	135
Figure 5.16 Solution retenue pour le problème de conception pour la correction d'un défaut géométrique d'une pièce mécanique par exploration de l'espace de conception.....	135

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Composition chimique de l'alliage de TA6V	5
Tableau 1.2 Exemples de défauts en fonction de la catégorie.....	7
Tableau 1.3 Résumé des 8 défauts retrouvés en fabrication additive métallique.....	13
Tableau 1.4 Récapitulatif des méthodes de corrections avec les défauts corrigés et leur utilisation durant le procédé de fabrication additive.....	17
Tableau 2.1 Résumé des données nécessaires pour la simulation des modèles thermique et mécanique	23
Tableau 2.2 Résumé des deux sources de chaleurs avec leurs avantages et inconvénients	30
Tableau 2.3 Utilisation de l'outil en fonction des sorties observées	41
Tableau 3.1 Eléments de réponses pour satisfaire les critères des conditions de répétabilité	57
Tableau 3.2 Extrait de la table des coefficients k pour l'élargissement de l'incertitude de mesure, JCGM 100:2008.....	60
Tableau 3.3 Valeurs des 31 mesurages effectués par l'opérateur	60
Tableau 3.4 Paramètres machine et variables géométriques observées pour le procédé LMD-w.....	62
Tableau 3.5 Calcul du degré de liberté du modèle étudié	64
Tableau 3.6 Calcul du plus petit commun multiple du modèle étudié	64
Tableau 3.7 Table de Taguchi pour la campagne expérimentale	65
Tableau 3.8 Valeurs des niveaux pour les paramètres d'entrée	66
Tableau 3.9 Paramètres machine et variables géométriques mesurées	67
Tableau 3.10 Résultats du test de Fisher-Snedecor et les valeurs-p des sorties géométriques en fonction des paramètres machine.....	70
Tableau 3.11 Tableau récapitulatif des valeurs des paramètres par campagne	72
Tableau 3.12 Tableaux récapitulatif des valeurs des paramètres d'entrées et des sorties observées	73
Tableau 3.13 Valeurs des paramètres d'entrée et des sorties obtenues pour la campagne expérimentale 2.2.....	74
Tableau 3.14 Valeurs des coefficients de variance (CV) moyens par sortie	80
Tableau 3.15 Table d'analyse de la variance.....	146
Tableau 4.1 Base de cas avec les valeurs réelles paramétriques et les variables géométriques moyennes mesurées	90
Tableau 4.2 Pourcentage d'erreur entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites par le réseau de neurones RN en fonction des sorties	94
Tableau 4.3 Pourcentages d'erreur entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites par les RN en fonction de la sortie étudiée et de l'essai.....	95

Tableau 4.4	Température du fil préchauffé en fonction des paramètres d'entrée	110
Tableau 4.5	Paramètres d'entrées, valeur du déplacement mesuré expérimentalement, déplacement calculé par le modèle de soudage et de refroidissement avec le pourcentage d'écart entre ces valeurs	112
Tableau 4.6	Propriétés mécaniques du TA6V en fonction de la température	154
Tableau 4.7	Propriétés thermiques du TA6V en fonction de la température	156

NOMENCLATURE

Chapitre 1

P	Puissance du laser (W)
TS	Vitesse de déplacement de l'outil (m/min)
WFS	Vitesse d'avance de fil (m/min)
h_c	hauteur de cordon (mm)
h_d	hauteur de dilution (mm)
w_c	largeur de cordon (mm)
w_d	largeur de dilution (mm)
α	angle de contact entre le cordon et le substrat (°)

Chapitre 2

σ	tenseur de contraintes
C	tenseur de rigidité du matériau de quatrième ordre
ε_e	déformation élastique
ε	déformation totale
ε_p	déformation plastique
ε_T	déformation thermique
T	température (°C)
$\varepsilon_e(T)$	déformation élastique en fonction de la température T
$E(T)$	module d'Young en fonction de la température (Pa)
$\nu(T)$	coefficient de Poisson en fonction de la température
$\sigma_y(T)$	limite élastique en fonction de la température (Pa)
$g(\sigma_y(T))$	une fonction associée au comportement du matériau
α	coefficient d'expansion thermique
θ	température au point étudié (°C)
θ_0	température initiale (°C)
ρ	densité du matériau (kg/m ³)
C_p	capacité spécifique de chaleur du matériau (J/kg K)
t	temps (s)
Q	source de chaleur employée
\mathbf{r}	position dans le repère de référence
\mathbf{q}	vecteur du flux de chaleur
$\rho(T)$	densité du matériau en fonction de la température (kg/m ³)
$f_L(T)$	fraction de masse liquide en fonction de la température
$T_{solidus}$	température du solidus (°C)
$T_{liquidus}$	température du liquidus (°C)
I	intensité du laser (W/cm ²)
(x, y, z)	coordonnées d'un point
α_{abs}	absorptivité du matériau
f_f	fraction de la chaleur déposée dans le quadrant avant de la source de Goldak
f_r	fraction de la chaleur déposée dans le quadrant arrière de la source de Goldak
a, b, c	paramètres de réglages du quadrant avant et arrière dans la source de Goldak
η	rendement du laser
$T_{ambiante}$	température initiale de la cellule robotisée avant la fabrication d'une pièce (°C)

T_{fil}	température de préchauffe du fil de TA6V une fois entré en contact avec le laser (°C)
α_{laser}	angle d'incidence du faisceau laser (°)
E_i	entrée ième du neurone
w_i	poids associé à la ième donnée
b_i	biais associé au ième neurone d'une couche
n	le nombre de points observés
Y_i	valeur expérimentale de la ième donnée
y_i	valeur prédite pour la ième donnée
X_i	ième paramètre d'entrée
d^*	distance de recouvrement idéale entre deux cordons (mm)

Chapitre 3

u_A	incertitude de type A
n	nombre d'observations
σ_{n-1}	écart type expérimental
m_i	valeur de la ième mesure
\bar{m}	moyenne arithmétique des mesures réalisées
μ_M	espérance mathématique
p_i	probabilité de la ième donnée
k	coefficient de Student
U_A	incertitude de type A élargie
Y	réponse observée
$PPCM$	plus petit commun diviseur
ddl	nombre de degrés de liberté
r_{XY}	coefficient de corrélation entre les variables X et Y
$S_{param\grave{e}tre}$	somme du carré des écarts du paramètre (P, WFS ou TS)
S_{plan}	somme du carré des écarts du plan expérimental réalisé
$i_{param\grave{e}tre}$	importance de chaque paramètre machine sur les variables géométriques
r	ratio entre WFS et P (m/min kW)
E	énergie reçue par la pièce durant la fabrication (W.s)
ϕ_{fil}	diamètre du fil de TA6V (mm)
E_{min}	Energie minimal à apporter pour la fabrication d'une pièce (W.s)
S^2_r	variance intrasérie : répétabilité de la méthode d'analyse employée
S^2_g	variance intersérie : répétabilité de l'opérateur dans la tâche d'analyse
S^2	variance totale : variabilité de la méthode et de l'opérateur
$CV_{répétabilité}$	coefficient de variance intrasérie
$CV_{opérateur}$	coefficient de variance intersérie
CV_{total}	coefficient de variance totale

Chapitre 4

A	nombre de neurones sur la couche cachée
B	nombre de neurones sur la couche d'entrée
MSE	erreur quadratique moyenne
n	nombre de données total
Y_i	vecteur contenant les valeurs expérimentales observées pour la ième donnée

\tilde{Y}_t	vecteur contenant les valeurs prédites par le réseau de neurones pour la ième donnée
Δt	pas de temps considéré dans la simulation numérique
$\phi_{laser}(z)$	diamètre du laser en fonction de la hauteur z
$S(z)$	surface sur laquelle est appliquée la puissance du laser à une hauteur z (mm ²)
$r_2(z)$	rayon interne de la couronne formée par le laser à une hauteur z (mm)
$r_1(z)$	rayon externe de la couronne formée par le laser à une hauteur z (mm)
θ	angle d'incidence moyen
α_{TA6V}	coefficient d'absorption du TA6V
ε	émissivité
α	convection (W/m ² K)

Chapitre 5

L_d	longueur du défaut (m)
l_d	largeur du défaut (m)
p_d	profondeur du défaut (m)
t	temps de fabrication (min)
l_{fil}	longueur de fil consommé durant la correction (m)
<i>triplet</i>	paramètres machine (P , WFS , TS)
H	matrice historique contenant tous les triplets testés
RN	réseau de neurones
M	matrice mémoire contenant les triplets répondant favorablement aux conditions d'existence et les valeurs des variables géométriques prédites par le réseau de neurones
C	matrice candidate contenant tous les triplets répondant favorablement aux conditions d'existence
<i>Performance</i>	matrice contenant les performances calculées (t , l_{fil}) pour chaque stratégie et chaque triplet de la matrice C
N_{cordon}	nombre de cordons par couche
N_{couche}	nombre de couche pour corriger le défaut
t_{fab}	temps de fabrication (min)
t_{pause}	temps de pause entre chaque cordon ou entre chaque couche (min)
$t_{position}$	temps nécessaire à l'outil pour revenir à sa position initiale entre chaque couche (min)
t_r	temps de refroidissement (min)
$l_{position}$	distance à parcourir par l'outil pour revenir à sa position initiale lorsqu'une couche est fabriquée. Cette distance dépendant de la stratégie employée (m)
t_1	temps machine pour la stratégie 1 (min)
t_2	temps machine pour la stratégie 2 (min)
t_3	temps machine pour la stratégie 3 (min)
t_4	temps machine pour la stratégie 4 (min)
l_1	longueur de fil consommée pour la stratégie 1 (m)
l_2	longueur de fil consommée pour la stratégie 2 (m)
l_3	longueur de fil consommée pour la stratégie 3 (m)
l_4	longueur de fil consommée pour la stratégie 4 (m)

CHAPITRE 1 : CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE

1.1	La fabrication additive.....	2
1.1.1	Définitions de la fabrication additive	2
1.1.2	Les enjeux écologiques.....	3
1.1.3	Les procédés de la fabrication additive	4
1.2	La correction de défauts géométriques à l'aide de la fabrication additive	6
1.3	La conception pour la fabrication additive.....	9
1.4	Les difficultés de la fabrication additive	12
1.4.1	Un problème multiphysiques.....	12
1.4.2	Les erreurs inhérentes au procédé	13
1.4.3	La correction des erreurs	14
1.5	Notre procédé LMD-w étudié	17
1.6	Synthèse et plan du manuscrit	19

1.1 LA FABRICATION ADDITIVE

1.1.1 DEFINITIONS DE LA FABRICATION ADDITIVE

La fabrication additive (FA) est un procédé initialement utilisé pour le prototypage rapide de pièces. Aujourd'hui, les industries telles que les industries aéronautiques et aérospatiales [1] utilisent ce procédé pour fabriquer des pièces adaptées aux contraintes géométriques et mécaniques. Leur objectif étant de réduire le coût des matières premières et de ramener le rapport achat/vol à 1:1 [2]. Pour illustrer ce rapport achat/vol, si une entreprise achète 1 kilogramme de matière première alors 1 kilogramme sera utilisé dans un avion ou une fusée.

La fabrication additive est définie de différentes façons :

- le standard ISO/ASTM 52900 (American Society of Testing Materials) la définit comme « un processus d'assemblage de matériaux pour fabriquer des objets à partir de données de modèles 3D, généralement couche après couche, par opposition aux méthodes de fabrication soustractive. »,
- en 2010 Gibson *et al.*[3] définissent la fabrication additive comme un procédé ajoutant de la matière par couches successives où chaque couche est une section mince de la pièce dérivée des données de la CAO d'origine,
- en 2014, Frazier *et al.* [4] ont défini la fabrication additive comme étant un procédé initialisé par la conception de la pièce et se terminant par son impression,
- en 2017, Walton et Moztarzadeh [5] considèrent que la fabrication additive décrit une famille de technologies suscitant de l'intérêt dans de grands secteurs, tels que l'automobile, l'aérospatiale et le secteur médical. Par la suite, le British Standards Institution (BSI) et l'ASTM ont divisé cette famille en sept groupes,
- en 2018, Prakash *et al.* [6], ont défini la fabrication additive comme étant un ensemble de technologies de fabrication moderne utilisé pour produire des prototypes en trois dimensions, issus de la CAO (Conception Assistée par Ordinateur).

La fabrication additive est un processus complexe en raison des multiples physiques impliquées : la mécanique, la thermique et la science des matériaux. Plus récemment, la robotique a été associée pour rendre flexible les procédés. Dans leur définition, Vaneker *et al.* [7] intègrent trois étapes au processus proposé par Frazier [4] la préparation de la construction, l'inspection de la pièce fabriquée et le post-traitement. La Figure 1.1 illustre les visions de Frazier [4] et de Vaneker *et al.* [7] mises en parallèle.

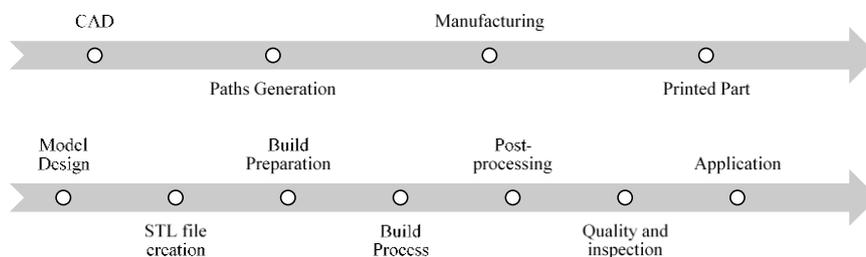


Figure 1.1 Procédés de fabrication additive selon Frazier, 2014 (en haut) [4]et Vaneker *et al.* , 2020 (en dessous) [7]

La FA s'inscrit dans une démarche de réflexion tant économique au travers de la réduction des coûts mais également écologique en adressant des problématiques de surconsommation (ou: "en adaptant plus justement la consommation aux besoins") et de relocalisation de la production : il s'agit d'un des fondamentaux de l'Industrie 4.0 ou de l'Usine du Futur.

1.1.2 LES ENJEUX ECOLOGIQUES

Dans l'Industrie 4.0, l'environnement est un facteur majeur. Dès 2014, Frazier [4] présente l'intérêt écologique de la fabrication additive. Il justifie que la fabrication additive devrait avoir un impact positif sur l'environnement en réduisant la consommation d'énergie et l'empreinte carbone comparé aux procédés de fabrication soustractifs.

Prakash *et al.* [6] ont comparé les procédés de la fabrication additive et les procédés de fabrication dits « classiques ». En effet, contrairement aux procédés de fabrication actuelle, la fabrication permet de réaliser des pièces dans de petites structures, proches du consommateur ; permettant de réduire les coûts et les impacts environnementaux.

Les procédés de fabrication actuels sont dits « soustractifs » sont fondés sur le principe de perte de matière importante. La fabrication additive quant à elle se contente de déposer la matière nécessaire par couche successive, diminuant la consommation de matière première.

Lundbäck et Lindgren [2] avaient, dans leurs travaux, exposé ce côté « économie de matière ». Ils prennent pour exemple le secteur aéronautique avec le ratio Buy-to-Fly. Ce ratio est un rapport en poids entre la matière première utilisée pour un composant et le poids du composant lui-même. Avec les procédés de fabrication classique le ratio moyen est de 4:1 mais peut même monter à 20:1. C'est-à-dire que pour 4 kilogrammes de matière achetée, seul 1 kilogramme sera réellement utilisé dans le produit. Alors que la fabrication additive permet d'approcher les ratios de l'ordre de 1:1. Cette différence de Buy-to-Fly ratio entre les procédés soustractifs et les procédés de FA est illustrée par la Figure 1.2.

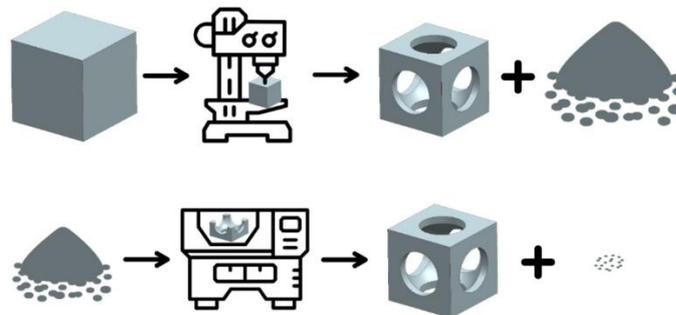


Figure 1.2 Représentation de la consommation de matière avec les procédés soustractifs (en haut) et les procédés de fabrication additive (en bas) selon Lundbäck et Lindgren, 2017

Un autre aspect environnemental que la fabrication additive permet de prendre en compte est l'allongement de la durée de vie d'un produit. En effet, la fabrication additive permet d'effectuer une maintenance corrective sur des pièces endommagées ou trop usées. Cette maintenance permet d'allonger le cycle de vie du produit, mais également de réduire la production de pièces neuves. Ce qui permet de réduire la quantité de matière ou d'énergie consommée, mais aussi le coût de production.

1.1.3 LES PROCÉDES DE LA FABRICATION ADDITIVE

Les procédés de fabrication additive se distinguent sur le matériau et la source de chaleur mis en œuvre. Ces matériaux sont de natures différentes : résine, céramique, cire, eau, plastique, papier ou métal.

Nos travaux nous ont conduit à traiter la fabrication additive métallique. Les travaux de Frazier [4] ont été la source de certaines de nos approches. En effet, dans ses travaux Frazier [4] a regroupé les systèmes de la fabrication additive métallique selon trois catégories :

- les systèmes « lit de poudre »,
- les systèmes par « projection de poudre »,
- les systèmes par « apport de fil »

A partir de ses travaux et de ceux de McMillan *et al.* [8], il est possible de représenter sous forme schématique les systèmes de la fabrication additive métallique. Ainsi la Figure 1.3 illustre la décomposition des procédés de la fabrication additive en fonction des familles définies par l'ASTM. Tous les procédés de la fabrication additive métallique n'y sont pas ; par exemple le procédé par friction de matière (FSW).

Dans leurs travaux de 2005, Mischra et Ma [9] exposent le principe de fonctionnement de ce procédé qui repose sur le fait qu'un outil en rotation vient au contact du matériau. La friction entre l'outil et le métal produit de la chaleur. Cette chaleur locale permet de faire fusionner la matière. Nous nous sommes intéressés à une approche phénoménologique identique mettant en œuvre un faisceau laser. Le procédé étudié pour nos travaux est le procédé de fusion laser par apport de fil (Laser Metal Deposition), mis en évidence par un encadrement orange sur la Figure 1.3. Dans la section suivante, nous expliquons le principe de fonctionnement de ce type de procédé.

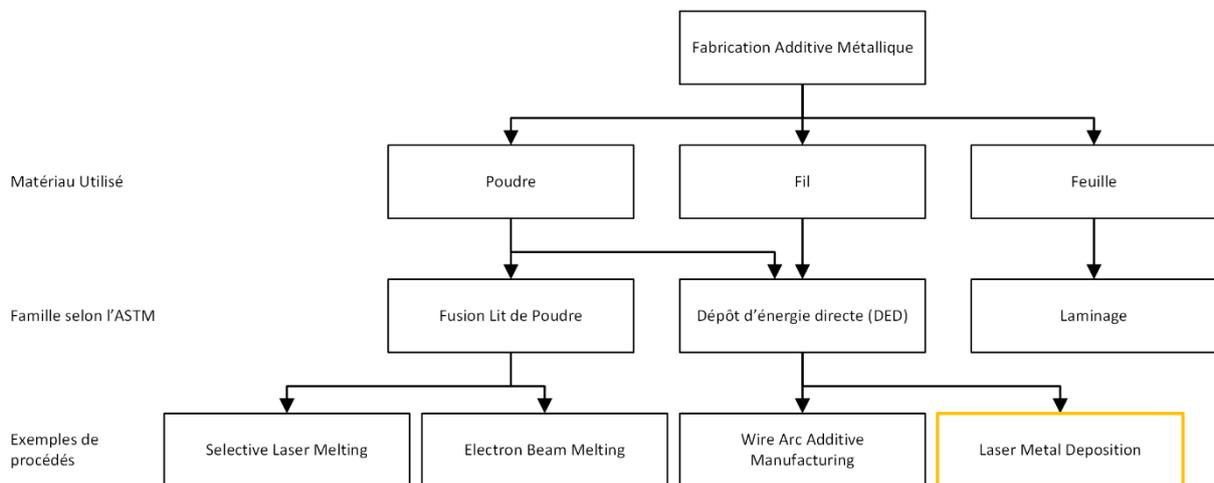


Figure 1.3 Classement des procédés de fabrication additive métallique par familles en fonction de l'état de la matière première (poudre, fil ou feuille) et de la source de chaleur

A. LE PROCÉDE PAR APPORT DE FIL

Le principe des procédés par apport de fil consiste à venir déposer du métal fondu par couches successives. Ces procédés sont reconnus pour leur pourcentage de dépôt important de matière, permettant d'atteindre une densité de 99.6% selon Javidani *et al.* [10], mais aussi pour leur

possibilité à créer une pièce de volume plus importante que les autres systèmes. Physiquement ce pourcentage de 99.6% signifie que la pièce est composée à 99.6% du matériau déposé. Les 0.4% restant pouvant être des impuretés, des porosités ou bien des bulles de gaz capturées dans la matière.

Les systèmes d'impression par apport de fil peuvent avoir différents types de source d'énergie. Les sources d'énergie les plus courantes sont :

- le faisceau laser,
- le faisceau d'électrons,
- l'arc plasma.

B. LE MATERIAU : L'ALLIAGE DE TITANE (TA6V)

Le titane allié présente des caractéristiques mécaniques élevées pour une masse volumique relativement faible, environ 4.42g/cm^3 pour l'alliage de titane TA6V contre 4.507g/cm^3 pour le titane pur et 7.96g/cm^3 pour l'acier inoxydable 316L [11]. C'est pourquoi, le titane allié trouve son application dans le domaine aéronautique et aérospatial.

L'alliage de titane utilisé lors de nos travaux de recherche est le Ti-6Al-4V, aussi écrit TA6V. Cet alliage fait partie des alliages alpha + bêta. Ces alliages répondent favorablement aux traitements thermiques et sont résistants à chaud. Ils sont également d'un point de vue métallurgique stables à une température de 450°C . Ce sont les alliages capables de présenter la résistance mécanique la plus élevée (1250 MPa à la résistance à la rupture à la traction pour le TA6V contre 200MPa pour l'acier inoxydable). Leur aptitude au soudage est limitée par les conséquences de transformations métallurgiques au cours du procédé et du risque élevé d'oxydation.

Le Tableau 1.1 indique la composition chimique de l'alliage TA6V. Cet alliage est dans la catégorie alpha+bêta car il contient des éléments dits alphagènes comme le titane (Ti), la vanadium (V), l'aluminium (Al) et des éléments dits gammagènes avec le carbone (C) et l'azote (N).

Tableau 1.1 Composition chimique de l'alliage de TA6V

Elément	Al	C	Fe	H	N	O	V	Ti
%	6	0.1	0.4	0.015	0.05	0.2	3.5-4.5	88.735-89.735
Phase	α	γ			γ		α	α

Le titane est un métal réactif à l'oxydation dans des milieux aqueux, mais aussi dans l'air. Le titane est stable jusqu'aux températures avoisinant les $400-450^\circ\text{C}$. Au-dessus de cette température, la couche d'oxyde augmente. Dès qu'il est en contact avec une source d'oxygène telle que l'air ou l'eau, une couche passive d'oxyde se forme instantanément (TiO_2) [12]. Seul l'usinage permet d'enlever cette couche d'oxyde. L'usinage du TA6V reste délicate. Durant le procédé un dégagement de chaleur important se produit, pouvant endommager l'outil de découpe. C'est pourquoi la fabrication additive est un moyen économique et sécuritaire de fabriquer des pièces en TA6V [13].

La FA offre de nombreux avantages pour fabriquer des pièces. Et, La fabrication additive métallique peut également être utilisée pour corriger des pièces mécaniques ayant des défauts, notamment des défauts géométriques [14].

1.2 LA CORRECTION DE DEFAUTS GEOMETRIQUES A L'AIDE DE LA FABRICATION ADDITIVE

Il existe plusieurs méthodes pour corriger les défauts sur des pièces métalliques. La FA, méthode de fabrication par ajout de matière, est l'une d'entre elles [14]. La correction de pièces peut intervenir après une erreur lors de la phase de production d'une pièce par procédés conventionnels ou après un certain temps d'utilisation de la pièce pour réparer une de ses fonctions [15]. La correction de pièces peut également avoir lieu pour un recyclage de pièce. Nous nous situons dans un contexte industriel.

Cette méthode de correction est limitée par les principes physiques du procédé employé. Ces limites sont de plusieurs ordres :

- le matériau utilisé et ses propriétés de soudabilité,
- les plages des paramètres d'entrée du procédé,
- les caractéristiques et performance machine (robot et contrôleur)
- la dimension de la cuve d'inertage et donc de la zone de travail,
- les caractéristiques de la tête d'impression (distance focale du laser, diamètre de sortie de la buse, dimension du laser, longueur d'onde du laser),
- la précision du procédé,
- la géométrie à fabriquer.

Pour pouvoir corriger par la fabrication additive, il est possible d'avoir recours à l'usinage pour ajouter la matière, comme illustrée sur la Figure 1.4. De ce fait, la méthode de correction est identique qu'il s'agisse d'un défaut surfacique ou d'un défaut volumique. Seule la quantité de matière déposée diffère.

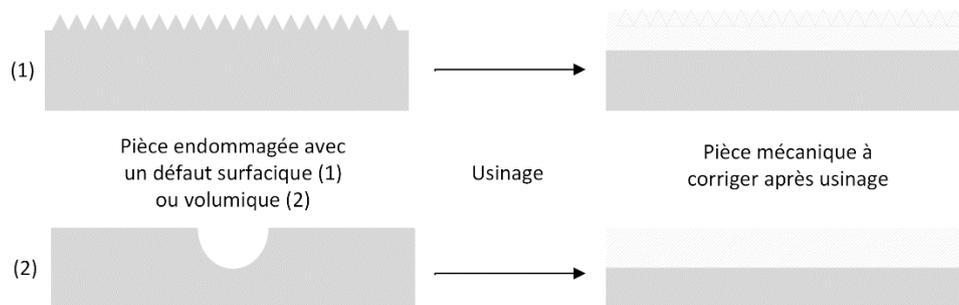


Figure 1.4 Pièce mécanique à corriger après l'usinage pour la préparation de la surface d'impression

En pratique, la fabrication additive ne s'oppose pas à la fabrication soustractive. Elles sont complémentaires. Pour la correction en fabrication additive, il est donc important de vérifier sa faisabilité en fonction du type de défaut et du procédé utilisé. Pour cela, nous proposons de diagnostiquer la pièce endommagée en trois temps :

- temps 1 : Spécifiant le défaut de la pièce, selon la classification présentée ci-après,
- temps 2 : Quantifiant le défaut, porosité, fissure, déplacement de la pièce,
- temps 3 : Définissant la stratégie de correction.

Temps 1 : Spécification du défaut de la pièce Avant l'émergence des procédés de fabrication additive, une pièce métallique endommagée pouvait être classée selon deux catégories : réparable ou jetable.

Depuis l'arrivée de la fabrication additive métallique, une troisième catégorie émerge celle que nous qualifierons de « réparable par un procédé de la fabrication additive ». Ainsi lors de la phase de spécification, le défaut d'une pièce endommagée peut être :

- « non réparable »,
- « réparable par les procédés classiques » ou
- « réparable par les procédés de la fabrication additive ».

Or, dire qu'un défaut est réparable par un procédé de fabrication classique revient à dire que le défaut n'est pas réparable par les procédés de fabrication additive. Le Tableau 1.2 regroupe des exemples de défauts en fonction de la catégorie.

Tableau 1.2 Exemples de défauts en fonction de la catégorie

Catégories	Exemples de défauts
Non réparable	Pièce trop endommagée : la réparation coûterait plus cher que la fabrication d'une nouvelle pièce. Matériau ayant des propriétés de soudabilité faibles
Non réparable par la fabrication additive	Porosités Fissures Déplacement de la pièce
Réparable par fabrication additive	Tous les autres défauts dans les limites des caractéristiques techniques du procédé choisi.

Temps 2 : Quantification du défaut Si le défaut peut être corrigé par la fabrication additive, il est nécessaire de le quantifier. Cette quantification permet de déterminer le type de défaut à corriger (porosités, fissures, déplacement de la pièce) et son importance. Pour cela, la pièce est analysée visuellement et à l'aide d'un instrument optique tel que le microscope. Cette quantification permet également de définir la stratégie globale (choix du procédé, choix du matériau, choix des paramètres d'entrée machine, la trajectoire de la tête d'impression, etc.) à mettre en place pour la correction de ce défaut. C'est que nous appellerons la phase de définition. Lors de cette phase les problématiques géométriques, les problématiques de performance et le choix de la paramétrie interviennent. Il est important de faire appel aux connaissances du procédé issue des impressions déjà réalisées. Ces impressions constituent une base de cas. Une fois la conception de la pièce mécanique choisie, l'impression de la pièce est effectuée et la pièce est corrigée. Enfin on qualifie la pièce corrigée pour permettre sa réintroduction dans l'industrie. Le processus de correction de pièce métallique endommagée est présenté sur la Figure 1.5.

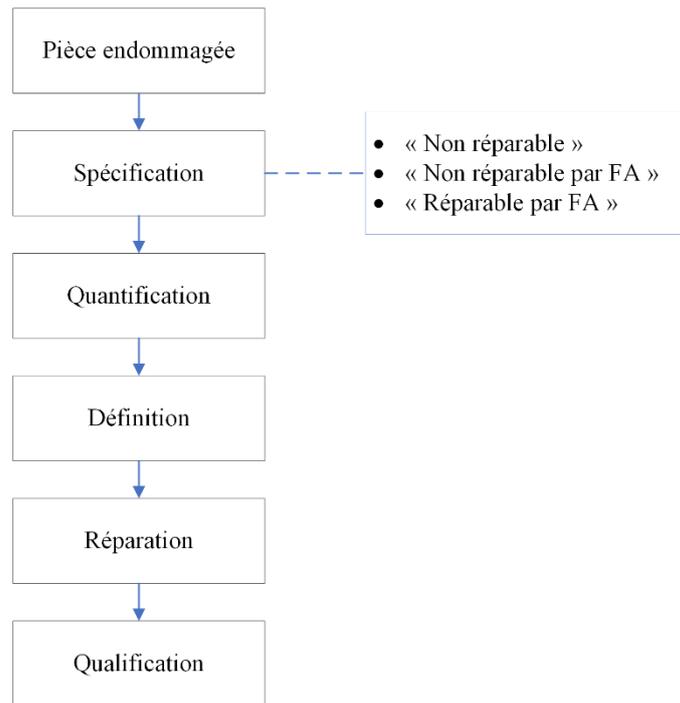


Figure 1.5 Représentation schématique des étapes constituant le processus de correction en fabrication additive

Temps 3 : Définition de la stratégie Nous nous proposons également de représenter le processus de correction en fabrication additive, par le diagramme SADT (Structured Analysis and Design Technics ou Technique Structurée d'Analyse et de Modélisation). La méthode SADT est une méthode graphique d'analyse fonctionnelle descendante, qui part du général pour aller au particulier. Cette méthode permet de décrire des systèmes complexes dans le but de poser le problème, non de le résoudre. Pour les Figure 1.6 et Figure 1.7 nous avons choisi d'utiliser l'actigramme. C'est-à-dire que nous nous concentrons sur les actions à réaliser et non sur les données.

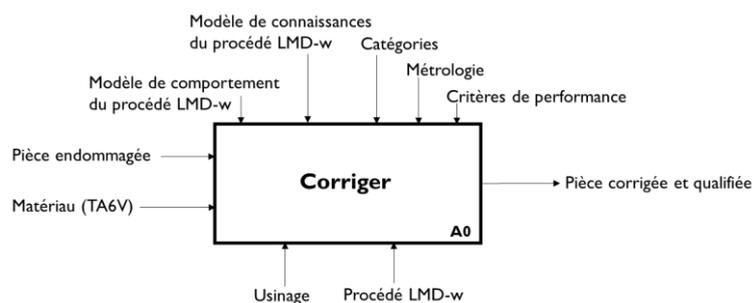


Figure 1.6 Niveau A0 du diagramme SADT pour la correction en fabrication additive

Sur la Figure 1.6 le niveau 0 est le niveau le plus haut dans un diagramme SADT. Ici l'action à entreprendre est de « corriger ». Dans cette modélisation, nous considérons que l'« activité » transforme les entrées en sorties. Pour cela, en entrée, nous retrouvons une pièce endommagée et la matière à apporter pour la correction. A l'aide de l'usinage et de la fabrication additive, la correction pourra être effectuée.

Cette correction est contrôlée par la catégorisation des défauts de la pièce endommagée, par de la métrologie et par le respect des critères de performances. En sortie de ce processus, nous récupérerons une pièce corrigée et qualifiée.

Dans la Figure 1.7, nous détaillons le processus, en identifiant chaque action à réaliser. On y retrouve les points de contrôle (modèle de comportement et de connaissance du procédé de FA, catégories, métrologie et critères de performance), les données d'entrée (pièce endommagée et matière (TA6V)), les moyens (usinage et procédé de FA) ainsi que la sortie : la pièce corrigée et qualifiée. Les niveaux allant de A1 jusqu'à A5 permettent de détailler l'ensemble des sorties et des moyens mis en place pour chaque action.

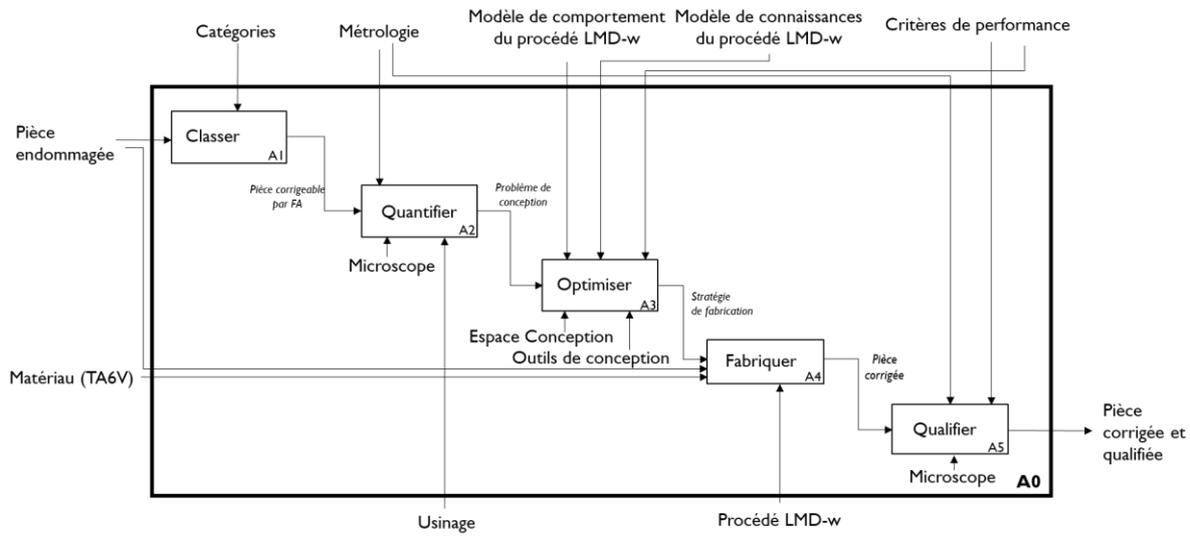


Figure 1.7 Détails du niveau A0 avec les niveaux A1 à A5 pour le processus de correction en fabrication additive sur le diagramme SADT

En plus d'être un problème multiphysiques et multi échelles, la fabrication additive peut être considérée comme un problème de conception.

1.3 LA CONCEPTION POUR LA FABRICATION ADDITIVE

Selon Watschke *et al.* [16], l'une des principales limites de la fabrication additive est le manque de connaissances des phénomènes physiques et des couplages entre ceux-ci. Les phénomènes physiques impliqués lors de l'impression ont un fort impact sur la qualité des pièces sortant du processus. C'est pourquoi Ponche *et al* [17] les considèrent dès le début du processus, en y intégrant, à l'étape de la conception, les défauts générés par le processus. Les méthodes de conception standard ne sont pas toujours adaptées à ces procédés de fabrication encore nouveaux.

Par conséquent, une nouvelle méthode de conception, spécifique à la fabrication additive, a été développée : la conception pour la fabrication additive (Design for Additive Manufacturing en anglais, DfAM). La conception pour la fabrication additive est une méthode de conception axée sur les spécificités de la fabrication additive en tenant compte de ses limites (par exemple, le temps de traitement, le coût du processus, les post-traitements, la préparation de l'impression).

Dans leurs travaux Laverne *et al.* [18] ainsi que Yang *et al.* [19] ont développé un ensemble de méthodes et d'outils pour guider les concepteurs lors du processus de conception de produit grâce à de nouvelles fonctions, formes et compositions de matériaux rendus possibles par la fabrication additive. Dans le domaine de la conception pour la fabrication additive, les connaissances peuvent être portées sur les limites du procédé afin de réduire le risque d'erreurs lors de la fabrication. Ce mode de conception est dit restrictif. La conception pour la fabrication additive peut également être opportuniste. Ce mode de conception vise à concevoir des produits en fonction des possibilités du procédé toujours selon Laverne *et al.* [18].

En outre, l'inclusion des processus de fabrication et d'assemblage dès le début du processus de conception augmente les chances de réussite de l'impression et raccourcit le cycle de développement d'après Vaneker *et al.* [7]. La capitalisation des connaissances et l'accès à celles-ci ont facilité le développement d'idées de solutions innovantes et de faisabilité technique. Son utilisation et son application pendant la phase de conception dans la fabrication additive s'appelle l'exploration de l'espace de conception et l'exploitation de l'espace de conception.

L'approche de l'exploration de l'espace de conception permet aux ingénieurs de tester plusieurs combinaisons d'entrées de paramètres pour simuler le processus afin de trouver la ou les solutions optimales. Cependant, les erreurs existent également dans les modèles de simulation ou dans les modèles de prédiction (réseau de neurones ou régression).

Selon Lopez *et al.* [20] les modèles mathématiques et de calculs sont basés sur le processus physique et les observations des ingénieurs. En raison des erreurs commises lors du processus d'impression et de l'incertitude des mesures effectuées lors des observations, il est permis de considérer que le modèle numérique repose sur des erreurs. Les solutions générées par le modèle numérique sont alors inexactes.

L'espace de conception dans lequel l'utilisateur génère ses solutions de conception, est lui également basé sur une modélisation partielle des processus de fabrication additive. La simplification des phénomènes physiques impliqués conduit à des inexactitudes lors de son utilisation. Ainsi, lors de l'exploration et de l'exploitation de l'espace de conception pour la fabrication additive, les solutions générées sont partiellement "corrompues", et le concepteur ne considère pas nécessairement ces erreurs lors du choix de conception.

Initialement, nous avons un procédé de fabrication. Ce procédé est observé pour pouvoir être modélisé. Les observations sont une des sources d'erreurs. Les outils de mesures contiennent intrinsèquement une incertitude qui a un impact sur la précision et la répétabilité des mesures effectuées par l'opérateur.

De plus, les modèles mathématiques et les modèles de simulations reposent sur ces observations partiellement erronées. Ces différentes sources d'erreurs et leurs répercussions entre elles sont illustrées sur la Figure 1.8.

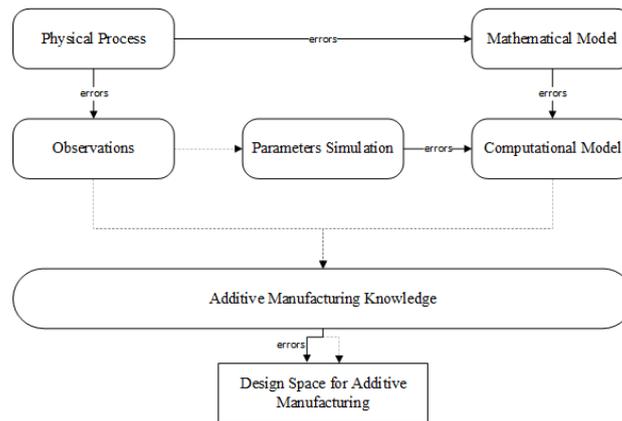


Figure 1.8 Sources d'erreurs lors du développement d'un modèle de calcul selon Vaneker *et al.* [7]

Pour explorer l'espace de conception dans le contexte de la fabrication additive, Goguelin *et al.* [21] ont développé une méthodologie, composée de trois étapes :

- étape 1 : filtrer les solutions en fonction des objectifs en utilisant un diagramme de coordonnées parallèles,
- étape 2 : afficher les corrélations entre les variables de conception de la fabrication additive pour le concepteur avec un diagramme de dispersion,
- étape 3 : sélectionner une solution et évaluer ses performances avec des diagrammes à barres et des diagrammes radar.

Cette méthodologie permet au concepteur de sélectionner les valeurs d'entrées du processus en les évaluant pour limiter le risque d'erreurs lors du procédé de fabrication. En outre, Xiong *et al.* [22] ont développé une méthode basée sur les données pour les tâches de recherche et d'optimisation de conception. Le but de leur méthode est d'explorer puis d'exploiter l'espace de conception dans le processus de la fabrication additive. Pour explorer l'espace de conception, la méthode consiste à identifier des régions de conception réalisables avec une classification de réseau bayésien. De plus, Xiong *et al.* [22] ont utilisé une corrélation gaussienne pour rechercher les points optimaux dans chaque région de conception. Une fois ces points optimaux déterminés, ils les utilisent dans une analyse par éléments finis. L'exploration de l'espace de conception est un moyen de capitaliser les connaissances acquises au cours des différentes fabrications passées. Ces connaissances peuvent être acquises de deux manières. Soit des campagnes expérimentales sont réalisées et les réponses sont analysées, cette méthode permet de développer un modèle de comportement. Soit les lois et les principes de la physique sont appliquées pour développer des modèles de simulations, également appelés modèles de connaissances. Dans tous les cas, les sorties issues des modèles de comportement ou modèles de connaissance contiennent des incertitudes dues aux instruments de mesure, à la réponse mesurée ou bien dues aux conditions aux limites des modèles de simulation du procédé de fabrication additive.

1.4 LES DIFFICULTES DE LA FABRICATION ADDITIVE

1.4.1 UN PROBLEME MULTIPHYSIQUES

La fabrication additive est un procédé couplant trois physiques :

- La thermique : conduction, convection, radiation, rayonnement
- La métallurgie : composition en phases, taille des grains
- La mécanique : élasticité, plasticité

La Figure 1.9 illustre les interactions des trois physiques entre elles et les phénomènes mis en jeu.

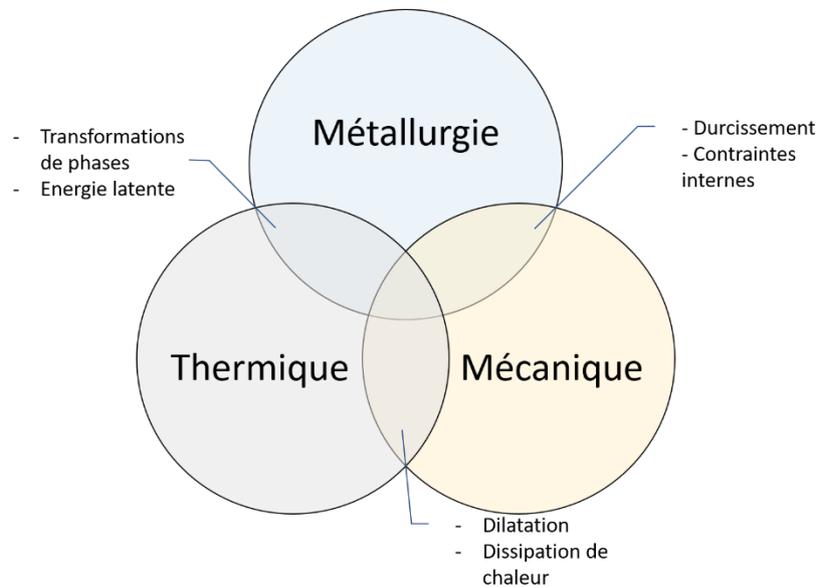


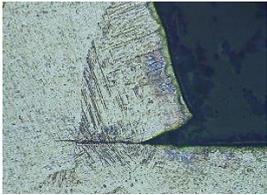
Figure 1.9 Diagramme d'interactions entre les physiques mis en jeu lors des procédés de fabrication additive

Lors du refroidissement du métal en fusion, la matière subit des modifications de structure que nous appellerons microstructures. Par conséquent, la fabrication additive doit être modélisée par une approche de type thermo-métallo-mécanique. D'après le travail de Depradeux en 2004 [23], « dans le cas du soudage sur l'acier 316L, l'absence de transformations structurales à l'état solide permet de traiter un problème purement thermo-mécanique, sans qu'il soit nécessaire de modéliser de changement de microstructures ». D'un point de vue métallurgique, nous pouvons considérer que seule la fusion thermique et ses conséquences sur les propriétés mécaniques thermo dépendantes sont à prendre en compte.

D'un point de vue de la mécanique, il est nécessaire de traiter les déformations et la dilatation thermique ainsi que les caractéristiques mécaniques du métal en fonction de la température. En outre, d'un point de vue thermique, il est nécessaire de prendre en compte la dissipation d'énergie, la chaleur, dans le métal. Pour cela, il est nécessaire de la modéliser. En effet, cette dissipation est responsable du comportement mécanique de la pièce au cours des montées et descentes de température.

Un des problèmes majeurs de la fabrication additive réside dans l'apparition de défauts inhérents aux procédés. Les défauts en fabrication additive sont classés en plusieurs catégories et leurs raisons sont multiples. Ces catégories de défauts peuvent être réduits au nombre de 8 et sont présentés dans le Tableau 1.3.

Tableau 1.3 Résumé des 8 défauts retrouvés en fabrication additive métallique

Défauts	Explication	Illustration	Références
Délamination	La délamination est un défaut caractérisant la désolidarisation d'une couche déposée avec une couche inférieure. <i>Ce défaut ne peut pas être corrigé</i>		[24], [25]
Oxydation	L'oxydation est un défaut provoqué par un inertage insuffisant avant et pendant l'impression de la pièce. Une couche d'oxyde se forme sur la surface de la géométrie imprimée. <i>Ce défaut peut être corrigé par usinage.</i>		[24]–[26]
Porosité / Manque de fusion	La porosité est l'incrustation d'une bulle de gaz dans la matière lors de l'impression. Le manque de fusion de la matière indique une insuffisance énergétique pour fusionner la matière. <i>Ces défauts sont corrigibles par traitement thermique ou High Isostatic Pressure.</i>		[24]–[31]
Fissures	Les fissures dépendent principalement de la nature de la solidification du matériau. Elles proviennent généralement lors du refroidissement des grains si la contrainte interne au niveau du bain de fusion est trop importante.		[24], [26], [29]

Déplacement de la pièce	Le déplacement de la pièce finale peut également être appelé « wrapping ». Lors du refroidissement, si la pièce n'est pas uniformément bridée les contraintes issues du procédé vont mal se répartir et lorsque la pièce sera débridée, elle se déformera dans sa configuration la plus stable en forme de banane. <i>Ces défauts sont corrigibles par traitement thermique ou High Isostatic Pressure.</i>		[24]–[26], [28], [29], [32]
Etat de surface	L'état de surface caractérise la qualité du dépôt d'une couche : effet de vagues, l'homogénéité du dépôt de matière, les fusions partielles, les effets de bosse, etc. <i>Ces défauts peuvent être corrigés par usinage.</i>		[24]–[27], [30], [31], [33]–[41]
Précision du dépôt	La précision du dépôt permet de caractériser l'écart qu'il existe entre la géométrie désirée (CAO) et la pièce imprimée.	—	[25]–[27], [33], [34], [42]

Nous retiendrons que les défauts apparaissent durant la fabrication de la pièce et qu'ils sont tous en lien avec les conditions expérimentales (inertage de la cuve de fabrication avec un gaz de protection comme l'Argon et paramètres machine). Certains de ces défauts peuvent être corrigés comme les porosités ou le manque de fusion tandis que d'autres comme la délamination sont rédhibitoires : ils ne peuvent pas être corrigés.

1.4.3 LA CORRECTION DES ERREURS

Il existe différentes méthodes pour corriger les défauts. Ces méthodes peuvent être incluses durant le procédé de fabrication ou bien a posteriori. Dans leurs travaux Wu *et al.* [24] recensent un ensemble de technique permettant d'améliorer la qualité de la pièce finale pour le procédé de fabrication additive par dépôt de fil fondu par arc électrique (WAAM). Ces différentes techniques sont :

- le traitement thermique a posteriori,
- le laminage à froid entre les couches,
- le refroidissement entre les couches,
- le martelage et traitement par impact ultrasonique.

Le traitement thermique peut être employé pour améliorer les propriétés mécaniques d'une pièce issue d'un procédé de fabrication additive. Pour cela, différents cycles sont employés en

fonction de la caractéristique à améliorer (porosité, manque de fusion ou propriétés mécaniques de la pièce).

En 2016 Zhong *et al.* [43] ont proposé une technique pour corriger le défaut de porosité dans le procédé de dépôt de fil par fusion laser : le traitement HIP (Hot Isostatic Pressing) [43]. Le traitement HIP permet de réduire la présence de porosité dans la pièce finale et ainsi augmenter la densité du matériau. Ce traitement permet également d'augmenter les propriétés mécaniques de la pièce finale. Le cycle employé par Zhong *et al* est le suivant : les échantillons sont montés en pression à 1000 bar et en température à 1150°C pendant 4 heures. Le gaz utilisé est l'argon. La Figure 1.10 illustre la réduction du taux de porosités après le traitement HIP pour l'échantillon de Zhong *et al.* [43]. Initialement, la pièce avait un taux de porosité de 0.41% et en fin, la pièce obtient un taux de porosité de 0%.

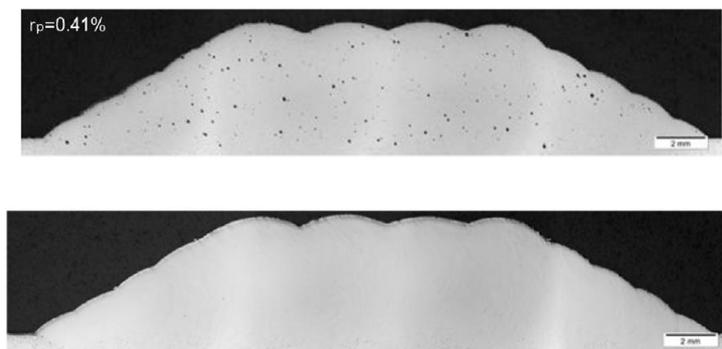


Figure 1.10 Réduction du taux de porosités dans une pièce issue du procédé de fabrication additive WAAM après traitement HIP, Zhong *et al.* (2016) [43]

Le laminage à froid entre les couches, illustrée sur la Figure 1.11, est une méthode à réaliser durant le procédé de fabrication additive. Entre chaque couche déposée, un rouleau est passé sur la couche déposée. Les études de Colegrove *et al.* [44] ont montré que cette technique permettait de réduire la formation de contraintes résiduelles, mais aussi la déformation de la pièce finale. Pour le procédé WAAM, cette technique permet également de réduire l'anisotropie de la microstructure et donc d'améliorer les propriétés mécaniques de la pièce finale comme le montrent les travaux de Huang *et al.* [45] et de Martina *et al.* [46] où la recristallisation de la couche déformée est ensuite chauffée de nouveau par le passage de la source de chaleur lors du dépôt de la couche suivante.

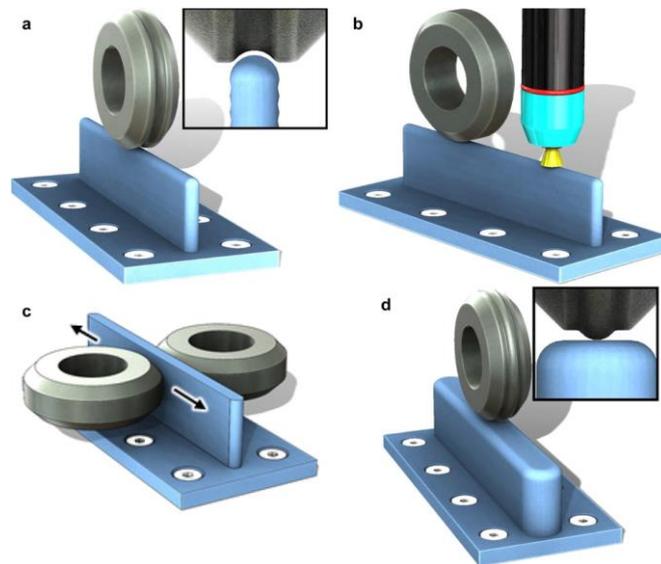


Figure 1.11 Schémas des différentes méthodes pour le interpass cold rolling : (a) méthode verticale, (b) méthode verticale directement après le passage de la source de chaleur, (c) méthode horizontale, (d) méthode avec un profil inversée pour les couches épaisses, Colegrove *et al.* (2017) [44]

Le refroidissement entre les couches par soufflage de gaz inerte sur la couche déposée permet de contrôler les cycles de température afin d'obtenir la microstructure souhaitée et donc des propriétés mécaniques acceptables (rigidité, dureté, résistance). Cette méthode permet également de réduire le risque d'oxydation lors de la fabrication avec l'alliage de titane TA6V d'après les travaux de Wu *et al.* [47].

Le martelage et les traitements par impact ultrasonique ont été appliqués pour réduire les contraintes résiduelles locales dans le cas du soudage. Ces méthodes sont des corrections a posteriori :

- Le martelage permet de générer des contraintes de compression jusqu'à une profondeur de 1 à 2 millimètres sous la zone martelée.
- Le traitement par impact ultrasonique quant à lui permet de raffiner le grain et de l'orienter dans une direction aléatoire.

Après un traitement par impact ultrasonique, les contraintes résiduelles réduisent de 58% et la microdureté peut augmenter de 28%. L'effet de ce traitement a lieu jusqu'à une profondeur de 60 μ m selon l'étude de Li *et al.* [48].

Le Tableau 1.4 résume les différentes méthodes de correction ainsi que les défauts qu'elles permettent de corriger ou d'améliorer.

Tableau 1.4 Récapitulatif des méthodes de corrections avec les défauts corrigés et leur utilisation durant le procédé de fabrication additive

Méthode de correction	Moment de l'intervention	Influences sur les défauts corrigés
Traitements thermiques	A posteriori	Amélioration des propriétés mécaniques Réduction du taux de porosité Réduction du manque de fusion
Laminage à froid	In situ / a posteriori	Augmentation des propriétés mécaniques Réduction des contraintes résiduelles Réduction du déplacement de la pièce finale Réduction de l'anisotropie des grains
Refroidissement entre les couches	In situ	Contrôle de la microstructure Augmentation des propriétés mécaniques Réduction de l'oxydation
Martelage et traitement par impact ultrasonique	A posteriori	Augmentation des propriétés mécaniques (microdureté) Réduction des contraintes résiduelles locales
Traitement HIP	A posteriori	Amélioration des propriétés mécaniques Réduction du taux de porosité Réduction du manque de fusion

Tous les défauts ne peuvent pas être corrigés, c'est pourquoi des modèles numériques sont développés. Cette modélisation des procédés de fabrication additive permet de mieux comprendre et anticiper la génération de défauts issus de la thermique comme la déformation de la pièce en fin de fabrication ou le manque de fusion. La modélisation des procédés de fabrication additive sera abordée dans la section suivante.

1.5 NOTRE PROCÉDE LMD-W ETUDIÉ

Nos travaux se sont intéressés au procédé de fabrication additive par apport de fil fondu par fusion laser. Ce procédé est appelé Laser Metal Deposition with Wire (LMD-w).

Le principe de fonctionnement du procédé par apport de fil fondu par fusion laser (LMD-w) repose sur l'apport de fil de TA6V déposé sur le substrat, dans le bain de fusion à une vitesse WFS de façon coaxiale au laser à une puissance P tandis que la tête du robot se déplace à une vitesse TS . La fabrication a lieu dans une chambre inertée à l'argon (Ar) pour éviter l'oxydation du TA6V. La Figure 1.12 illustre le principe de fonctionnement du procédé LMD-w .

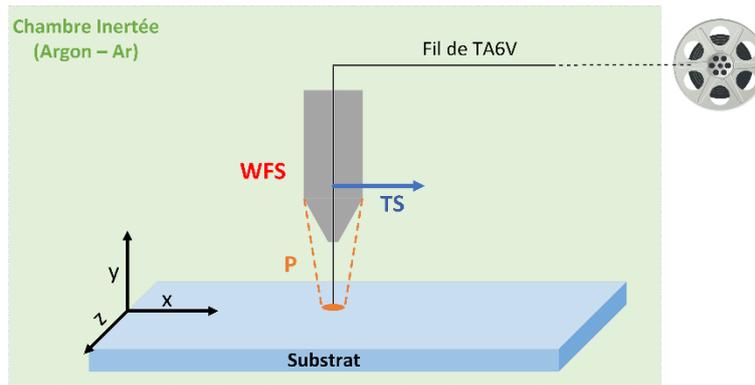


Figure 1.12 Schéma du procédé LMD-W avec les trois variables, également appelées « paramètres d'entrée », Cazaubon *et al.*[49]

Les trois variables d'entrée étudiées dans nos travaux sont :

- la puissance du laser, noté P , en Watts (W),
- la vitesse de déplacement de l'outil, notée TS pour « Tool Speed », en Mètre par Minute (m/min),
- la vitesse d'arrivée du fil, notée WFS pour « Wire Feed Speed », en Mètre par Minute (m/min).

Dans la suite de nos travaux, nous nommerons ces variables : paramètres machine. Ils sont considérés comme indépendants les uns des autres. Cela signifie que nous considérons qu'il n'y a pas de couplages entre eux [50].

La finalité de nos travaux consiste à comprendre les impacts et les influences de ces paramètres sur la géométrie d'un cordon. Le cordon est la géométrie de base de toute fabrication en FA. La Figure 1.13 est une photographie prise durant la fabrication d'un cordon avec le procédé LMD-w. On y retrouve le fil en sortie de buse se déposant sur le substrat pour former un cordon.

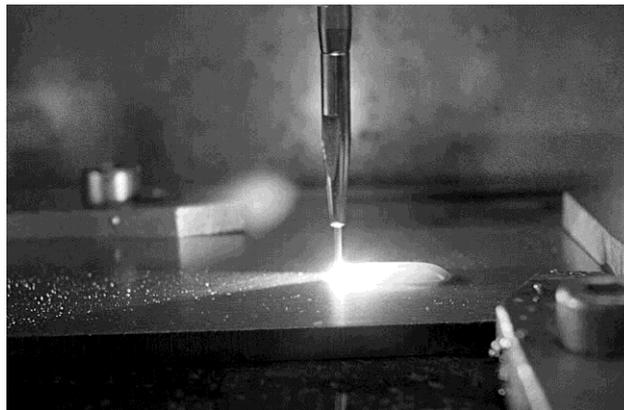


Figure 1.13 Capture d'écran lors de l'acquisition vidéo du procédé LMD-w

Ainsi, plusieurs réponses, ou variables géométriques, sont observées :

- la hauteur du cordon, notée h_c , en millimètre (mm)
- la largeur du cordon, notée w_c , en millimètre (mm)
- la hauteur de dilution, notée h_d , en millimètre (mm)
- la largeur de dilution, notée w_d , en millimètre (mm)
- l'angle de contact entre le cordon et le substrat, notée α , en degré ($^\circ$)

La Figure 1.14 est une coupe microscopique d'un cordon issu du procédé LMD-W. Elle illustre les variables géométriques mesurées sur la géométrie d'un cordon.

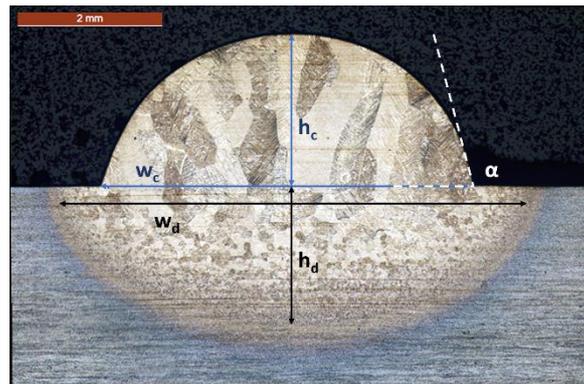


Figure 1.14 Coupe transversale d'un cordon de fabrication additive LMD-w et ses sorties géométriques (LEICA DM1750M, x5), Cazaubon *et al.* [51]

Le premier objectif de ces travaux de recherche est de prédire les valeurs théoriques de ces six sorties en fonction des trois paramètres d'entrée étudié du procédé LMD-w.

1.6 SYNTHÈSE ET PLAN DU MANUSCRIT

Dans ce premier chapitre, nous avons vu que le processus de correction en fabrication additive comprend cinq phases dont deux qui inhérentes au procédé de FA : l'optimisation dans le sens aide à la décision et la fabrication.

La phase d'optimisation consiste à passer du « problème défini » (en d'autres termes la modélisation du défaut à corriger) à la « stratégie de fabrication » (qui se trouve d'ailleurs être en entrée de la phase d'impression entre autres).

Cette phase d'optimisation s'apparente à une approche de la conception : la conception pour la fabrication additive (Design for Additive Manufacturing en anglais, DfAM). En ce sens, l'optimisation utilise les mécanismes d'exploration d'espace de conception et donc de convergence vers une solution dite « optimale » ou idéale et une sélection de stratégie. L'optimisation en conception mécanique nécessite l'utilisation de modèles numériques. Dans notre contexte cela implique le développement et l'utilisation d'un modèle de comportement et d'un modèle de connaissance du procédé LMD-w de fabrication additive.

Ce modèle de comportement repose sur des observations expérimentales. Ces observations expérimentales nous permettent de comprendre les relations qui existent entre les paramètres d'entrée machine et les sorties géométriques. Le modèle de connaissance quant à lui nous

permet de simuler numériquement le procédé LMD-w en prenant en compte les aspects thermique et mécanique de la FA.

Nos travaux de recherche sont motivés pour assister l'opérateur dans le choix d'une stratégie adaptée pour la correction d'une pièce mécanique endommagée en utilisant le procédé LMD-w de fabrication additive. De ce fait, l'objectif de ces travaux de thèse est de répondre à la problématique suivante :

« Comment corriger des défauts géométriques par ajout de matière en fabrication additive métallique ? »

Dans ce contexte, nous proposons, comme illustré sur le diagramme de la Figure 1.15, dans un premier temps, de comprendre le fonctionnement du procédé LMD-w en étudiant les relations et les impacts du choix des paramètres d'entrées sur les sorties géométriques. Pour cela, il est nécessaire de développer un modèle de comportement propre au procédé. Dans un second temps, nous souhaitons prédire les valeurs géométriques du cordon, de la dilution et la déformation de la pièce imprimée pour un jeu de paramètres machine (puissance du laser P , vitesse d'avance de fil WFS et vitesse de déplacement de l'outil TS). Afin de prédire ces valeurs, un modèle de prédiction est nécessaire. Nous faisons l'hypothèse qu'avec un modèle de comportement et un modèle de prédiction, un espace de conception du procédé LMD-w peut être généré. Dans cet espace de conception, un ensemble de stratégies possibles peut être utilisé pour résoudre un problème de fabrication. Pour choisir la stratégie optimale, celle qui, à l'aide de simulation, génère des solutions dont les performances sont optimales et qui offrent les meilleurs compromis entre des variables de performances, un outil de comparaison reposant sur le principe de Pareto est développé.

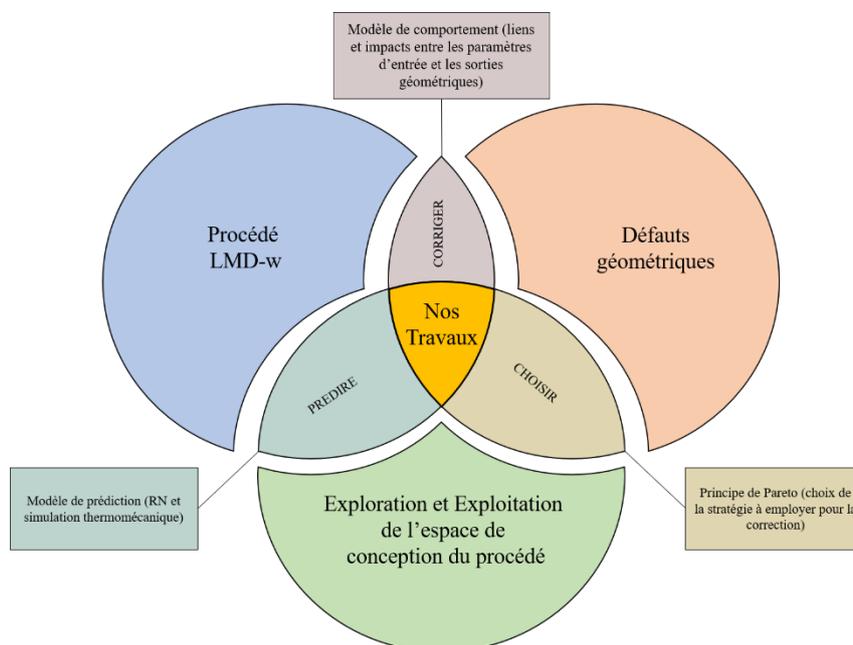


Figure 1.15 Diagramme de contextualisation de nos travaux de recherche dans le domaine de la fabrication additive

CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART ET POSITIONNEMENT DES TRAVAUX DE RECHERCHE

2.1	Modèles numériques des procédés de fabrication additive	22
2.1.1	Introduction des modèles de simulations numériques dits « indirects »	22
2.1.2	Les modèles thermomécaniques.....	23
2.1.3	Modélisation du problème mécanique.....	24
2.1.4	Modélisation du problème thermique.....	24
2.1.5	Modélisation du dépôt de matière	32
2.1.6	Synthèse.....	33
2.2	Modèles de prédiction de sorties géométriques en fonction de paramètres d'entrée dits « directs »	34
2.2.1	Les réseaux de neurones et la fabrication additive	34
2.2.2	Les régressions et la fabrication additive	38
2.2.3	Données en entrée des modèles de prédiction	40
2.2.4	Synthèse.....	41
2.3	Aide à la conception pour la correction en fabrication additive.....	42
2.3.1	Exploration de l'espace de conception	42
2.3.2	Représentation graphique pour l'espace de conception.....	43
2.3.3	Sélection d'une solution optimale	45
2.3.4	Stratégies pour la correction en fabrication additive	47
2.3.5	Synthèse.....	49
2.4	Synthèse et positionnement de nos travaux de recherche.....	50
2.4.1	Synthèse.....	50
2.4.2	Positionnement de nos travaux de recherche.....	51
2.4.3	Notre plan de résolution	53

2.1 MODELES NUMERIQUES DES PROCEDES DE FABRICATION ADDITIVE

La modélisation du procédé de fabrication additive a pour objectif représenter les influences des paramètres machine sur les sorties étudiées, en établissant des relations entre elles. Pour cela, les modèles de numériques impliquent plusieurs physiques fortement couplées : la thermique, la science des matériaux et la mécanique des milieux continus (fluide et structure).

2.1.1 INTRODUCTION DES MODELES DE SIMULATIONS NUMERIQUES DITS « INDIRECTS »

La fabrication additive est un problème multiphysique [23]. La Figure 2.1 présente les comportements physiques principaux impliqués dans le procédé de fabrication additive, ainsi que leurs couplages. Pour modéliser le procédé de FA, trois niveaux de modélisations sont requis :

- Un modèle thermique permettant de prédire les champs de température dans la pièce fabriquée et l'évolution de ce champ au cours du temps,
- Un modèle mécanique prédisant les contraintes résiduelles induites par le procédé et les distorsions s'imposant sur la pièce finale,
- Un modèle métallurgique pour prédire la microstructure de la pièce finale.

Les modélisations thermique et mécanique observent des phénomènes à une échelle macroscopique alors que le modèle métallurgique décrit des phénomènes à l'échelle microscopique.

Dans leurs travaux, Schoinochoritis *et al.* [52] ainsi que Denlinger [53] ont démontré la possibilité de coupler ou non les modèles thermique et mécanique. Le fait de découpler le modèle thermique du modèle mécanique permet de réduire les temps de calculs et les ressources employées, mais les phénomènes induits par les couplages sont oubliés : thermo-élasto-plasticité.

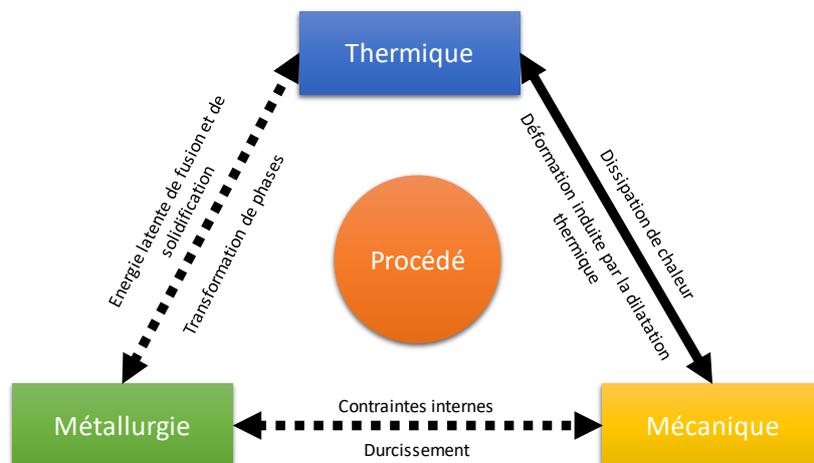


Figure 2.1 Diagramme d'interactions entre le problème mécanique, métallurgique et thermique au cours du procédé de fabrication additive métallique

Les sections suivantes présentent respectivement l'état des connaissances sur la modélisation du problème mécanique et la modélisation du problème thermique.

2.1.2 LES MODELES THERMOMECHANIQUES

Les modèles thermiques et mécaniques peuvent être couplés ou découplés. Le découplage du modèle thermique et du modèle mécanique permet de se focaliser sur les physique mises en jeu d'un point de vue thermique d'une part et mécanique d'autre part. Il permet également de pouvoir chercher la meilleure paramétrisation des modèles par physique. Les modèles sont découplés suivant la nature des variables observées.

Dans leurs travaux sur la simulation des procédés lits de poudre en fabrication additive, Schoinochoritis *et al.* [52] expriment pas à pas la méthodologie à employer pour la résolution du problème thermique et du modèle mécanique par la méthode des éléments finis. Ces deux modèles peuvent être couplés ou découplés. On dit que deux modèles sont couplés si les résultats thermiques calculés pour le pas de temps i sont utilisés pour calculer à la suite les résultats mécaniques pour ce même pas de temps. Une fois les résultats thermiques et mécaniques obtenus au temps i , le calcul pour le temps $i+1$ est effectué ainsi de suite jusqu'à la convergence ou la fin du temps observé.

Le Tableau 2.1 regroupe l'ensemble des conditions aux limites, conditions initiales, forces appliquées, propriétés du matériau à renseigner et résultats obtenus pour le modèle thermique et le modèle mécanique.

Tableau 2.1 Résumé des données nécessaires pour la simulation des modèles thermique et mécanique

Modèle	Thermique	Mécanique
Conditions aux limites	Convection Radiation	Déplacement Rotation
Conditions initiales	Température de la chambre	Déplacements nuls
« Forces »	Flux de chaleur (Q)	Gravité Champs de températures
Propriétés du matériau	Conductivité Chaleur spécifique Densité Emissivité Chaleur latente Coefficient de transfert thermique	Densité Module d'Young Coefficient de Poisson Coefficient de dilatation thermique
Résultats	Champs de température Température maximale Dimension bain de fusion ...	Contraintes résiduelles Champs de déplacement Contraintes plastiques ...

2.1.3 MODELISATION DU PROBLEME MECANIQUE

Le traitement du modèle de comportement relatif à la mécanique des structure est plus plus couteux en ressources de calcul que le modèle thermique [23]. Pour résoudre le problème mécanique, les équations d'équilibre doivent être résolus en tout point de l'espace et pour tout pas de temps.

En statique, l'équation de référence en mécanique est l'équation d'équilibre (2.1).

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{0} \quad (2.1)$$

Avec $\boldsymbol{\sigma}$ les contraintes.

La loi de comportement mécanique est :

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}\boldsymbol{\varepsilon}_e \quad (2.2)$$

Avec \mathbf{C} le tenseur de rigidité du matériau de quatrième ordre et $\boldsymbol{\varepsilon}_e$ la déformation élastique.

Dans ses travaux, Depradeux [23] décrit la déformation viscoplastique comme étant une composante de la déformation totale. Ceci est vrai dans l'hypothèse des petites perturbations. Ainsi, nous considérons que la déformation totale ($\boldsymbol{\varepsilon}$) s'exprime comme étant la somme des déformations élastiques ($\boldsymbol{\varepsilon}_e$), plastiques ($\boldsymbol{\varepsilon}_p$) et thermiques ($\boldsymbol{\varepsilon}_T$).

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_e + \boldsymbol{\varepsilon}_p + \boldsymbol{\varepsilon}_T \quad (2.3)$$

Depradeux [23] considèrent que les propriétés mécaniques de l'alliage TA6V, alliage utilisé pour notre étude, sont constantes à partir de 600°C contre 800°C pour Megahed *et al.* [54]. Ils émettent alors l'hypothèse que le comportement mécanique du matériau est non linéaire car ses propriétés mécaniques sont dépendantes de la température. Ainsi l'équation d'équilibre à satisfaire devient :

$$\vec{\nabla} \cdot \boldsymbol{\sigma} + \vec{f}_{int} = \vec{0} \quad (2.4)$$

Avec f_{int} les forces d'inertie. De plus, les différentes déformations ont pour expressions

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_e(T) &= \frac{1 + \nu(T)}{E(T)} \boldsymbol{\sigma} - \frac{\nu(T)}{E(T)} tr(\boldsymbol{\sigma}) \\ \boldsymbol{\varepsilon}_p(T) &= g(\boldsymbol{\sigma}_Y(T)) \\ \boldsymbol{\varepsilon}_T(T) &= \boldsymbol{\alpha}(T)(\theta - \theta_0) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Avec E le module d'Young, ν le coefficient de Poisson, $g(\boldsymbol{\sigma}_Y)$ une fonction associée au comportement du matériau, $\boldsymbol{\sigma}_Y$ la limite élastique et $\boldsymbol{\alpha}$, θ et θ_0 le coefficient d'expansion thermique, la température au point étudié et la température initiale. L'ensemble de ces déformations est également pris en compte dans les travaux de Depradeux [23], Schoinochoritis *et al.* [52], Arbaoui *et al.* [55], Labudovic *et al.* [56] portant sur la FA.

2.1.4 MODELISATION DU PROBLEME THERMIQUE

Afin de modéliser le comportement thermique d'un procédé de fabrication additive, plusieurs éléments caractéristiques sont à simuler :

- La quantité d'énergie fournie à la pièce au cours du procédé,
- La répartition de la chaleur dans la pièce au cours du procédé,
- L'évacuation de la chaleur au niveau des surfaces extérieures par radiation et par convection libre ou forcée.

Dans le cas du procédé LMD-w, l'énergie du faisceau laser est absorbée à la surface de la pièce et sa chaleur est conduite au sein du matériau. La densité de puissance du faisceau laser, qui est une énergie par unité de volume, permet de fondre le métal, d'après les travaux d'Arbaoui *et al.* [55].

A. MISE EN EQUATION

Dans la littérature, les modèles numériques thermiques étudiés sont transitoires [53], [54], [56]–[62]. L'évolution des champs de températures dans la pièce est dépendante du temps. L'équation régissant la distribution spatiale de la température et de son évolution au cours du temps est exprimée par l'équation de la chaleur (2.6) exprimée par Denlinger [53].

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = -\nabla \cdot \mathbf{q}(\mathbf{r}, t) + Q(\mathbf{r}, t) \quad (2.6)$$

Avec ρ la densité du matériau, C_p la capacité spécifique de chaleur du matériau, T la température, t le temps, Q la source de chaleur employée, \mathbf{r} la position dans le repère de référence et \mathbf{q} le vecteur du flux de chaleur tel que

$$\mathbf{q} = -k\nabla T \quad (2.7)$$

Le procédé LMD-w de la fabrication additive utilise le laser comme source de chaleur [63]. La source de chaleur du procédé LMD-w est montée sur un effecteur d'un robot KUKA KR6. Cet effecteur est mobile, comme illustré sur la Figure 2.2.



Figure 2.2 Effecteur du robot avec le fil en sortie de buse

La géométrie de base en FA est le cordon, Figure 1.13. La fabrication la plus répandue est celle impliquant un déplacement rectiligne de l'outil à vitesse constante selon un axe de coordonnées cartésiennes.

Dans ses travaux de recherche, Depradeux [23] fait l'hypothèse d'un déplacement rectiligne uniforme à une vitesse V selon l'axe X . Afin d'étudier le déplacement de la source de chaleur, il met en place deux repères, comme illustré sur la Figure 2.3. Le premier est un repère dit "Lagrangien". Il est lié à la pièce ($O; X, Y, Z$) et est fixe. Le second repère est dit "Eulérien". Il est lié à la source de chaleur ($O'; x, y, z$) en mouvement.

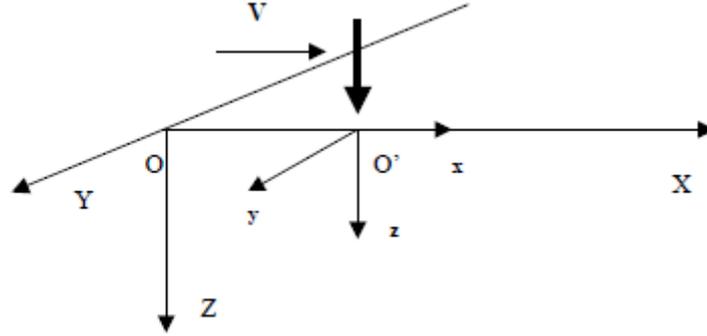


Figure 2.3 Repères pour étudier le déplacement de la source de chaleur Depradeux [23]

Si la source de chaleur se déplace à une vitesse constante v , parallèlement à l'axe X et qu'à $t=0$, elle se situe à $X=0$, alors les coordonnées d'un point local $\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix}$ suivent une relation établie par

Depradeux [23] en fonction du repère $\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}$, telle que :

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} \leftrightarrow \begin{Bmatrix} X = x + v \cdot t \\ Y = y \\ Z = z \end{Bmatrix} \quad (2.8)$$

Contrairement à Depradeux [23] ou Denlinger [53], Peyre *et al.* [58] ainsi que Magahed *et al.* [54] prennent en compte dans leur expression de l'équation de la chaleur, les propriétés thermiques non-linéaires de l'alliage de titane *TA6V*. De ce fait, l'équation de la chaleur fait intervenir les propriétés thermiques non-linéaires du matériau telle que dans les équations (2.9) et (2.10).

$$\rho(T)C_p^{éq}(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (k(T)\vec{\nabla}T) \quad (2.9)$$

$$C_p^{éq}(T) = C_p(T) + L_m D_m(T) \quad (2.10)$$

Tout comme Arbaoui *et al.* [55], Peyre *et al.* [58] considèrent que la capacité thermique spécifique du matériau est thermo dépendante. Cependant cette valeur est aussi dépendante de l'état physique du métal. Lorsqu'il entre en fusion, le métal devient solide et cette grandeur thermique ne s'exprime plus de la même manière. Dans leurs travaux, Trushnikov *et al.* [62] expriment la modification de la capacité thermique spécifique (2.11) et la fraction de masse liquide (2.12).

$$c_p^* = c_p + H_L \frac{df_L(T)}{T} \quad (2.11)$$

$$f_L(T) = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} \quad (2.12)$$

L'ensemble des équations (2.6) à (2.12) permettent de modéliser l'aspect thermique du procédé de fabrication additive. L'équation (2.9) exprime l'équation de la chaleur en fonction de propriétés thermiques du matériau. Quant à l'équation (2.12) elle permet de faire subir un changement d'état à notre matériau, lorsqu'il passe de l'état solide à l'état liquide par fusion. Les propriétés du matériau sont donc dépendantes de la température, mais également de l'état physique dans lequel il se trouve (solide ou liquide).

B. MODELISATION DE LA SOURCE DE CHALEUR

L'apport de chaleur est généré par la source de chaleur. Dans notre cas, il s'agit d'un laser. Selon l'étude de Depradeux [23], dans le cas du « soudage » laser, l'énergie pénètre en profondeur dans la pièce durant sa fabrication. Deux modèles sont majoritairement employés dans la littérature pour modéliser cette source de chaleur.

- La distribution gaussienne, ou
- Le double ellipsoïde de Goldak.

La distribution gaussienne permet de modéliser une source de chaleur surfacique ou volumique tandis que le double ellipsoïde de Goldak, qui est un dérivé de la distribution gaussienne, est une source de chaleur purement volumique.

(a). LA DISTRIBUTION GAUSSIENNE DE LA CHALEUR

La distribution gaussienne surfacique est fortement plébiscitée dans la littérature [56], [58]–[60], [64]–[69]. Le faisceau laser est modélisé comme étant un flux de chaleur mobile s'appliquant sur une surface. Il prend la forme d'une distribution gaussienne d'énergie, comme illustrée sur la Figure 2.4. La Gaussienne peut être à répartition infinie ou à répartition finie sur disque de rayon r [23].

Sur la Figure 2.4, en jaune est représenté la projection de la source de chaleur (source de chaleur à répartition finie de rayon r), en noire la courbe de la gaussienne (source de chaleur à répartition infinie) et en rouge le cordon en cours de fabrication.

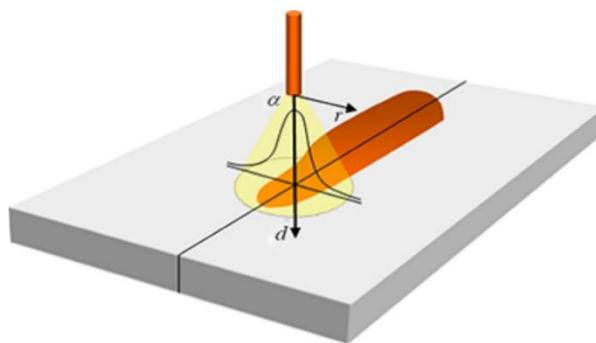


Figure 2.4 Représentation de la distribution gaussienne de la source de chaleur laser, Depradeux [23]

Arbaoui *et al.* [55] précisent que l'intensité du laser décroît lorsque la distance buse/pièce augmente (Figure 2.5).

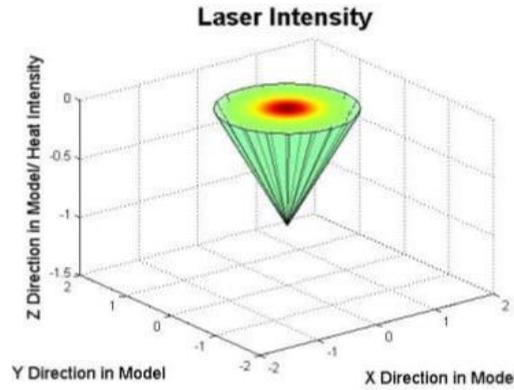


Figure 2.5 Intensité du laser en fonction de la hauteur selon l'axe z (distance buse/pièce)

L'intensité du laser, par la distribution gaussienne, s'exprime selon la relation (2.13) comme étant,

$$\begin{cases} I(x, y, z) = \frac{2P_0(x^2 + y^2)}{\pi r^2(z)} \exp\left(-2 \frac{x^2 + y^2}{r^2(z)}\right) \\ r^2(z) = r_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} ; z_R = \frac{\pi r_0^2}{l} \end{cases} \quad (2.13)$$

Avec I l'intensité du laser, P_0 la puissance du laser, r le rayon du cercle en fonction de z , x et y les coordonnées du point entre le centre du cercle et le rayon R .

De plus, dans leurs travaux sur la modélisation numérique du prototypage rapide par laser par dépôt de fil de fusion Arbaoui *et al.* [55] considèrent que l'énergie du laser ne pénètre pas de façon significative dans le fil métallique. De ce fait, ils négligent le coefficient d'absorption. Ils considèrent alors que le laser n'interagit qu'avec la cible métallique de surface. La cible étant la zone de contact entre le spot laser et le substrat. Or dans le modèle de Bromson exprimé par Debroy *et al.* en 1995 [70], l'absorptivité du laser par la matière est prise en compte. Cette absorptivité lie la résistivité à la longueur d'onde du laser, et est exprimée par la relation (2.14). Cette absorptivité du laser doit être prise en compte car seulement un pourcentage, α_{abs} , de puissance fournie est absorbé par le matériau.

$$\begin{cases} Q_{laser} = \alpha_{abs}(T)I(x, y) \\ \alpha_{abs}(T) = 0.365 \sqrt{\frac{r(T)}{l}} - 0.0667 \frac{r(T)}{l} + 0.006 \left(\frac{r(T)}{l}\right)^{\frac{3}{2}} \end{cases} \quad (2.14)$$

Une autre approche propose de modéliser la source de chaleur comme un double ellipsoïde dit de Goldak.

(b). LA DOUBLE ELLIPSOÏDE DE GOLDAK

Le double ellipsoïde de Goldak [71] permet de prendre en compte la taille et la forme de la source de chaleur, et de modéliser la pénétration de la chaleur dans le substrat.

Cette modélisation est adaptée lorsqu'on souhaite prendre en compte les effets du bain de fusion. Elle permet également de prendre en compte la dissymétrie de la source de chaleur lors de son déplacement. Cette source de chaleur défini par Goldak *et al.* [71], permet de surmonter la différence de rapidité entre le gradient de température et la source de chaleur.

Deux sources ellipsoïdales sont combinées. La moitié avant de la source est le quadrant d'une source ellipsoïdale, représenté par a_r , et la moitié arrière est le quadrant d'une autre ellipsoïde, représenté par a_f (Figure 2.6). La distribution de la densité de puissance le long de l'axe x est illustrée à la Figure 2.6. Dans ce modèle, les fractions f_f et f_r de la chaleur déposée dans les quadrants avant et arrière sont nécessaires, de telle sorte que $f_f + f_r = 2$. La Figure 2.6 représente le double ellipsoïde de Goldak.

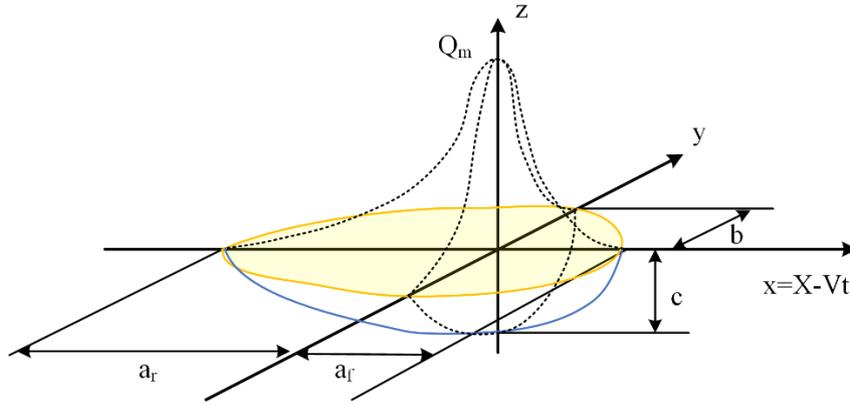


Figure 2.6 Représentation schématique du double ellipsoïde de Goldak *et al.* [71]

Ainsi la distribution de la densité de puissance dans le quadrant avant s'exprime par l'équation (2.15) et celle du quadrant arrière par l'équation (2.16).

$$Q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \exp\left(\frac{-3(z + v(\tau - t))^2}{c^2}\right) \quad (2.15)$$

$$Q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2}\right) \exp\left(\frac{-3y^2}{b^2}\right) \exp\left(\frac{-3(z + v(\tau - t))^2}{c^2}\right) \quad (2.16)$$

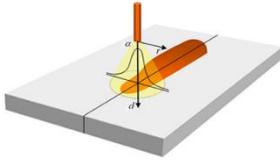
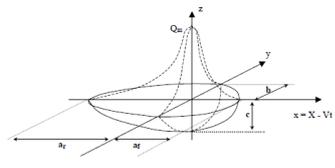
Les paramètres a , b et c du quadrant avant et du quadrant arrière peuvent avoir des valeurs différentes compte tenu que les quadrants sont indépendants. Néanmoins, une phase de calibration est nécessaire pour déterminer les valeurs des paramètres a , b et c ainsi que le rendement de la source de chaleur.

Denlinger [53] généralise l'équation de la double ellipsoïde de Goldak par la relation (2.17), avec P la puissance du laser, η le rendement du laser, f le quadrant (avant ou arrière), v la vitesse de déplacement de la source de chaleur, x , y et z les coordonnées du point d'application de la source de chaleur.

$$Q = \frac{6\sqrt{3}P\eta f}{abc\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2} + \frac{-3y^2}{b^2} + \frac{3(z + v.t)^2}{c^2}\right) \quad (2.17)$$

Le Tableau 2.2 regroupe les informations des deux sources de chaleurs employées pour modéliser le laser en fabrication additive. Dans ce tableau on y retrouve également les avantages et les inconvénients des modélisations associées.

Tableau 2.2 Résumé des deux sources de chaleurs avec leurs avantages et inconvénients

	Distribution Gaussienne	Double ellipsoïde de Goldak
Modélisation	Surfacique	Volumique
Représentation schématique		
Equation de la distribution énergétique	$Q_{laser} = \alpha(T)I(x, y)$	$Q = \frac{6\sqrt{3}P\eta f}{abc\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3x^2}{a^2} + \frac{-3y^2}{b^2} + \frac{3(z + v \cdot t)^2}{c^2}\right)$
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> – permet de simuler l'apport d'énergie dans la zone de contact entre la matière et le laser sur le substrat 	<ul style="list-style-type: none"> – permet de prendre en compte la dissymétrie de la source de chaleur lors de son déplacement – permet de prendre de compte la pénétration de l'énergie dans la matière
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> – pas de prise en compte de la pénétration de la source de chaleur dans le bain de fusion. – pas de prise en compte de la dissymétrie de la source de chaleur lorsque la source se déplace 	<ul style="list-style-type: none"> – calibration expérimentale nécessaire pour déterminer les paramètres a, b et c – calibration expérimentale pour déterminer f_r et f_f
Bilan	Modèle « simplifié » et rapide à mettre en place	Modèle « complet » mais difficile à mettre en place car il nécessite une phase de calibration expérimentale

Dans la sous-section suivante, nous définissons le modèle retenu pour modéliser la source de chaleur du procédé LMD-w.

C. BILAN DES MODELES DE LA SOURCE DE CHALEUR

Comme vu précédemment, il existe deux types de modélisations pour la source de chaleur laser : une modélisation surfacique ou une modélisation volumique. La principale différence repose sur le fait que les modélisations de sources volumiques (gaussienne volumique ou double ellipsoïde de Goldak) prennent en compte la géométrie du bain de fusion dans les calculs. En effet, la matière reçoit pendant un temps bref (entre la milliseconde et la seconde), une quantité d'énergie suffisante pour faire fondre le matériau. Ainsi, on obtient des températures de 1650°C-1700°C sur un volume proche du cm³. Les gradients de températures sont alors importants entraînant des contraintes au sein de la matière. La prise en compte du bain de fusion permet dans un certain sens de modéliser plus « fidèlement » la réalité du phénomène que les modélisations de sources surfaciques.

Bien qu'elles soient plus fidèles, les sources volumiques sont plus complexes à modéliser. Sharma et ses collègues proposent une méthodologie pour calibrer la source de chaleur [72]. Leur étude permet de définir les paramètres de la source de chaleur de la double ellipsoïde de Goldak pour « Twin Wire Welding ». Pour ce faire, il est d'usage de recourir à l'utilisation de capteurs de température et de caméra thermique. Dans notre cas, un des problèmes du titane est sa forte émissivité. La caméra thermique doit donc elle aussi être calibrée et choisie en conséquence. Ce type de caméra, adaptée, est relativement onéreux. De plus, la forte montée en température sur un faible volume et presque instantanée mettent à mal l'efficacité des thermocouples. Le profil de température peut ne pas être complet. Encore une fois, même si certains papiers proposent une paramétrie pour les sources volumiques, les données des résultats sont difficilement réutilisables car ces paramètres sont propres à la source de chaleur utilisée et à son montage sur le robot.

Les modèles surfaciques et volumiques, évoqués précédemment, ne prennent pas en compte l'interaction entre le laser et le fil, pour un dépôt coaxial au laser, avant que le fil entre en contact avec le substrat. C'est pourquoi, nous proposons d'intégrer cette interaction dans notre modèle. Lors de cette interaction, le fil monte en température, nous appellerons cette étape : la préchauffe du fil. Cette étape est illustrée par la Figure 2.7. Au moment (1), le fil de TA6V de diamètre 1.2 mm sort de la buse à une vitesse initiale de WFS (m/min) avec une température initiale de 25°C . Au moment (2), à un instant t après la sortie de buse, la surface extérieure du fil entre en contact avec le laser dont les faisceaux ont un angle d'incidence de α_{laser} ($^{\circ}$). La puissance du laser est P (W). Enfin en (3), le fil chauffe jusqu'à atteindre le substrat à une température préchauffée notée T_{fil} ($^{\circ}\text{C}$).

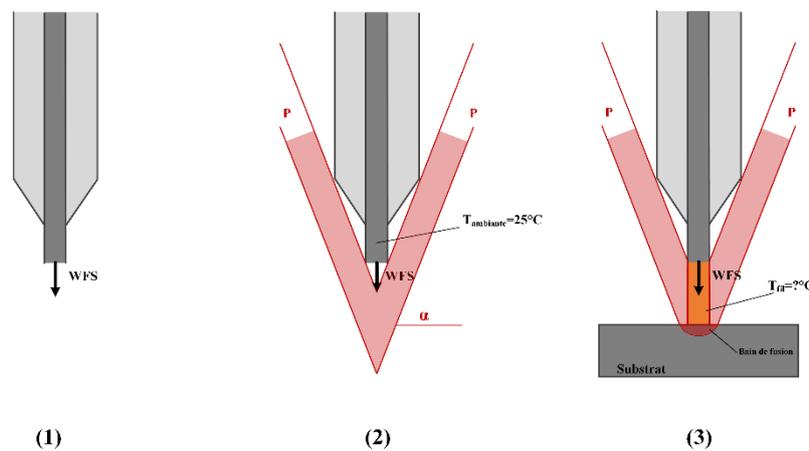


Figure 2.7 Avance du fil jusqu'à son interaction avec le laser

De plus, lors du dépôt de matière par le procédé LMD-w, la tâche du laser n'est pas totalement appliquée à la surface du substrat. En effet, comme illustrée sur la Figure 1.13, le fil est déposé devant la matière déjà présente sur le substrat. De ce fait le laser peut être divisé et modélisé en deux parties : une partie, représentée par une demi-couronne, est appliquée à la surface du cordon déposé (à droite sur la figure) et une autre demi-couronne est appliquée à la surface du substrat (à gauche sur la figure).

2.1.5 MODELISATION DU DEPOT DE MATIERE

La modélisation du dépôt de matière avec l'activation des éléments pour la méthode des éléments finis peut s'effectuer selon deux méthodes selon Denlinger [53]:

- la méthode des éléments discrets,
- la méthode hybride des éléments discrets.

Ces deux méthodes reposent sur le même principe, la différence se fait au niveau de la gestion du nombre d'éléments à activer :

- la « méthode des éléments discrets ». Cette méthode inclut tous les éléments finis du maillage dans l'analyse et ce depuis le début. Les propriétés thermiques et mécaniques assignées aux éléments ont des valeurs très petites permettant de négliger ces éléments lors des calculs s'ils ne sont pas « actifs ». Un élément est actif lorsqu'il est pris en compte dans le calcul au pas de temps donné.
- la « méthode hybride des éléments discrets ». Cette méthode n'inclut que les éléments actifs dans le calcul ou lorsque qu'ils sont réactivés par le passage de la source de chaleur.

Nie *et al.* [66] expliquent ce principe dans leur étude expérimentale et leur modélisation du dépôt d'acier H13 par fusion laser comme suit et est illustré sur la Figure 2.8. Trois types d'éléments sont présents :

- les éléments déposés (gris),
- les éléments activés pour simuler la dépose de matière (rouge),
- les éléments désactivés car pas encore déposés (transparent).

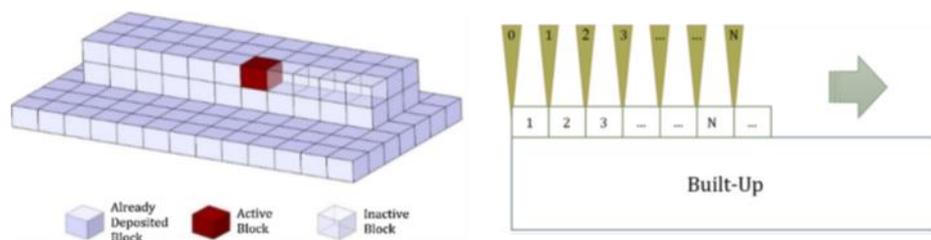


Figure 2.8 Méthode des éléments discrets et application de la source de chaleur pas à pas

Les éléments désactivés existent d'un point de vue géométrique. Leur module d'Young est multiplié par un coefficient très petit (10^{-5} par exemple). Il permet de les considérer comme non déposés. Les éléments sont activés au moment où le pas de temps simule le passage de la source de chaleur.

Au début de la simulation, la source de chaleur est éteinte. Seuls les éléments du substrat sont actifs. Le substrat est le support métallique sur lequel la pièce est fabriquée. Il est constitué du même métal que la pièce.

Au temps 1, l'élément 1 est ajouté physiquement et activé numériquement, puis le laser est activé et va de la position 0 à la position 1 à la vitesse TS , sur la Figure 2.8 à gauche.

Au temps 2, l'élément 2 est ajouté physiquement et activé numériquement donc les éléments 1 et 2 sont actifs ; puis le laser passe de la position 1 à la position 2, sur la Figure 2.8 à gauche.

Ainsi de suite jusqu'au temps N de la première couche (les éléments 1 à N sont actifs. Les éléments $N+1$ sont inactifs).

Au changement de couche, les deux méthodes divergent :

- soit cette démarche est répétée jusqu’à la fin de la fabrication de la pièce. Les éléments déposés de la première couche sont actifs (méthode des éléments discrets),
- soit les éléments déposés de la première couche redeviennent inactifs puis réactivés lorsque la source de chaleur passe pour fabriquer la deuxième couche (méthode hybride).

Nie *et al.* [66] a employé la méthode des éléments discrets, tandis que Denlinger [53] a utilisé la méthode hybride. Aucune méthode ne semble être plus avantageuse que l’autre en termes de performances.

Les modèles numériques employés pour la simulation des procédés de fabrication additive peuvent être complétés par des modèles de prédictions. Ces modèles permettent de prédire des variables de sorties en fonction de paramètres d’entrées tels que les paramètres machines, P , WFS et TS .

2.1.6 SYNTHÈSE

Dans cette première section, nous avons présenté les modèles numériques permettant de simuler les procédés de fabrication additive. Dans notre cas, nous nous sommes intéressés aux modèles thermiques et mécaniques couplés ou non. L’objectif de ces modèles est de comprendre les physiques mises en jeu lors des procédés afin qu’elles approximent le plus fidèlement possible la réalité de fabrication. Nous avons choisi de ne pas prendre en compte les problèmes métallurgiques car les phénomènes métallurgiques ont lieu au niveau du bain de fusion. Bien que cette microstructure ait un impact direct sur la caractérisation mécanique du matériau, elle est en dehors de notre champ d’investigation.

Il en émerge des relations entre les paramètres machine (puissance laser, voltage, débit de matière, vitesse de déplacement de l’outil, etc.) et les sorties observées (déplacement de la pièce finale, champ de température au cours de la fabrication, etc.). Ces modèles permettent d’estimer la géométrie d’un bain de fusion, le champ de température au sein de la pièce au cours du procédé, le déplacement de la pièce, la composition en phase (alpha et bêta) de la pièce, etc.

Dans la littérature, peu de papiers adressent le procédé fabrication additive : LMD-w. De plus, les résultats présentés sont difficilement répliquables d’un procédé à une autre. En effet, la FA est un moyen de production encore jeune et il existe autant de montages machine qu’il existe de composants (robot, contrôleur, laser, matériau, dimensions de la cuve, gaz d’inertage, ordinateur de commande et autres). Il s’agit ici des principales difficultés quant à la compréhension de la fabrication additive. Dans notre revue de la littérature, neuf publications ont été trouvées étudiant les procédé fil métallique/laser. Parmi ces publications cinq étudient le procédé avec l’arrivée du fil non coaxiale à la source de chaleur [34], [73]–[76] et quatre avec l’arrivée du fil coaxiale à la source de chaleur [30], [55], [77], [78], comme notre procédé LMD-w. Une arrivée est dite coaxiale si le fil et le laser sont concentriques donc la modélisation devra prendre en compte l’interaction entre eux.

Nos travaux ont pour objectif de simuler le procédé LMD-w de façon macroscopique, pour prédire le déplacement du substrat en fonction du jeu de paramètres d’entrée du procédé. Par la suite, nous proposons d’étudier l’influence des paramètres d’entrée machine, puissance du laser P , vitesse d’avance de fil WFS et vitesse de déplacement de l’outil TS , sur la géométrie d’un cordon et sur le déplacement du substrat généré.

Ce constat nous amène à nous poser la première question de recherche à savoir « Quels sont les liens et les impacts entre les paramètres d'entrée du procédé LMD-w et les sorties géométriques ? » (Q1)

2.2 MODELES DE PREDICTION DE SORTIES GEOMETRIQUES EN FONCTION DE PARAMETRES D'ENTREE DITS « DIRECTS »

Les modèles de prédiction en fabrication additive sont généralement employés afin de prédire la valeur d'une sortie en fonction des valeurs d'une ou plusieurs entrées. Il existe plusieurs catégories de sorties : géométriques comme la hauteur de cordon ou la prédiction d'un défaut comme le pourcentage de porosité. Les paramètres d'entrées que nous utilisons sont les paramètres machine. Dans la littérature, deux méthodes de prédiction sont plébiscitées : les réseaux de neurones ou les régressions.

2.2.1 LES RESEAUX DE NEURONES ET LA FABRICATION ADDITIVE

A. GENERALITES SUR LES RESEAUX DE NEURONES

Un réseau de neurones artificiels est un modèle numérique dont la structure s'apparente au fonctionnement du cerveau humain, d'après Adnan *et al.* [79].

Le neurone dit « formel » possède une structure identique à celle provenant du cerveau humain (Figure 2.9). Il possède un noyau, des connexions entrantes et une connexion sortante. Il est représenté par une fonction linéaire ou non linéaire biaisée et pondérée [80].

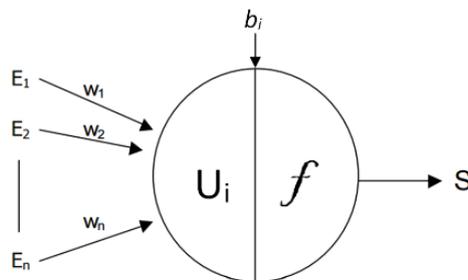


Figure 2.9 Représentation schématique de la structure d'un neurone formel, Cagin [80]

Le neurone « formel » relie le vecteur des entrées à des sorties intermédiaires. Dans notre cas, les entrées, E_i , peuvent être les paramètres machine, pondérés par un poids w_i . La sortie, S , peut-être une variable géométrique, un pourcentage de porosité, etc. Ces grandeurs sont exprimées dans la formule (2.18), avec f une fonction d'activation et b_i le biais, qui permet de décaler la fonction d'activation.

$$S = f\left(\sum_i w_i E_i\right) + b_i = f(U_i) + b_i \quad (2.18)$$

Un réseau de neurones est une composition de plusieurs couches, au minimum 2, portant des neurones formels connectés entre eux. La Figure 2.10 est une représentation schématique d'un

réseau de neurones à 3 couches. La couche intermédiaire est également appelée couche cachée. Il est important d'avoir une architecture en adéquation avec le problème à traiter. Dans les travaux de Peng *et al.*[81], il a été montré que trop de neurones sur la couche cachée augmente le risque de sur-écriture et une non-convergence du réseau.

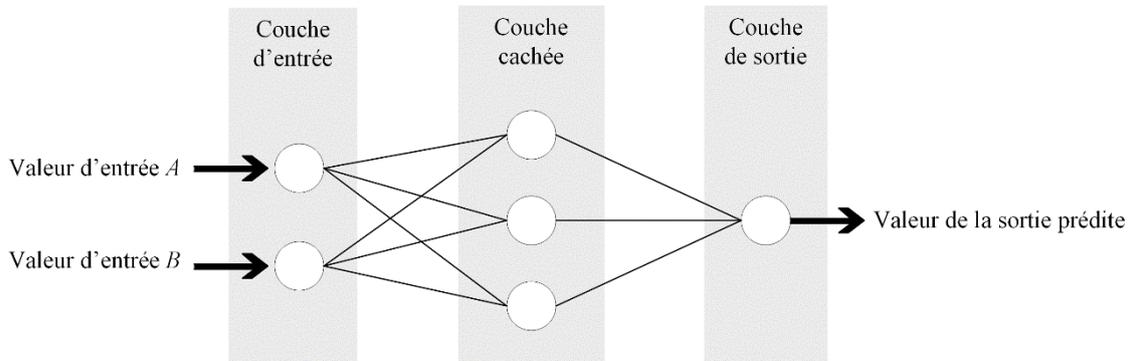


Figure 2.10 Exemple d'un réseau de neurones à 3 couches

Il existe plusieurs types de fonction neuronale ou fonction de transfert. Une fonction de transfert calcule la sortie d'une couche à partir de son entrée. La Figure 2.11, issue des travaux de Cagin [80], présente les différentes fonctions de transfert.

Fonction Heaviside	$y(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	
Fonction Signe	$y(x) = \begin{cases} -1 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	
Fonction Linéaire	$y(x) = x$	
Fonction Linéaire à seuil	$y(x) = \begin{cases} -1 & \text{si } x < -a \\ \frac{1}{a}x & \text{si } x \in [-a; a] \\ 0 & \text{si } x > a \end{cases}$	
Fonction Tangente Sigmoidale	$y(x) = \frac{e^{kx} - 1}{e^{kx} + 1}$	
Fonction Logarithme Sigmoidale	$y(x) = \frac{1}{1 + e^{-kx}}$	

Figure 2.11 Représentation des différentes fonctions de transferts, Cagin [80]

En fabrication additive, les réseaux de neurones sont utilisés pour prédire des valeurs de sorties du procédé en fonction de paramètres machine tels que la puissance du laser, la vitesse de déplacement de l'outil. Il s'agit d'une modélisation *a posteriori* car un réseau de

neurone doit apprendre. L'apprentissage ne peut avoir lieu qu'à partir de données recueillies réelles. Ces données sont généralement issues des expériences réalisées en amont [81]–[83]. La force des réseaux de neurones est de pouvoir représenter des relations complexes et non linéaires extraites d'observations et d'analyses.

B. LES RESEAUX DE NEURONES POUR LA FABRICATION ADDITIVE

En fabrication additive, les réseaux de neurones ont déjà été utilisés pour déterminer une distance optimale entre deux cordons afin d'obtenir un état de surface homogène [82]. Les modèles neuronaux assurent de limiter les erreurs de géométries, les déplacements du substrat et le temps de fabrication. Ils aident à définir les paramètres machine [81] et explicitent la nature du cordon vis-à-vis des paramètres d'entrée [83].

Les données d'entrées utilisées par Li *et al.* [82], Peng *et al.* [81] ou Xiong *et al.* [83] sont regroupées dans des bases de données. Ces bases de données contiennent les valeurs expérimentales des paramètres machines pour chaque cordon fabriqué ainsi que les valeurs des sorties étudiés. Dans leurs travaux respectifs les auteurs ont étudié l'aspect géométrique du cordon en relevant la hauteur et la largeur d'un cordon. Ces bases de données contiennent entre 17 valeurs pour Li *et al.* [82] et 35 valeurs d'expériences pour Peng *et al.* [81].

Peng *et al.* [81] utilisent le théorème de Kolmogorov pour décider de l'architecture, c'est-à-dire le nombre de neurones sur la couche cachée de leur réseau.

$$A = 2B + 1 \quad (2.19)$$

Avec A est le nombre de neurones sur la couche cachée et B le nombre de neurones sur la couche d'entrée. Ce théorème leur permet d'obtenir l'architecture de leur réseau de neurones : une architecture 4-9-1 (4 neurones sur la couche d'entrée, 9 neurones sur la couche cachée et 1 neurone sur la couche de sortie).

Généralement, dans la littérature, la fonction de performance choisie est celle de la minimisation de l'erreur quadratique moyenne (MSE) en mettant à jour les poids à travers la descente de gradient approché. Ainsi en comparant les performances de chaque réseau, sachant que le meilleur réseau est celui pour lequel l'erreur quadratique moyenne est la plus basse, l'architecture optimale est définie. Pour Li *et al.* [82], l'architecture avec la meilleure performance est 3-12-1 et pour Xiong *et al.* [83] la meilleure performance 4-12-2. Les différentes architectures sont représentées dans la Figure 2.12. Les architectures des réseaux présentés diffèrent par leur nombre d'entrée et leur nombre de sortie prédite. Il n'existe pas une architecture unique pour résoudre un problème de prédiction. Il faut déterminer en fonction du problème l'architecture adaptée à sa résolution.

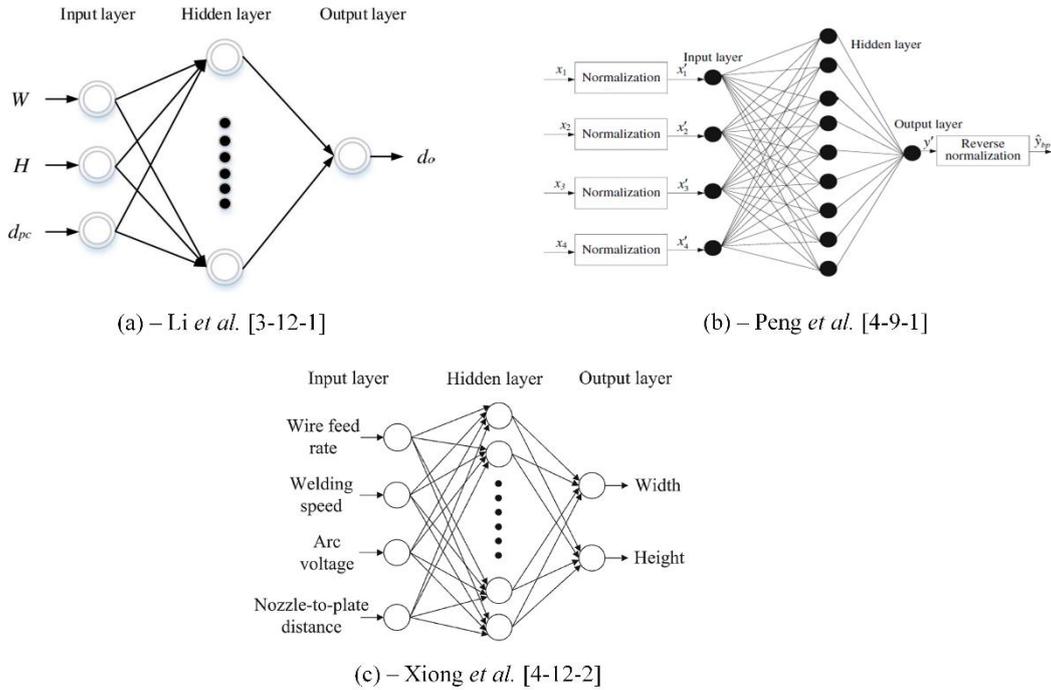


Figure 2.12 Représentation des architectures de (a) Li *et al.* [82], (b) Peng *et al.* [81] et (c) Xiong *et al.* [83]

Le taux d'apprentissage d'un réseau de neurones indique la vitesse à laquelle les poids (w) et les biais (b) évoluent. L'architecture et l'apprentissage du RN a une influence sur sa performance. Ainsi, le réseau de neurone de Peng *et al.* [81] permet d'obtenir un r^2 de 0,97. Le r^2 représente le coefficient de corrélation, le nuage de points (base de cas) et la fonction de prédiction. Plus le r^2 est proche de 1, plus la fonction passe par les points expérimentaux de la base de cas.

De plus sur la Figure 2.12, nous remarquons que Peng *et al.* [81] ont normalisé leurs données. La normalisation des données issues de l'expérimental permet d'alléger la mémoire de l'ordinateur et d'accélérer le temps de calcul. Pour normaliser les valeurs d'entrées l'équation (2.20) est utilisée avec x_i la valeur d'entrée du RN.

$$x'_i = \frac{0.8(x_{i \max} - x_i)}{x_{i \max} - x_i} + 0.1, (i = 1,2,3,4) \quad (2.20)$$

En sortie les valeurs, \hat{y} , sont ensuite dénormalisées selon l'équation (2.21).

$$\hat{y} = y_{\max} - \frac{(y' - 0.1)(y_{\max} - y_{\min})}{0.8} \quad (2.21)$$

Tout en se basant sur des données issues de l'expérience, une autre forme de prédiction est utilisée dans la littérature : les régressions. A la différence des réseaux de neurones, les régressions permettent d'exprimer sous forme d'équations les sorties en fonction des paramètres d'entrée étudiés.

A. LES REGRESSIONS LINEAIRES OU MULTIPLES

Les modèles de régression sont utilisés pour calculer une relation mathématique entre une réponse observée et un ou plusieurs facteurs de contrôles (=paramètres machine). L'objectif est de déterminer les coefficients (β_i) des paramètres d'entrée (X_i), dans la relation (2.22).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (2.22)$$

Avec Y la réponse observée, X_i les paramètres d'entrée ($i = 1, 2, \dots, k$), β_i les coefficients de la régression et ε l'erreur.

D'une manière générale, s'il existe plusieurs facteurs indépendants (comme la puissance du laser, la vitesse de déplacement de la source de chaleur ou encore la vitesse d'avance de fil), on cherche à déterminer l'ensemble des coefficients de la régression linéaire multiple pour exprimer les coefficients de la fonction liant la sortie aux facteurs [50], [84].

D'après Wolberg [84], la méthode des moindres carrés est employée pour la majorité des problèmes demandant la détermination des coefficients tels qu'exprimés dans l'équation (2.22). Cette méthode permet de déterminer les coefficients de la régression en minimisant le carré des erreurs [50], [84] comme exprimée dans la relation (2.23).

$$S = \sum_{i=1}^{i=n} w_i R_i^2 = \sum_{i=1}^{i=n} w_i (Y_i - y_i)^2 = \sum_{i=1}^{i=n} w_i (Y_i - f(X_i))^2 \quad (2.23)$$

Avec n le nombre de points observés, Y_i la valeur expérimentale de la $i^{\text{ème}}$ donnée, y_i la valeur calculée numériquement pour la $i^{\text{ème}}$ donnée, R_i le résidu de la $i^{\text{ème}}$ donnée, différence entre la valeur expérimentale et la valeur calculée, X_i la variable indépendante (=facteur) scalaire si un seul facteur sinon vecteur et W_i le « poids » associé la $i^{\text{ème}}$ donnée.

Cette méthode est également employée pour de la prédiction. A savoir qu'une fois l'équation de la régression linéaire multiple (pour rester dans le cas général) déterminée, il est possible de lancer les calculs numériques pour prédire les valeurs de la réponse en fonction des variables indépendantes.

Dans l'équation (2.23), les variables sont pondérées par un poids w . Cette pondération dépend de la précision et de la certitude de la mesure. Si l'ensemble des points a été mesuré suivant un protocole identique (outil, opérateur, méthode), alors l'incertitude et les erreurs de mesures ont été répétés pour tous les points. C'est pourquoi, il est possible d'attribuer un poids identique à chaque point tel que $w_i=1$.

B. REGRESSION POUR LA FABRICATION ADDITIVE

Tellez *et al.* [50] ont étudié l'influence des paramètres d'entrée sur la géométrie d'un cordon (hauteur et largeur) en utilisant la méthode des moindres carrés. Ils ont défini les modèles de la hauteur et de la largeur du cordon en fonction des paramètres d'entrée, comme étant de la forme :

$$Y = a + b \times WFS + c \times P + d \times TS \quad (2.24)$$

Le coefficient de corrélation, r^2 , du modèle pour la largeur du cordon est de 0,748 contre 0,9640 pour la hauteur. Cela signifie que la régression linéaire est plus adaptée pour décrire la relation entre la hauteur et les paramètres d'entrée qu'entre la largeur et ces mêmes paramètres. Dans ses modèles Tellez n'a pas pris en compte la possible interaction entre les paramètres d'entrée, c'est-à-dire le produit de deux ou plusieurs facteurs d'entrée. Dans leurs travaux respectifs Xiong *et al.* [83], Urbanic *et al.* [85] ainsi que Onwubolu *et al.* [86] ont cherché à déterminer la relation liant la sortie aux paramètres d'entrées tout en prenant ces interactions en considération. Ainsi, leurs modèles ont permis d'obtenir une régression du second ordre exprimée sous la forme de l'équation (2.25).

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^4 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i < j}}^4 \beta_{ij} X_i X_j \quad (2.25)$$

Si on pose que X_1 est la vitesse d'avance de fil notée F , X_2 la vitesse d'avance de l'outil notée S , X_3 le voltage de l'arc électrique noté V et X_4 la distance buse/pièce noté N . Il est alors possible de développer l'expression (2.25), laissant apparaître les interactions entre les paramètres (produit de deux facteurs ou plus) tel que :

$$\begin{aligned} Y = & \beta_0 + \beta_1 F + \beta_2 S + \beta_3 V + \beta_4 D \\ & + \beta_{11} F^2 + \beta_{22} S^2 + \beta_{33} V^2 + \beta_{44} D^2 + \beta_{12} FS + \beta_{13} FV \\ & + \beta_{14} FD + \beta_{23} SV + \beta_{24} SD + \beta_{34} VD \end{aligned} \quad (2.26)$$

Parfois les modèles linéaires ne sont pas adaptés aux données expérimentales. C'est pourquoi, un autre type de modèle peut être utilisé : la régression exponentielle.

C. LES MODELES EXPONENTIELS

Onwubolu *et al.* [86] ont développé dans leurs travaux de recherche en fabrication additive un modèle exponentiel pour la prédiction de l'angle de contact s'exprimant selon la relation (2.27).

$$y = KP^k V^l C^m \varepsilon \quad (2.27)$$

Avec y la réponse observée (mesurée), K , k , l et m les paramètres du modèle à déterminer, P la puissance du laser, V la vitesse de déplacement de l'outil, C la vitesse d'entrée de la poudre et ε l'erreur résiduelle des mesures.

Pour déterminer la valeur des puissances, Onwubolu *et al.* [86] utilisent la fonction logarithmique.

$$\ln(y) = \ln(K) + k \ln(P) + l \ln(V) + m \ln(C) + \ln(\varepsilon) \quad (2.28)$$

El Cheikh *et al.* [87] posent également l'hypothèse que les paramètres s'expriment comme étant de la forme exponentielle lors de la prédiction de la géométrie de leur cordon, avec l'équation :

$$y = \alpha \left(P^\alpha Q_m^\beta V^\gamma \right) + b \quad (2.29)$$

Avec P la puissance du laser, Q_m la vitesse d'avance de fil, V la vitesse de déplacement de l'outil et α , β , γ des nombres entiers ou relatifs. Ainsi en passant par la fonction logarithmique, El Cheick *et al.* [87] obtiennent une équation reliant la réponse mesurée y aux paramètres d'entrée du procédé de fabrication additive.

Cette méthode permet d'obtenir des coefficients de corrélation, r^2 , de 0,96 pour El Cheikh *et al.* [87] et de 0,9994 pour Onwubalo *et al.* [86]. Les coefficients de corrélation des modèles sont très proches de 1. Cela signifie qu'ils approchent de façon quasi exacte la courbe décrite par les nuages de points expérimentaux respectifs. Ces modèles théoriques décrivent donc fidèlement la réalité expérimentale.

Cependant cette méthode ne permet de lier qu'une seule réponse aux paramètres d'entrée du procédé. Elle doit donc être faite autant de fois qu'il y a de sortie à étudier. Dans notre cas d'étude, nous souhaitons pouvoir prédire six sorties géométriques (hauteur de cordon, largeur de cordon, hauteur de dilution, largeur de dilution, déplacement du substrat et angle de contact) en fonction de trois paramètres machines (puissance du laser, vitesse d'avance de fil et vitesse de déplacement de l'outil). Ainsi, nous nous retrouverions à devoir déterminer six équations.

2.2.3 DONNEES EN ENTREE DES MODELES DE PREDICTION

Le développement des modèles de prédiction repose sur les observations expérimentales faites du procédé de fabrication additive durant sa fabrication. Ces observations sont généralement faites à l'aide d'instrument de mesures tels que des thermocouples, caméras thermiques ou microscope. Leur utilisation conduit à générer des approximations dans le relevé des mesures thermiques ou géométriques. De ce fait, l'analyse de ces données expérimentales permet à l'utilisateur d'émettre des hypothèses quant aux phénomènes mis en jeu durant la fabrication.

Dans la littérature, les sorties géométriques peuvent être observées et analysées grâce à différents outils, en fonction du matériel à disposition. Pour cela, les pièces fabriquées sont coupées en échantillons. Ces échantillons sont analysés avec un microscope, le LEICA DM1750M, appareil de mesures à disposition au sein de la plateforme d'Addimadour. Cet outil de mesure permet d'étudier les aspects géométriques, la microstructure ainsi que les porosités dans l'échantillon. Sur dix publications qui étudient les relations entre les paramètres d'entrée et les sorties de type géométriques [42], [53], [74], [77], [88] - [89], nous notons que :

- 7 utilisent un microscope,
- 1 utilise un laser vision sensor,
- 1 utilise un relevé manuel, et
- 1 utilise le couplage microscope et scanner laser 3D.

Le Tableau 2.3 détaille les données étudiées dans les dix publications susmentionnées. Nous retrouvons notamment les sorties géométriques étudiées, l'outil utilisé ainsi que la publication correspondante.

Tableau 2.3 Utilisation de l'outil en fonction des sorties observées

Sorties géométriques étudiées	Outil d'analyse utilisé	Référence
Hauteur de cordon Largeur de cordon Hauteur de dilution Largeur de dilution Angle de contact	SEB micrograph	Abioye <i>et al.</i> [74]
Effet Keyhole	Microscope	Al Kazzaz <i>et al.</i> [88]
Hauteur de cordon moyenne Largeur de cordon moyenne Pénétration de la source de chaleur dans la matière	Microscope Scanner laser 3D	Ayed <i>et al.</i> [77]
Déplacement du substrat	Photographie et relevé manuel	Denlinger [53]
Hauteur de cordon Largeur de cordon Aire du cordon Aire de la zone de dilution	Microscope	Gudenko et Sliva [90]
Hauteur du cordon Largeur du cordon Pénétration de la source de chaleur dans la matière	Microscope	Kamble et Rao [42]
Géométrie du bain de fusion	Microscope	Li <i>et al.</i> [91]
Géométrie du bain de fusion	Microscope	Ocylok <i>et al.</i> [92]
Géométrie du bain de fusion	Microscope	Song <i>et al.</i> [93]
Hauteur du cordon Largeur du cordon	Laser vision sensor	Xiong <i>et al.</i> [89]

Nous pouvons noter que parmi ces publications, Ayed *et al.* [77] laissent entrevoir la notion d'incertitude de mesures en employant les termes de « hauteur moyenne » et « largeur moyenne ». Dans les neuf publications restantes, les auteurs expriment leurs résultats comme des valeurs « exactes ».

2.2.4 SYNTHÈSE

Nous avons vu précédemment deux outils permettant la prédiction d'une réponse en fonction de paramètres d'entrée : les réseaux de neurones et les régressions (linéaires, multiples ou exponentielles).

Le procédé LMD-w est un procédé dont son développement est relativement récent. Ainsi, il est difficile de prédire si les sorties sont liées de façon linéaire ou non-linéaire aux paramètres d'entrée.

Dans notre cas, les relations entre les sorties géométriques et les paramètres d'entrées ne sont pas toutes linéaires, [49]. L'outil de régression s'adapte mal à la non-linéarité contrairement aux réseaux de neurones. Les régressions exponentielles, quant à elles, garantissent un bon rapport entre le temps de développement mathématiques et la précision des réponses. Cependant ces régressions ne fonctionnent qu'à condition que les relations entre les entrées et les sorties tendent à être exponentielles.

L'une des différences majeures entre les réseaux de neurones et les régressions est la façon dont les entrées et les sorties sont liées. Les réseaux de neurones traitent des problèmes de prédiction de façon globale. C'est à dire qu'il est possible de générer une fonction unique liant l'ensemble des paramètres machine du procédé (puissance du laser P , vitesse d'avance de fil WFS et vitesse de déplacement de l'outil TS) et les variables géométriques (hauteur de cordon h_c , largeur de cordon w_c , hauteur de dilution h_d , largeur de dilution w_d et angle de contact α). Avec cette approche, nous pouvons alors exprimer les variables géométriques en fonction des paramètres machine sous forme matricielle d'après l'équation (2.30), avec F_{RN} la fonction du réseau de neurones telle que présentée dans l'équation (2.18).

$$\begin{bmatrix} h_c \\ w_c \\ h_d \\ w_d \\ \alpha \end{bmatrix} = F_{RN}(P, WFS, TS) \quad (2.30)$$

L'outil de régression, quant à lui, génère chaque variable géométrique indépendamment en fonction de tous les paramètres machine. Ainsi, il y a autant de régressions à paramétrer que de variables à déterminer. Si nous reprenons l'exemple de la prédiction des valeurs géométriques, dans notre cas, cela revient à 5 fonctions, notées f , g , u , v et w , comme exprimée par l'expression (2.31).

$$\begin{aligned} h_c &= f(P, WFS, TS) \\ w_c &= g(P, WFS, TS) \\ h_d &= u(P, WFS, TS) \\ w_d &= v(P, WFS, TS) \\ \alpha &= w(P, WFS, TS) \end{aligned} \quad (2.31)$$

Le développement d'un réseau de neurones est a priori plus complexe à réaliser qu'une régression. En effet, un réseau de neurones est constitué d'un ensemble de neurones selon une architecture. Il est également entraîné en suivant une fonction d'apprentissage choisie par l'utilisateur avec une valeur de performance à atteindre également définie par l'utilisateur.

Tout comme la régression, les réseaux de neurones ont besoin d'un nombre de données suffisantes pour pouvoir entraîner et valider le modèle. Plus la base de cas sera fournie plus le modèle aura de la matière sur laquelle se construire et plus les prédictions du réseau de neurones seront fidèles à la réalité du procédé.

Par conséquent, nous posons la deuxième question de recherche à savoir « Comment prédire les variables géométriques en fonction des paramètres machine du procédé LMD-w ? » (**Q2**)

2.3 AIDE A LA CONCEPTION POUR LA CORRECTION EN FABRICATION ADDITIVE

2.3.1 EXPLORATION DE L'ESPACE DE CONCEPTION

L'exploration de l'espace de conception permet la prise de décision pour résoudre un problème d'optimisation multicritère en conception selon Carlsen *et al.* [94].

Dans les travaux d'Abi Akle de 2015 [95], le processus d'exploration de l'espace de conception est illustré en mettant l'utilisateur au centre de ce processus. Afin de pouvoir aider à la prise de décision, l'exploration doit passer par trois étapes :

- la découverte : compréhension et interaction entre les variables du système,
- l'optimisation : réduction de l'espace de conception avec un outil tel que la dominance au sens de Pareto,
- la sélection : comparaison des solutions pour identifier le bon compromis entre toutes les solutions candidates possibles.

L'exploration de l'espace de conception permet à un utilisateur de répondre à une problématique à laquelle il trouvera une solution grâce à un ou plusieurs modèles de simulation, pour nous le procédé LMD-w, et aux connaissances acquises par les expériences passées telles que les règles métiers et les relations entre les entrées et sorties du procédé LMD-w. En sortie, l'utilisateur sélectionne une solution optimale parmi un ensemble de solutions candidates.

2.3.2 REPRESENTATION GRAPHIQUE POUR L'ESPACE DE CONCEPTION

L'exploration de l'espace de conception est généralement réalisée à l'aide d'une représentation graphique. Cette représentation permet de visualiser de façon explicite et d'explorer un espace de conception en fonction de trois critères selon Keim [96]. Ces trois critères sont :

- les données à visualiser,
- la technique de visualisation ou
- la méthode d'interaction.

Dans les travaux d'Abi Akle [95], les trois formes de visualisation auxquelles nous nous intéressons sont détaillées. Ces trois formes sont :

- le nuage de points simple (scatterplot simple)
- la matrice (scatterplot matrix) et
- le « Parallel coordinates plot »

A. SCATTERPLOT SIMPLE

Le scatterplot permet de visualiser un nuage de points dans un plan. Ce mode de visualisation permet d'observer la relation qui existe entre deux variables étudiées. La première variable se trouve sur l'axe des abscisses et la seconde variable sur l'axe des ordonnées par exemple. Ce mode de visualisation permet de manière assez rapide et simple de conjecturer quant à la linéarité ou non de la relation entre les deux variables observées [95].

La Figure 2.13 illustre la représentation d'un scatterplot. Ici les variables étudiées sont l'énergie par unité de longueur en fonction du volume de fil déposé par unité de longueur. Le jeu de couleurs et de symboles des nuages de points permet d'ajouter une troisième dimension à cette représentation 2D.

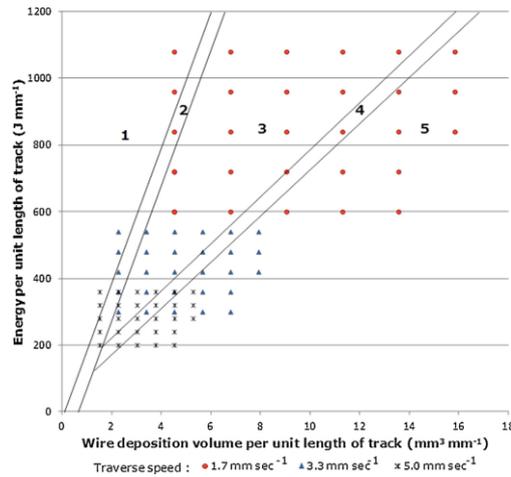


Figure 2.13 Cartographie du procédé par dépôt de fil fondu pour l’Inconel 625 dans Abioye *et al.* [74] à l’aide d’un scatterplot simple

B. MATRICE

Le scatterplot matrix permet de visualiser un ensemble de scatterplot simple. Cette matrice est composée de deux matrices triangulaires inversées par rapport à la diagonale [95]. Cette représentation est efficace dans l’exploration d’espace de conception pour observer les interactions entre les variables. Cependant, sa lisibilité dépend du nombre de variables observées.

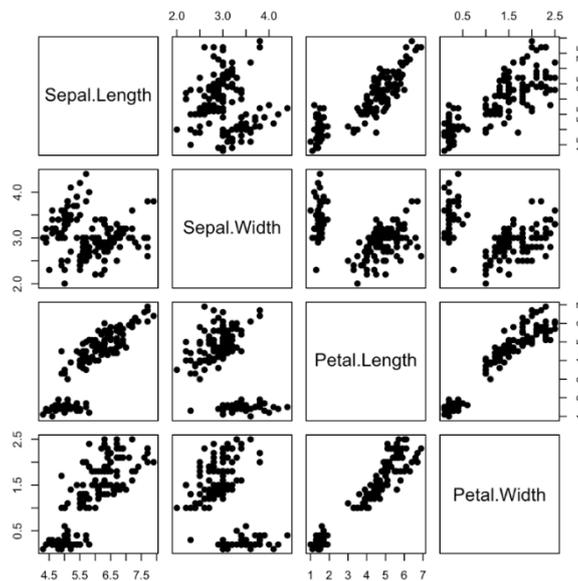


Figure 2.14 Illustration d’un scatterplot matrix dans les exemples de R (<http://www.sthda.com/english/wiki/scatter-plot-matrices-r-base-graphs>)

C. PARALLEL COORDINATES PLOT

Un parallel coordinates plot permet d'étudier les caractéristiques des échantillons pour des variables quantitatives. Sa force est que les variables peuvent être différentes en unités ou en étendue de données. Le parallel coordinates plot permet de représenter graphiquement un espace de grande dimension. Sa dimension est égale au nombre d'axes présents sur le graphique. Par exemple le parallel coordinates plot présenté sur la Figure 2.15 possède 13 axes. Ainsi sa dimension est de 13. Au premier abord, la lecture de ce graphique n'est pas aisée. Selon son créateur, Inselberg, lorsque la plupart des lignes entre deux dimensions sont parallèles entre elles, cela suggère une relation positive entre les deux dimensions. Lorsque les lignes se croisent dans une sorte de superposition de forme en X, il s'agit d'une relation négative. Lorsque les lignes se croisent au hasard, cela montre qu'il n'y a pas de relation particulière entre les deux grandeurs. Par exemple les lignes bleues en parallèles entre w_c et w_d , Figure 2.15, suggèrent une relation positive entre les deux paramètres.

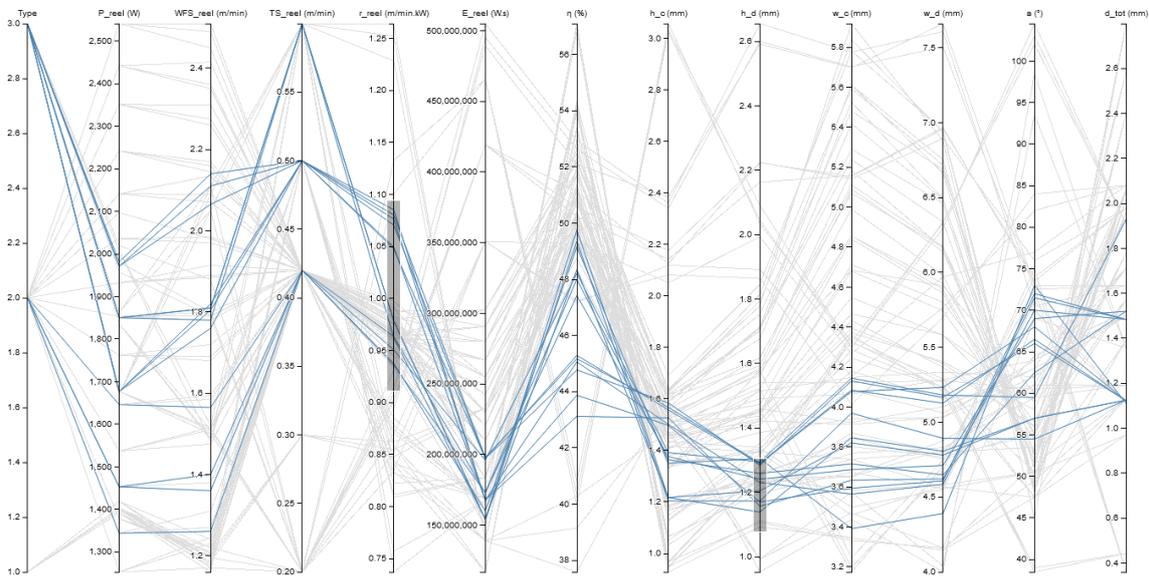


Figure 2.15 Illustration d'un parallel coordinates plot pour le procédé LMD-w avec des données issues de l'expérimental

Son utilisation est particulièrement utilisée lors de l'exploration par exemple d'un espace de conception car il est possible de sélectionner des plages sur les axes et les lignes se surlignent.

2.3.3 SELECTION D'UNE SOLUTION OPTIMALE

A. LA DECISION

La définition du terme « décision » diffère selon le domaine d'utilisation de ce mot.

Dans le domaine du système industriel, génie industriel, conception et design, « une décision est un processus de transformation d'information. Il s'agit d'une réponse à une question, de la sélection d'une alternative parmi plusieurs qui permettra d'obtenir les avantages optimaux et les inconvénients minimaux » Abi Akle [95]. Cependant à cette définition, nous ajoutons qu'une décision finale est prise par l'utilisateur (Longueville [97]) et elle entraîne une action

par le choix de la solution (Adla [98]). L'ajout de ces deux notions nous permet de définir la prise de décision en FA pour la correction comme « un processus de transformation de l'information répondant à une question par la sélection d'une solution optimale parmi plusieurs solutions, permettant d'obtenir les avantages optimaux et les inconvénients minimaux ».

B. OUTIL POUR LA PRISE DE DECISION

Une solution dite optimale est comprise dans l'espace de conception. Cette solution répondra à une problématique formulée, précise et devra être celle dont les performances seront les plus élevées et les désagréments les moins importants. Les performances sont évaluées par des variables appelées : variables de performances. Ces variables de performances peuvent être simples ou multiples. Nous pouvons donc faire face à un espace de conception multidimensionnel dont l'espace performance est unidimensionnel ou multidimensionnel. De ce fait, l'espace de performance est bidimensionnel ou multidimensionnel. Dans notre cas d'étude, les variables de performances sont de l'ordre de deux :

- Le temps machine à minimiser,
- La longueur de fil de TA6V à minimiser,

L'objectif de l'utilisateur est de déterminer la stratégie de correction à réaliser afin de corriger une pièce avec un défaut géométrique.

Pour aider utilisateur, en charge de corriger une pièce, dans sa prise de décision les solutions candidates sont évaluées sur leurs performances et les solutions optimales seront celles qui domineront toutes les autres solutions, peuplant l'espace de conception, au sens Pareto. On appelle aussi ces solutions : solutions Pareto-Optimales.

Le principe de dominance au sens de Pareto s'applique pour un problème multi-objectifs, minimum deux objectifs. Dans notre cas nous souhaitons minimiser trois variables de performance. Ainsi, le problème à résoudre s'exprime tel que :

$$\min(F(x)) = \min(Y) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)), n \geq 2 \quad (2.32)$$

Ici $x \in X$ avec X l'espace de conception contenant les solutions candidates et Y l'espace de performance.

On dit qu'une solution est Pareto optimale, y , si elle n'est dominée par aucune autres solutions de l'espace X , notée z dans l'équation (2.33). Et elle est dominante si aucune autre solution ne la domine.

$$y \text{ domine } z \text{ ssi } \forall i \in [1 \dots n], f_i(y) \leq f_i(z) \\ \exists k \in [1 \dots n] \mid f_k(y) < f_k(z) \quad (2.33)$$

Donc une solution appartenant à l'espace de conception est dite Pareto-Optimale si et seulement s'il n'existe pas de solution, appartenant à cet espace, la dominant. L'ensemble des solutions Pareto-Optimales forment un front dans l'espace de performance appelée « Front de Pareto », comme illustré sur la Figure 2.16.

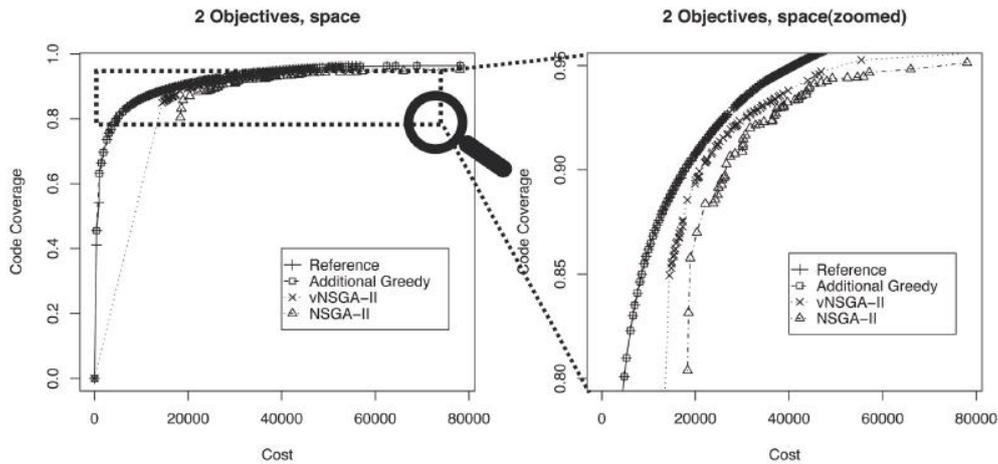


Figure 2.16 Exemple d'un front de Pareto avec des solutions dominées (rond domine croix qui domine triangle) dans Yoo et Harman [99]

Avec cette approche, l'ensemble des solutions, composant le front de Pareto, sont optimales. Ainsi, c'est à l'utilisateur de choisir la solution parmi les Pareto-Optimales qu'il utilisera en fonction des connaissances acquises par les expériences réalisées passées. Ainsi il définira la stratégie de correction pour les pièces mécaniques endommagées et réparables par fabrication additive.

2.3.4 STRATEGIES POUR LA CORRECTION EN FABRICATION ADDITIVE

En plus des paramètres machine, il est important de définir de nouveaux paramètres [14], [26], [31], [38], [100], [101]. Ces paramètres sont :

- la trajectoire de la tête d'impression,
- le recouvrement horizontal des cordons,
- le temps de refroidissement entre les couches,
- le bridage.

Cependant, tous les auteurs s'accordent à dire que pour réduire les problèmes de déformation de la pièce, il est fortement recommandé de brider entièrement la pièce, afin de répartir de façon homogène les contraintes. Ainsi, ces variables forment ce que nous appelons la stratégie. Il existe autant de stratégies qu'il existe de valeurs possibles pour chaque variable.

Le temps de refroidissement entre les couches

Au cours de leur étude sur l'effet du temps de refroidissement entre les couches, Lee *et al.* [38] ont montré que pour réduire le déplacement des pièces par procédé LMD-w, il est nécessaire de réduire au maximum le temps de refroidissement entre les couches. L'objectif de ce temps de refroidissement est d'homogénéiser la température au sein de la pièce fabriquée. Ainsi la pièce ne surchauffe pas et nous évitons les gradients thermiques trop importants [100].

Les trajectoires de la tête d'impression

La trajectoire de l'outil est le paramètre de fabrication qui a de façon significative le plus d'impact sur la qualité géométrique et mécanique de la pièce fabriquée [14], [26], [38], [100], [102]. Les différentes études menées sur le sujet ont montré que :

- Les parcours d’outils unidirectionnel mènent à une répartition non uniforme des contraintes dans la pièce [38],
- Pour un jeu de paramètre d’entrée machine, la longueur de parcours avait un impact plus important [102],
- Réduire la longueur de parcours permet d’augmenter l’homogénéité de la microstructure si l’énergie incidente est faible, mais au contraire de la diminuer si l’énergie incidente est importante [14],
- Les parcours parallèles doivent être utilisés dans un mode multi-balayage pour éviter les problèmes de consolidation [100]. Or, ce type de trajectoires permettent de maximiser la microstructure, la dureté et les propriétés de traction par rapport aux autres trajectoires [103], illustrées sur la Figure 2.17.

De plus, parmi les trajectoires que nous retrouvons le plus dans la littérature, nous avons :

- La trajectoire dite tramée (raster en anglais, sur la Figure 2.17),
- La trajectoire zigzag,
- La trajectoire contour,
- La trajectoire spirale,
- La trajectoire continue,
- La trajectoire hybride.

Ces trajectoires sont illustrées sur la Figure 2.17.

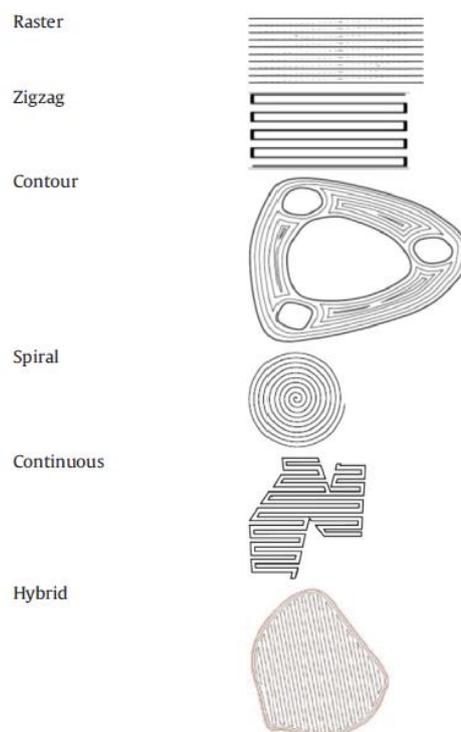


Figure 2.17 Trajectoires couramment utilisées en fabrication additive, Ding *et al.* [104]

Lorsqu’il faut remplir une certaine surface, les cordons, géométrie de base de la fabrication additive, peuvent se chevaucher. Ce chevauchement entre les cordons, autrement appelé recouvrement horizontal, doit respecter certaines règles afin d’éviter un entassement de matière ou bien un manque de matière.

Le recouvrement horizontal

Le recouvrement, également appelé « overlapping » représente un chevauchement entre deux cordons. Ce recouvrement est compris entre 0 et 1. A 0, les cordons ne se chevauchent pas et à 1 les cordons se recouvrent. Lors du recouvrement horizontal de deux cordons, deux phénomènes sont à prendre en considération [105] :

- La formation d’une zone creuse et sans matière. Cela intervient lorsque la distance entre les centres est trop importante,
- Une augmentation de la hauteur du cordon. Cela intervient lorsque la distance entre les centres est trop faible.

Pour le procédé WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), il existe une distance à respecter entre les centres des deux cordons, notée d^* , pour réduire la formation de creux et l’augmentation de la hauteur de cordon (lors du dépôt du second cordon). Cette distance vaut 0,738 fois la largeur des cordons w_c selon Ding *et al.* [105].

$$d^* = 0,738w_c \quad (2.34)$$

La Figure 2.18 illustre les phénomènes observés en fonction de la distance entre les centres des deux cordons déposés. Sur la Figure 2.18 (a), les centres des cordons sont à la distance optimale. Sur la Figure 2.18 (b), la distance séparant les deux centres est inférieure à la distance optimale définie par Ding *et al.* créant une élévation de la hauteur du cordon 2.

Enfin sur la Figure 2.18 (c) les cordons sont séparés par une distance d supérieure à la distance optimale d^* créant une zone de creux entre les deux sommets des cordons.

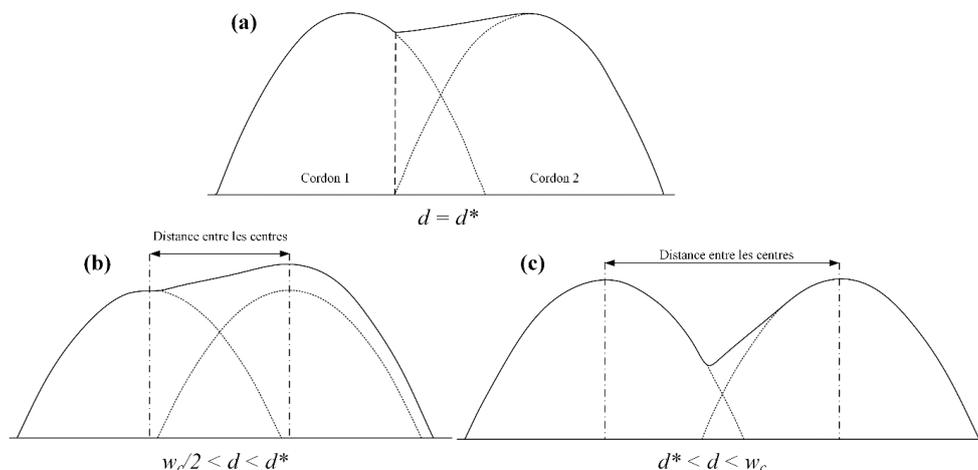


Figure 2.18 Phénomènes naissant lors du recouvrement horizontal en fonction de la distance d entre les centres des deux cordons, selon Ding *et al.* [105]

Pour la suite de nos travaux, nous considérerons la distance de recouvrement comme étant la distance d^* .

2.3.5 SYNTHÈSE

Dans cette section, nous nous sommes intéressés au problème de conception induit par la fabrication additive et plus particulièrement la correction par ajout de matière qui est considéré par Paydas *et al.* [14] comme un procédé adéquat pour la réparation de pièce mécanique.

Au cours de ce chapitre, nous avons vu que la fabrication additive est un procédé complexe à mettre en œuvre du fait des physiques mis en jeu. En plus de ces difficultés, vient s'ajouter les effets de la stratégie sur l'aspect géométrique et les propriétés mécaniques de la pièce fabriquée. Nous appelons stratégie l'ensemble des variables suivantes :

- Trajectoires,
- Temps de refroidissement entre les couches,
- Bridage,
- Recouvrement entre les cordons.

Nous avons vu précédemment, que pour minimiser la déformation des pièces fabriquées en FA, il était nécessaire de brider totalement la pièce et de minimiser le temps de refroidissement entre les couches. Ces deux résultats permettent de garantir une répartition des contraintes résiduelles induites par les gradients thermiques. De plus, afin de garantir une homogénéité dans le taux de remplissage, il est important le chevauchement soit de d^* entre deux cordons successifs (équation (2.34)).

Dans la littérature, six trajectoires sont principalement étudiées, Figure 2.17. Chaque trajectoire possède ses avantages (amélioration des propriétés mécaniques de la pièce, amélioration de l'aspect géométrique d'un cordon, réduction du temps de fabrication) et ses inconvénients (gradients thermiques trop importants, augmentation des contraintes résiduelles dans la pièce, hétérogénéité de la microstructure).

Ainsi pour corriger son défaut l'utilisateur doit décider parmi un ensemble de stratégies possibles, la solution optimale. Cette solution est forcément comprise dans l'espace de conception et doit avoir les performances les plus élevées.

Nous pouvons alors formuler une troisième question de recherche qui est « Quelle stratégie pour la correction géométrique d'une pièce mécanique endommagée ? » (**Q3**)

2.4 SYNTHÈSE ET POSITIONNEMENT DE NOS TRAVAUX DE RECHERCHE

2.4.1 SYNTHÈSE

L'analyse des travaux existants, présentée dans les différentes sections de ce chapitre, permet de faire la synthèse de l'état concernant la modélisation des procédés de la fabrication additive et leur utilisation en conception. Durant cet état de l'art, trois questions de recherches se sont posées. Elles portent sur la modélisation du procédé LMD-w (**Q1**), la prédiction de la géométrie et du déplacement de la pièce finale (**Q2**) et enfin sur la stratégie à adopter pour corriger une pièce mécanique par ajout de matière (**Q3**). Ces questions **Q1**, **Q2** et **Q3** nous amènent à nous soulever une problématique de recherche à savoir

« Comment corriger des défauts géométriques par ajout de matière en fabrication additive métallique ? »

Nous savons que la fabrication additive est un procédé de fabrication par ajout de matière. Les procédés de la FA sont complexes. Leur compréhension et leur utilisation est complexe. Dans ce chapitre, nous avons réalisé un état de l'art. Cet état de l'art nous a permis de mettre en lumière certaines limites et connaissances manquantes sur la fabrication additive pour la correction de défauts géométriques.

Il existe deux façons de modéliser les procédés de la FA : les modèles dits « directs » avec les réseaux de neurones et les modèles « indirects » avec les modèles numériques. Ces deux modélisations permettent de prédire des sorties en fonction de paramètres d'entrées machine.

La méthode directe utilise les résultats d'expériences passées pour relier, au travers d'équations, les paramètres d'entrées aux sorties. Il est alors possible de considérer dans ce cas le procédé comme étant une boîte noire, comme illustrée sur la Figure 2.19, et les équations expriment cette boîte noire.

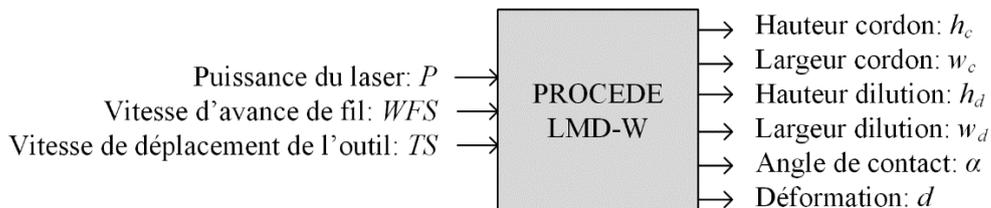


Figure 2.19 Relations entre nos paramètres d'entrée et nos sorties étudiées pour le procédé LMD-w, sous forme de boîte noire

Les méthodes indirectes, par la simulation numérique, utilisent les lois de la physique mais également les résultats d'expériences passées. Ces résultats ne sont pas utilisés pour trouver une relation directe liant les variables géométriques aux paramètres machine mais pour ajuster les propriétés thermomécaniques du matériau pour pouvoir simuler le procédé de fabrication additive. Une fois le paramétrage effectué, les modèles de simulation numériques permettent de déterminer les champs de températures au sein de la pièce en cours de fabrication, la géométrie du bain de fusion, et le déplacement de la pièce finale.

2.4.2 POSITIONNEMENT DE NOS TRAVAUX DE RECHERCHE

Nous avons l'intention de développer un modèle de comportement du procédé LMD-w. Le modèle de comportement permettra de qualifier l'existence de liens, d'impacts et d'influences existant entre les trois paramètres machine définis (puissance laser, vitesse d'avance de fil et vitesse de déplacement de l'outil) et les cinq variables géométriques étudiées géométriques (hauteur de cordon, largeur de cordon, hauteur de dilution, largeur de dilution, angle de contact) ainsi que sur le déplacement de la pièce finale.

Les relations liants les paramètres machine du procédé et les variables géométriques du procédé sont difficilement prévisibles du fait des connaissances encore lacunaires sur les procédés de fabrication additive fil/laser. Afin de généraliser au mieux les relations paramètres/variables du procédé avec un nombre d'expériences faibles, en raison des coûts de fabrication, nous faisons l'hypothèse que les relations peuvent être non-linéaires. Ainsi, dans la suite de nos travaux de recherche, nous utiliserons les réseaux de neurones pour prédire la géométrie de notre cordon fabriqué. L'adaptabilité et la gestion simplifiée des relations non linéaires sont les raisons pour lesquelles nous l'avons choisi. La principale difficulté résidera dans le choix de l'architecture du réseau de neurones.

De plus, nous avons vu au cours de ce chapitre que les procédés de fabrication additive fil/laser mettent en jeu des phénomènes multiphysiques et multi échelles. Nous utilisons les modèles numériques de simulations pour estimer le déplacement du substrat en sortie de fabrication. Ces deux méthodes de prédictions (RN et modèles numériques) sont complémentaires. Ainsi, nous proposons de coupler ces deux méthodes.

Dans ce but, nous proposons de générer le maillage de la géométrie à fabriquer de façon automatique en sortie du réseau de neurones. La Figure 2.20 illustre le couplage de ces deux méthodes.

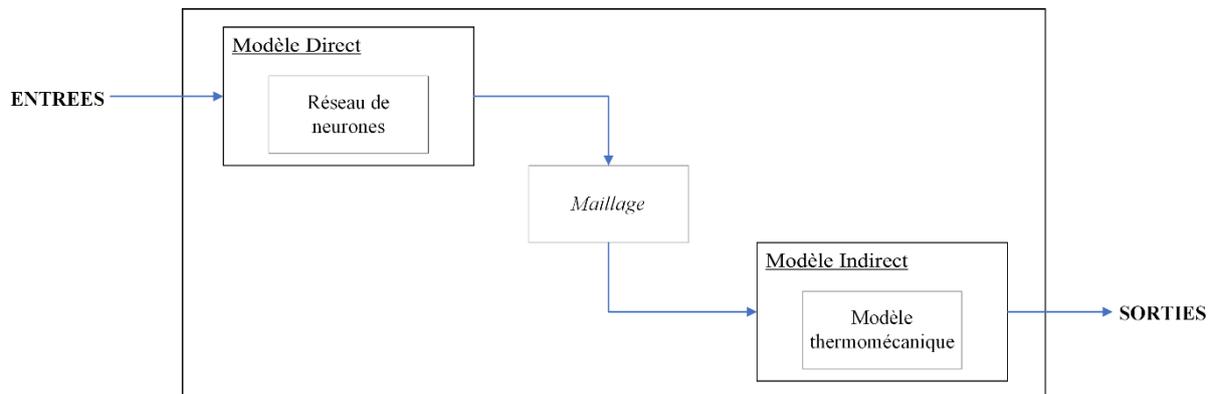


Figure 2.20 Modèle de prédiction proposé pour l'étude du procédé LMD-w

Cependant, pour les modèles numériques de simulation du procédé LMD-w, nous avons vu que la modélisation de la source de chaleur sont soit surfaciques, soit volumiques. Néanmoins, ces modélisations ne prennent pas en compte l'interaction entre le laser et le fil, pour une arrivée coaxiale du fil par rapport à la source de chaleur. Cette interaction intervient avant que le fil entre en contact avec le substrat. Ainsi le laser est appliqué selon deux hauteurs ($z=0$ et $z=h_c$). Afin de considérer les deux dernières limites, nous nous proposons de modéliser la source de chaleur par une source surfacique avec interaction entre le fil et le laser. Lors de son déplacement, la source de chaleur sera modélisée sur deux hauteurs :

- Une demi-couronne, à une puissance P fonction de la hauteur z comme sur la Figure 2.5, sur la surface du cordon déposée à une hauteur h_c
- Une demi-couronne en amont du cordon, pour simuler la dissymétrie de la source de chaleur lors de son déplacement, comme illustré sur la Figure 2.21.

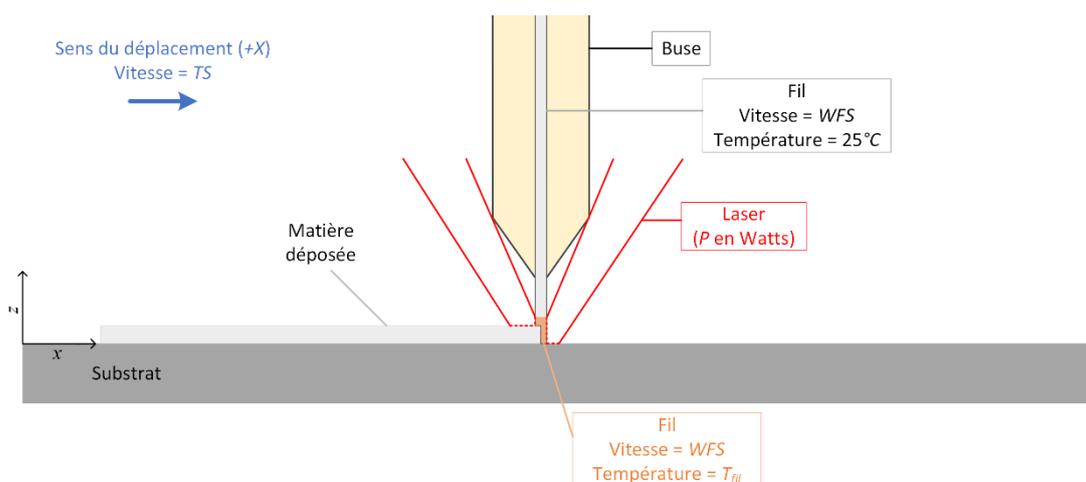


Figure 2.21 Interaction entre le laser et le fil et entre le laser et le substrat pendant la phase de soudage du procédé LMD-w

Nous savons que la fabrication additive est un procédé générant des défauts géométriques et mécaniques. Dans notre cas d'étude, nous nous intéressons aux défauts de types géométriques. Après une phase d'usinage de la pièce à corriger, nous pouvons nous ramener à étudier les défauts de types surfaciques ou volumiques. L'objectif est de permettre à l'utilisateur de choisir quelle stratégie de correction est adaptée à son défaut géométrique. Pour cela, nous proposons de développer un algorithme reposant sur le principe de dominance au sens de Pareto. Le principe de Pareto est de placer l'utilisateur au centre de la décision en proposant un ensemble de solutions candidates.

2.4.3 NOTRE PLAN DE RESOLUTION

Pour répondre à notre problématique de recherche, « **Comment corriger des défauts géométriques par ajout de matière en fabrication additive métallique ?** », plusieurs campagnes expérimentales seront réalisées. Ces campagnes expérimentales peuvent être divisées en trois parties comme illustré sur la Figure 2.22.

Dans le premier bloc, en rouge sur la Figure 2.22, l'objectif est de répondre à la question de recherche **Q1**. Pour cela, deux campagnes expérimentales seront menées. Ces expériences permettront de développer un modèle de comportement. Ce modèle permet de comprendre les impacts et les influences des paramètres d'entrée du procédé LMD-w étudiés (puissance du laser P , vitesse d'avance de fil WFS et vitesse de déplacement de l'outil TS) sur les sorties géométriques (hauteur du cordon h_c , largeur du cordon w_c , hauteur de dilution h_d , largeur de dilution w_d et angle de contact α) ainsi que le déplacement du substrat en fin de fabrication (**Chapitre 3**).

Les résultats expérimentaux forment une base de cas servant à développer le réseau de neurones du procédé LMD-w, encadré bleu sur la Figure 2.22. En entrée de ce modèle de prédiction direct, nous retrouvons les trois paramètres d'entrée machine (P , WFS , TS) et en sortie, les valeurs théoriques pour la géométrie d'un cordon. Le maillage utilisé par le modèle numérique de simulation, modèle indirect, sera généré en sortie de RN. Avec ce modèle de prédiction indirect, nous serons capables d'estimer le déplacement de la pièce finale (**Chapitre 4**), répondant de ce fait à la question de recherche **Q2**.

Enfin un espace de conception sera créé pour aider l'utilisateur dans sa prise de décision pour corriger un défaut géométrique surfacique ou volumique d'une pièce mécanique en FA, permettant de répondre à la question de recherche **Q3**. L'utilisateur comparera les solutions candidates à l'aide du principe de dominance au sens de Pareto. Cette comparaison permettra à l'utilisateur de définir la solution optimale pour garantir la correction tout en réduisant le temps machine et la quantité de matière consommée (**Chapitre 5**), encadré noir sur la Figure 2.22.

Dans le cadre de cette étude, il est important de prendre en compte la variabilité des mesures pour les modèles de prédiction. C'est pourquoi, afin d'affiner notre protocole d'analyse de la géométrie d'un cordon, nous proposons d'étudier la fidélité de la mesure réalisée avec notre microscope, de déterminer l'incertitude pour chaque sortie géométrique et enfin de quantifier l'influence de ces incertitudes de mesures sur le modèle de connaissance de notre procédé LMD-w, encadré jaune sur la Figure 2.22.

Q0: Fidélité du microscope

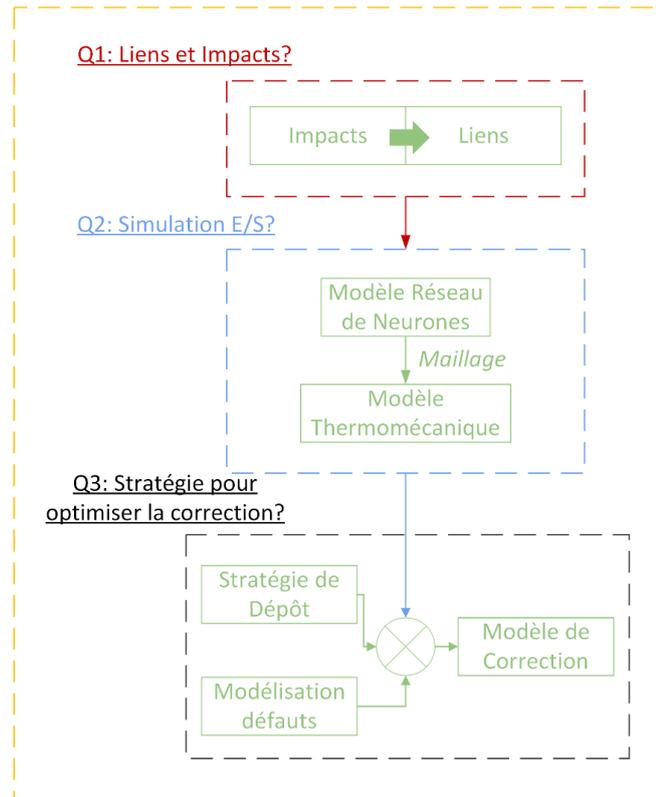


Figure 2.22 Plan de résolution par question de recherche pour répondre à notre problématique de recherche

CHAPITRE 3 : DEVELOPPEMENT DU MODELE DE COMPORTEMENT

3.1	Introduction Chapitre 3	56
3.2	Etude préliminaire de validation sur la répétabilité de la mesure au microscope.....	56
3.2.1	Définition de la répétabilité de la mesure	56
3.2.2	Démarche de l'étude de répétabilité	57
3.2.3	Phase 1 et phase 2 de la démarche.....	57
3.2.4	Phase 3 : analyse des résultats	59
3.3	Identification des relations entre les paramètres machine et les variables géométriques	61
3.3.1	Nature des paramètres et des variables mis en jeu	61
3.3.2	Méthodologie et expérimentation.....	62
3.3.3	Résultats et analyses	67
3.4	Impacts des paramètres machine sur les variables géométriques	71
3.4.1	Méthodologie expérimentale	72
3.4.2	Résultats et analyses	72
3.5	Etude de l'influence de l'incertitude de mesure sur les relations entrées/sorties	76
3.5.1	Définition de la reproductibilité	77
3.5.2	Protocole expérimental	77
3.5.3	Analyse des résultats	79
3.5.4	Application des résultats à l'espace de conception.....	81
3.6	Conclusion.....	83

3.1 INTRODUCTION CHAPITRE 3

Dans ce chapitre, nous répondons à la question de recherche Q1 : « Quels sont les liens et les impacts entre les paramètres machine du procédé LMD-w et les variables géométriques ? ».

Deux campagnes expérimentales ont été réalisées :

- la première campagne expérimentale, notée *c1*, permet de qualifier l'existence de relations entre les paramètres d'entrée machine et les variables géométriques.
- la deuxième campagne expérimentale, notée *c2*, détermine l'impact des paramètres d'entrée du procédé sur les sorties géométriques. Cette deuxième campagne se divise en deux sous campagnes notées *c2.1* et *c2.2*.

D'après notre état de l'art, les mesures réalisées au microscope comportent des incertitudes. C'est pourquoi, nous avons réalisé une étude préliminaire pour valider la répétabilité de la mesure au microscope. Enfin, nous étudions l'influence de l'incertitude de mesures sur les relations entre les entrées et les sorties.

L'ensemble de ces expériences permet de définir le modèle de comportement du procédé de fabrication additive LMD-w.

3.2 ETUDE PRELIMINAIRE DE VALIDATION SUR LA REPETABILITE DE LA MESURE AU MICROSCOPE

Des cordons fabriqués par la technologie LMD-w sont découpés en échantillons. Ces échantillons sont alors analysés à l'aide du microscope LEICA DM1750M.

3.2.1 DEFINITION DE LA REPETABILITE DE LA MESURE

D'après le Bureau Internationale des Poids et Mesures (BIPM), la répétabilité des résultats de mesurages est : *l'écart entre les résultats des mesurages successifs d'une même mesurande, mesurages effectués dans la totalité des mêmes conditions de mesure.*

Ces conditions sont appelées « conditions de répétabilité ». Les conditions de répétabilité comprennent :

- un même mode opératoire,
- un même observateur,
- un même instrument de mesure utilisé dans les mêmes conditions,
- un même lieu,
- une répétition durant une courte période.

La répétabilité peut s'exprimer quantitativement à l'aide des caractéristiques de dispersion des résultats JCGM 100 :2008 [106].

Avant d'engager le plan expérimental, nous qualifions la répétabilité du microscope dont nous avons possession au sein du laboratoire de la plateforme technologique Addimadour.

3.2.2 DEMARCHE DE L'ETUDE DE REPETABILITE

Un opérateur ayant été formé au préalable sur l'instrument de mesure (LEICA DM1750M et sa suite logiciel LAS v14.2) réalise le test suivant : mesurer un étalon d'une longueur de 1000 μ m (1mm). L'étalon est fourni par le fournisseur LEICA sous la référence 563011. Durant le test, l'opérateur est supervisé afin que les conditions mentionnées soient respectées et que l'opérateur effectue les mesures sans chercher à obtenir la valeur précédente et cela dans un délai aussi court que possible. Le Tableau 3.1 reprend les éléments du protocole permettant de valider les conditions de répétabilité imposées par la norme JCGM 100 :2008 [51].

Tableau 3.1 Eléments de réponses pour satisfaire les critères des conditions de répétabilité

Critères de la norme JCGM 100 :2008	Réponse
Même mesurande	Etalon de mesure LEICA 563011
Mode opératoire	Protocole de mesure défini
Même observateur	1 opérateur formé au préalable pour tout le test
Même instrument	Microscope LEICA DM1750M et sa suite logiciel LAS v14.2
Mêmes conditions	Réglage de l'instrument de mesure avant le test par l'opérateur
Même lieu	Laboratoire d'Addimadour
Répétition sur une courte durée	31 mesures Superviseur pour veiller que l'opérateur ne cherche pas à réaliser une mesure similaire à la précédente

Le protocole se divise en trois phases :

- phase 1 : préparation et installation,
- phase 2 : test,
- phase 3 : analyse.

Les deux premières phases seront réalisées par l'opérateur utilisant le microscope et l'analyse des résultats est réalisée par le superviseur.

3.2.3 PHASE 1 ET PHASE 2 DE LA DEMARCHE

A. REGLAGES

Au préalable, l'instrument de mesure est allumé. Il est demandé à l'opérateur, qui réalise le test, de le régler et de le mettre au point. Pour cela, nous lui donnons les informations suivantes :

- prendre l'étalon de mesure LEICA 563011,
- placer l'étalon sur le porte échantillon du microscope,
- faire le focus avec le plus petit objectif (x5),
- régler le microscope :
 - o réglages des molettes macroscopiques :
 - réglages des molettes microscopiques,
 - réglage retour image sur l'écran d'ordinateur,
 - sélectionner l'étalon sur le retour image sur l'écran d'ordinateur (clic gauche),

- faire un clic droit et sélectionner « trouver le focus »,
- jouer avec les molettes microscopiques pour atteindre le focus maximal,
- réglages la luminosité :
 - sélectionner l'étalon sur le retour image de l'écran d'ordinateur (clic gauche),
 - faire un clic droit et sélectionner « exposition spot »,
 - régler la luminosité avec les boutons sur le microscope « + » et « - » pour que l'ensemble des graduations de l'étalon soit visible.

Une fois les réglages effectués, en présence du superviseur, ni l'étalon ni les réglages ne seront touchés dans la suite de l'expérience.

B. ACQUISITION DE L'IMAGE

L'étalon est photographié et l'image est enregistrée dans le dossier dédié à cet effet. De ce fait, l'opérateur doit suivre les consignes suivantes :

- vérifier que le dossier sélectionné est correct,
- renommer l'image sous le format « Etalon_Test_InitialesOpérateur »,
- acquérir l'image en HDR (High Dynamic Range),
- sélectionner l'objectif (x5) pour de l'acquisition.

Avant d'effectuer les mesures, le superviseur veille à ce que l'échelle longueur/pixel soit correcte (c'est-à-dire que 1 pixel = 1.524 μm pour notre instrument de mesure).

C. RELEVÉ DES MESURES

Le relevé des mesures implique une phase de traitement de l'image. L'opérateur réalise les mesures de la mesurande (l'étalon LEICA 563011). Sa valeur exacte est connue : 1000 μm .

Le superviseur doit veiller à ce que l'opérateur respecte le protocole, et ne cherche pas à reproduire sa meilleure mesure à l'aide de repère visuel. Pour cela, le superviseur chronométrera l'opérateur durant sa tâche. Nous appelons « meilleure mesure », la mesure ayant l'écart le plus petit entre la valeur mesurée et la valeur exacte.

Quant à l'opérateur, il doit suivre les consignes données jusqu'à ce que 31 mesurages soient effectués :

- sélectionner l'onglet « Analyser » puis « Interactif » puis « Outils mesure – sélection »,
- choisir « Outil distance – ligne »,
- cliquer sur l'extrémité gauche de l'étalon,
- cliquer sur l'extrémité droite de l'étalon de telle sorte que la ligne soit perpendiculaire aux graduations de l'étalon.

Une fois les 31 mesures réalisées, le superviseur vérifie que toutes les mesures sont réalisées et note les temps mis par l'opérateur pour réaliser la tâche. Cette vérification se fait en présence de l'opérateur. Si toutes les mesures sont réalisées, l'opérateur est libéré. A ce moment, le superviseur relève les valeurs des mesures dans une feuille de calcul Excel pour les analyser.

3.2.4 PHASE 3 : ANALYSE DES RESULTATS

A. INCERTITUDE DE TYPE A

Les conditions de répétabilité permettent l'évaluation d'une incertitude de type A ; en caractérisant la dispersion minimum d'une méthode. Cette incertitude, notée u_A , est calculée selon l'expression (3.1)

$$u_A = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}} \quad (3.1)$$

Avec n le nombre d'observations et σ_{n-1} l'écart type expérimental tel que

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} \quad (3.2)$$

m_i la $i^{\text{ème}}$ mesure et \bar{m} la moyenne arithmétique des mesures réalisées telle que

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \quad (3.3)$$

La norme JCGM 100 :2008 [106] impose que le nombre de mesurage soit suffisamment grand pour garantir que la moyenne arithmétique des observations (\bar{m}) fournisse une estimation fiable de l'espérance mathématique μ_M telle que :

$$\mu_M = E(M) = \sum_{i=1}^n p_i m_i \quad (3.4)$$

Pour une variable aléatoire discrète M prenant des valeurs m_i avec des probabilités p_i , l'espérance si elle existe est la somme étendue à toutes les valeurs de m_i susceptibles d'être prises par M .

En pratique, il est difficile de garantir un nombre d'observations n important tout en respectant la condition de répétabilité de courte durée. C'est pourquoi on « élargit » l'incertitude calculée issue des n mesures, u_A , par un coefficient, k , appelé coefficient de Student. On obtient alors l'expression d'une incertitude de type A élargie U_A (3.5).

$$U_A = k u_A = k \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}} \quad (3.5)$$

Pour choisir la valeur du coefficient k , la matrice de la loi de Student est utilisée. Cette matrice possède deux entrées :

- le nombre de mesures (n) ou le degré de liberté ($n-1$),
- l'intervalle de confiance (90%, 95%, 99%)

Le Tableau 3.2 regroupe quelques exemples de valeurs du coefficient k en fonction du nombre d'observations et les intervalles de confiance correspondants. Plus le nombre de mesures est faible plus la valeur du coefficient est importante. De même, plus l'intervalle de confiance est élevé, plus la valeur du coefficient l'est également.

Tableau 3.2 Extrait de la table des coefficients k pour l'élargissement de l'incertitude de mesure, JCGM 100:2008

Degré de liberté	Intervalle de confiance		
	n-1	90%	95%
5	2.02	2.57	4.03
10	1.81	2.23	3.17
15	1.75	2.13	2.95
20	1.72	2.09	2.85
25	1.71	2.06	2.79
30	1.70	2.04	2.75
35	1.70	2.03	2.72
40	1.68	2.02	2.70
45	1.68	2.01	2.69
50	1.68	2.01	2.68
100	1.66	1.984	2.626
>100	1.645	1.96	2.576

B. RESULTATS DU TEST

Les valeurs des 31 mesurages sont regroupées dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3 Valeurs des 31 mesurages effectués par l'opérateur

N° de la mesure	Valeur de la mesure (μm)	N° de la mesure	Valeur de la mesure (μm)
1	1010	17	1011
2	1012	18	1011
3	1010	19	1010
4	1008	20	1009
5	1013	21	1009
6	1012	22	1009
7	1010	23	1010
8	1011	24	1011
9	1013	25	1009
10	1010	26	1010
11	1010	27	1010
12	1011	28	1009
13	1011	29	1011
14	1011	30	1010
15	1011	31	1008
16	1011		

La longueur de notre étalon est de $1000\mu\text{m}$. Or un pixel équivaut à une longueur de $1.524\mu\text{m}$. Ainsi le processus d'analyse d'image ne nous permet pas immédiatement de mesurer une distance de $1000\mu\text{m}$ car la sélection d'un pixel est binaire. Ainsi pour être au plus près de la mesure vraie, l'opérateur devrait sélectionner :

- 656 pixels, soit $999.744\mu\text{m}$, ou
- 657 pixels, soit $1001.268\mu\text{m}$.

Dans le Tableau 3.3, nous présentons les valeurs mesurées ; la valeur moyenne des mesures réalisées par l'opérateur est :

$$1010.35\mu\text{m}, \text{ soit } 662 \text{ ou } 663\text{pixels}$$

L'écart-type des mesures effectuées par l'opérateur est de $1.226\mu\text{m}$. On peut alors à partir de l'équation (3.1) déterminer l'incertitude de type A,

$$u_A = 0.220\mu\text{m}$$

Afin de calculer l'incertitude de type A élargie, nous avons choisi un intervalle de confiance à 99%

Le nombre de mesures est 31, ce qui nous amène à disposer d'un problème à 30 degrés de liberté. Le Tableau 3.2 et le Tableau 3.3 nous permettent de déterminer la valeur du coefficient de Student k : 2,75.

On obtient ainsi :

$$U_A = 2,75 \times u_A = 0.61\mu\text{m}$$

L'analyse de cette incertitude élargie montre que pour un intervalle de confiance de 99%, la dispersion des mesures réalisées par l'opérateur se situe dans la fourchette suivante $[\bar{m} - U_A; \bar{m} + U_A]$, avec \bar{m} sa moyenne de $1010,35 \mu\text{m}$, soit l'intervalle $[1010.35-0.61\mu\text{m} ; 1010.35+0.61\mu\text{m}]$. Afin de généraliser cet intervalle d'incertitude pour des mesures de distance sous le microscope LEICA DM1750M avec un objectif (x5) et son logiciel LAS v14.2, le coefficient d'incertitude élargie, noté *Coefficient* dans la formule (3.6), est le suivant :

$$\text{Coefficient} = \frac{\sigma_{n-1}}{\bar{m}} \times 100 = \frac{1.23}{1010.35} \times 100 = 0.12\% \quad (3.6)$$

L'intervalle d'incertitude de la mesure de distance peut alors être généralisé et exprimé comme suit :

$$X = x \pm 0,12\% \quad (3.7)$$

Avec X la mesurande et x sa valeur mesurée au microscope.

La démarche construite et mise en place permet de conclure que les mesures réalisées avec le microscope LEICA DM1750M et son logiciel LAS v14.2 sont répétables avec une incertitude de 0.12%. De ce fait, le matériel est validé pour la suite des expériences [107].

3.3 IDENTIFICATION DES RELATIONS ENTRE LES PARAMETRES MACHINE ET LES VARIABLES GEOMETRIQUES

Afin d'identifier les relations entre les paramètres machine et les variables géométriques, une campagne expérimentale, également appelée *c1*, a été réalisée [49]. Pour cela, des cordons ont été fabriqués. Chaque cordon est défini par un jeu de paramètre unique.

3.3.1 NATURE DES PARAMETRES ET DES VARIABLES MIS EN JEU

Le procédé LMD-W est caractérisé par :

- 3 paramètres machine : ils règlent le procédé,
- 6 variables qualifiant la pièce ou le cordon final (Figure 3.1).

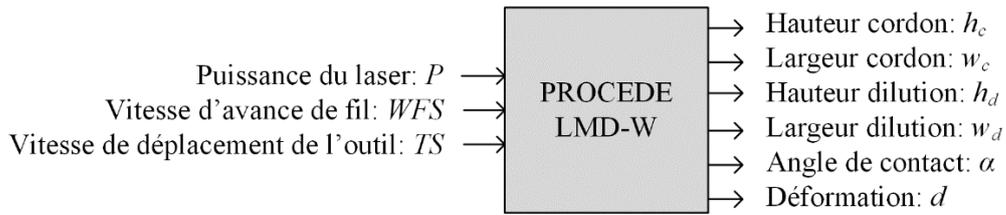


Figure 3.1 Relations entre les paramètres d'entrée et les sorties étudiées pour le procédé LMD-w

A partir de cette expérimentation, nous qualifions l'existence de liens ou de relations entre les paramètres machine et les variables géométriques. L'objectif est de conduire ensuite à la réalisation d'un premier modèle qui permettra de définir la géométrie d'un cordon en fonction des paramètres machine. Les éléments impliqués sont définis dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4 Paramètres machine et variables géométriques observées pour le procédé LMD-w

Nature	Nom	Symbole	Unité	Domaine
Paramètres machine	Puissance du laser	P	W	[1680; 2000]
	Vitesse d'avance de fil	WFS	m/min	[1,5; 2,1]
	Vitesse de déplacement de l'outil	TS	m/min	[0,2; 0,6]
Variables géométriques	Hauteur de cordon	h_c	mm	Mesuré au microscope
	Hauteur de dilution	h_d	mm	
	Largeur de cordon	w_c	mm	
	Largeur de dilution	w_d	mm	
	Angle de contact	α	°	
	Déplacement du substrat	d	mm	

3.3.2 METHODOLOGIE ET EXPERIMENTATION

Pour des questions de soudabilité il est nécessaire que les matériaux du fil et du substrat soient identiques(Ranatowski *et al.* [108]).

Pour fabriquer les cordons, nous avons utilisé comme substrat, support d'impression, des plaques de TA6V. Le fil employé est un fil de TA6V d'un diamètre de 1.2mm. Les substrats ont été poncés à l'aide d'une ponceuse orbitale avec un papier de grain P60 puis dégraissés à l'alcool isopropylique (IPA). Ce traitement de surface permet d'éliminer les impuretés et d'améliorer l'absorptivité du laser en surface.

Afin d'empêcher tout mouvement de translation dans le plan (X,Y) pendant le procédé, le substrat est bridé.

Pour se prémunir du phénomène d'oxydation, les impressions ont été réalisées dans une cuve inertée à l'argon (Ar).

La cellule robotisée utilisée pour cette expérience est composée d'un robot 6 axes KUKA KR60-HA et de son contrôleur KUKA KRC4. L'énergie est fournie par la tête laser, PRECITEC CoaxPrinter, montée sur le robot. Le dépôt de fil est coaxial au laser, Figure 3.2.

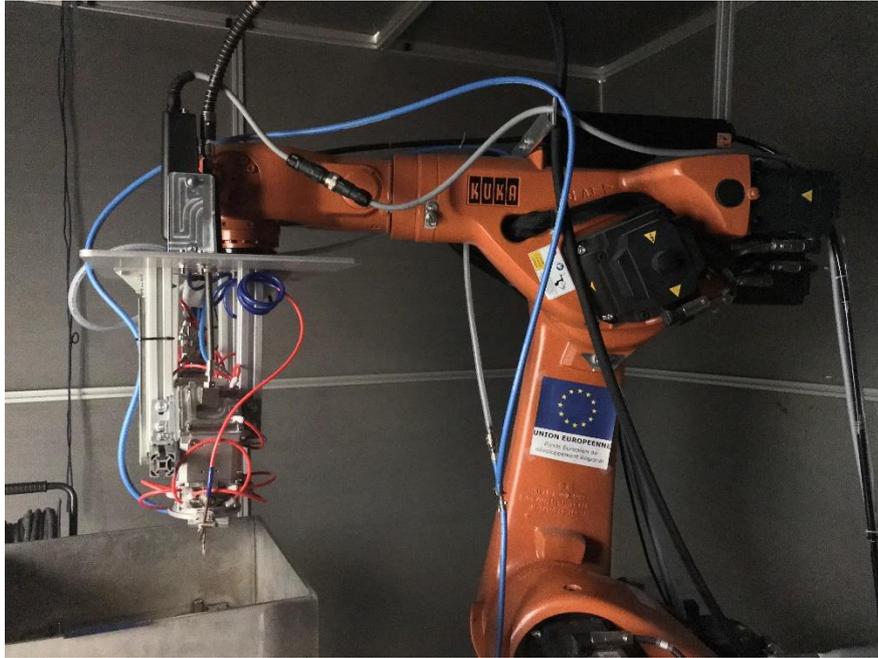


Figure 3.2 Robot KUKA KR60-HA et la tête Precitec CoaxPrinter

Pour l'analyse microscopique, chaque cordon a été découpé en 3 échantillons à $\frac{1}{4}$ de la longueur, $\frac{1}{2}$ de la longueur et $\frac{3}{4}$ de la longueur à l'aide d'un disque diamanté STRUERS 20S25 et d'une tronçonneuse STRUERS Labotom 5.

Les échantillons ont ensuite été enrobés dans de la résine. Ils étaient polis miroir et attaqués chimiquement au réactif de Kroll. Le réactif de Kroll révèle la microstructure, permettant de déterminer la dilution lors de l'analyse microscopique avec le LEICA DM 1750M et sa suite logiciel LAS v14.2.

Dans cette expérimentation 9 cordons de 100 mm chacun ont été imprimés. Un substrat (150mmx60mmx5mm) était associé à chaque cordon.

A. PLAN D'EXPERIENCE DE TAGUCHI

Pour cette expérimentation, le nombre de cordons à fabriquer a été déterminé par le plan d'expérience de Taguchi. Par définition « un plan d'expérience est une suite d'essais, organisée à l'avance de manière à déterminer en un minimum d'essais et avec un maximum de précision, l'influence de multiples paramètres sur une ou plusieurs réponses » [109]. Pour étudier l'influence des trois paramètres d'entrées (P, WFS et TS) sur nos sorties, nous les étudions sur trois niveaux chacun. Un niveau représente un réglage. Nous noterons -1 le niveau bas, 0 le niveau moyen et +1 le niveau haut tels que :

$$\begin{cases} \text{valeur}(-1) < \text{valeur}(0) < \text{valeur}(+1) \\ \text{valeur}(0) = \frac{\text{valeur}(-1) + \text{valeur}(+1)}{2} \end{cases}$$

Il est possible de réaliser un plan complet pour étudier l'influence de ces 3 paramètres à 3 niveaux sur les sorties. Ce plan complet nous amènerait à réaliser un total de 27 essais (3^3). Pour des raisons économiques, il est possible de réduire ce nombre d'essais grâce à la méthode

de Taguchi. La méthode du plan d'expérience, développée par Genichi Taguchi repose sur le concept de l'orthogonalité.

L'orthogonalité permet de réduire de nombre d'essais tout en garantissant le même niveau d'informations pour l'analyse des résultats. La condition d'orthogonalité permet d'étudier l'effet d'un facteur, un paramètre d'entrée, indépendamment des autres facteurs. Afin de réduire le nombre d'essais, nous sommes amenés à déterminer le nombre de degrés de liberté (ddl) du modèle de comportement supposé et son plus petit commun multiple (PPCM).

- Le degré de liberté (ddl) pour un paramètre d'entrée est le nombre de valeurs nécessaire à calculer pour en déduire les autres; il permet de définir le minimum d'essais pour le modèle étudié. C'est une condition nécessaire mais pas suffisante. Pour réellement définir ce nombre minimal il faut également calculer le PPCM du modèle.
- Pour calculer le PPCM du modèle, on utilise un tableau à double entrées avec les niveaux de chaque paramètre.

Le nombre minimal d'essais à réaliser sera conditionné par la valeur la plus importante entre le ddl et le PPCM. Ainsi si le ddl est supérieur au PPCM alors le nombre minimal d'essais sera défini par le ddl, inversement si le PPCM est supérieur au ddl.

Dans notre cas, nous avons 3 paramètres à 3 niveaux. Le modèle que nous étudions est un modèle réponses/paramètres sans couplage entre les paramètres machine. Ce modèle est exprimé par la relation (3.8)

$$Y = M + P + WFS + TS \quad (3.8)$$

avec Y la réponse observée, M la moyenne des valeurs mesurées pour la réponse Y , P la puissance du laser, WFS la vitesse d'avance de fil et TS la vitesse de déplacement de l'outil.

Etape 1 : Calcul du degré de liberté pour le modèle.

Tableau 3.5 Calcul du degré de liberté du modèle étudié

Paramètres d'entrée	Nombre de niveaux	ddl
M	-	1
P	3	2
WFS	3	2
TS	3	2
ddl total du modèle		7

Le nombre de degré de liberté du modèle (3.8) est 7. Pour le moment, le nombre minimal d'essais à réaliser est 7. Calculons le PPCM.

Etape 2 : Calcul du plus petit commun multiple.

Tableau 3.6 Calcul du plus petit commun multiple du modèle étudié

P	3	*	*	*
WFS	3	9	*	*
TS	3	9	9	*
Paramètres d'entrée du système	Nb de niveaux	3	3	3
		P	WFS	TS

A la lecture des Tableau 3.6 et Tableau 3.5, PPCM=9 et ddl=7. Le résultant limitant est le PPCM car pour satisfaire cette règle il faut un le minimum d'essais à réaliser de 9.

Il nous reste maintenant à choisir la table orthogonale de Taguchi. Les tables sont annotées $L_T(n^C)$, avec n le nombre de niveaux des facteurs, C le nombre de facteurs (de colonnes), T le nombre d'essais (de lignes). La table se rapprochant le plus de notre configuration $L_9(3^3)$ est la table de Taguchi $L_9(3^4)$. On obtient ainsi le Tableau 3.7 qui est la table de Taguchi idéale pour notre campagne expérimentale. Le paramètre le moins facile à modifier se situe dans la première colonne. Ainsi, le paramètre le plus facile à régler se situe dans la dernière colonne de la table. Dans notre cas, il n'y a pas de paramètre plus facile à régler qu'un autre. Par conséquent, les paramètres d'entrée machine sont placés de façon arbitraire dans les colonnes du Tableau 3.7.

Tableau 3.7 Table de Taguchi pour la campagne expérimentale

N° essai	Paramètres d'entrée		
	Puissance (W)	WFS (m/min)	TS (m/min)
1	-1	-1	-1
2	-1	0	0
3	-1	+1	+1
4	0	-1	0
5	0	0	+1
6	0	+1	-1
7	+1	-1	+1
8	+1	0	-1
9	+1	+1	0

B. CHOIX DES VALEURS POUR LES PARAMETRES D'ENTREE

Le choix des valeurs des paramètres machine doit respecter les règles de Taguchi et les règles métiers suivantes :

- Taguchi : Pour toute valeur d'un paramètre, une combinaison avec les deux autres paramètres d'entrée doit exister,
- Métiers : La valeur maximale de la vitesse d'outil (TS) doit être inférieure à la valeur maximale de la vitesse d'avance de fil (WFS) telle que $TS_{max} < WFS_{max}$
- Métiers : Le ratio défini comme étant le rapport de la vitesse d'avance de fil sur la puissance doit varier entre 0,75 et 1,25. Sachant que 1 est le ratio permettant d'avoir un dépôt homogène selon les travaux d'Ayed *et al.* [77],

Afin de déterminer tous les triplets possibles, un code python a été développé. Pour une valeur de P , une valeur de WFS est choisie. La combinaison de ces deux valeurs s'appelle un doublet. Par incrémentation, l'algorithme passe en revue l'ensemble des valeurs de TS comprises entre 0.2 et 0.6 m/min. Pour chaque valeur prise par TS , le doublet se transforme en triplet. L'algorithme extrait les triplets répondant aux critères précédemment cités. Une fois les valeurs de TS parcourues, il passera à la valeur de WFS suivante, réalisera la même sélection. Jusqu'à ce que l'ensemble des triplets (P , WFS et TS) soient trouvés. Cet algorithme est illustré sur la Figure 3.3.

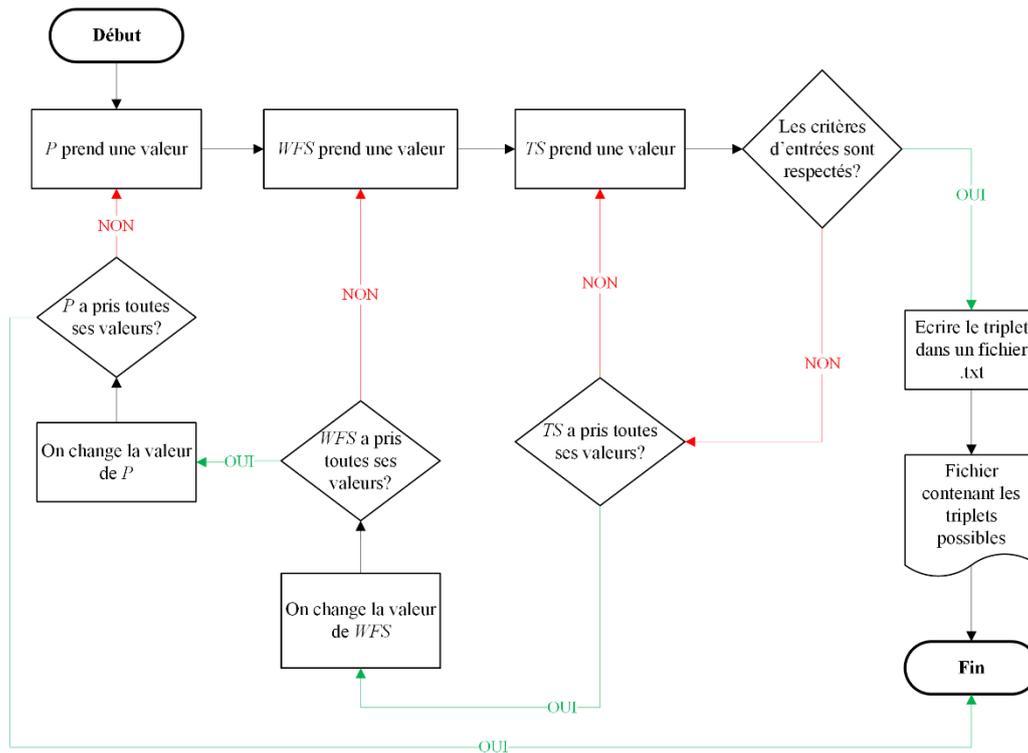


Figure 3.3 Algorithme du code python proposé pour déterminer les triplets de fabrication

L'ensemble des triplets (P , WFS et TS) possibles sont regroupés dans un fichier texte dans lequel nous prenons les trois niveaux pour nos trois paramètres. L'ensemble des valeurs obtenus qui résultent du plan de Taguchi sont présentés dans le Tableau 3.8. Nous avons donc utilisé ces valeurs pour fabriquer neuf cordons (i.e. neuf essais) respectant les valeurs d'entrée ci-après présentées (Tableau 3.8).

Tableau 3.8 Valeurs des niveaux pour les paramètres d'entrée

N° essai	Paramètres d'entrée		
	Puissance (W)	WFS (m/min)	TS (m/min)
1	1680	1.5	0.2
2	1680	1.8	0.4
3	1680	2.1	0.6
4	1840	1.5	0.5
5	1840	1.8	0.8
6	1840	2.1	0.2
7	2000	1.5	0.8
8	2000	1.8	0.2
9	2000	2.1	0.4

3.3.3 RESULTATS ET ANALYSES

Chaque cordon fabriqué est découpé en trois échantillons. Ces échantillons sont ensuite analysés au microscope. Le Tableau 3.9 regroupe la moyenne de ces trois mesures, par cordon, en fonction de la sortie et de la paramétrie d'entrée définie dans le Tableau 3.8.

Tableau 3.9 Paramètres machine et variables géométriques mesurées

N	Paramètres machine			Variables géométriques mesurées					
	P(W)	WFS(m/min)	TS(m/min)	d(mm)	h _c (mm)	h _a (mm)	w _c (mm)	w _a (mm)	α (°)
1	1680	1.5	0.2	1.978	2.148	2.2033	5.151	6.939	75
2	1680	1.8	0.4	0.892	1.742	1.2847	3.832	4.873	76
3	1680	2.1	0.6	1.357	1.533	0.9797	3.493	4.067	87
4	1840	1.5	0.4	1.235	1.353	1.5443	4.480	5.633	55
5	1840	1.8	0.6	1.125	1.213	1.1723	3.878	4.826	56
6	1840	2.1	0.2	1.910	3.038	2.0567	4.306	6.320	103
7	2000	1.5	0.6	0.443	0.960	1.2713	4.345	5.232	39
8	2000	1.8	0.2	1.635	2.361	2.6157	5.726	7.592	72
9	2000	2.1	0.4	1.177	1.783	1.4057	4.493	5.571	71

Pour analyser et formaliser les liens entre les paramètres d'entrée et les sorties, nous avons utilisé deux outils : le coefficient de corrélation et le test de la variance.

A. ANALYSE DU COEFFICIENT DE CORRELATION

L'analyse de la corrélation permet de déterminer s'il existe une relation entre deux variables. La corrélation permet de définir le type de relation :

- linéaire ou non-linéaire,
- positive ou négative,
- monotone ou non.

Les corrélations calculées sont regroupées sous forme matricielle. La forme matricielle permet de regrouper l'ensemble des coefficients de corrélation calculés dans un tableau des variables deux à deux. La forme graphique quant à elle permet de générer le nuage de points de deux variables, comme l'illustre la Figure 3.4.

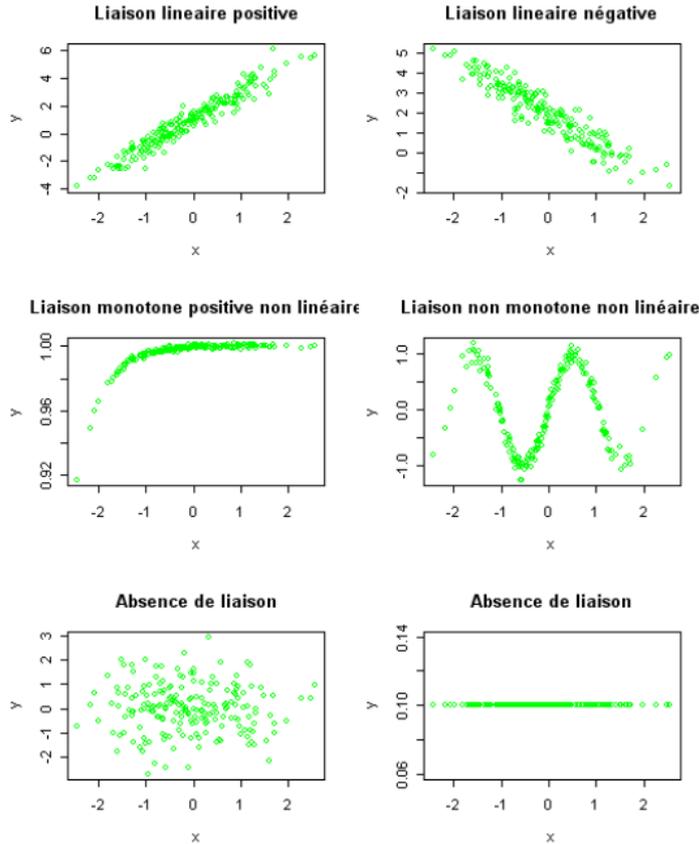


Figure 3.4 Exemples de relations linéaires, non linéaires, monotones, non monotones et exemples d'absence de liaisons

Il existe deux méthodes pour calculer le coefficient de corrélation,

- la méthode de Spearman qui permet de déterminer la monotonie de la relation entre deux variables quantitatives,
- la méthode de Bravais-Pearson, appelée couramment la méthode de Pearson qui permet de déterminer la linéarité de la relation entre deux variables quantitatives.

Les relations entre les paramètres d'entrée machine et les variables géométriques peuvent être non linéaires. Afin de déterminer la linéarité des relations, nous utiliserons la méthode de Pearson pour calculer le coefficient de corrélation. La corrélation de Pearson est la méthode la plus courante pour quantifier une relation entre deux variables. Elle permet de mesurer le degré de linéarité dans la relation, entre deux variables quantitatives, par un coefficient. Ce coefficient est calculé à l'aide de la formule (3.9).

$$r_{XY} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (3.9)$$

Avec X et Y les variables observées, r_{XY} le coefficient de corrélation de Pearson entre les variables X et Y , x_i la valeur de la variable X pour la $i^{\text{ème}}$ observation, y_i la valeur de la variable Y pour la $i^{\text{ème}}$ observation et n le nombre d'observation.

Le domaine de variation de r_{XY} est situé entre -1 et +1. Les résultats sont considérés significatifs si la valeur-p, p-value, est inférieure à 0.05. Les interprétations possibles sont les suivantes :

- une variable est corrélée à elle-même $r_{XX} = r_{YY} = 1$,
- si la valeur absolue du coefficient de corrélation r_{XY} est comprise entre 0.8 et 0.6, nous considérerons que les variables tendent à suivre une relation linéaire (positive, si le signe devant la valeur du coefficient est positif ou négative si le signe devant la valeur du coefficient est négatif),
- si la valeur absolue du coefficient de corrélation est supérieure à 0.8, nous considérons les variables comme fortement corrélées.

La Figure 3.5 regroupe les coefficients de corrélation de Pearson calculés pour l'ensemble des paramètres que nous avons traité. De plus, les cases en surbrillance mettent en avant les résultats pour lesquelles, $p\text{-value} < 0.05$. Nous représentons en rouge, les relations linéaires négatives et en bleu, les relations linéaires positives. Nous remarquons ainsi que :

- WFS et α tendent à suivre une relation linéaire positive,
- TS et w_c ainsi que TS et h_c suivent une relation linéaire négative,
- TS et h_d ainsi que TS et w_d suivent une relation linéaire négative,
- TS et d tendent à suivre une relation linéaire négative.

Nous pouvons également remarquer que les sorties deux à deux, w_c et h_d , w_c et w_d ainsi que h_d et w_d , suivent des relations linéaires positives.

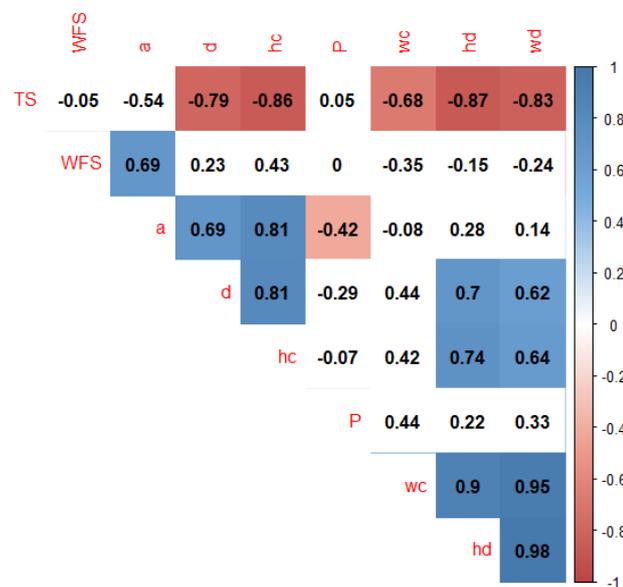


Figure 3.5 Matrice des coefficients de corrélation par la méthode de Pearson entre les paramètres d'entrée et les sorties

Par la suite, nous réalisons une analyse de la variance afin de vérifier si les résultats obtenus sont significatifs.

B. ANALYSE DE LA VARIANCE

Nous avons ensuite réalisé une analyse de la variance (Annexes 7.1) et le test de Fisher-Snedecor (Annexes 7.1.2).

Nous nous basons sur l'hypothèse nulle (H_0) qui considère que les variables ne sont pas indépendantes. Cette hypothèse est rejetée si F calculé est supérieure à $F_{Snedecor}$. Dans notre cas, la valeur de $F_{Snedecor}$ est issue de la table de Snedecor. Cette table se trouve en Annexes 7.1.3. Dans notre cas, la valeur de $F_{Snedecor}$ vaut 9.55 pour une p-value inférieure à 0.05.

Le Tableau 3.10 rassemble les résultats des coefficients du test de Fischer-Snedecor. Les résultats permettent de conclure que :

- la vitesse de déplacement de l'outil, TS , est le seul paramètre d'entrée à exercer une influence significative sur toutes les sorties géométriques observées (hors déplacement du substrat).
- la hauteur de cordon, h_c , dépend également de manière significative de la vitesse d'avance de fil WFS .
- seul l'angle de contact, α , dépend significativement des trois paramètres d'entrée du procédé LMD-w.

Tableau 3.10 Résultats du test de Fisher-Snedecor et les valeurs-p des sorties géométriques en fonction des paramètres machine

Paramètres machine		h_c	h_d	w_c	w_d	α	d
P	F	0.94	3.60	4.63	9.25	15.63	1.45
	p-value	0.4811	0.1594	0.1210	0.0521	0.0259	0.3617
WFS	F	13.27	2.53	2.57	5.17	42.14	0.92
	p-value	0.0324	0.2269	0.2236	0.1068	0.0064	0.4882
TS	F	57.21	67.48	10.93	68.14	23.50	8.70
	p-value	0.0041	0.0032	0.0419	0.0032	0.0147	0.0564

Pour appuyer ces propos nous proposons de calculer l'importance de chaque paramètre machine pour chaque variable géométrique.

Cette importance, notée i , se calcule en faisant le rapport entre la somme du carré des écarts du paramètres notée $S_{paramètre}$ et la somme du carré des écarts du plan notée S_{plan} , définie par la relation (3.10). Les variables $S_{paramètre}$ et S_{plan} sont définies dans l'annexe 7.1.2 dans le Tableau 3.15.

$$i_{paramètre} = \frac{S_{paramètre}}{S_{plan}} \quad (3.10)$$

Les résultats sont regroupés sur la Figure 3.6, où le pourcentage d'influence de chaque paramètre est exprimé en fonction de la variable géométrique observée.

La vitesse de l'outil TS est le paramètre ayant une influence supérieure sur les variables géométriques comparée à la puissance et à la vitesse d'avance de fil. Son influence va de 60% pour la largeur du cordon à 92% pour la hauteur de dilution. Ce résultat n'est cependant pas applicable pour l'angle de contact, qui est la variable géométrique la plus influencée par la vitesse d'avance de fil à 52%.

En revanche la puissance du laser, responsable de la fusion du fil, n'a pas autant d'influence que nous pourrions le penser. En effet, son influence va de 1% pour la hauteur de cordon h_c à 26% pour la largeur de cordon w_c .

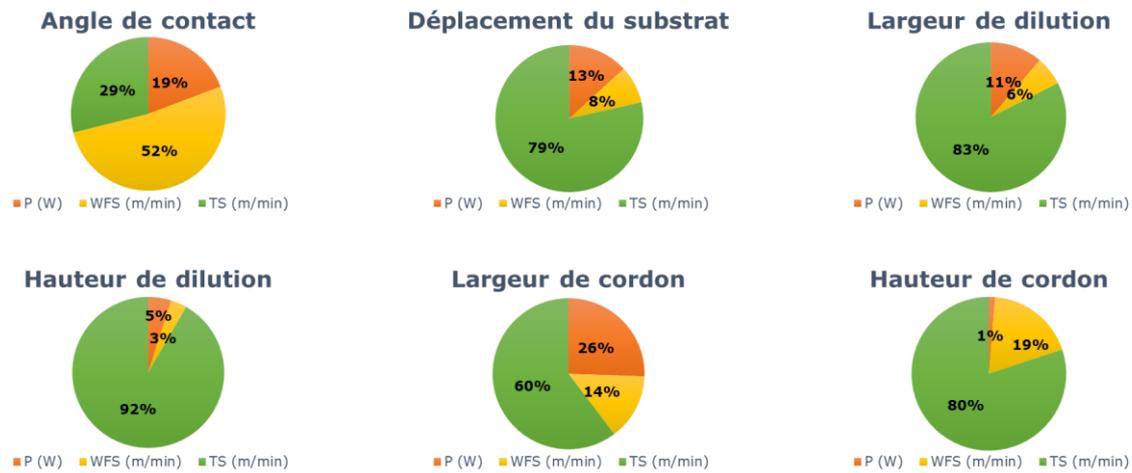


Figure 3.6 Pourcentage d'influence des paramètres d'entrée sur les sorties

3.4 IMPACTS DES PARAMETRES MACHINE SUR LES VARIABLES GEOMETRIQUES

Dans cette section, une nouvelle expérimentation, basée sur les travaux d'Ayed *et al.* [77], est réalisée. Cette expérimentation est divisée en deux campagnes. L'objectif de ces campagnes est de déterminer les impacts des paramètres machine du procédé (P , WFS et TS) sur les variables géométriques (h_c , h_d , w_c , w_d , α).

Contrairement à la première expérimentation, une interaction entre les paramètres de puissance laser, P , et la vitesse d'avance de fil, WFS , est considérée. Cette interaction, nommée ratio et notée r , s'exprime en $m \cdot \min^{-1} \cdot kW^{-1}$. De plus, pour garantir un dépôt de matière homogène par le procédé LMD-w, le ratio r , tel que $r = \frac{WFS}{P}$, doit tendre vers 1 [77].

Pour la première campagne de cette expérimentation, les valeurs de P et WFS sont fixées de sorte qu'elles soient identiques à celles des travaux d'Ayed *et al.* Ainsi nous prenons P à 1400W et WFS à 1.2m/min. De ce fait, la valeur du ratio est de $0.85 m \cdot \min^{-1} \cdot kW^{-1}$. Le réglage de la machine LMD-w nous permet de faire varier le paramètre TS entre 0.2m/min et 0.6m/min, avec un pas d'incrément de 0.1m/min.

Pour la deuxième campagne, la vitesse d'outil TS est fixée à 0.4 m/min. Les paramètres P et WFS varient. Les bornes pour la puissance du laser sont 1250W et 2550W avec un pas de 100W. Les bornes de la vitesse d'avance de fil sont 1.2m/min et 2.5m/min avec une incrément de 0.1m/min. Ainsi, le ratio r est compris entre 0.96 et 0.98.

Le Tableau 3.11 regroupe les valeurs des paramètres pour la première et la deuxième campagne expérimentale.

Tableau 3.11 Tableau récapitulatif des valeurs des paramètres par campagne

Campagne 2.1	Campagne 2.2
P = 1400 W	P ∈ [1250;2550] W ΔP = 100 W
WFS = 1.2 m/min	WFS ∈ [1.2 ; 2.5] m/min ΔWFS = 0.1 m/min
TS ∈ [0.2 ; 0.6] m/min ΔTS = 0.1 m/min	TS = 0.4 m/min
r = 0.85 m.min ⁻¹ kW ⁻¹	r ∈ [0.96 ; 0.98] m.min ⁻¹ kW ⁻¹
Objectifs : Validation du protocole expérimental et de la méthodologie d'analyse microscopique	Objectif : Etudier la dilution en fonction des paramètres machine du procédé

3.4.1 METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

Tout comme la première expérimentation, nous utilisons des substrats de TA6V de dimensions similaires, 150mm x 60mm x 5mm. Le matériau du fil est le TA6V dont le diamètre est 1.2mm. Le robot, le contrôleur et la tête d'impression sont inchangés. L'arrivée du fil est toujours coaxiale au laser qui est notre source de chaleur. La cuve est inertée à l'Argon (Ar).

La préparation du substrat, la préparation des échantillons et l'analyse de ces derniers restent identiques. Le processus est résumé à l'aide de la Figure 3.7.

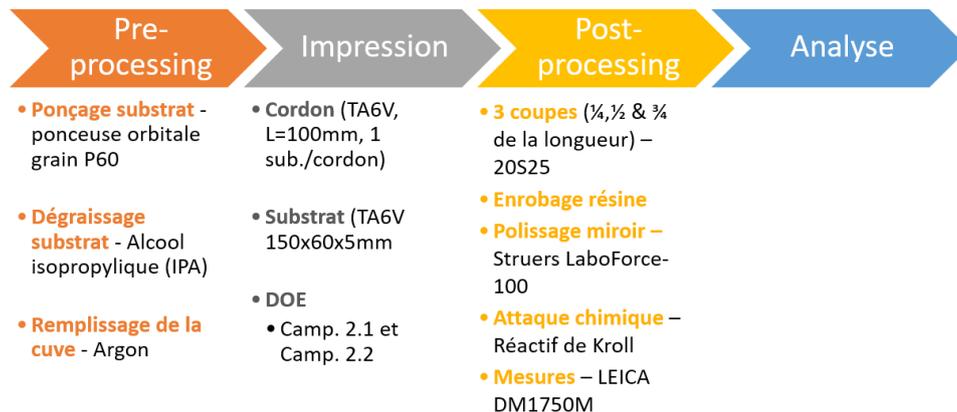


Figure 3.7 Processus de préparation du substrat et des échantillons pour le procédé LMD-w pour les campagnes expérimentales 1 et 2

3.4.2 RESULTATS ET ANALYSES

A. CAMPAGNE EXPERIMENTALE 2.1

Cette campagne expérimentale a pour objectifs de valider : le protocole expérimental et la méthodologie d'analyse employée. Pour cela, nous comparons nos résultats à ceux d' Ayed *et al.* [77]. En effet, nos cellules robotisées du procédé LMD-w sont identiques.

Le Tableau 3.12 regroupe la moyenne des mesures des trois échantillons par cordon. Au total, cinq essais ont été réalisés. Les trois premières colonnes comportent les valeurs des paramètres machine du procédé LMD-w. Ces valeurs sont dites « réelles ». En effet, il existe un décalage

entre la valeur commandée et la valeur réellement appliquée. Pour la suite de notre étude, nous ne considérerons que les valeurs réelles.

Tableau 3.12 Tableaux récapitulatif des valeurs des paramètres d'entrées et des sorties observées

P (W)	WFS (m/min)	TS (m/min)	r (m/min.kW)	d (mm)	h_c (mm)	h_d (mm)	w_c (mm)	w_d (mm)	α (°)
1403	1.195	0.2	0.85	2.08	2.084	1.916	4.143	5.810	81
1398	1.195	0.3	0.85	1.71	1.471	1.515	4.112	5.298	62
1419	1.205	0.4	0.85	1.78	1.776	1.242	3.838	4.774	55
1392	1.176	0.5	0.845	0.97	1.05	1.223	3.665	4.569	50
1403	1.197	0.6	0.85	1.13	0.948	1.1043	3.34	4.151	50

Pour répondre aux deux objectifs de cette campagne 2.1, nous représentons graphiquement les valeurs moyennes de la hauteur de cordon en fonction de la vitesse de déplacement TS d'Ayed *et al.* [77] et les valeurs moyennes de la hauteur de cordon issues de nos essais. Ces valeurs sont reportées sur un même graphique. Nous avons fait de même pour les valeurs de la largeur de cordon en fonction de la vitesse de déplacement de l'outil TS . Ces graphiques sont regroupés sur la Figure 3.8. En bleu nous retrouvons la courbe obtenue avec les valeurs d'Ayed *et al.* [77] et en orange la courbe obtenue avec nos résultats expérimentaux.

Cette campagne expérimentale 2.1, nous permet de dégager trois résultats. Ces résultats sont exprimés ci-après :

- les valeurs de hauteur de cordon d'Ayed *et al.* [77] sont supérieures à nos valeurs tandis que leurs valeurs de largeur de cordon sont inférieures aux nôtres. Ces valeurs permettent de conclure qu'à procédé de fabrication et paramétrie d'entrée machine identiques, la répétabilité de la machine n'est pas garantie. Cependant les tendances sont retrouvées.
- pour une vitesse de déplacement de l'outil TS fixée, lorsque nos valeurs mesurées pour la hauteur de cordon est inférieure à celles d'Ayed *et al.* [77], nos valeurs de largeur de cordon correspondantes sont supérieures aux leurs. Nous pouvons conclure que la hauteur de cordon et la largeur de cordon semblent être liées par une relation négative. En effet, lors de la fabrication, un volume de matière fini V est déposé formant un cordon. Ce cordon a une hauteur et une largeur. Ainsi, si la valeur de la hauteur de cordon diminue, la largeur de cordon augmente.
- lorsque la vitesse de déplacement de l'outil TS augmente, les valeurs de hauteur de cordon et de largeur de cordon diminuent. Ce résultat est en accord avec la campagne expérimentale 1 à la fin de laquelle nous avons conclu à une relation linéaire négative entre TS et h_c ainsi qu'entre TS et w_c (Figure 3.5).

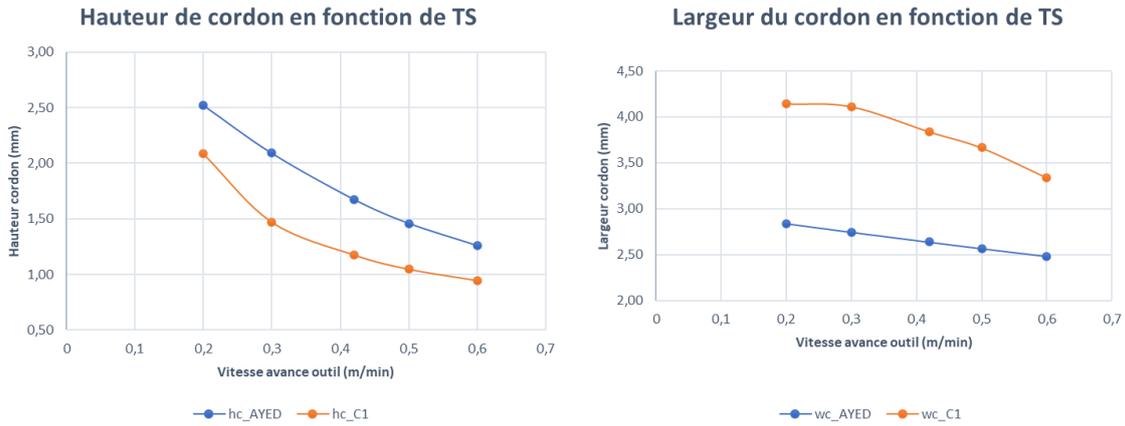


Figure 3.8 A gauche : courbe théorique et courbe expérimentale obtenues pour la hauteur de cordon, A droite : courbe théorique et courbe expérimentale obtenues pour la largeur de cordon

B. CAMPAGNE EXPERIMENTALE 2.2

Lors la campagne expérimentale 2.2, la vitesse de déplacement de l'outil *TS* est fixée à 0.4m/min et la puissance du laser *P* ainsi que la vitesse d'avance de fil *WFS* varient entre leurs extremums respectifs. Ces valeurs sont présentées dans le Tableau 3.11. Le ratio *r* est alors compris entre 0.96 et 0.98. Les valeurs moyennes des trois coupes par cordon et par sorties en fonction de la paramétrie d'entrée sont regroupées dans le Tableau 3.13.

Tableau 3.13 Valeurs des paramètres d'entrée et des sorties obtenues pour la campagne expérimentale 2.2

P (W)	WFS (m/min)	TS (m/min)	r (m/min.kW)	h_c (mm)	h_d (mm)	w_c (mm)	w_d (mm)	α (°)
1378	1.21	0.42	0.88	1.190	1.235	3.691	4.841	60
1253	1.22	0.42	0.97	1.332	1.518	3.205	4.709	74
1344	1.28	0.42	0.95	1.346	1.322	3.449	4.505	71
1453	1.38	0.42	0.95	1.362	1.275	3.713	4.719	65
1537	1.50	0.42	0.98	1.399	1.422	3.925	5.056	63
1646	1.58	0.42	0.96	1.413	1.320	4.136	5.132	61
1762	1.70	0.42	0.96	1.453	1.420	4.4	5.387	57
1853	1.79	0.42	0.97	1.453	1.451	4.565	5.635	57
1932	1.90	0.42	0.98	1.508	1.477	4.803	5.85	54
2056	1.98	0.42	0.96	1.532	1.573	4.844	5.940	56
2141	2.10	0.42	0.98	1.566	1.597	5.115	6.155	53
2242	2.16	0.42	0.96	1.589	1.679	5.213	6.323	50
2351	2.28	0.42	0.97	1.596	1.697	5.519	6.547	50
2442	2.38	0.42	0.97	1.618	1.754	5.561	6.719	50
2541	2.48	0.42	0.98	1.653	1.813	5.846	6.920	47

A la lecture du tableau ci-dessus, nous pouvons observer que lorsque la vitesse d'avance de fil WFS augmente, la hauteur et la largeur de cordon augmentent. En effet, en augmentant la vitesse d'avance de fil tout en maintenant la vitesse de déplacement de l'outil fixe, le volume de matière fini V déposé sur le substrat augmente également.

De même, nous remarquons que pour une vitesse de déplacement de l'outil TS , lorsque la puissance augmente, la hauteur de dilution, h_d , et la largeur de dilution, w_d , augmentent. Plus la puissance du laser augmente plus l'énergie reçue par la pièce augmente. Cette énergie, notée E dont l'unité est le Watt seconde, $W/m^2.s$, est le rapport entre la puissance du laser P et la vitesse de déplacement TS multipliée par le diamètre du fil, ϕ_{fil} . Elle s'exprime par la formule (3.11).

$$E = \frac{P}{\phi_{fil} \cdot TS} \quad (3.11)$$

Ainsi, nous proposons d'étudier la relation qui peut exister entre la hauteur de dilution et la largeur de dilution. Pour cela, nous représentons la hauteur de dilution en fonction de la largeur de dilution (Figure 3.9). Pour notre analyse, nous pouvons séparer la Figure 3.9 en deux zones A et B. La répartition des points dans la première zone tend à être aléatoire. Dans cette zone, la hauteur de dilution et la largeur de dilution ne suivent pas de loi ou de relation identifiable. La deuxième zone se situe pour une largeur de cordon supérieure à 5.3mm. Dans cette zone, la hauteur de dilution et la largeur de dilution tendent à suivre une relation linéaire positive.

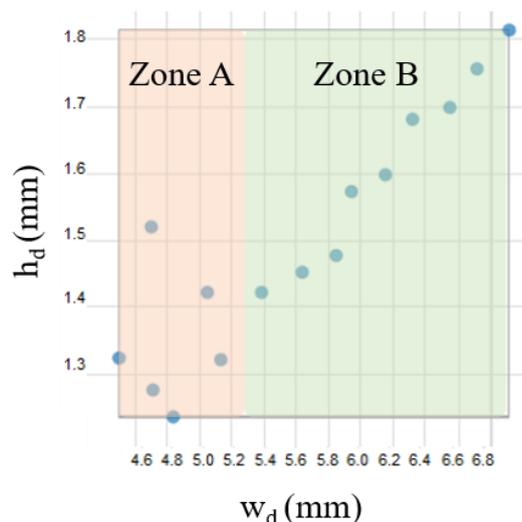


Figure 3.9 Hauteur de dilution en fonction de la largeur de dilution

Nous utilisons une matrice scatter plot pour la Figure 3.10. Cette matrice de graphiques, nous permet de visualiser en parallèle le graphique de h_d en fonction de w_d (à gauche) et les valeurs de l'énergie E (à droite). Sur ces graphiques, les six points appartenant à la Zone A sont mis en surbrillance orange. Ainsi, nous remarquons qu'ils sont désordonnés lorsque la valeur de l'énergie E est inférieure à $2.0 \cdot 10^8 W.s$. Cette valeur est appelée valeur seuil, et est notée E_{min} . Il semblerait donc que pour pouvoir contrôler la dilution (hauteur et largeur), il ne faille pas passer en deçà du seuil minimal d'énergie E_{min} .

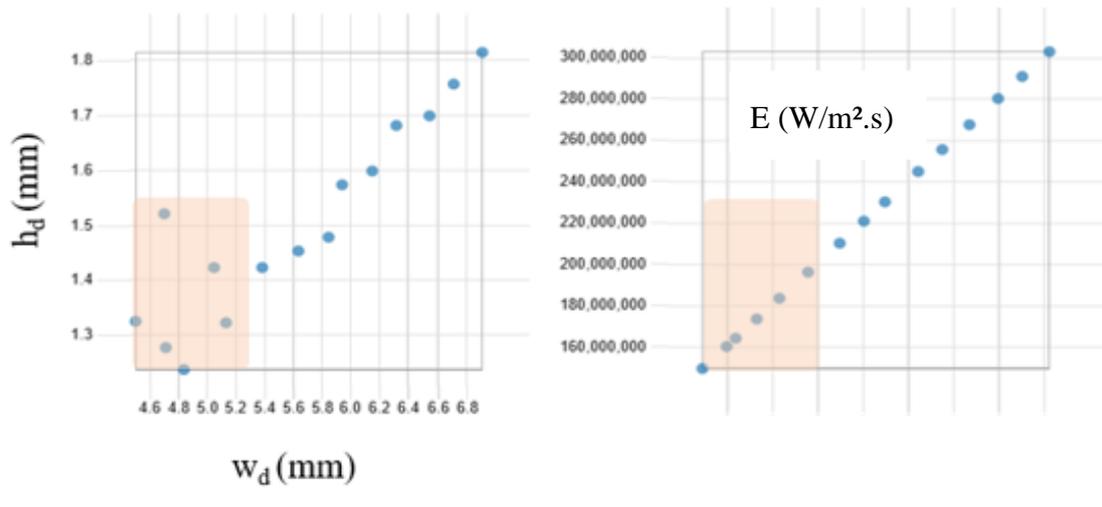


Figure 3.10 Limite du domaine pour le contrôle de la relation entre la hauteur de dilution et la largeur de dilution

Pour conclure dans cette section, une campagne expérimentale divisée en deux expériences (2.1 et 2.2) a été réalisée. Ces expériences nous ont permis de :

- montrer que le procédé de fabrication additive, LMD-w, à montage identique, n'est pas répétable (campagne expérimentale 2.2),
- retrouver le résultat de la campagne expérimentale 1 : la vitesse de déplacement de l'outil et la géométrie du cordon suivent une relation linéaire négative (campagne expérimentale 2.1),
- montrer qu'il existe une relation négative entre la hauteur de cordon et la largeur de cordon lorsque P et WFS sont fixes et TS augmente (campagne expérimentale 2.1),
- montrer que lorsque la valeur de P augmente et celle de TS reste constante, l'énergie E reçue par la pièce durant la fabrication augmente. Donc la hauteur de dilution, h_d , et la largeur de dilution, w_d , augmentent (campagne expérimentale 2.2),
- montrer que lorsque la valeur de E est inférieure à $2 \cdot 10^8 \text{W.s}$, le comportement de la dilution est aléatoire (campagne expérimentale 2.2).

Afin de valider toutes les relations trouvées entre les paramètres d'entrée machine et les sorties géométriques, nous devons vérifier que les mesures comportent le moins d'incertitude possible.

3.5 ETUDE DE L'INFLUENCE DE L'INCERTITUDE DE MESURE SUR LES RELATIONS ENTREES/SORTIES

L'objectif de cette étude est de quantifier l'influence de la mesure des opérateurs, personne qui réalise les mesures, et de la variabilité du mesurande sur l'incertitude de mesure. À cette fin, cinq opérateurs ont effectué le test dans des conditions appelées conditions de reproductibilité.

3.5.1 DEFINITION DE LA REPRODUCTIBILITE

D'après la norme JCGM 100 :2008 du BIPM [106], la reproductibilité des résultats de mesurage est *l'écart entre les résultats de mesurages du même mesurande, mesurages effectués en faisant varier les conditions de mesure. Les conditions de mesure, ou conditions de reproductibilité peuvent varier en fonction de :*

- *le principe de mesure,*
- *la méthode de mesure,*
- *l'observateur,*
- *l'instrument de mesure,*
- *l'étalon de référence,*
- *le lieu,*
- *les conditions d'utilisation,*
- *le temps.*

La reproductibilité peut s'exprimer quantitativement à l'aide des caractéristiques de dispersion des résultats.

3.5.2 PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Nous souhaitons donc étudier l'influence de la mesure en fonction de l'opérateur et du mesurande. Parmi les conditions de reproductibilité, nous considérons que les conditions de temps et d'étalonnage n'ont pas d'influence sur les mesures réalisées car tous les opérateurs effectuent le test, le même jour, et que le microscope a été calibré de la même manière pour chaque opérateur par le superviseur.

A. METHODOLOGIE EMPLOYEE

Le matériel utilisé pour ce test est le microscope LEICA DM1750M et son logiciel LAS V14.2 ainsi que trois échantillons (trois coupes de cordons) pris aléatoirement parmi les échantillons des campagnes expérimentales précédentes.

Il a été demandé à cinq opérateurs, familier avec l'instrument de mesure, de mesurer ces trois échantillons cinq fois chacun et d'y mesurer les cinq variables géométriques : hauteur du cordon (h_c), hauteur de dilution (h_d), largeur de cordon (w_c), largeur de dilution (w_d) et l'angle de contact (α). Au total chaque opérateur a réalisé 75 mesures.

B. DESCRIPTIF DES ACTIONS

Initialement, l'opérateur sélectionne le premier échantillon à mesurer sur le logiciel du microscope. Grâce à l'outil « mesure-sélection » pour les hauteurs et largeur et l'outil « angle-3points », l'opérateur réalise les cinq mesures, illustrées sur la Figure 3.11, dans l'ordre suivant :

- hauteur de cordon, h_c , (coupe microscopique **b**),
- hauteur de dilution, h_d , (coupe microscopique **d**),
- largeur de cordon, w_c , (coupe microscopique **a**),
- largeur de dilution, w_d , (coupe microscopique **c**) et
- angle de contact, α , (coupe microscopique **e**).

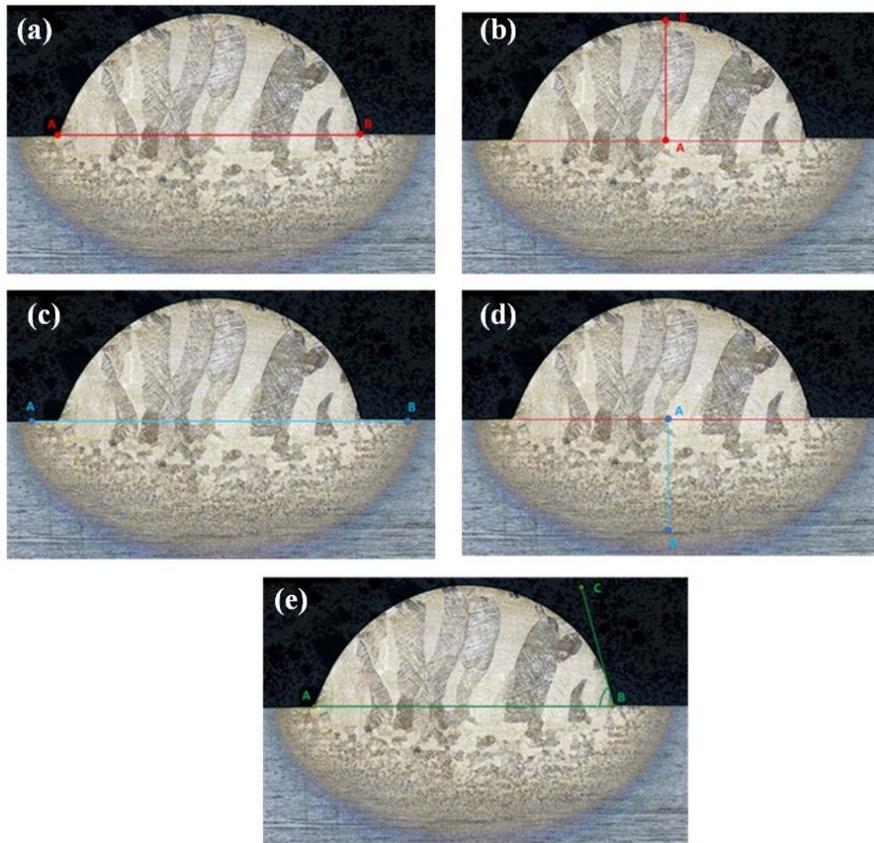


Figure 3.11 Emplacement des points A, B et C pour (a) la largeur de cordon, (b) la hauteur de cordon, (c) la largeur de dilution, (d) la hauteur de dilution et (e) l'angle de contact pour les mesures au microscope

Une fois toutes les mesures effectuées, l'opérateur sélectionne le deuxième échantillon puis le troisième échantillon. L'opérateur répète ces tâches cinq fois par échantillon. La Figure 3.12 schématise les tâches de l'opérateur pour cette étude.

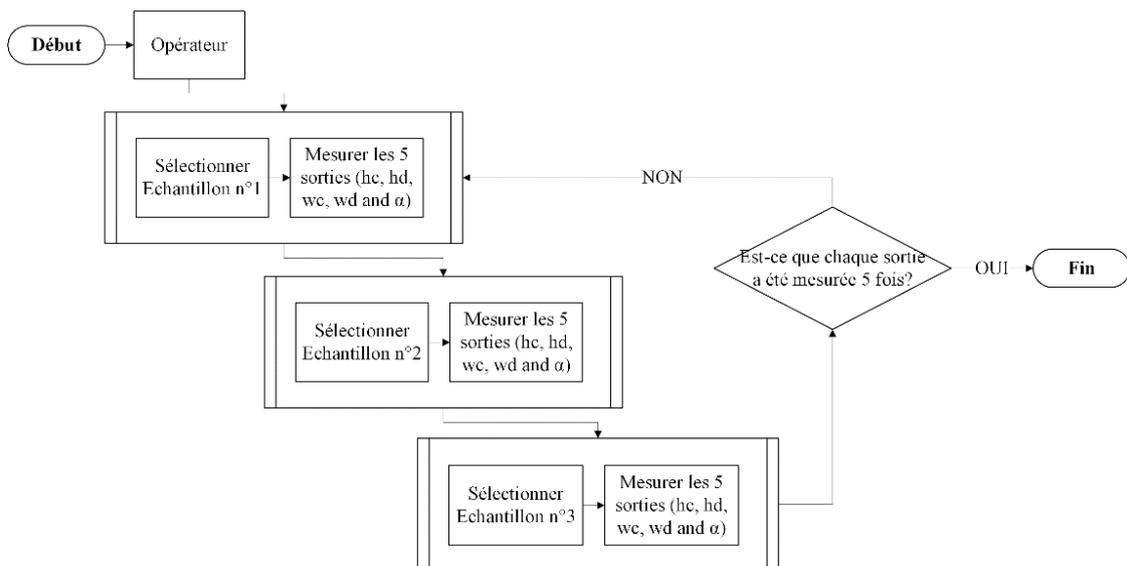


Figure 3.12 Ordre des tâches de l'opérateur pour l'étude sur l'influence de la mesure

Une fois l'ensemble des 75 mesures réalisé par l'opérateur, le superviseur du test relève les valeurs dans un tableur.

3.5.3 ANALYSE DES RESULTATS

Chaque opérateur a mesuré cinq variables géométriques (hauteur de cordon, largeur de cordon, hauteur de dilution, largeur de dilution et angle de contact) cinq fois par échantillon. Le test comprend trois mêmes échantillons pour les cinq opérateurs pris au hasard parmi 96 possibles. Chaque opérateur réalise au total 75 mesures.

Les valeurs ont été relevées par le superviseur et notées dans un tableur. Les trois variances sont ensuite calculées :

- la variance intrasérie (S_r^2), soit la répétabilité de la méthode employée,
- la variance intersérie (S_g^2), soit la répétabilité de l'opérateur,
- la variance totale ($S^2 = S_r^2 + S_g^2$). Elle représente la répétabilité de la méthode employée couplée à celle de l'opérateur.

A noter que si la variance intersérie S_g^2 est négative alors nous prendrons pour valeur 0.

A. DEFINITION DE LA VARIANCE POUR L'INCERTITUDE

Pour déterminer les trois variances, il est nécessaire dans un premier temps de calculer :

- la moyenne des répétitions des mesures par échantillon, par sortie et par opérateur,
- l'écart-type expérimental des répétitions des mesures par échantillon, par sortie et par opérateur,
- la variance des répétitions des mesures par échantillon et par sortie. La variance est l'écart-type au carré.

Dans un second temps, on détermine :

- la variance intrasérie, S_r^2 . Cette variance correspond à la répétabilité de la méthode. Elle est déterminée par échantillon et par sortie. La formule pour calculer la variance des moyennes est exprimée par la relation (3.12)

$$S_r^2 = \frac{1}{\text{Nombre opérateur} - 1} \times \sum_i (x_i - \bar{x}_i)^2 \quad (3.12)$$

Avec x_i la valeur de la $i^{\text{ème}}$ mesure et \bar{x}_i la moyenne arithmétique des valeurs de x pour un échantillon donné.

- la variance intersérie, S_g^2 (3.13) correspond à l'effet de l'opérateur sur la fidélité de la mesure.

$$S_g^2 = \text{Variance des moyennes} - \frac{S_r^2}{\text{Nombre de répétitions des mesures}} \quad (3.13)$$

- la variance totale, notée S , est telle que :

$$S = S_r^2 + S_g^2 \quad (3.14)$$

Afin de généraliser au mieux les intervalles d'incertitudes, on exprime les intervalles avec des pourcentages que nous appellerons Coefficient de Variance (CV) tels que calculés à l'aide des formules (3.15) à (3.17).

$$CV_{\text{répétabilité}} = \frac{\sqrt{S_r^2}}{\text{Moyenne}} \times 100 \quad (3.15)$$

$$CV_{\text{opérateur}} = \frac{\sqrt{S_g^2}}{\text{Moyenne}} \times 100 \quad (3.16)$$

$$CV_{\text{total}} = \frac{\sqrt{\text{Variance totale}}}{\text{Moyenne}} \times 100 \quad (3.17)$$

B. RESULTATS ET ANALYSE

Pour analyser les résultats issus de cette étude sur l'incertitude de mesure, nous calculons les moyennes, les écart-types et la variance des répétitions de mesures par opérateur, par sortie et par échantillon. L'ensemble des mesures et des calculs est présent en Annexes 7.2. Ces valeurs nous permettent de déterminer le coefficient de variance pour la répétabilité de la méthode, pour l'influence de l'opérateur et le coefficient de variance totale par sortie. Ces résultats seront regroupés présentés dans le Tableau 3.14.

Tableau 3.14 Valeurs des coefficients de variance (CV) moyens par sortie

	CV répétabilité (%)	CV opérateur (%)	CV total (%)
h_c	0.3608	0.1049	0.3776
h_d	4.0494	4.6031	6.2490
w_c	0.8568	0.0671	0.8773
w_d	1.0566	0.5445	1.2137
α	1.5500	0.3159	1.5968

A la lecture de ce tableau, nous pouvons constater que :

- la méthode utilisée pour mesurer les variables au microscope est validée car chaque erreur conduit à une incertitude inférieure à 10%,
- les valeurs de $CV_{\text{opérateur}}$ sont inférieures à celles de $CV_{\text{répétabilité}}$ pour la hauteur de cordon, la largeur de cordon, la largeur de dilution et l'angle de contact. Ce qui veut dire que la définition de la mesurande, points à sélectionner pour mesures ces grandeurs, génère plus d'incertitudes que l'opérateur dans sa capacité à répéter une même tâche,
- la hauteur de dilution (h_d) est la mesurande la plus incertaine à mesurer avec un pourcentage total de 6.249%. Cela peut facilement s'expliquer par la zone de « floue » où il est difficile de différencier la partie diluée du substrat,
- la hauteur du cordon (h_c) est la mesurande la plus certaine à mesurer avec un pourcentage total de 0.38%. En effet, le contraste entre la résine et le métal est facilement identifiable,
- la mesure de l'angle de contact (α) est plus incertaine que la mesure de la largeur du cordon (w_c) et la largeur de dilution (w_d).

Sur la base de ces constats, nous pouvons conclure que l'effet « opérateur » a moins d'influence sur l'incertitude de mesure que la variabilité de la mesurande, sauf pour la hauteur de dilution (h_d). De plus, nous choisissons, ici, d'exprimer chaque sortie avec son incertitude de mesure comme étant $X = x \pm i\%$, avec X la mesurande, x la valeur de la mesure réalisée et i le

pourcentage d'incertitude total appelé CV_{total} . Nous obtenons ainsi chaque sortie avec son incertitude telle que :

$$H_c = h_c \pm 0.38\%$$

$$H_d = h_d \pm 6.25\%$$

$$W_c = w_c \pm 0.88\%$$

$$W_d = w_d \pm 1.21\%$$

$$A = \alpha \pm 1.60\%$$

3.5.4 APPLICATION DES RESULTATS A L'ESPACE DE CONCEPTION

Nous appliquons l'incertitude mesurée des sorties déterminée précédemment dans notre espace de conception. Cet espace de conception regroupe les données provenant des différents échantillons mesurés issus des impressions réalisées lors des campagnes expérimentales précédentes. Cet espace de conception est constitué des paramètres machine du procédé et des variables géométriques de 31 cordons fabriqués. Pour rappel, nous considérons comme paramètres machine du procédé LMD-w :

- la puissance laser P ,
- la vitesse d'avance de fil WFS et
- la vitesse de déplacement de l'outil TS

et, comme variables géométriques :

- la hauteur de cordon h_c ,
- la hauteur de dilution h_d ,
- la largeur de cordon w_c ,
- la largeur de dilution w_d et
- l'angle de contact α .

Sur la base des résultats de nos expériences, nous avons introduit l'incertitude dans un espace de conception. Notre espace de conception se compose de cinq variables géométriques (h_c , h_d , w_c , w_d et α) et de trois paramètres d'entrée machine (P , WFS et TS), portant la dimension de notre espace de conception à 8. Pour peupler cet espace de conception, nous avons utilisé la base de cas expérimentale des campagnes expérimentales 1, 2.1 et 2.2. Cette base de cas comporte les valeurs réelles des paramètres machine et les moyennes des trois échantillons par cordon et par sortie. Au total, la base de cas contient 31 points de conception.

Cette implémentation permet de capitaliser les connaissances du procédé acquises pour les fabrications futures. L'application de cette incertitude sur les points de conception dans l'espace de conception permet de vérifier l'unicité du jeu de paramètres, c'est-à-dire que pour une géométrie, il n'existe qu'un seul jeu de paramètres d'entrée. Ainsi, au cours de l'exploration et de l'exploitation de l'espace de conception, l'ingénieur sera en mesure de sélectionner les paramètres d'entrée pour répondre à son problème de conception en fabrication additive.

Sur la Figure 3.13 et la Figure 3.14 nous présentons deux illustrations de l'introduction de l'incertitude dans l'espace de conception (représentée par des barres d'erreurs dans les nuages de points). Pour des raisons de lisibilité, nous avons choisi d'afficher les incertitudes dans des graphiques bidimensionnels (diagrammes x-y).

Sur la Figure 3.13, nous présentons les incertitudes de mesures appliquées aux valeurs géométriques (h_c et h_d) en fonction de la puissance laser P . L'incertitude sur la hauteur de

Dans une matrice de nuage de points, les paramètres d'entrée et les sorties du processus sont affichés ensemble deux par deux. Nous avons voulu présenter au moins une fois, une application de deux incertitudes de sortie pour la largeur de la dilution (w_d) et la largeur de cordon (w_c) sur la Figure 3.14

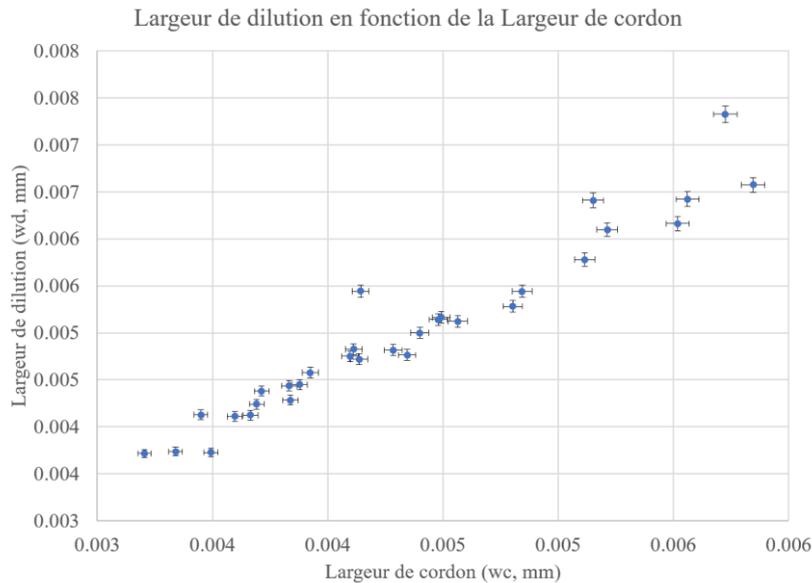


Figure 3.14 Largeur de dilution en fonction de la largeur du cordon avec leur incertitude de mesure (0.88% pour h_c et 1.21% pour h_d)

3.6 CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre était de répondre à la question de recherche Q1 à savoir :

« Quels sont les liens et les impacts entre les paramètres machine et les variables géométriques ? »

Pour cela, nous avons réalisé quatre études :

- étude 1 : étude sur la répétabilité de l'instrument de mesure,
- étude 2 : étude sur l'identification des relations entre les paramètres d'entrée du procédé LMD-w et les sorties géométriques,
- étude 3 : étude sur les impacts des paramètres d'entrée sur les sorties géométriques,
- étude 4 : étude sur l'influence de l'incertitude de mesures sur les relations entrées/sorties.

La première étude, en pointillés bleus sur la Figure 3.15 est une étude préliminaire qui nous a permis de vérifier la répétabilité de la mesure avec l'instrument (microscope LEICA DM1750M et sa suite logiciel LAS v14.2) pour les campagnes expérimentales futures.

Les études 2, 3 et 4 contenues dans le rectangle en pointillés verts, sont celles qui nous permettent de réellement répondre à notre question de recherche Q1.

Pour l'étude 2 sur l'identification des relations entre les paramètres d'entrée du procédé et les sorties géométriques, une campagne expérimentale a été réalisée. Cette campagne expérimentale a permis de mettre en lumière qu'il existe des relations entre les entrées et les

sorties mais aussi entre les sorties elles-mêmes. Ces relations ont pu être déterminées après analyses de la corrélation et de la variance. De plus, nous avons appris que pour contrôler la géométrie d'un cordon (h_c et w_c) et la géométrie de la dilution (h_d et w_d), il faut principalement jouer sur le paramètre d'entrée de la vitesse de déplacement de l'outil TS . Il s'agit du paramètre le plus décisif pour ce procédé de fabrication.

Quant à l'angle de contact, pour le contrôler il faut faire varier la vitesse d'avance de fil WFS . L'ensemble de ces relations sont illustrées sur la Figure 3.16.

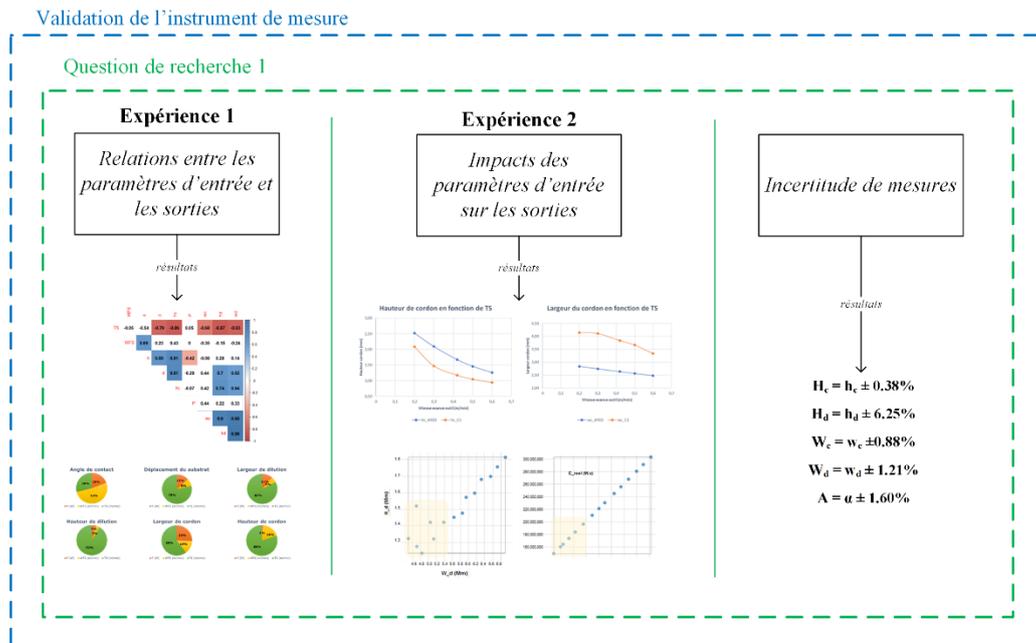


Figure 3.15 Organisation des études pour répondre à la question de recherche 1

L'étude 3 portant sur les impacts des paramètres d'entrée sur les sorties géométriques était divisée en deux expériences notées campagne 2.1 et campagne 2.2. Leurs résultats nous ont permis de conclure que :

- le procédé de fabrication additive, LMD-w, à montage identique, n'est pas répétable (campagne expérimentale 2.2),
- la vitesse de déplacement de l'outil et la géométrie du cordon suivent une relation linéaire négative (campagne expérimentale 2.1),
- la hauteur de cordon et la largeur de cordon suivent une relation négative lorsque P et WFS sont fixes et que TS augmente (campagne expérimentale 2.1),
- lorsque la puissance du laser P et la géométrie de dilution suivent une relation positive. A savoir que lorsque la valeur de P augmente, l'énergie E reçue par la pièce durant la fabrication augmente. Donc la hauteur de dilution, h_d , et la largeur de dilution, w_d , augmentent (campagne expérimentale 2.2),
- pour pouvoir contrôler la géométrie de la dilution, il ne faut pas amener moins d'énergie que la valeur seuil de $2.10^8 W.s$, (campagne expérimentale 2.2).

Enfin, l'étude 4 portant sur les incertitudes de mesures nous a permis de mettre en avant la variabilité de certaines réponses comme la hauteur de dilution.

Nous obtenons ainsi les relations suivantes :

$$H_c = h_c \pm 0.38\%$$

$$H_d = h_d \pm 6.25\%$$

$$W_c = w_c \pm 0.88\%$$

$$W_d = w_d \pm 1.21\%$$

$$A = \alpha \pm 1.60\%$$

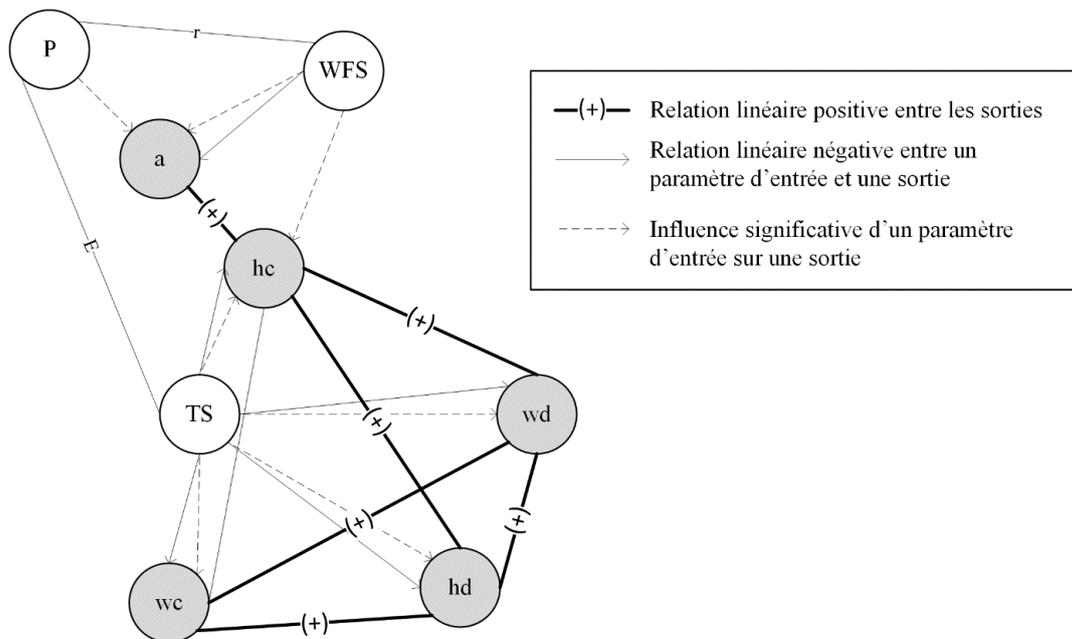


Figure 3.16 Diagramme d'interaction entre les paramètres d'entrée et les sorties géométriques du cordon

Ces résultats seront utilisés pour le développement du modèle de prédiction, présenté dans le prochain chapitre.

CHAPITRE 4 : DEVELOPPEMENT DU METAMODELE NUMERIQUE

4.1	Introduction Chapitre 4	88
4.2	Développement d'un réseau de neurones pour la prédiction pour le procédé LMD-w	88
4.2.1	La base de cas	88
4.2.2	Modèle prédictif direct : le réseau de neurones	90
4.2.3	Résultats et analyses	94
4.3	Modèle de simulation thermomécanique du procédé LMD-w	96
4.3.1	Modèle numérique par éléments finis	97
4.3.2	Etape 1 : Modèle de préchauffe du fil	99
4.3.3	Etape 2 : Modèle de soudage et refroidissement	104
4.3.4	Résultats et analyse.....	109
4.4	Conclusion.....	113

4.1 INTRODUCTION CHAPITRE 4

Dans ce chapitre, nous nous intéressons au développement du méta-modèle numérique. Ce méta-modèle doit répondre à la question de recherche 2 (Q2) « Comment prédire les sorties géométriques en fonction des paramètres d'entrée du procédé LMD-w ? ». Pour cela, nous avons développé deux aspects le composant :

- Le développement d'un réseau de neurones,
- Le développement d'un modèle thermomécanique associé au procédé LMD-w.

Ces deux modèles sont liés entre eux par la génération automatique d'un maillage en sortie de réseau de neurones. Le maillage permet alors de générer un modèle global de prédiction pour le procédé LMD-w.

4.2 DEVELOPPEMENT D'UN RESEAU DE NEURONES POUR LA PREDICTION POUR LE PROCEDE LMD-W

Pour maîtriser l'impression en fabrication additive, il est nécessaire de maîtriser le dépôt du cordon et sa géométrie. Certaines applications comme la fabrication de parois vont nécessiter un cordon « haut » et peu large (angle de mouillage proche de 90°) alors que d'autres applications, comme le rechargement où une surface doit être recouverte de matière vont plutôt nécessiter des cordons « plats » (fort angle de mouillage) ce qui facilitera leur juxtaposition. La géométrie est dépendante des valeurs des paramètres d'entrée : P , WFS et TS . Dans le chapitre précédent, nous avons conclu qu'il existe des relations entre les paramètres d'entrée et les sorties géométriques. À noter que le déplacement est la seule sortie pour laquelle aucun paramètre n'a d'influence significative. Pour modéliser ces relations et prédire les valeurs des sorties, un modèle prédictif direct, réseau de neurones (RN), a été développé sur le logiciel MatlabR2019b. Dans cette section, nous présentons la base de cas utilisée pour développer le RN, puis nous décrivons l'architecture de ce réseau de neurones conçu et enfin nous présenterons l'analyse des résultats obtenus.

4.2.1 LA BASE DE CAS

La base de cas servant aux réseaux de neurones est alimentée par les mesures des campagnes expérimentales¹, 2.1 et 2.2. Dans notre cas, cette base contient un total de 31 essais. Chaque essai consiste en l'impression d'un cordon selon un jeu de paramètres défini (P , WFS et TS). Sur chaque cordon de 100mm, également appelé essai, trois coupes sont faites sur la longueur (à 25mm, 50mm et 75mm) pour créer trois échantillons, Figure 4.1.

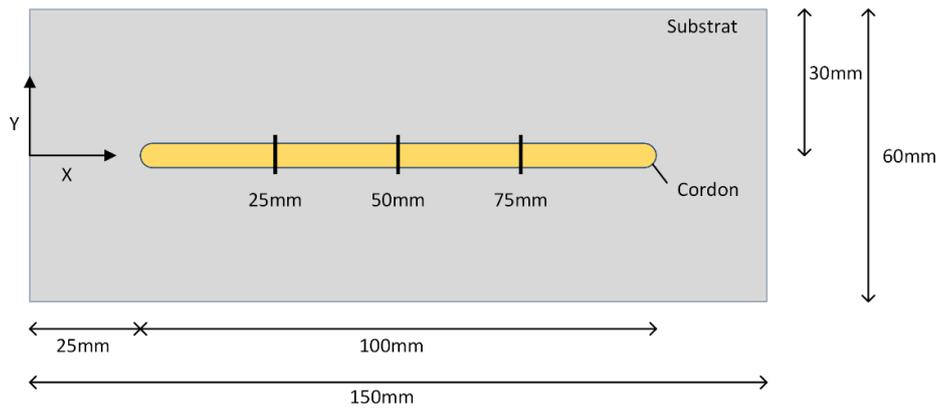


Figure 4.1 Schéma des dimensions du substrat, du cordon, et les plans de coupe

Chaque ligne de la base de cas, présentée dans le Tableau 4.1, contient un index, les valeurs réelles des paramètres d'entrée (P , WFS et TS) puis la valeur moyenne des variables géométriques telles que présentées sur la Figure 1.12 et la Figure 1.14 avec :

- un index pour identifier le cordon,
- paramètres machine
 - o puissance moyenne réelle du laser (W), notée P
 - o vitesse d'avance de fil moyenne réelle (m/min), notée WFS
 - o vitesse d'outil moyenne réelle (m/min), notée TS
- variables géométriques (moyenne des échantillons par cordon)
 - o hauteur moyenne du cordon (mm), notée h_c
 - o largeur moyenne du cordon (mm), notée w_c
 - o hauteur moyenne de dilution (mm), notée h_d
 - o largeur moyenne de dilution (mm), notée w_d
 - o angle moyen de contact ($^\circ$), noté α

Tableau 4.1 Base de cas avec les valeurs réelles paramétriques et les variables géométriques moyennes mesurées

Index	P	WFS	TS	h_c	h_d	w_c	w_d	α
1	1378	1.21	0.42	1.19	1.476	3.691	4.841	60.3
2	1253	1.22	0.42	1.332	1.518	3.205	4.709	73.8
3	1344	1.28	0.42	1.346	1.322	3.449	4.505	71.3
4	1453	1.38	0.42	1.362	1.275	3.713	4.719	65.3
5	1537	1.5	0.42	1.399	1.422	3.925	5.056	63
6	1646	1.49	0.42	1.413	1.32	4.136	5.132	61.2
7	1762	1.7	0.42	1.453	1.42	4.4	5.387	56.7
8	1853	1.8	0.42	1.453	1.451	4.565	5.635	56.5
9	1932	1.9	0.42	1.508	1.477	4.803	5.85	54
10	2056	1.98	0.42	1.532	1.573	4.844	5.938	55.7
11	2141	2.1	0.42	1.566	1.597	5.115	6.155	52.7
12	2242	2.16	0.42	1.589	1.679	5.213	6.323	49.8
13	2351	2.28	0.42	1.596	1.697	5.519	6.547	49.7
14	2442	2.38	0.42	1.618	1.754	5.561	6.719	49.7
15	2541	2.48	0.42	1.653	1.813	5.846	6.92	47.3
16	1403	1.2	0.2	2.084	1.916	4.143	5.81	81
17	1398	1.2	0.3	1.471	1.515	4.112	5.298	62.2
18	1419	1.21	0.42	1.178	1.242	3.838	4.774	54.7
19	1392	1.18	0.5	1.05	1.222	3.665	4.569	49.5
20	1403	1.2	0.6	0.948	1.104	3.34	4.151	49.5
21	1677	1.51	0.2	2.148	2.203	5.151	6.939	74.5
22	1677	1.8	0.5	1.508	1.186	3.597	4.605	71.2
23	1669	2.08	0.6	1.533	0.98	3.493	4.067	87
24	1836	1.5	0.5	1.135	1.335	4.284	5.253	48.5
25	1850	1.8	0.6	1.213	1.172	3.878	4.826	56.2
26	2008	1.49	0.6	0.96	1.271	4.345	5.232	38.7
27	1986	1.82	0.2	2.361	2.616	5.726	7.592	72
28	1974	2.105	0.5	1.569	1.288	4.097	5.175	66.8
29	1661	1.78	0.4	1.742	1.285	3.832	4.873	76.3
30	1836	1.49	0.4	1.353	1.544	4.48	5.633	55.2
31	1995	2.09	0.4	1.783	1.406	4.493	5.571	70.7

4.2.2 MODELE PREDICTIF DIRECT : LE RESEAU DE NEURONES

Dans cette sous-section, nous présentons l'architecture du réseau de neurones développé et la fonction de transfert utilisée pour l'apprentissage du réseau.

A. ARCHITECTURE DU RESEAU DE NEURONES DEVELOPPE

L'architecture du réseau de neurones que nous avons choisi se compose d'une couche d'entrée, d'une couche cachée et d'une couche de sortie. Cette architecture est issue de la littérature.

Dans notre cas, la couche d'entrée contient autant de neurones que de paramètres d'entrée. Ici les paramètres sont identiques aux entrées de la base de cas : P , WFS et TS . Ainsi la couche d'entrée contient 3 neurones.

Pour déterminer le nombre de neurones sur la couche cachée, nous utilisons le théorème de Kolmogorov [81]. Le théorème de Kolmogorov est donné par la relation (4.1).

$$A = 2B + 1 \quad (4.1)$$

Avec A le nombre de neurones sur la couche cachée et B le nombre de neurones sur la couche d'entrée. Ici B vaut 3 donc selon le théorème de Kolmogorov, la couche cachée contient 7 neurones.

La fonction de transfert utilisée pour la couche cachée, c'est-à-dire pour chaque neurone de la couche, est la fonction tangente sigmoïde. Cette fonction est une fonction non linéaire. Comme nous l'avons démontré précédemment, il n'existe pas toujours de relations linéaires entre les paramètres machine du procédé et les variables géométriques. Ainsi, la fonction tangente sigmoïde permet de générer un réseau de neurones pour tous les cas possibles. Cette fonction est représentée sur la Figure 4.2.

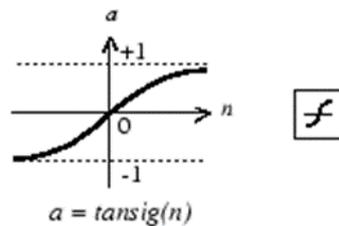


Figure 4.2 Représentation de la fonction tangente sigmoïde

Son expression est donnée par la relation (4.2). Cette fonction normalise les données d'entrée issues de la couche précédente, soit la couche d'entrée pour déterminer les valeurs en sorties.

$$tansig(x) = -1 + \frac{2}{1 + e^{-2x}} \quad (4.2)$$

La couche de sortie contient autant de neurones que le nombre de sorties, variables géométriques, de la base de cas. Il s'agit des mesures observées et effectuées au microscope LEICA DM1750M. De ce fait, la couche de sortie du réseau de neurones possède 5 neurones (h_c , h_d , w_c , w_d et α).

Après avoir testé plusieurs architectures et fonctions de transfert, nous avons déterminé qu'une fonction linéaire est adaptée à notre cas, comme illustrée sur la Figure 4.3.

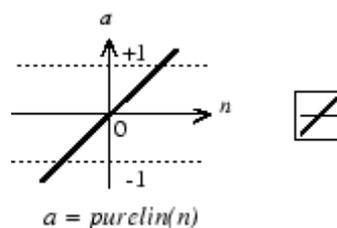


Figure 4.3 Représentation de la fonction linéaire

Nous pouvons alors résumer l'architecture du réseau de neurones grâce à la Figure 4.4.

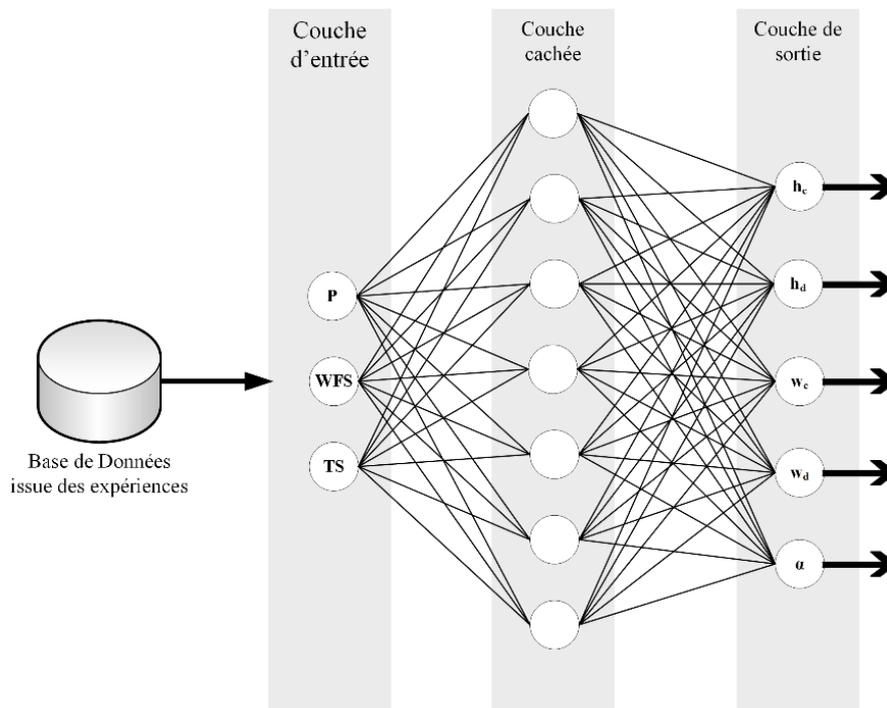


Figure 4.4 Architecture du réseau de neurones, RN

Nous devons maintenant définir la fonction d'apprentissage du réseau de neurones.

B. LA FONCTION D'APPRENTISSAGE

La phase d'apprentissage permet de mémoriser un certain pourcentage de données d'entrée pour généraliser les relations entre les entrées et les sorties du réseau de neurones, à l'aide de pondérations faites par les poids et les biais. Un réseau de neurones est généralisé lorsqu'il est capable, grâce aux exemples appris de traiter des cas distincts, non rencontrés et similaires aux exemples d'apprentissage.

La fonction d'apprentissage que nous avons choisie d'utiliser est la rétropropagation de régularisation bayésienne. Dans les travaux Kamble *et al.* [111] les performances de cinq différentes fonctions d'apprentissage ont été testées (la méthode du gradient conjugué, la méthode de Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno, la méthode de Rétropropagation sécante en une étape, la méthode de rétropropagation de Levenberg-Marquardt et la rétropropagation de régularisation bayésienne). La rétropropagation de régularisation bayésienne est la méthode dont les prédictions se sont avérées être en accord avec leurs valeurs expérimentales.

La régularisation bayésienne permet de mettre à jour les valeurs des poids (w) et des biais (b) utilisés pour calculer les valeurs en sortie de couche. Les poids et les biais sont alors modifiés de façon que l'indice de performance de la fonction soit amélioré. L'objectif est de minimiser l'indice de performance (F) de la fonction. En effet, plus l'indice F diminue, plus la performance de généralisation du réseau augmente. Son indice de performance est décrit par l'équation (4.3).

$$F = \beta E_d + \alpha E_w \quad (4.3)$$

Avec α et β les paramètres à optimiser, E_d la somme de la moyenne des erreurs au carré et E_w la somme des carrés des poids du réseau.

En sortie, nous cherchons à déterminer si le réseau est performant en calculant l'erreur quadratique moyenne (MSE) pour un même jeu d'entrée (P , WFS et TS), entre les valeurs prédites par le réseau de neurones et les valeurs expérimentales mesurées.

(a). *REPARTITION DES VALEURS D'ENTRAÎNEMENT ET DE VALIDATION*

Les valeurs d'entraînement et de validation proviennent de la base de cas. Pour se faire, nous exploitons :

- la base d'apprentissage pour déterminer les poids et les biais,
- la base de validation pour valider les poids et les biais sur un ensemble de cas,
- la base de test pour tester la généralisation du réseau de neurones sur des cas restant de la base de cas.

L'entraînement du réseau, i.e. la mise à jour des poids et des biais, ne s'arrête que lorsque la valeur de la MSE, définie ci-après (4.4), entre les valeurs prédites et les valeurs expérimentales est inférieure à une valeur que nous avons fixée à 10^{-2} .

La répartition des données pour l'entraînement et pour la validation est propre à l'utilisateur. Compte tenu du faible nombre de données dans notre base de cas, nous avons fait le choix d'entraîner nos réseaux avec 90% des valeurs expérimentales et de le valider avec 10% des valeurs expérimentales restantes.

(b). *INDICE DE PERFORMANCE DE L'UTILISATEUR : MSE*

L'indice de performance, l'erreur quadratique moyenne ou MSE, est calculée à l'aide de la formule (4.4). En sortie, l'erreur quadratique moyenne est un scalaire.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \tilde{Y}_i)^2 \quad (4.4)$$

Avec n le nombre de données total, Y_i le vecteur des valeurs expérimentales observées pour la $i^{\text{ème}}$ donnée, \tilde{Y}_i le vecteur des valeurs prédites par le réseau pour la $i^{\text{ème}}$ donnée.

Ci-dessous, nous définissons les vecteurs Y et \tilde{Y}_i considérés en fonction du réseau de neurones développé ainsi que la valeur de n .

$$\text{Pour RN, } n = 31, Y = \begin{bmatrix} h_c \\ h_d \\ w_c \\ w_d \\ \alpha \end{bmatrix} \text{ et } \tilde{Y}_i = \begin{bmatrix} \tilde{h}_c \\ \tilde{h}_d \\ \tilde{w}_c \\ \tilde{w}_d \\ \tilde{\alpha} \end{bmatrix}$$

La formule (4.5) exprime l'erreur quadratique pour le réseau de neurones à 5 sorties.

$$MSE = \frac{1}{31} \sum_{i=1}^{31} \left(\begin{bmatrix} h_c \\ h_d \\ w_c \\ w_d \\ \alpha \end{bmatrix}_i - \begin{bmatrix} \tilde{h}_c \\ \tilde{h}_d \\ \tilde{w}_c \\ \tilde{w}_d \\ \tilde{\alpha} \end{bmatrix}_i \right)^2 \quad (4.5)$$

4.2.3 RESULTATS ET ANALYSES

En sortie d'un réseau de neurones, nous récupérons :

- les sorties prédites de chaque variable de sortie pour chaque essai,
- les poids et les biais de chaque neurone de chaque couche,
- les pourcentages d'erreurs maximal, minimal et moyen,
- l'erreur quadratique moyenne du réseau.

Dans l'analyse des résultats, nous avons fait l'hypothèse d'interprétation suivante : si le réseau de neurones conduit à une erreur de prédiction moyenne inférieure à 10% nous le considérerons fidèle.

Après, 5304 itérations, durant le processus d'apprentissage, le réseau de neurones a convergé car la MSE du réseau était égale à 10^{-2} .

Les valeurs prédites pour chaque variable géométrique sont extraites et utilisées pour calculer les pourcentages d'erreurs minimal, maximal et moyen de chacune d'entre elles. Le Tableau 4.2 regroupe les valeurs de ces pourcentages. La hauteur de dilution possède encore une valeur de pourcentage maximal supérieure à 10%. Cependant, en moyenne les erreurs de prédiction du modèle ne dépassent pas 2.58% pour la hauteur de cordon, 3.76% pour la hauteur de dilution, 1.30% pour la largeur de cordon, 1.29% pour la largeur de dilution et 0.09% pour l'angle de contact.

Tableau 4.2 Pourcentage d'erreur entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites par le réseau de neurones RN en fonction des sorties

	h_c	h_d	w_c	w_d	α
Erreur minimale (%)	0.00	0.14	0.04	0.06	0.00
Erreur maximale (%)	8.40	19.65	2.85	6.87	1.42
Erreur moyenne (%)	2.58	3.76	1.30	1.29	0.09

En extrayant, les valeurs des erreurs par index et par sortie, nous pouvons identifier pour quel(s) index(s) cette valeur de 19.65% d'erreur maximale est atteinte, Tableau 4.3. Nous constatons que les 10% d'erreur sont dépassées pour les cordons d'index 18 (19.65%), et 19 (14.16%). Ces index correspondent à des données d'entraînement du réseau.

Tableau 4.3 Pourcentages d'erreur entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites par les RN en fonction de la sortie étudiée et de l'essai

Index	h_c	h_d	w_c	w_d	α
1	8.40	1.29	0.24	1.90	0.00
2	6.53	7.71	1.97	4.31	0.00
3	3.64	3.56	1.10	1.64	0.00
4	0.37	6.90	1.56	1.34	0.00
5	1.64	4.50	2.85	2.71	0.00
6	2.97	3.33	2.06	0.84	0.00
7	1.24	0.14	1.34	0.82	0.00
8	1.86	0.41	1.01	0.44	1.42
9	0.07	0.20	2.58	1.11	0.74
10	0.98	4.64	0.04	0.83	0.00
11	0.45	3.57	1.94	1.12	0.00
12	2.20	1.97	1.17	0.32	0.00
13	1.63	1.30	0.76	0.21	0.00
14	3.52	1.20	1.17	0.06	0.00
15	1.88	1.49	0.98	0.16	0.00
16	4.08	3.03	2.70	0.34	0.00
17	1.36	6.86	1.39	1.91	0.00
18	5.18	19.65	0.47	6.87	0.00
19	0.29	14.16	0.63	5.93	0.61
20	7.28	2.63	0.18	1.18	0.00
21	2.70	5.67	0.70	0.55	0.00
22	4.84	0.84	1.11	0.50	0.00
23	1.83	5.00	2.58	1.65	0.00
24	0.00	0.52	0.33	0.78	0.00
25	1.15	2.22	0.72	0.06	0.00
26	2.71	0.16	1.17	0.06	0.00
27	3.39	3.90	0.54	0.25	0.00
28	0.57	3.34	2.00	0.75	0.00
29	4.25	2.26	1.10	0.92	0.00
30	0.89	2.46	2.52	0.32	0.00
31	1.96	1.64	1.29	0.11	0.00

Les résultats de ce modèle de réseau de neurones (RN) satisfont le critère initialement défini pour l'erreur quadratique moyenne (MSE). L'emploi de ce RN pour le modèle thermomécanique permet de générer le maillage de la géométrie à simuler en fonction des valeurs des paramètres machine, comme illustré sur la Figure 4.5 par la flèche verte. Pour cela, une « brique » de communication est développée. Cette brique récupère la hauteur de cordon, la largeur de cordon et l'angle de contact du réseau de neurones pour générer la forme du cordon. La hauteur et la largeur de dilution sont utilisées pour vérifier les dimensions du bain de fusion simulé à ceux mesurés expérimentalement.

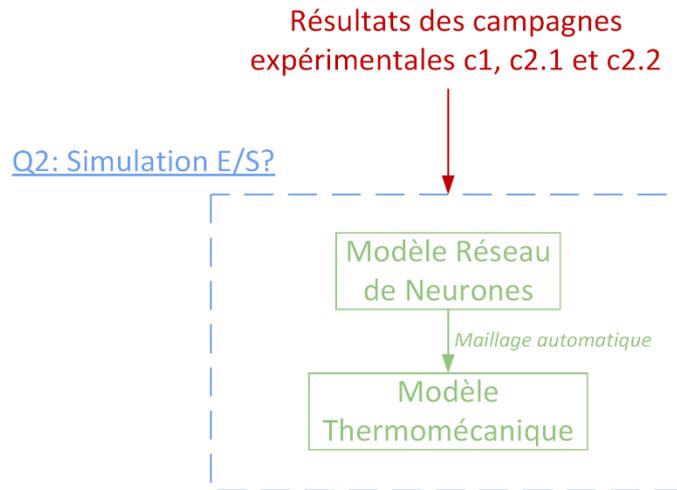


Figure 4.5 Enchaînement des modèles réseau de neurones et thermomécanique

4.3 MODELE DE SIMULATION THERMOMECHANIQUE DU PROCEDE LMD-W

L'objectif du modèle de simulation du procédé est de prédire la géométrie d'un cordon puis de simuler le comportement thermomécanique (champ de température et déformation) d'une pièce en fonction des paramètres d'entrée du procédé LMD-w, Figure 4.6.

En entrée de ce modèle thermomécanique, nous retrouvons :

- le maillage du cordon généré à partir des valeurs prédites par le réseau de neurones,
- les paramètres machine,
- les propriétés thermomécaniques du matériau TA6V,
- les conditions aux limites.

En sortie, nous étudierons :

- le déplacement du substrat en fin de procédé
- les champs de température.

De plus, nous considérons que le modèle de simulation du procédé LMD-w est intégré dans un modèle plus global de simulation du procédé comprenant la base de cas expérimentales et le réseau de neurones précédemment présenté. Cette base de cas utilisée pour créer le modèle thermomécanique est identique à celle utilisée pour le développement du réseau de neurones.

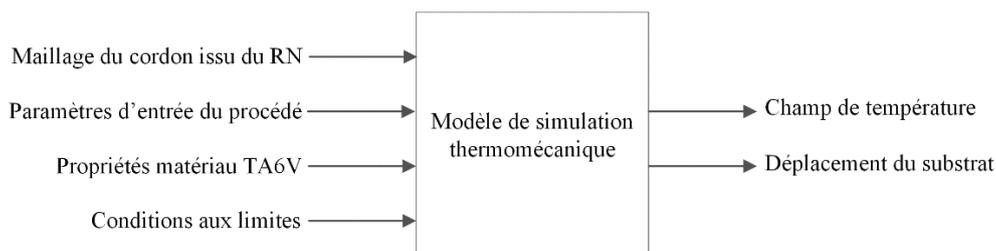


Figure 4.6 Entrées et sorties du modèle de simulation thermomécanique

En outre, nous avons fait le choix de considérer que la fabrication d'une pièce par le procédé LMD-w se divise en deux étapes :

- la préchauffe du fil et
- le soudage.

C'est pourquoi, notre modèle de simulation thermomécanique du procédé est divisé en deux sous-modèles :

- un modèle dit de préchauffe du fil
- un modèle dit de soudage et refroidissement.

Le modèle de préchauffe de fil permet de déterminer la température du fil au moment où il entre en contact avec le substrat. Cette température, notée T_{fil} , est ensuite utilisée comme une donnée d'entrée pour le modèle de soudage, comme illustrée sur la Figure 4.7. Le « Maillage » du modèle de préchauffe de fil et le « Maillage RN » du modèle de soudage et refroidissement sont différents. Le premier maillage représente la géométrie du fil tandis que le second maillage est celui du cordon, issu du réseau de neurones.

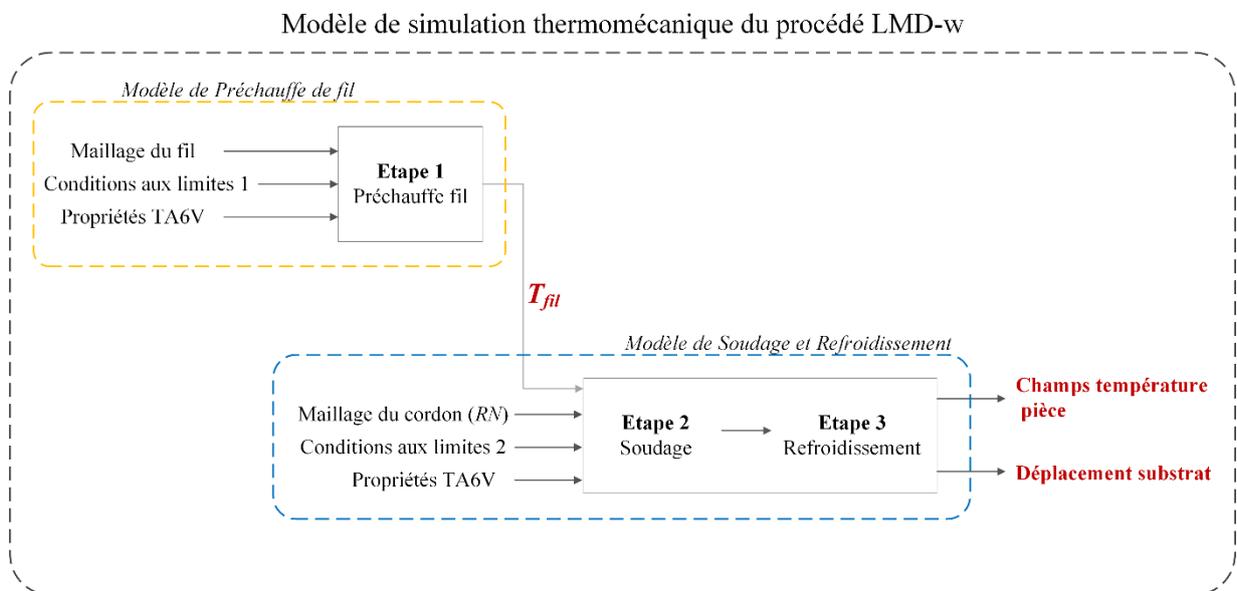


Figure 4.7 Représentation graphique des données d'entrée et de sortie entre le modèle de préchauffe et le modèle de soudage et refroidissement formant le modèle de simulation thermomécanique du procédé LMD-w

Ces deux modèles sont traités par la méthode des éléments finis.

4.3.1 MODELE NUMERIQUE PAR ELEMENTS FINIS

A. PRINCIPE D'ACTIVATION DES ELEMENTS FINIS

Le matériau utilisé dans le procédé étudié est un alliage de titane, le TA6V. Entre le moment où la source de chaleur est activée et le moment où elle s'éteint, le procédé dépose de la matière fondue à tout instant ; fabriquant ainsi la géométrie voulue. Il est possible de décomposer le dépôt de matière en trois états :

- état initial ($t=0$) : le procédé n'a pas commencé. La source de chaleur est éteinte. Le substrat est posé dans la cellule de travail.
- état intermédiaire ($t=t_i$) : le procédé est en cours. La source de chaleur est allumée. On considère qu'une certaine quantité de matière est déposée sur le substrat.
- état final ($t=t_f$) : le procédé est terminé. La géométrie est entièrement déposée. La source de chaleur est éteinte.

Dans un premier temps, pour le modèle de soudage et refroidissement, les éléments du maillage composant le cordon sont désactivés. Cette désactivation permet de se retrouver dans l'état initial. Les éléments finis sont progressivement activés grâce à une boîte d'activation se déplaçant le long de la trajectoire de fabrication, à la vitesse TS . Les dimensions de cette boîte sont (longueur du cordon, hauteur du cordon, $TS.\Delta t$). Ainsi, nous nous retrouvons avec des éléments activés et des éléments désactivés. L'activation permet de simuler le dépôt de matière et ainsi de se retrouver à l'état intermédiaire.

Lors de l'activation des éléments finis, nous leur « affectons » un matériau aux propriétés thermiques et mécaniques dites saines ou normales. A contrario, lorsque les éléments sont désactivés, nous affectons aux éléments un matériau dit dénaturé ou dégradé. Un matériau est dénaturé thermiquement lorsque sa valeur de conduction de chaleur est très petite. De ce fait, l'élément ne conduit pas la chaleur. Son effet est alors négligé dans l'équation de la chaleur. En outre, d'un point de vue mécanique, un matériau dénaturé est un matériau dont le module d'Young est très petit. Son effet est alors négligé pour les calculs mécaniques.

On se retrouve ainsi à créer deux matériaux :

- un matériau « sain » dont les propriétés thermomécaniques du TA6V sont normales, et
- un matériau « dénaturé » dont des propriétés thermomécaniques sont dégradées.

Les propriétés thermomécaniques du TA6V sont dépendantes de la température. Ses valeurs sont présentées en Annexes 7.4.

B. APPLICATION DES MATERIAUX AUX ELEMENTS FINIS EN FONCTION DE LEUR ETAT

À l'état initial, la source de chaleur est éteinte. Les éléments composant le substrat sont actifs. Les éléments, situés dans les zones qui seront construites, sont « désactivés ». Les éléments en vert sur la Figure 4.8 sont les éléments actifs et ceux en gris sont les éléments « désactivés ». Afin de simplifier la compréhension du changement de domaine, nous proposons de diviser le cordon en éléments cubique. La longueur d'un élément cubique correspond à la longueur de la boîte d'activation évoquée précédemment. Cette longueur est de $TS.\Delta t$ mètres, où Δt est le pas de temps considéré lors du calcul et TS est la vitesse de déplacement de l'outil.

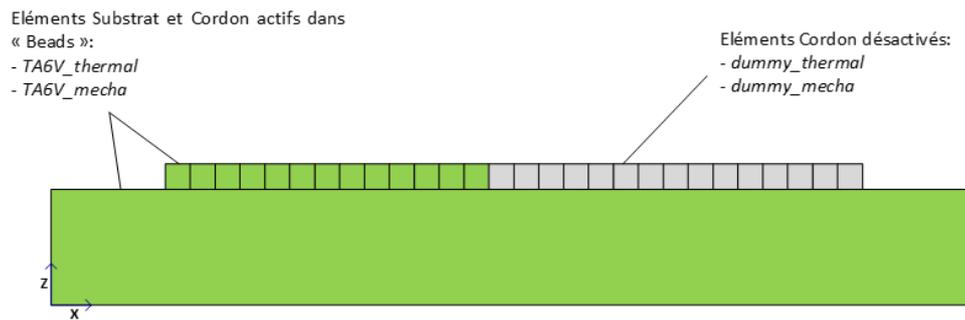


Figure 4.8 Attribution du matériau sain (verts) et dénaturé (gris) aux éléments pour l'état intermédiaire

À l'état final, la source de chaleur est éteinte. Toute la matière formant le cordon a été déposée sur le substrat. Tous les éléments sont maintenant actifs, possèdent les propriétés thermomécaniques saines du TA6V et font partie du maillage « Beads ».

4.3.2 ETAPE 1 : MODELE DE PRECHAUFFE DU FIL

L'objectif l'étape 1 est de prévoir la température du fil au moment où il entre en contact avec le bain de fusion.

A. HYPOTHESES

Considérons un fil de TA6V, de diamètre 1.2mm sortant à une vitesse WFS (m/min) de la buse. En sortie de buse, la température du fil est considérée comme étant à la température ambiante $T_{ambiante}=25^{\circ}\text{C}$. À un instant t_i , la surface extérieure du fil entre en contact avec le laser. Le fil atteint alors une température, notée T_{fil} , lorsqu'il entre en contact avec le bain de fusion .

Pour déterminer cette température T_{fil} , nous considérons 3 étapes. Ces étapes sont représentées sur la Figure 4.9 :

- (1) le fil de TA6V de diamètre 1.2mm sort de la buse à une vitesse initiale de WFS (m/min) avec une température initiale de 25°C .
- (2) à un instant t après la sortie de buse, la surface extérieure du fil entre en contact avec le laser dont les faisceaux ont un angle d'incidence de valeur ϑ ($^{\circ}$) par rapport à la surface du substrat. La puissance du laser est P (W).
- (3) le fil chauffe jusqu'à ce qu'atteindre le bain de fusion à une température préchauffée notée T_{fil} ($^{\circ}\text{C}$).

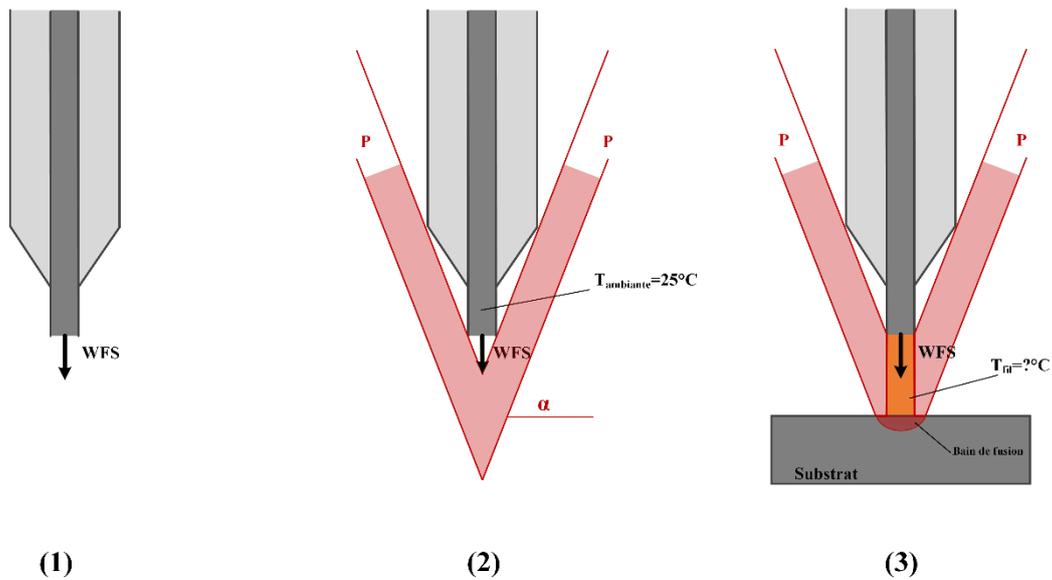


Figure 4.9 Interaction du fil avec le laser à simuler pour déterminer la température T_{fil}

B. DEFINITION DU MODELE DE PRECHAUFFE DU FIL

Il s'agit ici d'un modèle eulérien, dans lequel on simule le déplacement d'une section du fil à la vitesse WFS . Ce modèle prédit l'évolution de la température dans la section du fil lors de son trajet jusqu'au bain de fusion. C'est un modèle qui vise à déterminer un état stationnaire : toutes les sections de fil qui se succèdent subissent le même chauffage et ont donc la même histoire thermique.

(a). MAILLAGE DE LA GEOMETRIE

Le fil est un cylindre de rayon, r , de 0.6mm et d'une hauteur, h , strictement supérieure à r ($h \gg r$). Ce cylindre possède un axe de révolution, en pointillé sur la Figure 4.10. Afin de réduire encore davantage les coûts de calcul, nous nous ramenons à un problème 2D axisymétrique. Dans ce contexte la géométrie considérée est un rectangle dans le plan (ZX) passant par le centre de la base du cylindre, en surbrillance bleue sur la Figure 4.10.

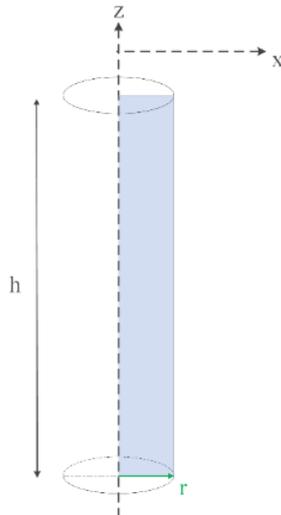


Figure 4.10 Géométrie du fil à mailler pour le modèle de préchauffe de fil

Cette géométrie est divisée en deux domaines : domaine 1 et domaine 2 tels que

$$h_{\text{domaine1}} < h_{\text{domaine2}}$$

La définition de deux domaines provient du fait que nous souhaitons un maillage fin dans la zone où la source de chaleur s'applique, domaine 1, et un maillage plus grossier ensuite, domaine 2.

(b). APPLICATION DU MATERIAU, DES CONDITIONS INITIALES ET DES CONDITIONS AUX LIMITES POUR LE MODELE DE PRECHAUFFE DU FIL

Le problème traité est purement thermique, le matériau appliqué aux deux domaines possède les propriétés thermiques saines du TA6V présentées en Annexes 7.4.2

Conformément à l'hypothèse (1), les conditions initiales appliquées aux deux domaines sont une température initiale de 25°C, notée T_{ambiante} et une vitesse WFS orientée selon $-Z$ en se basant sur la Figure 4.11. Le domaine 1, représenté en orange, correspond à la partie durant laquelle le fil est en contact avec la source de chaleur. Le domaine 2, en bleu sur la Figure 4.11, sert uniquement au calcul mais ne correspond pas à la réalité du procédé. En effet, le fil entre dans le bain à $Z=0$, interface entre le domaine 1 et le domaine 2.

Nous définissons trois zones sur lesquelles sont appliquées les conditions aux limites :

- surface latérale bas (bleue)
 - convection : 25 W/m²K
 - radiation : émissivité de 0.4
- surface latérale source (orange)
 - convection : 25 W/m²K
 - radiation : émissivité de 0.4
 - source de chaleur
- entrée (vert)
 - température fixe : $T_{\text{ambiante}} = 25^{\circ}\text{C}$

Sur la Figure 4.11 sont résumées les applications des conditions aux limites, des conditions initiales ainsi que le matériau employé pour le modèle de préchauffe de fil.

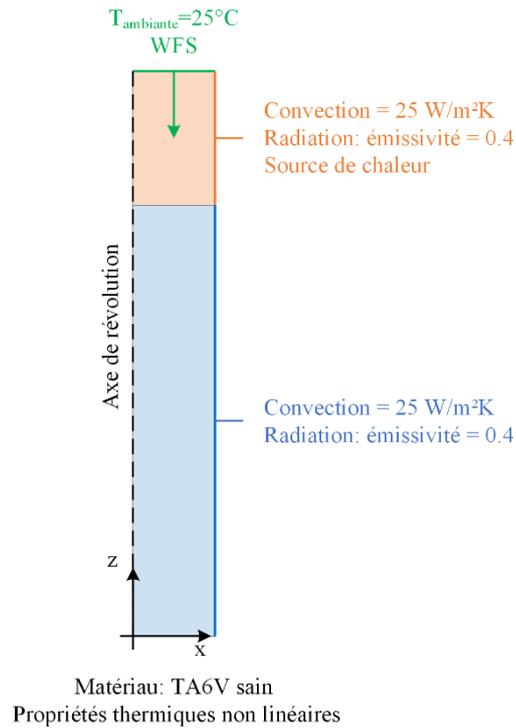


Figure 4.11 Application du matériau, des conditions initiales et des conditions aux limites pour le modèle de préchauffe de fil

(c). DEFINITION DU FLUX DE CHALEUR

Si le flux de chaleur appliqué sur la surface extérieure du fil de TA6V est compris entre $Z=0$ et $Z=3$, alors il a pour la formule (4.7) ; sinon le flux de chaleur est égal à 0, comme illustrée sur la Figure 4.12.

$$\phi_{\text{laser}}(z) = \cos(\theta) \times \frac{\alpha_{\text{TA6V}} P}{\pi(2+z)^2 \left(\left(\frac{1}{\tan(1.1689)} \right)^2 - \left(\frac{1}{\tan(1.4464)} \right)^2 \right)} \quad (4.7)$$

Cette expression peut être décomposée en deux parties :

- numérateur : Absorption par le TA6V (α_{TA6V}) de la puissance du laser (P) avec une orientation des faisceaux, selon un angle d'incidence moyen de 75° ($\theta = 75^{\circ}$),
- dénominateur : Expression de la surface sur laquelle est répartie la puissance P . Cette surface varie avec la hauteur Z du fait de la focalisation du laser.

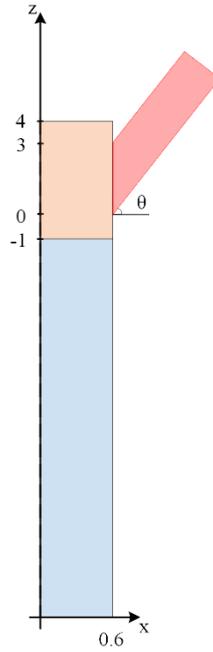


Figure 4.12 Application du flux de chaleur pour une altitude z comprise entre 0 et 3

La puissance du laser à une hauteur Z est considérée uniformément répartie sur la surface notée $S(z)$. La Figure 4.13 représente la « forme » du faisceau laser considérée dans le modèle. A ce titre, le point focal tracé est théorique, car la puissance ne peut pas se concentrer en un point. De plus, le plan focal est le plan dans lequel $S(z)$ est minimum. Pour calculer cette surface, nous utilisons la formule (4.8)

$$S(z) = \pi r_1(z)^2 - \pi r_2(z)^2 \quad (4.8)$$

Où r_1 et r_2 , correspondent respectivement au rayon extérieur et au rayon intérieur de la couronne formée par le faisceau laser dans un plan $Z=cste$. En diminuant la hauteur Z , les rayons interne (r_2) et externe (r_1) diminuent et convergent vers un point, appelé point focal. On détermine les rayons interne et externe pour une même hauteur Z à l'aide des formules (4.10) et (4.9). Ainsi :

$$r_1(z): \tan(\theta_1) = \frac{z}{r_1(z)} \text{ donc } r_1(z) = \frac{z}{\tan(\theta_1)} \quad (4.9)$$

$$r_2(z): \tan(\theta_2) = \frac{z}{r_2(z)} \text{ donc } r_2(z) = \frac{z}{\tan(\theta_2)} \quad (4.10)$$

On obtient d'après la formule (4.8) :

$$S(z) = \pi \left(\frac{z}{\tan(\theta_1)} \right)^2 - \pi \left(\frac{z}{\tan(\theta_2)} \right)^2$$

$$S(z) = \pi z^2 \left(\left(\frac{1}{\tan(\theta_1)} \right)^2 - \left(\frac{1}{\tan(\theta_2)} \right)^2 \right)$$

Dans le montage expérimental, le plan de travail est décalé de +2mm par rapport au plan de focalisation du laser, selon l'axe Z . Nous pouvons ainsi exprimer $S(z)$ selon la formule (4.11).

$$S(z) = \pi (2 + z)^2 \left(\left(\frac{1}{\tan(\theta_1)} \right)^2 - \left(\frac{1}{\tan(\theta_2)} \right)^2 \right) \quad (4.11)$$

De plus, dans notre montage expérimental, les valeurs de ϑ_1 et ϑ_2 sont respectivement 66.97° soit 1.1689 rad et 82.87° soit 1.4464 rad.

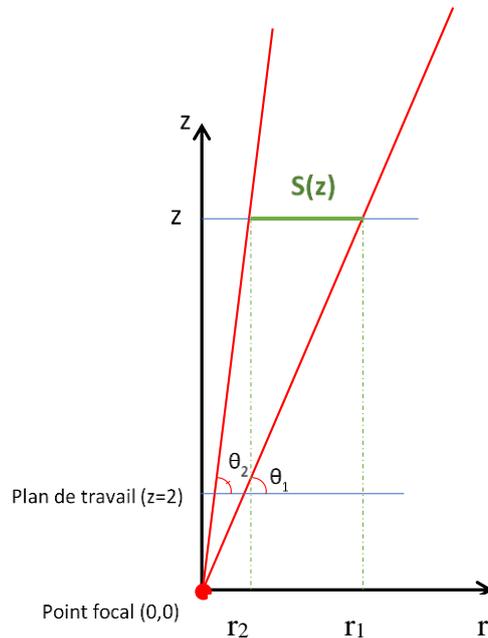


Figure 4.13 Forme du faisceau laser en fonction de la hauteur Z

Ce modèle de préchauffe permet d'approximer la température du fil, T_{fil} , lorsqu'il entre en contact avec le substrat. Les paramètres du procédé pris en compte pour ce modèle sont la puissance du laser, P , et la vitesse d'avance de fil, WFS .

$$T_{fil} = f(P, WFS)$$

La température de préchauffe du fil est ensuite utilisée comme entrée pour le modèle de soudage et de refroidissement.

4.3.3 ETAPE 2 : MODELE DE SOUDAGE ET REFROIDISSEMENT

La simulation numérique du problème thermomécanique du dépôt de matière du procédé LMD-w permet de récupérer le déplacement de la pièce après le refroidissement de la pièce à température ambiante.

Le modèle proposé est transitoire et non-linéaire du fait de la dépendance des propriétés thermomécaniques du matériau (TA6V) à la température.

Les hypothèses faites pour le développement du modèle sont les suivantes :

- le fil sort de la buse à la température ambiante (25°C),
- au moment t , la surface extérieure du fil entre en contact avec le laser et entre en contact avec le substrat à une température T_{fil} ,
- le laser est modélisé par source de chaleur surfacique : une tâche en forme de couronne,

- la première moitié arrière de cette couronne est appliquée sur la surface du cordon (en aval),
- la seconde moitié avant de la couronne est appliquée sur la surface du substrat,
- la source de chaleur se déplace à une vitesse TS ,
- le bridage de la pièce est le bridage « table ».

Dans cette partie, nous considérons que les étapes de soudage et de refroidissement.

A. BRIDAGE DE LA PIECE

Le bridage numérique reproduira le bridage expérimental. Nous appelons ce bridage, le bridage « table ». Cependant, dans les modèles de simulation numérique il est nécessaire de bloquer les 6 degrés de liberté de la pièce :

- 3 degrés de translations selon les axes X , Y et Z et
- 3 degrés de rotation autour des axes X , Y et Z .

Ce blocage des degrés de liberté permet que tous déplacements soient le résultat d'une déformation de la pièce dû au passage de la source de chaleur et au dépôt de la matière en fusion sur la face supérieure du substrat. On parle de blocage des « modes rigides ».

La configuration étudiée est symétrique. En effet, nous déposons au centre du substrat et les serrages sont identiques en tout point du substrat. De ce fait, il existe un plan de symétrie : le plan (XZ), comme représenté sur la Figure 4.14.

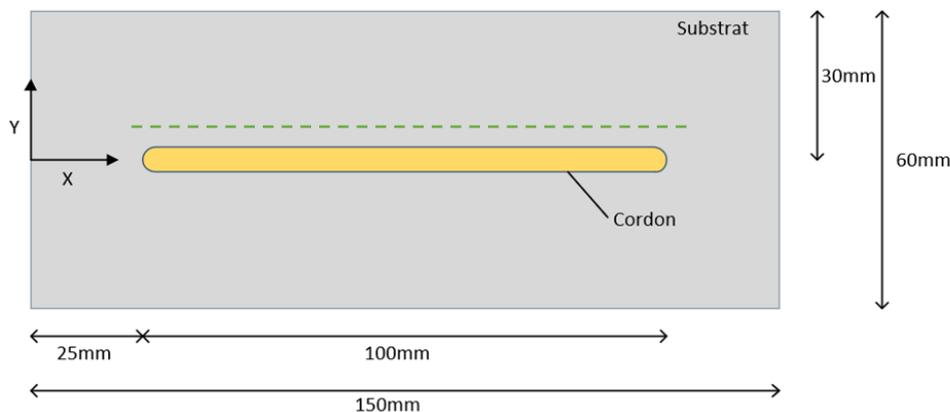


Figure 4.14 Position du cordon déposé sur le substrat

Ainsi pour le bridage, nous considérons que la face gauche de notre substrat est encadrée et qu'il existe un plan de symétrie tels que :

- face gauche du substrat :
 - $U_x=U_y=U_z=0 \rightarrow$ pas de translations selon les axes X , Y et Z et pas de rotations autour de ces trois axes
- plan de symétrie :
 - $U_y=0 \rightarrow$ pas de translations selon l'axe Y et pas de rotations autour des axes Z et Y

L'ensemble de ces conditions est illustré sur la Figure 4.15.

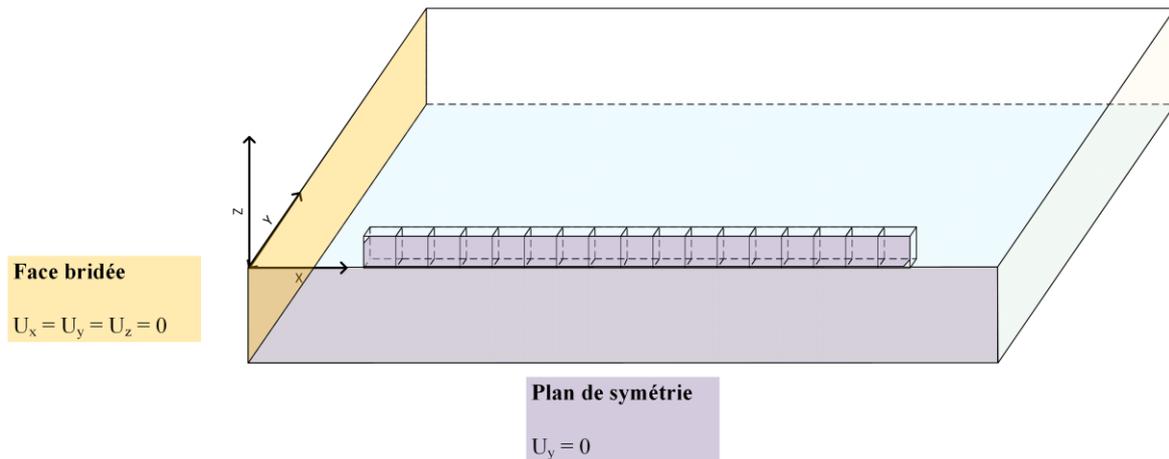


Figure 4.15 Représentation graphique des conditions aux limites pour la simulation du soudage et du refroidissement pour le procédé LMD-w

B. ÉTAPE DE SOUDAGE

L'étape de soudage comprend les trois états d'activation des éléments finis : l'état initial, l'état intermédiaire et l'état final. Ces états ont été présentés précédemment.

(a). CONDITIONS INITIALES ET CONDITIONS AUX LIMITES POUR L'ÉTAPE DE SOUDAGE

Initialement le substrat est à température ambiante, soit 25°C . La matière déposée a une température T_{fil} , déterminée précédemment, telle que $T_{fil} > T_{ambiante}$. La source de chaleur se déplace à une vitesse TS selon l'axe X et la matière est déposée selon l'axe $-Z$ conformément à la Figure 4.15. Le substrat est bridé selon le bridage table.

Les conditions aux limites thermiques et mécaniques suivantes sont appliquées :

- conditions aux limites thermiques :
 - convection :
 - surfaces latérales du substrat,
 - surface inférieure du substrat,
 - surface extérieure du cordon (éléments actifs)
 - radiation :
 - toutes les surfaces sauf la surface inférieure du substrat
 - source de chaleur :
 - surface extérieure du cordon,
 - interface entre le cordon et le substrat,
- condition aux limites mécanique :
 - bridage « table » du substrat aux nœuds 1 et 2 et au plan de symétrie.

Ces conditions initiales et aux limites sont illustrées sur la Figure 4.16.

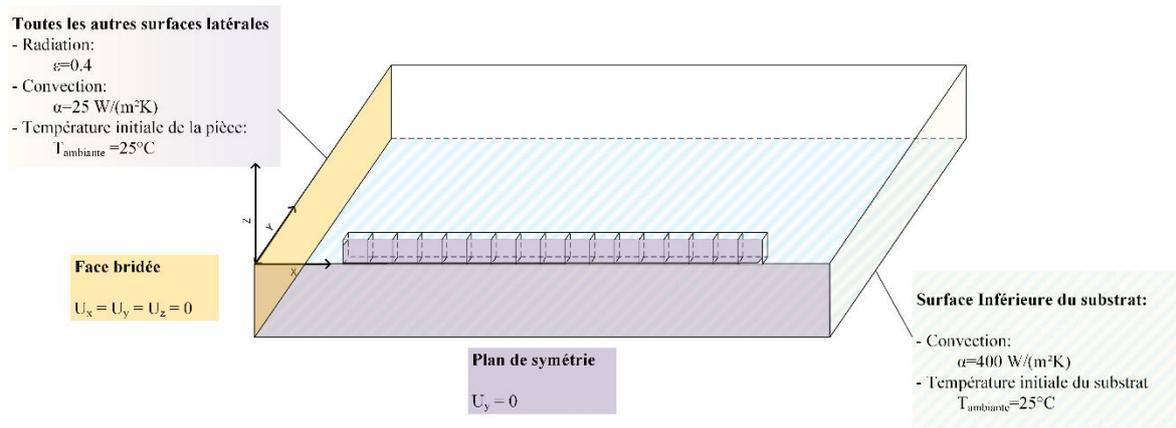


Figure 4.16 Conditions aux limites appliquées à la géométrie simulée pour l'étape de soudage

(b). EXPRESSION DE LA SOURCE DE CHALEUR EN FONCTION DE SON APPLICATION SUR LE CORDON

Le flux de chaleur varie avec la nature de l'interaction qu'il a avec le fil, le cordon et le substrat. Nous illustrons cette interaction à l'aide de la Figure 4.17. Sur la figure nous pouvons remarquer, que le faisceau du laser est appliqué sur deux hauteurs : le haut du cordon (h_c) et le substrat. De ce fait, le flux de chaleur, défini selon la formule (4.7), aura deux formules, en fonction de la zone d'application.

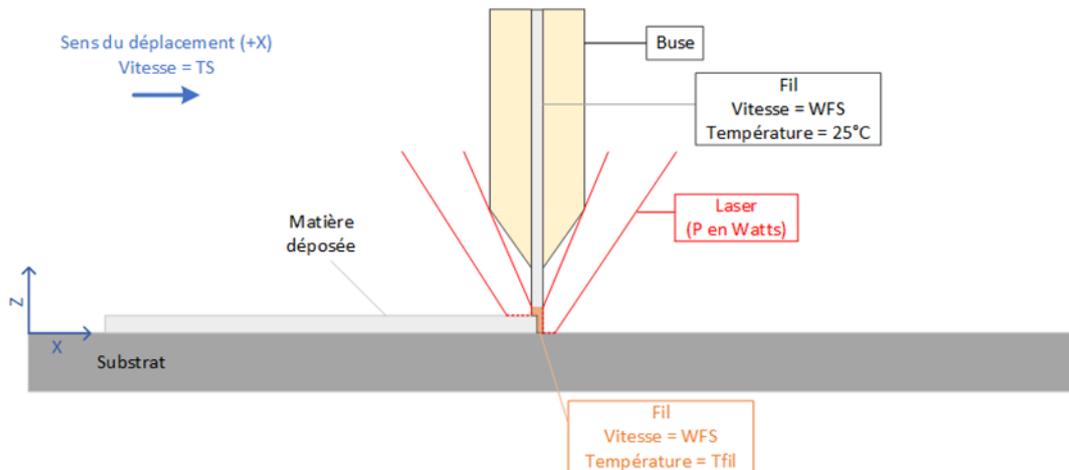


Figure 4.17 Interaction entre le laser, le fil, le cordon et le substrat pendant l'étape de soudage du procédé LMD-w

Comme le présente la Figure 4.17, il est possible de représenter la tâche du laser comme une couronne ayant un diamètre extérieur et un diamètre intérieur selon le plan (XY). Or, une partie du laser a été en contact avec le fil de TA6V de diamètre noté ϕ_{fil} et en rouge foncé sur la Figure 4.18. Ainsi nous nous retrouvons à appliquer une source de chaleur sur un diamètre noté $\phi_{interne}$ fonction de la hauteur z dans l'expression (4.12).

$$\phi_{interne}(z) = |\phi_{fil} - \phi_{interne\ initial}(z)| \quad (4.12)$$

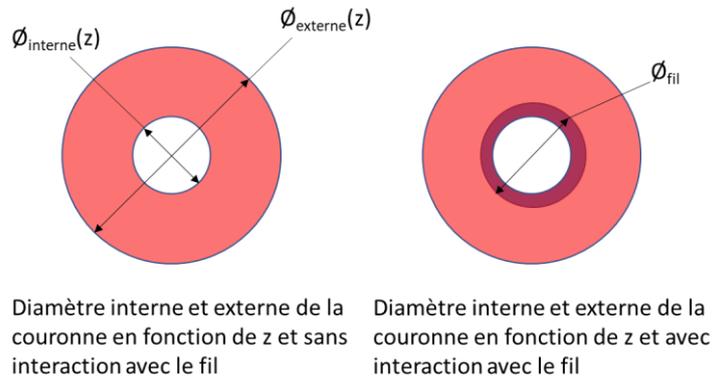


Figure 4.18 Variation du diamètre interne de la couronne lors d'une interaction avec le fil

Au sein de l'aire du disque « fil », la température T_{fil} déterminée préalablement sera appliquée. La Figure 4.19 schématise cette application.

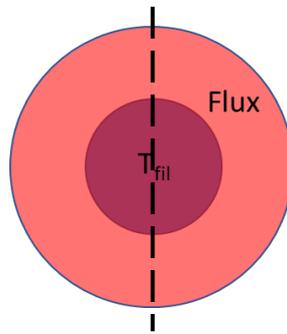


Figure 4.19 Application de la température T_{fil} et du flux en fonction de la zone

La moitié « gauche », partie amont du flux, est appliquée à la surface du cordon et la moitié « droite » (partie aval) est appliquée à la surface supérieure du substrat.

On peut donc exprimer le flux laser par l'équation suivante :

- surface supérieure du cordon, $r_1 < x < r_{fil}$, avec r_1 le rayon extérieur de la tâche laser

$$\begin{aligned} \varnothing_{cordon}(x) = & step(0,5 - x) \times \left(\frac{\alpha_{TA6V} \times P}{\pi * (0,85^2 - 0,25^2)} \right) \times step \left(\sqrt{((x - 0,5)^2 + y^2)} - 0,6 \right) \\ & \times \left(1 - step \left(\sqrt{((x - 0,5)^2 + y^2)} - 0,85 \right) \right) \end{aligned} \quad (4.13)$$

- surface supérieure du substrat, $r_{fil} < x < r_1$

$$\begin{aligned} \varnothing_{substrat}(x) = & step(x - 0,5) \times \left(\frac{\alpha_{TA6V} \times P}{\pi * (0,85^2 - 0,25^2)} \right) \times step \left(\sqrt{((x - 0,5)^2 + y^2)} - 0,6 \right) \\ & \times \left(1 - step \left(\sqrt{((x - 0,5)^2 + y^2)} - 0,85 \right) \right) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Avec 0,5 la taille des éléments du maillages en millimètre, P la puissance du laser en Watts, α_{TA6V} le coefficient d'absorption du TA6V, « step » les fonctions créneaux permettant de localiser et d'appliquer le flux sur les éléments concernés, 0,6 le rayon du fil en millimètres et 0,85 le rayon externe de la couronne en millimètres.

C. ÉTAPE DE REFROIDISSEMENT

Lors de la phase de refroidissement, tous les éléments formant le cordon sont actifs et possèdent les propriétés thermomécaniques saines du TA6V présentés en Annexes 7.4. Le principe de cette phase consiste à laisser refroidir la pièce pendant une durée de 80 secondes. Cette durée permet au métal de se refroidir générant des contraintes qui elles-mêmes entraînent le phénomène de déplacement du substrat, noté d sur la Figure 4.20.



Figure 4.20 Déplacement du substrat observé sur une pièce après le la fabrication d'un cordon

Les conditions aux limites diffèrent par rapport à la phase de soudage. Sur les surfaces latérales sont appliquées la convection de $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ et la radiation avec une émissivité de 0.4, et sur la surface inférieure du substrat est appliquée la convection de $400 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Le modèle permet de déterminer le déplacement de la pièce après refroidissement.

Ainsi le modèle surfacique permet de déterminer le déplacement de la pièce en fonction des paramètres d'entrée : P , T_{fil} , WFS et TS . Cette fonction est notée F ci-dessous.

$$d = F(P, T_{fil}, WFS, TS)$$

4.3.4 RESULTATS ET ANALYSE

A. MODELE DE PRECHAUFFE

La base de cas pour ce modèle comporte des essais issus des campagnes expérimentales présentées dans le chapitre précédent. Le Tableau 4.4 regroupe les valeurs réelles des paramètres d'entrée du procédé et la valeur de la température du fil calculée lorsque celui-ci entre en contact avec le substrat. Chaque essai a été simulé. Ces simulations ont permis de déterminer les températures moyennes du fil au moment où il entrait en contact avec le substrat.

Dans la grande majorité des cas cette température dépasse la température de fusion qui est de 1625°C . Cela signifie que lorsque le fil atteint le bain, il est déjà à l'état liquide. C'est globalement ce qui est recherché dans le procédé de fabrication additive. L'introduction d'un

fil plus froid pourrait poser un problème, car cela nécessite un apport énergétique supplémentaire, provenant du bain de fusion, pour le faire fondre.

Tableau 4.4 Température du fil préchauffé en fonction des paramètres d'entrée

Index	Puissance P (W)	Vitesse d'avance de fil WFS (m/min)	Température T_{fil} (°C)
1	1378	1.21	1846
2	1253	1.22	1700
3	1344	1.28	1736
4	1453	1.38	1743
5	1537	1.5	1702
6	1646	1.49	1814
7	1762	1.7	1722
8	1853	1.8	1713
9	1932	1.9	1693
10	2056	1.98	1728
11	2141	2.1	1696
12	2242	2.16	1727
13	2351	2.28	1717
14	2442	2.38	1708
15	2541	2.48	1706
16	1403	1.2	1884
17	1398	1.2	1879
18	1419	1.21	1889
19	1392	1.18	1896
20	1403	1.2	1885
21	1677	1.51	1822
22	1677	1.8	1589
23	1669	2.08	1445
24	1836	1.5	1969
25	1850	1.8	1709
26	2008	1.49	2131
27	1986	1.82	1806
28	1974	2.105	1598
29	1661	1.78	1591
30	1836	1.49	1979
31	1995	2.09	1614

Le procédé LMD-w est « sensible » à la distance de travail, soit la distance buse/pièce. Cette distance affecte la répartition d'énergie entre le fil et le substrat. Ce modèle permettrait également de pouvoir étudier cet aspect du procédé. En effet, si la distance buse/pièce diminue, c'est-à-dire que le plan de travail est décalé vers le haut, alors le fil est moins préchauffé, mais le bain reçoit plus d'énergie. Inversement si la distance buse/pièce augmente.

La température du fil préchauffé est utilisée comme donnée d'entrée dans le modèle pour l'étape de soudage.

B. MODELE SOUDAGE ET REFROIDISSEMENT

Grâce au modèle de soudage et de refroidissement, nous avons calculé le déplacement de la pièce après sa fabrication et après un temps de refroidissement. Les valeurs d'entrées, P et TS , ainsi que la valeur de déplacement mesurée, $d_{mesuré}$, pour chaque essai sont regroupées dans le Tableau 4.5.

Pour mesurer le déplacement, nous avons :

- bridé le côté gauche de la pièce fabriquée,
- mesuré le déplacement comme illustré sur la Figure 4.20.

Les résultats, présentés dans le Tableau 4.5, permettent de constater qu'il existe des écarts entre les valeurs du déplacement calculées et les valeurs mesurées. Ces écarts peuvent être positifs ou négatifs. Un écart est considéré comme positif si la valeur du déplacement calculée est supérieure à la valeur expérimentale.

La valeur moyenne des écarts entre le déplacement prédit par le modèle et le déplacement mesuré pour un cordon est de 11%. Le temps de calcul moyen est de 1570 secondes soit près de 27 minutes. Nous considérons ces résultats comme acceptables car il s'agit d'un premier modèle développé.

L'écart maximal entre la valeur de déplacement calculée et celle du déplacement mesuré est de -27%. L'écart minimal quant à lui est de 0%. Ces valeurs sont atteintes pour les paramétrie suivantes ($P=2141W$, $TS=0.42m/min$) et ($P=1537W$, $TS=0.42m/min$).

De plus, parmi l'ensemble des simulations réalisées, deux n'ont pas convergé. Ces simulations sont surlignées en bleu dans le Tableau 4.5. Les paramétries de ces deux simulations sont ($P=1253W$, $TS=0.42m/min$) et ($P=1344W$, $TS=0.42m/min$).

Tableau 4.5 Paramètres d'entrées, valeur du déplacement mesuré expérimentalement, déplacement calculé par le modèle de soudage et de refroidissement avec le pourcentage d'écart entre ces valeurs

Puissance P(W)	Avance outil TS(m/min)	Valeur référence $d_{mesuré}$ (mm)	Phase 2 $d_{calculé}$ (mm)	Ecart %	Temps de calcul t_{calcul} (min)	Mémoire requis M(Mb)
1378	0.42	1.19	1.30	+9%	14.77	630
1253	0.42	0.36			0.00	
1344	0.42	1.11			0.00	
1453	0.42	1.52	1.50	-1%	15.92	704
1537	0.42	1.5	1.50	0%	15.60	712
1646	0.42	1.93	1.60	-17%	19.33	711
1762	0.42	2.05	1.80	-12%	18.17	706
1853	0.42	1.57	1.90	+21%	18.83	718
1932	0.42	1.96	2.10	+7%	16.67	628
2056	0.42	2.06	2.00	-3%	19.00	716
2141	0.42	2.59	1.90	-27%	17.67	723
2242	0.42	2.02	2.00	-1%	18.67	702
2351	0.42	2.4	2.30	-4%	20.17	710
2442	0.42	2.07	2.30	+11%	38.50	704
2541	0.42	2.8	2.50	-11%	39.00	760
1403	0.2	2.08	2.20	+6%	35.00	600
1398	0.3	1.71	1.60	-6%	16.05	650
1419	0.42	1.78	1.40	-21%	26.50	713
1392	0.5	0.97	1.20	+24%	27.17	701
1403	0.6	1.13	1.00	-12%	25.00	627
1677	0.2	1.98	2.30	+16%	39.17	726
1677	0.5	1.48	1.60	+8%	30.17	719
1669	0.6	1.36	1.60	+18%	30.67	708
1836	0.5	1.39	1.30	-6%	29.17	635
1850	0.6	1.12	1.40	+25%	28.00	713
2008	0.6	1	1.10	+10%	18.83	625
1986	0.2	2.4	2.60	+8%	36.67	700
1974	0.5	1.6	1.50	-6%	38.83	719
1661	0.4	1.7	1.40	-18%	31.67	717
1836	0.4	1.24	1.40	+13%	37.50	712
1995	0.4	1.59	1.70	+7%	36.17	625

Le modèle proposé de soudage et de refroidissement a des limites. En effet, ce modèle repose sur un maillage géométrique du cordon dont les valeurs proviennent d'un réseau de neurones. Les prédictions du RN contiennent des écarts entre la géométrie mesurée au microscope et la valeur prédite du RN. Nous avons également noté lors de la mesure du déplacement de la pièce que les substrats n'avaient pas tous une épaisseur de 5mm. L'épaisseur de ces derniers variaient entre 5.5mm et 6.30mm. Or à paramétrie d'entrée identique, plus le substrat est épais, plus il résistera à la déformation. De plus, une des entrées du modèle de soudage et de refroidissement est la température du fil, T_{fil} .

Cette température, très difficile à déterminer expérimentalement, est approximée. Une autre limite de notre modèle porte sur les valeurs des lois de comportement thermique et mécanique du TA6V ainsi que sur les valeurs des conditions aux limites (convection, radiation, température de la cellule robotisée, bridage, etc.). Les valeurs des lois de comportement sont difficiles à trouver dans la littérature et à adapter dans les modèles de simulations de procédé additif.

4.4 CONCLUSION

Au cours de ce chapitre, nous avons développé un méta-modèle numérique permettant de prédire par réseau de neurones la géométrie d'un cordon en fonction de ses paramètres machine et de simuler pour prédire le déplacement de la pièce par un modèle thermomécanique. Ces modèles ont permis de répondre à la question de recherche 2 : « Comment prédire les sorties géométriques en fonction des paramètres d'entrée du procédé LMD-w ? ». Ces deux modèles sont résumés sur la Figure 4.21.

Le modèle de prédiction par réseau de neurones permet de prédire la géométrie du cordon (h_c et w_c), de la dilution (h_d et w_d) ainsi que l'angle de contact (α) en fonction de la paramétrie d'entrée (P , WFS et TS). L'architecture de ce réseau de neurone est 3-7-5. C'est-à-dire que le réseau a 3 neurones sur la couche d'entrée, 7 neurones sur la couche cachée et 5 neurones sur la couche de sortie. Ce modèle de prédiction direct a permis d'obtenir des écarts moyens, entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites, de 2.58% pour la hauteur de cordon, 3.76% pour la hauteur de dilution, 1.30% pour la largeur de cordon, 1.29% pour la largeur de dilution et 0.09% pour l'angle de contact. De plus, toutes les sorties exceptée la hauteur de dilution ont des pourcentages d'erreur maximal inférieurs à 10%. Ces valeurs sont regroupées dans le Tableau 4.2.

Les valeurs géométriques prédites, h_c et w_c , sont ensuite récupérées afin de générer un maillage, flèche verte sur la Figure 4.21. Ce maillage est alors utilisé dans le modèle de simulation thermomécanique du procédé LMD-w. Ce modèle de simulation est divisé en deux sous-modèles : modèle de préchauffe de fil et modèle de soudage et refroidissement. Le modèle de préchauffe, dépendant de la puissance, P , et de la vitesse d'avance de fil, WFS . Ce premier sous-modèle permet de déterminer la température moyenne du fil avant qu'il n'entre en contact avec le substrat. Cette température avoisine la température de fusion du métal qui est de 1625°C, ce qui signifie que lorsque le fil atteint le bain, il est déjà à l'état liquide. Cette température T_{fil} est ensuite utilisée comme température initiale du fil pour le modèle de soudage et refroidissement. Ce deuxième sous-modèle permet de calculer le déplacement de la pièce une fois son cycle de fabrication terminée. Cependant, il existe des écarts positifs et négatifs entre les valeurs du déplacement mesuré et les valeurs du déplacement calculé pouvant s'expliquer par nos choix de conception de ce modèle (conditions aux limites, lois de comportement thermique et mécanique, maillage issu du RN, définition de la source de chaleur, etc.). Malgré tout, les résultats de ce sous-modèle sont satisfaisants avec un écart moyen absolu de 11%.

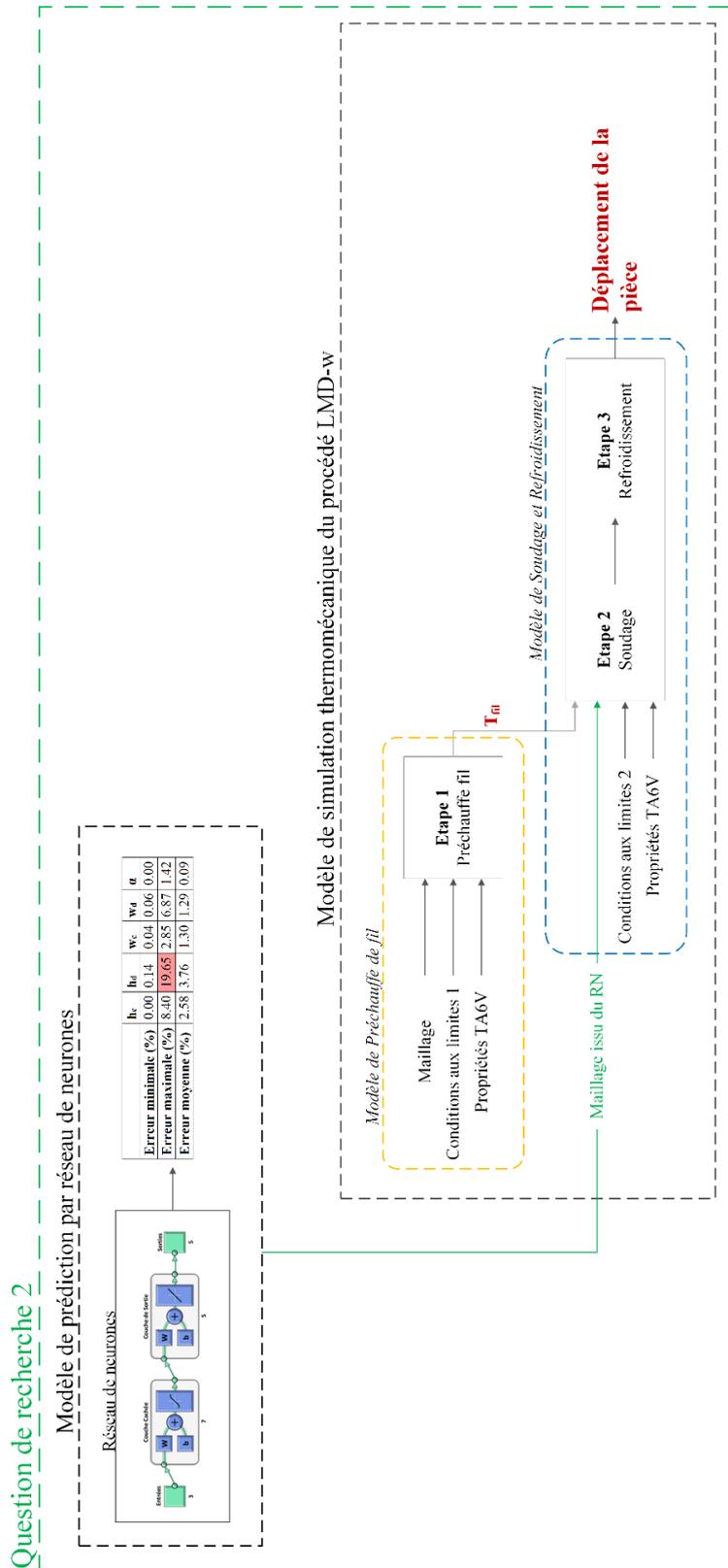


Figure 4.21 Modèle de réseau de neurones et modèle de simulation thermomécanique du procédé LMD-w pour la prédiction des sorties géométriques et du déplacement du substrat en fonction des paramètres d'entrée du procédé

CHAPITRE 5 : DEVELOPPEMENT D'UNE METHODE POUR L'EXPLORATION DES ESPACES DE SOLUTIONS POUR LA CORRECTION EN FABRICATION ADDITIVE

5.1	Introduction Chapitre 5	116
5.2	La correction de défauts géométriques en fabrication additive	116
5.2.1	Le problème de correction.....	116
5.2.2	Les variables de performances	117
5.2.3	Les stratégies proposées pour la correction de défaut en fabrication additive	118
5.3	Algorithme de génération de solutions non dominées au sens de Pareto	120
5.3.1	Rappel du principe de dominance	120
5.3.2	Algorithme de génération développé.....	121
5.4	Résolution du problème de défaut « volumique ».....	126
5.4.1	Expressions des objectifs.....	126
5.4.2	Résultats et analyse.....	130
5.4.3	Exploration et Exploitation du Design Space.....	132
5.5	Conclusion.....	136

5.1 INTRODUCTION CHAPITRE 5

Au cours des différents chapitres, nous avons présenté notre modèle de comportement et notre métamodèle numérique relatif au procédé de la fabrication additive LMD-w. Le modèle de comportement nous a permis de déterminer quels étaient les impacts des paramètres machine du procédé LMD-w sur les variables géométriques d'un cordon. Le métamodèle quant à lui, permet tout d'abord de prédire pour un triplet de paramètres d'entrée (puissance laser, vitesse d'avance de fil et vitesse de déplacement de l'outil) la géométrie du cordon à fabriquer, grâce à un réseau de neurones. Il permet aussi, grâce à un modèle de simulation thermomécanique, de prédire quel serait le déplacement de la pièce en sortie du procédé.

Dans ce chapitre, nous utilisons l'ensemble de ces résultats afin de répondre à la question de recherche 3 « Quelle stratégie appliquer pour corriger un défaut géométrique en fabrication additive ? ».

Pour répondre à cette question, nous avons développé un algorithme reposant sur le principe de dominance au sens de Pareto. Le principe de dominance au sens de Pareto est pertinent ici, car notre objectif est de mettre l'utilisateur au centre de la décision. Nous souhaitons donc lui fournir un outil, l'algorithme, qui lui donnera un ensemble de solutions répondant à son problème. Ainsi, l'utilisateur, fort de son expérience avec le procédé de fabrication additive, choisira la solution qui convient à son problème de conception. C'est pourquoi dans un premier temps, le terme de stratégie est défini ainsi que le défaut géométrique considéré pour notre étude. Dans un second temps, l'algorithme développé est exposé. Enfin, nous nous mettons à la place de l'utilisateur pour tester l'algorithme sur un défaut géométrique aléatoire.

5.2 LA CORRECTION DE DEFANTS GEOMETRIQUES EN FABRICATION ADDITIVE

5.2.1 LE PROBLEME DE CORRECTION

Avant de passer à la correction, les pièces présentant des défauts sont généralement usinées. Cet usinage permet de revenir à l'étude de deux types de défauts géométriques :

- Les défauts surfaciques,
- Les défauts volumiques.

La correction associée aux défauts surfaciques est appelée « surfacage » et celle associée aux défauts volumiques est appelée « remplissage ». La partie de la pièce sur laquelle sera effectuée la correction est appelée substrat. La différence entre ces deux types de défaut est l'épaisseur de la correction à effectuer. En effet, pour le surfacage une seule couche de cordon est fabriquée contre deux ou plus pour le remplissage.

Ainsi nous pouvons ramener la géométrie du défaut étudié à celle présentée sur la Figure 5.1.

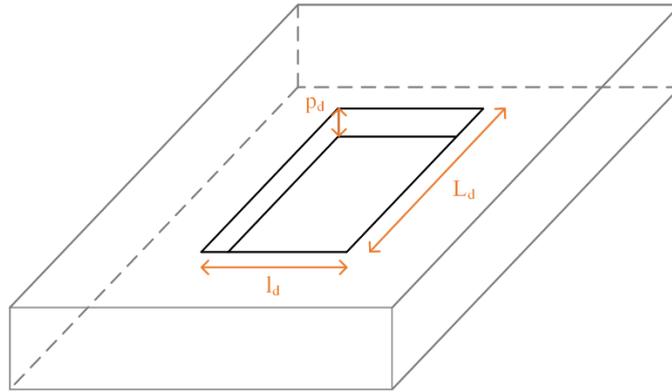


Figure 5.1 Géométrie du défaut à corriger

Avec L_d la longueur du défaut en mètres, l_d la largeur du défaut en mètres et p_d la profondeur du défaut à corriger en mètres.

Afin de définir les corrections adaptées au défaut, nous proposons de développer un algorithme d'optimisation utilisant le principe de dominance au sens de Pareto. Pour cela, définissons les variables de performances du problème d'optimisation dans la sous-section suivante.

Les paramètres machines du procédé LMD-w sont la puissance du laser (P), la vitesse d'avance de fil (WFS) et la vitesse de déplacement de l'outil (TS). Ces paramètres machine ont pour domaines de variations ceux présentés en (5.1). De plus, le ratio (rapport entre WFS et P) doit être compris entre 0.75 et 1.10, afin de garantir l'homogénéité du dépôt de matière.

$$\begin{aligned}
 P &\in [1253; 2553] \text{ W} \\
 WFS &\in [1.16; 2.56] \text{ m/min} \\
 TS &\in [0.2; 0.6] \text{ m/min} \\
 r &\in [0.75; 1.10]
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

De plus, l'angle de contact est contraint par la condition suivante : il doit être inférieur ou égal à 90° . De plus, les hauteurs de cordon et de dilution ainsi que la largeur de cordon doivent être supérieures à 0.

5.2.2 LES VARIABLES DE PERFORMANCES

Le problème que nous souhaitons résoudre est bi-objectif. En effet, le but de l'algorithme proposé est de fournir à l'utilisateur un ensemble de solutions candidates permettant de corriger le défaut le plus rapidement possible tout en limitant la consommation de fil de TA6V. Ainsi les deux objectifs et variables de performance à minimiser, sont :

- le temps machine, noté $t_{machine}$
- la longueur de fil consommé, notée l_{fil}

Ces deux variables de performance sont fonction des dimensions du défaut à corriger, notée f , et de la stratégie employée. Nous pouvons alors exprimer les variables de performances telles que :

$$(t_{fab}, l_{fil}) = f(L_d, l_d, p_d, \text{stratégie})
 \tag{5.2}$$

5.2.3 LES STRATEGIES PROPOSEES POUR LA CORRECTION DE DEFAUT EN FABRICATION ADDITIVE

Pour fabriquer une pièce en fabrication additive, plusieurs variables sont à définir telles que :

- les paramètres d’entrée du procédé étudié,
- la trajectoire de la tête d’impression,
- le recouvrement horizontal des cordons,
- les temps de pause pendant la fabrication ou encore
- le temps de refroidissement de la pièce à l’issue de la fabrication.

L’ensemble de ces paramètres forme ce que nous appelons la stratégie. Il existe autant de stratégies qu’il existe de valeurs possibles pour chaque variable.

Les objectifs de nos travaux sont de définir un jeu de paramètres d’entrée du procédé LMD-w et une stratégie adaptée pour la correction de défaut géométrique. C’est pourquoi, pour la suite de nos travaux, nous considérerons que les paramètres d’entrées du procédé sont indépendants de la stratégie de fabrication. De plus, des contraintes sont fixées telles que :

- le temps de refroidissement de la pièce fabriquée dans la cuve sera de 120 secondes,

$$t_r = 120s$$

- il n’y aura pas de temps de pause durant la fabrication,

$$t_{pause} = 0s$$

Le jeu de paramètres d’entrée sera défini grâce à notre étude. Le temps de refroidissement et le temps de pause sont fixés. Dans la suite de cette section, nous présenterons donc les variables restantes : le recouvrement horizontal et les trajectoires de la tête d’impression.

A. RAPPEL SUR LE RECOUVREMENT HORIZONTAL

Le recouvrement, également appelé « overlapping » dans la littérature, représente le chevauchement entre deux cordons. Ce recouvrement est compris entre 0, pas de chevauchement, et 1, les deux cordons sont superposés. Lors du recouvrement horizontal de deux cordons, deux phénomènes sont à prendre en considération pour déterminer la valeur de ce recouvrement. Selon Ding *et al.* [105], les deux phénomènes sont :

- la formation d’une zone creuse lorsque la distance entre les centres est trop importante,
- une augmentation de la hauteur du cordon lorsque la distance entre les centres est trop faible.

Toujours selon Ding *et al.* [105], dans leurs travaux sur le recouvrement entre deux cordons pour le procédé WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), il existe une distance à respecter entre les centres des deux cordons, notée d^* , permettant de réduire la formation de creux et l’augmentation de la hauteur de cordon lors du dépôt du second cordon. Cette distance vaut 0.738 fois la largeur des cordons w_c .

$$d^* = 0.738w_c \quad (5.3)$$

La Figure 5.2 illustre les phénomènes observés en fonction de la distance entre les centres des deux cordons déposés. Sur la Figure 5.2 (a), les centres des cordons sont à la distance optimale. Sur la Figure 5.2 (b), la distance séparant les deux centres est inférieure à la distance optimale définie par Ding *et al.* créant une élévation de la hauteur du cordon 2. Enfin sur la Figure 5.2 (c) les cordons sont séparés par une distance d supérieure à la distance optimale d^* créant une zone de creux entre les deux sommets des cordons.

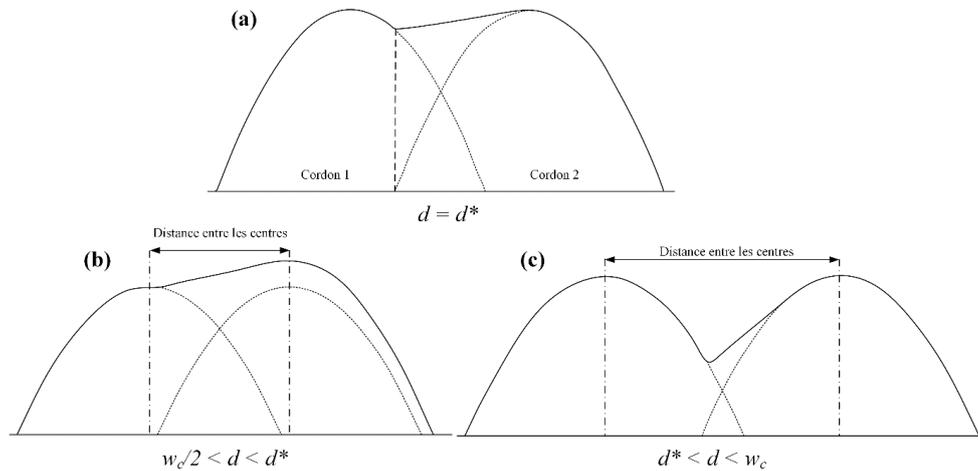


Figure 5.2 Phénomènes naissant lors du recouvrement horizontal en fonction de la distance d entre les centres des deux cordons, selon Ding *et al.* [105]

Pour la suite de nos travaux, nous considérerons la distance de recouvrement comme étant la distance d^* .

B. TRAJECTOIRES DE LA TETE D'IMPRESSION RETENUES

En fabrication additive, six trajectoires de la tête d'impression sont majoritairement employées : « tramé », « zigzag », « contour », « spirale », « continu » et « hybride » [104]. La Figure 5.3 illustre les schémas des différentes trajectoires :

- la trajectoire « tramé », *raster* en anglais,
- la trajectoire « zigzag »,
- la trajectoire « contour »,
- la trajectoire « spirale »,
- la trajectoire « continu », *continuous* en anglais,
- a trajectoire « hybride ».

Dans le cadre de notre étude, le défaut est simulé par un rectangle s'il est surfacique ou par un parallépipède rectangle s'il est volumique. Au vu de la géométrie des défauts, nous avons choisi, pour des raisons de développement de l'algorithme, de concentrer notre étude sur les trajectoires « tramé » et « zigzag ». Chacune de ces deux trajectoires sera appliquée dans le sens de la longueur du défaut et dans le sens de la largeur du défaut. Nous nous retrouvons ainsi à étudier huit scénarios, soit deux corrections et quatre scénarios par correction :

- correction Surfaçage
 - scénario S1 : Trajectoire « tramé » dans la longueur,
 - scénario S2 : Trajectoire « zigzag » dans la longueur,
 - scénario S3 : Trajectoire « tramé » dans la largeur,
 - scénario S4 : Trajectoire « zigzag » dans la largeur.
- correction Remplissage
 - scénario R1 : Trajectoire « tramé » dans la longueur,
 - scénario R2 : Trajectoire « zigzag » dans la longueur,
 - scénario R3 : Trajectoire « tramé » dans la largeur,
 - scénario R4 : Trajectoire « zigzag » dans la largeur.

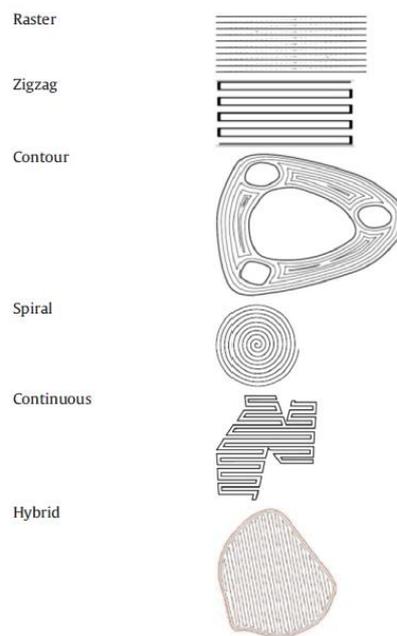


Figure 5.3 Les différentes trajectoires en fabrication additive, selon Ding *et al.* [104]

Les huit scénarios sont définis. Nous devons maintenant trouver, en fonction de la géométrie du défaut et du scénario, les solutions non-dominées au sens de Pareto. Pour cela, nous avons développé un algorithme reposant sur le principe de dominance au sens de Pareto. Cet algorithme développé sur Matlab permettra de générer ces solutions. Puis l'utilisateur « sélectionnera » l'une d'entre elles.

5.3 ALGORITHME DE GENERATION DE SOLUTIONS NON DOMINEES AU SENS DE PARETO

5.3.1 RAPPEL DU PRINCIPE DE DOMINANCE

Le principe de dominance au sens de Pareto est employé en optimisation multi-objective. Un problème d'optimisation multi-objectif consiste à trouver parmi un ensemble de solutions candidates un sous-ensemble de solutions minimisant ou maximisant les objectifs définis. La

solution choisie par l'utilisateur parmi ces solutions, est celle qui offre le meilleur compromis entre les variables de performance.

Soit un problème multi-objectif dont les solutions doivent minimiser les objectifs (5.4). Nous noterons X l'espace de décision, Y l'espace objectif ou performance, x les solutions candidates appartenant à ces deux espaces de décision et objectif et $F(x)$ la fonction objective.

$$\min \left(F(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \right), n \geq 2 \quad (5.4)$$

La solution optimale est la solution qui domine les autres solutions candidates. La dominance est définie telle que (5.5) :

$$x_1 \text{ domine } x_2 \text{ ssi } \forall i \in [1 \dots n], f_i(x_1) \leq f_i(x_2) \text{ et } \exists k \in [1 \dots n] | f_k(x_1) < f_k(x_2) \quad (5.5)$$

Ainsi une solution candidate, x^P , est considérée comme Pareto optimale si et seulement si aucune autre solution candidate ne la domine (5.6).

$$x^P \in X \text{ Pareto optimale ssi } \exists x \in X | x^P < x \quad (5.6)$$

Il existe un ensemble de solutions Pareto-Optimales, stockées dans un vecteur. L'ensemble de ces solutions optimales forment un front de Pareto dans l'espace objectif Y comme illustré en violet sur la Figure 5.4.

Cependant, la forme du front de Pareto dépend du nombre de variables à maximiser et/ou à minimiser. Suivant s'il faut maximiser ou minimiser les objectifs, le « sens » d'optimisation diffère :

- Si les deux variables, $g1$ et $g2$, sont à minimiser, le front de Pareto est orienté vers le bas à gauche, encadré (a) sur la Figure 5.4
- Si les deux variables, $g1$ et $g2$, sont à maximiser, le front de Pareto est orienté vers le haut droit, encadré (c) sur la Figure 5.4
- Si la variable en abscisse, $g1$, est à minimiser et la variable en ordonnée, $g2$, est à maximiser, le front de Pareto sera orienté en haut à gauche, encadré (b) sur la Figure 5.4
- Si la variable en abscisse, $g1$, est à maximiser et la variable en ordonnée, $g2$, est à minimiser, le front de Pareto est orienté en bas à droite, encadré (d) sur la Figure 5.4.

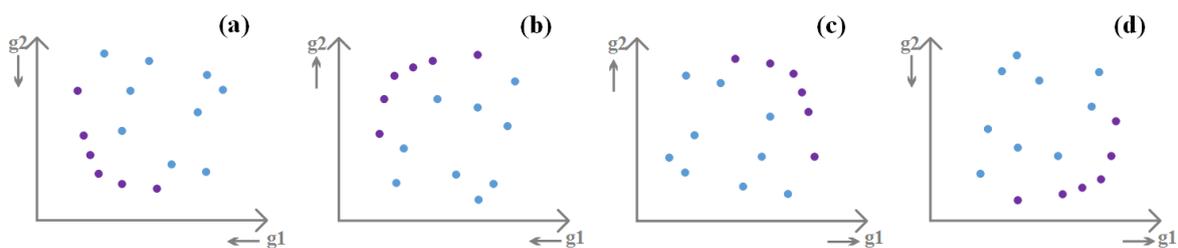


Figure 5.4 Différentes orientations du front de Pareto en fonction des objectifs par variables de performances

5.3.2 ALGORITHME DE GENERATION DEVELOPPE

Dans le cadre de la correction de défauts géométriques par la fabrication additive, nous définissons un algorithme reposant sur le principe de dominance au sens Pareto pour la correction « surfacage » et pour la correction « remplissage ». Fondamentalement, ces deux algorithmes suivent la même architecture. La différence se trouve dans la prise en compte de la

prédiction de la hauteur de dilution issue du réseau de neurones pour la correction « remplissage ». C'est pourquoi l'algorithme est présenté dans son aspect général.

A. GENERATION ALEATOIRE D'UN TRIPLET

Initialement, l'algorithme génère des paramètres machines aléatoires du procédé LMD-w. Ce triplet (P , WFS , TS) est écrit dans une matrice « historique » (H). Si ce triplet généré n'existe pas déjà dans la matrice H et si le ratio est compris entre ses bornes, alors le triplet (P , WFS et TS) servira de données d'entrée pour le réseau de neurones (RN) défini dans le Chapitre 4. Cette première étape est schématisée sur la Figure 5.5.

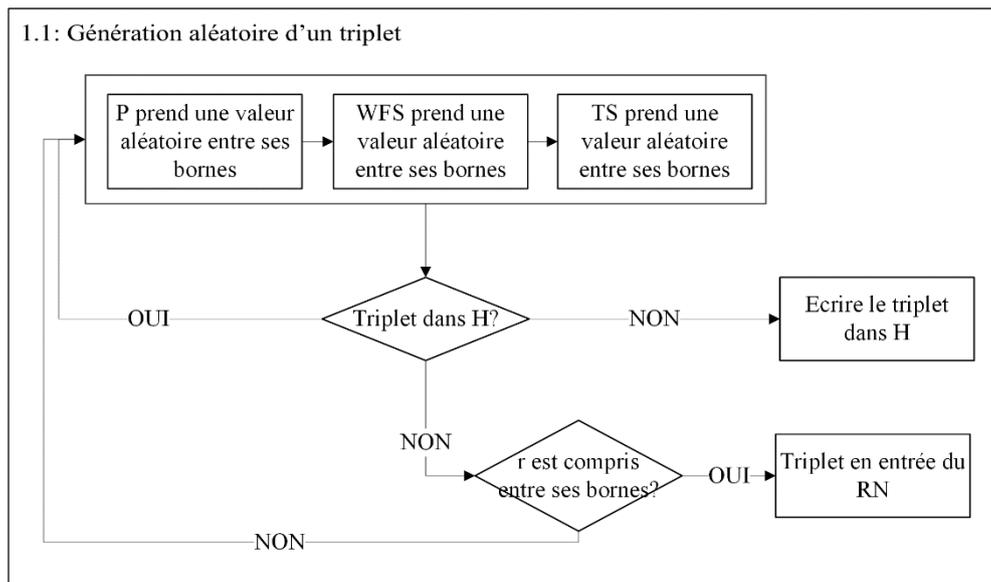


Figure 5.5 Génération aléatoire d'un triplet pour les paramètres machine du procédé LMD-w

B. PREDICTION DE LA GEOMETRIE DU CORDON

Dans un second temps, le triplet contenant les paramètres machine est utilisé comme données d'entrée pour le réseau de neurones. Nous récupérons en sortie du réseau de neurones (RN) les valeurs des paramètres de conception. Dans le cas de la correction « surfacage » les paramètres de conception sont la hauteur de cordon (h_c), la largeur de cordon (w_c) et l'angle de contact (α). Dans le cas de la correction « remplissage », la hauteur de dilution (h_d) est également considérée. Si les conditions sur les paramètres de conception sont respectées alors leurs valeurs sont écrites dans une matrice (M) et le triplet est écrit dans une matrice candidate, notée C . Une représentation schématique de la deuxième étape est ajoutée à la figure précédente sur la Figure 5.6.

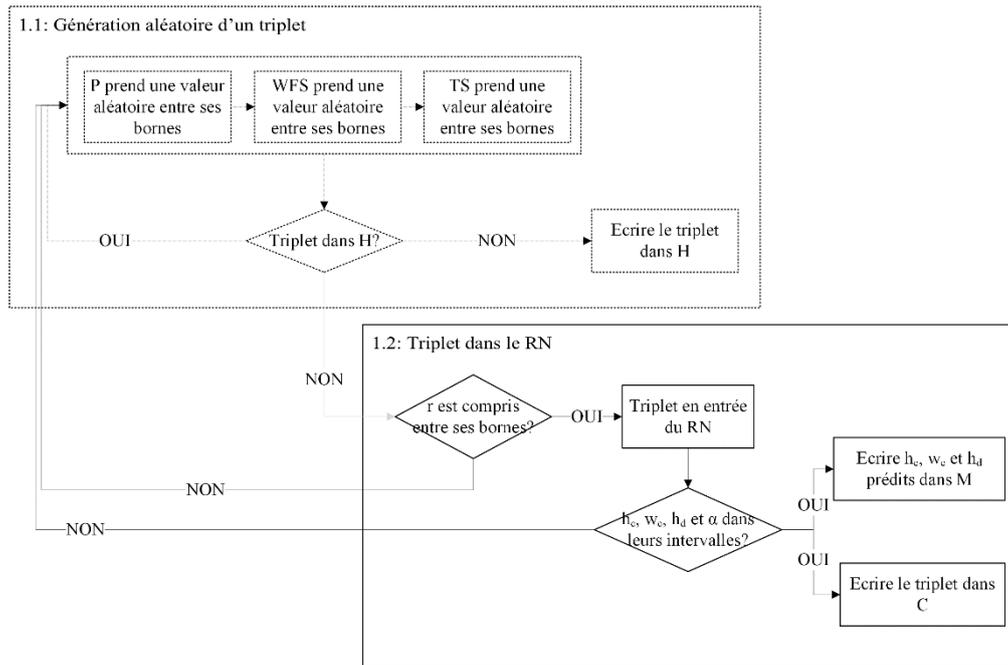


Figure 5.6 Utilisation des paramètres machine générés pour obtenir les paramètres de conception

C. CALCUL DES PERFORMANCES

Un ensemble de points aléatoires a été généré. Leurs performances ont été calculées, et enregistrées dans la matrice *Performance*. Cette dernière étape de notre algorithme consiste à calculer les performances de nouveaux points, générés par l'algorithme, pour chacune des quatre trajectoires. Les performances calculées sont le temps machine et la longueur de matière consommée pour corriger le défaut donné. L'expression des performances est présentée dans la prochaine sous-section. De ce fait, si les performances calculées, pour le triplet, sont inférieures aux performances des solutions candidates déjà présentes alors cette solution est « ignorée ». A contrario, si les performances calculées, pour le triplet, sont meilleures que toutes les solutions candidates optimales présentes, alors cette solution candidate est retenue et les performances sont écrites dans une matrice « Performance ». Ainsi quatre cas sont possibles. Ces cas sont illustrés sur la Figure 5.7.

Le premier cas (a), la longueur de fil calculée pour le triplet d'entrée (P , WFS et TS), en vert sur la figure ci-après et noté x_2 , est inférieure à la longueur minimale des points déjà présents, en bleu sur la figure et noté x_1 . De plus le temps de fabrication calculé pour le nouveau triplet est quant à lui supérieur au temps minimal de fabrication. Dans ce cas, nous gardons le triplet et les performances associées dans les matrices C et *Performances*.

$$x_2 \text{ domine } x_1 \text{ car } l_i(x_2) \leq l_i(x_1) \text{ et } t_i(x_1) \leq t_i(x_2)$$

Pour le deuxième cas (b), le temps de fabrication est inférieur au temps minimal de fabrication. La longueur de fil calculée est quant à elle supérieure à la longueur minimale de fil. Dans ce cas, le triplet et les performances sont conservées dans les matrices C et *Performances*.

$$x_2 \text{ domine } x_1 \text{ car } t_i(x_2) \leq t_i(x_1) \text{ et } l_i(x_1) \leq l_i(x_2)$$

Pour le troisième cas (c), les performances calculées sont inférieures aux performances minimales. Le triplet et les performances sont sauvegardées dans les matrices *C* et *Performances*.

$$x_2 \text{ domine } x_1 \text{ car } l_i(x_2) \leq l_i(x_1) \text{ et } t_i(x_2) \leq t_i(x_1)$$

A contrario, pour le quatrième cas (d), les performances calculées sont supérieures aux performances minimales. Dans ce cas-là, le triplet est conservé dans la matrice *H* mais les performances ne sont pas sauvegardées. Ce triplet ne sera pas tracé dans le graphique.

$$x_1 \text{ domine } x_2 \text{ car } l_i(x_1) \leq l_i(x_2) \text{ et } t_i(x_1) \leq t_i(x_2)$$

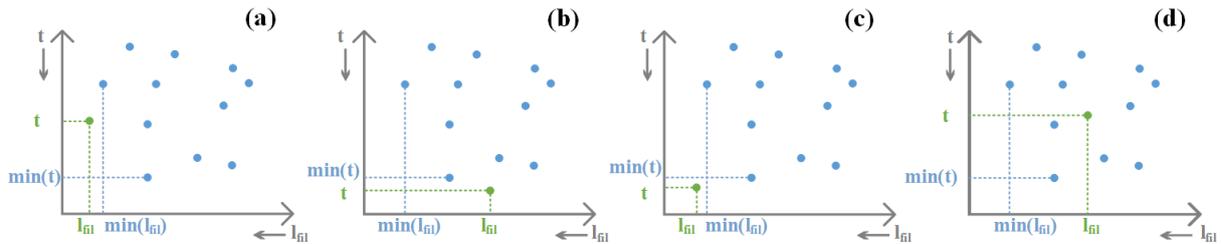


Figure 5.7 Différents résultats issus du calcul des performances

Les points ajoutés dans la matrice *Performances* permettent d'avancer vers le front de Pareto, pour chaque stratégie, en fonction du défaut à corriger. Pour cela, nous avons généré des points, nous avons retenu les points non-dominés, après un nombre d'itérations, l'algorithme ne trouve plus de candidats. Nous extrayons alors de la matrice les points non-dominés, qui eux forment le front de Pareto.

Nous pouvons ainsi résumer l'algorithme proposé en 3 étapes :

- étape 1 : Génération aléatoire d'un triplet
- étape 2 : Prédiction des paramètres de conception par le réseau de neurones
- étape 3 : Calculs de performances du triplet en fonction de la correction et du scenario & approximation du front de Pareto par scenario

L'ensemble de ces étapes sont résumé sur la Figure 5.8.

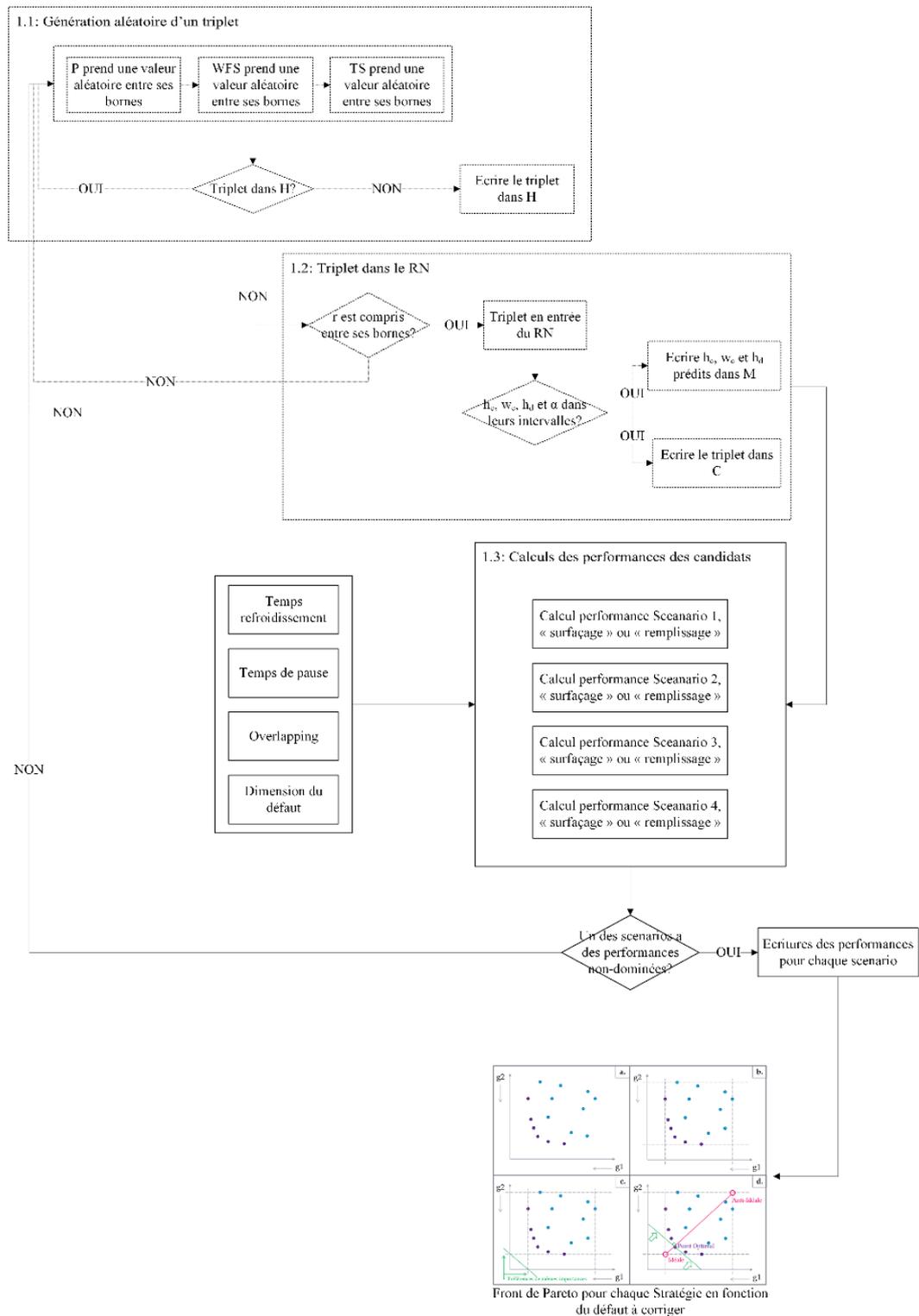


Figure 5.8 Architecture de l'algorithme de Pareto pour la correction d'un défaut donné

Dans la prochaine section, nous nous mettrons à la place de l'utilisateur. Pour cela, nous définirons dans un premier temps un défaut aléatoire, puis dans un second temps, nous chercherons les solutions candidates pour corriger ce défaut en fonction des différents scénarios. Afin de généraliser les géométries des défauts, nous nous positionnons dans le cas dont la correction sera le « remplissage ».

5.4 RESOLUTION DU PROBLEME DE DEFAUT « VOLUMIQUE »

Dans cette section, nous appliquons l'algorithme développé pour la correction « remplissage ». Dans un premier temps, nous proposons d'exprimer les objectifs en fonction de la stratégie employée. Dans un second temps, nous explorerons l'espace des solutions candidates.

Soit le défaut de dimensions :

- la longueur du défaut, $L_d = 10cm$,
- la largeur du défaut, $l_d = 5cm$,
- la profondeur du défaut, $p_d = 2cm$.

5.4.1 EXPRESSIONS DES OBJECTIFS

La Figure 5.9 schématise les quatre trajectoires et donc les quatre scénarios envisagés pour la correction d'un défaut volumique. Le scénario 1, encadré (a), est associé à la trajectoire « tramé » dans le sens de la longueur du défaut. Le scénario 2, encadré (b), a une trajectoire « zigzag » dans le sens de la longueur du défaut. Enfin les scénarios 3 et 4, encadrés (c) et (d) respectifs, les trajectoires sont « tramé » et « zigzag » dans le sens de la largeur du défaut.

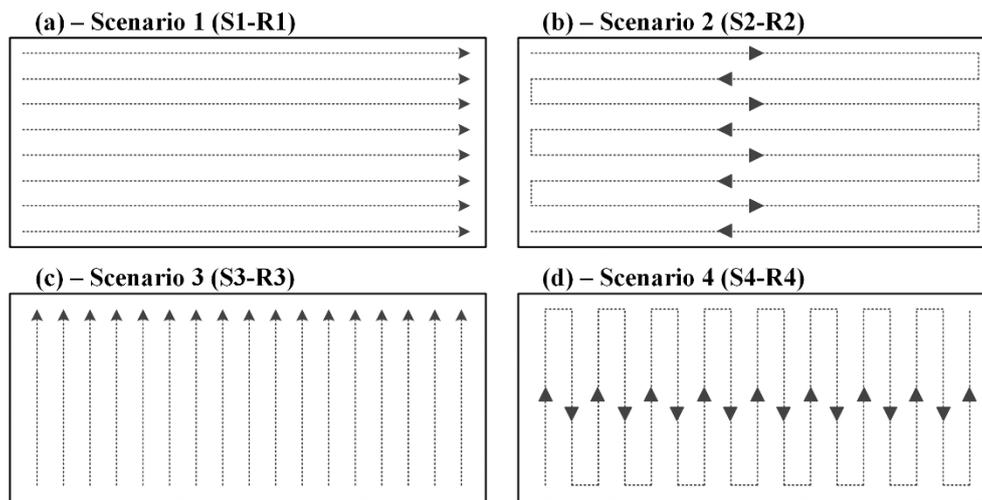


Figure 5.9 Différentes trajectoires pour les quatre scénarios pour la correction d'un défaut surfacique. (a) Scénario 1, (b) Scénario 2, (c) Scénario 3 et (d) Scénario 4

Les deux objectifs à exprimer sont le temps machine et la longueur de fil de TA6V utilisé. Le temps machine est défini comme la durée durant laquelle la pièce se trouve dans la cellule robotisée. Ces objectifs sont exprimés en fonction des quatre scénarios dans les prochains paragraphes.

Nous commençons par déterminer le nombre de cordons par couche, N_{cordon} , et le nombre de couches, N_{couche} , à fabriquer pour le défaut. Le nombre de couche est défini de telle sorte à ce que la hauteur de correction soit supérieure à la hauteur du défaut.

Nous définissons N_{cordon} comme étant le nombre minimal de cordons à déposer sur le substrat afin de couvrir la surface du défaut ($L_d \times l_d$).

Pour ce faire, nous calculons le rapport entre la largeur totale du défaut moins la largeur d'un cordon w_c et le recouvrement entre les cordons d'une valeur $d^* = 0.738w_c$. Le résultat est ensuite arrondi à l'unité supérieure.

$$N_{cordon} = \frac{l_d - w_c}{d^*} \quad (5.7)$$

Pour combler le manque de matière de profondeur p_d , il faut répéter la stratégie surfacique autant de fois que nécessaire, N_{couche} , c'est-à-dire jusqu'à ce que la hauteur totale de la pièce fabriquée soit supérieure à la profondeur.

Le temps machine est la somme du temps de fabrication, t_{fab} , (dépôt de matière et retour à la position initiale (0,d*)) de l'outil pour imprimer le cordon suivant pour une même couche), le temps de pause, le temps de retour en position (0,0) pour imprimer la couche suivante et ce jusqu'à N_{couche} , noté $t_{position}$, et le temps de refroidissement, noté t_r . Ainsi le temps machine, $t_{machine}$, s'exprime de façon générale selon l'expression (5.8)

Initialement, le temps de pause a été défini comme nul et le temps de refroidissement égal à 2 minutes.

$$t_{machine} = N_{couche}(t_{fab} + t_{position}) - t_{position} + t_r \quad (5.8)$$

Avec $t_{position}$ le rapport entre la distance que l'outil doit parcourir pour revenir à sa position (0,0), notée $l_{position}$, et la vitesse d'avance d'outil, TS . Cette distance, représentée en pointillés rouges sur la Figure 5.10, permet de faire revenir l'outil à sa position (0,0) pour fabriquer la couche supérieure. Elle s'exprime de façon différente suivant la trajectoire et suivant si le nombre de cordons par couche est pair ou impair pour les trajectoires « zigzag », encadrés (b), (c), (e) et (f).

$$t_{position} = \frac{l_{position}}{TS} \quad (5.9)$$

Ainsi cette longueur, $l_{position}$, est égale à :

- la diagonale du défaut pour les scénarios 1, 2 impair, 3 et 4 impair, telle que :

$$l_{position} = \sqrt{(L_d - w_c)^2 + (l_d - w_c)^2} \quad (5.10)$$

- la largeur du défaut moins la largeur d'un cordon pour le scénario 2 pair, telle que

$$l_{position} = l_d - w_c \quad (5.11)$$

- la longueur du défaut moins la largeur d'un cordon pour le scénario 4 pair, telle que

$$l_{position} = L_d - w_c \quad (5.12)$$

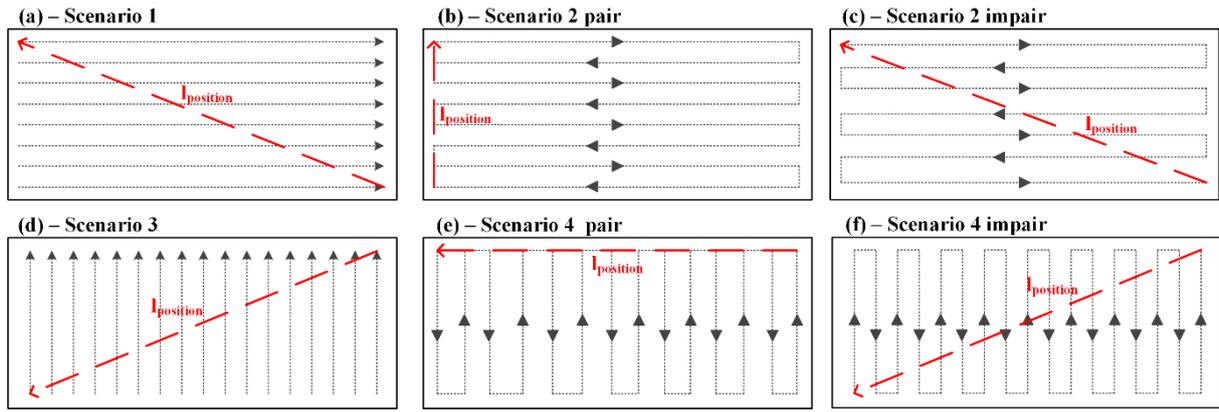


Figure 5.10 Schématisation de la longueur pour revenir en position initiale pour imprimer une couche n+1

Dans la suite de cette section, le temps machine et la longueur de fil utilisé pour chaque scénario seront exprimés en fonction de la vitesse de déplacement d'outil, TS , des dimensions du défaut, L_d , l_d et p_d et de la largeur de cordon, w_c .

A. SCENARIO 1 : TRAJECTOIRE « TRAME » DANS LA LONGUEUR

D'après la formule générale du temps machine (5.8), nous pouvons exprimer celui pour le scénario 1, noté t_1 comme étant :

$$t_1 = N_{couche} \left(\left((N_{cordon} - 1) \times \frac{\sqrt{(L_d - w_c)^2 + d^{*2}}}{TS} + N_{cordon} \times \frac{L_d - w_c}{TS} \right) + \frac{\sqrt{(L_d - w_c)^2 + (l_d - w_c)^2}}{TS} - \frac{\sqrt{(L_d - w_c)^2 + (l_d - w_c)^2}}{TS} + 2 \right) \quad (5.13)$$

Avec t_1 le temps machine pour le scénario 1 en minute, L_d la longueur du défaut en mètre, w_c la largeur d'un cordon en mètre, d^* la distance optimale centre à centre et TS la vitesse de déplacement de l'outil en mètre par minute.

Nous définissons la longueur d'un cordon comme étant la longueur du défaut moins la largeur d'un cordon multipliée par le nombre de couches total, N_{couche} . Ainsi, pour obtenir la longueur totale de fil utilisée pour remplir le défaut, nous multiplions cette longueur de cordon par le nombre de cordons, N_{cordon} . Ainsi, cette longueur de fil en mètre, notée l_1 , est telle que :

$$l_1 = N_{couche} \left(N_{cordon} \left(\frac{WFS \times (L_d - w_c)}{TS} \right) \right) \quad (5.14)$$

B. SCENARIO 2 : TRAJECTOIRE « ZIGZAG » DANS LA LONGUEUR

Pour le scénario 2, la trajectoire « zigzag » est utilisée. Cette trajectoire peut être décomposée en deux sous-trajectoires : trajectoire « tramé » dans le sens de la longueur et un retour noté

l_{retour} . Pour couvrir la surface du défaut ($L_s \times l_s$), N_{cordon} sont fabriqués sur N_{couche} . Le nombre de cordon est identique au nombre de cordon du scénario 1. La longueur retour, l_{retour} , est la distance centre à centre entre deux cordons successifs, d^* (5.2).

$$l_{retour} = d^* = 0.738w_c \quad (5.15)$$

En reprenant la définition (5.8) du temps machine, nous pouvons exprimer pour le scénario 2 que :

$$t_{2,pair} = N_{couche} \left(\left(N_{cordon} \times \frac{L_d - w_c}{TS} + (N_{cordon} - 1) \times \frac{l_{retour}}{TS} \right) + \frac{l_d - w_c}{TS} \right) - \frac{l_d - w_c}{TS} + 2 \quad (5.16)$$

$$t_{2,impair} = N_{couche} \left(\left(N_{cordon} \times \frac{L_d - w_c}{TS} + (N_{cordon} - 1) \times \frac{l_{retour}}{TS} \right) + \frac{\sqrt{(L_d - w_c)^2 + (l_d - w_c)^2}}{TS} \right) - \frac{\sqrt{(L_d - w_c)^2 + (l_d - w_c)^2}}{TS} + 2 \quad (5.17)$$

La longueur de fil de la bobine de TA6V consommé se calcule suivant l'expression suivante, indépendamment de la parité du nombre de cordon :

$$l_2 = N_{couche} \left(N_{cordon} \frac{WFS \times (L_s - w_c)}{TS} + (N_{cordon} - 1) \frac{WFS \times l_{retour}}{TS} \right) \quad (5.18)$$

Les scénarios 1 et 2 considèrent des trajectoires dans le sens de la longueur du défaut. Les scénarios 3 et 4 sont des stratégies avec des trajectoires dans le sens de la largeur du défaut. Ainsi l'expression des objectifs des scénarios 3 et 4 est identique à celle des objectifs des scénarios 1 et 2 à la différence que la longueur et la largeur du défaut sont inversées.

C. SCENARIO 3 : TRAJECTOIRE « TRAME » DANS LA LARGEUR

Pour le temps machine, nous reprenons la formule (5.13) en remplaçant la longueur du défaut par sa largeur. Ainsi, nous obtenons :

$$t_3 = N_{couche} \left(\left((N_{cordon} - 1) \times \frac{\sqrt{(l_d - w_c)^2 + d^{*2}}}{TS} + N_{cordon} \times \frac{l_d - w_c}{TS} \right) + \frac{\sqrt{(L_d - w_c)^2 + (l_d - w_c)^2}}{TS} \right) - \frac{\sqrt{(L_d - w_c)^2 + (l_d - w_c)^2}}{TS} + 2 \quad (5.19)$$

Avec t_3 le temps machine du scénario 3 exprimé en minute, l_d la largeur du défaut surfacique en mètre, w_c la largeur du cordon en mètre, d^* la distance centre à centre entre deux cordons successifs en mètre et TS la vitesse de déplacement de l'outil en mètre par minute.

La longueur de fil utilisé, l_3 , s'exprime comme étant

$$l_3 = N_{couche} \left(N_{cordon} \frac{WFS \times (l_d - w_c)}{TS} \right) \quad (5.20)$$

D. SCENARIO 4 : TRAJECTOIRE « ZIGZAG » DANS LA LARGEUR

En reprenant les formules du scénario 2 pair (5.16) et du scénario 2 impair (5.17) tout en inversant la longueur et la largeur du défaut, nous pouvons exprimer le temps machine du scénario 4 comme étant

$$t_{4,pair} = N_{couche} \left(\left(N_{cordon} \times \frac{l_d - w_c}{TS} + (N_{cordon} - 1) \times \frac{l_{retour}}{TS} \right) + \frac{L_d - w_c}{TS} \right) - \frac{L_d - w_c}{TS} + 2 \quad (5.21)$$

$$t_{4,impair} = N_{couche} \left(\left(N_{cordon} \times \frac{l_s - w_c}{TS} + (N_{cordon} - 1) \times \frac{l_{retour}}{TS} \right) + \frac{\sqrt{(L_d - w_c)^2 + (l_d - w_c)^2}}{TS} \right) - \frac{\sqrt{(L_d - w_c)^2 + (l_d - w_c)^2}}{TS} + 2 \quad (5.22)$$

La longueur de fil utilisée, l_4 , issue de la bobine de TA6V est

$$l_4 = N_{couche} \left(N_{cordon} \frac{WFS \times (l_s - w_c)}{TS} + (N_{cordon} - 1) \frac{WFS \times l_{retour}}{TS} \right) \quad (5.23)$$

5.4.2 RESULTATS ET ANALYSE

Initialement, l'algorithme génère et écrit cent triplets, répondant aux critères, dans la matrice candidate C . Les performances pour les quatre stratégies (scenario 1, scenario 2, scenario 3 et scenario 4) de ces cent triplets sont calculées.

L'algorithme a calculé les performances de 182 141 triplets. Parmi ces 182 141 triplets, l'algorithme a écrit 126 triplets dans la matrice candidate C .

Les fronts de Pareto des quatre stratégies sont regroupés sur un seul graphique, Figure 5.11. Cela permet de déterminer des solutions candidates inter stratégie. De ce fait, l'utilisateur entame son processus de décision. Sur l'axe des ordonnées nous retrouvons l'objectif à minimiser : la longueur de fil de TA6V consommé (en mètre) et sur l'axe des abscisses le temps machine (en minute).

Les ronds rouges sont les solutions candidates du scénario 1, les ronds bleus les solutions candidates du scénario 2, les diamants verts les solutions candidates du scénario 3 et enfin les astérisques noires les solutions candidates pour le scénario 4.

Nous remarquons sur cette Figure 5.11 que :

- les solutions candidates des scénarios 1 et 3 (trajectoires tramées dans le sens de la longueur et de la largeur) sont dominées par les solutions candidates des scénarios 2 et 4 (trajectoires zigzag dans le sens de la longueur et de la largeur du défaut)
- les scénarios 2 et 4 offrent un temps machine bien inférieur aux temps machine des scénarios 1 et 3 ($t_2=33.29\text{min}$ et $t_4=36.02\text{min}$ contre $t_1=119.2\text{min}$ et $t_3=174.2\text{min}$)
- le scénario 1, ronds rouges, permet d'atteindre une longueur de fil minimale ($l_1=60.24\text{m}$ contre $l_2=62.5\text{m}$, $l_3=61.7\text{m}$, et $l_4=66.81\text{m}$),

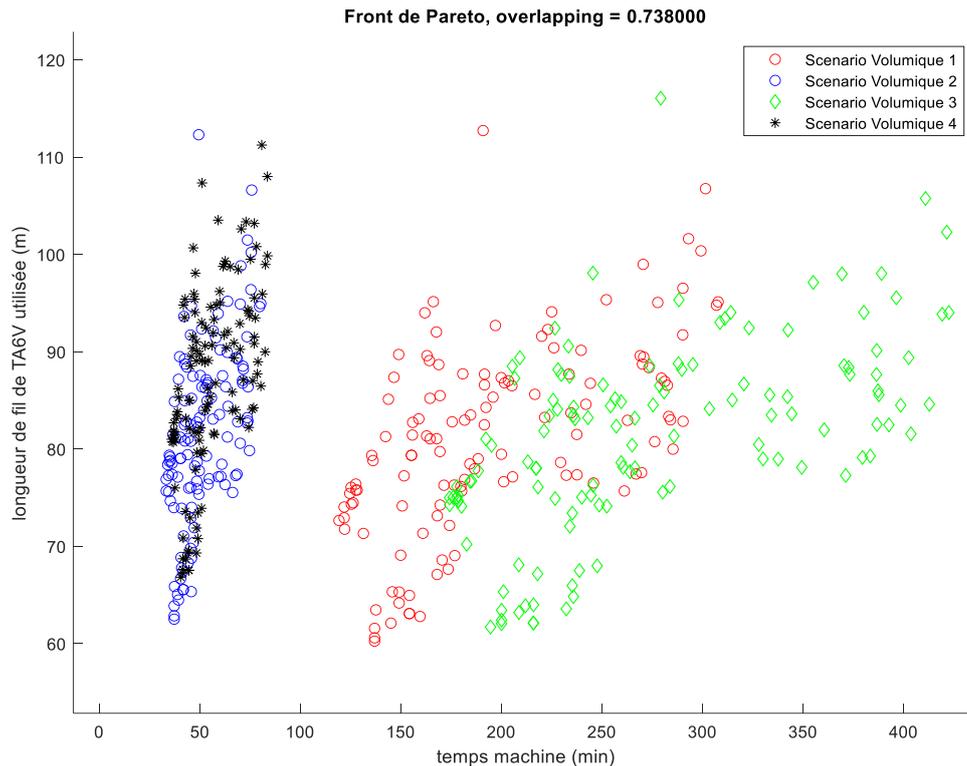


Figure 5.11 Espace des solutions candidates des scénarios 1, 2, 3 et 4 formant le front de Pareto pour le problème bi-objectif

Une fois que les solutions non-dominées générées par l'algorithme précédemment présenté, l'utilisateur retourne dans l'espace comportant les paramètres de conception (hauteur de cordon, largeur de cordon, puissance de laser, vitesse d'avance de fil, vitesse de déplacement de l'outil et le ratio) et les performances calculées. Cet espace lui permet de décider quelle stratégie retenir pour corriger son défaut en fonction des performances et de son expérience sur le procédé de FA.

Dans notre cas, après exploration visuelle de la Figure 5.11, il semblerait que les solutions offrant le meilleur compromis sont les optimums des scénarios 1 et 2. Cependant, les variables de performance ne sont pas pondérées. Cela signifie que nous accordons autant d'attention à la longueur de fil utilisée qu'au temps machine. Ainsi, le meilleur compromis provient du scénario 2. Or, en considérant une pondération plus importante sur la longueur de fil utilisée en raison du coût du titane, alors le meilleur compromis provient du scénario 1, car trois solutions proches sont non-dominées.

Cependant, une exploration graphique permet à l'utilisateur de vérifier si les paramètres associés à chacune de ces solutions dominantes retenues graphiquement par exploration permet d'obtenir par exemple :

- un dépôt de matière homogène (r proche de 1 [77]),
- un déplacement faible de la pièce finale en simulant la fabrication via le modèle thermomécanique.

Cette exploration et exploitation permet ainsi de définir la stratégie de correction optimale pour le défaut de l'utilisateur.

5.4.3 EXPLORATION ET EXPLOITATION DU DESIGN SPACE

Nous proposons à l'ingénieur en charge de la conception de choisir sa solution pour son problème de conception par les solutions candidates. Pour cela, nous utiliserons une visualisation du Design interactive. Les interfaces de conception graphique ont un impact positif sur la performance de l'ingénieur en charge de la conception [112]. Afin d'aider l'ingénieur dans son analyse et sa prise de décision pour le processus de conception [113], nous proposons le Parallel Coordinates Plot, Figure 5.12.

Dans notre cas, nous avons choisi de représenter graphiquement les solutions candidates générées par l'algorithme précédemment présenté ainsi que les paramètres de conception associés. Ces paramètres sont :

- les paramètres d'entrée machines : P , WFS et TS ,
- les valeurs de la hauteur et de la largeur de cordon pour le triplet d'entrée : h_c et w_c ,
- les variables de performances : l_{fil} et t ,
- le scenario de correction.

De ce fait, pour explorer l'espace de conception, nous avons choisi l'interface graphique Parallel Coordinates Plot. Chaque paramètre de conception est représenté par un axe pouvant être déplacé. Les points de conception sont représentés sous la forme de lignes bleues reliant les axes entre eux.

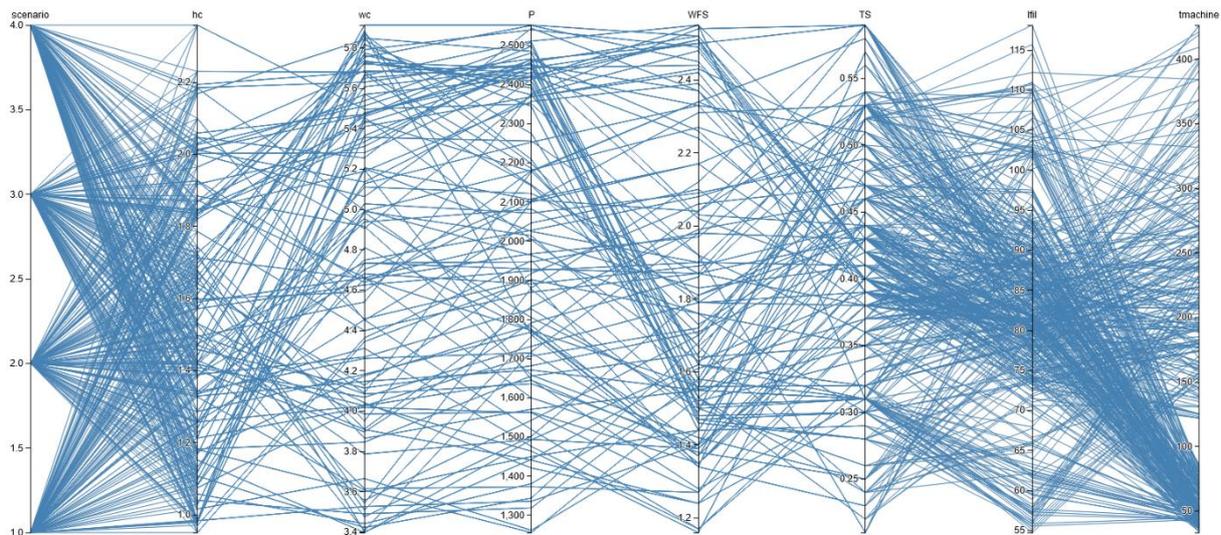


Figure 5.12 Parallel coordinates plot pour l'exploration de l'espace de conception (Design Space en anglais)

En dehors de cette page, les valeurs sont exclues et sont grisées. Ainsi sur la Figure 5.13, l'ingénieur a choisi deux critères pour son problème de conception que ses plages admissibles pour la puissance du laser P et la vitesse de déplacement de l'outil TS sont telles que :

$$1700 \text{ W} \leq P \leq 2100 \text{ W}$$

$$0.45 \text{ m/min} \leq TS \leq 0.6 \text{ m/min}$$

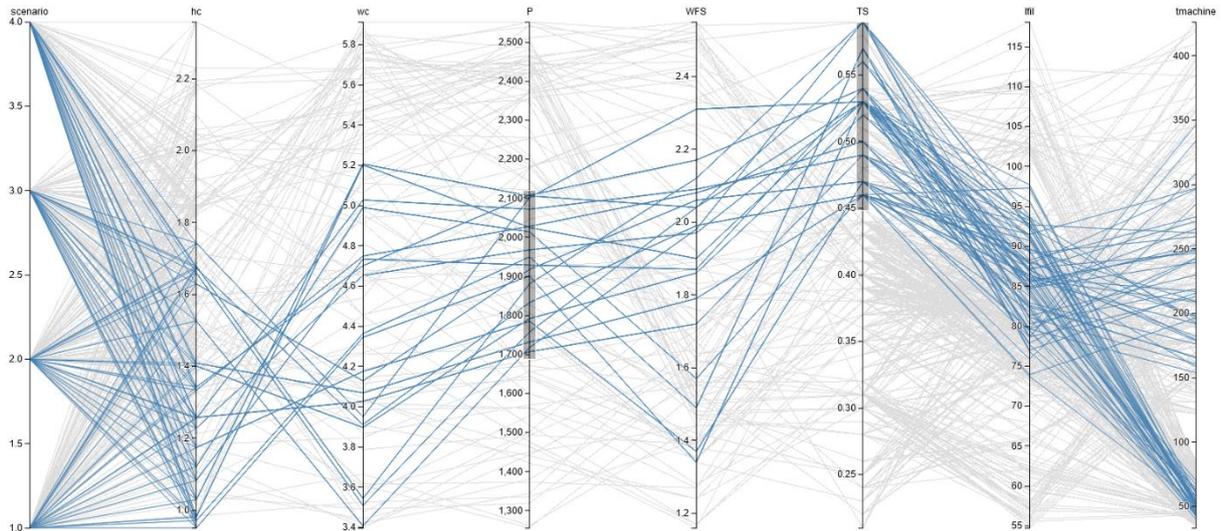


Figure 5.13 Plages de valeurs sélectionnées pour les critères avec en bleues les points conception retenus et en gris les points de conception exclus

Parmi les deux variables de performance, la priorité se porte sur la minimisation de la longueur de fil. Il sélectionne alors la plage correspondante, comme sur la Figure 5.14. Ce nouveau critère permet à l'ingénieur à se ramener à deux scénarios de correction contre quatre précédemment. Comme lors de l'exploration visuelle du front de Pareto, les deux scénarios envisagés sont le scenario 1 et le scenario 2.

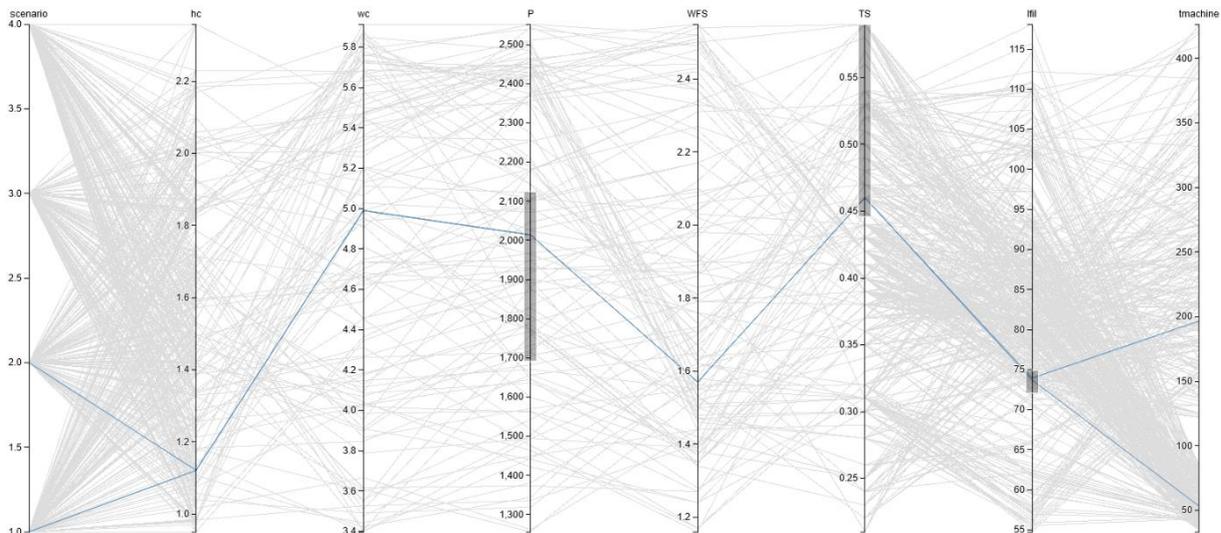


Figure 5.14 Plage de valeurs sélectionnée pour réduire le temps machine

Par la suite, l'ingénieur souhaite minimiser le temps machine pour la correction du défaut. Il sélectionne ainsi la valeur correspondante. Ainsi, l'exploration graphique interactive de l'espace de conception permet à l'ingénieur de déterminer que la trajectoire de correction adaptée à son problème de conception est celle du scénario 2, Figure 5.15. Cette exploration visuelle permet également de déterminer le jeu de paramètres d'entrée de la machine pour la correction du défaut.

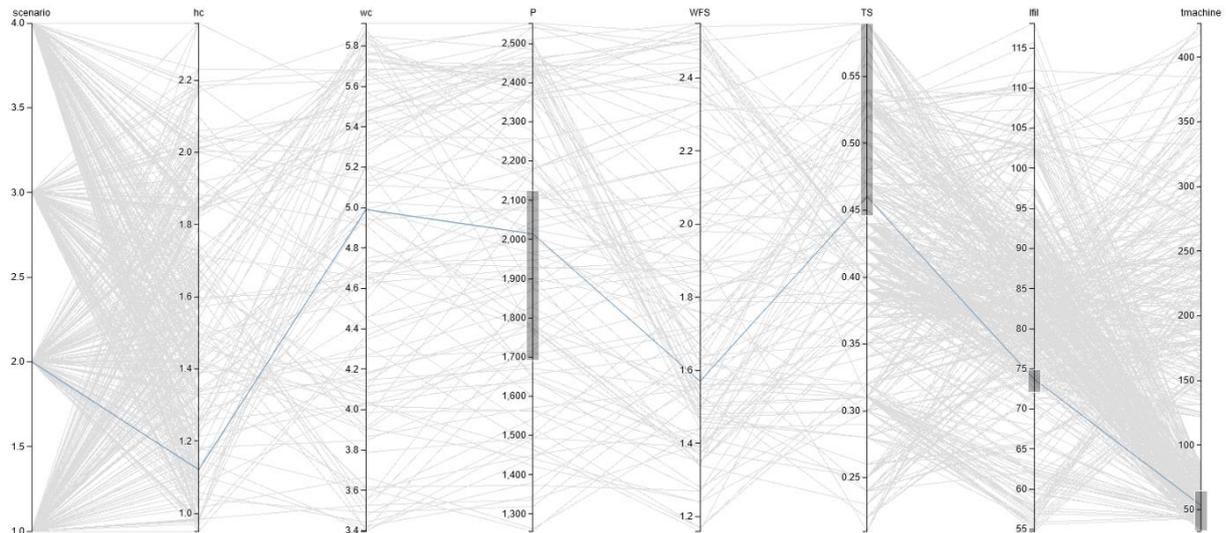


Figure 5.15 Solution optimale retenue par l'ingénieur pour son problème de conception après exploration de son espace de conception

Afin de vérifier la robustesse de la solution retenue, l'ingénieur sélectionne le scénario 2 en plus des plages de ses paramètres de conception (P , WFS et TS) tout en lâchant les filtres sur les critères de performances, Figure 5.16. La solution est robuste. En effet, le chemin de la Figure 5.16 est identique au chemin de la Figure 5.15.

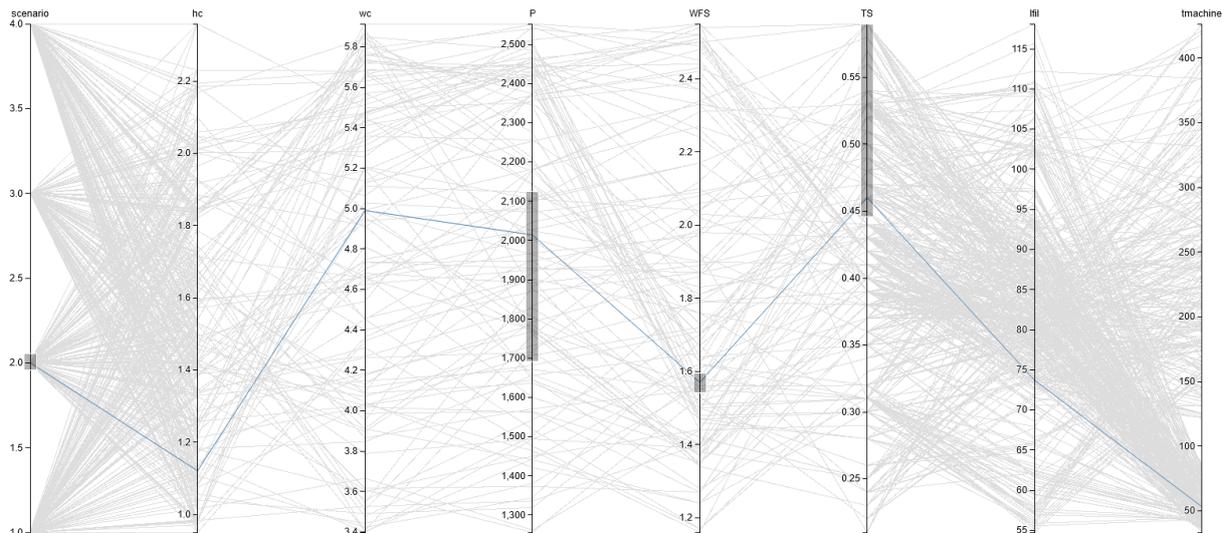


Figure 5.16 Solution retenue pour le problème de conception pour la correction d'un défaut géométrique d'une pièce mécanique par exploration de l'espace de conception

5.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté une approche d'aide à la décision pour la correction de défaut géométrique pour le procédé LMD-w. Cette approche repose sur le principe de dominance au sens de Pareto. Ainsi, nous répondons à la question de recherche 3 : « Quelle stratégie appliquer pour corriger un défaut géométrique en fabrication additive ? »

Pour cela, nous avons présenté deux types de défauts : les défauts surfaciques et les défauts volumiques. La différence entre ces deux défauts réside dans la quantité de matière nécessaire pour corriger le défaut. Un défaut surfacique ne nécessite qu'une couche de cordons tandis qu'un défaut volumique nécessite au minimum deux couches. L'algorithme proposé repose sur les résultats des expériences présentées précédemment en utilisant le modèle de comportement présenté dans le Chapitre 3.

L'objectif de cet algorithme est de générer un espace de solutions regroupant les solutions candidates pour le problème bi-objectif posé. Par l'exploration visuelle, l'utilisateur pourra entamer son processus de décision de solution idéale afin de minimiser les deux objectifs : le temps machine et la longueur de fil de TA6V utilisé.

Pour chaque défaut et chaque scénario, les solutions Pareto optimales ont été déterminées. A la suite de quoi, les performances des solutions candidates sont comparées entre elles amenant ainsi à former le front de Pareto. Une exploration visuelle des solutions candidates générés par l'algorithme grâce au Parallel Coordinates Plot permet à l'ingénieur de définir sa solution optimale pour son problème de conception.

L'algorithme pourrait être complété par une simulation thermomécanique du procédé LMD-w avec les solutions Pareto optimales. Cette étude complémentaire permettrait d'ajouter une variable de performance en déterminant le déplacement du substrat en fin de procédé et ainsi vérifier si les solutions Pareto optimales sont identiques par rapport à cette nouvelle variable de performance.

Ce sixième et dernier chapitre a pour objectif de présenter une synthèse des travaux effectués et d'en dégager les perspectives.

Les chapitres précédents ont permis d'exposer la problématique, le positionnement et les travaux dédiés à la correction de pièces mécaniques par la fabrication additive métallique. Ces travaux ont été consacrés, en particulier, à l'étude des influences des paramètres d'entrée machine, au développement d'un modèle de prédiction et à son utilisation pour aider l'utilisateur à choisir la stratégie de correction pour son problème de conception. La première partie de ce chapitre sera consacrée à une synthèse du travail effectué. De plus, les apports scientifiques et industriels des travaux seront dégagés.

Les perspectives de ces travaux seront énoncées dans la seconde partie de ce chapitre. L'objectif est de mettre en avant les voies de recherche qui nous semblent pertinentes à étudier.

6.1 SYNTHESE ET ORIGINALITE DES TRAVAUX

La fabrication additive regroupe un ensemble de procédés de fabrication. Chaque procédé est caractérisé par la source de chaleur utilisée pour faire fondre le matériau employé. Comme matériau, nous retrouvons : la résine, la céramique, la cire, l'eau, les polymères, le papier ou encore le métal. Selon le standard ISO/ASTM 52900 la fabrication additive est « un processus d'assemblage de matériaux pour fabriquer des objets à partir de données de modèles 3D, généralement couche après couche, par opposition aux méthodes de fabrication soustractive. ». La FA métallique était initialement utilisée pour le prototypage rapide de pièces. Aujourd'hui, elle est principalement utilisée par les industries aérospatiales pour fabriquer des pièces mécaniques dans le but de réduire les coûts de matière.

En raison des multiples physiques impliquées dans la fabrication additive (mécanique, thermique, métallurgie et robotique) ainsi que du manque de connaissance sur ces procédés, la fabrication additive métallique est un processus complexe à mettre en œuvre.

Les procédés de fabrication additive métallique offrent trois avantages : la fabrication, la correction ou l'ajout de nouvelle(s) fonction(s) aux pièces mécaniques. Les travaux de recherche présentés dans ce manuscrit de thèse s'intéressent à la correction de défauts de pièces mécaniques par le procédé de fabrication additive de dépôt de fil, LMD-w. Cependant, il existe des limites à l'utilisation de la fabrication additive métallique pour la correction de défauts. Ces limites sont relatives :

- au matériau utilisé et ses propriétés de soudabilité,
- aux plages des paramètres d'entrée du procédé,
- à la géométrie à corriger (volume de matière), etc.

C'est pourquoi, il est nécessaire de vérifier la faisabilité d'une telle démarche en analysant le type de défaut à corriger. Nous avons proposé une nouvelle méthode de conception, spécifique à la correction par FA.

La conception pour la fabrication additive (Design for Additive Manufacturing en anglais, DfAM) est une méthode de conception axée sur les spécificités de la fabrication additive en tenant compte de ses limites (par exemple, le temps de traitement, le coût du processus, les post-

traitements, la préparation de l'impression). La capitalisation des connaissances et l'accès à celles-ci ont facilité le développement d'idées de solutions innovantes et de faisabilité technique. Son utilisation et son application pendant la phase de conception dans la fabrication additive s'appelle l'exploration de l'espace de conception et l'exploitation de l'espace de conception. L'approche de l'exploration de l'espace de conception permet aux ingénieurs trouver les paramètres machine idéaux. L'espace de conception dans lequel l'utilisateur génère ses solutions de conception, est lui également basé sur une modélisation partielle des processus de fabrication additive.

L'analyse des travaux existants, présentée dans ce manuscrit a permis de faire la synthèse de l'état concernant la modélisation des procédés de la fabrication additive et leur utilisation en conception. Durant cet état de l'art, trois questions de recherche se sont posées quant à :

- la modélisation du procédé LMD-w (**Q1**),
- la prédiction de la géométrie et du déplacement de la pièce finale (**Q2**) et
- la stratégie à adopter pour corriger une pièce mécanique par ajout de matière (**Q3**).

Ces questions de recherche **Q1**, **Q2** et **Q3** nous ont amené à soulever et résoudre la problématique de recherche :

« Comment corriger des défauts géométriques par ajout de matière en fabrication additive métallique ? »

Pour répondre à cette problématique de recherche, plusieurs campagnes expérimentales ont été réalisées.

Dans le Chapitre 3, nous avons répondu à la question de recherche **Q1**, à savoir : « Quels sont les liens et les impacts entre les paramètres d'entrées et les sorties géométriques ? ».

Pour cela, nous avons développé un modèle de comportement après avoir réalisé quatre études. La première étude était une étude préliminaire, elle nous a permis de montrer que les mesures réalisées avec l'instrument optique (microscope LEICA DM1750M et sa suite logiciel LAS v14.2) sont répétables. La deuxième étude portait sur l'identification des relations entre les paramètres machine du procédé LMD-w et les variables géométriques. Après analyse de la corrélation et de la variance des mesures de cette campagne expérimentale des relations entre les paramètres étudiés et les variables mais aussi entre les variables elles-mêmes ont été montrées. De plus, cette étude nous a appris que pour contrôler la géométrie d'un cordon (h_c et w_c) et la géométrie de la dilution (h_d et w_d), il faut jouer sur la vitesse de déplacement de l'outil *TS*, paramètre le plus décisif pour ce procédé LMD-w. Quant au contrôle de l'angle de contact (α), il faut jouer sur la vitesse d'avance de fil *WFS*. La troisième étudiait les impacts des paramètres machine sur les variables géométriques.

Les résultats des deux expériences réalisées pour l'occasion, ont montré que :

- le procédé LMD-w n'est pas un procédé répétable, même à configuration et paramètres identiques,
- la vitesse de déplacement de l'outil et la géométrie du cordon suivent une relation linéaire négative,
- la hauteur du cordon et la largeur du cordon suivent une relation négative lorsque la puissance du laser et la vitesse d'avance de fil sont fixes et que la vitesse de déplacement de l'outil croît,
- lorsque la puissance du laser et la géométrie de dilution suivent une relation positive,

- pour contrôler la géométrie de dilution, il ne faut pas apporter une énergie supérieure à une valeur seuil : $E_{seuil} = 2.10^8 W.s$.

Enfin la quatrième étude du Chapitre 3 portait sur l'influence de l'incertitude de mesures sur les relations paramètres/variables. Les résultats obtenus permettent d'exprimer la variabilité des réponses géométriques.

$$H_c = h_c \pm 0.38\%$$

$$H_d = h_d \pm 6.25\%$$

$$W_c = w_c \pm 0.88\%$$

$$W_d = w_d \pm 1.21\%$$

$$A = \alpha \pm 1.60\%$$

Au cours du Chapitre 4, nous avons développé un méta modèle numérique permettant de prédire la géométrie d'un cordon en fonction des valeurs des paramètres machine. La simulation du déplacement de la pièce par un modèle thermomécanique a été réalisée. Ces modèles ont permis de répondre à la question de recherche **Q2** : « Comment prédire les sorties géométriques en fonction des paramètres d'entrée du procédé LMD-w ? ».

Le modèle de prédiction par réseau de neurones, d'architecture 3-7-5, permet de prédire la géométrie du cordon (h_c et w_c), de la dilution (h_d et w_d) ainsi que l'angle de contact (α) en fonction de la paramétrie d'entrée (P , WFS et TS). Ce modèle de prédiction direct a permis d'obtenir des écarts entre les valeurs prédites et les valeurs expérimentales inférieurs à 10% sauf pour la hauteur de dilution (h_d). Les valeurs prédites pour la hauteur et la largeur de cordon permettent de générer un maillage. Ce maillage est alors utilisé dans le modèle de simulation thermomécanique du procédé LMD-w. Ce modèle de simulation est divisé en deux sous-modèles :

- un modèle de préchauffe de fil dépendant de la puissance, P , et de la vitesse d'avance de fil, WFS . Il permet déterminer la température moyenne du fil avant qu'il n'entre en contact avec le substrat. Cette température avoisine la température de fusion du métal qui est de 1625°C, ce qui signifie que lorsque le fil atteint le bain, il est déjà à l'état liquide. Cette température T_{fil} est ensuite utilisée comme température initiale du fil pour le modèle de soudage et refroidissement.
- un modèle de soudage et refroidissement permettant de calculer le déplacement de la pièce une fois son cycle de fabrication terminée. Les résultats de ce sous-modèle ont un écart moyen absolu entre la mesure expérimentale et la valeur calculée de 11%.

Enfin dans le Chapitre 5, nous avons présenté le développement d'un algorithme reposant sur le principe de dominance au sens de Pareto permettant de répondre à notre question de recherche **Q3** : « Quelle stratégie appliquer pour corriger un défaut géométrique en fabrication additive ? ».

L'algorithme que nous avons proposé repose sur la base de cas des résultats des expériences et en utilisant le modèle de comportement développé dans le chapitre 3. L'algorithme génère un espace de solutions regroupant les solutions candidates pour le problème bi-objectif posé (minimisation du temps machine et de la longueur de fil utilisée), en fonction du défaut et des scénarios. Une exploration visuelle des solutions candidates générés par l'algorithme grâce au

Parallel Coordinates Plot permet à l'ingénieur de définir sa solution optimale pour son problème de conception.

Cinq éléments ressortent des actions de recherche que nous avons conduites :

- **1** mise en place d'une méthodologie expérimentale pour déterminer l'influence de l'incertitude de mesure sur un espace de conception pour la fabrication additive,
- **2** mise en place d'une méthodologie pour l'identification des relations entre les paramètres d'entrée du procédé LMD-w et des sorties géométriques
- **3** développement d'un métamodèle numérique pour la simulation de dépôt de matière pour le procédé de fabrication additive LMD-w
- **4** mise en place d'une méthodologie pour la correction de pièces mécaniques par procédé LMD-w
- **5** évaluation des stratégies de correction par exploration de l'espace de conception

Tous les verrous n'ont pas été levés, les perspectives de ces travaux sont donc multiples.

6.2 PERSPECTIVES

Nous présentons, dans cette dernière sous-section, les perspectives de nos travaux de recherche.

Une première perspective à nos travaux s'impose. Elle concerne la phase expérimentale de notre démarche. Augmenter la plage de valeurs des paramètres d'entrée du procédé LMD-w enrichira certainement le modèle. Cet élargissement aurait comme conséquence directe d'augmenter le nombre d'essai et donc la base de cas expérimentale sur laquelle se reposent les modèles de comportement et de connaissance. Pour le modèle de comportement, l'augmentation de la base de cas expérimentale permettrait de valider, d'infirmer ou d'affiner les relations entre les paramètres d'entrée du procédé et les sorties géométriques que nous avons établies. Pour le modèle de connaissance, et plus particulièrement le réseau de neurones, l'augmentation de la base de cas expérimentale permettrait un apprentissage sur plus de points et donc une prédiction avec un pourcentage d'erreur plus faible. En effet, le réseau de neurones pourrait ainsi être testé sur des points plus éloignés entre eux et ainsi être plus général qu'il ne l'est actuellement.

Le modèle développé n'a pas pu être confronté à la réalité expérimentale. C'est pourquoi, il est envisageable de recalibrer ce modèle à l'aide d'une phase expérimentale. Cette expérimentation permettrait de valider la température d'arrivée du fil avant qu'il n'entre en contact avec le substrat. L'expérimentation permettrait également de vérifier si l'émissivité et les conditions opératoires renseignées dans notre modèle sont cohérentes avec l'observation. Les valeurs des conditions initiales et des conditions aux limites du matériau mais aussi de la chambre de fabrication proviennent principalement de la littérature. Ainsi la validation expérimentale permettrait de réduire l'écart entre les valeurs prédites par le modèle et celles contenues dans la base de cas expérimentale du procédé LMD-w.

L'exploration de l'espace de conception actuelle, ne prend pas en compte graphiquement les incertitudes de mesures. Il serait alors prometteur d'intégrer cette dimension sur l'espace de conception lors de son exploitation par l'ingénieur.

ANNEXES

7.1 LA VARIANCE

7.1.1 METHODE DE L'ANALYSE

Le premier objectif de l'analyse de la variance consiste à comparer les moyennes des échantillons étudiés en vérifiant si la différence entre les moyennes des réponses pour chaque niveau d'une action est significative en fonction de la valeur des résidus. Un résidu (r) est la différence entre une réponse mesurée (y) et sa réponse théorique (\tilde{y}) de telle sorte à ce que $r = y - \tilde{y}$.

Pour cela il faut :

- Calculer la moyenne générale des réponses ($h_c, h_d, w_c, w_d, \alpha$ et d) (3.18),

$$M = \frac{\sum y_i}{n} \quad (3.18)$$

Avec M la moyenne générale de la réponse Y , Y la réponse observée, y_i la valeur de la réponse Y à la i ème position et n le nombre d'observations (=nombre d'essais réalisés).

- Calculer l'effet moyen des facteurs (P, WFS et TS) (3.19),

$$EA_k = \frac{\sum y_{\langle k|A \rangle}}{n_{\langle k|A \rangle}} - M \quad (3.19)$$

Avec EA_k la valeur de l'effet moyen du facteur A au niveau k , $y_{\langle k|A \rangle}$ la valeur de la réponse Y pour le facteur A au niveau k et $n_{\langle k|A \rangle}$ le nombre d'observations pour le facteur A au niveau k .

- Calculer la valeur des interactions entre facteurs si le modèle comporte des interactions (3.20),

$$EA_k B_p = \frac{\sum y_{\langle k|A, p|B \rangle}}{n_{\langle k|A, p|B \rangle}} - EA_k - EB_p - M \quad (3.20)$$

Avec EB_p la valeur de l'effet moyen du facteur B au niveau p , $EA_k B_p$ la valeur de l'effet moyen du facteur A au niveau k et du facteur B au niveau p , $y_{\langle k|A, p|B \rangle}$ la valeur de la réponse Y pour le facteur A au niveau k et le facteur B au niveau p et $n_{\langle k|A, p|B \rangle}$ le nombre d'observations pour le facteur A au niveau k et le facteur B au niveau p .

- Etablir le graphique des effets et écrire le modèle par rapport à la moyenne.

Le graphique des effets permet par lecture graphique de déterminer comment minimiser ou maximiser une réponse en fonction du facteur. Afin d'identifier si la relation entre le facteur A et la réponse Y est linéaire ou non, trois niveaux sont définis pour le facteur A :

- Niveau 1, valeur minimale du facteur A ,
- Niveau 2, valeur moyenne du facteur A ,
- Niveau 3, valeur maximale du facteur A .

Prenons l'exemple de la Figure 3.17, soit un même facteur A et une même réponse Y . Sur la figure de gauche, les réponses Y , en fonction des niveaux du facteur A , ne sont pas alignées. La relation, entre le facteur A et la réponse Y , est non-linéaire. Sur la figure de droite, les réponses Y , en fonction des niveaux du facteur A , sont alignées. La relation entre le facteur A et la réponse Y est linéaire négative, car la courbe est décroissante. Afin de minimiser la réponse Y , il faudrait, pour le graphique de gauche, régler le facteur A au niveau 2 et régler le facteur A au niveau 3 pour le graphique de droite. A l'inverse si nous souhaitons maximiser la réponse Y , il faudrait régler le paramètre A au niveau 1 pour les deux graphiques.

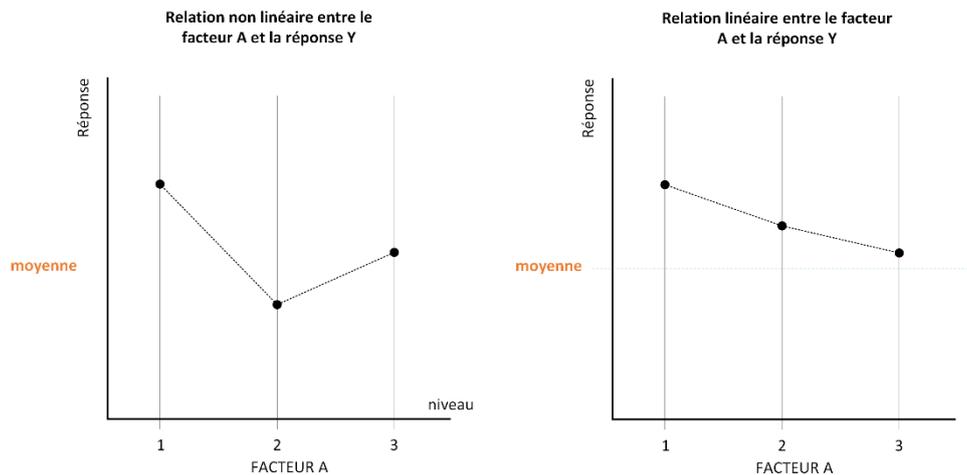


Figure 3.17 Exemples de graphique des effets avec une relation non linéaire entre le facteur A et la réponse Y (gauche) et une relation linéaire négative entre le facteur A et la réponse Y (droite)

Le deuxième objectif de l'analyse de la variance permet également de vérifier si les résultats obtenus sont significatifs. Un facteur (paramètres d'entrée) a un effet significatif si le rapport entre la variance des réponses du facteur et la variance des résidus est supérieure à une valeur F issue d'une matrice définie par la relation de Fisher-Snedecor (3.21).

$$\frac{V_a}{V_r} > F_{SNEDECOR} \quad (3.21)$$

$F_{SNEDECOR}$ est une valeur déduite à partir du nombre de degré de liberté de chaque action par rapport au nombre de degré de liberté des résidus du plan d'expérience avec un risque de 5%. Ces valeurs sont regroupées dans une table dite table de Snedecor 7.1.3.

7.1.2 DEFINITION DU TEST DE SNEDECOR

Le test de SNEDECOR ou encore « loi de F » permet de comparer deux variances afin de définir si l'écart des réponses lors d'un changement de niveau d'un paramètre est lié à l'effet de ce paramètre ou non. La Figure 3.18 illustre la problématique à résoudre avec le test de Snedecor. Ainsi les facteurs sont statistiquement significatifs si $F_{calculé} > F_{Snedecor}$.

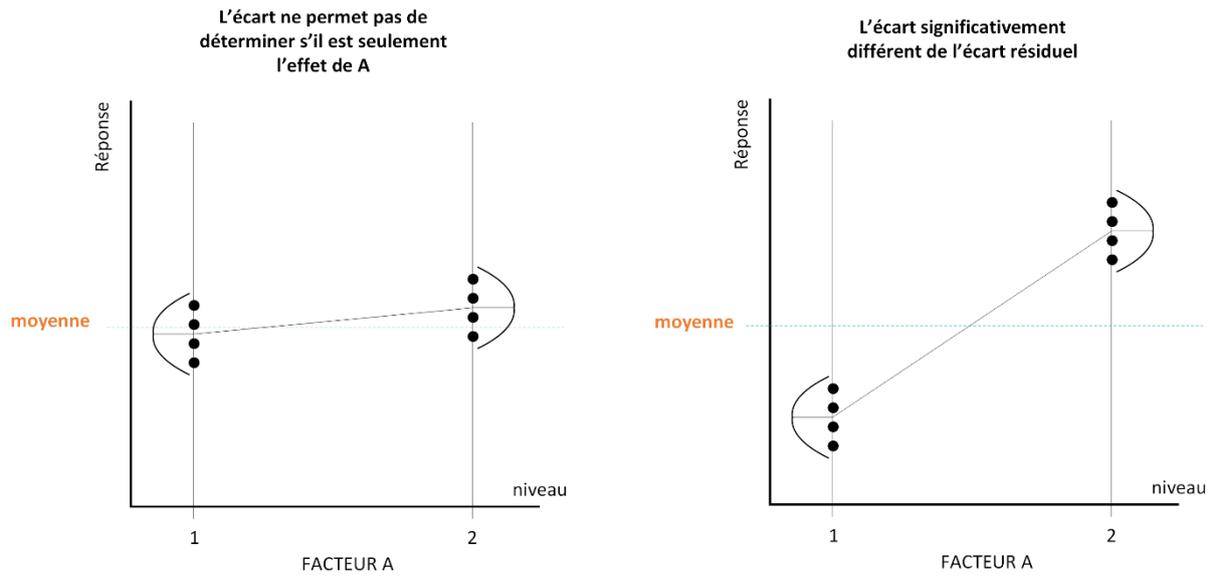


Figure 3.18 Principe du test de Snedecor

Pour faciliter la lecture des résultats, nous regroupons les valeurs calculées de la moyenne des effets des facteurs, des degrés de liberté et du $F_{\text{calculé}}$ dans un tableau pour chaque sortie, similaire au Tableau 3.15.

Tableau 3.15 Table d'analyse de la variance

Actions	Nb niveaux	Effets moyens	Somme des carrés des écarts S	ddl	Variance	Fisher calculé (F_{exp})	Fisher table (F)	Significatif
Facteur	n	E	$S = \frac{N \sum E^2}{n}$	n-1	$V_a = \frac{S}{Nb \text{ ddl}_{\text{facteur}}}$	$\frac{V_a}{V_r}$	Table SNEDECOR	O/N
Interaction	n.n	I	$S = \frac{N \sum I^2}{n.n}$	(n-1)(n-1)	$V_a = \frac{S}{Nb \text{ ddl}_{\text{interaction}}}$	$\frac{V_a}{V_r}$	Table SNEDECOR	O/N
Total plan			$S_t = \sum (y_i - M)^2$	N-1				
Résidu			$S_r = \sum r^2$	N- ddl _{modèle}	$V_r = \frac{S_r}{Nb \text{ ddl}_{\text{résidu}}}$			

7.1.3

TABLE DE SNEDECOR



Table : Loi de Fisher-Snedecor

Valeur f de la variable de Fisher-Snedecor F (v1 ; v2) ayant la probabilité 0.05 d'être dépassée

		v1 - degrés de liberté du numérateur																																					
		v2 - degrés de liberté du dénominateur																																					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22	24	26	28	30	35	40	45	50	60	80	100	200	500	1000			
1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54	241.88	242.98	243.90	244.69	245.36	245.95	246.47	246.92	247.32	247.69	248.05	248.32	248.56	248.76	248.95	249.15	249.30	249.45	249.60	250.10	250.69	251.14	251.49	251.77	252.20	252.72	253.04	253.68	254.06	254.19
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.31	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.40	19.41	19.42	19.42	19.43	19.43	19.44	19.44	19.44	19.45	19.45	19.45	19.46	19.46	19.46	19.46	19.47	19.47	19.47	19.47	19.47	19.48	19.48	19.49	19.49	19.49	19.49	19.49	
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.76	8.74	8.73	8.71	8.70	8.69	8.68	8.67	8.67	8.66	8.65	8.64	8.63	8.62	8.62	8.62	8.62	8.62	8.62	8.62	8.62	8.62	8.62	8.62	8.62	8.62	8.62	8.62	8.62
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.89	5.87	5.86	5.84	5.83	5.82	5.81	5.80	5.79	5.77	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75	5.75
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.66	4.64	4.62	4.60	4.59	4.58	4.57	4.56	4.55	4.53	4.52	4.50	4.50	4.50	4.48	4.46	4.45	4.44	4.43	4.41	4.41	4.39	4.37	4.37	4.37	4.37	
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.98	3.96	3.94	3.92	3.91	3.90	3.88	3.87	3.86	3.84	3.83	3.82	3.81	3.79	3.77	3.76	3.75	3.74	3.72	3.71	3.69	3.68	3.67	3.67	3.67		
7	5.52	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.60	3.57	3.55	3.53	3.51	3.49	3.48	3.47	3.46	3.44	3.43	3.41	3.40	3.39	3.38	3.36	3.34	3.33	3.32	3.30	3.29	3.27	3.25	3.24	3.23	3.23	3.23		
8	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.10	3.07	3.05	3.03	3.01	2.99	2.97	2.96	2.95	2.94	2.92	2.90	2.89	2.87	2.86	2.84	2.83	2.81	2.80	2.79	2.77	2.76	2.75	2.74	2.73	2.72	2.71		
9	4.86	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.94	2.91	2.89	2.86	2.85	2.83	2.81	2.80	2.79	2.77	2.75	2.74	2.72	2.71	2.70	2.68	2.66	2.65	2.64	2.62	2.60	2.59	2.56	2.55	2.54	2.54			
10	4.64	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.82	2.79	2.76	2.74	2.72	2.70	2.69	2.67	2.66	2.65	2.63	2.61	2.59	2.58	2.57	2.55	2.53	2.52	2.51	2.49	2.47	2.46	2.43	2.42	2.41	2.41			
11	4.45	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.72	2.69	2.66	2.64	2.62	2.60	2.58	2.57	2.56	2.54	2.52	2.51	2.49	2.48	2.47	2.44	2.43	2.41	2.40	2.38	2.36	2.35	2.32	2.31	2.30	2.30			
12	4.27	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.63	2.60	2.58	2.55	2.53	2.51	2.50	2.48	2.47	2.46	2.44	2.42	2.41	2.39	2.38	2.36	2.34	2.33	2.31	2.29	2.27	2.26	2.23	2.22	2.21	2.21			
13	4.10	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.57	2.53	2.51	2.48	2.46	2.44	2.43	2.41	2.40	2.39	2.37	2.35	2.33	2.32	2.30	2.28	2.27	2.25	2.24	2.22	2.20	2.19	2.16	2.14	2.14	2.14			
14	3.94	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.51	2.48	2.45	2.42	2.40	2.38	2.37	2.35	2.34	2.33	2.31	2.29	2.27	2.26	2.24	2.22	2.21	2.19	2.18	2.16	2.14	2.12	2.10	2.08	2.07	2.07			
15	3.79	3.53	3.14	2.91	2.75	2.64	2.56	2.49	2.44	2.39	2.35	2.32	2.29	2.26	2.24	2.22	2.21	2.19	2.17	2.16	2.15	2.14	2.12	2.11	2.09	2.08	2.06	2.05	2.03	2.02	2.00	1.98	1.97	1.97	1.97				
16	3.64	3.38	2.99	2.76	2.60	2.49	2.41	2.34	2.29	2.24	2.20	2.17	2.14	2.11	2.09	2.07	2.06	2.04	2.03	2.02	2.01	2.00	1.98	1.97	1.95	1.94	1.92	1.91	1.89	1.88	1.86	1.84	1.82	1.81	1.81	1.81			
17	3.50	3.24	2.85	2.62	2.46	2.35	2.27	2.20	2.15	2.10	2.06	2.03	2.00	1.97	1.94	1.92	1.91	1.89	1.88	1.87	1.86	1.84	1.83	1.81	1.80	1.78	1.77	1.75	1.74	1.72	1.70	1.68	1.66	1.65	1.65	1.65			
18	3.36	3.10	2.71	2.48	2.32	2.21	2.13	2.06	2.01	1.96	1.92	1.89	1.86	1.83	1.81	1.79	1.78	1.76	1.75	1.74	1.72	1.71	1.69	1.68	1.66	1.65	1.63	1.62	1.60	1.58	1.56	1.54	1.52	1.51	1.50	1.50	1.50		
19	3.22	2.96	2.57	2.34	2.18	2.07	1.99	1.92	1.87	1.82	1.78	1.75	1.72	1.69	1.67	1.65	1.64	1.62	1.61	1.60	1.58	1.57	1.55	1.54	1.52	1.51	1.49	1.48	1.46	1.44	1.42	1.40	1.38	1.37	1.36	1.36	1.36		
20	3.09	2.83	2.44	2.21	2.05	1.94	1.86	1.79	1.74	1.69	1.65	1.62	1.59	1.56	1.54	1.52	1.51	1.49	1.48	1.46	1.45	1.43	1.42	1.40	1.39	1.37	1.36	1.34	1.32	1.30	1.28	1.26	1.24	1.23	1.22	1.22	1.22		
21	2.95	2.69	2.30	2.07	1.91	1.80	1.72	1.65	1.60	1.55	1.51	1.48	1.45	1.42	1.40	1.38	1.37	1.35	1.34	1.32	1.31	1.29	1.28	1.26	1.25	1.23	1.22	1.20	1.18	1.16	1.14	1.12	1.11	1.10	1.10	1.10			
22	2.81	2.55	2.16	1.93	1.77	1.66	1.58	1.51	1.46	1.41	1.37	1.34	1.31	1.28	1.26	1.24	1.23	1.21	1.20	1.18	1.17	1.15	1.14	1.12	1.11	1.09	1.08	1.06	1.04	1.02	1.00	0.98	0.96	0.95	0.95	0.95			
23	2.67	2.41	2.02	1.79	1.63	1.52	1.44	1.37	1.32	1.27	1.23	1.20	1.17	1.14	1.12	1.10	1.09	1.07	1.06	1.04	1.03	1.01	1.00	0.98	0.97	0.95	0.94	0.92	0.90	0.88	0.86	0.84	0.82	0.81	0.81	0.81	0.81		
24	2.53	2.27	1.88	1.65	1.49	1.38	1.30	1.23	1.18	1.13	1.09	1.06	1.03	1.00	0.98	0.96	0.95	0.93	0.92	0.90	0.89	0.87	0.86	0.84	0.83	0.81	0.80	0.78	0.76	0.74	0.72	0.70	0.68	0.67	0.67	0.67			

7.2

TABLEAUX COEFFICIENTS DE VARIANCES

7.2.1 ECHANTILLON 1

	S^2_r	Variance moyenne	S^2_g	S^2_g retenue	Variance totale	CV répétabilité (%)	CV opérateur (%)	CV total (%)
h_c	24.68	8.668	3.732	3.732	28.412	0.421	0.164	0.452
h_d	1956.98	1108.42	717.024	717.024	2674.004	4.655	2.817	5.441
w_c	58.4	36.4	24.72	24.72	83.12	0.199	0.130	0.238
w_d	2264.74	704.26	251.312	251.312	2516.052	1.092	0.364	1.151
α	0.36	0.112	0.04	0.04	0.4	1.192	0.397	1.257

7.2.2

ECHANTILLON 2

	S^2_r	Variance moyenne	S^2_g	S^2_g retenue	Variance totale	CV répétabilité (%)	CV opérateur (%)	CV total (%)
h_c	10.36	2.212	0.14	0.14	10.5	0.279	0.032	0.281
h_d	1666. 02	4189.548	3856. 344	3856.34 4	5522.364	4.431	6.741	8.067
w_c	14.84	10.628	7.66	7.66	22.5	0.099	0.072	0.122
w_d	1860. 28	1942.448	1570. 392	1570.39 2	3430.672	0.986	0.906	1.339
α	0.58	0.092	-0.024	0	0.58	1.503	0	1.503

7.2.3

ECHANTILLON 3

	S^2_r	Variance moyenne	S^2_g	S^2_g retenue	Variance totale	CV répétabilité (%)	CV opérateur (%)	CV total (%)
h_c	46.4	13.748	4.468	4.468	50.868	0.382	0.118	0.400
h_d	1073.96	2283.188	2068.396	2068.396	3142.356	3.063	4.250	5.239
w_c	10585.42	1845.028	-272.056	0	10585.42	2.271	0.000	2.271
w_d	1139.94	2637.028	2409.04	2409.04	3548.98	0.662	0.963	1.169
α	2.12	0.592	0.168	0.168	2.288	1.955	0.550	2.031

7.3 VARIABILITE DE LA MESURE PAR SORTIE ET PAR OPERATEUR

7.3.1 VARIABILITE DE L'ECHANTILLON 1

		M1	M2	M3	M4	M5	Moyenne	Ecart type	Variance
hc	OP1	1184	1180	1180	1179	1178	1180.2	2.28035085	5.2
	OP2	1187	1175	1172	1195	1187	1183.2	9.49736806	90.2
	OP3	1185	1183	1177	1181	1179	1181	3.16227766	10
	OP4	1180	1182	1179	1181	1181	1180.6	1.14017543	1.3
	OP5	1172	1181	1173	1178	1172	1175.2	4.08656335	16.7
hd	OP1	965	899	937	862	867	906	44.5757782	1987
	OP2	864	959	1021	955	955	950.8	56.0464093	3141.2
	OP3	858	973	964	972	962	945.8	49.3173397	2432.2
	OP4	988	1002	974	1006	1029	999.8	20.6203783	425.2
	OP5	1018	953	948	919	910	949.6	42.4181565	1799.3
wc	OP1	3846	3832	3827	3833	3832	3834	7.1063352	50.5
	OP2	3855	3829	3828	3826	3826	3832.8	12.4779806	155.7
	OP3	3833	3832	3829	3827	3830	3830.2	2.38746728	5.7
	OP4	3828	3821	3817	3818	3818	3820.4	4.50555213	20.3
	OP5	3822	3841	3837	3839	3839	3835.6	7.73304597	59.8
wd	OP1	4191	4324	4420	4364	4376	4335	87.4699949	7651
	OP2	4382	4401	4364	4339	4412	4379.6	29.1770458	851.3
	OP3	4414	4425	4419	4382	4331	4394.2	39.0474071	1524.7
	OP4	4357	4314	4320	4336	4374	4340.2	25.1833278	634.2
	OP5	4366	4343	4329	4310	4372	4344	25.7390754	662.5
α	OP1	50	51	51	51	51	50.8	0.4472136	0.2
	OP2	51	50	50	50	49	50	0.70710678	0.5
	OP3	50	51	51	50	50	50.4	0.54772256	0.3
	OP4	51	50	51	50	50	50.4	0.54772256	0.3
	OP5	50	50	51	50	49	50	0.70710678	0.5

7.3.2

VARIABILITE DE L'ECHANTILLON 2

		M1	M2	M3	M4	M5	Moyenne	Ecart type	Variance
hc	OP1	1152	1151	1151	1150	1148	1150.4	1.51657509	2.3
	OP2	1156	1149	1143	1155	1155	1151.6	5.54977477	30.8
	OP3	1157	1155	1152	1153	1154	1154.2	1.92353841	3.7
	OP4	1153	1146	1153	1151	1151	1150.8	2.86356421	8.2
	OP5	1153	1155	1149	1151	1149	1151.4	2.60768096	6.8
hd	OP1	841	909	922	843	873	877.6	37.1321963	1378.8
	OP2	826	914	869	914	922	889	40.9511905	1677
	OP3	977	977	991	950	1002	979.4	19.501282	380.3
	OP4	940	1014	1004	1006	1044	1001.6	37.9842072	1442.8
	OP5	756	902	881	888	864	858.2	58.7469148	3451.2
wc	OP1	3874	3866	3875	3872	3867	3870.8	4.08656335	16.7
	OP2	3867	3874	3876	3874	3882	3874.6	5.36656315	28.8
	OP3	3872	3870	3870	3872	3867	3870.2	2.04939015	4.2
	OP4	3867	3867	3870	3864	3864	3866.4	2.50998008	6.3
	OP5	3863	3863	3871	3872	3867	3867.2	4.2661458	18.2
wd	OP1	4267	4387	4331	4283	4313	4316.2	46.8102553	2191.2
	OP2	4426	4464	4410	4420	4380	4420	30.2985148	918
	OP3	4465	4352	4305	4402	4420	4388.8	61.9088039	3832.7
	OP4	4352	4430	4400	4443	4389	4402.8	35.8287594	1283.7
	OP5	4385	4352	4339	4315	4301	4338.4	32.7993902	1075.8
α	OP1	50	51	51	52	51	51	0.70710678	0.5
	OP2	49	50	51	50	51	50.2	0.83666003	0.7
	OP3	51	51	51	51	50	50.8	0.4472136	0.2
	OP4	51	50	50	52	50	50.6	0.89442719	0.8
	OP5	51	52	50	50	51	50.8	0.83666003	0.7

7.3.3

VARIABILITE DE L'ECHANTILLON 3

		M1	M2	M3	M4	M5	Moyenne	Ecart type	Variance
hc	OP1	1787	1789	1789	1789	1765	1783.8	10.5451411	111.2
	OP2	1785	1791	1784	1789	1791	1788	3.31662479	11
	OP3	1789	1784	1792	1782	1778	1785	5.56776436	31
	OP4	1787	1782	1776	1791	1791	1785.4	6.42650761	41.3
	OP5	1778	1778	1768	1783	1783	1778	6.12372436	37.5
hd	OP1	1107	1060	1016	1063	1081	1065.4	33.3511619	1112.3
	OP2	1029	1027	1026	987	1022	1018.2	17.6266843	310.7
	OP3	1016	1098	1119	1105	1122	1092	43.617657	1902.5
	OP4	1104	1140	1158	1158	1135	1139	22.1585198	491
	OP5	1098	1043	1002	1033	1002	1035.6	39.4119271	1553.3
wc	OP1	4514	4510	4520	4514	4518	4515.2	3.89871774	15.2
	OP2	4534	4521	4516	4516	4484	4514.2	18.4173831	339.2
	OP3	4516	4510	4509	4514	4513	4512.4	2.88097206	8.3
	OP4	4509	5016	4499	4511	4496	4606.2	229.173951	52520.7
	OP5	4504	4499	4511	4493	4502	4501.8	6.61059755	43.7
wd	OP1	5141	5076	5056	5088	5104	5093	32.0468407	1027
	OP2	5102	5126	5156	5110	5163	5131.4	27.1808756	738.8
	OP3	5188	5182	5124	5148	5179	5164.2	27.2983516	745.2
	OP4	5029	5016	5098	5045	5098	5057.2	38.6354759	1492.7
	OP5	5098	5062	4994	5034	5012	5040	41.1825206	1696
α	OP1	73	74	78	75	75	75	1.87082869	3.5
	OP2	75	73	73	74	73	73.6	0.89442719	0.8
	OP3	74	73	74	75	73	73.8	0.83666003	0.7
	OP4	77	75	75	72	74	74.6	1.81659021	3.3
	OP5	77	76	73	75	76	75.4	1.51657509	2.3

7.4 LES PROPRIETES THERMOMECHANIQUES DU TA6V

Dans cette sous-section les différentes valeurs des propriétés thermiques, Tableau 4.7, et mécaniques, Tableau 4 6, du TA6V sont présentées. Les propriétés thermomécaniques du TA6V sont thermo-dépendantes. En effet, car la plage de température vue par le matériau au cours du procédé est très grande, et dans cette plage les propriétés thermiques et surtout mécaniques sont grandement modifiées.

7.4.1 PROPRIETES MECANIQUES DU TA6V

Nous considérons un comportement élasto-plastique avec un écrouissage de type « isotrope » défini par une loi puissance. C'est pourquoi dans les propriétés mécaniques nous retrouvons le module et l'exposant d'écrouissage. Ces valeurs sont issues des travaux de Ramos *et al.* [114].

Tableau 4 6 Propriétés mécaniques du TA6V en fonction de la température

	Matériau sain		Matériau dénaturé
Module d'Young (MPa)	T (°C)	M.Y	0.001
	24	125000	
	94	110000	
	205	100000	
	317	100000	
	428	80000	
	539	74000	
	650	55000	
	761	27000	
	872	20000	
	1094	5000	
	1650	100	
Coefficient de Poisson	0.3		0.3
Coefficient d'expansion thermique	T (°C)	C.E.T	0
	24	8.78E-06	
	94	9.83E-06	
	205	10.0E-06	
	317	10.7E-06	
	428	11.1E-06	
	539	11.2E-06	
	650	11.7E-06	
	761	12.2E-06	
	872	12.3E-06	
	1094	12.4E-06	
	1650	12.5E-06	
Limite élastique (MPa)	T(°C)	σ_Y	-
	24	1000	
	94	630	
	205	630	
	317	525	

	428	500	
	539	446	
	650	300	
	761	45	
	872	25	
	1094	5	
	1650	0.1	
Module d'écrouissage (MPa)	T(°C)	H	
	24	700	
	94	2200	
	205	2200	
	317	2200	
	428	1900	-
	539	1900	
	650	1900	
	761	2000	
	872	2000	
1094	2000		
1650	100		
Exposant de la loi d'écrouissage	1		-

7.4.2 PROPRIETES THERMIQUES DU TA6V

Tableau 4.7 Propriétés thermiques du TA6V en fonction de la température

	Matériau sain		Matériau dénaturé
Masse volumique (kg.m³)	T(°C)	d	3860
	25	4420	
	1650	4170	
	3000	2990	
Conductivité (W.mm⁻¹.K⁻¹)	T(°C)	c	1.871.10 ⁻¹¹
	25	4.4.10 ⁻³	
	1000	1.91.10 ⁻²	
	1100	2.04.10 ⁻²	
	1200	2.17.10 ⁻²	
	1300	2.29.10 ⁻²	
	1400	2.41.10 ⁻²	
	1500	2.52.10 ⁻²	
	1600	2.63.10 ⁻²	
	1650	3.34.10 ⁻²	
1700	3.46.10 ⁻²		
3000	6.58.10 ⁻²		
Capacité thermique (J.kg⁻¹.K⁻¹)	T(°C)	C_p	732.25
	25	546	
	1000	667	
	1650	798	
	1700	830	
Chaleur latente (J.kg⁻¹)	T(°C)	H	-
	1604	0	
	1650	2.86.10 ⁵	

- CAZAUBON, Valentine, ABI AKLE, Audrey, et FISCHER, Xavier. A Parametric Study of Additive Manufacturing Process: TA6V Laser Wire Metal Deposition. In : *International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing*. Springer, Cham, 2020. p. 15-20

Abstract : Additive Manufacturing has proven to be an economically and industrially attractive process in building or repairing parts. However, the major issue of this new process is to guarantee a mechanical behavior identical to the subtractive manufacturing methodologies. The work, presented in this paper, is centered on the Laser Wire Metal Deposition (LMD-w) method with the metallic alloy TA6V. Its working principle is to fuse a coaxial wire on a substrate with a laser as a heat source. To better understand the interaction between the input parameters (Laser Power, Wire Feed Speed and Tool Speed) and the clad geometry output variables (Height, Width and Contact Angle) and the substrate displacement, we have realized an experimentation. We printed 9 clads according Taguchi's experimental design. Pearson correlation coefficient and Fisher test performed on the experimental measures showed as main result: Tool Speed is the parameter with the most significant influence on the output variables.

Keywords: Parameters Influences, Clads Geometry, Clads Characterization, Taguchi's Experimental Design, Statistical Analysis

- CAZAUBON, Valentine, ABI AKLE, Audrey, et FISCHER, Xavier. METHOD TO DEFINE MEASUREMENT UNCERTAINTY FOR DESIGN SPACE EXPLORATION IN ADDITIVE MANUFACTURING. *Proceedings of the Design Society*, 2021, vol. 1, p. 2067-2076

Abstract : Additive manufacturing is a process used for quick prototyping in industries. Geometrical defects are observed on printed parts. The aim of the paper is to propose a design method to implement measurements uncertainties into a Design Space for Additive Manufacturing parameters selection. To do so, two tests have been realized. The first test consists in determining the instrument's uncertainty by measuring a standard length several times by an operator. The second test aim to determine the uncertainty within operators measurement of geometric outputs (clad's height, clad's width, dilution's height, dilution's width and contact angle). Based on the results of our tests, uncertainties have been applied in our Design Space populated with 31 real printed clads. The uncertainties display with error bars on scatterplots allow to capitalize the knowledge for his/her exploration of the Design Space for future prints. The given information provides to ease the engineer to select the optimal solution (laser power, tool speed and wire feed speed) for his/her given Additive Manufacturing problematic among candidate points.

Keywords : Design for Additive Manufacturing (Dfam), Additive Manufacturing, Uncertainty

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. Bikas, P. Stavropoulos, et G. Chryssolouris, « Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review », *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 83, n° 1-4, p. 389-405, mars 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7576-2.
- [2] A. Lundbäck et L.-E. Lindgren, « Finite Element Simulation to Support Sustainable Production by Additive Manufacturing », *Procedia Manufacturing*, vol. 7, p. 127-130, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2016.12.033.
- [3] I. Gibson, D. Rosen, et B. Stucker, « Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing », 2014.
- [4] W. E. Frazier, « Metal Additive Manufacturing: A Review », *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 23, n° 6, p. 1917-1928, juin 2014, doi: 10.1007/s11665-014-0958-z.
- [5] D. Walton et H. Moztarzadeh, « Design and Development of an Additive Manufactured Component by Topology Optimisation », *Procedia CIRP*, vol. 60, p. 205-210, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2017.03.027.
- [6] K. S. Prakash, T. Nancharaih, et V. V. S. Rao, « Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing - An Overview », *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, n° 2, p. 3873-3882, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.642.
- [7] T. Vaneker, A. Bernard, G. Moroni, I. Gibson, et Y. Zhang, « Design for additive manufacturing: Framework and methodology », *CIRP Annals*, vol. 69, n° 2, p. 578-599, 2020, doi: 10.1016/j.cirp.2020.05.006.
- [8] M. McMillan, M. Leary, et M. Brandt, « Computationally efficient finite difference method for metal additive manufacturing: A reduced-order DFAM tool applied to SLM », *Materials & Design*, vol. 132, p. 226-243, oct. 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.06.058.
- [9] R. S. Mishra et Z. Y. Ma, « Friction stir welding and processing », *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 50, n° 1-2, p. 1-78, août 2005, doi: 10.1016/j.mser.2005.07.001.
- [10] M. Javidani, J. Arreguin-Zavala, J. Danovitch, Y. Tian, et M. Brochu, « Additive Manufacturing of AlSi10Mg Alloy Using Direct Energy Deposition: Microstructure and Hardness Characterization », *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 26, n° 4, p. 587-597, avr. 2017, doi: 10.1007/s11666-016-0495-4.
- [11] M. Boivineau *et al.*, « Thermophysical Properties of Solid and Liquid Ti-6Al-4V (TA6V) Alloy », *International Journal of Thermophysics*, vol. 27, n° 2, p. 507-529, mars 2006, doi: 10.1007/PL00021868.
- [12] Y. Millet, « Corrosion du titane et de ses alliages », *Matériaux - Corrosion Vieillissement*, p. 20, 2012.
- [13] B. D. Gélas, M. Armand, L. Séraphin, et R. Tricot, « Titane et alliages de titane », *Technique de l'Ingénieur (M 557)*, 1976.
- [14] H. Paydas, A. Mertens, R. Carrus, J. Lecomte-Beckers, et J. T. Tchuindjang, « Laser cladding as repair technology for Ti-6Al-4V alloy: Influence of building strategy on microstructure and hardness », *Materials & Design*, vol. 85, p. 497-510, nov. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.07.035.
- [15] E. Herderick, « Additive Manufacturing of Metals: A Review », *Materials Science and Technology*, p. 1413, 2011.
- [16] H. Watschke, S. Kuschmitz, J. Heubach, G. Lehne, et T. Vietor, « A Methodical Approach to Support Conceptual Design for Multi-Material Additive Manufacturing », *Proc. Int. Conf. Eng. Des.*, vol. 1, n° 1, p. 659-668, juill. 2019, doi: 10.1017/dsi.2019.70.

- [17] R. Ponche, O. Kerbrat, P. Mognol, et J.-Y. Hascoet, « A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process », *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 30, n° 4, p. 389-398, août 2014, doi: 10.1016/j.rcim.2013.12.001.
- [18] F. Laverne, F. Segonds, G. D'Antonio, et M. Le Coq, « Enriching design with X through tailored additive manufacturing knowledge: a methodological proposal », *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 11, n° 2, p. 279-288, mai 2017, doi: 10.1007/s12008-016-0314-7.
- [19] S. Yang, Y. Tang, et Y. F. Zhao, « Assembly-Level Design for Additive Manufacturing: Issues and Benchmark », in *Volume 2A: 42nd Design Automation Conference*, Charlotte, North Carolina, USA, août 2016, p. V02AT03A028. doi: 10.1115/DETC2016-59565.
- [20] F. Lopez, P. Witherell, et B. Lane, « Identifying Uncertainty in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Models », *Journal of Mechanical Design*, vol. 138, n° 11, 2016, doi: 10.1115/1.4034103.
- [21] S. Goguelin, J. M. Flynn, W. P. Essink, et V. Dhokia, « A Data Visualization Dashboard for Exploring the Additive Manufacturing Solution Space », *Procedia CIRP*, vol. 60, p. 193-198, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2017.01.016.
- [22] Y. Xiong *et al.*, « Data-Driven Design Space Exploration and Exploitation for Design for Additive Manufacturing », *Journal of Mechanical Design*, vol. 141, n° 10, p. 101101, oct. 2019, doi: 10.1115/1.4043587.
- [23] L. Depradeux, « Simulation numérique du soudage - acier 316l : validation sur cas tests de complexité croissante », INSA Lyon, 2004. [En ligne]. Disponible sur: <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2004ISAL0014/these.pdf>
- [24] B. Wu *et al.*, « A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement », *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 35, p. 127-139, oct. 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.
- [25] E. Malekipour et H. El-Mounayri, « Common defects and contributing parameters in powder bed fusion AM process and their classification for online monitoring and control: a review », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 95, n° 1, p. 527-550, mars 2018, doi: 10.1007/s00170-017-1172-6.
- [26] C. R. Cunningham, J. M. Flynn, A. Shokrani, V. Dhokia, et S. T. Newman, « Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing », *Additive Manufacturing*, vol. 22, p. 672-686, août 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.06.020.
- [27] S. H. Mok, G. Bi, J. Folkes, et I. Pashby, « Deposition of Ti-6Al-4V using a high power diode laser and wire, Part I: Investigation on the process characteristics », *Surface and Coatings Technology*, vol. 202, n° 16, p. 3933-3939, mai 2008, doi: 10.1016/j.surfcoat.2008.02.008.
- [28] C. Qiu, G. A. Ravi, C. Dance, A. Ranson, S. Dilworth, et M. M. Attallah, « Fabrication of large Ti-6Al-4V structures by direct laser deposition », *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 629, p. 351-361, avr. 2015, doi: 10.1016/j.jallcom.2014.12.234.
- [29] E. Capello, D. Colombo, et B. Previtali, « Repairing of sintered tools using laser cladding by wire », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 164-165, p. 990-1000, mai 2005, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.075.
- [30] B. Baufeld, O. Van der Biest, et R. Gault, « Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties », *Materials & Design*, vol. 31, p. S106-S111, juin 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2009.11.032.
- [31] J. Yu *et al.*, « Influence of laser deposition patterns on part distortion, interior quality and mechanical properties by laser solid forming (LSF) », *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, n° 3, p. 1094-1104, janv. 2011, doi: 10.1016/j.msea.2010.09.078.

- [32] C.-M. Lee, W.-S. Woo, J.-T. Baek, et E.-J. Kim, « Laser and arc manufacturing processes: A review », *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 17, n° 7, p. 973-985, juill. 2016, doi: 10.1007/s12541-016-0119-4.
- [33] P. Guo, B. Zou, C. Huang, et H. Gao, « Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 240, p. 12-22, févr. 2017, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.09.005.
- [34] E. Brandl, V. Michailov, B. Viehweger, et C. Leyens, « Deposition of Ti-6Al-4V using laser and wire, part II: Hardness and dimensions of single beads », *Surface and Coatings Technology*, vol. 206, n° 6, p. 1130-1141, déc. 2011, doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.07.094.
- [35] K. Zhang, W. Liu, et X. Shang, « Research on the processing experiments of laser metal deposition shaping », *Optics & Laser Technology*, vol. 39, n° 3, p. 549-557, avr. 2007, doi: 10.1016/j.optlastec.2005.10.009.
- [36] M. Rombouts, G. Maes, W. Hendrix, E. Delarbre, et F. Motmans, « Surface Finish after Laser Metal Deposition », *Physics Procedia*, vol. 41, p. 810-814, 2013, doi: 10.1016/j.phpro.2013.03.152.
- [37] R. M. Mahamood et E. T. Akinlabi, « Effect of Laser Power on Surface Finish during Laser Metal Deposition Process », in *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, San Francisco, USA, 2014, vol. 2, p. 5. doi: 10.1109/icmimt.2017.7917405.
- [38] Y. Lee, Y. Bandari, P. Nandwana, Brian T. Gibson, B. Richardson, et S. Simunovic, « Effect of Interlayer Cooling Time, Constraint and Tool Path Strategy on Deformation of Large Components Made by Laser Metal Deposition with Wire », *Applied Sciences*, vol. 9, n° 23, p. 5115, nov. 2019, doi: 10.3390/app9235115.
- [39] A. Paskual, P. Álvarez, et A. Suárez, « Study on Arc Welding Processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing », *Procedia CIRP*, vol. 68, p. 358-362, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2017.12.095.
- [40] H. Gong, K. Rafi, H. Gu, T. Starr, et B. Stucker, « Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes », *Additive Manufacturing*, vol. 1, p. 87-98, oct. 2014, doi: 10.1016/j.addma.2014.08.002.
- [41] S. Dahat, K. Hurtig, J. Andersson, et A. Scotti, « A Methodology to Parameterize Wire + Arc Additive Manufacturing: A Case Study for Wall Quality Analysis », *JMMP*, vol. 4, n° 1, p. 14, 2020, doi: 10.3390/jmmp4010014.
- [42] A. G. Kamble et R. Rao, « Experimental investigation on the effects of process parameters of GMAW and transient thermal analysis of AISI321 steel », *Advances in Manufacturing*, vol. 1, n° 4, p. 362-377, 2013, doi: 10.1007/s40436-013-0041-2.
- [43] C. Zhong, A. Gasser, J. Kittel, K. Wissenbach, et R. Poprawe, « Improvement of material performance of Inconel 718 formed by high deposition-rate laser metal deposition », *Materials & Design*, vol. 98, p. 128-134, mai 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2016.03.006.
- [44] P. A. Colegrove, J. Donoghue, F. Martina, J. Gu, P. Prangnell, et J. Hönnige, « Application of bulk deformation methods for microstructural and material property improvement and residual stress and distortion control in additively manufactured components », *Scripta Materialia*, vol. 135, p. 111-118, juill. 2017, doi: 10.1016/j.scriptamat.2016.10.031.
- [45] J. Huang, X. Ye, et Z. Xu, « Effect of Cold Rolling on Microstructure and Mechanical Properties of AISI 301LN Metastable Austenitic Stainless Steels », *J. Iron Steel Res. Int.*, vol. 19, n° 10, p. 59-63, oct. 2012, doi: 10.1016/S1006-706X(12)60153-8.
- [46] F. Martina, P. A. Colegrove, S. W. Williams, et J. Meyer, « Microstructure of Interpass Rolled Wire + Arc Additive Manufacturing Ti-6Al-4V Components », *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 46, n° 12, p. 6103-6118, déc. 2015, doi: 10.1007/s11661-015-3172-1.

- [47] B. Wu, Z. Pan, D. Ding, D. Cuiuri, H. Li, et Z. Fei, « The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 258, p. 97-105, août 2018, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.03.024.
- [48] G. Li, S. Qu, M. Xie, et X. Li, « Effect of ultrasonic surface rolling at low temperatures on surface layer microstructure and properties of HIP Ti-6Al-4V alloy », *Surface and Coatings Technology*, vol. 316, p. 75-84, avr. 2017, doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.01.099.
- [49] V. Cazaubon, A. Abi Akle, et X. Fischer, « A Parametric Study of Additive Manufacturing Process: TA6V Laser Wire Metal Deposition », Aix en Provence (France), 2021.
- [50] A. G. M. Tellez, « Fibre Laser Metal Deposition with Wire: Parameters Study and Temperature Control », University of Nottingham, 2010. [En ligne]. Disponible sur: <https://core.ac.uk/download/pdf/33565772.pdf>
- [51] V. Cazaubon, A. Abi Akle, et X. Fischer, « METHOD TO DEFINE MEASUREMENT UNCERTAINTY FOR DESIGN SPACE EXPLORATION IN ADDITIVE MANUFACTURING », *Proc. Des. Soc.*, vol. 1, p. 2067-2076, août 2021, doi: 10.1017/pds.2021.468.
- [52] B. Schoinochoritis, D. Chantzis, et K. Salonitis, « Simulation of metallic powder bed additive manufacturing processes with the finite element method: A critical review », *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 231, n° 1, p. 96-117, 2017, doi: 10.1177/0954405414567522.
- [53] E. R. Denlinger, « Thermo-mechanical model development and experimental validation for metallic parts in additive manufacturing », Pennsylvania State University, 2015. Consulté le: févr. 08, 2019. [En ligne]. Disponible sur: https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/11049
- [54] M. Megahed, H.-W. Mindt, N. N'Dri, H. Duan, et O. Desmaison, « Metal additive-manufacturing process and residual stress modeling », *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, vol. 5, n° 1, p. 61-93, déc. 2016, doi: 10.1186/s40192-016-0047-2.
- [55] L. Arbaoui, J.-E. Masse, L. Barrallier, et K. Mocellin, « Numerical modelling of laser rapid prototyping by fusion wire deposit », *International Journal of Material Forming*, vol. 3, n° S1, p. 1095-1098, avr. 2010, doi: 10.1007/s12289-010-0962-2.
- [56] M. Labudovic, D. Hu, et R. Kovacevic, « A three dimensional model for direct laser metal powder deposition and rapid prototyping », *Journal of Materials Science*, vol. 38, n° 1, p. 35-49, 2003, doi: 10.1023/a:1021153513925.
- [57] E. Foroozmehr et R. Kovacevic, « Modeling of the Effect of Path Planning on Deposition of Metal-Ceramic Composite With Laser Powder Deposition Process », in *International Manufacturing Science and Engineering Conference, Volume 1*, West Lafayette, Indiana, USA, 2009, vol. 43611, p. 301-309. doi: 10.1115/MSEC2009-84054.
- [58] P. Peyre, M. Dal, S. Pouzet, et O. Castelnau, « Simplified numerical model for the laser metal deposition additive manufacturing process », *Journal of Laser Applications*, vol. 29, n° 2, p. 022304, mai 2017, doi: 10.2351/1.4983251.
- [59] Y. Chew, J. H. L. Pang, G. Bi, et B. Song, « Thermo-mechanical model for simulating laser cladding induced residual stresses with single and multiple clad beads », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 224, p. 89-101, oct. 2015, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.04.031.
- [60] J. Li, Q. Wang, P. Michaleris, et Edward W. Reutzel, « Model prediction for deposition height during a direct metal deposition process », in *2017 American Control Conference (ACC)*, 2017, p. 2188-2194. doi: 10.23919/ACC.2017.7963277.
- [61] C. Simion, C. Manu, S. Baset, et J. Millard, « Distortions Generated by Welding Process Using ANSYS-FEA », *Atomic Energy of Canada Limited*, p. 9.

- [62] D. Trushnikov *et al.*, « Modeling of the Plasma 3D Deposition of Wire Materials », in *Additive Manufacturing of High-performance Metals and Alloys - Modeling and Optimization*, InTech, 2018. doi: 10.5772/intechopen.77153.
- [63] M. Motta, A. G. Demir, et B. Previtali, « High-speed imaging and process characterization of coaxial laser metal wire deposition », *Additive Manufacturing*, vol. 22, p. 497-507, août 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.05.043.
- [64] A. J. Pinkerton, « An analytical model of beam attenuation and powder heating during coaxial laser direct metal deposition », *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 40, n° 23, p. 7323-7334, déc. 2007, doi: 10.1088/0022-3727/40/23/012.
- [65] A. J. Pinkerton et L. Li, « Modelling the geometry of a moving laser melt pool and deposition track via energy and mass balances », *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 37, n° 14, p. 1885-1895, juill. 2004, doi: 10.1088/0022-3727/37/14/003.
- [66] Z. Nie *et al.*, « Experimental study and modeling of H13 steel deposition using laser hot-wire additive manufacturing », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 235, p. 171-186, sept. 2016, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.04.006.
- [67] V. Neela et A. De, « Three-dimensional heat transfer analysis of LENSTM process using finite element method », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 45, n° 9, p. 935-943, déc. 2009, doi: 10.1007/s00170-009-2024-9.
- [68] J. I. Arrizubieta, A. Lamikiz, F. Klocke, S. Martínez, K. Arntz, et E. Ukar, « Evaluation of the relevance of melt pool dynamics in Laser Material Deposition process modeling », *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 115, p. 80-91, déc. 2017, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.07.011.
- [69] J. Romano, L. Ladani, et M. Sadowski, « Thermal Modeling of Laser Based Additive Manufacturing Processes within Common Materials », *Procedia Manufacturing*, vol. 1, p. 238-250, 2015, doi: 10.1016/j.promfg.2015.09.012.
- [70] T. DebRoy et S. A. David, « Physical processes in fusion welding », *Rev. Mod. Phys.*, vol. 67, n° 1, p. 85-112, 1995, doi: 10.1103/RevModPhys.67.85.
- [71] J. Goldak, A. Chakravarti, et M. Bibby, « A new finite element model for welding heat sources », *MTB*, vol. 15, n° 2, p. 299-305, juin 1984, doi: 10.1007/BF02667333.
- [72] A. Sharma, A. K. Chaudhary, N. Arora, et B. K. Mishra, « Estimation of heat source model parameters for twin-wire submerged arc welding », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 45, n° 11-12, p. 1096-1103, déc. 2009, doi: 10.1007/s00170-009-2046-3.
- [73] E. Brandl, V. Michailov, B. Viehweger, et C. Leyens, « Deposition of Ti-6Al-4V using laser and wire, part I: Microstructural properties of single beads », *Surface and Coatings Technology*, vol. 206, n° 6, p. 1120-1129, déc. 2011, doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.07.095.
- [74] T. E. Abioye, J. Folkes, et A. T. Clare, « A parametric study of Inconel 625 wire laser deposition », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, n° 12, p. 2145-2151, déc. 2013, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.06.007.
- [75] M. Akbari, Y. Ding, et R. Kovacevic, « Process Development for a Robotized Laser Wire Additive Manufacturing », in *Volume 2: Additive Manufacturing; Materials*, Los Angeles, California, USA, juin 2017, p. V002T01A015. doi: 10.1115/MSEC2017-2951.
- [76] M. Freund, S. Riekehr, N. Kashaev, B. Klusemann, et J. Enz, « Process development for wire-based laser metal deposition of 5087 aluminium alloy by using fibre laser », *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 34, p. 721-732, août 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.06.033.
- [77] A. Ayed, G. Bras, H. Bernard, P. Michaud, Y. Balcaen, et J. Alexis, « Study of Arc-wire and Laser-wire processes for the realization of Ti-6Al-4V alloy parts », *MATEC Web of Conferences*, vol. 321, p. 03002, 2020.

- [78] M. Bambach, I. Sizova, F. Silze, et M. Schnick, « Comparison of laser metal deposition of Inconel 718 from powder, hot and cold wire », *Procedia CIRP*, vol. 74, p. 206-209, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.08.095.
- [79] J. Adnan, N. G. N. Daud, M. T. Ishak, Z. I. Rizman, et M. I. A. Rahman, « Tansig activation function (of MLP network) for cardiac abnormality detection », présenté à INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND TECHNOLOGY (IntCET 2017), Putrajaya, Malaysia, 2018. doi: 10.1063/1.5022900.
- [80] S. Cagin, « Méta-modèles réduits et séparés du comportement de balayage d'un moteur Diesel 2-temps pour l'exploration évolutionnaire des espaces de solutions », Université de Bordeaux, 2015. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01255129/document>
- [81] A. Peng, X. Xiao, et R. Yue, « Process parameter optimization for fused deposition modeling using response surface methodology combined with fuzzy inference system », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 73, n° 1-4, p. 87-100, juill. 2014, doi: 10.1007/s00170-014-5796-5.
- [82] Y. Li, Y. Sun, Q. Han, G. Zhang, et I. Horváth, « Enhanced beads overlapping model for wire and arc additive manufacturing of multi-layer multi-bead metallic parts », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 252, p. 838-848, févr. 2018, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.10.017.
- [83] J. Xiong, G. Zhang, J. Hu, et L. Wu, « Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second-order regression analysis », *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 25, n° 1, p. 157-163, févr. 2014, doi: 10.1007/s10845-012-0682-1.
- [84] J. R. Wolberg, *Data analysis using the method of least squares: extracting the most information from experiments*. Springer & Business Media, 2006.
- [85] R. J. Urbanic, S. M. Saqib, et K. Aggarwal, « Using Predictive Modeling and Classification Methods for Single and Overlapping Bead Laser Cladding to Understand Bead Geometry to Process Parameter Relationships », *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 138, n° 5, p. 051012, janv. 2016, doi: 10.1115/1.4032117.
- [86] G. C. Onwubolu, J. P. Davim, C. Oliveira, et A. Cardoso, « Prediction of clad angle in laser cladding by powder using response surface methodology and scatter search », *Optics & Laser Technology*, vol. 39, n° 6, p. 1130-1134, sept. 2007, doi: 10.1016/j.optlastec.2006.09.008.
- [87] H. El Cheikh, B. Courant, S. Branchu, J.-Y. Hascoët, et R. Guillén, « Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process », *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 50, n° 3, p. 413-422, mars 2012, doi: 10.1016/j.optlaseng.2011.10.014.
- [88] H. Al-Kazzaz, M. Medraj, X. Cao, et M. Jahazi, « Nd:YAG laser welding of aerospace grade ZE41A magnesium alloy: Modeling and experimental investigations », *Materials Chemistry and Physics*, vol. 109, n° 1, p. 61-76, mai 2008, doi: 10.1016/j.matchemphys.2007.10.039.
- [89] J. Xiong, G. Zhang, J. Hu, et Y. Li, « Forecasting process parameters for GMAW-based rapid manufacturing using closed-loop iteration based on neural network », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 69, n° 1-4, p. 743-751, oct. 2013, doi: 10.1007/s00170-013-5038-2.
- [90] A. V. Gudenko et A. P. Sliva, « Influence of electron beam oscillation parameters on the formation of details by electron beam metal wire deposition method », *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1109, p. 012037, nov. 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1109/1/012037.
- [91] S. Li *et al.*, « Melt-pool motion, temperature variation and dendritic morphology of Inconel 718 during pulsed- and continuous-wave laser additive manufacturing: A comparative study », *Materials & Design*, vol. 119, p. 351-360, avr. 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.01.065.
- [92] S. Ocylok, E. Alexeev, S. Mann, A. Weisheit, K. Wissenbach, et I. Kelbassa, « Correlations of Melt Pool Geometry and Process Parameters During Laser Metal Deposition by Coaxial Process Monitoring », *Physics Procedia*, vol. 56, p. 228-238, 2014, doi: 10.1016/j.phpro.2014.08.167.

- [93] J. Song *et al.*, « Numerical and experimental study of laser aided additive manufacturing for melt-pool profile and grain orientation analysis », *Materials & Design*, vol. 137, p. 286-297, janv. 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2017.10.033.
- [94] D. Carlsen, M. Malone, J. Kollat, et T. W. Simpson, « Evaluating the Performance of Visual Steering Commands for User-Guided Pareto Frontier Sampling During Trade Space Exploration », in *Volume 1: 34th Design Automation Conference, Parts A and B*, Brooklyn, New York, USA, janv. 2008, p. 499-509. doi: 10.1115/DETC2008-49681.
- [95] A. Abi Akle, « Visualisation d'information pour une décision informée en exploration d'espace de conception par shopping », Ecole Centrale Paris, 2015. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01220661/document>
- [96] D. A. Keim, « Information visualization and visual data mining », *IEEE Trans. Visual. Comput. Graphics*, vol. 8, n° 1, p. 1-8, mars 2002, doi: 10.1109/2945.981847.
- [97] B. Longueville, « Capitalisation des processus de décision dans les projets d'innovation: Application à l'automobile », Ecole Centrale Paris, 2003.
- [98] A. Adla, « Aide à la Facilitation pour une prise de Décision Collective: Proposition d'un Modèle et d'un Outil », Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2010.
- [99] S. Yoo et M. Harman, « Pareto efficient multi-objective test case selection », in *Proceedings of the 2007 international symposium on Software testing and analysis - ISSTA '07*, London, United Kingdom, 2007, p. 140. doi: 10.1145/1273463.1273483.
- [100] J. Jhabvala, E. Boillat, T. Antignac, et R. Glardon, « On the effect of scanning strategies in the selective laser melting process », *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 5, n° 2, p. 99-109, juin 2010, doi: 10.1080/17452751003688368.
- [101] F. R. Kaschel, M. Celikin, et D. P. Dowling, « Effects of laser power on geometry, microstructure and mechanical properties of printed Ti-6Al-4V parts », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 278, p. 116539, avr. 2020, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116539.
- [102] P. Promoppatum, « Influence of scanning length and energy input on residual stress reduction in metal additive manufacturing_ Numerical and experimental studies », *Journal of Manufacturing Processes*, p. 13, 2020.
- [103] X. Wang, D. Deng, M. Qi, et H. Zhang, « Influences of deposition strategies and oblique angle on properties of AISI316L stainless steel oblique thin-walled part by direct laser fabrication », *Optics & Laser Technology*, vol. 80, p. 138-144, juin 2016, doi: 10.1016/j.optlastec.2016.01.002.
- [104] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, et H. Li, « A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures », *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 34, p. 8-19, août 2015, doi: 10.1016/j.rcim.2015.01.003.
- [105] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, et H. Li, « A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM) », *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 31, p. 101-110, févr. 2015, doi: 10.1016/j.rcim.2014.08.008.
- [106] The International Bureau of Weights and Measures, *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*. 2008. Consulté le: déc. 01, 2020. [En ligne]. Disponible sur: https://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf
- [107] V. Cazaubon, A. Abi Akle, et X. Fischer, « TITRE ICED 21 », présenté à International Conference of Engineering Design, 2021.
- [108] E. Ranatowski, « Weldability of Titanium and its Alloys - Progress in Joining », *Advances in Materials Sciences*, vol. 8, n° 2, janv. 2008, doi: 10.2478/v10077-008-0033-2.
- [109] « ANOVA-Memotech.pdf ».

- [110] A. Abi Akle, B. Yannou, et S. Minel, « Information visualisation for efficient knowledge discovery and informed decision in design by shopping », *Journal of Engineering Design*, vol. 30, n° 6, p. 227-253, juin 2019, doi: 10.1080/09544828.2019.1623383.
- [111] L. V. Kamble, D. R. Pangavhane, et T. P. Singh, « Neural network optimization by comparing the performances of the training functions -Prediction of heat transfer from horizontal tube immersed in gas–solid fluidized bed », *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 83, p. 337-344, avr. 2015, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.11.085.
- [112] C. Ligetti, T. W. Simpson, M. Frecker, R. R. Barton, et G. Stump, « Assessing the Impact of Graphical Design Interfaces on Design Efficiency and Effectiveness », *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 3, n° 2, p. 144-154, juin 2003, doi: 10.1115/1.1583757.
- [113] E. H. Winer et C. L. Bloebaum, « Visual design steering for optimization solution improvement », p. 11.
- [114] D. Ramos, F. Belblidia, et J. Sienz, « New scanning strategy to reduce warpage in additive manufacturing », *Additive Manufacturing*, vol. 28, p. 554-564, août 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.05.016.

Titre : Procédé de fabrication additive par dépôt de fil fondu : modèles, méthodes et stratégies pour la correction de défaut de pièce mécanique

Résumé :

La fabrication additive métallique regroupe un ensemble de procédés de fabrication, notamment le procédé de dépôt par fusion laser de fil, LMD-w en anglais. Grâce à ces procédés, il est possible de fabriquer, de corriger ou d'ajouter de nouvelles fonctions aux pièces mécaniques. Dans le cadre de nos travaux de recherche nous avons choisi de nous concentrer sur la correction par fabrication additive métallique de défauts de pièce mécanique. L'objectif de cette recherche est l'aide au choix de la paramétrie machine adaptée à un problème de correction de pièce par ajout de matière. Pour cela nous avons développé un modèle de comportement intégrant la complexité de mise en œuvre du procédé LMD-w liée à des phénomènes multiphysiques et multiéchelles. Pour la construction de ce modèle, nous avons menés trois campagnes d'expérimentations consistant à fabriquer des cordons - géométrie élémentaire de fabrication additive - puis de les analyser à l'aide d'un instrument optique antérieurement validé. Ce modèle a permis d'établir des relations entre les paramètres d'entrée étudiés - puissance laser, vitesse d'avance de fil, vitesse de déplacement de l'outil- et les sorties géométriques-hauteur de cordon et de dilution, largeur de cordon et de dilution, angle de contact et déplacement du substrat -. Dès lors, un modèle de connaissance a été développé. Il est composé d'un réseau de neurones et d'un modèle de simulation numérique du procédé LMD-w. Ces deux sous-modèles communiquent entre eux grâce à la génération d'un maillage de la géométrie à simuler, en sortie de réseau de neurones. Enfin pour compléter notre proposition d'aide au choix de paramétrie machine adaptée à un problème de correction, nous avons développé un algorithme d'optimisation reposant sur le principe de dominance au sens de Pareto. En sortie de cet algorithme, les données sont visualisées sur un graphique interactif le « parallel coordinates plot ». L'ensemble de nos travaux permet ainsi de simuler des solutions optimales de quatre stratégies de correction de pièces mécaniques avec le procédé LMD-w, d'explorer l'espace de conception constitué de ces solutions optimales et de sélectionner une solution dite « préférée » à l'aide d'une visualisation interactive des espaces de performance et de décision.

Mots clés : Fabrication additive – Pièce mécanique – Correction de Défauts – Modèle de connaissance – Modèle de comportement – Aide à la décision

Title : Additive manufacturing process by molten wire deposition: models, methods and strategies for the correction of mechanical part defects

Abstract :

Metal additive manufacturing is a group of manufacturing processes, including the process of deposition by laser melting of wire, LMD-w in English. With these processes, it is possible to manufacture, correct or add new functions to mechanical parts. Within the framework of our research work, we have chosen to focus on the correction of mechanical part defects by metallic additive manufacturing. The objective of this research is to help in the choice of the machine parameters adapted to a problem of correction of part by adding material. For this purpose, we have developed a behavioral model integrating the complexity of the implementation of the LMD-w process related to multiphysical and multiscale phenomena. For the construction of this model, we have conducted three experimental campaigns consisting in manufacturing beads - elementary geometry of additive manufacturing - and then analyzing them with an optical instrument previously validated. This model allowed us to establish relationships between the input parameters studied - laser power, wire feed speed, tool displacement speed - and the geometric outputs - bead and dilution height, bead and dilution width, contact angle and substrate displacement -. Therefore, a knowledge model was developed. It consists of a neural network and a numerical simulation model of the LMD-w process. These two sub-models communicate with each other thanks to the generation of a mesh of the geometry to be simulated, at the output of the neural network. Finally, we have developed an optimization algorithm based on the principle of dominance in the Pareto sense to complete our proposal to help in the choice of machine parameters adapted to a correction problem. At the output of this algorithm, the data are visualized on an interactive graph called "parallel coordinates plot". Our work allows us to simulate optimal solutions of four correction strategies for mechanical parts with the LMD-w process, to explore the design space constituted by these optimal solutions and to select a "preferred" solution with the help of an interactive visualization of the performance and decision spaces.

Keywords : Additive Manufacturing – Mechanical Parts – Defects Correction – Behaviour Model – Knowledge Model – Decision Support

I2M – Institut de mécanique et d'ingénierie

[I2M, UMR 5295, 351 Cours de la Libération - 33400 Talence]

ESTIA Recherche

[ESTIA-Recherche, RNSR 20142 0655V, Technopole Izarbel 90 Allée Fauste d'Elhuyar
64210 BIDART - FRANCE]

