



Prototypage rapide de pièces en acier : étude du dépôt de matière et d'énergie lors de la fusion à l'arc d'un fil par le procédé MIG-CMT

Luis Corona Galvan

► To cite this version:

Luis Corona Galvan. Prototypage rapide de pièces en acier : étude du dépôt de matière et d'énergie lors de la fusion à l'arc d'un fil par le procédé MIG-CMT. Génie civil. Université Montpellier, 2018. Français. NNT : 2018MONT062 . tel-02046020v3

HAL Id: tel-02046020

<https://theses.hal.science/tel-02046020v3>

Submitted on 18 Jun 2020

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

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

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

En Mécanique et Génie Civil

Information, Structure et Systèmes

Laboratoire de Mécanique et Génie Civil

**Prototypage rapide de pièces en acier: étude du dépôt
de matière et d'énergie lors de la fusion à l'arc d'un fil
par le procédé MIG-CMT.**

**Présentée par Luis CORONA
Le 23 février 2018**

**Sous la direction de Frédéric DESCHAUX-BEAUME
et Sébastien ROUQUETTE**

Devant le jury composé de

**Stephan SEGONDS, Maître de conférences - HDR, Institut Clément Ader (ICA), Université Paul
Sabatier**

Rapporteur

Vincent GUIPONT, Chargé de recherche - HDR, Centre de Matériaux -Mines Paristech

Rapporteur

Denis DELAGNES, Professeur, Institut Clément Ader - groupe SUMO, Ecole de Mines d'Albi

Examineur

**Patrice PEYRE, Directeur de recherche, Laboratoire Procédés et Ingénierie en Mécanique et
Matériaux**

Président du jury

Frédéric DESCHAUX-BEAUME, Professeur, Université de Montpellier - LMGC

Directeur de thèse

Sébastien ROUQUETTE, Maître de Conférences, Université de Montpellier - LMGC

Co-encadrant de thèse



**UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER**

Remerciements

L'achèvement de ce travail mené sur plusieurs années procure une grande satisfaction. C'est l'occasion de se remémorer les différentes embûches qu'il a fallu surmonter mais surtout les personnes qui m'ont permis d'en arriver là.

Tout d'abord je tiens à remercier le président du jury Monsieur Patrice PEYRE, ainsi que les rapporteurs Monsieur Stephan SEGONDES et Monsieur Vincent GUIPONT pour l'honneur qu'ils m'ont fait en participant à ce jury.

Ensuite, cette thèse n'aurait pu exister sans le financement du Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) organisme public décentralisé du gouvernement fédéral mexicain voué à promouvoir et stimuler le développement de la science et de la technologie dans ce pays.

Le remerciement suivant revient bien justement à deux personnes qui ont influencé ce travail de thèse mais également ma vie personnelle, il s'agit de Frédéric DESCHAUX-BAUME, mon directeur de thèse, qui fut pour moi un directeur de thèse attentif et disponible, et Sébastien ROUQUETTE, co-encadrant de cette thèse, pour ses relectures et ses conseils. Je tiens à les remercier chaleureusement pour leur soutien quotidien, leur aide précieuse, leur travail acharné et tous leurs conseils.

Je tiens également à remercier tous mes amis et collègues de l'équipe Assemblage Soudé du LMGC pour leur aide, leur soutien et leur gentillesse. Les rapports humains dont j'ai profité à leur côté ont fait naître de réels liens d'amitiés qui à mes yeux n'ont pas de prix.

Je voudrais également remercier l'ensemble du personnel de l'IUT de Nîmes pour leur attention et leur efficacité qui ont permis que je passe toutes ces années dans les bonnes conditions grâce à leur professionnalisme.

Je souhaite également remercier tous mes amis de la 3^{ème} génération DIM qui ont su m'apporter confiance et écoute à tous les moments. Je remercie également Bachir MEZRAG et Issam BENDAOUD pour leurs multiples conseils. Je voudrais remercier Romain MONIER et Alexis CHIOCCA qui m'ont transmis le goût du vélo, je remercie également Simon RADEL pour ses conseils végétariens. Enfin je remercie Arturo GOMEZ qui m'a supporté et encouragé depuis le début de cette thèse, très humblement, je voudrais te dire merci pour tous les bons moments passés et à venir.

Enfin, les mots le plus simples étant les plus forts, j'adresse toute mon affection à mes parents, à mes sœurs et à mon frère qui ont contribué à ce que je suis devenu. Je n'aurais rien fait de tout cela sans votre soutien et votre amour.

Tableau de matières

Introduction.....	1
Chapitre 1: Revue bibliographique	4
1.1. Généralités sur le prototypage	4
1.2. Classification des différents types de prototypage	4
1.3. Prototypage virtuel et prototypage rapide.....	5
1.4. Principes fondamentaux de fabrication	5
1.4.1. Classification des procédés de fabrication.....	5
1.4.2. Prototypage rapide, fabrication additive et impression 3D.....	6
1.5. Fabrication additive.....	7
1.5.1. Domaines d'application de la fabrication additive	7
1.5.2. Chaîne numérique en fabrication additive	8
1.5.3. Les différentes technologies de fabrication additive	9
1.5.4. Matériaux utilisés	9
1.6. Fabrication additive de pièces non métalliques	10
1.6.1. Stéréolithographie (SLA).....	10
1.6.2. Fused Deposition Modeling (FDM).....	10
1.6.3. 3D inkjet printing (3DP)	10
1.6.4. Laminated Object Manufacturing (LOM)	11
1.7. Fabrication additive de pièces métalliques	11
1.7.1. Techniques de FA sur lit de poudre	11
1.7.2. Techniques de FA par injection de poudre	12
1.7.3. Techniques de FA par fusion de fil métallique	13
1.8. Fabrication additive métallique par dépôt de fil fondu.....	13
1.8.1. Classification des technologies SMD	13
1.9. Avantages de la FA par fil métallique par rapport aux techniques à base de poudres	15
1.9.1. Disponibilité des matériaux	16
1.9.2. Coût des matériaux d'apport	16
1.9.3. Dimension des pièces et taux de dépôt.....	17
1.9.4. Problèmes de sécurité et de santé	17
1.10. Fabrication additive par fil et arc électrique.....	17
1.11. Développements récents du procédé WAAM.	17
1.12. Les différents types de technologies de soudage à l'arc utilisées en WAAM.....	20

1.13. Généralités sur le soudage	21
1.13.1. L'opération de soudage	22
1.14. Les différentes sources d'énergie utilisées en soudage	22
1.14.1. La combustion d'un gaz	22
1.14.2. Le plasma	23
1.14.3. La source laser	23
1.15. Les différents procédés de soudage à l'arc.....	26
1.15.1. Le soudage à l'arc SMAW	26
1.15.2. Le soudage à l'arc GTAW	27
1.15.3. Le soudage à l'arc GMAW	28
1.16. Les différents régimes de transfert en soudage GMAW	28
1.16.1. Transfert par court-circuit.....	29
1.16.2. Transfert par pulvérisation axiale (spray)	30
1.16.3. Transfert à veine liquide rotative	31
1.16.4. Transfert en régime pulsé.....	31
1.16.5. Transferts par court-circuit forcé ou contrôlé.....	32
1.17. Le procédé CMT (Cold Metal Transfer)	32
1.18. Conclusion.....	34
Chapitre 2: Dispositifs expérimentaux et techniques de mesure	36
2.1. Conception de l'imprimante 3D basée sur la technologie WAAM.....	36
2.2. Généralités sur les imprimantes 3D métalliques open source	36
2.3. Analyse du besoin	37
2.3.1. Définition du besoin	37
2.4. Cahier des charges fonctionnel.....	38
2.5. Conception de l'imprimante	40
2.5.1. Conception mécanique.....	40
2.5.2. Commande du système	46
2.5.3. Carte Arduino	46
2.5.4. Carte RAMPS	47
2.5.5. Contrôleur de moteurs pas à pas	47
2.5.6. Logiciels.....	48
2.6. Le procédé de soudage CMT.....	49
2.7. Description des paramètres du procédé	49
2.8. Choix des consommables utilisés.....	51

2.8.1. Fil électrode.....	51
2.8.2. Tôle substrat	52
2.8.3. Gaz de protection	52
2.9. Instrumentation de l'imprimante 3D	52
2.10. Mesure des signaux électriques du générateur de soudage	53
2.10.1. Mesure du courant de soudage	53
2.10.2. Mesure de la tension de soudage	54
2.10.3. La centrale d'acquisition	54
2.10.4. Le programme d'acquisition	55
2.11. Caméra rapide.....	56
2.12. Caractérisation géométrique des dépôts	57
2.13. Numérisation de la surface des dépôts	57
2.14. Post-traitement de l'image virtuelle	58
2.15. Méthode manuelle de mesure des paramètres géométriques	59
2.16. Méthode automatique de mesure des paramètres géométriques	60
2.17. Caractérisation macrographique et micrographique des dépôts	62
2.18. Conclusion.....	63
Chapitre 3: Analyse de l'influence des paramètres du procédé CMT	65
3.1. Influence des paramètres procédé sur la géométrie des dépôts.....	65
3.1.1. Choix des paramètres procédé.....	65
3.1.2. Aspect général des cordons	66
3.1.3. Caractéristiques géométriques des cordons	68
3.1.4. Taux de dépôt	71
3.2. Réduction des défauts en début de cordons	72
3.2.1. Analyse du défaut	72
3.2.2. Analyse des paramètres du cycle d'amorçage	74
3.2.3. Influence des paramètres du cycle d'amorçage	75
3.2.4. Influence du mode « 2-temps spécial »	77
3.3. Analyse énergétique des différentes phases du cycle CMT.....	81
3.3.1. Analyse du cycle de transfert du procédé CMT.....	81
3.3.2. Méthodologie de découpage des 3 phases du cycle CMT	84
3.3.3. Comparaison des formes d'onde correspondant aux différents points de fonctionnement	85
3.3.4. Analyse des caractéristiques des phases du cycle CMT	87

3.3.5.	Influence de la distance tube contact - substrat	91
3.4.	Etude de l'influence des paramètres du cycle CMT sur les transferts	94
3.4.1.	Rappel des paramètres caractéristiques du cycle CMT	94
3.4.2.	Analyse de l'influence des paramètres de la phase d'arc chaud	95
3.4.3.	Analyse de l'influence des paramètres de la phase d'arc froid	99
3.4.4.	Analyse de l'influence du paramètre de la phase de court-circuit	100
3.5.	Optimisation des paramètres du cycle CMT	101
3.6.	Conclusion.....	105
Chapitre 4: Chapitre 4 : Fabrication de dépôts multicouches et contrôle du procédé		107
4.1.	Fabrication de dépôts multicouches	107
4.2.	Choix de la stratégie de construction	107
4.3.	Influence de la superposition de cordons sur la géométrie des dépôts	109
4.4.	Influence de la vitesse de déplacement sur la géométrie des murs	111
4.5.	Influence du temps d'attente entre deux couches	112
4.6.	Choix des paramètres de fabrication	114
4.7.	Fabrication de mur à partir du point de fonctionnement optimisé	116
4.8.	Développement d'une méthode de contrôle en ligne du procédé.....	118
4.9.	Les méthodes de contrôle statistique des processus.....	119
4.9.1.	Analyse de la forme de la dispersion	119
4.9.2.	Principe de la carte de contrôle : limites naturelles d'un processus.....	120
4.9.3.	La carte de contrôle	121
4.9.4.	Calcul des moyennes et étendues de la carte de contrôle	123
4.9.5.	Sélection de la taille et fréquence des échantillons	125
4.9.6.	Identification des variables représentatives de la stabilité du processus	125
4.9.7.	Calcul des limites naturelles du processus.....	129
4.9.8.	Cartes de contrôle de cordons réguliers.....	130
4.9.9.	Application des cartes de contrôle à des cordons irréguliers	135
4.9.10.	Application au contrôle de la fabrication d'un mur	139
4.10.	Conclusion.....	143
Conclusion et perspectives.....		145
Références.....		149
Liste des figures		159
Liste des tableaux		165

Introduction

Le développement récent des procédés de fabrication additive a déjà radicalement transformé les habitudes de production de plusieurs secteurs industriels. Ces nouveaux procédés ne présentent en effet presque aucune limite de formes de pièces réalisables, puisque celles-ci sont fabriquées par la superposition de couches élémentaires de tailles et formes quelconques. Les coûts de production sont presque identiques, qu'il s'agisse de la fabrication d'une pièce unitaire ou d'une série, puisqu'aucun outillage spécifique n'est à développer. Toute la chaîne de production est donc affectée par l'introduction de ces nouvelles technologies, depuis le bureau d'étude jusqu'à l'atelier de production, en passant par les services méthodes, et même les services commerciaux et marketing, les nouvelles possibilités offertes par ces procédés permettant de proposer des produits industriels presque « sur mesure ».

Ces technologies ont également suscité un fort engouement auprès du grand public, grâce notamment au développement du concept des imprimantes 3D « open source », construites à partir d'éléments standards assemblés selon des schémas disponibles en libre accès, et pilotées par des logiciels open source. Il est ainsi possible de construire, pour quelques centaines d'euros, une machine qui pourra fabriquer à volonté de petites pièces préalablement dessinées à l'aide d'un logiciel de CAO, à partir d'un filament en matériau polymère qui est chauffé et extrudé avant d'être déposé sur le support de construction pour fabriquer, par superposition de couches, la pièce en question.

Les équipements permettant de produire des pièces métalliques sont en revanche beaucoup plus coûteux, et ne sont donc accessibles qu'à certaines entreprises. Ces technologies de fabrication sont généralement basées sur la fusion, à partir d'une source laser ou d'un faisceau d'électron, d'une matière première constituée de poudres métalliques.

Parallèlement à ces développements, les procédés de soudage ont également connu au cours des dernières années de sérieuses évolutions, avec la généralisation des procédés automatisés et robotisés, qui permettent la réalisation rapide d'assemblages précis et reproductibles, mais aussi le développement de nouveaux procédés de soudage. Parmi ceux-ci, les techniques de soudage à l'arc dérivées du procédé GMAW (Gas Metal Arc Welding), dites à « court-circuit contrôlé », présentent un fort potentiel pour l'amélioration de la qualité des soudures, mais aussi pour des applications en fabrication additive. Le procédé de soudage GMAW consiste à fondre, grâce à un arc électrique, l'extrémité d'un fil-électrode, qui vient ensuite se déposer à l'état liquide sur les pièces à assembler en produisant leur fusion localisée, la liaison étant alors assurée par la solidification du mélange liquide formé. Le procédé produit cependant de nombreux défauts, dus à une difficile maîtrise de l'apport énergétique produisant la fusion et le « transfert » de métal liquide sur les pièces à assembler. Les nouveaux procédés à court-circuit contrôlé permettent, à travers un réglage spécifique des formes d'ondes des signaux caractéristiques de l'arc électrique, un meilleur contrôle de la fusion du fil, et son transfert régulier. Si le métal fondu est déposé sur un substrat massif, la fusion de ce dernier reste limitée, et l'on peut ainsi déposer un « cordon » de métal liquide qui se solidifie rapidement au contact du substrat. La superposition de cordons peut alors permettre de fabriquer des pièces selon le principe de la fabrication additive. Ces technologies, désignées sous l'acronyme anglais WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing), ne sont pas encore utilisées pour

la production industrielle de pièces métalliques, en raison principalement du mauvais état de surface des pièces fabriquées, et du difficile contrôle de l'apport de chaleur produisant la fusion du fil.

Parmi les techniques de soudage à l'arc par « court-circuit contrôlé », le procédé appelé CMT (Cold Metal Transfer), développé par la société Fronius, est sans doute le plus prometteur pour une utilisation en fabrication additive selon la technologie WAAM. Ce procédé associe un réglage très précis de la forme d'onde du courant contrôlant l'énergie produite par l'arc électrique, à un dévidage alterné du fil d'apport. Cela permet de générer à intervalles réguliers des court-circuit au cours desquels les gouttelettes de métal fondu à l'extrémité du fil-électrode sont déposées sur le substrat ou le bain fondu, et de produire le réamorçage de l'arc électrique lors du mouvement de retrait du fil, qui permet de rompre le court-circuit.

Le travail présenté dans ce mémoire étudie les possibilités de fabrication de pièces en acier à partir de la technologie de fabrication additive WAAM en utilisant une source de soudage CMT pour assurer la fusion du fil-électrode et sont dépôt.

Le premier chapitre présente une étude bibliographique retraçant l'évolution des nouveaux procédés de fabrication, depuis les technologies de prototypage vers la fabrication directe, en insistant plus particulièrement sur les techniques de fabrication additive. Les études portant sur la technologie WAAM sont ensuite détaillées, puis le principe des principaux procédés de soudage à l'arc est décrit, ainsi que leurs évolutions récentes, en terminant par le procédé CMT.

Le second chapitre présente la démarche de conception de l'installation de fabrication additive utilisant une source de soudage CMT développée pour cette étude. Cette conception reprend le principe des imprimantes 3D open source, dans l'objectif de développer une machine de fabrication additive de pièces métalliques « low cost ». L'instrumentation de ce banc d'essai pour pouvoir analyser les conditions de fabrication, ainsi que les méthodes originales de caractérisation des pièces produites, sont également présentées.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude du procédé CMT, et à l'influence de chacun des paramètres sur les formes d'onde des signaux électriques produits, les puissances et énergies associées, et les caractéristiques de cordons déposés. Cette analyse a conduit à la détermination d'un « point de fonctionnement » du procédé permettant d'augmenter le taux de dépôt, tout en conservant un cycle de fusion/dépôt de métal stable et régulier.

Enfin, le dernier chapitre est consacré à la réalisation de murs constitués par la superposition de plusieurs cordons, dans le but de fabriquer des pièces. L'effet de l'addition des couches sur les transferts thermiques et la géométrie des cordons déposés est discuté. Finalement, une méthode de contrôle en ligne du procédé, basée sur le principe des cartes de contrôle utilisées dans le cadre de la maîtrise statistique des procédés, est développée, afin de tenter de détecter l'apparition des défauts géométriques et déclencher des actions correctives. Les résultats de cette méthode sont testés sur quelques configurations présentant des défauts.

Chapitre 1: Revue bibliographique

Ce premier chapitre présente d'abord une revue non exhaustive des techniques de prototypage et de fabrication additive. Après une description des principes généraux caractérisant ces technologies, les principales techniques de fabrication additive sont présentées, et les avantages des technologies à base de fil métallique sont exposés. Le principe des technologies de fabrication additive par fusion à l'arc d'un fil métallique est ensuite décrit, et les études récentes portant sur ce procédé sont détaillées. Finalement, les caractéristiques principales des procédés de soudage à l'arc sont présentées, et les spécificités propres au procédé CMT utilisé dans le cadre de ce travail sont détaillées.

1.1. Généralités sur le prototypage

On peut définir le prototypage comme une approximation du produit selon une ou plusieurs dimensions d'intérêt, qui comprend des prototypes allant des croquis de concepts à des artefacts entièrement fonctionnels [1]. Le prototypage joue un rôle clé dans l'innovation des produits. Il aide à développer rapidement un produit en fournissant un bon outil pour la résolution de problèmes pour la validation d'un concept. Le prototypage peut aussi être utilisé pour augmenter la capacité de visualisation pendant les premières phases de la conception, et permet en plus de communiquer le but et la sensation du produit. Un autre avantage du prototypage est qu'il permet de tester et d'améliorer la conception, avant même la fabrication de l'outillage de production, qui est généralement coûteux. Finalement, le prototypage a énormément d'impact sur le coût, la qualité et le temps de développement du produit. Grâce à cela, différentes équipes peuvent regarder le prototype et l'utiliser comme un tremplin pour développer de nouveaux produits.

1.2. Classification des différents types de prototypage

Selon les différentes applications de prototypage, les méthodes de prototypage peuvent être classées en méthodes physiques ou analytiques. Par exemple, l'approche par simulation, ou prototypage virtuel, est une méthode analytique et une maquette d'argile est un prototype physique.

D'un point de vue différent, les prototypes peuvent également être classés comme des prototypes complets ou ciblés (comprehensive or focused prototypes). Par exemple, lorsque les prototypes sont utilisés pour tester le « look » d'un produit, ce prototype peut être fabriqué à partir de polystyrène à cette fin, c'est donc un prototype ciblé (focused prototype). Au contraire, un prototype de véhicule complet conçu pour tester ses fonctions essentielles serait un prototype complet (comprehensive prototype).

Les options traditionnelles de prototypage, qui peuvent être classées dans les méthodes de prototypage physiques, comprennent la construction d'un modèle en argile [2], en papier [2] ou papier carton [3], la sculpture en bois [4], le cintrage des câbles [5], la découpe de plaques de mousse en polystyrène expansé (Styrofoam) [2][3] et le fraisage d'un bloc de plastique [6] ou d'aluminium.

Cependant, ces méthodes prennent souvent beaucoup de temps, et les formes produites sont parfois de qualité insuffisante pour répondre à l'objectif.

Afin d'évaluer efficacement le concept du produit développé, ou pour améliorer sa conception, ou encore pour réduire le temps de production, d'autres techniques de prototypage, telles que le prototypage virtuel [7][8][9] et le prototypage rapide, ont été développées.

1.3. Prototypage virtuel et prototypage rapide

Les méthodologies de conception traditionnelles exigent que les concepteurs construisent une variété de prototypes physiques pour tester et évaluer leurs idées de conception. Actuellement, les nouvelles technologies impliquant un prototypage rapide et virtuel révolutionnent la façon dont les produits sont conçus.

Le prototypage virtuel est un processus de conception assistée par ordinateur (CAO). Il utilise un prototype numérique généré par ordinateur, au lieu d'un prototype physique, pour tester et évaluer les caractéristiques spécifiques, opérationnelles et de fabrication d'un produit. Il est souvent réalisé dans un environnement de réalité virtuelle, qui fournit une simulation stéréoscopique du modèle en 3D [7][10].

Si les méthodes de prototypage traditionnelles sont souvent efficaces dans la conception et l'analyse de produits composés d'au maximum 100 composants, pour les grands ensembles en revanche, les technologies de prototypage virtuel se sont révélées plus efficaces [1].

A la différence du prototypage virtuel, le prototypage rapide permet quant à lui de créer rapidement des prototypes physiques qui peuvent aider à accélérer le processus de développement d'un produit. Le prototypage rapide est un processus de fabrication de forme libre ("freeform") qui permet aux utilisateurs de fabriquer une pièce physique réelle à partir d'un modèle CAO en utilisant un type particulier de technologie et de matériau. Le fichier CAO est divisé en plusieurs couches par un logiciel qui peut également préparer la pièce pour la machine de fabrication en couches utilisée. La pièce est ensuite construite couche après couche sans outils extérieurs. Ce processus permet de créer rapidement des pièces géométriquement complexes.

1.4. Principes fondamentaux de fabrication

1.4.1. Classification des procédés de fabrication

Il existe trois types de procédés de fabrication: les méthodes soustractives, formatives et additives. Le principe de la fabrication soustractive [11], appelée aussi usinage, consiste à enlever de la matière de façon à donner à la pièce brute la forme et les dimensions voulues, à l'aide d'une machine-outil [12].

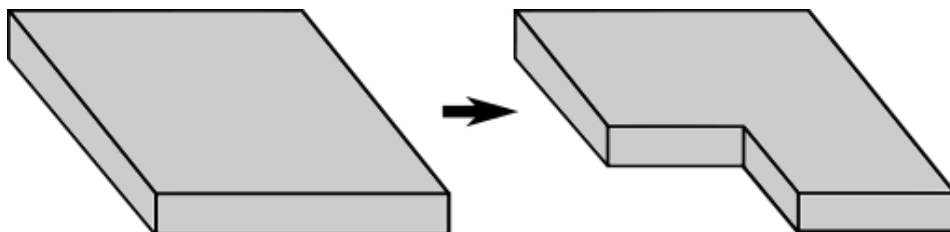


Figure 1.4.1 Principe de la fabrication soustractive : de la matière est progressivement enlevée d'un bloc brut de matériau jusqu'à ce que la forme souhaitée soit obtenue.

La fabrication formative [13][14] consiste à appliquer un effort mécanique sur une pièce brute de manière à la déformer pour lui faire prendre une forme souhaitée. On peut citer, par exemple, parmi

les techniques de fabrication formative, les procédés de pliage, de forgeage ou de matriçage. La matière peut aussi être portée à l'état liquide pour faciliter sa déformation, comme dans le cas du moulage ou du moulage par injection.

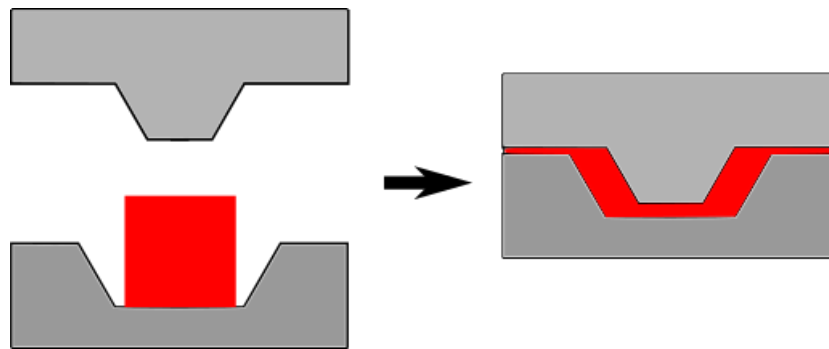


Figure 1.4.2 Principe de la fabrication formative : un effort mécanique est appliqué sur un matériau pour le déformer et lui faire prendre la forme souhaitée.

La fabrication additive, à l'inverse de la fabrication soustractive, consiste à déposer progressivement le matériau, de sorte que des portions successives de celui-ci soient combinées pour former l'objet souhaité, par exemple par soudage, brasage ou par la plupart des procédés de prototypage rapide.

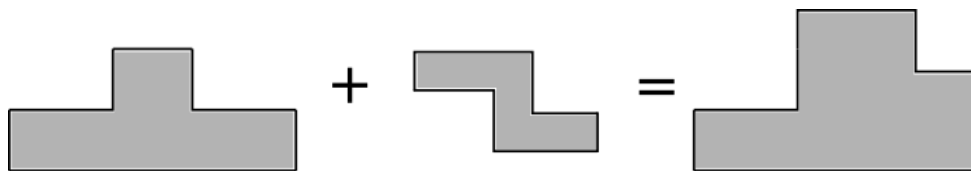


Figure 1.4.3. Principe de la fabrication additive : le matériau est manipulé pour que des portions successives de celui-ci soient combinées pour former l'objet désiré.

1.4.2. Prototypage rapide, fabrication additive et impression 3D

Il existe de nombreuses dénominations pour décrire les techniques de fabrication couche par couche. On peut citer par exemple les appellations suivantes, généralement traduites des dénominations anglaises originales: la fabrication en couches (layered manufacturing [15][16][17]), le prototypage rapide, l'outillage rapide (rapid tooling [18][19]), la fabrication solide de formes libres (solid freeform fabrication [20]), la fabrication additive, ou l'impression 3D (3D printing [21]). Ces expressions synonymes qualifient l'ensemble des techniques de fabrication couche par couche.

Au fil des années, de nombreux nouveaux procédés ont été créés avec à chaque fois un nom nouveau, bien que tous soient basés sur un principe de fabrication couche par couche similaire. Cette prolifération de noms a causé des problèmes de classification et de normalisation. Afin de normaliser l'utilisation de la terminologie, l'appellation « fabrication additive » (Additive Manufacturing en anglais) a finalement été adoptée comme le nom reconnu pour tous les processus qui sont additifs [22]. Ce terme désigne l'ensemble des procédés de fabrication par ajout de matière, qui regroupe six types de techniques: l'extrusion de matière, la projection de matière, la projection de liant, la photopolymérisation, la fusion de lit de poudre et le dépôt d'énergie dirigée.

L'expression "impression 3D" a été récemment popularisée par les médias pour désigner les techniques de fabrication additive. En réalité, l'impression 3D ne représente qu'un petit groupe de technologies de fabrication additive ou prototypage rapide.

1.5. Fabrication additive

Au cours des dernières années, la fabrication additive (FA) a évolué à partir d'imprimantes 3D utilisées pour le prototypage rapide vers une fabrication rapide sophistiquée qui peut créer directement des pièces sans outillages.

La fabrication additive se réfère à une large famille de techniques qui transforment les conceptions numériques 3D en pièces fonctionnelles réelles. Une définition formelle de la fabrication additive est donnée par le comité 42 de l'organisme de normalisation ASTM: « la fabrication additive est un processus par lequel un objet 3D est créé par dépôt des couches successives de matière » [23].

Contrairement aux techniques de fabrication classiques telles que l'usinage, qui fabriquent des produits en enlevant de la matière d'un bloc ou d'une tôle, la fabrication additive crée la forme finale en ajoutant de la matière, sans utilisation d'accessoires additionnels ou d'outils de coupe. Cela ouvre la possibilité de produire des pièces d'une géométrie complexe qui sont difficiles à obtenir en utilisant des processus d'enlèvement de matière classiques.

Il est important de mentionner que la FA est devenue possible grâce au développement d'autres technologies, comme par exemple la conception assistée par ordinateur (CAO), la fabrication assistée par ordinateur (FAO) et le contrôle numérique par ordinateur (CNC). Ces technologies combinées ont rendu possible la construction d'objets en trois dimensions [24].

1.5.1. Domaines d'application de la fabrication additive

La FA peut apporter une valeur ajoutée aux produits et améliorer leur qualité. L'un des premiers domaines d'application de la fabrication additive est le prototypage. Utilisés au départ comme supports visuels et modèles de présentation, les prototypes fabriqués par FA sont devenus une partie intégrale du processus de conception itératif d'un produit. Les pièces obtenues en FA ont commencé à être utilisées comme modèles fonctionnels, pour l'ajustement et l'assemblage.

Un autre domaine d'application pour la FA est la fabrication d'outillages, en particulier pour la technologie d'injection plastique, où la production d'outils avec des canaux de refroidissement spéciaux a été développée.

L'application qui a connu la plus forte croissance pour la FA est cependant la production directe de pièces. Par opposition au prototypage et à l'outillage rapide, où la FA est utilisée comme une étape dans le processus de conception ou de production, dans la production directe de pièces, la FA crée un produit final à vendre ou à utiliser [25]. Ce développement de la production directe de pièces a été rendu possible grâce à l'augmentation des familles de matériaux métalliques utilisables pour les différentes techniques de FA, la réduction des coûts de production, et la prise de conscience croissante du potentiel des processus de FA. Les industries où l'influence de la FA a eu un impact important sont les domaines aéronautique et spatiale [26]–[28], l'automobile [29], le militaire [30], l'électronique [31]–[33], le bio-médical [34]–[36] et le secteur des énergies [37].

1.5.2. Chaîne numérique en fabrication additive

La chaîne numérique est devenue un enjeu de plus en plus important dans l'industrie manufacturière. Comme tous les procédés de fabrication, la fabrication additive n'échappe pas à ce principe et doit donc avoir une chaîne numérique performante pour pouvoir se développer et gagner des parts de marché sur les autres procédés. Contrairement à la fabrication conventionnelle qui est soustractive, en FA, le matériau est ajouté successivement en couches pour construire une pièce. Cette stratégie de fabrication élimine les nombreux problèmes de préparation, parfois fastidieux, rencontrés en fabrication classique, la FA ne nécessitant pratiquement aucun effort humain pour démarrer la fabrication, une fois le modèle virtuel conçu. Toutes les étapes de préparation de la fabrication sont alors intégrées dans « la chaîne numérique », et sont réalisées de manière automatique une fois celle-ci paramétrée. Bien qu'il existe de nombreux procédés de FA, les différentes étapes de préparation de la fabrication sont très similaires (Figure 1.5.1).

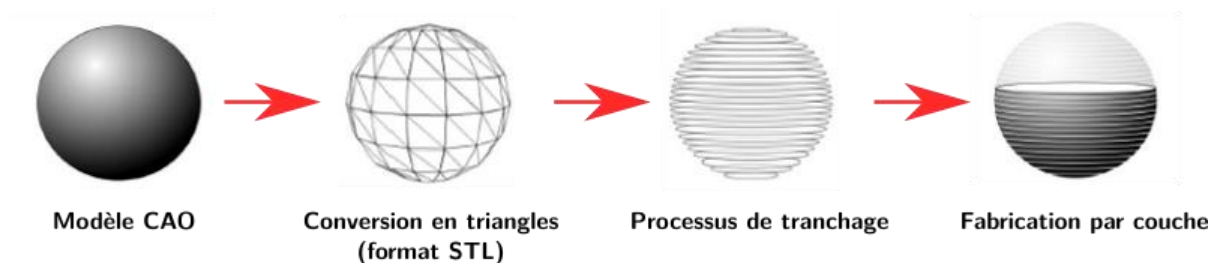


Figure 1.5.1. Chaîne numérique de la fabrication additive.

La première étape est la définition du modèle 3D de la pièce à fabriquer. Il existe une grande variété de sources pouvant fournir des données 3D pour le processus de FA, les principales étant les modèles 3D créés par le concepteur à l'aide d'un logiciel de CAO. Un autre type de source utilisable provient des techniques de retro-ingénierie, qui consistent à prendre une pièce existante et à la scanner à l'aide d'un scanner 3D. Le modèle 3D peut être un modèle « solide » intégrant la présence de matière, ou un modèle de surface, qui ne contient que la géométrie des surfaces des pièces.

L'étape suivante consiste à générer, à partir du modèle 3D, un modèle STL. Ce modèle peut être généré à l'aide du même logiciel de CAO que celui utilisé précédemment, ou en utilisant un logiciel indépendant. Le format de fichier STL est devenu un standard en FA. Il consiste en une décomposition de la surface d'un modèle 3D en facettes triangulaires repérées par leurs normales, et il est utilisé comme représentation de la pièce pour permettre son découpage en « tranches ». Même si le format de fichier STL est utilisé dans toutes les techniques de FA, les fichiers générés présentent parfois des défauts, tels que des triangles qui se chevauchent, des surfaces non fermées, ou des pertes d'informations. Des techniques de « réparation » des fichiers, basées sur diverses méthodes mathématiques, sont actuellement à l'étude pour tenter d'améliorer la qualité des fichiers STL générés [38].

La troisième étape est le découpage en tranches de la pièce et la génération des trajectoires de l'outil qui dépose la matière. Cette étape est généralement réalisée de manière automatique à l'aide d'un logiciel spécifique paramétré selon les caractéristiques de la machine de FA qui sera utilisée. Ce logiciel lit l'information contenue dans le fichier STL pour le découper en tranches d'épaisseur fixée, puis génère la trajectoire que décrira l'outil de fabrication. Le réglage des paramètres de fabrication

(hauteur des couches, vitesse de déplacement ...) est calculé par le logiciel en fonction des caractéristiques de la pièce et de la machine choisie, ou peut être modifié manuellement.

La fabrication de la pièce constitue l'avant dernière étape du processus. La trajectoire générée par le logiciel de découpage est introduite dans la machine de FA, qui transforme les instructions binaires en mouvement de la machine.

Enfin, la dernière étape consiste en une finition ou un post-traitement de la pièce fabriquée. Cette étape inclut par exemple le détachement de la pièce du plateau support, l'élimination des supports de construction parfois générés par le logiciel de découpage, ou les éventuels traitements thermiques permettant de libérer les contraintes résiduelles dans les pièces métalliques.

1.5.3. Les différentes technologies de fabrication additive

Le domaine de la fabrication additive rassemble une grande variété de procédés, possédant chacun des caractéristiques spécifiques. Plusieurs systèmes de classification des procédés de FA ont été proposés, en fonction par exemple de la nature et de l'état du matériau d'apport, de la source d'énergie utilisée, du volume de construction, etc. [39][40]. Le Comité international ASTM F42 [23] a quant à lui proposé de les regrouper en sept catégories, décrites dans le tableau suivant, qui donne également une brève description de chacune, et leurs principales applications.

Processus	Description	Exemples de sociétés	Application
Extrusion de matière	Ces machines poussent le matériau, généralement un filament thermoplastique, à travers une buse sur une plate-forme qui se déplace dans les directions horizontale et verticale.	Stratasys (US), RepRap, Ultimaker (Pay bas)	Prototypage
Jet de matière	Ce processus, en général, utilise une tête d'impression à jet d'encre mobile pour déposer du matériau sur une zone de construction.	3D Systems (US), SolidScape (US), Object (Israël)	Prototypage, Modèles de moulage
Jet de liant	Ce procédé utilise un agent de liaison liquide déposé à l'aide d'une tête d'impression à jet d'encre pour assembler des matériaux en poudre dans un lit en poudre.	3D Systems (US), ExOne (US), Voxeljet (Allemagne)	Prototypage, Moule à fondre
Photopolymérisation en cuve	Ces machines durcissent sélectivement un photopolymère liquide dans une cuve à l'aide de la lumière.	3D Systems (US), Envisiontec (Allemagne)	Prototypage
Stratification	Ce processus utilise des tôles de matériau liées pour former un objet tridimensionnel.	Fabrisonic (US), Mcor (Irlande)	Prototypage, Pièce directe
Fusion sur lit de poudre	Ce processus utilise de l'énergie thermique à partir d'un faisceau laser ou d'électrons pour fusionner sélectivement la poudre dans un lit de poudre.	EOS (Allemagne) 3D Systems (US), Arcam (Suède)	Prototypage, Pièce directe
Apport direct d'énergie	Ce processus utilise de l'énergie thermique à partir d'un faisceau laser, un faisceau d'électrons, ou d'un arc électrique pour fondre les matériaux à fur et à mesure qu'ils sont déposés.	Optomec (US) Sciaky, Inc. (US), BeAM (France)	Prototypage, Pièce directe

Tableau 1.5.1 Classification des différentes technologies de fabrication additive selon l'ASTM [23].

Par la suite, nous allons regrouper les différents procédés de FA selon le type de matériau utilisé, non métallique ou métallique.

1.5.4. Matériaux utilisés

On rencontre en FA deux principaux types de matériaux, les polymères et les métaux. Cependant, certains procédés de FA utilisent également des céramiques, des composites et d'autres matériaux. Les principaux matériaux utilisables selon la catégorie de procédé sont détaillés dans le Tableau 1.5.2 [41].

	Extrusion de matière	Jet de matière	Jet de liant	photo-polymérisation en cuve	Stratification	Fusion sur lit de poudre	Apport direct d'énergie
Polymères thermoplastiques	X	X	X	X	X	X	
Composites		X	X	X		X	
Métaux		X	X		X	X	X
Céramiques		X	X			X	
Cire		X		X			
Papier					X		
Résines durcissables UV		X		X			

Tableau 1.5.2 Les différentes catégories de procédés de fabrication additive et les types de matériaux associés [41]

1.6. Fabrication additive de pièces non métalliques

Divers procédés de FA ont été développés pour la fabrication de pièces non métalliques, et sont aujourd'hui commercialisés par différentes entreprises.

1.6.1. Stéréolithographie (SLA)

Considérée comme la première ou l'une des premières technologies de FA disponibles sur le marché, la technique de SLA a été créée et brevetée dans les années 1980 par Charles Hull [41]. Le procédé est basé sur le durcissement par polymérisation d'une résine liquide photosensible par exposition sélective à une lumière ultraviolette (UV). Le plateau de construction est recouvert d'une couche d'épaisseur donnée de résine liquide contenue dans une cuve, qui est ensuite balayée par la lumière UV pour durcir sélectivement la résine. Une fois qu'une tranche de la pièce est fabriquée, le plateau descend d'une épaisseur de couche, et une lame remplie de résine balaie la surface de la pièce, en la recouvrant d'une couche de résine fraîche. La couche déposée est alors à nouveau irradiée par la lumière UV de manière sélective, formant une nouvelle couche de matière durcie adhérant à la couche précédente [43]. Les matériaux typiquement employés pour la SLA sont des résines durcissables aux UV, contenant parfois des suspensions de particules céramiques. Aujourd'hui, le procédé SLA a connu des développements permettant de fabriquer des pièces partiellement métalliques, en utilisant des suspensions de particules de métal dans une résine photo-durcissable. La SLA n'est généralement utilisée que pour fabriquer des prototypes. Les principaux fabricants de machines de SLA sont aujourd'hui 3DSystems (USA) [44] et EOS (Allemagne) [45].

1.6.2. Fused Deposition Modeling (FDM)

Ce procédé dépose un fil de matière plastique fondu sur un substrat, à l'aide d'une tête mobile. Le matériau est chauffé à une température légèrement supérieure à son point de fusion à l'intérieur de la tête, puis il est extrudé par une buse sur le substrat. Il se refroidit ensuite jusqu'à ce qu'il se solidifie et forme une couche [46]. La technologie a été développée par S. Scott Crump à la fin des années 1980 et a été commercialisée en 1990. La technologie FDM est une marque déposée de l'entreprise Stratasys [47]. Les matériaux typiquement utilisés avec la technologie FDM sont des polymères thermoplastiques comme l'ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrène) et le PLA (Polylactic Acid). Il existe cependant des développements en cours pour utiliser des polymères renforcés avec des particules de céramique ou de métal.

1.6.3. 3D inkjet printing (3DP)

L'impression tridimensionnelle (3DP) (ou 3D inkjet printing en anglais) [48][49] est un procédé de FA dans lequel la pièce est construite à partir d'un lit de poudre. Une tête d'impression à jet d'encre est

utilisée pour pulvériser un liant liquide dans une couche de poudre déposée d'épaisseur donnée, et le liant se solidifie pour former une couche solide. Ensuite, le piston qui maintient le plateau de construction de la pièce descend d'une hauteur équivalente à l'épaisseur de couche, et une nouvelle couche de poudre est appliquée. Le processus 3DP est assez flexible en termes de types de matériaux pouvant être utilisés. Toute combinaison d'un matériau en poudre avec un liant ayant une viscosité suffisamment faible pour former des gouttelettes peut être utilisée. Des pièces en plastique, en céramique, en métal et en céramique-métal peuvent être fabriquées à l'aide de la 3DP. L'inconvénient de la technique est que les pièces, obtenues à partir de poudres, sont poreuses. Des post-traitements, notamment par frittage et/ou infiltration, peuvent être réalisés pour augmenter la densité, et créer des pièces entièrement fonctionnelles. Le système est commercialisé par l'entreprise 3D Systems [44].

1.6.4. Laminated Object Manufacturing (LOM)

Dans le procédé de fabrication d'objets laminés (LOM) [49] [50], le matériau solide est sous la forme de feuilles. Les étapes du processus consistent à découper des tranches de la pièce à fabriquer dans les feuilles à l'aide d'un laser le coupe, et à lier les différentes tranches découpées à l'aide d'un rouleau à chaud qui active un adhésif thermosensible. Les matériaux utilisés avec ce procédé sont des feuilles de papier adhésif ou de plastique, ou de fines tôles de métal.

1.7. Fabrication additive de pièces métalliques

Bien qu'elles aient été développées à l'origine pour fabriquer des pièces en matériaux organiques, les technologies de FA ont étendu leur domaine d'application à la fabrication de matériaux métalliques. Plusieurs de ces techniques ont été développées spécifiquement pour la fabrication de composants métalliques, tandis que d'autres sont adaptées des technologies à base de polymères [52]. Les techniques de FA de pièces métalliques peuvent être regroupées en 3 catégories selon la nature et la forme des matériaux utilisés.

1.7.1. Techniques de FA sur lit de poudre

Dans les techniques de FA utilisant des poudres, l'enceinte de construction consiste en une chambre fermée qui peut être utilisée sous vide ou remplie d'un gaz inerte pour empêcher l'oxydation des poudres métalliques, souvent très réactives [53]. Au centre de la chambre, un réservoir de poudre métallique dépose une couche de poudre qui est lissée à l'aide d'un système de nivellement. La chambre est ensuite préchauffée à une température prédéterminée selon le procédé, environ 100° C pour les techniques par faisceau laser et 700° C pour la technique par faisceau d'électrons. Un faisceau laser ou un faisceau d'électrons balaye ensuite la surface de la poudre métallique dans les zones correspondant à la forme de la tranche de la pièce qui doit être construite. Chaque couche fabriquée possède une épaisseur comprise entre 20 et 200 µm selon le procédé, le matériau ou les réglages choisis. Le plateau de construction est ensuite abaissé d'une épaisseur de couche, et le système de nivellement étale une couche de poudre fraîche sur le dessus de la pièce, et le processus est répété jusqu'à ce que la construction soit terminée [54][52]. Le Tableau 1.7.1 résume les avantages et inconvénients des deux principales techniques de FA sur lit de poudre. De nombreuses dénominations ont été proposées pour ces procédés, dont les plus courantes sont également rassemblées dans le Tableau 1.7.1.

		Système de Fabrication Additive	Exemples	Caractéristiques				
				Résolution	Taux de dépôt	Finition de surface	Efficience énergétique	Coût
Fusion	Faisceau laser	Lit de poudre	DMLS, SLS, SLM	++	–	+++	–	–
	Faisceau d'électrons	Lit de poudre	EBSM, EBM, EBAM	0	+	+	++	–

Frittage métallique par faisceau d'électrons (Direct Metal Laser Sintering **DMLS**),
Frittage Sélective par faisceau de laser(Selective Laser Sintering **SLS**),
Fusion sélective par faisceau laser (Selctive Laser Melting **SLM**),
Fusion sélective par faisceau d'électrons (Electron Beam Selective Melting **EBSM**),
Fusion de faisceau d'électrons (Electron Beam Melting **EBM**),
Fabrication Additive par faisceau d'électron(Electron Beam Additive Manufacturing **EBAM**),
++: excellent; +: bon; 0: neutre; –: négatif.

Tableau 1.7.1 Comparaison des techniques de fabrication additive métallique sur lit de poudre, et principales désignations employées pour ces techniques [55]

1.7.2. Techniques de FA par injection de poudre

Une autre technologie de FA de pièces métalliques utilise l'injection de poudre pour fournir le matériau à déposer. Au lieu d'un lit de poudre qui réagit avec un faisceau d'énergie, la poudre est injectée à travers une buse, puis elle est fondue à l'aide d'un faisceau laser pour former une couche de matière dense. La poudre peut être injectée à travers un gaz porteur inerte ou alimentée par simple gravité. Avec les deux méthodes d'injection de poudre, une alimentation séparée de gaz de protection est utilisée pour protéger le métal liquide de l'oxydation. La pièce est généralement fixée sur un plateau qui se déplace dans le plan horizontal dans les deux directions x et y. La tête laser est translatée verticalement pour être refocalisée pour chaque nouvelle couche à déposer [52].

La technologie par injection de poudre et faisceau laser peut également être utilisée pour la réparation de pièces déjà existantes. De plus, le métal en poudre injecté peut être mélangé à d'autres métaux, permettant de fabriquer des pièces en alliages de compositions variables [56][57]. La technique par injection de poudre n'est pas limitée à un volume confiné, comme le sont les systèmes sur lit de poudre. Par conséquent, cette technologie peut être utilisée pour déposer des revêtements fonctionnels sur de grandes pièces, telles que des pièces forgées. En général, cette technologie n'est pas en mesure de procurer une précision dimensionnelle équivalente à celle des techniques sur lit de poudre, c'est pourquoi elle est plutôt utilisée pour la réparation et le revêtement. Le Tableau 1.7.2 résume les principaux avantages et inconvénients de cette technique. Comme pour le précédent type de technique de FA, plusieurs dénominations ont été proposées pour désigner ces procédés (Tableau 1.7.2).

		Système de Fabrication Additive	Exemples	Caractéristiques				
				Résolution	Taux de dépôt	Finition de surface	Efficience énergétique	Coût
Fusion	Faisceau laser	Injection de poudre	LENS, LAM, DLD, LMDS,LMD	+	++	+	–	0

Mise en form par faisceau laser (Laser-Engineered net shaping **LENS**),
Fabrication additive par faisceau laser (Laser Additive Manufacturing **LAM**),
Déposition directe par faisceau laser (Direct Laser Deposition **DLD**),
Formation par déposition de métal par faisceau laser (Laser Metal Deposition Shaping **LMDS**),
Déposition de métal par faisceau laser (Laser Metal Deposition **LMD**),
++: excellent; +: bon; 0: neutre; –: négatif.

Tableau 1.7.2 Avantages et inconvénients des techniques de fabrication additive par injection de poudre, et principales désignations employées pour ces techniques [55]

1.7.3. Techniques de FA par fusion de fil métallique

En plus des techniques sur lit de poudre et par injection de poudre, il existe une troisième technologie de FA qui utilise un fil métallique comme matériau de base. La source d'énergie peut être un faisceau d'électrons, un faisceau laser, ou un plasma d'arc généré par un poste de soudage. La technique consiste à déposer des couches successives de fil métallique fondu grâce à une source d'énergie, pour finalement fabriquer une structure tridimensionnelle. Ces techniques sont généralement adaptées à des pièces de dimensions plus importantes que les technologies à base de poudre. Les techniques de FA par fusion de fil métallique permettent en effet d'atteindre des taux de dépôt très élevés, ce qui permet de fabriquer des structures de gros volumes [58]. Elles peuvent offrir une alternative rapide, flexible et rentable aux méthodes de production de courtes séries, et sont particulièrement adaptées pour la personnalisation de pièces, la fabrication de composants structurels, surtout pour l'industrie aérospatiale, et pour la réparation de pièces denses de taille moyenne comme des moules. Cependant, la précision dimensionnelle et l'état de surface sont moins bons comparativement aux technologies à base de poudre, et la pièce finale a généralement besoin d'un usinage pour arriver à la forme finale souhaitée. Le Tableau 1.7.3 présente les avantages et inconvénients de ces techniques et les dénominations généralement employées pour les désigner.

		Système de Fabrication Additive	Exemples	Caractéristiques				
				Résolution	Taux de dépôt	Finition de surface	Efficiency énergétique	Coût
Fusion	Faisceau laser	Fil métallique	DMD	0	++	0	–	–
	Faisceau d'électrons	Fil métallique	EBF ³	–	++	0	++	+
	Arc électrique	Fil métallique	WAAM	–	+++	–	++	+++

Déposition directe de métal (Direct Metal Deposition **DMD**),
Fabrication de forme libre par faisceau d'électrons (Electron Beam Free Fabrication **EBF³**),
Fabrication additive par fil et arc électrique (Wire and Arc Additive Manufacturing **WAAM**),
++: excellent; +: bon; 0: neutre; –: négatif.

Tableau 1.7.3 Comparaison des techniques de fabrication additive métallique par fusion de fil [55]

1.8. Fabrication additive métallique par dépôt de fil fondu

Contrairement aux technologies à base de poudre, qui ont bénéficié d'un très fort engouement ces dernières années, les technologies de FA à base de fil métallique sont encore assez peu étudiées, et n'ont fait l'objet que de rares travaux de recherche. Ces techniques, qui peuvent utiliser, comme cela a été précisé dans le précédent paragraphe, un faisceau laser, un faisceau d'électrons ou un arc électrique pour fondre le fil métallique, sont généralement regroupées sous la désignation « Shaped Metal Deposition » (SMD).

1.8.1. Classification des technologies SMD

Comme cela a déjà été mentionné, les technologies de FA peuvent être classées en fonction de la source d'énergie utilisée pour fondre la matière. La Figure 1.8.1 propose ainsi un classement des technologies SMD en trois catégories selon la source d'énergie employée.

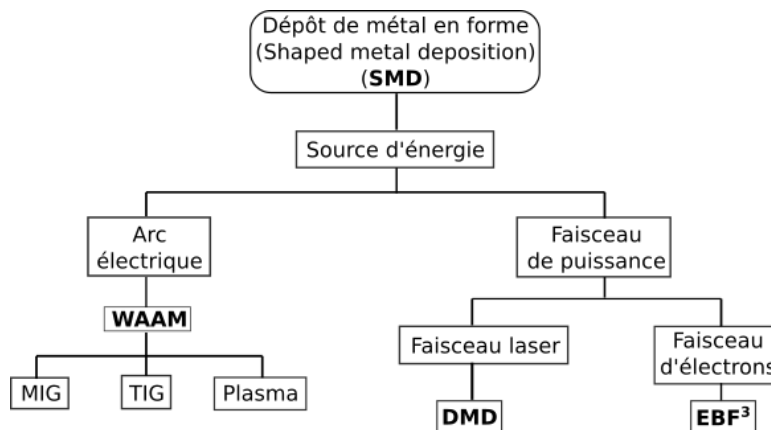


Figure 1.8.1. Classification des technologies SMD en fonction de la source d'énergie employée.

1.8.1.1. Techniques à base de faisceau d'électrons : Electron Beam Free Form Fabrication (EBF³)

Ce procédé, développé par le Centre Langley de recherche de la NASA [59], utilise un faisceau d'électrons comme source d'énergie pour faire fondre l'extrémité d'un fil métallique, déposé à partir d'une bobine sur la zone de construction de la pièce à fabriquer (Figure 1.8.2). Pour permettre le transfert du faisceau d'électrons jusqu'à la surface du fil, l'enceinte doit être soumise à un vide secondaire, ce qui permet également de protéger le métal liquide de toute oxydation. Cette technique est donc particulièrement adaptée à la fabrication de pièces en matériaux sensibles à l'oxydation, comme les alliages d'aluminium et surtout de titane [60]. Le diamètre du fil employé est un facteur important qui détermine l'état de surface des pièces obtenues avec ce procédé. Des fils de fort diamètre seront ainsi utilisés pour les parties massives des pièces, permettant de forts taux de dépôt, tandis que des fils plus fins pourront être utilisés pour les détails fins de la géométrie des pièces.

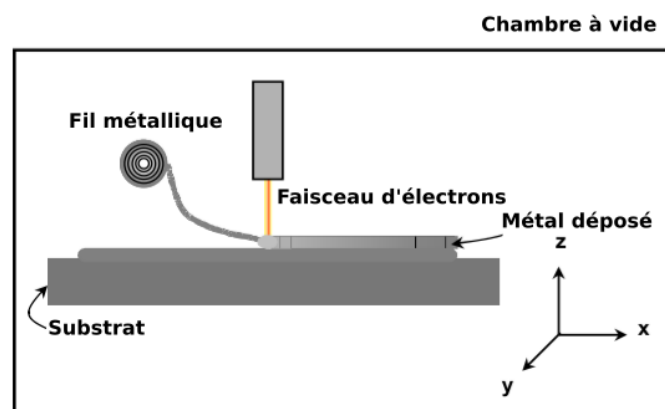


Figure 1.8.2. Représentation schématique des composants du système de FA par EBF³ [59].

1.8.1.2. Techniques à base de laser : Direct Metal Deposition (DMD)

La technique de « dépôt direct de métal » (Direct Metal Deposition, DMD) est une technologie de FA à base de laser utilisant généralement une poudre, injectée grâce à une buse d'alimentation dans l'axe du faisceau laser (Figure 1.8.3). Le jet de poudre peut cependant être remplacé par un fil métallique alimenté à vitesse constante grâce à un dévidoir. L'extrémité du fil est alors fondue par le

faisceau laser, et le métal liquide est déposé sur la surface de la pièce à construire, couche après couche. Une grande variété d'alliages métalliques, tels que les aciers, les alliages de titane et d'aluminium, ont été étudiés pour ce procédé. Parmi ces différents matériaux, c'est cependant l'alliage de titane Ti-6Al-4V qui a reçu la plus grande attention, en raison de son usage répandu dans l'industrie aéronautique [61].

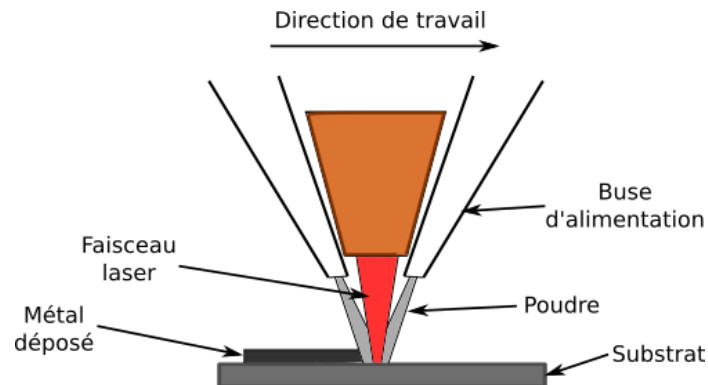


Figure 1.8.3. Représentation schématique des composants du système de FA par EBF³ [59].

1.8.1.3. Techniques à base d'arc électrique

Cette technique, généralement désignée par l'acronyme WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing), emploie une énergie électrique pour produire la fusion d'un fil d'apport [58], [62]. La Figure 1.8.4 montre une description schématique du procédé. Ce type de technologie s'apparente aux technologies traditionnelles de soudage à l'arc. Elle a pu se développer au cours des dernières années en raison du développement de plus en plus pointu et spécifique des équipements de soudage : robots et automates de soudage, géométrie des torches, synergies et capacité des générateurs de courant... Plusieurs procédés de soudage à l'arc ont ainsi été adaptés pour permettre de fabriquer des pièces par addition de couches de métal déposé à l'état liquide [63], [64].

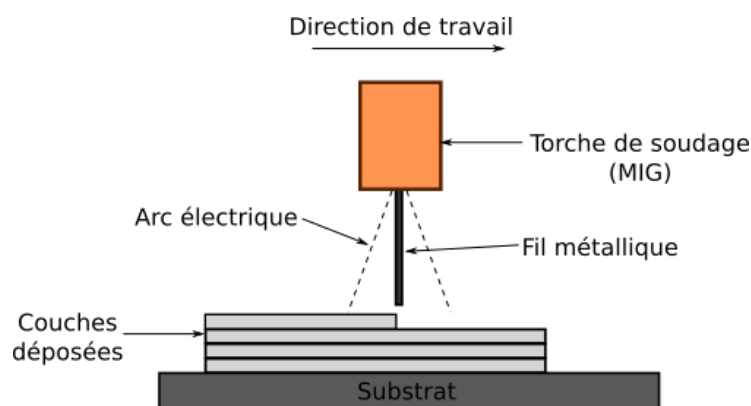


Figure 1.8.4. Représentation schématique des composants du système WAAM, avec une torche de soudage MIG.

1.9. Avantages de la FA par fil métallique par rapport aux techniques à base de poudres

Bien qu'elles aient été relativement peu étudiées jusqu'à présent en comparaison des techniques à base de poudres, les techniques à base de fil métallique présentent de nombreux avantages, qui expliquent le regain d'intérêt dont elles bénéficient depuis quelques années.

1.9.1. Disponibilité des matériaux

Les techniques à base de fil métallique utilisent comme produit d'apport des bobines de fil identiques à celles utilisées pour le soudage. De très nombreux produits développés pour ces applications d'assemblage sont donc disponibles pour la fabrication additive. Le catalogue Grainger répertorie par exemple 380 différentes nuances d'aciers et d'alliages de nickel disponibles sous la forme de fil de soudure [7]. A ces différents produits, s'ajoutent de nombreux fils constitués d'autres métaux et alliages. La liste suivante indique les principaux métaux et alliages disponibles sous la forme de fils de soudage utilisables pour la fabrication additive.

- Titane et alliages de titane
- Nickel et alliages de nickel, dont Inconel 600, 625, 718
- Alliages nickel-cuivre
- Aciers
- Aciers inoxydables et aciers réfractaires
- Aluminium et alliages d'aluminium 1100, 2318, 2319, série 3000, 4043, 4047, 5183, 5356, 5554, 5556
- Alliages de cobalt
- Alliages de zirconium
- Tantale
- Tungstène
- Niobium
- Molybdène

La variété de matériaux disponibles est ainsi bien plus large que ceux utilisables par les techniques à base de poudres. Notons que des fils spécifiquement développés pour la technologie WAAM sont maintenant proposés par certains fournisseurs de produits d'apport de soudage [65].

1.9.2. Coût des matériaux d'apport

Une recherche de fournisseur sur Internet permet facilement de vérifier que la matière première sous la forme de poudre est plus coûteuse que sous la forme de fil métallique. Par exemple, le coût par kilogramme de la poudre d'alliage de titane Ti-6Al-4V de qualité FA est plus élevé de 141% par rapport au coût moyen du fil du même alliage [66]. Le coût de la poudre de tantale de qualité FA est supérieur de 7% au coût moyen du fil de tantale [66]. De la même façon, la poudre d'Inconel 625 de qualité FA, ou la poudre d'acier inoxydable 316 de qualité FA, coûtent le double du coût moyen de leurs homologues en fils [66].

D'autre part, la quantité de matière première nécessaire pour produire une pièce est bien plus importante avec les procédés à base de poudre. En effet, on utilise en moyenne un volume de poudre équivalent à 5 fois le volume de la pièce à construire, une grande partie de la matière étant inutilisée, et doit être éliminée, ou récupérée et recyclée dans le meilleur des cas. Les techniques à base de fil ne génèrent, en revanche, que très peu de déchets de matière. Les procédés par fils métalliques sont donc plus respectueux de l'environnement, en raison du rendement d'utilisation proche de 100% du fil d'apport, et il n'est donc pas nécessaire de récupérer et recycler la matière non utilisée après fabrication.

1.9.3. Dimension des pièces et taux de dépôt

Avec les procédés par fil métallique, on peut produire des structures métalliques à grande échelle, d'une longueur supérieure à 6 mètres [67], alors que les techniques à base de poudre ne permettent généralement pas de fabriquer des pièces de plus de 0,014 m³ de volume en raison des limites des capacités dimensionnelles des machines existantes [62]. Les taux de dépôt étant beaucoup plus faibles avec les techniques à base de poudres (0,01-2,27 kg/h contre 9-10 kg/h pour les techniques à base de fil) [66][68], les temps de production des pièces de grandes dimensions, telles que celles susceptibles d'être utilisées dans les moteurs d'avion, les structures de châssis ou d'autres grands systèmes mécaniques, sont donc plus élevés.

Enfin, l'utilisation de matériau d'apport dense à la place d'une poudre permet de limiter certains défauts de compacité, les pièces obtenues à partir de poudres contenant souvent des porosités qui peuvent limiter la résistance des structures fabriquées [69].

1.9.4. Problèmes de sécurité et de santé

L'utilisation de matériaux sous la forme de fines poudres pose aussi des problèmes pour la santé des opérateurs, l'inhalation de particules fines de certains métaux, comme le nickel, étant nocive. Pour limiter les risques potentiels pour la santé, des appareils respiratoires et des systèmes de ventilation doivent être utilisés, ce qui renchérit le coût du procédé et rend les opérations de manipulation des poudres plus complexes [70]. Certaines poudres à base d'aluminium ou de titane sont aussi très inflammables et nécessitent de prendre des précautions supplémentaires lors de leur stockage et de leur manipulation [71].

1.10. Fabrication additive par fil et arc électrique

Le principe de la fabrication additive de pièces métalliques à l'aide d'un fil et d'un arc électrique (Wire and Arc Additive Manufacturing, WAAM) a fait l'objet d'un brevet déposé dès le début des années 1920. La technique était présentée comme un moyen de produire des pièces métalliques décoratives par l'addition de couches de métal fondu à l'aide d'un poste de soudage à l'arc manuel [72]. Au cours des décennies suivantes, la technologie a parfois été utilisée pour réparer les surfaces de composants métalliques dégradés [73], [74]. Ce n'est que bien plus tard, à partir des années 1980 et surtout 1990, que ce principe a été utilisé pour tenter de fabriquer des pièces mécaniques de grandes dimensions [75],[76]. Un article récent dresse une revue historique plus détaillée de cette technologie [77].

1.11. Développements récents du procédé WAAM.

C'est à partir du début des années 1990 que la technologie WAAM a connu de nouveaux développements, grâce à l'arrivée des nouvelles générations de robots qui ont permis de souder en différentes positions, ce qui a donné la possibilité d'assembler directement des pièces de formes beaucoup plus complexes, donnant naissance à ce que l'on appelle aujourd'hui le « soudage 3D » [78].

Ces innovations, qui ont apporté des gains importants de productivité et de qualité dans le domaine du soudage, n'ont cependant pas permis le développement à une échelle industrielle de la technologie WAAM. Des verrous technologiques sont en effet apparus, liés notamment à la détermination des paramètres optimum du procédé, qui peuvent être très différents de ceux

employés en soudage, à l'accumulation de la chaleur dans la pièce au fur et à mesure de la construction, ou aux contraintes résiduelles générées, qui peuvent induire des déformations importantes. De plus, la faible précision dimensionnelle permise par la technique et l'état de surface médiocre des dépôts, inhérents aux procédés de soudage à l'arc, ont constitué des limites à son développement industriel.

Le choix et le contrôle précis des paramètres du procédé a une influence déterminante sur la qualité géométrique des pièces fabriquées. Plusieurs études ont ainsi mis en évidence l'influence de divers paramètres du procédé sur la qualité dimensionnelle des pièces, en particulier l'intensité de soudage, la vitesse de dévidage du fil d'apport, la vitesse de déplacement de la torche de soudage [79], et le pas de translation verticale de la torche entre chaque couche [80]. L'optimisation et le contrôle de ces paramètres permet alors de réduire les défauts géométriques lors de l'empilement des dépôts successifs [79][81].

De nombreux travaux de recherche sont orientés vers l'identification de corrélations entre les paramètres du procédé de soudage et la géométrie des cordons déposés [82], afin de pouvoir prédire la forme de la pièce en cours de construction et faciliter le développement des outils logiciel de pilotage de la fabrication. Les résultats de ces études ont montré que des modèles analytiques pouvaient être utilisés efficacement pour prédire avec une grande précision la géométrie du dépôt à partir des paramètres de procédé utilisés, ou pour choisir des paramètres procédé permettant de réduire les défauts de surface. Ces modèles ont été identifiés en utilisant différentes techniques comme l'analyse de régression [83][84][85], les réseaux de neurones artificiels [86] ou la combinaison de ces deux techniques [87]. Ces études ont aussi montré que la géométrie des cordons déposés pouvait être décrite avec précision par divers types de fonctions, telles que des fonctions paraboliques ou sinus [88][89].

Parmi les défauts géométriques observés avec le procédé WAAM, les défauts de type accumulation ou manque de matière en début ou en fin de dépôt sont les plus fréquents. Ces défauts ont de plus tendance à s'amplifier avec l'accumulation des couches déposées. L'ajustement des paramètres du procédé de soudage dans les phases d'amorçage ou de fin de dépôt peuvent permettre de réduire ces défauts [90]. Une autre stratégie consiste à alterner le sens de dépôt d'une couche à l'autre, ce qui permet de compenser les excès de matière parfois observés en début de cordon par les manques de matière déposée en fin de cordon, ou inversement.

Ces approches consistant à modifier les paramètres du procédé durant les phases transitoires de démarrage et de fin des dépôts pour limiter les défauts géométriques, bien qu'elles conduisent à des résultats satisfaisants, sont toutefois basées sur des méthodes empiriques d'optimisation, qui peuvent nécessiter beaucoup de temps pour chaque nouvelle application. Des méthodes alternatives sont aussi développées, consistant à optimiser les trajectoires de dépôt pour éliminer autant que possible en amont les configurations pouvant favoriser l'apparition des défauts géométriques. Ces approches présentent toutefois aussi des limites, car les outils de génération des trajectoires généralement employés sur les installations utilisant la technique WAAM sont identiques à ceux utilisés sur les machines de fraisage, généralement des logiciels commerciaux (logiciels de Fabrication Assistée par Ordinateur, ou FAO). De la même façon, le « découpage » du modèle de pièce à réaliser est généralement effectué à l'aide de logiciels initialement développés pour les techniques de prototypage rapide, qui ne sont donc pas toujours bien adaptés à la technologie WAAM [91]. Des

équipes de recherche travaillent donc sur le développement d'outils logiciels mieux adaptés, intégrant les spécificités et les contraintes de la technologie WAAM, pour permettre d'optimiser plus efficacement la fabrication au cours de la phase de préparation (Figure 1.11.1) [92][93].

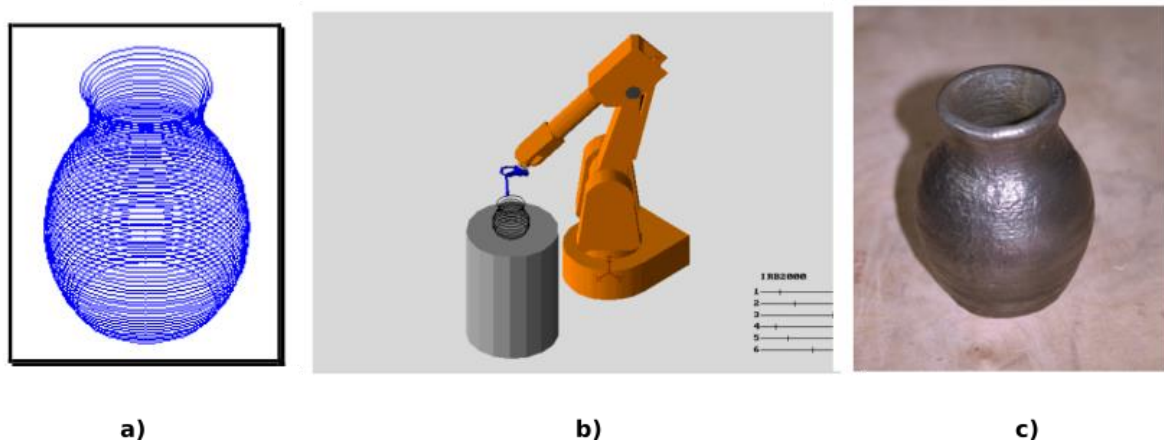


Figure 1.11.1. a) Découpage de model CAO et trajectoire de fabrication, b) Simulation de la trajectoire de fabrication en WAAM, c) Pièce métallique solide [92]

L'une des difficultés rencontrées dans la définition des trajectoires est liée à la refusion plus ou moins importante, lors du dépôt d'une couche de matière fondue, des couches adjacentes, ce qui a bien sur une influence sur la géométrie du dépôt, qui peut subir des « effondrements » si la refusion est trop importante, ou une discontinuité si elle est au contraire trop faible. Venturini et al. [94] ont par exemple travaillé sur l'optimisation de la trajectoire de l'outil de dépôt pour la réalisation de pièces en forme de T, améliorant ainsi fortement la précision de la pièce fabriquée dans la zone de raccordement. Ding et al. [95] ont quant à eux développé un algorithme basé sur la « transformation de l'axe médian » (Medial Axis Transformation en anglais), pour calculer les trajectoires optimales de l'outil permettant de remplir un volume donné sans laisser de vides. D'autres stratégies de programmation de trajectoires tentent de limiter les phases d'amorçage/arrêt de l'arc électrique, qui ont tendance à favoriser la génération de défauts. Un algorithme permettant la génération de trajectoire d'outil pour la fabrication de pièces massives sans arrêt de l'arc électrique a ainsi été développé [96]. La géométrie de la pièce est d'abord découpée en tranches, puis chacune d'elles est décomposée en un ensemble de polygones convexes, dans lesquels la trajectoire de remplissage est calculée. Finalement, toutes les « sous-trajectoires » sont liées entre elles pour former une seule trajectoire continue, permettant de fabriquer sans arrêt de l'arc électrique chacune des couches.

L'une des difficultés inhérentes au procédé WAAM concerne la génération de contraintes résiduelles importantes, sous l'effet du chauffage/refroidissement localisé de la pièce, qui peut affecter la résistance des pièces produites, mais aussi modifier leur géométrie en produisant des déformations. Pour limiter ces distorsions, des stratégies d'optimisation des trajectoires sont également recherchées, afin de modifier l'histoire thermique du processus, et par conséquent la répartition des contraintes résiduelles [97]–[99]. Il a notamment été observé qu'un dépôt continu sans refroidissement intermédiaire générerait moins de déformations. En revanche, cette stratégie de dépôt continu peut provoquer un apport excessif de chaleur dans la pièce en construction, provoquant un effondrement progressif, du fait de la refusion de plus en plus importante des couches précédemment déposées. La géométrie de la pièce risque alors de devenir non conforme [100]. Un contrôle du cycle thermique, grâce à un système de refroidissement et/ou le maintien en

température avant le dépôt et entre les différentes couches (préchauffage ou post chauffage), peut aussi contribuer à réduire la déformation des pièces [77]. L'analyse par la méthode des éléments finis des sollicitations thermomécaniques induites par le procédé lors de l'empilement des couches successives a permis d'étudier les effets de divers paramètres de fabrication, comme les trajectoires et le sens des dépôts, ou le temps entre deux couches déposées, sur l'évolution des températures dans la pièce en construction, et des contraintes et déformations résiduelles [101] [102] [103]. D'un point de vue pratique, l'une des solutions expérimentées ayant permis de réduire significativement les contraintes résiduelles et les distorsions consiste à appliquer une déformation sur le cordon déposé à l'aide d'un rouleau, ce qui contribue en outre à affiner le grain par un phénomène de recristallisation [104].

La recristallisation du grain de solidification a un effet bénéfique sur les propriétés mécaniques, car la microstructure brute issue du processus de fusion localisée et solidification dirigée est constituée de grains colonnaires, présentant une forte anisotropie de comportement [104]. De plus, dans les alliages d'aluminium en particulier, des porosités sont souvent observées, qui peuvent être en partie éliminées par la déformation plastique et la recristallisation, donnant au matériau des caractéristiques mécaniques équivalentes à celles des matériaux forgés.

Les développements les plus récents portent sur le contrôle en continu des paramètres du procédé pour prévenir toute dérive pouvant engendrer des défauts géométriques ou microstructuraux. Des techniques d'imagerie basées sur des caméras rapides associées à du traitement d'image sont aujourd'hui développées pour surveiller et réguler, à travers des contrôleurs de soudage à boucle fermée, le transfert de métal fondu [63][105]. Des systèmes permettant de mesurer de manière automatisée la hauteur du dépôt réalisé, à l'aide notamment de profilomètres laser, ont été également développés [106]. D'autres études évaluent la stabilité et la régularité des dépôts grâce à des mesures de température, à l'aide de pyromètres laser ou de caméras thermiques [107].

En raison de la qualité souvent médiocre de l'état de surface des pièces fabriquées avec le procédé WAAM, un usinage de finition est nécessaire pour les composants ayant de faibles tolérances dimensionnelle. Des machines hybrides combinant la technique de fabrication additive WAAM et une technique d'usinage conventionnelle, permettant d'éliminer la matière en excès déposée par le procédé WAAM tout en améliorant l'état de surface, ont été développées, exploitant les avantages des deux procédés [79][96][97].

1.12. Les différents types de technologies de soudage à l'arc utilisées en WAAM

La technologie WAAM s'est développée en utilisant trois technologies de procédé de soudage à l'arc pour fondre et déposer le fil métallique. Le procédé TIG (Tungsten Inert Gas), aussi appelé GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), utilise une électrode réfractaire en alliage de tungstène pour créer et maintenir l'arc électrique. Le fil d'apport doit alors être amené de manière indépendante, pour que son extrémité traverse l'arc électrique pour pouvoir fondre et se déposer sur la zone de construction de la pièce.

Le procédé Plasma, ou PAW (Plasma Arc Welding), utilise également une électrode réfractaire en alliage de tungstène, mais contrairement au procédé TIG pour lequel l'arc est « libre », celui du

procédé plasma est « constricté » en passant à travers une tuyère, ce qui donne un arc de très forte densité d'énergie. Le fil d'apport doit également être apporté de manière indépendante dans l'axe de l'arc électrique.

Enfin, le procédé MIG (Metal Inert Gas), appelé aussi GMAW (Gas Metal Arc Welding), utilise comme électrode un fil d'apport fusible, relié à l'une des bornes du générateur de soudage, qui doit alors être dévidé pour compenser sa fusion. Du fait que la géométrie de l'extrémité de l'électrode change en permanence à cause de sa fusion, l'arc est moins stable qu'avec les procédés TIG ou plasma. En revanche, les problèmes de positionnement précis du fil par rapport à l'arc ne se posent pas avec ce procédé. La Figure 1.12.1 montre une représentation schématisée de ces trois types de procédés. Ils seront décrits de manière plus détaillée dans les paragraphes suivants.

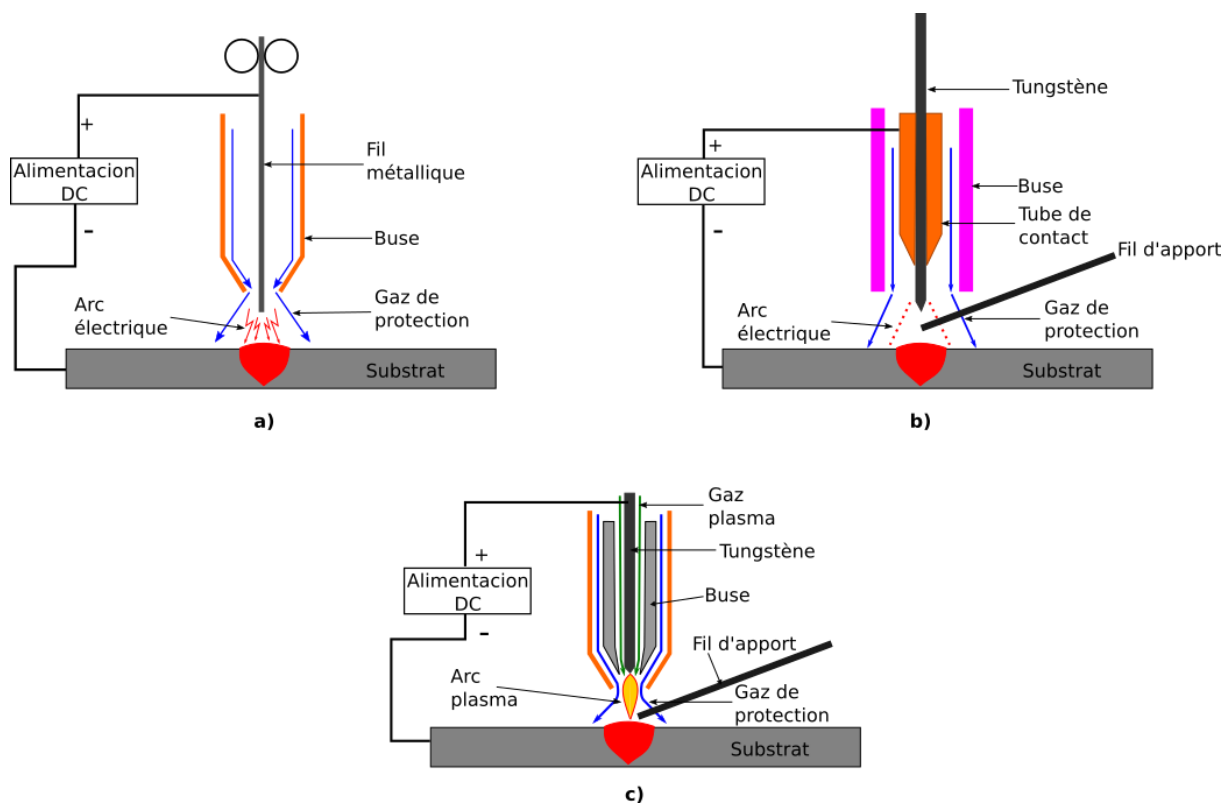


Figure 1.12.1. Représentation schématisée des procédés de soudage à l'arc : a) GMAW, b) GTAW, c) PAW

1.13. Généralités sur le soudage

Le procédé WAAM étant directement dérivé des technologies de soudage, il est nécessaire de rappeler quelques caractéristiques essentielles de l'opération de soudage et des principes et techniques sur lesquels sont basés les principaux procédés.

De manière générale, le soudage est un procédé de fabrication très répandu dans l'industrie, petite ou grande, permettant d'assembler de manière efficace, économique et fiable des éléments métalliques. Le soudage trouve notamment de nombreuses applications dans l'industrie automobile, la construction de bâtiments, de ponts et de navires, de sous-marins, d'appareils à pression, de gazoducs, et des principaux éléments de structure des centrales nucléaires. Il existe aujourd'hui de nombreux procédés de soudage répondant à la très grande variété d'assemblages à réaliser et aux caractéristiques des métaux utilisés.

1.13.1. L'opération de soudage

Le soudage est une opération qui consiste à assembler deux éléments métalliques par fusion et re-solidification localisée. En d'autres termes, il s'agit d'assurer la continuité mécanique entre les parties à assembler, avec ou sans l'aide d'un produit d'apport.

Dans la plupart des cas, un métal d'apport doit cependant être ajouté aux joints lors du soudage par fusion, et dans ce cas, le matériau d'apport choisi doit posséder des propriétés d'usage au moins équivalentes et une température de fusion du même ordre de grandeur que celle des matériaux à assembler. L'utilisation de métal d'apport répond à deux besoins : tout d'abord, il est nécessaire d'apporter de la matière afin de combler une préparation de joint (chanfrein), afin d'assurer ainsi une section efficace suffisante entre les deux parties à assembler ; d'autre part, il est aussi souvent nécessaire de modifier, ou tout au moins de contrôler la composition et la structure métallographique de la zone fondue, afin de lui donner les caractéristiques mécaniques voulues.

Pendant la phase de soudage, le métal d'apport ainsi qu'une partie du métal de base des éléments à assembler sont portés au-dessus de la température de fusion, ce qui permet ainsi le mélange à l'état liquide des éléments. La zone fondue, ou cordon de soudure, est alors constituée du mélange des deux métaux de base et dans la plupart des cas d'un métal d'apport. De part et d'autre de cette zone fondue, les éléments à assembler ont subi également un échauffement important produisant des transformations de leurs structures cristallines. Cette zone est appelée « zone affectée thermiquement », ou ZAT (Figure 1.13.1).

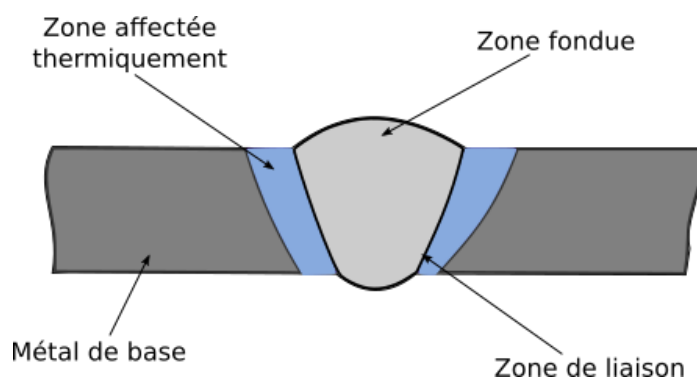


Figure 1.13.1. Représentation schématique d'une coupe transversale d'un assemblage.

1.14. Les différentes sources d'énergie utilisées en soudage

Par définition, le soudage a besoin d'un apport de chaleur pour produire la fusion localisée de la matière et obtenir une continuité métallique entre les pièces. Selon les caractéristiques des matériaux à assembler, différentes sources d'énergie sont utilisées pour réaliser la fusion des éléments à assembler ou du métal d'apport. Dans les paragraphes suivants, une brève description des principales sources d'énergie utilisées en soudage est donnée, afin de mieux comprendre les caractéristiques du procédé de soudage.

1.14.1. La combustion d'un gaz

La première source d'énergie utilisée pour le soudage a été obtenue grâce à la combustion d'un gaz combustible avec un gaz carburant (oxygène ou air). Le soudage par gaz comprend tous les procédés

dans lesquels des gaz combustibles sont utilisés en combinaison avec de l'oxygène pour obtenir un mélange inflammable. Les gaz généralement utilisés sont l'acétylène, le propane, ou des mélanges d'acétylène avec d'autres gaz (crylène, tétrène). La combinaison de gaz la plus courante est le mélange oxyacétylénique (oxygène et acétylène), dont la combustion produit une flamme dont la température maximale dépasse 3000°C (Figure 1.14.1).

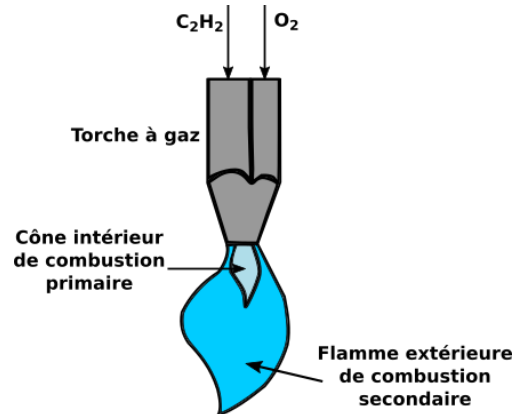


Figure 1.14.1. Représentation schématique de la flamme oxyacétylénique.

1.14.2. Le plasma

Considéré comme le quatrième état de la matière (après l'état solide, liquide, et gazeux), le plasma est constitué d'un gaz ionisé. Le soudage plasma se caractérise par la transformation à l'état plasma d'un gaz plasmagène par un arc électrique établi entre une électrode réfractaire et une anode. Le procédé plasma se compose d'une électrode réfractaire placée dans une tuyère refroidie à l'eau dans laquelle circule un gaz plasmagène, permettant la création d'un plasma d'arc à l'extrémité de l'électrode. La géométrie de la tuyère, qui ne laisse qu'un petit orifice pour le passage du plasma, produit une constriction de l'arc qui est ensuite transféré vers les pièces à souder. La tuyère est elle-même entourée par une buse projetant un gaz inerte autour du plasma, assurant la protection contre l'oxydation du métal en fusion. Grâce au phénomène de constriction de l'arc, la densité d'énergie du plasma est très élevée (10^9 W/m^2), tout comme sa température (entre 16000 et 33000 °C), ce qui permet un échauffement très rapide du matériau à assembler, qui fond et même se vaporise localement. Grâce aux températures très élevées et à la forte densité de puissance de l'arc, le procédé permet d'améliorer les performances du soudage à l'arc conventionnel en augmentant la vitesse de soudage ou l'épaisseur maximale des éléments à assembler. Il peut aussi être employé pour découper des métaux.

1.14.3. La source laser

Le terme LASER signifie en anglais *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, c'est-à-dire amplification de la lumière par émission de rayonnement stimulé. Le laser peut être considéré à la fois comme une onde d'énergie et un faisceau de particules, selon le principe physique de la dualité onde-particule. L'une des particularités du laser est qu'il s'agit d'un faisceau de lumière possédant une bande de longueur d'onde très étroite, au point de pouvoir être considérée comme une lumière monochromatique. Le faisceau sortant de la source laser, parallèle, peut avoir un diamètre de 1 à 10 mm selon le type de source d'émission employée. Pour des applications en soudage, le faisceau doit être focalisé, pour qu'il atteigne des densités d'énergie comprises entre 10^{10} et 10^{13} W/m^2 . Sous l'effet de telles densités d'énergie, le métal est localement vaporisé,

formant au sein de la matière une cavité étroite emplie de vapeurs métalliques, appelée « capillaire » ou « keyhole » en anglais (Figure 1.14.2). Ce procédé de soudage, en raison de la très forte concentration de la source de chaleur, permet de souder à très grande vitesse, ou d'obtenir de très fortes pénétrations, ce qui autorise le soudage en une seule passe de pièces de forte épaisseur. Il permet de plus de limiter les distorsions subies par les pièces sous l'effet des dilatations-contractions induites par le cycle thermique. Il n'emploie généralement pas de métal d'apport, c'est pourquoi il a fallu, pour pouvoir appliquer le laser à la FA de pièces métalliques, ajouter un système d'alimentation en matière métallique, sous la forme de poudres ou d'amenée de fil.

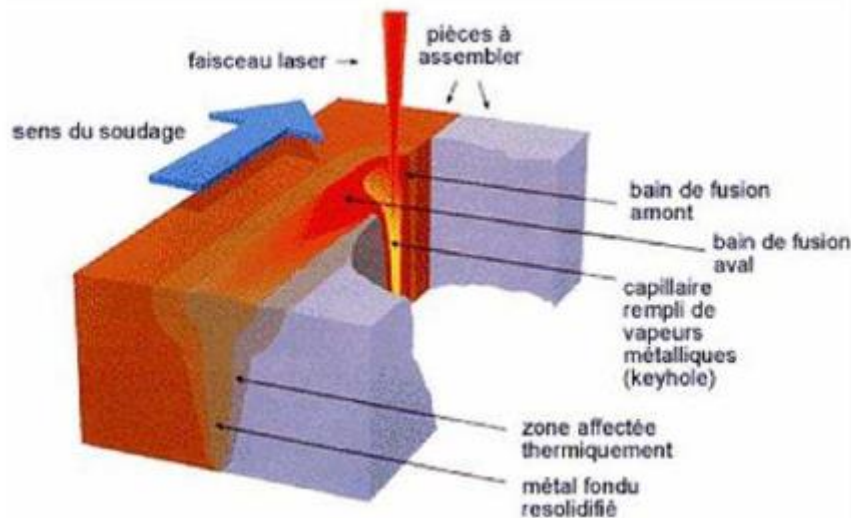


Figure 1.14.2. Représentation schématique du soudage laser.

La source d'énergie la plus utilisée dans les procédés de soudage est l'arc électrique, en raison de la forte intensité de chaleur qu'il produit, et de la facilité à le contrôler. Les densités de puissance spécifique obtenues avec de telles sources sont de l'ordre de 10^6 W/cm^2 . Un arc électrique est un conducteur électrique gazeux qui change l'énergie électrique en chaleur. Cette transformation est produite par une source de courant, générée par un générateur, qui permet de maintenir une différence de potentiel entre l'anode et la cathode. Trois types de particules se déplacent à l'intérieur de l'arc électrique: les électrons se déplacent de la borne négative (cathode) vers la borne positive (anode), et supportent la plus grande partie de la conduction de courant en raison de leur plus petite masse et de leur plus grande mobilité ; les ions positifs, formés dans le milieu gazeux, se déplacent en sens inverse des électrons ; enfin, les ions négatifs tels que ceux issus de l'ionisation des atomes d'oxygène, qui captent des électrons, se déplacent vers l'anode. La zone anodique, qui subit une forte chute de tension (Figure 1.14.3), est le siège d'un bombardement d'électrons. Ces derniers transmettent à l'anode leur énergie cinétique, sous la forme d'une « chaleur de condensation », ce qui produit une forte augmentation de température pouvant atteindre entre 5 000 et 20 000K au niveau de la surface de l'anode, produisant généralement sa fusion.

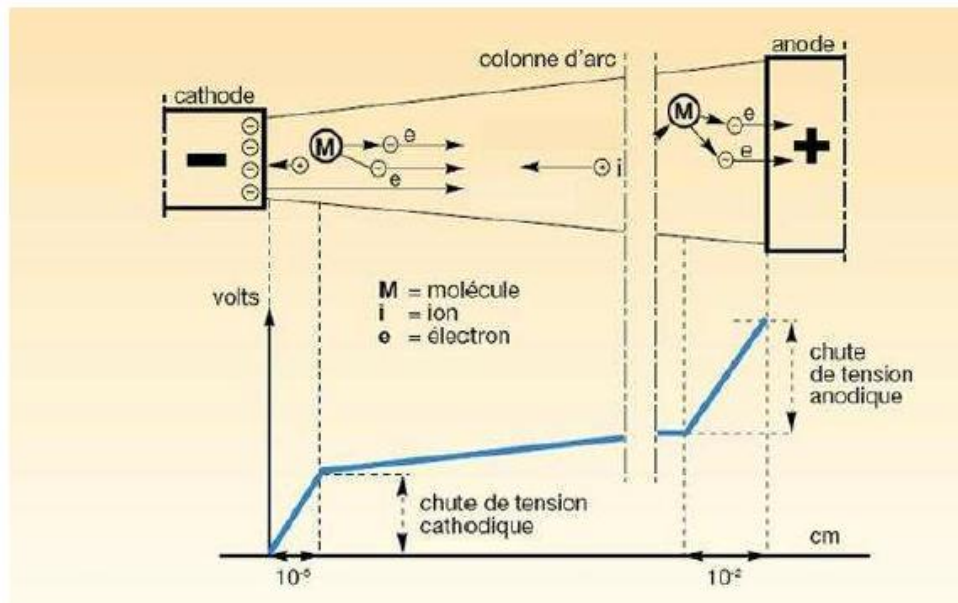


Figure 1.14.3. Représentation schématic d'un arc électrique [110].

L'arc électrique utilisé dans les différents procédés de soudage, que nous décrivons plus loin, peut présenter des caractéristiques différentes selon le procédé de soudage. Si le courant employé est continu (Direct Current, DC), les pièces à souder peuvent être reliées à la borne positive ou négative du générateur. Dans le premier cas, les pièces à souder constituent l'anode, tandis que la cathode est constituée par l'électrode de soudage (on parle de polarité EN, pour électrode négative). Les pièces à souder subissent donc le plus fort échauffement et ont tendance à fondre, ce qui permet la formation de la zone fondue. Cette polarité est employée avec les procédés de soudage à l'arc utilisant une électrode réfractaire, comme le procédé TIG (ou GTAW). Dans le second cas, les pièces à souder constituent la cathode et l'anode est constituée par l'électrode de soudage, qui subira donc le plus fort échauffement et aura tendance à fondre (polarité EP ou électrode positive). Cette polarité est employée avec les procédés de soudage à l'arc utilisant une électrode fusible, qui est alors constituée du métal d'apport à déposer dans la soudure, comme dans le cas du procédé MIG (ou GMAW). C'est dans ce cas principalement la chaleur accumulée dans le métal liquide déposé qui permet la fusion localisée des pièces à assembler, et la formation de la zone fondue.

Pour certaines applications bien particulières (soudage des alliages d'aluminium par exemple), un courant alternatif (AC) peut aussi être employé, ce qui permet d'inverser à chaque période de courant la polarité de la pièce et de l'électrode, favorisant la fusion des pièces lorsqu'elles sont à l'anode, ou leur décapage lorsqu'elles sont à la cathode, par le phénomène d'émission cathodique.

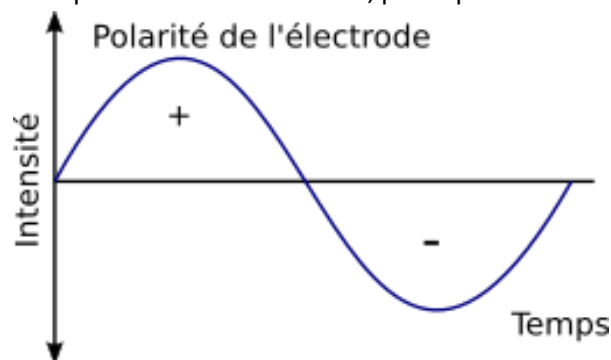


Figure 1.14.4. Forme d'onde utilisée lors du soudage en courant alternatif (AC)

Pour mieux maîtriser l'énergie apportée à la pièce et ainsi améliorer les performances, une source de courant dite « pulsée » peut aussi être employée, caractérisée par une succession de phases de courant bas et de courant haut (Figure 1.14.5). Cette forme particulière du courant permet de générer un apport d'énergie important lors des impulsions de courant, favorisant la fusion du métal d'apport (fil métallique), tout en limitant l'échauffement du métal de base, grâce aux phases de courant bas, pendant lesquelles l'intensité est maintenue juste suffisante pour éviter l'extinction de l'arc.

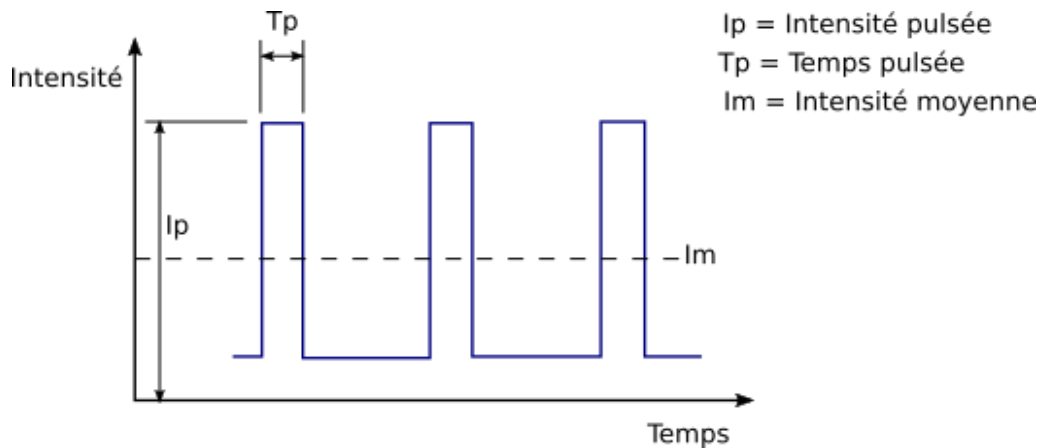


Figure 1.14.5. Forme d'onde utilisée lors du soudage en courant pulsé

1.15. Les différents procédés de soudage à l'arc

Il existe une grande variété de procédés de soudage utilisant l'arc électrique comme source de chaleur. Nous ne détaillons dans cette partie que les trois procédés les plus couramment employés dans l'industrie.

1.15.1. Le soudage à l'arc SMAW

Le procédé de soudage à l'arc SMAW (Shielded Metal Arc Welding), ou soudage à l'électrode enrobée en français, est bien connu pour sa polyvalence, car il peut être utilisé dans toutes les positions de soudage pour la fabrication ou la réparation de composants métalliques. C'est l'un des procédés de soudage les plus simples en termes d'exigences d'équipement, qui peut être utilisé aussi bien en atelier que sur chantier. Il s'agit cependant d'un procédé exclusivement manuel, qui nécessite souvent un niveau de compétence élevé du soudeur.

La technique de soudage à l'électrode enrobée utilise généralement un générateur de courant continu, et une électrode fusible reliée à la polarité positive du générateur (anode). Les électrodes employées sont constituées d'un noyau ou âme métallique constituant le métal d'apport, recouvert d'un enrobage dont la fonction principale est de former lors de sa fusion une couche de « laitier » à la surface de la zone fondue, qui la protège de l'oxydation (Figure 1.15.1).

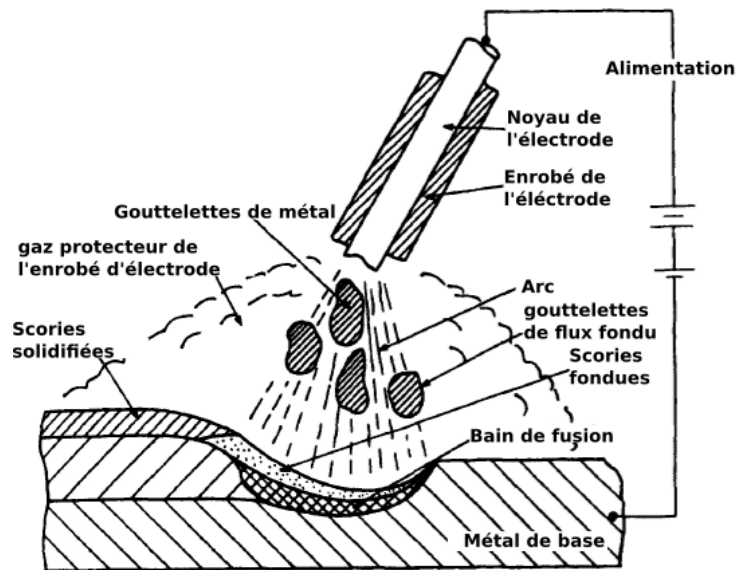


Figure 1.15.1. Représentation schématique du procédé de soudage SMAW

1.15.2. Le soudage à l'arc GTAW

Le soudage à l'arc GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) est un procédé manuel ou automatique qui permet d'assembler une très grande variété de matériaux. En conditions manuelles, il requiert cependant un haut degré de qualification du soudeur pour obtenir des soudures de qualité.

Le procédé de soudage GTAW, aussi appelé soudage TIG (Tungsten Inert Gas), utilise comme source de chaleur un arc électrique maintenu entre une électrode de tungstène non fusible, et les pièces à souder. La zone affectée par la chaleur, le métal fondu et l'électrode de tungstène sont protégées de la contamination atmosphérique par une couverture de gaz inerte (généralement de l'argon ou de l'hélium) alimenté par la torche de soudage (Figure 1.15.2). Dans certains cas, de l'hydrogène peut être ajouté au gaz de protection, ce qui génère un arc plus énergétique et permet d'atteindre des vitesses de soudage plus élevées. Afin d'éviter la fusion de l'électrode de tungstène, celle-ci est en général reliée à la borne négative du générateur (cathode), les pièces à assembler faisant alors office d'anode, et recevant de ce fait la majeure partie de la chaleur générée par l'arc électrique. Si un métal d'apport est nécessaire, on utilise un fil métallique, ajouté manuellement au niveau du bain de fusion, ou de manière automatique à l'aide d'un système de dévidage.

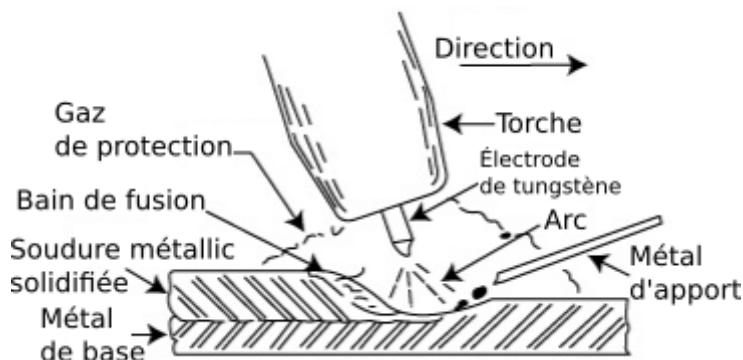


Figure 1.15.2. Représentation schématique du procédé GTAW

1.15.3. Le soudage à l'arc GMAW

Le procédé GMAW (Gas Metal Arc Welding) est aujourd'hui le procédé de soudage le plus utilisé dans l'industrie. Malgré ses soixante ans d'histoire, des développements constants continuent d'apporter des améliorations à ce procédé. Il permet de souder une grande variété de matériaux, tels que les aciers au carbone, les aciers inoxydables, les alliages d'aluminium, de magnésium, de cuivre, de nickel, et peut aussi être utilisé pour réaliser des revêtements métalliques par « rechargement ». Le procédé GMAW peut de plus être facilement automatisé, ou utilisé sur des installations robotisées.

Le procédé GMAW utilise un fil-électrode fusible, qui assure à la fois l'apport de métal, et la création et le maintien de l'arc électrique. Pour compenser la fusion du fil-électrode, celui-ci doit être alimenté à l'aide d'un dévidoir. En général, le fil-électrode est relié à la polarité positive du générateur (anode) grâce à un tube-contact, qui assure également son guidage vers le bain de fusion (Figure 1.15.3). La protection contre l'oxydation est assurée, comme avec le procédé GTAW, par un gaz inerte, généralement à base d'argon, qui est guidé à l'intérieur de la buse de soudage jusqu'à la zone fondue. On utilise aussi pour désigner le procédé l'acronyme MIG (Metal Inert Gas). Pour certaines applications, un gaz actif, généralement du CO_2 ou de l'oxygène, peut être ajouté afin d'augmenter l'énergie transmise par l'arc. On parle alors de procédé MAG (Metal Active Gas).

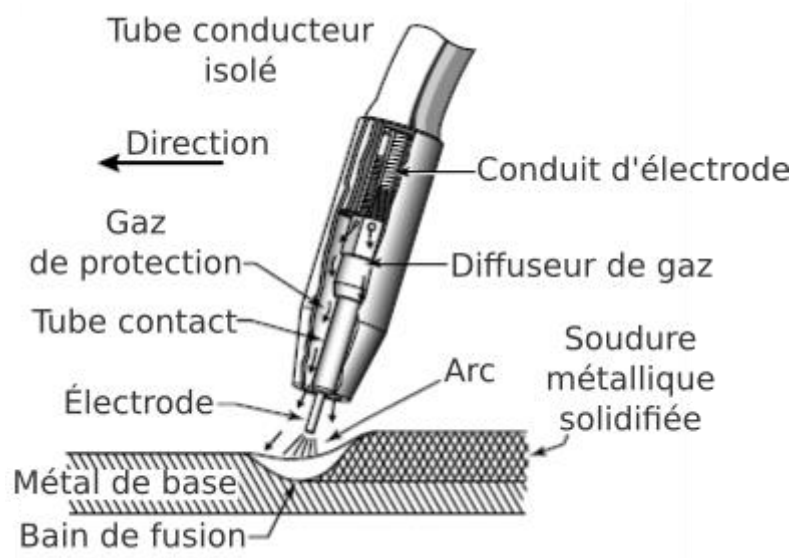


Figure 1.15.3. Représentation schématique du procédé GMAW

1.16. Les différents régimes de transfert en soudage GMAW

Comme cela vient d'être rappelé, le procédé de soudage à l'arc GMAW a pour principe la fusion, grâce à un arc électrique, d'un fil-électrode constituant le métal d'apport. Celui-ci est ensuite déposé à l'état liquide sur les pièces à souder, produisant leur fusion localisée en leur transférant une partie de la chaleur qu'il transporte. Ce transfert de matière depuis l'extrémité du fil électrode jusqu'au bain de fusion est régi par divers phénomènes physiques, souvent couplés, dont l'importance relative varie selon les niveaux d'énergie de l'arc électrique. La Figure 1.16.1 illustre les différents

modes de transfert de métal que l'on peut rencontrer en soudage GMAW, en fonction de l'intensité et de la tension de l'arc électrique.

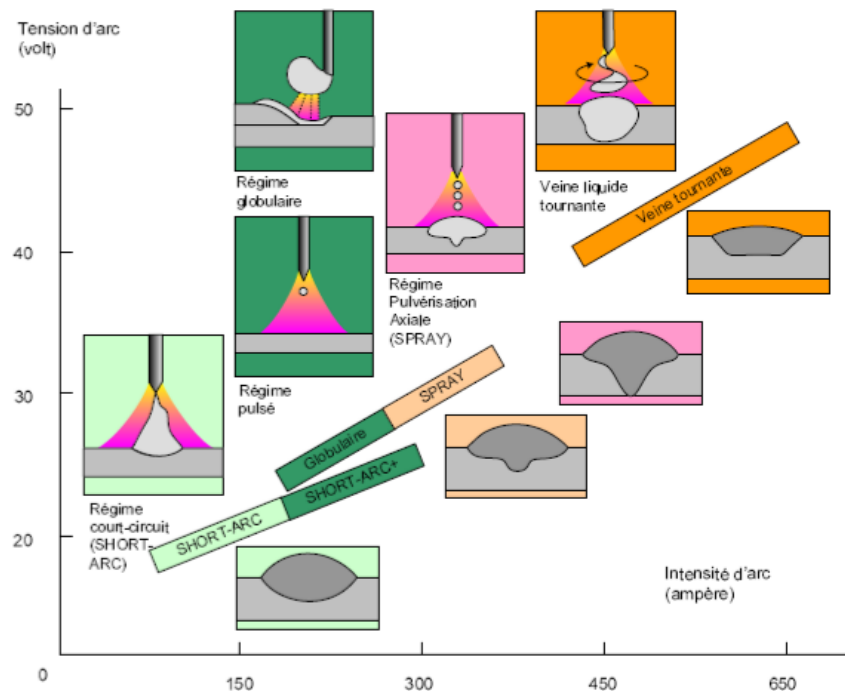


Figure 1.16.1. Les différents modes de transfert rencontrés en soudage GMAW [110]

1.16.1. Transfert par court-circuit

Le transfert par court-circuit apparaît pour de faibles intensités et tensions de soudage (17 à 21V, et moins de 200 A en courant lisse et continu). Il est caractérisé par l'extinction suivie du réamorçage périodique de l'arc, ce qui entraîne de grandes variations du courant et de la tension (Figure 1.16.2). Ce régime est lié à une énergie de soudage insuffisante pour produire la formation et le détachement de gouttelettes à l'extrémité du fil-électrode. L'arc électrique produit bien la fusion de l'extrémité du fil, mais la gouttelette formée grossit très lentement, tandis que le fil-électrode poursuit sa descente vers le bain de fusion, poussé par le dévidoir. L'extrémité du fil entre alors en contact avec le bain de fusion, créant un court-circuit et l'extinction de l'arc électrique, la tension chutant alors à une valeur proche de zéro. En raison de la forme particulière des caractéristiques statiques (relations tension-courant) des générateurs utilisés en soudage GMAW, qui sont dites horizontales, la chute de tension s'accompagne d'une augmentation de l'intensité délivrée par le générateur, ce qui favorise alors l'échauffement par effet joule du fil, et surtout permet sa séparation du bain de fusion par un phénomène de pincement sous l'effet des forces électromagnétiques. La séparation entre le fil et le bain permet alors le réamorçage de l'arc, et un nouveau cycle commence.

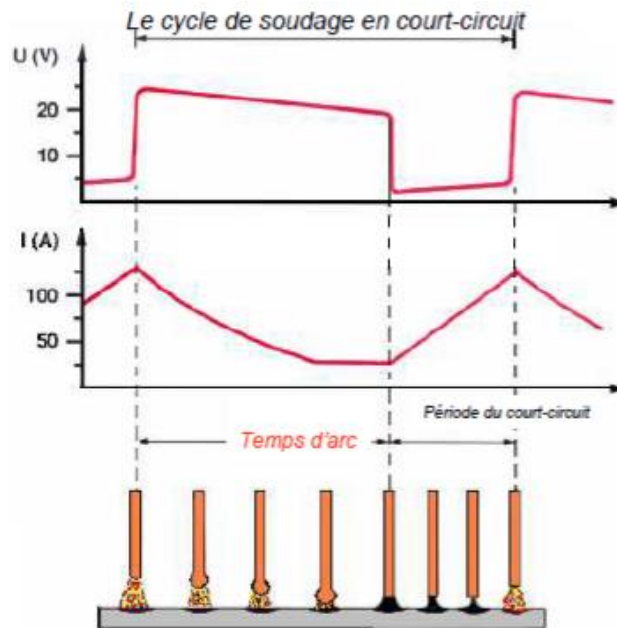


Figure 1.16.2. Représentation schématique du mécanisme de transfert par court-circuit et des formes d'onde associées.

1.16.2. Transfert par pulvérisation axiale (spray)

Pour de fortes énergies de soudage (intensité généralement supérieure à 300 A), le transfert de métal se produit sous forme de fines gouttelettes, dont le diamètre est inférieur à celui du fil (Figure 1.16.3). En effet, l'énergie de l'arc est alors suffisante pour produire la fusion rapide de l'extrémité du fil, et les forces électromagnétiques créent un effet de pincement suffisant pour produire leur détachement dès qu'elles atteignent une taille critique. Ce mode de transfert de métal procure un arc stable avec peu de projections. C'est le régime généralement utilisé pour souder des pièces épaisses (supérieures à 5 mm) en positions à plat, configuration permettant d'utiliser de fortes énergies de soudage.

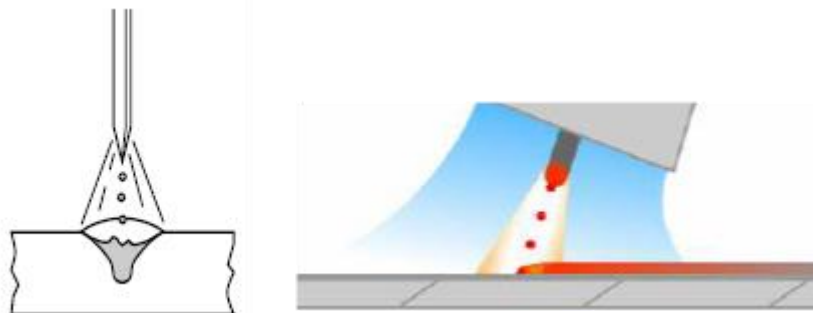


Figure 1.16.3. Représentation schématique du transfert par pulvérisation axiale (ou spray)

Le transfert globulaire est caractérisé par la formation de grosses gouttes de métal fondu formées à la pointe de l'électrode consommable, qui se détachent principalement sous l'effet de la gravité. Les niveaux d'énergie correspondant à ce régime de transfert de métal se situent en effet entre les niveaux des régimes par court-circuit et par pulvérisation axiale. L'échauffement produit par l'arc est donc suffisant pour produire la fusion de l'extrémité du fil, mais les forces électromagnétiques, en raison des plus faibles intensités employées, sont trop faibles pour produire par pincement le détachement des gouttes, qui doivent alors grossir jusqu'à ce que la gravité produise leur détachement. Le taux de transfert de ces gouttelettes est alors beaucoup plus lent qu'en transfert par pulvérisation axiale, généralement autour de 1 à 10 gouttelettes par seconde. La goutte suit

généralement une trajectoire aléatoire qui n'est pas toujours dans l'axe de l'arc, ce qui génère un transfert instable avec beaucoup de projections.

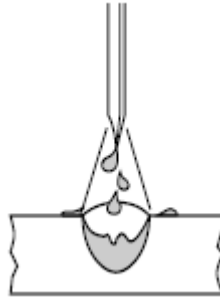


Figure 1.16.4. Représentation schématique du transfert globulaire

1.16.3. Transfert à veine liquide rotative

Lorsque l'intensité dépasse des valeurs de l'ordre de 500 A et la tension est comprise entre 45 et 50 V environ, le transfert par pulvérisation axiale est soumis à des forces électromagnétiques importantes. A ces niveaux d'énergie, le métal liquide, soumis aux forces électromagnétiques, effectue un mouvement de rotation dans l'arc (Figure 1.16.5). Ce régime de transfert, très rarement utilisé, peut permettre de souder des éléments de forte épaisseur grâce à son apport d'énergie élevé.

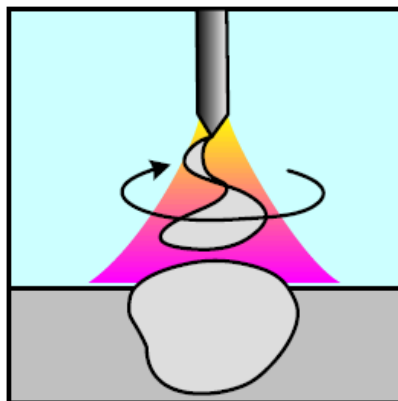


Figure 1.16.5. Représentation schématique du transfert à veine liquide rotative

1.16.4. Transfert en régime pulsé

Le transfert de métal en courant pulsé est un régime dit « forcé ». Des impulsions de courant d'intensité et de durée contrôlées sont imposées (Figure 1.16.6), afin de générer la formation et le détachement d'une gouttelette unique, qui est alors propulsée dans l'axe de l'arc vers la zone fondue. L'intensité de l'arc diminue ensuite pendant une courte période jusqu'à la prochaine impulsion, ce qui permet de limiter l'échauffement du fil et du bain de fusion, et donc la taille de la zone fondue. Ce régime permet ainsi de souder des pièces d'épaisseurs plus faibles que celles permises par le régime par pulvérisation axiale, en gardant une grande stabilité de transfert.

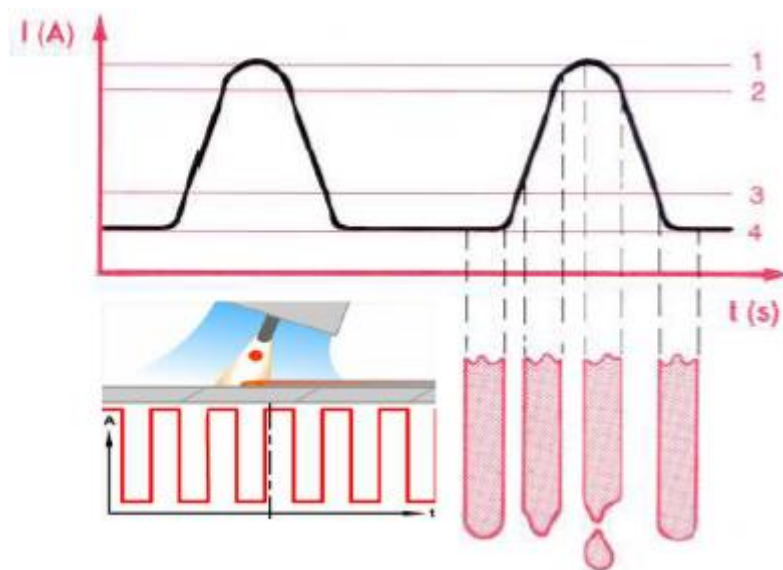


Figure 1.16.6. Représentation schématisque du transfert pulsé.

1.16.5. Transferts par court-circuit forcé ou contrôlé

Ces régimes de transfert de métal sont obtenus en utilisant des postes de soudage particuliers dont les formes d'onde permettent de maintenir une fréquence de court-circuit régulière. Ces régimes sont généralement utilisés dans des gammes d'énergie de soudage correspondant à l'apparition d'un transfert globulaire en courant lisse. Ces modes de transfert permettent alors de conserver un transfert par court-circuit, et donc des taux de projection faibles. Parmi les différents procédés de soudage par court-circuit contrôlé, basés pour la plupart sur des principes ou technologies différentes ayant fait l'objet de brevets, on peut citer le procédé Cold Arc développé par la société EWM [111], le procédé STT (Surface Tension Transfer) de Lincoln [112], et le procédé CMT (Cold Metal Transfer) développé par Fronius [113], qui a été retenu pour la présente étude.

1.17. Le procédé CMT (Cold Metal Transfer)

Le procédé CMT a été initialement développé par la société Fronius pour pouvoir contrôler de manière précise l'énergie apportée par l'arc, afin de minimiser l'apport de chaleur et permettre de souder des pièces de très faibles épaisseurs, d'où la dénomination du procédé.

Le procédé associe un contrôle précis de la forme d'onde du courant avec un mouvement alterné du fil d'apport, qui permet de souder avec un transfert par court-circuit sous une énergie minimale. Au court d'un cycle de transfert par court-circuit, l'intensité de l'arc est d'abord fixée pendant un très court intervalle de temps (de l'ordre de quelques centièmes de seconde) à une valeur assez élevée pour fondre l'extrémité du fil d'apport et former une petite gouttelette liquide (Figure 1.17.1). L'intensité diminue alors jusqu'à une valeur juste suffisante pour maintenir l'arc, et le fil-électrode descend, alimenté par le dévidoir. Le fil entre alors en contact avec la zone fondue, provoquant l'extinction de l'arc électrique. A la différence du procédé GMAW classique en régime par court-circuit, pour lequel l'extinction de l'arc s'accompagne d'une augmentation rapide de l'intensité qui va permettre le détachement du fil par pincement sous l'effet des forces électromagnétiques générées,

le courant est maintenu à une valeur relativement basse avec le procédé CMT, et c'est un mouvement de retrait du fil qui va permettre son détachement. Une gouttelette est alors déposée dans le bain de fusion, et l'arc est réamorcé grâce à l'augmentation de l'intensité jusqu'à une valeur contrôlée, générant une nouvelle gouttelette à l'extrémité du fil. Ce mode de transfert permet de limiter très fortement les projections, mais aussi et surtout de réduire au minimum l'apport de chaleur, le détachement des gouttelettes s'effectuant sous un courant très faible, produisant donc très peu d'échauffement par effet joule.

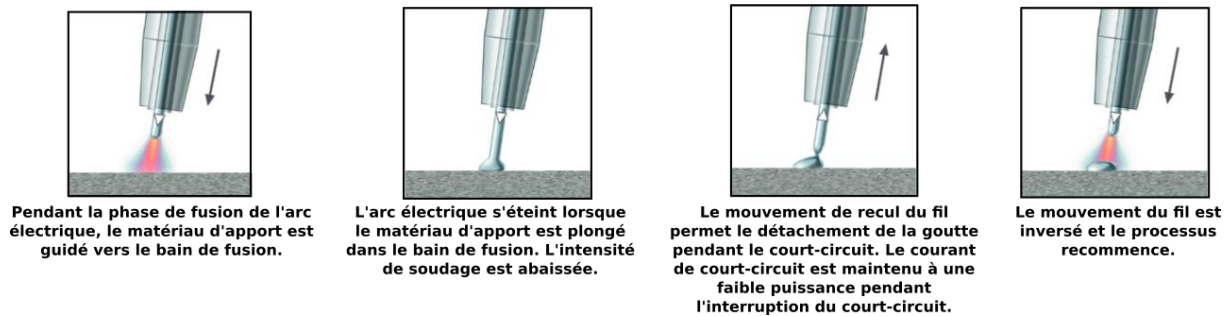


Figure 1.17.1. Description du cycle CMT [114]

Ce résultat a été rendu possible par plusieurs innovations technologiques : tout d'abord le contrôle numérique de la forme d'onde du courant, qui permet de fixer de manière précise les valeurs d'intensité délivrées par le générateur et leurs variations, indépendamment de la tension ; ensuite, le système de dévidage alterné, rendu possible par le développement d'un nouveau système de dévidoir à deux moteurs. Un second moteur pas à pas a en effet été ajouté à l'intérieur de la torche, qui fait remonter périodiquement de fil avant de le laisser descendre à nouveau. La torche CMT utilise donc un dévidoir classique placé à la sortie de la bobine de fil, qui permet, comme dans les procédé GMAW, d'alimenter grâce à un premier moteur pas à pas la torche en fil d'apport, dévidé à vitesse constante, et un second dévidoir placé dans la torche au plus près de l'arc, qui par une rotation alternée de son moteur, permet au fil de se rétracter avant de descendre à nouveau, à une fréquence maximale de 100 fois par seconde environ. Les moteurs pas à pas des deux dévidoirs sont pilotés numériquement par le contrôleur qui équipe le générateur de soudage. Le moteur du premier dévidoir tourne à vitesse constante, et la longueur de fil en excès entre les deux moteurs, qui se crée lorsque le second moteur tourne en sens inverse, est alors absorbée dans un « buffer », ce qui permet de faire varier la longueur de fil entre les deux moteurs (Figure 1.17.2). Grâce à l'extrême précision de pilotage des formes d'onde de courant (intensité et tension) et de la vitesse de dévidage par le contrôleur du générateur CMT, les quantités de métal transférées à chaque court-circuit sont presque identiques, ce qui procure une grande régularité aux cordons déposés.

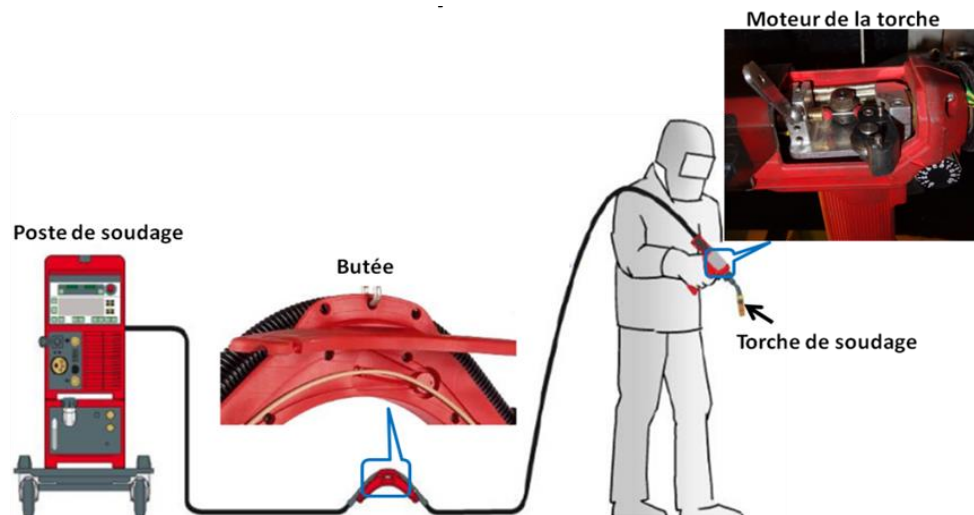


Figure 1.17.2. Principaux éléments du « double dévidoir » à deux moteurs du procédé CMT [98]

Le procédé CMT « classique » décrit plus haut a bénéficié au cours des dernières années de plusieurs améliorations, ce qui a amélioré les possibilités de contrôle de l'énergie transmise et du transfert de matière. Parmi ces innovations, on peut citer celles ayant donné naissance aux variantes suivantes du procédé CMT :

- Le CMT Pulsé: le procédé permet de générer une forme d'onde de courant complexe, combinant un ou plusieurs cycles de courant pulsé avec le cycle CMT, ce qui permet d'accroître de façon contrôlée l'énergie transmise au cours du soudage.
- Le CMT Advanced: le procédé permet d'inverser la polarité de l'électrode, produisant donc un courant alternatif. Le changement de polarité a lieu durant les phases de court-circuit, garantissant ainsi la stabilité du procédé CMT.
- Le CMT Advanced-Pulsé: le procédé permet de générer des formes d'ondes encore plus complexes, combinant cycles CMT, cycles de courant pulsé et inversion de la polarité de l'électrode.

Ces variantes de plus en plus complexes nécessitent cependant d'avoir une très grande maîtrise du procédé pour pouvoir être utilisées de manière optimale. Une trentaine de paramètres au minimum doivent être ajustés afin d'obtenir des caractéristiques de transfert de métal et d'énergie adaptées. C'est pourquoi ces procédés sont généralement employés en utilisant uniquement des paramètres « standards » préprogrammés par le constructeur, sous la forme de diverses bases de données associant entre eux ces différents paramètres, appelées « lois synergiques », ce qui limite de ce fait les possibilités offertes par le procédé [98].

1.18. Conclusion

Ce chapitre bibliographique a permis de présenter les caractéristiques essentielles des techniques de fabrication additive, qui les distinguent des autres procédés de prototypage rapide et de fabrication directe. Le principe de fonctionnement des différents procédés de fabrication additive a aussi été décrit, en insistant sur les techniques utilisant des matériaux d'apport sous la forme de fils

métalliques, qui présentent plusieurs avantages mais sont pourtant peu développées. La technologie WAAM utilisant une source de soudage à l'arc électrique pour assurer la fusion du fil métallique a été plus particulièrement détaillée, puisqu'il s'agit du procédé retenu pour cette étude. Les caractéristiques générales des procédés de soudage utilisés avec la technologie WAAM ont aussi été présentées, car elles influent sur le processus de fusion et de dépôt du fil métallique. Enfin, le procédé de soudage à l'arc CMT, qui sera associé à la technologie WAAM dans cette étude pour produire la fusion et le dépôt contrôlé du fil métallique, a été décrit.

Le chapitre suivant est consacré à la présentation du banc d'essai de fabrication additive WAAM-CMT développé dans le cadre de ce travail de recherche, et des outils et méthodes employés pour analyser le procédé et caractériser les produits fabriqués.

Chapitre 2: Dispositifs expérimentaux et techniques de mesure

Ce second chapitre est consacré à la présentation des différents dispositifs et techniques originaux utilisés dans ce travail de recherche. La première partie du chapitre décrit le système d'impression 3D spécialement conçu et fabriqué pour cette étude, afin de pouvoir réaliser des éprouvettes en acier par fabrication additive à partir du procédé CMT décrit dans le précédent chapitre. Les caractéristiques du procédé de soudage CMT utilisé pour assurer le dépôt de matière, et des matériaux utilisés, sont ensuite présentées, puis l'instrumentation développée afin d'analyser les relations entre les paramètres procédé agissant sur la forme des signaux électriques contrôlant l'arc électrique, et les phénomènes de fusion et de dépôt du métal, est décrite. Enfin, une méthodologie originale employée pour caractériser la géométrie des dépôts réalisés est présentée.

2.1. Conception de l'imprimante 3D basée sur la technologie WAAM

Les machines de fabrication additive de pièces métalliques commercialisées aujourd'hui sont d'un coût très élevé, ce qui limite donc leur utilisation à la fabrication de produits à très haute valeur ajoutée. Cela rend de plus l'accès à cette technologie difficile pour les petites et moyennes entreprises, les pays en voie de développement ou encore les laboratoires et les universités. Le développement d'une imprimante 3D open source pour la technologie de fabrication additive à base de fil métallique et arc électrique (WAAM) est présenté dans les sections suivantes.

Cette imprimante 3D pour pièces métalliques est contrôlée par un microcontrôleur et un logiciel open source, et associe un poste de soudage CMT commercial à la technologie mécanique dérivée d'une imprimante 3D open source basée sur le projet RepRap [115]. Nous ne décrivons dans les paragraphes suivants de cette section que la conception et la fabrication de la partie mécanique, ainsi que le choix des composants électroniques et des logiciels permettant le pilotage de la machine. Les caractéristiques de la source de soudage CMT employée pour assurer la fusion et le dépôt du fil métallique seront présentées dans la section suivante.

2.2. Généralités sur les imprimantes 3D métalliques open source

La fabrication par impression 3D est aujourd'hui largement employée pour obtenir à faible coût de petits composants unitaires pour les équipements scientifiques, utilisés notamment pour la fabrication de réactifs chimiques [26], la manipulation des liquides [27], l'équipement optique [28], l'instrumentation analytique [29], ou les composants de laboratoire de physiologie [30]. Cette démocratisation des technologies d'impression 3D a été rendue possible grâce au développement de produits « open source », qui permettent d'acquérir des machines de fabrication additive pour quelques centaines d'euros, voire de fabriquer sa propre machine à l'aide de composants standards. Ces machines sont toutefois limitées à la fabrication de pièces en matériaux polymères ou céramiques. En effet, il n'existe pas encore aujourd'hui pour la fabrication de pièces métalliques d'alternative open source aux machines commerciales, dont les coûts demeurent très élevés (plus de 500 000 \$US). Ces technologies sont donc aujourd'hui encore réservées à quelques secteurs de pointe, comme l'industrie aéronautique et spatiale, ou le domaine médical. Des travaux antérieurs ont tenté de diffuser les technologies de fabrication additive de pièces métalliques à d'autres secteurs de l'industrie grâce au développement des technologies WAAM, en associant des robots commerciaux à une source de soudage [92], mais les coûts de telles installations restent encore élevés.

D'autres travaux décrivent le développement et l'adaptation d'imprimantes *open source* basées sur le projet RepRap [116][117], couplées à un poste de soudage à l'arc MIG, pour pouvoir fabriquer des pièces métalliques. Ces alternatives sont beaucoup plus flexibles, et d'un coût bien plus accessible que les installations utilisant un robot. Les travaux de recherche portant sur les imprimantes 3D open source comprennent aussi le développement de logiciels de contrôle open source basés sur Linux, qui peuvent être utilisés pour les imprimantes 3D de type RepRap pour la fabrication de pièces en métal [118]. Nous nous sommes basé en grande partie sur ces travaux pour développer l'imprimante 3D décrite dans les paragraphes suivants.

2.3. Analyse du besoin

Le but de ce travail de conception est de développer un banc d'impression 3D entièrement basé sur des composants et logiciels open source, qui soit adapté à la technologie de FA par fil et arc électrique WAAM utilisant une source de soudage CMT. Nous avons donc commencé par réaliser une analyse du besoin, afin d'identifier les fonctions du cahier des charges.

2.3.1. Définition du besoin

Avant de démarrer le processus de conception de notre imprimante 3D métal basée sur la technologie WAAM, il est nécessaire de bien définir notre besoin, et d'établir le cahier des charges des fonctions que devra remplir le système développé. Nous avons dans un premier temps utilisé un diagramme « bête à cornes » (Figure 2.3.1) pour formuler notre besoin, en répondant aux deux questions :

- À qui l'objet rend-il service ?
- Sur quoi l'objet agit-il ?

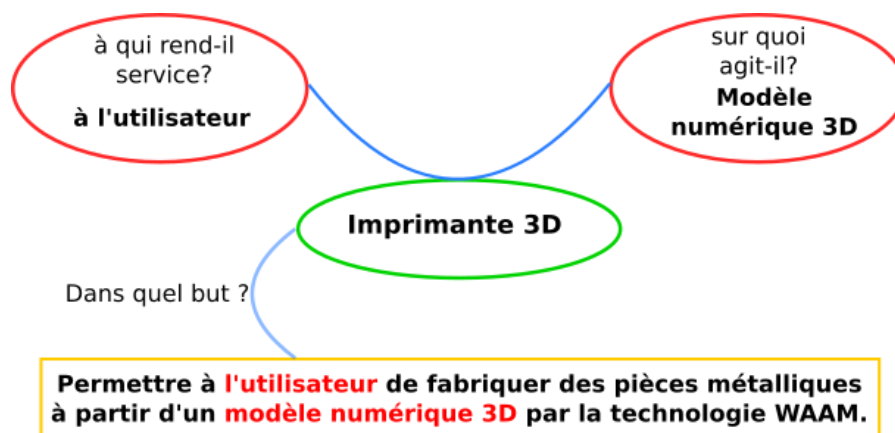


Figure 2.3.1. Diagramme bête à cornes du système à développer

Cela nous permet d'identifier la fonction principale qui répond à la question :

- Dans quel but ?

Formulation du besoin ou du but du produit:

Permettre à l'utilisateur de fabriquer des pièces métalliques à partir d'un modèle numérique 3D par la technologie WAAM.

2.4. Cahier des charges fonctionnel

L'étape suivante consiste à définir l'environnement du produit, qui va être constitué de tous les éléments avec lesquels il va interagir. Selon le type d'interaction qu'exercent les différents éléments sur le produit à concevoir, on pourra alors définir des fonctions de service (FS), qui traduisent le service rendu par le produit, et des fonctions contrainte (FC) imposées par l'environnement, qui orientent les choix de conception. Toutes ces interactions sont représentées sur la Figure 2.4.1 sous la forme d'un « diagramme pieuvre », et sont décrites dans le Tableau 2.4.1.

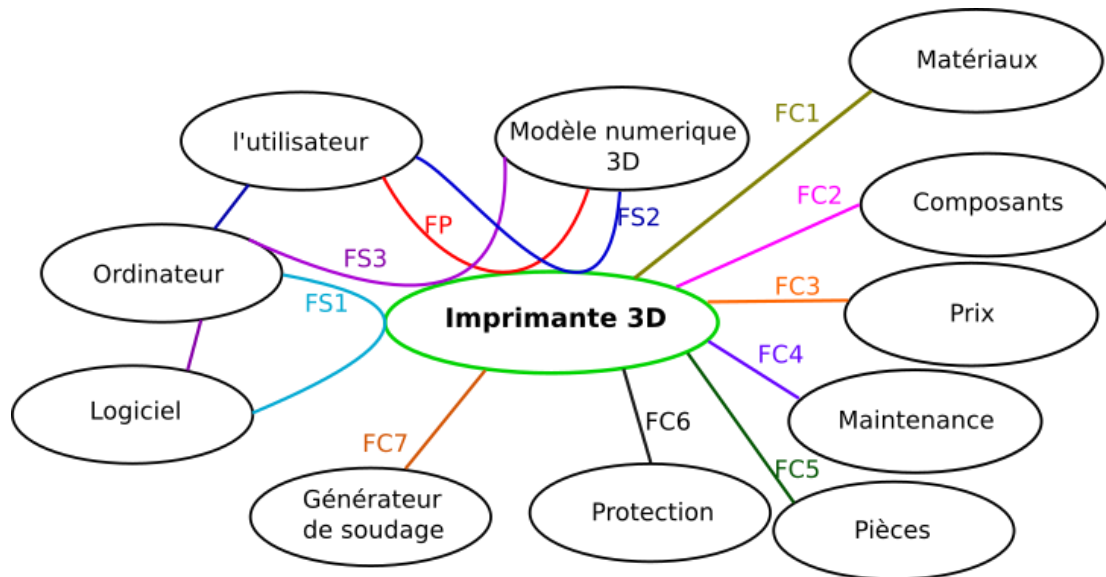


Figure 2.4.1. Diagramme pieuvre de l'imprimante 3D.

Fonction principale (FP): Permettre à l'utilisateur de fabriquer des pièces métalliques à partir d'un modèle numérique 3D par la technologie WAAM.

FS1	Contrôler l'imprimante.
FS2	Visualiser à l'écran de l'ordinateur le modèle 3D conçu par l'utilisateur.
FS3	Préparer le modèle en 3D pour l'impression.
FC1	Utiliser des matériaux résistant aux différentes sollicitations qu'ils peuvent rencontrer sur l'imprimante.
FC2	Utiliser des composants standards dans la conception de l'imprimante 3D.
FC3	Réduire au maximum le coût.
FC4	Etre simple à régler/réparer/entretenir.
FC5	Permettre la fabrication des pièces que l'utilisateur a conçu.
FC6	Protéger la machine contre les perturbations extérieures (provoquées par le générateur de soudage).

FC7	Utiliser un générateur de soudage CMT.
-----	--

Tableau 2.4.1 Description des fonctions de service et des fonctions contrainte fixées par l'environnement du produit

Suite à ce premier travail de recensement, les différentes fonctions sont analysées, de manière à identifier les solutions potentielles permettant de satisfaire chacune d'elles. Les résultats de ce travail d'analyse sont synthétisés dans le Tableau 2.4.2.

Fonction	Fonction technique	Critères	Niveau	Flexibilité
FS1	Utiliser un logiciel pour gérer toutes les activités en temps réel de l'imprimante.	Logiciel CAO de licence libre.	Marlin	Non négociable
FS2	Visualiser le modèle en 3D et convertir en format STL.	Logiciel CAO de licence libre.	FreeCAD, ThinkerCAD, Google SketchUp	Négociable
FS3	Découper en couches le modèle 3D. Générer la trajectoire de fabrication.	Logiciel de découpage de licence libre.	Repetier, Cura, Slic3r	Négociable
FC1	Résister à la flexion/torsion. Résister en flambage.	Raideur des composants en flexion et torsion. Raideur de la structure. Ne pas se déformer en cours d'utilisation.	Charge de travail maximale : 200 kg Déplacement maximale de la tête d'impression sous l'effet du chargement : 0,1 mm.	Non négociable
FC2	Composants accessibles à tout le monde.	Prix raisonnable		Peu négociable
FC3	Composants simples et matériaux courants	Prix raisonnable		Peu négociable
FC4	Notice de montage. Assemblage simple. Pièces d'usures standards.	Eviter les outils spéciaux.	A définir d'après dessin technique	Peu négociable
FC5	Définir le volume d'impression.	Le modèle CAO créé doit tenir sur la surface d'impression	300x300x300mm ³	Peu négociable

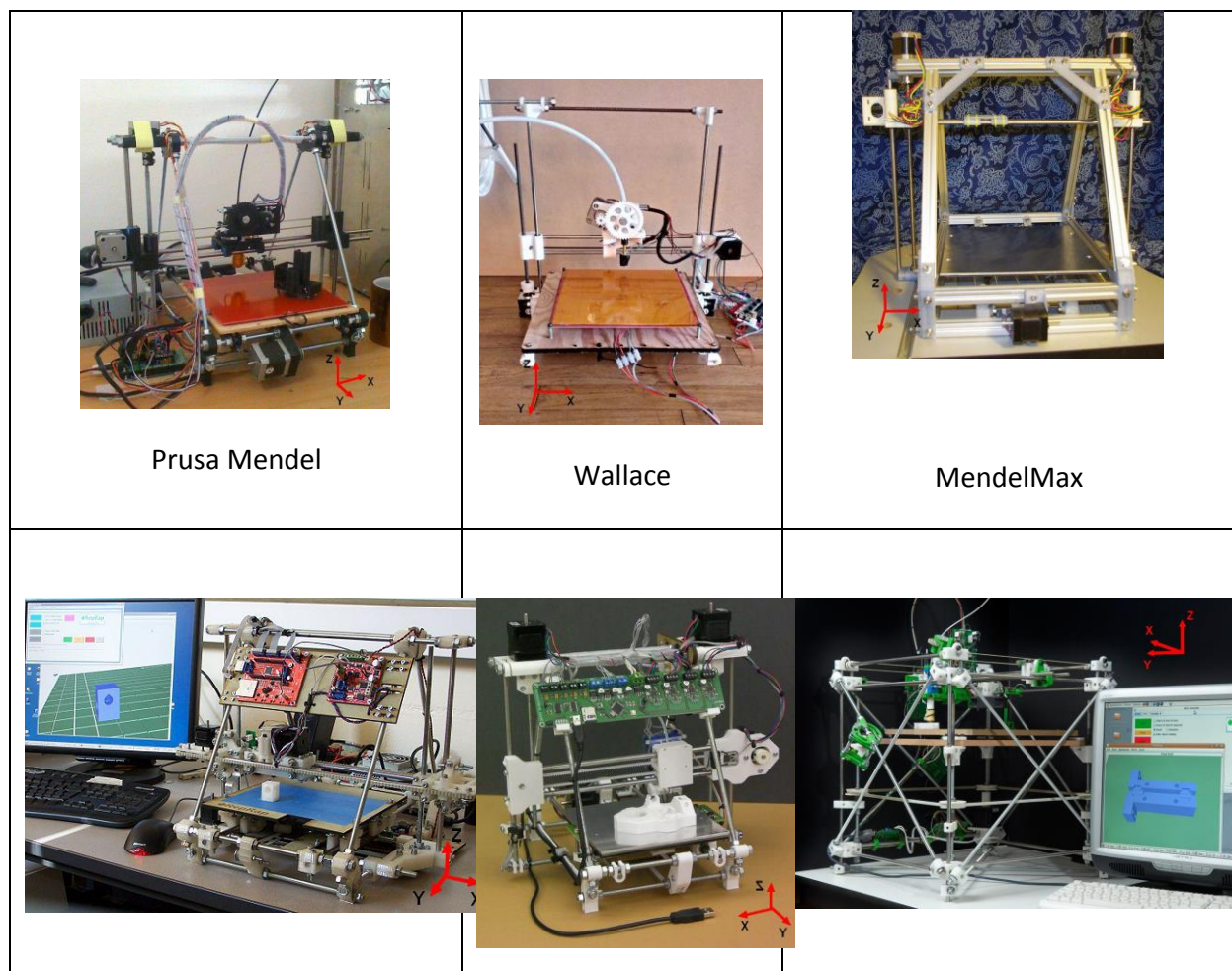
		de l'imprimante. Surface de travail limitée.		
FC6	Isoler électriquement et thermiquement le plateau de travail du reste de l'imprimante. Protéger les composants des projections de soudure.	Utiliser des matériaux isolants entre le plateau et le reste de la machine. Utiliser des soufflets de protection.		Non négociable
FC7	Tenir la torche du générateur de soudage CMT fixe.	Fixer la torche au châssis.	A définir d'après dessin technique ci-après	Non négociable

Tableau 2.4.2. Analyse des fonctions et de leur degré de flexibilité

2.5. Conception de l'imprimante

2.5.1. Conception mécanique

La partie « mécanique » de l'imprimante développée s'inspire de l'architecture des différents modèles d'imprimantes 3D à fil plastique décrits sur le site de l'organisme RepRap [115]. On peut voir sur la Figure 2.5.1 les différents modèles présentés sur ce site.



Original Mendel	RepRappro Huxley	Darwin
-----------------	------------------	--------

Figure 2.5.1. Différents modèles d'imprimantes décrits sur le site RepRap [115].

Le système mécanique à développer peut se décomposer en quatre sous-ensembles : le châssis de la machine, le plateau de travail, le mécanisme de translation selon les axes X et Y (plan horizontal), et enfin le mécanisme de translation selon l'axe Z (axe vertical). Le cahier des charges nous imposant que la torche doit rester fixe, c'est le plateau de travail, sur lequel les pièces seront construites, qui subira les mouvements de translation selon les axes X, Y et Z. Nous décrivons sommairement dans les paragraphes suivants les solutions technologiques retenues pour ces quatre sous-ensembles.

2.5.1.1. Le châssis

Une conception de châssis relativement simple mais surtout très rigide (cahier des charges) a été retenue. Nous avons choisi d'utiliser des profilés rainurés en alliage d'aluminium de section 45x45 mm. Une conception de châssis cubique, semblable au modèle *Darwin* de la Figure 2.5.1, est la plus adaptée à notre situation, où les pièces de formes complexes sont à bannir (Figure 2.5.2). L'avantage du profilé est qu'il peut être facilement assemblé de manière rigide à l'aide de simples équerres, vis et écrous (Figure 2.5.3.a).

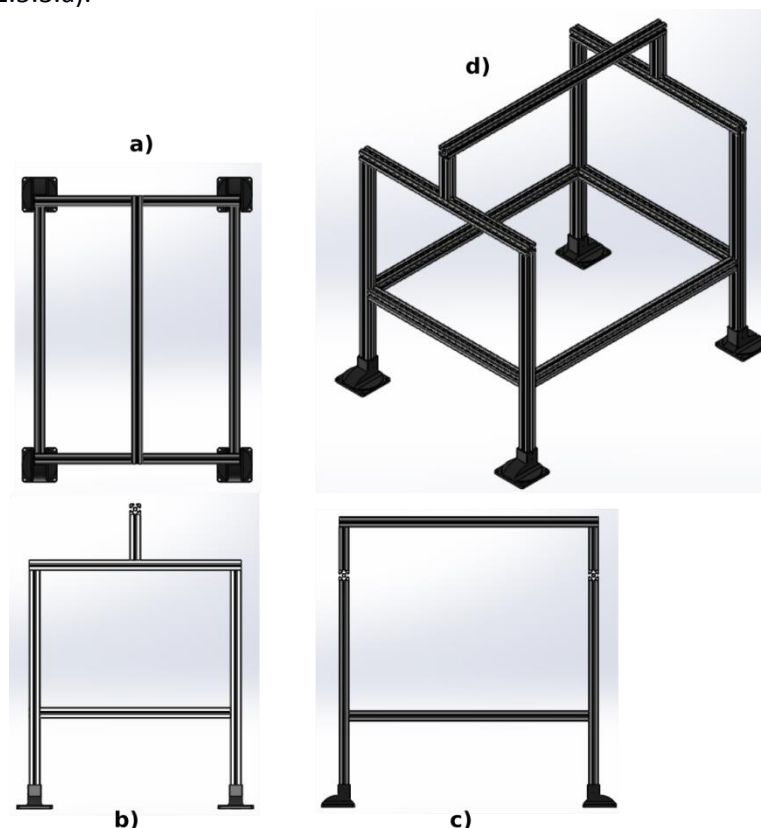


Figure 2.5.2 Différentes vues standard du châssis de notre imprimante 3D : a) vue de dessus, b) vue de gauche, c) vue de face, d) vue isométrique

Pour amortir les vibrations dues au fonctionnement de l'imprimante, nous avons prévu d'ajouter quatre pieds réglables.

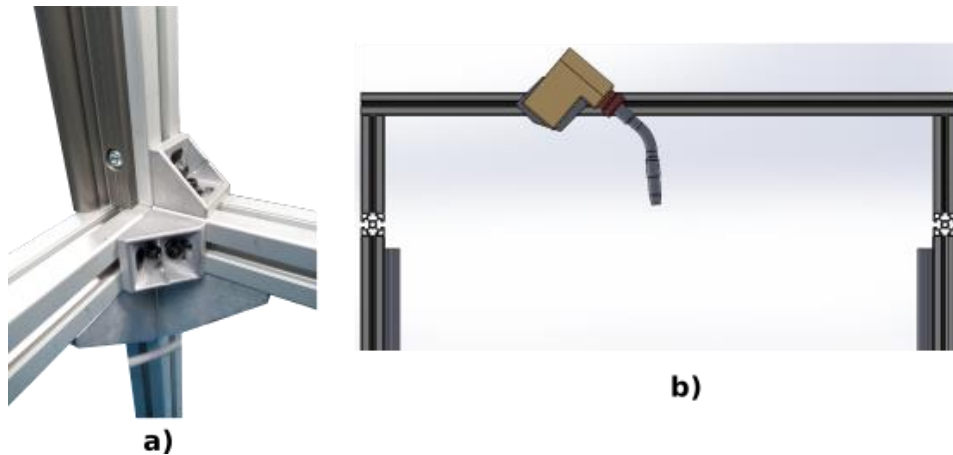


Figure 2.5.3 . a) Châssis de l'imprimante assemblé avec des équerres, boulons et écrous. b) Torche fixée au châssis.

La fixation des différents éléments sur le châssis se fait très simplement par l'intermédiaire d'écrous, vis, et équerres (Figure 2.5.2.a). A la différence des imprimantes RepRap, où la tête d'impression est mobile et se déplace le long des axes X et Y, nous avons opté pour maintenir la torche fixe sur le châssis (Figure 2.5.2 b), afin de pouvoir positionner des caméras rapides ou des caméras thermiques pour obtenir des images du fil métallique sortant de la torche, et étudier ainsi les caractéristiques de transfert de métal et de chaleur pendant le processus de fabrication.

2.5.1.2. Le plateau de travail

Le plateau de travail est fabriqué à partir de plaques en alliage d'aluminium de 3 mm d'épaisseur, découpées par jet d'eau. Chaque élément du plateau de travail est vissé aux autres à l'aide de vis de diamètre 1,5 mm. La surface supérieure du plateau de travail a des dimensions de 400 x 400 mm² pour répondre aux exigences du cahier de charge, qui spécifie que la machine doit être capable de fabriquer des pièces d'un volume maximum de 300 x 300 x 300 mm³. Le câble de masse du générateur de soudage (borne négative) est branché directement sur le plateau de travail, pour garantir la continuité du circuit électrique du procédé de soudage à l'arc électrique. Pour éviter le déplacement du support de construction des pièces au cours de la fabrication, le plateau de travail comprend une série de rainures permettant de visser des brides droites de maintien (Figure 2.5.4). Pour que le plateau puisse se déplacer dans le plan horizontal selon les axes X et Y, il sera guidé par quatre axes cylindriques (deux parallèles à l'axe X et deux parallèles à l'axe Y), par l'intermédiaire d'appuis mobiles de type paliers.

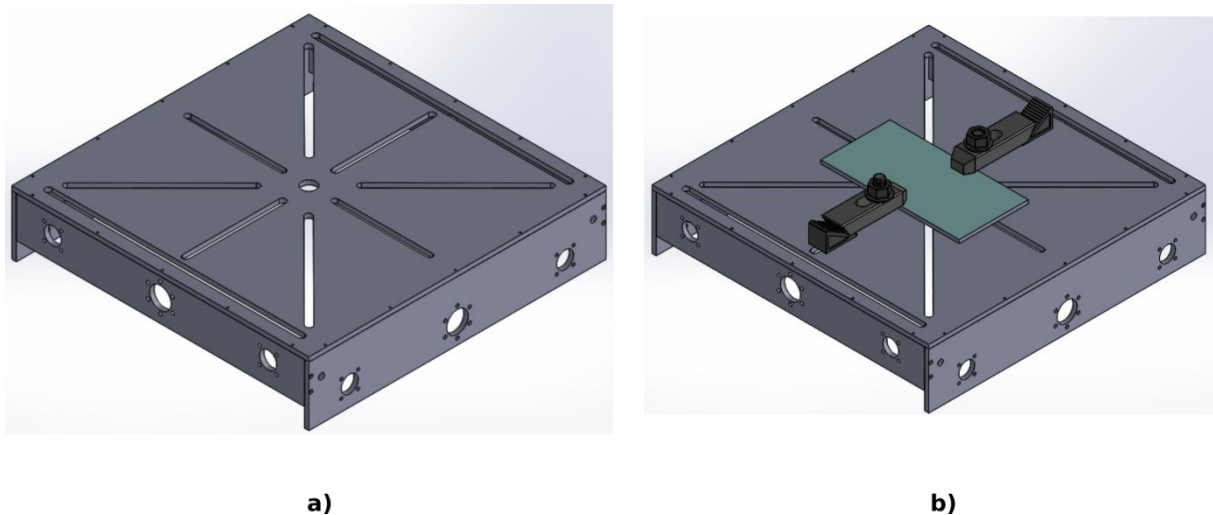


Figure 2.5.4 a) Modèle CAO représentant le plateau de travail nu, et b) avec son support de construction fixé avec des brides droites de maintien

La fonction contrainte FC6, qui impose de protéger la machine des perturbations extérieures, intègre deux fonctions techniques. La première consiste à isoler électriquement le plateau de travail du reste des composants de la machine, afin d'éviter le passage du courant de soudage à travers les organes de la machine. La solution retenue a été l'utilisation d'une nouvelle génération de paliers qui, à la différence des roulements linéaire à billes standards normalement utilisés pour les imprimantes 3D, sont en matériau polymère (Figure 2.5.5), et donc assurent l'isolation électrique entre le plateau et les axes de guidage métalliques. La deuxième fonction technique associée à la fonction contrainte FC6 correspond à la protection des composants de la machine contre les éventuelles projections de métal liquide qui arrivent fréquemment en soudage, qui risqueraient de les endommager. La solution choisie est l'utilisation d'une tôle de protection (Figure 2.5.5) au-dessous du plateau de travail, qui empêche la pénétration des projections de soudage vers les vis mères et les guidages (axes).

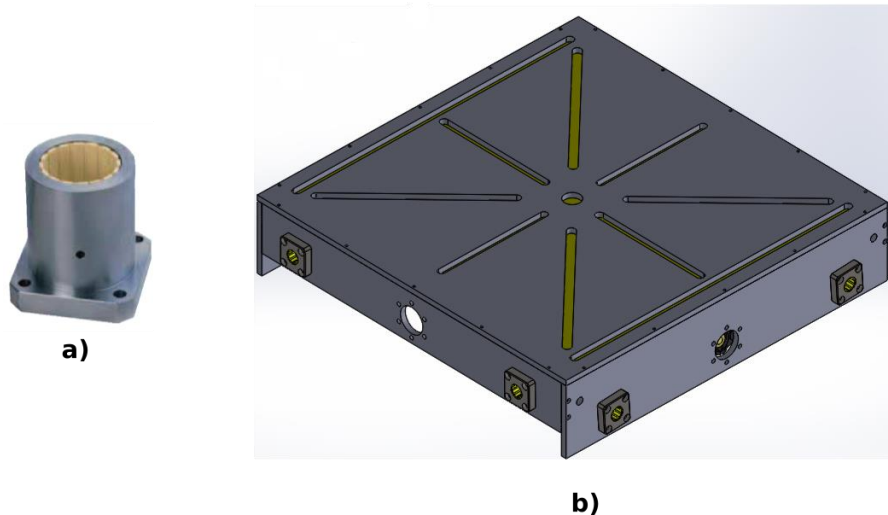


Figure 2.5.5 a) Douille à collerette carrée avec palier en polymère DryLyn® R de Igus®[119], b) assemblage sur le plateau de travail des douilles à collerette carrée et de la tôle de protection contre les projections de soudage.

2.5.1.3. Le mécanisme de translation selon les axes X et Y

Le schéma cinématique de la Figure 2.5.6 montre les différentes liaisons que doit comporter le mécanisme de translation selon les axes X et Y.

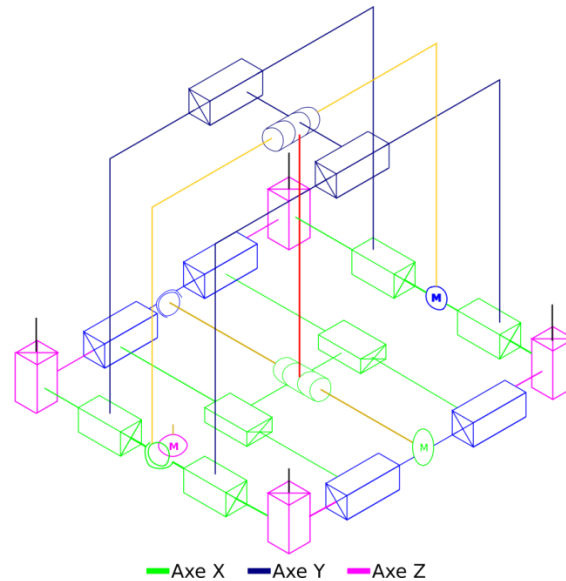


Figure 2.5.6 Schéma cinématique des mécanismes de translation selon les axes X et Y

L'axe X est composé d'une liaison mécanique de type hélicoïdale, qui transforme le mouvement de rotation d'un moteur pas à pas en mouvement linéaire, et de quatre axes de guidage, ou glissières (Figure 2.5.7). La vis mère hélicoïdale utilisée est reliée au plateau de travail avec un écrou en polymère DryLin® de Igus®, qui permet d'isoler électriquement le plateau, branché sur le câble de masse du générateur, de la vis et du moteur pas à pas. Pour assurer un meilleur guidage du plateau, ce dernier est relié par quatre appuis glissant, assurés par les douilles à collerettes fixées sur le plateau, à deux glissières parallèles à l'axe X, constituées d'arbres de section circulaire en aluminium. Cet ensemble constitué des deux glissières et de la vis hélicoïdale de l'axe X est encastré à ses extrémités à des paliers glissant sur l'axe Y, créant également une liaison de type glissière.

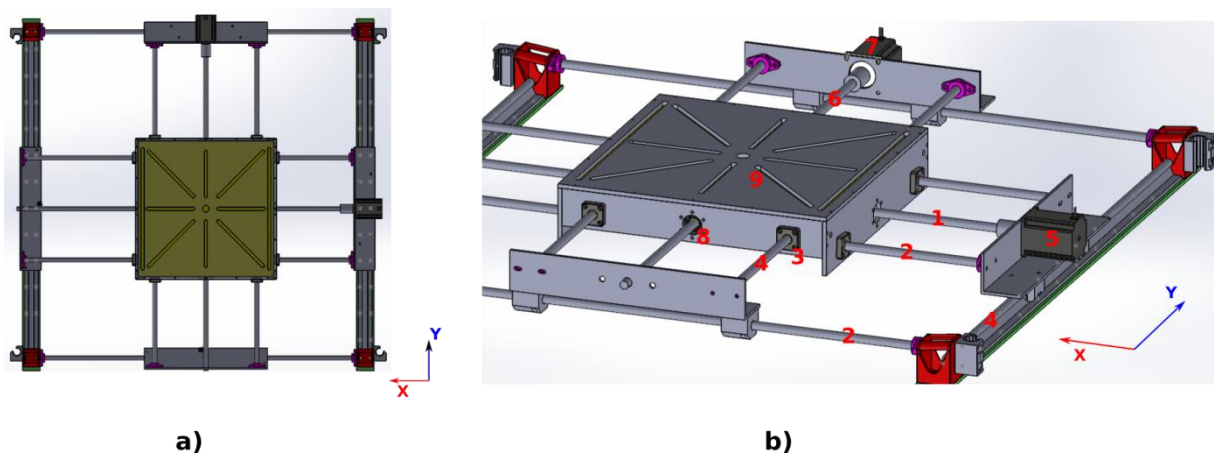


Figure 2.5.7 a) Vue de dessus du plateau de travail et des axes X et Y. b) Composants constituant les mécanismes de translation X et Y: 1. Vis mère hélicoïdale de l'axe X. 2. Arbres de guidage de l'axe X. 3. Douilles à collerette carrée avec palier en polymère. 4. Arbres de guidage de l'axe Y. 5. Moteur pas à pas de l'axe X. 6. Vis hélicoïdale de l'axe Y. 7. Moteur pas à pas de l'axe Y. 8. Ecrans pour vis hélicoïdale. 9. Plateau de travail.

L'ensemble assurant la translation du plateau suivant l'axe Y est identique à celui de l'axe X. Il est composé d'un moteur pas à pas accouplé à une vis hélicoïdale, et de quatre axes de guidage, assurant la translation du plateau de travail et du mécanisme de l'axe X. Les paliers assurant la liaison entre le plateau de travail et les deux rails de guidage centraux sont, comme pour l'axe X, des douilles à collerette vissées au plateau, qui assurent l'isolation électrique de ce dernier.

2.5.1.4. L'axe Z

Le schéma cinématique du mécanisme de l'axe Z est représenté sur la Figure 2.5.8. L'axe Z est composé de deux vis mère trapézoïdales accouplées à deux moteurs pas à pas de type NEMA 23 de la société Igus®, et de quatre rails de guidage fixés aux montants verticaux du bâti (Figure 2.5.9).

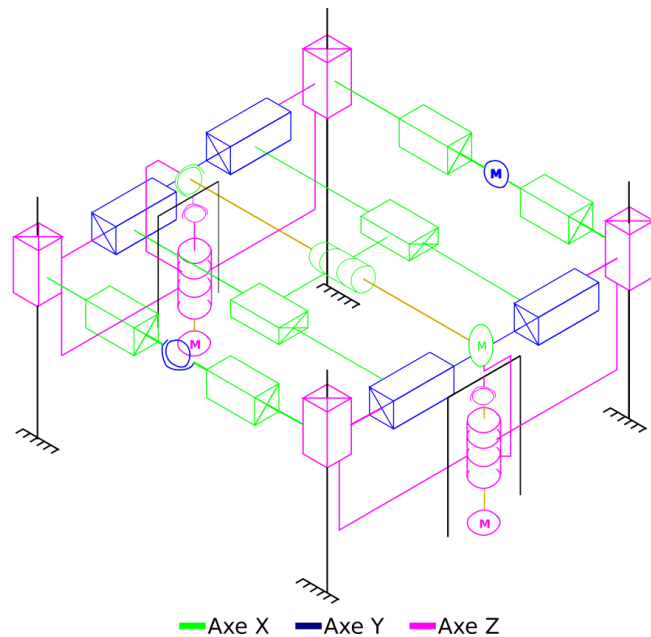


Figure 2.5.8 Schéma cinématique de l'axe Z et de l'axe X.

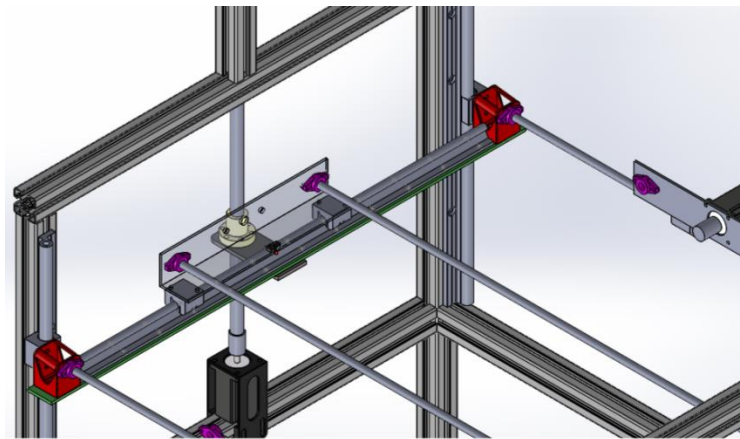


Figure 2.5.9 Modèle CAO du mécanisme de translation selon l'axe Z.

Afin de pouvoir repérer la position relative du plateau par rapport au bâti et à la torche, et limiter son déplacement pour qu'il n'atteigne pas la fin de course de la vis à pleine vitesse, des systèmes de butée sont fixés sur les trois axes (fin de course). Grâce à ces butées, qui délimitent l'espace de travail du plateau, ce dernier pourra, à chaque redémarrage de la machine, situer sa position initiale avant de démarrer la fabrication d'une pièce (POM).

La Figure 2.5.10 montre le schéma cinématique de l'ensemble des mécanismes, le modèle CAO du banc, et une photo du banc après fabrication.

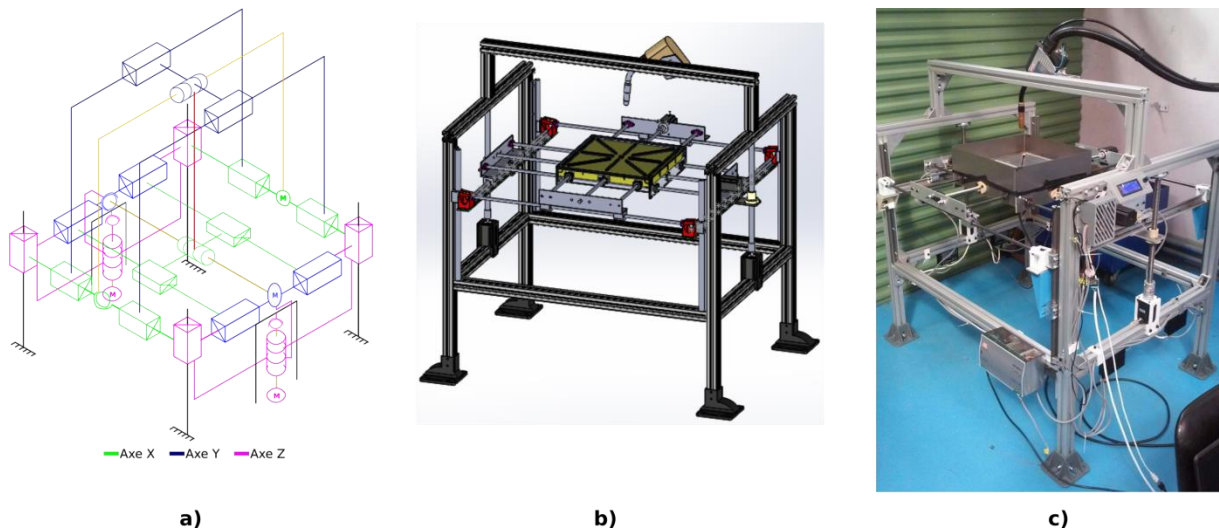


Figure 2.5.10 a) Schéma cinématique de l'imprimante 3D. b) Modèle CAO. c) Imprimante assemblée

2.5.2. Commande du système

La partie commande de l'imprimante 3D se compose essentiellement de composants électroniques de licence libre (open source).

2.5.3. Carte Arduino

La carte Arduino [120] est un microcontrôleur de licence libre permettant de piloter des tâches scientifiques liées à l'automatisation. Le microcontrôleur contenu dans la carte Arduino permet de recevoir des signaux d'entrée provenant de capteurs très divers, de les traiter et de les analyser, puis en fonction de règles préalablement définies, de produire des signaux de sortie contrôlant divers types de composants électroniques (diodes lumineuses, moteurs, actionneurs...). Le choix d'un microcontrôleur open source de type Arduino est particulièrement adapté aux projets de recherche originaux comme le nôtre, où des opérations de contrôle très spécifiques doivent être développées pour piloter de manière coordonnée différents organes, car il est à la fois extrêmement flexible et relativement facile à utiliser.



Figure 2.5.11 Carte Arduino MEGA

En utilisant une carte Arduino comme microcontrôleur, on peut ainsi notamment développer et faire fonctionner des imprimantes 3-D capables de fabriquer des pièces à partir d'un certain nombre de matériaux comprenant des polymères, des céramiques et des métaux, tout en réduisant les coûts que nécessiterait le développement de microcontrôleurs spécifiques à chaque type d'imprimante.

2.5.4. Carte RAMPS

Il existe de nombreuses cartes électroniques qui peuvent être branchées sur une carte Arduino afin d'étendre ses capacités. Ce type de carte électronique est généralement appelé « module », ou « shield » en anglais [121].

Le module le plus connu dans le domaine des imprimantes 3D est sans doute celui issu du projet RepRap de fabrication d'imprimantes de prototypage rapide « auto-répliquantes ». Ce module, baptisé RAMPS (RepRap Arduino Mega Pololu Shield), est probablement le module le plus utilisé dans les imprimantes 3D « grand public », que l'on peut aujourd'hui acheter pour quelques centaines d'euros, ou même fabriquer soi-même. Ce module permet notamment de contrôler simultanément jusqu'à 5 moteurs pas à pas et un écran LCD (Figure 2.5.12).

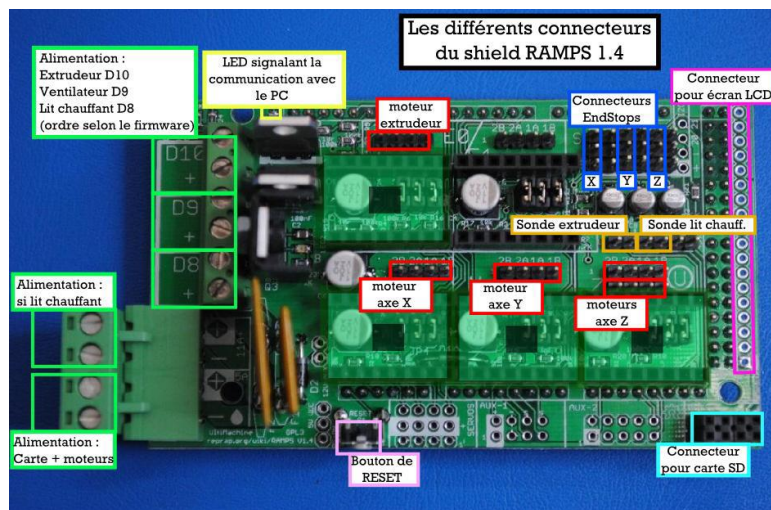


Figure 2.5.12 Carte RAMPS 1.4

2.5.5. Contrôleur de moteurs pas à pas

Pour pouvoir faire fonctionner un moteur pas à pas, il est nécessaire d'utiliser un contrôleur de moteur pas à pas. Ce dernier permet de commander la vitesse de rotation du moteur à partir des signaux de sortie de la carte Arduino. La carte RAMPS possède déjà des contrôleurs intégrés, de type Pololu A4988, mais ces derniers ne sont pas adaptés à la puissance des moteurs utilisés pour notre imprimante 3D. Nous avons donc ajouté des contrôleurs externes pour chacun des moteurs, de type CW 5045. Ces contrôleurs sont branchés sur la carte RAMPS selon le diagramme de connexion de la Figure 2.5.13.

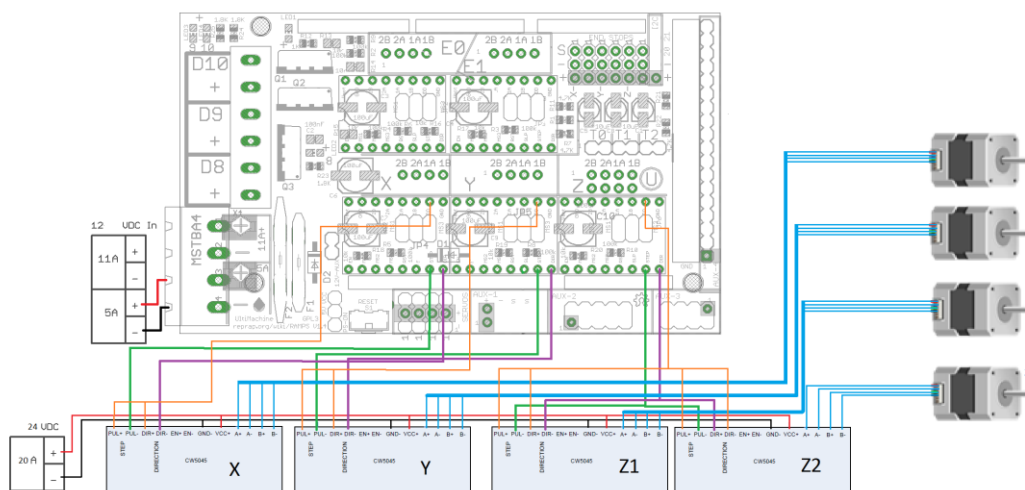


Figure 2.5.13 Schéma du diagramme de connexion des contrôleurs sur la carte RAMPS et connexion des moteurs pas à pas aux contrôleurs.

2.5.6. Logiciels

Les logiciels utilisés pour programmer et contrôler les opérations de fabrication avec l'imprimante 3D développée doivent également être sous licence libre.

2.5.6.1. Le logiciel de contrôle de l'imprimante 3D

Le logiciel Marlin a été utilisé pour le contrôle de l'imprimante 3D. Il s'agit d'un microprogramme ou micrologiciel (firmware) open source spécialement développé pour la famille d'imprimantes de type RepRap. Il fonctionne sur la carte principale de l'imprimante 3D, en gérant toutes les actions en temps réel de la machine. Il permet notamment de programmer le fonctionnement des résistances thermiques (pour les imprimantes 3D plastiques équipées d'une buse chauffante), des moteurs pas à pas, des capteurs, de l'écran LCD, des différents boutons et de tout ce qui est impliqué dans le processus d'impression 3D [122].

Le micrologiciel Marlin est principalement utilisé pour les procédés de fabrication additive de type FDM (*Fused Deposition Modeling*) ou FFF (*Fused Filament Fabrication*). Avec ces procédés, un moteur pousse un filament plastique à travers une buse chauffée par résistance, qui permet la fusion et l'extrusion de la matière, pendant que la buse se déplace sous contrôle informatique. Après plusieurs minutes (ou plusieurs heures) de pose de fines couches de plastique, le résultat est un objet physique.

Le langage de contrôle utilisé par le micrologiciel Marlin est un dérivé du langage « code G » ou *G-code* en anglais, qui décrit à travers chaque commande toutes les actions élémentaires que doit réaliser la machine. Le format du programme en G-code doit être spécifique à la machine utilisée, c'est pourquoi on ne peut pas dans notre cas utiliser un format existant. Ce format de G-code intègre notamment les paramètres de découpage des pièces qui seront fabriquées, qui dépendent fortement des caractéristiques de la machine utilisée. Le format de code G peut être créé grâce à un logiciel de « découpage », appelé « *slicer* » en anglais.

2.5.6.2. Le « Slicer »

Les logiciels de découpage, ou « *Slicer* », préparent le modèle 3D solide que l'on veut fabriquer par impression 3D en le découpant en tranches minces (couches). Dans le processus, il génère le code G

qui indique à l'imprimante en détail comment reproduire le modèle. Il existe de nombreux logiciels de découpage open source, tels que les logiciels Cura [123], Slic3r [124], Simplify3D [125] ou Skeinforge [126]. Nous avons choisi d'utiliser le logiciel Slic3r pour générer les fichiers en code G adaptés à notre configuration d'imprimante.

2.6. Le procédé de soudage CMT

L'installation de fabrication additive doit comprendre un système d'alimentation en matière première, sous la forme d'un fil métallique dans le cas du procédé WAAM, et une source de chaleur, qui doit assurer la fusion de l'extrémité du fil avant son dépôt en couches. Ces fonctions sont assurées par le procédé de soudage à l'arc CMT (Cold Metal Transfer), qui a été intégré au banc de fabrication additive décrit dans les précédents paragraphes. Le procédé est constitué d'un générateur de courant, qui permet de générer et de contrôler l'arc électrique, d'une bobine de fil métallique (en acier dans le cadre de la présente étude), d'un réservoir de gaz de protection pour éviter l'oxydation du métal (bouteille de gaz), et d'une torche de soudage reliée au générateur, à la bobine et à la bouteille de gaz par un « faisceau » contenant les câbles d'alimentation en courant, la gaine transportant le fil d'apport, et le tuyau d'arrivée de gaz de protection. L'extrémité de la torche de soudage est constituée d'une buse permettant de diriger le flux gazeux vers la zone de métal en fusion, et un « tube contact » qui assure le guidage du fil au centre de la buse, et le contact électrique avec le fil, pour maintenir une différence de potentiel entre son extrémité et le support de construction métallique, nécessaire pour générer et entretenir l'arc électrique.

2.7. Description des paramètres du procédé

Le procédé CMT est une variante améliorée du procédé de soudage MIG (Metal Inert Gas), ou GMAW (Gas Metal Arc Welding), produisant un mode de transfert de métal par court-circuit contrôlé [113]. Ce procédé est caractérisé par un mouvement de translation alternée du fil d'apport, qui produit ainsi de façon mécanique le détachement des gouttelettes de métal fondu formées à l'extrémité du fil d'apport, pendant les phases de court-circuit contrôlées électroniquement (cf. Chapitre 1). La forme d'onde du courant pendant les phases d'arc électrique est également contrôlée, de manière à générer avant les court-circuit des gouttelettes de caractéristiques (volume et température) contrôlées. Ce mécanisme de transfert permet de déposer des cordons de métal en utilisant de faibles niveaux de puissance, ce qui permet de limiter fortement les projections souvent rencontrées en soudage, ou encore de souder de très faibles épaisseurs grâce à la limitation de la température des gouttelettes déposées.

Pour pouvoir contrôler de manière stable ce mode de transfert, un grand nombre de paramètres caractérisant le cycle de transfert en CMT doivent être fixés, dont les réglages peuvent s'avérer complexes. Le cycle CMT se compose ainsi d'une vingtaine de paramètres, pré-réglés dans le processeur du générateur de soudage CMT dans plusieurs lois synergiques, définies pour différentes nuances d'alliages métalliques, différents diamètres de fil, ou encore différents gaz de protection. Chacune de ces lois synergiques est généralement constituée de plusieurs points de fonctionnement correspondant à des puissances moyennes et des taux de dépôts variables, en fonction des caractéristiques de dépôt ou de soudage souhaitées. Ces points de fonctionnement n'ont cependant pas été optimisés pour certaines applications atypiques, comme la fabrication additive, et

l'ajustement de certains paramètres procédé peut être nécessaire pour améliorer le transfert ou la qualité des dépôts.

La Figure 2.7.1 montre de manière schématique l'évolution de la vitesse du fil, de l'intensité et de la tension au cours d'un cycle de transfert avec le procédé CMT classique. Ce graphe permet de décrire le mécanisme de fusion et de transfert du métal fondu, sous la forme de gouttelettes déposées sur le substrat lors de la phase de court-circuit.

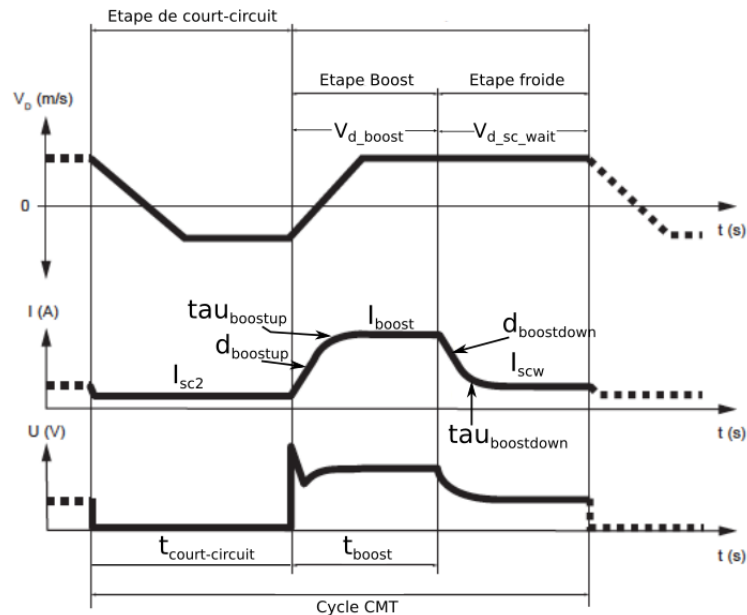


Figure 2.7.1 Evolution de la vitesse de fil V_d , de l'intensité I et de la tension U au cours d'un cycle de transfert caractéristique du procédé CMT, et paramètres caractéristiques du procédé

Le cycle de transfert en CMT peut ainsi se décomposer en trois étapes.

Pendant la phase de court-circuit (le fil est entré en contact avec le substrat et l'arc électrique s'éteint), la tension est proche de zéro, et l'intensité prend la valeur de consigne I_{sc2} . La gouttelette qui s'est formée à l'extrémité du fil électrode se propage dans le bain de fusion déjà formé sur le substrat sous l'action combinée de la gravité et des forces de tension de surface (ou s'étale par mouillage sur le substrat s'il s'agit de la première gouttelette déposée, produisant la fusion localisée du substrat). Un ménisque de métal fondu relie alors le fil et le bain de fusion. Le fil électrode remonte alors (vitesse de dévidage V_d négative). Ce mouvement de retrait produit un rétrécissement du diamètre du ménisque reliant le fil au métal fondu, permettant finalement le détachement de la gouttelette sans projections, à faible tension et intensité.

A la rupture du court-circuit, l'arc électrique se réamorce, et l'intensité augmente jusqu'à la valeur de consigne I_{Boost} . C'est la phase du cycle appelée « boost », ou phase d'arc chaud. La montée du courant est contrôlée par la vitesse de montée d_{Boost_up} (en A/ms) et par la durée d'accroissement non linéaire $\tau_{Boostup}$ (en ms). Dès le démarrage de la phase boost, détectée par l'augmentation de la tension, l'unité de commande de processus numérique du système CMT déclenche l'inversion du sens de dévidage du fil. La vitesse de remontée s'annule dans un premier temps, et le fil se stabilise (V_d nulle). Sous l'action de la chaleur de condensation des électrons traversant l'arc électrique, l'extrémité du fil s'échauffe et forme une nouvelle gouttelette qui grossit durant la phase d'arc

chaud. Puis le fil redescend à la fin de la phase boost, pour atteindre la vitesse de consigne $V_{dbboost}$. La durée de la phase boost est contrôlée par le paramètre t_{Boost} .

Durant la phase suivante, dite d'arc froid, l'intensité du courant diminue à la vitesse définie par les paramètres d_{Boost_down} , vitesse de descente linéaire du courant et $\tau_{Boostdown}$, durée de la phase de diminution non linéaire du courant, jusqu'à la valeur de consigne I_{scw} . Cette valeur d'intensité est plus faible que l'intensité de la phase d'arc chaud, afin de limiter le volume de la gouttelette formée à l'extrémité du fil, et éviter qu'elle ne se détache sous l'effet de la gravité et des forces de Lorentz. La vitesse de dévidage du fil augmente rapidement à la fin de la phase boost et au début de cette phase, jusqu'à sa valeur maximale de consigne $V_{dbboost}$. Cette phase s'arrête lorsque le fil entre en contact avec le substrat ou le bain de fusion, créant un nouveau court-circuit, et l'inversion du sens de translation du fil, qui amorce alors sa remontée à la vitesse de consigne $V_{dbboost}$.

Tous ces paramètres, qui sont fixés dans chaque point de fonctionnement d'une loi synergique donnée, peuvent cependant être modifiés à l'aide de la commande à distance RCU 5000i du générateur de soudage CMT [127].

2.8. Choix des consommables utilisés

2.8.1. Fil électrode

Le fil électrode utilisé au cours de cette étude est un fil de diamètre 1mm en acier faiblement allié de dénomination G2Si1 selon la norme NF EN ISO 13341. Ce type de fil est l'un des plus couramment employés pour le soudage des structures en acier, et possède de ce fait des lois synergiques déjà programmées dans le processeur du générateur de soudage CMT. Le matériau constituant ce fil présente une très bonne soudabilité opératoire, c'est-à-dire qu'il peut être utilisé avec la plupart des procédés de soudage sans précautions particulière, ainsi qu'une bonne soudabilité métallurgique, car il est peu sensible aux phénomènes de fissuration pouvant intervenir en cours de soudage, et il produit des microstructures après soudage donnant de bonnes caractéristiques mécaniques. La composition chimique type et les propriétés mécaniques de cet acier, données par le fabricant, sont indiquées dans les tableaux suivants [128].

Analyse chimique du fil G3Si1									
%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Cr	%Ni	%Mo	%V	%Cu(Total)
0,06- 0,15	1,40- 1,85	0,80- 1,15	0,035 max	0,025 max	0,15 max	0,15 max	0,15 max	0,03 max	0,50 max

Tableau 2.8.1. Composition chimique du fil électrode G3Si1.

Caractéristiques mécaniques			
	Re 0,2 (MPa)	Rm (MPa)	A%
Brut de soudage	490	590	27

Tableau 2.8.2. Caractéristiques mécaniques du fil électrode G3Si1.

2.8.2. Tôle substrat

La tôle utilisée comme substrat pour déposer des cordons à l'aide du fil électrode est une tôle laminée à chaud en acier de construction non allié et non effervescent (désoxydé) S235JR suivant la norme européenne EN 10025-2. Cet acier est couramment employé pour la construction de structures métalliques, et possède lui aussi une bonne soudabilité opératoire et métallurgique. Sa composition proche de celle du fil d'apport rend les deux matériaux parfaitement compatibles d'un point de vue métallurgique. Les dimensions des tôles support utilisées sont de 300 x 100 x 3 mm. La tôle est préalablement décapée chimiquement pour supprimer toutes traces d'huiles. La composition chimique type de cet acier, ainsi que ses propriétés mécaniques selon la norme précitée, sont données dans les tableaux ci-dessous.

Composition chimique de la tôle en acier S235JR						
Élément :	%C	%P	%S	%Mn	%N	%Cu
Composition :	0,17	0,045	0,045	1,40	0,009	0,55

Tableau 2.8.3. Composition chimique de la tôle en acier S235JR.

Caractéristiques mécaniques de la tôle en acier S235JR	
Limite élastique :	Re $\geq$ 235 MPa
Résistance à la traction :	360 $\leq$ Rm $\leq$ 510 MPa

Tableau 2.8.4. Caractéristiques mécaniques de la tôle en acier S235JR.

2.8.3. Gaz de protection

Le gaz de protection utilisé pour tous les essais réalisés est un mélange d'argon et de dioxyde de carbone dont les proportions volumiques sont données dans le Tableau 2.8.5. L'addition de dioxyde de carbone permet d'améliorer le mouillage de l'acier liquide, en modifiant les tensions superficielles liquide/gaz. Les lois synergiques pour fil en acier disponibles dans le microprocesseur du générateur de soudage CMT sont développées pour ce type de mélange gazeux, qui est d'ailleurs recommandé pour souder les aciers de construction.

Composition chimique du gaz de protection		
Argon %	Dioxyde de Carbone%	Oxyde Nitrique %
91,97	8	$\leq$ 0,03

Tableau 2.8.5. Composition chimique du gaz de protection.

2.9. Instrumentation de l'imprimante 3D

L'objectif principal de ce travail de recherche est l'étude des transferts de matière et de chaleur au cours du procédé de dépôt à l'aide du procédé CMT, afin d'identifier les paramètres de procédé les mieux adaptés pour produire des dépôts et des empilements de dépôts les plus réguliers possibles. Il est donc important de pouvoir enregistrer les paramètres électriques au cours du procédé, de

manière à pouvoir les corrélérer aux caractéristiques physiques des transferts, mais aussi de caractériser ces transferts par des mesures et observations directes, à l'aide de caméra rapide. Nous décrivons dans les paragraphes suivants les techniques de mesures employées et la façon dont elles ont été adaptées sur la machine d'impression 3D développée.

2.10. Mesure des signaux électriques du générateur de soudage

L'étude des caractéristiques des signaux électriques produits par le procédé CMT est très utile pour améliorer la compréhension des phénomènes physiques impliqués dans les transferts de matière et de chaleur, mais aussi pour évaluer la stabilité des transferts et détecter l'apparition de défauts. La mesure et l'enregistrement des signaux de tension et d'intensité au cours du soudage nécessitent cependant l'utilisation de capteurs spécifiques qui ne seront pas perturbés par le générateur de soudage, et pouvant atteindre de grandes vitesses d'acquisition. Ces mesures doivent de plus être enregistrées de manière synchronisée à l'aide d'une centrale d'acquisition. La Figure 2.10.1 donne une représentation schématique de l'installation, montrant la position des capteurs utilisés.

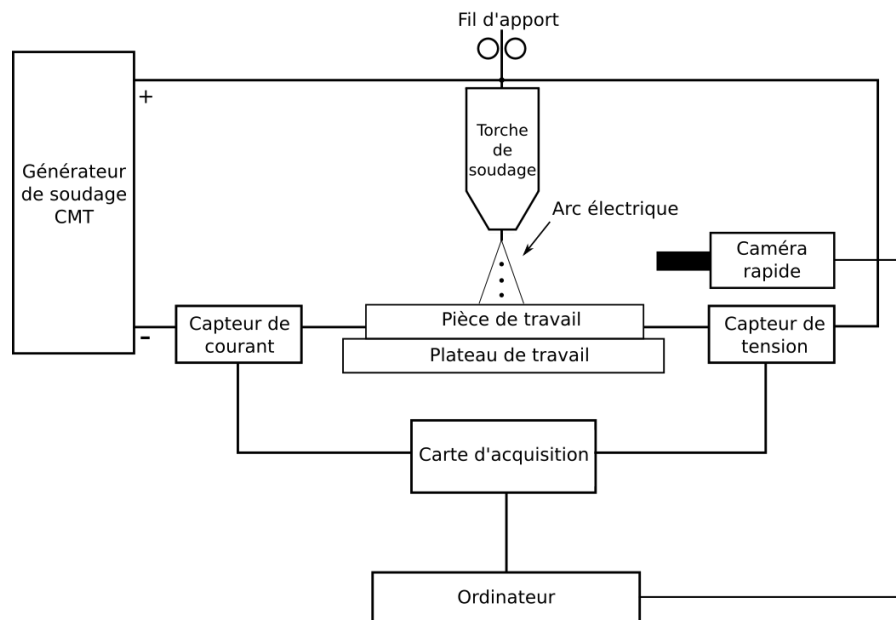


Figure 2.10.1 Schéma représentant l'installation et la connexion des différents capteurs

2.10.1. Mesure du courant de soudage

Le courant ou intensité de soudage que délivre le générateur permet la création et le maintien de l'arc électrique, et détermine en grande partie ses caractéristiques, la chaleur de condensation des électrons, qui fournit la majeure partie de l'échauffement produit par un arc électrique, étant directement liée à cette caractéristique. Cette grandeur peut atteindre des valeurs de 500 A, c'est pourquoi il faut utiliser des capteurs disposant d'une gamme de mesure de cet ordre avec une bande passante suffisamment large (100-400 kHz) pour permettre l'observation des fluctuations les plus brèves.

Nous avons choisi d'utiliser un capteur à boucle fermée de marque LEM®, qui mesure le flux d'électrons par effet Hall et traduit l'intensité du courant mesurée en tension. Pour mesurer le courant de soudage, le capteur a été placé autour du câble de puissance reliant la borne négative du générateur au plateau de travail. Les capteurs LEM® ont besoin d'une source d'alimentation électrique externe de type symétrique et d'un réseau de résistances en série (les valeurs sont

indiquées par le fournisseur selon le modèle de capteur), afin de conditionner le signal de sortie pour qu'il soit dans la gamme $\pm 10V$, valeurs de tension acceptées par la carte d'acquisition. Ce conditionneur est protégé des effets électromagnétiques par une cage de Faraday. Toutes les connexions physiques entre le capteur LEM, le conditionneur, et la carte d'acquisition se font avec des câbles coaxiaux blindés. Nous avons choisi un capteur de courant LEM LF 305-S, qui permet de mesurer des intensités comprises entre 0 et 500 A, à une fréquence pouvant atteindre 100 kHz.

2.10.2. Mesure de la tension de soudage

Pour la mesure de la tension en soudage, il est nécessaire de prévoir du matériel qui puisse supporter des tensions très variables, qui vont de moins de 1 V pendant les court-circuit à plus de 50 V au moment de l'amorçage, voire même plusieurs kilovolts pour les procédés de soudage à l'arc de type GTAW. La dynamique de la tension est liée à celle de l'intensité de soudage, et il faudra donc des fréquences d'acquisition élevées. La tension en soudage à l'arc est un objet d'étude important, parce qu'elle reflète l'image de la hauteur d'arc, c'est-à-dire la distance entre l'extrémité du fil électrode et la surface du bain de fusion, ce qui est une donnée importante pour le procédé CMT, puisque cette distance varie pendant les différentes phases du cycle de transfert. La tension de soudage est mesurée par la différence de potentiel entre l'électrode, ou plus précisément le « tube contact » dans lequel est guidé le fil électrode à la sortie de la torche de soudage, et le plateau de travail sur lequel est fixée la tôle servant de support de fabrication des pièces. La tension relevée doit être conditionnée à l'aide d'un pont diviseur de tension, pour que le signal de tension transmis à la carte d'acquisition soit dans la gamme $\pm 10V$. Les connexions physiques entre l'électrode, le plateau de travail, les bornes du conditionneur et la carte d'acquisition sont assurées par des câbles coaxiaux blindés, reliés à la terre pour éviter les perturbations électromagnétiques.

2.10.3. La centrale d'acquisition

Pour enregistrer la mesure des variations d'intensité et de tension au cours du dépôt de métal par le procédé de soudage à l'arc CMT et synchroniser les différentes voies de mesure, une carte d'acquisition de données contenant différentes entrées / sorties numériques ou analogiques pouvant être utilisées simultanément est nécessaire. Nous avons choisi d'utiliser une carte d'acquisition de la société National Instruments® (NI) de type NI USB-9215, qui permet de stocker les données grâce à son module NI DAQmx®, et le logiciel LabVIEW® pour créer un programme d'acquisition. Les différents signaux de sortie des mesures de tension et intensité sont branchés à la carte d'acquisition de données (NI) et configurés en mode RSE (*Referenced Single Ended*), le potentiel de référence de chaque voie étant alors branché à la terre pour éviter les perturbations dérivées dans le signal.

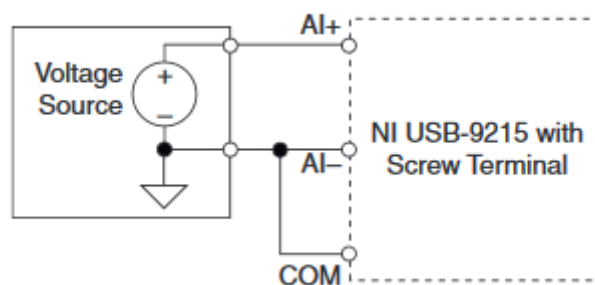


Figure 2.10.2 Diagramme de connexion en configuration RSE (*Referenced Single Ended*) à la carte d'acquisition de données NI USB-9215 [129]

2.10.4. Le programme d'acquisition

Le langage de programmation graphique LabVIEW® (pour *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) est un environnement de programmation particulièrement bien adapté à la mesure, au test, à l'instrumentation et à l'automatisation. LabVIEW® propose un flux de programmation graphique appelé langage de programmation G. Un programme développé dans l'environnement LabVIEW® se compose principalement de deux éléments, la « face-avant » et le « diagramme ». Ces deux fenêtres, bien que totalement distinctes au niveau de l'écran, et de niveaux informatiques très différents, sont indissociables et constituent les deux aspects d'une application. La « face-avant » représente le panneau de contrôle, elle constitue l'interface utilisateur et est composée de divers objets virtuels représentant les informations d'entrée (fournies par l'utilisateur) et de sortie (fournies par le programme), comme par exemple des boutons, des indicateurs, des graphiques, etc. Le « diagramme » constitue le corps proprement dit de notre programme/application, écrit sous la forme de diagramme de flux de donnée en langage G. Le diagramme comprend toutes les fonctions de l'instrument virtuel de la « face-avant ». Le programme d'acquisition LabVIEW® que nous avons développé pour l'acquisition de la tension et de l'intensité, mais aussi des autres données issues de caméras (cf. sections suivantes), démarre de façon automatique. Il comprend un premier écran qui présente les champs à compléter (Figure 2.10.3), contenant toutes les informations relatives au mode opératoire de l'expérience en cours, comme les paramètres du procédé. Cette information est enregistrée dans un fichier de type Excel.

Prototypage rapide	
Opérateur	
Processus	
Matériau de l'électrode	
Diamètre du fil (mm)	
Vitesse d'avance (mm/min)	
Point Synergique	
Tension (V)	
Intensité (A)	
Vitesse de dévidage (m/mm)	

OK Cancel

Figure 2.10.3 Premier écran de la « face avant » du programme d'acquisition LabVIEW

Une fois le premier écran complété, un deuxième écran (Figure 2.10.4) est ouvert, correspondant aux courbes des signaux électriques, tracées à partir des données de tension et d'intensité enregistrées en temps réel, et récupérées à partir des buffers à la fréquence de 25 kHz. Une fois l'expérience terminée, les données sont enregistrées dans un fichier au format texte (.txt) pour pouvoir les traiter ultérieurement. Tout ce processus s'effectue de manière automatique grâce à un script python, via la carte Arduino, qui détecte le signal numérique de la carte RAMPS dès qu'un nouvel essai de fabrication est lancé ou arrêté. Ce signal numérique de la carte RAMPS provient d'une instruction en G-code préalablement définie par l'utilisateur.

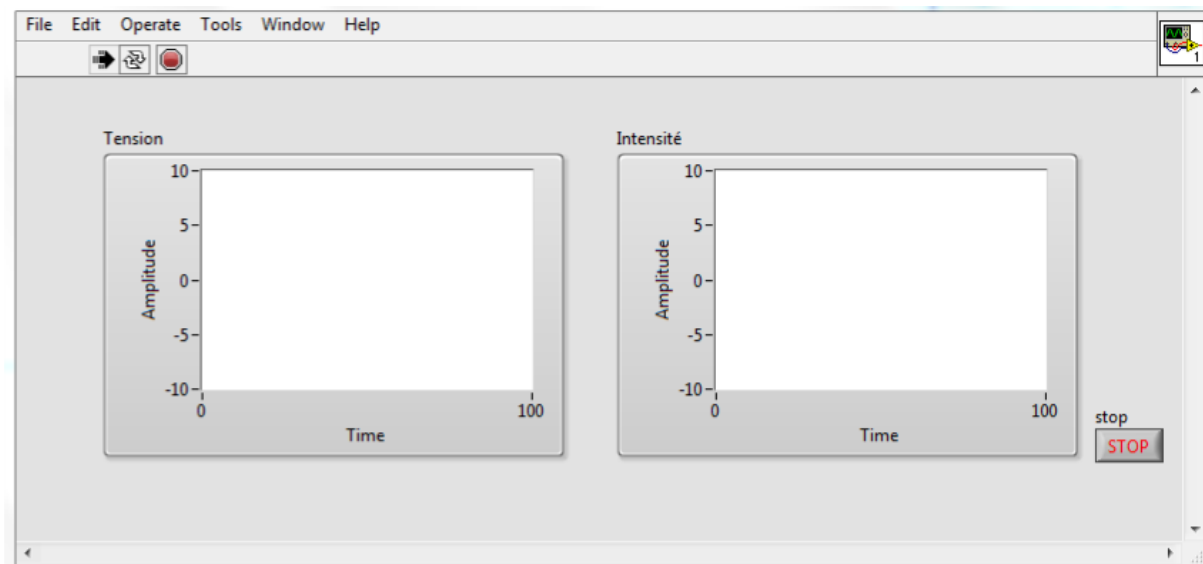


Figure 2.10.4 Deuxième écran de la « face avant » de notre programme d'acquisition LabVIEW™

2.11. Caméra rapide

Les phénomènes physiques intervenant lors du transfert de métal avec le procédé CMT présentent des temps caractéristiques extrêmement courts. Il est donc nécessaire, si l'on veut pouvoir les visualiser in situ, d'utiliser des techniques d'imagerie permettant de grandes vitesses d'acquisition. Nous avons utilisé une caméra rapide de type Phantom IR 300 [130] à capteur CMOS, permettant d'obtenir une fréquence d'acquisition de 6688 images par seconde en pleine résolution (800 x 600 pixels), et jusqu'à 190000 images par seconde en résolution réduite. Ce type de caméra rapide a une bonne sensibilité dans le proche infrarouge, dans un spectre de longueur d'ondes allant de 600 à 1100 nm environ, ce qui permet d'utiliser des temps d'exposition très faibles. La caméra est positionnée au niveau du plateau de construction, et est orientée selon un angle de 90° environ par rapport à l'axe du fil d'apport (Figure 2.11.1). La technique de l'ombroscopie a été employée pour s'affranchir du rayonnement parasite intense de l'arc électrique. Une lampe halogène de 250 W est placée à l'arrière du fil et du dépôt, et un filtre interférentiel d'une longueur d'onde de 1000 nm est placé sur l'objectif de la caméra, de manière à filtrer l'essentiel du rayonnement de l'arc (Figure 2.11.1). Le contour du fil et du métal fondu peut alors être visualisé au milieu du faisceau lumineux produit par la lampe halogène, qu'il occulte partiellement.

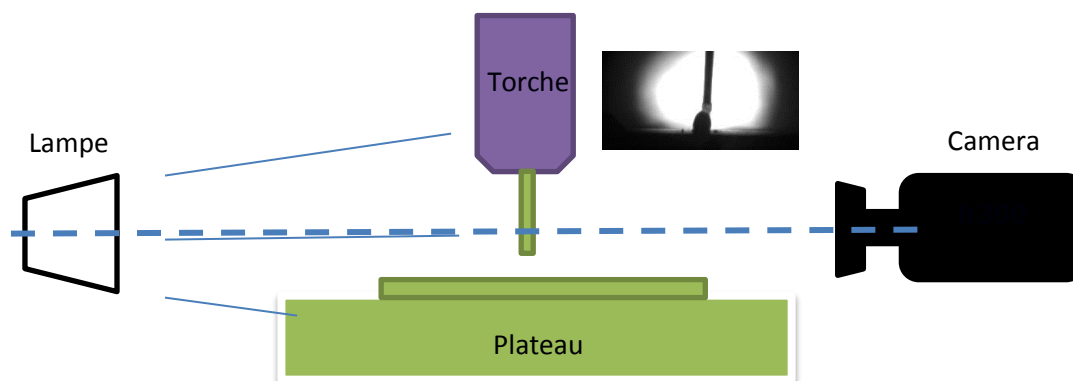


Figure 2.11.1 Principe de la technique d'ombroscopie appliquée à l'observation du transfert en soudage à l'arc

2.12. Caractérisation géométrique des dépôts

Afin d'obtenir les caractéristiques géométriques des cordons déposés, et de corrélérer ensuite ces résultats aux paramètres procédés lors de l'analyse ultérieure des conditions de dépôt, une technique de mesure sans contact a été employée. Celle-ci consiste à obtenir une image numérisée de la surface des éprouvettes fabriquées à l'aide d'un scanner 3D, et de traiter ensuite ces objets virtuels pour en extraire les caractéristiques géométriques des dépôts. Le processus de caractérisation est alors divisé en trois étapes (Figure 2.12.1) : la phase de numérisation de l'objet réel, la phase de post-traitement de l'objet numérisé, et enfin la mesure de ses caractéristiques géométriques, grâce notamment à des algorithmes spécialement développés pour cette tâche.

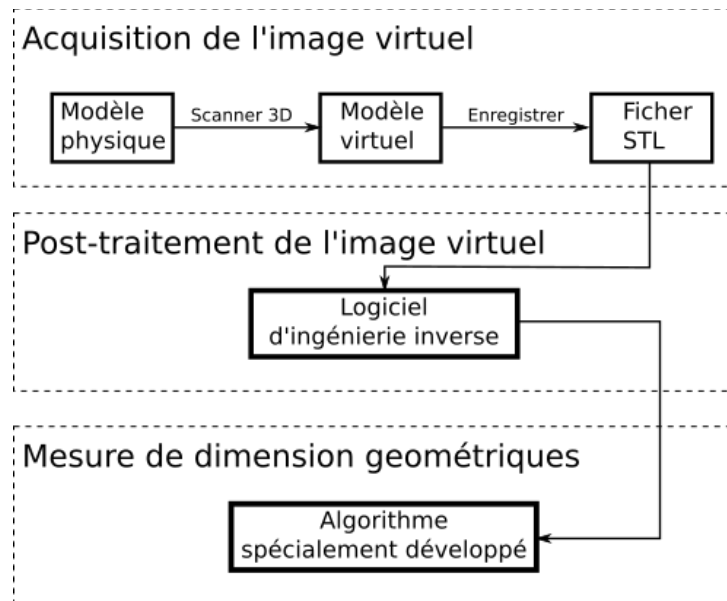


Figure 2.12.1 Description du processus de caractérisation géométrique des dépôts.

2.13. Numérisation de la surface des dépôts

Dans cette étape, la surface des cordons déposés est numérisée à l'aide d'un scanner 3D [131], puis le modèle virtuel est créé à partir d'un nuage de points, et est finalement enregistré dans un fichier au format STL. Ce type de technique de numérisation d'objets réels est utilisé notamment dans le domaine de l'art pour restaurer les sculptures [132], dans le domaine de la médecine pour la fabrication de prothèses sur mesure [133], dans le domaine de l'architecture et du génie civil pour scanner des surfaces complètes de bâtiments, ou des pièces [134], pour la restauration de bâtiments [135], ou encore dans le domaine de la fabrication mécanique, pour contrôler la qualité des composants et des assemblages fabriqués par comparaison avec les modèles virtuels issus de la CAO [136].

Un scanner de type BREUCKMANN OPTO TOP-HE [29] a été utilisé pour numériser les différents dépôts fabriqués. Le système est composé d'un projecteur qui projette des franges de lumière blanche balayant la surface des pièces à numériser, tandis qu'une caméra placée selon une orientation donnée enregistre la scène (Figure 2.13.1). Plusieurs images successivement acquises doivent généralement être corrélées pour numériser une surface sans données manquantes. Pour pouvoir numériser toutes les faces d'objets 3D, ces derniers sont placés sur un plateau tournant, et il faut alors répéter l'opération avec plusieurs orientations des pièces, les images étant ensuite

associées par photogrammétrie. Cet outil permet de numériser des pièces avec une précision pouvant atteindre 10 μm .



Figure 2.13.1) Scanner 3D OptoTOP-HE de Breuckmann. b) Schéma qui montre le principe de fonctionnement du scanner Breuckmann.

Avant de pouvoir numériser les pièces métalliques, il est parfois nécessaire de préparer la surface de l'objet afin d'éviter la réflexion de la lumière blanche par la surface de l'objet. Un revêtement mat est alors appliqué sur les surfaces à numériser, à partir d'un spray composé de particules blanches d'une granulométrie moyenne de 2,8 microns, en suspension dans un solvant à séchage rapide. Une fois pulvérisé sur la surface, il produit un revêtement blanc opaque, qui permet que l'objet soit numérisé. Une fois l'opération de numérisation terminée, la couche de spray peut être nettoyée facilement de la surface de l'objet [137].

Le scanner OptoTOP-HE de Breuckmann est piloté par le logiciel Optocat [138], qui permet de régler les paramètres des images enregistrées tels que la saturation, la luminosité, la résolution, etc., et le nombre d'images pour chaque champ d'observation, qui doit permettre d'obtenir des nuages de points suffisamment denses. Ce logiciel permet aussi de réaliser un prétraitement manuel de l'image, par exemple pour délimiter la zone de l'objet étudié dans le nuage de point obtenu. Finalement, le logiciel permet de générer un fichier de format STL, qui décrit la surface de l'objet scanné par un ensemble de facettes triangulaires caractérisées par les coordonnées de leurs sommets et leur normale extérieure.

2.14. Post-traitement de l'image virtuelle

Une fois la surface du modèle physique numérisée, les données sont traitées à l'aide du logiciel d'ingénierie inverse « Geomagic Studio » [139], qui permet d'aligner de manière semi-automatique l'objet virtuel par rapport à un repère prédéfini, et « d'encapsuler » l'objet pour obtenir une surface fermée. Il est en effet important que l'image virtuelle soit correctement alignée par rapport à un repère cartésien préalablement défini, pour pouvoir ultérieurement choisir facilement des plans de coupe dans lesquels analyser les caractéristiques géométriques des dépôts.

L'image numérisée de la surface de l'objet réel présente généralement quelques défauts, correspondant à des « trous » visibles sur l'image virtuelle (Figure 2.14.1 a). Ces défauts peuvent s'expliquer par une mauvaise configuration des paramètres du logiciel Optocat (saturation, luminosité, etc.), par une mauvaise préparation de la surface, qui réfléchit alors trop la lumière

blanche du scanner 3D, ou encore par la présence de zones concaves sur la surface de l'objet réel qui ne sont pas visibles par la caméra du scanner. Pour « réparer » ces défauts et avoir une surface continue, on utilise les outils de réparation semi-automatique du logiciel Geomagic Studio, basés sur des méthodes d'interpolation à partir des caractéristiques des surface voisines, qui permettent de « boucher les trous » de la surface.

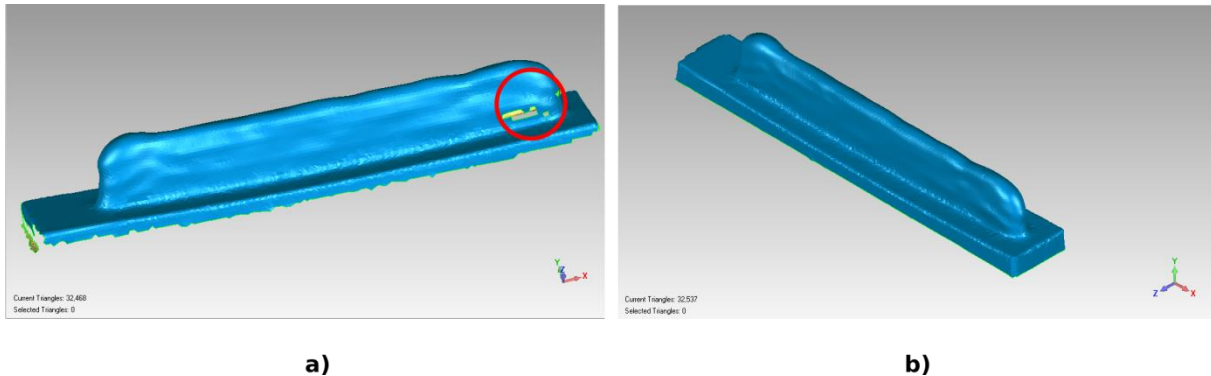


Figure 2.14.1 a) Objet numérisé qui présente des défauts superficiels et qui n'est pas aligné par rapport au système de coordonnées cartésiennes. b) Objet « réparé » et aligné sur le système de coordonnées cartésiennes avec le logiciel Geomagic Studio

Une fois les surfaces numérisées préparées par ce post-traitement, deux méthodes de mesure sont ensuite utilisées pour déterminer les caractéristiques géométriques des dépôts, qualifiées dans la suite de méthode manuelle et méthode automatique.

2.15. Méthode manuelle de mesure des paramètres géométriques

La méthode « manuelle » de détermination des caractéristiques géométriques des dépôts à partir de l'image numérisée de leur surface utilise les outils fournis par le logiciel Geomagic Qualify [140]. Ce logiciel est principalement dédié au contrôle de qualité de pièces en production, en comparant la géométrie de chaque pièce avec un modèle numérique de référence, pour en déduire les écarts dimensionnels.

Nous nous sommes intéressés dans le cadre de cette étude à deux types de géométries : des géométries de cordons simples, et des géométries multi-cordon. Pour chacune de ces géométries, la largeur moyenne (L), la hauteur moyenne (H) le long du dépôt, ainsi que les écarts types caractérisant la dispersion le long des cordons de ces grandeurs, doivent être mesurées (Figure 2.15.1).

Un autre paramètre intéressant pour les deux configurations étudiées, cordon simple et multi-cordon, est le volume total du dépôt, qui nous permettra d'en déduire le taux de dépôt, c'est-à-dire la quantité de matière déposée par seconde.

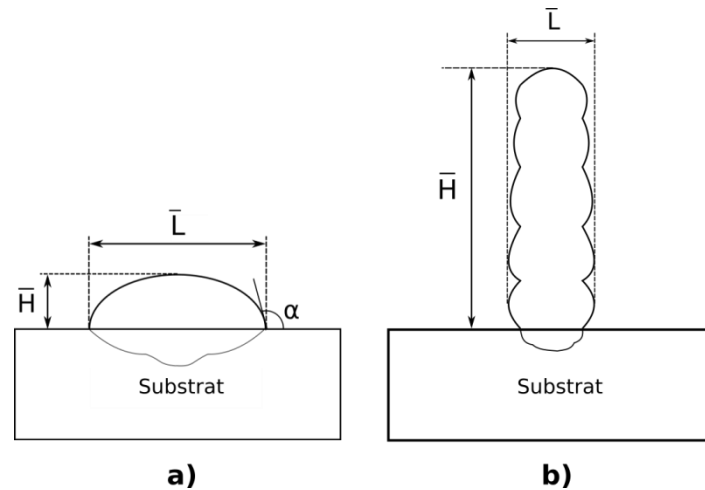


Figure 2.15.1 Paramètres géométriques à mesurer, pour a) un cordon simple, b) un multi-cordon

La méthode de mesure des largeurs et hauteurs de dépôts à l'aide du logiciel Geomagic Qualify s'est avérée fastidieuse, car elle nécessite de longues opérations manuelles pour définir une géométrie de référence. Ces grandeurs ont donc été mesurées par la méthode « automatique », à partir d'un programme en langage Python qui sera décrit dans la section suivante.

En revanche, le logiciel Geomagic Qualify permet d'obtenir de manière rapide le volume du cordon numérisé (Figure 2.15.2). Ce calcul du volume nécessite la définition préalable de la surface de l'objet à mesurer, puis la « fermeture » de cette surface, qui comporte des « trous » une fois que le substrat a été éliminé, opérations qui doivent être réalisées manuellement. Ce traitement peut introduire des erreurs d'estimation en fonction du choix du volume d'intérêt. La Figure 2.15.2 montre par exemple un cordon mal délimité, qui englobe donc une partie du substrat, ce qui donnera une valeur surestimée du volume de matière déposée.

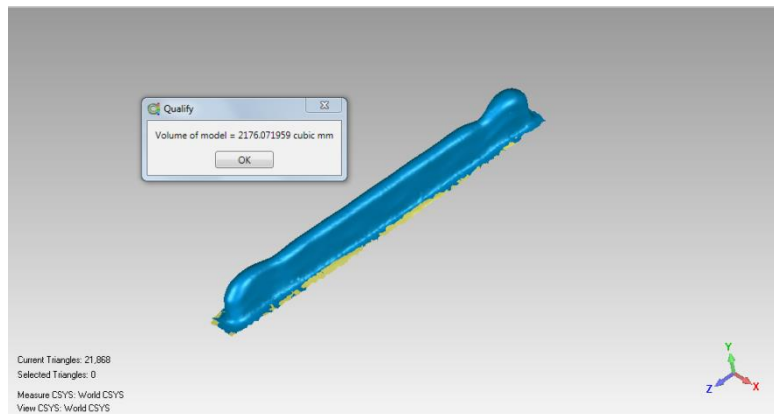


Figure 2.15.2 Calcul automatique du volume d'un mur multi-cordon à l'aide du logiciel Geomagic Qualify.

2.16. Méthode automatique de mesure des paramètres géométriques

La méthode développée pour mesurer les caractéristiques géométriques de largeur et de hauteur des dépôts est basée sur un traitement totalement automatisé des fichiers numérisés à partir du scanner, à l'aide d'un algorithme développé en langage Python, tirant ainsi bénéfice des nombreuses bibliothèques logiciels existantes. Nous avons en particulier utilisé pour développer cet algorithme la bibliothèque VTK (Visualization ToolKit)[141], bibliothèque de libre licence disponible pour la modélisation, le traitement d'images, et la visualisation de données scientifiques.

L'algorithme développé charge le fichier STL, préalablement réparé et aligné à l'aide du logiciel Geomagic Studio, et extrait de manière automatique un nombre défini de coupes transversales, fixé en fonction de la longueur du cordon simple ou du mur multi-cordon à étudier. Chaque coupe transversale est alors constituée d'un ensemble de points décrivant le contour du cordon (Figure 2.16.1).

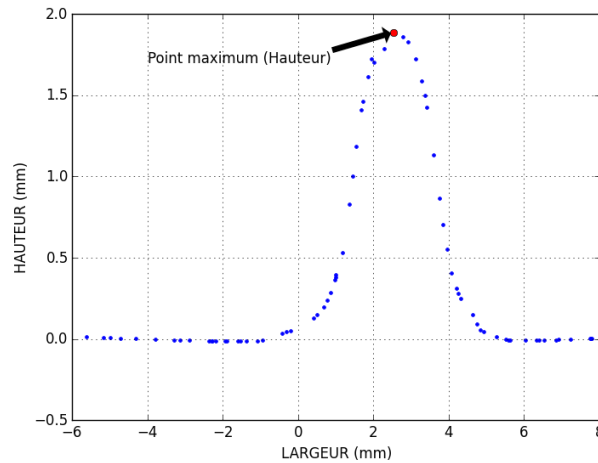


Figure 2.16.1 Ensemble de points décrivant le contour du cordon dans une coupe transversale, et localisation du point donnant la hauteur maximum

La hauteur de cordon ou de mur dans la coupe transverse étudiée est estimée par la valeur la plus élevée de la coordonnée selon l'axe Z des points du contour (Figure 2.16.1). Les valeurs relevées dans les différentes coupes transversales sont enregistrées, puis la moyenne et l'écart type sont calculés. La mesure de la largeur dans les murs multi-cordon est effectuée en séparant, dans chaque coupe transversale, les points du contour en deux catégories, gauche et droite, en fonction de leur coordonnée sur l'axe horizontal en comparaison de celle du centre du cordon, estimé grâce au point donnant la hauteur maximale précédemment identifié. Chaque catégorie de points est alors classée par ordre croissant de leurs coordonnées selon l'axe vertical. La distance selon l'axe horizontal entre les points des deux catégories est enfin calculée. Les points de chaque catégorie ayant des coordonnées différentes selon l'axe vertical, une interpolation linéaire est utilisée pour obtenir un contour continu pour les points de gauche, et déterminer ainsi la distance selon l'axe horizontal entre cette ligne et les points du contour de droite (Figure 2.16.2). Toutes les distances calculées entre ces points sont stockées pour chaque coupe avec la hauteur associée, et la valeur moyenne ainsi que l'écart-type de la largeur de mur sont calculés, pour chacune des coupes transversales, mais aussi pour l'ensemble des coupes d'un même cordon.

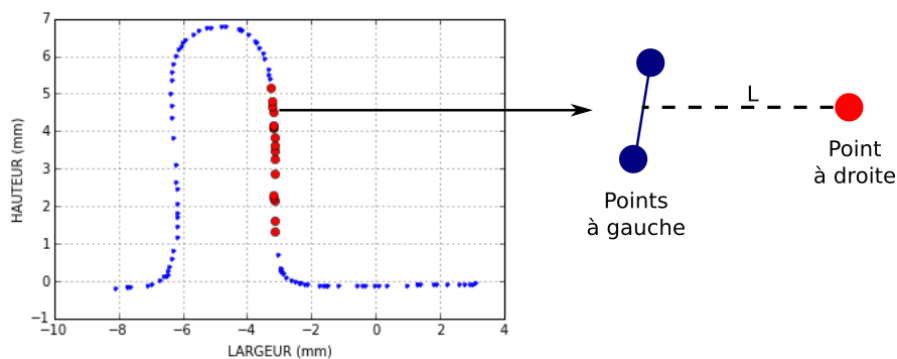


Figure 2.16.2 Méthode de mesure de la largeur des murs multi-cordon dans une coupe transversale : la largeur est mesurée par la distance horizontale entre les points de droite (en rouge) et les points de gauche (en bleu).

La mesure de la largeur dans les cordons simples est quant à elle effectuée à partir de coupes longitudinales du cordon, selon un plan parallèle à la surface du substrat. Un nombre défini de coupes longitudinales est retenu (cinq en moyenne), situées à des distances de la surface du substrat comprises entre 0,1 et 0,5 mm (Figure 2.16.3). A partir de ces coupes longitudinales, un pourcentage de points situés aux extrémités sont éliminés, afin de ne pas prendre en compte les défauts géométriques souvent observés en début et fin de cordon. Puis les points sont séparés en deux catégories, gauche et droite, et la distance entre ces points est calculée, de la même façon que pour la mesure de la largeur des murs multi-cordon. La valeur moyenne des largeurs mesurées ainsi que l'écart-type sont aussi calculés, pour chacune des coupes longitudinales et pour l'ensemble des coupes d'un même cordon.

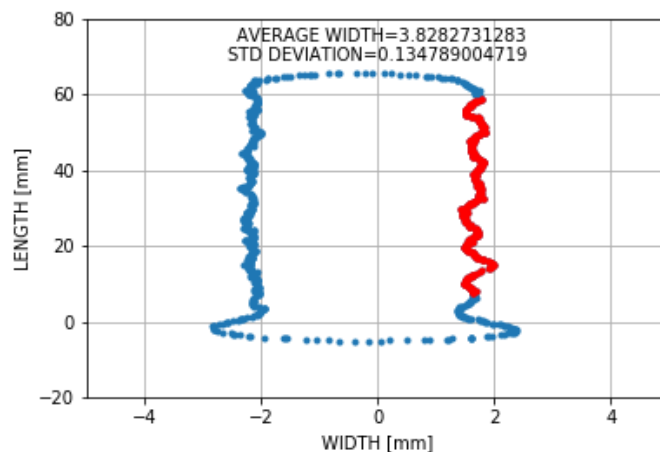


Figure 2.16.3 : Représentation du contour du cordon dans une coupe longitudinale parallèle au plan du substrat, et séparation des points du contour en deux catégories pour la mesure de largeur des cordons simples

Le volume peut aussi être calculé en utilisant des bibliothèques Python développées pour obtenir les propriétés d'objets 3D modélisés sous la forme de fichiers STL. Le modèle numérique à analyser doit d'abord être bien délimité, en sélectionnant manuellement la zone qui nous intéresse à l'aide du logiciel Geomagic Studio, puis le volume est automatiquement calculé grâce à un algorithme programmé en langage Python. Les résultats obtenus avec cette méthode, testés sur des tôles de dimensions connues, sont très reproductibles, et parfaitement identiques à ceux obtenus avec Geomagic Qualify. La qualité des résultats dépend cependant de la bonne délimitation de la zone de mesure, réalisée à l'aide du logiciel Geomagic Studio, qui doit prendre en compte toute la matière déposée, sans inclure de zones correspondant à la tôle substrat.

2.17. Caractérisation macrographique et micrographique des dépôts

La caractérisation métallographique des dépôts est réalisée à deux échelles. A l'échelle macrographique du cordon, elle permet d'analyser la forme et la taille de la zone fondue dans le substrat sous le cordon, ou des zones refondues dans les multi-cordons, la superposition des passes produisant une refusion partielle des cordons déjà déposés. A l'échelle micrographique, elle permet d'étudier la morphologie et la taille des grains et des phases en présence, mais aussi la présence éventuelle de défauts, tels que des soufflures (porosités) ou des fissures.

Pour réaliser ces analyses, les éprouvettes fabriquées sont découpées à l'aide d'une tronçonneuse métallographique à disques en carbure de silicium. Les échantillons découpés sont ensuite polis

manuellement, en utilisant d'abord des papiers abrasifs au carbure de silicium de granulométrie 180, 300, 600, 800, 1200, 1600, 2000, et 4000 avec une lubrification à l'eau, puis une pâte diamantée (3 et 1 μm) en finition pour obtenir un poli miroir. Les échantillons polis subissent alors une attaque chimique au Nital (5 % HNO_3 + éthanol) afin de révéler la microstructure de l'acier.

Les observations macrographiques ont été réalisées avec un macroscope sur colonne LEICA Z16 APO [142] équipé d'une caméra permettant l'acquisition et le stockage informatique des images. Pour obtenir de plus forts grossissements et mieux observer la structure de grain, des observations ont aussi été réalisées à l'aide d'un microscope optique inversé LEICA DMI5000M [143] équipé lui aussi d'une caméra permettant l'acquisition et le stockage informatique des images.

2.18. Conclusion

Dans ce chapitre, le banc de fabrication additive spécialement conçu pour la présente étude, ainsi que le procédé de soudage CMT utilisé comme source pour fondre le fil métallique et le déposer sur le substrat, ont été décrits. L'instrumentation développée pour pouvoir enregistrer l'évolution des signaux électriques très particuliers caractérisant le procédé CMT, ainsi que les techniques d'imagerie employées pour observer in-situ les phénomènes de transfert de matière au cours du dépôt, sont aussi été présentés. Finalement, une méthode originale basée sur la numérisation de la surface des dépôts afin de déterminer les caractéristiques géométriques des cordons réalisés a été décrite.

Le prochain chapitre présente les résultats de dépôts mono-cordon réalisés avec le procédé CMT, dans le but de mieux comprendre l'influence des nombreux paramètres du procédé sur le mécanisme de transfert de matière et de chaleur au cours du dépôt, et sur la géométrie des cordons obtenus.

Chapitre 3: Analyse de l'influence des paramètres du procédé CMT

Ce troisième chapitre est consacré à l'analyse de l'influence des paramètres du procédé CMT sur la géométrie des cordons obtenus, et sur les mécanismes de fusion et de dépôt de matière. Dans la première partie, des cordons sont réalisés en utilisant plusieurs points de fonctionnement correspondant à des paramètres procédé « standards » préenregistrés dans le microprocesseur du générateur CMT, et plusieurs vitesses de déplacement. Les défauts géométriques formés en début de cordon sont étudiés dans la seconde partie, puis une analyse plus fine des différentes phases du cycle de transfert caractéristique du procédé CMT est menée, à travers notamment le calcul des puissances et énergies générées lors de chacune de ces phases. Afin de mieux comprendre l'influence des principaux paramètres contrôlant le cycle CMT, une étude paramétrique est ensuite réalisée, de manière à tenter de corréliser les évolutions paramétriques aux variations de géométries, de taux de dépôt, ou encore de puissances et énergies générées pendant les différentes phases du cycle. Finalement, un point de fonctionnement optimisé, permettant d'augmenter le taux de dépôt par rapport aux points de fonctionnement standards, est proposé.

3.1. Influence des paramètres procédé sur la géométrie des dépôts

Dans cette première partie, les paramètres « standard » du procédé sont employés, correspondant à ceux intégrés dans la loi synergique C1360 préprogrammée dans le microprocesseur du générateur CMT, développée spécifiquement pour les aciers faiblement alliés. Rappelons que les essais sont réalisés avec un fil électrode en acier de diamètre 1 mm, et un mélange gazeux à base d'argon contenant 8% de CO₂ en volume.

3.1.1. Choix des paramètres procédé

La loi synergique utilisée est composée de dix points de fonctionnement, permettant de produire des puissances moyennes et donc des taux de dépôt de plus en plus élevés. Les paramètres prééglés pour l'ensemble de ces points sont indiqués dans le Tableau 3.1.1. En plus des neuf paramètres du cycle de transfert CMT décrits dans le chapitre deux (cf. 2.2.1), 2 paramètres contrôlant le cycle d'amorçage de l'arc peuvent être réglés, ainsi que deux paramètres contrôlant le cycle de fin de soudage. Les valeurs moyennes de tension, d'intensité, de puissance moyenne et de vitesse de fusion du fil correspondant à ces différents points sont également données dans le Tableau 3.1.1. Notons que ces valeurs ne sont qu'indicatives, et peuvent varier selon les conditions de dépôt, car les phénomènes physiques impliqués lors du transfert de matière en CMT sont complexes, et ne permettent pas un contrôle exact des puissances et vitesses de fusion moyennes.

		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
		Paramètres d'amorçage									
I_ignition	A	70	70	80	90	100	110	130	150	150	150
t_ignition	ms	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
		Paramètres caractéristiques du cycle CMT									
I_sc_wait	A	40	40	40	50	60	60	70	80	80	90
Vd_sc_wait	m/min	20	20	22,5	25	25	25	25	25	25	30
I_sc2	A	40	60	90	120	120	110	110	110	120	150
d_boostup	A/ms	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
tau_boostup	ms	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

I_boost	A	40	70	100	160	160	160	160	160	200	240
t_I_boost	ms	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1,6	3	4,5	4,5	4,5
d_boostdown	A/ms	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
tau_boostdown	ms	1	1	1	1	1	1	1	0,1	0,1	0,1

		Paramètres de fin de soudage									
I_drop_melt	A	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
t_burnback	ms(ex)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

		Valeurs moyennes (données indicatives)									
Courant	A	40	47	51	71	87	104	138	155,6	185	205
Tension	V	10,1	10,1	10,1	10,4	10,4	10,4	10,4	14,26	12,5	13,2
Puissance	W	404	475	515	738	905	1082	1435	2219	2312	2706
Vitesse de fusion du fil	m/min	1,1	1,2	1,4	2	2,5	3	4	5	6,3	7,8

Tableau 3.1.1 Valeurs des paramètres procédé prédéfinies dans la loi synergique C1360, et valeurs moyennes de courant, tension, puissance et vitesse de fusion du fil associées.

En plus des paramètres du procédé CMT, la vitesse relative de déplacement de la tête de dépôt est également un paramètre très important, qui détermine l'énergie linéique, c'est-à-dire l'énergie transmise par unité de longueur du substrat. Ce paramètre est utilisé en soudage pour caractériser l'énergie du procédé, car elle détermine l'échauffement du substrat, ou encore sa vitesse de refroidissement après le passage de la source de chaleur. Enfin, la distance entre le tube contact et la surface de la tôle substrat est également un paramètre à contrôler, car elle détermine la longueur de fil libre sous le tube contact, qui influe sur l'échauffement par effet joule du fil, ou encore sur la quantité de chaleur transmise par conduction depuis l'extrémité du fil vers le tube contact et les autres éléments de la torche de soudage. Cette distance a été fixée pour tous les essais à 15 mm.

Seuls les points de fonctionnement 5 à 10 ont été retenus pour les essais suivants, les quatre premiers points produisant une fusion trop lente du fil pour l'application visée. Différents cordons de soudure ont été réalisés avec ces points de fonctionnement, en utilisant différentes vitesses de déplacement (TS, Travel Speed, en anglais) comprises entre 0,3 m/min et 2,5 m/min, et les caractéristiques géométriques des cordons obtenus sont étudiées. Les cordons réalisés avec le même point de fonctionnement, d'une longueur de 80 mm, sont tous déposés sur une même tôle avec le même sens de dépôt, et séparés par une distance de 10 mm, en augmentant d'un cordon à l'autre la vitesse de déplacement.

3.1.2. Aspect général des cordons

Les cordons formés avec des vitesses de déplacement modérées sont tous réguliers, hormis le début de cordon, qui est plus large, et ce d'autant que la vitesse est faible (Figure 3.1.1). En revanche, pour les vitesses plus élevées, un défaut se manifeste sous la forme de fortes irrégularités. Ce défaut apparaît lorsque la vitesse de déplacement dépasse une valeur d'autant plus élevée que la puissance moyenne du point de fonctionnement est grande.

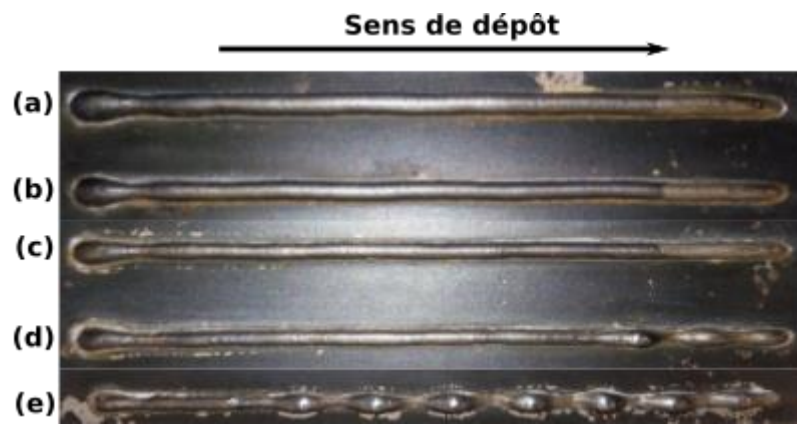


Figure 3.1.1 Cordons déposés avec le point de fonctionnement 5 et différentes vitesses de déplacement (a) 600, (b) 800, (c) 1000, (d) 1200, (e) 1500 mm/min.

Ce phénomène, appelé « humping », est bien connu en soudage. Le défaut est caractérisé par la formation d'une succession de bosses (ou « hump » en anglais) suivies de creux (ou « valley » en anglais) qui correspondent à des zones presque sans matière (Figure 3.1.2). Les phénomènes physiques impliqués dans l'apparition de ce défaut sont complexes et de natures diverses (hydrodynamique, thermique, mouillage ...), et font encore l'objet de travaux de recherche [144].



Figure 3.1.2 Défaut de « humping » dans un cordon déposé avec une grande vitesse de déplacement

La Figure 3.1.3 montre la vitesse d'apparition du humping pour les différents points de fonctionnement, en fonction de l'énergie linéique (rapport entre la puissance moyenne estimée et la vitesse de déplacement). La vitesse d'apparition du défaut est d'autant plus élevée que la puissance moyenne est grande. Le phénomène semble apparaître lorsque l'énergie linéique descend en dessous d'une limite comprise entre 50 et 70 J/mm environ, quel que soit le point de fonctionnement utilisé, ce qui a déjà été observé dans la littérature [145].

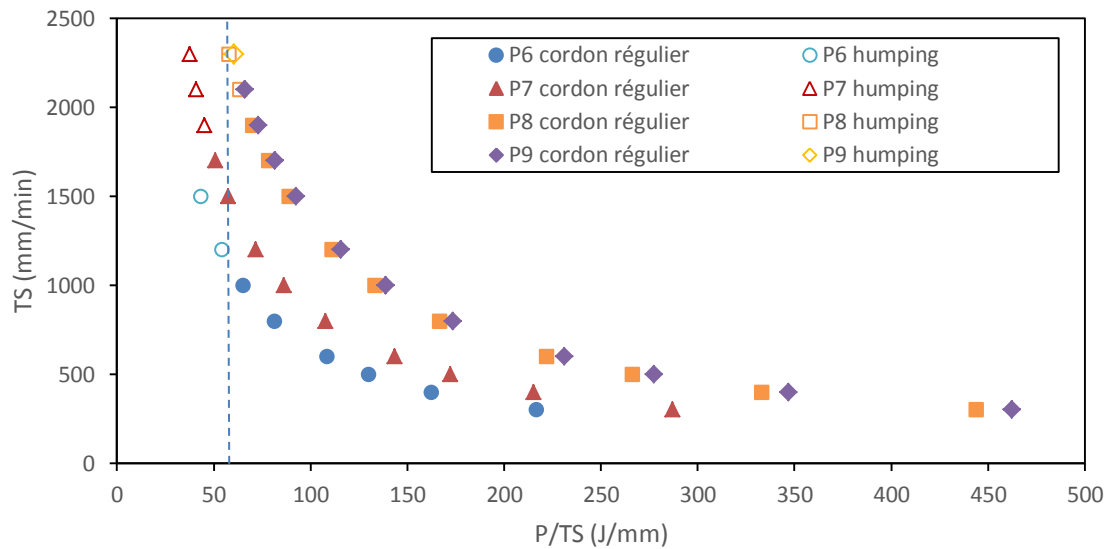


Figure 3.1.3 Domaine d'apparition du humping pour les différents points de fonctionnement testés (P : puissance, TS : Travel speed)

3.1.3. Caractéristiques géométriques des cordons

Les caractéristiques géométriques des différents cordons déposés (largeur moyenne, hauteur moyenne et leurs écarts types) ont été mesurées, selon la méthode utilisant le script en langage Python décrite dans le chapitre 2. Les figuresFigure 3.1.4 etFigure 3.1.5 montrent l'évolution respectivement de la hauteur moyenne et de la largeur moyenne des cordons obtenus avec les six points de fonctionnement testés, en fonction de la vitesse de déplacement. Pour chaque point de fonctionnement, la largeur comme la hauteur moyenne des cordons diminuent avec l'augmentation de la vitesse de déplacement.

Pour une même vitesse de déplacement, la largeur moyenne des cordons déposés augmente de manière générale avec la puissance moyenne utilisée. Cette augmentation est toutefois très faible entre les points 7 et 8, les paramètres procédé correspondant à ce dernier point conduisant pourtant à une puissance moyenne estimée très supérieure à celle du point 7 (2219 W au lieu de 1435 W, cf. Tableau 3.1.1). Rappelons que ces valeurs de puissance ne sont qu'indicatives, et qu'elles peuvent varier sensiblement en fonction de la régularité du cycle de transfert du procédé CMT.

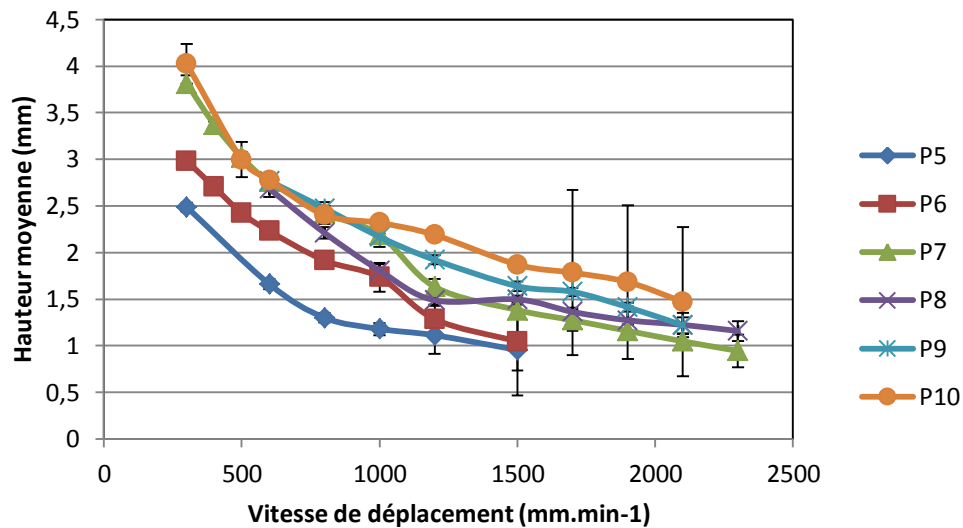


Figure 3.1.4 Evolution de la hauteur moyenne des cordons en fonction de la vitesse de déplacement.

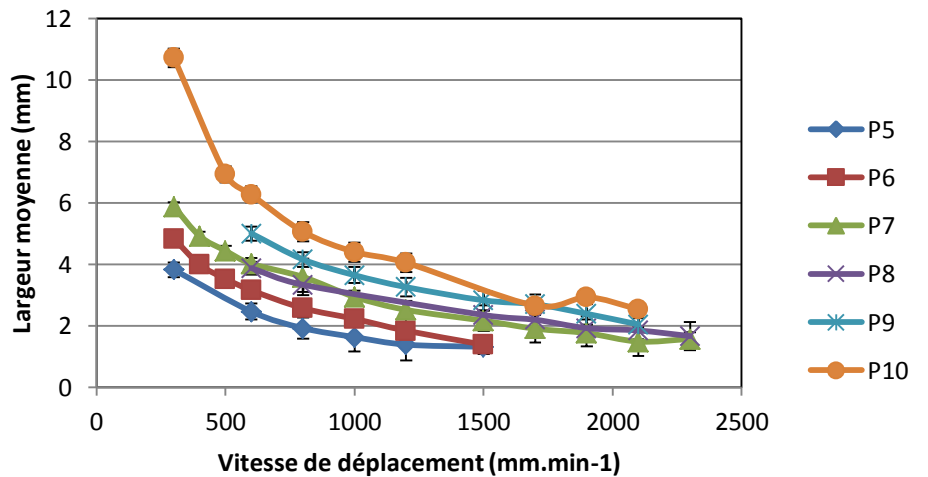


Figure 3.1.5 Evolution de la largeur moyenne des cordons en fonction de la vitesse de déplacement.

La hauteur moyenne des cordons évolue de manière moins régulière lorsque la puissance moyenne estimée augmente, à vitesse de déplacement constante (Figure 3.1.4). Pour des vitesses supérieures à 1200 mm/min, la hauteur moyenne augmente avec la puissance moyenne, avec cependant des hauteurs très proches pour les cordons obtenus avec les points de fonctionnement 7 et 8. Cette accroissement simultané de la hauteur et de la largeur des cordons mesurées est conforme à l'augmentation de la vitesse de fusion du fil associée à l'augmentation de la puissance moyenne (Tableau 3.1.1), qui doit conduire à la formation de dépôts de plus grand volume. Pour des vitesses d'avance inférieures à 800 mm/min en revanche, la hauteur moyenne des cordons pour une même vitesse de déplacement augmente entre les points de fonctionnement 5 et 7, puis se stabilise ensuite, la hauteur moyenne étant sensiblement la même pour les points 7 à 10. Cela se traduit par une forte augmentation du ratio entre la largeur moyenne et la hauteur moyenne aux faibles vitesses de déplacement pour les puissances moyennes les plus élevées (Figure 3.1.6). Ce ratio demeure en effet proche de 1,5 pour la plupart des cordons obtenus avec les différents points de fonctionnement et vitesses d'avance, hormis pour les points 9 et surtout 10, où le ratio dépasse 2,5.

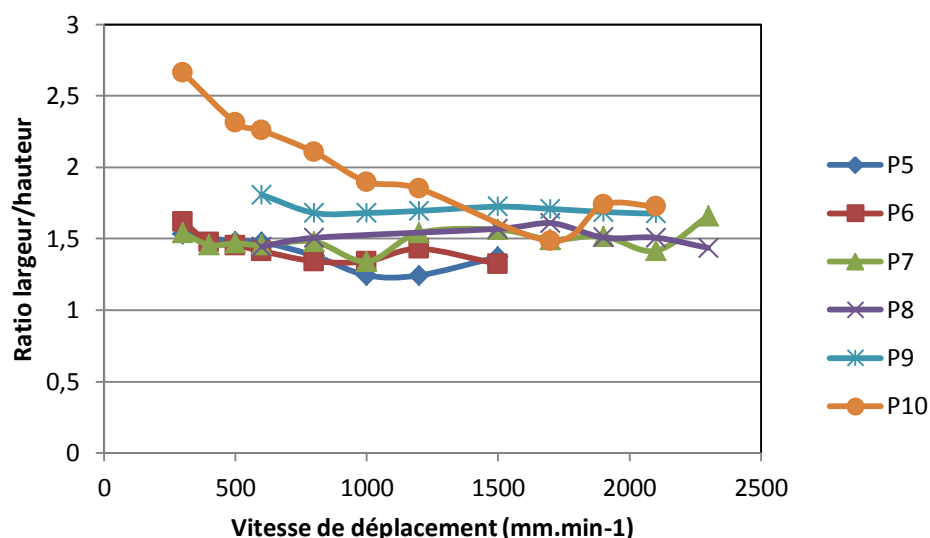
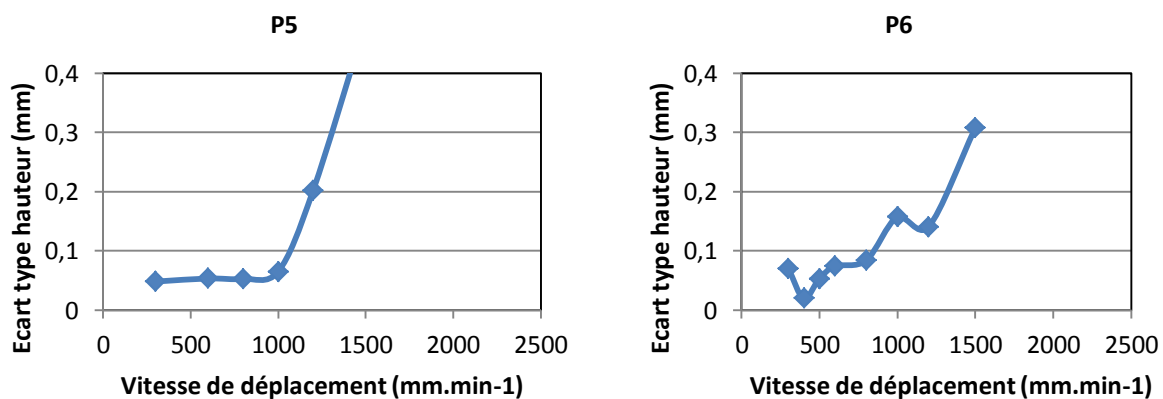


Figure 3.1.6 Evolution du ratio entre la largeur et la hauteur moyennes des cordons en fonction de la vitesse de déplacement.

Ce résultat s'explique par un meilleur mouillage du métal déposé sur le substrat lorsque les énergies linéiques augmentent (puissance moyenne élevée et vitesse de déplacement faible). En effet, l'apport de chaleur supplémentaire augmente l'échauffement du substrat, voire sa fusion, ce qui favorise le mouillage du métal déposé, en retardant la solidification de la ligne de contact, ou ligne triple solide-liquide-gaz, phénomène stoppant, dès qu'il se produit, l'étalement du liquide sur le substrat solide.

Si l'on s'intéresse maintenant à la régularité géométrique des cordons déposés, on peut constater que les écarts types pour la largeur et la hauteur (Figure 3.1.7) sont généralement très faibles, ce qui confirme la bonne régularité des cordons. Les écarts types pour la hauteur sont inférieurs à 0,1 mm pour tous les points de fonctionnement, sauf pour les vitesses élevées, pour lesquelles ils augmentent brutalement. Cette augmentation s'explique par l'apparition du phénomène de humping, qui produit de fortes variations de la hauteur des cordons avec la formation des « humps » et des « valleys ».



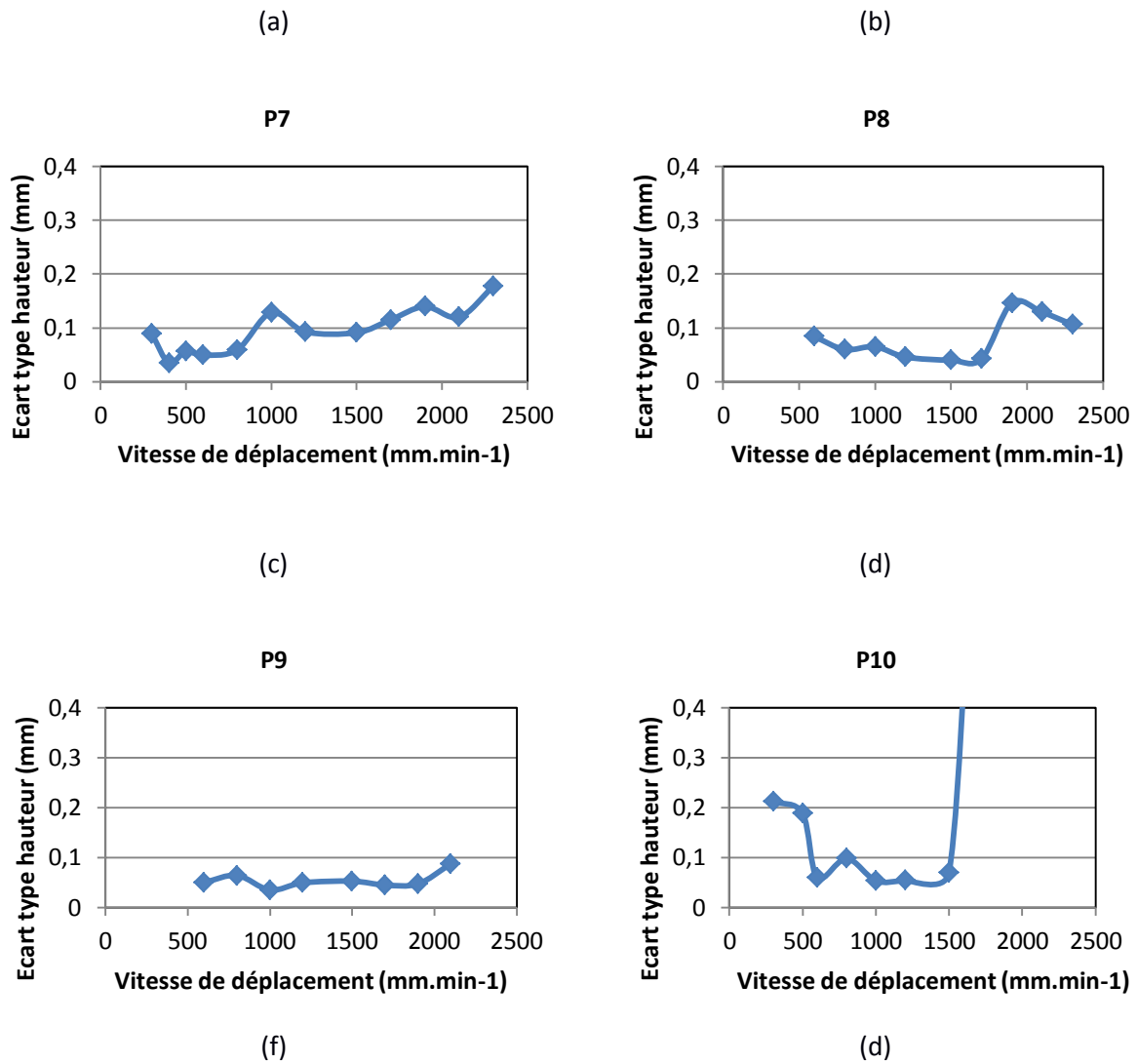


Figure 3.1.7 Evolution de l'écart type de la hauteur des cordons pour chaque point de fonctionnement en fonction de la vitesse de déplacement.

3.1.4. Taux de dépôt

Afin de déterminer le taux de dépôt, c'est-à-dire la masse de métal déposée par unité de temps, associé aux différents points de fonctionnement testés, un cordon de longueur 80 mm réalisé avec chaque point a été déposé à la vitesse de 500 mm/min sur une tôle d'acier d'épaisseur 3 mm, de dimensions 100 x 40 mm. Le poids de la tôle éprouvette est mesuré avant et après essai en utilisant une balance analytique Ohaus possédant une précision de 10^{-3} g pour en déduire le poids de métal déposé et le taux de dépôt, calculé selon la relation suivante :

$$\bar{T}_D = (W_2 - W_1)/t_w \quad (3.1.1)$$

Où, $\bar{T}_D$ est le taux moyen de dépôt, W_1 est le poids de la tôle avant dépôt, W_2 est le poids de la tôle après dépôt, et t_w est la durée du dépôt.

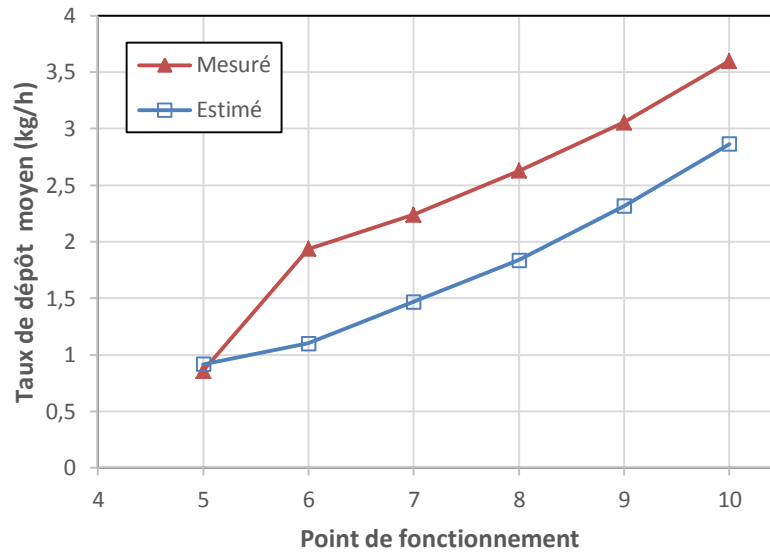


Figure 3.1.8 Taux de dépôt moyens mesurés et estimés pour les différents points de fonctionnement testés, pour une vitesse de déplacement de 500 mm/min.

Comme attendu, le taux de dépôt moyen mesuré par pesée augmente avec le numéro du point de fonctionnement, ce qui est conforme à l'augmentation de puissance moyenne et de vitesse de fusion de fil attendues (cf. Tableau 3.1.1). Si l'on calcule le taux de dépôt à partir de la vitesse de fusion du fil donnée dans le Tableau 3.1.1, en considérant une masse volumique de l'acier de 7800 kg/m^3 , les résultats sont bien inférieurs aux valeurs issues des mesures, hormis pour le point 5, pour lequel les valeurs sont très proches. Ce résultat confirme que les valeurs de puissances moyennes et de vitesses de fusion du fil données dans le Tableau 3.1.1 ne sont qu'indicatives, les valeurs réelles pouvant s'en éloigner significativement.

3.2. Réduction des défauts en début de cordons

Les caractéristiques géométriques de cordons données dans la partie précédente correspondent aux mesures des dimensions dans la partie centrale des cordons, dans laquelle le régime thermique est supposé quasi-stationnaire. Les extrémités des cordons, et en particulier les débuts de cordon, présentent des géométries un peu différentes, qui peuvent constituer des défauts rédhibitoires pour la fabrication de pièces mécaniques par cette technologie, car ces défauts risquent de s'amplifier avec la superposition des cordons. Le défaut se manifeste par une accumulation excessive de matière au début du cordon, qui forme une « macro-goutte » reliée au reste du cordon par un capillaire plus ou moins étroit (Figure 3.2.1), et peut s'apparenter au phénomène de « humping » déjà cité.

3.2.1. Analyse du défaut

Ces défauts en début de cordon semblent liés au régime thermique transitoire observé en début de cordon, la tôle substrat étant trop froide pour permettre un bon mouillage du cordon.

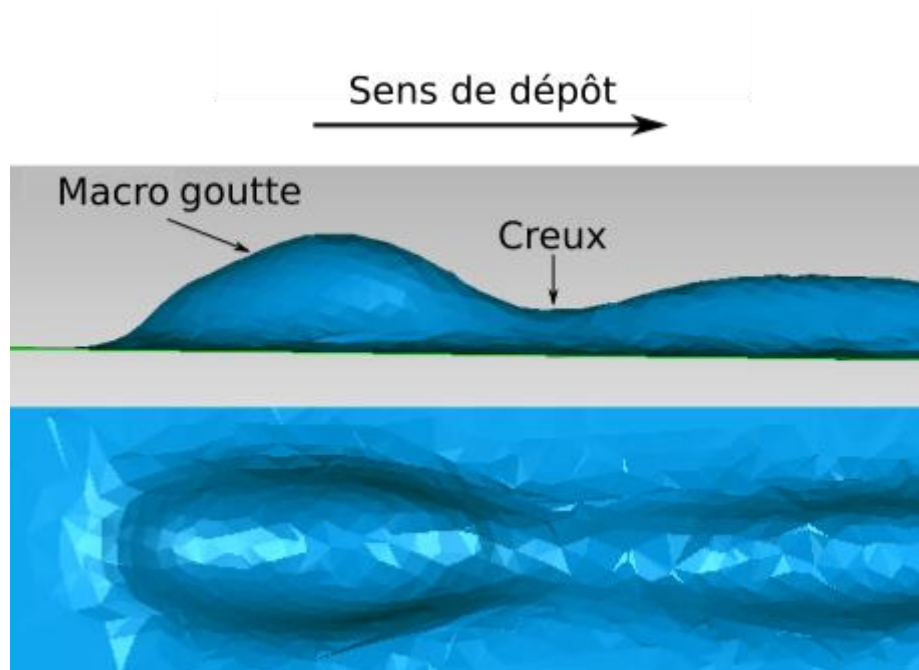


Figure 3.2.1 Accumulation de matière en début de cordon formant une « macro-goutte » suivie d'un « creux »

L'angle de mouillage dans le plan transversale au cordon au niveau de la macro goutte est en effet très élevé, parfois supérieure à 90° , en particulier pour les cordons réalisés avec les points de fonctionnement 5, 6 et 7, lorsque la vitesse de déplacement dépasse 600 mm/min, pour lesquels l'énergie linéique est la plus faible, et le défaut est alors plus marqué (Figure 3.2.2). Pour les autres points de fonctionnement, le défaut apparait pour des vitesses plus élevées.

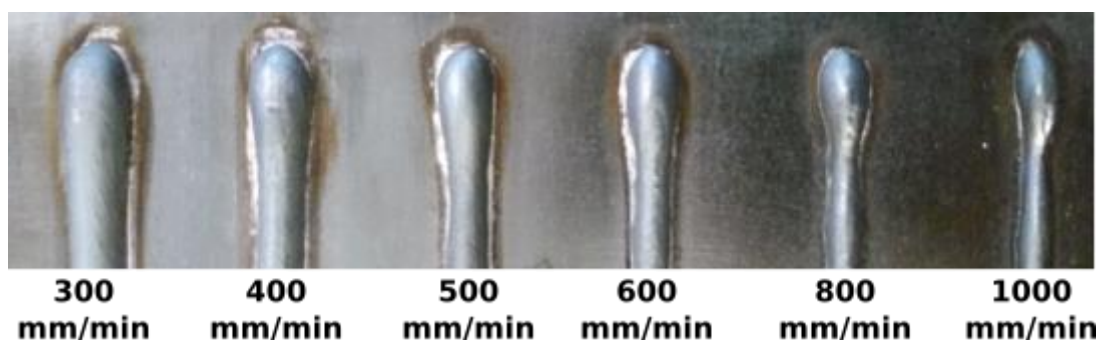


Figure 3.2.2 Influence de la vitesse de déplacement sur le défaut formé en début de cordon (point de fonctionnement 7).

Le défaut paraît donc directement lié à l'énergie linéique apportée. Lorsque celle-ci est insuffisante, la ligne de contact, ou ligne triple solide-liquide-gaz, se solidifie au contact de la tôle substrat avant que la goutte liquide n'ait atteint l'angle de mouillage d'équilibre, comme l'ont signalé certains auteurs [146], [147]. Cet « arrêt » de la ligne de contact peut alors produire des angles de mouillage supérieurs à 90° , ce qui fait que l'apport de nouvelles gouttelettes déposées, en faisant croître la hauteur de la macro-goutte formée, augmente le rayon moyen de celle-ci (Figure 3.2.3 b).

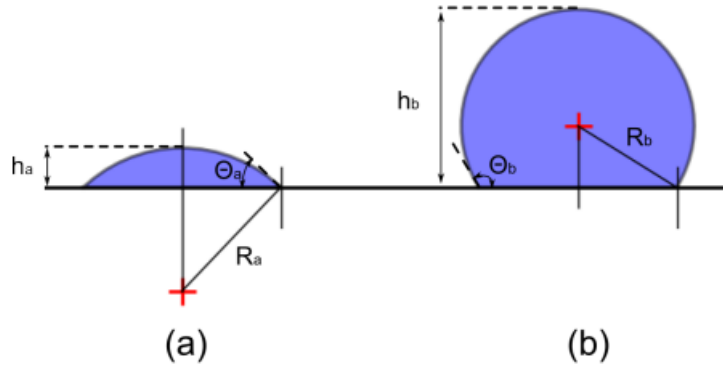


Figure 3.2.3 Géométries simplifiées de macro-goutte, (a) pour un angle de mouillage inférieur à 90°, et (b) pour un angle de mouillage supérieur à 90°

Selon l'équation de Laplace (équ. (3.2.1), cette augmentation du rayon produit une diminution de la pression interne de la macro-goutte. Ce phénomène physique produit des écoulements de fluide depuis les zones où le rayon est plus faible, et donc les pressions plus élevées, vers les zones où le rayon de courbure est plus important.

$$\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right) \quad (3.2.1)$$

Avec Δp la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la goutte, γ la tension de surface liquide/gaz, et R et R' les rayons de courbure de la surface de la goutte.

Lorsque le mouillage du dépôt s'améliore sous l'effet de l'accumulation de chaleur dans le substrat, l'angle de mouillage devient inférieur à 90°, et une augmentation de la hauteur du dépôt avec l'arrivée de nouvelles gouttelettes crée une diminution du rayon de courbure, (Figure 3.2.3 a), et donc une augmentation de la pression interne. Le liquide aura donc tendance à migrer vers l'arrière, accroissant encore la hauteur de la macro-goutte, et formant un creux dans le cordon.

Dans la suite, nous allons tenter de réduire ce défaut en optimisant le cycle d'amorçage du procédé CMT.

3.2.2. Analyse des paramètres du cycle d'amorçage

Le cycle d'amorçage du procédé CMT est contrôlé par deux paramètres caractéristiques de la loi synergique, le courant d'amorçage I_{ignition} et la durée d'amorçage t_{ignition} (cf. Tableau 3.1.1). Ces paramètres permettent de modifier l'énergie apportée pendant les premiers instants avant et pendant le dépôt de la/les premières gouttelettes de métal fondu.

La Figure 3.2.4 montre la forme des signaux d'intensité et de tension au cours du cycle d'amorçage. On peut voir sur cette figure que la tension passe d'une valeur initiale de 30 V à presque 0 V, lorsque le fil entre en contact avec le substrat. L'intensité augmente alors de façon linéaire jusqu'à la valeur de consigne I_{ignition} produisant par effet joule un échauffement du fil. Le fil électrode commence alors son retrait, et l'arc électrique s'amorce, ce qui se traduit par une augmentation de la tension mesurée. La durée de cette première phase d'arc est contrôlée par le second paramètre d'amorçage

t_{ignition} . Cette phase produit la formation d'une gouttelette de métal liquide à l'extrémité du fil, de volume d'autant plus grand que les paramètres I_{ignition} et t_{ignition} sont élevés. Une fois le temps t_{ignition} écoulé, l'intensité diminue jusqu'à une valeur d'un peu moins de 50 A qui n'est pas modifiable, et le fil électrode descend jusqu'à entrer en court-circuit, déposant la première gouttelette de métal fondu sur le substrat. Notons que les premiers court-circuit s'effectuent sous des courants variables, le cycle de transfert CMT « stabilisé » ne démarrant qu'après quelques cycles.

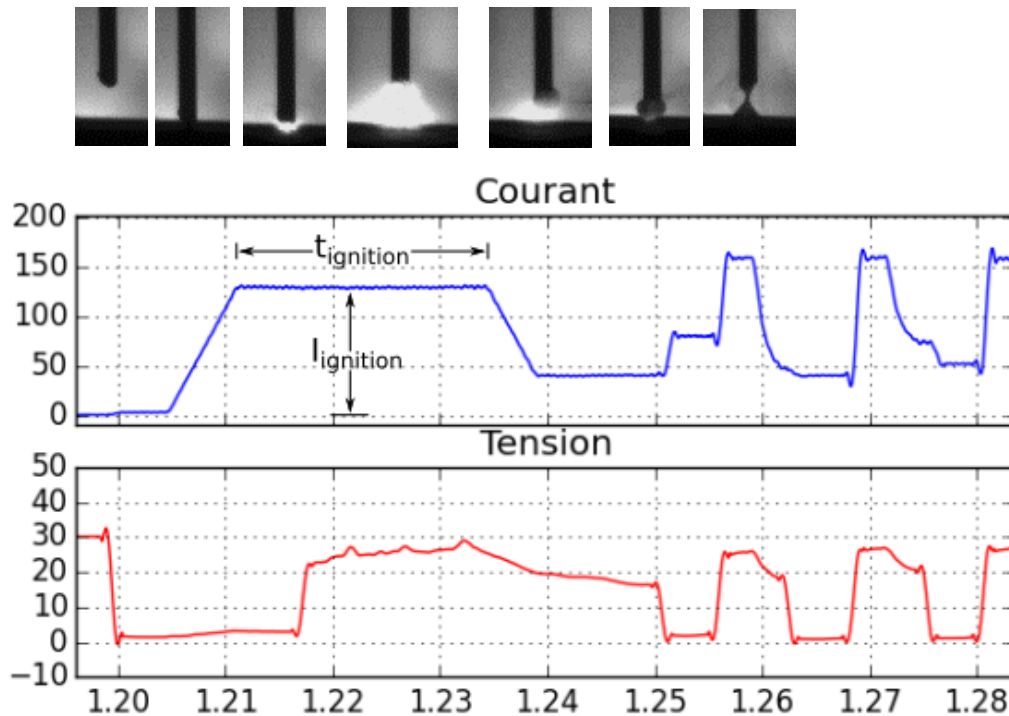


Figure 3.2.4 Cycle d'amorçage caractéristique du procédé CMT montrant les deux paramètres réglables I_{ignition} et t_{ignition} (point de fonctionnement 7)

3.2.3. Influence des paramètres du cycle d'amorçage

Les paramètres du cycle d'amorçage ont été modifiés en utilisant le point de fonctionnement 7, et en conservant une vitesse de déplacement de 600 mm/min.

3.1.1.1.1. Influence du courant d'amorçage I_{ignition}

La Figure 3.2.5 montre les cordons obtenus en faisant varier le courant d'amorçage entre les valeurs de 80 A et 300 A, en maintenant une durée de la phase d'amorçage de 10 ms. On peut observer que le « creux » diminue en augmentant le courant d'amorçage, mais l'accumulation de matière formant la macro-goutte est toujours présente.

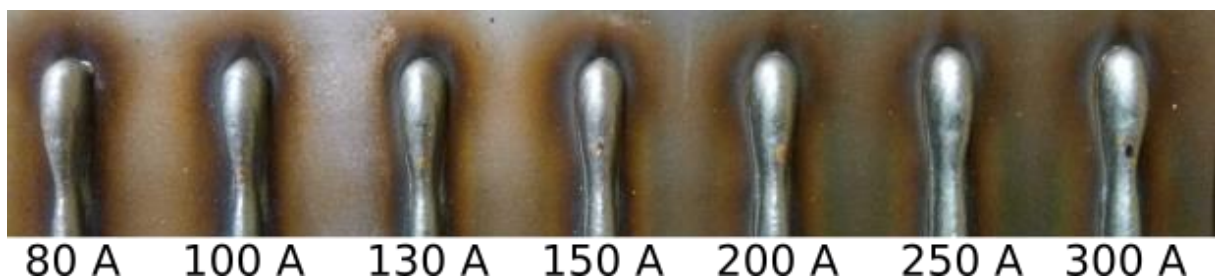


Figure 3.2.5 Evolution de la géométrie du début de cordon en fonction de la valeur du courant d'amorçage.

Le critère sélectionné pour évaluer l'influence des paramètres d'amorçage sur la géométrie du début du cordon consiste à mesurer la différence entre la hauteur et la largeur maximales de la macro-goutte et la hauteur et la largeur moyennes du reste du cordon, et la différence entre la hauteur et la largeur minimales du capillaire, et la hauteur et la largeur moyennes du reste du cordon (équations (3.2.2) à (3.2.5)).

$$\Delta H_{maxi} = H_{maxi} - \bar{H}_{cordon} \quad (3.2.2)$$

$$\Delta L_{maxi} = L_{maxi} - \bar{L}_{cordon} \quad (3.2.3)$$

$$\Delta H_{mini} = H_{mini} - \bar{H}_{cordon} \quad (3.2.4)$$

$$\Delta L_{mini} = L_{mini} - \bar{L}_{cordon} \quad (3.2.5)$$

La Figure 3.2.6 montre que la différence de hauteur maximale diminue légèrement avec l'augmentation du paramètre $I_{ignition}$, ce qui indique une atténuation du défaut géométrique, qui demeure cependant important. En revanche, la différence de largeur entre la macro-goutte et le cordon a tendance à augmenter légèrement.

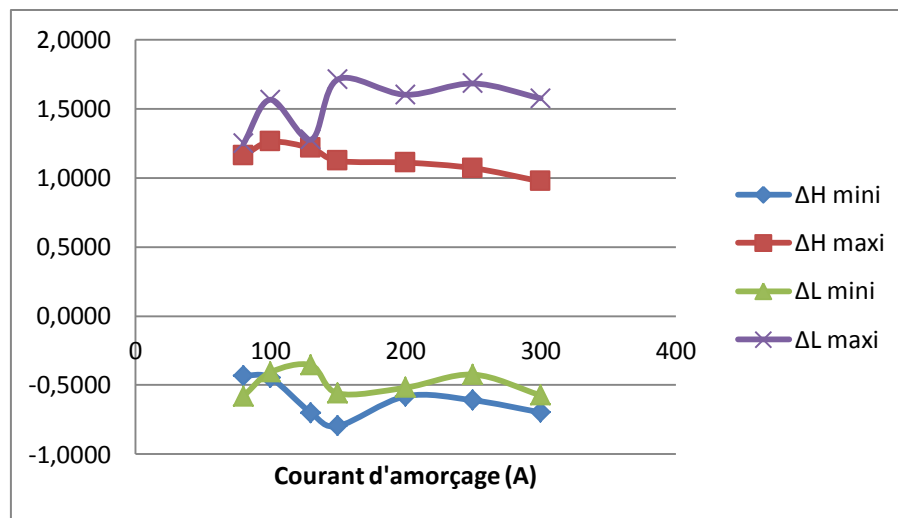


Figure 3.2.6 Différences de hauteur et de largeur maximales et minimales entre le début et le reste du cordon, en fonction du courant d'amorçage.

.3.1.1.1.2. Influence de la durée du courant d'amorçage

La Figure 3.2.7 montre l'aspect des cordons obtenus en maintenant la valeur par défaut du courant d'amorçage (130 A), et en faisant varier sa durée entre 5 et 50 ms. On constate que l'augmentation de la durée d'amorçage atténue le défaut en début de cordon, en diminuant en particulier fortement la réduction de section dans la zone du « creux » formé après la macro-goutte.

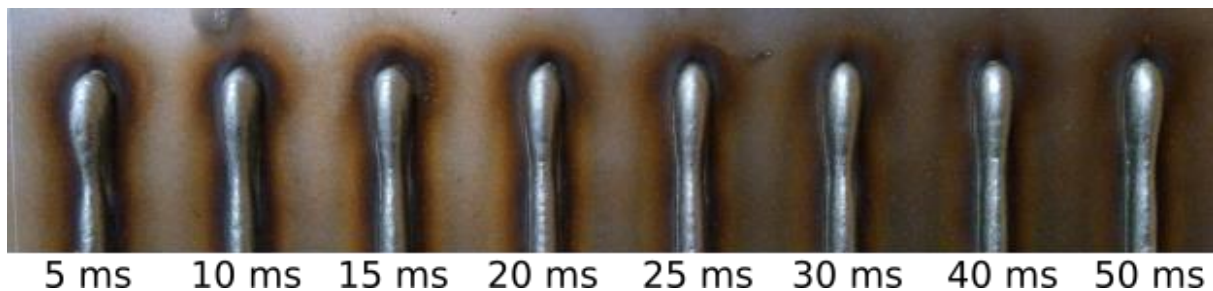


Figure 3.2.7 Evolution de la géométrie du début de cordon en fonction de la valeur de la durée du courant d'amorçage.

La Figure 3.2.8 confirme ce résultat, montrant que les écarts de largeur et de hauteur entre le début et le reste du cordon sont réduits avec l'augmentation de la durée de la phase d'amorçage.

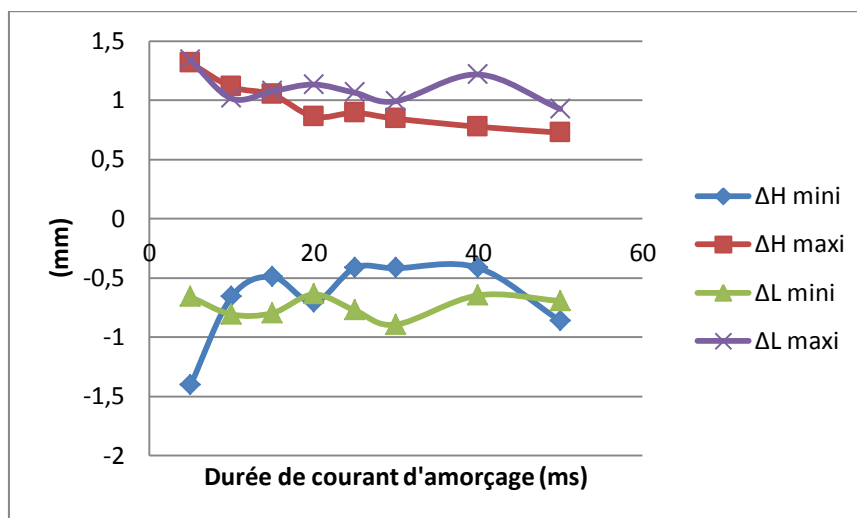


Figure 3.2.8 Différences de hauteur et de largeur maximales et minimales entre le début et le reste du cordon, en fonction de la durée du courant d'amorçage.

Cette amélioration pourrait être due à la formation d'une gouttelette de plus gros volume avant le premier court-circuit, qui produit un échauffement et une fusion plus importants du substrat au cours de ce premier court-circuit, retardant ainsi la solidification de la ligne de contact, ce qui permet un meilleur mouillage de la gouttelette sur le substrat.

3.2.4. Influence du mode « 2-temps spécial »

Il existe sur le procédé CMT un mode particulier, appelé « 2 temps spécial », qui permet de générer pendant les phases d'amorçage et d'extinction de l'arc électrique des intensités différentes du cycle de transfert « normal » du CMT. Ce mode spécial comprend 6 paramètres supplémentaires contrôlant les phases d'amorçage et d'arrêt du dépôt (Figure 3.2.9).

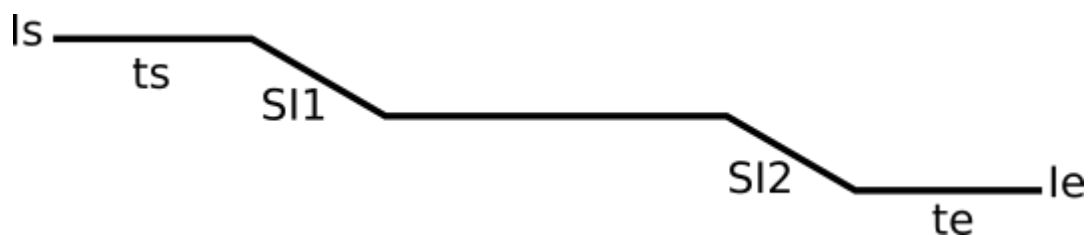


Figure 3.2.9 Description des paramètres du mode CMT « 2-temps spécial ».

La Figure 3.2.9 décrit ces 6 paramètres.

Le paramètre I_s permet de modifier le courant des phases du cycle CMT pendant les premiers cycles de transfert, et s'exprime par un pourcentage relatif aux intensités du cycle CMT « normal ».

Le paramètre t_s correspond à la durée pendant laquelle les valeurs des intensités sont modifiées au début du dépôt.

Le paramètre $S/1$ permet de régler la variation des intensités à la fin de la phase de démarrage pour retrouver les valeurs d'intensité « normales » du cycle CMT.

Les paramètres $S/2$, I_e et t_e permettent de la même façon de régler les caractéristiques de la phase finale d'un dépôt.

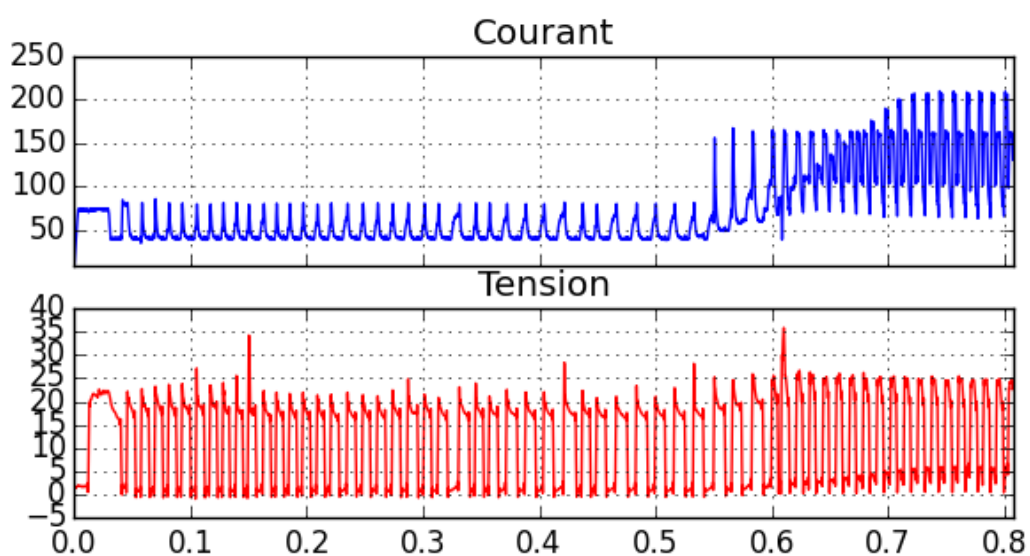
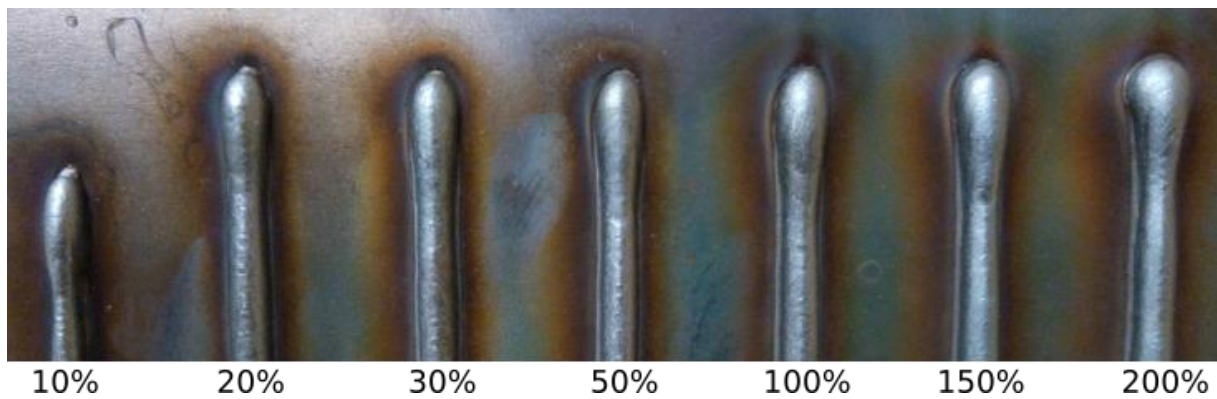


Figure 3.2.10 Forme d'onde caractéristique de la phase de démarrage avec le mode « 2-temps spécial » ($I_s = 20\%$, $t_s = 0,5$ s).

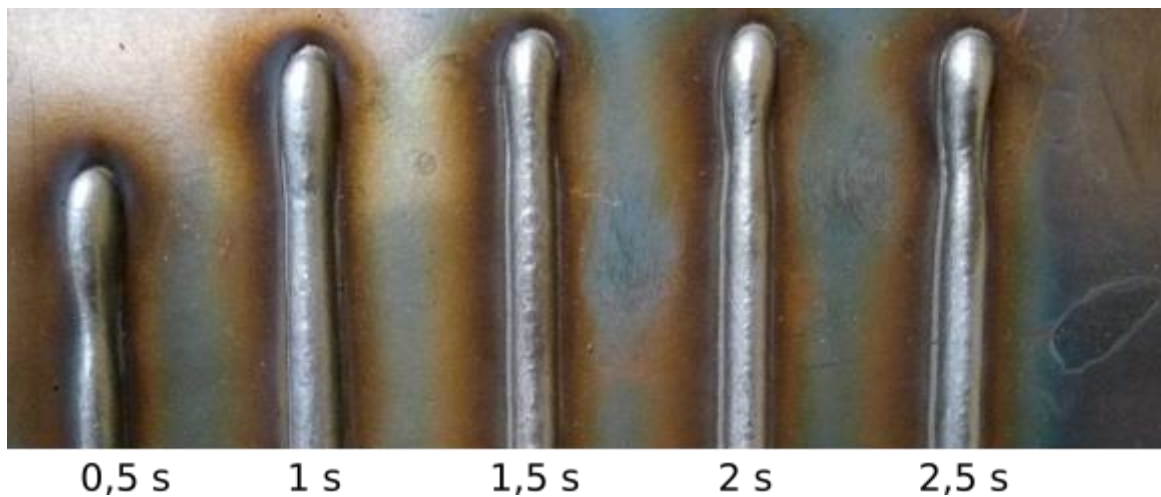
Afin de tenter d'atténuer le défaut observé au début du cordon, les 2 paramètres correspondant à l'étape d'amorçage I_s et t_s ont été modifiés. Les essais sont également réalisés à partir des paramètres de cycle correspondant au point de fonctionnement 7, à la vitesse d'avance de 600 mm/min.

La Figure 3.2.11a montre l'aspect des cordons obtenus en faisant varier le paramètre I_s entre 10 et 200%, pour une valeur de t_s de 0,5 s. L'accumulation de matière au début du cordon augmente logiquement avec la valeur du paramètre I_s , les intensités plus élevées en début de cordon augmentant le taux de dépôt. Le creux séparant la macro-goutte du reste du cordon semble en revanche atténué, même pour des valeurs du paramètre I_s inférieures à 100%, qui correspondent alors à des intensités plus faibles que celles du cycle CMT normal. Ce résultat peut s'expliquer par des durées plus longues des phases d'arc pendant le cycle de démarrage du mode 2 temps spécial (Figure 3.2.10). Ces durées sont en effet de plus de 10 ms pendant le cycle d'amorçage contre environ 5 ms durant le cycle normal de dépôt, ce qui permet, malgré des intensités plus faibles, de produire un échauffement plus important du fil sous l'effet de la chaleur de condensation des électrons pendant les phases d'arc, et de former des gouttelettes de plus gros volume et/ou de température plus élevée

qui mouillent mieux le substrat. C'est probablement ce qui explique le volume de matière déposée en apparence plus important en début de cordon, même lorsque les intensités sont plus faibles ($I_s < 100\%$).



(a)



(b)

Figure 3.2.11 Aspect des cordons réalisés avec l'option 2 temps spécial, (a) en fonction de la valeur du paramètre I_s (avec $t_s = 0,5$ s), et (b) en fonction de la valeur du paramètre t_s (avec $I_s = 20\%$)

La mesure des écarts de largeur et de hauteur entre la macro-goutte et la partie régulière du cordon confirme cette interprétation, montrant que la largeur et la hauteur de la macro-goutte demeurent plus importantes que celles du reste du cordon, même pour des valeurs de I_s inférieures à 100% (Figure 3.2.12).

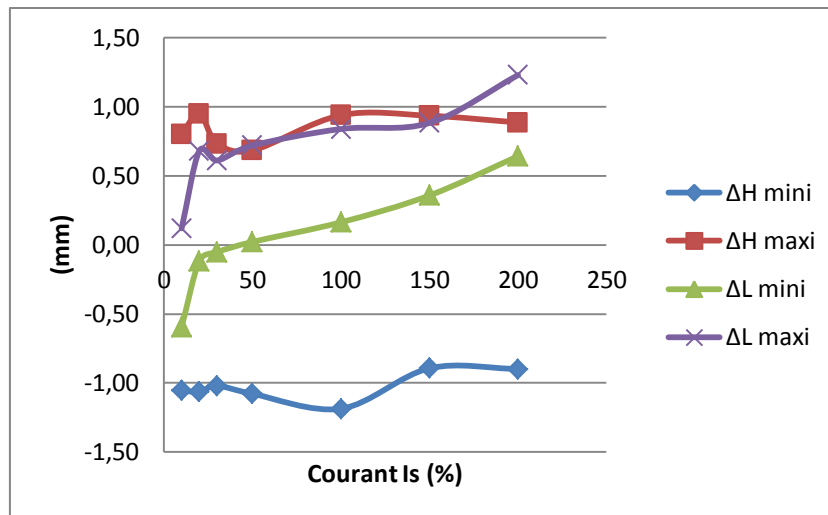


Figure 3.2.12 Différences de hauteur et de largeur maximales et minimales entre le début et le reste du cordon, en fonction de la valeur du paramètre I_s .

La Figure 3.2.11b montre l'aspect des cordons obtenus en faisant varier la durée t_s entre 0,5 et 2,5 s, pour une valeur du paramètre I_s fixée à 20%. On peut voir que l'accumulation de matière en début de cordon diminue un peu, sans que le « creux » reliant le début au reste du cordon ne disparaisse totalement. Le manque de matière semble même s'accroître pour les durées t_s supérieures à 1,5 s, ce qui semble montrer que le paramètre I_s contrôlant les niveaux d'intensité en début de cordon est trop faible pour produire un échauffement, et donc un volume de métal fondu et déposé suffisants pour réduire le défaut.

D'autres essais ont alors été réalisés en augmentant un peu le paramètre I_s , mais en gardant une durée t_s égale à 1s. L'aspect des cordons montre que le défaut a presque disparu lorsque le paramètre I_s est réglé à 50% (Figure 3.2.13). Ce résultat est confirmé par la mesure des écarts de largeur entre les dimensions du début du cordon et du cordon dans sa partie régulière, qui montrent des écarts de moins de 0,4 mm (Figure 3.2.14). L'augmentation de hauteur dans la macro-goutte est aussi réduite, avec un écart maximal à 0,4mm par rapport à la partie régulière du cordon. En revanche, le « creux » est toujours observé entre le cordon régulier et la macro-goutte avec une diminution de hauteur de plus de 1mm par rapport au reste du cordon.

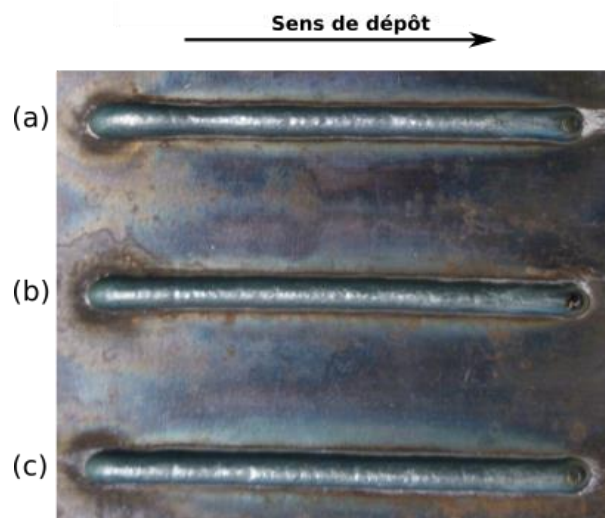


Figure 3.2.13 Aspect des cordons réalisés avec le mode « 2 temps spécial », avec les paramètres (a) $I_s = 70\%$ et $t_s = 1$ s, (b) $I_s = 60\%$ et $t_s = 1$ s, (c) $I_s = 50\%$ et $t_s = 1$ s.

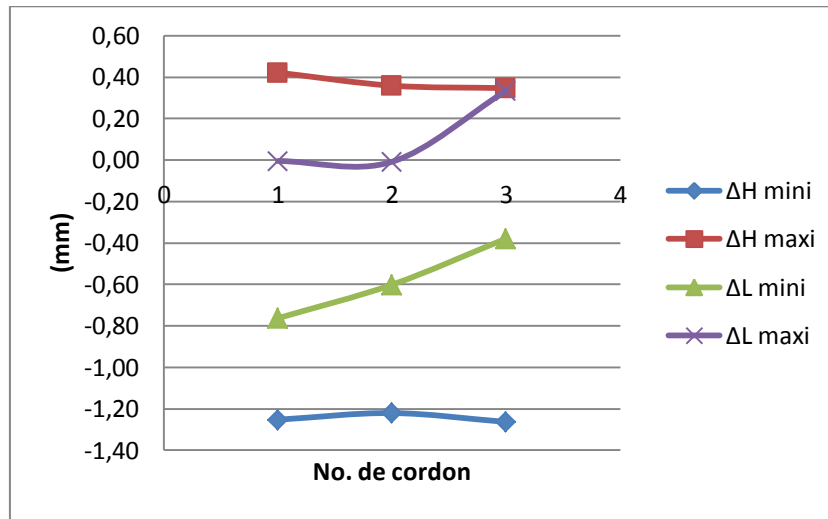


Figure 3.2.14 Différences de hauteur et de largeur maximales et minimales entre le début et le reste du cordon, en fonction des paramètres de démarrage I_s et t_s .

3.3. Analyse énergétique des différentes phases du cycle CMT

Afin de mieux comprendre l'effet des différents paramètres contrôlant la forme des signaux de tension et d'intensité sur les phénomènes de transfert de chaleur et de matière avec le procédé CMT, une analyse des caractéristiques des différentes phases du cycle de transfert, et en particulier des énergies produites lors de chacune de ces phases, est menée.

3.3.1. Analyse du cycle de transfert du procédé CMT

Dans un premier temps, les différentes phases du cycle de transfert ont été analysées de manière qualitative, en utilisant une caméra rapide pour visualiser la fusion de l'extrémité du fil d'acier et le transfert des gouttelettes liquides et leur dilution dans le bain liquide déjà formé sur le substrat. La technique d'ombroscopie employée pour réaliser ces observations a été décrite dans le chapitre 2. La Figure 3.3.1 montre les formes d'ondes de l'intensité et de la tension correspondant au point de fonctionnement 7 de la loi synergique C1360, et les images extraites des enregistrements par caméra rapide.

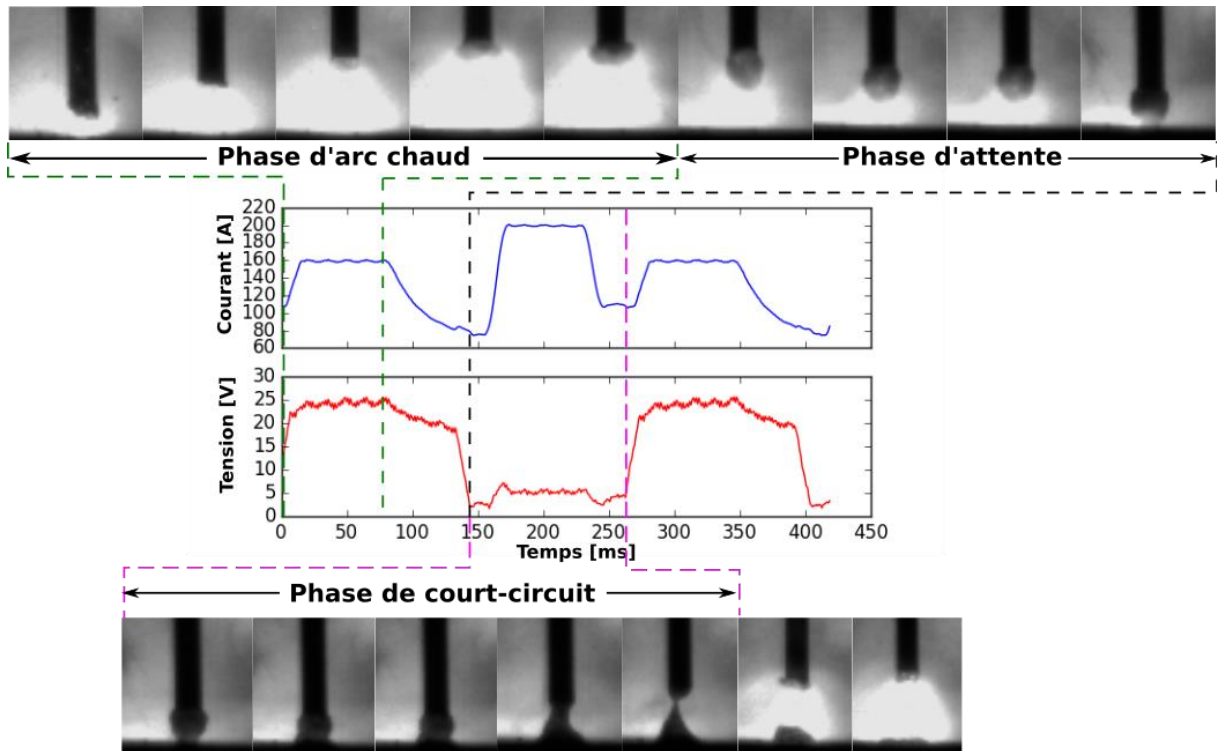


Figure 3.3.1 Formes d'ondes du courant et de la tension caractéristiques d'un cycle de transfert en CMT (point de fonctionnement 7 de la loi synergique C1360), et images extraites des enregistrements par caméra rapide montrant les phénomènes de fusion et de transfert de matière.

Comme cela a été expliqué dans le chapitre 2, le cycle de transfert de métal en CMT est composé de trois phases: la phase d'arc chaud, ou phase « boost », la phase d'arc froid, ou d'attente (wait), et la phase de court-circuit.

Au début de la phase boost, l'arc se réamorçage lors de la rupture du court-circuit, et le courant augmente jusqu'à la valeur de consigne I_{Boost} (160 A pour le point 7). On peut voir sur la Figure 3.3.1 que l'augmentation du courant est quasiment linéaire, et est contrôlée principalement par la vitesse de variation du courant d_{boostup} (500 A/ms). Le paramètre d'augmentation non linéaire du courant τ_{boostup} est ici fixé à une valeur très faible, de 0,1 ms, ce qui explique la variation quasi-linéaire du courant. Après le réamorçage de l'arc électrique, le fil électrode poursuit sa remontée. L'unité de commande du processeur déclenche alors le ralentissement de la remontée du fil, qui se stabilise rapidement, comme le montrent les images de caméra rapide. Durant la phase de boost, l'intensité élevée de l'arc produit la formation d'une gouttelette de métal liquide à l'extrémité du fil électrode, qui s'échauffe sous l'effet de la chaleur de condensation des électrons. Une fois que la durée de la phase boost, définie par le paramètre procédé t_{Boost} , est atteinte, le fil électrode amorce sa descente vers le substrat et le dépôt déjà formé, et l'intensité commence à diminuer.

La phase d'arc froid démarre au moment où le courant commence à diminuer, jusqu'à la valeur de consigne $I_{\text{sc_wait}}$, ce qui correspond aussi sensiblement au moment où le fil électrode amorce sa descente, pour atteindre la vitesse de consigne $V_{\text{d_sc_wait}}$. La variation du courant après la phase boost est plus lente et moins linéaire que lors de la montée en début de phase boost, la vitesse de descente du courant $d_{\text{Boost_down}}$ étant plus faible (300 A/ms) et la durée de la variation non linéaire $\tau_{\text{Boostdown}}$ plus élevée (1 ms). De ce fait, l'intensité de consigne de la phase d'arc froid n'est

atteinte qu'à la fin de cette phase pour le point 7, peu avant que le fil électrode n'entre en contact avec le dépôt liquide déjà formé.

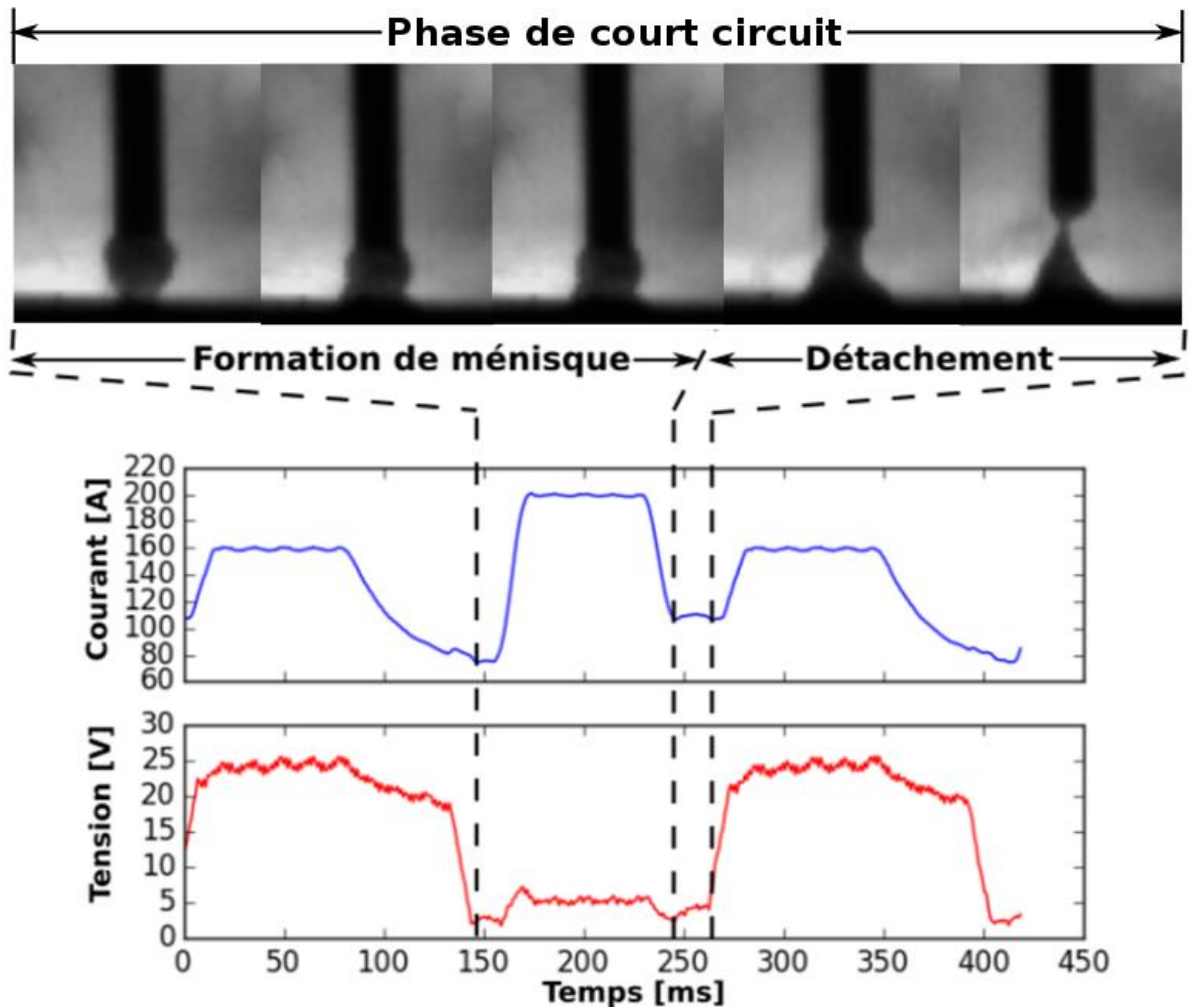


Figure 3.3.2 Formation et évolution du diamètre du ménisque formé durant la phase de court-circuit.

Ce contact correspond au début de la phase de court-circuit. L'arc électrique s'éteint alors, et la gouttelette formée à l'extrémité du fil électrode se mélange au bain liquide déjà formé. Sous l'effet de la gravité, mais surtout pour minimiser les tensions de surface, la goutte s'étale dans le bain liquide, mais reste accrochée au fil électrode par un ménisque. Au moment du contact entre la goutte et le bain liquide, la tension chute brutalement du fait de l'extinction de l'arc, et la vitesse de descente du fil diminue rapidement. Puis le fil électrode commence sa remontée, produisant une réduction de la section du ménisque reliant le bain liquide au fil, qui finit par se rompre, produisant le réamorçage de l'arc électrique. Au début de la phase de court-circuit, le courant devrait varier pour atteindre la valeur de consigne I_{sc2} . Dans le cas du point de fonctionnement 7 cependant, le courant augmente jusqu'à la valeur de 200 A, qui ne correspond pas à la consigne du point 7, qui est de 110 A seulement. Cette valeur de consigne n'est finalement atteinte qu'à la fin de la phase de court-circuit, peu avant le réamorçage de l'arc électrique. Ce pic de courant, qui a été rajouté au cycle de transfert CMT classique dans la loi synergique utilisée, doit accélérer la rupture du ménisque par l'augmentation des forces de Lorentz produisant un effet de « pincement » sur la partie la plus étroite du pont liquide, comme le montre la Figure 3.3.2. Les paramètres contrôlant ce pic de courant (intensité et durée du pic) ne sont cependant pas accessibles à travers la commande permettant de

modifier les paramètres du cycle de transfert, contrairement à tous les autres paramètres qui ont été décrits dans le chapitre 2.

3.3.2. Méthodologie de découpage des 3 phases du cycle CMT

Afin d'analyser plus précisément les caractéristiques de chacune des phases du cycle CMT, en particulier les puissances et énergies délivrées lors de chaque phase, ainsi que leurs durées respectives, les signaux électriques enregistrés ont été post-traités pour séparer les trois phases du cycle décrites dans le paragraphe précédent.

Les signaux de tension et intensité ont d'abord été filtrés à l'aide d'un filtre passe haut numérique pour éliminer les signaux parasites et obtenir un signal de bonne qualité. Ensuite, chaque point des signaux filtrés correspondant à l'évolution en fonction du temps de l'intensité et de la tension, est classé dans l'une des trois phases du cycle CMT à l'aide d'un script développé en langage de programmation Python, à partir de limites fixées en fonction de l'évolution des valeurs de tension et intensité enregistrées. La Figure 3.3.3 montre les limites choisies pour délimiter les différentes phases du cycle CMT.

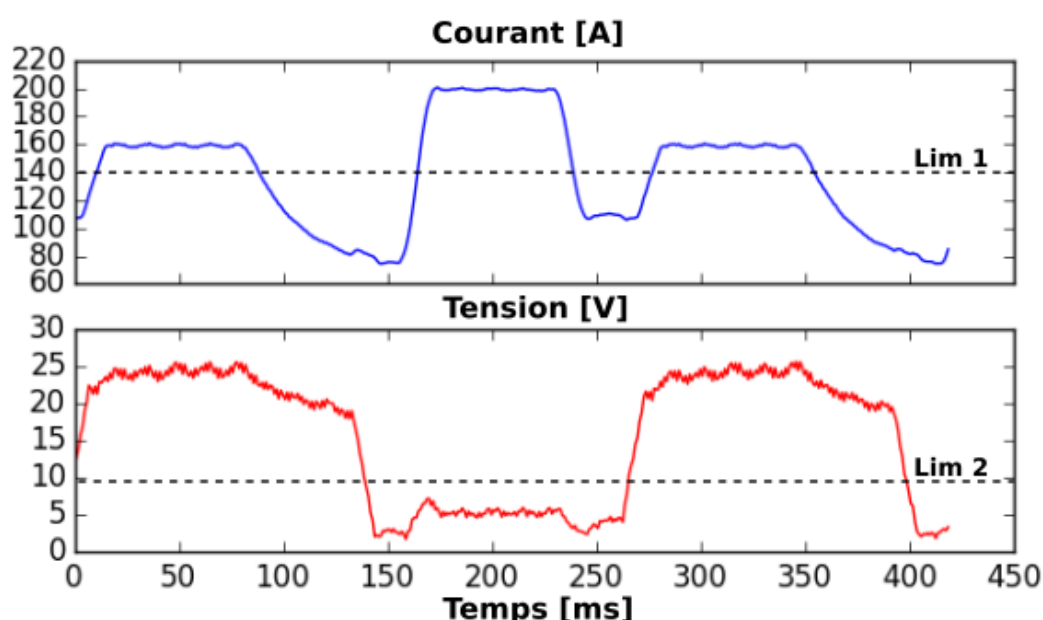


Figure 3.3.3 Formes d'ondes du courant et de la tension filtrée numériquement, et limites choisies pour délimiter les trois phases du cycle CMT.

Chaque pas de temps de l'enregistrement des signaux d'intensité et de tension est ainsi classé, en fonction des valeurs d'intensité et/ou de tension qui lui sont associées, dans l'une des trois phases du cycle CMT, caractérisées par les conditions rassemblées dans le Tableau 3.3.1.

Phase	Conditions à respecter
Arc chaud	Valeur de courant $[C] > \text{Lim 1}$ et valeur de tension $[T] > \text{Lim 2}$
Arc froid	Valeur de courant $[C] < \text{Lim 1}$ et valeur de tension $[T] > \text{Lim 2}$

Court-circuit	Valeur de tension $[T] < \text{Lim } 2$
---------------	---

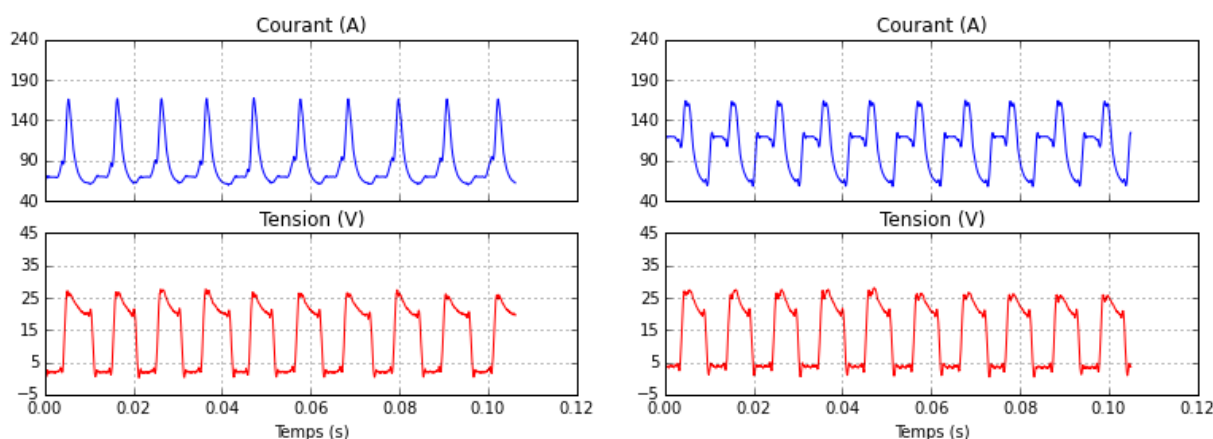
Tableau 3.3.1 Conditions établies pour séparer les trois phases du cycle en fonction des valeurs de tension et d'intensité

Le nombre de changements d'une phase à l'autre est également comptabilisé, de manière à calculer le nombre total de cycles, et ainsi le nombre total de court-circuit correspondant à un cordon donné.

Ce traitement du signal va nous permettre de calculer les intensités, tensions et puissances moyennes de chaque phase du cycle CMT, ainsi que leurs durées, et donc les énergies moyennes produites lors de chaque phase, mais aussi la régularité le long d'un cordon de ces grandeurs, à travers les écarts types, qui fournit une indication sur la stabilité du transfert CMT pour le point de fonctionnement de la loi synergique analysé.

3.3.3. Comparaison des formes d'onde correspondant aux différents points de fonctionnement

La Figure 3.3.4 montre les formes d'onde enregistrées avec les différents points de fonctionnement utilisés. Même si ces formes d'onde proviennent de la même loi synergique, on peut observer des différences importantes. Les caractéristiques de ces différentes formes d'onde suivent relativement bien les valeurs des paramètres de consigne durant les phases d'arc chaud et d'arc froid. On peut voir en particulier sur la Figure 3.3.4 que l'intensité et/ou la durée de la phase boost augmentent progressivement entre les points 5 et 10, et que l'intensité de la phase d'arc froid augmente entre les points 6 et 10. On observe aussi que la diminution du courant après la phase boost devient quasi-linéaire à partir du point 8, du fait de la diminution du paramètre de durée de baisse non linéaire du courant $\tau_{\text{boostdown}}$ (Tableau 3.1.1). En revanche, la forme d'onde du courant durant la phase de court-circuit ne suit pas la valeur de consigne I_{sc2} . Cette valeur n'est atteinte qu'en fin de court-circuit, alors que la majeure partie de cette phase a lieu sous une intensité différente, qui augmente entre les points 5 et 10, passant de 70 A environ pour le point 5 à 250 A à partir du point 8. La durée de cette variation du courant de court-circuit semble identique pour tous les points de fonctionnement, égale à environ 3ms, et pourrait donc être un paramètre imposé. Il existe donc dans la synergie étudiée un, voire deux paramètres supplémentaires, mais non modifiables avec la commande du procédé, qui viennent s'ajouter aux 9 paramètres du cycle CMT déjà décrits dans le Tableau 3.1.1.



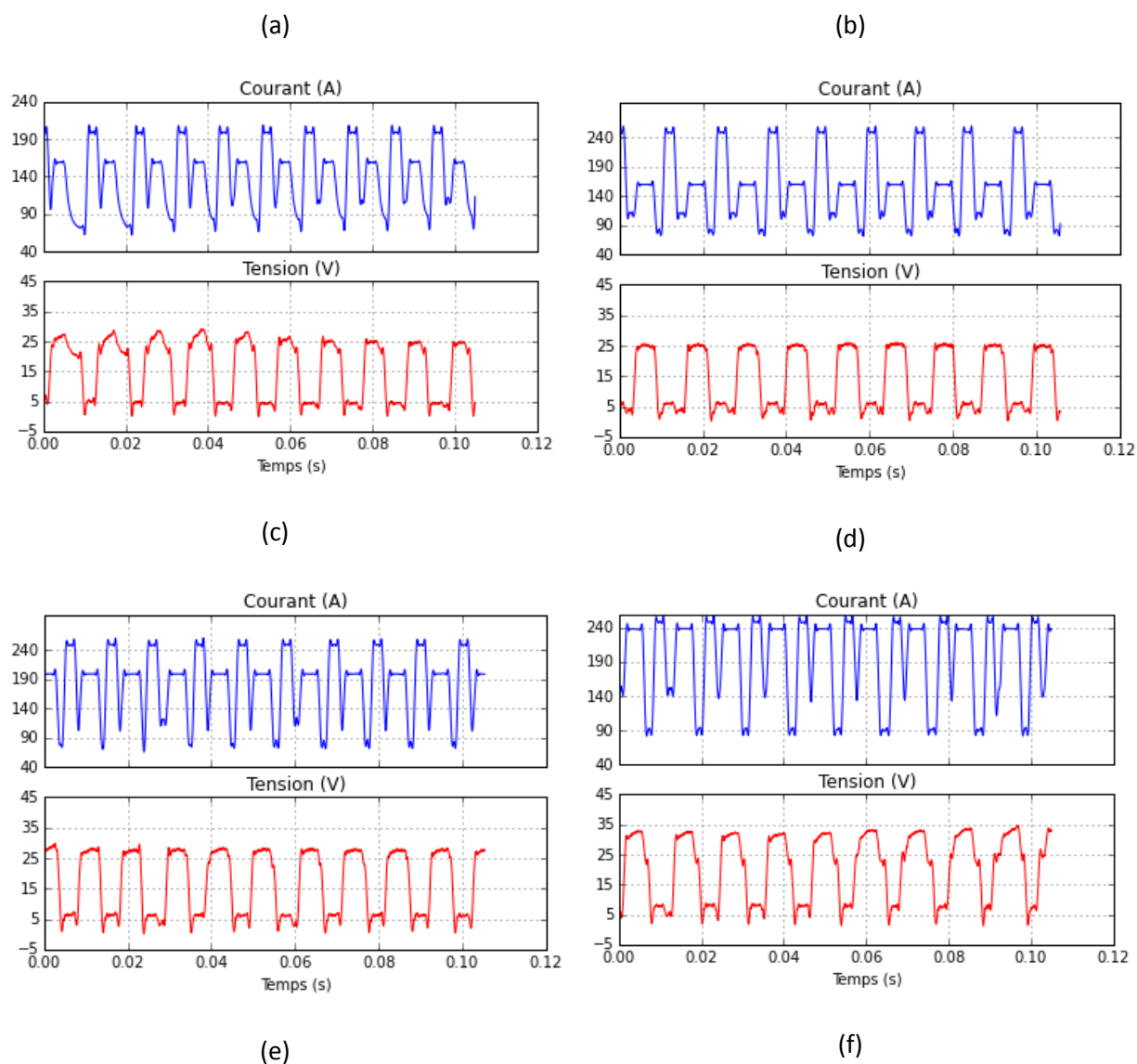
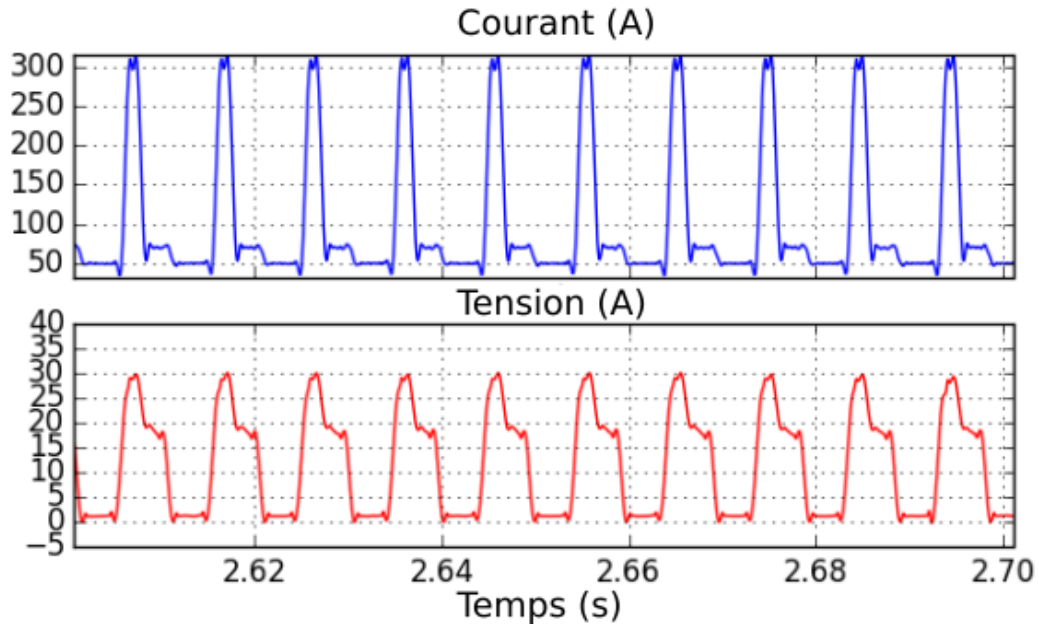
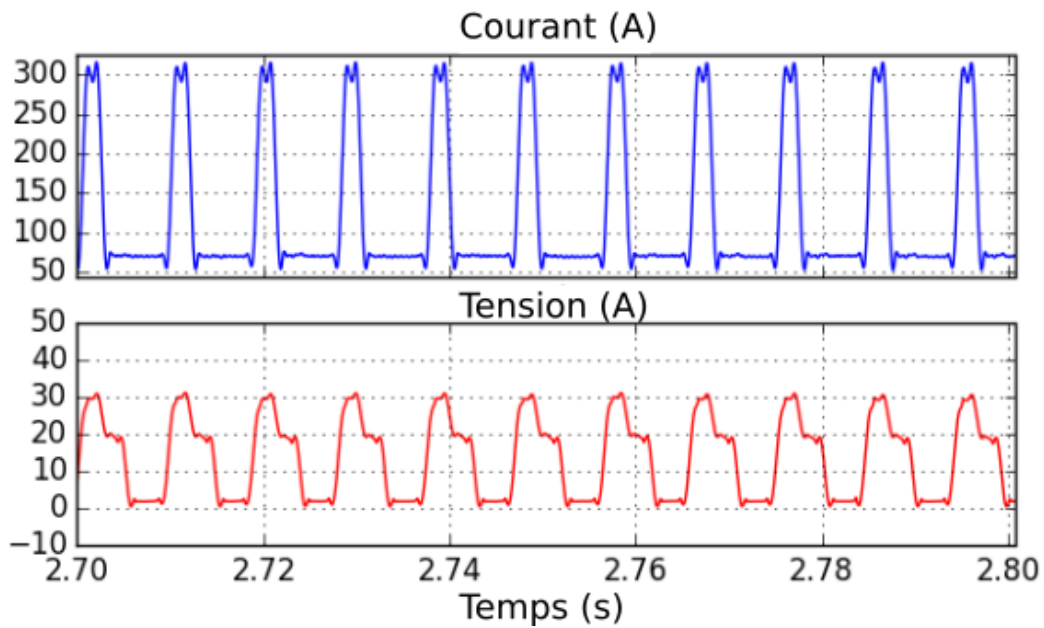


Figure 3.3.4 Formes d'onde caractéristiques des points de fonctionnement (a) 5, (b) 6, (c) 7, (d) 8, (e) 9 et (f) 10 de la loi synergique C1360

Les formes d'onde obtenues avec la loi synergique C1360 ont été comparées aux formes d'onde obtenues avec une autre loi synergique pour acier, également programmée sur le microprocesseur du générateur CMT, la loi C1355. La Figure 3.3.5 montre les formes d'onde obtenues avec les points de fonctionnement 7 et 8 de cette nouvelle loi synergique. Ces formes d'onde sont plus représentatives du cycle de transfert CMT, la variation de l'intensité durant la phase de court-circuit n'apparaissant pas, et le courant suit bien la valeur de consigne imposée I_{sc2} .



(a)



(b)

Figure 3.3.5 Formes d'onde obtenues avec la loi synergique C1355, (a) point de fonctionnement 7 ($I_{\text{boost}} = 300 \text{ A}$, $t_{\text{boost}} = 1,8 \text{ ms}$, $I_{\text{sc_wait}} = 70 \text{ A}$, $I_{\text{sc2}} = 50 \text{ A}$), (b) point de fonctionnement 8 ($I_{\text{boost}} = 300 \text{ A}$, $t_{\text{boost}} = 2,1 \text{ ms}$, $I_{\text{sc_wait}} = 70 \text{ A}$, $I_{\text{sc2}} = 70 \text{ A}$)

3.3.4. Analyse des caractéristiques des phases du cycle CMT

Les puissances et énergies produites durant les différentes phases du cycle CMT ont été déterminées à partir du traitement des signaux de tension et d'intensité, préalablement filtrés et « découpés » en phases selon la procédure décrite dans la section 3.3.2.

Comme la tension et l'intensité fluctuent au cours du temps, le calcul de la puissance moyenne d'une phase du cycle doit se faire par intégration sur tout l'espace temporel :

$$P = \frac{1}{t} \int_{t_i}^{t_f} U(t) \cdot I(t) dt \quad (3.3.1)$$

t_i et t_f étant les instants initiaux et finaux d'une phase donnée du cycle

L'énergie de chaque phase s'exprime quant à elle :

$$E = \int_{t_i}^{t_f} U(t) \cdot I(t) dt \quad (3.3.2)$$

Pour obtenir l'énergie linéique il suffit de diviser la puissance calculée par la vitesse de déplacement :

$$E_l = \frac{P}{v} \quad (3.3.3)$$

La durée des différentes phases du cycle est également déterminée. Le calcul de ces différentes caractéristiques (puissance, énergie, durée) lors des trois phases de chaque cycle du signal enregistré pour le dépôt d'un cordon permet ensuite de déduire les valeurs moyennes de ces caractéristiques pour l'ensemble d'un cordon, et les écarts types, qui permettent d'évaluer la régularité du cycle de transfert CMT.

Le nombre de cycles CMT par seconde peut enfin être déduit du nombre total de cycles dans chaque cordon déposé. Ce nombre de cycles correspond au nombre de court-circuit, et donc au nombre de gouttes déposées par seconde.

L'analyse montre que la vitesse de déplacement n'a pas d'influence sur les caractéristiques du cycle CMT, les puissances, durées et énergies des phases restant sensiblement constantes pour un point de fonctionnement donné, quel que soit la vitesse de déplacement. La Figure 3.3.6 montre par exemple l'évolution de la fréquence des court-circuit, qui ne varie quasiment pas avec la vitesse d'avance, hormis pour le point 10 lorsque la vitesse dépasse 1000 mm/min. Cette fréquence varie de plus assez peu avec les différents points de fonctionnement, ce qui montre que la durée totale du cycle CMT est assez similaire pour tous les points de fonctionnement étudiés.

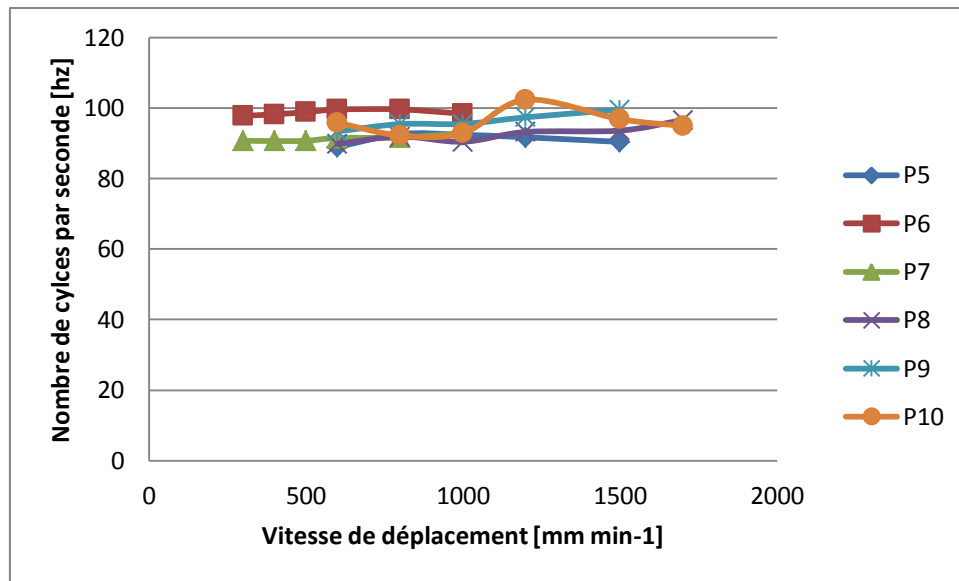


Figure 3.3.6 Evolution du nombre de cycles par seconde en fonction de la vitesse de déplacement pour les différents points de fonctionnement.

Le Tableau 3.3.2 montre les puissances moyennes et les écarts types calculés pour les trois phases du cycle, avec les différents points de fonctionnement de la loi synergique C1360.

	Phase d'arc chaud		Phase d'arc froid		Phase de court-circuit		Puissance moyenne cycle (W)
	Puissance (W)	écart type	Puissance (W)	écart type	Puissance (W)	écart type	
P5	3803,0	69,06	1583,4	31,83	259,8	99,80	1217,0
P6	3847,4	16,49	1668,2	8,16	453,9	14,23	1527,7
P7	3898,5	16,82	1979,7	9,31	867,7	9,61	2018,6
P8	3659,6	48,57	1884,2	39,75	905,8	45,62	2078,8
P9	5141,8	30,32	2254,6	61,08	1178,8	33,89	2995,3
P10	5647,2	2765,17	2406,3	86,13	1428,3	57,22	3445,8

Tableau 3.3.2 Puissance moyenne de chaque phase du cycle CMT, pour les différents points de fonctionnement

On peut observer que les valeurs de la puissance de la phase d'arc chaud sont très proches pour les points 5 à 8, ce qui s'explique par des valeurs identiques de l'intensité I_{boost} pour ces quatre points (160 A, cf. Tableau 3.1.1), alors qu'elle augmente pour les points 9 et 10. La puissance de la phase d'arc chaud mais aussi d'arc froid est un peu plus faible pour le point 8 que pour le point 7, alors que les intensités sont identiques ou un peu supérieures pour le premier point, ce qui s'explique par une diminution de la tension des phases d'arc. Cette diminution de la tension traduit une faible hauteur d'arc, ce que confirme la faible durée de la phase d'arc froid pour le point 8 (Tableau 3.4). En effet, si l'arc est plus court, la phase d'arc froid, au cours de laquelle le fil électrode descend vers le substrat jusqu'au court-circuit, doit être raccourcie. La puissance générée durant la phase de court-circuit est

très faible pour les points 5 et 6, ce qui n'est plus le cas pour les autres points, malgré la très faible tension mesurée, ce qui s'explique par les fortes intensités observées durant les courts-circuits pour ces points. Les puissances moyennes sur un cycle sont également calculées, et augmentent comme attendu de manière progressive lorsque l'on passe du point 6 au point 10. Les valeurs calculées sont très supérieures aux valeurs données dans les lois synergiques, excepté pour le point 8 (cf. Tableau 3.1), ce qui confirme encore une fois que ces valeurs sont indicatives.

La durée moyenne de chaque phase du cycle CMT est donnée dans le Tableau 3.3.3. La durée de la phase boost respecte de manière relativement précise la valeur de consigne t_{boost} , et varie très peu au cours des différents cycles, comme le montrent les très faibles écarts types calculés. La durée de la phase d'arc froid, qui est contrôlée par la descente du fil jusqu'au court-circuit, varie quant à elle beaucoup d'un point de fonctionnement à l'autre, alors que les vitesses de descente du fil sont identiques, hormis pour le point 10, où elle est plus élevée (cf. Tableau 3.1.1). Ces différences sont probablement liées à des hauteurs d'arc différentes, la durée de la phase étant d'autant plus faible que l'arc est court, comme cela a déjà été signalé pour le point 8. Enfin, la durée de la phase de court-circuit est relativement stable d'un point de fonctionnement à l'autre, autour de 5 ms. Notons que le point 8 présente la durée de court-circuit la plus longue, et en même temps la durée de phase d'arc froid la plus courte.

	Phase d'arc chaud (ms)		Phase d'arc froid (ms)		Phase de court-circuit (ms)		Durée cycle (ms)
	Moyenne	écart type	Moyenne	écart type	moyenne	écart type	
P5	1,04	0,004	5,2	0,5	4,8	0,2	11,0
P6	1,69	0,002	4,2	0,1	4,2	0,1	10,1
P7	3,06	0,036	2,9	0,1	4,9	0,1	10,9
P8	4,34	0,044	0,9	0,1	5,7	0,4	10,9
P9	4,31	0,006	1,7	0,1	4,4	0,2	10,5
P10	4,66	0,002	2,3	0,3	3,9	0,3	10,8

Tableau 3.3.3 Durées moyennes de chaque phase du cycle CMT pour les différents points de fonctionnement

La durée moyenne totale du cycle CMT est à peu près la même pour tous les points de fonctionnement et est comprise entre 10 et 11 ms, ce qui est conforme aux fréquences de court-circuit données dans la Figure 3.3.6.

Le Tableau 3.3.4 montre les énergies produites par chacune des phases du cycle CMT, calculées selon la relation ((3.3.2)), ainsi que l'énergie totale produite au cours d'un cycle CMT. On peut constater que pour les points 5 et 6, qui sont associés à des durées de phase boost très faibles, l'énergie électrique générée lors de cette phase est plus faible que celle générée durant la phase d'arc froid, malgré les intensités beaucoup plus faibles, car cette phase est de plus longue durée (cf. Tableau 3.3.3). A partir du point de fonctionnement 7, la phase d'arc chaud fournit plus de la moitié de l'énergie totale produite par un cycle, cette proportion passant à plus de 70% pour le point 10. La chaleur produite, qui assure l'échauffement des pièces et du fil, et en particulier la fusion de l'extrémité du fil électrode sous l'effet de la chaleur de condensation des électrons durant les phases d'arc, est donc principalement produite durant cette phase d'arc chaud. Notons également que l'énergie produite durant la phase de court-circuit, si elle est très faible pour les deux premiers

points, est loin d'être négligeable pour les points suivants, car elle représente jusqu'à 22% de l'énergie totale produite par cycle.

	Energie phase d'arc chaud (J)	Energie phase d'arc froide (J)	Energie totale phase d'arc (J)	Energie phase de court-circuit (J)	Energie totale par cycle (J)
P5	3,96	8,23	12,19	1,25	13,44
P6	6,50	7,01	13,51	1,91	15,41
P7	11,93	5,74	17,67	4,25	21,92
P8	15,88	1,70	17,58	5,16	22,74
P9	22,16	3,83	25,99	5,19	31,18
P10	26,32	5,53	31,85	5,57	37,42

Tableau 3.3.4 Energie moyenne des différentes phases et énergie totale du cycle pour les différents points de fonctionnement

L'énergie produite durant la phase d'arc, à travers la chaleur de condensation des électrons reçus par le fil électrode, produit la fusion de son extrémité, et donc la formation de la gouttelette au bout du fil. Le volume de fil fondu devrait donc être lié à l'énergie produite durant la phase d'arc électrique. La Figure 3.3.7 montre le poids moyen des gouttelettes déposées à chaque court-circuit pour les différents points de fonctionnement, calculées à partir du taux de dépôt présenté dans la Figure 3.3.6 et de la fréquence des court-circuit mesurées. On peut effectivement constater que le poids des gouttelettes déposées croît avec l'augmentation de l'énergie produite durant les phases d'arc électrique.

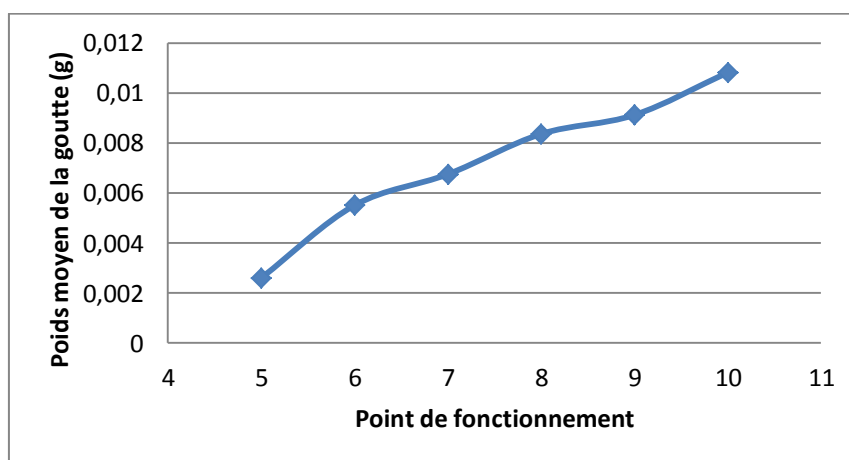


Figure 3.3.7 Poids moyen des gouttelettes déposées à chaque court-circuit pour les différents points de fonctionnement.

3.3.5. Influence de la distance tube contact - substrat

La distance entre le tube contact, assurant le guidage du fil électrode et le contact électrique avec la borne positive du générateur de soudage, et la tôle substrat, a été fixée pour tous les essais précédents à 15 mm (Figure 3.3.8). Ce paramètre peut cependant varier lors de la fabrication de pièces par la superposition de cordons, car la surface du « substrat », qui est alors constitué des cordons déjà déposés, n'est plus plane, et la hauteur de translation de laquelle est déplacé le plateau de construction de la machine entre deux couches n'est pas forcément toujours strictement égale à la hauteur de couche déposée, ce qui peut, après la superposition d'un grand nombre de couches,

produire des variations significatives de cette distance. Il est donc important d'étudier l'influence de la variation de ce paramètre sur la géométrie des dépôts et les caractéristiques du cycle de transfert. Pour y parvenir, des cordons ont été réalisés en faisant varier cette distance entre 10 et 30 mm.

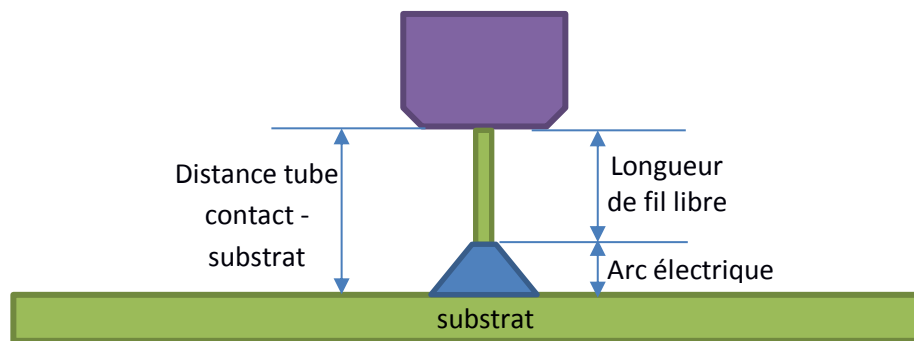


Figure 3.3.8 Représentation schématique de l'extrémité de la torche montrant le tube contact, la longueur de fil libre et l'arc électrique

La Figure 3.3.9 montre les caractéristiques géométriques des cordons réalisés avec le point de fonctionnement 6 de la synergie C1355 à la vitesse de déplacement de 500 mm/min, pour différentes valeurs de distance tube contact-substrat. On peut constater l'effet significatif de ce paramètre sur la géométrie des cordons, la hauteur passant de 2,2 mm à près de 3 mm, et la largeur de 3,4 mm à plus de 4 mm lorsque cette distance augmente de 10 à 30 mm. Le taux de dépôt augmente aussi de manière significative, surtout lorsque la distance varie entre 10 et 20 mm, avec une augmentation du volume déposé de 70%. Ce taux se stabilise toutefois pour des distances tube-substrat supérieures à 20 mm. La régularité des dépôts n'est en revanche pas affectée par ce paramètre, les écarts types demeurant très faibles pour la hauteur (0,05 mm), et un peu plus élevés pour la largeur (0,2 mm), quel que soit la hauteur tube – substrat.

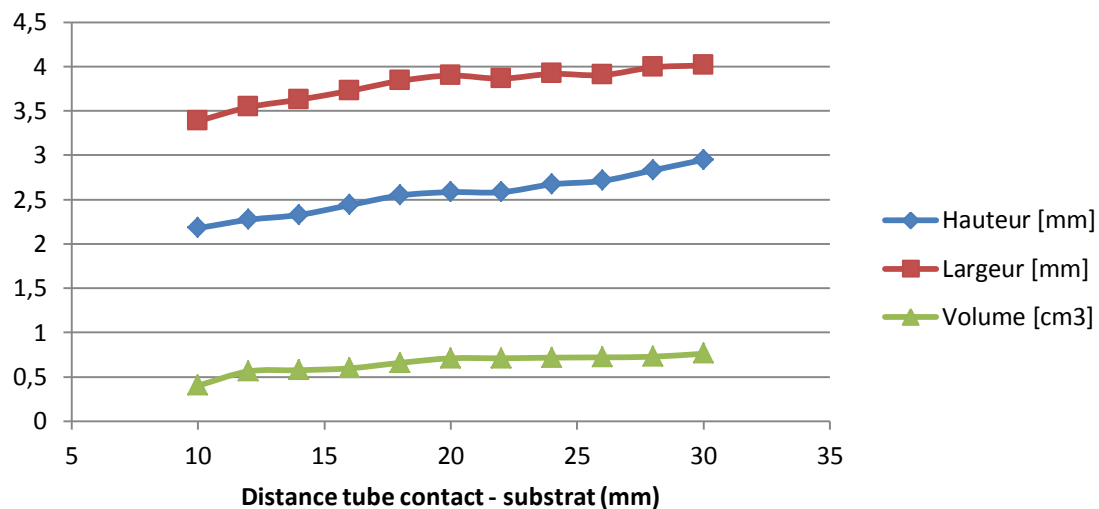


Figure 3.3.9 Evolution des caractéristiques géométriques des cordons en fonction de la distance tube contact – substrat (point de fonctionnement 6 de la synergie C1355, vitesse de déplacement de 500 mm/min)

L'augmentation du taux de dépôt et les variations de caractéristiques géométriques des cordons s'expliquent par l'évolution des caractéristiques des différentes phases du cycle CMT et des énergies associées. En effet, l'augmentation de la distance tube contact - substrat produit une augmentation

de la tension des phases d'arc, due principalement à l'augmentation de la hauteur d'arc, ce qui produit des puissances moyennes de la phase d'arc froid, et surtout de la phase d'arc chaud, plus élevées (Figure 3.3.10). La hauteur d'arc étant plus élevée, la durée de la phase d'arc froid, au cours de laquelle le fil électrode descend jusqu'au contact avec le substrat, est plus grande (Figure 3.3.11). En revanche, la phase de court-circuit devient plus courte, ce qui fait que la durée totale du cycle, et donc la fréquence de dépôt des gouttelettes, ne changent pas. Cette diminution de la durée de la phase de court-circuit pourrait s'expliquer par une augmentation de la température des gouttelettes de métal fondu à l'extrémité du fil, sous l'effet des plus fortes tensions d'arc, qui entraîne une diminution de la viscosité du métal, qui se sépare alors plus facilement du fil au moment de son retrait. La diminution de la durée de court-circuit réduit la durée de la phase de remontée du fil, ce qui devrait produire une hauteur d'arc plus courte, en contradiction avec le résultat observé. L'augmentation de la hauteur d'arc après chaque court-circuit pourrait être due à la fusion plus rapide du fil, formant des gouttelettes dont le volume est presque doublé lorsque la distance tube – substrat augmente de 10 à 30 mm, et donc une distance à combler plus importante entre l'extrémité du fil et la surface du dépôt lorsqu'elles se détachent et se mélangent au bain liquide déjà formé.

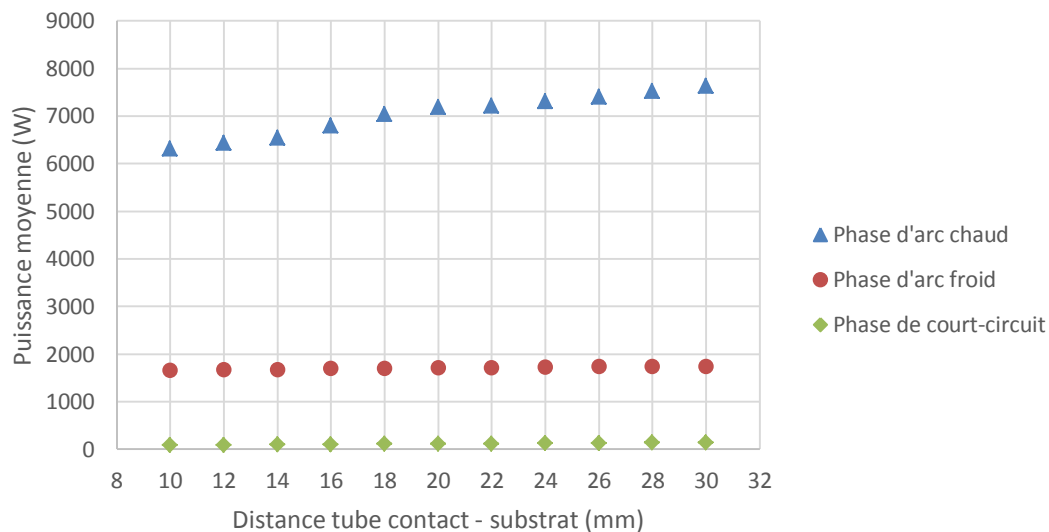


Figure 3.3.10 : Evolution de la puissance moyenne des phases du cycle CMT en fonction de la distance tube contact – substrat (point de fonctionnement 6 de la synergie C1355, vitesse de déplacement de 500 mm/min)

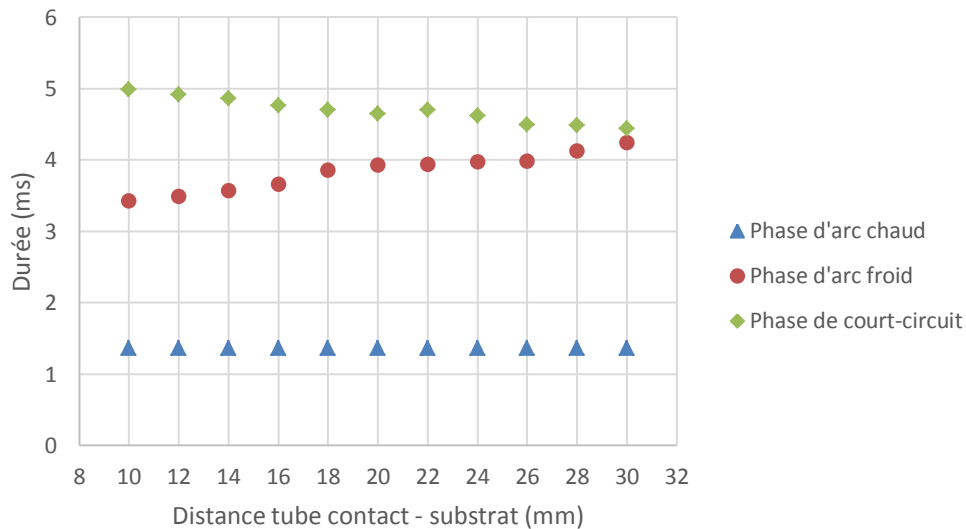


Figure 3.3.11 Evolution de la durée des phases du cycle CMT en fonction de la distance tube contact – substrat (point de fonctionnement 6 de la synergie C1355, vitesse de déplacement de 500 mm/min)

Cette augmentation de la taille des gouttelettes déposées à chaque court-circuit ne s'explique pas uniquement par l'augmentation de l'énergie produite lors de chaque cycle, qui n'est que de 20% lorsque la distance tube contact - substrat passe de 10 à 30 mm. Il est aussi probable que l'augmentation de la longueur de fil libre sous le tube contact (Figure 3.3.8) réduit la diffusion de la chaleur par conduction dans le tube contact et les éléments métalliques de la torche de soudage, ce qui favorise donc la fusion du fil.

3.4. Etude de l'influence des paramètres du cycle CMT sur les transferts

Tous les essais réalisés jusqu'à présent utilisaient les paramètres standards des points de fonctionnement prédéfinis dans les lois synergiques préenregistrées dans le microprocesseur du générateur CMT. Ces paramètres ne sont cependant pas nécessairement les mieux adaptés à l'application du procédé CMT en fabrication additive. Dans cette partie, nous avons donc étudié l'influence des principaux paramètres permettant de contrôler le cycle CMT sur les caractéristiques des différentes phases, notamment en termes de puissance et d'énergie, ainsi que sur les caractéristiques géométriques des cordons obtenus, de manière à identifier un ou des points de fonctionnement optimisés pour la réalisation de pièces en acier par fabrication additive.

3.4.1. Rappel des paramètres caractéristiques du cycle CMT

Le cycle de transfert en CMT, dont la forme d'onde du courant est décrite sur la Figure 3.4.1 pour la loi synergique C1355 programmée pour souder les aciers faiblement alliés, comprend 9 paramètres modifiables (cf. Tableau 3.1.11), dont 8 sont visibles sur la Figure 3.4.1.

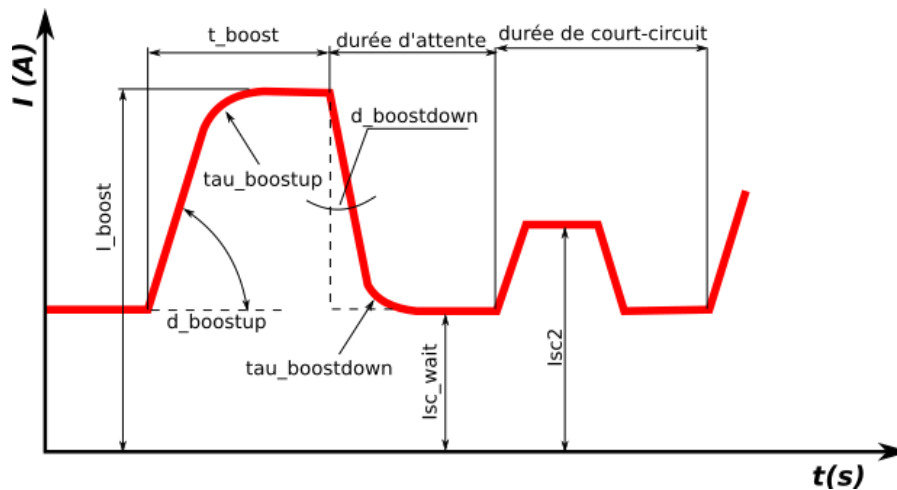


Figure 3.4.1 Forme d'onde du courant caractéristique du cycle de transfert en CMT correspondant à la loi synergique C1355.

Le cycle de transfert peut se décomposer en une phase d'arc chaud ou « boost », contrôlée par 4 paramètres (paramètres de montée du courant d_{boostup} et τ_{boostup} , intensité I_{boost} et durée de la phase t_{boost}), une phase d'arc froid ou d'attente, également contrôlée par 4 paramètres (paramètres de descente du courant $d_{\text{boostdown}}$ et $\tau_{\text{boostdown}}$, intensité $I_{\text{sc_wait}}$, et vitesse de descente du fil $V_{d_sc_wait}$ qui influe sur sa durée), et enfin une phase de court-circuit, contrôlée par le paramètre d'intensité I_{sc2} , le paramètre $V_{d_sc_wait}$, qui contrôle aussi la vitesse de remontée du fil, agissant également sur la durée de cette phase. Remarquons sur la Figure 3.4.1 que dans la loi synergique C1355 utilisée ici, l'intensité de court-circuit diminue pour revenir à la valeur d'intensité de la phase d'attente peu avant la rupture du court-circuit, sans doute pour éviter les projections qui pourraient se produire si la rupture du ménisque liquide se produisait sous des forces de Lorentz trop importantes. Cette phase du cycle ne peut être modifiée à l'aide de la commande du générateur.

Dans la suite, des cordons d'une longueur de 80 mm ont été déposés à la vitesse de déplacement de 500 mm/min, en partant des paramètres standards correspondant au point de fonctionnement 13 de la synergie C1355 (Tableau 3.4.1), et chaque paramètre est successivement modifié pour analyser son influence sur les caractéristiques des formes d'onde du cycle CMT et la géométrie des cordons déposés. Ce point de fonctionnement a été choisi comme référence car c'est celui qui produit le plus fort taux de dépôt, ce qui correspond donc à des conditions favorables pour réduire les temps de production en fabrication additive.

d_{boostup}	τ_{boostup}	I_{boost}	t_{boost}	$d_{\text{boostdown}}$	$\tau_{\text{boostdown}}$	$I_{\text{sc_wait}}$	$V_{d_sc_wait}$	I_{sc2}
(A/ms)	(ms)	(A)	(ms)	(A/ms)	(ms)	(A)	(m/min)	(A)
500	0,1	270	4	300	0,1	30	25	230

Tableau 3.4.1 paramètres standards correspondant au point de fonctionnement 13 de la synergie C1355

3.4.2. Analyse de l'influence des paramètres de la phase d'arc chaud

La phase d'arc chaud ou boost permet la formation d'une gouttelette de métal liquide à l'extrémité du fil d'apport, qui sera ensuite déposée sur le substrat pendant la phase de court-circuit. Cette gouttelette devrait être d'autant plus volumineuse que l'intensité I_{boost} ou la durée t_{boost} sont élevées.

L'influence de l'évolution des paramètres de montée d_{boostup} et τ_{boostup} n'est pas décrite, les effets étant relativement similaires à ceux que produit la variation du courant I_{boost} ou de la durée t_{boost} : une diminution du paramètre d_{boostup} ou une augmentation de τ_{boostup} produit une montée plus lente du courant, conduisant à des durées de phase boost plus courtes, voire à une diminution du courant maximal, car la valeur de consigne n'est pas atteinte avant la fin de la phase.

La Figure 3.4.2 montre le poids des gouttelettes déposées à chaque court-circuit, qui augmente avec l'intensité I_{boost} . Le taux de dépôt augmente également, mais moins que le poids des gouttelettes déposées, ce qui s'explique par des fréquences de court-circuit plus faibles.

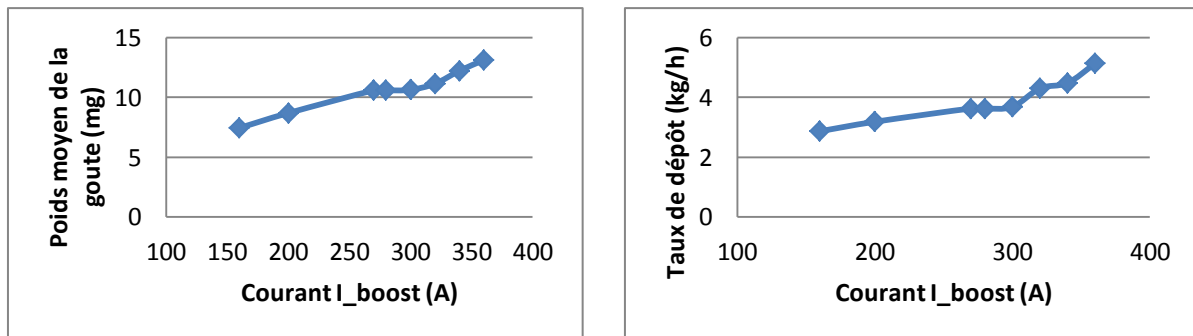


Figure 3.4.2 Evolution du poids moyen des gouttelettes déposées et du taux de dépôt en fonction du courant I_{boost} .

En effet, la durée de la phase d'arc froid ou d'attente augmente lorsque l'intensité I_{boost} augmente au-delà de 200 ou 250 A, ce qui traduit des hauteurs d'arc plus importantes (Figure 3.4.3). Pourtant, les court-circuit sont un peu plus courts, la rupture du ménisque reliant la gouttelette au fil étant facilitée par l'augmentation de l'énergie, qui a tendance à augmenter la température du métal, et donc à diminuer sa viscosité. L'augmentation de la hauteur d'arc pourrait être liée à la fusion plus rapide du fil, qui produit à chaque court-circuit le détachement de gouttelettes plus grosses, créant donc un arc plus long, ou bien pour les intensités les plus élevées, supérieures à 250 A, au détachement de gouttes avant le court-circuit, pouvant créer des projections, voire à une vaporisation excessive du fil électrode. On peut voir en effet sur les coupes transversales des cordons réalisés à 300 A de larges porosités, probablement dues à la vaporisation du métal (Figure 3.4.4).

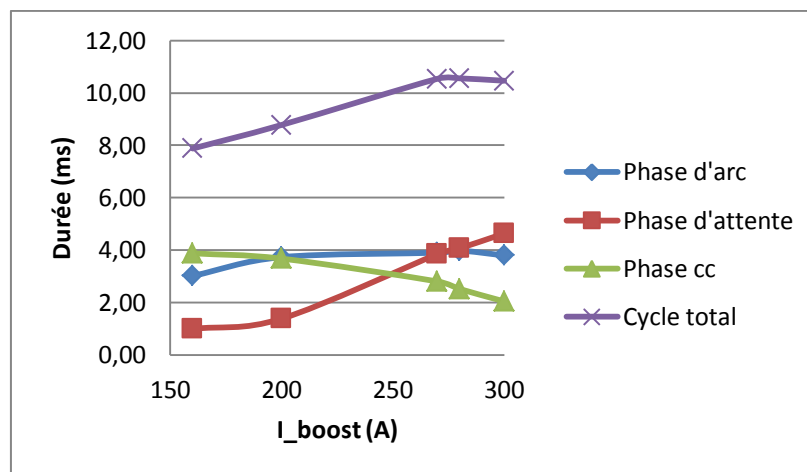


Figure 3.4.3 Evolution de la durée des phases du cycle CMT en fonction du courant I_{boost} .

La Figure 3.4.4 montre également l'évolution du mouillage et de la « pénétration » du cordon (fusion du substrat par le métal liquide du cordon déposé) en fonction de l'intensité I_{boost} . Ces deux caractéristiques paraissent liées, une quantité de chaleur plus élevée contenue dans le métal liquide déposé, due à l'augmentation du paramètre I_{boost} , augmentant la fusion du substrat et retardant la solidification de la ligne de contact, favorisant ainsi le mouillage.

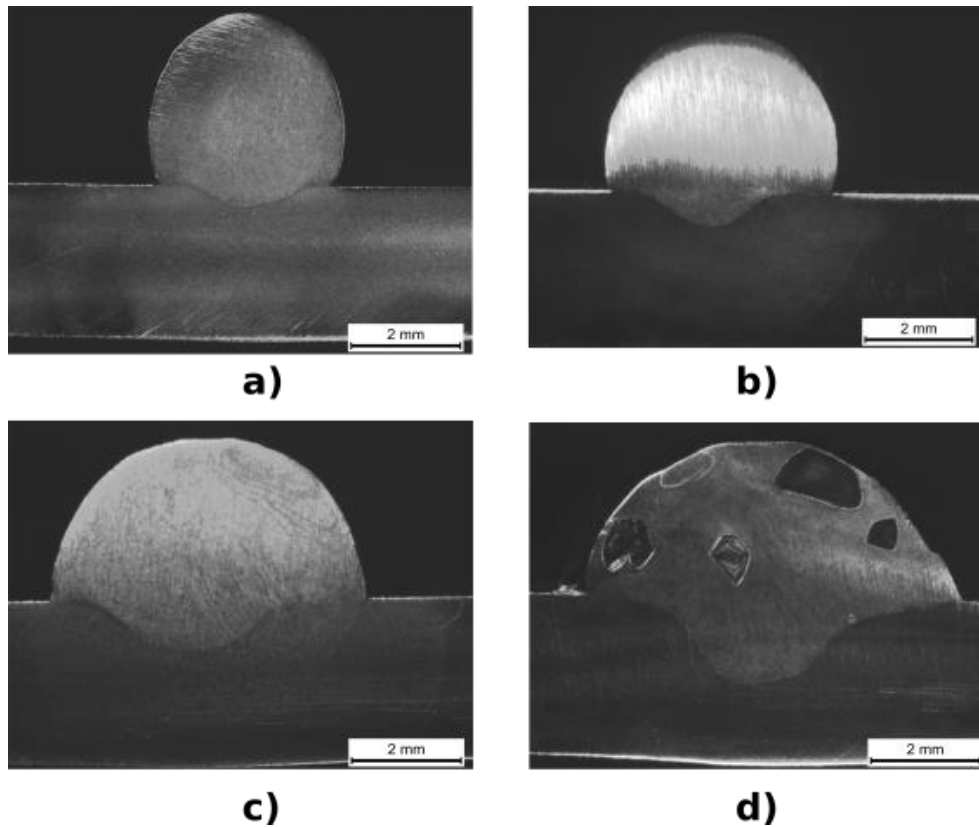


Figure 3.4.4 Macrographies montrant l'influence de l'intensité de la phase d'arc chaud sur le mouillage et la pénétration du cordon sur le substrat (pour une vitesse de déplacement de $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$), a) $I_{boost}=160 \text{ A}$, b) $I_{boost}=200 \text{ A}$, c) $I_{boost}=250 \text{ A}$, d) $I_{boost}=300 \text{ A}$

Le paramètre t_{boost} contrôle la durée de la phase d'arc chaud, comme le montre la Figure 3.4.5, et augmente de ce fait l'énergie de la phase boost, ainsi que l'énergie totale produite au cours d'un cycle de transfert (Figure 3.4.6), et la puissance moyenne. Comme pour le paramètre I_{boost} , il diminue la durée de la phase de court-circuit, sans doute en facilitant le détachement des gouttelettes, dont la température est plus élevée et la viscosité plus faible. En revanche, contrairement à ce qui est observé avec l'augmentation du courant I_{boost} , l'augmentation de t_{boost} produit aussi une très légère diminution de la durée de la phase d'arc froid. Cette évolution paraît cohérente, puisqu'une diminution de la durée de la phase de court-circuit s'accompagne d'une diminution de la durée de la phase de retrait du fil, et donc de la hauteur d'arc, qui en retour diminue la durée de la phase d'arc froid contrôlée par la redescende du fil jusqu'au court-circuit. Ce résultat semble confirmer que l'augmentation de la durée de la phase d'arc froid observée pour les intensités I_{boost} supérieures à 270 A est liée à des pertes de matière à l'extrémité du fil par le détachement de gouttes ou par vaporisation, ce qui accroît la hauteur d'arc. La diminution de la durée des phases de court-circuit et d'arc froid ne compense pas totalement l'augmentation de la durée de la phase

boost, ce qui fait que la durée totale du cycle augmente un peu, faisant diminuer légèrement la fréquence des court-circuit, et donc de dépôt des gouttelettes.

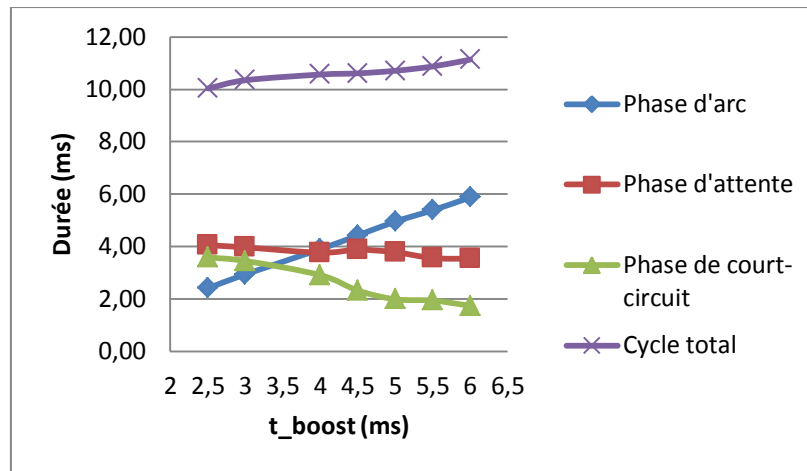


Figure 3.4.5 Evolution de la durée des phases du cycle CMT en fonction du paramètre t_{boost} .

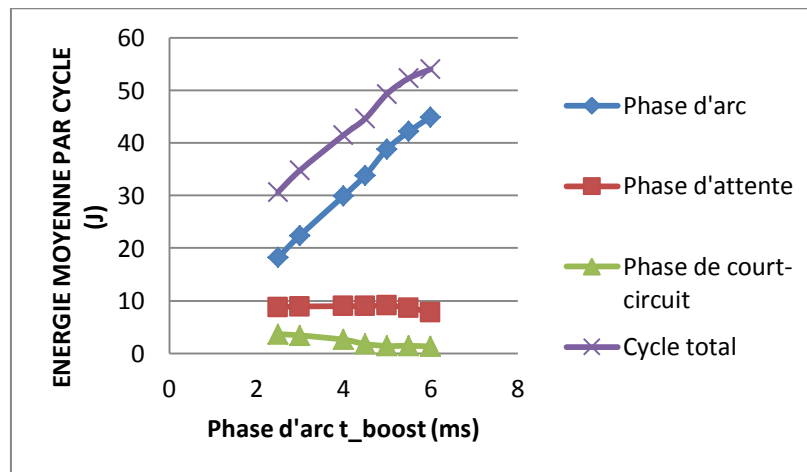


Figure 3.4.6 Evolution de l'énergie produite par les différentes phases du cycle CMT en fonction de la durée t_{boost} .

Comme avec le paramètres I_{boost} , l'augmentation de t_{boost} augmente la taille des gouttelettes déposées, ainsi que le taux de dépôt (Figure 3.4.7)

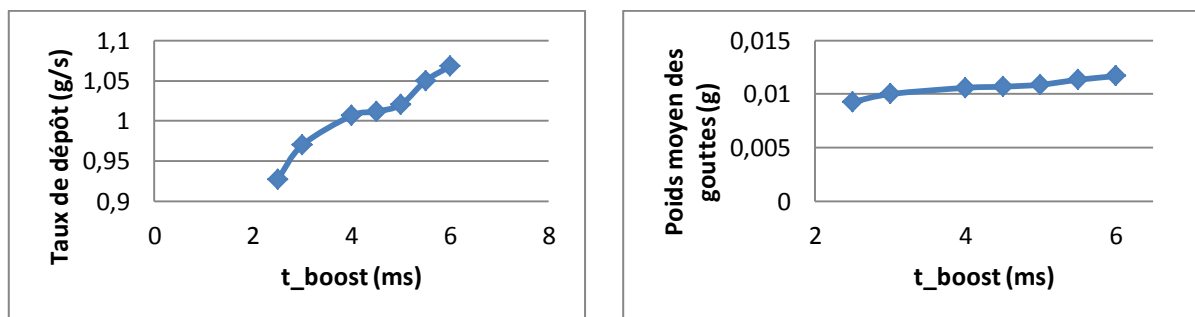


Figure 3.4.7 Evolution du taux de dépôt et du poids des gouttelettes déposées en fonction de la durée t_{boost} .

3.4.3. Analyse de l'influence des paramètres de la phase d'arc froid

Durant cette phase, l'intensité de l'arc est considérablement réduite, afin que la gouttelette formée à l'extrémité du fil ne se détache pas pendant la descente du fil électrode, jusqu'à ce qu'il entre en contact avec le bain liquide déjà formé.

Une diminution importante du paramètre $d_{\text{boostdown}}$ a pour effet de maintenir un courant élevé pendant le début de la phase d'arc froid, ce qui produit si ce paramètre est inférieur à 100 A/ms les mêmes effets que l'augmentation du temps t_{boost} sur la puissance moyenne, la taille des gouttelettes déposées, le taux de dépôt et la durée de court-circuit. En revanche, la durée de la phase d'attente n'est presque pas modifiée, sauf lorsque ce paramètre devient inférieur à 50 A/ms, où elle augmente alors, peut-être à cause du détachement de gouttelettes avant le court-circuit, qui augmentent la hauteur d'arc. Il est donc préférable de conserver ce paramètre à une valeur élevée, (entre 250 et 500 A/ms), et sa variation n'a alors quasiment aucun effet sur les caractéristiques des signaux et des dépôts.

De la même façon, l'intensité de la phase d'arc froid $I_{\text{sc_wait}}$ n'a que très peu d'effet sur les caractéristiques du cycle et le taux de dépôt, sauf lorsque sa valeur est supérieure à 150 A, mais le cycle de transfert devient alors irrégulier avec la projection de gouttelettes avant les court-circuit, comme lorsque l'intensité I_{boost} est trop élevée.

Le paramètre $V_{d_sc_wait}$, qui contrôle la vitesse de descente du fil au cours de la phase d'attente jusqu'à l'établissement du court-circuit, a en revanche une influence significative. Si l'on augmente ce paramètre, la durée de la phase d'attente est réduite (Figure 3.4.8), et celle de la phase de court-circuit augmente un peu, sans doute du fait que les gouttelettes de métal déposées ont moins le temps de s'échauffer, et ont donc une plus forte viscosité qui retarde la rupture du ménisque. De ce fait, la hauteur d'arc est un peu plus importante, d'autant plus que la vitesse de remontée du fil est également contrôlée par ce paramètre, et la puissance des phases d'arc est plus élevée. L'énergie totale apportée au cours d'un cycle augmente également, principalement du fait de l'augmentation de l'énergie de la phase d'arc chaud (Figure 3.4.9). Le poids des gouttelettes déposées augmente (Figure 3.4.10), tout comme la fréquence des court-circuit, ce qui accroît d'autant le taux de dépôt, qui augmente de plus de 20% lorsque le paramètre passe de 20 m/min à 30 m/min.

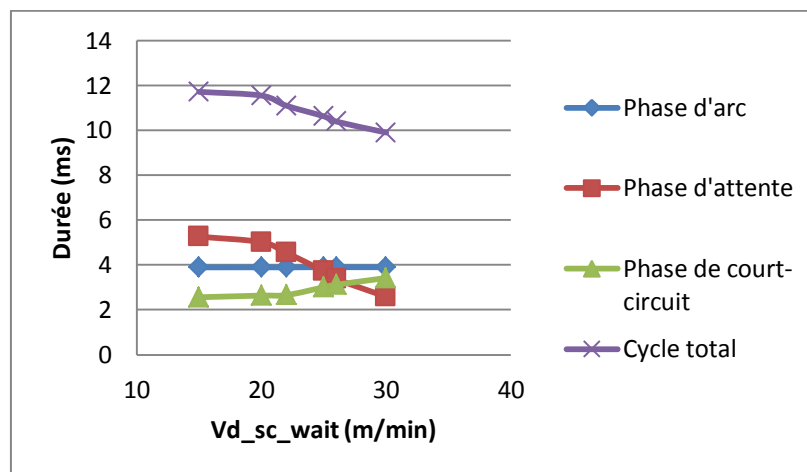


Figure 3.4.8 Evolution de la durée des phases du cycle CMT en fonction du paramètre $V_{d_sc_wait}$.

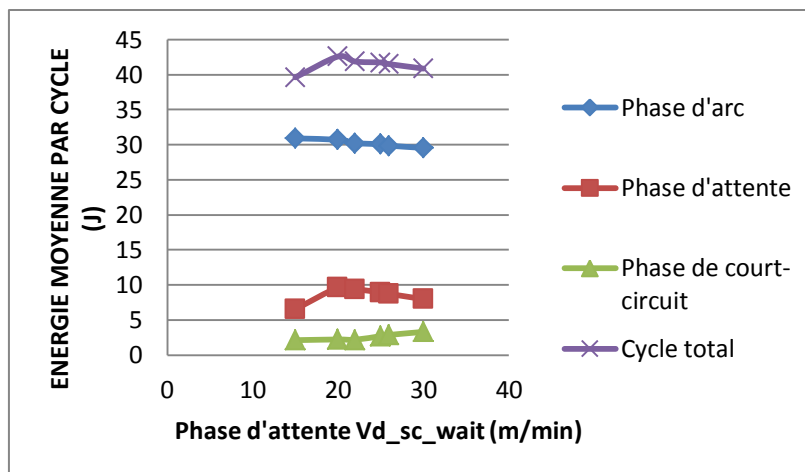


Figure 3.4.9 Evolution de l'énergie produite lors des différentes phases du cycle CMT en fonction du paramètre Vd_{sc_wait} .

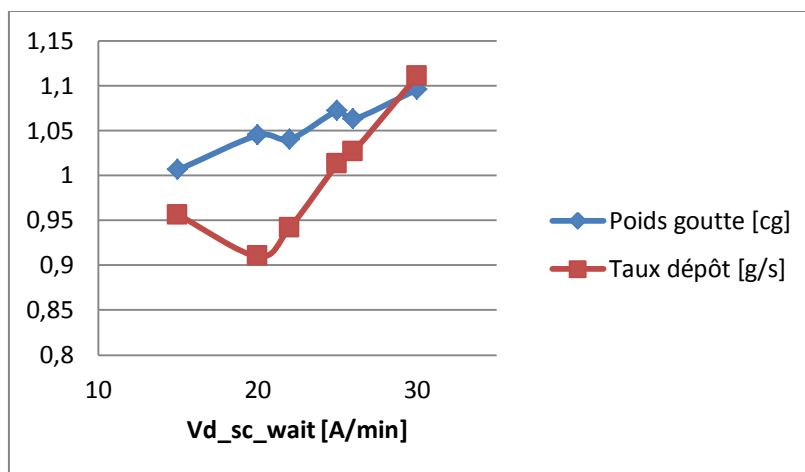


Figure 3.4.10 Evolution du taux de dépôt et du poids moyen des gouttelettes déposées en fonction du paramètre Vd_{sc_wait} .

3.4.4. Analyse de l'influence du paramètre de la phase de court-circuit

L'évolution du paramètre I_{sc2} a une influence assez faible sur la durée des phases du cycle CMT (Figure 3.4.11). Il diminue très légèrement la durée de la phase de court-circuit lorsque sa valeur est supérieure à 230 A, en favorisant la striction du ménisque sous l'effet des forces de Lorentz (Figure 3.4.11) mais n'a aucun effet sur les énergies ou le taux de dépôt.

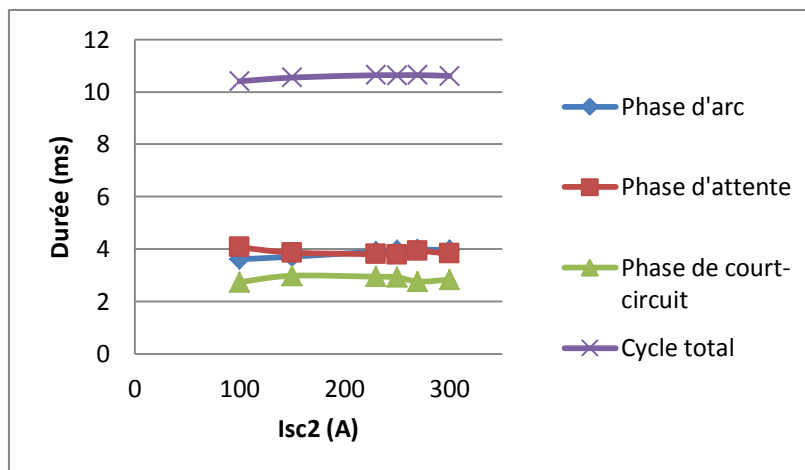


Figure 3.4.11 Evolution de la durée de chaque phase du cycle CMT en fonction du paramètre Isc2.

3.5. Optimisation des paramètres du cycle CMT

L'analyse des paramètres contrôlant le cycle CMT a montré que 3 paramètres avaient une influence significative sur les énergies produites et les taux de dépôts : l'intensité I_{boost} , la durée t_{boost} et la vitesse $V_{d_sc_wait}$. Nous allons tenter d'optimiser ces trois paramètres afin d'augmenter le taux de dépôt, sans provoquer la déstabilisation du cycle CMT que produirait une énergie excessive avec le détachement de gouttelettes avant le court-circuit, risquant de provoquer des projections et des irrégularités des cordons.

Les paramètres du point de fonctionnement 13 de la synergie C1355 (cf. Tableau 3.4.1) ont été choisis comme référence, car c'est le point des lois synergiques standards préréglées dans le microprocesseur du générateur CMT qui produit le plus fort taux de dépôt, avec une valeur de 0,925 g/s. Les trois paramètres influant sur le taux de dépôt ont été augmentés successivement, en observant leur effet à la fois sur le taux de dépôt et sur la régularité du cycle de transfert et de la géométrie des cordons, en conservant une vitesse d'avance de 1200 mm/min.

L'augmentation de l'intensité I_{boost} au-delà de la valeur de 270 A correspondant au point de fonctionnement 13 produit comme espéré une augmentation du taux de dépôt. Cependant, au-delà de 300 A, des irrégularités commencent à apparaître sur les formes d'onde du courant et de la tension du cycle CMT, qui s'accroissent encore lorsque l'intensité I_{boost} dépasse 320 A (Figure 3.5.2). Ces irrégularités traduisent une instabilité du cycle de transfert CMT, du fait du détachement de gouttelettes de métal à l'extrémité du fil sous l'effet combiné de leur poids et des forces de Lorentz, qui augmentent tous deux avec l'augmentation de l'intensité de l'arc électrique. Ces détachements de gouttelettes produisent des chutes de tension durant la phase d'arc chaud ou d'arc froid, avant que le court-circuit ne se produise, visibles sur la Figure 3.5.2.

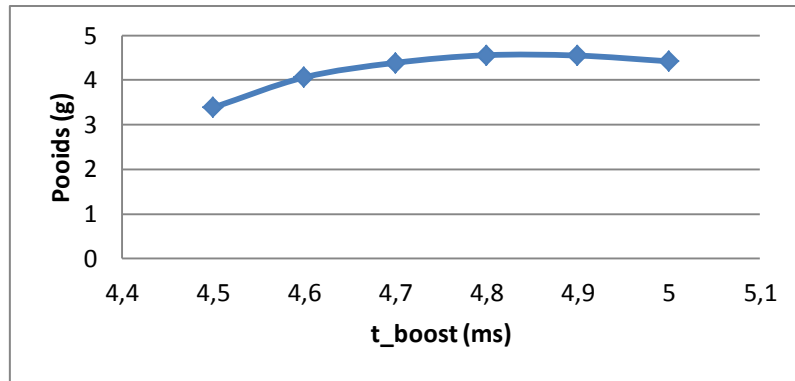
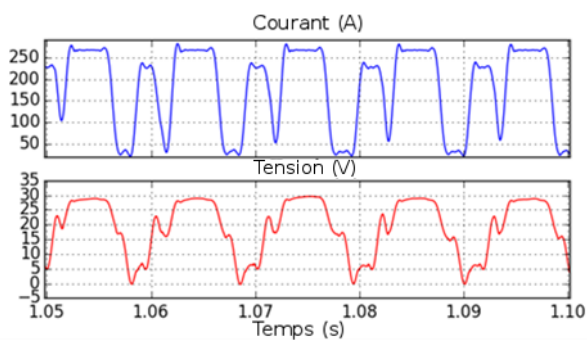


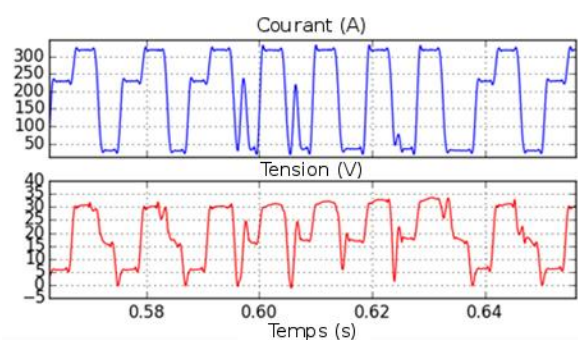
Figure 3.5.1 Evolution du taux de dépôt en fonction de la durée t_{boost} .

Le paramètre I_{boost} doit donc rester en deçà de 300 A pour conserver un cycle de transfert CMT stable. Ce paramètre a été fixé à 280 A pour étudier l'influence des autres paramètres sur le taux de dépôt.

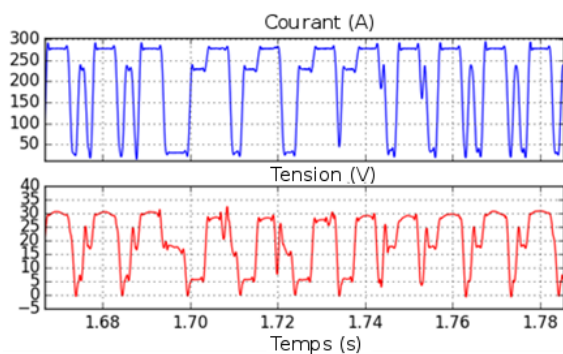
La durée de la phase boost augmente également, comme nous l'avons montré dans la section 3.4, la taille des gouttelettes formées à l'extrémité du fil, et donc devrait aussi augmenter le taux de dépôt. Cependant, comme avec l'augmentation du paramètre I_{boost} , si ces gouttelettes deviennent trop volumineuses, elles risquent de se détacher sous l'effet de la gravité et des forces de Lorentz. L'intensité demeurant fixée à 280 A, l'augmentation du paramètre t_{boost} n'influe donc que sur le poids des gouttes, et on peut alors espérer former des gouttelettes restant attachées à l'extrémité du fil durant les phases d'arc de plus gros volume que celles formées avec l'augmentation du paramètre I_{boost} . Remarquons toutefois qu'en augmentant la durée t_{boost} , on diminue un peu la fréquence des court-circuit, ce qui peut réduire l'accroissement de taux de dépôt produit par l'augmentation du volume des gouttelettes déposées. La Figure 3.5.1c montre effectivement une augmentation du taux de dépôt avec l'augmentation du paramètres t_{boost} , qui confirme l'effet favorable de cette modification. Toutefois, lorsque ce paramètre atteint 5 ms, le signal devient irrégulier, du fait du détachement des gouttelettes pendant les phases d'arc, produisant des chutes rapides de tension avant que la phase de court-circuit ne s'établisse (Figure 3.5.2c). Ce paramètre doit donc demeurer en deçà de 5 ms pour conserver un transfert régulier de matière. Il a été fixé pour tous les essais suivants à 4,9 ms.



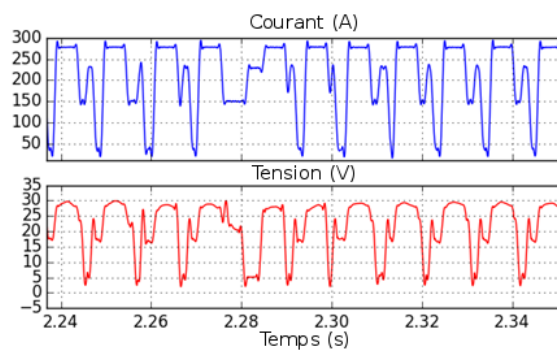
(a)



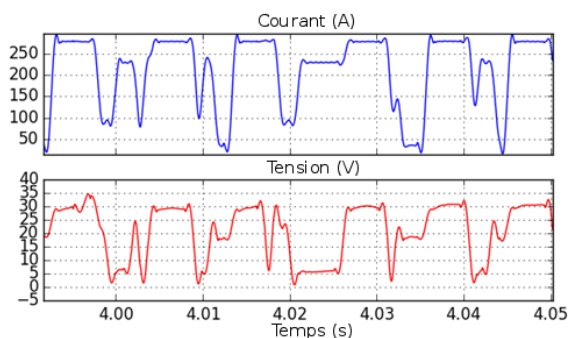
(b)



(c)



(d)



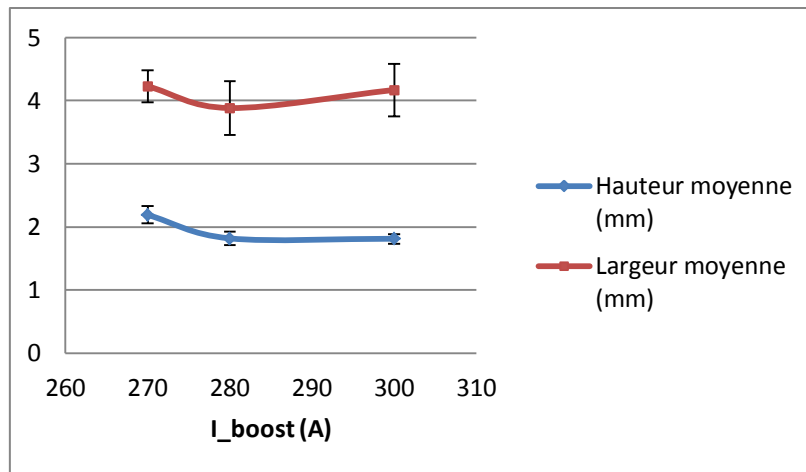
(e)

Figure 3.5.2 Forme d'ondes du courant et de la tension montrant le cycle CMT, a) pour le point de fonctionnement 13 de la loi synergique C1355, b) lorsque l'intensité I_{boost} est trop élevée (320 A), c) lorsque la durée t_{boost} est trop élevée (5 ms), d) lorsque l'intensité I_{sc_wait} est trop élevée (150 A), et e) lorsque la vitesse de fil $V_{d_sc_wait}$ est trop élevée (30 m/min).

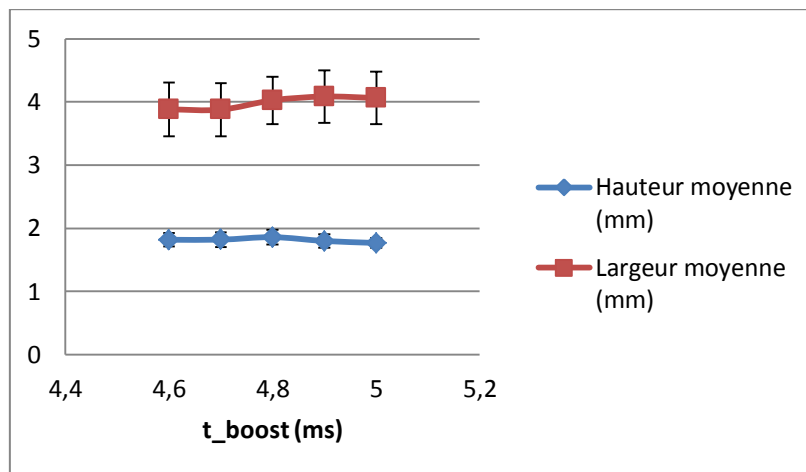
Le paramètre I_{sc_wait} , qui n'avait pas montré dans la section 3.4 une grande influence sur les caractéristiques du cycle CMT, a aussi été augmenté. Le taux de dépôt augmente très légèrement avec l'augmentation de ce paramètre, mais au-delà de 150A, des fortes irrégularités apparaissent du fait du détachement de gouttelettes à la fin des phases d'arc, qui perturbent le mode de transfert du procédé CMT, avec parfois la disparition de la phase de court-circuit lors de certains cycles, qui limite le taux de dépôt et provoque des projections (Figure 3.5.2d). Ce paramètre a par la suite été fixé à 90 A.

Finalement, le paramètre $V_{d_sc_wait}$ a été augmenté, de manière à tenter d'augmenter la fréquence des court-circuit, sans trop réduire le volume des gouttelettes déposées lors de chaque phase de court-circuit. Le résultat est positif, mais à partir d'une vitesse de 30 m/min, le transfert devient irrégulier, la durée des phases de court-circuit, au cours desquelles les gouttelettes sont déposées, devenant très variable du fait d'une trop grande vitesse d'approche du fil (Figure 3.5.2e).

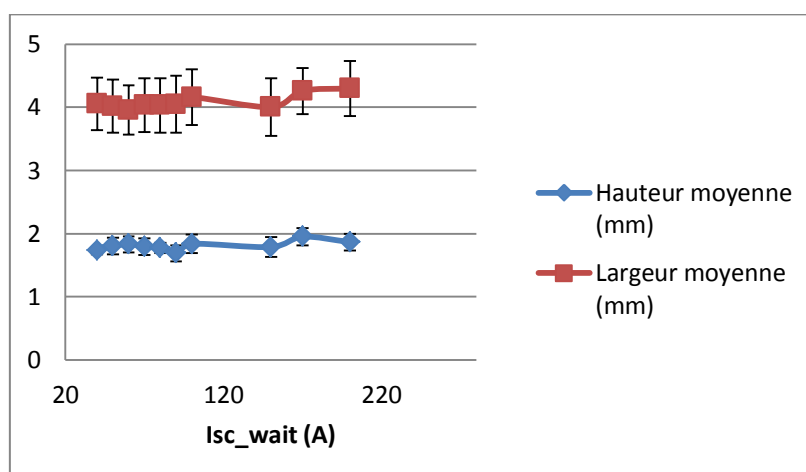
Le taux de dépôt peut donc être augmenté de plus de 25% par rapport au taux de dépôt maximal des points de fonctionnement standards, sans déstabiliser le cycle de transfert CMT. La régularité des cordons obtenus, évaluée par l'écart type de la hauteur des cordons, si elle est un peu moins bonne lorsque le cycle de transfert CMT est déstabilisé par un excès d'énergie durant les phases d'arc, ou une vitesse d'avance du fil trop élevée, reste du même ordre que ceux du point de fonctionnement 13 pour les autres cordons (Figure 3.5.3).



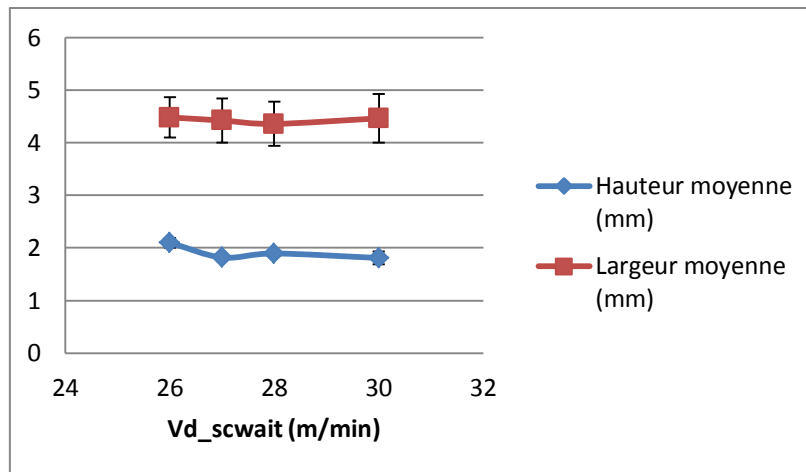
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3.5.3 Evolution des écarts types de la hauteur des cordons en fonction a) de I_{boost} , b) de t_{boost} , c) de I_{sc_wait} et d) de $V_{d_sc_wait}$

Finalement, les paramètres rassemblés dans le Tableau 3.5.1 ont été retenus pour le point de fonctionnement optimisé présentant un taux de dépôt maximum, qui sera utilisé ultérieurement pour fabriquer des « murs » par la superposition de cordons.

$d_{boostup}$ (A/ms)	$\tau_{boostup}$ (ms)	I_{boost} (A)	t_{boost} (ms)	$d_{boostdown}$ (A/ms)	$\tau_{boostdown}$ (ms)	I_{sc_wait} (A)	$V_{d_sc_wait}$ (m/min)	I_{sc2} (A)
500	0,1	280	4,9	300	0,1	90	29	230

Tableau 3.5.1 Choix des paramètres optimisés présentant un taux de dépôt maximum

3.6. Conclusion

Ce chapitre a montré que des cordons réguliers pouvaient être obtenus avec différents points de fonctionnement des lois synergiques préenregistrées dans le microprocesseur du générateur de soudage CMT. Les écarts types mesurés sur les largeurs et hauteur sont sensiblement les mêmes, inférieurs à 0,1 mm environ, quel que soit le point de fonctionnement employé, tant que la vitesse de dépôt ne dépasse pas une certaine valeur, qui produit alors l'apparition du phénomène de humping, et les cordons deviennent très irréguliers. Des cordons de largeurs comprises entre environ 2 mm et 6 mm, voire plus, et de hauteurs comprises entre 1 et 3 mm environ, peuvent être obtenus selon la puissance moyenne et la vitesse de déplacement employée, ce qui peut permettre de choisir les paramètres procédé en fonction des caractéristiques de pièces à fabriquer. Les défauts en début de cordon, qui peuvent s'amplifier au cours de la fabrication de pièces par la superposition de cordons, ont pu être réduits par l'ajustement des paramètres d'amorçage. Les caractéristiques des différentes phases du cycle de transfert en CMT, en termes notamment de puissances et d'énergies générées, ont été analysées et corrélées à la géométrie des cordons, et l'influence sur ces caractéristiques de la distance entre le tube contact et la surface du substrat, qui peut varier au cours de la construction d'une pièce, a été étudiée. Enfin, une étude paramétrique a permis de mieux comprendre l'influence des différents paramètres contrôlant la forme d'onde du courant et de la tension caractéristique du cycle CMT sur les phénomènes de fusion et de transfert de métal, et

d'optimiser les paramètres afin d'accroître le taux de dépôt. Des paramètres optimisés permettant des taux de dépôt d'acier supérieurs de 25% par rapport à ceux permis par les paramètres standard des lois synergiques ont ainsi été déterminés.

Dans le dernier chapitre, nous étudions l'effet de la superposition des cordons sur la géométrie des dépôts, et des ajustements sont proposés afin d'améliorer la régularité. Une méthode de contrôle en ligne du procédé, permettant de détecter les dérives éventuelles produisant des irrégularités géométriques, est également présentée.

Chapitre 4: Chapitre 4 : Fabrication de dépôts multicouches et contrôle du procédé

Ce dernier chapitre est consacré à la réalisation de dépôts multi-cordons et au développement d'outils de contrôle en ligne permettant de suivre la stabilité du processus de dépôt de matière, afin de détecter les défauts et de décider d'éventuels ajustements des réglages du procédé. Le chapitre est composé de deux parties distinctes. La première partie concerne l'étude de l'influence de la superposition des couches sur la géométrie des cordons, et l'optimisation des paramètres de fabrication pour conserver des géométries régulières, ou des taux de dépôt maximums. La seconde partie concerne l'identification des caractéristiques des signaux électriques les plus pertinentes pour analyser la stabilité des dépôts et l'apparition de défauts éventuels, et au développement d'une méthode de contrôle en ligne du procédé permettant le suivi de la qualité de la fabrication.

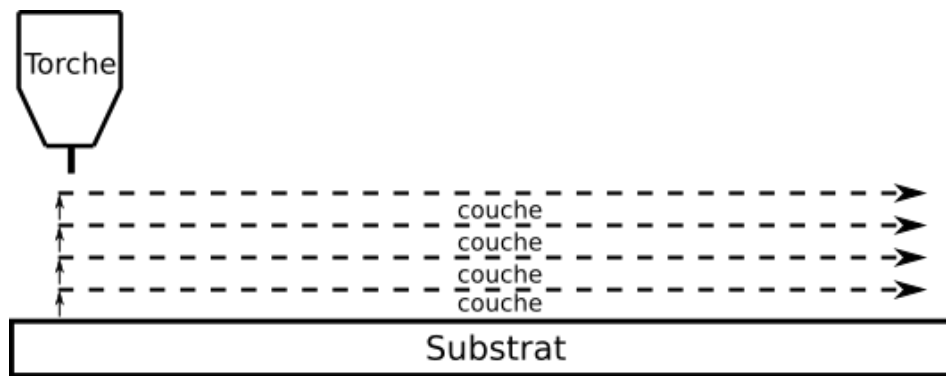
4.1. Fabrication de dépôts multicouches

Dans cette partie, des murs formés par la superposition de plusieurs cordons sont réalisés, afin d'étudier l'effet de cette addition sur les caractéristiques géométriques des cordons déposés. En effet, en raison des caractéristiques inhérentes aux procédés de soudage, et en particulier au procédé CMT, la géométrie des cordons déposés n'est pas uniforme, notamment en début de cordon, où la matière déposée tend à s'accumuler pour former une macro-goutte. Si ce défaut peut être réduit en contrôlant les paramètres du cycle d'amorçage du procédé, il n'est pas totalement éliminé, et la superposition de cordons peut conduire à une amplification de ce défaut.

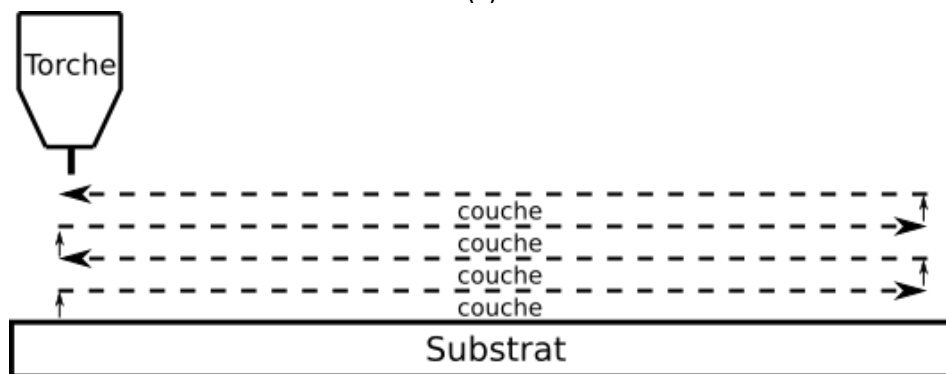
4.2. Choix de la stratégie de construction

La production de pièces par fabrication additive nécessite la définition d'une stratégie de construction, c'est-à-dire le choix des trajectoires que décrira la « tête » de dépôt, et le pas de translation verticale de la tête ou du plateau de construction entre deux couches, qui doit correspondre à la hauteur de couche déposée. Les trajectoires peuvent être générées à partir des outils de CFAO développés pour les machines-outils, ou à partir d'applications spécifiquement dédiées à la fabrication additive. Dans le cas présent, la géométrie de pièce à fabriquer étant très simple, la génération de la trajectoire pour la fabrication des murs est faite manuellement, en choisissant les positions de début et de fin de chaque dépôt, et la hauteur du déplacement vertical du plateau de construction entre deux couches.

Pour réaliser des murs par la superposition de cordons, deux stratégies ont été comparées. La première consiste en conserver le même sens de dépôt pendant toute la fabrication (Figure 4.2.1a), tandis que la seconde consiste à alterner le sens de dépôt d'une couche à l'autre (Figure 4.2.1b). Un temps d'attente de 5 secondes est respecté entre deux couches, de manière à laisser refroidir le cordon.



(a)



(b)

Figure 4.2.1 Stratégies de fabrication des dépôts multicouche, (a) en conservant le même sens de dépôt pour chaque couche, (b) en alternant le sens de dépôt entre chaque couche.

La première stratégie produit des murs irréguliers, les défauts en début de cordon ayant tendance à s'amplifier, alors que l'on observe au contraire un manque de matière en fin de cordon, qui s'amplifie également (Figure 4.2.2a). La seconde stratégie alternant le sens de dépôt permet en revanche de compenser les excès de matière observés en début de cordon par les manques de matière déposée en fin de cordon (Figure 4.2.2b).



(a)



(b)

Figure 4.2.2 (a) Mur fabriqué avec la stratégie utilisant le même sens de dépôt, et (b) mur fabriqué en utilisant la stratégie alternée de dépôt.

Dans la suite, toutes les expériences sont réalisées avec cette seconde stratégie de fabrication.

Le second paramètre caractérisant la stratégie de dépôt est la hauteur de translation du plateau de fabrication entre deux couches déposées. Ce paramètre doit être égal à la hauteur des couches déposées, afin de maintenir une distance entre le tube contact et le substrat constante pour les différentes couches superposées. Une évaluation inappropriée de cette hauteur, qui peut varier entre 1 et 3 mm environ pour la première couche en fonction des conditions de dépôt, entraîne alors une variation progressive de la distance entre le tube contact et la surface du dépôt précédent, qui affecte la géométrie des dépôts suivants (cf. 3.3.5). Des essais préliminaires ont montré que bien que les hauteurs des premières couches déposées étaient très variables selon les conditions de dépôt (point de fonctionnement et vitesse de déplacement), la hauteur moyenne de couche déposée diminue lorsque l'on superpose plusieurs cordons, pour se stabiliser à une valeur proche de 1,5 mm, quel que soient les énergies et vitesses utilisées. C'est donc cette valeur qui a été retenue comme hauteur de translation du plateau de travail entre couches pour tous les essais qui vont suivre.

4.3. Influence de la superposition de cordons sur la géométrie des dépôts

Afin d'évaluer l'influence de la superposition de plusieurs cordons sur la géométrie des dépôts, des « murs » formés par la superposition de 2 à 10 cordons de longueur 80 mm ont été construits sur des tôles substrat de dimensions 300 x 100 x 3 mm³. Les points de fonctionnement 5, 6, et 7 de la loi synergique C1360 ont été utilisés pour cette étude, avec une distance entre le tube contact et le substrat fixée à 15 mm pour le premier cordon, un déplacement vertical du plateau de 1,5 mm, et une vitesse de déplacement de 600 mm/min. Les hauteurs et largeurs moyennes de chacun des « murs » formés ont été mesurées en utilisant la méthodologie décrite dans le chapitre 2.

La Figure 4.3.1 montre l'évolution de la largeur moyenne en fonction du nombre de cordons superposés pour les trois points de fonctionnement testés. On peut constater que la largeur moyenne des murs augmente lors du dépôt des quatre premières couches, puis tend à se stabiliser à une valeur d'autant plus élevée que la puissance moyenne associée au point est grande.

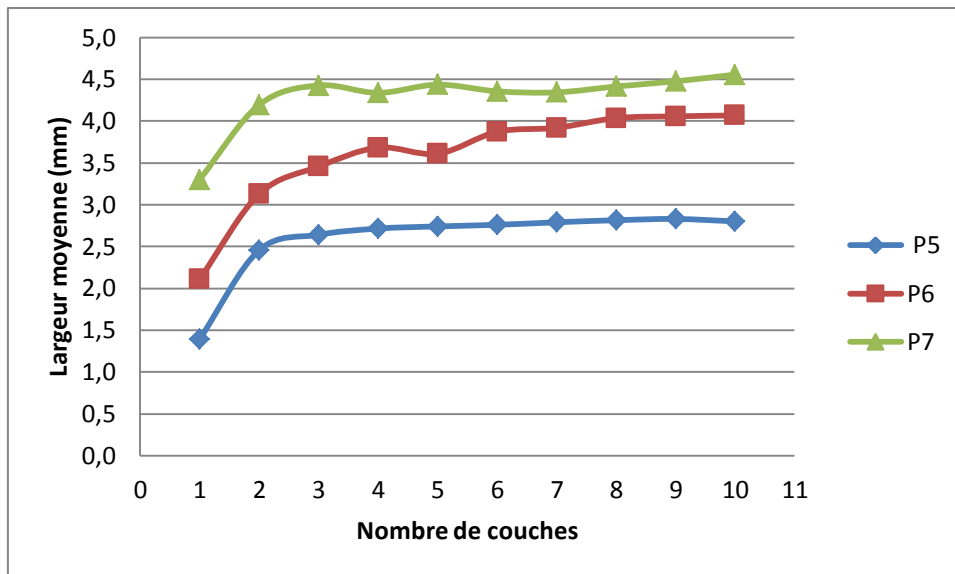


Figure 4.3.1 Evolution de la largeur moyenne des murs en fonction du nombre de cordons superposés.

La Figure 4.3.2 montre l'évolution de la hauteur moyenne de la dernière couche déposée, en fonction du nombre de cordons superposés. On peut voir sur cette figure que la hauteur de la première couche déposée est toujours plus élevée que les autres (comprise entre 1,5 mm et 2,5 mm environ selon le point de fonctionnement), mais que la hauteur a ensuite tendance à se stabiliser, dès le second cordon pour le point 5, et à partir du troisième ou du quatrième pour les points 6 et 7, la hauteur des couches étant ensuite comprise entre 1 mm et 1,5 mm environ selon le point de fonctionnement pour toutes les autres couches.

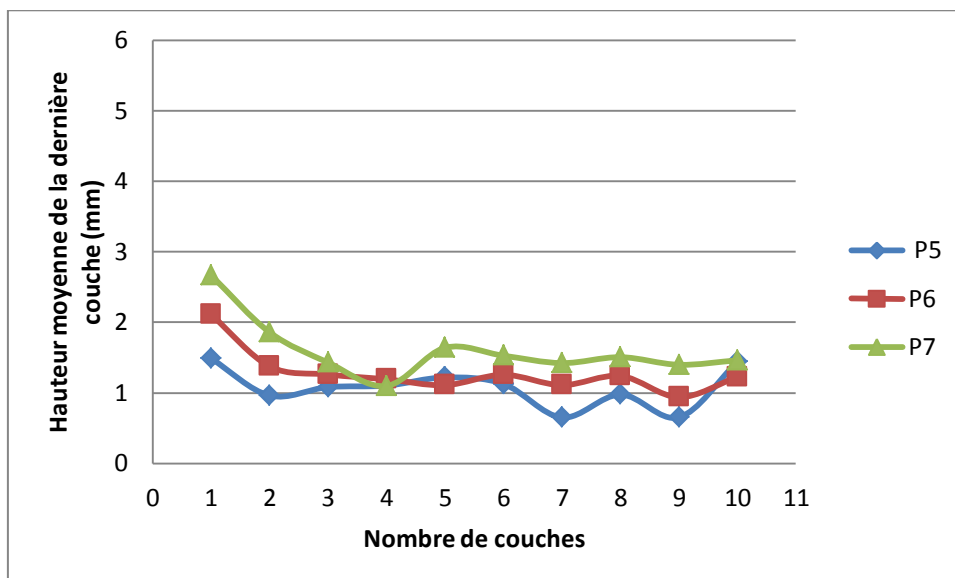


Figure 4.3.2 Evolution de la hauteur moyenne de la dernière couche déposée en fonction du nombre de cordons superposés

Ces évolutions sont bien sûr liées à l'accumulation de chaleur dans le mur et la tôle substrat avec la superposition des cordons. Le premier cordon est en effet déposé sur un substrat froid, alors que le second et les suivants sont déposés sur les cordons qui viennent de se solidifier, et sont donc encore chauds. De ce fait, la pénétration des nouveaux cordons, c'est-à-dire la refusion des cordons

précédemment déposés lors du dépôt des suivants, sera plus importante, produisant un volume de métal fondu plus élevé, et le dépôt liquide a alors tendance à s'étaler. Après quelques cordons déposés cependant (2 ou 3 pour les points de fonctionnement 5 à 7), un régime thermique quasi-stationnaire s'établit, c'est-à-dire que l'apport de chaleur supplémentaire produit par le dépôt d'un nouveau cordon est compensé par la diffusion de la chaleur, par conduction thermique principalement, dans les premiers cordons déposés, puis dans la tôle substrat, et ensuite dans le plateau de construction de la machine.

Les écarts types des largeurs mesurées dans les différentes sections d'un même mur restent relativement faibles, et sont inférieurs à 0,2 mm, voire à 0,1 mm, malgré la variation de largeur dans les premiers cordons. Les écarts types des hauteurs mesurées dans les différentes sections des murs augmentent en revanche avec l'augmentation du nombre de couches, passant de moins de 0,1 mm pour la première couche à un peu plus de 0,2 mm dans les murs constitués de 10 couches, ce qui semble montrer que les irrégularités de hauteur formées dans les premières couches ont tendance à s'amplifier avec la superposition des cordons.

4.4. Influence de la vitesse de déplacement sur la géométrie des murs

Afin d'évaluer l'influence de la vitesse de déplacement sur la géométrie des dépôts, des murs formés par la superposition de 2 à 10 cordons ont été déposés, en utilisant le point de fonctionnement 7 de la loi synergique C1360, à trois vitesses de déplacement différentes de 500, 600, et 800 mm/min, et en conservant toujours la stratégie de fabrication déjà mentionnée.

La Figure 4.4.1 montre l'évolution de la hauteur moyenne de la dernière couche déposée en fonction du nombre de cordons superposés pour les trois vitesses de déplacement. Si la hauteur du premier cordon déposé diminue un peu avec l'augmentation de la vitesse d'avance, ce qui avait déjà été décrit dans le chapitre 3, en revanche la variation est moins significative à partir de la troisième couche déposée, la hauteur moyenne de chaque nouvelle couche se stabilisant à une valeur proche de 1,5 mm pour les trois vitesses testées. Quel que soit la vitesse employée, la hauteur moyenne des couches déposées diminue lors des premières couches, et tend à se stabiliser à partir du troisième cordon déposé.

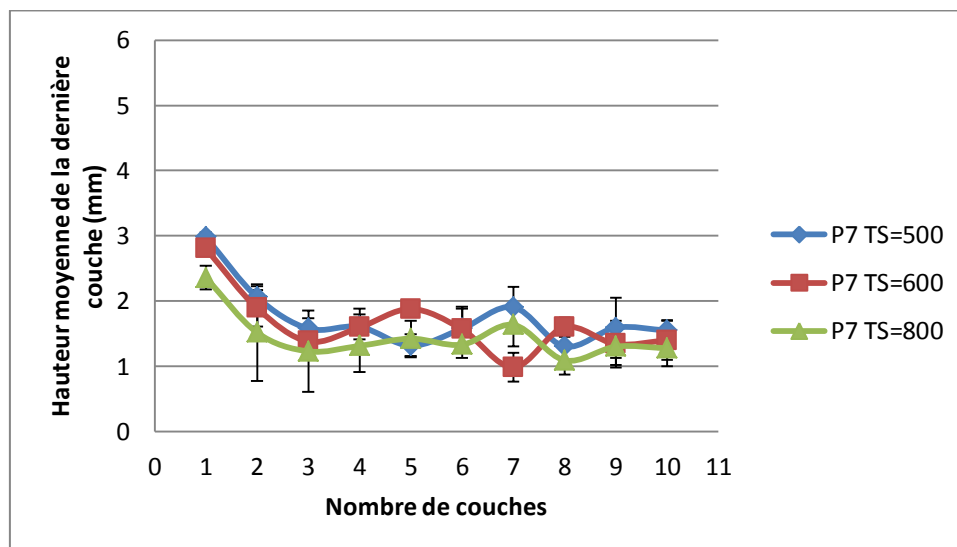


Figure 4.4.1 Evolution de la hauteur moyenne de la dernière couche déposée en fonction du nombre de cordons superposés, pour différentes vitesses de déplacement

La Figure 4.4.2 montre l'évolution de la largeur moyenne des murs en fonction du nombre de cordons superposés, pour les trois vitesses de déplacement. La largeur moyenne des murs varie de façon plus marquée que la hauteur moyenne avec la vitesse de déplacement. Elle diminue en effet de près de 30% lorsque la vitesse augmente de 500 mm/min à 800 mm/min. Quel que soit la vitesse, on observe la même tendance d'augmentation de la largeur moyenne des murs avec la superposition des cordons, sous l'effet de l'accumulation de chaleur déjà discutée. La largeur moyenne des murs se stabilise après la cinquième couche environ.

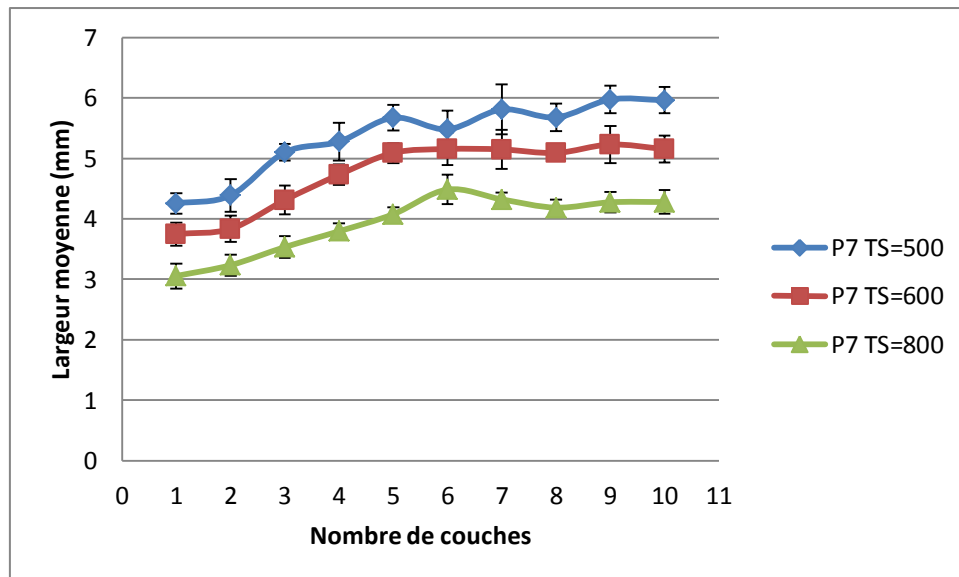


Figure 4.4.2 Evolution de la largeur moyenne des murs en fonction du nombre de cordons superposés, pour différentes vitesses de déplacement.

Les écarts types des hauteurs et largeurs mesurées dans les différentes sections des murs sont assez comparables, quel que soit la vitesse de déplacement, avec des valeurs proches de 0,1 à 0,2 mm, hormis pour la plus grande vitesse de déplacement, pour laquelle l'écart type de la hauteur des premiers cordons est relativement important, avec des valeurs supérieures à 0,5 mm. Ce résultat reflète les fortes ondulations de la surface des cordons formés aux grandes vitesses de déplacement. Cet écart type tend cependant à se réduire avec la superposition des cordons, pour retrouver des valeurs du même ordre que dans les autres murs après la quatrième couche déposée.

4.5. Influence du temps d'attente entre deux couches

Afin de limiter les variations de géométrie des cordons lors de la superposition des premières couches dues à l'accumulation de chaleur, des murs ont aussi été réalisés avec un temps de pause entre deux couches augmenté à 30 secondes, en utilisant le point de fonctionnement 7 et les trois vitesses de déplacement déjà comparées, de 500, 600, et 800 mm/min.

Les Figure 4.5.1 et Figure 4.5.2 montrent les résultats obtenus avec les deux temps de pause. Pour toutes les vitesses de déplacement testées, l'augmentation de la durée du temps de pause entre deux couches produit une augmentation de la hauteur moyenne et une diminution de la largeur moyenne des murs formés. L'augmentation de la largeur moyenne lors du dépôt des premiers cordons est fortement réduite lorsque le temps de pause entre deux couches est de 30 secondes, la largeur restant presque constante pour tous les cordons déposés (Figure 4.8).

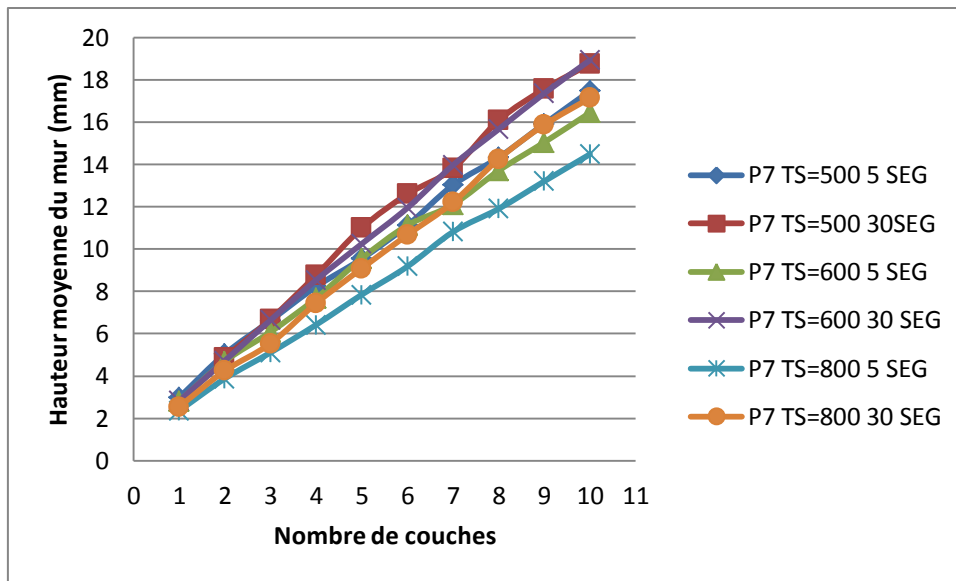


Figure 4.5.1 Evolution de la hauteur moyenne du mur en fonction du nombre de cordons superposés, pour différentes vitesses de déplacement et différents temps de pause entre couches

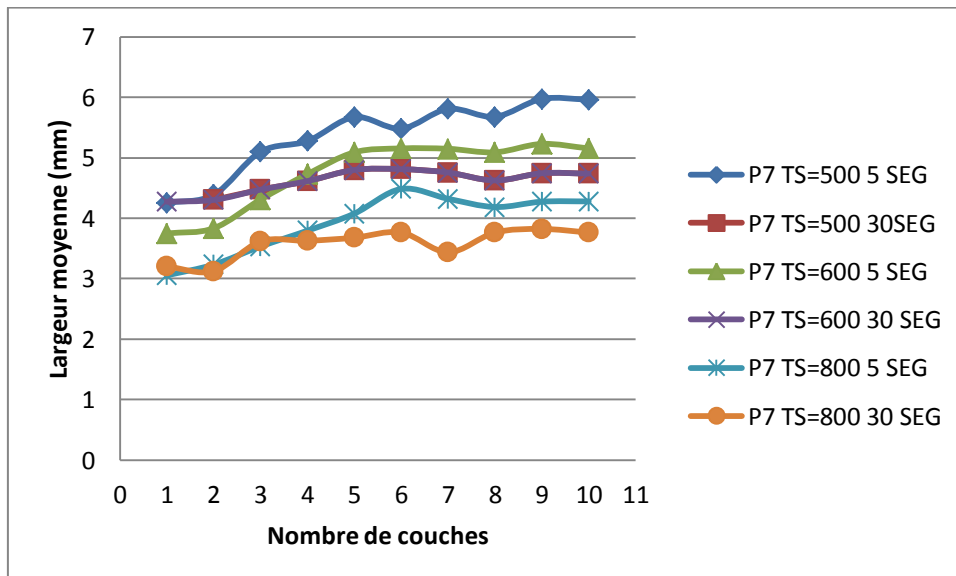


Figure 4.5.2 Evolution de la largeur moyenne des murs en fonction du nombre de cordons superposés, pour différentes vitesses de déplacement et différents temps de pause entre couches

L'augmentation de la durée du temps de pause entre deux couches a également un effet sur les écarts types des hauteurs et largeurs mesurées dans les différentes sections des murs. Les écarts types de la largeur des murs ont tendance à diminuer légèrement avec l'augmentation du temps de pause, du fait que la largeur augmente moins dans les premiers cordons déposés, quel que soit le point utilisé. Les écarts types passent ainsi de valeurs moyennes de 0,2 mm à moins de 0,15 mm lorsque le temps de pause augmente de 5 à 30 s. En revanche, l'écart type de la hauteur n'est pas modifié pour les vitesses de déplacement de 500 et 600 mm/min. Pour la vitesse la plus élevée, de 800 mm/min, l'effet est même négatif, l'écart type augmentant avec la durée du temps de pause pour les murs constitués de plus de 4 cordons superposés. Pour cette vitesse de déplacement, l'écart type de la hauteur de mur est relativement élevé lors du dépôt des premiers cordons, indiquant des ondulations importantes dans la hauteur du mur, sous l'effet d'une vitesse de déplacement trop

élevée, défaut qui peut, si l'augmentation de vitesse se poursuit, conduire au phénomène de humping. Cependant, lorsque le temps de pause entre deux couches est fixé à 5 secondes, l'écart type se réduit avec la superposition des cordons, et la hauteur des murs devient plus régulière. Grâce à l'accumulation de chaleur dans le mur due à la superposition des cordons, le mouillage du dépôt est amélioré, et les irrégularités de hauteur s'atténuent. Pour des temps de pause entre deux couches de 30 secondes, le refroidissement entre couches est plus important, et l'atténuation des ondulations avec l'accumulation de chaleur est donc moins marquée.

4.6. Choix des paramètres de fabrication

Les résultats précédents ont montré que des caractéristiques géométriques de murs variables pouvaient être obtenues selon le point de fonctionnement et la vitesse de déplacement choisis, avec toujours, pour la gamme de vitesses et les points de fonctionnement choisis, des écarts types assez comparables. De manière générale, la largeur moyenne des murs augmente avec la puissance moyenne associée au point de fonctionnement utilisé, et diminue avec l'augmentation de la vitesse de déplacement. Il est donc possible d'obtenir des murs de mêmes largeurs en augmentant à la fois la puissance moyenne, et la vitesse de déplacement, ce qui permet de réduire les temps de fabrication. Ces modifications des paramètres de fabrication peuvent cependant modifier la régularité des murs, si la vitesse de déplacement est trop élevée en particulier. Dans ce paragraphe, nous avons comparé les caractéristiques de trois murs réalisés avec des points de fonctionnement et des vitesses de déplacement différents, choisis de manière à avoir sensiblement les mêmes dimensions de murs.

Les trois points de fonctionnement 5, 6 et 7 déjà étudiés ont été retenus, et utilisés pour fabriquer des murs avec des vitesses de déplacement modérées, afin d'éviter les défauts de type humping pouvant intervenir lorsque les vitesses sont trop élevées. Le point 7, associé à la plus forte puissance moyenne, a été choisi comme référence pour produire un mur de 10 couches à la vitesse de 500 mm/min, en respectant un temps de pause de 30 secondes entre chaque couche.

Pour choisir des vitesses de construction des murs permettant de déposer les mêmes volumes de matière avec les autres points, nous nous sommes basés sur les vitesses de fusion du fil estimées pour ces différents points (cf. Tableau 3.1.1 du chapitre 3). Ces valeurs n'étant qu'indicatives, les volumes déposés ne seront donc pas rigoureusement identiques pour les trois points de fonctionnement.

Le volume de matière déposée étant supposé proportionnel à la vitesse de fusion estimée du fil, qui est respectivement de 2,5 , 3 et 4 m/min pour les points 5, 6 et 7, la vitesse de déplacement à utiliser pour les points 5 et 6 a donc été calculée de manière à conserver un rapport entre cette vitesse de fusion et la vitesse de déplacement constant. Il faut alors choisir une vitesse de déplacement de 312 mm/min pour le point 5, et de 375 mm/min pour le point 6.

La Figure 4.6.1 montre l'évolution de la hauteur des murs construits en fonction du nombre de cordons superposés. On voit que les valeurs restent très proches pour les différents points de fonctionnement. Le point 5 donne des hauteurs un peu plus faibles, ce qui peut s'expliquer par le fait que la vitesse de fusion du fil estimée pour ce point est proche des vitesses mesurées par la suite (cf. Figure 3.1.8 du chapitre 3), alors que les vitesses de fusion mesurées des points 6 et 7 sont supérieures aux valeurs estimées. La prise en compte de ces valeurs mesurées pour calculer la vitesse permettant de déposer un volume de métal déposé équivalent donnerait donc probablement des résultats plus proches encore.

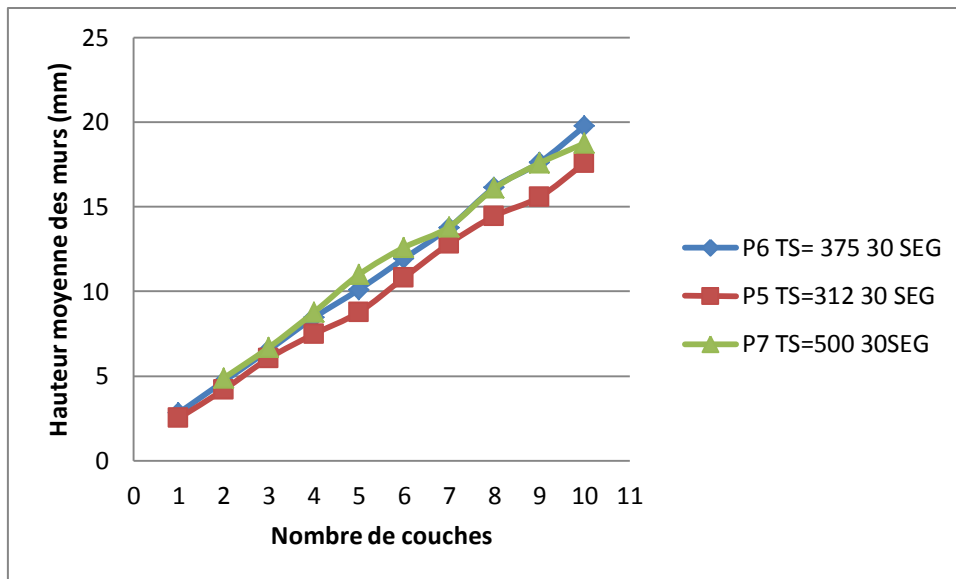


Figure 4.6.1 Evolution de la hauteur moyenne des murs fabriqués avec différents points de fonctionnement, avec un rapport entre vitesse de fusion de fil estimée et vitesse de déplacement constant

Les largeurs des murs fabriqués sont également très proches (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Enfin, l'évolution des volumes déposés en fonction du nombre de cordons superposés est présentée sur la Figure 4.6.3, et montre également des valeurs très proches, avec un volume un peu plus faible pour le point 5.

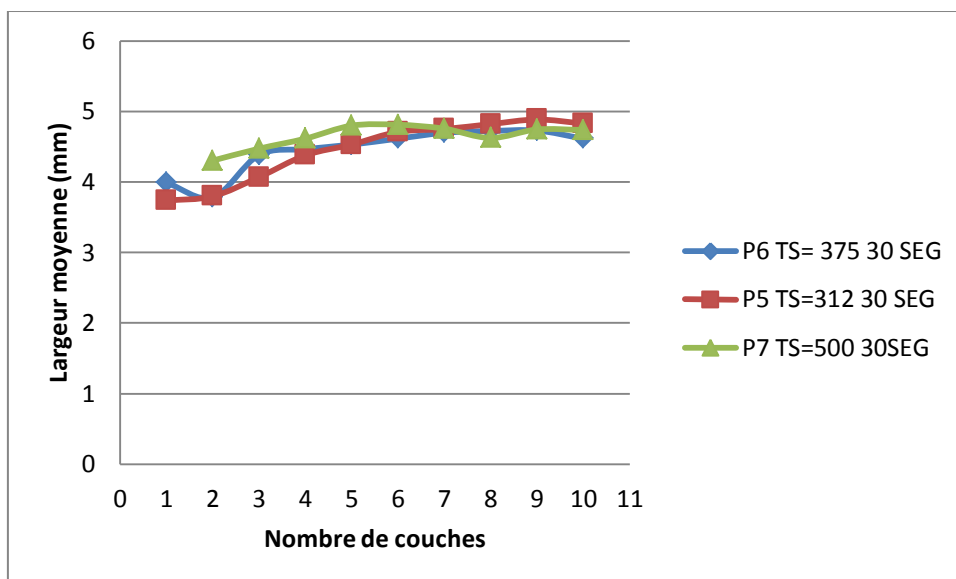


Figure 4.6.2 Evolution de la largeur moyenne des murs fabriqués avec différents points de fonctionnement, avec un rapport entre vitesse de fusion de fil estimée et vitesse de déplacement constant

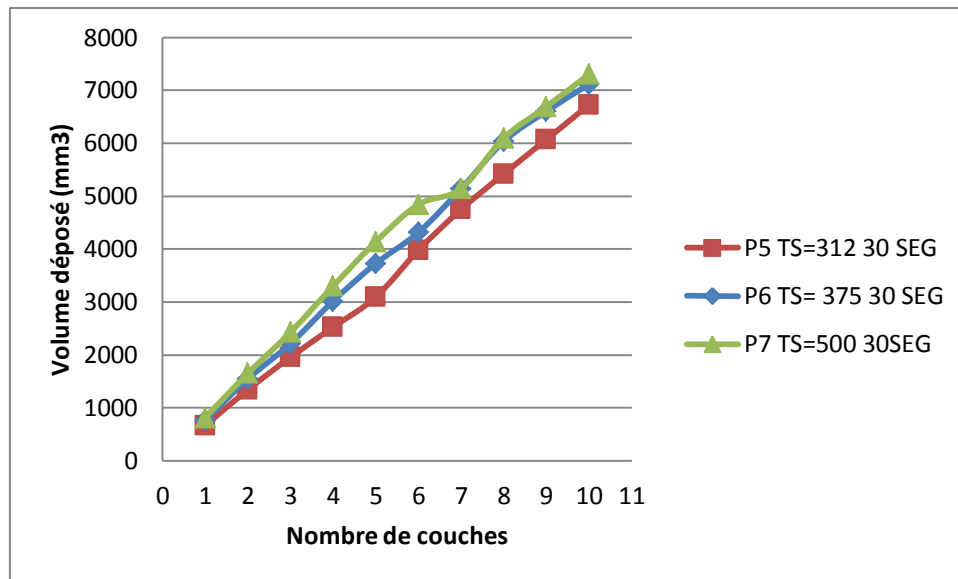


Figure 4.6.3 Evolution du volume des murs fabriqués avec différents points de fonctionnement, avec un rapport entre vitesse de fusion de fil estimée et vitesse de déplacement constant

Si l'on compare maintenant la régularité des murs fabriqués, que l'on peut estimer par les écarts types des mesures de largeurs et de hauteurs dans les différentes sections des murs, on constate que les écarts types pour la largeur sont très proches pour les trois points, avec des valeurs moyennes de 0,15 mm pour le point 5, et de 0,2 mm pour les points 6 et 7. Les écarts types des hauteurs de murs mesurées dans les différentes sections varient un peu plus, avec des valeurs, pour un mur de 10 couches, de moins de 0,15 mm pour le point 5, de moins de 0,2 mm pour le point 6, et d'un peu plus de 0,25 mm pour le point 7.

Ces résultats confirment donc qu'en augmentant à la fois la puissance moyenne, et donc le taux de dépôt, et la vitesse de déplacement, on peut obtenir des géométries de murs identiques, avec une régularité presque équivalente, même si les écarts-types mesurés sont un peu moins bons.

4.7. Fabrication de mur à partir du point de fonctionnement optimisé

Les derniers essais ont été réalisés en utilisant les paramètres procédé du point de fonctionnement optimisé produisant un taux de dépôt maximal, déterminés dans le chapitre 3 (cf. 3.5). Ce point produit un taux de dépôt supérieur à 4 kg/h, contre des taux de dépôt compris entre 1,1 et 2,2 kg/h pour les points de fonctionnement 5 à 7 testés précédemment. La vitesse de déplacement doit alors être plus que doublée pour le point optimisé pour obtenir des dépôts de taille similaire à ceux présentés dans la section précédente. Des murs de longueur identique aux précédents (80 mm) ont ainsi été déposés, à une vitesse de 1200 mm/min, choisie pour conserver un rapport entre taux de dépôt et vitesse de déplacement sensiblement constant par rapport aux point 5 à 7 déjà testés. Afin d'étudier l'influence de la vitesse de déplacement, deux autres vitesses plus élevées ont également été utilisées, de 1500 mm/min et 1700 mm/min. Comme précédemment, la hauteur de translation entre deux couches est fixée à 1,5 mm, et la durée du temps de pause entre deux couches est de 10 secondes.

La Figure 4.7.1 montre les dimensions des murs obtenus après la superposition de dix couches. Le mur réalisé à la vitesse de 1200 mm/min présente une hauteur assez régulière, avec un écart type de 0,2 mm, comparable à ceux mesurés avec les murs fabriqués avec les points de fonctionnement 5 à 7. En revanche, la largeur est beaucoup moins régulière, avec un écart type de plus de 1,5 mm. La largeur moyenne est de plus plus élevée que pour les points 5 à 7, tandis que la hauteur moyenne est plus faible. Ce résultat est principalement dû à une variation importante de la largeur dans les premiers cordons déposés, qui augmente fortement dans le second puis le troisième cordon sous l'effet de l'accumulation de la chaleur, les cordons déjà formés n'ayant pas assez de temps pour se refroidir avant le dépôt d'un nouveau cordon. Les cordons étant plus larges, leur hauteur, à quantité de métal déposée identique, est donc plus faible. Ce phénomène est lié à la forte énergie produite avec le point de fonctionnement optimisé, associée à une grande vitesse de dépôt. Les cordons de 80 mm sont ainsi déposés, avec le point optimisé, en un temps variant entre 2,8 et 4 secondes seulement. Les mêmes cordons étaient déposés en un temps compris entre 10 et 15 secondes avec les points 5 à 7, ce qui laissait plus de temps au cordon pour se refroidir. Une augmentation du temps de pause entre deux couches, ou une augmentation de la longueur des cordons, pourrait alors améliorer la régularité des murs fabriqués avec le point de fonctionnement optimisé.

Des murs constitués par la superposition de 10 couches de longueur 250 mm ont été fabriqués avec le point de fonctionnement optimisé pour vérifier cette hypothèse. Cette augmentation de la longueur des cordons fait passer la durée de chaque dépôt à 12 secondes pour la vitesse de 1200 mm, ce qui laisse plus de temps aux cordons pour se refroidir, même si le temps de pause entre couches a été maintenu à 10 secondes. Les cordons présentent alors un aspect bien plus régulier. Ce résultat n'a cependant pas pu être vérifié par des mesures par manque de temps.

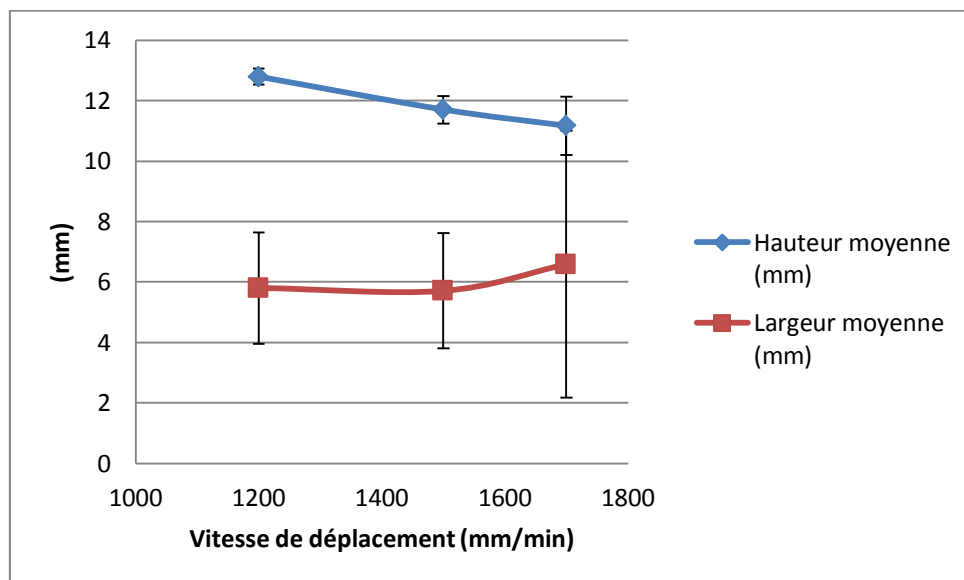


Figure 4.7.1 Evolution de la hauteur moyenne et de la largeur moyenne des murs réalisés avec le point de fonctionnement optimisé en fonction de la vitesse de déplacement

La régularité des murs formés diminue encore lorsque la vitesse de déplacement augmente, comme le montre l'augmentation des écarts types sur la figure Figure 4.7.1. A la vitesse de 1700 mm/min, des fortes irrégularités s'apparentant au phénomène de humping apparaissent même. On observe également une diminution du taux de dépôt lorsque la vitesse de déplacement augmente (Figure 4.7.2). Cette diminution est très limitée lorsque la vitesse augmente de 1200 à 1500 mm/min, mais

devient plus significative à 1700 mm/min. Ce résultat est difficile à expliquer, car l'augmentation de la vitesse de déplacement, en produisant des cordons de hauteur un peu plus faible, accroît légèrement la distance entre le tube contact et la surface de dépôt, puisque la hauteur de translation est la même pour tous les essais. Hors, les résultats présentés au chapitre 3 ont montré que cette évolution devrait au contraire augmenter le taux de dépôt (cf. 3.3.5). Les variations de distance tube-surface sont cependant très faibles ici. On peut les estimer à moins de 2 mm pour les derniers cordons déposés, ce qui ne doit pas avoir un très gros effet sur le taux de dépôt (cf. 3.3.5). On peut aussi supposer qu'une vitesse de déplacement élevée, en limitant l'échauffement du substrat, produit un refroidissement plus important du fil lors des court-circuit, ce qui peut réduire le volume des gouttes formées à son extrémité durant les phases d'arc. Pour une vitesse de déplacement de 1200 mm/min, le taux de dépôt moyen mesuré est de 4,49 kg/h, ce qui représente une augmentation de plus de 25% par rapport au point de fonctionnement standard produisant le plus fort taux de dépôt.

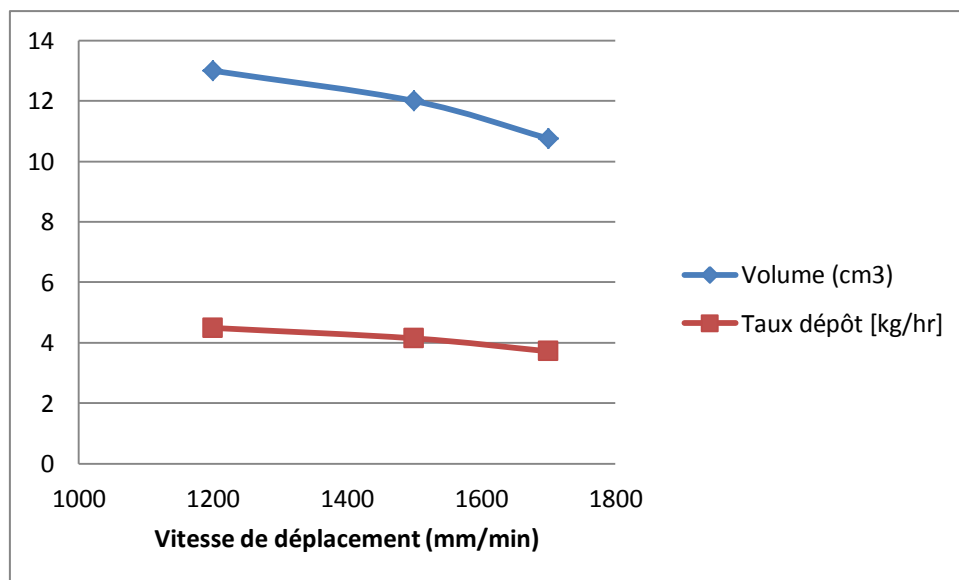


Figure 4.7.2 Evolution du taux de dépôt et du volume de métal déposé dans les murs de 10 couches de longueur 80 mm réalisés avec le point de fonctionnement optimisé, en fonction de la vitesse de déplacement

4.8. Développement d'une méthode de contrôle en ligne du procédé

Dans le chapitre précédent, nous avons identifié les paramètres procédés d'un point de fonctionnement optimisé, permettant d'atteindre des taux de dépôt supérieurs de plus de 25% à ceux des points de fonctionnement standards, prédéfinis dans le microprocesseur du générateur CMT. Ce point de fonctionnement est cependant très proche des limites de stabilité du cycle de transfert en CMT, qui permet de déposer de manière quasi-périodique des gouttelettes de tailles régulières, ce qui produit des dépôts réguliers et sans projections. La qualité des dépôts obtenus avec ces nouveaux réglages peut donc être très dépendante des variations pouvant provenir de l'évolution de la température du substrat, de la morphologie des cordons déposés, ou encore de la variation de la distance entre le tube contact et la surface de dépôt. Les risques de « dérive » vers un régime de transfert moins stable, qui pourrait générer des défauts géométriques, tels que des projections ou des irrégularités de hauteur et de largeur des cordons, sont donc réels.

Nous développons donc dans cette partie une méthode d'analyse des signaux caractéristiques du cycle de transfert en CMT, de manière à détecter à travers l'évolution de ces signaux les dérives responsables de l'apparition de défauts géométriques, et de déclencher une éventuelle action de correction des paramètres de fabrication.

4.9. Les méthodes de contrôle statistique des processus

La surveillance en temps réel de la qualité des processus de fabrication a été développée de manière à éviter les longues inspections et réparations éventuelles post-fabrication, mais aussi à limiter les rebuts de pièces, en détectant au plus tôt les dérives du procédé.

Dans le cas des procédés de soudage à l'arc automatiques en particulier, de nombreux systèmes de suivi en ligne ont été développés pour détecter les dérives de qualité des soudures, basés par exemple sur des techniques d'imagerie optique [107], de caméra infrarouge [148], ou de contrôles par ultrasons [105]. Ces méthodes développées en laboratoire nécessitent cependant des appareils souvent coûteux et très sensibles à leur environnement, qui sont parfois difficilement utilisables en environnement industriel.

Des méthodes plus simples, basées sur la simple analyse des signaux électriques produit par le générateur de soudage à l'arc, existent aussi, et sont les plus répandues, malgré leurs limites en terme de détection de certains types de défaut. Ces méthodes ne peuvent cependant être transposées au procédé CMT, en raison de la complexité des formes d'onde de courant et de tension caractéristiques du procédé CMT. Il est donc nécessaire, avant de développer ces méthodes, d'identifier les caractéristiques des signaux électriques dont l'analyse est pertinente pour détecter une dérive potentielle et l'apparition de défauts.

Avant de mener cette analyse, le principe de la méthode de contrôle statistique des procédés, ou maîtrise statistique des procédés MSP (Statistical Process Control ou SPC en anglais), qui sera appliquée par la suite au procédé CMT, est décrit. La MSP est une méthode utilisant des données statistiques issues de mesures relatives à certaines caractéristiques du procédé ou des produits pour identifier les causes particulières de variation dans un processus de fabrication [149], [150]. Il permet d'analyser le processus en question à partir de cartes de contrôle statistique caractérisant l'évolution dans un intervalle de temps donné de la mesure d'une caractéristique de qualité. En effet, tous les processus, quels qu'ils soient, ne peuvent produire toujours exactement le même résultat. Quelle que soit le phénomène observé, on note toujours une dispersion dans la répartition de la caractéristique. Ces variations proviennent de l'ensemble du processus de production.

La méthode de maîtrise statistique des procédés a ainsi pour objectif la maîtrise des processus en partant de leurs variations, en utilisant des outils méthodologiques qui vont aider à améliorer la qualité du processus. Cette méthode peut être utilisée pour n'importe quel processus de fabrication industriel.

4.9.1. Analyse de la forme de la dispersion

Tout phénomène pouvant être quantifié par une ou plusieurs caractéristiques subit des variations plus ou moins importantes, qui modifient ces caractéristiques. La loi la plus employée pour modéliser ces dispersions dans un système soumis à de nombreux facteurs indépendants les uns des autres, est la loi normale, ou loi de Gauss (Equation 4.1), qui est une courbe en forme de « cloche » centrée sur

la valeur moyenne μ de la caractéristique (Figure 4.9.1). La largeur de la courbe est caractérisée par l'écart type σ .

$$n(x) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.1)$$

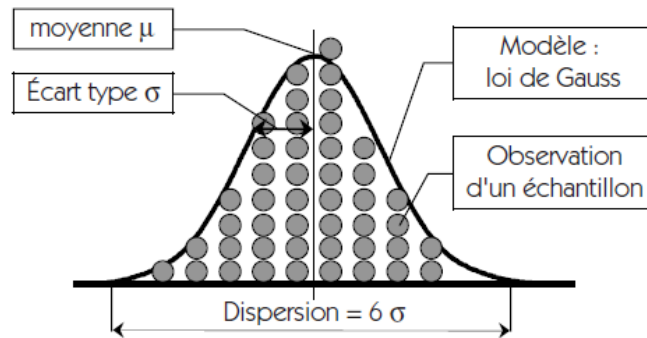


Figure 4.9.1 Représentation de la forme de la loi normale, ou loi de Gauss [150]

Si l'on étudie un échantillon d'évènements du phénomène étudié, la valeur moyenne (notée $\bar{X}$) de la caractéristique retenue de l'échantillon peut être comparée à la moyenne μ de la caractéristique du phénomène, ou à une valeur cible choisie, afin de vérifier la qualité du réglage du phénomène.

De la même façon, l'écart type des valeurs de la caractéristique retenue calculé sur l'échantillon étudié caractérise la dispersion de l'échantillon, et peut être comparé à des valeurs cibles, ou à l'écart type caractérisant le phénomène. La dispersion peut aussi être déterminée à travers des intervalles de fluctuation autour de la valeur moyenne. L'intervalle des valeurs comprises entre $\mu-3\sigma$ et $\mu+3\sigma$ englobe par exemple 99,7 % des évènements, et est souvent assimilé à la largeur de la courbe (Figure 4.9.3 Représentation des limites naturelles d'un processus. [150])

).

4.9.2. Principe de la carte de contrôle : limites naturelles d'un processus

L'objectif de la MSP est de mettre le processus étudié « sous contrôle », c'est-à-dire faire en sorte que les caractéristiques de contrôle des échantillons issus du processus suivent une distribution pouvant être décrite par une loi normale centrée sur la valeur cible. Dans un processus « hors contrôle » au contraire, les caractéristiques des échantillons ne suivent pas nécessairement une courbe en cloche, ou bien suivent une distribution qui n'est pas centrée sur la valeur cible.

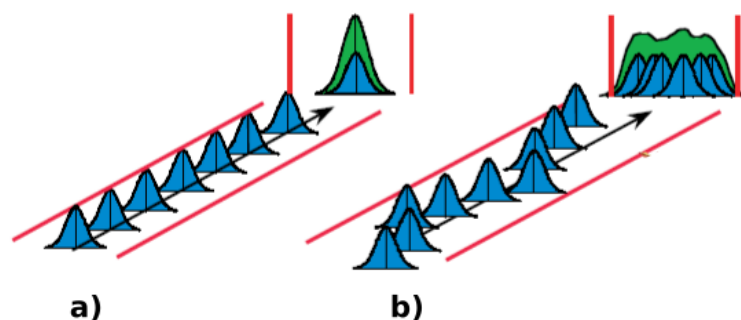


Figure 4.9.2 Représentation schématique des distributions de caractéristiques a) pour un processus "sous contrôle", b) pour un processus "hors contrôle" [150]

Pour détecter la dérive éventuelle d'un processus sous contrôle vers un processus hors contrôle par le suivi de la valeur des caractéristiques, il faut cependant tenir compte des limites naturelles du processus, c'est-à-dire prendre en compte le fait que le processus, même bien réglé, ne fournit pas des caractéristiques identiques, mais une distribution de valeurs de ces caractéristiques, supposée suivre une loi normale, centrée sur la valeur moyenne. Les limites naturelles du processus peuvent alors être définies par la largeur de cette distribution, que l'on peut caractériser par 3 fois l'écart type de la distribution, 99,7% des valeurs de la distribution se situant à l'intérieur de cet intervalle. Tant que les valeurs de caractéristiques mesurées sont dans ces limites, il n'y a pas de raison d'agir sur le processus, car on risquerait de décentrer un processus bien centré. Si en revanche plusieurs valeurs sortent de ces limites, il y a une forte probabilité que le processus ne soit plus centré sur la cible, il faut alors le recentrer en modifiant les paramètres du processus. Cette décision peut être prise à partir de cartes de contrôles.

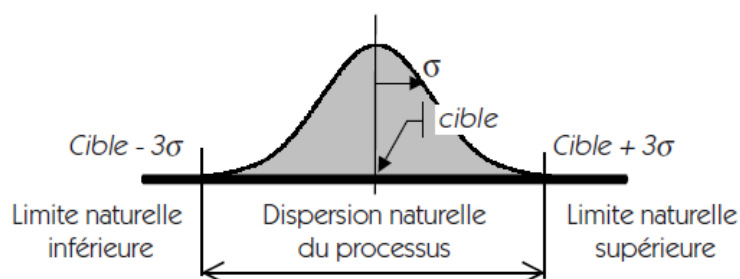


Figure 4.9.3 Représentation des limites naturelles d'un processus. [150]

4.9.3. La carte de contrôle

Le principe de la carte de contrôle a été initié par W. Shewhart [151] au début des années 1920, dans le but d'aider à détecter si un processus se trouve sous contrôle ou pas. La carte de contrôle peut être assimilée à un feu de circulation, dont le fonctionnement est basé sur des mesures de caractéristiques provenant d'échantillons de processus, réalisées de façon continue ou à des intervalles aléatoires. Un feu vert est donné lorsque le processus doit être autorisé à fonctionner sans ajustement, seules des variations des caractéristiques causées par les fluctuations naturelles du processus étant présentes. Un feu orange apparaît lorsqu'un problème est possible. Le feu rouge indique qu'il n'y a pratiquement aucun doute que les variations des caractéristiques observées ne sont pas dues aux fluctuations naturelles du processus, ce qui risque de le conduire à l'échec [149].

Il existe différents types de cartes de contrôle, chacun ayant un but spécifique [149]. Les cartes de contrôle les plus fréquemment utilisées sont basées sur le calcul de deux paramètres statistiques : la moyenne sur un échantillon donné des caractéristiques mesurées est comparée avec la valeur cible pour la caractéristique en question, et l'étendue, c'est-à-dire la différence entre les valeurs maximales et minimales de la caractéristique, permet d'évaluer la dispersion de la caractéristique sur l'échantillon considéré. Le résultat de ces calculs peut alors être donné sous la forme d'une représentation graphique, comparant les paramètres statistiques mesurés sur chaque échantillon avec les valeurs cible et les limites naturelles du processus (Figure 4.9.4).

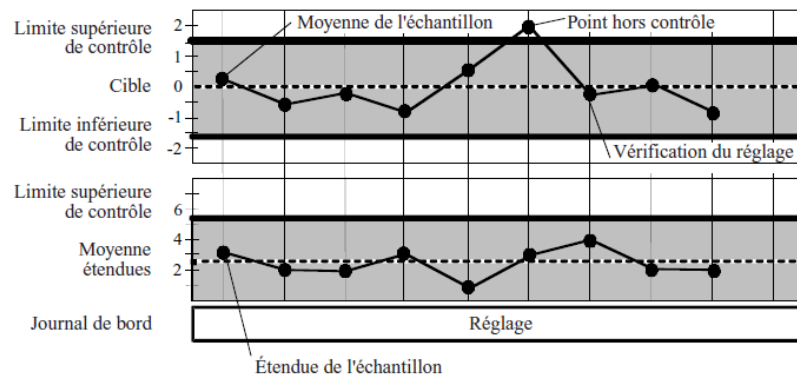


Figure 4.9.4 Représentation graphique d'une carte de contrôle montrant les valeurs moyennes de caractéristique et l'étendue de ces valeurs pour chaque échantillon [150]

Sur la carte des moyennes de la Figure 4.9.4, la ligne en pointillé matérialise la valeur sur laquelle on souhaite être réglé (la cible). La ligne supérieure, ou « limite supérieur de contrôle » (LSC), et la ligne inférieure, ou « limite inférieure de contrôle » (LIC) pour les moyennes », sont choisies en fonction des limites naturelles du processus, et déterminent la zone dans laquelle doivent se situer les valeurs portées sur la carte. Si un point sort de la carte de contrôle, il faudra intervenir en modifiant les réglages du processus.

La carte des étendues de chaque échantillon est tracée selon le même principe, et est comparée à une « limite supérieur de contrôle » pour les étendues, choisie également en fonction des limites naturelles du processus (Figure 4.9.4). Si un point de la carte dépasse cette limite, la dispersion du processus est considérée trop importante, et une modification des réglages du processus peut être nécessaire.

Il est parfois possible de détecter les problèmes affectant un processus même si les limites de contrôle n'ont pas été dépassées. La Figure 4.9.5 montre différents graphiques de contrôle qui sont devenus populaires dans les livres de statistiques [152], indiquant des comportements anormaux dans les processus, qui ne conduisent pas toujours à des valeurs hors limites sur la carte de contrôle, mais sont révélateurs de risques potentiels.

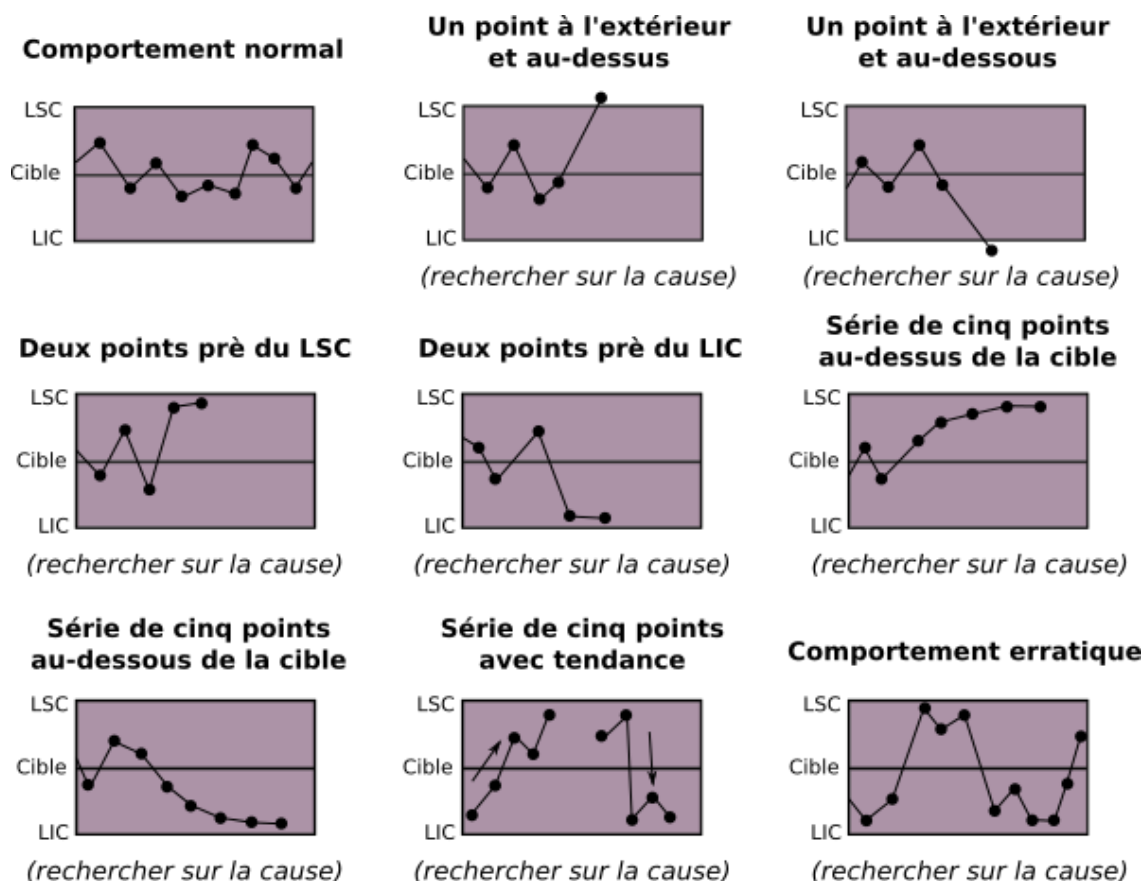


Figure 4.9.5 Exemples de cartes de contrôle de processus révélant des situations anormales dans le comportement des échantillons [152]

4.9.4. Calcul des moyennes et étendues de la carte de contrôle

Afin de pouvoir tracer la carte de contrôle d'un processus, un échantillonnage doit être réalisé, c'est à dire que les données résultant de ce processus doivent être rassemblées en sous-groupes constituant chacun un échantillon. Chaque échantillon est alors constitué d'un ensemble n de mesures de la ou des caractéristiques analysées. La moyenne des mesures pour chaque échantillon i est alors calculée selon la relation :

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (4.9.1)$$

Avec :

- $\bar{x}_i$ La moyenne du sous-groupe i
- n La taille de l'échantillon du sous-groupe i

On peut montrer, d'après le théorème de la limite centrale, que les moyennes des sous-groupes sont normalement distribuées, quelle que soit la distribution des mesures individuelles à partir desquelles les moyennes ont été calculées. La moyenne des moyennes et l'écart type des moyennes peuvent alors être calculés selon les relations (4.9.2) et (4.9.3).

$$\mu = \bar{\bar{x}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \bar{x}_i \quad (4.9.2)$$

$$\sigma_{\bar{x}} = \sigma / \sqrt{n} \quad (4.9.3)$$

Où :

- $\bar{x}_i$ La moyenne de chaque sous-groupe
- $\mu, \bar{\bar{x}}$ La moyenne de la moyenne des sous-groupes
- σ L'écart type des données de tous les échantillons
- $\sigma_{\bar{x}}$ L'écart type des moyennes
- n La taille de l'échantillon du sous-groupe
- k Le nombre de sous-groupes

Les équations (4.9.1) et (4.9.2) permettent de déduire la relation 4.4 pour le calcul de la valeur $\sigma_{\bar{x}}$:

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{k \sum_{i=1}^k \bar{x}_i^2 - \left[\sum_{i=1}^k \bar{x}_i \right]^2}{k(k-1)}} \quad (4.9.4)$$

Les limites naturelles du processus ont été définies de la façon suivante :

$$\text{Limites de contrôle naturelles} = \bar{\bar{x}} \pm 3\sigma_{\bar{x}} \quad (4.9.5)$$

Pour tracer la carte de contrôle des étendues, il faut tout d'abord calculer l'étendue R de chaque échantillon, définie comme la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale des mesures de l'échantillon, ou sous-groupe i :

$$R_i = x_{\max_i} - x_{\min_i} \quad (4.9.6)$$

Où $x_{\max_i}$ est la valeur maximale des mesures dans le sous-groupe et $x_{\min_i}$ est la valeur minimale des mesures dans le sous-groupe.

Les limites de contrôle pour les étendues sont calculées à l'aide des relations suivantes :

$$\text{Limite supérieure de contrôle} = D_4 \bar{R} \quad (4.9.7)$$

Où $\bar{R}$ est la moyenne des écarts mesurés sur chaque échantillon ou sous-groupe :

$$\bar{R} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k R_i \quad (4.9.8)$$

et D_4 et D_3 sont donnés par les relations :

$$D_4 = 1 + 3 d_3/d_2 \quad (4.9.9)$$

$$D_3 = 1 - 3 d_3/d_2 \quad (4.9.10)$$

Les constantes d_2 et d_3 sont fonction de la taille du sous-groupe. Leur valeurs sont données sous forme de tableau dans la plupart des ouvrages traitant de statistiques [149].

4.9.5. Sélection de la taille et fréquence des échantillons

Deux facteurs très importants pour la méthode de MSP correspondent à la taille et à la fréquence des échantillons. Le choix de la taille se fait en respectant deux conditions :

1. Les échantillons de chacun des sous-groupes doivent être produits dans des conditions très similaires, sur un très court intervalle de temps.
2. La taille des échantillons doit demeurer constante pour tous les sous-groupes.

Le but du prélèvement étant de donner une image du processus sans pour autant mesurer toutes les données issues d'un processus, il faut que la fréquence d'échantillonnage donne une image la plus juste possible du processus.

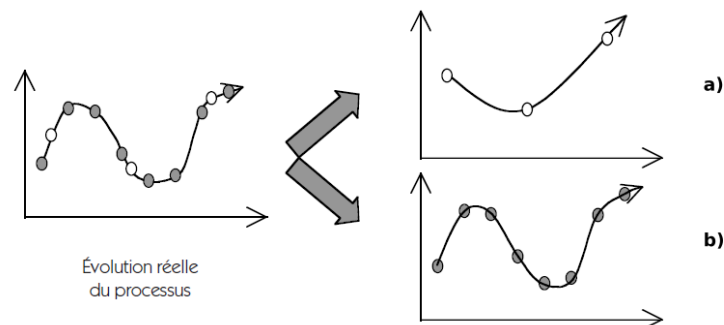


Figure 4.9.6 Incidence de la fréquence d'échantillonnage [149]

La Figure 4.9.6 montre que la solution b) décrit d'une meilleure façon le processus en comparaison avec la solution a). On remarque également qu'une fréquence plus élevée ne donnerait que peu d'informations supplémentaires. Certains auteurs proposent la règle empirique suivante : *la fréquence des actions correctives sur un processus doit être au moins quatre fois plus faible que la fréquence de prélèvement* [149].

4.9.6. Identification des variables représentatives de la stabilité du processus

Le procédé de soudage CMT crée, s'il est bien réglé, des dépôts réguliers, constitués des cordons ayant des largeurs et hauteurs relativement constantes, les écarts types mesurés étant de l'ordre de 0,1 à 0,2 mm en moyenne. Cependant, pour certains choix de paramètres, en particulier pour des vitesses de déplacement élevées, de plus fortes irrégularités géométriques peuvent apparaître, conduisant au phénomène de humping dans les cas extrêmes.

D'autre part, afin de gagner en productivité avec la technologie WAAM, les taux de dépôts maximum sont recherchés, ce qui conduit à ce placer généralement tout près des limites de stabilité du procédé, c'est-à-dire les limites assurant un transfert régulier de gouttelettes de métal fondu lors des court-circuit contrôlés. Les réglages permettant d'atteindre ces taux de dépôt maximum correspondent alors à des puissances électriques moyennes élevées, avec des risques de projections importants, pouvant générer des pertes de matière et des défauts géométriques si ces projections viennent se déposer sur les parties de la pièce déjà construites. Ces réglages optimisant le taux de dépôt pourront aussi être associés à des vitesses de déplacement élevées, pour éviter de former des dépôts de trop forte largeur, et les risques d'apparition de défauts géométriques sont alors accrus. Afin de garantir la qualité des pièces fabriquées et limiter les rebus, tout en optimisant la productivité, il est donc important de pouvoir suivre, si possible en continu, les caractéristiques des cordons déposés, de manière à détecter au plus tôt l'apparition de défauts géométriques et corriger les réglages du procédé avant qu'ils ne s'amplifient.

La mesure en cours de fabrication des évolutions géométriques des cordons déposés demeure délicate, même si des techniques, à base d'imagerie optique ou thermique notamment, peuvent être développées. Ces méthodes sont cependant relativement coûteuses et d'une utilisation complexe. Une alternative consiste alors à utiliser des méthodes indirectes, basées sur l'analyse de caractéristiques facilement accessibles, telles que celles issues de l'enregistrement des courant et tension au cours de la fabrication, et de tenter de les corrélérer à l'apparition des défauts géométriques. Les formes d'onde de courant et d'intensité ont déjà été employées pour identifier les modes de transfert et la stabilité du procédé en soudage à l'arc GMAW [153]. Cependant, dans le cas du procédé de soudage CMT, les formes d'ondes très particulières du courant et de la tension associées au cycle de transfert CMT rendent l'analyse plus complexe, le choix des variables à étudier étant multiple. Il est alors nécessaire de posséder une bonne compréhension des phénomènes pour choisir celles qui sont les plus pertinentes. Toute irrégularité dans les signaux ne conduit en effet pas nécessairement à l'apparition de défauts géométriques visibles sur les cordons.

La Figure 4.9.7 présente des exemples d'enregistrements de tension et d'intensité caractéristiques du cycle CMT. Un signal stable comme celui présenté sur la Figure 4.9.7a conduit toujours à la formation d'un cordon régulier, présentant de faibles variations de hauteur et de largeurs, avec des écarts types inférieurs à 0,1 ou 0,2 mm. Le signal de la Figure 4.9.7b montre en revanche des irrégularités traduisant une instabilité du transfert des gouttelettes de métal. Il s'agit dans le cas présent d'un réglage conduisant à une l'énergie produite durant les phases d'arc insuffisante, et certaines gouttelettes se séparent mal du fil lors des court-circuit, produisant ces irrégularités du signal. Cependant, ces instabilités de transfert ne conduisent pas nécessairement à l'apparition de défauts géométriques visibles. En effet, si les irrégularités observées ne concernent que quelques cycles de transfert isolés, les quelques gouttelettes concernées n'affectent pas la géométrie globale du cordon, le bain liquide formé lors du dépôt, avant qu'il ne se solidifie, étant constitué de plusieurs dizaines de gouttelettes mélangées. Il faut donc en général une succession d'instabilités du cycle de transfert pour produire des défauts géométriques visibles.

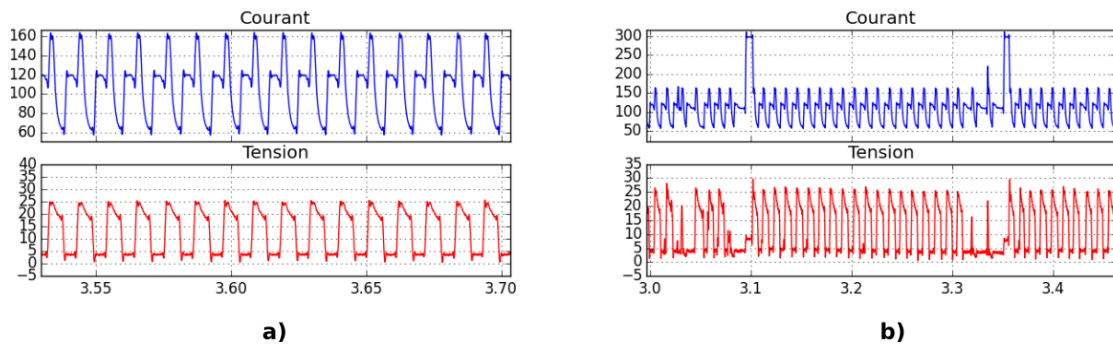


Figure 4.9.7 Evolutions du courant et de la tension du procédé CMT, montrant a) un signal régulier représentatif d'un régime de transfert stable, b) un signal irrégulier indiquant un régime de transfert instable.

Plusieurs caractéristiques des signaux électriques peuvent être analysées pour tenter de mettre en évidence l'apparition de défauts. Les caractéristiques les plus accessibles sont les tensions et intensités moyennes, calculées sur une période donnée. On peut cependant craindre que ces valeurs moyennes ne soient pas suffisantes pour révéler l'apparition de défauts, car elles ne tiennent pas compte de la spécificité des formes d'ondes du cycle CMT, qui produit des variations « naturelles » des tensions et intensités.

Pour pouvoir analyser de manière plus précise les signaux électriques enregistrés, le suivi des caractéristiques de chacune des phases du cycle CMT doit être réalisé. Chaque phase du cycle CMT (phases d'arc chaud, d'arc froid et de court-circuit) peut se caractériser par son intensité moyenne, sa tension moyenne et sa durée. Rappelons que la fréquence des cycles est un peu inférieure à 100 Hz, ce qui permet donc d'obtenir pour chacune de ces caractéristiques près de 100 mesures pour chaque seconde de dépôt. Les signaux de tension et d'intensité enregistrés ont donc été traités selon l'algorithme décrit dans le chapitre 3 (cf. 3.3.2), de manière à séparer les trois phases du cycle et à calculer leurs caractéristiques, pour chacun des cycles correspondant au dépôt d'un cordon réalisé avec des paramètres procédé fixés.

L'analyse des résultats obtenus a montré que l'évolution des intensités moyennes des différentes phases au cours des cycles n'était pas la caractéristique la plus pertinente pour observer l'apparition de défauts géométriques. En effet, l'intensité des phases d'arc chaud et de court-circuit est relativement régulière à chaque cycle, et suit assez fidèlement les valeurs de consignes I_{boost} et I_{sc2} . En revanche, l'intensité de la phase d'arc froid est moins régulière, mais ses fluctuations naturelles, observées sur des cordons réguliers, sont du même ordre que les variations observées dans le cas de cordons présentant de fortes irrégularités géométriques.

Les évolutions au cours des différents cycles de la tension moyenne ainsi que de la durée de la phase d'arc froid, sont en revanche des informations beaucoup plus pertinentes pour révéler la formation d'un défaut géométrique. Les figures Figure 4.9.8 et Figure 4.9.9 montrent l'évolution de la tension moyenne et de la durée des phases d'arc froid, respectivement pour un cordon régulier et pour un cordon irrégulier présentant de fortes ondulations. On peut ainsi constater en comparant les deux figures que lorsque des fluctuations de hauteur du cordon apparaissent, sous l'effet en particulier d'une vitesse de déplacement trop élevée ou d'une énergie produite par les phases d'arc trop faible, une augmentation de la tension moyenne des phases d'arc et de la durée de la phase d'arc froid est observée dans les zones où les cordons sont les plus hauts. La tension moyenne des phases d'arc et la durée de la phase d'arc froid diminuent en revanche lorsque le cordon forme un « creux ».

Le produit de la tension moyenne avec la durée de la phase d'arc froid constitue également une bonne caractéristique pour le suivi de la géométrie des cordons, car il reflète relativement fidèlement les variations de hauteur des cordons (Figure 4.9.8 et Figure 4.9.9). Ce paramètre caractérise les variations d'énergie des phases d'arc, qui dépendent principalement de la phase d'arc froid, puisque les durées et intensités des phases d'arc chaud ne varient quasiment pas.

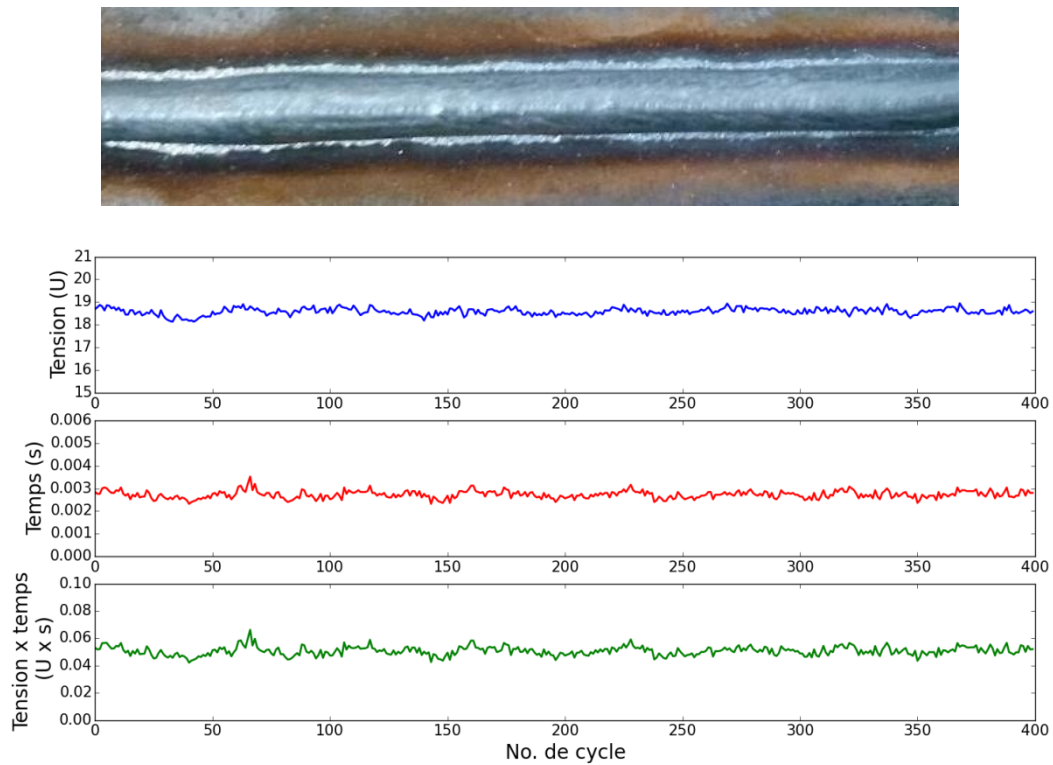


Figure 4.9.8 Evolution de la tension moyenne, de la durée, et du produit tension moyenne x durée des phases d'arc froid, pour un cordon régulier (point de fonctionnement 7 avec une vitesse de déplacement de 500 mm/min)



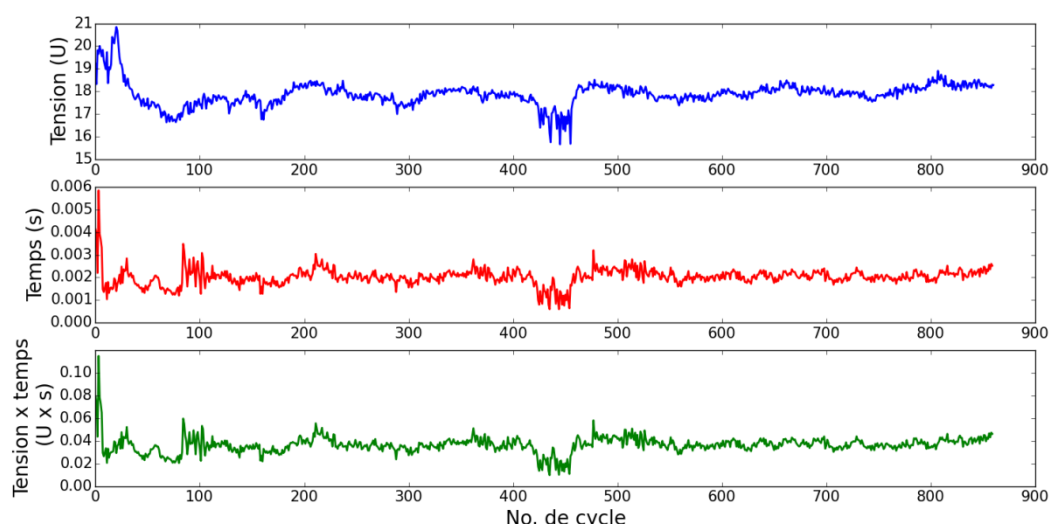


Figure 4.9.9 Evolution de la tension moyenne, de la durée, et du produit tension moyenne x durée des phases d'arc froid pour un cordon irrégulier (paramètres du point de fonctionnement 7 avec une diminution de l'intensité I_{boost} à 100A et une vitesse de déplacement de 500 mm/min)

4.9.7. Calcul des limites naturelles du processus

Nous avons finalement retenu comme variables de contrôle pour suivre la régularité géométrique des cordons la tension moyenne et la durée des phases d'arc froid, que nous appellerons U_w et t_w , ainsi que le produit $P_w = U_w \cdot t_w$.

Afin de calculer les limites naturelles du processus pour les différentes variables caractérisant les phases d'arc froid, nous avons retenu les réglages du point de fonctionnement 7 de la loi synergique C1360, à la vitesse de déplacement de 500 mm/min, qui donne des cordons réguliers sans défauts géométriques, hormis au début du cordon. Afin de ne pas fausser les mesures des limites naturelles du processus, seule la partie centrale du cordon, dans la partie où il est vraiment régulier, a été considéré. Les signaux des courant et de tension dans ces zones ont été traités selon l'algorithme décrit dans le chapitre 3, afin d'en extraire les tensions moyennes et durées moyennes des phases d'arc froid de chacun des cycles. Les valeurs moyennes et les écarts types de ces caractéristiques, ainsi que les moyennes et écarts types des produit $U_w \cdot t_w$ calculées, pour un cordon de longueur de 80mm, sont rassemblées dans la Tableau 4.9.1.

		P6	P7	P13
Tension moyenne phase d'arc froid U_w (V)	Moyenne	19,28	18,59	19,58
	Ecart type	0,144	0,147	0,308
Durée phase d'arc froid t_w (ms)	Moyenne	4,19	2,72	2,68
	Ecart type	0,164	0,17	0,068
$P_w = U_w \cdot t_w$	Moyenne	80,82	50,65	76,36

(V.ms)	Ecart type	3,256	3,25	7,350
--------	------------	-------	------	-------

Tableau 4.9.1 Moyennes et écarts types des variables de contrôles retenues, calculées pour des cordons réguliers

Nous supposons par la suite que les fluctuations naturelles du processus pour les variables de contrôle retenues peuvent être caractérisées par les écarts types calculés pour le point de fonctionnement 7, quel que soient les paramètres de réglage procédé choisis. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons calculé les écarts types des variables de contrôle mesurées pour deux autres points de fonctionnement standards donnant des cordons réguliers, le point de fonctionnement 6 de la loi synergique C1360, qui correspond à des puissances et des taux de dépôt assez proches de ceux du point 7, et le point de fonctionnement 13 de la synergie C1355, qui fournit une puissance et un taux de dépôt bien plus élevés. Les valeurs des écarts types mesurés, données dans le Tableau 4.9.1, montrent que les fluctuations des variables de contrôle retenues sont effectivement très comparables pour les points 6 et 7. En revanche, l'écart type pour la tension moyenne de la phase d'arc froid est environ deux fois plus élevé pour le point 13, tandis que l'écart type pour la durée de cette phase est plus de deux fois plus faible. Nous retiendrons cependant par la suite les écarts types calculés pour le point de fonctionnement 7 pour étudier la stabilité des autres réglages.

4.9.8. Cartes de contrôle de cordons réguliers

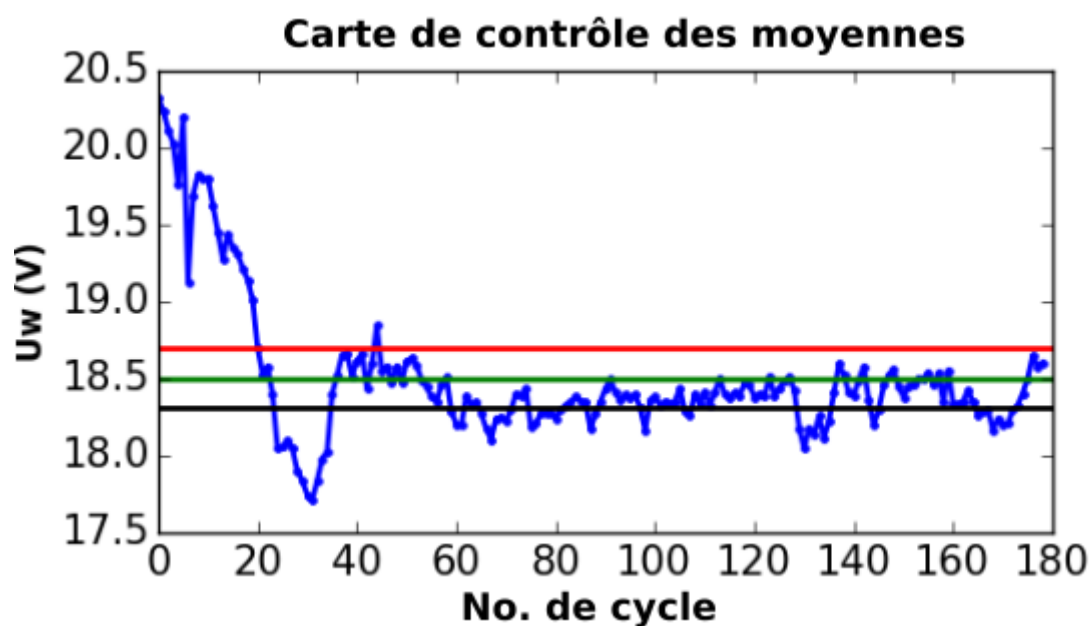
La carte de contrôle est une représentation graphique de l'évolution de la variable de contrôle retenue au cours du processus. Cette variable de contrôle est moyennée sur un échantillon, ou sous-groupe, dont la taille doit être fixée.

Pour les variables de contrôle retenues, qui sont déjà moyennées sur la durée de la phase d'arc froid, une taille d'échantillon réduite de 5 mesures a été choisie. Toutes les valeurs des caractéristiques de la phase d'arc froid mesurées pour les différents cycles sont regroupées en échantillons de 5 mesures successives, et chaque moyenne d'échantillon est calculée. Les étendues de ces caractéristiques pour chaque échantillon ne sont pas présentées, car aucune corrélation nette n'a pu être mise en évidence entre ces paramètres et la formation éventuelle de défauts géométriques.

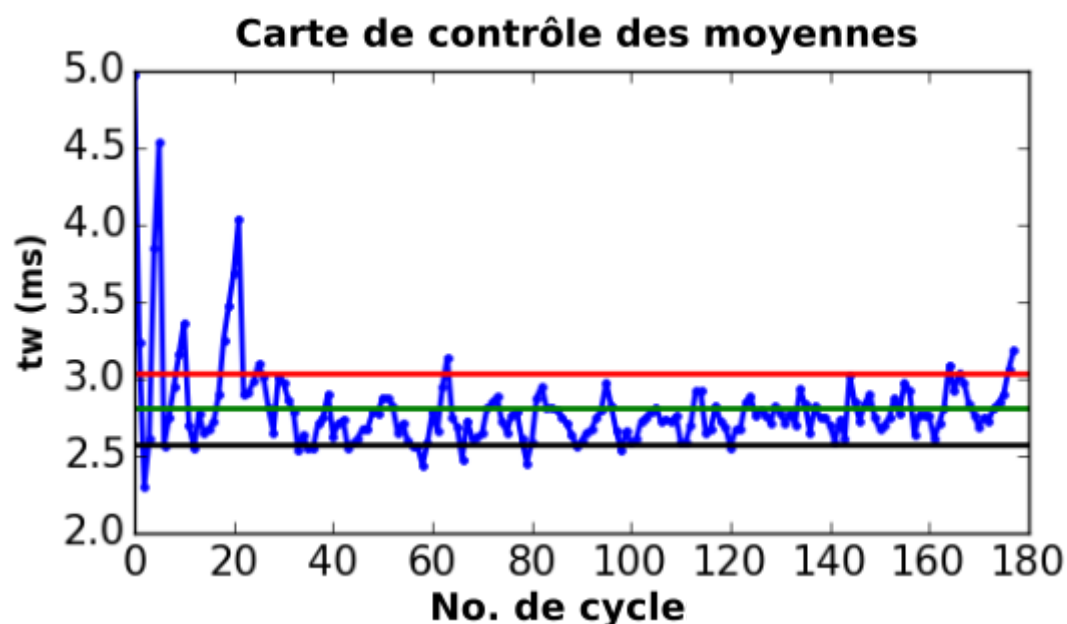
La moyenne de chaque échantillon est alors comparée sur la carte de contrôle aux limites de contrôle choisies pour le processus. Comme la moyenne de la variable de contrôle du processus varie selon le réglage du procédé (cf. Tableau 3.1.1), nous avons choisi de fixer les limites de contrôle relativement à la moyenne des mesures pour chaque réglage. Les limites de contrôles supérieures et inférieures sont données respectivement par les relations $\mu - 3\sigma$ et $\mu + 3\sigma$, μ étant la moyenne de la variable de contrôle calculée à partir des moyennes par échantillon selon la relation 4.2, et σ étant l'écart type calculé selon la relation 4.3 en utilisant les valeurs obtenues pour le point de fonctionnement 7 (Tableau 4.9.1).

La Figure 4.9.10 montre une carte des 3 variables de contrôle retenues, avec les limites de contrôle fixées précédemment, pour le point de fonctionnement standard 7, qui donne un cordon régulier. On peut constater que bien que le cordon soit régulier, certains points sortent des limites de contrôles fixées. La tension U_w est la variable de contrôle qui sort le plus fréquemment des limites de contrôle fixées (Figure 4.9.10a). On constate aussi sur cette carte de contrôle que la phase d'amorçage, qui crée des défauts géométriques, augmente fortement cette variable de contrôle, ce qui augmente la moyenne de la variable, et décale de ce fait les limites de contrôle vers les valeurs hautes, puisque

ces dernières sont centrées par rapport à la moyenne des moyennes mesurées pour chaque échantillon. De ce fait, le nombre de points hors limite situés sous la limite inférieure est augmenté, sans que cela ne soit forcément représentatif de défauts géométriques. La durée tw moyenne par échantillon révèle aussi par ses variations le défaut géométrique en début de cordon. Ce défaut se manifeste, dans le cas de la variable de contrôle tw , par de fortes oscillations, ce qui modifie beaucoup moins la moyenne des moyennes par échantillon, et donc la position des limites de contrôle. De ce fait, beaucoup moins de points passent au-dessous de la limite de contrôle inférieure avec la variable tw qu'avec la variable Uw . La variable de contrôle Pw montre sensiblement les mêmes évolutions que celles de tw . Les points de la carte de contrôle ne dépassent que rarement les limites de contrôle, et de plus ces dépassements ne concernent généralement qu'un point isolé. Ces deux variables de contrôle ont été retenues par la suite pour tenter d'établir des corrélations entre leurs variations et la formation de défauts géométriques.



(a)



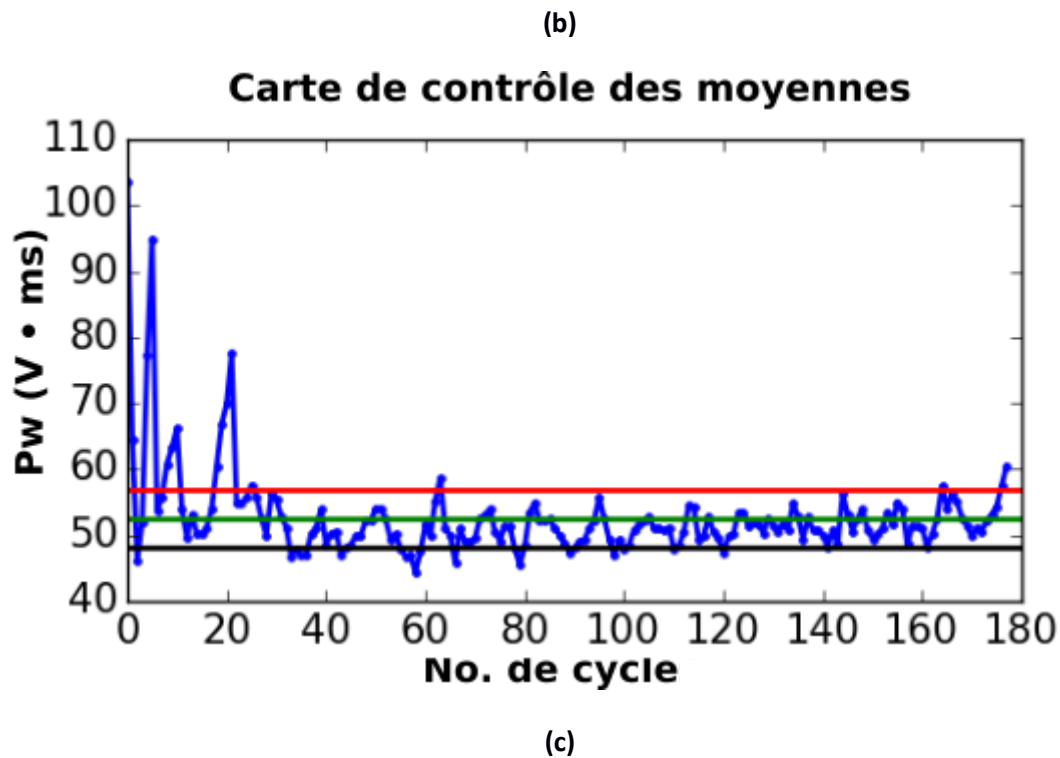
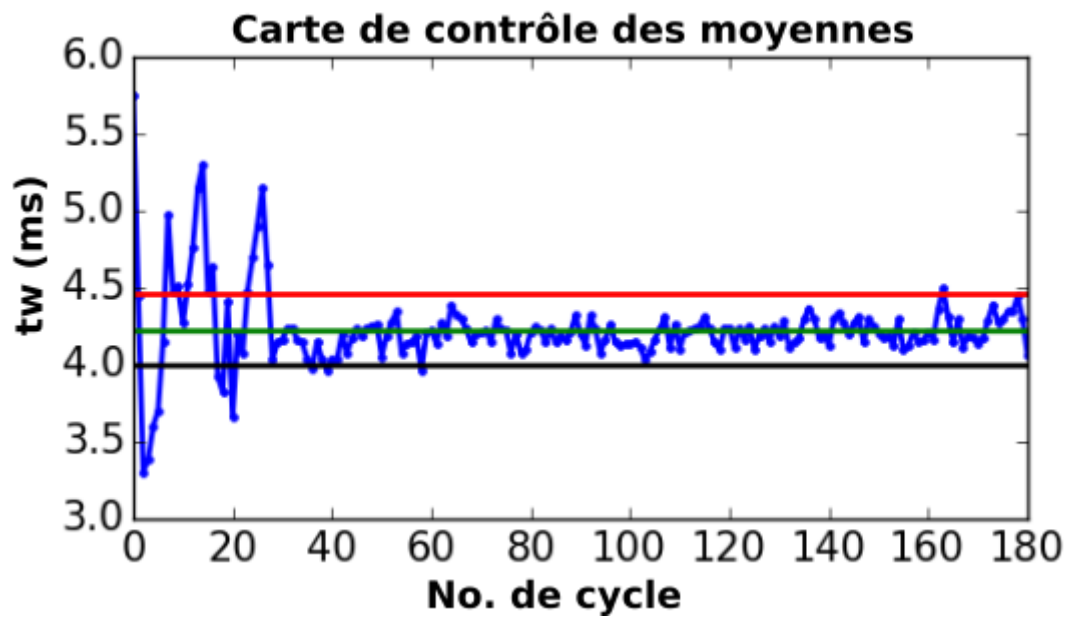


Figure 4.9.10 Cartes de contrôle des moyennes a) de la tension U_w , b) de la durée t_w et c) du produit P_w (point de fonctionnement 7, vitesse de déplacement de 500 mm/min).

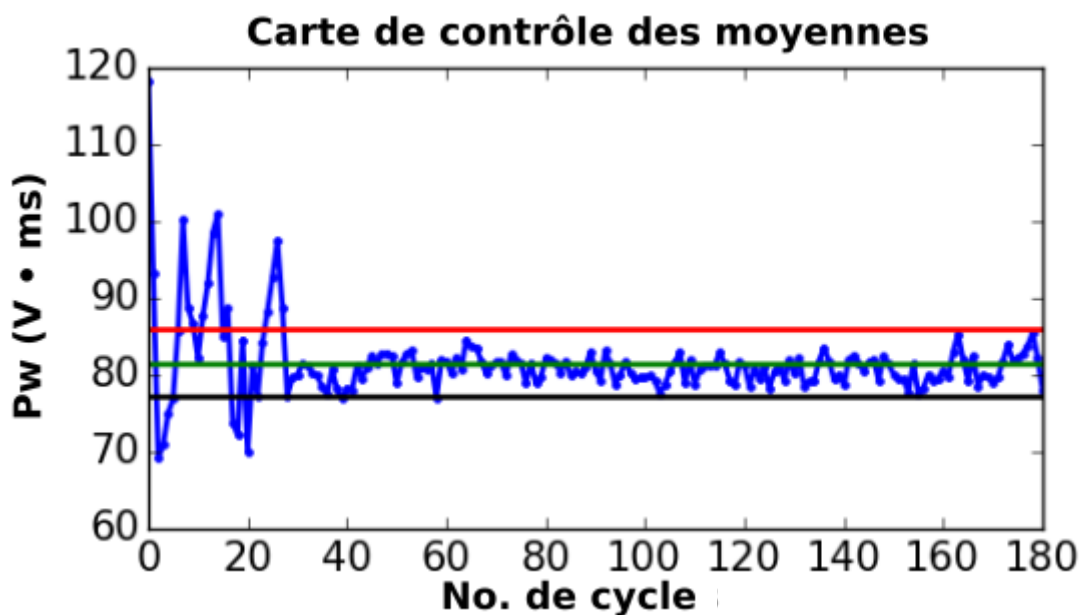
La Figure 4.9.11 montre les cartes de contrôles de la durée t_w et du produit P_w pour un cordon régulier obtenu avec le point de fonctionnement 6 et une vitesse de déplacement de 500 mm/min. Le cordon formé est parfaitement régulier, hormis le défaut au démarrage (Figure 4.9.11a). La carte montre bien des points hors limites en début de cordon, qui révèlent l'apparition du défaut au démarrage, puis tous les points restent dans les limites de contrôle, hormis quelques points isolés. Ce résultat montre que les limites choisies à partir des écarts types calculés pour le point de fonctionnement 7 peuvent bien s'appliquer pour délimiter les fluctuations naturelles du processus pour des réglages différents.



(a)



(b)

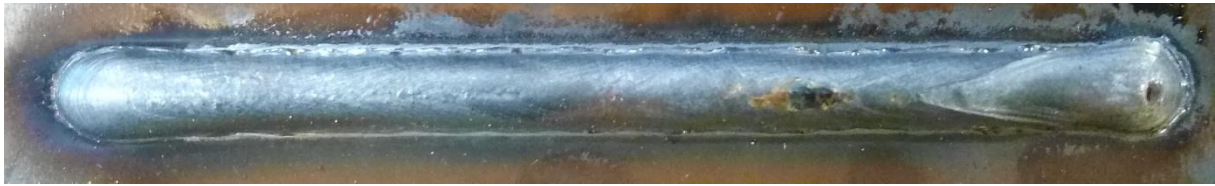


(c)

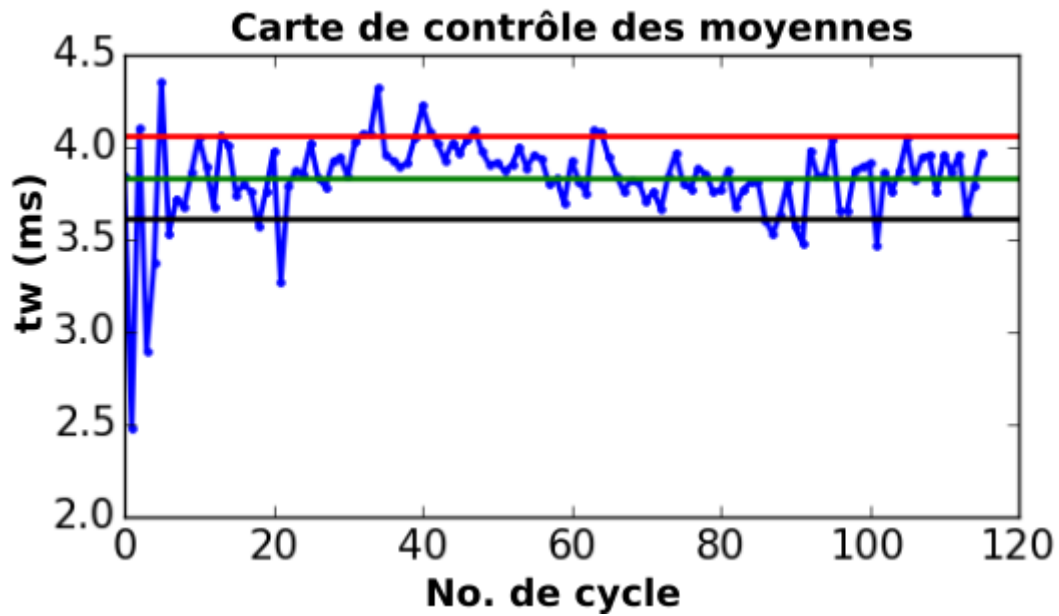
Figure 4.9.11 a) aspect du cordon obtenu avec le point de fonctionnement 6 et la vitesse de déplacement de 500 mm/min, et cartes de contrôle des moyennes b) de la durée tw et c) du produit Pw .

La Figure 4.9.12 présente maintenant les cartes de contrôles correspondant au dépôt d'un cordon régulier réalisé avec le point de fonctionnement 13 de la synergie C1355 à la vitesse de déplacement de 800 mm/min. Ce point est associé rappelons-le à des puissances moyennes et des taux de dépôt très supérieurs à ceux des deux autres points. Les cartes de contrôle des variables tw et Pw révèlent également le défaut géométrique en début de cordon, qui est ici un peu atténué, sans doute en raison de la puissance élevée utilisée avec ce point, qui améliore dès le démarrage du cordon le mouillage. Les points sont ensuite dans les limites de contrôle, hormis quelques points isolés. Ce résultat confirme à nouveau que les limites de contrôles choisies sont bien représentatives des

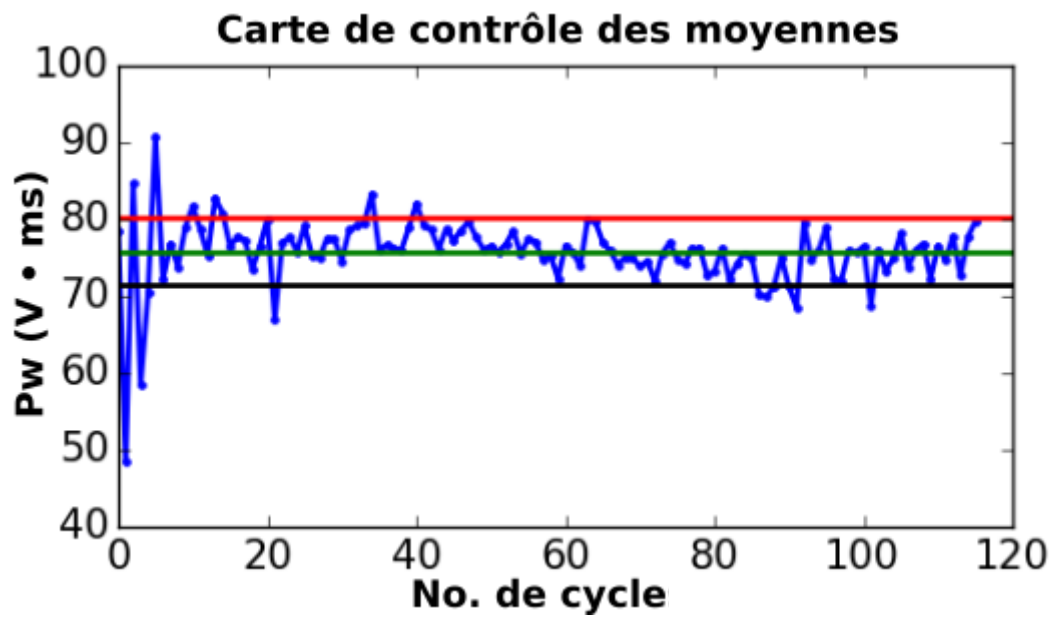
fluctuations naturelles des variables de contrôle du processus, même pour des réglages procédé très différents.



(a)



(b)



(c)

Figure 4.9.12 a) aspect du cordon obtenu avec le point de fonctionnement 13 et la vitesse de déplacement de 800 mm/min, et cartes de contrôle des moyennes b) de la durée t_w et c) du produit P_w

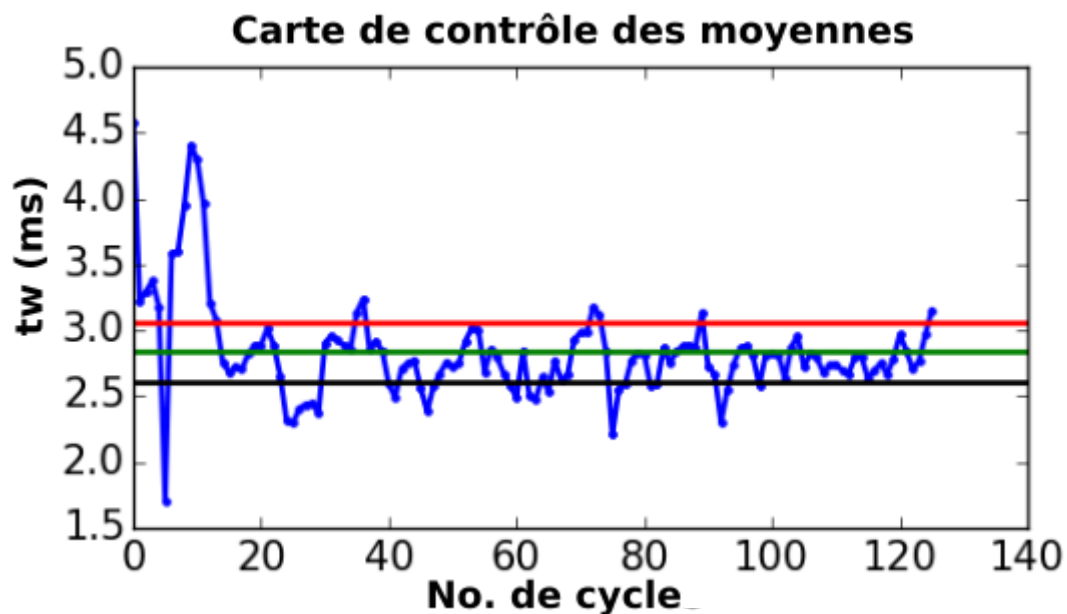
4.9.9. Application des cartes de contrôle à des cordons irréguliers

La méthode basée sur l'utilisation des cartes de contrôle des variables t_w et P_w , dont les limites ont été déterminées à partir des écarts types calculés pour le point de fonctionnement 7, a été employée pour tenter de révéler l'apparition des défauts observés sur certains cordons.

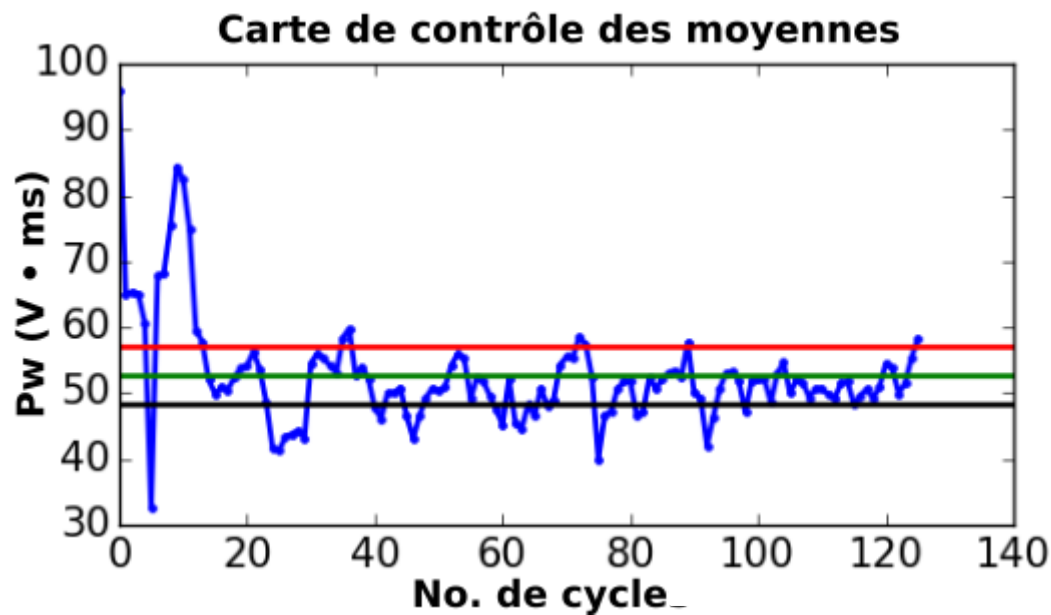
La Figure 4.9.13a montre l'aspect d'un cordon obtenu avec les réglages de paramètres du point de fonctionnement 7, excepté pour le paramètre de vitesse de dévidage $V_{d_sc_wait}$, qui a été augmenté à la valeur de 50 m/min. Cette modification provoque l'apparition de défauts géométriques, surtout en début de cordon.



(a)



(b)



(c)

Figure 4.9.13 a) aspect du cordon obtenu en augmentant le paramètre V_{dsc_wait} à 50 m/min et en conservant tous les autres paramètres du point de fonctionnement 7, à la vitesse de déplacement de 500 mm/min, et cartes de contrôle des moyennes b) de la durée t_w et c) du produit P_w

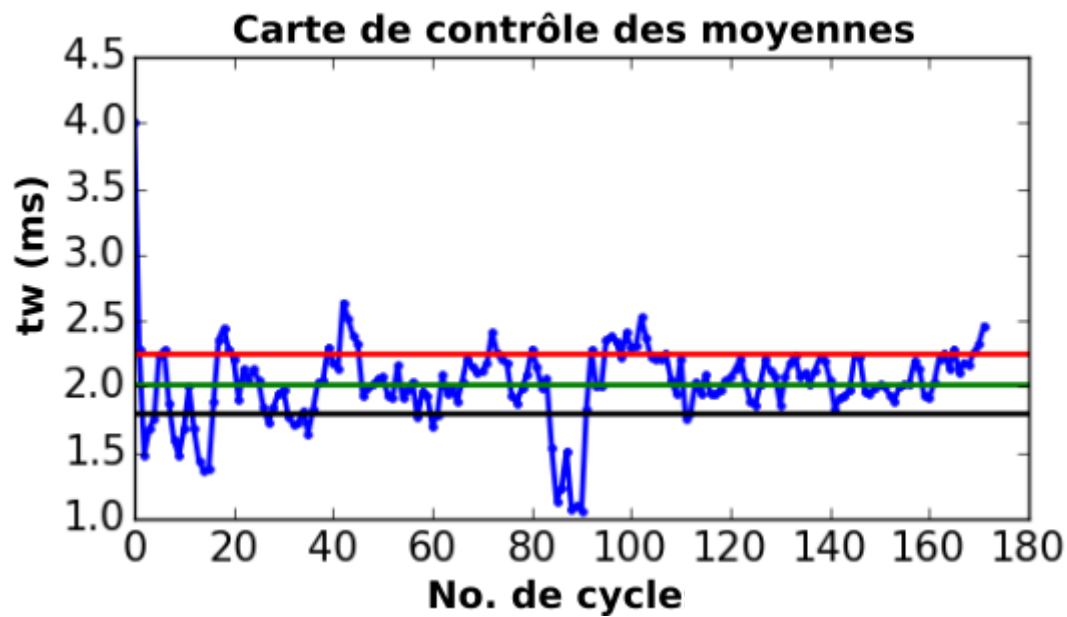
Les cartes de contrôles des variables t_w et P_w associées à ce cordon, présentées sur les Figure 4.9.13b-c, montrent que beaucoup de points sont hors limites dans ce cordon irrégulier. Ces deux variables de contrôle reflètent relativement bien les oscillations de la surface du cordon déposé, passant de valeurs hautes dans les zones où le cordon présente une plus forte hauteur, à des valeurs basses, souvent en dessous ou proche de la limite de contrôle inférieure, dans les zones où le cordon forme des creux.

Un second test a été réalisé sur un cordon déposé avec une intensité I_{boost} faible, de 100 A, en conservant les autres paramètres égaux à ceux du point de fonctionnement 7, à la vitesse de déplacement de 500 mm/min.

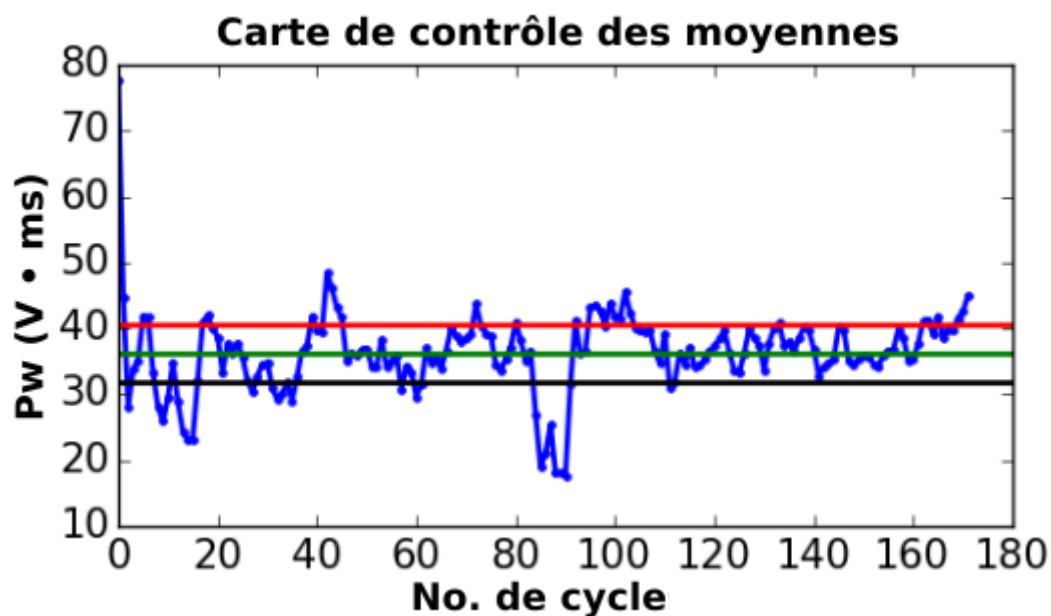
L'aspect du cordon obtenu, présenté sur la Figure 4.9.14a, est encore plus irrégulier que celui obtenu dans le précédent test, avec des défauts qui s'apparentent au phénomène de « humping ». Les cartes de contrôle des variables t_w et P_w tracées pour ce cordon permettent de bien mettre en évidence ces défauts critiques, les variables oscillant entre des valeurs hautes au-dessus de la limite de contrôle supérieure dans les zones de forte hauteur du cordon, à des valeurs basses inférieures à la limite inférieure de contrôle au niveau des zones de creux du cordon.



(a)



(b)



(c)

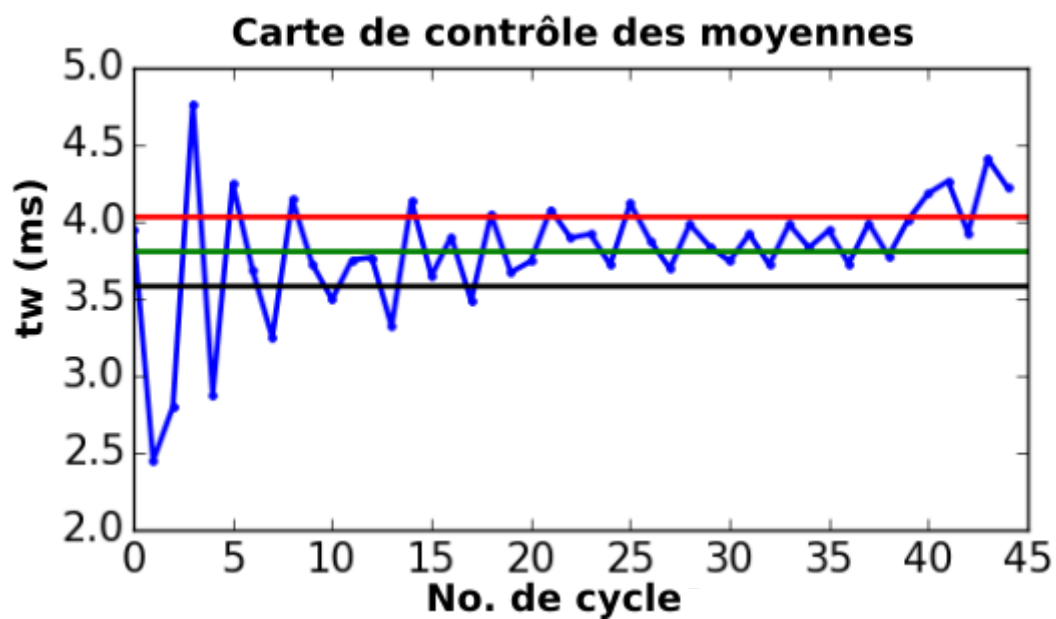
Figure 4.9.14 a) aspect du cordon obtenu en diminuant le paramètre I_{boost} à 100 A et en conservant tous les autres paramètres du point de fonctionnement 7, à la vitesse de déplacement de 500 mm/min, et cartes de contrôle des moyennes b) de la durée tw et c) du produit Pw

Un troisième test a été effectué, en traçant les cartes de contrôle des variables tw et Pw pour un cordon réalisé avec le point de fonctionnement 13 et une vitesse d'avance élevée de 2100 mm/min, qui produit un cordon étroit présentant des irrégularités géométriques (Figure 4.9.15a). Les cartes de contrôle des deux variables retenues ne permettent pas cette fois d'identifier de manière certaine les défauts géométriques par des points hors limites ou proches des limites de contrôle. Il faut toutefois signaler qu'à la vitesse de déplacement utilisée pour cet essai, la durée du dépôt n'est que de 2,3 secondes. Seuls 220 points de mesure sont alors réalisés pour chaque variable, correspondant à autant de cycles de transfert de gouttelettes. Dans ces conditions, chacun des cycles peut avoir un

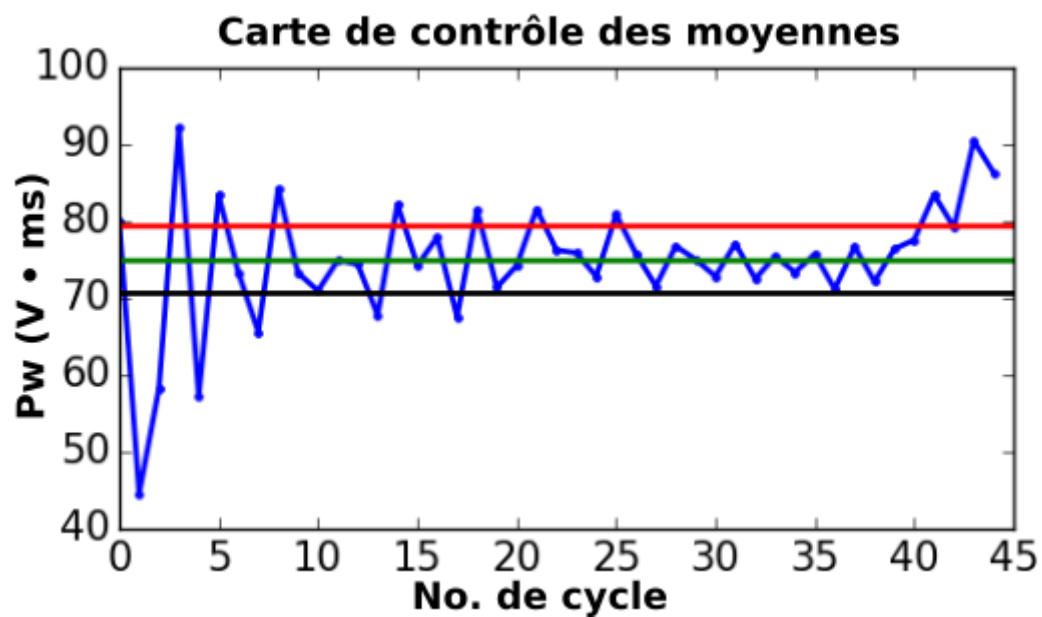
effet sur la géométrie des cordons, puisqu'on ne dépose à cette vitesse en moyenne que 2,75 gouttelettes par mm de cordon. Le fait de calculer les moyennes de ces variables de contrôle sur 5 points de mesure successifs risque alors d'atténuer les fluctuations lors de chaque cycle, qui peuvent être significatives pour ces vitesses.



(a)



(b)



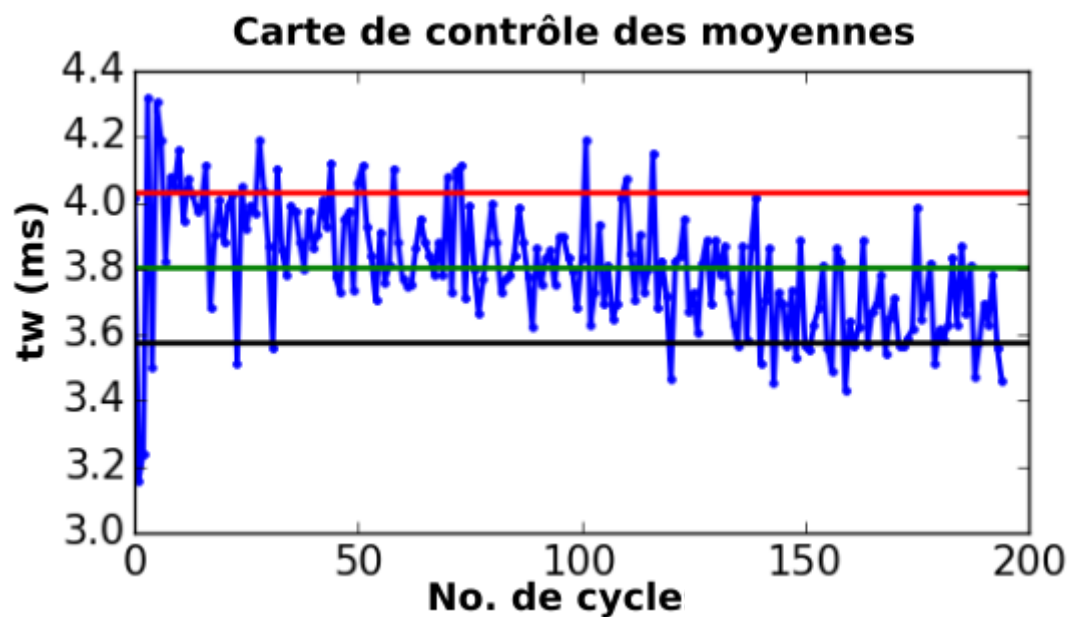
(c)

Figure 4.9.15 a) aspect du cordon obtenu avec le point P13 et une vitesse de déplacement de 2100 mm/min, et cartes de contrôle des moyennes b) de la durée t_w et c) du produit P_w

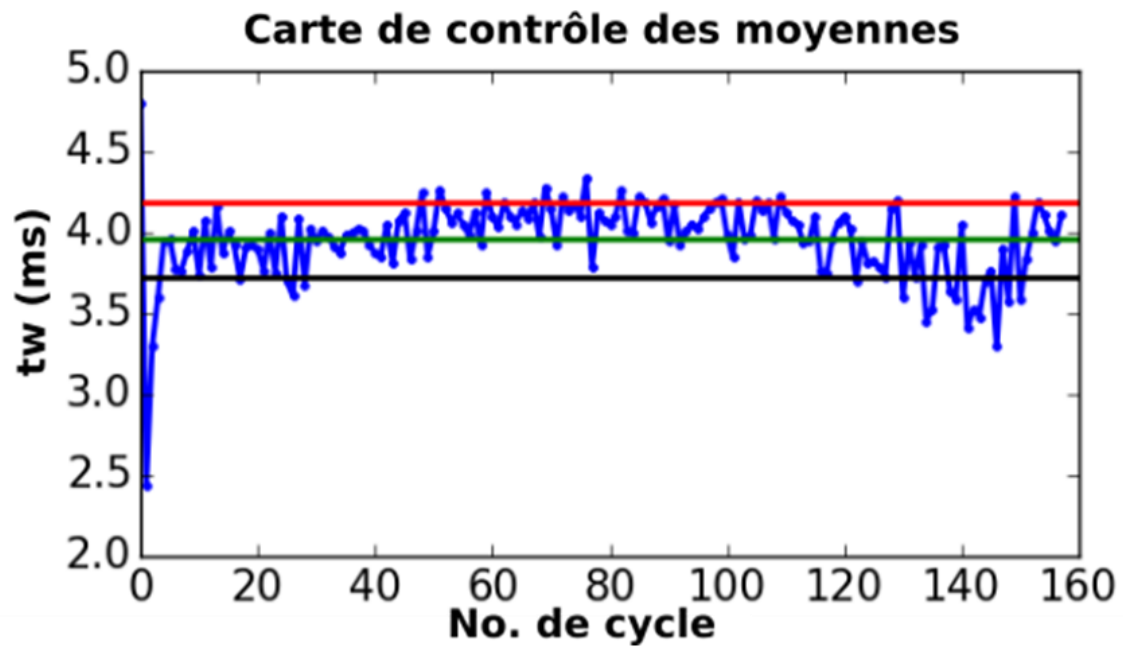
Il est donc probable qu'une taille d'échantillon différente devrait être choisie en fonction de la vitesse de déplacement, en tous cas pour les vitesses les plus élevées.

4.9.10. Application au contrôle de la fabrication d'un mur

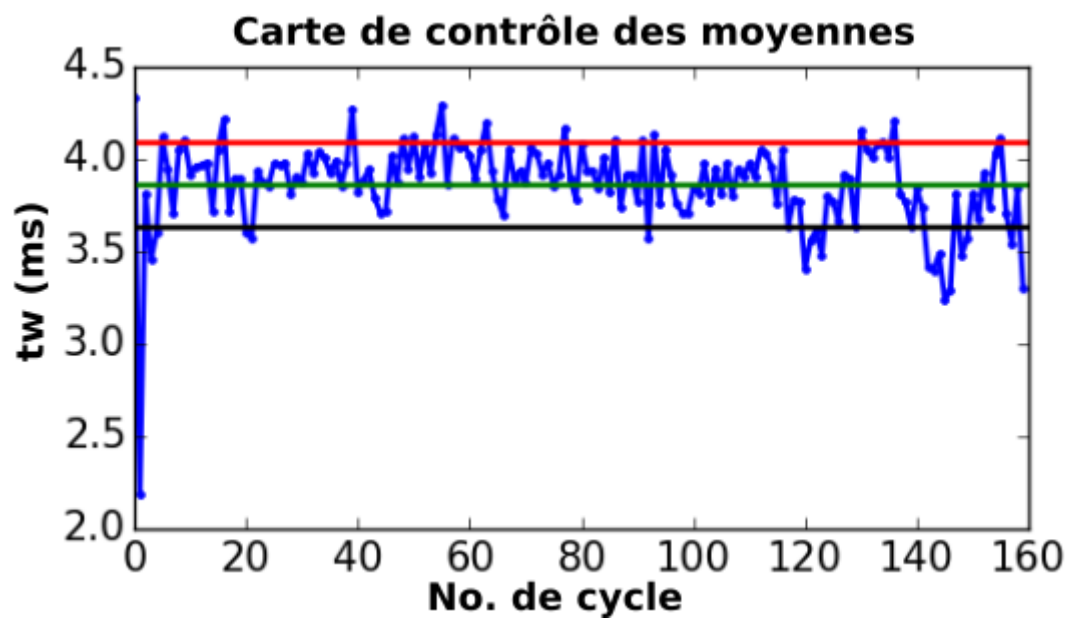
La méthode a finalement été employée pour contrôler la fabrication d'un mur de 10 couches, réalisé avec le point de fonctionnement optimisé (cf. 4.1.6). Les temps d'attente entre deux couches de ces murs ont été choisis trop faibles pour permettre le refroidissement suffisant des cordons précédents, ce qui produit après quelques couches déposées des irrégularités de surface qui s'amplifient. Les figures Figure 4.9.16 et Figure 4.9.17 montrent l'évolution des variables de contrôle t_w et P_w pour les quatre premières couches déposées. Le résultat montre bien que si les cartes de contrôle des premières couches ne présentent que quelques points en dehors des limites de contrôle, le phénomène s'amplifie fortement à partir de la troisième et surtout de la quatrième couche, révélant bien l'apparition des irrégularités géométriques, qui doivent être corrigées rapidement par un ajustement des paramètres procédé si l'on veut éviter l'aggravation du défaut. Il faut alors par exemple soit augmenter la durée des temps de pause entre couches, soit réduire les puissances moyennes en agissant sur l'un des paramètres du cycle CMT.



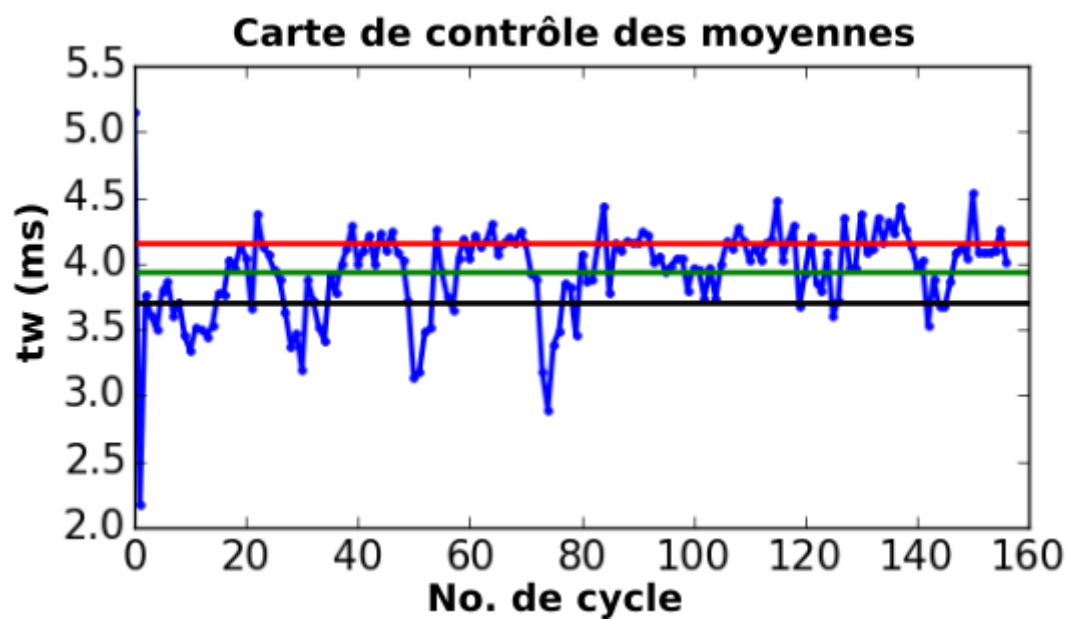
(a)



(b)

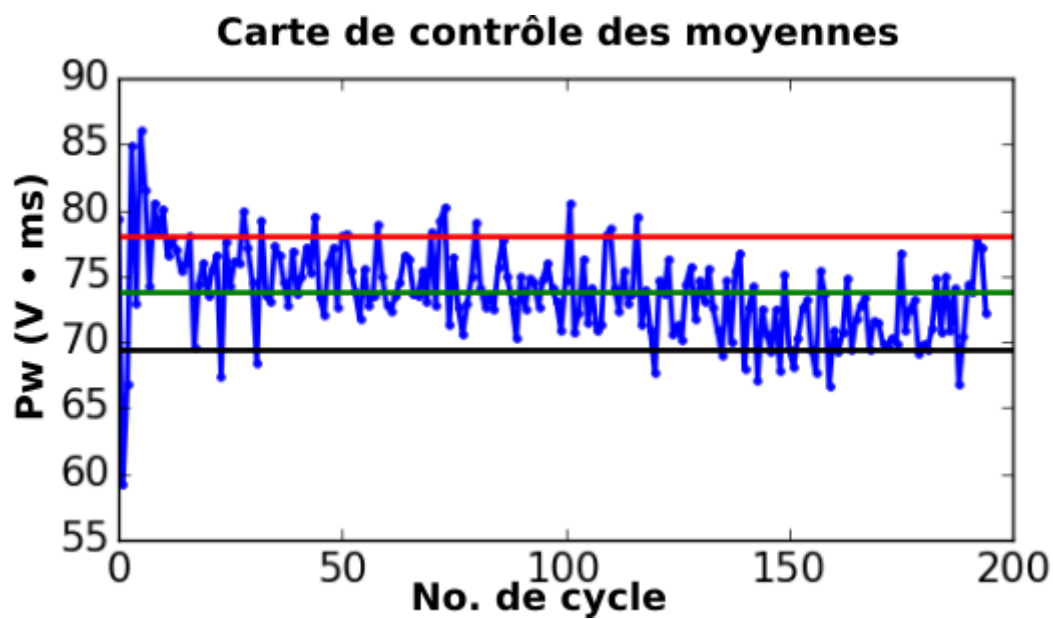


(c)

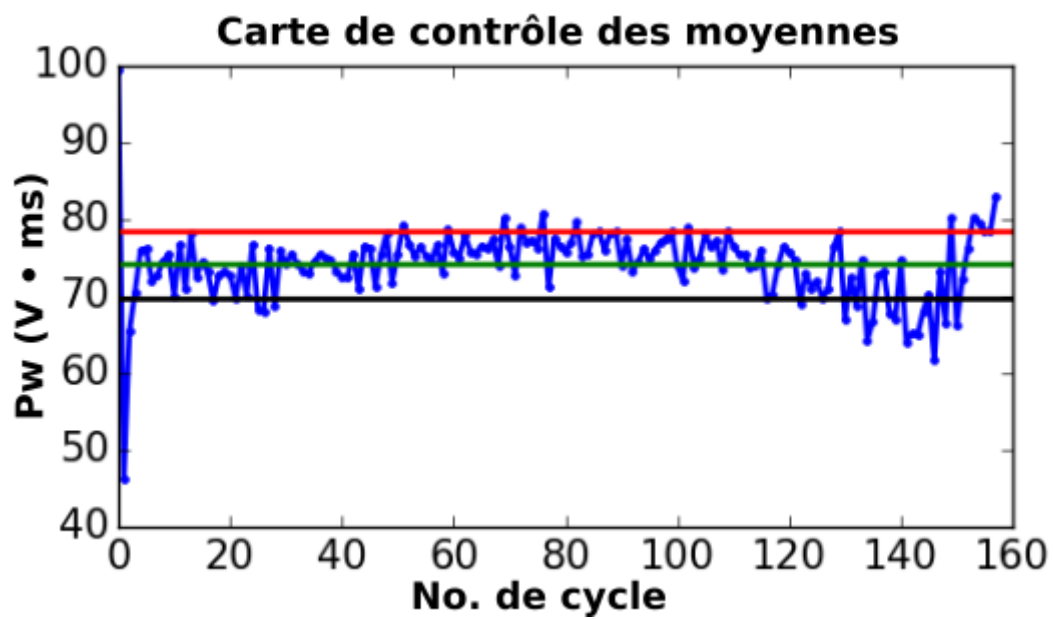


(d)

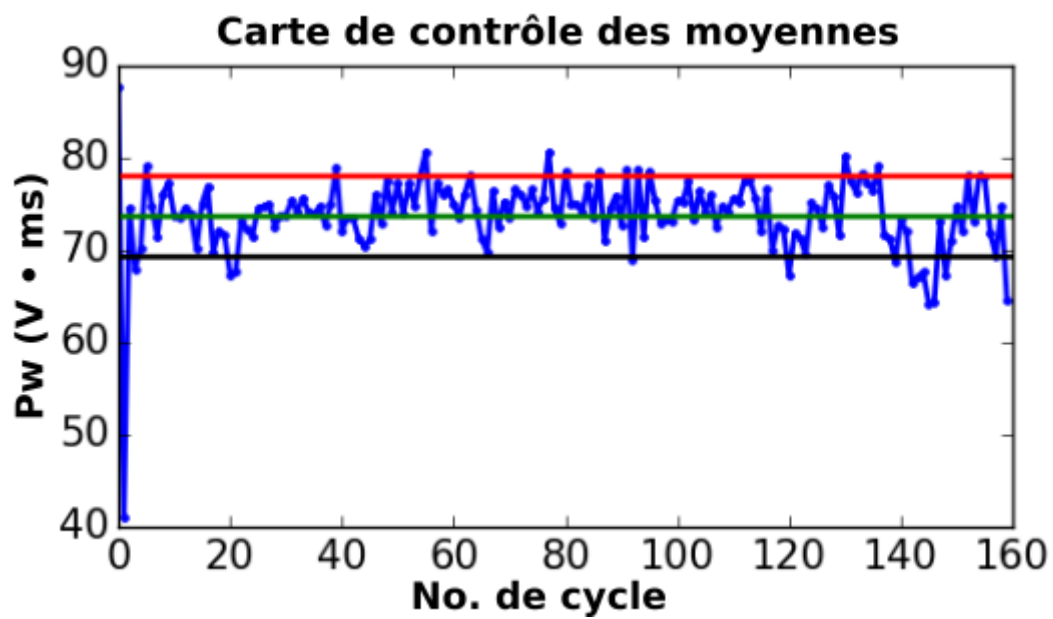
Figure 4.9.16 Carte de contrôle de la variable tw lors de la construction d'un mur réalisé avec le point de fonctionnement optimisé, a) première couche, b) deuxième couche, c) troisième couche, d) quatrième couche



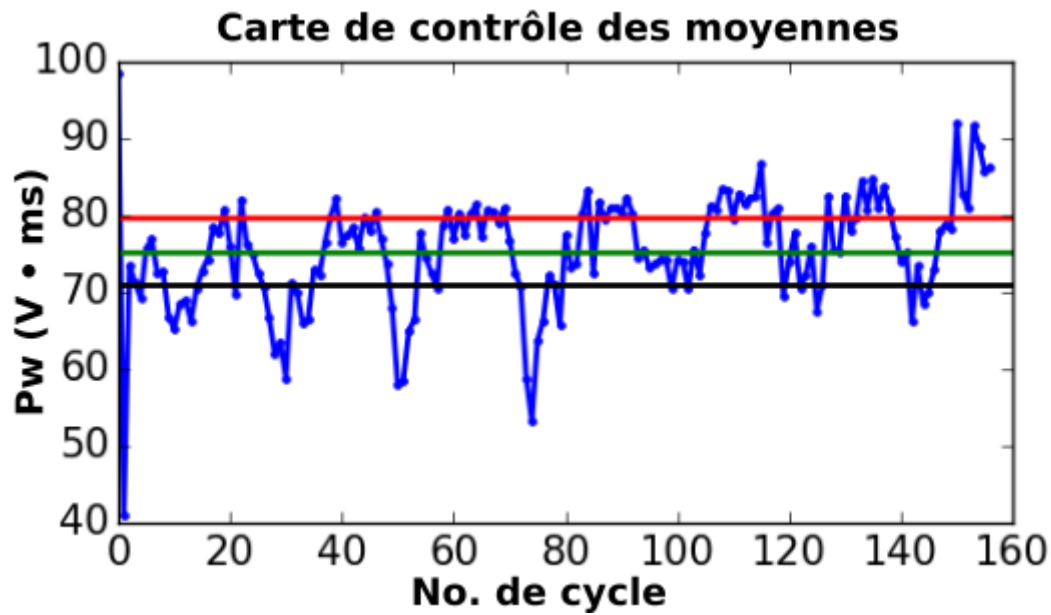
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4.9.17 Carte de contrôle de la variable Pw lors de la construction d'un mur réalisé avec le point de fonctionnement optimisé, a) première couche, b) deuxième couche, c) troisième couche, d) quatrième couche

4.10. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, des murs constitués par la superposition de cordons ont été construits, avec différents paramètres de fabrication. Un problème lié à l'accumulation de chaleur lors de la superposition des cordons a été identifié et en partie résolu grâce à l'ajout de temps de pause entre deux couches. Plusieurs murs de dimensions identiques ont pu être obtenus avec des taux de dépôts et des vitesses de déplacement différents, en conservant des précisions dimensionnelles comparables, démontrant que les temps de production pouvaient être réduits en optimisant les paramètres de manière à augmenter le taux de dépôt. Un point de fonctionnement optimisé a ainsi été identifié, qui permet d'améliorer le taux de dépôt de plus de 25% par rapports aux points standards préprogrammés dans le microprocesseur du générateur CMT.

Enfin, une méthode de contrôle de la fabrication a été développée, basée sur le principe du contrôle statistique des procédés, dans le but de détecter l'apparition éventuelle de défaut géométriques et de déclencher des actions correctives. Les variables pertinentes pour détecter l'apparition de défauts ont été identifiées, et des cartes de contrôle basées sur ces variables ont été testées avec succès pour détecter la formation de défauts géométriques dans des cordons et des murs.

Conclusion et perspectives

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire avait pour objectif général de contribuer au développement des technologies de fabrication additive par fusion à l'arc de fil métallique, souvent désignées sous l'acronyme WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing). Parmi les différents procédés de soudage à l'arc utilisables pour assurer la fusion du fil métallique, c'est le procédé CMT (Cold Metal Transfert), développé par la société Fronius, qui a été retenu. Ce procédé est une évolution du procédé traditionnel de soudage à l'arc avec fil-électrode fusible GMAW (Gas Metal Arc Welding). Il se distingue par un contrôle très précis de la forme d'onde du courant de soudage, qui permet de générer de manière contrôlée une gouttelette de métal fondu à l'extrémité du fil-électrode, et un mouvement de dévidage alterné du fil électrode, qui permet de venir déposer les gouttelettes fondues sur le support de construction ou la pièce à souder de manière précise et sans projections.

Le premier chapitre de ce mémoire était consacré à la présentation de données bibliographiques concernant l'évolution ancienne et récente des procédés de prototypage et de fabrication additive, qui a notamment conduit au développement des procédés utilisant comme matériau d'apport des fils métalliques. Ces procédés ont été plus particulièrement détaillés, puis les caractéristiques particulières de la technologies WAMM, et ses avantages par rapports aux autres techniques de fabrication additive de pièces métalliques, ont été explicités. Finalement, une revue des principaux procédés de soudage a été faite, en insistant sur ceux qui peuvent être utilisés comme source de fusion du fil métallique dans la technologie WAAM, et les caractéristiques particulières du procédé CMT retenu pour cette étude ont été détaillées.

Dans le second chapitre, le banc de fabrication additive par la technologie WAAM-CMT, dont la conception et le développement ont constitué une part significative de ce travail de thèse, a été présenté. Le réglage et le fonctionnement du procédé de soudage CMT, qui a été intégré à l'installation de fabrication additive, ainsi que le matériau employé, un fil d'acier faiblement allié de diamètre 1 mm, ont ensuite été décrits. Les techniques d'instrumentation et de mesure développées pour analyser les paramètres procédé et les phénomènes physiques intervenant lors de la fusion et du dépôt de matière, ont aussi été détaillées. Finalement, la méthode de caractérisation de la géométrie des dépôts formés, basée sur la numérisation à l'aide d'un scanner 3D des éprouvettes fabriquées, puis la mesure de leurs caractéristiques à partir de programmes dédiés spécialement développés pour cette étude, a été présentée.

Dans le troisième chapitre, l'influence des différents paramètres de réglage du procédé CMT sur les caractéristiques du processus de dépôt et sur la géométrie des cordons d'acier déposés a été investiguée de manière approfondie, ce qui a permis de mieux comprendre les mécanismes physiques intervenant lors du dépôt de la matière. Les réglages « standard » de paramètres ont d'abord été employés, et les taux de dépôt obtenus avec ces différents jeux de paramètres ont été mesurés, ainsi que les caractéristiques géométriques moyennes des dépôts et leur régularité, évaluée à travers la mesure des écarts types des largeurs et hauteur le long du cordon. Les défauts apparaissant régulièrement en début de cordon ont été analysés, et en partie corrigés en modifiant les paramètres d'amorçage du procédé CMT. Afin de mieux comprendre le processus de dépôt de matière, celui-ci a été décomposé en différentes phases, qui ont été analysées séparément, en calculant notamment les puissances moyennes et les énergies produites par chacune de ces phases.

Finalement, l'analyse de l'effet des principaux paramètres de réglage du procédé CMT sur le processus de dépôt de matière a été menée, ce qui a permis de proposer un réglage particulier, ou point de fonctionnement, permettant d'obtenir un taux de dépôt très élevé, supérieur de plus de 15 % au taux de dépôt maximal produit par les paramètres procédé standards.

Le quatrième chapitre était consacré à la fabrication de murs par la superposition de cordons, et au développement d'une méthode de contrôle du procédé permettant d'assurer la qualité des pièces produites. L'influence de la superposition de cordons sur la géométrie des dépôts a d'abord été étudiée, révélant la nécessité de laisser refroidir un peu chaque cordon avant de réaliser l'addition d'un nouveau cordon. Des géométries identiques peuvent être obtenues avec différents jeux de paramètres, à condition d'augmenter dans les mêmes rapports le taux de dépôt et la vitesse de déplacement, ce qui permet d'accroître la productivité. Le point de fonctionnement optimisé pour atteindre un taux de dépôt maximal a ainsi pu être employé, donnant des résultats présentant toutefois une régularité un peu moins bonne que dans les dépôts réalisés avec des taux de dépôt environ deux fois plus faibles. Enfin, une méthode de contrôle en ligne du procédé, basée sur le principe des cartes de contrôle, qui consistent à suivre l'évolution dans le temps d'un paramètre caractéristique de la qualité d'un processus de production, a été développée. Après avoir présenté les principes de ces techniques, des variables de contrôle ont été identifiées, en s'appuyant notamment sur le travail d'analyse réalisé dans le chapitre 3, et des limites caractérisant les variations « naturelles » de ces variables, ont été calculées. Finalement, ces méthodes de cartes de contrôle ont été testées sur des cas de fabrication présentant des défauts géométriques, ce qui a permis de révéler leur efficacité, même si des réglages supplémentaires peuvent être nécessaires pour certaines conditions de fabrication, en particulier lorsque la vitesse de déplacement est très élevée.

De nombreux travaux restent cependant nécessaires avant de pouvoir fabriquer de manière fiable et économique des pièces d'acier avec la technologie WAAM-CMT. La stratégie de fabrication pour des géométries réelles n'a pas été abordée dans cette étude, même si des travaux récents ont été menés, sur lesquels les prochains développements pourront s'appuyer. En effet, dans le cas de la fabrication de pièces de géométries plus complexes que les simples murs fabriqués dans ce travail, les temps de pause, qui augmentent fortement les temps de production, pourront être réduits, voire supprimés si la stratégie de construction est optimisée de manière à ne démarrer une nouvelle couche que sur une zone qui a déjà suffisamment refroidi. Des plateaux supports refroidis par eau peuvent aussi être employés pour tenter d'accélérer le refroidissement, mais leur efficacité sera limitée pour la fabrication de pièces formant des parois minces, car la chaleur devra d'abord diffuser à travers les parois de la pièce déjà fabriquée, phénomène qui peut être assez lent dans les aciers, dont la conductivité thermique est modérée. Des systèmes de refroidissement accéléré à l'aide de fluides cryogéniques peuvent aussi être envisagés. Ces modes de refroidissement, qui peuvent être appliqués au plus près de la zone la plus chaude, pourraient en outre réduire les déformations, qui sont un autre problème que pose cette technique. Le problème des contraintes résiduelles et des distorsions qu'elles induisent dans les pièces n'a pas été abordé dans le cadre de ce travail, mais peut constituer une limitation au procédé WAAM, qu'il faudra donc étudier.

La présence de contraintes résiduelles peut aussi avoir une forte influence sur le comportement mécanique des structures fabriquées. Ce point constitue le second axe d'étude qui reste à approfondir. Les microstructures et les propriétés des pièces fabriquées n'ont pu être étudiées dans le cadre de cette étude, par manque de temps. Si le matériau employé, un fil d'acier faiblement allié,

a été spécifiquement développé pour le soudage pour garantir des microstructures et propriétés acceptables, on sait cependant que le processus de solidification peut conduire à des microstructures présentant de fortes textures. Cet effet est plus limité dans les aciers, grâce à la transformation que subit le matériau à l'état solide, qui peut être mise à profit pour affiner la structure des pièces fabriquées en optimisant la stratégie de construction. Le comportement mécanique de telles structures, notamment en fatigue, et le rôle des contraintes résiduelles, reste une autre interrogation à laquelle nous n'avons pu répondre.

Enfin, si les bases d'une méthode de contrôle du procédé ont été posées, il reste à améliorer la précision des cartes de contrôle proposées. La taille des échantillons, tout comme les limites de contrôle proposées dans cette étude, devront probablement être adaptées lorsque les réglages procédé sont très différents de ceux étudiés ici, en particulier si des vitesses de déplacement très élevées sont employées. Il reste aussi à adapter cette méthode pour que le calcul des cartes de contrôle soit effectué en temps réel, entre chaque couche de dépôt, de manière à pouvoir déclencher une action corrective sur les réglages procédé avant le dépôt de la couche suivante. Enfin, il reste à identifier les paramètres procédé à modifier selon le résultat fourni par la carte de contrôle, en s'appuyant sur les résultats présentés dans cette étude.

Références

- [1] F. W. Liou, *Rapid Prototyping and Engineering Applications: A Toolbox for Prototype Development*. CRC Press, 2007.
- [2] Y. Shimizu, *Models prototypes : clay, plaster, styrofoam, paper*. Graphic-sha. Tokyo, 1991.
- [3] E. Akaoka, T. Ginn, and R. Vertegaal, "DisplayObjects: Prototyping Functional Physical Interfaces on 3D Styrofoam, Paper or Cardboard Models," in *Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, 2010, pp. 49–56.
- [4] H. Jung, T. Nam, and H. Lee, "3D Modeling Interface with Air Spray : Field Study of 3D Model Making and Prototype Development," 2005.
- [5] C. Sosa, "Sosa Metal Works." [Online]. Available: <http://www.sosametalworks.com/>.
- [6] D. J. Guckenberger, T. E. de Groot, A. M. D. Wan, D. J. Beebe, and E. W. K. Young, "Micromilling: a method for ultra-rapid prototyping of plastic microfluidic devices," *Lab Chip*, vol. 15, no. 11, pp. 2364–2378, 2015.
- [7] G. G. Wang, "Definition and Review of Virtual Prototyping," *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 232–236, Jan. 2003.
- [8] T. Huang, C. W. Kong, H. L. Guo, A. Baldwin, and H. Li, "A virtual prototyping system for simulating construction processes," *Autom. Constr.*, vol. 16, no. 5, pp. 576–585, Aug. 2007.
- [9] S. H. Choi and A. M. M. Chan, "A virtual prototyping system for rapid product development," *Comput. Des.*, vol. 36, no. 5, pp. 401–412, 2004.
- [10] S. H. Choi and H. H. Cheung, "A multi-material virtual prototyping system," *Comput. Des.*, vol. 37, no. 1, pp. 123–136, Jan. 2005.
- [11] K. F. Ehmann, S. G. Kapoor, R. E. DeVor, and I. Lazoglu, "Machining Process Modeling: A Review," *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 119, no. 4B, pp. 655–663, Nov. 1997.
- [12] M. P. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing : materials, processes, and systems*, 3rd ed. J. Wiley & Sons, 2007.
- [13] Wikipedia, "Forming processes - Wikipedia." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Forming_processes. [Accessed: 12-Jul-2017].
- [14] C. M. Fuges, "Not Subtractive or Additive, But Formative Manufacturing: MoldMaking Technology." [Online]. Available: <http://www.moldmakingtechnology.com/blog/post/not-subtractive-or-additive-but-formative-manufacturing>. [Accessed: 12-Jul-2017].
- [15] V. Petrovic, J. Vicente Haro Gonzalez, O. Jordá Ferrando, J. Delgado Gordillo, J. Ramón Blasco Puchades, and L. Portolés Griñan, "Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 49, no. 4, pp. 1061–1079, 2011.
- [16] V. Kumar and D. Dutta, "An assessment of data formats for layered manufacturing," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 28, no. 3, pp. 151–164, 1997.
- [17] P. Kulkarni, A. Marsan, and D. Dutta, "A review of process planning techniques in layered manufacturing," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 6, no. 1, pp. 18–35, Mar. 2000.

- [18] C. K. Chua, K. H. Hong, and S. L. Ho, "Rapid tooling technology. Part 1. A comparative study," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 604–608, 1999.
- [19] G. N. Levy, R. Schindel, and J. P. Kruth, "Rapid Manufacturing and Rapid Tooling With Layer Manufacturing (Lm) Technologies, State of the Art and Future Perspectives," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 52, no. 2, pp. 589–609, 2003.
- [20] R. H. Crawford and J. J. Beaman, "Solid freeform fabrication," *IEEE Spectr.*, vol. 36, no. 2, pp. 34–43, 1999.
- [21] T. Wohlers and T. Gornet, "History of additive manufacturing," *Wohlers Rep. 2012*, pp. 1–26, 2012.
- [22] R. Narayan, *Rapid Prototyping of Biomaterials: Principles and Applications*. Elsevier Science, 2014.
- [23] A. International., *Standard terminology for additive manufacturing technologies : designation F2792-12a*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012.
- [24] R. I. Noorani, *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. John Wiley and Sons, 2005.
- [25] B. P. Conner *et al.*, "Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services," *Addit. Manuf.*, vol. 1–4, pp. 64–76, 2014.
- [26] B. Lyons, "Additive manufacturing in aerospace: Examples and research outlook," *Bridg.*, vol. 44, no. 3, 2014.
- [27] J. Coykendall, M. Cotteleer, L. Holdowsky, and M. Mahto, "3D opportunity in Aerospace and Defense," *Deloitte Univ. Press*, pp. 1–28, 2014.
- [28] S. H. Khajavi, J. Partanen, and J. Holmström, "Additive manufacturing in the spare parts supply chain," *Comput. Ind.*, vol. 65, no. 1, pp. 50–63, 2014.
- [29] C. A. Giffi, B. Gangula, and P. Illinda, "3D opportunity for the automotive industry," *Deloitte Univ. Press*, p. 28, 2014.
- [30] M. J. Louis, T. Seymour, and J. Joyce, "3D opportunity in the Department of Defense," *Deloitte Univ. Press*, 2014.
- [31] V. A. Lifton, G. Lifton, and S. Simon, "Options for additive rapid prototyping methods (3D printing) in MEMS technology," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 20, no. 5, pp. 403–412, 2014.
- [32] M. Vaezi, H. Seitz, and S. Yang, "A review on 3D micro-additive manufacturing technologies," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67, no. 5, pp. 1721–1754, 2013.
- [33] M. Mahto and S. Brenna, "3D opportunity for electronics Additive manufacturing powers up," *Deloitte Univ. Press*, 2017.
- [34] F. P. W. Melchels, M. A. N. Domingos, T. J. Klein, J. Malda, P. J. Bartolo, and D. W. Hutmacher, "Additive manufacturing of tissues and organs," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 37, no. 8, pp. 1079–1104, 2012.
- [35] G. H. Snyder, M. Cotteleer, and B. Kotek, "3D opportunity in medical technology: Additive manufacturing comes to life," *A Deloitte Ser. Addit. Manuf.*, 2014.
- [36] A. L. Jardini *et al.*, "Cranial reconstruction: 3D biomodel and custom-built implant created

- using additive manufacturing,” *J. Cranio-Maxillofacial Surg.*, vol. 42, no. 8, pp. 1877–1884, 2014.
- [37] Lloyd’s Register, “The opportunities for Additive Manufacturing in the Energy industry,” *Addit. Manuf.*, p. 9, 2014.
 - [38] J. D. Hiller and H. Lipson, “STL 2.0: A Proposal for a Universal Multi-Material Additive Manufacturing File Format,” *Proc. 20th Solid Free. Fabr. Symp.*, no. 1, pp. 266–278, 2009.
 - [39] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, *Additive manufacturing technologies*, vol. 238. Springer, 2010.
 - [40] K. Hartke, “MANUFACTURING TECHNOLOGY SUPPORT (MATES) Task Order 0021: Air Force Technology and Industrial Base Research and Analysis, Subtask Order 06: Direct Digital Manufacturing,” 2011.
 - [41] T. T. Wohlers and W. Associates, *Wohlers Report 2012: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual*. Wohlers Associates, 2012.
 - [42] C. W. Hull, “Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography.” Google Patents, 1986.
 - [43] P. F. Jacobs, D. T. Reid, Computer, and A. S. A. of SME., *Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography*. Society of Manufacturing Engineers, 1992.
 - [44] 3D Systems, “3D Printers, 3D Scanning, Software, Manufacturing and Healthcare Services | 3D Systems.” [Online]. Available: https://www.3dsystems.com/?smtNoRedir=1&_ga=2.181949679.951613853.1500367105-1005834349.1497603466. [Accessed: 18-Jul-2017].
 - [45] EOS, “EOS e-Manufacturing Solutions: Industrial 3D Printing.” [Online]. Available: <https://www.eos.info/en>. [Accessed: 18-Jul-2017].
 - [46] F. P. Miller, A. F. Vandome, and J. McBrewster, *Fused Deposition Modeling*. VDM Publishing, 2010.
 - [47] Stratasys, “Stratasys | Impression 3D et fabrication additive.” [Online]. Available: <http://www.stratasys.com/fr>. [Accessed: 18-Jul-2017].
 - [48] K. Seki, Y. Onozawa, S. Inukai, and N. Ono, “3D inkjet printer.” Google Patents, 2012.
 - [49] P. Calvert, “Inkjet Printing for Materials and Devices,” *Chem. Mater.*, vol. 13, no. 10, pp. 3299–3305, 2001.
 - [50] M. Feygin, A. Shkolnik, M. N. Diamond, and E. Dvorskiy, “Laminated object manufacturing system.” Google Patents, 1998.
 - [51] K. Pang, *An Integrated CAD/CAM System for Laminated Object Manufacturing*. Hong Kong University of Science and Technology, 1998.
 - [52] B. Vayre, F. Vignat, and F. Villeneuve, “Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects,” *Mech. & Ind.*, vol. 13, no. 2, pp. 89–96, 2012.
 - [53] L. E. Murr *et al.*, “Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting,” *Acta Mater.*, vol. 58, no. 5, pp. 1887–1894, 2010.

- [54] S. L. Sing, J. An, W. Y. Yeong, and F. E. Wiria, "Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs," *J. Orthop. Res.*, vol. 34, no. 3, pp. 369–385, Mar. 2016.
- [55] O. Yilmaz and A. A. Uglu, "Shaped metal deposition technique in additive manufacturing: A review," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 230, no. 10, pp. 1781–1798, 2016.
- [56] A. J. Pinkerton and L. Li, "Direct additive laser manufacturing using gas- and water-atomised H13 tool steel powders," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 25, no. 5, pp. 471–479, Mar. 2005.
- [57] D. Manfredi, F. Calignano, M. Krishnan, R. Canali, E. P. Ambrosio, and E. Atzeni, "From Powders to Dense Metal Parts: Characterization of a Commercial AlSiMg Alloy Processed through Direct Metal Laser Sintering," *Materials (Basel)*, vol. 6, no. 3, pp. 856–869, 2013.
- [58] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, and P. Colegrove, "Wire + arc additive manufacturing," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 836, no. March, p. 1743284715Y.000, 2015.
- [59] K. M. B. Taminger and R. a. Hafley, "Electron Beam Freeform Fabrication: A Rapid Metal Deposition Process," 2003.
- [60] V. R. Dave, J. E. Matz: J., and T. W. Eagar, "Electron Beam Solid Freeform Fabrication of Metal Parts," *Sff*, pp. 64–71, 1995.
- [61] E. Uhlmann, R. Kersting, T. B. Klein, M. F. Cruz, and A. V. Borille, "Additive Manufacturing of Titanium Alloy for Aircraft Components," *Procedia CIRP*, vol. 35, no. Supplement C, pp. 55–60, 2015.
- [62] W. E. Frazier, "Metal Additive Manufacturing: A Review," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 23, no. 6, pp. 1917–1928, 2014.
- [63] J. Xiong and G. Zhang, "Adaptive control of deposited height in GMAW-based layer additive manufacturing," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, no. 4, pp. 962–968, 2014.
- [64] 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," *Addit. Manuf.*, vol. 7, no. Supplement C, pp. 20–26, 2015.
- [65] Voestalpine, "voestalpine Böhler Welding - Company - News - The Future of Productivity presented on Schweissen & Schneiden: Wire Arc Additive Manufacturing." [Online]. Available: <http://www.voestalpine.com/welding/Company/News/The-Future-of-Productivity-presented-on-Schweissen-Schneiden-Wire-Arc-Additive-Manufacturing>.
- [66] Sciaky Inc., "Wirefeed Additive Manufacturing vs. Powder Methods | Sciaky." [Online]. Available: <http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/wire-am-vs-powder-am>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [67] F. Martina, "Have we 3d printed the biggest metal part ever? — WAAMMat." [Online]. Available: <http://waammatt.com/blog/have-we-3d-printed-the-biggest-metal-part-ever>. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [68] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, and P. Colegrove, "Wire+ arc additive manufacturing," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 7, pp. 641–647, 2016.
- [69] Simon and 3D Printing Technology, "3ders.org - Wire-feed additive manufacturing might be the future of metal-based 3D printing | 3D Printer News & 3D Printing News." [Online].

Available: <http://www.3ders.org/articles/20150531-wire-feed-additive-manufacturing-might-be-the-future-of-metal-based-3d-printing.html>. [Accessed: 15-Aug-2017].

- [70] Jeff Kerns, "What's the Difference Between Stereolithography and Selective Laser Sintering?" [Online]. Available: <http://www.machinedesign.com/3d-printing/what-s-difference-between-stereolithography-and-selective-laser-sintering>.
- [71] ECN and B. Jordan, "Navy going big on 3D printing next year." [Online]. Available: https://www.ecnmag.com/news/2015/07/navy-going-big-3d-printing-next-year?et_cid=4655278&et_rid=480122371&location=top. [Accessed: 15-Aug-2017].
- [72] B. Ralph, "Method of making decorative articles." Google Patents, 1925.
- [73] H. K. Shockey, "Machine for reclaiming worn brake drums." Google Patents, 1932.
- [74] J. W. D. White, "Pressure roller and method of manufacture." Google Patents, 1964.
- [75] J. Schmidt, H. Dorner, and E. Tenckhoff, "Manufacture of complex parts by shape welding," *J. Nucl. Mater.*, vol. 171, no. 1, pp. 120–127, 1990.
- [76] J. Grosse-Wördemann, "The shape welding of heavy semi-finished parts," *Materialprüfung*, vol. 22, no. 4, pp. 168–173, 1980.
- [77] P. M. Almeida Sequeira, "Process Control and Development in Wire and Arc Additive Manufacturing," no. April, pp. 1–467, 2012.
- [78] A. F. Ribeiro, J. Norrish, and R. S. McMaster, "Practical case of rapid prototyping using gas metal arc welding," 1994.
- [79] P. Kazanas, P. Deherkar, P. Almeida, H. Lockett, and S. Williams, "Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 226, no. 6, pp. 1042–1051, 2012.
- [80] F. Bonaccorso, C. Bruno, L. Cantelli, D. Longo, G. Muscato, and S. Rapisarda, "Closed Loop Welding Controller for Manufacturing Process," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 26, no. 1, p. 12003, 2011.
- [81] P. M. Dickens, M. S. Pridham, R. C. Cobb, I. Gibson, and G. Dixon, "Rapid prototyping using 3-D welding," in *Proceedings of the 3rd Symposium Solid Freedom Fabrication, Austin, Texas*, 1992, vol. 9, no. 1992, pp. 280–290.
- [82] A. Ribeiro, B. Ogunbiyi, and J. Norrish, "Mathematical model of welding parameters for rapid prototyping using robot welding," ... *Technol. Weld. ...*, no. July 2017, 1997.
- [83] K. Siva, N. Murugan, and V. Raghupathy, "Modelling, analysis and optimisation of weld bead parameters of nickel based overlay deposited by plasma transferred arc surfacing," *Surf. Eng.*, vol. 1, no. 2009, pp. 174–182, 2009.
- [84] I. S. Kim, J. S. Son, I. G. Kim, J. Y. Kim, and O. S. Kim, "A study on relationship between process variables and bead penetration for robotic CO₂ arc welding," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 136, no. 1–3, pp. 139–145, 2003.
- [85] J. Xiong, G. Zhang, H. Gao, and L. Wu, "Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 29, no. 2, pp. 417–423, 2013.

- [86] D. S. Nagesh and G. L. Datta, "Prediction of weld bead geometry and penetration in shielded metal-arc welding using artificial neural networks," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 123, no. 2, pp. 303–312, 2002.
- [87] J. Xiong, G. Zhang, J. Hu, and L. Wu, "Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second-order regression analysis," *J. Intell. Manuf.*, vol. 25, no. 1, pp. 157–163, 2014.
- [88] S. Suryakumar, K. P. Karunakaran, A. Bernard, U. Chandrasekhar, N. Raghavender, and D. Sharma, "Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing," *Comput. Des.*, vol. 43, no. 4, pp. 331–344, 2011.
- [89] Y. Cao, S. Zhu, X. Liang, and W. Wang, "Overlapping model of beads and curve fitting of bead section for rapid manufacturing by robotic MAG welding process," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 27, no. 3, pp. 641–645, 2011.
- [90] Y. M. Zhang, Y. Chen, P. Li, and a. T. Male, "Weld deposition based rapid prototyping: a preliminary study," *J. Mater. Process. Technol.*, 2003.
- [91] M. Ericsson, P. Nylén, F. Danielsson, and H. Carlsson, "Off-line programming of robots for metal deposition," 2005.
- [92] A. Ribeiro, J. Norrish, and M. RS, "Practical case of rapid prototyping using gas metal arc welding," *Proc. 5th Int. Conf. "computer Technol. welding", Weld. Institute, Print. by Cramptons Printers, Paris, 15–16 June 1994*, vol. 55, no. June, pp. 1–6, 1994.
- [93] Y. M. Zhang, P. Li, Y. Chen, and A. T. Male, "Automated system for welding-based rapid prototyping," *Mechatronics*, vol. 12, no. 1, pp. 37–53, 2002.
- [94] G. Venturini, F. Montevecchi, A. Scippa, and G. Campatelli, "Optimization of WAAM deposition patterns for T-crossing features," *Procedia CIRP*, vol. 55, pp. 95–100, 2016.
- [95] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, "A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 34, pp. 8–19, 2015.
- [96] D. Ding, Z. S. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, "A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 73, no. 1–4, pp. 173–183, 2014.
- [97] A. H. Nickel, *Analysis of thermal stresses in shape deposition manufacturing of metal parts*. Stanford University Stanford, 1999.
- [98] A. H. Nickel, D. M. Barnett, and F. B. Prinz, "Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 317, no. 1, pp. 59–64, 2001.
- [99] E. Foroozmehr and R. Kovacevic, "Effect of path planning on the laser powder deposition process: thermal and structural evaluation," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 51, no. 5–8, pp. 659–669, 2010.
- [100] J. D. Spencer, P. M. Dickens, and C. M. Wykes, "Rapid prototyping of metal parts by three-dimensional welding," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 212, no. 3, pp. 175–182, 1998.
- [101] P. S. Almeida and S. Williams, "Innovative process model of Ti–6Al–4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT)," in *Proceedings of the twenty-first annual*

international solid freeform fabrication symposium, University of Texas at Austin, Austin, TX, USA, 2010.

- [102] M. P. Mughal, H. Fawad, and R. Mufti, "Finite element prediction of thermal stresses and deformations in layered manufacturing of metallic parts," *Acta Mech.*, vol. 183, no. 1–2, pp. 61–79, 2006.
- [103] J. Ding, "Thermo-mechanical Analysis of Wire and Arc Additive Manufacturing Process," no. January, p. 216, 2012.
- [104] P. A. Colegrove *et al.*, "Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213, no. 10, pp. 1782–1791, 2013.
- [105] H. Rieder, A. Dillhöfer, M. Spies, J. Bamberg, and T. Hess, "Online Monitoring of Additive Manufacturing Processes Using Ultrasound 2 . Additive Manufacturing and Quality Assurance Considerations 3 . Ultrasonic Process Monitoring," *Proc. 11th Eur. Conf. Non-Destructive Test.*, vol. 1, no. Ecdnt, pp. 2194–2201, 2014.
- [106] Y.-M. Kwak and C. C. Dumanidis, "Geometry regulation of material deposition in near-net shape manufacturing by thermally scanned welding," *J. Manuf. Process.*, vol. 4, no. 1, pp. 28–41, 2002.
- [107] R. Monier, "Etude expérimentale du comportement dynamique des phases liquides en soudage par court-circuit contrôlé," Université de Montpellier, 2016.
- [108] Y. A. Song, S. Park, D. Choi, and H. Jee, "3D welding and milling: Part I-a direct approach for freeform fabrication of metallic prototypes," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 45, no. 9, pp. 1057–1062, 2005.
- [109] Y.-A. Song, S. Park, and S.-W. Chae, "3D welding and milling: part II—optimization of the 3D welding process using an experimental design approach," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 45, no. 9, pp. 1063–1069, 2005.
- [110] *Les procédés de soudages à l'arc: les soudages TIG, MIG et MAG.* Air Liquid Welding, 2004.
- [111] EWM Group, "EWM- cold Arc ®." [Online]. Available: <https://www.ewm-group.com/fr/>.
- [112] Lincoln Electric, "Pipe Welding with STT Process." [Online]. Available: <http://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/Pages/stt-pipe-welding-detail.aspx>.
- [113] Fronius, "CMT - welding processes - welding technology - Fronius." [Online]. Available: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/our-expertise/welding-processes/cmt>.
- [114] FRONIUS, "FRONIUS France - Le soudage - Technologies." [Online]. Available: https://www3.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-6E6E2EB0-7342A297/fronius_france/hs.xsl/32_10110.htm#.WZrpq1FdLIU. [Accessed: 21-Aug-2017].
- [115] RepRap, "RepRap - RepRap Wiki." [Online]. Available: reprap.org.
- [116] G. C. Anzalone, C. Zhang, B. Wijnen, P. G. Sanders, and J. M. Pearce, "A low-cost open-source metal 3-D printer," *IEEE Access*, vol. 1, pp. 803–810, 2013.
- [117] TU Delft, "Open source 3D metal printer | 3D printing metal with a MAG welder." [Online]. Available: <https://metal2014.weblog.tudelft.nl/>.

- [118] B. Wijnen, G. C. Anzalone, A. S. Haselhuhn, P. G. Sanders, and J. M. Pearce, "Free and Open-source Control Software for 3-D Motion and Processing," *J. Open Res. Softw.*, vol. 4, no. e2, 2016.
- [119] Igus, "igus® chaînes porte-câbles, câbles souples, coussinets, embouts à rotule et des guidages linéaires." [Online]. Available: <http://www.igus.fr/>. [Accessed: 29-Sep-2017].
- [120] Arduino, "Arduino - Home." [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/>.
- [121] RepRap, "RAMPS 1.4/es - RepRapWiki." [Online]. Available: http://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4/es.
- [122] "Home | Marlin 3D Printer Firmware." [Online]. Available: <http://marlinfw.org/>.
- [123] Ultimaker, "Cura 3D Printing Slicing Software." [Online]. Available: <https://ultimaker.com/en/products/cura-software>.
- [124] "Slic3r - G-code generator for 3D printers." [Online]. Available: <http://slic3r.org/>.
- [125] "3D Printing Software | Simplify3D." [Online]. Available: <https://www.simplify3d.com/>.
- [126] RepRap, "Skeinforge - RepRapWiki." [Online]. Available: <http://reprap.org/wiki/Skeinforge>.
- [127] Fronius, "Fronius International - RCU 5000i manual." [Online]. Available: [https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect Welding/Operating Instructions/42%2C0426%2C0021%2CFR.pdf](https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect%20Welding/Operating%20Instructions/42%2C0426%2C0021%2CFR.pdf).
- [128] ESAB, "Weld G3Si1 | Welding Consumables | Products & Solutions | ESAB." [Online]. Available: <http://www.esab.fr/france-benelux/fr/products/index.cfm?fuseaction=home.product&productCode=411142&tab=2>.
- [129] National Instruments, "NI-9215 - National Instruments." [Online]. Available: <http://www.ni.com/fr-fr/support/model.ni-9215.html>.
- [130] "High Speed Camera and Phantom Camera Products | Vision Research." [Online]. Available: <http://www.phantomhighspeed.com/>.
- [131] RapidForm, "3D Scanners: A Guide to 3D Scanning Technology," 2012. [Online]. Available: <http://www.rapidform.com/3d-scanners/>.
- [132] M. Groenendyk, "A Further Investigation into 3D Printing and 3D Scanning at the Dalhousie University Libraries: a Year Long Case Study," *Can. Assoc. Res. Libr.*, 2013.
- [133] Z. Muwaffak, A. Goyanes, V. Clark, A. W. Basit, S. T. Hilton, and S. Gaisford, "Patient-specific 3D scanned and 3D printed antimicrobial polycaprolactone wound dressings," *Int. J. Pharm.*, vol. 527, no. 1–2, pp. 161–170, Jul. 2017.
- [134] SingularityHub, "Handheld 3D Scanner Lets You Digitize Objects And Rooms In Minutes," 2012. [Online]. Available: <https://singularityhub.com/2012/05/03/handheld-3d-scanner-lets-you-digitize-objects-and-rooms-in-minutes/>.
- [135] J. Xu, L. Ding, and P. E. D. L. B, "Digital reproduction of historical building ornamental components: From 3D scanning to 3D printing," *Autom. Constr.*, vol. 76, pp. 85–96, Apr. 2017.
- [136] N. Krznar, A. Pilipović, and M. Šercer, "Additive Manufacturing of Fixture for Automated 3D Scanning – Case Study," *Procedia Eng.*, vol. 149, no. Supplement C, pp. 197–202, 2016.

- [137] 3D ScanSpray, "3DScanSpray.com." [Online]. Available: <https://3dscanspray.com/>.
- [138] Optocat - Introduction, "Portail d'information de l'école centrale de paris, CAO mécanique." [Online]. Available: <http://cao.etudes.ecp.fr/optocat/index.html>.
- [139] Geomagic, "Geomagic, 3D scanning, design and reverse engineering software from 3D Systems Geomagic." [Online]. Available: <http://www.geomagic.com/en/>.
- [140] "Logiciel GEOMAGIC QUALIFY - Le spécialiste Français des technologies 3D de développement produits." [Online]. Available: <http://www.boutique-3d.com/Logiciel-GEOMAGIC-Qualify-version-12-Node>.
- [141] VTK, "VTK - The Visualization Toolkit." [Online]. Available: <https://www.vtk.org/>.
- [142] Leica, "Leica Z16 APO - Product: Leica Microsystems." [Online]. Available: <http://www.leica-microsystems.com/products/stereo-microscopes-macroscopes/details/product/leica-z16-apo/>.
- [143] Leica, "Leica DMI5000 M - Product: Leica Microsystems." [Online]. Available: <http://www.leica-microsystems.com/products/light-microscopes/industrial-materials/inverted-microscopes/details/product/leica-dmi5000-m/>.
- [144] J. Chapuis, "An approach for optimizing arc welding applications," Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2011.
- [145] a Adebayo, J. Mehnen, and X. Tonnellier, "Limiting Travel Speed in Additive Layer Manufacturing," *Trends Weld. Res. Proc. 9th Int. Conf.*, vol. 3, pp. 1038–1044, 2013.
- [146] F. Tavakoli, S. H. Davis, and H. P. Kavehpour, "Spreading and arrest of a molten liquid on cold substrates," *Langmuir*, vol. 30, no. 34, pp. 10151–10155, 2014.
- [147] R. De Ruiter, P. Colinet, P. Brunet, J. H. Snoeijer, and H. Gelderblom, "Contact line arrest in solidifying spreading drops," *Phys. Rev. Fluids*, vol. 2, no. 4, p. 43602, 2017.
- [148] K. R. Thomas *et al.*, "Online monitoring of cold metal transfer (CMT) process using infrared thermography," *Quant. Infrared Thermogr. J.*, vol. 6733, no. November, pp. 1–11, 2016.
- [149] J. S. Oakland, *Statistical Process Control*. Butterworth-Heinemann, 2003.
- [150] M. Pillet, *Appliquer la maîtrise statistique des procédés (MSP/SPC)*. Ed. d'Organisation, 2001.
- [151] W. A. Shewhart, *Economic Control of Quality of Manufactured Product*. New York: D. Van Nostrand Company, Inc, 1931.
- [152] R. G. Schroeder, *Administración de operaciones*. Compañía Editorial Continental, 1992.
- [153] C. S. Wu, Q. X. Hu, J. S. Sun, T. Polte, and D. Rehfeldt, "Intelligent monitoring and recognition of the short-circuiting gas—metal arc welding process," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 218, no. 9, pp. 1145–1151, 2004.

Liste des figures

FIGURE 1.4.1 PRINCIPE DE LA FABRICATION SOUSTRACTIVE : DE LA MATIERE EST PROGRESSIVEMENT ENLEVEE D'UN BLOC BRUT DE MATERIAU JUSQU'A CE QUE LA FORME SOUHAITEE SOIT OBTENUE.	5
FIGURE 1.4.2 PRINCIPE DE LA FABRICATION FORMATIVE : UN EFFORT MECANIQUE EST APPLIQUE SUR UN MATERIAU POUR LE DEFORMER ET LUI FAIRE PRENDRE LA FORME SOUHAITEE.	6
FIGURE 1.4.3. PRINCIPE DE LA FABRICATION ADDITIVE : LE MATERIAU EST MANIPULE POUR QUE DES PORTIONS SUCCESSIVES DE CELUI-CI SOIENT COMBINEES POUR FORMER L'OBJET DESIRE.	6
FIGURE 1.5.1. CHAINE NUMERIQUE DE LA FABRICATION ADDITIVE.	8
FIGURE 1.8.1. CLASSIFICATION DES TECHNOLOGIES SMD EN FONCTION DE LA SOURCE D'ENERGIE EMPLOYEE.	14
FIGURE 1.8.2. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES COMPOSANTS DU SYSTEME DE FA PAR EBF ³ [59].	14
FIGURE 1.8.3. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES COMPOSANTS DU SYSTEME DE FA PAR EBF ³ [59].	15
FIGURE 1.8.4. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES COMPOSANTS DU SYSTEME WAAM, AVEC UNE TORCHE DE SOUDAGE MIG.	15
FIGURE 1.11.1. A) DECOUPAGE DE MODEL CAO ET TRAJECTOIRE DE FABRICATION, B) SIMULATION DE LA TRAJECTOIRE DE FABRICATION EN WAAM, c) PIECE METALLIQUE SOLIDE [92]	19
FIGURE 1.12.1. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES PROCEDES DE SOUDAGE A L'ARC : A) GMAW, B) GTAW, c) PAW	21
FIGURE 1.13.1. REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UNE COUPE TRANSVERSALE D'UN ASSEMBLAGE.	22
FIGURE 1.14.1. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA FLAMME OXYACETYLENIQUE.	23
FIGURE 1.14.2. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU SOUDAGE LASER.	24
FIGURE 1.14.3. REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UN ARC ELECTRIQUE [110].	25
FIGURE 1.14.4. FORME D'ONDE UTILISEE LORS DU SOUDAGE EN COURANT ALTERNATIF (AC)	25
FIGURE 1.14.5. FORME D'ONDE UTILISEE LORS DU SOUDAGE EN COURANT PULSE	26
FIGURE 1.15.1. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU PROCEDE DE SOUDAGE SMAW	27
FIGURE 1.15.2. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU PROCEDE GTAW	27
FIGURE 1.15.3. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU PROCEDE GMAW	28
FIGURE 1.16.1. LES DIFFERENTS MODES DE TRANSFERT RENCONTRES EN SOUDAGE GMAW [110]	29
FIGURE 1.16.2. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU MECANISME DE TRANSFERT PAR COURT-CIRCUIT ET DES FORMES D'ONDE ASSOCIEES.	30
FIGURE 1.16.3. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU TRANSFERT PAR PULVERISATION AXIALE (OU SPRAY)	30
FIGURE 1.16.4. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU TRANSFERT GLOBULAIRE	31
FIGURE 1.16.5. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU TRANSFERT A VEINE LIQUIDE ROTATIVE	31
FIGURE 1.16.6. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU TRANSFERT PULSE.	32
FIGURE 1.17.1. DESCRIPTION DU CYCLE CMT [114]	33
FIGURE 1.17.2. PRINCIPAUX ELEMENTS DU « DOUBLE DEVIDOIR » A DEUX MOTEURS DU PROCEDE CMT [98].	34
FIGURE 2.3.1. DIAGRAMME BETE A CORNES DU SYSTEME A DEVELOPPER	37
FIGURE 2.4.1. DIAGRAMME PIEUVRE DE L'IMPRIMANTE 3D.	38
FIGURE 2.5.1. DIFFERENTS MODELES D'IMPRIMANTES DECRITS SUR LE SITE RepRAP [115].	41
FIGURE 2.5.2 DIFFERENTES VUES STANDARD DU CHASSIS DE NOTRE IMPRIMANTE 3D : A) VUE DE DESSUS, B) VUE DE GAUCHE, c) VUE DE FACE, D) VUE ISOMETRIQUE	41
FIGURE 2.5.3 . A) CHASSIS DE L'IMPRIMANTE ASSEMBLE AVEC DES EQUERRES, BOULONS ET ECROUS. B) TORCHE FIXEE AU CHASSIS.	42
FIGURE 2.5.4 A) MODELE CAO REPRESENTANT LE PLATEAU DE TRAVAIL NU, ET B) AVEC SON SUPPORT DE CONSTRUCTION FIXE AVEC DES BRIDES DROITES DE MAINTIEN	43
FIGURE 2.5.5 A) DOUILLE A COLLERETTE CARREE AVEC PALIER EN POLYMERE DRYLYN® R DE IGUS® [119], B) ASSEMBLAGE SUR LE PLATEAU DE TRAVAIL DES DOUILLES A COLLERETTE CARRE ET DE LA TOLE DE PROTECTION CONTRE LES PROJECTIONS DE SOUDAGE.	43
FIGURE 2.5.6 SCHEMA CINEMATIQUE DES MECANISMES DE TRANSLATION SELON LES AXES X ET Y	44
FIGURE 2.5.7 A) VUE DE DESSUS DU PLATEAU DE TRAVAIL ET DES AXES X ET Y. B) COMPOSANTS CONSTITUANT LES MECANISMES DE TRANSLATION X ET Y: 1. VIS MERE HELICOÏDALE DE L'AXE X. 2. ARBRES DE GUIDAGE DE L'AXE X. 3. DOUILLES A COLLERETTE	

CARREE AVEC PALIER EN POLYMER. 4. ARBRES DE GUIDAGE DE L'AXE Y. 5. MOTEUR PAS A PAS DE L'AXE X. 6. VIS HELICOÏDALE DE L'AXE Y. 7. MOTEUR PAS A PAS DE L'AXE Y. 8. ECROUS POUR VIS HELICOÏDALE. 9. PLATEAU DE TRAVAIL.....	44
FIGURE 2.5.8 SCHEMA CINEMATIQUE DE L'AXE Z ET DE L'AXE X.	45
FIGURE 2.5.9 MODELE CAO DU MECANISME DE TRANSLATION SELON L'AXE Z.....	45
FIGURE 2.5.10 A) SCHEMA CINEMATIQUE DE L'IMPRIMANTE 3D. B) MODELE CAO. C) IMPRIMANTE ASSEMBLEE	46
FIGURE 2.5.11 CARTE ARDUINO MEGA.....	46
FIGURE 2.5.12 CARTE RAMPS 1.4.....	47
FIGURE 2.5.13 SCHEMA DU DIAGRAMME DE CONNEXION DES CONTROLEURS SUR LA CARTE RAMPS ET CONNEXION DES MOTEURS PAS A PAS AUX CONTROLEURS.	48
FIGURE 2.7.1 EVOLUTION DE LA VITESSE DE FIL V_D , DE L'INTENSITE I ET DE LA TENSION U AU COURS D'UN CYCLE DE TRANSFERT CARACTERISTIQUE DU PROCEDE CMT CLASSIQUE, ET PARAMETRES CARACTERISTIQUES DU PROCEDE.....	50
FIGURE 2.10.1 SCHEMA REPRESENTANT L'INSTALLATION ET LA CONNEXION DES DIFFERENTS CAPTEURS.....	53
FIGURE 2.10.2 DIAGRAMME DE CONNEXION EN CONFIGURATION RSE (<i>REFERENCED SINGLE ENDED</i>) A LA CARTE D'ACQUISITION DE DONNEES NI USB-9215 [129].....	55
FIGURE 2.10.3 PREMIER ECRAN DE LA « FACE AVANT » DU PROGRAMME D'ACQUISITION LABVIEW.....	55
FIGURE 2.10.4 DEUXIEME ECRAN DE LA « FACE AVANT » DE NOTRE PROGRAMME D'ACQUISITION LABVIEW™	56
FIGURE 2.11.1 PRINCIPE DE LA TECHNIQUE D'OMBROSCOPIE APPLIQUEE A L'OBSERVATION DU TRANSFERT EN SOUDAGE A L'ARC.....	56
FIGURE 2.12.1 DESCRIPTION DU PROCESSUS DE CARACTERISATION GEOMETRIQUE DES DEPOTS.....	57
FIGURE 2.13.1) SCANNER 3D OPTOTOP-HE DE BREUCKMANN. B) SCHEMA QUI MONTRE LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU SCANNER BREUCKMANN.	58
FIGURE 2.14.1 A) OBJET NUMERISE QUI PRESENTE DES DEFAUTS SUPERFICIELS ET QUI N'EST PAS ALIGNE PAR RAPPORT AU SYSTEME DE CORDONNEES CARTESIENNES. B) OBJET « REPAIRE » ET ALIGNE SUR LE SYSTEME DE CORDONNEES CARTESIENNES AVEC LE LOGICIEL GEOMAGIC STUDIO.....	59
FIGURE 2.15.1 PARAMETRES GEOMETRIQUES A MESURER, POUR A) UN CORDON SIMPLE, B) UN MULTI-CORDON	60
FIGURE 2.15.2 CALCUL AUTOMATIQUE DU VOLUME D'UN MUR MULTI-CORDON A L'AIDE DU LOGICIEL GEOMAGIC QUALIFY.....	60
FIGURE 2.16.1 ENSEMBLE DE POINTS DECRIVANT LE CONTOUR DU CORDON DANS UNE COUPE TRANSVERSALE, ET LOCALISATION DU POINT DONNANT LA HAUTEUR MAXIMUM	61
FIGURE 2.16.2 METHODE DE MESURE DE LA LARGEUR DES MURS MULTI-CORDON DANS UNE COUPE TRANSVERSALE : LA LARGEUR EST MESUREE PAR LA DISTANCE HORIZONTALE ENTRE LES POINTS DE DROITE (EN ROUGE) ET LES POINTS DE GAUCHE (EN BLEU).	61
FIGURE 2.16.3 : REPRESENTATION DU CONTOUR DU CORDON DANS UNE COUPE LONGITUDINALE PARALLELE AU PLAN DU SUBSTRAT, ET SEPARATION DES POINTS DU CONTOUR EN DEUX CATEGORIES POUR LA MESURE DE LARGEUR DES CORDONS SIMPLES	62
FIGURE 3.1.1 CORDONS DEPOSES AVEC LE POINT DE FONCTIONNEMENT 5 ET DIFFERENTES VITESSES DE DEPLACEMENT (A) 600, (B) 800, (C) 1000, (D) 1200, (E) 1500 MM/MIN.	67
FIGURE 3.1.2 DEFAUT DE « HUMPING » DANS UN CORDON DEPOSE AVEC UNE GRANDE VITESSE DE DEPLACEMENT	67
FIGURE 3.1.3 DOMAINE D'APPARITION DU HUMPING POUR LES DIFFERENTS POINTS DE FONCTIONNEMENT TESTES (P : PUISSANCE, TS : TRAVEL SPEED)	68
FIGURE 3.1.4 EVOLUTION DE LA HAUTEUR MOYENNE DES CORDONS EN FONCTION DE LA VITESSE DE DEPLACEMENT.	69
FIGURE 3.1.5 EVOLUTION DE LA LARGEUR MOYENNE DES CORDONS EN FONCTION DE LA VITESSE DE DEPLACEMENT.	69
FIGURE 3.1.6 EVOLUTION DU RATIO ENTRE LA LARGEUR ET LA HAUTEUR MOYENNES DES CORDONS EN FONCTION DE LA VITESSE DE DEPLACEMENT.	70
FIGURE 3.1.7 EVOLUTION DE L'ECART TYPE DE LA HAUTEUR DES CORDONS POUR CHAQUE POINT DE FONCTIONNEMENT EN FONCTION DE LA VITESSE DE DEPLACEMENT.....	71
FIGURE 3.1.8 TAUX DE DEPOT MOYENS MESURES ET ESTIMES POUR LES DIFFERENTS POINTS DE FONCTIONNEMENT TESTES, POUR UNE VITESSE DE DEPLACEMENT DE 500 MM/MIN.	72
FIGURE 3.2.1 ACCUMULATION DE MATIERE EN DEBUT DE CORDON FORMANT UNE « MACRO-GOUTTE » SUIVIE D'UN « CREUX ».....	73
FIGURE 3.2.2 INFLUENCE DE LA VITESSE DE DEPLACEMENT SUR LE DEFAUT FORME EN DEBUT DE CORDON (POINT DE FONCTIONNEMENT 7) (A)300, (B)400, (C)500, (D)600, (E)800, (F)1000 MM/MIN	73
FIGURE 3.2.3 GEOMETRIES SIMPLIFIEES DE MACRO-GOUTTE, (A) POUR UN ANGLE DE MOUILLAGE INFERIEUR A 90°, ET (B) POUR UN ANGLE DE MOUILLAGE SUPERIEUR A 90°	74

FIGURE 3.2.4 CYCLE D'AMORÇAGE CARACTERISTIQUE DU CYCLE CMT MONTRANT LES DEUX PARAMETRES REGLABLES	
IGNITION ET TIGNITION (POINT DE FONCTIONNEMENT 7)	75
FIGURE 3.2.5 EVOLUTION DE LA GEOMETRIE DU DEBUT DE CORDON EN FONCTION DE LA VALEUR DU COURANT D'AMORÇAGE.....	75
FIGURE 3.2.6 DIFFERENCES DE HAUTEUR ET DE LARGEUR MAXIMALES ET MINIMALES ENTRE LE DEBUT ET LE RESTE DU CORDON, EN	
FONCTION DU COURANT D'AMORÇAGE.	76
FIGURE 3.2.7 EVOLUTION DE LA GEOMETRIE DU DEBUT DE CORDON EN FONCTION DE LA VALEUR DE LA DUREE DU COURANT	
D'AMORÇAGE.	77
FIGURE 3.2.8 DIFFERENCES DE HAUTEUR ET DE LARGEUR MAXIMALES ET MINIMALES ENTRE LE DEBUT ET LE RESTE DU CORDON, EN	
FONCTION DE LA DUREE DU COURANT D'AMORÇAGE.....	77
FIGURE 3.2.9 DESCRIPTION DES PARAMETRES DU MODE CMT « 2-TEMPS SPECIAL ».	77
FIGURE 3.2.10 FORME D'ONDE CARACTERISTIQUE DE LA PHASE DE DEMARRAGE AVEC LE MODE « 2-TEMPS SPECIAL » ($I_s = 20\%$, $T_s =$	
0,5 s).	78
FIGURE 3.2.11 ASPECT DES CORDONS REALISES AVEC L'OPTION 2 TEMPS SPECIAL, (A) EN FONCTION DE LA VALEUR DU PARAMETRE I_s	
(AVEC $T_s = 0,5$ s), ET (B) EN FONCTION DE LA VALEUR DU PARAMETRE T_s (AVEC $I_s = 20\%$)	79
FIGURE 3.2.12 DIFFERENCES DE HAUTEUR ET DE LARGEUR MAXIMALES ET MINIMALES ENTRE LE DEBUT ET LE RESTE DU CORDON, EN	
FONCTION DE LA VALEUR DU PARAMETRE I_s	80
FIGURE 3.2.13 ASPECT DES CORDONS REALISES AVEC LE MODE « 2 TEMPS SPECIAL », AVEC LES PARAMETRES (A) $I_s = 70\%$ ET $T_s = 1$ s,	
(B) $I_s = 60\%$ ET $T_s = 1$ s, (C) $I_s = 50\%$ ET $T_s = 1$ s.	81
FIGURE 3.2.14 DIFFERENCES DE HAUTEUR ET DE LARGEUR MAXIMALES ET MINIMALES ENTRE LE DEBUT ET LE RESTE DU CORDON, EN	
FONCTION DES PARAMETRES DE DEMARRAGE I_s ET T_s	81
FIGURE 3.3.1 FORMES D'ONDES DU COURANT ET DE LA TENSION CARACTERISTIQUES D'UN CYCLE DE TRANSFERT EN CMT (POINT DE	
FONCTIONNEMENT 7 DE LA LOI SYNERGIQUE C1360), ET IMAGES EXTRAITES DES ENREGISTREMENTS PAR CAMERA RAPIDE	
MONTRANT LES PHENOMENES DE FUSION ET DE TRANSFERT DE MATIERE.....	82
FIGURE 3.3.2 FORMATION ET EVOLUTION DU DIAMETRE DU MENISQUE FORME DURANT LA PHASE DE COURT-CIRCUIT.	83
FIGURE 3.3.3 FORMES D'ONDES DU COURANT ET DE LA TENSION FILTREE NUMERIQUEMENT, ET LIMITES CHOISIES POUR DELIMITER LES	
TROIS PHASES DU CYCLE CMT.....	84
FIGURE 3.3.4 FORMES D'ONDE CARACTERISTIQUES DES POINTS DE FONCTIONNEMENT (A) 5, (B) 6, (C) 7, (D) 8, (E) 9 ET (F) 10 DE LA	
LOI SYNERGIQUE C1360	86
FIGURE 3.3.5 FORMES D'ONDE OBTENUES AVEC LA LOI SYNERGIQUE C1355, (A) POINT DE FONCTIONNEMENT 7 ($I_{BOOST} = 300$ A,	
$T_{BOOST} = 1,8$ ms, $I_{SCWAIT} = 70$ A, $I_{SC2} = 50$ A), (B) POINT DE FONCTIONNEMENT 8 ($I_{BOOST} = 300$ A, $T_{BOOST} = 2,1$ ms,	
$I_{SCWAIT} = 70$ A, $I_{SC2} = 70$ A)	87
FIGURE 3.3.6 EVOLUTION DU NOMBRE DE CYCLES PAR SECONDE EN FONCTION DE LA VITESSE DE DEPLACEMENT POUR LES DIFFERENTS	
POINTS DE FONCTIONNEMENT.	89
FIGURE 3.3.7 POIDS MOYEN DES GOUTTELETTES DEPOSEES A CHAQUE COURT-CIRCUIT POUR LES DIFFERENTS POINTS DE	
FONCTIONNEMENT.	91
FIGURE 3.3.8 REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE L'EXTREMITE DE LA TORCHE MONTRANT LE TUBE CONTACT, LA LONGUEUR DE FIL	
LIBRE ET L'ARC ELECTRIQUE	92
FIGURE 3.3.9 EVOLUTION DES CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES CORDONS EN FONCTION DE LA DISTANCE TUBE CONTACT –	
SUBSTRAT (POINT DE FONCTIONNEMENT 6 DE LA SYNERGIE C1355, VITESSE DE DEPLACEMENT DE 500 mm/min)	92
FIGURE 3.3.10 : EVOLUTION DE LA PUISSANCE MOYENNE DES PHASES DU CYCLE CMT EN FONCTION DE LA DISTANCE TUBE CONTACT –	
SUBSTRAT (POINT DE FONCTIONNEMENT 6 DE LA SYNERGIE C1355, VITESSE DE DEPLACEMENT DE 500 mm/min)	93
FIGURE 3.3.11 EVOLUTION DE LA DUREE DES PHASES DU CYCLE CMT EN FONCTION DE LA DISTANCE TUBE CONTACT – SUBSTRAT	
(POINT DE FONCTIONNEMENT 6 DE LA SYNERGIE C1355, VITESSE DE DEPLACEMENT DE 500 mm/min)	94
FIGURE 3.4.1 FORME D'ONDE DU COURANT CARACTERISTIQUE DU CYCLE DE TRANSFERT EN CMT CORRESPONDANT A LA LOI	
SYNERGIQUE C1355.	95
FIGURE 3.4.2 EVOLUTION DU POIDS MOYEN DES GOUTTELETTES DEPOSEES ET DU TAUX DE DEPOT EN FONCTION DU COURANT I_{BOOST} .	
.....	96
FIGURE 3.4.3 EVOLUTION DE LA DUREE DES PHASES DU CYCLE CMT EN FONCTION DU COURANT I_{BOOST}	96

FIGURE 3.4.4 MACROGRAPHIES MONTRANT L'INFLUENCE DE L'INTENSITE DE LA PHASE D'ARC CHAUD SUR LE MOUILLAGE ET LA PENETRATION. DU CORDON SUR LE SUBSTRAT (POUR UNE VITESSE DE DEPLACEMENT DE 500 MM · MIN ⁻¹), A) IBOOST=160 A , B) IBOOST=200 A , C) IBOOST=250 A , D) IBOOST=300 A	97
FIGURE 3.4.5 EVOLUTION DE LA DUREE DES PHASES DU CYCLE CMT EN FONCTION DU PARAMETRE TBOOST.	98
FIGURE 3.4.6 EVOLUTION DE L'ENERGIE PRODUITE PAR LES DIFFERENTES PHASES DU CYCLE CMT EN FONCTION DE LA DUREE TBOOST.	98
FIGURE 3.4.7 EVOLUTION DU TAUX DE DEPOT ET DU POIDS DES GOUTTELETTES DEPOSEES EN FONCTION DE LA DUREE TBOOST.	98
FIGURE 3.4.8 EVOLUTION DE LA DUREE DES PHASES DU CYCLE CMT EN FONCTION DU PARAMETRE VDSC_WAIT.	99
FIGURE 3.4.9 EVOLUTION DE L'ENERGIE PRODUITE LORS DES DIFFERENTES PHASES DU CYCLE CMT EN FONCTION DU PARAMETRE VDISC_WAIT.	100
FIGURE 3.4.10 EVOLUTION DU TAUX DE DEPOT ET DU POIDS MOYEN DES GOUTTELETTES DEPOSEES EN FONCTION DU PARAMETRE VDISC_WAIT.	100
FIGURE 3.4.11 EVOLUTION DE LA DUREE DE CHAQUE PHASE DU CYCLE CMT EN FONCTION DU PARAMETRE ISC2.	101
FIGURE 3.5.1 EVOLUTION DU TAUX DE DEPOT A) EN FONCTION DE L'INTENSITE I_BOOST, B) EN FONCTION DE LA DUREE T_BOOST, C) EN FONCTION DE L'INTENSITE ISC_WAIT, ET D) EN FONCTION DE LA VITESSE VDSC_WAIT	102
FIGURE 3.5.2 FORME D'ONDES DU COURANT ET DE LA TENSION MONTRANT LE CYCLE CMT, A) POUR LE POINT DE FONCTIONNEMENT 13 DE LA LOI SYNERGIQUE C1355, B) LORSQUE L'INTENSITE I_BOOST EST TROP ELEVEE (320 A), C) LORSQUE LA DUREE T_BOOST EST TROP ELEVEE (5 MS), D) LORSQUE L'INTENSITE ISC_WAIT EST TROP ELEVEE (150 A), ET E) LORSQUE LA VITESSE DE FIL VDSC_WAIT EST TROP ELEVEE (30 M/MIN).	103
FIGURE 3.5.3 EVOLUTION DES ECARTS TYPES DE LA HAUTEUR DES CORDONS EN FONCTION A) DE I_BOOST, B) DE T_BOOST, C) DE ISC_WAIT, ET D) DE VDSC_WAIT	105
FIGURE 4.2.1 STRATEGIES DE FABRICATION DES DEPOTS MULTICOUCHE, (A) EN CONSERVANT LE MEME SENS DE DEPOT POUR CHAQUE COUCHE, (B) EN ALTERNANT LE SENS DE DEPOT ENTRE CHAQUE COUCHE.	108
FIGURE 4.2.2 (A) MUR FABRIQUE AVEC LA STRATEGIE UTILISANT LE MEME SENS DE DEPOT, ET (B) MUR FABRIQUE EN UTILISANT LA STRATEGIE ALTERNEE DE DEPOT.	109
FIGURE 4.3.1 EVOLUTION DE LA LARGEUR MOYENNE DES MURS EN FONCTION DU NOMBRE DE CORDONS SUPERPOSES.	110
FIGURE 4.3.2 EVOLUTION DE LA HAUTEUR MOYENNE DE LA DERNIERE COUCHE DEPOSEE EN FONCTION DU NOMBRE DE CORDONS SUPERPOSES.	110
FIGURE 4.4.1 EVOLUTION DE LA HAUTEUR MOYENNE DE LA DERNIERE COUCHE DEPOSEE EN FONCTION DU NOMBRE DE CORDONS SUPERPOSES, POUR DIFFERENTES VITESSES DE DEPLACEMENT.	111
FIGURE 4.4.2 EVOLUTION DE LA LARGEUR MOYENNE DES MURS EN FONCTION DU NOMBRE DE CORDONS SUPERPOSES, POUR DIFFERENTES VITESSES DE DEPLACEMENT.	112
FIGURE 4.5.1 EVOLUTION DE LA HAUTEUR MOYENNE DU MUR EN FONCTION DU NOMBRE DE CORDONS SUPERPOSES, POUR DIFFERENTES VITESSES DE DEPLACEMENT ET DIFFERENTS TEMPS DE PAUSE ENTRE COUCHES	113
FIGURE 4.5.2 EVOLUTION DE LA LARGEUR MOYENNE DES MURS EN FONCTION DU NOMBRE DE CORDONS SUPERPOSES, POUR DIFFERENTES VITESSES DE DEPLACEMENT ET DIFFERENTS TEMPS DE PAUSE ENTRE COUCHES	113
FIGURE 4.6.1 EVOLUTION DE LA HAUTEUR MOYENNE DES MURS FABRIQUES AVEC DIFFERENTS POINTS DE FONCTIONNEMENT, AVEC UN RAPPORT ENTRE VITESSE DE FUSION DE FIL ESTIMEE ET VITESSE DE DEPLACEMENT CONSTANT	115
FIGURE 4.6.2 EVOLUTION DE LA LARGEUR MOYENNE DES MURS FABRIQUES AVEC DIFFERENTS POINTS DE FONCTIONNEMENT, AVEC UN RAPPORT ENTRE VITESSE DE FUSION DE FIL ESTIMEE ET VITESSE DE DEPLACEMENT CONSTANT	115
FIGURE 4.6.3 EVOLUTION DU VOLUME DES MURS FABRIQUES AVEC DIFFERENTS POINTS DE FONCTIONNEMENT, AVEC UN RAPPORT ENTRE VITESSE DE FUSION DE FIL ESTIMEE ET VITESSE DE DEPLACEMENT CONSTANT	116
FIGURE 4.7.1 EVOLUTION DE LA HAUTEUR MOYENNE ET DE LA LARGEUR MOYENNE DES MURS REALISES AVEC LE POINT DE FONCTIONNEMENT OPTIMISE EN FONCTION DE LA VITESSE DE DEPLACEMENT	117
FIGURE 4.7.2 EVOLUTION DU TAUX DE DEPOT ET DU VOLUME DE METAL DEPOSE DANS LES MURS DE 10 COUCHES DE LONGUEUR 80 MM REALISES AVEC LE POINT DE FONCTIONNEMENT OPTIMISE, EN FONCTION DE LA VITESSE DE DEPLACEMENT	118
FIGURE 4.9.1 REPRESENTATION DE LA FORME DE LA LOI NORMALE, OU LOI DE GAUSS [150]	120
FIGURE 4.9.2 REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES DISTRIBUTIONS DE CARACTERISTIQUES A) POUR UN PROCESSUS "SOUS CONTROLE", B) POUR UN PROCESSUS "HORS CONTROLE" [150]	120

FIGURE 4.9.3 REPRESENTATION DES LIMITES NATURELLES D'UN PROCESSUS. [150]	121
FIGURE 4.9.4 REPRESENTATION GRAPHIQUE D'UNE CARTE DE CONTROLE MONTRANT LES VALEURS MOYENNES DE CARACTERISTIQUE ET L'ETENDUE DE CES VALEURS POUR CHAQUE ECHANTILLON [150]	122
FIGURE 4.9.5 EXEMPLES DE CARTES DE CONTROLE DE PROCESSUS REVELANT DES SITUATIONS ANORMALES DANS LE COMPORTEMENT DES ECHANTILLONS [152]	123
FIGURE 4.9.6 INCIDENCE DE LA FREQUENCE D'ECHANTILLONNAGE [149]	125
FIGURE 4.9.7 EVOLUTIONS DU COURANT ET DE LA TENSION DU PROCEDE CMT, MONTRANT A) UN SIGNAL REGULIER REPRESENTATIF D'UN REGIME DE TRANSFERT STABLE, B) UN SIGNAL IRRÉGULIER INDICANT UN REGIME DE TRANSFERT INSTABLE.	127
FIGURE 4.9.8 EVOLUTION DE LA TENSION MOYENNE, DE LA DUREE, ET DU PRODUIT TENSION MOYENNE X DUREE DES PHASES D'ARC FROID, POUR UN CORDON REGULIER (POINT DE FONCTIONNEMENT 7 AVEC UNE VITESSE DE DEPLACEMENT DE 500 MM/MIN)	128
FIGURE 4.9.9 EVOLUTION DE LA TENSION MOYENNE, DE LA DUREE, ET DU PRODUIT TENSION MOYENNE X DUREE DES PHASES D'ARC FROID POUR UN CORDON IRRÉGULIER (PARAMETRES DU POINT DE FONCTIONNEMENT 7 AVEC UNE DIMINUTION DE L'INTENSITE I_BOOST A 100A ET UNE VITESSE DE DEPLACEMENT DE 500 MM/MIN)	129
FIGURE 4.9.10 CARTES DE CONTROLE DES MOYENNES A) DE LA TENSION Uw, B) DE LA DUREE TW ET C) DU PRODUIT Pw (POINT DE FONCTIONNEMENT 7, VITESSE DE DEPLACEMENT DE 500 MM/MIN).	132
FIGURE 4.9.11 A) ASPECT DU CORDON OBTENU AVEC LE POINT DE FONCTIONNEMENT 6 ET LA VITESSE DE DEPLACEMENT DE 500 MM/MIN, ET CARTES DE CONTROLE DES MOYENNES B) DE LA DUREE TW ET C) DU PRODUIT Pw.	133
FIGURE 4.9.12 A) ASPECT DU CORDON OBTENU AVEC LE POINT DE FONCTIONNEMENT 13 ET LA VITESSE DE DEPLACEMENT DE 800 MM/MIN, ET CARTES DE CONTROLE DES MOYENNES B) DE LA DUREE TW ET C) DU PRODUIT Pw	135
FIGURE 4.9.13 A) ASPECT DU CORDON OBTENU EN AUGMENTANT LE PARAMETRE Vdsc_wait A 50 M/MIN ET EN CONSERVANT TOUS LES AUTRES PARAMETRES DU POINT DE FONCTIONNEMENT 7, A LA VITESSE DE DEPLACEMENT DE 500 MM/MIN, ET CARTES DE CONTROLE DES MOYENNES B) DE LA DUREE TW ET C) DU PRODUIT Pw	136
FIGURE 4.9.14 A) ASPECT DU CORDON OBTENU EN DIMINUANT LE PARAMETRE I_BOOST A 100 A ET EN CONSERVANT TOUS LES AUTRES PARAMETRES DU POINT DE FONCTIONNEMENT 7, A LA VITESSE DE DEPLACEMENT DE 500 MM/MIN, ET CARTES DE CONTROLE DES MOYENNES B) DE LA DUREE TW ET C) DU PRODUIT Pw	137
FIGURE 4.9.15 A) ASPECT DU CORDON OBTENU AVEC LE POINT P13 ET UNE VITESSE DE DEPLACEMENT DE 2100 MM/MIN, ET CARTES DE CONTROLE DES MOYENNES B) DE LA DUREE TW ET C) DU PRODUIT Pw	139
FIGURE 4.9.16 CARTE DE CONTROLE DE LA VARIABLE TW LORS DE LA CONSTRUCTION D'UN MUR REALISE AVEC LE POINT DE FONCTIONNEMENT OPTIMISE, A) PREMIERE COUCHE, B) DEUXIEME COUCHE, C) TROISIEME COUCHE, D) QUATRIEME COUCHE	141
FIGURE 4.9.17 CARTE DE CONTROLE DE LA VARIABLE Pw LORS DE LA CONSTRUCTION D'UN MUR REALISE AVEC LE POINT DE FONCTIONNEMENT OPTIMISE, A) PREMIERE COUCHE, B) DEUXIEME COUCHE, C) TROISIEME COUCHE, D) QUATRIEME COUCHE	143

Liste des tableaux

TABEAU 1.5.1 CLASSIFICATION DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE FABRICATION ADDITIVE SELON L'ASTM [23].	9
TABEAU 1.5.2 LES DIFFERENTES CATEGORIES DE PROCEDES DE FABRICATION ADDITIVE ET LES TYPES DE MATERIAUX ASSOCIES [41].	10
TABEAU 1.7.1 COMPARAISON DES TECHNIQUES DE FABRICATION ADDITIVE METALLIQUE SUR LIT DE POUDRE, ET PRINCIPALES DESIGNATIONS EMPLOYEES POUR CES TECHNIQUES [55].	12
TABEAU 1.7.2 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES TECHNIQUES DE FABRICATION ADDITIVE PAR INJECTION DE POUDRE, ET PRINCIPALES DESIGNATIONS EMPLOYEES POUR CES TECHNIQUES [55].	12
TABEAU 1.7.3 COMPARAISON DES TECHNIQUES DE FABRICATION ADDITIVE METALLIQUE PAR FUSION DE FIL [55].	13
TABEAU 2.4.1 DESCRIPTION DES FONCTIONS DE SERVICE ET DES FONCTIONS CONTRAINTE FIXEES PAR L'ENVIRONNEMENT DU PRODUIT	39
TABEAU 2.4.2. ANALYSE DES FONCTIONS ET DE LEUR DEGRE DE FLEXIBILITE	40
TABEAU 2.8.1. COMPOSITION CHIMIQUE DU FIL ELECTRODE G3Si1.	51
TABEAU 2.8.2. CARACTERISTIQUES MECANQUES DU FIL ELECTRODE G3Si1.	51
TABEAU 2.8.3. COMPOSITION CHIMIQUE DE LA TOLE EN ACIER S235JR.	52
TABEAU 2.8.4. CARACTERISTIQUES MECANQUES DE LA TOLE EN ACIER S235JR.	52
TABEAU 2.8.5. COMPOSITION CHIMIQUE DU GAZ DE PROTECTION.	52
TABEAU 3.1.1 VALEURS DES PARAMETRES PROCEDE PREDEFINIES DANS LA LOI SYNERGIQUE C1360, ET VALEURS MOYENNES DE COURANT, TENSION, PUISSANCE ET VITESSE DE FUSION DU FIL ASSOCIEES.	66
TABEAU 3.3.1 CONDITIONS ETABLIES POUR SEPARER LES TROIS PHASES DU CYCLE EN FONCTION DES VALEURS DE TENSION ET D'INTENSITE	85
TABEAU 3.3.2 PUISSANCE MOYENNE DE CHAQUE PHASE DU CYCLE CMT, POUR LES DIFFERENTS POINTS DE FONCTIONNEMENT	89
TABEAU 3.3.3 DUREES MOYENNES DE CHAQUE PHASE DU CYCLE CMT POUR LES DIFFERENTS POINTS DE FONCTIONNEMENT	90
TABEAU 3.3.4 ENERGIE MOYENNE DES DIFFERENTES PHASES ET ENERGIE TOTALE DU CYCLE POUR LES DIFFERENTS POINTS DE FONCTIONNEMENT	91
TABEAU 3.4.1 PARAMETRES STANDARDS CORRESPONDANT AU POINT DE FONCTIONNEMENT 13 DE LA SYNERGIE C1355	95
TABEAU 3.5.1 CHOIX DES PARAMETRES OPTIMISES PRESENTANT UN TAUX DE DEPOT MAXIMUM	105
TABEAU 4.9.1 MOYENNES ET ECARTS TYPES DES VARIABLES DE CONTROLES RETENUES, CALCULEES POUR DES CORDONS REGULIERS	130