



HAL
open science

Réalisation de pièces aéronautiques de grandes dimensions par fabrication additive WAAM

Vincent Querard

► **To cite this version:**

Vincent Querard. Réalisation de pièces aéronautiques de grandes dimensions par fabrication additive WAAM. Génie mécanique [physics.class-ph]. École centrale de Nantes, 2019. Français. NNT : 2019ECDN0001 . tel-02389961

HAL Id: tel-02389961

<https://theses.hal.science/tel-02389961v1>

Submitted on 2 Dec 2019

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

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

THESE DE DOCTORAT DE

L'ÉCOLE CENTRALE DE NANTES
COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

ÉCOLE DOCTORALE N° 602
Sciences pour l'Ingénieur
Spécialité : Génie Mécanique

Par

Vincent QUERARD

Réalisation de pièces aéronautiques de grandes dimensions par fabrication additive WAAM

Thèse présentée et soutenue à Centrale Nantes, le 10/01/2019

Unité de recherche : UMR 6183, Institut de recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM)

Rapporteurs avant soutenance :

Emmanuel Duc	Professeur des Universités, SIGMA Clermont Ferrand
Nicolas Perry	Professeur des Universités, Arts et Métiers Bordeaux

Composition du Jury :

Claire Lartigue Présidente	Professeur des Universités, Université Paris-Sud
Emmanuel Duc Rapporteur	Professeur des Universités, SIGMA Clermont Ferrand
Nicolas Perry Rapporteur	Professeur des Universités, Arts et Métiers Bordeaux
Jean-Yves Hascoet Directeur de thèse	Professeur des Universités, Centrale Nantes
Matthieu Rauch Co-directeur	Maitre de conférences HDR, Centrale Nantes
Invité Fabian David	Responsable Projet R&T, Stelia Aerospace

Remerciements

Je souhaite remercier, Jean-Yves Hascoët et Matthieu Rauch pour m'avoir encadré pendant ces trois années de thèse et de m'avoir offert l'opportunité de découvrir un domaine industriel que je ne connaissais pas. Je tiens également à remercier l'ensemble des membres du projet avec lesquels j'ai pu travailler lors de ces trois années. Les échanges ont toujours été riches et constructifs.

Je souhaite également adresser mes remerciements aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail de thèse.

Ensuite, je tiens à remercier l'ensemble des membres de l'équipe de recherche, ainsi que le membre du laboratoire avec lesquels j'ai pu échanger et en particulier les doctorants.

De plus, je veux remercier les membres du département d'enseignement IPSI pour leur accueil et leur bonne humeur. J'ai apprécié de travailler cette équipe, toujours prête à rendre service.

Enfin, je tiens bien évidemment à remercier les membres de ma famille qui m'ont aidé et soutenu durant ces trois longues années. Je souhaite tout particulièrement remercier mon frère, Jérôme, pour l'aide précieuse et appuyée qu'il m'a apporté.

Table des matières

Liste des abréviations.....	8
Chapitre 1 : Introduction générale	11
1. Les intérêts de la fabrication additive	12
2. Les procédés de fabrication additive métallique.....	13
2.1. Les principaux procédés basés sur les dépôts de poudre métallique	13
2.2. Les principaux procédés basés sur les dépôts de fil métallique.....	15
2.3. Comparaison des procédés de fabrication additive (poudre et fil)	17
3. Etat de l'art : Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)	18
3.1. Les technologies utilisées pour la fabrication WAAM	18
3.1.1. Les procédés de soudure à l'arc électrique pour le WAAM.....	18
3.1.2. Les systèmes de déplacement	23
3.2. Génération de trajectoires de fabrication et stratégies de dépôt	24
3.2.1. Généralités sur la génération de trajectoires	24
3.2.2. Cas des composants monocordons	24
3.2.3. Cas des composants massifs	25
3.3. Les technologies additionnelles pour améliorer la santé matière	26
3.3.1. Système de roulage.....	26
3.3.2. Système de martelage	27
3.3.3. Trainard de protection gazeuse.....	28
3.3.4. Fabrication avec Monitoring du procédé.....	28
3.3.5. Conclusion sur les technologies additionnelles	29
3.4. Spécificités des alliages d'aluminium pour le procédé WAAM	29
4. Conclusion et organisation du manuscrit.....	32
Chapitre 2 : Génération de trajectoires pour le procédé WAAM.....	33
1. Méthodologie de génération de trajectoires pour le WAAM.....	33
1.1. Définition des principaux éléments de vocabulaire.....	33
1.2. Étapes d'obtention d'un composant par fabrication additive	35
1.3. Génération de trajectoires.....	36
1.4. Identification des verrous liés à la génération de trajectoires pour le procédé WAAM	38
1.4.1. Verrou n°1 : Génération de trajectoires avec orientation 5 axes de l'outil pour la fabrication WAAM.....	39
1.4.2. Verrou n°2 : Gestion de l'interface remplissage - monocordon	40
1.4.3. Verrou n°3 : Fabrication de parois horizontales (dépôt en corniche).....	43

1.4.4.	Verrou n°4 : Intersections et jonctions de murs monocordons.....	44
1.4.5.	Verrou n°5 : Choix de la direction privilégiée	48
1.4.6.	Verrou n°6 : Parachèvement après fabrication additive WAAM.....	49
1.5.	Conclusion sur la méthodologie de génération de trajectoires	50
1.6.	Application des méthodes de résolution.....	51
2.	Méthodologies de découpage pour les composants à angle de contre dépouille élevé.....	55
2.1.	Découpage par plans parallèles	55
2.2.	Découpage par plans parallèles avec sectionnement angulaire du composant.....	57
2.3.	Découpage basé sur la fibre neutre du composant	59
2.4.	Découpage basé sur la fibre neutre du composant avec variation continue de l'épaisseur de couche.....	60
2.5.	Conclusion sur les méthodologies de découpage	63
3.	Conclusion sur la génération de trajectoires pour le procédé WAAM	64
Chapitre 3 : Choix des paramètres et stratégies de fabrication		67
1.	Démarche expérimentale du choix des paramètres pour la fabrication additive WAAM	67
1.1.	Les différents paramètres du procédé WAAM.....	67
1.2.	Démarche expérimentale employée.....	70
1.3.	Application de la méthodologie du choix des paramètres opératoires	72
1.4.	Conclusion.....	74
2.	Cas particulier des paramètres pour l'accroche au substrat	75
2.1.	Problématiques rencontrées lors de la phase d'accroche.....	75
2.2.	Influence des paramètres de dépôts sur les premières couches	78
2.2.1.	Plan expérimental mis en œuvre.....	78
2.2.2.	Expériences menées.....	79
2.2.3.	Résultats	80
2.2.4.	Influence des paramètres sur la déformation.....	82
2.3.	Conclusion sur le choix des paramètres lors de la phase d'accroche au substrat	84
3.	Influence de la pression de serrage des galets d'entraînement sur la géométrie et la composition chimique du fil.....	85
3.1.	Principe de fonctionnement du système de dévidage et prélèvement des échantillons.	85
3.2.	Influence de la pression de serrage sur la géométrie du fil.....	86
3.3.	Influence de la pression de serrage sur la composition chimique du fil.....	87
3.4.	Conclusion sur l'effet de la pression exercée par les galets d'entraînement sur le fil...	89
4.	Conclusion sur le choix des paramètres et stratégies de fabrication.....	89
Chapitre 4 : Caractérisation mécanique et santé matière		91

1.	Caractérisation mécanique des éléments fabriqués en WAAM.....	91
1.1.	Résistance mécanique sous contrainte de traction.....	92
1.1.1.	Caractérisation mécanique du fil déposé (Al Mg5).....	92
1.1.2.	Caractérisation mécanique du mur	93
1.1.3.	Caractérisation mécanique des talons.....	94
1.1.4.	Conclusion sur la résistance mécanique	96
1.2.	Tenue en fatigue	97
1.2.1.	Résultats des essais de fatigue	97
1.2.2.	Conclusion sur les résultats de tenue en fatigue	98
2.	Influence du refroidissement inter passe sur la santé matière de dépôt WAAM	98
2.1.	Protocole expérimental.....	99
2.2.	Résultats	100
2.2.1.	Mesure de la porosité.....	101
2.2.2.	Mesure de la masse volumique.....	103
2.2.3.	Mesure de micro dureté.....	103
2.2.4.	Conclusion sur l'influence du refroidissement forcé.....	104
3.	Influence de l'angle de balayage sur la santé matière en remplissage	105
3.1.	Problématique rencontrée.....	105
3.2.	Stratégie employée	105
3.3.	Résultats	106
4.	Conclusion sur la caractérisation mécanique et la santé matière	108
	Chapitre 5 : Fabrication additive WAAM sur support non plan	111
1.	Fabrication additive sur support simple courbure.....	111
1.1.	Approche proposée pour la fabrication sur un support simple courbure.....	112
1.2.	Problématiques mises en évidence	113
1.3.	Méthodes de résolution proposées.....	114
2.	Illustration des méthodes de résolution proposées : Fabrication additive sur un support double courbure de grandes dimensions	115
2.1.	Présentation de la structure étudiée	116
2.2.	Fabrication de la structure	117
2.3.	Conclusion.....	119
3.	Conclusion sur la fabrication additive sur support double courbure.....	119
	Chapitre 6 : Conclusion et perspectives	121
1.	Conclusion	121
2.	Perspectives	123

Références bibliographiques.....	125
Annexes	131
Annexe 1 : Eprouvettes de traction de type « A » et « M »	131
Annexe 2 : Eprouvettes de fatigue de type « A » et « M »	131
Annexe 3 : Certificat du fil Al Mg5 (5356)	132

Liste des abréviations

AM	Additive Manufacturing ou Fabrication Additive : ensemble des procédés permettant de fabriquer par ajout de matière point par point ou couche par couche d'un objet physique à partir d'un modèle numérique.
BTF	Buy To Fly (Ratio) : rapport entre la masse brute et la masse finale d'une pièce.
CMT	Cold Metal Transfer : technologie de soudage développée à partir du GMAW consistant à créer un cordon de soudure par une succession de gouttes de métal en fusion et par un mouvement d'avance-recul du fil fusible.
CAO	Conception Assistée par Ordinateur : la CAO regroupe les logiciels et les techniques de modélisation géométrique qui permettent de représenter un produit en cours de conception.
d	Distance inter-cordons : cette valeur représente la distance entre deux cordons de remplissage au sein d'une même couche
DFAM	Design For Additive Manufacturing : prise en compte lors de la conception d'une pièce des contraintes inhérentes au procédé de fabrication additive.
EBM	Procédé de fabrication additive qui utilise l'énergie thermique fournie par un faisceau d'électrons pour faire fondre de manière sélective de la poudre
EBF3	Procédé de fabrication additive breveté par la NASA qui utilise l'énergie d'un faisceau d'électron qui crée un bain de fusion dans lequel le fil est apporté.
LMD	Laser Metal Deposition : procédé de fabrication additive consistant à projeter de la poudre et à la faire fondre à l'aide d'un laser.
DR	Deposition Rate ou taux de dépôt de matière.
FGM	Functionally Graded Materials : relatif aux pièces multi-matériaux.
FA	Voir AM.
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding : soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène.
GMAW	Gas Metal Arc Welding : soudage à l'arc en atmosphère (inerte ou active) avec fil fusible.
I	Courant moyen de soudage.
LH	Layer Height : épaisseur de couche.
MA	Métal d'Apport pour joint soudé sous forme de fil ou d'électrode (enrobée ou non).
MAG	Metal Active Gas : Voir GMAW.

MB	Métal de Base, métal constituant la pièce sur laquelle le joint de soudure est déposé.
MEB	Microscope Electronique à Balayage : technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon.
MIG	Metal Inert Gas : voir GMAW.
PAW	Plasma Arc Welding : soudure à l'arc plasma.
SLM	Procédé de fabrication additive qui utilise l'énergie thermique fournie par un laser pour faire fondre de manière sélective de la poudre.
SLS	Procédé de fabrication additive qui utilise l'énergie thermique fournie par un laser pour fritter de manière sélective de la poudre.
TCP	Tool Center Point : point piloté de l'effecteur.
TIG	Tungsten Inert Gas : voir GTAW.
TS	Travel Speed : vitesse de déplacement/avance en fabrication exprimée en mm/min (souvent dénommée « Feed rate » en usinage).
U	Tension moyenne de soudage.
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing : procédé de fabrication additive reposant sur l'utilisation d'un générateur de soudure à l'arc. La matière est apportée sous forme de fil.
WFS	Wire Feed Speed : vitesse de dévidage du fil fusible.
ZAT	Zone Affectée Thermiquement.

Chapitre 1 : Introduction générale

Pour fabriquer une pièce fonctionnelle, il existe une multitude de procédés d'obtention ayant chacun des spécificités différentes permettant de répondre au cahier des charges. Parmi ces procédés d'obtention, nous pouvons distinguer : la fabrication soustractive (par enlèvement de matière), la mise en forme (qui consiste à imposer une géométrie à un matériau : la quantité de matière est alors constante), la fabrication additive...

La fabrication additive (ou Additive Manufacturing), communément appelée « impression 3D », regroupe l'ensemble des procédés de fabrication par ajout de matière. La norme ISO/ASTM 52900:2015(fr) la définit comme un procédé consistant à assembler des matériaux pour fabriquer des pièces à partir de données de modèle en 3D, en général couche après couche, à l'inverse des méthodes de fabrication soustractive et de fabrication mise en forme.

Les procédés de fabrication additive que nous connaissons aujourd'hui sont apparus dans les années 1980 [1]. Durant les années 1990 à 2000, les applications concernent la fabrication de maquettes et de prototypes technologiques [2]. De nos jours, les technologies de fabrication additive permettent de réaliser des pièces fonctionnelles répondant aux attentes du cahier des charges. De nombreux matériaux peuvent être utilisés par ces procédés [3] : les thermoplastiques, les céramiques, les métaux... Une multitude de secteurs comme l'éducation, la recherche et l'industrie fait intervenir la fabrication additive [4].

Dans le domaine industriel, la fabrication additive est aujourd'hui capable d'apporter des solutions et des opportunités dans beaucoup de domaines notamment le médical, l'automobile, la production d'énergie et l'aéronautique [3]. Du fait du fort potentiel supposé de ces technologies, les acteurs industriels investissent massivement dans ce domaine afin d'anticiper les futures possibilités offertes par la fabrication additive [2]. De nouvelles applications apparaissent également avec le développement de ces technologies [5].

Ainsi, la fabrication additive est particulièrement intéressante pour le domaine aéronautique puisqu'elle offre une liberté de conception et également des opportunités en ce qui concerne la réduction de la masse des pièces embarquées, un critère déterminant pour réduire la consommation de carburant des appareils. Actuellement, les composants obtenus par fabrication additive pour le domaine aéronautique sont limités à des dimensions réduites (exemple : pièce de support de 155 x 74 x 65 mm sur un airbus A350XWB en 2017 [6]). Il serait donc pertinent d'étudier les possibilités de ces procédés pour fabriquer des composants de structure, en particulier de grandes dimensions. En effet, avec l'effet d'échelle, le gain de masse généré par l'utilisation d'un procédé de fabrication additive serait plus important. Dans le cadre de notre domaine d'étude lié au secteur industriel aéronautique, nous nous intéresserons dans la suite du manuscrit uniquement aux procédés de fabrication additive dédiés aux matériaux métalliques.

Cette introduction générale est organisée comme suit : après avoir mis en évidence les intérêts de la fabrication additive, nous nous intéresserons aux différents procédés de fabrication additive métallique et leurs applications. Nous ferons également une comparaison de ces procédés. Ensuite,

nous focaliserons notre attention sur le procédé Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) : un procédé prometteur pour la fabrication de composants de structure. Les différentes problématiques mises en jeu lors de l'obtention de composants à l'aide de ce procédé seront explicitées ainsi que les spécificités liées aux alliages d'aluminium. Enfin, les différentes voies de recherche étudiées dans ce manuscrit seront exposées ainsi que l'organisation de celui-ci.

1. Les intérêts de la fabrication additive

La fabrication additive présente de nombreux avantages et possibilités par rapport aux procédés usuels. Nous pouvons notamment distinguer :

- **La simplification des assemblages** : des pièces jusqu'alors issues de l'assemblage de plusieurs composants peuvent être obtenues directement par fabrication additive en une seule pièce. Cela peut réduire les temps de fabrication et simplifier l'obtention des composants (moins de références pièces) [7].
- **La liberté de conception** : la fabrication additive offre la possibilité de réaliser des géométries complexes, par exemple issues de résultats d'optimisations topologiques mais aussi de revoir la conception de certains composants, en incluant les opportunités offertes par le procédé de fabrication additive [8]. Cela peut permettre par exemple de réduire la masse d'un composant tout en conservant les mêmes exigences du cahier de charges.
- **La simplification des outillages** : l'utilisation d'un procédé de fabrication additive ne nécessite pas d'outillage spécifique pour réaliser une pièce [9]. Par exemple, pour une pièce traditionnellement obtenue par moulage, en cas de modification de la géométrie, cela nécessite de concevoir et fabriquer un nouveau moule, ce qui n'est pas nécessaire avec un procédé additif.
- **La réduction des pertes de matière lors des opérations de parachèvement** : des pièces auparavant obtenues uniquement par usinage dans la masse (phase d'ébauche puis de finition gourmande en temps machine et en matière) peuvent alors être réalisées (en partie) par fabrication additive. L'opération d'usinage se limite donc à la finition des surfaces fonctionnelles ce qui permet de réduire le gaspillage de matière (BTF ratio [7]), le temps machine et l'usure des outils. Il y a également la possibilité de faire de la fonctionnalisation de composant : par exemple, rapporter une géométrie réalisée en fabrication additive sur un composant en phase d'obtention (après un usinage par exemple) [10].
- **La fabrication hybride** : il s'agit de la combinaison des procédés additifs et soustractifs au sein d'une même machine. Cela permet d'effectuer des opérations de parachèvement en cours de fabrication. Il est donc possible d'améliorer l'accessibilité pour l'usinage ou encore de reprendre une pièce ayant un défaut en cours de fabrication (additive) et ainsi diminuer le taux de rebut [11], [12].
- **La fabrication de pièces multi-matériaux à gradient fonctionnel ou FGM (Functionally Graded Material)** : une pièce peut être qualifiée de multi-matériaux lorsqu'elle est composée

d'au moins deux matériaux ou alliages primaires qui sont distribués (continûment ou discontinûment) à l'intérieur de la structure. Lorsque la distribution est continue, on parle alors de pièce multi-matériaux à gradient continu [13]. Dans ce cas, la composition et la microstructure du matériau changent graduellement à l'intérieur de la pièce. Cette distribution des matériaux permet de modifier les propriétés à l'intérieur-même de la pièce. Les deux principaux domaines d'application de cette technologie sont l'aéronautique et le biomédical [14],[15].

Malgré ces différents avantages, la fabrication additive possède deux limitations principales [5] :

- **les dimensions des pièces sont limitées**, notamment pour les procédés nécessitant une enceinte contrôlée ;
- **le coût des machines de fabrication est généralement élevé**, cependant, avec le développement des technologies et l'augmentation du marché, ce dernier devrait diminuer.

Aujourd'hui, la compétitivité de la fabrication additive est réelle par rapport aux procédés d'obtention conventionnels. Elle peut aussi permettre d'accroître la flexibilité (modification du design...) et de mieux maîtriser la chaîne de production [9].

2. Les procédés de fabrication additive métallique

Chaque procédé de fabrication additive métallique nécessite une source de chaleur, un système de protection gazeuse et un métal de fabrication. Ce dernier existe sous deux formes : la poudre et le fil. Les procédés de fabrication additive peuvent être divisés selon ces deux catégories. Un large panel de matériaux est disponible sous ces deux formes (aciers et ses alliages, alliages d'aluminium, alliages de titane...). Chacune de ces deux catégories a des applications et des performances qui lui sont propres et possède des niveaux de maîtrises différents.

2.1. Les principaux procédés basés sur les dépôts de poudre métallique

Nous pouvons distinguer plusieurs procédés dont le métal d'apport est sous forme de poudre métallique [16] :

- **Selective Laser Melting (SLM)** : l'énergie thermique fournie par un laser permet la fusion de la poudre dans une enceinte sous gaz neutre. La Figure 1 schématise le fonctionnement de ce procédé. Le faisceau laser balaie la surface et fait fondre la poudre sur une section déterminée par la maquette numérique (en bleu sur la Figure 1). Après solidification de la couche, la plateforme de construction qui supporte le lit de poudre (à droite) est abaissée et la plateforme de stockage (à gauche) se lève pour pouvoir étaler une nouvelle couche de poudre avec l'aide du rouleau. Le laser balaie à nouveau la surface de la poudre pour construire la couche suivante [17].

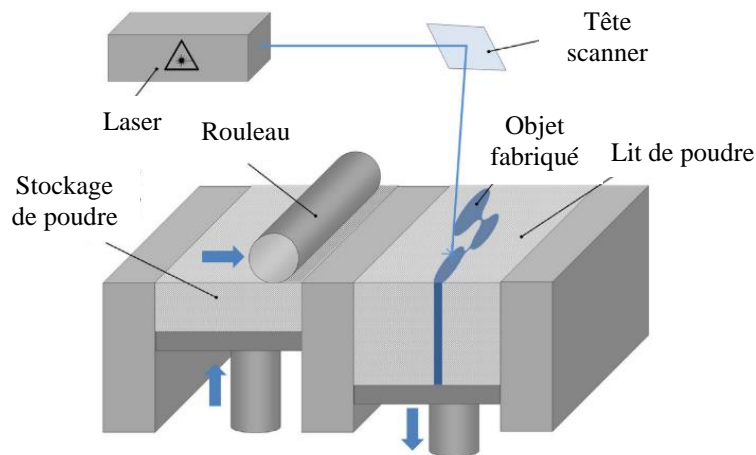


Figure 1 : Principe de fonctionnement du SLM [18]

- **Selective Laser Sintetering (SLS)** : cette technologie est très similaire au SLM. Dans ce cas, l'énergie thermique fournie par un laser permet de fritter de manière sélective un lit de poudre afin de fabriquer une pièce couche après couche. Il n'y a pas de phase liquide contrairement au SLM. L'enceinte est sous atmosphère inerte [3].
- **Electron Beam Melting (EBM)** : le principe de fonctionnement est également similaire au SLM, seule la source d'énergie diffère. Dans ce cas, l'énergie thermique est fournie par un faisceau d'électrons qui permet la fusion sélective de la poudre. Lors de la fabrication, l'enceinte est sous vide.
- **Laser Metal Deposition (LMD)** : contrairement aux trois procédés précédents, il n'y a pas de lit de poudres. Dans ce cas, la poudre est transportée par un flux de gaz inerte (le plus souvent de l'argon) vers une tête de projection. L'apport d'énergie est réalisé avec un laser coaxial avec cette dernière qui permet la fusion de la poudre (Figure 2). Le gaz de protection peut être apporté directement au niveau de la tête de projection. Une enceinte sous gaz neutre peut également être utilisée pour améliorer cette protection [17]. De plus, ce procédé permet la fabrication de pièces multi-matériaux à gradient fonctionnel (FGM) contrairement aux autres technologies.

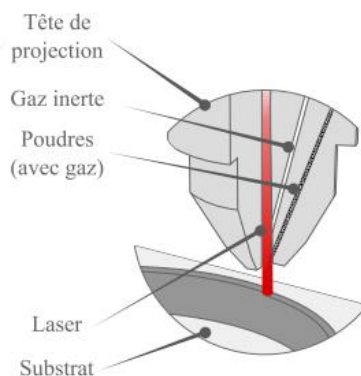


Figure 2 : Procédé LMD par projection de poudre [19]

Les applications des procédés à base de poudres métalliques sont principalement les composants à forte valeur ajoutée et de dimensions réduites [20]. En effet, ils permettent de fabriquer des composants avec une bonne qualité de surface [21], [22]. Les domaines privilégiés d'application sont l'aérospatiale et l'aéronautique pour la réalisation de pièces avec une complexité géométrique importante. Un autre domaine d'application est le médical avec la fabrication de prothèses [23] et notamment l'utilisation du FGM (Figure 3) avec l'obtention de composants multi-matériaux [19]. La réparation de pièces fait également partie des domaines dans lequel ces procédés (notamment le LMD) possèdent un intérêt certain [24].

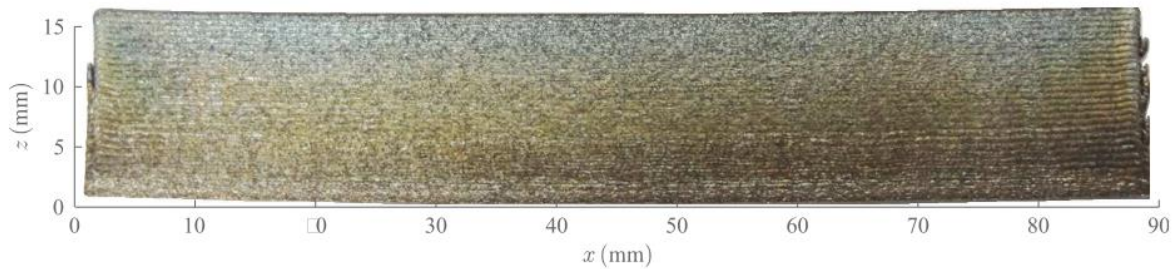


Figure 3 : Mur FGM fabriqué avec le procédé LMD [19]

2.2. Les principaux procédés basés sur les dépôts de fil métallique

Les différents procédés de fabrication additive utilisant des fils métalliques diffèrent principalement par la source de chaleur utilisée [16]. Nous pouvons distinguer plusieurs procédés utilisant le métal d'apport sous cette forme :

- **Wire Laser Additive Manufacturing (WLAM) [16] ou Wire Feed Laser Beam (WFLB) [25]** : la source d'énergie utilisée est un laser qui crée un bain de fusion dans lequel le fil est apporté (Figure 4). L'environnement de fabrication est sous enceinte contrôlée (sous argon). De nombreux paramètres (puissance du laser, vitesse du fil, position du fil par rapport au substrat) doivent être maîtrisés pour assurer de bonnes propriétés du métal déposé.

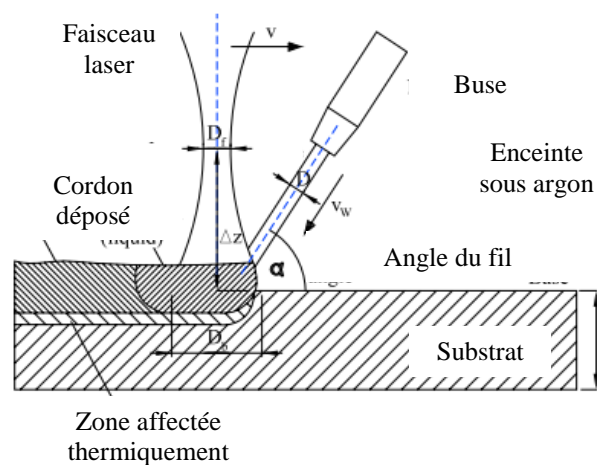


Figure 4 : Principe du WLAM [25]

- **Electron Beam FreeForm Fabrication (EBF3)** [26] : il s'agit d'un procédé breveté par la NASA. Il est utilisé pour fabriquer des géométries complexes avec un bon état de surface. La source d'énergie utilisée est un faisceau d'électron qui crée un bain de fusion dans lequel le fil est apporté. L'environnement de fabrication est sous vide poussé (Figure 5).

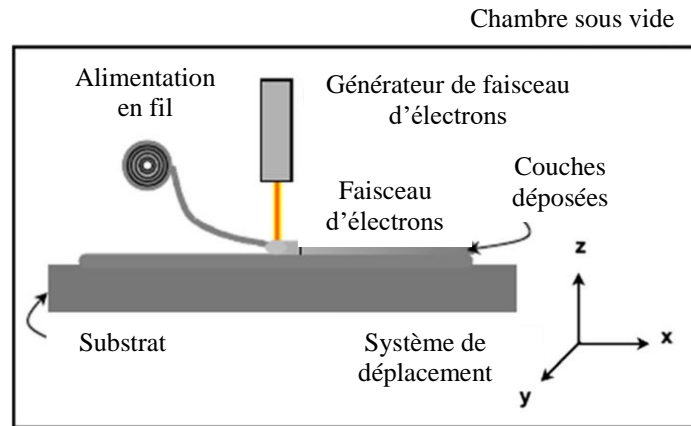


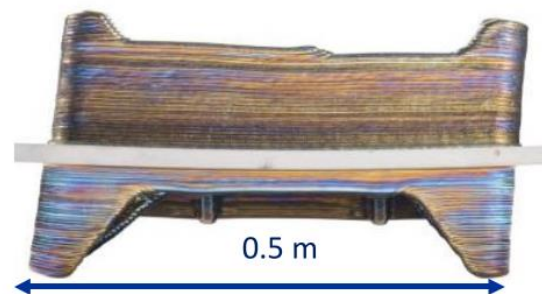
Figure 5 : Principe de fonctionnement de l'EBF3 [16]

- **Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)** : la source de chaleur utilisée ici est un arc électrique. Ce procédé repose sur l'association d'un générateur de soudure et d'un système de déplacement pour fabriquer des composants. Contrairement aux deux procédés précédents, l'utilisation d'une enceinte permettant de contrôler l'atmosphère n'est pas obligatoire. Un flux de gaz inerte au voisinage du bain de fusion est suffisant. Ce procédé sera détaillé à la section 3.

Les principales applications des procédés basés sur les fils métalliques sont les composants de structures et de relativement grandes dimensions (supérieure au mètre). Les principaux domaines d'application sont le naval, l'aérospatial et l'aéronautique [7].



(a) Longeron d'aile en alliage d'aluminium de 2.5 m de longueur [27]



(b) Pièce de train d'atterrissage en alliage de titane (0.5 m) [28]

Figure 6 : Exemples de composants fabriqués en WAAM [27] [28]

2.3. Comparaison des procédés de fabrication additive (poudre et fil)

Pour comparer les procédés de fabrication additive, quatre grandeurs caractéristiques principales ont été retenues. Elles permettent notamment de caractériser les performances de fabrication au regard des besoins du cahier des charges (taille de la pièce, état de surface attendu...). Ces quatre grandeurs sont :

- le taux de dépôt, c'est-à-dire la quantité de matière déposée par unité de temps ;
- l'épaisseur de couche, c'est-à-dire la distance entre deux plans de dépôts ;
- l'état de surface de fabrication, et notamment la rugosité ;
- le rendement matière, c'est-à-dire le rapport entre la masse de matière fonctionnelle pour le composant et la masse de matière utilisée pour fabriquer le composant.

Le comparatif entre procédés à base de poudre et à base de fil est présenté dans le Tableau 1.

Forme du matériau	Poudre	Fil
Taux de dépôt (kg/h)	0.1-0.2 [29]	1.5-4.2 [30], [31]
Epaisseur de couche (μm)	20-500 [22], [24]	1000-2500 [31], [32]
Etat de surface - Ra (μm)	10-20 Rugosité faible [21], [22]	200 Rugosité élevée [33]
Rendement matière (%)	10-60% [33]	90-100% [33]

Tableau 1 : Comparaison entre les procédés à base de poudre et de fil

Les procédés basés sur le fil métallique permettent de déposer beaucoup de matière par unité de temps, par rapport aux poudres métalliques. Par contre, la rugosité est nettement plus élevée, car l'épaisseur de couche est plus grande pour les procédés basés sur le fil. Le rendement matière est également beaucoup plus élevé pour le fil que pour la poudre. En effet, il y a beaucoup de perte de matière dans ce dernier cas [33]. Cela signifie donc que le coût matière est plus faible pour le fil. De plus, la poudre étant volatile, cela nécessite de travailler dans une enceinte spécifique protégeant l'utilisateur.

Dans la suite de notre étude, nous nous intéresserons uniquement aux procédés de fabrication additive basés sur le fil métallique car ils sont particulièrement adaptés à la fabrication de composants de structure et de grandes dimensions grâce à leur haut taux de dépôt. Nous avons choisi de nous

concentrer sur le WAAM car il présente des avantages prometteurs : la possibilité de réaliser des pièces dans un environnement moins protégé (pas de LASER ou de faisceau d'électrons par exemple). De plus, parmi les procédés cités auparavant, il est relativement simple à mettre en œuvre en particulier car il ne nécessite pas forcément l'utilisation d'une enceinte sous atmosphère contrôlée, ce qui pourrait être problématique avec des composants de grandes dimensions. D'autre part, le procédé WAAM s'appuie sur des technologies possédant un bon niveau de maîtrise, comme l'association d'un robot industriel et d'un générateur de soudure à l'arc [7].

3. Etat de l'art : Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)

Nous allons, dans cette section, nous concentrer sur le WAAM dont le principe de fonctionnement repose sur l'utilisation [27]:

- d'une source de chaleur : l'énergie d'un arc électrique (section 3.1.1) ;
- d'un réservoir de matière : sous forme de fil ;
- d'un système de déplacement (section 3.1.2).

Afin de fabriquer des composants, il est nécessaire de combiner les mouvements du système de déplacement et l'alimentation de matière. Une étape préalable de génération de trajectoires doit donc être effectuée afin de décrire les mouvements de l'effecteur porté par le système de déplacement (section 3.2).

Lors de l'opération de dépôt, la fusion du matériau entraîne une transformation chimique de la matière ainsi que des gradients de température au sein du composant. Des défauts de la structure interne peuvent apparaître. C'est pourquoi des systèmes ont été développés et ajoutés aux procédés de fabrication additive afin d'améliorer la qualité de la microstructure, les performances mécaniques et d'assurer la conformité géométrique de la pièce au cahier des charges (sections 3.3 à 3.3.4). Enfin, les alliages d'aluminium, qui nous intéressent plus particulièrement ici, possèdent des spécificités qui seront explicitées en section 3.4.

3.1. Les technologies utilisées pour la fabrication WAAM

Les principaux procédés de soudure à l'arc électrique sur lesquels s'appuie le WAAM sont détaillés ci-après.

3.1.1. Les procédés de soudure à l'arc électrique pour le WAAM

Le soudage est une opération qui consiste à assembler plusieurs pièces métalliques entre elles, de manière permanente (non démontable), avec ou sans métal d'apport. Les soudures peuvent être mises en œuvre de différentes façons et ceci selon plusieurs critères : la composition des pièces à assembler, l'épaisseur des pièces à lier et le domaine d'utilisation (industrie, agroalimentaire, nucléaire...).

Le principe de la soudure à l'arc est d'élever la température jusqu'au point de fusion du matériau en utilisant l'énergie dégagée par un arc électrique. C'est l'échauffement créé par la

résistivité des métaux parcourus par un courant qui élève la température au point de soudure jusqu'à la fusion du métal et permet de réaliser une liaison mécanique entre deux composants.

3.1.1.1. Procédés conventionnels de soudure à l'arc

De nombreux procédés de soudures à l'arc existent. Dans cette section, nous allons nous concentrer sur les trois principales technologies utilisées pour la fabrication additive :

- **Soudage à l'arc en atmosphère (inerte ou active) avec fil fusible (MIG : Metal Inert Gas, MAG : Metal Active Gas, GMAW : Gas Metal Arc Welding)** : il s'agit du procédé de soudage le plus utilisé industriellement, en concurrence avec le soudage à l'arc avec électrode enrobée. Un arc électrique est formé entre le fil fusible (métal d'apport) et la pièce afin de former un cordon de soudure (Figure 7). Le gaz protecteur permet d'éviter l'oxydation du métal déposé lors du refroidissement et de maintenir l'arc stable.

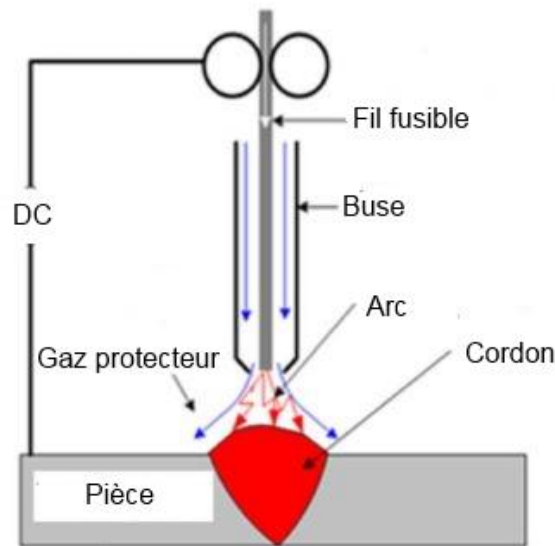


Figure 7 : Principe de la soudure GMAW [34]

- **Soudage à l'arc en atmosphère inerte avec électrode de tungstène (TIG : Tungsten Inert Gas ou GTAW : Gas Tungsten Arc Welding)** : contrairement au GMAW, l'arc électrique ne s'établit pas entre le métal d'apport et la pièce mais entre une électrode réfractaire de tungstène et la pièce à souder. Un gaz inerte (argon, hélium et mélanges) protège la zone de métal en fusion contre l'air ambiant durant le soudage. Le fil est apporté sur le côté entre l'électrode réfractaire et la pièce à souder (Figure 8). Une variante de ce procédé a été développée, il s'agit du TOPTIG. Le principe de fonctionnement est similaire mais le système d'alimentation du fil est différent : il est apporté dans la buse de protection gazeuse.

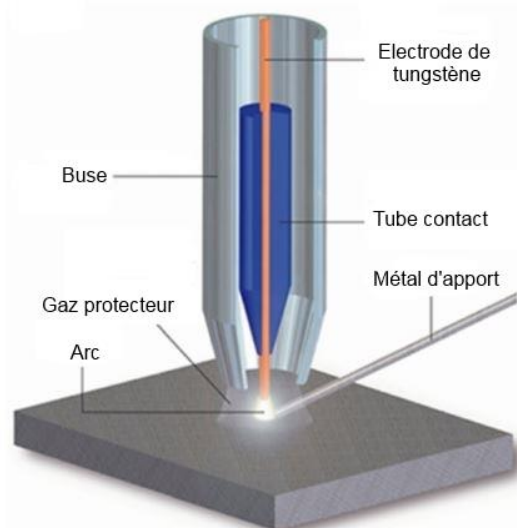


Figure 8 : Principe de la soudure TIG ou GTAW [16]

- **Soudure à l'arc plasma (PAW : Plasma Arc Welding) :** le procédé Plasma (Figure 9) est une évolution du procédé TIG qui permet d'améliorer les performances de soudage. Un gaz plasmagène circulant dans la tuyère crée une constriction de l'arc (arc conique), ce qui permet de concentrer l'énergie sur une surface réduite. Un second flux de gaz s'écoule dans la buse et assure la protection du bain de fusion. L'alimentation en métal d'apport est identique au GTAW.

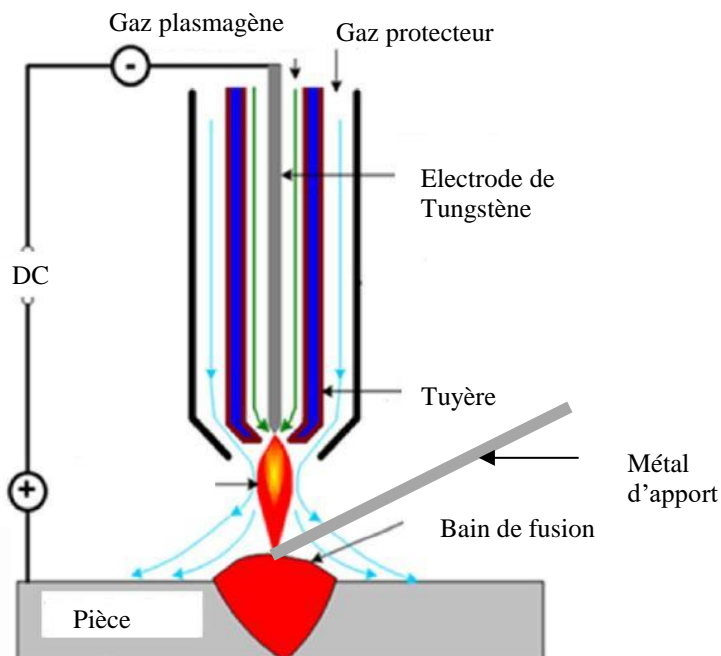


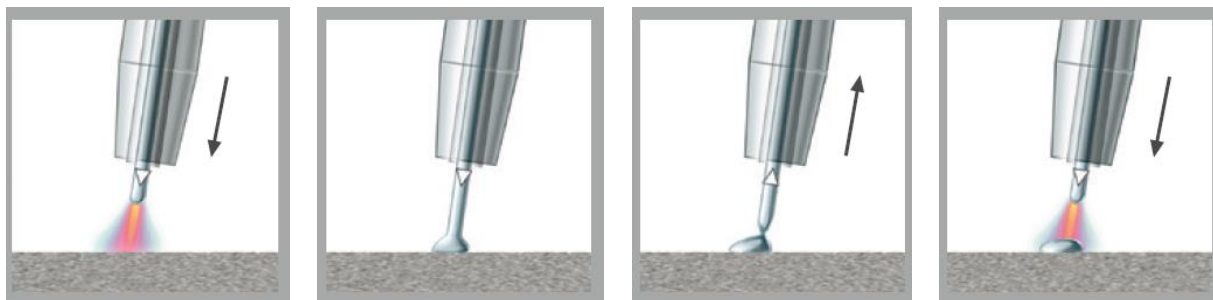
Figure 9 : Principe de la soudure plasma PAW [16]

Dans le cas du GMAW, le fil fusible est coaxial avec la torche de soudage contrairement aux procédés GTAW et au PAW où le fil est apporté sur le côté. L'utilisation du GMAW permet donc de faciliter grandement l'exécution des trajectoires de la torche [7]. C'est pourquoi nous allons

maintenant nous intéresser plus spécifiquement au GMAW. Des améliorations ont été apportées à ce procédé afin d'améliorer significativement la qualité du dépôt et la stabilité de l'arc. Parmi ces améliorations, nous pouvons citer le Cold Metal Transfer (CMT) qui est apparu en 2005. Ce procédé de soudage est détaillé à la sous-section suivante.

3.1.1.2. Le Cold Metal Transfer

Le procédé CMT (Cold Metal Transfer) a été développé par la société FRONIUS [35]. Il s'agit d'un système GMAW amélioré. Ce procédé est qualifié de soudage à "froid", car il permet, par rapport au GMAW conventionnel, de réduire l'apport de chaleur. Cet aspect est intéressant pour la fabrication additive car l'objectif est d'associer des cordons pour construire un composant : l'énergie est donc utilisée pour faire fondre une partie du cordon précédemment déposé. Si l'énergie apportée à la pièce est trop importante, il n'est pas possible de construire un composant car cela peut créer un écroulement de la matière. Le principe de ce procédé repose sur un mouvement d'avance et de recul du fil. Ainsi, le cordon est déposé sous forme d'une succession de gouttes. Les étapes du cycle CMT sont représentées sur la Figure 10.



Etape 1 :	Etape 2 :	Etape 3 :	Etape 4 :
Durant la phase de fusion, le fil (métal d'apport) est guidé vers le bain de fusion	L'arc électrique s'éteint lorsque le fil est plongé dans le bain de fusion. L'intensité de soudage est abaissée. C'est la phase de court-circuit.	Le mouvement de recul du fil entraîne le détachement de la goutte. Le courant de court-circuit est maintenu à une faible intensité	Le mouvement du fil est inversé et le processus recommence.

Figure 10 : Principe du cycle Cold Metal Transfer [35]

Le procédé CMT [35] présente trois avantages principaux par rapport au soudage GMAW standard :

- la quasi-absence de projection lors de la soudure : le recul du fil forme une goutte pendant le court-circuit, la soudure est donc propre et le matériau homogène ;
- le faible apport de chaleur (court-circuit très court donc l'arc apporte de la chaleur de manière ponctuelle) ;
- la stabilité de l'arc (le paramétrage et le réglage de la longueur de l'arc interviennent de manière mécanique).

Trois variantes du procédé CMT existent :

- CMT PULSE (Figure 11) : il s'agit de la combinaison d'un cycle électrique pulsé et d'un cycle du CMT. En plus du mouvement d'avance et de recul du fil, le courant est pulsé, cela permet de pouvoir régler l'apport de chaleur lors de la soudure.

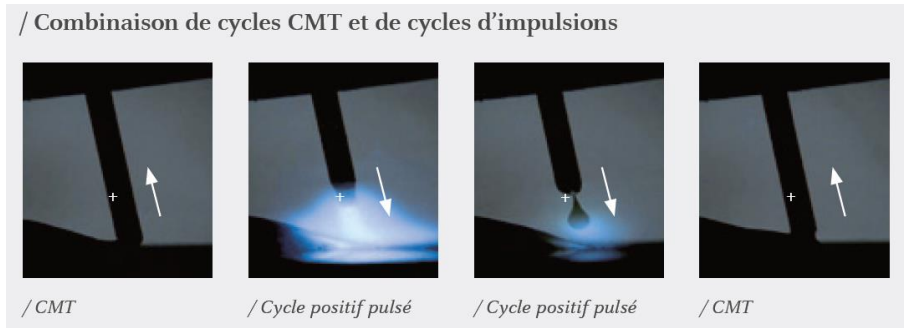


Figure 11 : Principe du Cold Metal Transfer pulse [35]

- CMT ADVANCED (Figure 12) : il y a une alternance de polarité positive et négative au cours du cycle CMT. L'énergie est apportée uniquement pendant les cycles positifs (étant donné que la pièce est à la polarité négative). Cela permet de déposer la matière avec un faible apport de chaleur. Ce dernier est ciblé pendant la phase de court-circuit.

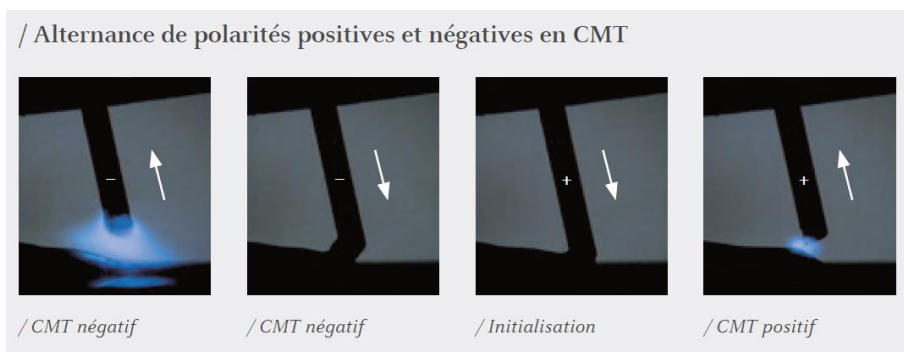


Figure 12 : Principe du Cold Metal Transfer advanced [35]

- CMT ADVANCED PULSE (Figure 13) : ce mode de soudage combine des cycles CMT à polarité d'électrode négative avec une phase d'impulsion à polarité positive. La première étape est une phase de CMT négative. Ensuite, le procédé s'initialise au contact de la pièce. Le fil se rétracte et le cycle positif démarre avec la formation d'un arc pulsé.

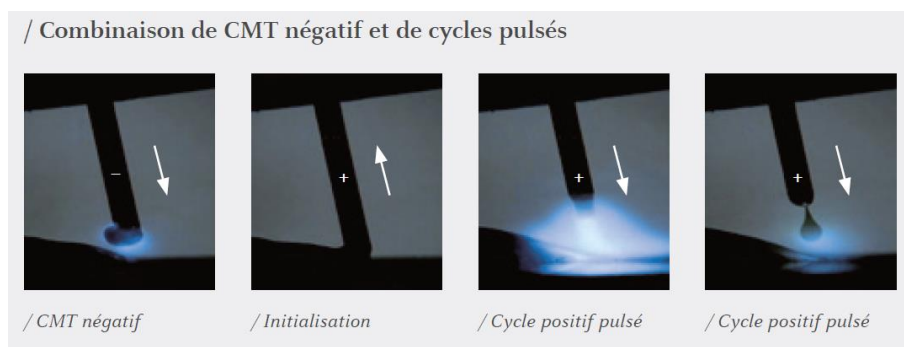


Figure 13 : Principe du Cold Metal Transfer advanced pulse [35]

Chacun de ces modes a des applications différentes. Des lois de paramétrage ont été développées par le constructeur pour différentes nuances de matériaux. Elles sont intégrées au générateur de soudure. Selon le matériau et le diamètre du fil, les modes de soudage les plus adaptés sont proposés. Cela permet d'adapter l'apport d'énergie en fonction du besoin.

3.1.2. Les systèmes de déplacement

Le second pilier d'une machine de fabrication additive est le système de déplacement. Pour le procédé WAAM, les applications de grandes dimensions imposent un espace de travail important (plusieurs mètres). Pour répondre à ce besoin, des robots série multi-axes sont majoritairement utilisés [7]. Ils possèdent des rayons d'action importants et une bonne flexibilité pour orienter l'outil. Il est ainsi possible de conserver une orientation constante de l'outil par rapport à une surface non plane, comme par exemple pour les opérations d'inspection [36]. En plus de ces systèmes de déplacement, des tables multi-axes peuvent être ajoutées pour améliorer l'accessibilité de l'effecteur. Cela peut également permettre de réduire l'effet de la gravité ou travailler avec une orientation outil constante par rapport à la verticale.

L'ensemble des expériences présentées dans ce manuscrit a été réalisé avec un équipement multi-procédés présent à l'Ecole Centrale de Nantes. Il s'agit d'une cellule robotisée dans laquelle il est possible de mettre en œuvre des procédés additifs (WAAM et LMD) et soustractifs (broche d'usinage grande vitesse). Le robot porteur utilisé est un KUKA KR500MT comportant 6 axes. Son rayon d'action est de 2830 mm et sa charge maximale admissible est de 500 kg.



Figure 14 : Cellule multi-procédés

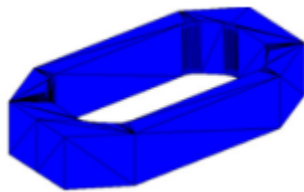
D'autres équipements sont également disponibles dans cette enceinte par la réalisation de mesures (caméra thermique, palpeur, profilomètres...), de préchauffage (éléments résistifs) ou l'ajout d'équipement de refroidissement (système venturi).

Pour fabriquer des composants en WAAM avec ces machines, il est nécessaire de programmer les mouvements de l'effecteur : il s'agit de la génération de trajectoires de fabrication qui est détaillée à la section suivante.

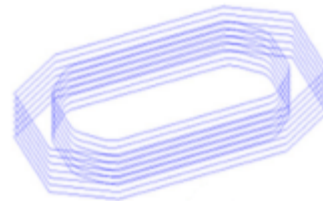
3.2. Génération de trajectoires de fabrication et stratégies de dépôt

3.2.1. Généralités sur la génération de trajectoires

La génération de trajectoires est une étape primordiale pour la mise en œuvre du procédé de fabrication additive. Elle s'appuie sur la maquette numérique de la pièce. Une étape de découpage de cette dernière permet d'obtenir les courbes qui décrivent les trajectoires de fabrication. Le découpage est généralement réalisé par une succession de plans parallèles distant de l'épaisseur de couche du fait de sa simplicité de mise en œuvre [37].



Maquette numérique



Découpage

Figure 15 : Découpage d'une maquette numérique par plans parallèles

Dans la littérature, la démarche utilisée pour la génération des trajectoires de fabrication n'est souvent pas clairement explicitée (par exemple le choix de l'orientation de l'outil). D'une manière générale, cette dernière est effectuée au moyen d'algorithmes développés en interne dont la démarche de choix est peu détaillée. La plupart du temps, seules des pièces tests sont présentées. De plus, un manque de maturité des solutions logicielles actuelles a été mis en évidence [38]. Il s'agit, le plus souvent d'adaptation de logiciels existants et non de solutions dédiées à la fabrication additive WAAM.

3.2.2. Cas des composants monocordons

Les murs sont le plus souvent qualifiés de monocordons, c'est-à-dire qu'ils sont fabriqués à partir d'un empilement de cordons simples. Cela permet de fabriquer des parois d'une épaisseur égale à la largeur d'un cordon. Selon la géométrie des composants, il est parfois nécessaire d'associer des murs monoparois. La gestion des intersections et des jonctions de parois soulève une problématique. En effet, contrairement à l'usinage, où l'action de passer à plusieurs reprises au même point n'a pas d'effet majeur sur la pièce, dans le domaine de la fabrication additive, cela se traduit par un double dépôt qui, couche après couche, génère un défaut lié au surplus de matière. Cette problématique sera

détaillée au Chapitre 2 ainsi que les stratégies décrites dans la littérature pour la résoudre. Une nouvelle méthode de résolution sera également proposée et appliquée à différents types d'intersections.

3.2.3. Cas des composants massifs

La fabrication de pièces massives nécessite la génération de trajectoires de remplissage : dépôts de cordons côte à côte au sein d'une même couche. Dans ce cas, il faut veiller à avoir un remplissage homogène afin d'éviter les manques de matière et de fusion qui dégraderaient les propriétés mécaniques des composants fabriqués. Cela nécessite donc de mettre en place des stratégies pour que la fusion entre les dépôts successifs soit correcte. Pour cela, des approches ont été développées et testées. Il est par exemple possible d'alterner la position des parcours de remplissage entre chaque couche (Figure 16). Cela permet de lisser les creux et les crêtes des cordons et ainsi obtenir une bonne planéité des couches déposées [40].

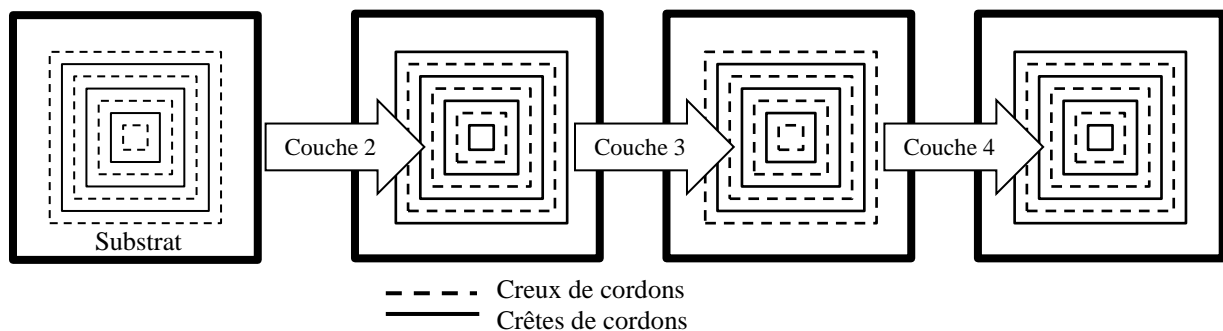


Figure 16 : Stratégie de remplissage [40]



Figure 17 : Vue en coupe de la stratégie de remplissage [40]

D'autres stratégies de remplissage peuvent être envisagées pour fabriquer des composants massifs : balayage zigzag, spirale... Ces dernières seront explicitées au chapitre 3.

Selon la géométrie du composant, la génération de parcours de remplissage peut conduire à des zones critiques où la distance entre deux parcours n'est pas constante. Ainsi, si les paramètres opératoires sont conservés constants, cela se traduira par des hétérogénéités au sein de la pièce, ce qui peut conduire à des manques de matière [41]. Cette problématique est illustrée par la Figure 18 a, nous pouvons voir que la génération de parcours de remplissage à partir de la géométrie initiale (en vert) ne permet pas d'assurer un remplissage correct (voir les zones entourées sur la Figure 18 a) car la distance entre parcours de remplissage est variable. Pour contrer ce problème, une solution consiste à adapter la géométrie (Figure 18 b). Cela génère par contre des surplus de matière (zone en rouge) qui doivent être éliminées pour répondre au cahier des charges. En général, les applications WAAM nécessitent un parachèvement, étape au cours de laquelle ces zones de surplus seront retirées. La présence de ces zones n'est donc pas rédhibitoire pour ce type de composant. C'est pourquoi des

adaptations peuvent être apportées à la géométrie de la pièce à fabriquer en prenant compte les contraintes liées au procédé (DFAM : Design For Additive Manufacturing).

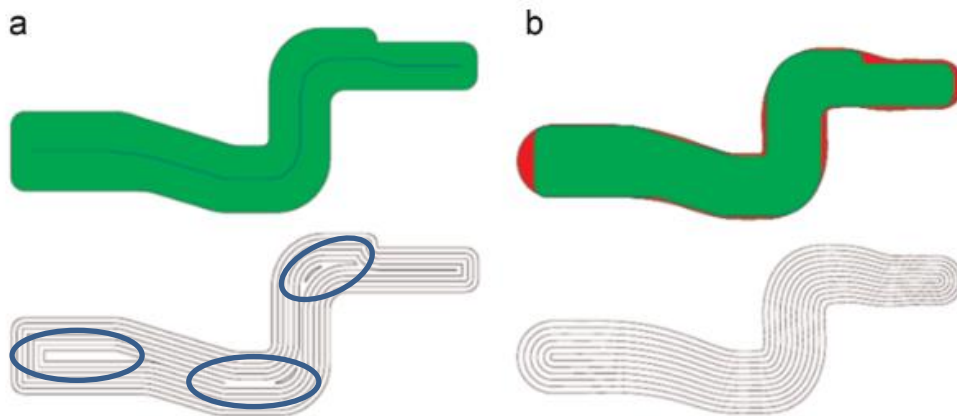


Figure 18 : Adaptation de la géométrie pour le remplissage de matière [41]
a : géométrie originale et trajectoires de fabrication associées
b : géométrie optimisée avec surplus de matière

Dans la plupart des cas, les paramètres opératoires du procédé sont constants tout au long de la fabrication et donc la section du cordon l'est aussi. Plutôt que de modifier la géométrie de la pièce, une autre solution serait de faire varier ces paramètres pour modifier la section du cordon au besoin. Cette stratégie a déjà été employée, mais elle se limite à l'utilisation de différents jeux de paramètres pour le dépôt de chaque cordon [37] et non une variation continue des paramètres tout au long de la fabrication. Une approche s'appuyant sur la variation continue d'un paramètre de fabrication sera proposée au chapitre 2.

3.3. Les technologies additionnelles pour améliorer la santé matière

Une fois la génération de trajectoires effectuée, la fabrication du composant peut être mise en œuvre. Lors de la fabrication, le métal fond ce qui génère des gradients thermiques qui conduisent à des déformations et des contraintes résiduelles. Cela peut affecter la santé matière avec la possible création de défauts qui peuvent détériorer les performances mécaniques du composant. L'étude de la microstructure des composants (dureté, taux de porosité, fissures...) et la réalisation d'essais mécaniques (résistance mécanique, allongement...) permet de quantifier l'impact de ces défauts. Des technologies additionnelles au procédé WAAM ont été développées ou adaptées pour améliorer la santé matière du dépôt. Elles sont présentées ci-après.

3.3.1. Système de roulage

Le roulage consiste à exercer un effort presseur sur le cordon de soudure en phase de refroidissement à l'aide d'un galet, ce qui crée un phénomène d'écrouissage [39]. Cela permet de réduire le taux de porosité et la taille des grains à l'échelle de la microstructure, les performances mécaniques du matériau s'en trouvent alors améliorées.

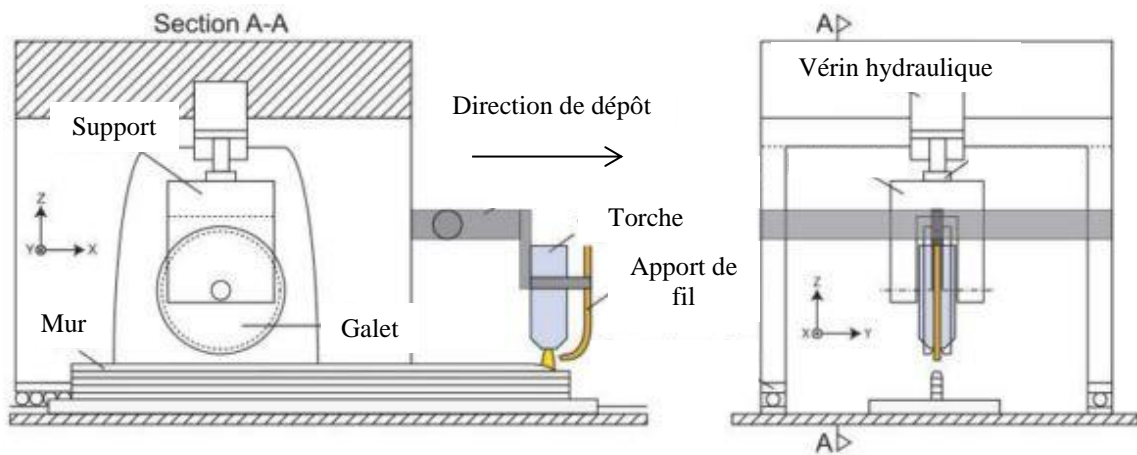


Figure 19 : Schéma de principe d'un système de roulage pour le procédé WAAM [42]

Différents profils de galets peuvent être utilisés selon les besoins. Généralement, pour les murs monocordons, des galets avec une empreinte cylindrique sont utilisés. Cette solution impose cependant une opération supplémentaire (phase de dépôt puis de roulage) et nécessite l'utilisation d'un outillage capable de résister aux efforts importants mis en jeu (les valeurs d'efforts s'échelonnent de 15 kN à 75 kN selon les matériaux [43], [44]). Les essais pour l'instant réalisés sont limités à des cas de murs monocordons. La liberté de fabrication est fortement réduite par l'ajout de l'opération de roulage. Ces systèmes ne sont pas compatibles avec les robots sériels multiaxes du fait de leur manque de rigidité pour résister aux efforts mis en jeu lors de l'opération de roulage.

3.3.2. Système de martelage

Afin d'exercer un effort presseur sur le métal déposé, une autre voie a été développée, il s'agit du martelage [45]. Son principe repose sur l'application d'un effort ponctuel et alternatif sur la surface d'une paroi déposée en WAAM (Figure 20).



Figure 20 : Système de martelage [45]

Les performances en termes de résistance mécanique et d'allongement se trouvent améliorées. Cependant, cette opération entraîne des vibrations et des efforts importants au niveau de l'effecteur (jusqu'à 5 kN). Cela augmente le temps de fabrication et nécessite l'emploi de systèmes de déplacement rigides [45].

3.3.3. Trainard de protection gazeuse

Pendant la fabrication avec le procédé WAAM, le bain de fusion est généralement protégé par un apport de gaz protecteur intégré à la torche. Le rôle de ce gaz est d'éviter le phénomène d'oxydation du métal déposé et de maintenir l'arc. Cependant, cette protection locale (au niveau de la torche de soudage) n'est pas toujours suffisamment efficace pour protéger le cordon déposé (les alliages de titane par exemple [46]). C'est pourquoi, en plus de ce premier apport de gaz, des systèmes issus du soudage ont été ajoutés à l'effecteur. Il s'agit d'un trainard (Figure 21 et Figure 22), qui a pour fonction de créer un écoulement laminaire de gaz protecteur sur le bain de fusion. Un gaz inerte est projeté sur le bain de fusion et le cordon en phase de refroidissement ce qui réduit de manière importante l'oxydation du matériau (sans ce système de trainard, le métal déposé est rapidement en contact avec l'air ambiant après le passage de la torche). Le débit de gaz utilisé est d'environ 10 l/min. Il a été montré que ce système permet de réduire significativement la contamination du bain de fusion par le dioxygène. Cela peut, dans certains cas, éviter l'utilisation d'une enceinte contrôlée pour la fabrication avec des alliages sensibles à l'oxydation comme les alliages de titane [46]. Cependant, ce système augmente l'encombrement de l'effecteur ce qui peut pénaliser l'accessibilité et interférer avec des éléments précédemment fabriqués (par exemple en cas de changement d'orientation outil).

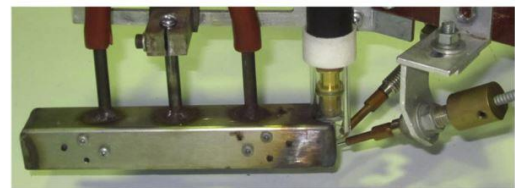
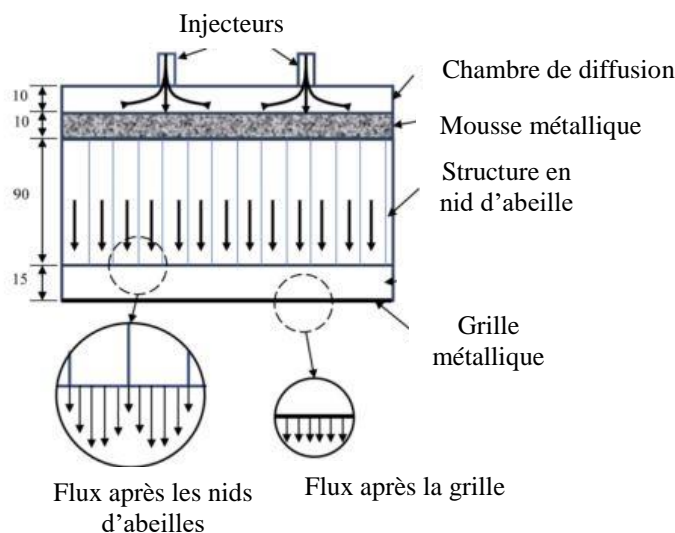


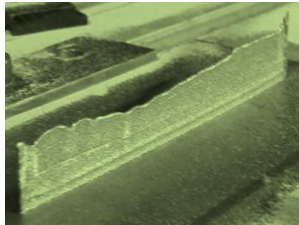
Figure 22 : Trainard de protection [32]

Figure 21 : Schéma de principe du trainard de protection développé par Ding et al. [46]

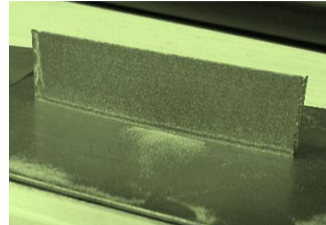
3.3.4. Fabrication avec Monitoring du procédé

Lors de la fabrication d'une pièce, des défauts de différentes natures peuvent apparaître et notamment un écart entre la position théorique et réelle du cordon. Il en résulte une incohérence entre la trajectoire de l'outil (qui a été généré) et la position de la matière. Ces défauts engendrent donc une variabilité des conditions de dépôt, qui peut dégrader la santé matière et la précision géométrique du composant final. Pour pallier cette problématique, une solution est le monitoring. Cela consiste à adapter les paramètres opératoires (puissance, vitesse de dévidage du fil, vitesse d'avance...) au cours du procédé par un contrôle en ligne, c'est-à-dire un asservissement des paramètres en fonction de mesures thermiques (champ de température), géométriques... Des méthodes de compensation ont été développées et appliquées à des cas concrets [47] notamment la fabrication de murs par projection de

poudre avec monitoring géométrique (Figure 23). En modulant les paramètres opératoires (dans ce cas, le débit matière utilisé) selon la hauteur du mur, le monitoring a permis de fabriquer le composant avec des conditions de dépôt optimales tout au long de la fabrication. D'autres approches sont par ailleurs développées au sein de l'équipe de recherche.



(a) Sans monitoring géométrique



(b) Avec monitoring géométrique

Figure 23 : Fabrication de mur avec et sans monitoring du procédé [47]

Cette nouvelle approche apparaît comme une solution très intéressante pour les futures applications des procédés de fabrication additive qui s'orientent vers des composants fonctionnels de plus en plus complexes et dont les mécanismes (thermiques, physiques...) ne peuvent pas aujourd'hui être anticipés lors de la génération de trajectoires.

3.3.5. Conclusion sur les technologies additionnelles

Les différentes technologies présentées dans cette sous-section sont pertinentes pour améliorer la qualité du dépôt et la santé matière. Cependant, la mise en place de ces équipements engendre des contraintes supplémentaires (moyens matériels, moyens de mesures...). Ces opérations ne sont pas adaptées à des composants de grandes dimensions ou de forme complexe. En effet, les applications de ces technologies se limitent à des géométries « tests » (fabrication de murs principalement).

Dans notre domaine d'étude, nous cherchons à mettre en place des méthodes de fabrication pour des pièces fonctionnelles de grandes dimensions, c'est pourquoi, nous avons choisi de ne pas utiliser ces technologies du fait de leurs limitations.

3.4. Spécificités des alliages d'aluminium pour le procédé WAAM

La faible densité de l'aluminium et de ses alliages en fait un matériau de choix pour des applications industrielles variées (aéronautique, aérospatiale, automobile, énergie...). L'utilisation croissante de ce matériau a mis en évidence de nouveaux enjeux comme le recyclage et la réutilisation de cette matière [48]. Dans la suite, nous allons nous concentrer sur les spécificités de ce matériau pour la fabrication WAAM.

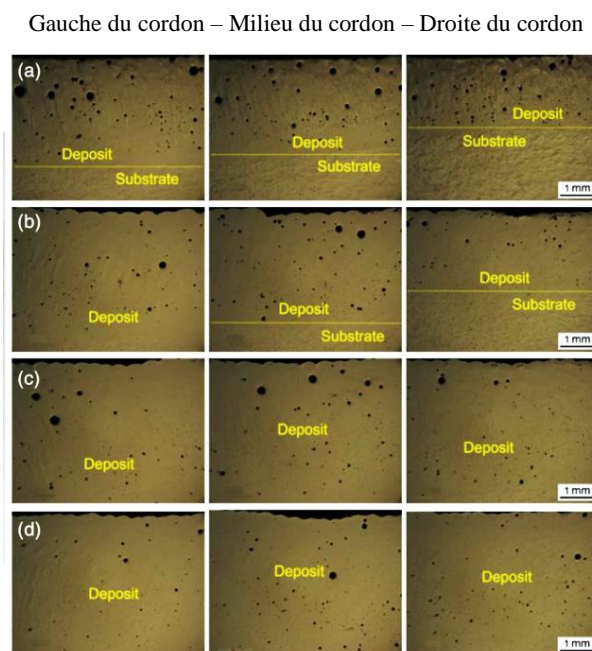
A température ambiante, l'aluminium est recouvert d'alumine (Al_2O_3). Cette dernière forme une couche isolante et poreuse à la surface de la pièce. La température de fusion de l'alumine est d'environ $2000^{\circ}C$ [49] contre 650 à $700^{\circ}C$ pour les alliages d'aluminium. Ainsi, lors du dépôt, cet oxyde ne fond pas et crée des inclusions dans le bain de fusion [50], ce qui détériore la qualité de la matière déposée et ne permet pas la création d'un arc stable. A l'instar des opérations de soudage, la

fabrication additive avec des alliages d'aluminium requiert donc une étape de préparation de la tôle support avant fabrication.

Les deux principaux problèmes liés à l'aluminium et ses alliages en WAAM sont les fissures de solidification et la porosité [44] qui sont détaillées ci-après. Ces défauts constatés dépendent des nuances utilisées.

La formation de fissures à chaud est un défaut fréquemment observé lors des opérations de soudage des alliages d'aluminium [51]. Elles se produisent durant la phase de solidification. Lors du dépôt, le métal subit un fort gradient thermique à proximité du bain de fusion, dû à l'apport de chaleur localisé. C'est pourquoi, la réduction de l'apport de chaleur lors du dépôt de la matière peut permettre de limiter ce gradient thermique et par conséquent de réduire le risque d'apparition de fissures lors de la solidification.

Par ailleurs, l'aluminium possède une haute affinité pour le dihydrogène (produit lors de la formation de l'alumine), ce qui le rend particulièrement sensible à la porosité. Ces défauts dégradent la structure interne et par conséquent, ils affectent les propriétés mécaniques des composants. Sur la Figure 24, des observations de dépôts de cordon en alliage d'aluminium (2219 - Al 6.3 Cu) sont présentées.



**Figure 24 : Observation de cordons simples déposés avec le procédé CMT
(a) TS = 1 m/min (b) TS = 0.8 m/min (c) TS = 0.6 m/min (d) TS = 0.5 m/min [30]**

Nous remarquons tout d'abord que les pores sont majoritairement présents sur la partie supérieure des dépôts du fait de la sensibilité des alliages d'aluminium au dihydrogène. La taille des pores peut être importante (plus de 100 μm de diamètre). Cela peut donc affecter les propriétés des composants obtenus en WAAM.

Le mode de dépôt utilisé (CMT, CMT P, CMT ADV ou CMT PADV) peut réduire significativement le taux de porosité ainsi que la taille et le nombre de pores (Figure 25). Cette

différence est notamment observée pour les modes « Advanced » (Figure 25 c et d), qui grâce à l'inversion de polarité peuvent aider à éliminer la couche d'oxyde sur le fil [30] et ainsi réduire les inclusions. L'apport de chaleur est réduit avec ces modes. Ainsi, la phase de solidification est plus rapide, la quantité de dihydrogène dissoute dans le métal en fusion, qui est principalement responsable de la formation de porosité, est réduite [52].

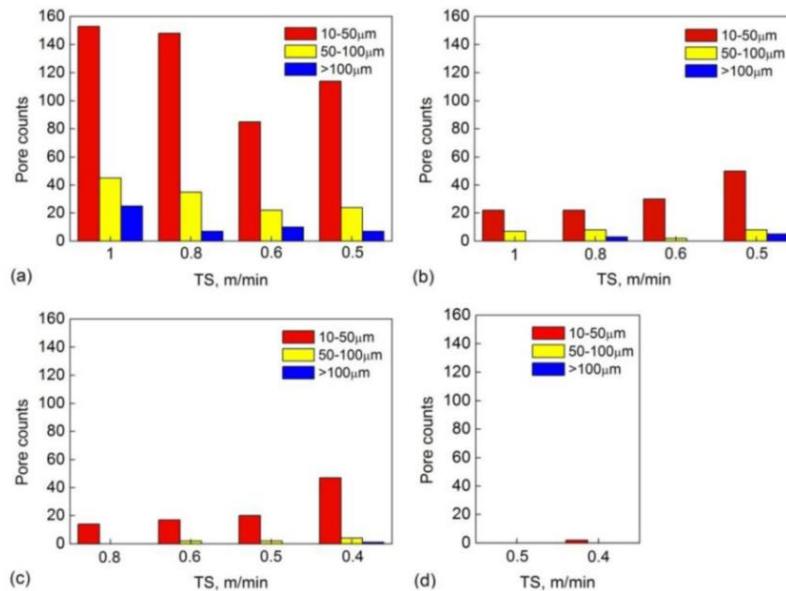


Figure 25 : Comptage des porosités en fonction du mode CMT et de la vitesse d'avance (a) CMT, (b) CMT Pulsé, (c) CMT Advanced (d) CMT P-Advanced [30]

Un autre moyen de réduire le taux de porosité est le roulage, déjà décrit dans ce chapitre. Dans le cas des alliages d'aluminium, les efforts s'échelonnent de 15 à 45 kN. La combinaison de l'opération de roulage avec traitement thermique (535 °C pendant 90 min) après dépôt permet de réduire significativement la présence de pores dans le métal déposé [53]. Cela permet également d'augmenter la dureté (Figure 26), notamment avec l'augmentation de l'effort presseur. Les propriétés mécaniques s'en trouvent améliorées.

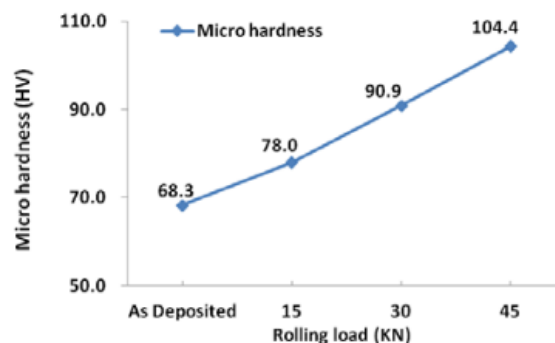


Figure 26 : Dureté en fonction de l'effort de roulage [44]

4. Conclusion et organisation du manuscrit

La fabrication additive est un domaine qui regroupe une multitude de technologies capables de répondre à différents niveaux de qualité et d'exigence. Parmi ces technologies, le WAAM, qui désigne les procédés de fabrication additive de pièces métalliques par soudage à l'arc, est destiné aux applications de grandes dimensions et nécessitant un taux de dépôt important. L'objectif de cette thèse est de proposer une méthodologie de fabrication de pièces de grandes dimensions du domaine aéronautique en alliage d'aluminium par technologie WAAM robotisée.

Dans les sections précédentes, plusieurs problématiques ont été soulevées. Elles constituent les différentes voies de recherche étudiées durant cette thèse et sont l'objet des différents chapitres de ce manuscrit.

La génération de trajectoires est une étape décisive du procédé d'obtention par fabrication additive. La démarche mise en œuvre qui s'appuie sur la maquette numérique jusqu'à la pièce finale est peu explicitée dans la littérature. Il y a également un manque de maturité des solutions logicielles actuelles [38]. Pour cela, nous proposerons et formaliserons une méthode permettant de générer les trajectoires de fabrication adaptées à la géométrie du composant. Les contraintes du procédé peuvent également nécessiter une adaptation de la géométrie et par conséquent des trajectoires de fabrication. C'est pourquoi, nous chercherons à mettre en œuvre des méthodes pour répondre à ces limitations. Cela sera l'objet du second chapitre de ce manuscrit.

La génération des trajectoires s'appuie sur des paramètres de fabrication (épaisseur de couche, vitesse d'avance et paramètres du procédé...) dont la démarche de choix a été peu explicitée jusqu'à présent. Dans le troisième chapitre de ce manuscrit, nous chercherons à proposer une méthode afin de choisir les paramètres opératoires adaptés pour la mise en œuvre du procédé.

Le dépôt du métal lors de la fabrication s'accompagne d'une modification de sa structure interne qui peut affecter sa santé matière. Nous chercherons donc à évaluer, quantifier et expliquer les performances mécaniques des composants réalisés au travers d'analyses de la microstructure mais aussi de mesures macroscopiques (résistance mécanique à la traction et fatigue). Des voies d'améliorations des propriétés mécaniques seront également proposées afin de répondre aux limitations du roulage notamment. Cette étude est l'objet du quatrième chapitre de ce manuscrit.

Les composants fabriqués en WAAM sont habituellement déposés sur des substrats plans. Nous chercherons en premier lieu à mettre en évidence les problématiques liées à la fabrication additive sur des supports non plans. Une méthode de fabrication additive sur ce type de support sera proposée et illustrée avec l'obtention d'un composant de structure de fuselage. Les intérêts du WAAM pour ce cas d'étude seront présentés au cinquième chapitre.

Le sixième et dernier chapitre conclut ce travail de thèse et propose quelques perspectives.

Chapitre 2 : Génération de trajectoires pour le procédé WAAM

Ce second chapitre présente les travaux concernant la génération de trajectoires pour le procédé WAAM. À l'instar d'autres procédés de fabrication, cela constitue une étape décisive pour l'obtention de la pièce finale, participe à la bonne maîtrise du procédé et s'appuie sur le choix de paramètres opératoires optimisés.

Dans la première partie de ce chapitre, une méthodologie de génération de trajectoires pour le procédé WAAM est détaillée. Plusieurs verrous liés à la génération de trajectoires sont soulevés. Afin de résoudre ces derniers, des méthodes sont proposées puis illustrées par la réalisation d'un composant du domaine naval.

Dans une seconde partie, différentes méthodologies de découpage, en lien avec la génération de trajectoires, pour les composants ayant une forte variabilité de l'angle contre dépouille sont proposées, étudiées et comparées. L'objectif est de répondre au besoin de génération de trajectoires de complexité croissante du fait du déploiement du procédé pour des applications de plus en plus sophistiquées. Une approche reposant sur une variation continue des paramètres opératoires est également développée pour apporter une plus grande flexibilité à la génération de trajectoires.

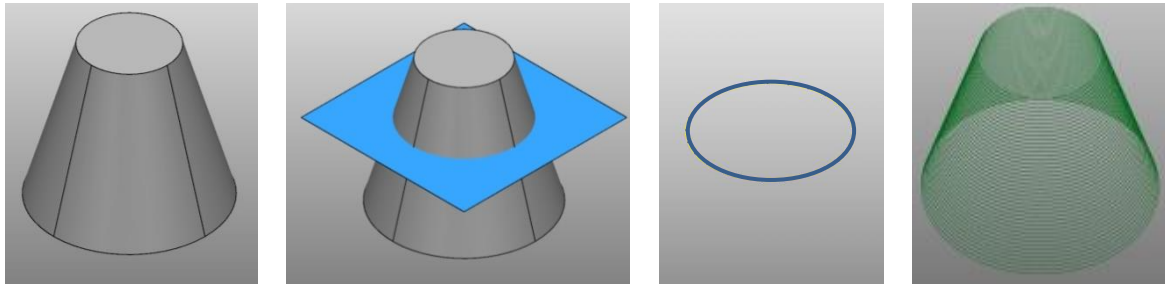
1. Méthodologie de génération de trajectoires pour le WAAM

Cette section regroupe les différents éléments nécessaires à la mise en œuvre de la méthodologie de génération de trajectoires, qui, à partir d'un modèle numérique, permet de fabriquer avec le procédé WAAM un composant fonctionnel et conforme au cahier des charges.

1.1. Définition des principaux éléments de vocabulaire

Dans cette partie, les principaux éléments de vocabulaire traitant de la génération de trajectoires sont définis.

La maquette numérique correspond au modèle numérique de la pièce (obtenu avec un logiciel de CAO). Elle peut être composée de volumes, de surfaces, de maillages, de courbes ou de points. Cette maquette constitue la base de la génération de trajectoires, car c'est à partir de celle-ci que le découpage va être effectué. Cette étape permet d'obtenir des courbes générées par l'intersection d'une surface de découpage (le plus souvent un plan) et la maquette numérique (si cette dernière est volumique, la courbe générée est la frontière entre le volume et le plan de coupe). Sur ces courbes, il est possible de modifier le nombre de points et d'appliquer différents types d'interpolation (linéaire, spline...) pour obtenir des trajectoires lissées par exemple. Chaque découpage va générer une ou plusieurs courbes pouvant être fermées ou ouvertes. Un découpage dans le cas d'un cône est proposé Figure 27.



Maquette numérique + Plan de découpage = Courbe obtenue (fermée) = Découpage complet

Figure 27 : Exemple d'opération de découpage sur un cône

C'est à partir de ces courbes que le parcours est généré. Ce dernier représente le chemin parcouru physiquement par le TCP (Tool Center Point) c'est-à-dire les points de passage de l'outil. En d'autres termes, il correspond aux coordonnées de la trajectoire outil usuellement définie dans un repère associé à la pièce. Il est également possible d'utiliser un repère associé à la machine.

Sur ce parcours d'outil, deux types de trajectoires peuvent être utilisées :

- Des trajectoires qualifiées de « 3 axes » : les mouvements relatifs de l'axe outil sont décrits par des translations par rapport à la pièce dans trois directions orthogonales ;
- Des trajectoires qualifiées de « 5 axes » : en plus des translations de l'outil par rapport à la pièce dans les 3 directions orthogonales, des rotations de l'axe outil par rapport à la pièce sont ajoutées selon deux directions.

Pour toutes les trajectoires « 5 axes » générées dans ce manuscrit, les orientations de l'outil seront paramétrées par un vecteur d'orientation (Figure 28), où les coordonnées (A3, B3, C3) sont utilisées pour décrire l'orientation de l'axe outil dans le repère pièce [50].

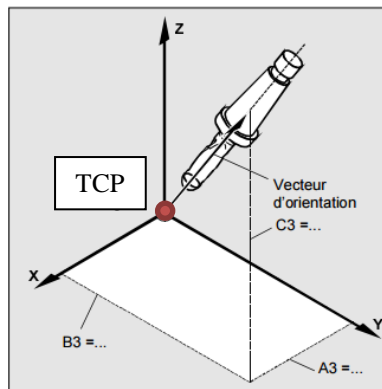


Figure 28 : Définition du vecteur d'orientation de l'outil dans le cas d'une trajectoire « 5 axes »
[54]

La génération des vecteurs d'orientation peut être assurée par la construction de guides (Figure 29). Ces derniers sont des courbes qui définissent localement l'orientation du vecteur outil en fonction

du niveau et du point sur le parcours d'outil. Les guides sont répartis tout au long du parcours. Une interpolation de type « spline » permet de générer les coordonnées du vecteur outil pour chaque point du parcours.

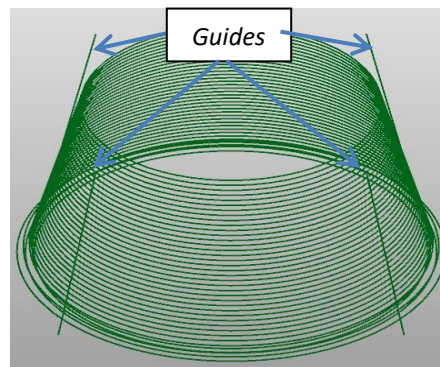


Figure 29 : Exemple de trajectoires avec guides pour construction des vecteurs d'orientation

1.2. Étapes d'obtention d'un composant par fabrication additive

L'obtention d'un composant par fabrication additive s'appuie sur une succession d'étapes permettant à partir de la maquette numérique d'obtenir un composant fonctionnel (Figure 30).

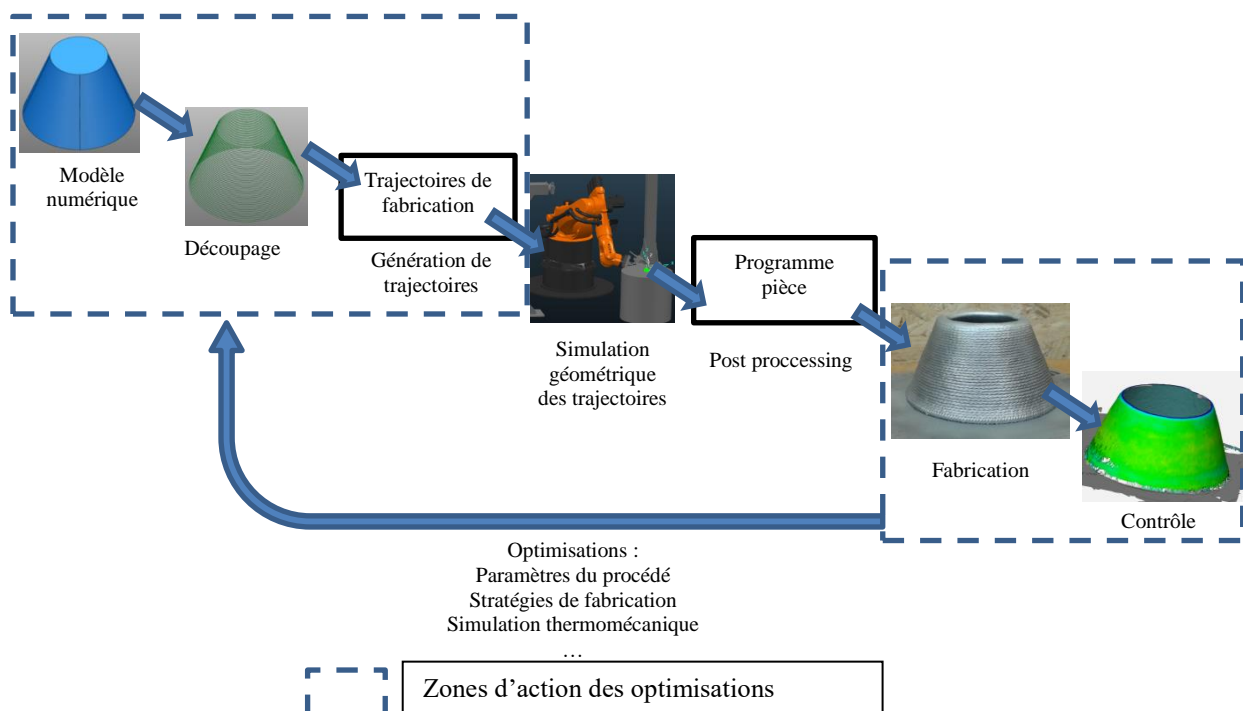


Figure 30 : Étapes d'obtention d'un composant par fabrication additive

Les différentes étapes nécessaires à l'obtention d'une pièce par fabrication additive sont :

- **Le modèle numérique** : comme évoqué en 1.1, il constitue la base de la génération de trajectoires et décrit la géométrie du composant à fabriquer.

- **Le découpage** : comme évoqué en 1.1, cette opération permet d'obtenir les courbes à partir desquelles les parcours d'outil vont être générés.
- **La génération de trajectoires** : cette étape convertit les courbes issues du découpage en coordonnées afin de générer les trajectoires de fabrication. C'est également lors de cette étape que de nombreux paramètres doivent être renseignés. Parmi ces derniers, nous pouvons distinguer : le sens du parcours, les types d'interpolation (linéaire, spline...), l'ordre d'exécution des parcours, la position des points de départ (sur le parcours), les stratégies de fabrication, mais également, les paramètres du procédé.
- **La simulation géométrique des trajectoires** : cette étape de simulation des trajectoires de fabrication a trois buts principaux :
 - Vérifier la faisabilité du parcours par la machine (limites d'axes), c'est-à-dire vérifier que les trajectoires sont incluses dans l'espace de travail de la machine.
 - Vérifier qu'aucune singularité (alignement d'axes) n'est atteinte lors de la fabrication. Dans le cas d'un robot sériel six axes par exemple, une infinité de possibilités existe pour atteindre un point. Pour éliminer ces phénomènes de singularité, la méthode consiste à imposer des priorités sur l'utilisation des axes machine ou limiter l'amplitude de certains axes rotatifs.
 - Vérifier l'absence de collisions avec les éléments présents au sein de l'environnement.
- **Le post processing** : cette étape se traduit par l'ajout d'une donnée supplémentaire à chaque point des trajectoires de fabrication afin de décrire de manière unique la position de l'organe terminal (ici, de la torche) résultant de l'étape de simulation. Il s'agit de la valeur de l'angle de rotation de l'outil sur son axe.
- **La fabrication** : c'est l'étape de mise en œuvre du procédé. Elle correspond à l'exécution des trajectoires de fabrication. La réussite de la fabrication repose donc sur le choix des différents paramètres lors des précédentes étapes.
- **Le contrôle** : cette étape de contrôle ou d'inspection valide ou non la conformité de la pièce. Les données de contrôle sont le plus souvent géométriques, mais peuvent être également liées à d'autres critères (état de surface par exemple).
- **Les optimisations** : En cas de non-conformité ou d'échec de la fabrication, des optimisations doivent être opérées. Les principaux leviers pour corriger la génération de trajectoires sont les paramètres du procédé WAAM et les stratégies de fabrication, mais aussi des modifications du modèle numérique et par conséquent du découpage.

1.3. Génération de trajectoires

La génération de trajectoires est une étape primordiale pour la fabrication d'un composant. À partir de la maquette numérique, la génération de trajectoires s'appuie sur différents paramètres préalablement établis : les stratégies de fabrication, les paramètres liés à la machine à commande

numérique et les paramètres liés au procédé WAAM. Il en résulte des trajectoires de fabrication qui incluent les parcours d'outil ainsi que tous les paramètres opératoires associés (Figure 31).

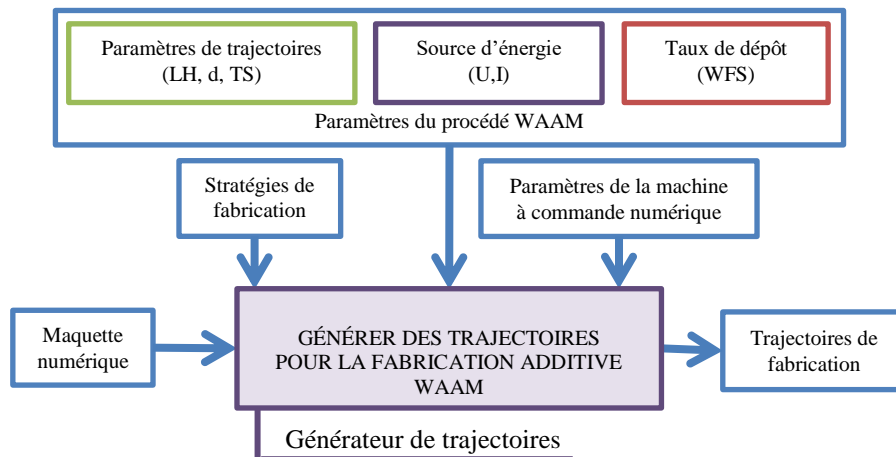


Figure 31 : SADT du générateur de trajectoires

Afin de choisir le type des trajectoires à générer, il est nécessaire d'analyser localement la géométrie du composant à fabriquer. Sur un même composant, nous pouvons distinguer différentes zones. Ces dernières peuvent être divisées en deux catégories :

- **1^{re} catégorie : Les zones pouvant être réalisées directement avec des murs mono cordon (sans remplissage), c'est-à-dire dont l'épaisseur de paroi est inférieure à la largeur d'un cordon :** pour la fabrication de murs uniquement verticaux, la génération de trajectoires 3 axes est suffisante. Dans les autres cas, il faut privilégier l'utilisation de trajectoires 5 axes afin de conserver des conditions optimales de dépôt (position de la torche par rapport au cordon précédent).
- **2^e catégorie : Les zones nécessitant un remplissage (pièce massive ou dont l'épaisseur de paroi est supérieure à la largeur d'un cordon) :** pour les zones en dépouille uniquement, les trajectoires 3 axes sont adaptées, car le dépôt des parcours de contournage s'appuie sur le remplissage de la couche précédente (comme sur un substrat). Au contraire, les zones en contre-dépouille nécessitent l'utilisation des trajectoires 5 axes pour la fabrication du contour. Le dépôt du remplissage est lui réalisé avec des trajectoires 3 axes.

En conclusion, la démarche de choix est résumée par la Figure 32 afin de déterminer quel type de trajectoires il faut générer pour la fabrication additive. En effet, cette démarche préalable est nécessaire, car selon le résultat de ces choix, le découpage peut être affecté (par exemple, l'épaisseur de couche peut être différente entre un composant monocordon et un composant en remplissage). Il y a donc trois types de trajectoires : 3 axes, 5 axes et remplissage. Pour les trajectoires de remplissage, l'orientation de l'outil est perpendiculaire au plan de coupe.

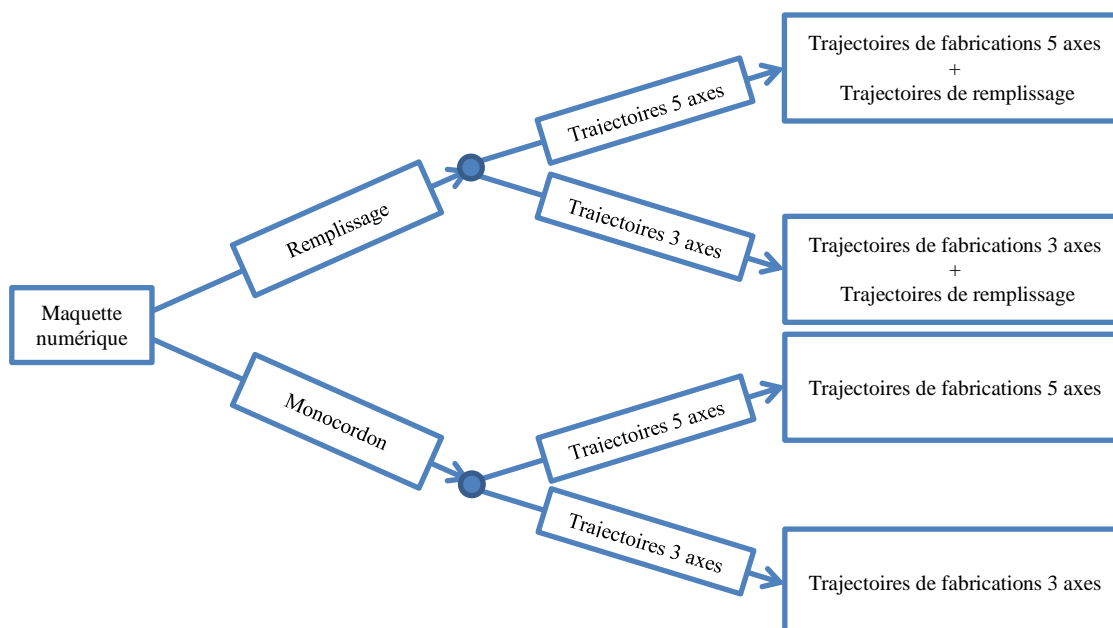


Figure 32 : Arbre de choix du type de trajectoires à générer

1.4. Identification des verrous liés à la génération de trajectoires pour le procédé WAAM

L'évolution des capacités du procédé pour fabriquer des géométries de plus en plus élaborées permet d'élargir son champ d'application. Afin de définir les domaines de fonctionnement et de trouver les limites éventuelles du procédé pour la fabrication de structures en alliage d'aluminium, nous avons proposé une pièce test (Figure 33) qui synthétise certaines géométries singulières présentes au sein des structures aéronautiques.

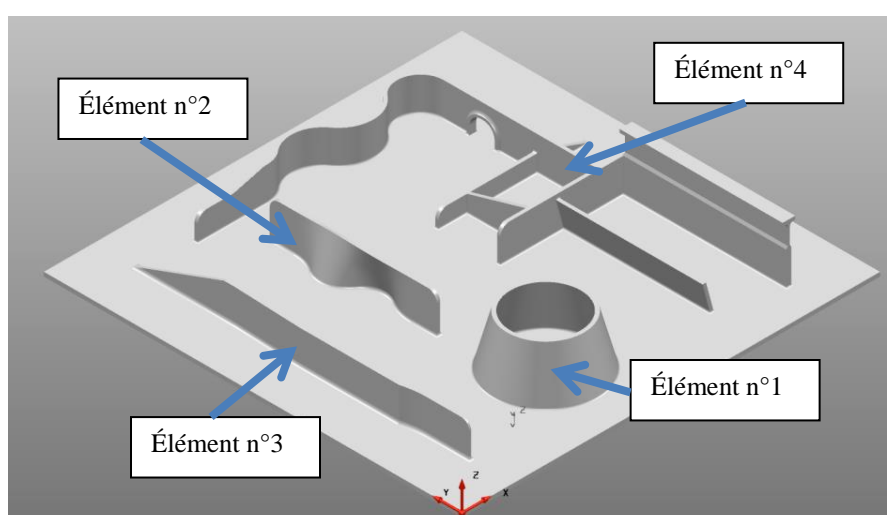


Figure 33 : Modèle numérique de la géométrie proposée

Cette pièce est constituée de composants, dont les géométries illustrent les différents verrous portant sur la génération de trajectoires. Parmi ces éléments, nous distinguons :

- **Élément n°1** : Un cône d'une inclinaison de 15° .
- **Élément n°2** : Un mur non plan.

- **Élément n°3** : Un mur de largeur variable.
- **Élément n°4** : Une structure constituée de plusieurs murs comprenant des intersections et hauteurs différentes. Il comprend également une zone en corniche (paroi horizontale).

À la fin de cette partie, un autre verrou lié à la direction privilégiée de fabrication sera traité.

1.4.1. Verrou n°1 : Génération de trajectoires avec orientation 5 axes de l'outil pour la fabrication WAAM

Dans le cas de composants en contre-dépouille, la principale difficulté est de générer une orientation adaptée de l'outil au cours de la fabrication. Il faut en effet que l'axe de l'outil soit constamment tangent à la surface de l'élément afin de conserver une position relative de l'outil par rapport à la pièce constante lors de la fabrication (Figure 34).

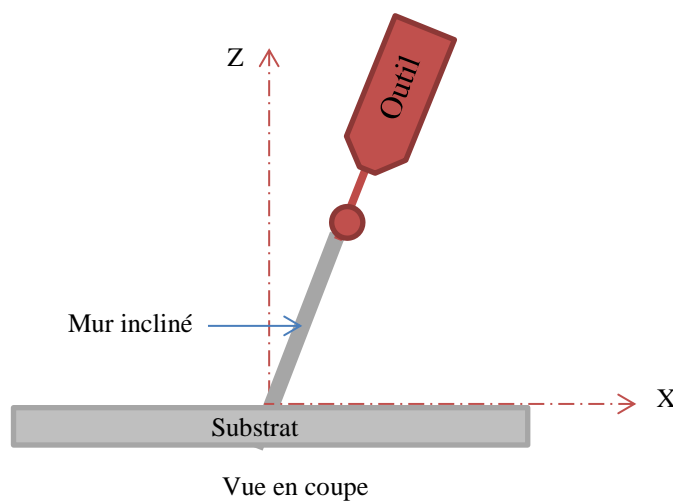
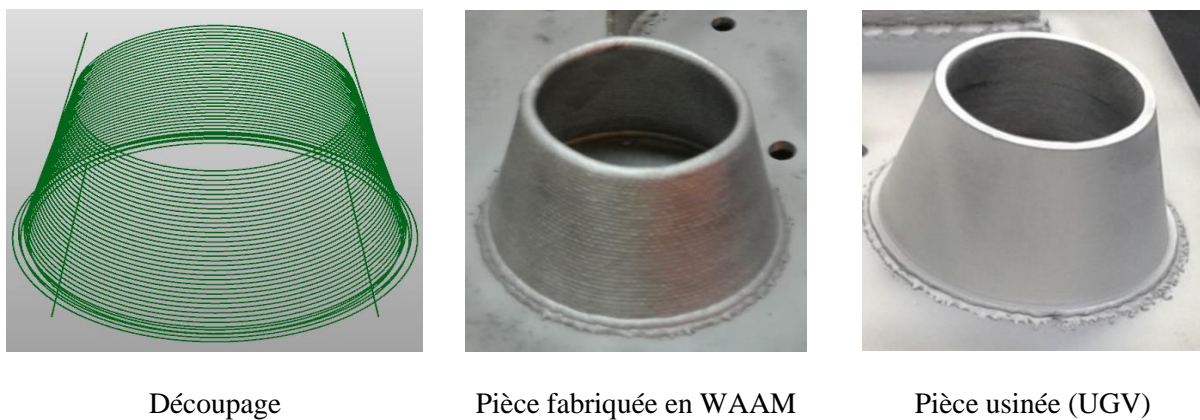
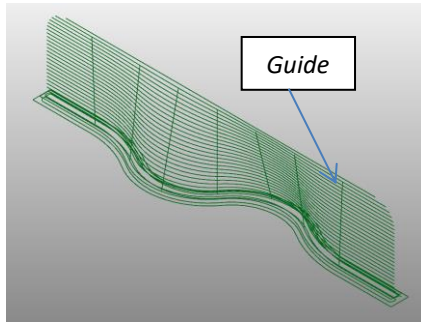


Figure 34 : Exemple de fabrication d'un mur incliné avec orientation 5 axes de l'outil

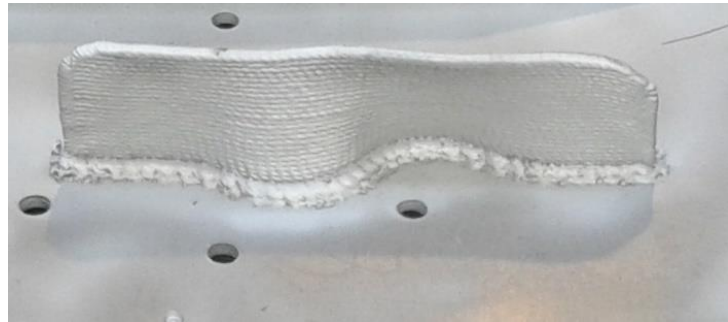
Pour générer des trajectoires 5 axes, il est nécessaire de générer les coordonnées des vecteurs d'orientations associés aux points du parcours d'outil à l'aide des guides. Cette méthode de génération de trajectoires outil est illustrée par les éléments n°1 et n°2 (Figure 35 et Figure 36).



**Figure 35 : Obtention d'un cône à 15° avec trajectoires 5 axes.
Paramètres : TS = 800 mm/min, WFS = 7 m/min, LH = 1.9 mm,
AlMg5 – 5356 Ø1.2 mm, I = 96 A, U = 9.8 V.**



Découpage



Pièce fabriquée en WAAM

Figure 36 : Mur à inclinaison variable : Découpage et pièce fabriquée en WAAM

**Paramètres : TS = 800 mm/min, WFS = 7 m/min, LH = 1.9 mm,
AlMg5 – 5356 Ø1.2 mm, I = 96 A, U = 9.8 V.**

L'illustration de la génération de trajectoires outil 5 axes sur ces deux composants permet également de mettre en avant deux conclusions importantes en ce qui concerne le paramétrage des trajectoires :

- **La fabrication sans dégagement de liaison :** la fabrication ne comporte qu'un seul démarrage et un seul arrêt d'arc. En d'autres termes, la pièce est fabriquée avec un seul cordon continu. Cette stratégie comporte plusieurs avantages : la surface de la pièce est homogène du fait de la régularité des conditions de dépôts. Le second avantage est la rapidité de fabrication. En effet, chaque arrêt-départ impose des temps morts inhérents au procédé qui, sur certaines pièces, peuvent devenir non négligeables par rapport au temps de dépôt. Le troisième avantage est l'absence d'instabilité créée par les arrêts-départs (formation de cavité et d'amas de matière). Cette stratégie est particulièrement adaptée aux composants comprenant uniquement des parcours fermés (Élément n°1 de la Figure 33).
- **L'alternance du sens de parcours entre chaque niveau :** Pour les composants avec des parcours ouverts, alterner le sens de parcours permet de compenser efficacement les défauts liés aux arrêts et départs de dépôt et ainsi obtenir des extrémités de murs homogènes. L'élément n°2 illustre l'effet de cette compensation.

1.4.2. Verrou n°2 : Gestion de l'interface remplissage - monocordon

D'une manière générale, les composants peuvent être classés selon trois catégories :

- **1^{re} catégorie : les pièces monocordons.** Cela correspond aux pièces composées de murs simples cordons (par exemple l'élément n°1 ou n°2). Dans ce cas, en régime établi avec des paramètres opératoires fixes, le paramètre nécessaire à la génération de trajectoires est uniquement l'épaisseur de couche.
- **2^e catégorie : les pièces massives (en remplissage).** Pour les composants de forte épaisseur (supérieure à la largeur d'un cordon simple), la génération de trajectoires de remplissage est nécessaire et requiert deux paramètres : l'épaisseur de couche et la distance inter-cordons.

D'un point de vue thermique, l'énergie apportée par l'arc électrique a trois objectifs : faire fondre le fil (objectif n°1) avec les couches inférieures (objectif n°2) et avec le cordon voisin (objectif n°3) alors que pour les éléments de 1^{re} catégorie, seuls les objectifs n°1 et n°2 sont recherchés. L'objectif n°3 consiste à obtenir un mouillage entre les cordons, c'est-à-dire une fusion entre deux cordons voisins.

- **3^e catégorie : les pièces incluant des éléments de première et deuxième catégorie.** Dans ce cas, au sein d'un même niveau, des zones de première et seconde catégorie peuvent se rejoindre. Le plus souvent, il s'agit de zones remplies d'une épaisseur comprise entre 2 et 3 fois la largeur d'un cordon unitaire ou de parcours monocordons comprenant une zone de recouvrement. Sur un même parcours, deux cordons sont proches et se recouvrent (Figure 37). Il y a donc une interférence entre deux régimes distincts et dont les paramètres liés aux trajectoires (LH) sont différents pour un même parcours : cela soulève donc un verrou. Ce phénomène peut nécessiter des modifications de la géométrie (DFAM) afin de simplifier et homogénéiser la pièce et assurer la réussite de la fabrication. Ainsi, un élément classé en 3^e catégorie peut, après modification de la géométrie, appartenir à la première ou seconde catégorie. S'il n'est pas possible d'apporter des modifications à la maquette numérique, une autre solution pourrait être d'adapter localement les paramètres opératoires.

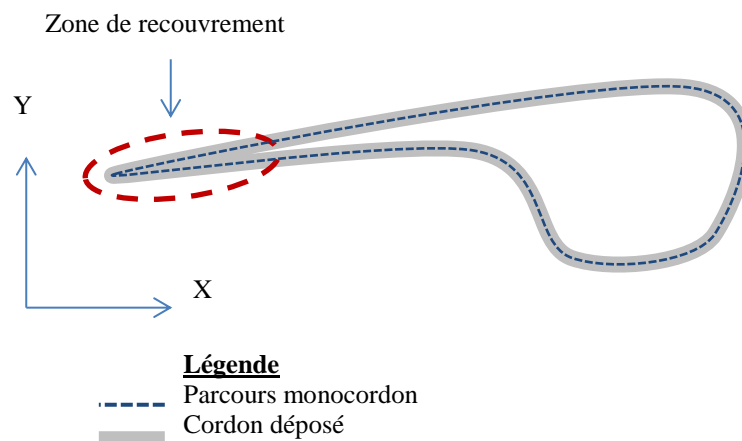


Figure 37 : Exemple de parcours de 3^e catégorie – Parcours monocordon avec zone de recouvrement

L'élément n°3 fait partie de cette troisième catégorie (Figure 38). Il comporte trois largeurs de parois différentes (dont une supérieure à la largeur d'un cordon).

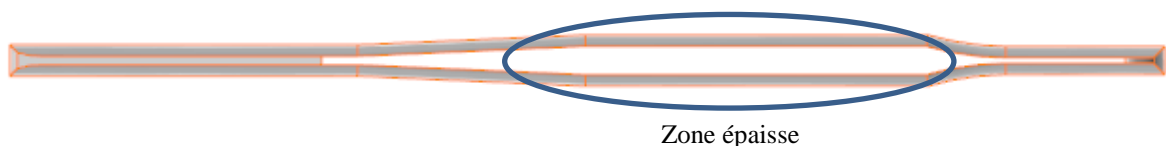


Figure 38 : Géométrie de l'élément n°3 – Vue de dessus

La zone centrale (plus large qu'un cordon simple) nécessite de déposer plusieurs cordons côte-à-côte, ce qui illustre la problématique du manque de mouillage. Ce phénomène dépend du matériau employé. Pour les alliages de titane, l'emploi d'une stratégie de remplissage zigzag pour la fabrication

est performant du fait de la bonne mouillabilité de ce matériau [55]. Les alliages d'aluminium ont par contre une mauvaise mouillabilité. Le choix de la stratégie de remplissage est donc primordial. Par exemple, l'utilisation d'une stratégie de remplissage par contours parallèles pour ce type de composant n'est pas adaptée (Figure 39). En effet, elle conduit à un temps important entre le dépôt de deux contours successifs, ce qui génère une différence de température entre passes élevée. Cela équivaut donc à construire des murs côte à côte sans fusion entre eux (l'objectif n°3 relatif aux trajectoires de remplissage n'est pas rempli).

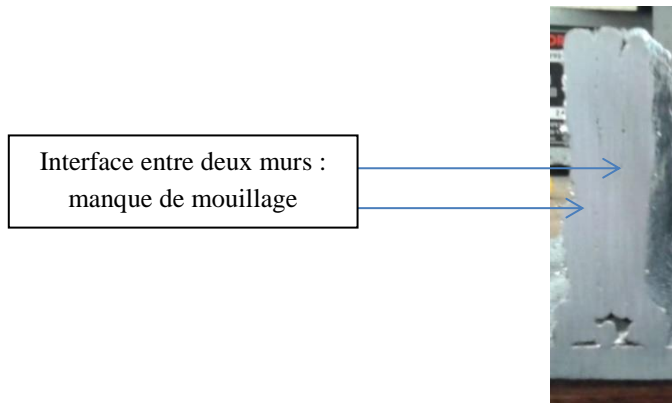


Figure 39 : Problème rencontré avec la stratégie de remplissage par contours parallèles
Paramètres : $d = 3.5$ mm, $TS = 800$ mm/min, $WFS = 7$ m/min,
AlMg5 – 5356 $\varnothing 1.2$ mm, $I = 96$ A, $U = 9.8$ V.

Pour résoudre ce verrou, la stratégie de remplissage par balayage zigzag est la plus efficace (Figure 40). Cela permet d'apporter suffisamment d'énergie pour faire fondre la matière et obtenir un remplissage homogène et de réduire la température entre passes. Différents paramètres de cette stratégie, notamment la variation de l'angle du balayage entre les couches, seront plus largement étudiés et optimisés dans le chapitre 4.

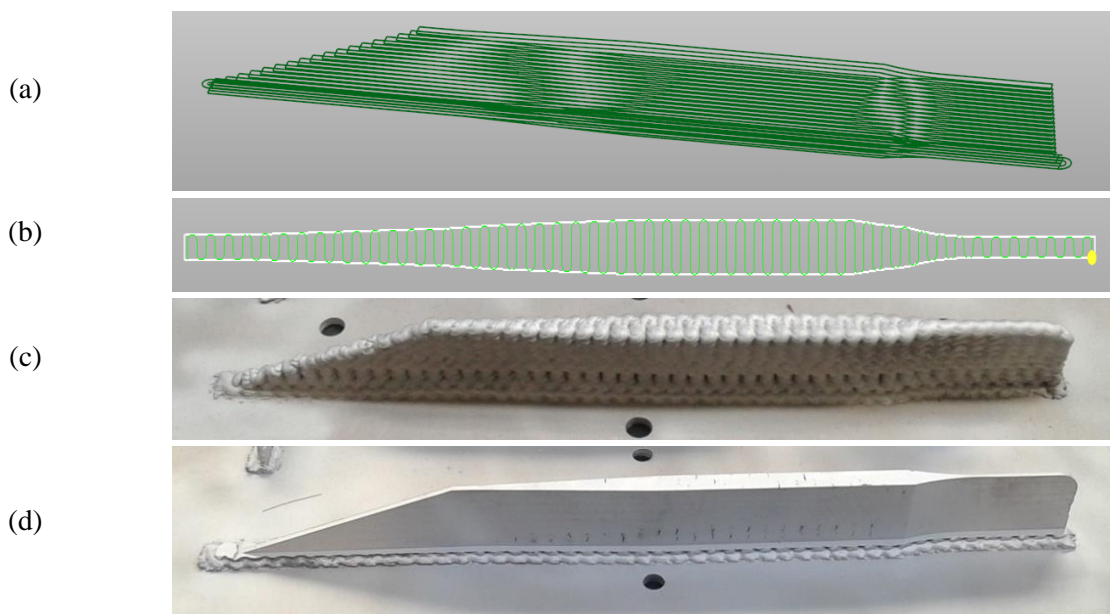


Figure 40 : Fabrication de l'élément n°3
(a) Découpage, (b) parcours de remplissage, (c) pièce fabriquée en WAAM, (d) usinée
Paramètres : $d = 3.5$ mm, $TS = 800$ mm/min, $WFS = 7$ m/min,
AlMg5 – 5356 $\varnothing 1.2$ mm, $I = 96$ A, $U = 9.8$ V.

1.4.3. Verrou n°3 : Fabrication de parois horizontales (dépôt en corniche)

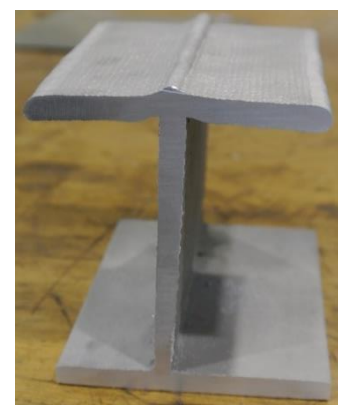
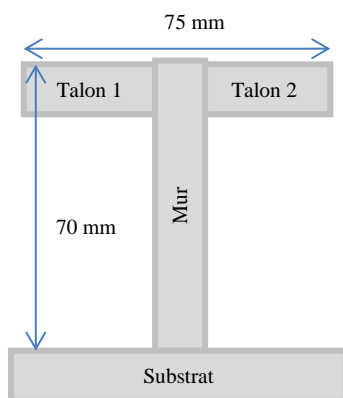
La fabrication de parois horizontales constitue un verrou, car elle nécessite de maîtriser l'effet de la gravité sur le bain de fusion lors du dépôt. Nous avons choisi de ne pas utiliser de supports pour la fabrication de ces parois. La modification du posage est possible (pour s'affranchir de l'effet de la gravité), mais elle n'est pas généralisable à tous les cas de figure (par exemple les pièces de très grandes dimensions) et ne résout donc que partiellement cette problématique.

La méthode de résolution proposée ici consiste à utiliser les règles issues des pratiques de soudage en corniche : la torche doit être positionnée avec un angle d'environ 20° vers le haut par rapport à l'horizontale (Figure 41). En cas de coulure, il est conseillé de réduire la vitesse d'avance et la vitesse de dévidage du fil tout en conservant un rapport WFS/TS constant [7]. L'application de ces règles permet de fabriquer des parois horizontales (Figure 41).



Figure 41 : Position de la torche pour la fabrication de murs horizontaux

La capacité du procédé a été démontrée (Figure 42) pour la fabrication de parois horizontales sans support. La fabrication des talons est gérée séparément comme deux murs distincts (talon 1 puis talon 2). Les conditions de dépôt mises en œuvre sont généralisables à la fabrication de parois horizontales en alliage d'aluminium (5356 - AlMg5). Celles-ci sont intéressantes pour obtenir d'une part de bonnes caractéristiques de raidissement contre le flambage par excentration de la matière (augmentation du moment quadratique), mais aussi une liberté de conception avec, par exemple, la possibilité de faire varier la hauteur du mur et la largeur des talons en fonction de la contrainte subie localement par le composant.



a. Dimensions

b. Pièce fabriquée

c. Coupe de la géométrie

Figure 42 : Fabrication de géométrie en "T" en WAAM avec trajectoires 5 axes

Paramètres : TS = 800 mm/min WFS = 7 m/min LH = 1.9 mm

AlMg5 – 5356 Ø1.2 mm, I = 96 A, U = 9.8 V.

1.4.4. Verrou n°4 : Intersections et jonctions de murs monocordons

Dans le cas des parois monocordons, la gestion des intersections et jonctions de murs soulève une problématique liée à la génération de trajectoires pour le procédé WAAM. En effet, sur la Figure 43, la fabrication d'un croisement direct de deux murs peut conduire à la formation d'un défaut au niveau du croisement : il y a apparition d'un surplus de matière au niveau du croisement et la formation d'une cavité juste après celui-ci [56]. Ceux-ci se produisent lorsque le sens de parcours entre deux couches n'est pas alterné.

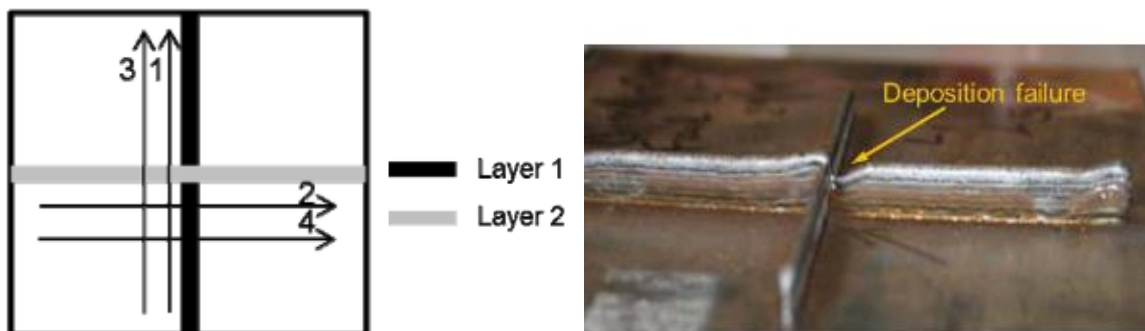


Figure 43 : Stratégie employée pour une intersection de murs sans inversion du sens de parcours entre chaque couche [56]

Des travaux [56] ont conclu qu'alterner le sens de parcours entre chaque niveau était une première solution permettant d'éviter la formation d'une cavité (Figure 44). Cela permet de compenser le défaut couche après couche. Cependant, une problématique persiste avec cette solution, car elle génère un pic au niveau du croisement dû à l'apport de matière doublé au niveau de l'intersection des deux murs. De plus, cet effet s'accroît avec l'accroissement de la hauteur de la pièce.

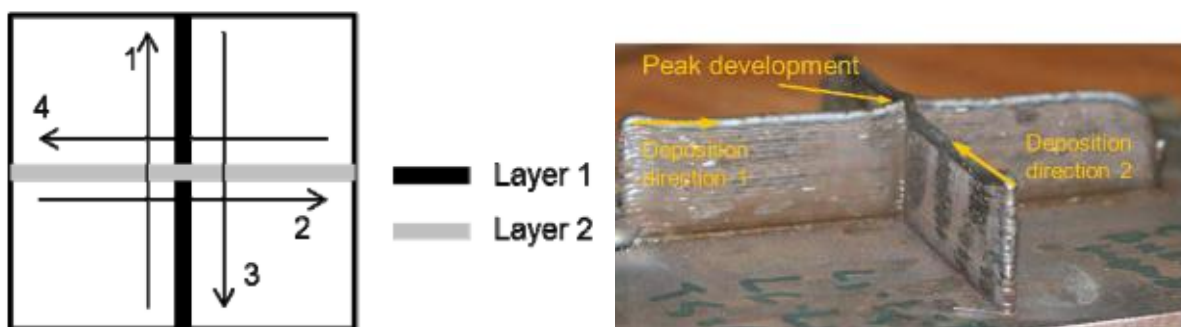


Figure 44 : Stratégie employée pour une intersection de murs avec inversion du sens de parcours entre chaque couche [56]

Une autre stratégie a également été proposée. Dans ce cas, les trajectoires ne sont plus rectilignes mais s'appuient sur des parcours avec un angle droit (Figure 45). La cavité n'est pas formée mais il existe toujours un amas de matière au centre. De plus, la matière déposée au niveau de l'intersection comporte des défauts (trous, manque de matière...) [56].

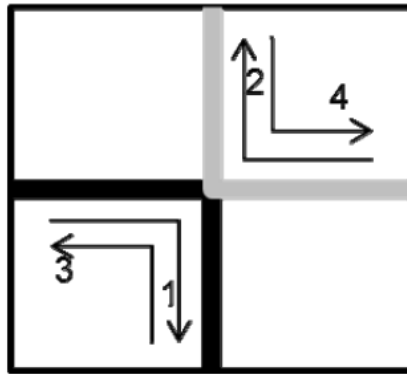
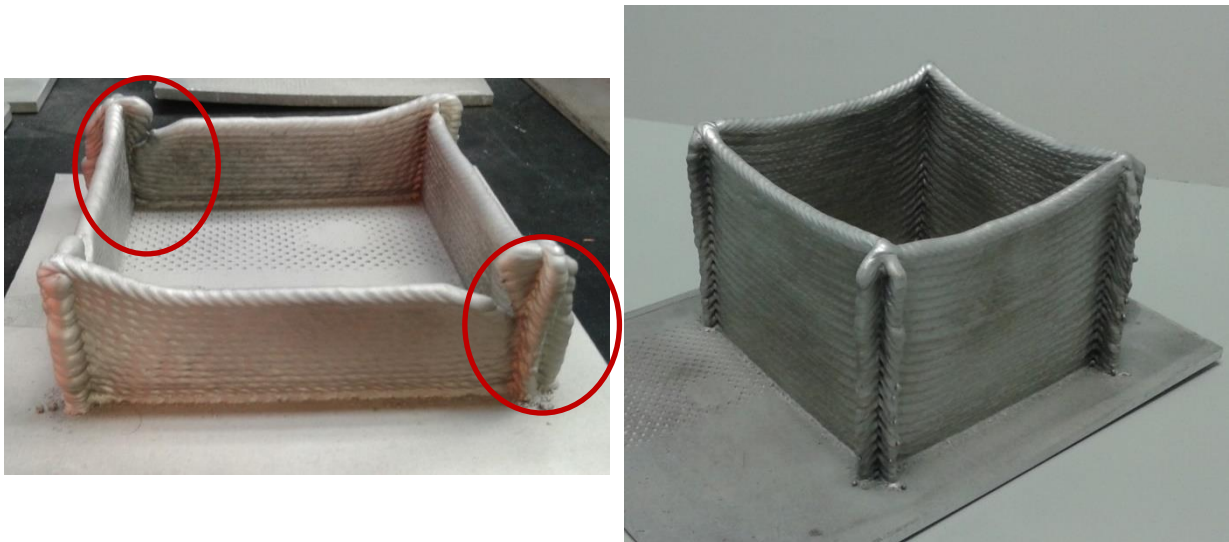


Figure 45 : Stratégie avec parcours à angles droits [56]

Ces approches appliquées aux alliages de titane et d'acier ne résolvent qu'en partie la problématique puisqu'il y a toujours la présence d'un double dépôt de matière au niveau de l'intersection.

Dans un premier temps, nous avons appliqué la stratégie de croisement direct avec et sans alternance de parcours à un alliage d'aluminium (Al Mg 5 – 5356) et nous constatons le même phénomène (Figure 46).

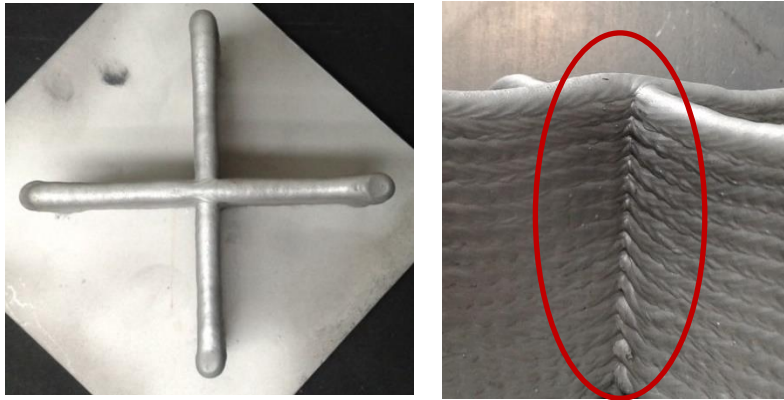


a. Essai de jonction sans alternance du sens de parcours (essai stoppé)

b. Essai de jonction avec alternance du sens de parcours (essai terminé)

Figure 46 : Essais menés sur un alliage d'aluminium en croisement direct avec et sans alternance du sens de parcours en s'appuyant sur la méthode proposée dans [56]

**Paramètres : TS = 800 mm/min WFS = 7 m/min LH = 1.9 mm,
AlMg5 – 5356 Ø1.2 mm, I = 96 A, U = 9.8 V.**



a. Pièce fabriquée

b. Défaut constaté

Figure 47 : Essais de croisement direct de deux murs (4 voies) avec alternance du sens de parcours en s'appuyant sur la méthode proposée dans [56]

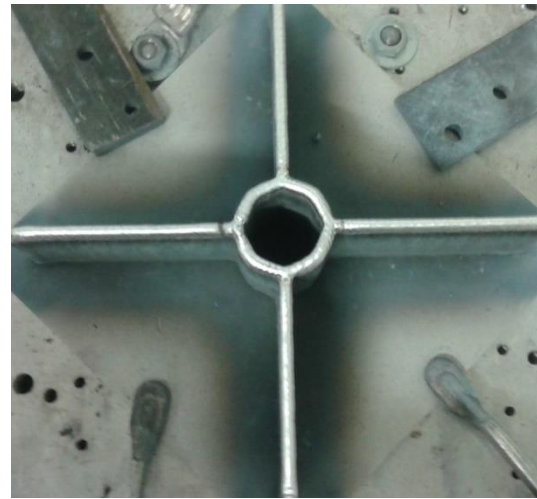
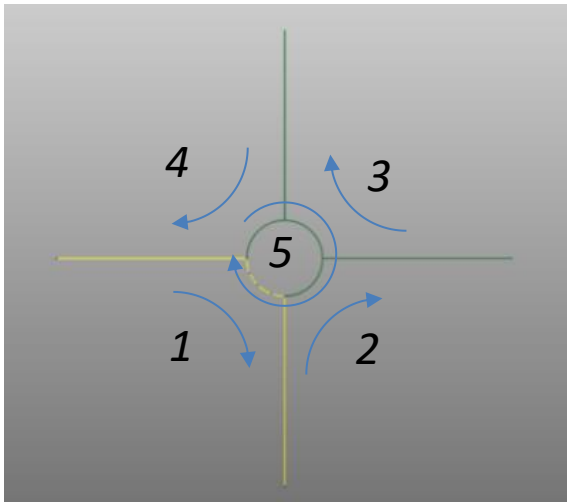
**Paramètres : TS = 800 mm/min WFS = 7 m/min LH = 1.9 mm,
AlMg5 – 5356 Ø1.2 mm, I = 96 A, U = 9.8 V.**

Même si la méthode de croisement direct avec alternance du sens de parcours employée ici permet de réaliser des jonctions et des intersections (Figure 47), elle ne résout que partiellement le verrou, car le double dépôt au centre est toujours présent. Parmi les effets négatifs de cette solution, nous distinguons :

- L'ampleur du défaut est liée à la hauteur du composant ;
- Il peut entraîner une collision avec l'effecteur ;
- Dans le cas d'intersections multiples (à 5 voies et plus), ce défaut serait amplifié ;
- Les conditions de dépôt au centre sont instables ;
- L'état de surface au niveau de l'intersection est dégradé ;
- La géométrie n'est pas adaptée au parachèvement (car il n'y a pas de rayon de raccordement).

Une autre méthode de résolution est donc proposée afin de résoudre complètement le verrou lié aux intersections de murs, qui équivaut à trouver des solutions pour éliminer le double dépôt central. Les contraintes liées au procédé ont été prises en compte afin de proposer une méthode DFAM (Design For Additive Manufacturing) et donc une nouvelle méthode de conception des intersections. Cette dernière consiste à déporter la zone de croisement par une géométrie centrale appelée rondpoint.

A titre d'illustration, nous proposons d'appliquer cette méthode sur une intersection à quatre voies (2 murs). La Figure 48 a. représente les parcours d'outil à effectuer. Sur chaque mur (parcours 1, 2, 3 et 4), deux cordons ont été déposés, alors que sur le rondpoint, seul un a été déposé. Pour compenser cette différence, il suffit de parcourir la géométrie centrale (parcours 5) une fois de plus. Un total de cinq parcours est donc nécessaire pour fabriquer deux niveaux.



a. Parcours générés

b. Pièce fabriquée

Figure 48 : Intersection de type rondpoint
Paramètres : TS = 800 mm/min WFS = 7 m/min LH = 1.9 mm
AlMg5 – 5356 Ø1.2 mm, I = 96 A, U = 9.8 V.

Cette méthode présente plusieurs avantages :

- L'homogénéité de croissance du composant ;
- La stabilité des conditions de dépôt ;
- La gestion de tous types d'intersections, peu importe le nombre de voies.

Cependant, elle nécessite de reconcevoir l'ensemble des intersections d'une pièce pour tenir compte des capacités du procédé (Design for Additive Manufacturing).

La méthodologie de croisement peut donc être résumée par la Figure 49 qui reprend le principe sur un exemple d'intersection de deux murs (4 voies) et le généralise aux autres intersections (3 voies, 5 voies...).

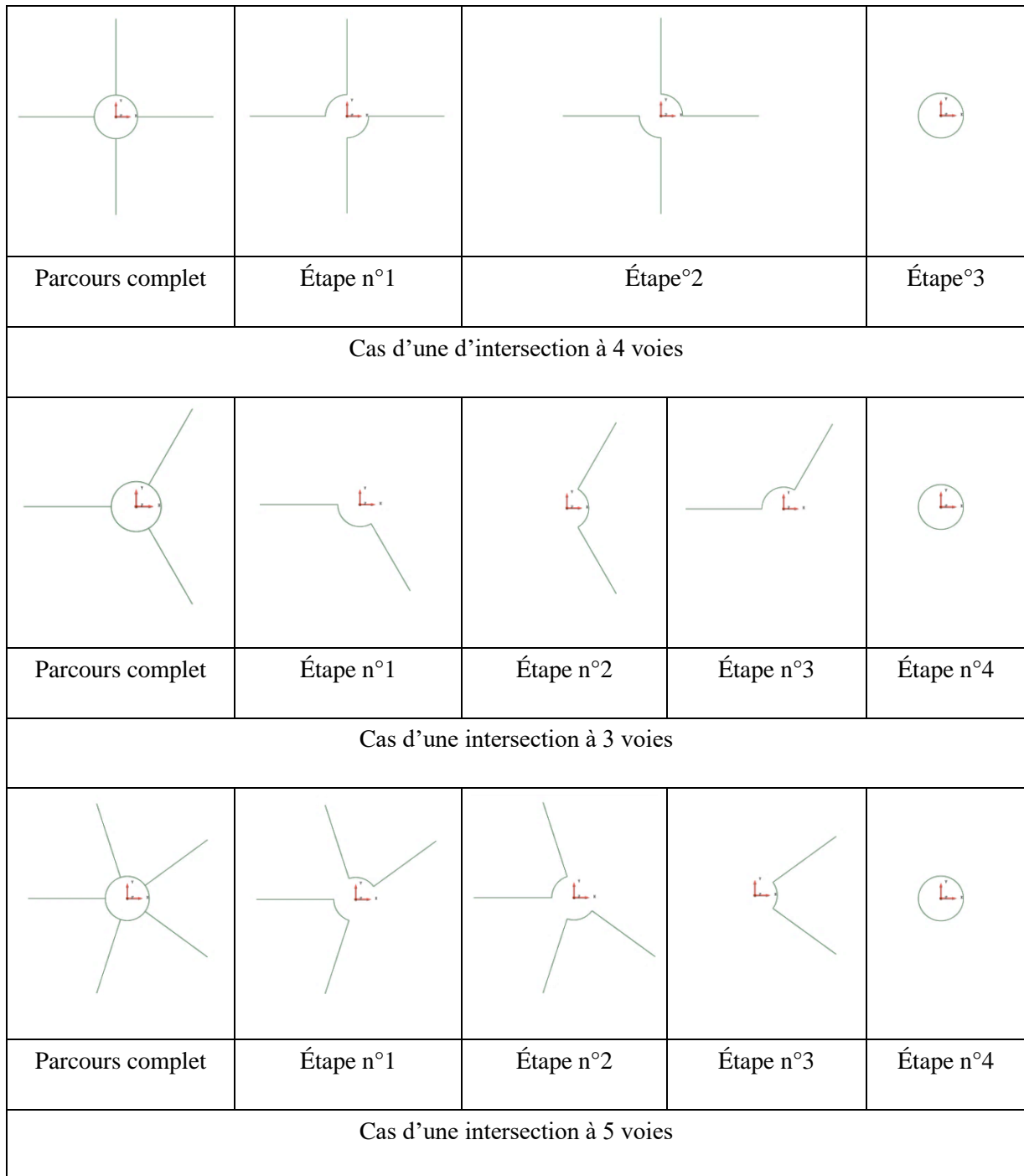


Figure 49 : Méthodologie de gestions des jonctions/intersections : Principe sur une intersection à 4 voies et généralisation sur des intersections à 3 et 5 voies.

1.4.5. Verrou n°5 : Choix de la direction privilégiée

Certaines pièces peuvent présenter une ou plusieurs directions privilégiées. Par exemple, pour un composant axisymétrique, cette direction correspond à l'axe de révolution de celui-ci. D'autre part, on définit la direction de croissance comme étant la normale au plan de découpage. Sur la Figure 50, plusieurs directions de croissance sont envisagées pour la fabrication d'un composant présentant une direction privilégiée.

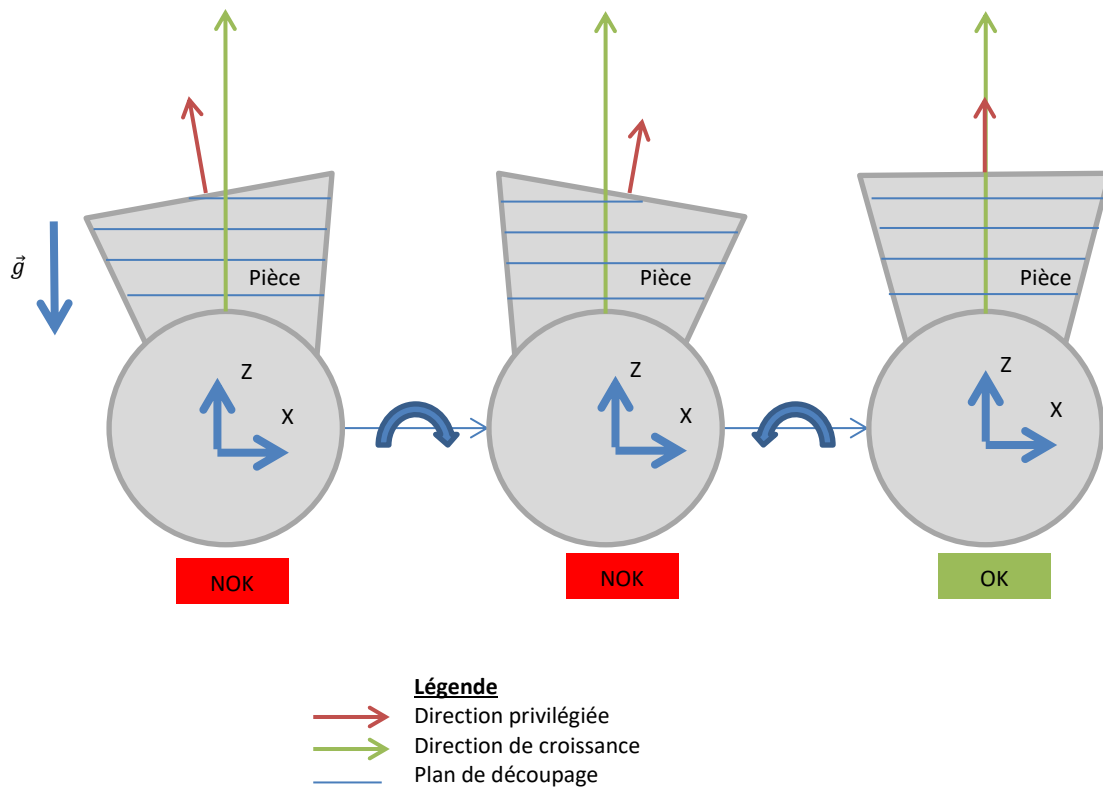


Figure 50 : Illustration de la problématique de choix de direction de croissance

Dans le cas où la direction de croissance n'est pas confondue avec la direction privilégiée, cela peut engendrer un défaut asymétrique lié à la variation de l'effet de la gravité sur le composant qui entraîne un écoulement de la matière. En conséquence, la couche déposée n'est pas parallèle au plan de coupe, cela se traduit par des conditions de dépôt variables en fonction de la position de l'outil par rapport à la pièce. De plus, ce phénomène s'amplifie avec le nombre de couches, jusqu'à rendre le procédé inopérant.

En conclusion, si un composant présente une direction privilégiée, il faut choisir une direction de croissance confondue avec la direction privilégiée. Dans le cas où cette direction privilégiée n'est pas identifiée, le choix de la direction de croissance constitue donc un verrou. La méthode de résolution consiste à orienter le modèle numérique du composant par rapport à la direction de croissance en cherchant à minimiser l'angle de contre dépouille. Cela permet d'homogénéiser l'effet de la gravité lors de la fabrication et éviter l'apparition de défauts.

1.4.6. Verrou n°6 : Parachèvement après fabrication additive WAAM

La plupart des procédés de fabrication additive ne constituent qu'une étape dans la gamme de fabrication d'une pièce fonctionnelle. En effet, bien souvent, un parachèvement de la pièce est nécessaire afin de respecter les contraintes du cahier des charges.

L'opération de fabrication additive apportant de l'énergie sous forme de chaleur jusqu'à atteindre le point de fusion du matériau déposé, elle engendre des déformations (gradient thermique sur la pièce) et des contraintes résiduelles sur la pièce fabriquée. Ces mécanismes thermiques inhérents à la fabrication additive (mais qui peuvent être tout ou en partie corrigés par le monitoring du procédé

par exemple) entraînent des écarts géométriques entre le modèle réel et la maquette numérique de la pièce. Si ces écarts sont inférieurs à la surépaisseur prévue au moment de la fabrication du composant, l'opération d'usinage peut être menée à bien et basée sur le modèle final du composant. À l'inverse, si ces écarts sont supérieurs à la surépaisseur et que la fabrication a engendré des déformations trop importantes, la pièce obtenue n'est pas conforme à la maquette numérique. Si les exigences du cahier des charges sont liées à l'état de surface de la pièce (et non à sa forme exacte), l'opération d'usinage ne peut donc pas s'appuyer sur ce modèle car il n'est pas représentatif de la géométrie de la pièce fabriquée réellement. Dans ce cas, plusieurs problématiques sont soulevées :

- 1) L'acquisition du modèle réel ;
- 2) Le traitement du modèle précédemment acquis ;
- 3) La génération de trajectoires de parachèvement associées à ce modèle ;
- 4) Le repositionnement du modèle numérique par rapport au posage de la pièce à prévoir.

Pour acquérir le modèle, la solution usuelle employée est le scan numérique de la pièce après fabrication. Elle permet d'obtenir un nuage de points représentatif de la surface réelle, c'est-à-dire avec l'état de surface brut de fabrication WAAM (problématique n°1). La génération de trajectoires d'usinage directement sur ce modèle n'est pas pertinente, car elle serait basée sur une surface dégradée. C'est pourquoi un traitement est nécessaire (problématique n°2). Il consiste à lisser et filtrer le maillage, pour que l'opération d'usinage permette d'atteindre l'état de surface souhaité sans prendre en compte l'ondulation générée par les cordons. Il existe donc un écart entre la surface réelle et la surface lissée qui doit être inférieur à la surépaisseur prévue lors de la fabrication du composant. À partir de ce deuxième modèle, la génération de trajectoires d'usinage peut être menée à bien (problématique n°3). Cependant, il convient au préalable d'effectuer un repositionnement du modèle numérique (obtenue par scan) par rapport au posage de la pièce réelle (problématique n°4). Pour effectuer ce dernier, il est nécessaire de s'appuyer sur des éléments géométriques (plans, cylindre, arrête...) scannés au préalable et qui permettent de dégauchir le modèle numérique lissé par rapport à l'origine pièce choisie.

1.5. Conclusion sur la méthodologie de génération de trajectoires

Une méthodologie de génération de trajectoires pour la fabrication WAAM a été proposée. Cependant, la mise en évidence des capacités du procédé sur différentes géométries a soulevé plusieurs verrous successivement résolus. Plusieurs règles à mettre en application par la fabrication de composants fonctionnels en WAAM découlent des différents verrous traités. Ces règles sont dépendantes des spécificités du composant étudié.

Règle n°1 : Privilégier l'utilisation des trajectoires 5 axes pour les composants en contre-dépouille (Verrou n°1).

Règle n°2 : Dans le cas de parcours uniquement fermés, privilégier la fabrication sans arrêts-départs entre chaque couche permet d'améliorer l'état de surface et réduire le temps de fabrication (Élément n°1).

Règle n°3 : Dans le cas de parcours ouverts, alterner le sens de parcours permet de compenser les défauts générés par les arrêts et les départs de cordons (Élément n°2).

Règle n°4 : Pour assurer un remplissage homogène, il est nécessaire de conserver une température entre-passes faible pour garantir un mouillage du matériau et éviter les manques de matière (Verrou n°2).

Règle n°5 : Pour la fabrication de parois horizontales, appliquer un angle de 20° vers le haut pour la torche permet de déposer en corniche (Verrou n°3).

Règle n°6 : En cas de jonctions ou d'intersections de murs, utiliser une géométrie DFAM permet d'éliminer le phénomène de double dépôt au niveau de l'intersection (Verrou n°4).

Règle n°7 : En cas de défaut asymétrique constaté sur une géométrie, un ajustement de la direction de croissance peut être nécessaire afin que cette dernière soit confondue avec la direction privilégiée du composant (Verrou n°5).

Règle n°8 : L'opération de parachèvement, dans le but d'améliorer l'état de surface, peut nécessiter une génération de trajectoires d'usinage basée sur la géométrie réelle de la pièce après traitement.

1.6. Application des méthodes de résolution

Une illustration des méthodes de résolution présentées dans la section 1.4 est proposée avec la fabrication d'une hélice. Cette application traite de trois verrous :

- Verrou n°2 : Gestion de l'interface remplissage - monocordon ;
- Verrou n°5 : Choix de la direction privilégiée ;
- Verrou n°6 : Parachèvement après fabrication additive WAAM.

Comme évoqué en 1.4, ce composant appartient à la 3^{ème} catégorie (Verrou n°2 : Gestion de l'interface remplissage - monocordon). En effet, la géométrie de cette pièce combine des zones (corps de pale) en monocordon et de zones (bord de fuite et bord d'attaque) où les cordons se recouvrent : assimilables à des zones remplis.

La méthode de résolution de ce verrou consiste à apporter des modifications à la maquette numérique (DFAM) afin d'éliminer les zones de recouvrement et ainsi construire le composant uniquement en mur monocordon (élément de 1^{ère} catégorie). Cette intervention sur la géométrie est sans conséquence car un parachèvement est nécessaire après fabrication sur un tel composant. La prise en compte des contraintes du procédé lors de la phase de design permet donc de reprendre la géométrie. La Figure 42 reprend la méthodologie employée pour mener à bien la réalisation du composant. Elle est divisée en plusieurs étapes :

- **L'acquisition du modèle réel :** la pièce a été scannée afin d'obtenir un nuage de points de la surface extérieure du composant.
- **La reconstruction CAO :** à partir du nuage de points acquis, un modèle numérique surfacique a été redessiné. La méthode de cette reconstruction se divise en trois étapes. Premièrement, le modèle a été découpé par des plans distants de 2 mm (valeurs proches d'épaisseur de couche) afin d'obtenir des courbes. En second lieu, ces courbes ont été refermées, lissées et renumérotées (changement du nombre de points). Enfin, une surface a été reconstruite à partir de ces courbes.

- **Le découpage et la génération de trajectoires** : cette étape a été le levier sur lequel des actions correctives ont été menées.
- **La mise au point** : l'observation des essais de réalisation a permis de mettre en œuvre des actions correctives afin de résoudre les verrous mis en évidence.
- **Les optimisations** : elles se divisent en deux étapes, le choix de la direction privilégiée qui n'est pas évidente sur ce type de composant. Pour cela, la méthode proposée en section 1.4.5 a été appliquée pour réaligner la direction de croissance afin qu'elle soit confondue avec la direction privilégiée (Verrou n°5 : Choix de la direction privilégiée). Des modifications ont été apportées au modèle numérique afin d'éliminer les zones de recouvrement (DFAM)
- **La fabrication** : les actions correctives menées ont permis de réaliser le composant.

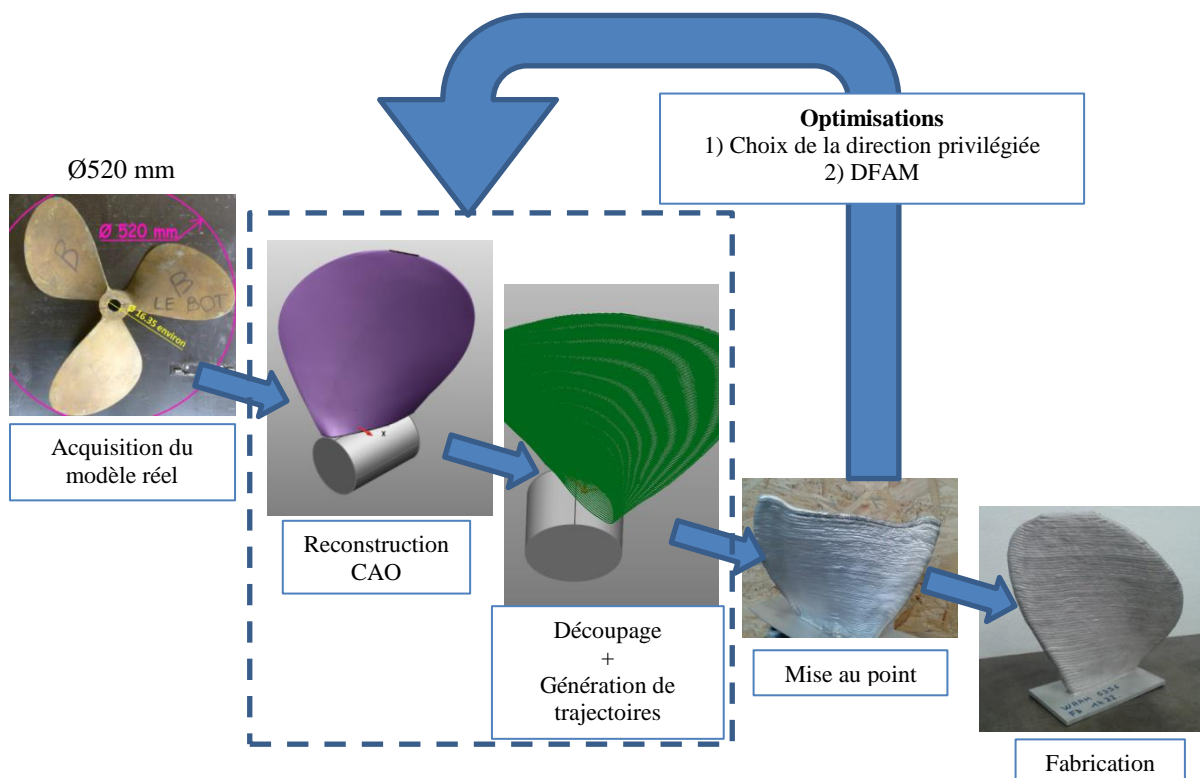
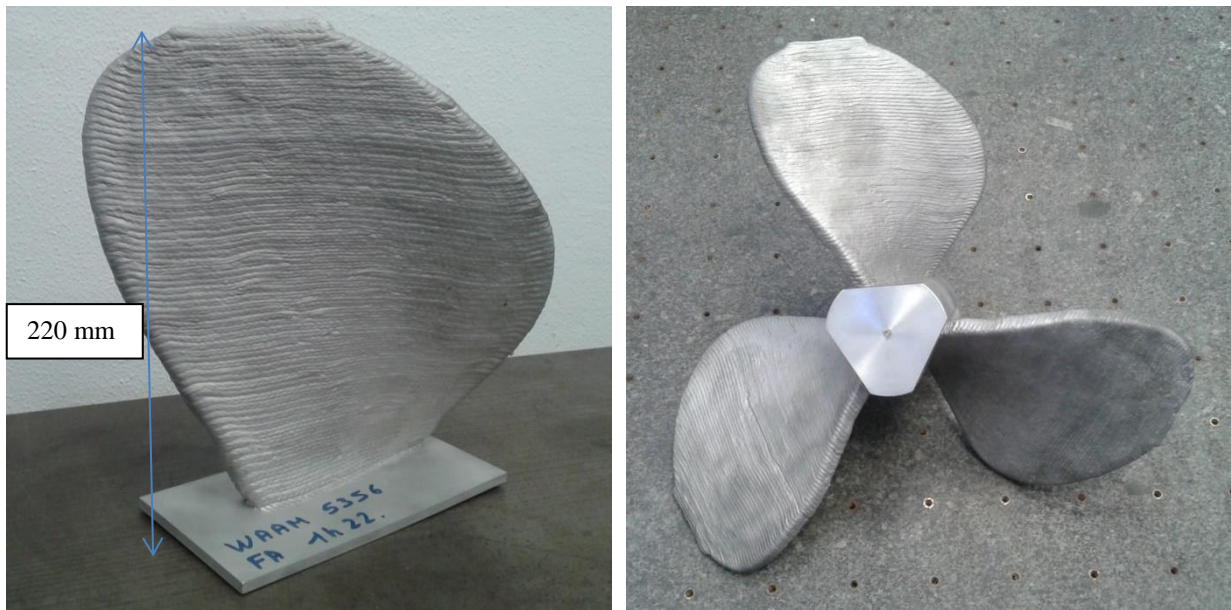


Figure 51 : Étapes de réalisation d'une pale d'hélice

Après la mise en place d'optimisations (DFAM et choix de la direction privilégiée), il a été possible de mener à bien la réalisation d'une pale ainsi que d'une hélice complète (Figure 52). L'hélice a été fabriquée sur un moyeu utilisé comme support.



a. Pale d'hélice

b. Hélice complète

Figure 52 : Pale et hélice fabriquées avec le procédé WAAM
Paramètres : TS = 800 mm/min WFS = 7 m/min LH = 1.9 mm,
AlMg5 – 5356 Ø1.2 mm, I = 96 A, U = 9.8 V.

Pour illustrer les problématiques liées au parachèvement d'éléments fabriqués en WAAM (Verrou n°6 : Parachèvement après fabrication additive WAAM) et mettre en évidence les problématiques liées aux pièces de grandes dimensions, une application a été menée sur ce même type composant, mais à une échelle plus élevée (diamètre nominal de 1050 mm). Pour cette application, un critère important est l'état de surface des pales qui nécessite un parachèvement afin de respecter le cahier des charges et aussi permet d'améliorer les performances des hélices [57].

L'opération de scan a mis en évidence des erreurs importantes entre la maquette numérique et le modèle réel ne permettant pas de générer les parcours d'usinages directement sur le modèle théorique. Après filtrage et lissage du nuage de points (Figure 53), la génération des trajectoires d'usinage a été réalisée.

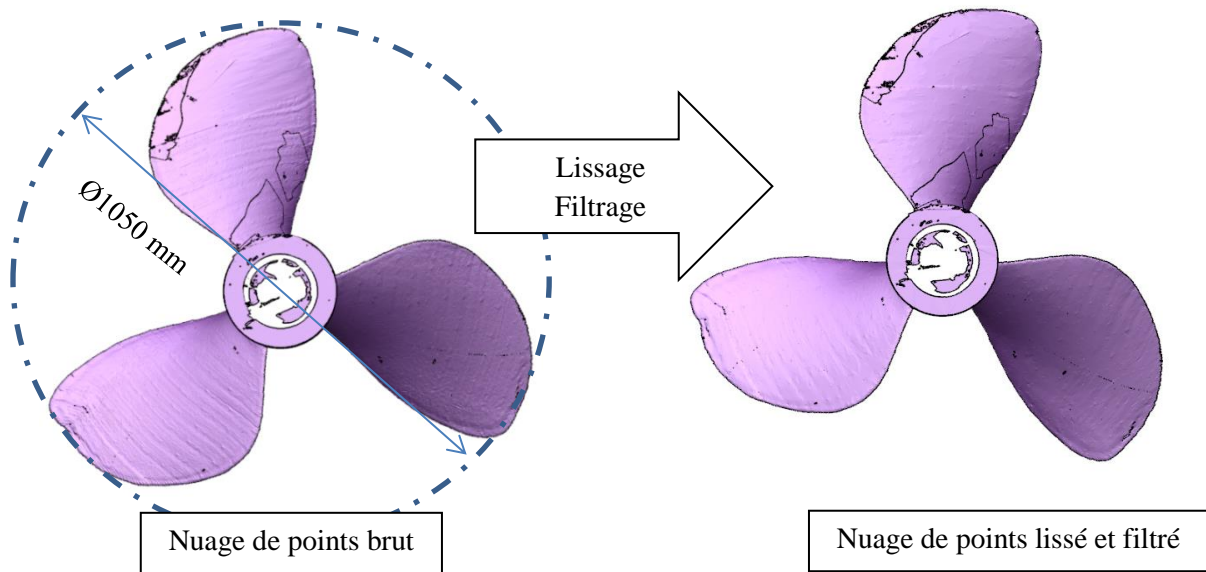


Figure 53 : Nuage de points avant et après filtrage

L'opération de parachèvement (Figure 54) a permis d'améliorer l'état de surface pour répondre aux critères du cahier des charges. Cela démontre la pertinence du procédé WAAM qui, combiné au parachèvement, permet la réalisation de composant fonctionnel répondant au critère d'état de surface.



Figure 54 : Hélice après opération de parachèvement

2. Méthodologies de découpage pour les composants à angle de contre dépouille élevé

Cette section propose des méthodologies de découpe et de génération de trajectoires pour des pièces dont l'angle de dépouille est élevé (supérieur à 15°). Le but est de confronter ces méthodologies pour obtenir ce type de pièce avec le procédé WAAM afin de choisir la plus adaptée à la réalisation.

La géométrie proposée (Figure 55) pour l'application et la comparaison des différentes méthodologies est un coude à base cylindrique de rayon intérieur (appelé R_{int}) de 100 mm, de rayon extérieur (appelé R_{ext}) de 200 mm. Cette géométrie ayant un angle de contre-dépouille allant jusqu'à 90° va permettre de mettre en avant la capacité du procédé au regard du découpage choisi.

L'épaisseur de paroi n'est pas prise en compte dans cet exemple, la maquette numérique est basée sur une surface à partir de laquelle seront générés les parcours d'outil. Le centre théorique du cordon est donc sur cette surface.

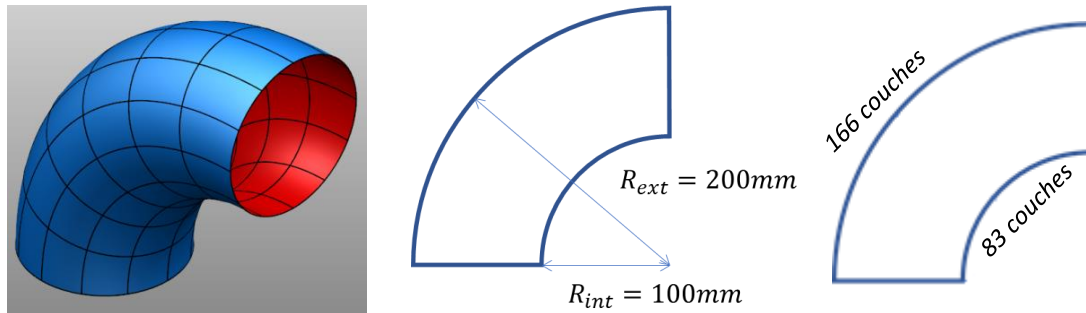


Figure 55: Géométrie du coude et dimensions associées

En supposant une épaisseur de couche constante fixée à $LH = 1.9$ mm (valeur déterminée expérimentalement et égale à la distance entre deux couches), il est possible de calculer théoriquement le nombre de couches à déposer sur les rayons intérieurs (noté $N_{LH\ int}$) et extérieurs (noté $N_{LH\ ext}$) de cet exemple (Eq.2) à partir des longueurs curvilignes L_{int} et L_{ext} (Eq.1) :

$$L_{ext} = \frac{\pi \cdot R_{ext}}{2} \approx 314 \text{ mm} \text{ et } L_{int} = \frac{\pi \cdot R_{int}}{2} \approx 157 \text{ mm} \quad (\text{Eq.1})$$

$$N_{LH\ ext} = \frac{L_{ext}}{LH} \approx 166 \text{ couches} \text{ et } N_{LH\ int} = \frac{L_{int}}{LH} \approx 83 \text{ couches} \quad (\text{Eq.2})$$

$N_{LH\ ext}$ étant le double de $N_{LH\ int}$, l'utilisation de contours fermés uniquement entrainerait un manque de matière. Il est donc nécessaire d'intercaler des contours ouverts afin de compenser ce manque.

2.1. Découpage par plans parallèles

Dans le cas d'un découpage basé sur l'intersection de plans parallèles (chaque plan est distant de l'épaisseur de couche LH) et la maquette numérique, les courbes obtenues sur cet exemple ne sont

pas utilisables pour générer les trajectoires (Figure 56). En effet, les nombres de couches obtenus ($N_{LHext}^{parallèle} \approx 106$ couches et $N_{LHint}^{parallèle} \approx 53$ couches) sont très inférieurs aux valeurs déterminées dans l'équation (Eq.2), il y a donc un manque de cordons.

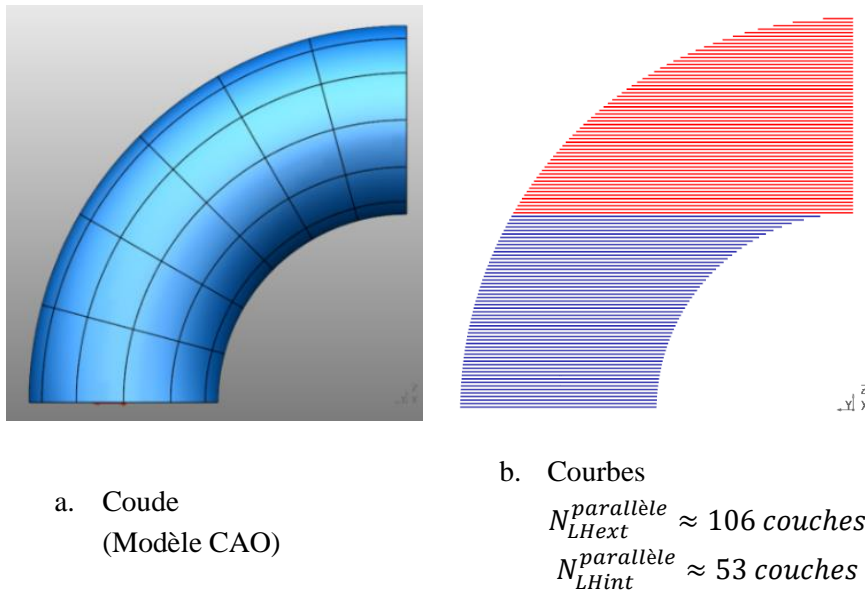


Figure 56 : Découpage par plans parallèles appliqué la géométrie étudiée (en bleu : courbes fermées, en rouge : courbes ouvertes)

La Figure 57 montre que la distance entre cordons varie de 2.5 mm à 8 mm, ce qui est très supérieure à la distance nominale LH.

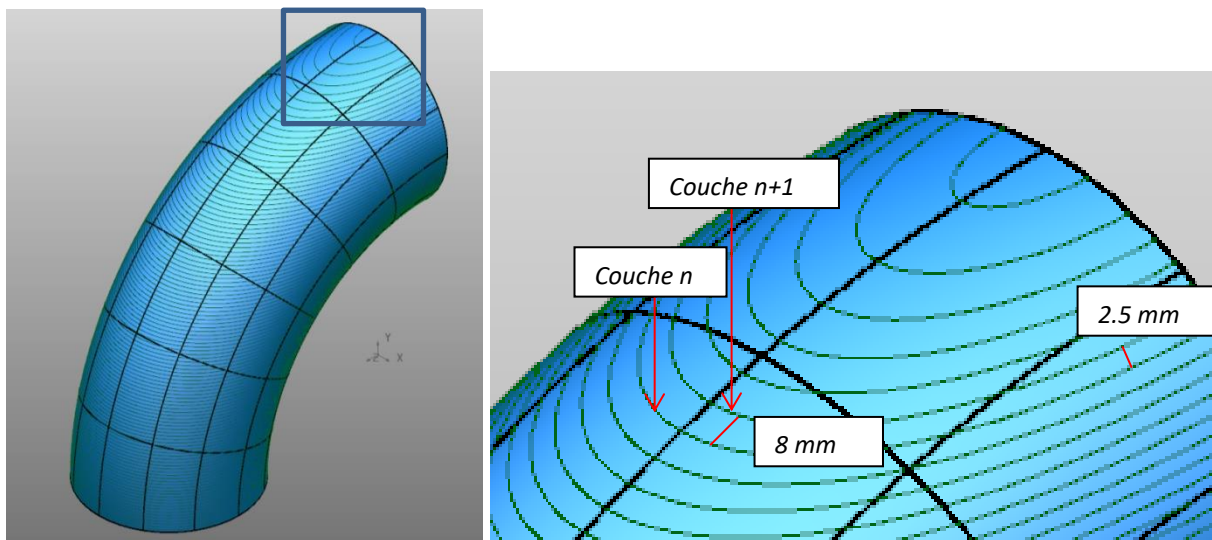


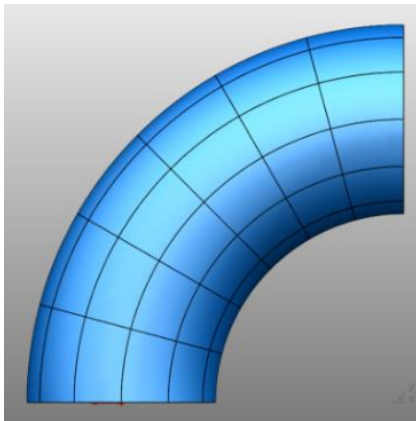
Figure 57 : Problématique liée au découpage par plans parallèles

Cette situation est généralisable à toutes les pièces ayant une variation de l'angle de dépouille importante, c'est-à-dire au-delà de 15° . Ce phénomène est également amplifié, si le nombre de couches est élevé. Afin de résoudre ce verrou, une première solution consiste à diviser le composant en plusieurs sections où l'angle de dépouille est inférieur à la valeur critique et ainsi déposer dans des conditions acceptables. Il s'agit de l'objet de la section suivante.

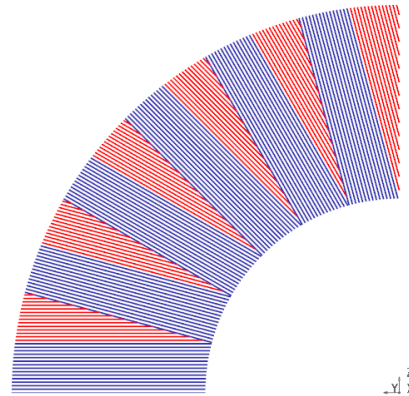
2.2. Découpage par plans parallèles avec sectionnement angulaire du composant

Une méthode de découpage par plans parallèles avec sectionnement peut être appliquée au composant. Nous choisissons de diviser le composant en sections de 15° (Figure 58). En effet, l'angle de contre dépouille ne dépasse pas cette valeur l'écart entre la distance directe entre deux parcours et l'épaisseur de couche (qui correspond à la distance normale entre deux plans de coupe) reste inférieur à 5%.

Le découpage de chaque section est ensuite effectué par des plans parallèles. Les nombres de couches obtenus ($N_{LHex}^{Sectionnement} \approx 166$ couches et $N_{LHint}^{Sectionnement} \approx 83$ couches) sont identiques aux valeurs préalablement déterminées (Eq.2). Ainsi, le découpage génère un ensemble de courbes ouvertes et un ensemble de courbes fermées (Figure 58 b.).



a. Coude (Modèle CAO)



b. Courbes par sections de 15°

$$N_{LHex}^{Sectionnement} \approx 166 \text{ couches}$$

$$N_{LHint}^{Sectionnement} \approx 83 \text{ couches}$$

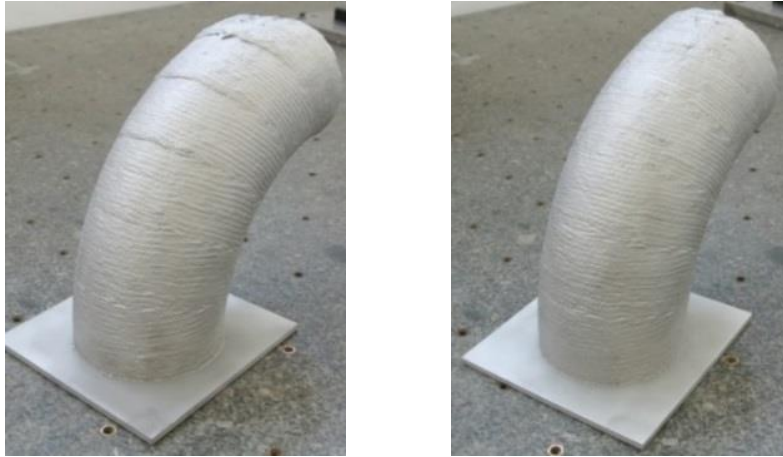
**Figure 58 : Découpage par plans parallèles et sections de 15°
(en bleu : courbes fermées, en rouge : courbes ouvertes)**

Cette méthode de découpage permet de sectionner un composant avec un fort angle de contre dépouille tout en conservant le découpage de plans parallèles pour chaque section. Elle reste simple à mettre en œuvre.

À partir du découpage précédemment obtenu, la génération de trajectoires peut être effectuée avec deux orientations d'outil (3 axes et 5 axes) afin de comparer l'effet des deux trajectoires outil sur la conformité du composant et illustrer la problématique de la section 1.4.1 :

- dans le cas d'une orientation outil 3 axes (Figure 59 a.), l'orientation de l'outil est indexée pour chaque section, c'est-à-dire que l'orientation outil est modifiée par palier de 15° .
- dans le cas d'une orientation outil 5 axes (Figure 59 b.), l'orientation de l'outil est tangente à la fibre neutre de la pièce. Elle est donc différente pour chaque couche et est progressivement incrémentée jusqu'à atteindre 90° .

La fabrication peut être menée à bien dans les deux cas (Figure 59), même si, pour le cas en trajectoires 3 axes, les conditions de dépôt se dégradent sur les dernières sections (distance torche/pièce importante, protection gazeuse altérée).



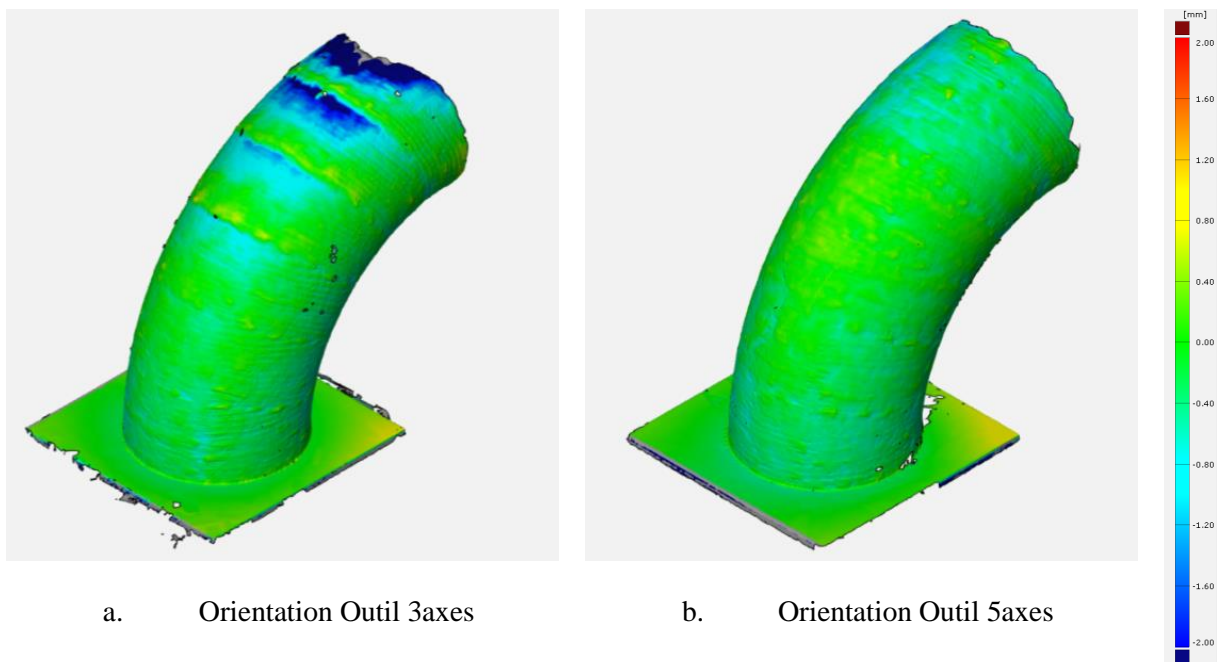
a. Orientation Outil 3axes

b. Orientation Outil 5axes

Figure 59 : Coudes fabriqués en WAAM avec des trajectoires 3 et 5 axes et un découpage par plans parallèles avec sectionnement

**Paramètres : TS = 800 mm/min WFS = 7 m/min LH = 1.9 mm,
AlMg5 – 5356 Ø1.2 mm, I = 96 A, U = 9.8 V.**

Après refroidissement, les surfaces extérieures des deux pièces ont été numérisées avec un scanner optique. Ensuite, chaque nuage de points obtenu a été comparé à la surface nominale extérieure souhaitée à l'aide du logiciel GOM. Les résultats de cette comparaison sont présentés sur la Figure 60.



a. Orientation Outil 3axes

b. Orientation Outil 5axes

Figure 60 : Comparaison de coudes fabriqués avec trajectoires 3 axes et 5 axes

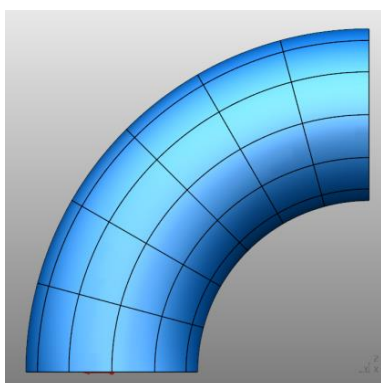
L'erreur maximale est relevée pour l'orientation outil 3 axes (Figure 60 a.), elle atteint une valeur maximale de 2 mm ce qui est du même ordre de grandeur que la largeur moyenne d'un cordon (5.5 mm). Cette erreur est principalement localisée sur les dernières sections. L'effet de la gravité étant également plus marqué sur les dernières sections, cela génère un écoulement de la matière en fusion auquel s'ajoute l'orientation imparfaite de l'outil (notamment en limite de section). À l'inverse, dans le cas b, l'erreur maximale mesurée est de 0.8 mm. Aucun effet de « palier » n'est observé sur cette pièce. L'orientation de l'outil suivant la surface, les conditions de dépôt sont identiques et homogènes sur l'ensemble du composant ce qui permet de mieux respecter la géométrie à fabriquer par rapport aux trajectoires 3 axes. Cette erreur relevée est acceptable. En effet, pour les composants en WAAM, les applications sont principalement orientées vers les pièces de structure qui ne nécessitent pas de tolérances serrées (environ 1 mm). De plus, cet écart peut être compris dans la surépaisseur d'usinage nécessaire à un éventuel parachèvement du composant après fabrication.

En conclusion, l'intérêt des trajectoires 5 axes pour le WAAM est démontré expérimentalement ici. En effet, cela permet de respecter le cahier des charges avec des tolérances plus serrées, mais aussi d'assurer des conditions de dépôt constantes et homogènes (angle de la torche par rapport au cordon) sur l'ensemble de la pièce.

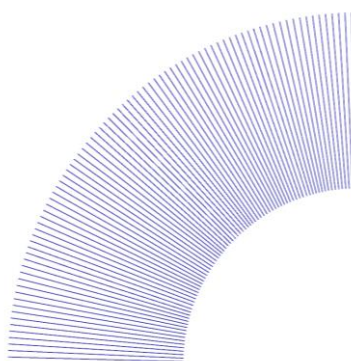
La fabrication avec des trajectoires 3 axes reste donc limitée à des géométries simples où l'angle de contre dépouille est faible (moins de 15° environ). La méthode de découpage par sections nécessite de diviser le composant et donc de multiplier les opérations de découpage. Pour étendre cette méthode, un troisième type de découpage peut être envisagé, ce qui est l'objet de la partie suivante.

2.3. Découpage basé sur la fibre neutre du composant

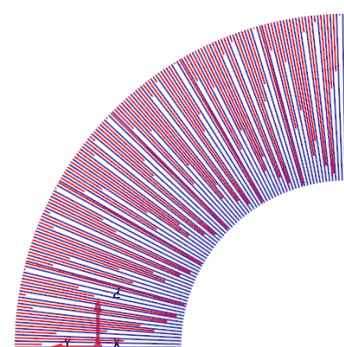
Cette méthode consiste à orienter la normale des plans de découpage selon la fibre neutre du composant. En appliquant cette méthode sur l'exemple proposé, cela permet d'obtenir un ensemble de courbes fermées (Figure 61 b.). Ainsi, le nombre de courbes étant identique sur les rayons intérieur et extérieur, il est nécessaire d'ajouter des courbes ouvertes (Figure 61 c.), car l'épaisseur de couche déposée est constante. Ces courbes sont réparties sur l'ensemble de la pièce afin de lisser la variation de hauteur et aussi garder les conditions de dépôt les plus constantes possibles.



a. Coude
(Modèle CAO)



b. Découpage basé sur
la fibre neutre



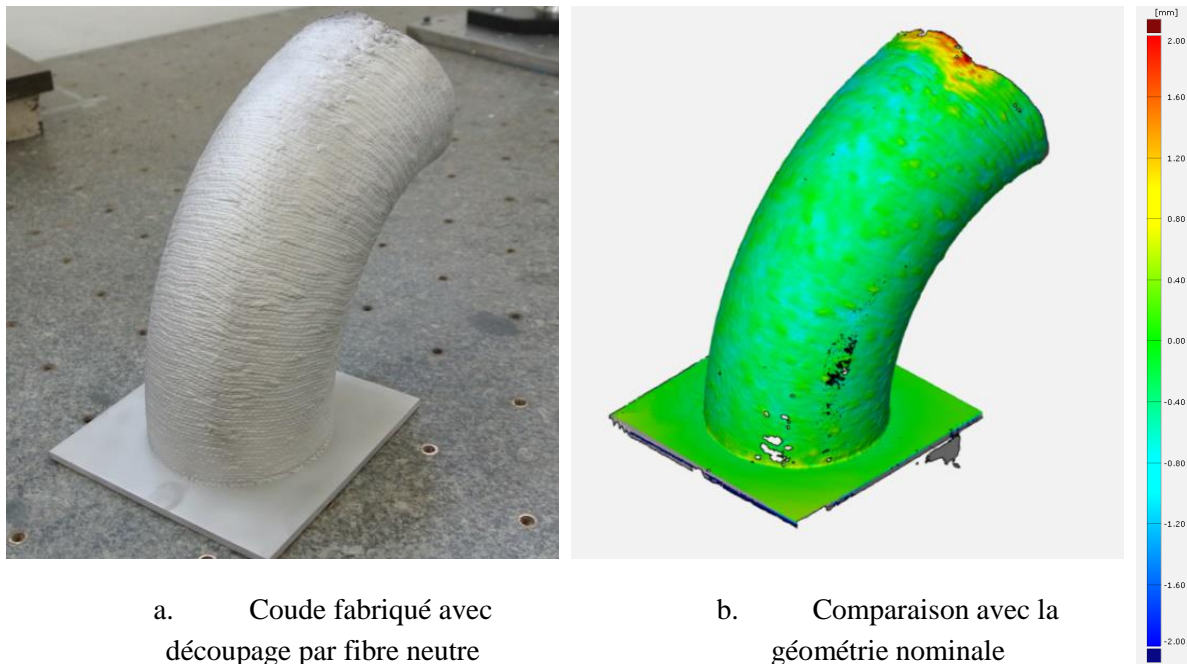
c. Courbes ouvertes et
fermées

$$N_{LHext}^{Fibre\ neutre} \approx 166\ couches$$

$$N_{LHint}^{Fibre\ neutre} \approx 83\text{ couches}$$

**Figure 61: Découpage de coude basé sur la fibre neutre
(en bleu : courbes fermées, en rouge : courbes ouvertes)**

Un essai de fabrication a été réalisé (Figure 62 a.) avec des trajectoires outil 5 axes (l'orientation de l'outil est tangente à la fibre neutre de la pièce). L'erreur entre la géométrie nominale et réelle est également contenue et inférieure à 0.8 mm (Figure 62 b.) ce qui est comparable avec le découpage par sections avec trajectoires 5 axes.



a. Coude fabriqué avec découpage par fibre neutre

b. Comparaison avec la géométrie nominale

**Figure 62 : Coude fabriqué en WAAM avec découpage par fibre neutre et trajectoires 5 axes
Paramètres : TS = 800 mm/min WFS = 7 m/min LH = 1.9 mm,
AlMg5 – 5356 Ø1.2 mm, I = 96 A, U = 9.8 V.**

En conclusion, l'intérêt de cette méthode de découpage réside dans sa flexibilité au regard de la géométrie. Si le composant possède une fibre neutre, il est possible de baser le découpage directement sur cette dernière et non plus sur une direction de croissance rectiligne. De plus, cela évite d'effectuer un sectionnement préalable du composant. Par contre, cela nécessite d'ajouter des courbes ouvertes, que l'on pourrait qualifier de « parcours de compensation », car l'épaisseur de couche du procédé est constante ici. Pour des composants plus complexes ou de dimensions plus importantes (avec un nombre de couches élevé), une automatisation du processus d'ajout des courbes ouvertes serait profitable. Une variation de l'épaisseur de couche est également envisageable, cette approche est étudiée dans la sous partie suivante.

2.4. Découpage basé sur la fibre neutre du composant avec variation continue de l'épaisseur de couche

Dans les sections précédentes, la méthode repose sur l'utilisation de paramètres opératoires constants et donc d'une épaisseur de couche constante. Elle requiert donc l'ajout de parcours de

compensation. C'est pourquoi il serait intéressant de pouvoir faire varier continûment l'épaisseur de couche au cours de la fabrication. Cela équivaut donc à moduler en cours de fabrication les paramètres intervenants sur la hauteur de cordon. Les deux principaux paramètres agissant sur cette dimension sont la vitesse d'avance (TS) et la vitesse de dévidage (WFS).

Dans l'exemple proposé, le principe est de reprendre le découpage basé sur la fibre neutre et d'agir sur les paramètres opératoires pour modifier l'épaisseur de couche au besoin. La première étape est de déterminer l'évolution de l'épaisseur de couche en fonction du rayon r compris R_{int} et R_{ext} . La distance entre les plans de coupe est fixée à 1.9 mm au niveau de la fibre neutre. Nous pouvons en déduire le nombre de plans de coupe ($N_{Fibre\ neutre}$). Les valeurs d'épaisseur sur le rayon intérieur (LH_{int}) et extérieur (LH_{ext}) peuvent être directement calculées à partir des longueurs curvilignes L_{int} et L_{ext} obtenues en section 2.1.

$$L_{fibre\ neutre} = \frac{\pi \cdot (R_{fibre\ neutre})}{2} \approx 124\ mm \quad (Eq.3)$$

$$N_{Fibre\ neutre} = \frac{L_{fibre\ neutre}}{LH_{fibre}} \approx 65\ couches \quad (Eq.4)$$

$$LH_{int} = \frac{L_{int}}{N_{Fibre\ neutre}} \approx 1.27\ mm \quad (Eq.5)$$

$$LH_{ext} = \frac{L_{ext}}{N_{Fibre\ neutre}} \approx 2.53\ mm \quad (Eq.6)$$

La plage de variation s'étend de 1.27 mm sur le rayon intérieur à 2.54 mm sur le rayon extérieur, ce qui est acceptable compte tenu de la valeur centrale (1.9 mm). La variation d'épaisseur de couche est liée au rayon r (Figure 63) via la relation (Eq.7) :

$$LH = 0.0127\ r\ avec\ r\ et\ LH\ en\ mm \quad (Eq.7)$$

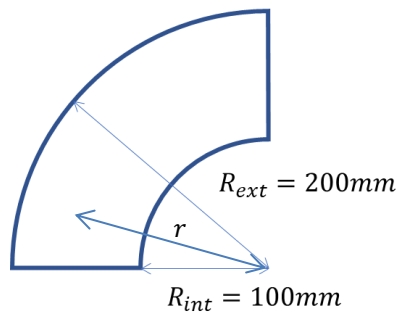


Figure 63 : Paramétrage de r pour le coude considéré

Afin de faire varier l'épaisseur de couche, deux principaux paramètres peuvent être modifiés : la vitesse d'avance (TS) et la vitesse du fil (WFS). Le plus direct sur lequel nous pouvons agir est le paramètre TS. Des travaux [37] ont été menés, mais dans cette étude, la variation des paramètres se limitait à une discrétisation de la couche (fabrication de cordons côte à côte avec des paramètres opératoires différents pour chaque cordon). La variation des paramètres n'est donc pas continue sur une couche complète ni au sein d'un même cordon. Cela génère donc un effet de marche qui requiert un surfaçage à chaque couche. D'autre part, un modèle reliant l'épaisseur de couche aux différents paramètres du procédé est proposé ici [37]: le modèle identifié est de type quadratique avec une vitesse du fil constante (Eq.8) :

$$LH = C1 + C2 WFS + C3.TS + C4.WFS^2 + C4.WFS.TS^2 + C5.TS^2 + C6.WFS.TS \quad (\text{Eq.8})$$

Où C1, C2, C3, C4, C5 et C6 sont des constantes déterminées expérimentalement.

Si nous considérons la vitesse du fil constante, nous pouvons alors simplifier le modèle précédent et l'écrire sous la forme (Eq.9) :

$$LH = a.TS^2 + b.TS + c \quad (\text{Eq.9})$$

Où a,b et c sont des constantes à déterminer.

Des essais ont permis d'étudier l'évolution de l'épaisseur de couche en fonction de la vitesse d'avance (Figure 64).

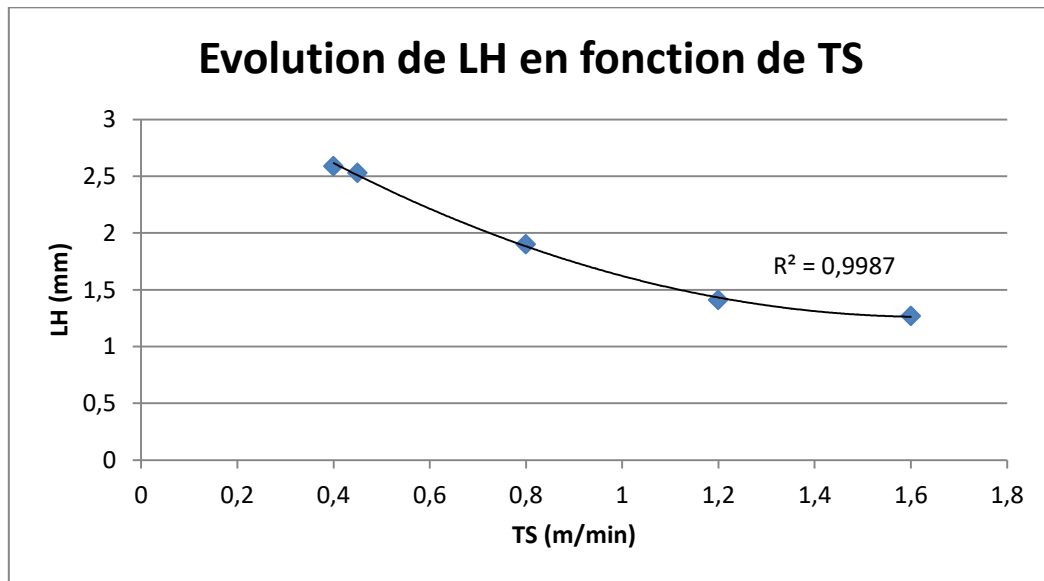


Figure 64 : Evolution de l'épaisseur de couche en fonction de TS (marqueurs : points expérimentaux, courbe noire : modèle quadratique)

Un modèle quadratique a donc été construit à partir de ces données et les constantes a, b et c ont été identifiées (Eq.10) :

$$LH = 0,880.TS^2 - 2,90.TS + 3,66 \quad (\text{Eq.10})$$

Ce modèle a été intégré dans l'algorithme de trajectoires afin de construire une répartition de la vitesse d'avance en fonction de l'épaisseur de couche souhaitée. Un essai de fabrication d'un coude à 45° a été mené pour confirmer la validité du modèle (Figure 65).



Figure 65 : Coude fabriqué avec une vitesse d'avance variable (variation continue de l'épaisseur de couche)

**Paramètres : TS = 450 à 1600 mm/min WFS = 7 m/min LH = 1.27 à 2.53 mm,
AlMg5 – 5356 Ø1.2 mm, I = 96 A, U = 9.8 V.**

Cet exemple montre que la variation de vitesse d'avance permet d'adapter l'épaisseur de couche (dans un certain intervalle possible) en fonction du découpage choisi et peut donc faciliter la réalisation de ce type de pièce. En particulier, il n'est pas nécessaire d'ajouter des courbes de compensation (comme pour le découpage par plans parallèles avec sectionnement ou par fibre neutre sans variation de l'épaisseur de couche). Cependant, il nécessite d'introduire tout au long du parcours une variation continue de TS dans les paramètres de contrôle des trajectoires de fabrication. De plus, dans ce cas, un seul paramètre opératoire a été modifié, ce qui entraîne une modification de la géométrie du cordon et notamment de sa largeur. Pour maîtriser complètement les dimensions du cordon, il serait nécessaire d'agir sur plusieurs paramètres simultanément (notamment la vitesse du fil et la vitesse d'avance) pour moduler la hauteur et la largeur du cordon en fonction du besoin. Pour cela, l'étude de l'évolution de l'épaisseur de couche LH et de la largeur du cordon en fonction des paramètres WFS et TS serait intéressante.

2.5. Conclusion sur les méthodologies de découpage

Cette section a permis de mettre en avant les limites du découpage par plans parallèles et l'intérêt de différentes méthodologies de découpage pour des composants avec un angle de contre dépouille élevée. Les limites des trajectoires 3 axes ont été démontrées et l'intérêt des trajectoires 5 axes a été mis en avant. Ce type de trajectoires permet notamment d'améliorer la précision géométrique de la pièce fabriquée pour rapport aux parcours 3 axes, mais aussi, d'assurer des conditions de dépôts homogènes sur l'ensemble du composant.

Nous avons ainsi proposé de nouvelles méthodes de découpage basées sur la fibre neutre du composant. En combinant ces méthodes avec une variation des paramètres opératoires en cours de fabrication, cela permet de simplifier la génération de trajectoires et de s'affranchir de la contrainte d'une épaisseur de couche constante. Cela implique d'intégrer un modèle (Figure 66) pour générer la variation du paramètre opératoire (TS dans cet exemple) et de l'introduire dans l'algorithme de génération de trajectoires. Le modèle proposé ici pourrait être généralisé à d'autres composants, mais

également servir de base de données pour la mise en place d'un monitoring du procédé. En effet, cela constitue une relation entre une valeur géométrique mesurable (ici la hauteur réelle d'un composant en cours de fabrication, et donc l'épaisseur de couche réelle) et un paramètre opératoire adaptable (ici la vitesse d'avance). Les données collectées ici sont donc utiles pour la mise en place d'une correction des paramètres opératoires en cours de fabrication.

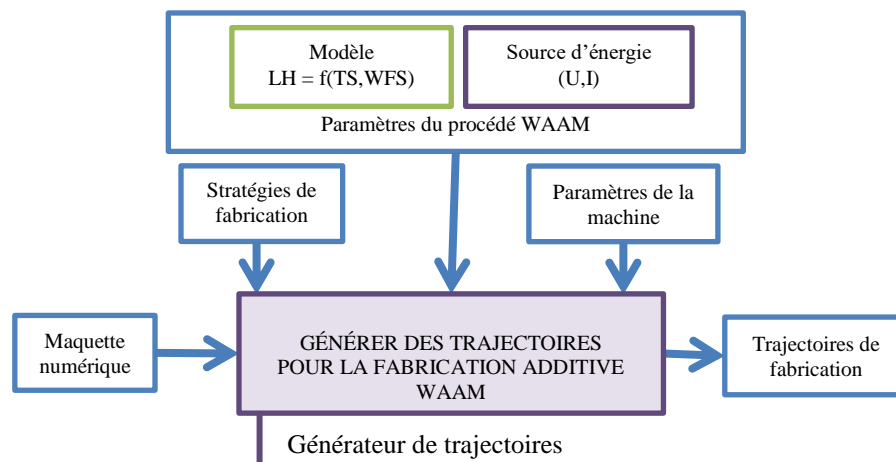


Figure 66 : SADT du générateur de trajectoires avec modèle $LH = f(TS, WFS)$

Pour parfaire cette adaptabilité des paramètres opératoires, et donc de la géométrie du cordon, il serait intéressant d'agir simultanément sur deux paramètres : la vitesse d'avance (TS) et la vitesse fil (WFS), pour contrôler la géométrie du cordon (hauteur et largeur). Il faut cependant veiller à rester dans le domaine de stabilité de l'arc en ce qui concerne la vitesse d'avance.

3. Conclusion sur la génération de trajectoires pour le procédé WAAM

La génération de trajectoires constitue une étape clé du processus de fabrication additive WAAM. Cette opération repose sur des paramètres déterminés en amont (paramètres du procédé, épaisseur de couche...) qui sont également dépendant des conditions de dépôt (notamment la température).

Le déploiement des procédés de fabrication additive et en particulier WAAM nécessite de maîtriser la génération de trajectoires pour des composants de plus en plus complexes. Pour répondre à cette problématique, plusieurs verrous ont été identifiés. Des méthodes de résolution ont été proposées afin de définir huit règles à appliquer dès la génération de trajectoires afin d'assurer la réussite de fabrication d'un composant.

La génération de trajectoires est basée sur une étape de découpage, généralement par plans parallèles. Cependant, le besoin actuel de génération de trajectoires demande de dépasser les limites de cette méthode. Plusieurs méthodes de résolution ont été étudiées et confrontées afin de mettre en évidence l'importance du choix du découpage en particulier pour les composants avec un angle de contre-dépouille élevé. D'autre part, l'intérêt de la variation continue de paramètres opératoires en cours de process a été démontré. Ce dernier point s'avère très utile pour avoir la possibilité de faire

varier continûment l'épaisseur de couche. La relation entre les paramètres du procédé et l'épaisseur de couche a été étudiée et modélisée. Cela peut constituer une base du monitoring de la géométrie.

La génération de trajectoires est en partie basée sur les paramètres de fabrication qui fixent entre autres l'épaisseur de couche. Dans le chapitre suivant, nous chercherons à mettre en place une démarche de choix de ces paramètres de mise en œuvre du procédé WAAM.

Chapitre 3 : Choix des paramètres et stratégies de fabrication

De nombreux leviers sont disponibles pour agir sur la qualité du dépôt parmi l'ensemble des paramètres opératoires liés au procédé de fabrication. Nous nous sommes basés sur des démarches expérimentales afin de proposer des méthodes de choix de ces paramètres.

Dans une première partie, les principaux paramètres sont définis puis classés afin d'introduire une méthode de détermination des paramètres opératoires du procédé. Cette méthode repose sur une démarche expérimentale consistant à observer, analyser et classer la géométrie du dépôt pour choisir des jeux de paramètres adaptés à la fabrication additive.

Actuellement, la plupart des composants WAAM sont fabriqués avec des paramètres constants [58] tout au long de la fabrication. Or, les conditions thermiques évoluant au cours de la fabrication, il serait pourtant utile d'adapter les paramètres opératoires pour assurer un dépôt optimal. C'est pourquoi, dans la deuxième partie de ce chapitre, une analyse qualitative des phénomènes thermiques mis en jeu lors de la fabrication additive WAAM et notamment sur la première passe est menée pour résoudre cette problématique. Ensuite, un plan expérimental est mis en œuvre afin de mettre en évidence l'effet des paramètres opératoires sur les performances de la liaison, mais aussi sur les déformations engendrées lors de la fabrication.

Enfin, les interactions du fil (le métal qui constituera les pièces) avec son système d'entraînement et son environnement sont étudiées. Il s'agit de l'objet de la troisième partie de ce chapitre.

1. Démarche expérimentale du choix des paramètres pour la fabrication additive WAAM

L'objectif de cette section est de mettre en évidence les principaux paramètres régissant la fabrication additive WAAM et leurs effets. La démarche expérimentale mise en œuvre pour choisir un jeu de paramètres adaptés à la fabrication de pièces est ensuite présentée.

1.1. Les différents paramètres du procédé WAAM

De nombreux paramètres communs aux procédés de fabrication additive sont nécessaires pour décrire et générer les trajectoires associées au procédé. L'objectif est de définir les principaux paramètres couramment utilisés pour la fabrication additive WAAM. La Figure 67 regroupe ces paramètres :

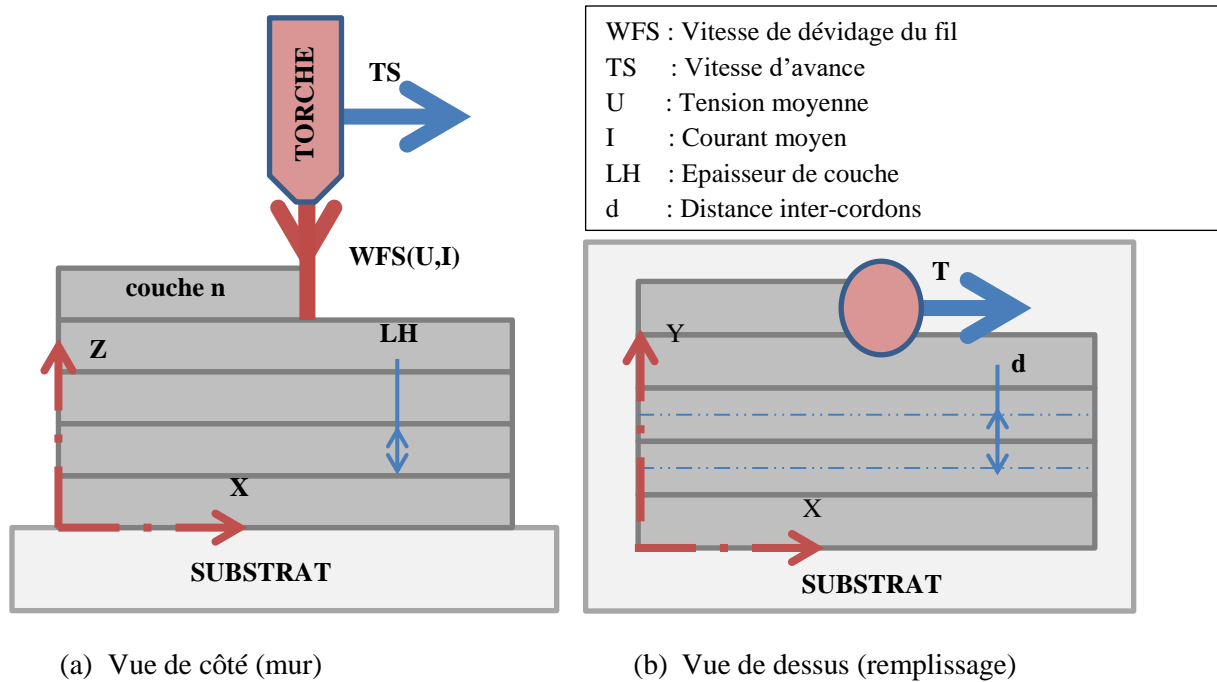


Figure 67 : Paramètres de fabrication additive WAAM

Le paramètre **WFS** correspond à la vitesse moyenne de dévidage du fil piloté par le générateur de soudure. Pour la fabrication additive, elle est généralement comprise entre 5 et 8 m/min [37].

La vitesse d'avance ou vitesse de travail est notée **TS**. Elle correspond à la vitesse de déplacement de la torche en fabrication. Il peut arriver, sur des parcours avec de fortes variations de courbure [59], que cette dernière ne soit pas toujours respectée par le système (différence entre la vitesse réelle de l'outil et la vitesse souhaitée) ce qui peut entraîner des défauts de fabrication (des amas de matière, car la vitesse de dévidage du fil reste constante). Plusieurs solutions sont possibles pour réduire l'effet de ce phénomène :

- modifier les courbes du parcours (par exemple augmenter les rayons de raccordement) ;
- adapter les paramètres de la machine (lisseurs de parcours, compresseurs...);
- simuler les évolutions de la vitesse d'avance et optimiser les paramètres tout au long du parcours ;
- asservir la vitesse de dévidage du fil à la vitesse réelle de l'outil et ainsi réduire l'apport de matière du fait de la réduction de la vitesse d'avance. Pour cela, une correction est implémentée dans la commande numérique. Cette dernière est explicitée par l'équation (Eq. 11). En fonction de la vitesse réelle de l'effecteur, la vitesse du fil est modifiée de manière proportionnelle afin de réduire la quantité de matière apportée et éviter les amas de matière. Une valeur seuil minimale de puissance est imposée pour éviter une rupture d'arc si la vitesse de l'effecteur s'annule. Cette solution est la plus intéressante car elle ne nécessite pas de modifications de parcours ni de simulation préalable.

$$WFS_{réelle} = \frac{TS_{réelle}}{TS_{programmée}} WFS_{programmée} \quad (\text{Eq. 11})$$

$TS_{réelle}$: vitesse d'avance réelle instantanée de l'effecteur

$TS_{programmée}$: vitesse d'avance souhaitée de l'effecteur

$WFS_{réelle}$: vitesse du fil adaptée pour compenser la variation de la vitesse d'avance

$WFS_{programmée}$: vitesse du fil souhaitée

En outre, pour modifier la géométrie du cordon tout au long du parcours, la vitesse d'avance est le paramètre le plus direct sur lequel il est possible d'agir. Une illustration de cette méthode sera proposée au chapitre suivant.

Les paramètres **U** et **I** sont respectivement les valeurs moyennes de la tension et du courant nécessaires à la création de l'arc électrique qui apporte l'énergie sous forme de chaleur pour faire fondre le fil fusible (métal d'apport) avec la pièce (métal de base).

L'épaisseur de couche, notée **LH**, exprime la distance entre deux cordons selon la direction verticale. Le réglage de ce paramètre est primordial pour assurer des conditions de dépôt optimales. Si l'épaisseur choisie est trop faible, la vitesse de croissance de la pièce est plus élevée que l'élévation de l'outil, il y a donc un risque de collision entre la pièce et la torche. De plus, le flux de gaz perturbe le bain de fusion. À l'inverse, si l'épaisseur est trop élevée, la distance entre la torche et la pièce augmente avec l'élévation de la pièce, ainsi, l'efficacité de la protection gazeuse diminue jusqu'à rendre la fabrication inopérante. Dans ces deux cas, la section du cordon est également modifiée, et la santé matière est dégradée par rapport aux conditions optimales. L'ordre de grandeur de ce paramètre pour les alliages d'aluminium est de 2 mm pour un fil de 1,2 mm de diamètre. Des méthodes de contrôle en ligne et notamment le monitoring géométrique peuvent permettre corriger ce paramètre pour assurer de bonnes conditions de dépôt [47].

Le paramètre **d** décrit la distance entre deux cordons au sein d'une même couche (Figure 67(b)). Sa valeur est toujours inférieure à la largeur d'un cordon simple afin d'assurer un taux de recouvrement (rapport entre le paramètre **d** et la largeur d'un cordon simple) satisfaisant entre les cordons et un remplissage homogène. Ce taux est généralement compris entre 60 et 80 % [34]. Pour générer les parcours de remplissage, plusieurs stratégies sont disponibles. Les plus couramment utilisées en fabrication additive sont regroupées sur la Figure 68.

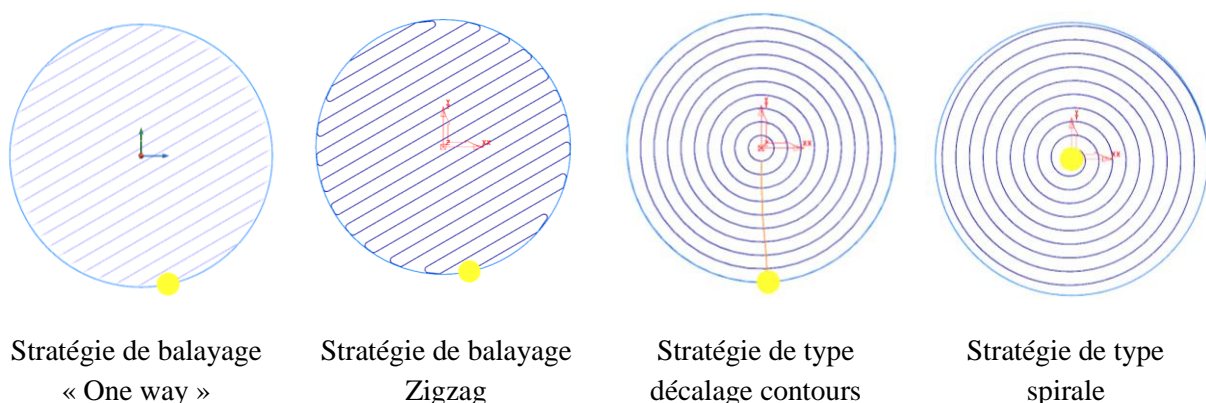


Figure 68 : Principales stratégies de remplissage (ligne bleue claire : frontière, ligne bleue foncée : parcours de remplissage, disque jaune : outil).

Pour ces parcours de remplissage, c'est ce même paramètre d qui est utilisé pour fixer la distance entre deux cordons voisins. Pour ces différentes stratégies, il est profitable de changer la position des points de départs et d'arrêt de dépôt entre chaque couche. Dans le cas du balayage Zigzag et « One way », il est également possible de faire varier l'angle du balayage entre chaque couche afin d'améliorer l'homogénéité du remplissage. Un exemple de cette variation est présenté sur la Figure 69 dans le cas d'un balayage Zigzag avec une variation de l'angle de 90° entre les couches successives.

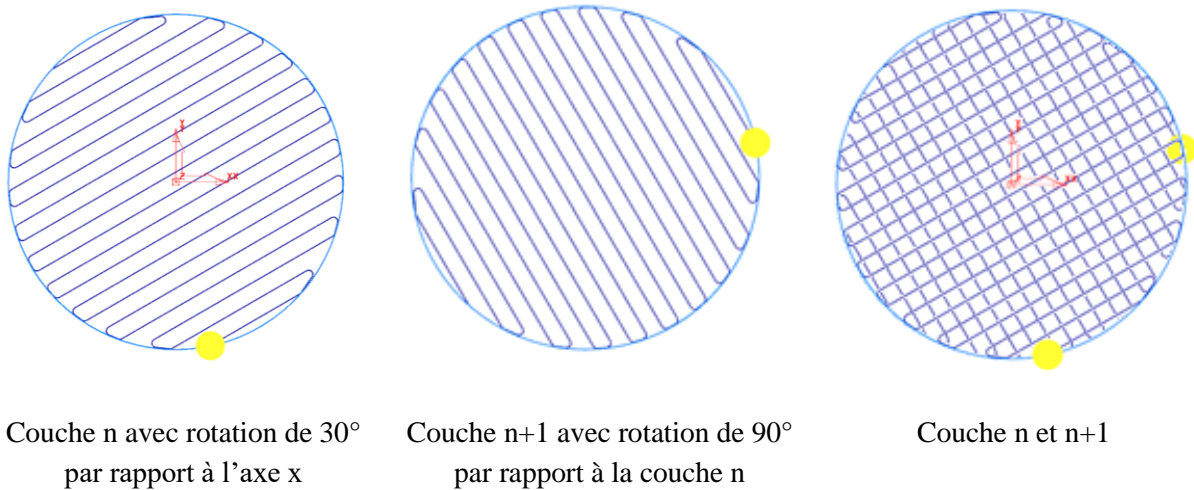


Figure 69 : Illustration de la variation de l'angle de balayage entre chaque couche (ligne bleue claire : frontière, ligne bleue foncée : parcours de remplissage, disque jaune : outil).

1.2. Démarche expérimentale employée

Pour mettre en œuvre le processus de fabrication d'une pièce en WAAM, le premier verrou scientifique à lever est le choix des paramètres opératoires du procédé. En analysant les différents paramètres, il est possible de classer ces paramètres selon trois domaines distincts (Figure 70) :

- Le **taux de dépôt** correspondant à la vitesse du fil (WFS) ;
- La **puissance** de la source de chaleur, correspondant à la puissance du générateur de soudure, (U, I) ;
- Les **paramètres de trajectoires** nécessaires à la génération de trajectoires, correspondant à l'épaisseur de couche (LH), la distance inter-cordons (d) et la vitesse d'avance (TS).

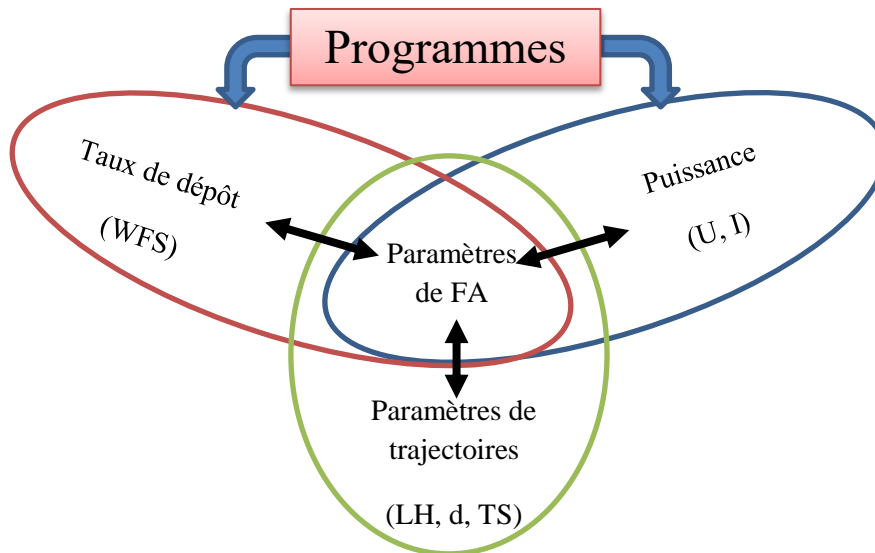


Figure 70 : Domaines de paramètres de fabrication WAAM

Les domaines « vitesse du fil » et « puissance » ne sont pas indépendants. En effet, dans les générateurs de soudure modernes, des lois empiriques relient l'ensemble de paramètres du procédé de soudure à la vitesse du fil. À partir des données d'entrée (matériaux, diamètre du fil, mode de soudure, nature du gaz de protection), une variation du paramètre WFS entraîne une adaptation des valeurs de courant, tension... grâce au programme employé. L'intervalle entre la vitesse minimale et maximale du fil correspond au domaine de stabilité de la loi. L'intérêt de ce mode de fonctionnement est la facilité d'utilisation [35]. En effet, cela constitue une banque de données de paramètres optimisés. Cependant, ces derniers ne peuvent pas être modifiés de manière totalement indépendante et sont dépendants des réglages du constructeur.

Pour résoudre le verrou lié au choix des paramètres opératoires, une démarche expérimentale est mise en œuvre. Cette approche se divise en deux étapes : la première consiste à observer la géométrie de cordons simples pour plusieurs vitesses de fil (WFS) et vitesses d'avance (TS). Il convient de choisir des géométries de cordons adaptées à la fabrication. Afin de classer les cordons selon leur géométrie, nous définirons la largeur et la hauteur du cordon selon la Figure 71.

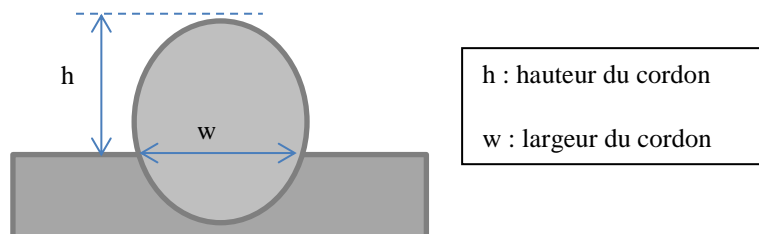


Figure 71 : Schéma d'une section de cordon

Les cordons peuvent être classés selon différentes géométries (Tableau 2) :

- **Cordon collé** : dans ce cas, la matière est seulement posée sur le substrat. Cette géométrie de cordon n'est pas compatible avec la fabrication additive car elle n'assure pas une bonne liaison entre deux couches. De plus, si la vitesse d'avance est élevée, un phénomène

d'instabilité ou de « humping » [60] peut apparaître. Cela engendre donc un cordon irrégulier formé de gouttes disjointes qui n'est pas adapté à la fabrication (instabilité d'arc, irrégularité du dépôt, cordon discontinu...);

- **Cordon effondré** : la pénétration du cordon est élevée. Ce dernier est très large. L'apport de chaleur est important. Cela entraîne un phénomène d'écroulement lors de la fabrication. La géométrie du cordon n'est pas adaptée à la fabrication additive, car le but est d'assembler des cordons (couche après couche) pour la fabrication d'une pièce et non pas d'assembler deux composants (soudure) ;
- **Cordon idéal FA** : ces cordons ont une largeur constante le long de la ligne de dépôt et une bonne régularité. La hauteur du cordon est proche de sa largeur. Ils sont adaptés à la fabrication additive.

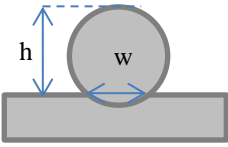
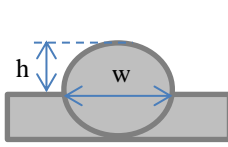
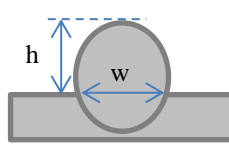
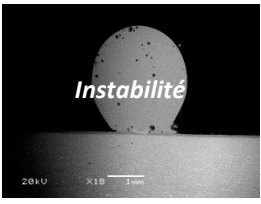
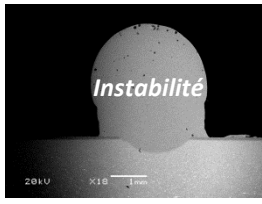
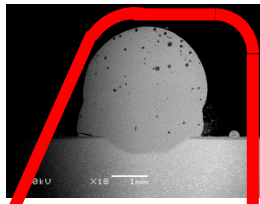
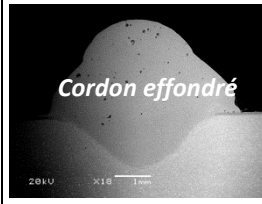
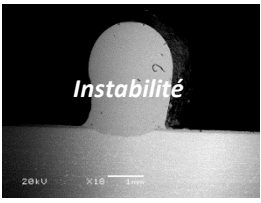
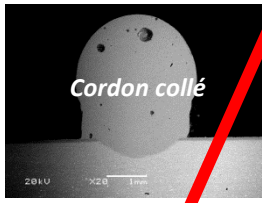
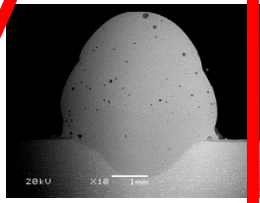
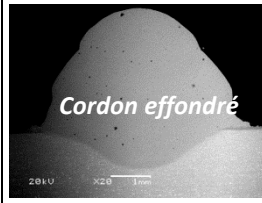
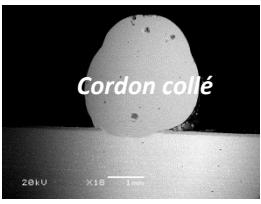
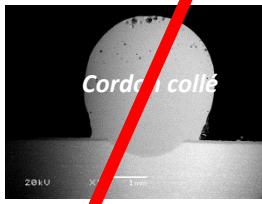
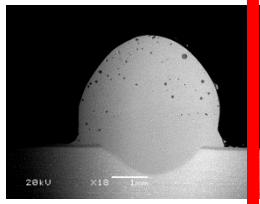
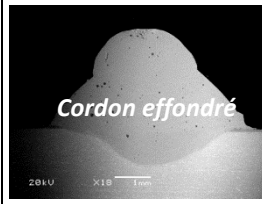
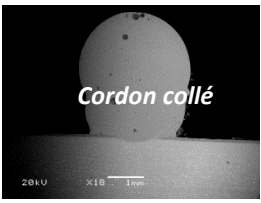
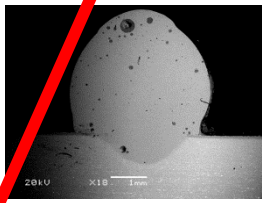
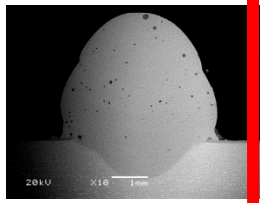
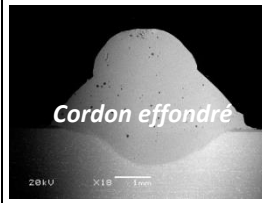
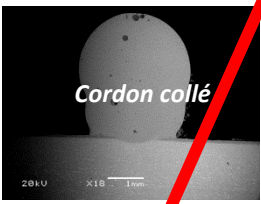
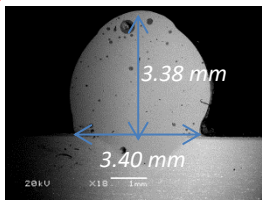
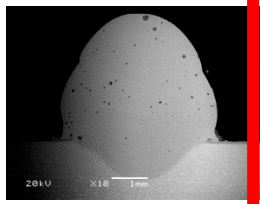
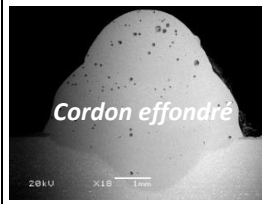
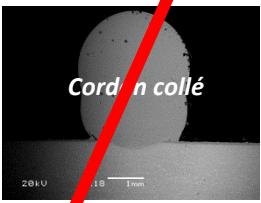
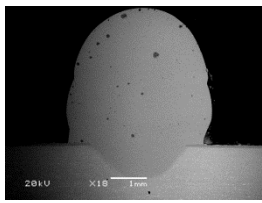
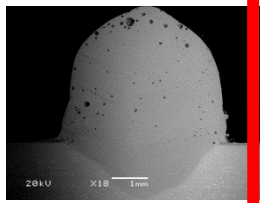
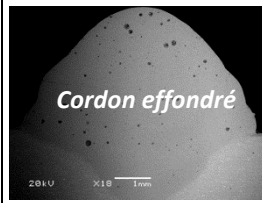
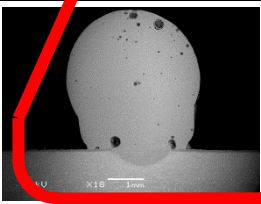
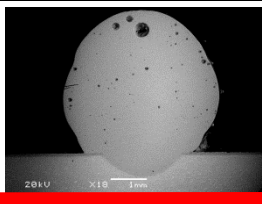
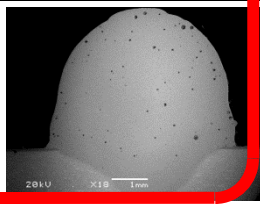
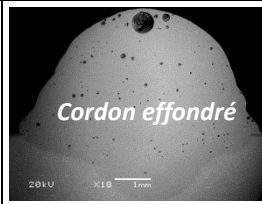
Géométrie du cordon			
Nom	Cordon collé	Cordon effondré	Cordon idéal FA
Dimensions h = Hauteur du cordon w = Largeur du cordon (au niveau de l'accroche)	$h > w$	$h < w$	$h \approx w$

Tableau 2 : Classification des géométries de cordons simples

La **seconde étape** du choix de paramètres consiste à fabriquer des murs avec les paramètres opératoires identifiés lors de la première étape. Le but est de déterminer l'épaisseur de couche (LH) à appliquer afin d'obtenir des conditions de dépôt homogènes tout au long de la fabrication et obtenir une distance constante entre deux cordons déposés.

1.3. Application de la méthodologie du choix des paramètres opératoires

La **première étape** de la méthode a donc été appliquée à la fabrication additive d'alliages d'aluminium de la manière suivante : des cordons simples ont été déposés sur un substrat (AlCu4MgSi - 2017A) d'une épaisseur de 3 mm. Le fil est un alliage d'aluminium (AlMg5 - 5356). Les vitesses d'avance utilisées s'échelonnent de 600 à 1200 mm/min et les valeurs de WFS de 6 à 9 m/min. Ces valeurs ont été choisies pour étudier un domaine centré sur les résultats de la bibliographie [44]. Chaque cordon a ensuite été observé sur sa section et analysé qualitativement afin de le classer selon sa géométrie.

Avance TS (mm/min)	Vitesse fil WFS			
	6 m/min	7 m/min	8 m/min	9 m/min
1200	 <i>Instabilité</i>	 <i>Instabilité</i>		 <i>Cordon effondré</i>
1100	 <i>Instabilité</i>	 <i>Cordon collé</i>		 <i>Cordon effondré</i>
1000	 <i>Cordon collé</i>	 <i>Cordon collé</i>		 <i>Cordon effondré</i>
900	 <i>Cordon collé</i>	 <i>Cordon collé</i>		 <i>Cordon effondré</i>
800	 <i>Cordon collé</i>	 3.38 mm 3.40 mm		 <i>Cordon effondré</i>
700	 <i>Cordon collé</i>	 <i>Cordon collé</i>		 <i>Cordon effondré</i>
600	 <i>Cordon collé</i>	 <i>Cordon collé</i>		 <i>Cordon effondré</i>



Domaine de conditions adaptées pour la fabrication additive

Tableau 3 : Analyse des sections de cordons simples déposés en WAAM
(Barre d'échelle : 1 mm, grossissement : x10)

Pour une vitesse du fil supérieure ou égale à 9 m/min, la géométrie des cordons est effondrée, la pénétration est importante ce qui n'est pas adapté à la fabrication additive. À l'inverse avec une vitesse du fil faible (6 m/min), le mouillage du cordon avec le substrat est faible. Avec l'augmentation de la vitesse d'avance, le phénomène d'instabilité apparaît. En conséquence, il existe un domaine de paramètres adaptés à la fabrication additive qui se situe entre ces deux régimes (Tableau 3). Pour une vitesse du fil (WFS) comprise entre 6 et 8 m/min, la vitesse d'avance (TS) doit respecter la condition suivante (équation (Eq. 12) de la frontière oblique sur le Tableau 3) :

$$TS < 300.WFS - 1200 \quad (\text{Eq. 12})$$

avec WFS en m/min et TS en mm/min

Ce domaine de stabilité confère une certaine latitude dans le choix des paramètres opératoires ce qui a permis d'envisager une variation des paramètres en cours de fabrication (voir Chapitre 2 section 2.4).

Parmi les combinaisons adaptées à la fabrication additive, un jeu particulier de paramètres a été choisi (WFS = 7 m/min et TS = 800 mm/min) pour la réalisation de pièces dans la suite du manuscrit. Cette combinaison offre une bonne stabilité, la section de ce cordon respecte bien le critère choisi (largeur environ égale à la hauteur). De plus, ce point de fonctionnement est situé au milieu de la zone de stabilité, il est donc possible de faire évoluer les paramètres tout en restant dans cette zone.

Dans ces conditions, la **seconde étape** a permis de déterminer de manière expérimentale l'épaisseur moyenne de couche. Pour cela, un mur monocordon a été fabriqué. Le rapport de la hauteur du mur et du nombre de couches conduit une valeur moyenne de 1,9 mm.

1.4. Conclusion

Pour déterminer les paramètres optimaux pour la fabrication additive, une approche expérimentale permettant de classer les cordons selon leur géométrie grâce à des critères de choix tels que la stabilité, le rapport hauteur-largeur du cordon et la section du cordon a été développée. Elle a permis de mettre en évidence une gamme de paramètres adaptés à la fabrication additive. Il est important de souligner que ces paramètres dépendent des autres domaines (la puissance et la vitesse du fil), mais également des phénomènes thermiques dont l'effet est fonction des dimensions de la pièce. Cette démarche a été appliquée à un alliage d'aluminium, mais elle peut également être mise en œuvre pour d'autres matériaux. La méthode de choix de paramètres est résumée sur la Figure 72 sur laquelle nous retrouvons les deux étapes précédemment citées.

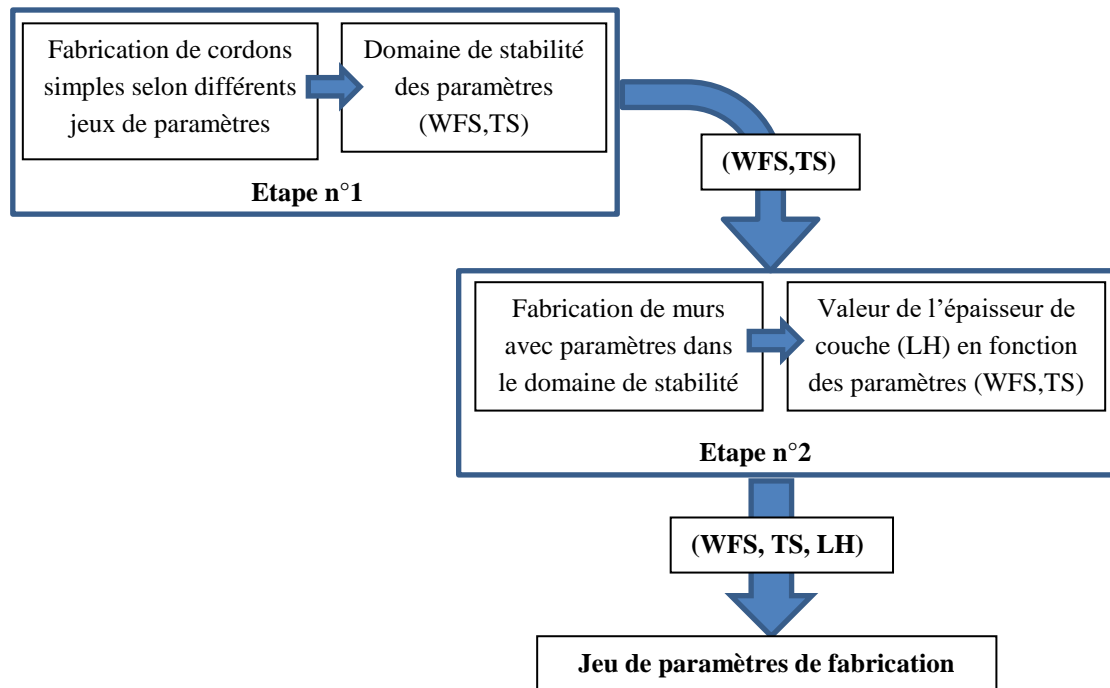


Figure 72 : Schéma récapitulatif de la méthode de choix de paramètres de fabrication

2. Cas particulier des paramètres pour l'accroche au substrat

La fabrication d'une pièce en WAAM peut être divisée en deux étapes. Une première concerne les premières couches qui seront la base de la pièce et qui constituent l'interface entre le substrat et la pièce fabriquée : il s'agit de la phase d'accroche. C'est une étape de régime transitoire dont le comportement est fortement lié aux dimensions du substrat, sa nature et à son état de surface. La seconde étape est la fabrication du reste de la pièce. Elle est assimilable au régime permanent. L'existence de ces deux régimes soulève une problématique associée aux conditions d'accroche. Les phénomènes observés et les solutions mises en place pour résoudre ce verrou sont abordés dans cette partie.

2.1. Problématiques rencontrées lors de la phase d'accroche

Lors d'une fusion de matériaux métalliques par arc électrique, de nombreux mécanismes physiques et notamment thermiques sont mis en jeu et agissent directement sur la morphologie du bain de fusion et donc la qualité du dépôt. En analysant la première couche d'un dépôt, plusieurs flux thermiques sont identifiables pour expliquer les mécanismes de répartition de l'énergie apportée par l'arc électrique. L'objectif de ce dernier est d'apporter l'énergie nécessaire à la fusion du fil avec le substrat. L'apport d'énergie se répartit donc sur chaque élément présent dans l'environnement. Les principaux échanges thermiques mis en jeu sont représentés sur la Figure 73.

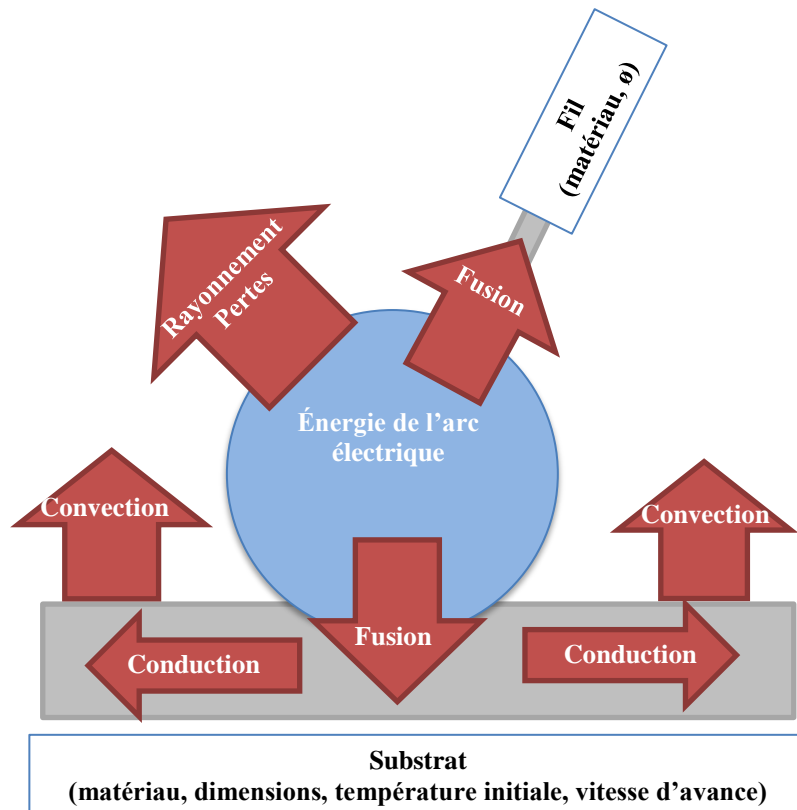


Figure 73 : Principaux phénomènes thermiques mis en jeu lors du dépôt du premier cordon (phase d'accroche).

Un premier flux permet la fusion du fil et un second flux celle substrat, afin de diluer les deux éléments et obtenir une liaison mécanique homogène (et non pas un simple collage). Une partie de l'énergie est également perdue et apporte de la chaleur à l'air ambiant (pertes et rayonnement de l'arc) ainsi qu'à la torche (non représentée sur la Figure 73).

Par ailleurs, une grande partie de l'énergie apportée par l'arc est également évacuée par conduction dans le substrat, qui, lui-même, le restitue à l'environnement par convection naturelle ou forcée. Le flux de chaleur évacué par conduction (donné par la relation (Eq. 13) dans le substrat lors de la phase d'accroche dans le cas d'un alliage d'aluminium est beaucoup plus important que dans le cas d'un acier compte tenu des valeurs de conductivité thermique : $120 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour un alliage d'aluminium de série 5000 [61] contre $26 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour un acier. Cette spécificité doit être prise en compte pour adapter l'énergie lors du dépôt sur un substrat en alliage d'aluminium.

$$J_{th} = -\lambda \cdot \text{grad}(T) : \text{Equation de la diffusion thermique} \quad (\text{Eq. 13})$$

λ : Conductivité thermique du matériau

T : Température au point considéré

Le flux évacué par conduction est également amplifié par la différence de température entre le substrat (température ambiante à l'état initial) et le point de fusion du matériau ($650\text{-}700^\circ\text{C}$). Cela peut engendrer une solidification trop rapide du métal déposé et peut conduire à la formation d'un cordon discontinu [62].

Ainsi, lors de la phase d'accroche, une grande partie de l'énergie fournie par l'arc électrique est perdue et n'est pas utilisée pour la fusion du métal d'apport (fil) avec le métal de base (le substrat). D'autre part, cette perte d'énergie est fortement liée aux dimensions du composant (notamment l'épaisseur du substrat).

Les performances de la liaison mécanique d'un composant fabriqué avec le substrat constituent un verrou majeur de la fabrication WAAM. La plupart des murs fabriqués (en alliage d'aluminium) sont déposés à paramètres constants [58]. Suite aux résultats de la section 1.3 où nous avons identifié les paramètres optimaux de fabrication, nous avons fabriqué un mur en conservant ces paramètres constants tout au long de la fabrication (Figure 74). Nous constatons que la largeur de la base de ce mur est plus faible que sa partie supérieure. La liaison mécanique entre le mur et le substrat est alors peu performante (Résistance mécanique en traction mesurée ici : 40 MPa). Ces mauvaises propriétés sont la conséquence du manque de mouillage entre la première passe et le substrat du fait de la trop faible énergie apportée et de la faible température du substrat.



Figure 74 : Fabrication d'un mur à paramètres opératoires constants
Paramètres : TS = 800 mm/min WFS = 7 m/min LH = 1.9 mm,
AlMg5 – 5356 Ø1.2 mm, I = 96 A, U = 9.8 V.

Pour résoudre cette problématique, deux solutions sont principalement utilisées :

- La première solution est le préchauffage du substrat [62] qui peut être réalisé à la flamme, par des composants résistifs ou par induction. Cette solution offre de nombreuses possibilités, mais peut générer un temps de préparation important (mise en place des éléments, montée en température...) qui peut être du même ordre de grandeur que le temps de fabrication. De plus, elle nécessite l'utilisation d'un outillage spécifique. L'ampleur des déformations sera cependant réduite étant donné la montée en température progressive et homogène de la pièce.
- La seconde consiste à modifier les paramètres opératoires (augmenter la puissance) sur la phase d'accroche pour augmenter la dilution du bain de fusion avec la tôle pour maximiser la pénétration et améliorer la résistance mécanique de la liaison substrat-mur. L'inconvénient de cette méthode est d'une part la déformation générée par l'apport de chaleur important et brutal ainsi que l'hétérogénéité de la montée en température de la pièce, ce qui peut, dans certains

cas, provoquer des dommages importants au substrat (perforation). Cependant, cette solution est simple à mettre en œuvre, il suffit de sélectionner les paramètres adaptés à la phase d'accroche et ensuite utiliser les paramètres optimaux de fabrication additive.

La première solution sera utilisée au chapitre 5 dans le cas d'un composant de grandes dimensions. La seconde solution a été retenue afin d'améliorer l'accroche au substrat étant donné sa simplicité de mise en œuvre et est étudiée dans la section suivante.

2.2. Influence des paramètres de dépôts sur les premières couches

Pour résoudre la problématique soulevée en 2.1, une démarche expérimentale a été mise œuvre dont le but est de déterminer les paramètres opératoires permettant de maximiser l'accroche au substrat tout en minimisant la déformation de ce dernier lors de la fabrication d'un mur.

2.2.1. Plan expérimental mis en œuvre

Un plan expérimental a été mis en œuvre afin de quantifier l'effet de la vitesse du fil (WFS) et de la vitesse d'avance (TS) sur la résistance mécanique à l'arrachement. Pour obtenir de meilleures performances au niveau de l'accroche, nous avons cherché à augmenter l'énergie apportée sur les deux premières couches. C'est pourquoi nous avons choisi de diminuer la vitesse d'avance (TS) et d'augmenter la vitesse du fil (WFS). Expérimentalement, nous avons travaillé sur deux niveaux de vitesse fil (8 et 9 m/min) et trois niveaux de vitesse d'avance (400, 600, et 800 mm/min). Pour rappel, les paramètres retenus à la section 1.3 (inclus dans le domaine de stabilité) pour la fabrication additive sont TS = 800 mm/min et WFS = 7 m/min. L'influence du bridage a également été étudiée.

Le codage des différents facteurs est présenté dans le Tableau 4. Pour le facteur WFS (à deux niveaux), la valeur -1 correspond au niveau bas du facteur, à la valeur +1 au niveau haut. Pour le facteur à trois niveaux (TS), il est nécessaire de diviser le facteur en deux, pour conserver l'homogénéité du codage (+1/-1). Pour cela, TS est remplacé par deux facteurs TS1 et TS2. Pour le niveau bas de TS, les facteurs TS1/TS2 sont à la valeur -1/-1, pour le niveau haut à +1/+1 et pour le niveau intermédiaire à -1/+1.

WFS (m/min)	Niveau du facteur WFS
8	-1
9	1

TS (mm/min)	Niveau du facteur TS1	Niveau du facteur TS2
400	-1	-1
600	-1	1
800	1	1

Tableau 4 : Codage des facteurs WFS (2 niveaux) et TS (3 niveaux)

Les réponses observées (valeurs de sortie) sont la valeur de résistance à l'arrachement et le défaut de planéité maximal mesuré après fabrication. Les différents paramètres des essais sont présentés dans le Tableau 5.

Essai n°	Epaisseur du substrat (mm)	TS (mm/min)	WFS (m/min)	Bridage
1	5	400	8	oui
2		600		
3		800		
4		400	9	
5		600		
6		800		
7		600	8	non
8			9	

Tableau 5 : Paramètres utilisés sur les deux premières couches.

2.2.2. Expériences menées

Les expériences ont consisté à fabriquer un mur monocordon pour chaque essai. En dehors des paramètres d'accroche, ce mur a été réalisé selon le jeu de paramètres déterminé en 1.3 (WFS = 7 m/min et TS = 800 mm/min). La stratégie employée est de type aller-retour. Un temps de pause (10 secondes) entre chaque couche a été observé pour éviter le phénomène d'effondrement et ne pas apporter une chaleur excessive au mur. Le système de bridage est constitué d'une tôle usinée en acier d'épaisseur 5 mm. Cette dernière était maintenue par 10 vis M6 (Figure 75). Cela permet d'obtenir une surface de contact et un maintien en position identique pour tous les essais. Les paramètres de dépôt sont précisés dans le Tableau 6.

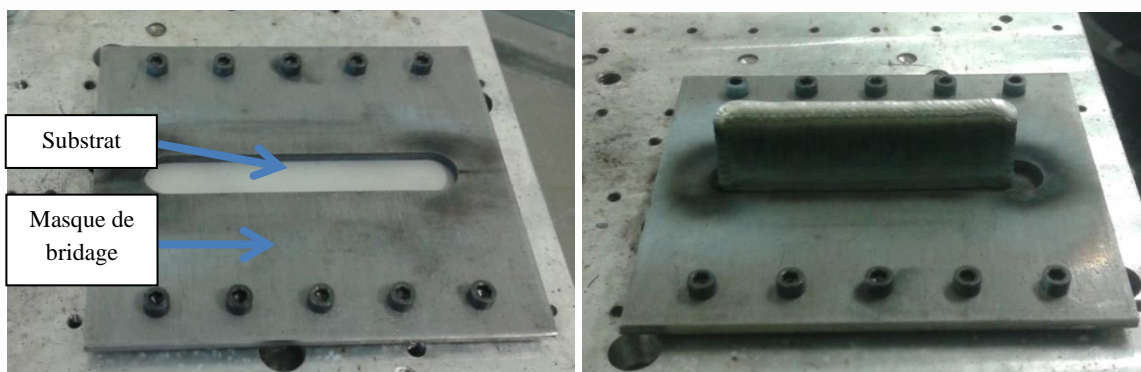


Figure 75 : Masque de bridage (à gauche) et exemple de fabrication d'un mur (à droite).

Mode	WFS (m/min)	Courant moyen (A)	Tension moyenne (V)	Puissance moyenne (W)
CMT Advanced	7	96	9.8	940
	8	109	10.1	1100
	9	122	10.3	1260

Tableau 6 : Paramètres de dépôt utilisés.

2.2.3. Résultats

La méthode mise en place pour quantifier la résistance à l'arrachement a consisté à prélever deux éprouvettes directement dans les murs d'une largeur de 25 mm et à effectuer un essai de traction. La valeur moyenne de la contrainte maximale à l'arrachement des deux éprouvettes a été retenue (l'écart entre les deux mesures était inférieur à 3% pour toutes les conditions d'essais).

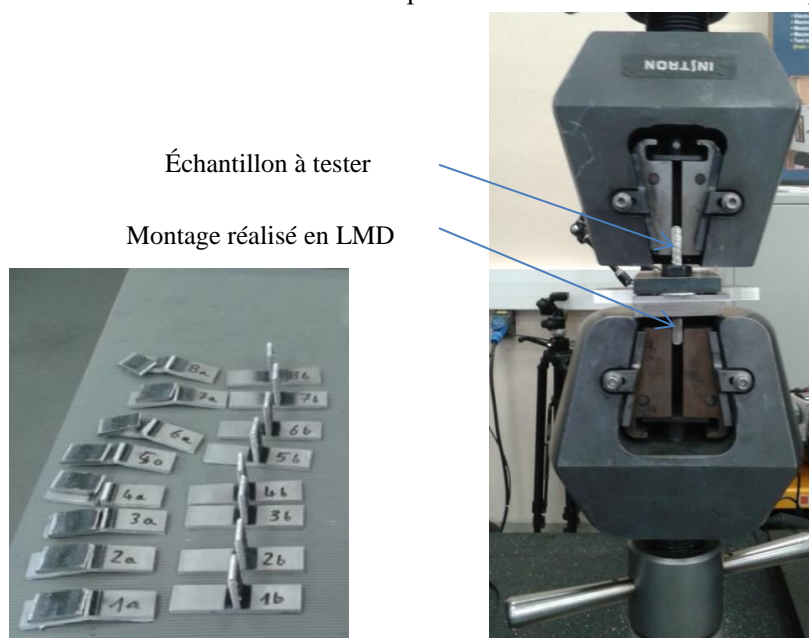


Figure 76 : Éprouvettes réalisées et essai sur une machine de traction

Les résultats des essais de traction sont présentés dans le Tableau 7. Chaque valeur de résistance à l'arrachement a été calculée par rapport à la section réelle de l'échantillon pour pouvoir comparer les éprouvettes. Pour chaque condition d'essais, l'énergie spécifique de soudage (notée HI) a été calculée selon l'équation (Eq. 14) en fonction des valeurs moyennes du courant et de la tension relevées lors des expériences. La valeur du rendement η est fixé à 0.9 [63].

$$HI = \eta \frac{I_{moyen} U_{moyen}}{TS} \cdot 60 \quad (\text{Eq. 14})$$

Essai n°	TS (mm/min)	WFS (m/min)	Bridage	Résistance Mécanique (MPa)	Puissance moyenne (W)	Energie spécifique (J.mm ⁻¹)
1	400	8	oui	156,8	1100	148,5
2	600			141,6	1100	99
3	800			128,7	1100	74,25
4	400	9		173,8	1260	170,1
5	600			171,8	1260	113,4
6	800			160,6	1260	85,05
7	600	8	non	138,0	1100	99
8		9		166,2	1260	113,4

Tableau 7 : Résultats des essais d'arrachement

Nous pouvons noter que, lorsque l'énergie spécifique moyenne de soudage augmente, la résistance mécanique à l'arrachement est améliorée. A partir des données expérimentales, nous pouvons construire l'évolution de la résistance mécanique en fonction de l'énergie spécifique de soudage (Figure 77). Pour une valeur de vitesse fil donnée, la résistance mécanique augmente lorsque l'énergie spécifique de soudage augmente (zone entourée en rouge sur la Figure 77). L'énergie apportée étant plus importante, cela améliore la dilution entre le substrat et les premières couches, et par conséquent, la liaison mécanique.

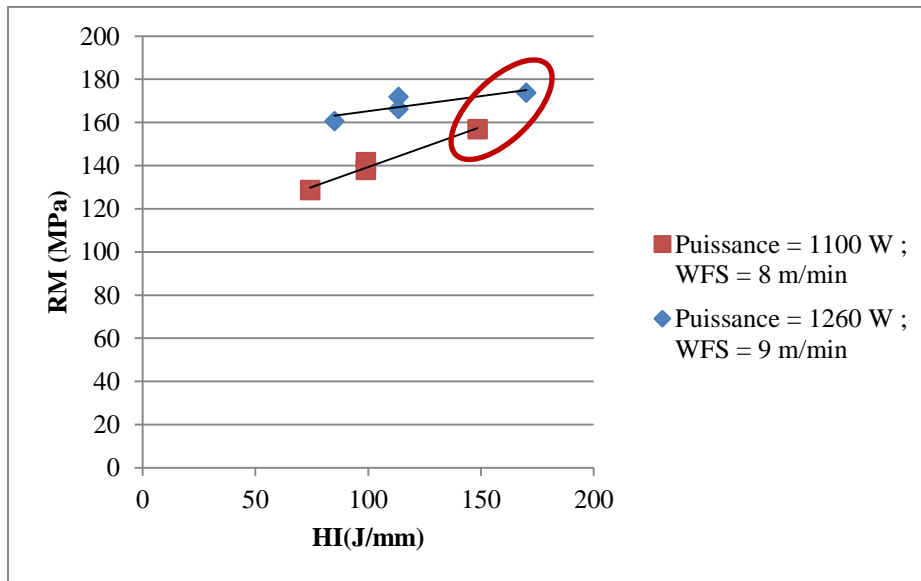
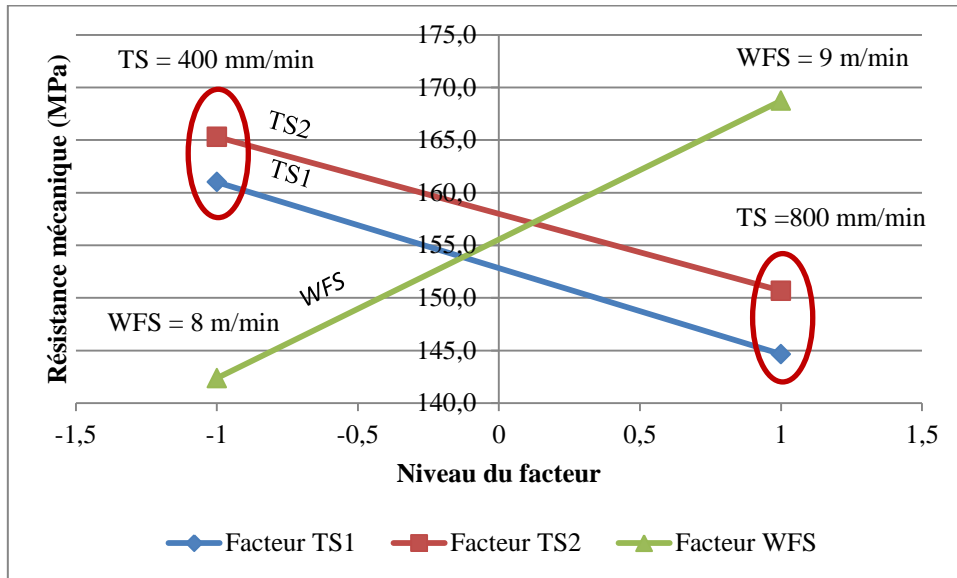


Figure 77 : Résistance mécanique en fonction de l'énergie spécifique de soudage

Les effets principaux des facteurs sont représentés sur la Figure 78. Le facteur ayant le plus d'effet est WFS (pente la plus forte). Pour maximiser l'accroche au substrat, c'est-à-dire la résistance mécanique à l'arrachement, il faut placer WFS à son niveau haut (9 m/min). Les deux autres facteurs (TS1 et TS2) ont également un effet principal sur la réponse, mais moins prépondérant que WFS. Pour maximiser la résistance à l'arrachement, il faut placer ces deux facteurs à leurs niveaux bas, ce qui équivaut à placer la vitesse d'avance à 400 mm/min. En effet, l'augmentation de la puissance combinée à la réduction de la vitesse d'avance permet d'augmenter l'apport de chaleur et donc d'améliorer la dilution entre le premier cordon et le substrat. Ceci a pour conséquence d'accroître la résistance à l'arrachement.



WFS (m/min)	Niveau du facteur WFS
8	-1
9	1

TS (mm/min)	Niveau du facteur TS1	Niveau du facteur TS2
400	-1	-1
600	-1	1
800	1	1

Figure 78 : Effet des facteurs WFS et TS sur la résistance mécanique à l'arrachement

Le choix des paramètres optimaux d'accroche permet d'améliorer de 37 % la résistance à l'arrachement (différence entre la meilleure combinaison : 173 MPa et la plus mauvaise combinaison : 128 MPa).

2.2.4. Influence des paramètres sur la déformation

Pour quantifier la seconde valeur de sortie, une mesure de la planéité du substrat après fabrication a été menée à bien. La méthode utilisée repose sur la comparaison du nuage de points acquis avec un plan théorique parfait (Figure 79). Une mesure de défaut de planéité de la surface supérieure de substrat a été effectuée avant et après dépôt du mur. La valeur maximale du défaut a été retenue pour comparer l'ensemble des essais.

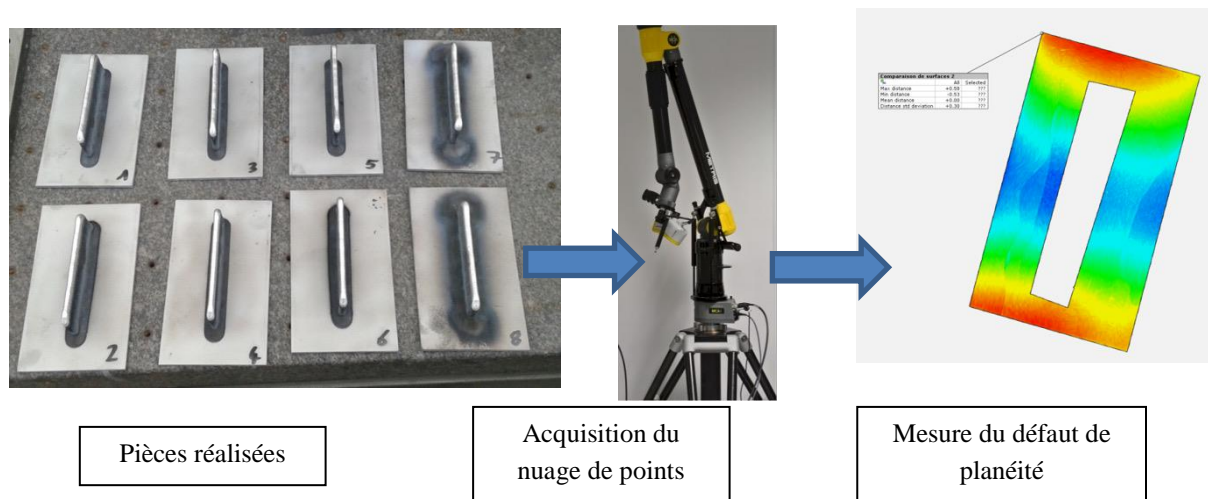


Figure 79 : Méthode de mesure de la planéité du substrat après fabrication

La partie centrale, où le mur est déposé, a été retirée de la comparaison pour quantifier uniquement la déformation du substrat. Les résultats sont présentés dans le Tableau 8.

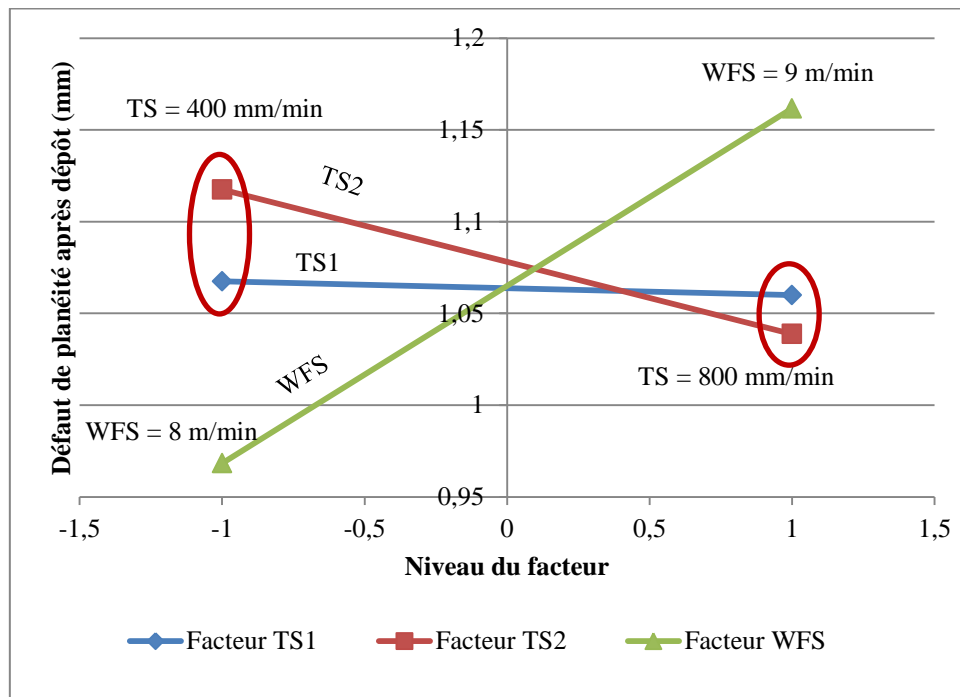
Essai n°	TS (mm/min)	WFS (m/min)	Bridage	Défaut de planéité avant dépôt (mm)	Défaut de planéité après dépôt (mm)	Puissance moyenne (W)	Energie spécifique ($J.mm^{-1}$)
1	400	8	oui	0,79	1,35	1100	148,5
2	600			0,96	1,11	1100	99
3	800			0,72	1,17	1100	74,25
4	400	9		0,83	1,41	1260	170,1
5	600			0,53	1,31	1260	113,4
6	800			1,01	1,34	1260	85,05
7	600	8	non	0,99	1,89	1100	99
8	600	9		0,56	2,46	1260	113,4

Tableau 8 : Résultats de mesure de planéité

Le défaut de planéité mesuré avant dépôt est compris entre 0,53 et 1,01 mm. Dans tous les cas d'étude, ce défaut a augmenté après la fabrication des murs. La déformation maximale constatée est mise en évidence pour les essais 7 et 8, qui n'étaient pas bridés lors du dépôt, ils se sont donc déformés davantage que les supports bridés, ce qui est attendu. Pour tous les essais, les bords de tôles aux extrémités du mur ont tendance à se déformer vers le haut. En effet, la partie supérieure du mur étant la plus chaude (car elle vient d'être déposée), le phénomène de refroidissement crée des contraintes résiduelles qui déforment le support selon cette direction.

Si le défaut maximal de planéité est retenu comme valeur de sortie, le facteur principal ayant le plus fort effet sur la déformation de la tôle est WFS (Figure 80). Il doit être placé à son niveau bas pour minimiser la déformation. L'effet de l'avance est par contre faible (pente faible). Pour les essais avec bridage, l'écart entre la valeur minimale et maximale est de 0,3 mm, ce qui représente une faible

variation quelles que soient les conditions de dépôt. Cependant, le défaut de planéité augmente avec l'énergie spécifique.



WFS (m/min)	Niveau du facteur WFS
8	-1
9	1

TS (mm/min)	Niveau du facteur TS1	Niveau du facteur TS2
400	-1	-1
600	-1	1
800	1	1

Figure 80 : Effet des facteurs sur le défaut de planéité après dépôt

La fabrication de mur sur les supports engendre une augmentation du défaut de planéité mais ce dernier reste acceptable (de l'ordre du millimètre en moyenne) au regard des dimensions du substrat (60 mm de largeur, 120 mm de longueur et 5 mm d'épaisseur).

2.3. Conclusion sur le choix des paramètres lors de la phase d'accroche au substrat

Une analyse des échanges thermiques présents lors des premières passes a permis de mettre en évidence le verrou d'accroche au substrat. La résolution de ce dernier a donc été menée de manière expérimentale avec la mise en place d'un plan d'expériences pour quantifier l'influence des paramètres opératoires sur les performances de la liaison substrat-mur et sur les déformations engendrées.

Pour améliorer l'accroche au substrat, nous avons choisi d'adapter les paramètres opératoires sur la première couche afin d'augmenter la pénétration du bain de fusion et améliorer la résistance mécanique. La méthode mise en œuvre a permis de résoudre la problématique du choix de paramètres pour les premières passes lors de la fabrication WAAM. Pour maximiser l'accroche au substrat, il faut

augmenter l'apport de chaleur pour améliorer la pénétration de la première passe avec le substrat. Cela correspond donc à augmenter la puissance sur la première passe tout en réduisant la vitesse d'avance. Ces conclusions font partie intégrante de la génération de trajectoires proposée dans la suite du manuscrit.

3. Influence de la pression de serrage des galets d'entraînement sur la géométrie et la composition chimique du fil

L'objectif de la fabrication additive étant de déposer un matériau pour construire un composant fonctionnel avec des caractéristiques mécaniques acceptables, nous avons fait le choix d'étudier le « feedstock » ou en d'autres termes la bobine et le fil qui constituera le futur matériau de la pièce à fabriquer. Ses caractéristiques peuvent donc influencer directement la qualité du dépôt, car, avant d'être fondu par l'énergie de l'arc électrique, le fil subit une série d'interactions avec différents éléments et son environnement.

3.1. Principe de fonctionnement du système de dévidage et prélèvement des échantillons

La Figure 81 représente l'ensemble des interactions possibles du fil avec le système de dévidage. Lors du dévidage de la bobine, le fil se détache de sa spire voisine. Il est ensuite entraîné par deux paires de galets profilés au diamètre correspondant au fil (1.2 mm). Le fil chemine ensuite dans une gaine constituée de carbone. Une autre paire de galets (également profilé) est présente dans le corps de la torche. Le fil parcourt alors une seconde section de gaine carbone jusqu'à atteindre le tube contact (élément en cuivre massif par lequel l'énergie est apportée au fil fusible) et fond enfin par l'énergie apportée par l'arc électrique.

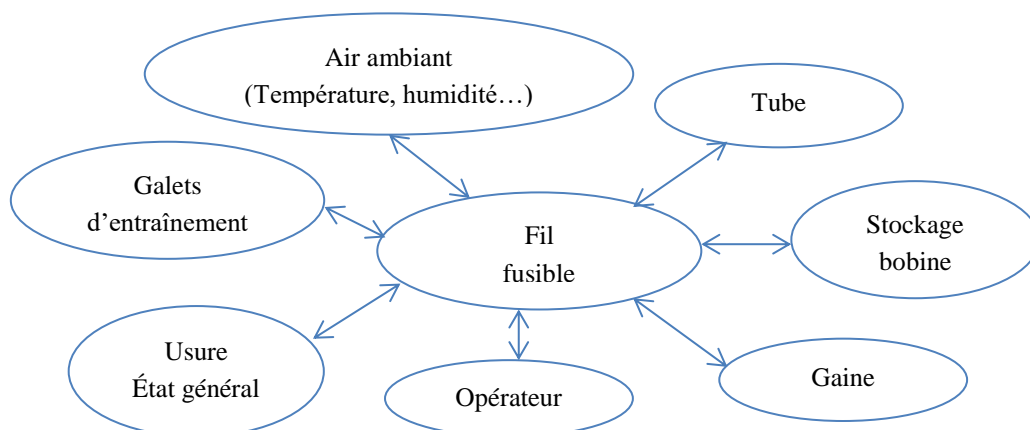


Figure 81 : Interactions du fil avec son environnement

Le principal réglage sur lequel nous pouvons et nous devons agir pour obtenir un dévidage du fil efficace et fiable est la pression de serrage des galets. Si la pression est trop faible, il peut y avoir un glissement entre les galets et le fil et ainsi, la vitesse réelle de dévidage est plus faible que la vitesse programmée. Si la pression est trop élevée, le fil se déforme, et peut flamber avant d'entrer dans la gaine (cela peut entraîner la rupture du fil et donc l'arrêt du dévidage).

La démarche mise en œuvre pour quantifier l'influence de la pression de serrage des galets (Figure 82), mais aussi des interactions avec le fil consiste à prélever des échantillons de fil selon plusieurs valeurs de réglage (échelle de réglage de 1 à 5, valeur nominale utilisée 3.5) :

- 1 échantillon avec la pression nominale noté « N »
- 1 échantillon avec une pression plus élevée noté « N+1 »
- 1 échantillon avec une pression plus faible noté « N-1 »
- 1 échantillon prélevé directement dans la bobine (sans serrage appliqué) noté « SB »

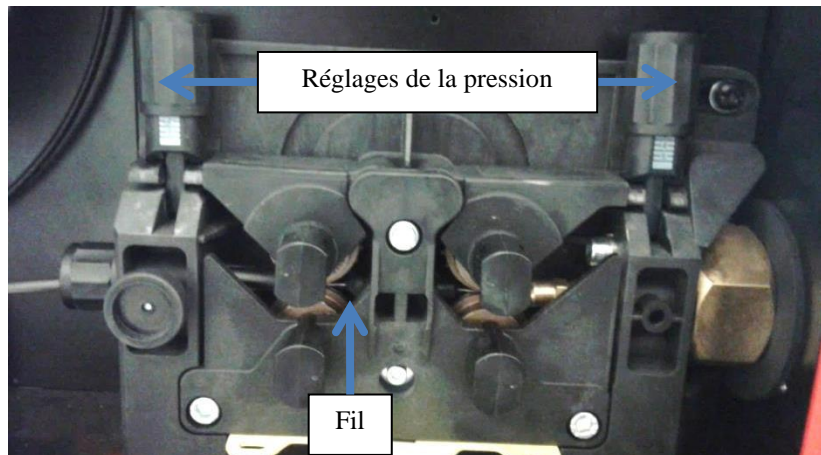


Figure 82: Système de réglage de la pression de serrage des galets sur le fil

3.2. Influence de la pression de serrage sur la géométrie du fil

Pour quantifier la déformation générée par les galets sur le fil, le protocole de mesure a consisté à observer les échantillons selon deux orientations 0° et 90° (position du fil autour de son axe) pour quantifier le défaut de circularité sur le pourtour du fil. Le Tableau 9 résume ces mesures pour les échantillons SB et N+1 selon les deux positions. Le profil mesuré est en bleu et le profil théorique est en rouge.

	Position 0°	Position 90°
SB	<p>Écart maximal mesuré = 4.74 μm</p>	<p>Écart maximal mesuré = 2.39 μm</p>
N+1	<p>Écart maximal mesuré = 8.65 μm</p>	<p>Écart maximal mesuré = 10.44 μm</p>

Tableau 9 : Mesures du défaut de circularité du fil pour les échantillons SB et N+1

Globalement, les écarts mesurés sont compris entre 2.39 et 11.19 μm selon les échantillons. La Figure 83 résume sous forme graphique les distances relevées pour chaque orientation.

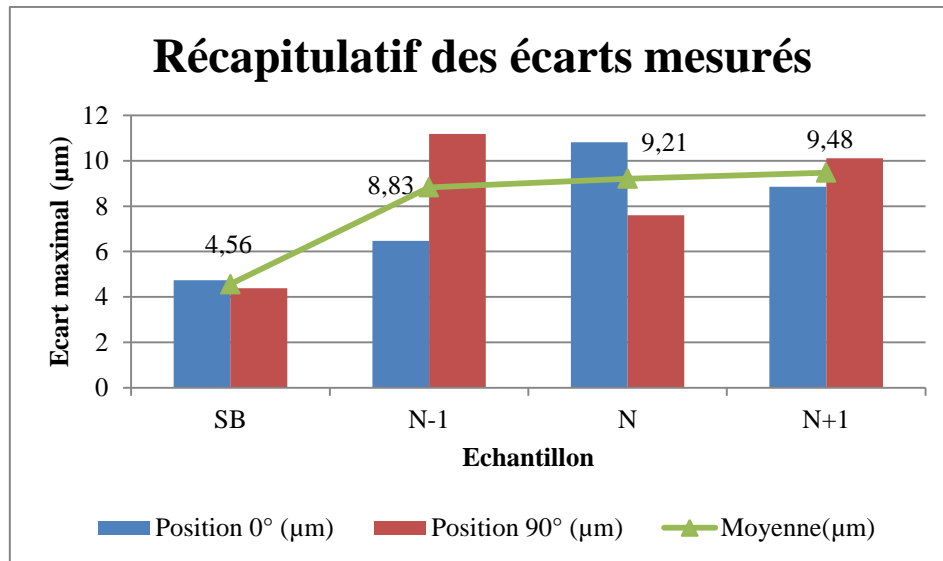


Figure 83 : Récapitulatif des écarts mesurés entre le diamètre nominal et mesuré

Une très légère augmentation de la déformation du fil est relevée avec l'augmentation de la pression de serrage. Entre un échantillon sans serrage (sortie bobine) et un échantillon entraîné par les galets, la déformation est doublée. Il est cependant important de souligner l'ordre de grandeur du défaut de circularité est de 10 μm . Le diamètre nominal du fil étant de 1.2 mm, le taux de déformation mesuré est inférieur à 2%. Cette déformation semble faible pour influencer la qualité du dépôt.

3.3. Influence de la pression de serrage sur la composition chimique du fil

Étant donné les nombreuses interactions du fil avec des éléments extérieurs, une analyse des échantillons a été menée afin de quantifier leur effet sur la composition chimique de ce dernier. Le protocole est similaire à celui mis en œuvre en section 3.2. Le Tableau 9 regroupe les images acquises pour une observation globale du fil selon les deux orientations.

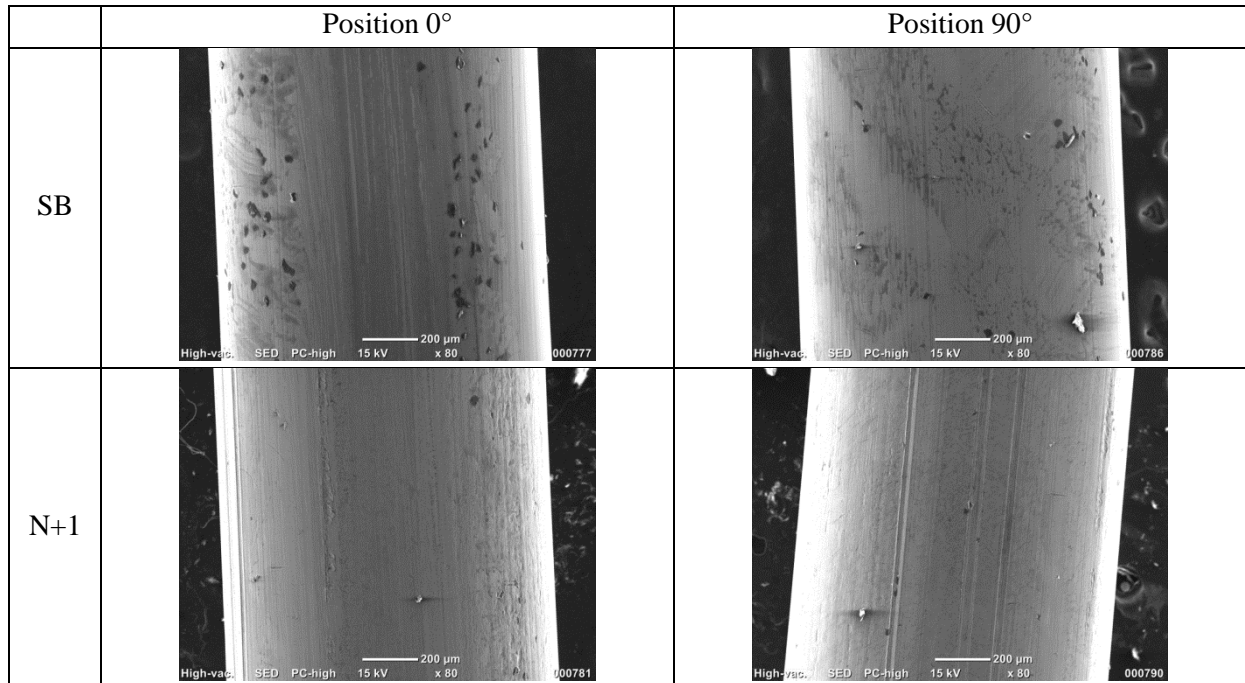


Tableau 10 : Images MEB du fil selon les deux orientations (Barre d'échelle : 200 μm , grossissement : x80, tension : 20 kV)

Des rayures et impacts sont observés sur l'ensemble des échantillons. Cela peut être expliqué par les différentes interactions subies par le fil en contact avec les galets, la gaine, le tube contact, mais aussi les autres spires de la bobine de fil (pour l'échantillon SB). Contrairement à l'échantillon SB, des rayures longitudinales sont observées. Celles-ci sont probablement les traces laissées par les galets à la surface du fil.

Les éléments principalement détectés sont bien l'aluminium et le magnésium à une valeur comprise entre 5.23 et 5.42 %. La moyenne s'établit à 5.33 % ce qui est cohérent avec la composition de l'alliage 5356 (Al Mg5) utilisé. Les deux autres éléments (l'oxygène et le carbone) ont été moyennés pour chaque pression (Figure 84). Le taux de carbone est légèrement plus élevé pour les échantillons ayant été en contact avec les galets. Le passage dans le circuit de dévidage (galets, gaine carbone, galets de torche et tube contact) a donc pollué le fil, mais dans des proportions relativement faibles (compris entre 2,5 et 5 %). En ce qui concerne l'oxygène, les taux s'établissent en moyenne de 0,62 à 1,48 %. Il n'y a pas de réelle tendance. La pression n'a donc visiblement pas d'influence sur cette valeur. Dans l'ensemble, les différences entre un échantillon provenant de la bobine et un échantillon ayant subi la pression des galets restent contenues et les écarts sont faibles.

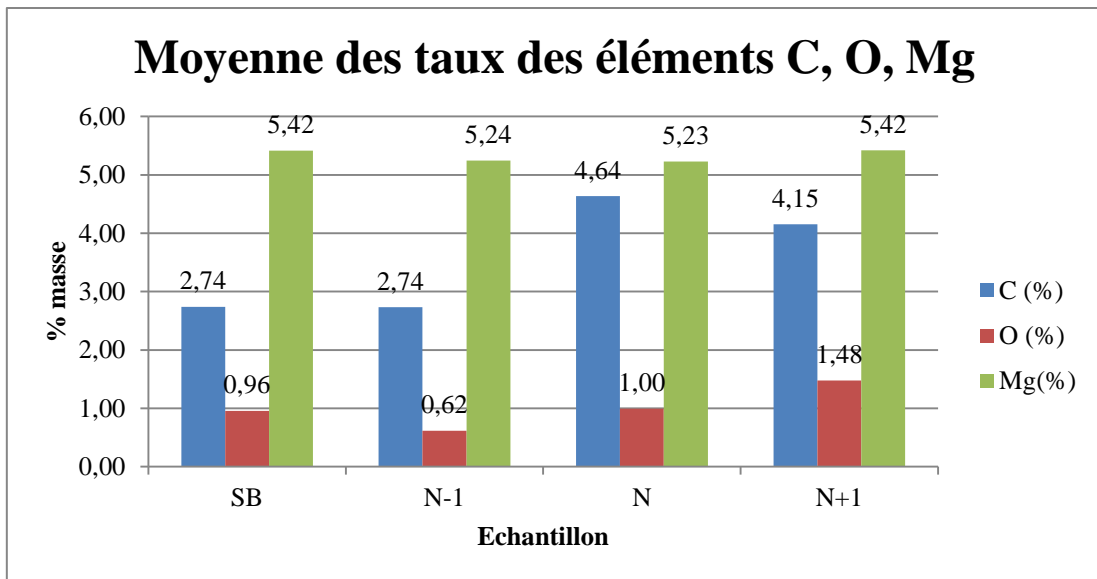


Figure 84 : Moyenne des pourcentages massiques des éléments carbone, oxygène et magnésium pour chaque échantillon

3.4. Conclusion sur l'effet de la pression exercée par les galets d'entraînement sur le fil

La méthode mise en place a pour but de mettre en évidence l'influence des interactions du fil avec les éléments constitutifs relatifs au procédé sur le fil. Il s'avère que géométriquement, l'effort exercé par les galets sur le fil n'engendre pas de déformation significative de ce dernier (l'ordre de grandeur est de 10 μm pour un fil de diamètre 1.2 mm). Il est difficile d'imaginer que cet écart ait une influence sur le bain de fusion. En revanche, le passage du fil dans le système de dévidage augmente la présence de carbone. Les frottements du fil avec la gaine (composé de carbone) sont probablement la cause de cette augmentation qui reste cependant contenue. Il y a donc une pollution du fil par le système de dévidage qui pourra conduire à des inclusions dans le dépôt. Dans tous les cas, la présence d'oxygène est détectée (environ 1 %), mais cela reste une valeur très faible. En conclusion, la pression de serrage n'a donc pas d'influence significative sur la géométrie du fil ni sur le taux de carbone présent le fil.

4. Conclusion sur le choix des paramètres et stratégies de fabrication

Une méthode de détermination et d'analyse a été développée pour effectuer le choix des paramètres et permettre la mise en œuvre de la fabrication WAAM en alliage d'aluminium. Une classification des conditions de dépôt a été construite. Les conclusions de cette méthode ont permis de créer une base de données de paramètres opératoires optimaux qui pourront être réutilisés pour d'autres applications (autres sections de cordon par exemple).

Le verrou lié à la faiblesse de l'accroche au substrat a été analysé et résolu par la mise en place d'un plan expérimental pour déterminer l'influence des paramètres opératoires sur les performances de

la liaison substrat-mur. Leurs principaux effets sur la résistance mécanique à l'arrachement et sur la déformation du substrat ont été quantifiés. Pour maximiser l'accroche, il faut augmenter l'apport de chaleur sur les premières couches, c'est-à-dire augmenter la vitesse du fil et réduire la vitesse d'avance.

Enfin, parmi la diversité des paramètres disponibles pour la mise en œuvre du procédé, une étude a été menée afin d'étudier les interactions du fil avec son environnement et notamment avec les galets d'entraînement, car il s'agit d'éléments réglables en contact avec le fil. Il apparaît que ces interactions ont une influence faible sur la géométrie et la composition chimique du fil.

Ce chapitre répond donc à la problématique du choix des paramètres opératoires pour la fabrication WAAM d'une pièce y compris la phase d'accroche. La méthode mise en place ici est applicable à d'autres matériaux (autres alliages d'aluminium, autres métaux ou alliages de métaux...).

Chapitre 4 : Caractérisation mécanique et santé matière

Les procédés de fabrication additive étant basés sur la fusion d'un métal d'apport, cela entraîne des transformations chimiques de la matière et des modifications de la structure interne du métal apporté lors de la phase de refroidissement. Ces transformations affectent donc également les performances mécaniques des composants, mais aussi la structure des matériaux. Cela constitue donc une problématique au regard des performances des composants fabriqués qui doivent être conformes au cahier des charges.

Ce chapitre se divise en trois parties. Dans un premier temps, une caractérisation mécanique des éléments fabriqués est menée (à l'échelle de la pièce). L'objectif est de quantifier et d'analyser les performances mécaniques des pièces obtenues en WAAM. Deux aspects sont étudiés : la résistance mécanique et la tenue en fatigue pour les alliages d'aluminium.

Dans une seconde partie, nous nous intéressons à la microstructure. Le but est de mettre en évidence l'influence d'une étape de refroidissement forcé entre passes. La porosité, la densité et la dureté sont quantifiées afin de mettre en avant l'intérêt de cette opération entre passes.

Enfin, la troisième partie a pour but de déterminer les paramètres de remplissage optimaux pour obtenir une fusion correcte entre les couches et résoudre le problème du manque de mouillage entre les couches évoqué au chapitre 2.

1. Caractérisation mécanique des éléments fabriqués en WAAM

Il a été mis en évidence au chapitre 2 la capacité du procédé à déposer des parois horizontales. Ces dernières présentent un intérêt pour la fabrication de profilés de structure en « T » qui assurent de bonnes propriétés de raidissement. Cependant, une caractérisation des performances mécaniques est nécessaire afin de valider la pertinence du procédé au regard des attendus du cahier des charges pour des pièces aéronautiques par exemple. Deux valeurs de sorties ont été étudiées : la résistance mécanique et la tenue en fatigue.

La structure en « T » peut être divisée en deux zones : le mur et les talons (Figure 85 (a)). La démarche a consisté à prélever des éprouvettes dans chacune de ces parties que ce soit pour des études de traction (voir Annexe 1 : Eprouvettes de traction de type « A » et « M ») ou de fatigue (voir Annexe 2 : Eprouvettes de fatigue de type « A » et « M »).

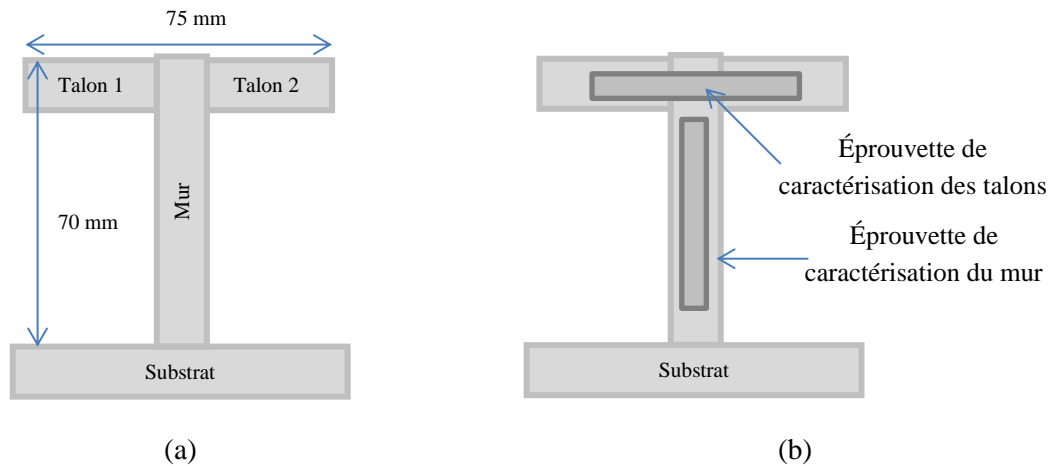


Figure 85 : Schématisation de la structure en « T » (a) Position des éprouvettes (b)

Une étape préalable a consisté à quantifier la résistance mécanique du fil pour comparer les propriétés avant dépôt (fil) et après dépôt (éprouvette).

1.1. Résistance mécanique sous contrainte de traction

1.1.1. Caractérisation mécanique du fil déposé (Al Mg5)

Des échantillons de fil ont été prélevés en sortie de bobine et pour différentes valeurs de serrage des galets d'entraînements, afin de mesurer la résistance mécanique du fil avant dépôt. La démarche est identique à celle employée au chapitre 2. La dénomination des échantillons est la suivante (échelle de réglage de 1 à 5, valeur nominale utilisée 3.5) :

- 1 échantillon avec la pression nominale noté « N »
- 1 échantillon avec une pression plus élevée noté « N+1 »
- 1 échantillon avec une pression plus faible noté « N-1 »
- 1 échantillon prélevé directement dans la bobine (sans serrage appliqué) noté « SB »

Les valeurs de résistance mécanique pour le fil brut sont très élevées (les valeurs expérimentales mesurées sont en moyenne de 440 MPa) du fait de l'effet d'écrouissage généré par le tréfilage (procédé d'obtention du fil). C'est pourquoi une étape préalable de traitement thermique des échantillons (à une température de 350°C pendant 1h) a été effectuée pour obtenir un matériau dont les propriétés sont proches de celles de la matière déposée.

Pour chaque type d'échantillons, la résistance mécanique a été mesurée en traction (quatre essais par échantillon). Les résultats obtenus (valeur moyenne des quatre essais) sont présentés sur la Figure 86.

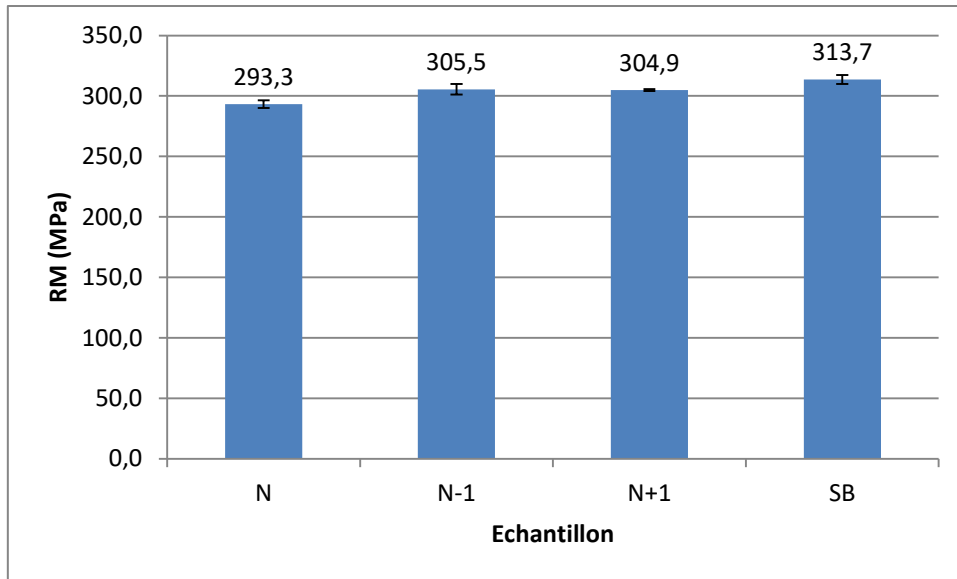


Figure 86 : Résultats des essais de traction

Les valeurs de résistance mécanique s'échelonnent entre 293 MPa et 313 MPa. Les échantillons ayant subi une pression par les galets ont des performances mécaniques légèrement plus faibles que ceux prélevés dans la bobine. La résistance mécanique varie peu entre les différents échantillons avec serrage (Echantillons N, N-1, N+1). La pression de serrage a visiblement peu d'influence sur la résistance mécanique. Dans la suite, à titre de comparaison, nous utiliserons une valeur de résistance mécanique moyenne de 301 MPa qui correspond à la moyenne des résistances mécaniques des échantillons ayant subi la pression de serrage des galets.

1.1.2. Caractérisation mécanique du mur

Afin de mesurer la résistance mécanique à la traction des composants fabriqués, quatre éprouvettes ont été prélevées dans le mur (Figure 87), notées M1 à M4. Les résultats des essais de traction sont présentés sur la Figure 88. Les éprouvettes sont positionnées perpendiculairement à la direction de dépôt afin d'étudier le cas le plus défavorable.

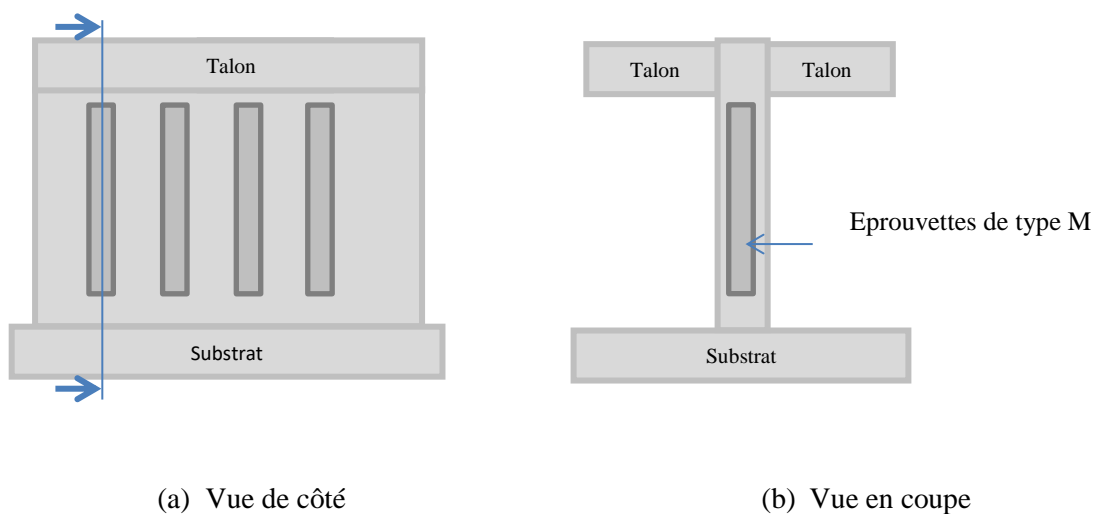


Figure 87 : Position des éprouvettes de traction de type M

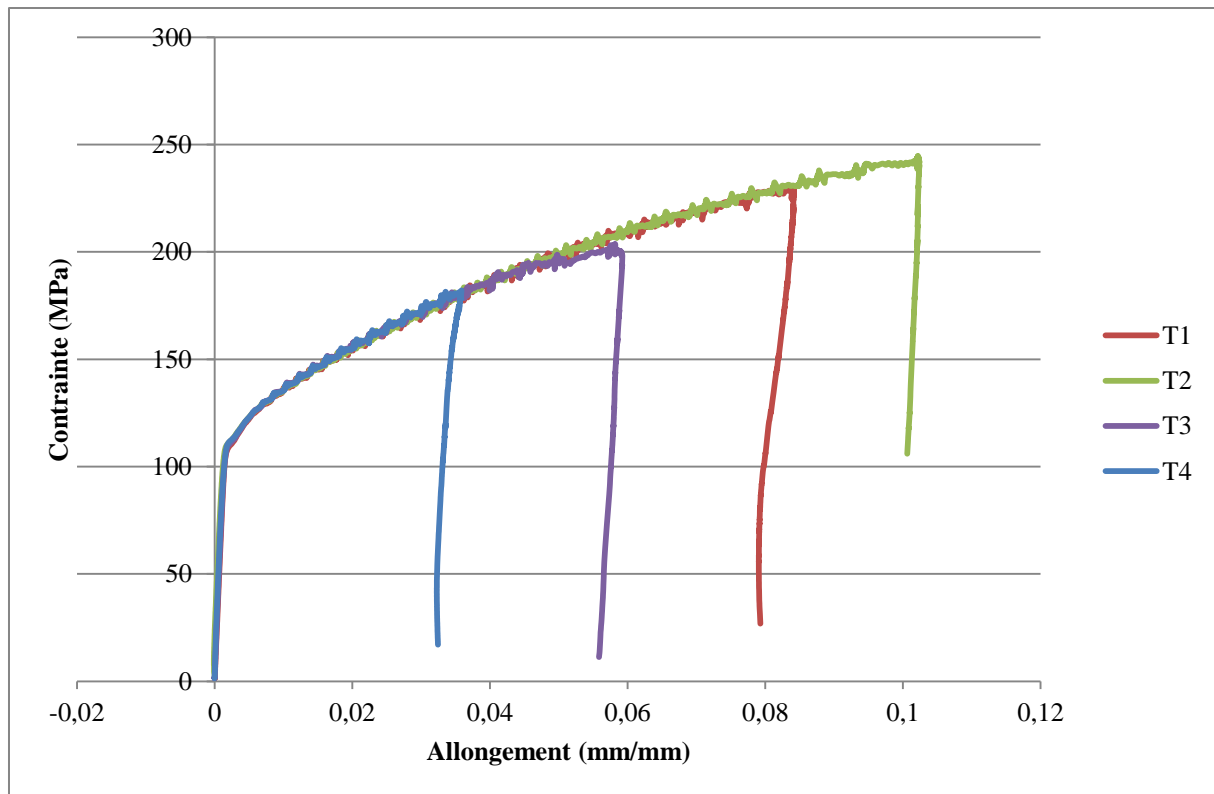


Figure 88 : Résultats des essais de traction des éprouvettes M1 à M4

Nous observons une bonne répétabilité des 4 échantillons sur la zone élastique. La limite élastique des éprouvettes est de 105 MPa. La limite élastique donnée pour le métal déposé est de 120 MPa (Annexe 3 : Certificat du fil Al Mg5 (5356)). Les caractéristiques élastiques sont donc peu dégradées.

En ce qui concerne la zone plastique et notamment la limite à la rupture, des variations importantes sont observées entre les différentes éprouvettes (de 220 MPa à 256 MPa). En comparaison avec les valeurs mesurées sur le fil, ces valeurs sont jusqu'à 25% inférieures. Cependant, ces valeurs sont comparables à celle d'un joint soudé : 265 MPa (Annexe 3 : Certificat du fil Al Mg5 (5356)). L'allongement à la rupture est compris entre 7 et 11% selon l'éprouvette. Cet allongement est plus faible par rapport à un joint soudé : 26 % (Annexe 3 : Certificat du fil Al Mg5 (5356)).

1.1.3. Caractérisation mécanique des talons

Pour la caractérisation mécanique des talons, la même démarche qu'en 1.1.2 a été employée. Quatre éprouvettes ont été prélevées notées T1 à T4. Les résultats des essais de traction de ces dernières sont présentés sur la Figure 90.

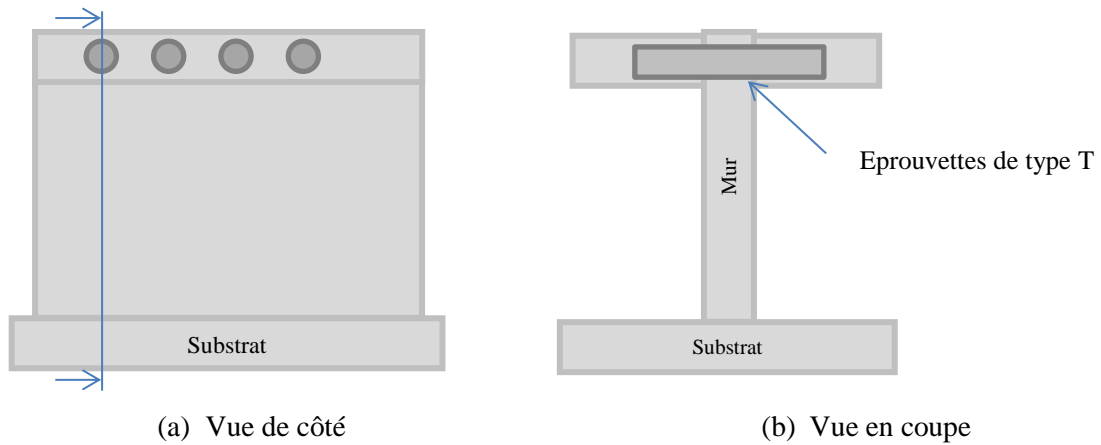


Figure 89 : Position des éprouvettes de traction de type T

Nous observons, comme pour les murs, une bonne répétabilité des 4 échantillons sur la zone élastique. La limite élastique moyenne des éprouvettes se situe à 105 MPa. Les caractéristiques élastiques sont à nouveau peu dégradées.

En ce qui concerne la zone plastique et notamment la rupture, il y a de nouveau une forte variabilité. Les valeurs de résistance mécanique s'échelonnent de 194 à 243 MPa selon les éprouvettes et sont donc plus faibles que pour les murs.

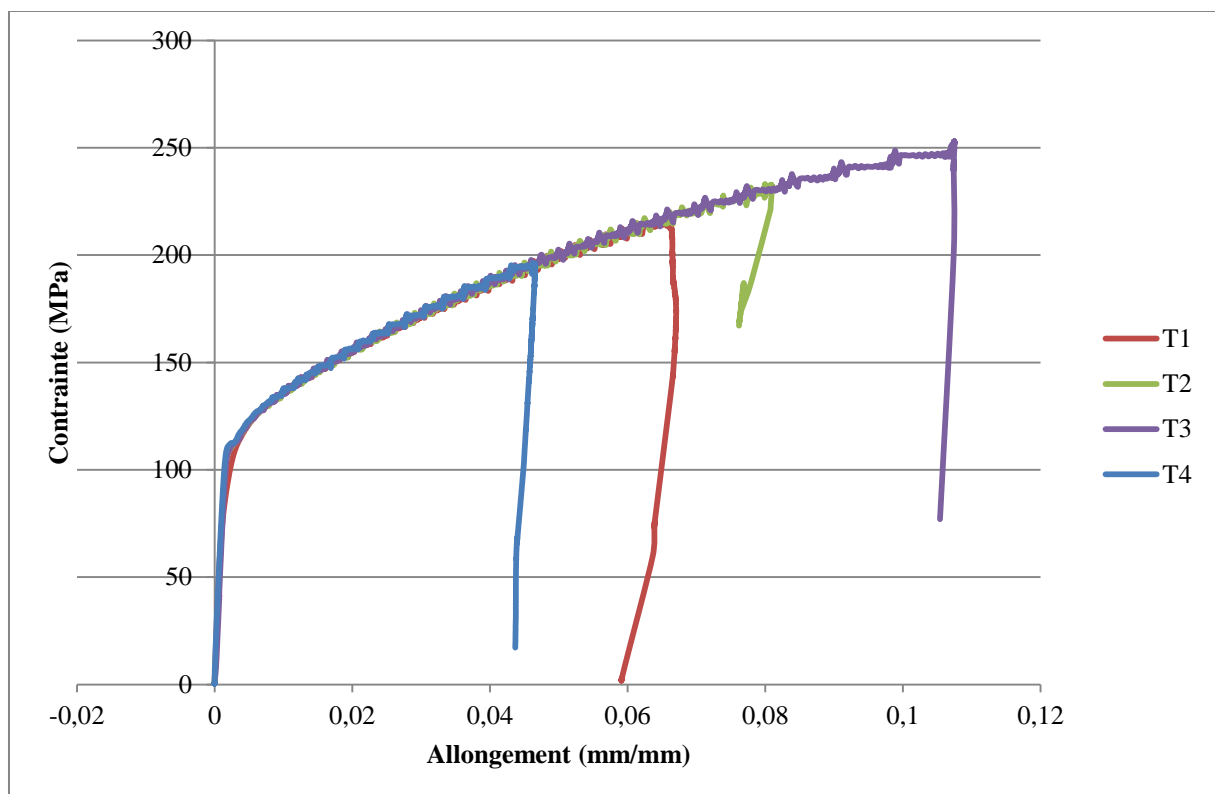


Figure 90 : Essais de traction des éprouvettes T1 à T4

1.1.4. Conclusion sur la résistance mécanique

Les résultats des essais sont regroupés sur la Figure 91.

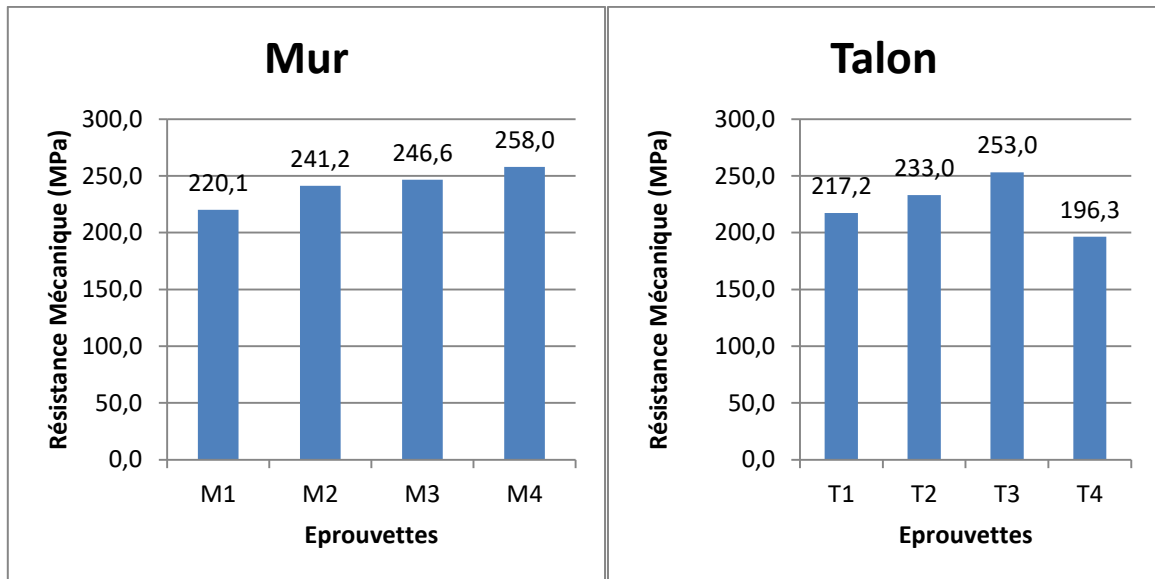


Figure 91 : Valeurs de Résistance Mécanique (RM) pour le mur et pour les talons

Les propriétés élastiques dans le mur sont comparables à celles du métal déposé, mais plastiquement, les valeurs des résistances mécaniques sont plus faibles et une variabilité importante selon l'échantillon est observée.

Ces écarts peuvent s'expliquer par la présence de défauts au niveau de l'interface entre deux couches. En effet, une concentration de contrainte peut se créer au niveau de cette interface (amorce de rupture) et affecter ces valeurs de résistance mécanique. Cela peut également réduire l'allongement à la rupture. De plus, l'essai de traction est réalisé dans une direction perpendiculaire à la couche, ce qui est le cas le plus défavorable.

D'autre part, dans le cas des talons, nous constatons des manques de fusion au niveau des zones de rupture (Figure 92) ce qui peut expliquer la variabilité et la faiblesse des résistances mécaniques mesurées. Ces zones de rupture sont situées à l'interface entre le mur et les talons, qui constituent une zone d'accroche où des inclusions et des manques de fusion peuvent apparaître et expliquer ces différences selon l'éprouvette.

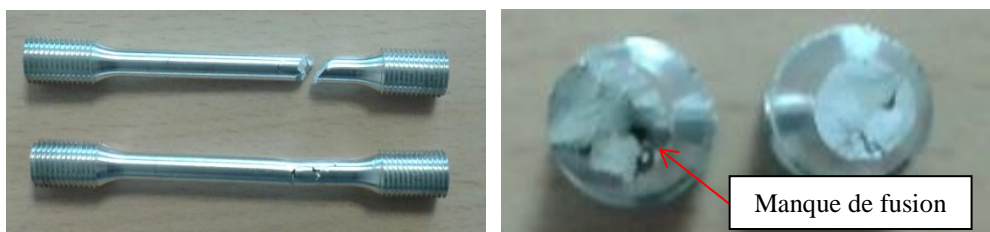


Figure 92 : Profil et section des éprouvettes de type Talon après rupture

Les propriétés mécaniques de la matière déposée sont acceptables en ce qui concerne de la résistance mécanique. L'utilisation du procédé WAAM avec cette nuance de matériau est pertinente pour la fabrication de pièces.

1.2. Tenue en fatigue

Les éléments de structure aéronautique étant fortement sollicités en fatigue [64], il est donc intéressant de quantifier la résistance des éléments fabriqués au regard de cette grandeur. Une étude a été menée afin de mesurer la tenue en fatigue du mur et des talons. Cette étude a consisté à solliciter 10 éprouvettes de chaque type (mur et talon) avec un chargement cyclique. Chaque série d'éprouvettes a été sollicitée à différentes valeurs de chargement (de 80 à 200 MPa) et à une fréquence de 30 Hz.

1.2.1. Résultats des essais de fatigue

Les courbes de Wöhler (contraintes en fonction du nombre de cycles ou SN) sont présentées en Figure 93 et Figure 94 respectivement pour les éprouvettes de type mur et talon.

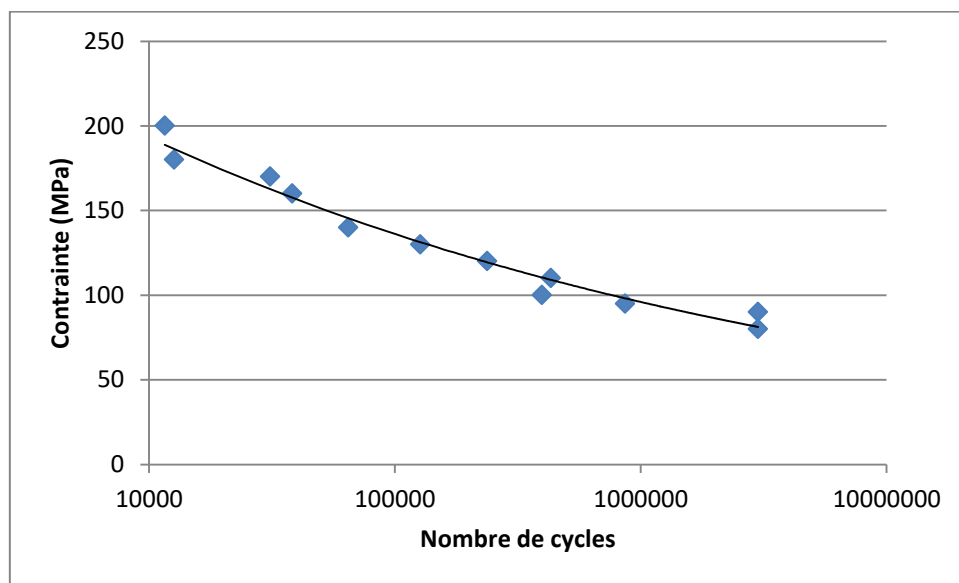


Figure 93 : Courbe SN des éprouvettes de type "Mur"

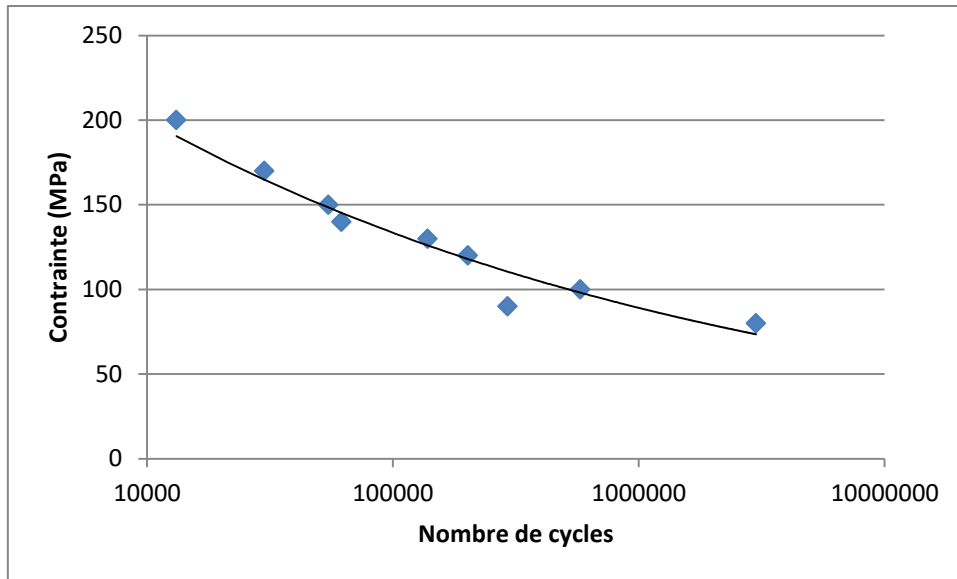


Figure 94: Courbe SN des éprouvettes de type talons

Nous constatons que dans ces deux cas, les résultats obtenus ont permis de construire des courbes par interpolation, typique des résultats d'essais de fatigue. Les contraintes pour les durées de vies à 10^5 et 10^6 cycles sont présentées dans le Tableau 11.

Nombre de cycles	10^5	10^6
Contrainte de fatigue (Mur)	136 MPa	96 MPa
Contrainte de fatigue (Talon)	133 MPa	88 MPa

Tableau 11 : Résultats de fatigue

1.2.2. Conclusion sur les résultats de tenue en fatigue

Les durées de vies à 10^5 et 10^6 sont comparables, quel que soit le type d'éprouvettes. En comparaison avec des joints soudés avec un alliage 5083, les données pour ces mêmes durées de vies sont respectivement de 92 MPa et 52 MPa [65]. La fabrication additive de couches successives monocordons génère un effet de traitement thermique qui améliore la liaison par rapport à un joint soudé. Pour les pièces fabriquées en WAAM ici, les résultats de tenue en fatigue sont tout à fait corrects. Cette conclusion est intéressante, notamment pour les pièces destinées aux applications aéronautiques. Cela démontre la pertinence du procédé pour ce domaine d'étude.

2. Influence du refroidissement inter passe sur la santé matière de dépôt WAAM

La santé matière du métal déposé peut être améliorée à l'aide d'une opération de roulage (voir chapitre 1). Cependant, ceci est compliqué à mettre en œuvre sur des géométries de pièces réelles. En effet, cela nécessite de générer un effort presseur important pouvant atteindre 45 kN [66] pour les alliages d'aluminium. D'autre part, cette opération limite la flexibilité du procédé à des géométries simples. Pour pallier ces limites, nous avons cherché un autre moyen pour améliorer la santé matière.

Dans le domaine du moulage par gravité, il a été montré que la vitesse de refroidissement peut influencer la porosité des alliages d'aluminium et donc leurs propriétés mécaniques. Un refroidissement rapide peut réduire la formation de pores lors de la phase de solidification [67], c'est pourquoi nous avons cherché à mettre en œuvre un système de refroidissement forcé pour le procédé WAAM. Pour évaluer l'effet de ce système, nous avons étudié la microstructure et plus particulièrement, la porosité, la micro dureté et la masse volumique.

2.1. Protocole expérimental

Le processus de fabrication est divisé en deux étapes : une étape de fabrication de la couche (l'effecteur est la torche) et une étape de refroidissement (l'effecteur est un refroidisseur à air comprimé).

La démarche expérimentale a consisté à fabriquer des murs monocordons avec une stratégie de type « aller simple » sur un total de 20 niveaux. Après le dépôt d'une couche, l'opération de refroidissement est effectuée. La vitesse d'avance est fixée à 800 mm/min pour la fabrication et le refroidissement. Le sens est également identique dans les deux cas. La Figure 95 schématise la position des effecteurs par rapport au mur pour chaque opération. Les paramètres de dépôt sont rappelés dans le Tableau 12.

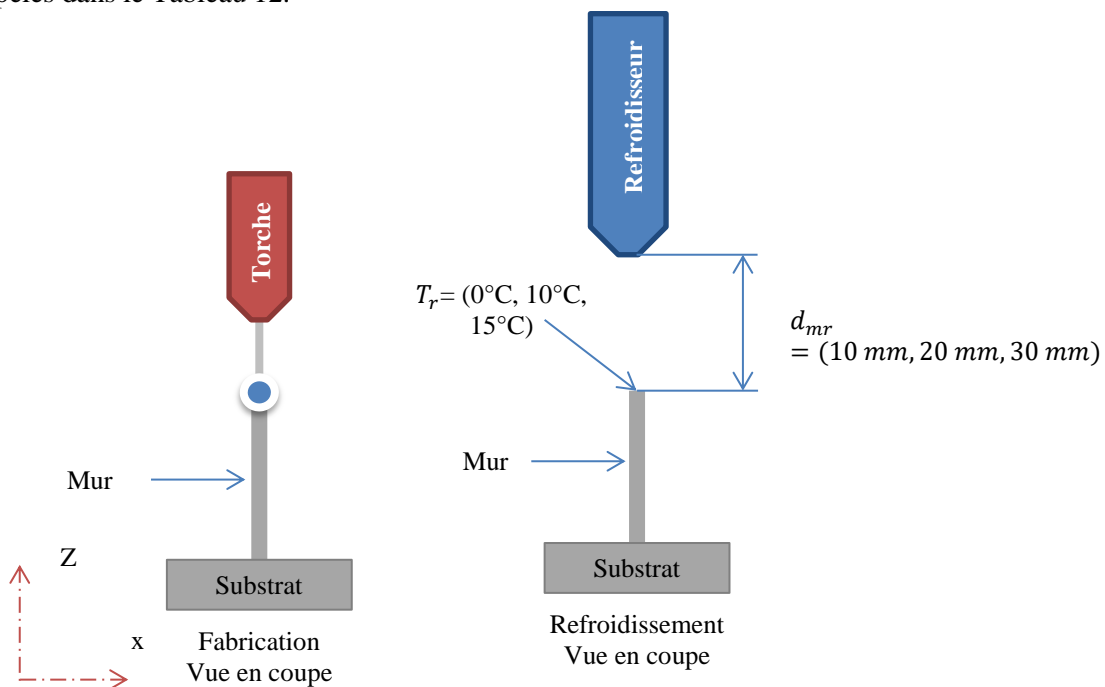


Figure 95 : Position de la torche et du refroidisseur par rapport au mur

Couches	WFS (m/min)	TS (mm/min)	Courant moyen (A)	Tension moyenne (V)	Débit de gaz protecteur - Argon (L/min)
2 premières couches	9	800	122	10.3	18
Couches suivantes	7	800	96	9.8	

Tableau 12 : paramètres du procédé

Deux paramètres ont été choisis pour étudier l'influence du refroidissement forcé : la température de refroidissement T_r et la distance mur-refroidisseur d_{mr} . Le Tableau 13 indique les valeurs de ces deux paramètres pour les différents essais réalisés. Un essai témoin pour lequel le refroidisseur était désactivé a également été effectué (essai n°10).

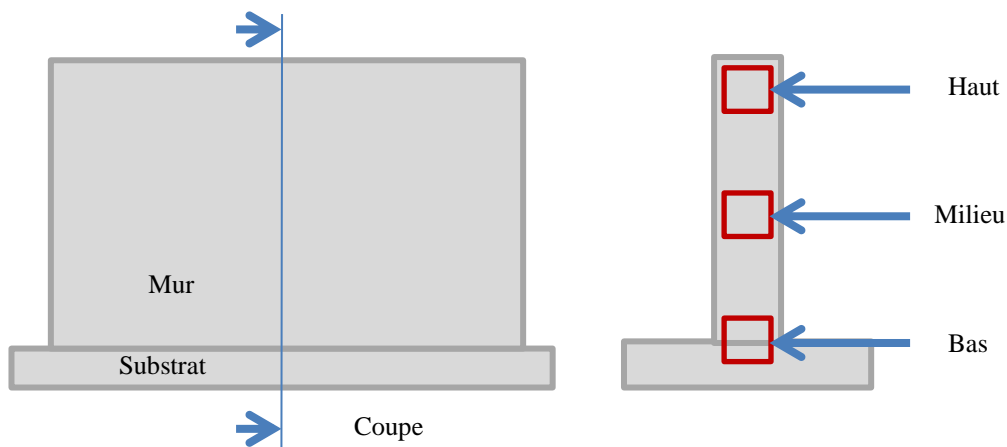
Essai	Température de refroidissement T_r (°C)	Distance mur-refroidisseur d_{mr} (mm)
1	0	10
2	0	20
3	0	30
4	10	10
5	10	20
6	10	30
7	15	10
8	15	20
9	15	30

Tableau 13 : Paramètres expérimentaux

Les niveaux de température ont été choisis afin d'augmenter le différentiel de température par rapport à l'air ambiant (environ 20°C). Pour les distances entre le mur et le refroidisseur, nous avons choisi deux premiers niveaux de 10 mm et 20 mm, comparables à la distance entre la torche et le dépôt (environ 14 mm). Nous avons également choisis un troisième niveau à 30 mm, plus éloigné du dépôt pour observer un éventuel effet négatif d'un flux de refroidissement trop proche du métal déposé.

2.2. Résultats

Après fabrication, pour chaque essai, un échantillon a été prélevé au milieu du mur (Figure 96 (a)) afin d'étudier la microstructure sur la hauteur de ce dernier et à trois niveaux : haut, milieu et bas (Figure 96 (b)).



(a) Mur - Vue de côté

(b) Mur - Vue en coupe

Figure 96 : Position des zones d'observations

2.2.1. Mesure de la porosité

Après polissage et attaque chimique (solution à 10% d'acide fluorhydrique), et pour chacune des conditions opératoires, les échantillons ont été observés au microscope optique (en réflexion). Les images obtenues sont présentées dans le Tableau 14.



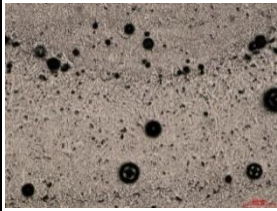
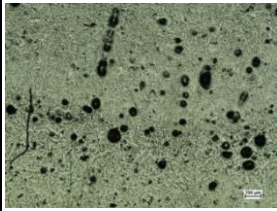
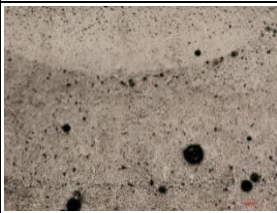

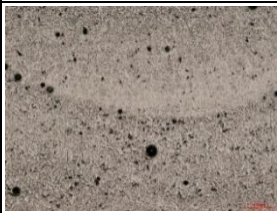
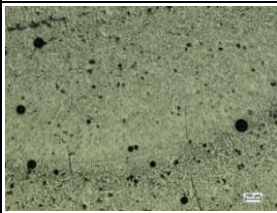
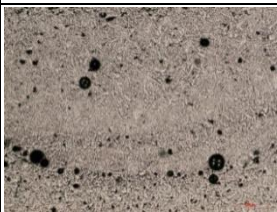

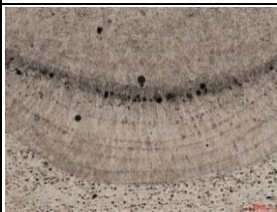
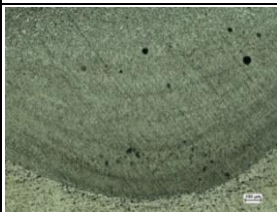

Essai	Essai 3 $T_r = 0^\circ\text{C}$ $d_{mr} = 30\text{ mm}$	Essai 5 $T_r = 10^\circ\text{C}$ $d_{mr} = 20\text{ mm}$	Essai 6 $T_r = 10^\circ\text{C}$ $d_{mr} = 30\text{ mm}$	Témoin
Haut				
Milieu				
Bas				
Barre d'échelle 200 μm 				

Tableau 14 : Métallographies observées pour murs fabriqués en WAAM avec différentes conditions de refroidissement (essais 3, 5, et 6) et sans refroidissement (essai témoin)

Pour chaque essai, nous avons quantifié le taux de porosité par traitement d'images. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 97.

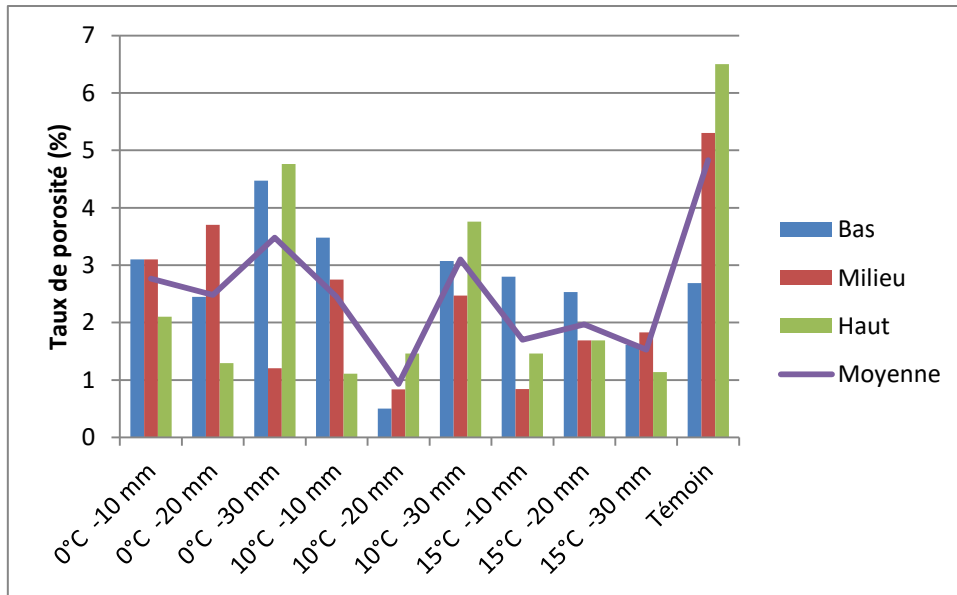


Figure 97 : Taux de porosité mesuré (la moyenne pour chaque essai est également indiquée)

Nous pouvons observer que l'échantillon témoin comporte beaucoup de porosités (en particulier pour la zone haute du mur) par rapport aux autres essais avec refroidisseur. Le refroidissement forcé permet donc de diminuer le taux de porosité. Par ailleurs, nous constatons que les conditions de l'essai n°5 ($T_r = 10^\circ\text{C}$, $d_{mr} = 30\text{ mm}$) conduisent au taux moyen de porosité minimal (0.93 %), soit presque cinq fois moins que l'échantillon témoin (4.83 %). Le diamètre moyen des pores est également le plus faible (35 μm) pour cet essai alors que pour l'échantillon témoin, il s'élève à 82 μm .

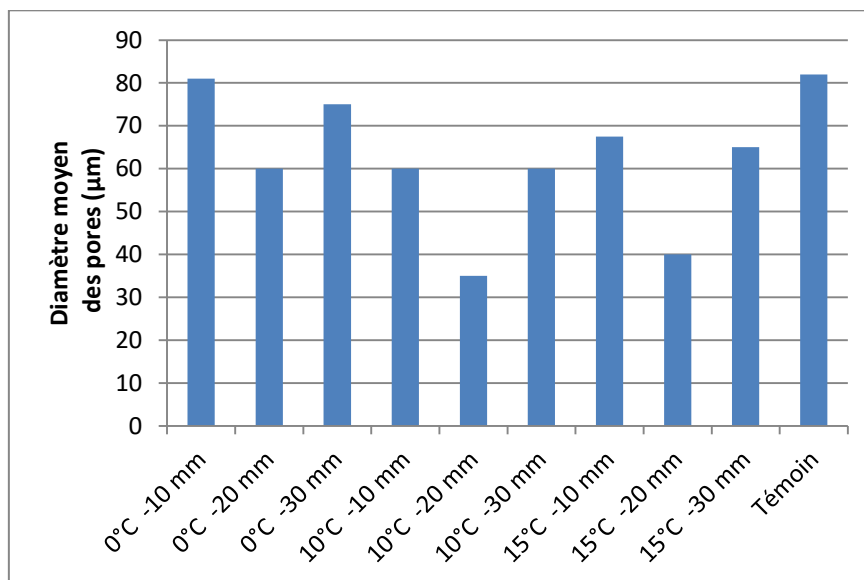


Figure 98 : Diamètre moyen des pores

Le dihydrogène dissous dans le bain de fusion est à l'origine de la formation de pores lors de la phase de solidification. La solubilité du dihydrogène dans l'aluminium liquide augmente avec la température [68]. Ainsi, en accélérant cette phase de solidification avec le refroidissement forcé, la quantité de dihydrogène dissous en phase liquide diminue et donc moins de pores sont formés [67].

2.2.2. Mesure de la masse volumique

La masse volumique de chaque échantillon a également été mesurée en utilisant le principe de la double pesée d'Archimède. Ainsi, deux pesées sont effectuées, une première pesée dans l'air ambiant et une seconde dans un fluide (de l'éthanol a été utilisé pour réaliser la mesure). La température du fluide est relevée pour chaque mesure afin de corriger la valeur de densité du fluide. À partir de ces deux pesées, l'équation (Eq.15) relie la densité de l'échantillon aux masses mesurées :

$$\rho_p = \frac{m_a}{m_a - m_{fl}} (\rho_{fl}(T) - \rho_a) + \rho_a \quad (\text{Eq. 15})$$

ρ_p est la densité recherchée

m_a est la masse mesurée à l'air ambiant

m_{fl} est la masse mesurée dans le fluide

ρ_{fl} est la masse volumique du fluide

ρ_a est la masse volumique de l'air (0.0012 g/cm³ à 20 °C)

Les résultats de mesures sont présentés sur la Figure 99.

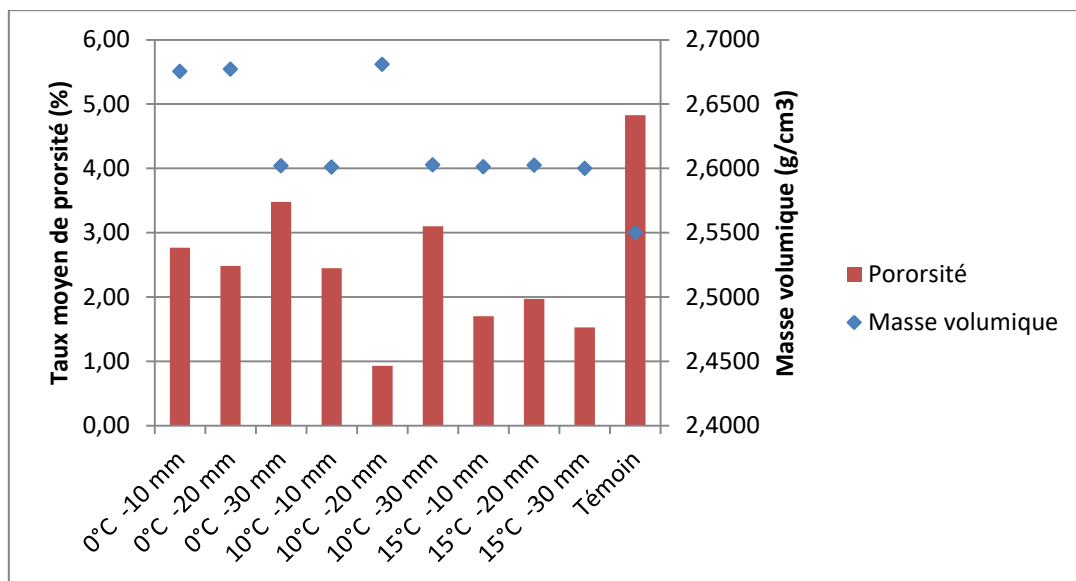


Figure 99 : Taux moyen de porosité et masses volumiques

Les valeurs de masses volumiques mesurées sont cohérentes avec celle de l'alliage d'aluminium AlMg5 (2.67 g.cm⁻³). La masse volumique la plus élevée est relevée pour les conditions de l'essai n°5 ($T_r = 10^\circ\text{C}$, $d_{mr} = 30$ mm), ce qui est cohérent avec les résultats de la partie précédente, car cela correspond au taux de porosité le plus faible. Cela confirme les observations de la microstructure par une mesure macroscopique.

2.2.3. Mesure de micro dureté

La micro dureté de murs fabriqués en WAAM a été mesurée afin de déterminer l'influence du refroidissement forcé. Pour l'ensemble des échantillons, la dureté est comprise entre 64 et 77 Hv pour

les essais avec refroidisseur alors que pour l'essai n°10 (témoin sans refroidisseur), cette valeur est de 58 Hv (Figure 100). La phase de refroidissement forcé permet d'améliorer la dureté et donc les propriétés mécaniques du composant fabriqué par rapport à l'essai témoin. Les résultats obtenus sont en accord avec les valeurs de la littérature pour les alliages d'aluminium ayant subi une opération de roulage de 15 kN : 78 Hv [44]. Le refroidissement forcé peut alors être envisagé pour remplacer une opération de roulage.

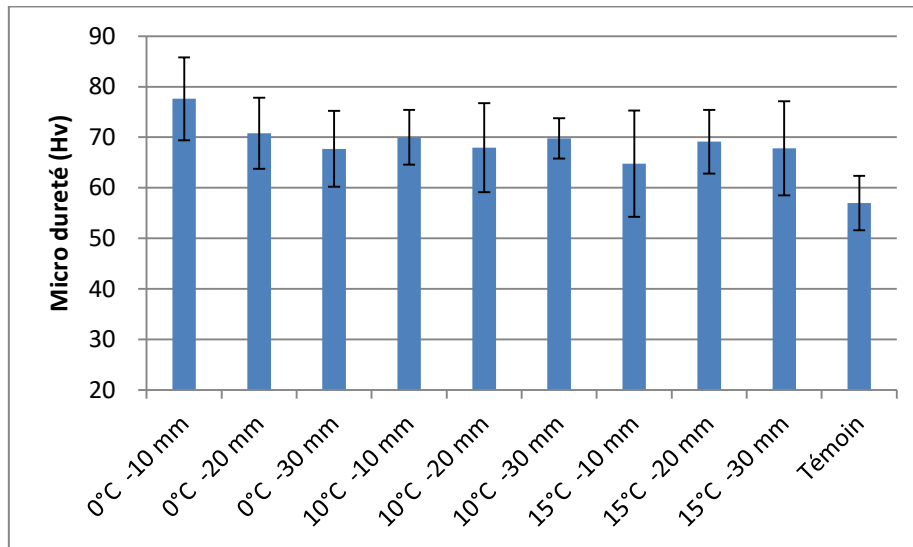


Figure 100 : Micro dureté (10 mesures par échantillon)

2.2.4. Conclusion sur l'influence du refroidissement forcé

La démarche expérimentale mise en œuvre a permis de mettre en évidence l'intérêt d'une étape de refroidissement forcé entre passes sur la santé matière. Cela permet de réduire d'une manière non négligeable le taux de porosité des éléments fabriqués. Les valeurs de dureté sont également améliorées et comparables avec des éléments ayant subi une opération de roulage.

De plus, la passe de refroidissement permet d'augmenter la vitesse de refroidissement de la couche déposée (effet de trempe) ce qui peut conduire à une fissuration de surface et aider à éliminer l'alumine sur la surface de chaque couche. La fusion entre la couche n et n+1 est donc meilleure ce qui permet d'améliorer les propriétés mécaniques. Cependant, le flux d'air froid peut perturber l'étape de fabrication (perturbation du flux de gaz protecteur), c'est pourquoi il est nécessaire soit de diviser en deux étapes le processus (fabrication puis refroidissement forcé) ou alors d'éloigner les deux effecteurs pour éviter les perturbations induites.

Un autre avantage du refroidissement forcé est l'absence de contact mécanique avec l'élément fabriqué. Cela permet donc une plus grande flexibilité sur les trajectoires outil (contrairement au roulage). De plus, cette opération ne génère aucun effort supplémentaire sur le système de déplacement (en négligeant la masse supplémentaire embarquée du système de refroidissement). Cette solution est pertinente par la fabrication de pièce WAAM notamment par rapport à l'opération de roulage.

3. Influence de l'angle de balayage sur la santé matière en remplissage

L'étude de la santé matière de composants monocordons a été menée dans la partie précédente. Un autre régime de fabrication concerne les composants de forte épaisseur fabriqués en remplissage. C'est pourquoi, il est également intéressant d'étudier la santé matière de ce type d'élément.

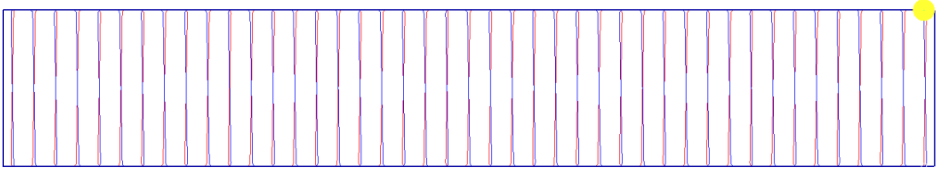
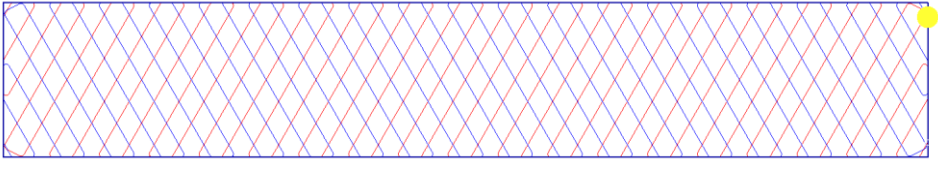
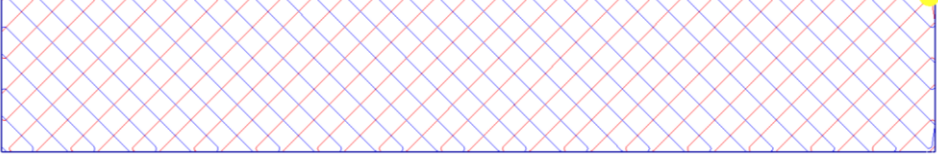
Le but de cette section est de mettre en évidence l'influence des paramètres de trajectoires sur la santé matière des pièces avec remplissage, afin d'améliorer le mouillage entre les cordons et d'obtenir une structure interne homogène.

3.1. Problématique rencontrée

Il a été mis en évidence au chapitre 2 la problématique du manque de mouillage des alliages d'aluminium. En effet, si la température entre passes est trop élevée, il peut apparaître un manque de fusion entre les cordons ce qui conduit à une dégradation de la structure interne. Pour assurer un remplissage homogène, la stratégie de remplissage par balayage zigzag est la plus efficace (voir chapitre 2). Pour optimiser cette stratégie, il est possible de modifier l'angle de balayage entre chaque couche. Le but de cette démarche expérimentale est en premier lieu de mettre en évidence l'influence de ce paramètre sur la santé matière (microstructure) et également de chercher à l'optimiser.

3.2. Stratégie employée

Le protocole expérimental consiste à construire des murs en remplissage avec une stratégie de balayage zigzag. Ces murs ont une section moyenne de 25 mm x 150 mm. La hauteur est de 100 mm. Différents angles de balayage ont été appliqués pour générer les parcours (Tableau 15).

Angle	Parcours d'outil (rouge : couche n, bleu : couche n+1, bleu foncé : frontière, jaune : outil)
0°	
30°	
45°	

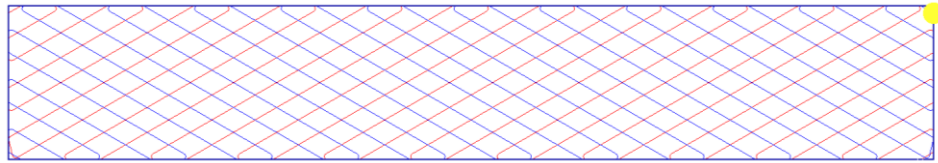
60°	
-----	--

Tableau 15: Parcours de remplissage générés pour la fabrication des échantillons

3.3. Résultats

Pour chaque angle appliqué, des images de la microstructure ont été effectuées pour observer la structure interne et notamment la taille des grains. Une observation a été effectuée dans le sens vertical et une autre dans le sens horizontal (Figure 101).

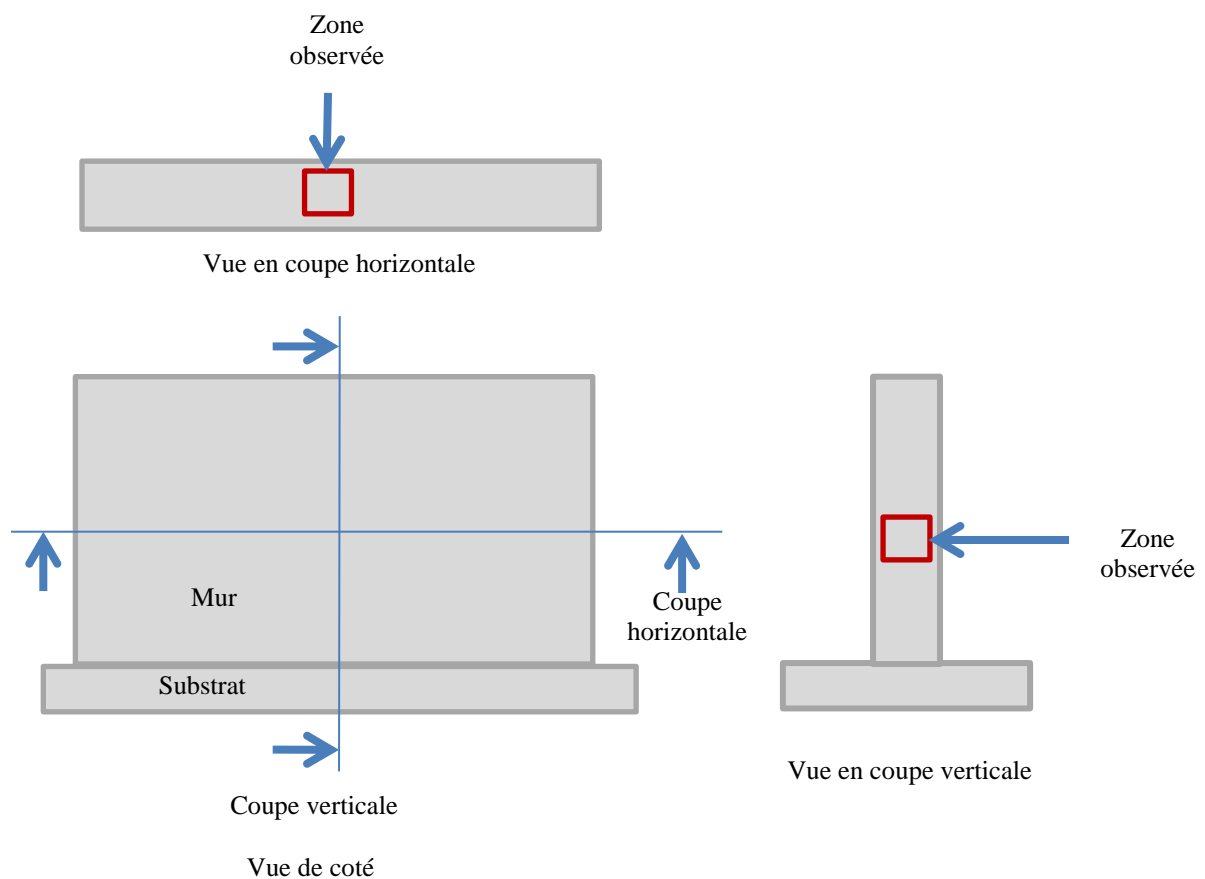


Figure 101 : Zones d'observation des murs fabriqués en WAAM

Le Tableau 16 présente des images de la microstructure de murs fabriqués en WAAM avec une stratégie de remplissage de type zigzag selon différents angles de balayage. En abaissant cet angle, nous observons une diminution du nombre de pores et de leur taille. De plus, la structure est plus compacte et la taille des grains est réduite. Des grains équiaxes sont majoritairement observés.

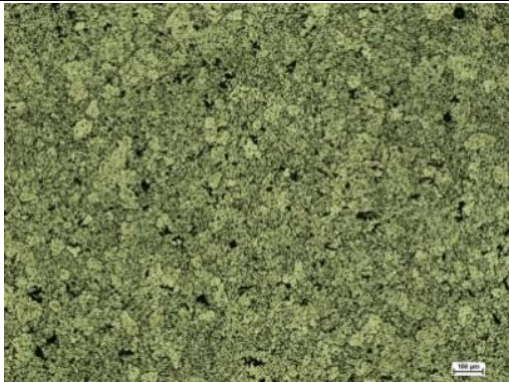
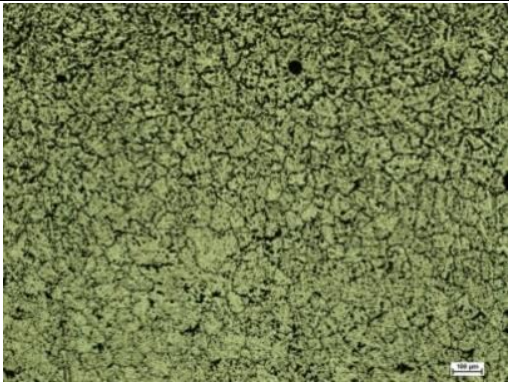
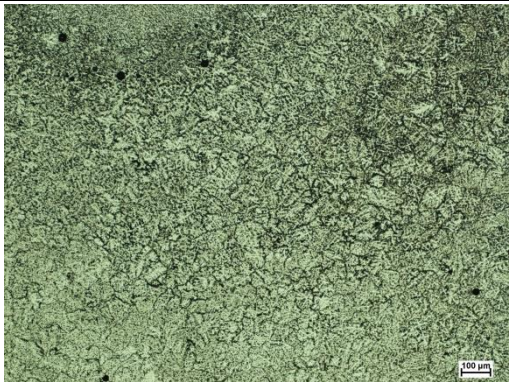
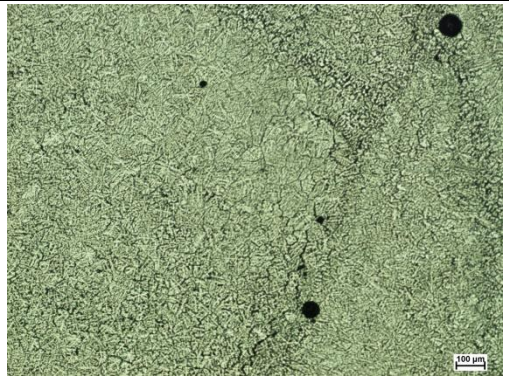
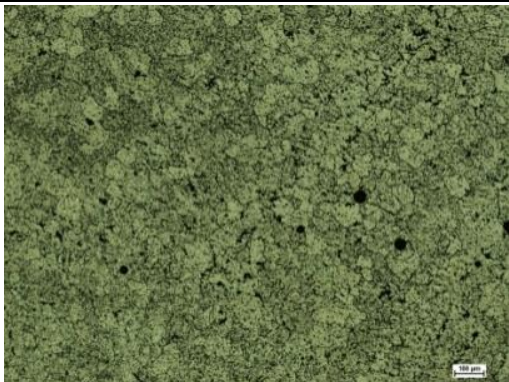
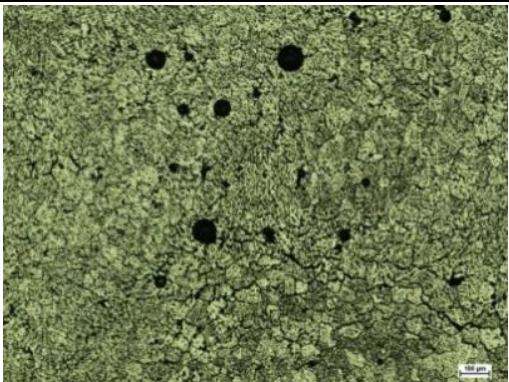
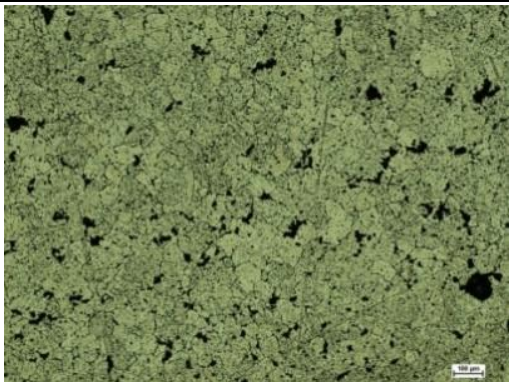
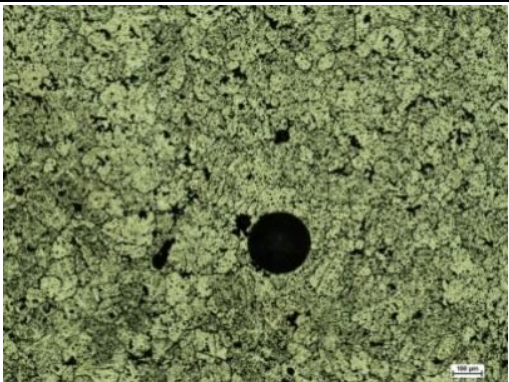
Angle	Horizontal	Vertical
0°		
30°		
45°		
60°		

Tableau 16 : Micro structures observées en fonction de l'angle de balayage

Lorsque l'angle est réduit, la longueur des parcours de balayage est réduite (Figure 102). Ainsi, la différence de température entre deux cordons voisins sur un même niveau est faible. Dans ces conditions, l'apport de chaleur important permet d'obtenir une bonne fusion entre les couches et le

cordon voisin, et ainsi d'avoir une phase de solidification lente [69]. La couche suivante rapporte de l'énergie pour fusionner en partie la couche précédente et favoriser le dégazage (et réduire la porosité). A l'inverse, lorsque l'angle augmente (par exemple 60°), la longueur de parcours augmente (Figure 102) donc l'outil met plus de temps pour revenir au même point. En conséquence, la différence de température entre passes est plus élevée du fait de cette augmentation de temps de parcours. Nous observons alors une structure composée de plus de dendrites qui traduit ce phénomène. Des manques de fusion ainsi que des pores de taille importante sont observés. Les propriétés mécaniques seront donc moins bonnes avec cette structure et ces conditions. En conclusion, l'angle de balayage de 0° est optimal car il permet d'obtenir une faible température entre passes et donc une structure interne compacte.

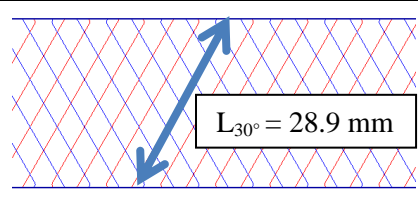
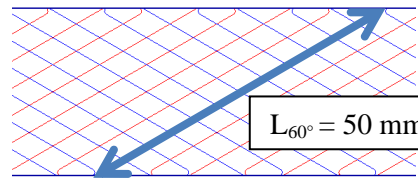
Angle	Portion de parcours
Exemple à 30°	
Exemple à 60°	

Figure 102 : Longueur de parcours en fonction de l'angle

4. Conclusion sur la caractérisation mécanique et la santé matière

La problématique liée à la santé matière des composants fabriqués a été étudiée dans ce chapitre à deux niveaux : à l'échelle macroscopique et à l'échelle de la microstructure.

Les performances mécaniques mesurées (en termes de résistances mécaniques) sont variables selon le type d'échantillon, mais comparables aux valeurs données pour le métal déposé. Une différence d'environ 30% est relevée entre un fil traité thermiquement et une éprouvette provenant d'un mur, mais reste comparable avec les données pour le métal déposé. Il y a donc une dégradation des performances mécaniques par l'opération de fabrication sur le matériau qui peut s'expliquer par la formation des défauts de la structure interne lors de la phase de fusion puis de refroidissement. Cependant, les résultats de tenue en fatigue sont meilleurs en comparaison à des joints soudés.

Afin de chercher à réduire ces défauts, nous avons mis en place un outil supplémentaire permettant d'agir sur les conditions thermiques du métal en phase de refroidissement. Ce dernier consiste à projeter un flux d'air froid sur le cordon après dépôt pour accélérer la phase de solidification. Les effets de ce dernier ont été quantifiés et ont permis de mettre en avant l'intérêt de cette opération sur la microstructure et notamment la réduction du taux de porosité et de la taille

moyenne des pores ainsi qu'une augmentation de la micro dureté. L'amélioration de ces caractéristiques est comparable à une opération de roulage, cependant, le refroidissement forcé est plus simple à mettre en œuvre et ne nécessite pas de générer des efforts importants (pas de contact entre l'effecteur et le métal déposé).

Enfin, pour des éléments fabriqués en remplissage, la santé matière a également été étudiée. L'effet de l'angle de balayage pour une stratégie de balayage zigzag a été mis en évidence. Plus ce dernier est faible, plus la microstructure compacte et la taille de grain est fine. Pour cela, il faut veiller à réduire la différence de température inter-cordons afin de maximiser le mouillage et donc l'homogénéité du remplissage.

Chapitre 5 : Fabrication additive WAAM sur support non plan

Les deux intérêts principaux de la fabrication additive sont la simplification des assemblages par la réduction du nombre de composants et la liberté de conception qui permet d'utiliser des géométries issues d'optimisations topologiques. Cela permet notamment de réduire la quantité de matière utilisée en ajoutant celle-ci uniquement où cela est nécessaire.

Habituellement, l'obtention d'une pièce avec un procédé de fabrication additive est réalisée sur un support plan, car celui-ci ne fait généralement pas partie de la pièce. Dans ce cas, il suffit de s'assurer que l'ensemble des parcours de la première couche est effectué sur le substrat sans collision et que la distance entre l'effecteur et le substrat est constante tout au long du parcours. Les outillages conventionnels de maintien en position sont suffisants pour ce type de substrat.

Nous pourrions également envisager de fabriquer des pièces sur un substrat fonctionnel. Dans ce cas, le support fait partie intégrante de la pièce et sa géométrie peut être non plane. C'est pourquoi, il est intéressant d'étudier la fabrication additive de composants sur des supports non plans, notamment des géométries courbées.

L'objectif de ce chapitre est de proposer des méthodes pour mettre en œuvre la fabrication WAAM sur des supports non-plans. Elles s'appliqueront notamment aux composants de structures de grandes dimensions, ce qui constitue une application de ce procédé. Une illustration de ces méthodes sera détaillée à la fin de ce chapitre, par un composant issu du domaine aéronautique.

1. Fabrication additive sur support simple courbure

Dans le cas de fabrication sur support non plan, la principale problématique est liée à la géométrie du substrat qui est ici directement fonctionnelle. Pour construire la maquette numérique, il est nécessaire de déterminer au préalable la géométrie du substrat (mesure). Si des écarts entre la maquette numérique et la pièce réelle existent et qu'ils ne sont pas pris en compte, les conditions de dépôt ne seront pas constantes sur l'ensemble du composant, ce qui peut engendrer des défauts. La seconde problématique est le positionnement du substrat. En effet, il doit y avoir une correspondance entre la position et l'orientation du repère pièce d'un point de vue réel (espace de travail) et d'un point de vue numérique (génération des trajectoires à partir de la maquette numérique). La troisième problématique est liée au bridage du composant en cours de fabrication qui pourra nécessiter l'utilisation d'outillage spécifique adapté à la géométrie du substrat. Une méthodologie est donc proposée pour mettre en œuvre la fabrication additive sur un support non plan. Dans un premier temps, nous étudierons le cas d'une géométrie simple courbure.

1.1.Approche proposée pour la fabrication sur un support simple courbure

L'objectif est de proposer une méthode afin de fabriquer une structure de type « T » sur un support simple courbure (portion de cylindre) de 500 x 500 mm. Le rayon de courbure théorique est de 500 mm. La démarche employée pour la fabrication du composant est décrite sur la Figure 103.

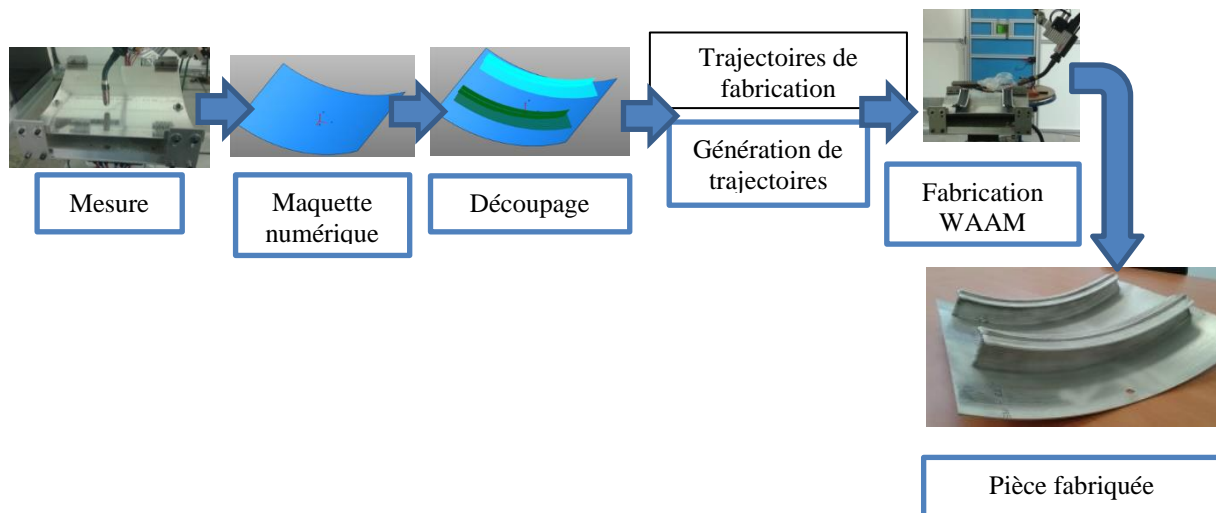


Figure 103 : Étapes de fabrication sur composant simple courbure

Nous retrouvons ici les différentes étapes de la méthode proposée au chapitre 2, à laquelle s'ajoute une première étape de **mesure** du substrat nécessaire à l'obtention de la **maquette numérique**.

Pour l'étape de **découpage**, la surface choisie n'est plus un plan, mais une surface qui présente une géométrie identique à celle de la tôle support (Figure 104) afin de conserver une distance constante entre cordons tout au long du parcours.

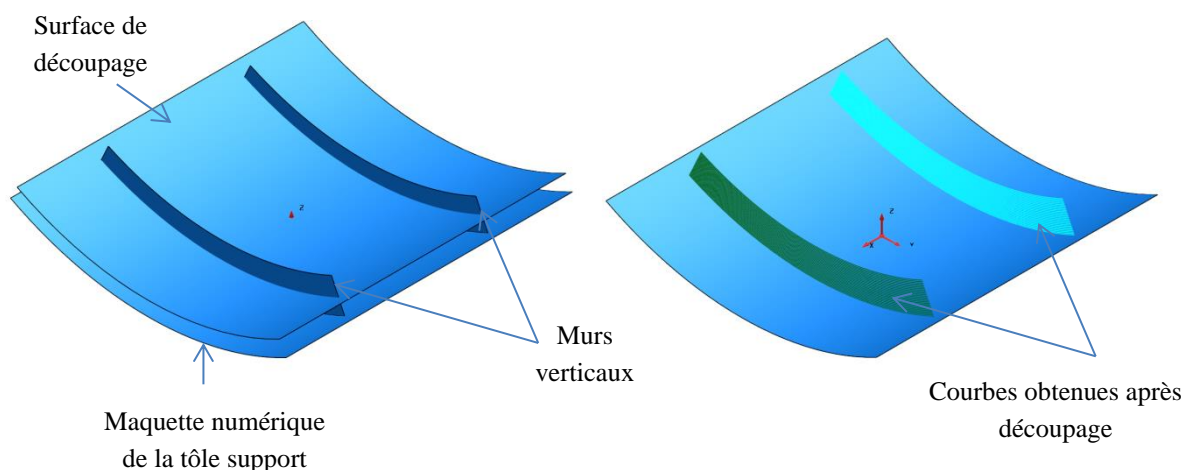


Figure 104 : Opération de découpage avec surface non plane

De plus, afin de conserver des conditions de dépôt homogènes et notamment pour maintenir un angle de l'outil constant par rapport à la surface de la tôle support, la **génération de trajectoires** s'appuie sur une orientation outil 5 axes (Figure 105 (a)) pour la fabrication des murs verticaux. Ainsi, l'axe de l'outil est toujours perpendiculaire à la surface et son orientation évolue en fonction de la courbure du support. Pour la fabrication des murs horizontaux, la démarche exposée au chapitre 2 (Fabrication de parois horizontales) a été appliquée (Figure 105 (b)).

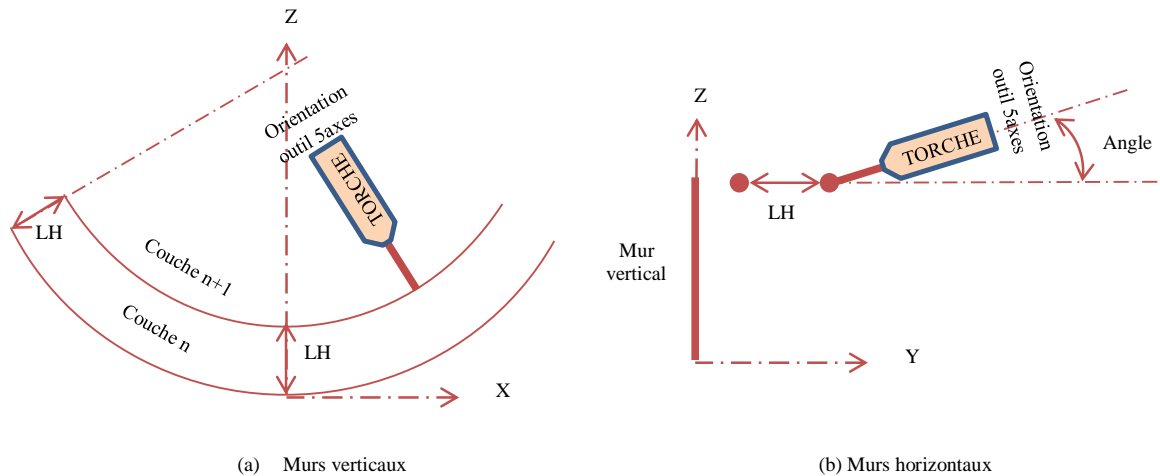


Figure 105 : Orientation de l'outil pour la fabrication

La démarche proposée a permis de fabriquer deux éléments de structure en « T » sur une tôle simple courbure (Figure 106). Cependant, la réalisation de ce composant a soulevé plusieurs problématiques qui sont explicitées à la section suivante.

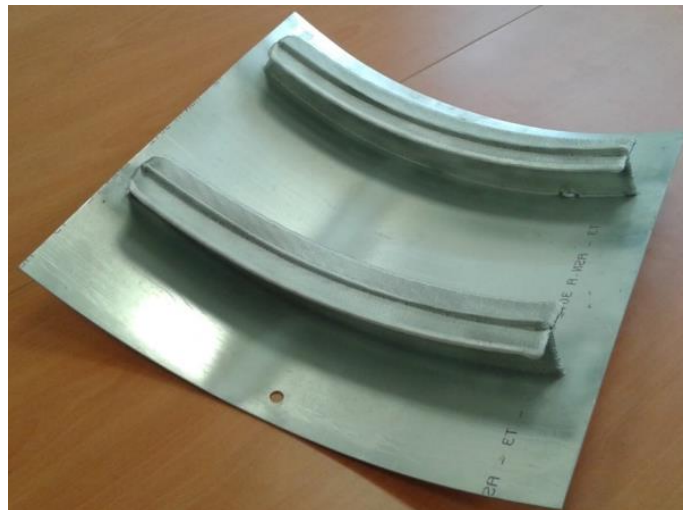


Figure 106 : Essai de fabrication sur tôle simple courbure

1.2. Problématiques mises en évidence

La première problématique concerne la géométrie du support, qui doit être mesurée pour construire la maquette numérique associée au modèle réel (**problématique n°1**). Il est important de noter que cette géométrie mesurée dépend aussi du bridage mis en place.

La seconde problématique identifiée concerne le maintien en position lors de la fabrication (**problématique n°2**) qui ne doit pas déformer le substrat et aussi contenir les déformations lors de la fabrication.

La troisième problématique relevée est la déformation de la tôle support (**problématique n°3**). En effet, sur les zones non bridées lors de la fabrication, des déformations importantes sont observées.

La quatrième problématique concerne l'accroche au substrat (**problématique n°4**). En effet, sur un composant de cette dimension, le flux de chaleur évacué par diffusion thermique est important, ce qui peut entraîner une moins bonne dilution entre le support et la première passe (voir chapitre 3) et donc une accroche trop faible. De plus, les parois horizontales, intéressantes pour le raidissement, sont déposées à la fin de la fabrication. Cela génère donc un apport de chaleur sur la partie supérieure de la pièce qui entraîne des contraintes internes importantes lors de la phase de refroidissement notamment au niveau de la base du mur (Figure 107).

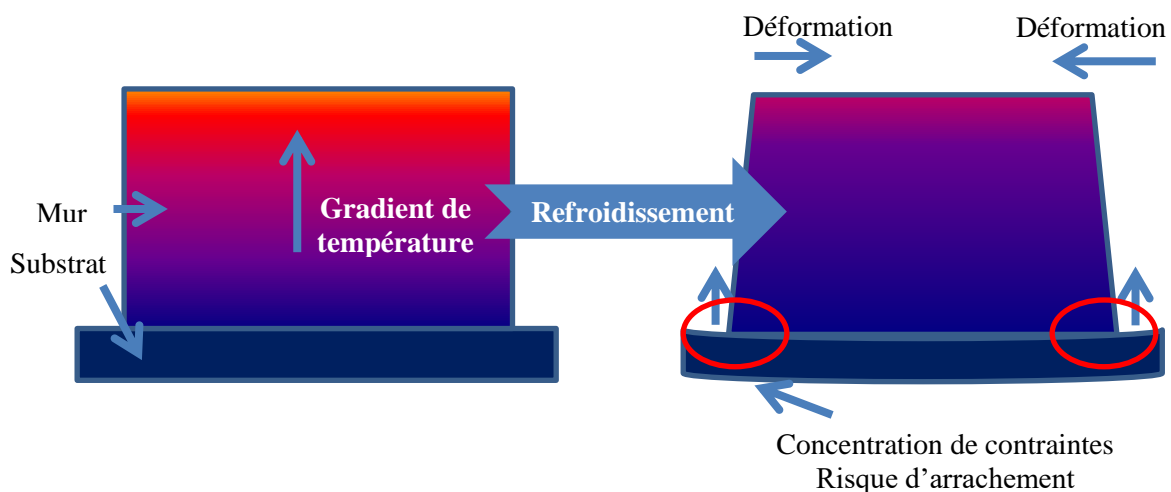


Figure 107 : Risque d'arrachement des extrémités de murs lors du refroidissement

1.3. Méthodes de résolution proposées

Pour répondre aux problématiques mises en évidence en 1.2, nous proposons plusieurs méthodes de résolution. Elles seront illustrées par la fabrication d'un composant fonctionnel sur support non plan de grandes dimensions à la fin de ce chapitre.

La première concerne le bridage de la tôle qui constitue une étape préalable à la mise en œuvre du procédé. Pour résoudre cette problématique, il est nécessaire d'adapter l'outillage à la tôle support. Il faut donc utiliser un outillage spécifique capable de supporter les efforts générés par les contraintes résiduelles après fabrication et résister à la température mise en jeu en cours de fabrication. Pour cela, la solution proposée consiste à maintenir en position la tôle support sur un bloc dont la surface supérieure est usinée selon la géométrie théorique du substrat (**problématique n°2**). Ce système permet de maintenir en contact l'ensemble de la surface de la tôle support avec le système de bridage et donc de résoudre la **problématique n°1** liée aux écarts entre le substrat et la maquette numérique (la géométrie du bridage étant connue). En ce qui concerne les déformations, le maintien en position

est ici assuré sur l'ensemble du pourtour du substrat ce qui permet de réduire l'ampleur des déplacements lors de la fabrication (**problématique n°3**). De plus, le positionnement du repère pièce peut être effectué directement sur le système de bridage, ce qui est intéressant dans le cas d'une industrialisation. En effet, le positionnement étant effectué sur le montage, il n'est pas nécessaire de répéter cette opération pour chaque tôle support.

La seconde méthode proposée consiste à adapter les paramètres et conditions de dépôt pour améliorer l'accroche au substrat (**problématique n°4**). Pour les composants de grandes dimensions, le flux de chaleur évacué par diffusion thermique est particulièrement important (effet d'échelle) et l'inertie thermique ralentit la montée en température de la pièce, ce qui rend problématique les conditions d'accroche au substrat. Il a été montré qu'une étape de préchauffage permet d'améliorer les conditions de dépôts de la première couche[62]. C'est pourquoi, une étape de préchauffage est intégrée à la méthode proposée en plus de l'augmentation de la puissance sur les premières passes (voir chapitre 3). De plus, cela permet une montée homogène en température de la pièce et donc de réduire l'ampleur des déformations.

2. Illustration des méthodes de résolution proposées : Fabrication additive sur un support double courbure de grandes dimensions

Dans le domaine aéronautique, la structure d'un avion de transport (le fuselage) est classiquement constituée de trois éléments (Figure 108) : la tôle (peau de l'avion), les cadres (profilés cintrés selon la forme de l'avion) et les lisses (profilés reliant les cadres). Ces éléments sont traditionnellement assemblés par rivetage, une opération contraignante en termes de temps et peu performante concernant le critère de réduction de la masse embarquée. C'est pourquoi la fabrication additive peut apporter de nouvelles solutions à ce domaine industriel et notamment le WAAM pour la réalisation d'éléments de structure.

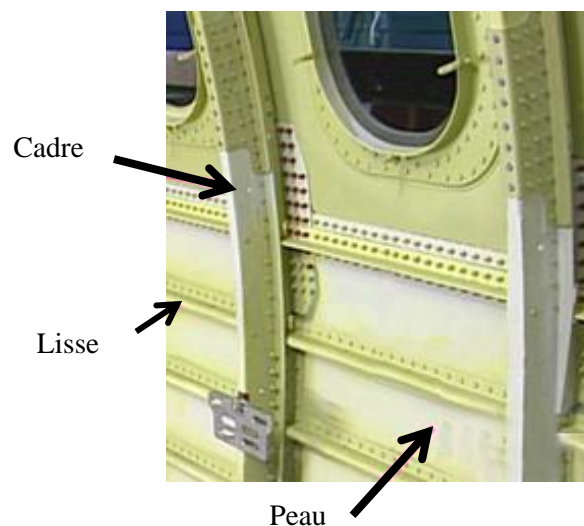


Figure 108 : Fuselage d'un avion Airbus A320

La liberté de conception offerte par le procédé WAAM permet d'ajouter de la matière uniquement où cela est nécessaire et donc de réduire le gaspillage et aussi la masse du composant (un critère déterminant pour le domaine aéronautique, car ce dernier agit directement sur la consommation de carburant) en utilisant les résultats d'une optimisation topologique par exemple. C'est pourquoi nous envisageons d'utiliser un procédé de fabrication additive pour la réalisation d'éléments de structures aéronautiques.

Nous présentons dans la suite de ce chapitre un cas d'application des méthodologies proposées : la fabrication d'une portion de fuselage. L'ensemble de la démarche est présenté :

- l'identification des contraintes liées au procédé de fabrication WAAM et d'usinage ;
- la reconception DFAM (liée aux contraintes précédemment identifiées) ;
- l'étape de fabrication additive ;
- l'étape de parachèvement.

2.1. Présentation de la structure étudiée

La fabrication d'un élément de structure est étudiée dans cette section. Il s'agit d'une portion de fuselage d'une dimension de 1000 x 1000 mm (Figure 109). Cet élément possède une géométrie double courbure (rayons de courbure différents dans deux directions), sur lequel sont fabriqués des raidisseurs primaires (de couleur beige, structure en « T ») et des raidisseurs secondaires (de couleur bleue, mur simple). Le rayon de courbure principal est de 2000 mm et le second rayon est de 9500 mm. Le but est d'illustrer les méthodes proposées dans ce manuscrit sur un élément représentatif qui est issu d'une collaboration avec l'entreprise STELIA Aerospace.

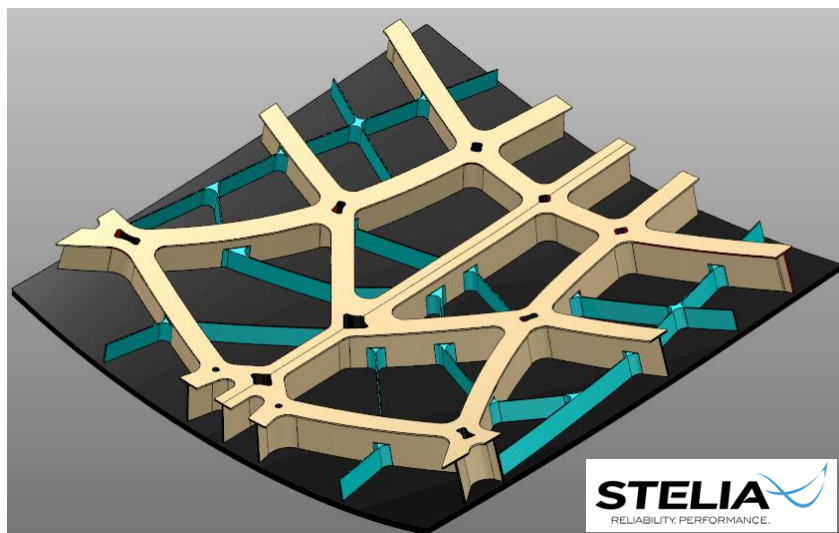


Figure 109 : Maquette numérique de la structure étudiée

Par rapport aux structures aéronautiques classiques (assemblage de profilés par rivetage), nous avons identifié les contraintes et les opportunités liées au procédé de fabrication additive WAAM et de finition par usinage grande vitesse (fabrication de parois horizontales et gestion des

intersections/jonctions). Ainsi, nous avons proposé des modifications de la géométrie afin que ces dernières soient prises en compte pour la reconception par le bureau d'études STELIA.

Nous avons obtenu une géométrie conçue avec la méthode DFAM (Design For Additive Manufacturing). Cela est notamment le cas pour les intersections/jonctions de parois, où la géométrie est adaptée au regard des capacités du procédé de fabrication et des contraintes liées à l'opération de parachèvement. Ainsi, la géométrie centrale des intersections (voir chapitre 2) possède des rayons de raccordement (Figure 110) permettant l'usinage de la surface extérieure des parois verticales.

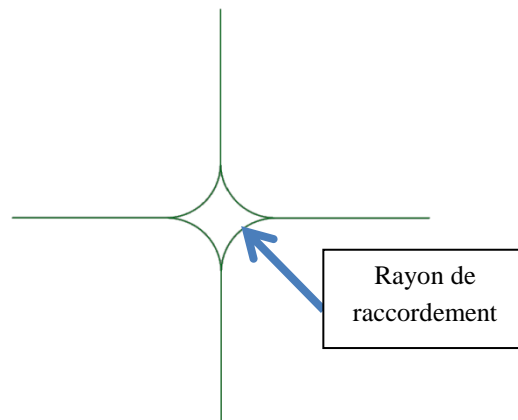


Figure 110 : Stratégie employée pour les intersections et les jonctions de murs

D'autre part, cette pièce présente un caractère novateur puisqu'il n'est pas nécessaire d'utiliser des éléments standards (profilés de structures) comme pour les éléments conventionnels de structures aéronautiques. En effet, elle s'appuie sur les résultats d'une optimisation topologique, ce qui est rendu possible par l'utilisation d'un procédé de fabrication additive.

2.2. Fabrication de la structure

Les méthodes de résolution proposées dans la section 1.3 sont appliquées à la réalisation de la structure présentée précédemment. Pour cela, un outillage spécifique (problématique n°1) a été réalisé (Figure 111). Il est constitué d'une contre forme dont le modèle numérique est conforme à la géométrie du substrat (problématique que n°2). Le maintien en position est assuré par des vis réparties sur le pourtour de la tôle support (problématique n°3).

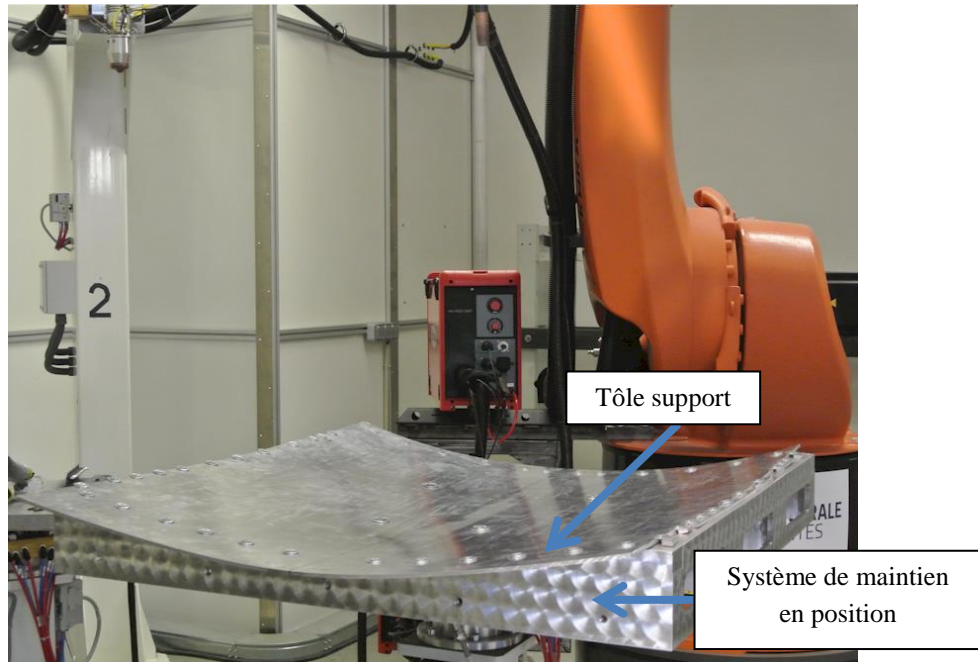


Figure 111 : Système de maintien en position utilisé avec tôle support

Le préchauffage du composant est réalisé par des éléments résistifs pour améliorer la liaison mécanique entre la pièce et la tôle support (problématique n°4). La pièce en cours de réalisation est présentée sur la Figure 112.

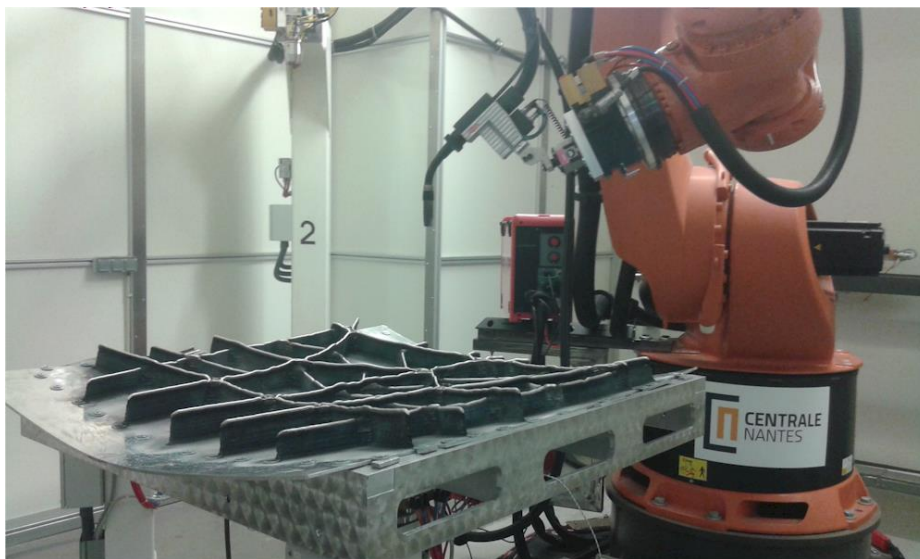


Figure 112 : Fabrication de la structure

Sur la Figure 113, la structure finale fabriquée est représentée. La partie à droite a été usinée pour pouvoir illustrer l'état de la pièce finale après parachèvement et pouvoir comparer ce résultat après le dépôt avec le procédé WAAM.



Figure 113 : Structure finale : partie brute (à gauche) - partie usinée (à droite)

2.3. Conclusion

La fabrication sur des supports de grandes dimensions et double courbure nécessite de mettre en place des outillages spécifiques de maintien en position. Cela a permis de résoudre la problématique liée à la géométrie du substrat.

D'autre part, la réalisation de composants de grandes dimensions peut se dérouler sur plusieurs jours. Il y a donc un cyclage thermique (refroidissement complet de la pièce, puis redémarrage de la fabrication des murs...). Cela engendre donc de fortes contraintes résiduelles lors du refroidissement, et donc des déformations de la tôle support lors du débridage. Pour réduire l'ampleur de ces défauts, il serait intéressant de maintenir la température de la pièce à un niveau constant tout au long de la fabrication. Cela implique d'inclure dans l'outillage des éléments de chauffage et de contrôle de la température sur un élément de grandes dimensions et demande donc une étude de conception de l'outillage plus poussée pour prendre en compte ces aspects.

3. Conclusion sur la fabrication additive sur support double courbure

Les verrous résolus dans ce chapitre ont permis de proposer une méthode pour fabriquer des composants de structure sur des supports non plans de grandes dimensions. La problématique majeure reste le maintien en position lors de la fabrication. Un système de bridage adapté à la géométrie de la pièce doit être utilisé pour faciliter son positionnement et minimiser les déformations. Par ailleurs, les

phénomènes thermiques sont amplifiés du fait des grandes dimensions du composant, ce qui se traduit par des contraintes résiduelles importantes et donc des déformations notamment lors du débridage.

L'intérêt du procédé pour la fabrication d'éléments de structure et notamment sur des supports non plans a été mis en avant ici. De plus, les possibilités offertes par la fabrication additive (liberté de conception...) permettent de s'affranchir de l'utilisation d'éléments standards et mettre en application les résultats issus d'optimisations topologiques, pour, par exemple, atteindre des objectifs en termes de réduction de la masse embarquée et aussi de la quantité de matière utilisée. Les méthodes proposées ont été illustrées par la réalisation d'un élément de structure aéronautique dont la conception comporte des éléments DFAM. Cela constitue une application directe du WAAM sur un composant de grandes dimensions jusqu'alors obtenu par assemblage et permet de disposer d'éléments utiles pour la réalisation de structure de taille plus importante.

Chapitre 6 : Conclusion et perspectives

Ce travail de thèse a mis en évidence l'intérêt de la fabrication additive WAAM pour l'obtention de composants de structures, notamment issus du domaine aéronautique. Dans ce dernier chapitre, nous soulignons d'abord les principaux apports et résultats obtenus. Dans un deuxième temps, nous proposons quelques perspectives et potentielles applications liées à notre domaine d'étude.

1. Conclusion

Pour fabriquer une pièce fonctionnelle, il existe une multitude de procédés d'obtention ayant chacun des spécificités différentes permettant de répondre au cahier des charges. La fabrication additive apparaît comme une solution pertinente pour la réalisation de composants du fait de ses nombreux avantages (liberté de conception, simplification des assemblages...). Parmi les différents procédés additifs, nous avons mis en avant l'intérêt du WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) qui possède un espace de travail important et un taux de dépôt de matière élevé. Ce dernier est donc particulièrement adapté à la réalisation de composants de grandes dimensions.

La mise en œuvre de la fabrication additive requiert une étape préalable de génération de trajectoires qui s'appuie sur la maquette numérique du composant. Le développement des procédés de fabrication additive et en particulier WAAM nécessite de générer des trajectoires sur des composants de plus en plus complexes. Après avoir identifié les verrous liés à cette problématique, des méthodes de résolution ont été proposées et ont permis d'établir des règles à appliquer dès la génération de trajectoires afin d'assurer la réussite de la fabrication. Cela a notamment permis d'apporter de nouvelles solutions pour la fabrication de structures (fabrication de parois horizontales, stratégies pour intersections et jonctions de murs...) mais aussi de mettre en évidence des stratégies pertinentes pour améliorer la qualité du dépôt (orientation outil, alternance du sens de parcours, stratégies de remplissage...). Par ailleurs, les trajectoires habituellement utilisées sont basées sur un découpage par plans parallèles, ce qui limite les applications du procédé à des composants avec un faible angle de contre-dépouille. Ainsi, plusieurs méthodes de découpage (sectionnement angulaire, fibre neutre) ont été développées et comparées afin de dépasser cette limite et donc d'augmenter le champ d'application du procédé. Une de ces méthodes est basée sur la variation continue des paramètres opératoires tout au long du parcours. Cela permet notamment d'utiliser une épaisseur de couche variable et donc de simplifier le découpage qui peut s'appuyer sur la fibre neutre du composant.

La mise en œuvre de la fabrication de composants par technologie additive nécessite de maîtriser de nombreux paramètres opératoires. Pour cela, une méthode de détermination et d'analyse a été développée pour déterminer des jeux de paramètres adaptés à la fabrication additive WAAM. Une classification des géométries des cordons en fonction des paramètres opératoires a été construite. Les conclusions de cette méthode ont permis de définir un domaine de stabilité des paramètres de fabrication. Cette méthode a été appliquée à un alliage d'aluminium, mais elle est générique et peut être utilisée pour d'autres matériaux. D'autre part, l'analyse de l'interface entre le substrat et la matière déposée a permis de soulever un nouveau verrou : la faiblesse de la liaison mécanique entre le substrat et le mur. Pour résoudre ce dernier, nous avons montré qu'il était nécessaire de modifier les

paramètres opératoires sur les premières passes (phase d'accroche) afin d'augmenter l'énergie apportée.

Lors de la fabrication d'un composant, le métal est fondu afin d'être déposé. Cela entraîne des gradients thermiques et donc des transformations chimiques et métallurgiques pouvant faire apparaître des défauts de la structure interne et donc affecter les propriétés mécaniques des composants. Les performances mécaniques des composants fabriqués en WAAM ont été évaluées. Les valeurs de résistance mécanique et de tenue en fatigue mesurées sont comparables à celles du métal déposé en soudure. La microstructure des composants fabriqués a également été étudiée, ce qui a permis de détecter la présence de défauts comme la porosité. Nous avons proposé et mis en place une opération supplémentaire de refroidissement forcé. Cela consiste à projeter un flux d'air froid sur le cordon après dépôt pour accélérer la phase de solidification. Cette opération supplémentaire a permis d'améliorer la structure interne du métal déposé : taux de porosité réduit, taille des pores réduite et augmentation de la micro dureté. De plus, l'effet de cette opération est comparable à une opération de roulage en termes d'amélioration de la microstructure. D'autre part, elle est sans contact mécanique avec le métal déposé et ne nécessite pas d'utiliser un moyen capable de générer un effort presseur important sur le cordon contrairement au roulage. Par ailleurs, pour des éléments massifs, plusieurs stratégies peuvent être employées. Parmi elles, nous avons montré que le balayage zigzag était intéressant, car il assurait une bonne homogénéité de la matière déposée. Pour cette stratégie, nous avons mis en évidence l'effet de l'angle de balayage sur la qualité de la structure de la matière déposée. Un faible angle de balayage engendre une différence de température inter-cordons réduite, ce qui se traduit par une microstructure plus compacte et donc de meilleures performances mécaniques pour les composants fabriqués.

Enfin, nous avons envisagé la fabrication additive sur des supports fonctionnels non plans. Pour cela, nous avons mis en place une méthodologie de génération de trajectoires pour répondre à ce domaine d'étude. La problématique majeure mise en évidence est le bridage lors de la fabrication. Pour cela, il est nécessaire de concevoir un outillage adapté à la géométrie du substrat. Cela permet notamment de faciliter le positionnement et minimiser les déformations en assurant un bon maintien en position. Cette méthodologie a été illustrée par la fabrication d'un élément représentatif de structure aéronautique dans le cadre d'un projet collaboratif. En effet, la fabrication additive présente de nombreux avantages pour ce domaine d'application : elle offre une liberté de conception et permet de simplifier les assemblages en s'affranchissant de l'utilisation d'éléments standards. Elle est particulièrement adaptée à la réalisation d'éléments issus d'optimisations topologiques. Ainsi, la matière est ajoutée uniquement où cela est nécessaire au regard des sollicitations subies par l'élément, ce qui peut permettre, par rapport à une structure classique, de réduire la masse embarquée et aussi la quantité de matière utilisée. La conception de cet élément de structure aéronautique a nécessité une étape préalable d'identification de contraintes liées aux procédés de fabrication (additive et soustractive) afin de proposer une géométrie DFAM. La réalisation du composant complet a permis de démontrer les capacités du procédé pour l'obtention de pièces de structure de grandes dimensions sur des supports non plans.

2. Perspectives

Les différents travaux effectués lors de cette thèse ont permis de mettre en place des méthodes afin de fabriquer des composants de structures. Cependant, les applications, notamment du domaine aéronautique, impliquent que l'espace de travail de la machine d'obtention soit du même ordre de grandeur qu'une portion de structure d'avion. C'est pourquoi il faudrait chercher à adapter l'espace de travail à la taille de la pièce à fabriquer. De nouvelles problématiques liées à l'effet d'échelle seront soulevées. En effet, une augmentation de la taille de la pièce aura nécessairement une influence sur les niveaux de déformation, les contraintes résiduelles et le comportement thermique du composant. Ces phénomènes inhérents à la fabrication devront être pris en compte et étudiés pour l'obtention des composants dans le respect du cahier des charges.

Il serait également intéressant de chercher à optimiser le taux de dépôt de matière. En effet, si la taille des composants augmente, les temps de fabrication sont également accrus. L'augmentation de ce taux permettrait d'améliorer la productivité du procédé en vue d'applications industrielles.

Une problématique majeure de la fabrication additive est la santé matière des composants fabriqués. L'optimisation des paramètres opératoires du procédé doit permettre d'obtenir des performances mécaniques du métal déposé suffisantes pour être en conformité avec le cahier des charges. En particulier, les conditions thermiques lors du dépôt ont une forte influence sur la santé matière. C'est pourquoi, la mise place d'un contrôle de la température en cours de fabrication (monitoring) apparaît comme une réponse pertinente pour garantir les propriétés mécaniques de la pièce. Les paramètres optimaux seraient conservés alors sur l'ensemble du composant tout au long de la fabrication, ce qui permettrait d'homogénéiser les conditions de dépôt.

Les méthodes proposées dans ce manuscrit (génération de trajectoires, gestion des intersections et jonctions, variation continue de paramètres, refroidissement forcé...) ont été appliquées à un alliage d'aluminium. Cependant, celles-ci sont génériques et pourraient être utilisées pour d'autres nuances d'aluminium ou d'autres métaux.

Actuellement, les principaux domaines d'applications du WAAM sont l'aéronautique et le naval. Les composants obtenus sont pour l'instant limités à certains cas d'études, mais avec l'augmentation du niveau de maîtrise du procédé, d'autres applications concrètes devraient alors apparaître et ainsi élargir le champ d'utilisation de ce procédé pour l'obtention de pièces.

Références bibliographiques

- [1] D. L. Bourell, J. J. Beaman, M. C. Leu, and D. W. Rosen, A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead, *US-Turkey Workshop on Rapid Technologies*, 2009.
- [2] M. J. Cotteleer, 3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth, *SIMT Additive Manufacturing Symposium*, p. 23, 2014.
- [3] K. S. Prakash, T. Nancharaih, and V. V. S. Rao, Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -An Overview, *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 2, pp. 3873–3882, 2018.
- [4] J. Geraedts, E. Doubrovski, J. Verlinden, and M. Stellingwerff, Three views on additive manufacturing: business, research and education, *Conference TMCE 2012*, no. February 2016, pp. 1–15, 2012.
- [5] M. Attaran, The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing, *Business Horizons*, vol. 60, no. 5, pp. 677–688, 2017.
- [6] A. Moussion, Airbus installe la première pièce métallique imprimée en 3D sur un appareil de série, 2017. [Online]. Available: <http://www.primante3d.com/aibus-metal-14092017/>.
- [7] S. W. Williams, F. Martina, a. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, and P. Colegrove, Wire+Arc Additive Manufacturing, *Materials Science and Technology*, vol. 00, pp. 1–7, 2015.
- [8] R. Ponche, O. Kerbrat, P. Mognol, and J.-Y. Hascoet, A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 30, no. 4, pp. 389–398, 2014.
- [9] W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, and Y. Chen, The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering, *Computer-Aided Design*, vol. 69, pp. 65–89, 2015.
- [10] G. Venturini, F. Montevecchi, A. Scippa, and G. Campatelli, Optimization of WAAM Deposition Patterns for T-crossing Features, *Procedia CIRP*, vol. 55, no. December, pp. 95–100, 2016.
- [11] M. Rivette, J.-Y. Hascoët, and P. Mognol, A graph-based methodology for hybrid rapid design, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 221, no. 4, pp. 685–697, 2007.
- [12] P. Mognol, M. Rivette, L. Jégou, and T. Lesprier, A first approach to choose between HSM, EDM and DMLS processes in hybrid rapid tooling, *Rapid Prototyping Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 7–16, 2007.
- [13] A. Kawasaki and R. Watanabe, Concept and P/M fabrication of functionally gradient materials, *Ceramics International*, vol. 23, no. 1, pp. 73–83, 1997.
- [14] P. Muller, P. Mognol, and J.-Y. Hascoet, Modeling and control of a direct laser powder deposition process for Functionally Graded Materials (FGM) parts manufacturing, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, no. 5, pp. 685–692, 2013.
- [15] J. Y. Hascoet, P. Muller, and P. Mognol, Manufacturing of Complex Parts with Continuous Functionally Graded Materials (FGM), *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 557–569, 2011.
- [16] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, Wire-feed additive manufacturing of metal components : technologies , developments and future interests, *Int J Adv ManufTechnol*, 2014.

- [17] S. PILLOT, Fusion laser sélective de lit de poudres métalliques Fusion laser sélective de lit de poudres métalliques, *Techniques de l'ingénieur*, 2016.
- [18] K. H. Leitz, P. Singer, A. Plankensteiner, B. Tabernig, H. Kestler, and L. S. Sigl, Multi-physical simulation of selective laser melting, *Metal Powder Report*, vol. 72, no. 5, pp. 331–338, 2017.
- [19] P. Muller, Fabrication additive de pièces multimatériaux, *Thèse de doctorat, Spécialité : Génie Mécanique, Ecole Centrale de Nantes*, 2013.
- [20] C. Y. Yap et al., Review of selective laser melting: Materials and applications, *Applied Physics Reviews*, vol. 2, no. 4, 2015.
- [21] K. Mumtaz and N. Hopkinson, Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting, *Rapid Prototyping Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 96–103, 2009.
- [22] K. A. Mumtaz and N. Hopkinson, Selective Laser Melting of thin wall parts using pulse shaping, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 2, pp. 279–287, 2010.
- [23] A. Bandyopadhyay, B. V. Krishna, W. Xue, and S. Bose, Application of Laser Engineered Net Shaping (LENS) to manufacture porous and functionally graded structures for load bearing implants, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, vol. 20, no. SUPPL. 1, 2009.
- [24] T. Petrat, B. Graf, A. Gumenyuk, and M. Rethmeier, Laser metal deposition as repair technology for a gas turbine burner made of inconel 718, *Physics Procedia*, vol. 83, pp. 761–768, 2016.
- [25] E. Brandl, B. Baufeld, C. Leyens, and R. Gault, Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: Comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications, *Physics Procedia*, vol. 5, no. PART 2, pp. 595–606, 2010.
- [26] F. Wang, J. Mei, H. Jiang, and X. Wu, Laser fabrication of Ti6Al4V/TiC composites using simultaneous powder and wire feed, *Materials Science and Engineering A*, vol. 445–446, pp. 461–466, 2007.
- [27] W. S. Filomeno Martina, Wire + arc additive vs . from solid: a cost comparison, *Welding Engineering and Laser Processing Centre, Cranfield University*, 2015.
- [28] S. Williams, Large scale metal wire + arc additive manufacturing of structural engineering parts, *69th IIW Annual Assembly and International Conference*, p. 25, 2016.
- [29] S. W. Williams, Recent developments in fusion processing of aluminum alloys_PAP, *LATEST2 - Light Alloys Towards Environmentally Sustainable Transport 2*, 2011.
- [30] B. Cong, J. Ding, and S. Williams, Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 76, no. 9–12, pp. 1593–1606, 2014.
- [31] D. Yang, C. He, and G. Zhang, Forming characteristics of thin-wall steel parts by double electrode GMAW based additive manufacturing, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 227, pp. 153–160, 2016.
- [32] C. Shen, Z. Pan, Y. Ma, D. Cuiuri, and H. Li, Fabrication of iron-rich Fe-Al intermetallics using the wire-arc additive manufacturing process, *Additive Manufacturing*, vol. 7, pp. 20–26, 2015.
- [33] P. Colegrove, High deposition rate high quality metal additive manufacture using wire + arc technology, *Cranfield University Internal Report*, p. 42, 2013.

- [34] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM), *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 31, pp. 101–110, 2015.
- [35] Fronius, Cold Metal Transfer : The technology, *CMT technology*, 2014.
- [36] N. D. M. Phan, Y. Quinsat, S. Lavernhe, and C. Lartigue, Scanner path planning with the control of overlap for part inspection with an industrial robot, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 98, no. 1–4, pp. 629–643, 2018.
- [37] J. S. Panchagnula and S. Simhambhatla, Inclined slicing and weld-deposition for additive manufacturing of metallic objects with large overhangs using higher order kinematics, *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 11, no. 2, pp. 99–108, 2016.
- [38] C. Bourlet, F. Scandella, and L. Jubin, État de L’Art de Fabrication Additive Métallique Avec Du Fil, *Études et Recherches, Institut de Soudure*, pp. 53–63, 2017.
- [39] C. Shen, Z. Pan, D. Cuiuri, D. Ding, and H. Li, Influences of deposition current and interpass temperature to the Fe₃Al-based iron aluminide fabricated using wire-arc additive manufacturing process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, no. June, 2016.
- [40] J. Kerninon, P. Mognol, J.-Y. Hascoet, and C. Legonidec, Effect of path strategies on metallic parts manufactured by additive process, *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 352–361, 2008.
- [41] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 73, no. 1–4, pp. 173–183, 2014.
- [42] P. A. Colegrove et al., Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, no. 10, pp. 1782–1791, 2013.
- [43] F. Martina, P. A. Colegrove, S. W. Williams, and J. Meyer, Microstructure of Interpass Rolled Wire + Arc Additive Manufacturing Ti-6Al-4V Components, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015.
- [44] J. Gu, B. Cong, J. Ding, S. W. Williams, and Y. Zhai, Wire+Arc Additive Manufacturing of Aluminium, *SFF symposium, Austin Texas*, pp. 451–458, 2014.
- [45] S. W. Williams, Residual Stress Characterization and Control in the Additive Manufacture of Large Scale Metal Structures, *Welding Engineering and Laser Processing Centre*, pp. 455–460, 2017.
- [46] J. Ding, P. Colegrove, F. Martina, S. Williams, R. Wiktorowicz, and M. R. Palt, Development of a laminar flow local shielding device for wire+arc additive manufacture, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 226, pp. 99–105, 2015.
- [47] J.-Y. Hascoët, A. Chabot, and M. Rauch, Towards closed loop control for Additive Manufacturing, *Conference on Welding and Additive Manufacturing, Metz, France.*, 2017.
- [48] G. Grimaud, N. Perry, and B. Laratte, Aluminium cables recycling process: Environmental impacts identification and reduction, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 135, no. December 2016, pp. 150–162, 2018.
- [49] R. F. Geller and P. J. Yavorsky, Melting point of alpha-alumina, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, vol. 34, no. 1928, pp. 395–401, 1945.
- [50] G. Thewlis and D. R. Milner, Inclusion Formation in Arc Welding, *Welding research*

supplement, pp. 281–288, 1977.

[51] A. Niel, F. Deschaux-Beaume, C. Bordreuil, and G. Fras, Hot-crack test for aluminium alloys welds using TIG process, *EPJ Web of Conferences*, vol. 6, p. 07001, 2010.

[52] J. H. Devletian and W. E. Wood, Factors Affecting Porosity in Aluminum Welds - a Review. Welding Research Council, 1983.

[53] J. Gu, J. Ding, S. W. Williams, H. Gu, P. Ma, and Y. Zhai, The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 230, pp. 26–34, 2016.

[54] Siemens, Sinumerik 840D/810D/FM-NC Notions complémentaires. 1997.

[55] A. Addison, J. Ding, F. Martina, H. Lockett, S. Williams, and X. Zhang, Manufacture of Complex Titanium Parts using Wire+Arc Additive Manufacture, *Titanium Europe 2015 Conference*, p. 14, 2015.

[56] J. Mehnen, J. Ding, H. Lockett, and P. Kazanas, Design study for wire and arc additive manufacture, *International Journal of Product Development*, vol. 19, p. 2, 2014.

[57] T. Breteau, T. Damay, E. Duc, and J. Y. Hascoët, Design for manufacturing with tool paths adapted to marine propeller, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, vol. 5, no. 4, pp. 271–275, 2011.

[58] B. Cong, Z. Qi, B. Qi, H. Sun, G. Zhao, and J. Ding, A Comparative Study of Additively Manufactured Thin Wall and Block Structure with Al-6.3%Cu Alloy Using Cold Metal Transfer Process, *Applied Sciences*, vol. 7, no. 3, p. 275, 2017.

[59] A. Dugas, CFAO et UGV : simulation d'usinage de formes complexes, *Thèse de doctorat, Spécialité : Génie Mécanique, Ecole Centrale de Nantes*, 2002.

[60] T. C. Nguyen, D. C. Weckman, D. a. Johnson, and H. W. Kerr, The humping phenomenon during high speed gas metal arc welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 10, no. 4, pp. 447–459, 2005.

[61] Euralliage, Alliage d'aluminium. [Online]. Available: <http://www.euralliage.com/alliage.html>.

[62] H. Geng, J. Li, J. Xiong, and X. Lin, Optimisation of interpass temperature and heat input for wire and arc additive manufacturing 5A06 aluminium alloy, *Science and Technology of Welding and Joining*, pp. 1–12, 2016.

[63] P. Almeida and S. Williams, Innovative process model of Ti–6Al–4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT), *Conf. TEXAS, Austin*, pp. 25–36, 2010.

[64] M. Pastor, Contribution à l'étude en fatigue de structures en aluminium renforcées par patches composites, *Thèse de doctorat, Spécialité : Génie Mécanique, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand*, 2008.

[65] C. Zhou, X. Yang, and G. Luan, Fatigue properties of friction stir welds in Al 5083 alloy, *Scripta Materialia*, vol. 53, no. 10, pp. 1187–1191, 2005.

[66] J. Gu, J. Ding, S. W. Williams, H. Gu, P. Ma, and Y. Zhai, The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, Nov. 2015.

[67] H.-P. Wang, L. Zhao, B. Zhou, H.-C. Liao, and Y. Pan, Effect of hydrogen content and cooling rate on porosity in aluminum alloy parts by counter-gravity casting, *Zhuzao/Foundry*, vol. 58,

pp. 205–209, 2009.

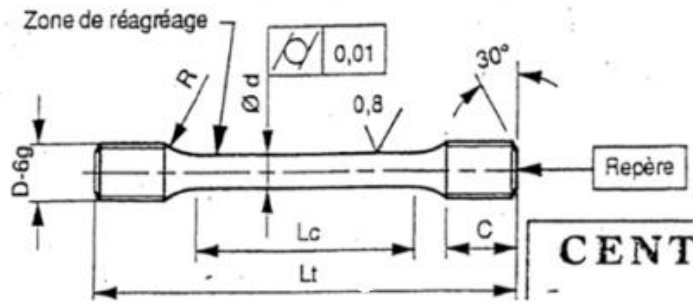
[68] Jean Charbonnier, Gaz dans les alliages d'aluminium de fonderie, *Techniques de l'ingénieur*, 1991.

[69] J. Akram, P. Chalavadi, D. Pal, and B. Stucker, Understanding grain evolution in additive manufacturing through modeling, *Additive Manufacturing*, vol. 21, no. March, pp. 255–268, 2018.

Annexes

Annexe 1 : Eprouvtes de traction de type « A » et « M »

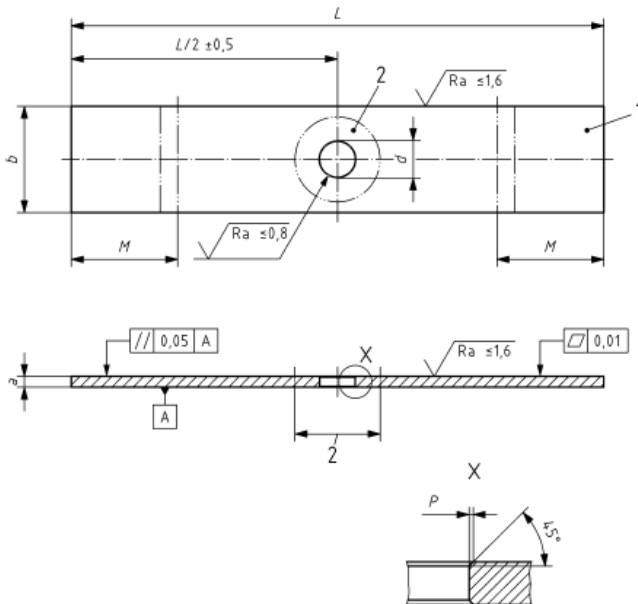
Schéma et dimensions des éprouvettes de traction normalisées



Lc	42 mm
Lt	80 mm
d	6 mm
R	10
Filetage	M10x1.00

Annexe 2 : Eprouvtes de fatigue de type « A » et « M »

Schéma et dimensions des éprouvettes de fatigue normalisées



L	120 mm
b	20 mm
a	3 mm
d	6.35 mm



**CERTIFICAT DE RÉCEPTION (3.1) - Analyse chimique
RELEVÉ DE CONTRÔLE (2.2) - Propriétés mécaniques/
INSPECTION CERTIFICATE (3.1) - Chemical analysis
TEST REPORT (2.2) - Mechanical properties**

Date/Date: 2017-10-24
 Numéro de certificat/Cert no: EC24926610 rev. 0
 Notre commande/Our order: 1778544
 Votre commande/Your order: 4424101706
 Notre référence/Our ref: Web user - Movex CMP020 BFR
 Votre référence/Your ref:
 Compte client/Cust no: FRB00671
 Votre numéro de fax/Your fax:
 Date de commande client/Your date: 20171024
 Votre e-mail/Your e-mail:

Adresse de facturation/Invoice address Destinataire du certificat/Cert receiver Adresse de livraison/Delivery address
 SERVISOUD
 3, SQUARE DU CHAMP BLANC
 49300 CHOLET
 France
 SERVISOUD
 BOULEVARD DES APPRENTIS
 44550 MONTOIR DE BRETAGNE
 France

LIVRAISON/DELIVERY Numéro de lot/Lot no: RB17331828 Quantité/Quantity: 525 KGM

PRODUIT/PRODUCT

Marque/Brand: ESAB
 Description/Desc: OK Autrod 5356 1.2mm 7kg
 Numéro article/Item no: 1815129870

**COMPOSITION CHIMIQUE/
CHEMICAL COMPOSITION**

Valeurs réelles/Actual results: conforme à/acc to EN 10204 - 3.1

Wire/strip

Autres/Auxiliary:

Si	0.05%
Mn	0.14%
Cr	0.07%
Cu	< 0.01%
Ti	0.07%
Al	94.0%
Fe	0.12%
Mg	4.9%
Zn	< 0.01%

CLASSIFICATIONS/CLASSIFICATIONS

SFA/AWS A5.10: ER5356
 EN ISO 18273: S Al 5356 (AlMg5Cr(A))
 JIS Z 3232: A53556

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES/MECHANICAL PROPS
 Valeurs typiques/Typical data: conforme à/acc to EN 10204 - 2.2

Standard/Standard:
 Autres/Auxiliary:
 Condition/Condition:

ESSAI DE TRACTION/TENSILE

<u>Rp0.2</u>	<u>Rm</u>	<u>A4-A5</u>
120 MPa	265 MPa	26 %

COMMENTAIRES/COMMENTS

Produit fourni suivant programme AQ correspondant au standard EN ISO 9001.
 Ce certificat est produit d'une façon électronique et valide sans signature.
 Pour questions supplémentaires s.v.p. adressez-vous à:
ESAB France SA, Rue du Petit Albi, BP 8498, 95891 Cergy Pontoise.

Product supplied under a QA Programme fulfilling the EN ISO 9001 standard.
 This certificate is produced electronically and is valid without signature.
 Please refer any queries to: (see above)

Validation - Analyse chimique/Validation - Chemical Analysis

Todd Makar
 Quality Assurance Manager

Validation - Autres/Validation - Others

Jay Coubrough

Titre : Réalisation de pièces aéronautiques de grandes dimensions par fabrication additive WAAM

Mots clés : Fabrication additive, dépôt de fil, fabrication 5 axes,

Résumé : Dans le domaine de la fabrication additive plusieurs technologies cohabitent et présentent des maturités et des applications différentes : le lit de poudre, la projection de poudre et le dépôt de fil pour ne citer que les principales.

Nous avons étudié, dans le cadre de cette thèse, la réalisation de pièces de grandes dimensions du domaine aéronautique en alliage d'aluminium, par technologie WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) robotisée. Cette technologie repose sur l'utilisation un générateur de soudure à l'arc, d'un système de protection gazeuse et d'un système d'alimentation en métal d'apport sous forme de fil. Pour répondre à cette problématique, plusieurs voies de recherche ont été investiguées. La première traitait principalement de la génération de trajectoires : Plusieurs expérimentations ont permis de montrer l'intérêt et l'importance de la génération de trajectoires et notamment la maîtrise de l'orientation outil pour la fabrication additive de pièces complexes

en étudiant le respect de la géométrie souhaitée. La seconde concernait l'étude de la santé matière des pièces fabriquées. Des observations au niveau de la microstructure, mais aussi des caractéristiques mécaniques ont permis de mettre en évidence l'influence des paramètres opératoires sur la qualité de la matière déposée.

Enfin, la réalisation de pièces fonctionnelles dans le cadre d'un projet financé par la DGA/DGAC et dont les partenaires étaient : STELIA, CONSTELLIUM, CT INGENIERIE et l'Ecole Centrale de Nantes, a permis de mettre en avant l'intérêt du procédé pour la fabrication de pièces aéronautiques. Un élément de structure aéronautique composé de raidisseurs a été fabriqué avec le procédé WAAM sur un substrat double courbure en alliage aluminium. Les difficultés accrues de réalisation ont pu être levées par l'emploi de la méthodologie développée dans le cadre de la thèse.

Title : Manufacturing of large scale components for aircraft industry with WAAM process

Keywords : Wire Arc Additive Manufacturing ,WAAM, 5 axis manufacturing, Cold Metal transfer

Abstract: In the field of additive manufacturing (AM), several processes are present and have different applications and levels of development: the main technologies are powder-bed based AM, powder projection and Wire Additive Manufacturing (WAM).

We have studied, in this PhD work, the manufacturing of large scale components in aluminum alloy for aircraft industry with Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). This technology is based on a welding generator, a shielding gas protection and a feedstock (wire in this case). To solve this issue, several ways of research were investigated. The first one dealt with toolpath generation: several experiments have highlighted the importance of tool path generation and the tool orientation to manufacture complex parts and

improve the part accuracy. The second one was about the validation of the material quality after deposit. Microstructural observations and mechanical tests have demonstrated the effect of process parameters on the deposit quality.

Finally, in the context of a DGA/DGAC funded research project, whose partners were STELIA, CT INGENIERIE, CONSTELLIUM and l'Ecole Centrale de Nantes, the manufacturing of functional part in aluminum alloy has shown the interest of the process for aircraft industry. A structural component based on a double curvature geometry has been manufactured with WAAM. The methodologies developed in this PhD work have enabled us to solve the issues to manufacture that type of component.