



HAL
open science

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

Arturo Gomez Ortega

► To cite this version:

Arturo Gomez Ortega. Prototypage rapide de pièces en alliage d'aluminium : étude du dépôt de matière et d'énergie lors de la fusion à l'arc d'un fil par le procédé MIG-CMT. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université de Montpellier, 2018. Français. NNT : . tel-01772359v1

HAL Id: tel-01772359

<https://hal.science/tel-01772359v1>

Submitted on 20 Apr 2018 (v1), last revised 21 May 2019 (v2)

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, Structures et Systèmes

Laboratoire de Mécanique et Génie Civil

Prototypage rapide de pièces en alliage d'aluminium :
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 Arturo GOMEZ ORTEGA

Le 31 Janvier 2018

Sous la direction de Frédéric DESCHAUX-BEAUME
et Sébastien ROUQUETTE

Devant le jury composé de

Joel ALEXIS, Professeur, ENI Tarbes

Pascal PAILLARD, Professeur, Polytech Nantes

Christophe COLIN, Attaché de recherche, MINES ParisTech, Centre des Matériaux

Bachir MEZRAG, Ingénieur, CEA Grenoble

Sébastien ROUQUETTE, Maître des Conférences, Université de Montpellier

Frédéric DESCHAUX-BEAUME, Professeur, Université de Montpellier

Président du jury

Rapporteur

Examineur

Examineur

Co-encadrant

Directeur



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER

Remerciements

Au Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) pour avoir supporté mon formation et pour m'avoir accompagné tout au long de mon séjour en France.

A l'Université de Montpellier, le Laboratoire de Mécanique et Génie Civil et l'IUT de Nîmes, les institutions dans lesquelles j'étais accueilli et formé ces trois ans, et où j'ai pu recevoir tout le soutien nécessaire pour le développement de ce projet de thèse.

A tous les enseignants, les chercheurs et les collègues, qui étaient présents à tout moment de mon séjour, pour partager leurs connaissances, leur soutien ainsi que leur amitié. D'une façon particulière aux membres de l'équipe Assemblages Soudés :

Frédéric, Sébastien, Cyril, Fabien, Issam, Alexis, Romain, Simon, Luis.

A mes parents, pour l'attention, la confiance et le soutien inconditionnel qu'ils m'ont apporté.

A mes amis, bien plus que des camarades, avec qui j'ai eu l'occasion de partager et de réussir dans cette étape enrichissante.

A tous les amis qu'ont été avec moi avant de commencer cette aventure et que continuent à me donner leur précieuse amitié.

Enfin, à tous ceux que j'ai rencontré au cours de ce voyage.

Merci à tous.

Glossaire d'acronymes

3D	Trois Dimensions
AM	Additive Manufacturing
ASTM	American Society for Testing Materials
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CMB	Controlled Metal Buildup
CMT	Cold Metal Transfer
DAQ	Data Acquisition
DED	Direct Energy Deposition
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
FA	Fabrication Additive
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
LENS	Laser Engineering Net Shaping
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert GAS
POM	Precision Optical Manufacturing
RAMPS	Reprap Arduino Mega Pololu Shield
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Stereolithography
STT	Surface Tension Transfer
TIG	Tungsten Inert Gas
VTK	Visualisation Toolkit

Table des matières

Introduction	5
Chapitre 1. Revue bibliographique	8
1.1 La fabrication additive	8
1.1.1 Généralités sur les procédés de fabrication	8
1.1.2 Méthodologie générale de fabrication additive	10
1.1.3 Classification des techniques de fabrication additive	12
1.2 La fabrication additive des pièces métalliques	13
1.2.1 Classification des procédés de fabrication additive de pièces métalliques	13
1.2.2 Technologies à base de laser	15
1.2.3 Technologies basées sur la fusion par faisceau d'électrons (Electron Beam Melting - EBM)	17
1.2.4 Technologies basées sur la fusion par arc électrique	18
1.3 La technologie WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing)	18
1.3.1 Les technologies de soudage à l'arc employées en WAAM	19
1.3.2. Les différents modes de transfert en soudage MIG	23
1.3.3. Soudage à l'arc de l'aluminium et de ses alliages	28
1.3.4. Les développements récents du procédé WAAM	30
1.4 Conclusion	37
Chapitre 2. Instrumentation	39
2.1 Conception du banc d'essai	39
2.1.1 Cahier des charges	40
2.1.2 Choix du type de mécanisme	41
2.1.3 Conception du système cartésien de mouvement	42
2.1.4 Conception Mécanique	44
2.1.5 Dimensionnement des différents composants mécaniques du banc d'essai	45
2.1.6 Electronique	47
2.1.7 Logiciels de contrôle et de commande	48
2.2 Le procédé de soudage CMT	50
2.2.1 Paramètres caractéristiques du procédé CMT	51
2.2.2 Enregistrement et traitement des données	53
2.3 Caractérisation géométrique des dépôts	55
2.3.1 Numérisation des pièces et récupération des modèles numériques	56
2.3.2 Méthode de mesure graphique	58
2.3.3 Méthode de mesure numérique	63
2.4 Autres techniques de caractérisation	65
2.4.1. Caméra rapide	65

2.4.2	Caractérisation micrographique	66
2.5	Conclusion	66
Chapitre 3.	Etude des dépôts réalisés avec les paramètres standards du procédé CMT.....	68
3.1	Paramètres procédé.....	68
3.2	Caractéristiques des cordons déposés.....	69
3.2.1	Aspect général des cordons déposés	69
3.2.2	Caractéristiques géométriques des cordons	73
3.2.3	Volume de matière déposé.....	78
3.3	Caractérisation de la puissance et de l'énergie associée aux différentes phases du cycle CMT.....	79
3.3.1	Méthodologie	79
3.3.2	Résultats.....	82
3.4	Influence de la distance tube-contact / substrat.....	87
3.5	Conclusion.....	91
Chapitre 4.	Optimisation des paramètres procédé.....	92
4.1	Analyse et réduction des défauts géométriques dans les dépôts mono-cordon.....	92
4.1.1	Longueur de dépôt inférieure à la consigne	92
4.1.2	Accumulation de matière en début de cordon.....	94
4.1.3	Irrégularités de forme périodiques du cordon	105
4.2	Influence des paramètres de la synergie CMT sur la géométrie des cordons.....	106
4.2.1	Mise en évidence des valeurs limites de chaque paramètre.....	107
4.2.2	Influence des paramètres de la phase d'arc chaud	107
4.2.3	Influence des paramètres de la phase d'arc froid.....	119
4.2.4	Influence du parameter de la phase de court-circuit	123
4.3	Vers un contrôle en ligne du procédé	124
4.3.1	Analyse de l'évolution de la durée de la phase boost	124
4.3.2	Analyse de l'évolution de la durée de la phase de court-circuit	126
4.3.3	Analyse de l'évolution de la durée de la phase d'arc froid.....	128
4.4	Conclusion.....	131
Chapitre 5.	Fabrication de dépôts multi-cordons.....	133
5.1	Etude de l'effet de la superposition de plusieurs cordons	133
5.1.1	Stratégie de construction.....	133
5.1.2	Evolution de la géométrie des dépôts avec l'addition des cordons.....	134
5.1.3	Influence de la vitesse d'avance sur la géométrie des dépôts	137
5.1.4	Influence des paramètres de dépôt sur le transfert de métal	141
5.2	Simulation numérique thermique des dépôts.....	145
5.2.1	Définition de la géométrie d'étude.....	145

5.2.2 Équation de la conduction de la chaleur	146
5.2.3 Modèle de source de chaleur équivalent pour le procédé MIG-CMT	147
5.2.4 Simulation thermique du dépôt de matière par le procédé CMT	148
5.3 Correction des défauts de fabrication	155
5.3.1 Amélioration de la géométrie des dépôts multi-cordons	156
5.3.2 Contrôle du procédé	160
5.4 Conclusion	168
Conclusion et perspectives	170
Annexe 1 : dimensionnement du mécanisme de mouvement dans le plan XY	173
A1.1 Dimensionnement des rails de guidage	173
A1.2 Choix des moteurs et vis d'entraînement	178
Annexe 2 : influence des paramètres de la synergie CMT sur les caractéristiques du transfert et sur la géométrie des cordons	184
A2.1 Influence des paramètres de la phase d'arc chaud	184
Paramètre d_boostup [A/ms]	184
Paramètre tau_boostup [ms]	186
Paramètre I_boost [A]	188
Paramètre t_I_boost [ms]	190
Paramètre d_boostdown [A/ms]	192
A2.2 Influence des paramètres de la phase d'arc froid	194
Paramètre I_sc_wait (A)	194
Paramètre Vd_sc_wait (m/min)	196
A2.3 Influence des paramètres de la phase court-circuit	198
Paramètre I_sc2[A]	198
Annexe 3 : évolution de la durée des phases du cycle CMT le long du dépôt	200
Références	213
Liste de Figures	219
Liste de Tableaux	227

Introduction

Le développement récent des technologies de fabrication additive constitue une véritable révolution dans de nombreux secteurs de l'industrie. En permettant la fabrication directe de pièces unitaires ou en série à partir des modèles géométriques développés par les bureaux d'étude à partir des logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO), ils réduisent considérablement les temps de développement de nouveaux produits. Ils permettent de plus de fabriquer des pièces de formes complexes, irréalisables avec les procédés de fabrication conventionnels, sans nécessiter le recours à des outils coûteux. Enfin, ils permettent un gain de matière important par rapport aux procédés de fabrication pas usinage, car ils induisent très peu de pertes, ce qui est un avantage considérable pour les matériaux présentant des coûts élevés, comme les alliages de titane.

Ces procédés permettent aujourd'hui de fabriquer des pièces métalliques qui sont ou seront prochainement utilisées dans le domaine médical, aéronautique, ou encore dans le secteur de l'énergie. Les technologies actuelles de fabrication de pièces métalliques sont basées sur la fusion de poudres préalablement déposées en couche ou projetées sur la surface de construction, à l'aide d'un faisceau laser ou d'un faisceau d'électrons orienté. En se solidifiant, le métal fondu produit des dépôts denses, que l'on peut superposer pour former des pièces. Ces procédés sont cependant très coûteux, en raison de la complexité des équipements actuels, mais aussi du coût élevé des poudres.

Les technologies basées sur la fusion à l'arc électrique d'un fil métallique peuvent fournir une alternative intéressante aux technologies actuelles, en particulier pour la fabrication de pièces métalliques de grandes dimensions. Si elles n'ont pas jusqu'ici bénéficié du même engouement que les technologies à base de poudre, en raison principalement de la mauvaise qualité des surfaces produites, elles font l'objet depuis quelques années de nouveaux développements, notamment dans le cadre du projet européen Rapolac, coordonné par l'université de Sheffield, qui a conduit en 2010 au développement d'un prototype de machine. Ces technologies sont aussi à la base d'un procédé de fabrication additive breveté par l'entreprise Norsk Titanium pour fabriquer des pièces en alliages de titane. Les technologies arc-fil métallique présentent un certain nombre d'avantages en comparaison des technologies à base de laser ou de faisceau d'électron: des taux de dépôt élevés qui permettent de réduire les temps de production, des coûts machine plus faibles, et un matériau de base massif, qui élimine tous les inconvénients liés à l'utilisation de poudres (coût et disponibilité des matières premières, variabilité de comportement selon la composition et la granulométrie, risques de pollution lors de leur stockage et de leur manipulation, risques pour la santé...).

Les technologies de fabrication additive arc-fil métallique sont toutes basées sur la fusion produite par un arc électrique d'un fil métallique, qui est ensuite déposé à l'état liquide sur la surface de construction, sur laquelle il se solidifie en formant un « cordon ». La superposition en couches de ces cordons permet alors de fabriquer des pièces. Ces technologies sont directement dérivées des procédés de soudage à l'arc, et utilisent le même type de source de courant et de « tête » ou « torche » pour assurer le dévidage du fil, la fusion du métal et son dépôt. Plusieurs procédés de soudage à l'arc ont ainsi fait l'objet d'applications en fabrication additive de pièces métalliques. Les technologies basées sur la création d'un arc entre une

électrode réfractaire (non fusible) et la surface des pièces, comme les technologies Plasma ou TIG (Tungsten Inert Gas), sont les plus précises, car la fusion et le dépôt de métal à l'état liquide sont généralement réguliers. En revanche, les procédés basés sur une électrode fusible, comme le procédé MIG (Metal Inert Gas) permettent des taux de dépôt plus élevés, mais souffrent d'instabilités qui produisent généralement un mauvais état de surface des cordons. Une variante récemment développée du procédé MIG, appelée CMT (Cold Metal Transfert), permet cependant d'améliorer la qualité des dépôts. C'est ce dernier procédé que nous avons choisi d'utiliser dans cette étude.

L'objectif du travail de recherche présenté dans ce mémoire est d'étudier l'influence des différents paramètres du procédé CMT sur les mécanismes de transfert de métal (fusion et dépôt du fil) et de chaleur, dans le cas de l'utilisation d'un fil métallique en alliage d'aluminium Al-5Si, en vue de son utilisation en fabrication additive.

Le premier chapitre présente une revue bibliographique des principes et techniques de la fabrication additive, et détaille en particulier les développements récents concernant les procédés basés sur les technologies arc-fil métallique.

Le second chapitre décrit les dispositifs expérimentaux développés et/ou utilisés dans ce travail. Le banc de fabrication additive, spécialement conçu pour cette étude, est d'abord présenté, puis les caractéristiques du procédé de soudage CMT, qui a été intégré sur ce banc de fabrication pour assurer l'apport de fil métallique, sa fusion contrôlée et son dépôt, sont détaillées. Enfin, une méthode originale employée pour caractériser la géométrie des dépôts est décrite, ainsi que les principales autres techniques de caractérisation utilisées par la suite.

Le troisième chapitre décrit les résultats des premiers essais de dépôts mono-cordon, réalisés avec des paramètres standard préenregistrés dans le générateur du procédé de soudage CMT. L'effet de la variation des paramètres procédé sur la géométrie des dépôts est d'abord étudié. Une analyse des caractéristiques des signaux électriques de tension et d'intensité enregistrés pendant tout le procédé de dépôt est aussi menée, de manière à mieux comprendre les relations entre les caractéristiques énergétiques de l'arc électrique produit, la fusion du matériau, et son transfert plus ou moins régulier sur la surface de construction, ainsi que les échanges thermiques associés.

Le quatrième chapitre est consacré à l'optimisation du procédé, de manière à tenter d'obtenir des cordons déposés plus réguliers. Les défauts les plus critiques, observés en début de cordon, sont en particulier analysés, et sont en partie corrigés en modifiant les paramètres « d'amorçage » du procédé CMT. L'analyse de l'influence de chaque paramètre du cycle de soudage CMT sur les caractéristiques des signaux électriques de l'arc et la géométrie des cordons déposés est ensuite menée, de manière à identifier les paramètres à modifier pour corriger les défauts, en agissant sur les conditions de transfert de chaleur et de matière. Enfin, les bases d'une méthode de contrôle en ligne du procédé sont posées. Cette méthode nécessite d'identifier les relations entre les caractéristiques des signaux de tension et d'intensité du procédé, et les instabilités du transfert de métal, qui peuvent conduire à l'apparition de défauts géométriques.

Le dernier chapitre s'attaque à la fabrication de murs par la superposition d'un nombre important de cordons, étape qui doit être maîtrisée pour pouvoir fabriquer des pièces de géométries plus complexes. Le problème de l'accumulation de chaleur avec la superposition des cordons est vite identifié, qui modifie fortement la géométrie des dépôts. Une étude par simulation numérique des transferts thermiques est alors menée pour mieux comprendre comment évoluent les champs de température en fonction du nombre de cordons superposés.

Enfin, les défauts apparaissant lors de la superposition de couches sont analysés et en partie corrigés. La méthode de contrôle en ligne du procédé est testée sur ces configurations, pour tenter d'identifier les premières phases d'apparition des défauts, et les corriger avant qu'ils ne deviennent critiques.

Chapitre 1. Revue bibliographique

Ce premier chapitre est consacré à l'analyse des données de la littérature concernant les procédés de fabrication additive, et en particulier les procédés dérivés du soudage. Les principes de la fabrication additive sont d'abord décrits, puis les technologies spécifiquement dédiées à la fabrication de pièces métalliques sont discutées. Enfin, les technologies basées sur le dépôt de fil métallique fondu par un arc électrique sont présentées, et les derniers développements, ainsi que les limites actuelles de ces procédés, sont discutés.

1.1 La fabrication additive

1.1.1 Généralités sur les procédés de fabrication

La fabrication est toujours définie comme l'ensemble des opérations successives aboutissant à la réalisation matérielle d'un produit ou la transformation de la matière première en produit. Le produit issu d'un processus de fabrication est souvent décomposé en plusieurs éléments ou pièces. Pour fabriquer chaque pièce, il est alors nécessaire de choisir le procédé le plus adapté pour répondre au niveau de qualité requis. En effet, afin que les pièces fabriquées soient utilisables, elles doivent satisfaire à certains critères, notamment en terme de tolérances dimensionnelles ou d'état de surface [1].

Les techniques de fabrication utilisées aujourd'hui dans l'industrie peuvent être regroupées dans trois catégories : les techniques de fabrication soustractive, les techniques de fabrication formative, et celles issues du nouveau concept de fabrication additive, qui a pu émerger grâce au développement des outils numériques et leur intégration aux processus de fabrication [2].

La fabrication soustractive regroupe toutes les techniques basées sur l'enlèvement de matière. Le principe de la fabrication soustractive de pièces métalliques, couramment appelée usinage, consiste à éliminer des parties d'une pièce brute pour donner à la pièce finale la forme, les dimensions et la surface désirées, à l'aide d'une machine-outil. On trouve dans cette catégorie toutes les techniques ou opérations d'usinage « conventionnelles », basées sur l'enlèvement mécanique de matière à l'aide d'outils tranchants ou abrasifs : l'alésage, le brochage, le fraisage, le découpage, le perçage, le filetage, le taraudage, la rectification, le tournage, le polissage, le limage. Des techniques d'enlèvement de matière chimiques ou électrochimiques peuvent aussi être utilisées (usinage chimique, électrolytique, électrochimique, électroérosion...). Certaines de ces opérations sont réalisées manuellement, mais on utilise la plupart du temps des machines-outils (affûteuses, fraiseuses, électroérosion, marquage/gravure, perceuses, rectifieuses, tours, centres d'usinage...). Ces machines-outils peuvent aujourd'hui être commandées de façon numérique. Pour toutes ces techniques, la pièce finale est obtenue à partir d'une pièce brute plus massive, et l'excès de matière est donc perdu, généralement sous la forme de fins copeaux de métal, ce qui représente l'inconvénient principal de ces procédés. En revanche, l'avantage de ces techniques est qu'elles permettent d'obtenir des pièces d'une grande précision dimensionnelle, et présentant un très bon état de surface.

Les techniques de fabrication formative regroupent les procédés permettant d'obtenir une pièce de forme désirée par déformation mécanique de la matière (forgeage, matriçage, emboutissage, pliage, extrusion...), ou par fusion et transfert à l'état liquide dans un moule ou une empreinte (fonderie, moulage). Contrairement à la catégorie de procédés précédente, il n'y a pas ou peu de perte de matière avec ces procédés, mais ils peuvent modifier la structure de la matière, et donc ses propriétés mécaniques. Pour la fabrication en série de pièces, ils permettent généralement des gains de temps par rapport aux procédés de fabrication soustractive.

Enfin, les techniques de fabrication additive (FA) comprennent tous les procédés basés sur l'ajout progressif de matière, généralement grâce à l'empilement de couches successives. La fabrication additive peut être définie comme une technique de fabrication d'objets en trois dimensions dans laquelle le relief des éléments à façonner est obtenu par un procédé d'impression (on parle alors d'impression 3D) qui consiste à déposer successivement des couches de matière les unes sur les autres selon le modèle numérique conçu à l'aide d'un ordinateur [3]. On parle aussi parfois de fabrication directe ou fabrication rapide, puisque la fabrication d'un objet physique (en trois dimensions et de forme quelconque) peut être obtenue directement à partir d'une description numérique (typiquement un fichier CAO), par un processus rapide, automatique et flexible [4]. On peut citer en exemple, parmi les divers procédés de FA récemment développés, la stéréolithographie, le frittage sélectif par laser, ou la fabrication par dépôt de fil fondu.

La fabrication additive présente trois gros avantages par rapport aux techniques de fabrication soustractive ou formative [3, 5]. Elle peut en premier lieu réduire les coûts de production, en particulier pour les pièces unitaires ou les petites séries, car elle permet d'obtenir des prototypes ou des produits sans qu'il soit nécessaire de recourir à une grande variété d'outillages coûteux. Elle permet ensuite des gains de temps importants dans le processus de conception de nouveaux produits, ce qui constituait l'un des objectifs initiaux de ces techniques (on parlait au départ de prototypage rapide), avec la réduction des temps de développement des produits en réalisant la construction des prototypes et produits d'une façon plus directe et efficace. Enfin, les procédés de fabrication additive offrent une grande liberté de forme des pièces produites, permettant notamment d'obtenir des formes de pièces impossibles ou très difficiles à réaliser par des procédés conventionnels.

D'autres avantages moins évidents à quantifier peuvent être cités, comme des gammes opératoires de fabrication moins complexes que pour un procédé d'usinage, où l'on doit considérer la forme 3D complète de la pièce pour assurer l'accessibilité des outillages et pour éviter les collisions, et définir une séquence d'opérations avec des réglages différents pour chacune, alors qu'en FA, la forme 3D de la pièce est découpée en une série de sections 2D qui peuvent être fabriquées avec les mêmes réglages machine. Les erreurs de programmation d'un système de FA n'ont enfin comme seules conséquences qu'une perte de temps et de matière, alors que pour les machines d'usinage une telle erreur peut entraîner de graves dommages à la machine ou même un risque pour la sécurité des opérateurs.

La fabrication additive présente cependant aussi des points faibles en comparaison des techniques de fabrication traditionnelles. La dimension des pièces que l'on peut réaliser en FA est limitée par le volume de travail de la machine, qui est encore relativement faible en comparaison des dimensions qu'on peut rencontrer en usinage. Une machine de fabrication additive ne permet de réaliser, généralement, qu'une seule pièce à la fois, et le temps de production est donc sensiblement proportionnel au nombre de pièces fabriquées. La technique n'est donc pas adaptée à la production en moyenne ou grande série. Enfin, la précision

géométrique et les tolérances dimensionnelles sont en général moins bonnes qu'avec les techniques d'usinage, et l'homogénéité de structure du matériau, et donc ses propriétés d'usage, sont encore difficiles à garantir.

1.1.2 Méthodologie générale de fabrication additive

Le mode opératoire de fabrication additive, à la différence des procédés de fabrication soustractive, implique l'apport progressif de matière, les différents « morceaux » devant se combiner de façon correcte pour produire l'objet désiré. Les machines de FA utilisent une approche à base de couches ajoutées de façon successive, chaque couche étant une tranche mince de la pièce issue des données CAO originales. Les diverses technologies de FA se distinguent par la nature, l'état et la forme de la matière première utilisée, et par le procédé qui permet de déposer ou de densifier ce matériau pour former les différentes couches. Le choix de la technologie employée déterminera les caractéristiques du type de pièce qui pourra être réalisé, en terme de dimensions, de précision dimensionnelle, de matériau, de propriétés mécaniques, ainsi que les durées et coûts de production, et les éventuelles opérations de parachèvement qui devront être réalisées [3]. Une grande variété de procédés de FA existe aujourd'hui, qui utilisent divers matériaux sous forme de liquide, de poudre ou de fil solide pour former des pièces massives. Pour tous ces procédés de FA, un mode opératoire commun existe, qui suit les étapes suivantes :

1. Création du modèle CAO de la pièce.

La fabrication d'une pièce en FA démarre toujours par la création d'un modèle développé dans un logiciel qui décrit entièrement la géométrie de la pièce (Figure 1.1). Ce modèle peut être créé avec un logiciel de CAO de modélisation solide, le résultat devant être une représentation en 3D du volume de la pièce ou de sa surface externe. Un équipement de rétro-ingénierie (par exemple, un scanner 3D) peut aussi être utilisé pour créer cette représentation.

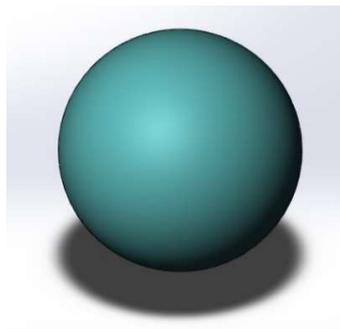


Figure 1.1 Modèle CAO de la pièce à réaliser

2. Conversion du fichier CAO en un fichier au format stéréo lithographie (STL).

Le format de fichier STL est devenu un standard en FA, et presque tous les systèmes de fabrication additive l'acceptent. La plupart des logiciels de CAO permettent la conversion de fichier dans ce format. Le format de fichier STL décrit les surfaces externes fermées du modèle CAO d'origine à partir de facettes triangulaires caractérisées par leurs sommets et normales extérieures (Figure 1.2), qui constituent la base pour le calcul du découpage de la pièce en tranches (couches).

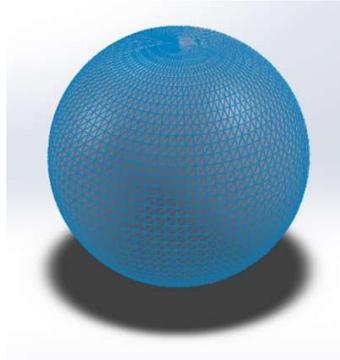


Figure 1.2 Représentation de la pièce au format STL

3. Découpage du fichier STL en tranches.

Cette étape du processus est généralement réalisée en utilisant des logiciels spécifiques à la FA, qui peuvent lire l'information contenue dans les fichiers STL pour découper la forme en tranches d'épaisseur fixée, et créer les chemins/trajectoires que devra suivre la « tête » de la machine pour fabriquer la pièce. C'est à travers ces logiciels que l'on définit les paramètres de fabrication, tels que la hauteur de chaque couche, la vitesse de déplacement de la tête de fabrication, la stratégie d'empilement des couches... Ces données sont traduites dans un langage appelé G-code.

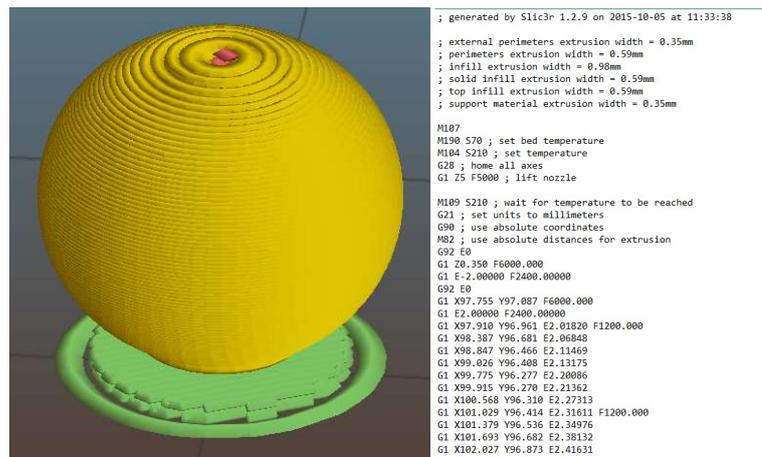


Figure 1.3 : Découpe du fichier STL en tranches et création du fichier de commande en langage G-code

4. Transfert des données vers la machine et fabrication de la pièce

Le programme en G-code est ensuite traduit par la machine, via un ordinateur ou dans certains cas à travers une carte de mémoire flash directement branchée sur la machine, pour transformer les instructions du programme en mouvements de la machine et en dépôt de matière.

5. Finition et post-traitement.

Une fois la fabrication de la pièce terminée, celle-ci doit être détachée du plateau de la machine ou du support. La pièce peut ensuite encore nécessiter un nettoyage, pour

éliminer les supports de construction parfois nécessaires à la fabrication de certaines géométries de pièces pour soutenir les couches. Enfin, des traitements de parachèvement mécanique (usinage, grenailage...) ou thermiques peuvent être réalisés.

1.1.3 Classification des techniques de fabrication additive

Les techniques de fabrication additive sont nombreuses et se différencient notamment par la nature et la forme du matériau utilisé, ou par le procédé employé pour produire le dépôt ou la densification des couches. La figure 1.4 présente une classification de ces procédés en trois grandes catégories, en fonction de la forme ou de l'état du matériau brut utilisé [3, 5, 6]. La première catégorie concerne les procédés de stéréolithographie, qui utilisent comme matière première une résine liquide qui polymérise sous l'action d'un rayon lumineux orienté sur les zones à durcir. La seconde catégorie regroupe tous les procédés utilisant un fil polymère ou métallique pour produire des pièces, ainsi que les procédés de « stratoconception » qui consistent à découper dans des feuilles ou plaques minces des strates qui sont ensuite collées entre elles. Enfin, la dernière catégorie rassemble tous les procédés utilisant des poudres, qui sont ensuite densifiées par frittage ou fusion sélective, ou en utilisant un liant pour former des pièces solides.

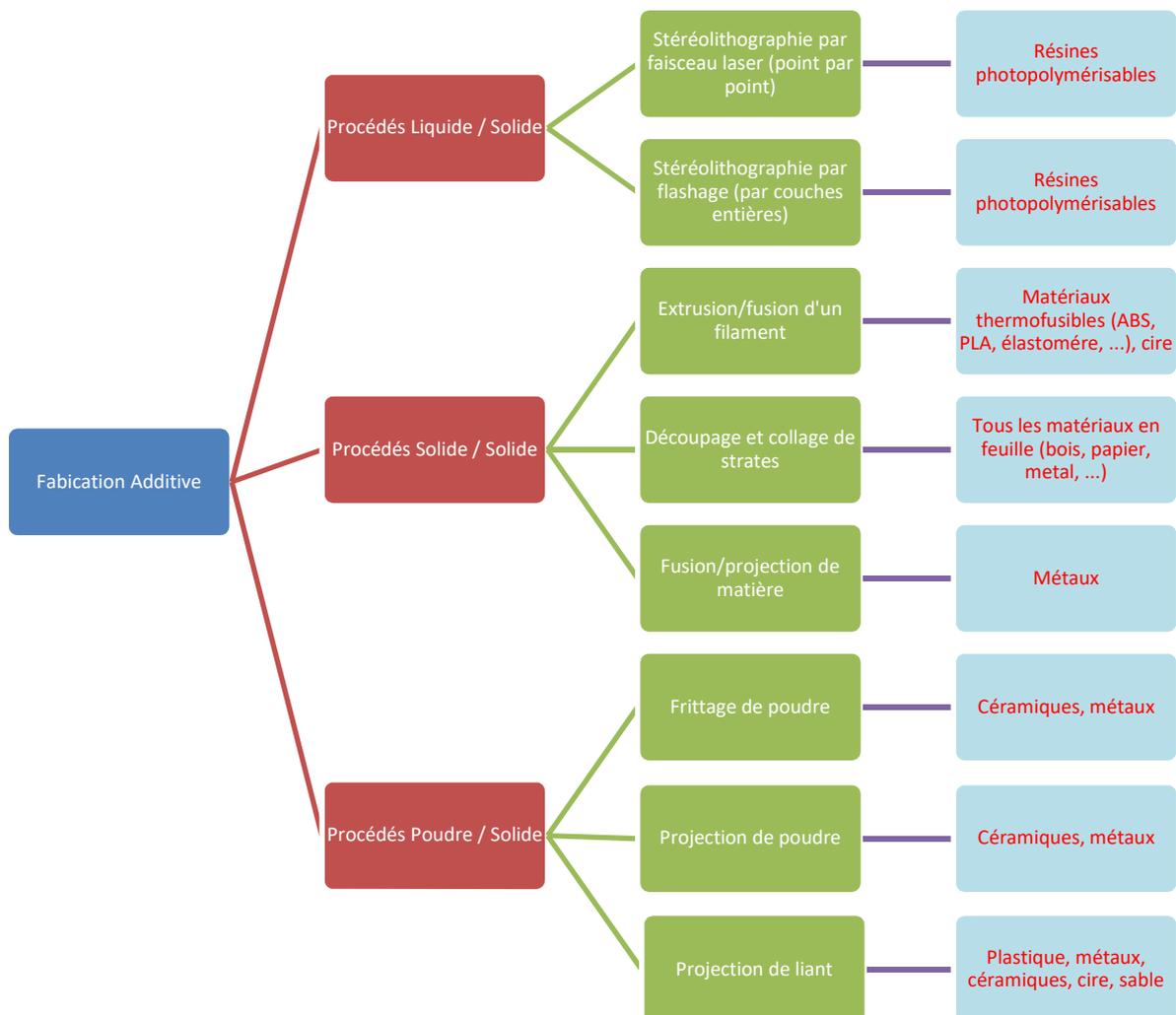


Figure 1.4 : Classification générale des procédés de fabrication additive [3,5,6]

1.2 La fabrication additive des pièces métalliques

Parmi les technologies de FA citées dans le précédent paragraphe, plusieurs peuvent être employées pour la fabrication de pièces métalliques. Les composants obtenus à l'aide de ces techniques peuvent présenter de très bonnes propriétés, notamment mécaniques, et ces procédés sont déjà utilisés dans certains secteurs industriels pour la production de pièces (outillage, automobile, aéronautique et spatial, biomédical...). Cependant, en raison des risques importants de formation de défauts, notamment de porosités, ou de la présence de contraintes résiduelles propres à ces procédés, ces derniers sont encore en cours d'évaluation pour la réalisation de pièces pour certaines applications critiques.

1.2.1 Classification des procédés de fabrication additive de pièces métalliques

Selon la classification retenue par l'ASTM (American Society for Testing Materials - ASTM F2792), les technologies de Fabrication Additive pour les composants métalliques peuvent être regroupées en quatre catégories selon le procédé employé pour assurer la densification ou la liaison des couches déposées (Tableau 1.1) : les technologies par liaison par jet d'encre, par fusion sur lit de poudre, par stratification de feuilles métalliques, et par dépôt d'énergie dirigée [7, 8].

Tableau 1.1 : Classification des procédés de fabrication additive de pièces métalliques selon l'ASTM [9]

Classification	Définition	Type de matériau	Source de liaison
Liaison par jet d'encre (Binder Jetting)	Processus dans lequel un agent liquide de liaison est déposé de manière sélective pour joindre la poudre métallique.	Poudre	<ul style="list-style-type: none"> ● Agent liquide
Fusion sur lit de poudre (Powder Bed Fusion)	Processus dans lequel une énergie thermique fond, de manière sélective, certaines régions d'un lit de poudre.	Poudre	<ul style="list-style-type: none"> ● Lasers ● Faisceau d'électrons
Stratification de feuilles métalliques (Sheet Lamination)	Processus dans lequel des feuilles de métal sont collées entre elles pour former un objet.	Feuille de métal Stratifié de métal Métal plaqué	<ul style="list-style-type: none"> ● Soudage ● Visserie ● Consolidation ultrasonique
Dépôt d'énergie dirigée (Direct Energy Deposition)	Processus dans lequel une énergie thermique focalisée est utilisée pour fondre le matériau en même temps qu'il est déposé.	Poudre Fil	<ul style="list-style-type: none"> ● Laser ● Faisceau d'électrons ● Arc électrique

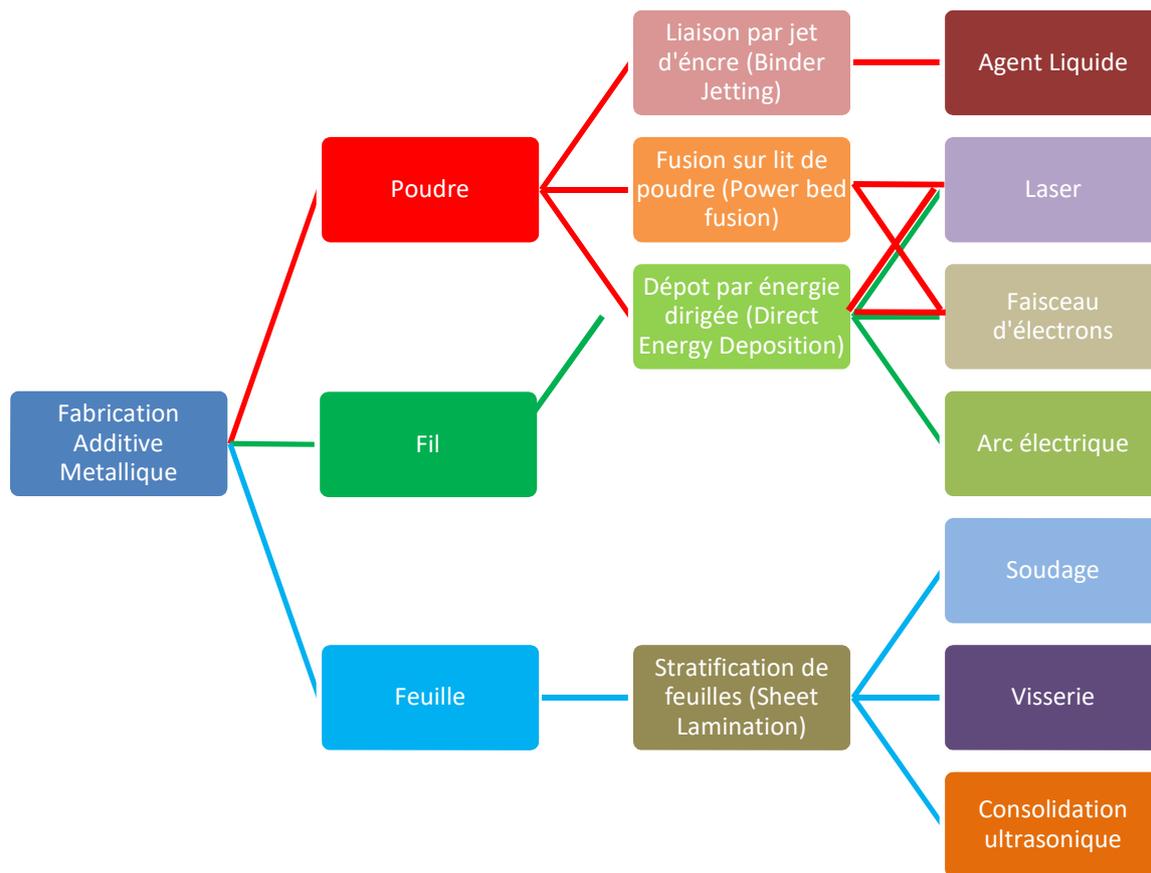


Figure 1.5 : Classification des procédés de fabrication additive de pièces métalliques selon la forme de la matière utilisée

La figure 1.5 propose une autre classification, cette fois en fonction de la forme de la matière utilisée : poudre densifiée par fusion ou frittage, ou collée à l'aide d'un liant, fil déposé à l'état liquide, ou encore feuilles découpées puis assemblées en strates. Notons que certaines de ces technologies conduisent à des matériaux hétérogènes (technologie poudres liées par jet d'encre) ou discontinus (méthodes par stratification). Dans la suite, nous ne détaillons que les technologies permettant d'obtenir un matériau métallique homogène (ou presque) et continu, grâce à la fusion localisée de la matière et sa solidification en couches successives. Les procédés sont regroupés en fonction de la source d'énergie utilisée pour assurer la fusion de la matière métallique (Tableau 1.2).

Tableau 1.2 : Procédés de FA de pièces métalliques par fusion localisée classés en fonction de la source de fusion employée

Technologie de fusion	Laser			Faisceau d'électrons		Arc électrique
Désignation	SLS, SLM	DED, LENS	CMB	EBM	DED	WAAM
Principe	Lit de poudre et fusion sélective	Projection de poudre et fusion concentrée	Fusion concentrée du fil	Lit de poudre et fusion sélective	Fusion concentrée du fil	Fusion par arc électrique du fil
Matériau	Poudre	Poudre	Fil	Poudre	Fil	Fil

1.2.2 Technologies à base de laser

Dans les technologies à base de laser, un faisceau focalisé de lumière laser est utilisé pour produire la fusion de la matière métallique. Généralement, les matériaux utilisés avec ces technologies sont sensibles à l'oxydation, qui peut diminuer leurs propriétés mécaniques, c'est pourquoi les machines à base de laser utilisent une atmosphère protectrice, généralement à base d'argon, dans la chambre de construction. Les technologies utilisant le laser sont aujourd'hui les plus utilisées dans l'industrie. Il existe plusieurs technologies de FA utilisant une source laser pour produire la fusion de la matière, présentées sous de nombreuses appellations. Elles peuvent cependant être regroupées en trois familles.

1.2.2.1. Fusion sélective par Laser (SLM, Selective Laser Melting)

Cette technologie consiste à déposer une fine couche de matière en poudre sur le plateau de construction, et à parcourir avec le faisceau d'un laser de forte puissance (quelques centaines de Watts) la zone correspondant à la tranche de la pièce qui doit être fabriquée, de manière à densifier la poudre par fusion-solidification (Figure 1.6). Le plateau de construction descend ensuite d'une hauteur égale à l'épaisseur des tranches de fabrication, et une nouvelle couche de poudre est déposée et fondue dans la zone correspondant à la nouvelle tranche de la pièce à construire, qui vient se lier avec la tranche précédente, et ce jusqu'à la construction totale de la pièce.

La technologie a été développée durant les années 1980 par l'université du Texas, puis a été utilisée au niveau industriel pour la fabrication rapide de pièces prototypes au début des années 1990 par la société DTM (aujourd'hui 3D Systems), qui présenta le procédé sous l'appellation « Selective Laser Sintering » (SLS) [9, 10, 11]. Des pièces à base de poudres d'alliages de nickel ou de titane ont ainsi pu être réalisées [8]. La puissance du laser initialement utilisé étant très faible, les poudres métalliques n'étaient pas toujours totalement fondues, et la densification avait alors lieu par frittage des poudres non fondues, d'où le choix de l'appellation du procédé. A la fin des années 1990, l'entreprise Fockele & Shwarze a repris le même concept, mais en utilisant un laser de plus forte puissance, qui permet la fusion complète des poudres irradiées par le laser. Le procédé est alors appelé « Selective Laser Melting » (SLM), pour le différencier du procédé développé par DTM [10]. Aujourd'hui, la plupart des installations de FA par laser sur lit de poudre sont équipées d'un laser de puissance suffisante pour produire la fusion complète de la poudre, mais on continue de l'appeler indifféremment SLM, SLS, ou encore Direct Metal Laser Sintering (DMLS) [10].

Quelques constructeurs se partagent aujourd'hui le marché des machines de FA de type SLM, qui présentent des variantes selon les fabricants. Ainsi, l'entreprise Electro Optical Systems (EOS) construit depuis 2001 des machines permettant notamment la fabrication de pièces en acier présentant à l'état brut de fabrication une très bonne précision dimensionnelle, de l'ordre de 20 microns. L'entreprise Concept Laser a quant à elle développé, également en 2001, une machine polyvalente qui combine frittage laser, gravure/marquage laser et érosion/usinage laser [13]. Les développements actuels des principaux fabricants de machines de type SLM portent sur l'augmentation des nuances de matériaux utilisables pour la fabrication de pièces, et sur l'amélioration de la qualité et des propriétés des pièces obtenues, en tentant de prévenir l'apparition des défauts [9-12]. EOS propose ainsi une machine capable de produire des pièces dans plusieurs nuances d'aciers ou d'alliages de cobalt, de titane, de nickel, ou de bronze. MTT Technologies propose des machines programmées pour fabriquer des pièces en acier inoxydable, en acier à outil, en alliages de titane, chrome-cobalt, et aluminium. Concept Laser

a breveté la technologie Laser Cusing, disponible sur trois machines, dédiée chacune à des matériaux différents, aciers, aciers inoxydables, et alliages non ferreux (aluminium, nickel, titane).

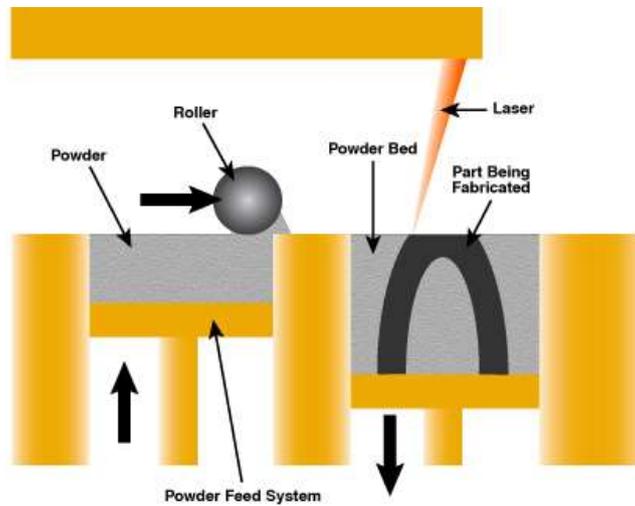


Figure 1.6 : Processus de frittage sélectif par laser (SLS) [14].

1.2.2.2. Dépôt d'énergie directe (DED, Direct Energy Deposition)

Le procédé LENS (Laser Engineering Net Shaping) a été développé dans les années 1990 par l'entreprise Optomec [15]. Cette technologie consiste à projeter de manière dirigée à l'aide d'une buse une poudre métallique dans l'axe d'un faisceau laser de grande puissance, produisant la fusion de la poudre, qui est alors déposée à l'état liquide avant de se solidifier (Figure 1.7). L'opération est réalisée à l'intérieur d'une chambre hermétiquement fermée contenant un gaz inerte pour protéger le métal de l'oxydation. En 2000, le groupe Precision Optical Manufacturing (POM) a développé une machine basée sur le même principe que la technologie LENS, qu'il a baptisée Direct Energy Deposition (DED) [16]. Les deux entreprises commercialisent aujourd'hui leurs propres machines de FA comprenant un système de mouvement à 5 axes, dédiées aussi bien à la fabrication de pièces 3D, qu'à la réparation ou au rechargement de surface de composants mécaniques [2, 11].

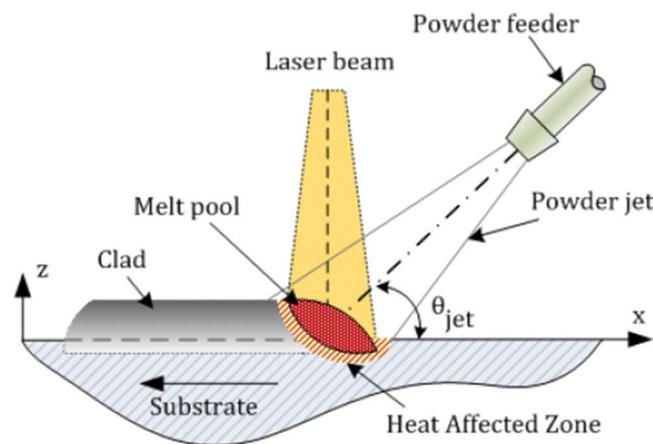


Figure 1.7: Principe de la fabrication additive par Laser Engineering Net Shaping (LENS) [17].

1.2.2.3. Controlled Metal Buildup (CMB).

Ce procédé a été développé par le Fraunhofer Institute for Production Technology, et commercialisé par l'entreprise Röders en 1999. Le principe de la technologie consiste à déposer un fil d'acier qui est fondu par une source de soudage laser. La machine développée par Röders combine le dépôt du fil fondu par soudage laser et le fraisage à l'aide d'une broche trois axes, qui peut être réalisé après chaque couche déposée afin d'améliorer l'état de surface. La technologie permet de fabriquer des pièces 3D, mais est surtout utilisée pour la modification et la réparation de moules et matrices [11, 18].

1.2.3 Technologies basées sur la fusion par faisceau d'électrons (Electron Beam Melting - EBM)

Avec la technologie EBM, la fusion du métal est assurée par un faisceau d'électrons focalisé, émis à partir d'un filament en tungstène [3]. Une série de bobines produisant des champs électromagnétiques sont utilisées pour concentrer et diriger le faisceau vers la plate-forme de travail (Figure 1.8). La particularité de la technologie EBM est qu'elle nécessite un vide poussé dans la chambre de construction, pour éviter que les électrons ne dévient, et maintenir un faisceau bien concentré. Cette caractéristique technologique présente l'avantage de prévenir toute oxydation ou pollution par les gaz des métaux fondus. La technologie est donc particulièrement adaptée à la fabrication de pièces en matériaux très sensibles à l'oxydation, tel que le titane.

La technologie EBM a été brevetée par la société Arcam, qui commercialise donc les seules machines disponibles [19]. Ces machines permettent en théorie de traiter n'importe quel matériau possédant une conductivité électrique suffisante. Cependant, à l'heure actuelle, seuls quelques matériaux sont utilisés avec cette technologie : les alliages de titane Ti6Al4V, Ti6Al4V Eli et Ti grade 2, et l'alliage cobalt-chrome CrCo ASTM F75. Cette technologie n'est pas adaptée aux géométries aussi complexes comme ceux qu'on peut construire avec des autres technologies de FA, et la taille maximale des pièces réalisables est limitée par les dimensions de l'enceinte des machines [12].

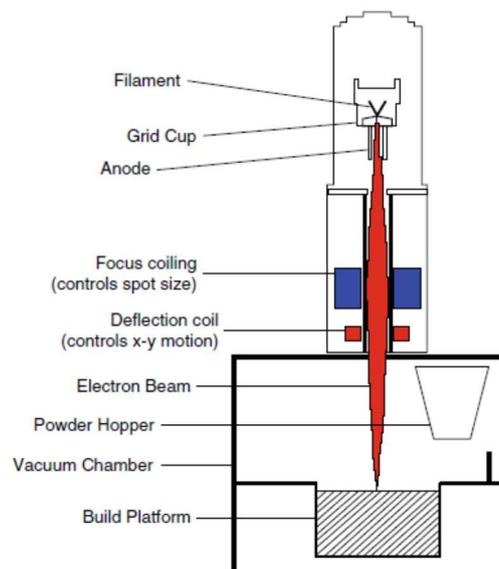


Figure 1.8 : Principe de la technologie Electron Beam Melting (Arcam) [20]

1.2.4 Technologies basées sur la fusion par arc électrique

Les techniques basées sur la fusion de la matière par un arc électrique, dérivées des technologies de soudage, constituent une alternative prometteuse pour la fabrication de composants métalliques de grandes dimensions et de géométries complexes.

Ces technologies sont basées sur la création d'un arc électrique, amorcé par une décharge électrique dans un gaz entre deux électrodes reliées aux pôles d'un générateur, et produisant lumière et chaleur. Plusieurs procédés de soudage utilisent ainsi l'arc électrique comme source de chaleur [21, 22]. L'arc de soudage est un arc court entre une électrode (l'outil) et les pièces à souder, portées localement à la température de fusion grâce à la chaleur produite par l'arc.

Pour la fabrication additive, les différents procédés de soudage à l'arc peuvent être adaptés, afin de privilégier le dépôt et la fusion du métal d'apport et non la fusion du support. Un système de FA par arc électrique doit donc comprendre un système d'apport de métal, généralement sous la forme d'un fil métallique dévidé automatiquement, et un système de création et de contrôle de l'arc électrique. Selon le procédé de soudage choisi, le contrôle de l'arc et du dévidage de fil, généralement regroupés dans la « tête » ou « torche » de soudage, peuvent être indépendants ou corrélés. Pour pouvoir construire une pièce, la torche de soudage doit être reliée à un mécanisme permettant son déplacement en 3D, de façon à déposer des cordons de métal, et à les empiler pour construire une pièce en 3D. L'acronyme WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) est généralement utilisé pour désigner ces technologies, quel que soit le procédé de soudage employé.

Aucune machine basée sur la technologie arc n'est encore commercialisée à ce jour, mais des prototypes démontrant son potentiel, basés sur l'adaptation de torches de soudage sur des machines-outils, ont été construits [23]. Tout récemment, la société Norsk Titanium a développé sa propre technologie, qu'elle utilise pour produire des pièces en titane dédiées à l'industrie aéronautique [24].

1.3 La technologie WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing)

Les technologies de soudage à l'arc, qui ont été développées à l'origine comme moyens d'assembler de manière permanente la matière, ont aussi fait l'objet depuis longtemps de nombreux développements et applications pour la réparation de pièces, voire pour la construction en 3D de préformes [25]. Ces technologies permettent ainsi de reconstruire, par dépôt de métal fondu, la surface de pièces ayant subi des phénomènes d'érosion ou d'usure (on parle alors de « rechargement »), ou même de reconstituer des parties de pièces cassées. Un brevet datant de 1925, décrivant le principe de fabrication de pièces décoratives par dépôt de fil fondu à l'arc, a ainsi été déposé par Baker [26]. On peut trouver un bon historique du développement de ces technologies dans la thèse de Pedro Almeida [25].

C'est cependant surtout à partir des années 1990, avec le développement simultané des technologies d'impression 3D et des nouvelles générations de robots, que l'industrie commence vraiment à développer ce qu'on appelle alors le soudage 3D (3D welding), pour pouvoir souder en toutes positions des pièces de formes complexes, mais aussi comme outil de prototypage rapide, et maintenant de fabrication directe. Ces technologies font actuellement l'objet de travaux de développements et de recherche, portant notamment sur les caractéristiques des matériaux obtenus, le contrôle de l'apport de chaleur par l'arc électrique, ou encore l'adaptation ou la correction de manière autonome du procédé [8, 27]. Si toutes ces technologies sont basées

sur la fusion d'un fil métallique à l'aide d'un arc électrique, les procédés de soudage employés pour générer et contrôler l'arc peuvent être différents, et les méthodes adoptées pour optimiser ces procédés sont alors diverses. Avant de détailler les développements en cours portant sur les procédés WAAM, le principe des différents procédés de soudage à l'arc utilisés est d'abord détaillé, ainsi que les mécanismes conduisant à la fusion et au dépôt du métal, et les difficultés particulières rencontrées lors du soudage des alliages d'aluminium.

1.3.1 Les technologies de soudage à l'arc employées en WAAM

1.3.1.1 L'arc électrique

L'arc électrique est le résultat d'une décharge électrique se produisant dans un milieu gazeux entre deux électrodes de potentiels différents. Il existe deux méthodes d'amorçage d'un arc électrique en soudage [28]:

- l'amorçage par surtension, la tension entre les électrodes devant être supérieure à la tension de claquage pour produire un électron germe qui va ensuite, par collisions successives, multiplier les charges et créer une décharge ;
- l'amorçage par contact, le court-circuit créé lors du contact produisant par effet Joule la fusion puis la volatilisation du métal des électrodes, formant ainsi un plasma de vapeur métallique, rapidement remplacé par un plasma de gaz ambiant.

Une fois amorcé, l'arc électrique doit être entretenu en maintenant un courant suffisant. Il est alors constitué d'une colonne de gaz ionisé qui est le siège de mouvements de particules chargées entre les deux électrodes. L'arc électrique peut être décomposé en trois zones correspondant à des phénomènes physiques bien distincts, entre l'anode et la cathode (Figure 1.9).

La cathode (polarité négative) est le siège d'une émission électronique d'autant plus importante que l'intensité du courant est élevée. Les électrons émis ionisent les atomes du gaz, formant des ions positifs ou négatifs, selon la nature des atomes. La zone cathodique, appelée « zone de transition cathodique », est le siège d'une chute de potentiel importante, associée à l'énergie d'extraction des électrons, qui dépend peu de l'intensité ou de la différence de potentielle totale entre les électrodes.

La partie centrale de l'arc électrique, la colonne d'arc, se comporte comme un conducteur gazeux. Le potentiel varie linéairement dans cette zone. Pour une hauteur d'arc fixée, la différence de potentiel dans la colonne d'arc est liée au potentiel d'ionisation du gaz.

Enfin, la zone de transition anodique, proche de l'anode, est également le siège d'une chute de potentiel, indépendante de la longueur de l'arc électrique. Les électrons sont brutalement décélérés dans cette zone, communiquant leur énergie cinétique à l'anode sous forme de chaleur de condensation des électrons. On considère généralement que la majeure partie de l'échauffement produit par l'arc électrique est générée par ce phénomène.

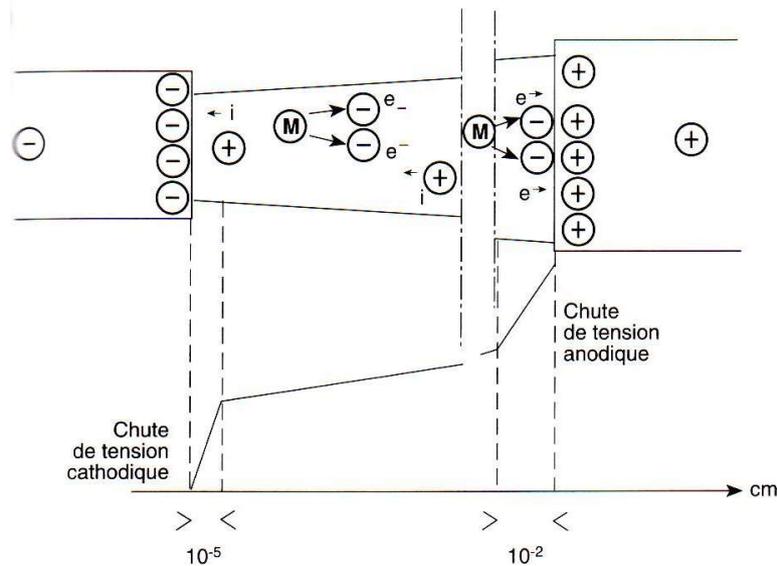


Figure 1.9 : Schéma des différentes zones de l'arc électrique, et répartition des tensions [29]

L'intensité et la tension entre les extrémités de l'arc sont liées par une relation appelée caractéristique d'arc. Pour une intensité de courant traversant l'arc électrique donnée, la tension aux bornes de l'arc (U à l'arc) est la somme des contributions de la colonne d'arc, et des zones de transitions anodique et cathodique (Figure 1.10). La caractéristique d'arc dépend de nombreux paramètres, en particulier de la nature de l'atmosphère gazeuse dans laquelle l'arc s'établit, de la géométrie et de la composition des électrodes, et de la distance entre les électrodes. Ainsi, si tous ces paramètres sont fixés, dans le domaine des intensités traditionnellement utilisées en soudage (intensités supérieures à 50 A), la tension varie de manière sensiblement linéaire avec l'intensité de soudage.

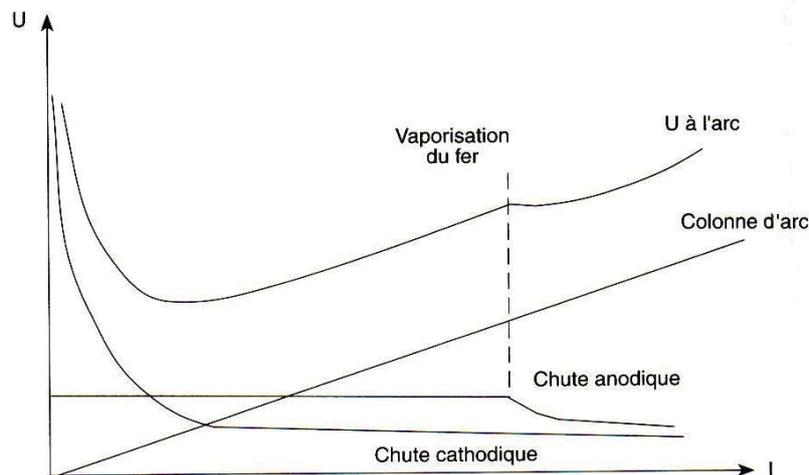


Figure 1.10 : Caractéristique d'arc, à longueur d'arc fixée (U à l'arc) et contribution des différentes zones de l'arc à la tension totale [29]

En soudage, il est parfois difficile de travailler à hauteur d'arc parfaitement constante. On ne peut donc pas définir une caractéristique unique de l'arc, mais on se déplace au contraire d'une caractéristique à une autre au cours d'une opération de soudage, du fait des fluctuations de la hauteur d'arc. La figure 1.11 montre l'influence de la variation de la hauteur d'arc sur la tension

aux bornes de l'arc, à intensité constante. On constate qu'une augmentation de la hauteur d'arc se traduit par une augmentation proportionnelle de la tension, quel que soit l'intensité.

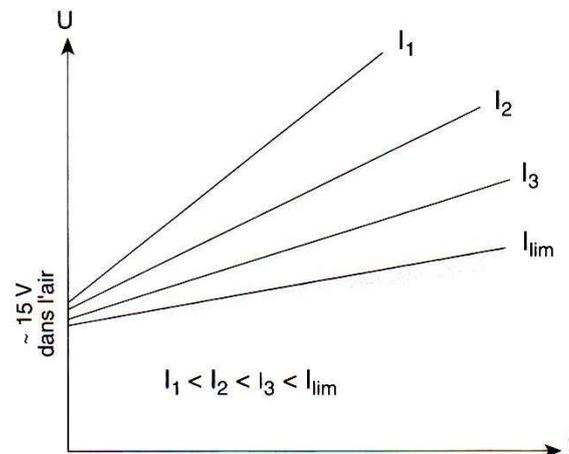


Figure 1.11 : Relation entre tension et hauteur d'arc, à intensité constante [29]

1.3.1.2. Le procédé de soudage TIG (Tungsten Inert Gas)

Le procédé de soudage TIG, également appelé Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), utilise une électrode réfractaire à base de tungstène, et un gaz inerte, généralement de l'argon, pour protéger le métal d'une oxydation excessive [30]. Pour souder la plupart des matériaux, l'électrode est reliée à la borne négative du générateur (cathode) et émet donc des électrons, qui se condensent ensuite sur la surface de la pièce à souder (anode), qui s'échauffe sous l'effet de la chaleur de condensation des électrons. Dans le cas du soudage de l'aluminium, la couche d'alumine réfractaire qui recouvre la surface du matériau peut cependant nuire à la qualité des soudures. L'utilisation d'un gaz de protection à base d'hélium, en produisant un arc plus concentré et plus énergétique, peut permettre de fondre l'alumine et donc permettre le soudage. La méthode la plus couramment employée cependant consiste à souder en courant alternatif, l'inversion de polarité permettant l'élimination de la couche d'alumine par l'émission d'électrons. On peut aussi souder en « polarité inverse », l'électrode devenant l'anode, mais cette technique réduit l'échauffement du bain, et risque même de faire fondre l'électrode en tungstène, dès que l'intensité de l'arc dépasse quelques dizaines d'ampères.

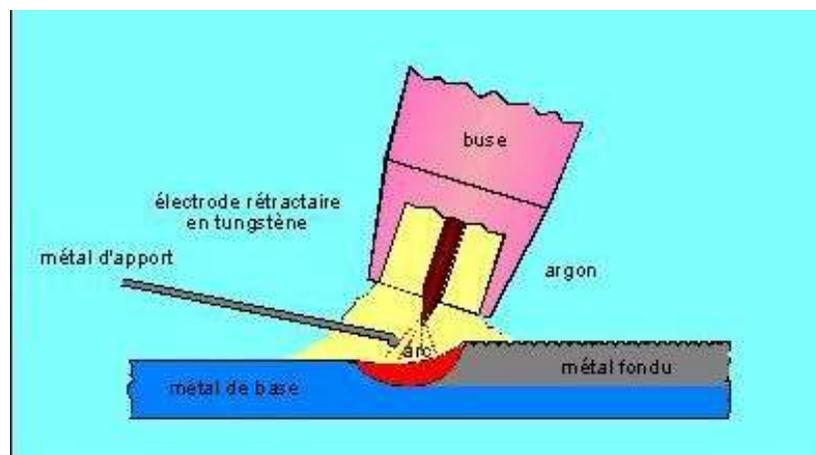


Figure 1.12 : Principe du soudage TIG [31]

1.3.1.3. Le procédé de soudage plasma

Le soudage plasma utilise également une électrode réfractaire à base de tungstène et un gaz inerte pour protéger le métal fondu de l'oxydation, mais contrairement au procédé TIG pour lequel l'arc est créé entre l'électrode et la pièce, celui-ci est amorcé entre l'électrode et le bord de la tuyère (Figure 1.13), puis transféré sur la pièce à travers l'ouverture de la tuyère, ce qui produit un effet de constriction de l'arc et augmente sa densité de puissance. Le procédé permet ainsi de fondre des pièces de bien plus forte épaisseur que le procédé TIG.

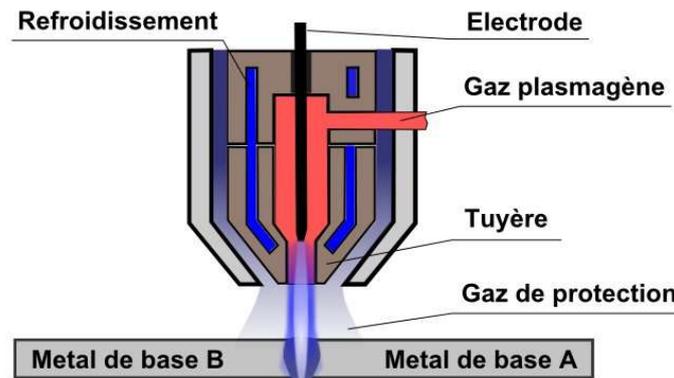


Figure 1.13: Principe du soudage plasma [32]

1.3.1.4. Le procédé de soudage MIG (Metal Inert Gas) ou MAG (Metal Active Gas)

Ce procédé, aussi appelé Gas Metal Arc Welding (GMAW), utilise le métal d'apport comme électrode. Celui-ci, sous la forme d'une bobine de fil, doit être alimenté de façon continue grâce à un dévidoir pour compenser la fusion de son extrémité (Figure 1.14). Le fil passe à l'extrémité de la torche de soudage à travers un tube-contact, qui assure à la fois son guidage et l'alimentation électrique du fil-électrode. La torche de soudage est également équipée d'un diffuseur de gaz et d'une buse, assurant la protection gazeuse contre l'oxydation. En fonction de la nature du gaz de protection, le procédé adopte l'acronyme MIG ou MAG. Le procédé MAG utilise un mélange gazeux contenant un gaz actif tel que le dioxyde de carbone (CO_2) ou le dioxygène (O_2). On utilise couramment des mélanges binaires ou ternaires à base d'argon ($\text{Ar-CO}_2\text{-O}_2$; Ar-O_2 ; Ar-CO_2). Le procédé MIG emploie un gaz inerte, de l'argon (Ar), de l'hélium (He) ou un mélange d'argon et d'hélium. L'hélium présente l'avantage, à longueur d'arc équivalente, de produire une tension d'arc supérieure de 40% environ à celle relevée avec de l'argon pur, ce qui procure un arc plus énergétique favorisant l'échauffement et la fusion du métal, et dans les alliages d'aluminium, diminue le nombre de porosités, celles-ci étant plus facilement éliminées dans un bain liquide plus étroit, mais aussi plus chaud et donc moins visqueux.

Le procédé de soudage MIG/MAG est généralement utilisé en courant continu en polarité inverse (polarité négative à la pièce), ce qui permet une fusion rapide du fil électrode, qui est bombardé par le flux d'électrons traversant l'arc électrique. Cette configuration est aussi favorable pour souder les alliages d'aluminium, puisque la couche d'alumine formée sur la surface de la pièce est ainsi éliminée.

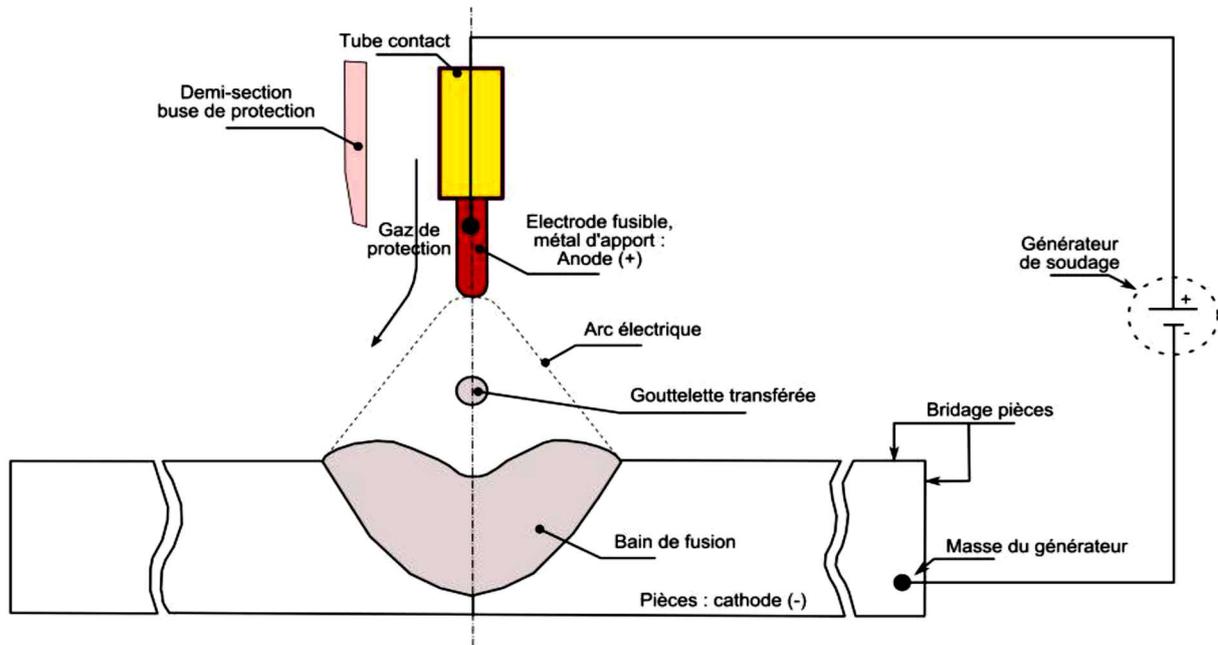


Figure 1.14 : Principe du soudage MIG/MAG [33]

1.3.2. Les différents modes de transfert en soudage MIG

La chaleur de condensation des électrons, que reçoit le fil-électrode en soudage MIG, produit la fusion de son extrémité. Le métal liquide doit ensuite être « transféré » à travers l'arc électrique, pour venir se déposer sur les pièces à souder, et produire leur fusion localisée en leur transmettant une partie de l'énergie qu'il a emmagasiné. Les mécanismes physiques intervenant durant ce « transfert » du métal liquide, depuis l'extrémité du fil-électrode vers les pièces à souder, dépendent du choix des paramètres de l'arc électrique (courant, tension, nature du gaz de protection). Pour un gaz et un matériau donnés, on peut ainsi distinguer plusieurs régimes de transfert en fonction du niveau d'énergie (Figure 1. 15). Il existe quatre régimes de transfert dits « naturels » [34], [35] :

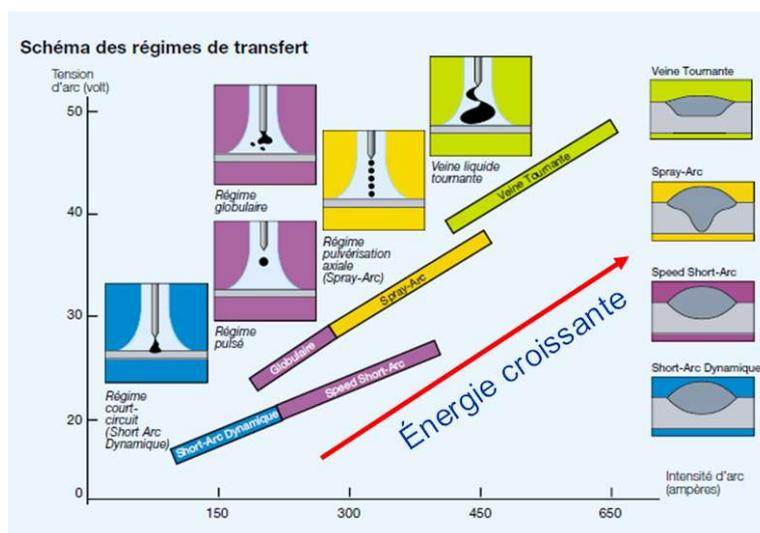


Figure 1.15 : Représentation des transferts en soudage MIG/MAG en fonction de l'énergie pour un fil-électrode en acier de diamètre 1,2 mm [36]

Le régime de transfert par court-circuit s'observe pour de faibles énergies (typiquement pour des intensités variant de 50 à 200 A et des tensions variant de 15 à 20 V pour un fil-électrode en acier de 1,2 mm). Le dépôt de métal se fait de manière discontinue en une alternance de temps d'arc et de temps de court-circuit (Figure 1.16). Durant le temps d'arc, c'est-à-dire la phase durant laquelle l'arc électrique est présent, une goutte se forme à l'extrémité du fil sous l'effet principalement de la chaleur de condensation des électrons, et grossit jusqu'à venir en contact avec la soudure, créant ainsi un court-circuit et l'extinction de l'arc, avec une chute brutale de la tension. Au cours de cette période de court-circuit, l'intensité augmente rapidement et engendre des forces électromagnétiques faisant apparaître un pincement entre la partie solide et la partie liquide du fil de soudage, ce qui facilite alors le détachement de la goutte, qui se mélange au cordon de soudure déjà formé. Puis l'arc se réamorçe entre le fil-électrode et la pièce, et un nouveau cycle commence. La fréquence de formation des gouttes varie en fonction des réglages et oscille dans une gamme de 40 à 250 Hz.

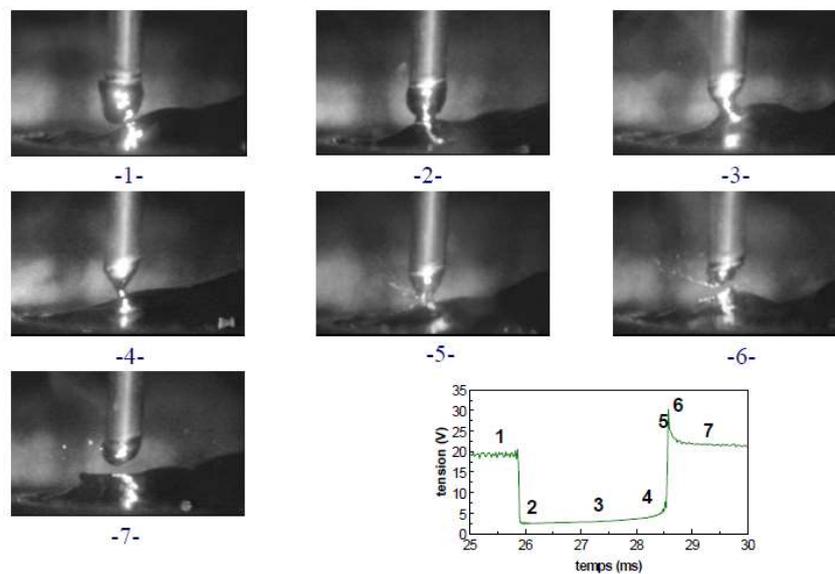


Figure 1.16 : Transfert par court-circuit : diagramme de tension et images associées pour une période [37]

Le régime de transfert globulaire (Figure 1.17) s'établit pour des niveaux d'énergie un peu plus élevés. Ainsi, les gouttes ont une croissance un peu plus rapide, et peuvent se détacher sous l'effet de la pesanteur avant l'établissement d'un court-circuit. La goutte suit alors une trajectoire aléatoire qui n'est pas toujours dans l'axe de l'arc. Des courts-circuits peuvent encore apparaître de temps en temps, de manière plus espacée et aléatoire. Ce mode de transfert est instable et provoque de nombreuses projections. La forme des signaux électriques correspondant à ce régime est assez semblable à celle observée en régime par court-circuit, à la différence près que la fréquence du phénomène n'est plus régulière. Dans la pratique, on cherche à éviter dans la mesure du possible ce mode de transfert.

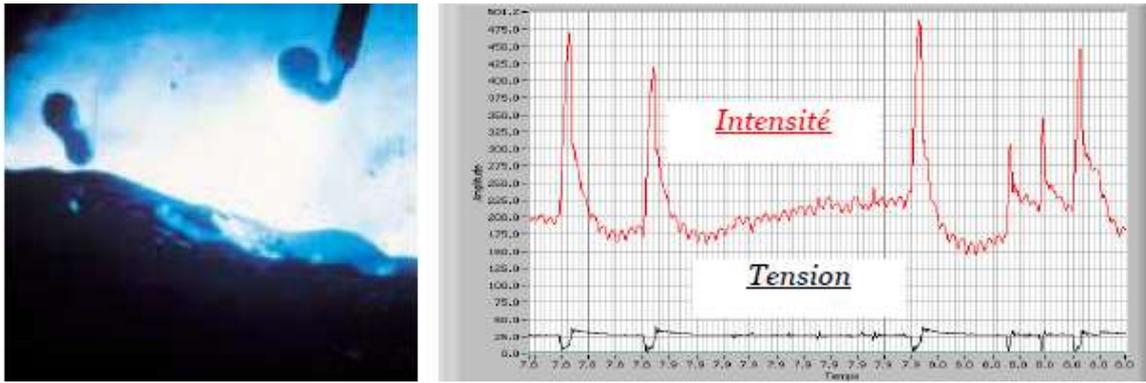


Figure 1.17 : Transfert globulaire : diagramme intensité/tension et image associée [37]

Le régime de transfert par pulvérisation axiale apparaît lorsque la densité de courant est supérieure à environ 250 A/mm^2 pour un acier, la valeur limite étant un peu plus faible pour les alliages d'aluminium. Le transfert de métal se produit alors sous forme de fines gouttelettes dont le diamètre est inférieur à celui du fil, projetées à grande vitesse dans l'axe du fil (Figure 1.18). Ce régime de transfert de métal procure un arc stable avec peu de projections, et il permet une pénétration et un volume de métal déposé importants. Vu les niveaux d'énergie requis pour atteindre ce régime de transfert, il est réservé au soudage des épaisseurs supérieures à 5 mm dans les configurations courantes. Les signaux de tension et d'intensité mesurés sont, pour ce régime, quasi continus.

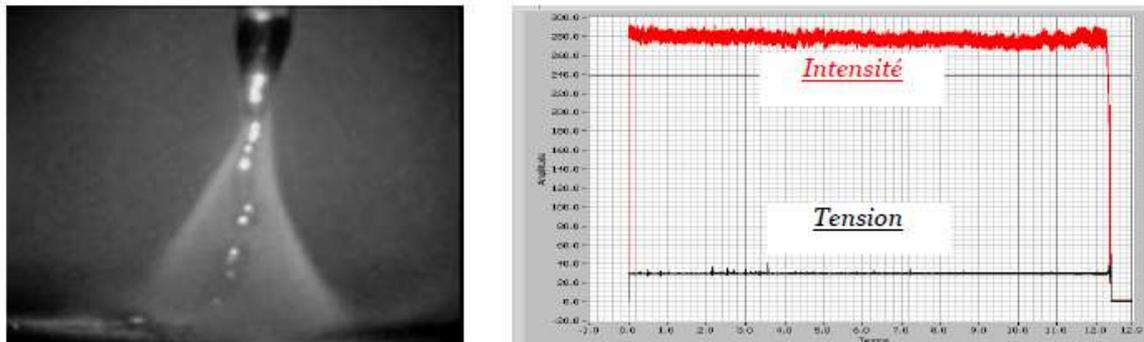


Figure 1.18 : Transfert par pulvérisation axiale : diagramme intensité/tension et image associée [37]

Pour des intensités de l'ordre de 500 A et des tensions de 45 à 50 V dans un fil d'acier de diamètre 1,2 mm, le métal liquide en transfert dans l'arc est soumis à des forces électromagnétiques importantes, qui induisent un mouvement de rotation du métal liquide, produisant une sorte de "veine tournante" (Figure 1.Erreur! Source du renvoi introuvable.19). Ce régime de transfert par veine tournante, qui implique de très fortes énergies, permet une productivité élevée pour des éléments à souder de fortes épaisseurs nécessitant un taux de dépôt important [38].

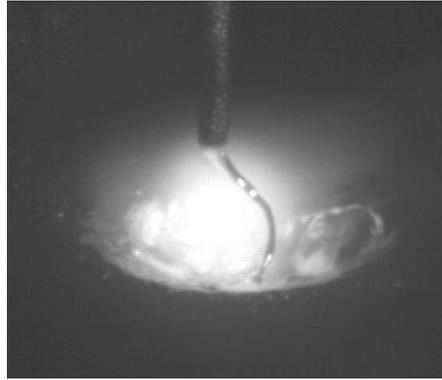


Figure 1.19 : Visualisation du transfert par veine liquide tournante [39]

Aujourd’hui, grâce aux évolutions des sources de courant et du matériel associé, il est possible de réguler de manière active le cycle de transfert, et ainsi de créer de nouveaux régimes de transfert dit « forcés ».

Le régime pulsé est réalisé grâce à la superposition de pics d'intensité à un courant de base (forme d'onde en créneaux). L'arc est alors constamment maintenu, et il y a libération d'une gouttelette de métal d'apport à chaque pic d'intensité, appelé "temps chaud" [40] (Figure 1.20). Ce régime de transfert particulier permet de réaliser des soudures de qualité sur des épaisseurs qui nécessiteraient autrement l'utilisation d'un régime globulaire.

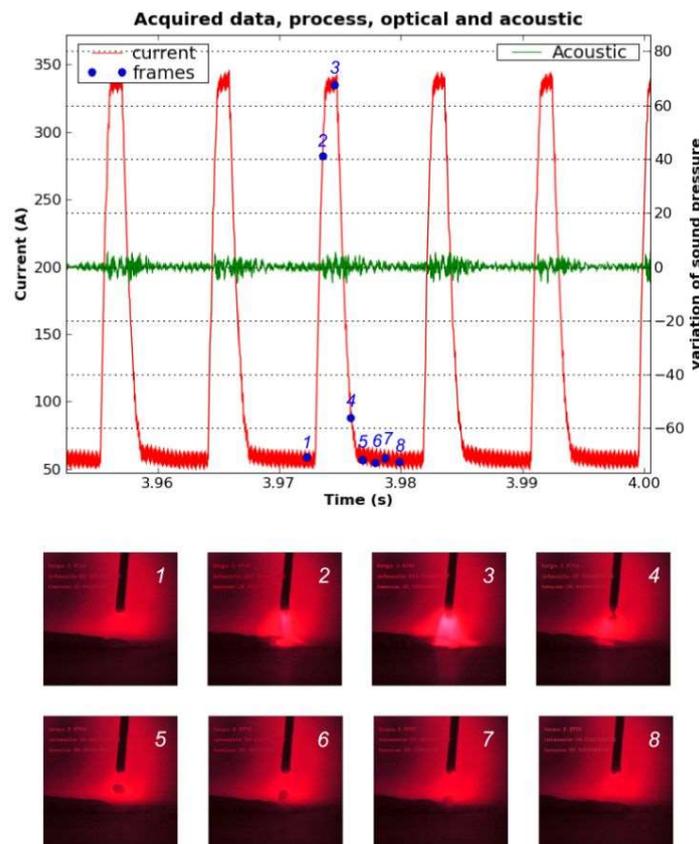


Figure 1.20 : Transfert pulsé : diagramme d'intensité et images associées [41]

La plupart des fabricants de matériel de soudage ont aussi récemment développé des systèmes de régulation et de contrôle des signaux électriques permettant de souder en MIG avec des régimes de transfert en court-circuit "forcés" ou "contrôlés", ce qui permet notamment de réduire les projections métalliques, l'échauffement des pièces, ou les distorsions [40, 41, 42].

Le régime par court-circuit forcé permet, par une gestion électronique du signal électrique, de maintenir le régime de transfert par court-circuit dans une gamme de vitesse de soudage correspondant normalement au transfert globulaire, ce qui permet de réduire fortement les taux de projection.

Les modes de transfert par court-circuit contrôlé sont obtenus grâce à un contrôle mécanique [45] ou électrique [46] du détachement des gouttes après l'établissement du court-circuit (Figure 1.21), ce qui permet un meilleur contrôle de l'énergie transmise aux pièces à assembler, permettant de souder des tôles très minces ou des matériaux de natures très différentes. Le procédé STT (Surface Tension Transfer), développé par la société Lincoln, est basé sur un contrôle précis de la forme d'onde du courant de soudage pour favoriser le mouillage puis la séparation de la goutte de métal lors du court-circuit, avec un faible apport calorifique. L'intensité chute au moment où le court-circuit s'établit (Figure 1.21), pour permettre le mouillage de la goutte formée à l'extrémité du fil sur la pièce, sans interaction avec les forces électromagnétiques. Le courant augmente ensuite progressivement pour créer des forces électromagnétiques de pincement qui vont détacher le fil. Enfin, lorsque l'arc se rétablit, l'intensité diminue à nouveau pour stabiliser le bain, avant de passer par un pic de courant pour fondre l'extrémité du fil, et de redescendre à la valeur de base du courant, jusqu'au court-circuit suivant [47].

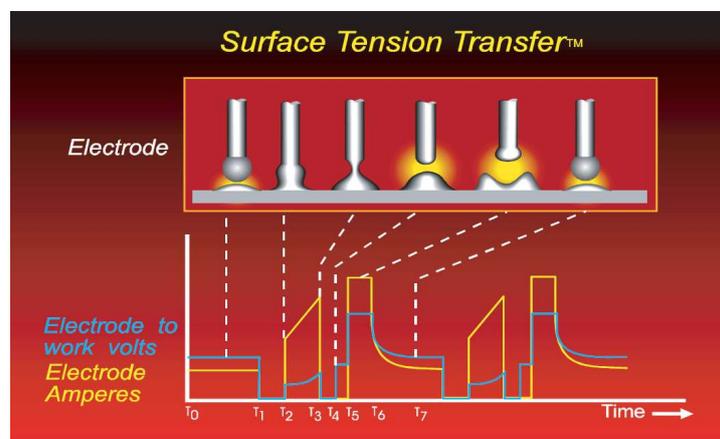
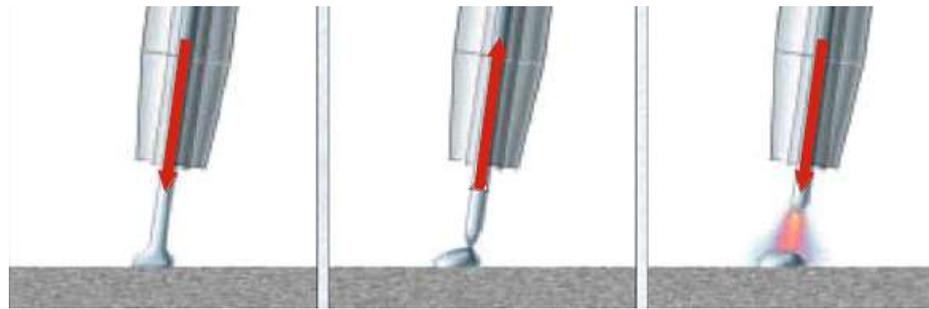


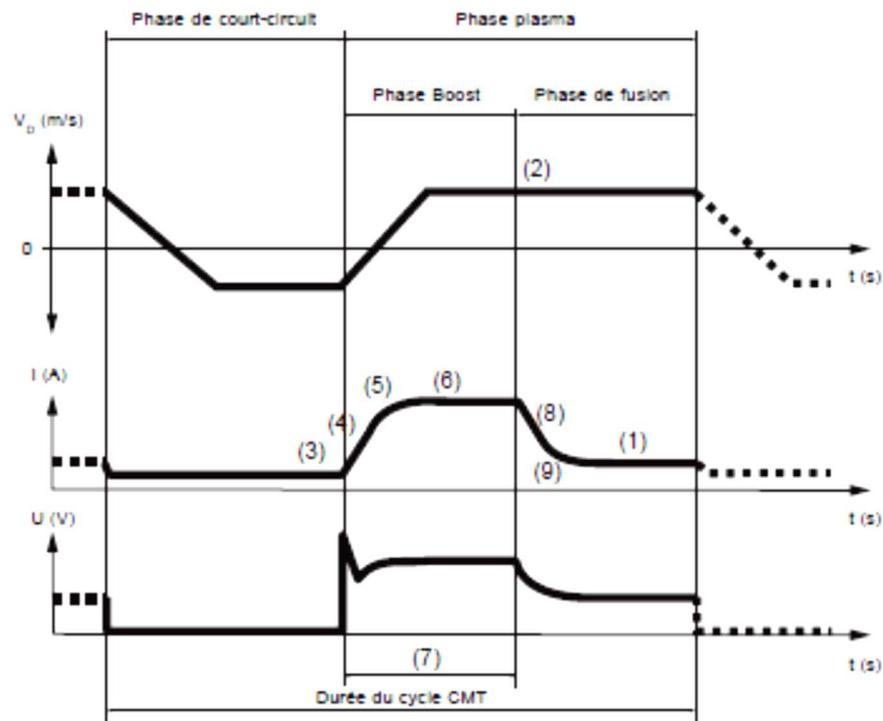
Figure 1.21 : Principe du transfert par court-circuit contrôlé STT (Surface Tension Transfer) [47]

Le procédé qui semble cependant le plus prometteur pour contrôler l'apport d'énergie en soudage MIG est probablement le CMT (Cold Metal Transfer) développé par la société Fronius. Ce procédé associe un contrôle précis de la forme d'onde du courant de soudage et un dévidage alterné du fil d'apport (Figure 1.22a), qui facilite le détachement des gouttes en court-circuit sans faire appel à des forces électromagnétiques de pincement, et donc à des intensités élevées. Au moment du court-circuit, l'intensité du courant est stabilisée à une valeur assez basse (Figure 1.22b), et le mouvement du fil s'inverse, produisant le détachement d'une goutte de métal d'apport. L'intensité augmente alors jusqu'à une valeur de consigne, et le fil se stabilise, avant

qu'il ne descende à nouveau sous une plus faible intensité, jusqu'au court-circuit suivant [43, 44].



(a)



(b)

Figure 1.22 : (a) Principe de dévidage alterné du fil d'apport, et (b) formes d'ondes du courant I et de la tension U , et vitesse de dévidage du fil V_D lors d'un cycle de transfert de goutte avec le procédé CMT [48]

1.3.3. Soudage à l'arc de l'aluminium et de ses alliages

Les propriétés physiques (module d'élasticité, coefficient de dilatation linéaire, chaleur spécifique, chaleur latente de fusion, conductivité thermique, cf. Tableau 1.3) de l'aluminium et de ses alliages ont une répercussion sur leur soudabilité.

La conductivité thermique de l'aluminium, suivant les alliages, est de 3 à 4 fois plus élevée que celle de l'acier. Ainsi, lors du soudage, la chaleur produite par l'arc se dissipe très rapidement par conduction dans la pièce à souder, échauffant celle-ci. Cela explique que, en dépit du bas point de fusion (660°C) de l'aluminium, les puissances mises en jeu pour souder les pièces en aluminium, à épaisseur égale, sont comparables à celles utilisées pour souder des pièces en acier

[29, 49, 50]. Dans le cas du soudage multi-passe cependant, les éléments à assembler devenant très chauds après le soudage des premières passes, il est généralement préférable de réduire ensuite la puissance de soudage, ou de laisser refroidir les pièces avant de poursuivre le soudage. Par ailleurs, la grande diffusion thermique de l'aluminium conduit à des gradients thermiques plus faibles que dans d'autres matériaux, ce qui génère moins de contraintes résiduelles. Le module d'élasticité relativement faible de l'aluminium limite également l'amplitude des contraintes résiduelles.

En revanche, son coefficient de dilatation linéique élevé favorise l'apparition des contraintes pour un gradient thermique donné, bien que sa température de fusion relativement faible facilite leur relaxation. Pour limiter l'apparition de contraintes trop importantes en soudage, il est ainsi préférable de souder sans brider les pièces, de façon à autoriser leur mouvement pour compenser les dilatations-retraits dus au cycle thermique de soudage [49, 50].

Tableau 1.3 : Propriétés physiques de l'aluminium à température ambiante [51]

Propriété	Symbole	Unité	Valeur
Masse volumique	ρ	kg.m^{-3}	2698
Point de fusion (1013 mbar)	T_f	$^{\circ}\text{C}$	660,45
Capacité thermique massique	C_p	$\text{J. kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	897
Conductivité thermique	λ	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	237
Coefficient de dilatation linéique	α_l	$10^{-6}.\text{K}^{-1}$	23,1
Module d'Young	E	MPa	69 000

D'autre part, l'aluminium se recouvre spontanément à l'air d'une pellicule protectrice continue d'oxyde appelé alumine. L'alumine est très stable, avec une température de fusion très élevée, de plus de 2000°C. En soudage, cette couche d'alumine superficielle peut empêcher une bonne liaison entre le métal de base et le métal déposé. Il est généralement nécessaire de procéder alors à un décapage mécanique préalable. Il faut ensuite éviter que la couche ne se reforme pendant le soudage, en utilisant une protection gazeuse avec un gaz neutre comme l'argon, l'hélium, ou des mélanges de ces deux gaz. L'utilisation d'un gaz actif (procédé MAG) est totalement proscrite pour souder les alliages d'aluminium. La protection gazeuse est cependant souvent insuffisante pour empêcher totalement la réapparition de l'alumine sur la surface du matériau chauffé. On utilise donc le phénomène de décapage ionique, en reliant la surface de la pièce à décaper à la polarité négative (cathode) du générateur de soudage. C'est la polarité courante utilisée en soudage MIG. En soudage TIG, on ne peut souder avec cette polarité au risque de faire fondre l'électrode en tungstène, et on utilise alors un courant alternatif, pour alterner les phases de décapage de la surface des pièces et de refroidissement de l'électrode. On peut aussi en soudage TIG utiliser de l'hélium pur comme gaz de protection, qui produit un plasma plus énergétique permettant de fondre la couche d'alumine.

Enfin, l'aluminium présente une forte aptitude à dissoudre l'hydrogène à haute température, ce qui impose que soient éliminées avant soudage toutes les sources de cet élément, afin d'éviter

des risques d'apparition de porosités dans la soudure, la solubilité de l'hydrogène dans l'aluminium diminuant rapidement avec le refroidissement.

Du point de vue métallurgique, il faut tenir compte de la réactivité chimique et de la volatilité de certains éléments d'alliage, comme le magnésium contenu dans certains alliages d'aluminium, qui seront généralement présents en plus fortes teneurs dans le métal d'apport que dans le métal de base pour compenser les pertes.

Enfin, l'échauffement produit peut modifier dans certains alliages d'aluminium les propriétés mécaniques du métal de base. Trois classes d'alliages peuvent être distinguées [50] :

- Les alliages sans durcissement structural (Aluminium pur, alliages Al-Mn, Al-Si et Al-Mn-Mg), qui présentent une bonne soudabilité. Lorsqu'ils sont utilisés à l'état recuit, ils ne subissent pas de perte sensible de caractéristiques mécaniques au niveau de la soudure. En revanche lorsqu'ils sont à l'état écroui, le durcissement dû à l'écrouissage disparaît au voisinage de la soudure, du fait d'un phénomène de restauration-recristallisation, produisant un adoucissement.
- Les alliages à durcissement structural contenant du cuivre, qui sont dans l'ensemble peu soudables parce que d'une part, l'oxydation du cuivre engendre une fragilisation et une fissuration dans la zone fondue, et d'autre part, leurs caractéristiques mécaniques après soudage sont assez fortement diminuées du fait de la dissolution des phases durcissantes.
- Les alliages à durcissement structural exempts de cuivre, qui ne présentent pas les mêmes risques de fragilisation et de fissuration en zone fondue, mais qui peuvent subir des pertes de caractéristiques mécaniques du métal de base par dissolution des phases durcissantes. Toutefois, ces caractéristiques peuvent être au moins en partie restaurées après une maturation à température ambiante ou un revenu.

1.3.4. Les développements récents du procédé WAAM

Les études récentes portant sur le développement des technologies WAAM se sont intéressées à plusieurs procédés de soudage. Wang et al [52] ont ainsi choisit le procédé TIG pour fabriquer des pièces en alliage d'aluminium 4043, matériau présentant généralement des problèmes en raison de la formation d'une couche d'alumine réfractaire en surface, qui empêche la bonne liaison des couches entre elles. En inversant régulièrement la polarité du support pour favoriser le décapage de la couche d'alumine, ils ont réussi à fabriquer une pièce cylindrique de qualité géométrique acceptable en empilant plus d'une centaine de couches (Figure 1.23).

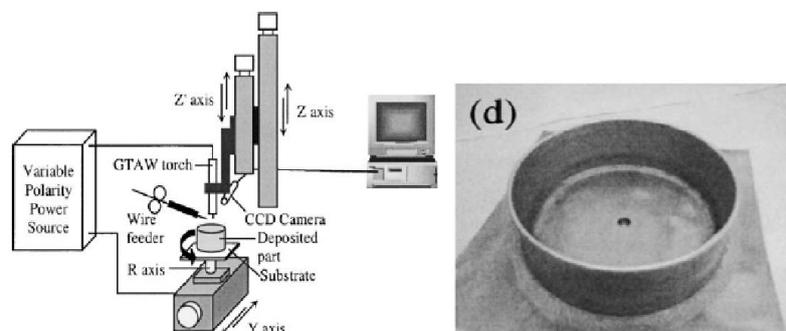


Figure 1.23 : Fabrication par WAAM d'une pièce en aluminium en utilisant le procédé de soudage TIG[52]

Le projet européen Rapolac [23], coordonné par l'université de Sheffield et achevé en 2010, a également démontré l'intérêt de la technologie de soudage TIG pour fabriquer des pièces métalliques. La société Norsk Titanium a quant à elle développé une machine de type WAAM, dédiée exclusivement à la production de pièces en titane, basée sur la technique de soudage Plasma [24], et utilisant une technologie brevetée de tête de soudage dotée d'un système de refroidissement spécial (Rapid Plasma Deposition) permettant de produire sans interruption pendant plusieurs heures.

La plupart des études et développements portant sur la technologie WAAM ont cependant été menées en utilisant le procédé de soudage MIG ou l'une de ses variantes à court-circuit contrôlé. L'une des difficultés rencontrées avec ce procédé est liée à la stabilité du transfert de matière et à la régularité géométrique des dépôts, qui sont directement dépendants du réglage du procédé (Figure 1.24) [52, 53].

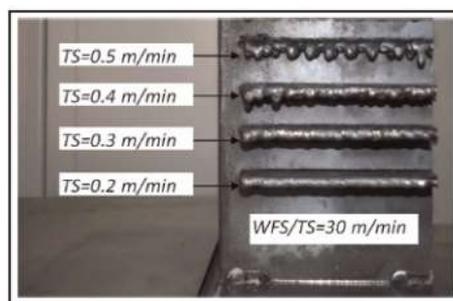


Figure 1.24: Influence des paramètres du procédé MIG sur la régularité des couches déposées [54]

Kovacevic et al. [55] ont utilisé un système de vision rapide et une simulation thermique pour étudier la corrélation entre les paramètres du procédé MIG, le transfert des gouttes de métal fondu, et la géométrie de dépôts en acier ainsi que leur pénétration dans le support, très dépendants des quantités de chaleur transférées. Le mode de transfert a aussi une forte influence sur la régularité des dépôts. Un mode de transfert globulaire obtenu avec des puissances de soudage moyennes, en produisant des dépôts très irréguliers, est ainsi inadapté à la fabrication additive (Figure 1.25) [56].

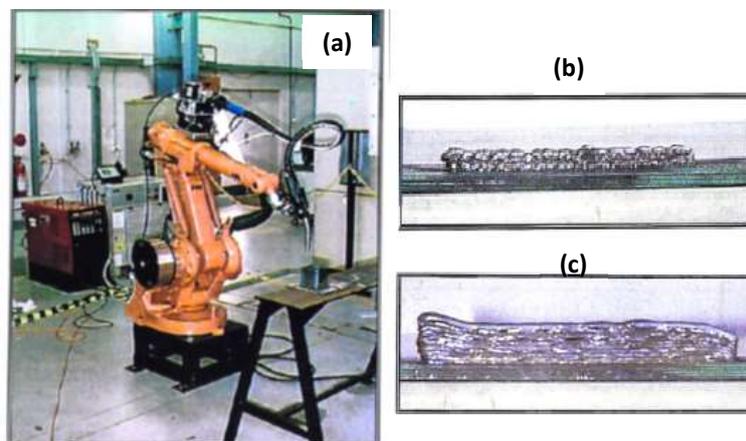


Figure 1.25 : (a) Installation WAAM composée d'un poste de soudage MIG et d'un robot de soudage, (b) mur fabriqué en régime de transfert globulaire, et (c) mur fabriqué en régime de transfert par court-circuit [56]

Le contrôle de la géométrie des dépôts lors des phases de démarrage et de fin de cordon est tout particulièrement délicat, les défauts géométriques formés lors de ces phases ayant tendance à s'accroître lors de l'empilement des couches (Figure 1.25.c), et posent des problèmes de raccordement lors de la construction de formes de géométries fermées. Des sens de dépôt alternés entre chaque couche, ou un décalage de la position de démarrage de chaque couche dans les géométries de pièces fermées, semblent réduire les défauts géométriques selon Zhang et al (Figure 1.26) [57].

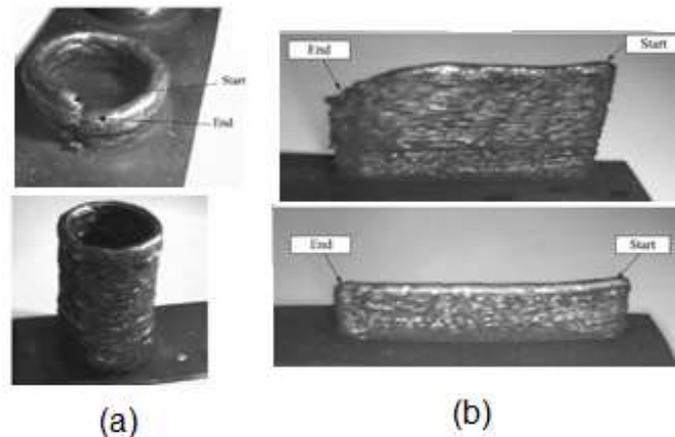


Figure 1.26 : (a) Défauts de raccordement de pièces de géométrie fermée, (b) défauts au démarrage et à l'arrêt du cordon, et optimisation des trajectoires de construction en vue de leur réduction [57]

Ces modifications géométriques sont liées à la fois au régime thermique transitoire lors de ces phases, et au cycle « d'amorçage » et « d'extinction » de l'arc, qui modifient l'apport énergétique mais aussi la pression qu'exerce l'arc sur le dépôt liquide [58]. Ces phases de début et de fin de cordon sont particulièrement problématiques pour les dépôts d'aluminium, notamment à cause de la couche d'alumine qui rend les recouvrements en fin de cordon difficiles, même si les procédés à court-circuit contrôlé peuvent diminuer les problèmes, comme l'ont testé Cong, Ding et al. [59, 60]. L'aluminium pose également des problèmes de porosité, comme en soudage, en raison de la grande solubilité de l'hydrogène dans l'aluminium liquide. Les procédés travaillant en mode pulsé, ou mieux les variantes mixant du court-circuit contrôlé et du courant pulsé, en minimisant l'apport de chaleur et donc limitant l'absorption d'hydrogène, et en favorisant son élimination par l'agitation du bain, diminuent les porosités [34]. Les propriétés des matériaux obtenus sont aussi étudiées, en vue d'applications dans l'industrie aéronautique notamment, dans laquelle des pièces en alliage de titane fabriquées par la technologie WAAM pourraient être économiquement plus avantageuses que les autres techniques, en raison du coût que représentent les pertes de matière pour ce matériau. Les microstructures et propriétés mécaniques obtenues avec ce procédé s'avèrent particulièrement intéressantes en comparaison des techniques de FA à base de poudres [61, 62, 63, 64].

Une autre problématique concerne l'élimination du support de construction, qui requiert des opérations de parachèvement qui peuvent être complexes. Haselhuhn et al. [65] ont tenté de pulvériser sur la surface du plateau de construction des poudres céramiques, pour faciliter le détachement de pièces en aluminium. Un autre moyen pour les pièces en aluminium consiste à utiliser un support en acier, la couche de composé intermétallique qui se forme entre les deux matériaux étant fragile et pouvant donc facilement être cassée par un choc, permettant la séparation de la pièce en aluminium de son substrat.

L'une des contraintes inhérentes au procédé WAAM concerne l'évacuation de la chaleur apportée pour fondre et déposer de fil métallique à l'état liquide. En effet, l'évacuation de la chaleur peut être plus délicate qu'en soudage en raison de l'addition d'un grand nombre de couches de métal déposé, notamment pour les pièces minces, pour lesquelles la diffusion de la chaleur doit se faire à travers un volume étroit de matière [53]. Kovacevic et al. [55] montrent que la forme du dépôt et sa pénétration sur le support sont très liées au choix des paramètres procédé, qui déterminent la quantité de chaleur transférée dans le support, et donc la température atteinte, qui doit être contrôlée pour garantir les caractéristiques géométriques, mais aussi mécaniques de la matière déposée. Le problème est encore plus critique lors de l'empilement successif de couches, car la chaleur accumulée fait que le substrat sur lequel se déposent les nouvelles couches est de plus en plus chaud au fur et à mesure des empilements, entraînant parfois des défauts de construction (effondrements), et plus de porosités et de projections [56], ou encore des microstructures inadaptées [66]–[68]. Des méthodes expérimentales, basées sur la mesure des températures par thermocouple ou laser [67]–[69], ou numériques, à travers des calculs par éléments finis [66, 70], sont développées pour déterminer ou prédire le temps nécessaire au refroidissement entre deux couches successives (Figure 1.27).

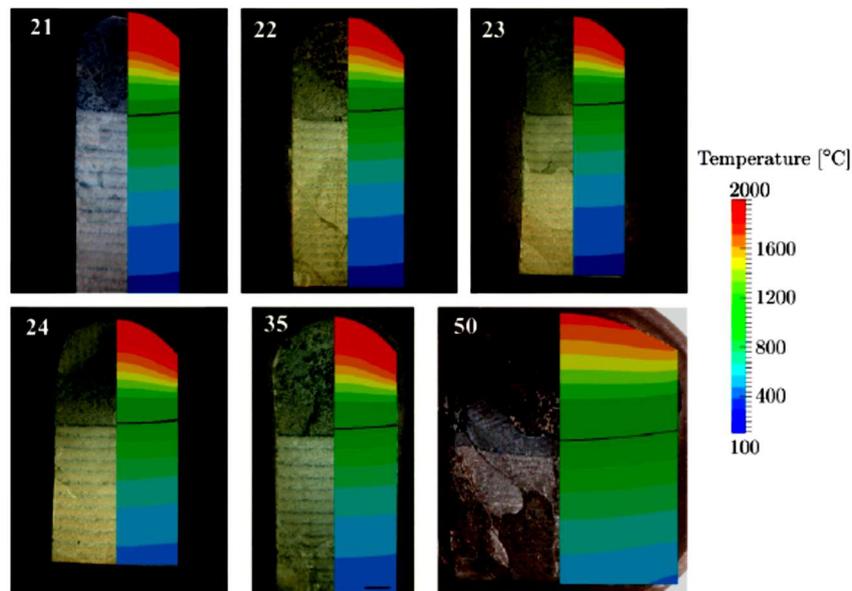


Figure 1.27 : Calcul de la température dans les cordons [68]

Un échauffement excessif a aussi un effet sur les contraintes générées du fait des gradients thermiques et des dilations différentielles qu'ils induisent, qui produit la déformation des pièces. Un système de refroidissement par eau du plateau (Figure 1.28) permet de diminuer les temps de fabrication en réduisant les temps de refroidissement entre deux couches successives, nécessaires pour assurer la régularité géométrique des dépôts, et réduit également les déformations induites par les contraintes générées lors du refroidissement [71].

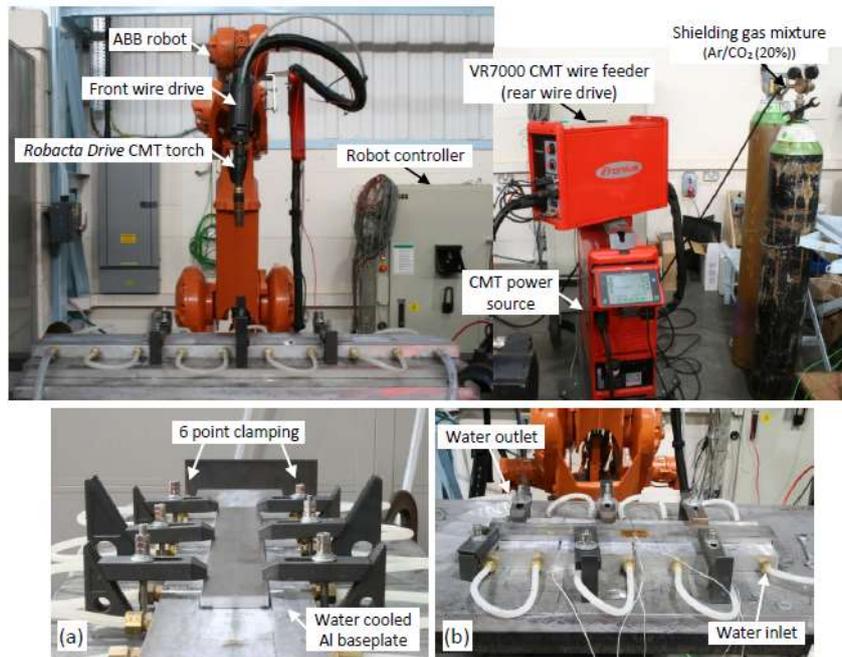


Figure 1.28 : Système de refroidissement par eau du plateau de construction permettant de diminuer les temps de refroidissement [71]

Les contraintes résiduelles constituent une autre problématique des procédés WAAM, puisque leur apparition est inévitable, et elle a des conséquences sur la géométrie des pièces, qui se déforment. La simulation numérique du procédé dans le but de prédire les contraintes résiduelles générées et les déformations attendues est parfois utilisée pour tenter d'optimiser le mode opératoire de construction des pièces en répartissant différemment l'apport de chaleur et de matière [66].

D'autres auteurs s'intéressent à la programmation des trajectoires des torches de soudage pour fabriquer, en additionnant les couches, des pièces de géométrie désirée, en supposant la géométrie de chaque dépôt connue. Dickens et al. [53] ont ainsi programmé les trajectoires d'un robot équipé d'une torche de soudage MIG à partir d'un fichier CAO pour fabriquer des pièces de géométries plus ou moins complexes (Figure 1.29).



Figure 1.29 : Pièces fabriquées en MIG à l'aide d'un robot de soudage [53]

Jacono [56] insiste sur la nécessité de bien optimiser les paramètres énergétiques du procédé de soudage pour pouvoir déposer et empiler, à l'aide d'un robot, des cordons d'acier réguliers de taille désirée avec un minimum de projections et porosités, et des propriétés mécaniques garanties, pour fabriquer des murs. Plusieurs études montrent qu'en utilisant un poste MIG dit « synergique », permettant de modifier l'apport de chaleur et de matière avec un transfert régulier, en jouant uniquement sur la vitesse de dévidage du fil d'apport, on pouvait adapter le volume du dépôt à la taille désirée en modifiant le rapport entre la vitesse de dévidage du fil et la vitesse de déplacement de la torche [72], [54].

Le choix de bons paramètres procédé ne suffit cependant généralement pas à garantir une fabrication sans défauts, notamment pour les pièces de grandes dimensions nécessitant l'empilement d'un grand nombre de couches, et la mise en place de systèmes de contrôle en cours de fabrication, afin d'ajuster les paramètres procédé avant qu'un défaut géométrique ne devienne critique, sont préconisés par de nombreux auteurs [53]. Des systèmes de vision permettant de mesurer la distance entre la buse de soudage et la surface de la pièce en construction, afin d'adapter de manière automatique la position de la torche de dépôt, ont ainsi été développés [71-76]. Kwak et al [77] proposent quant à eux de mesurer à l'aide de pyromètre et de profilomètre laser, respectivement les températures des dépôts et leurs formes, dans le but de développer une boucle de contrôle permettant d'ajuster les paramètres de dépôt. Doumanidis et al [72][75] se fixent les mêmes objectifs en développant un suivi du dépôt par une caméra infrarouge et un profilomètre (Figure 1.30).

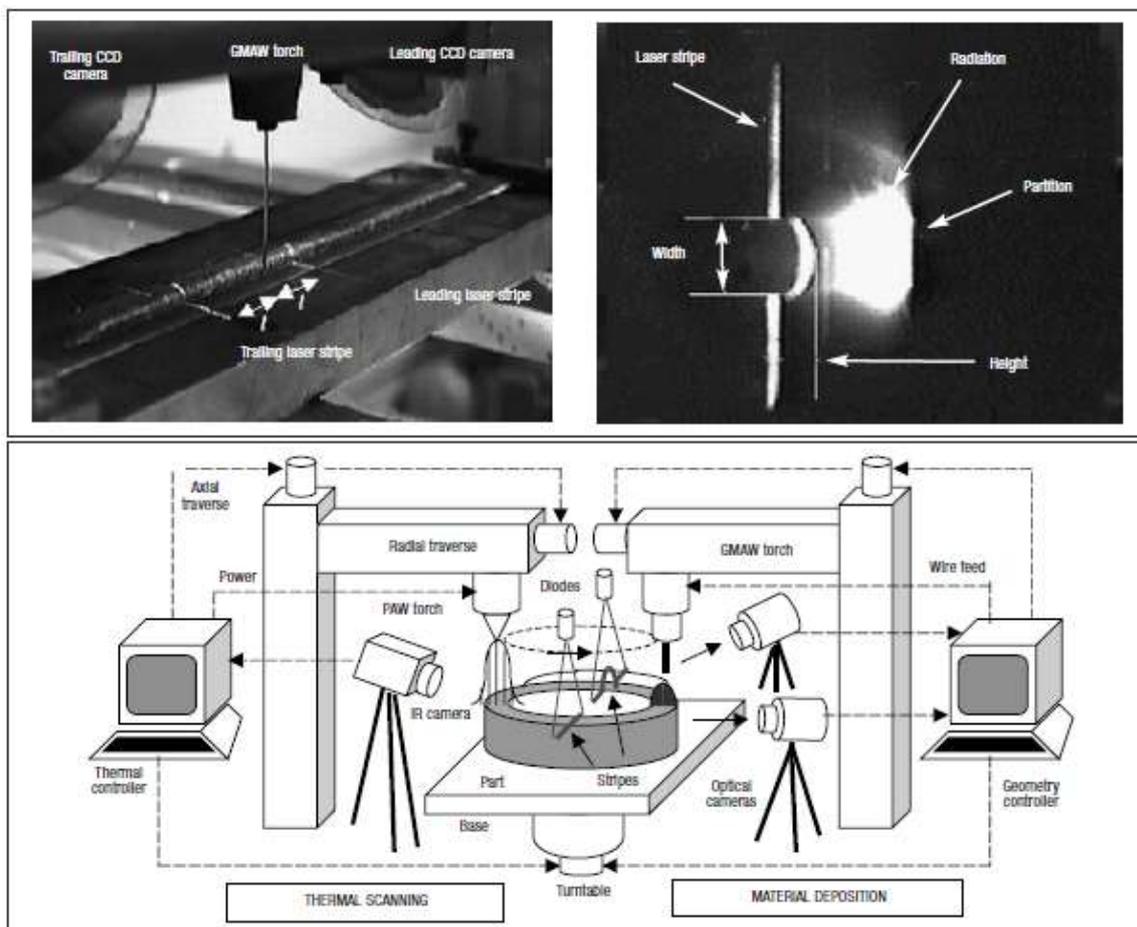


Figure 1.30 : Contrôle des températures et des géométries des dépôts en cours de fabrication [77]

Enfin, plusieurs études ont aussi été menées sur les outils et méthodes numériques permettant d'optimiser la séquence de fabrication d'une pièce à travers le choix des trajectoires de la torche. Zhang et al [57] ont développé un outil couvrant la chaîne numérique complète permettant, en partant du fichier CAO, le calcul de l'orientation optimale de la pièce, son découpage en tranches, le calcul des trajectoires de la torche, et même la programmation des finitions et post-traitements. Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'optimisation des trajectoires pour parvenir à la fabrication de pièces massives nécessitant le recouvrement de cordons adjacents déposés successivement, Siminski [58] ayant montré que leur qualité géométrique était très dépendante du choix de la séquence de déplacement de la torche (Figure 1.31).

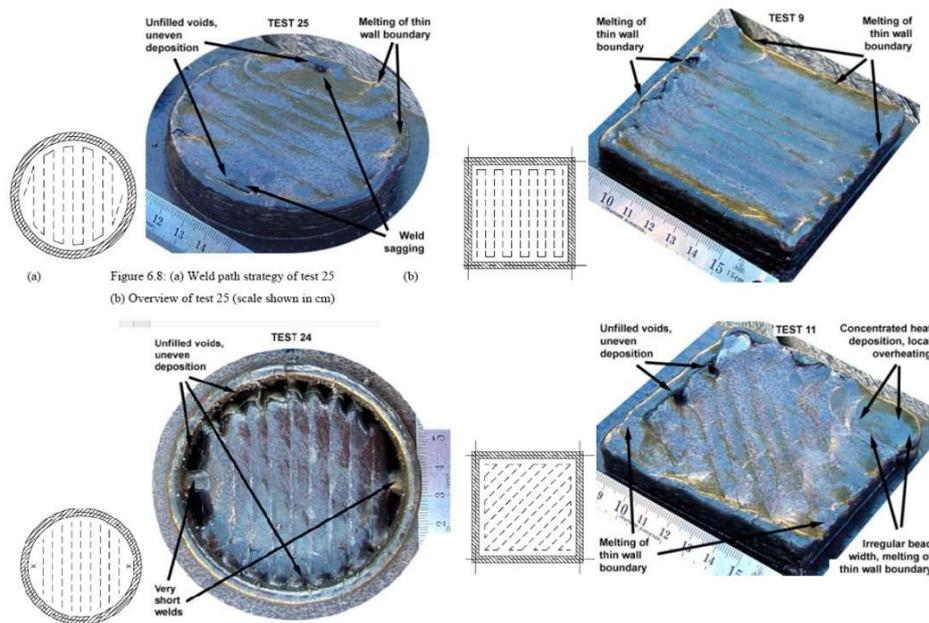


Figure 1.31 : Influence de la séquence de construction sur la géométrie des pièces fabriquées [58]

Jacono [56] a proposé une méthode de construction de pièces massives à partir de la détermination des trajectoires en partant des frontières de chaque couche. La problématique du recouvrement ou chevauchement de couches adjacentes a aussi été traitée par Cao et al [78] et Xiong et al. [79], qui ont proposé des approches mathématiques utilisant des fonctions géométriques pour décrire les formes de cordons en cas de chevauchement de deux cordons adjacents, afin d'optimiser les trajectoires pour minimiser les défauts géométriques. Martina et al. [80] proposent quant à eux d'adapter les paramètres procédé pour modifier la géométrie du dépôt plutôt que d'adapter les trajectoires.

D'autres auteurs tentent de prendre en compte les spécificités du procédé WAAM pour calculer les trajectoires de construction. Ainsi, Mehnen et al [81] tentent de prendre en compte les irrégularités géométriques en début et fin de cordon (Figure 1.32), et l'accumulation de chaleur dans la pièce.

Ribeiro et al [82] intègrent dans le calcul du découpage de la pièce et des trajectoires de construction, réalisé à partir du fichier CAO, les paramètres procédé et matériau, auxquels ils associent des caractéristiques géométriques de couches déposées. Zhang et al [57] ont développé un outil (Welding Déposition Wizard) qui inclut le découpage de la pièce à partir du

fichier CAO, la génération des trajectoires, et le contrôle des paramètres de soudage. Ding et al [83-85] développent des algorithmes de génération automatique de stratégies du dépôt pour des pièces pleines, associant des trajectoires linéaires et en zig-zag, dans le but de limiter les arrêts du dépôt, qui produisent souvent des défauts géométriques. Récemment, Venturini et al [86] ont réussi l'optimisation de trajectoires pour fabriquer des structures en forme de T sans défauts, pour lesquelles les problèmes de raccordement, et d'excès ou manque de matière associés, étaient très délicats.

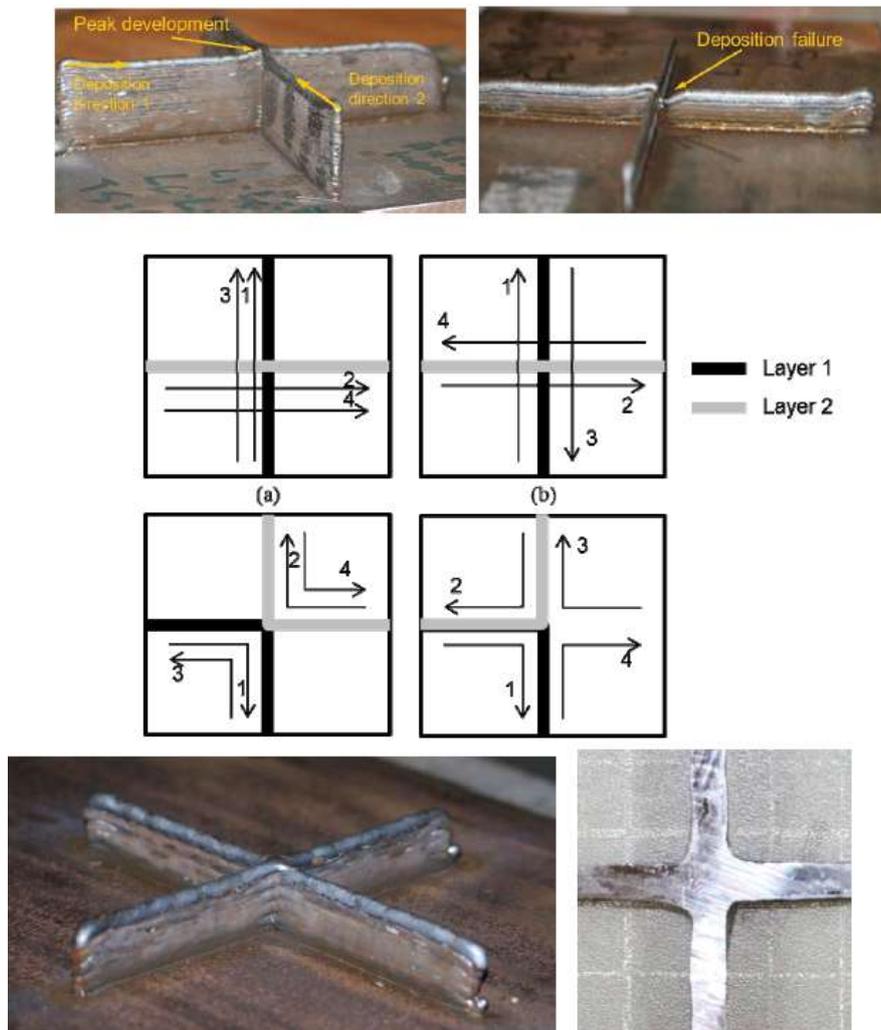


Figure 1.32 : Optimisation des trajectoires de dépôt en vue de minimiser les défauts géométriques [81]

1.4 Conclusion

La fabrication additive est une alternative très prometteuse aux techniques de fabrication soustractive traditionnelles pour la fabrication de composants métalliques avec des géométries complexes. Les procédés de FA utilisant des poudres métalliques (par lit de poudre ou projection directe) sont aujourd'hui les plus développés, en raison notamment de la grande précision des pièces fabriquées. L'épaisseur typique des couches déposées étant de 20 à 100 μm , les objets sont fabriqués avec une précision dimensionnelle de $\pm 0,05$ mm, et une rugosité

de surface (Ra) comprise entre 9 et 16 μm pour les procédés sur lit de poudre. Les taux de dépôts sont cependant relativement faibles, de l'ordre de 10 g/min, ce qui limite les applications de ces technologies à la fabrication des composants des tailles moyennes ou faibles.

Les technologies de FA basées sur la fusion de fil métallique sont plus adaptées à la fabrication de pièces de grandes dimensions, et réduisent de plus les pertes de matière, leur rendement matière étant proche de 100%. Avec les procédés utilisant l'arc électrique (technologies WAAM), le taux de dépôt de matière peut en effet atteindre environ 330 g/min (2500 cm^3/h). En revanche, la précision dimensionnelle et la qualité de l'état de surface sont moindres que celles des technologies sur lit de poudre. Au niveau des caractéristiques des matériaux obtenus, des propriétés mécaniques assez équivalentes peuvent être atteintes avec les deux techniques, avec toutefois une moindre porosité dans les pièces obtenues par fusion de fil. Enfin, les contraintes résiduelles sont généralement distribuées sur de plus grands volumes avec les techniques à base de fil, en raison de l'apport de chaleur plus important et des forts taux de dépôt, ce qui génère des distorsions plus importantes. Pour tenter de limiter les défauts géométriques inhérents au procédé de FA par dépôt de fil fondu à l'arc électrique, il est alors nécessaire de bien comprendre l'influence des divers paramètres du procédé, comme l'apport d'énergie, la vitesse de dévidage du fil, la vitesse d'avance, ou la stratégie de construction des pièces, sur la géométrie des dépôts, l'histoire thermique, ou encore les contraintes résiduelles.

Le travail de recherche décrit dans les prochains chapitres prétend analyser les phénomènes de transfert de matière et d'énergie pendant le processus de dépôt du métal dans le procédé de FA par fusion de fil métallique par arc électrique, afin de mieux comprendre les caractéristiques des dépôts obtenus, et pouvoir à terme optimiser les paramètres procédé en fonction du type de pièce à fabriquer. Ce travail vise aussi à apporter des bases pour le contrôle en ligne du processus de fabrication. Le procédé de soudage MIG-CMT a été retenu pour cette étude, car il permet un très bon contrôle à la fois de l'apport de chaleur et de la quantité de métal déposé. Avant de commencer l'analyse du procédé, un banc d'essai spécifique, ainsi que des outils dédiés pour l'observation et l'analyse des paramètres du procédé, ont dû être développés. Le prochain chapitre est consacré à la présentation de ces outils expérimentaux.

Chapitre 2. Instrumentation

Ce chapitre est consacré à la description des moyens expérimentaux utilisés au cours de ce travail de recherche. Dans un premier temps, le banc d'essai conçu et fabriqué pour permettre la fabrication additive de pièces métalliques est présenté, puis le procédé de soudage employé pour assurer la fusion et le dépôt d'alliage fondu est décrit. Les techniques de caractérisation du procédé et des dépôts obtenus sont ensuite détaillées.

2.1 Conception du banc d'essai

Les systèmes de fabrication additive sont des machines constituées, en général, de trois éléments : le dispositif d'apport de matière, la source de traitement de la matière, et le mécanisme de mouvement 3D. Le dispositif d'apport de matière doit permettre le stockage du matériau, dans notre cas sous la forme d'une bobine de fil métallique, et son alimentation vers la source. La source de traitement de la matière doit permettre de transformer la matière première afin de l'amener dans un état physique permettant son dépôt régulier et sa liaison avec les couches précédemment déposées. Enfin, le mécanisme de mouvement doit permettre le contrôle de la formation géométrique des différentes couches de matière en 2D, et de gérer la superposition des différentes couches afin de produire des pièces en 3D.

Dans le cas du présent travail de recherche, il a été décidé d'utiliser un procédé de soudage à l'arc de type CMT pour assurer les deux premières fonctions : apport de matière et traitement de la matière par fusion du fil, dépôt de gouttelettes liquides puis solidification. La conception du banc d'essai concerne donc essentiellement le mécanisme de mouvement 3D.

Les différentes technologies de FA utilisent diverses méthodes de construction des couches selon le type de source de traitement de la matière, auxquelles vont correspondre différents types de mécanismes de mouvements. Les principales méthodes de construction, adaptées aux différents types de sources, ou « canaux », sont décrites de manière schématique sur la figure 2.1.

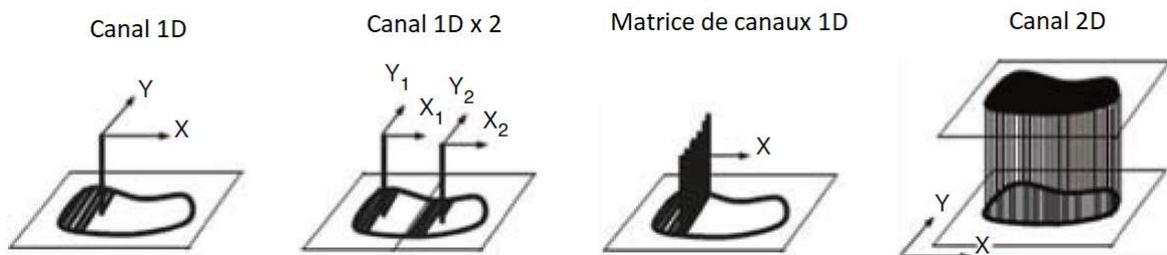


Figure 2.1: Principales méthodes de construction de couches en FA [6]

Les techniques de FA par stéréolithographie peuvent par exemple utiliser des sources constituées de matrices de canaux 1D qui vont irradier et durcir une bande de matière, ou même de « canaux 2D » qui permettent d'irradier en une seule fois l'ensemble de la couche qui doit être « durcie ». Le mécanisme de mouvement ne comprend alors, dans le premier cas, qu'une translation de la source suivant l'axe X, associée à un déplacement du plateau de construction selon l'axe vertical, afin de pouvoir déposer les nouvelles couches de résine, et dans le second cas qu'un simple déplacement vertical du plateau de construction.

Les techniques de FA par fusion de fil métallique par arc électrique (WAAM) emploient quant à elles des sources constituées d'un seul canal 1D, et nécessitent donc des mécanismes de mouvement intégrant des déplacements selon les trois axes de l'espace de travail. Il existe également des systèmes à deux sources, qui nécessitent alors des mécanismes de mouvement encore plus complexes pour déplacer de manière coordonnée les deux sources.

On rencontre généralement trois types de mécanismes permettant de contrôler le déplacement d'une source selon 3 axes : les mécanismes cartésiens, les robots parallèles, et les robots anthropomorphes. On peut aussi utiliser des combinaisons de ces différents types de mécanismes [87]. Afin de pouvoir faire un choix parmi ces différentes solutions de mécanismes de contrôle du mouvement de la source, un cahier des charges pour le banc d'essai a d'abord été défini. Une étude comparative des avantages et inconvénients des différents types de mécanismes est ensuite présentée, au regard notamment des exigences du cahier des charges défini. Nous présentons dans cette partie les principaux éléments de la démarche de conception ayant abouti à la réalisation du banc d'essai utilisé dans cette étude. Pour une description plus complète, on pourra se reporter à l'annexe 1 de ce mémoire.

2.1.1 Cahier des charges

Afin de pouvoir choisir parmi les différentes solutions techniques disponibles, une analyse du besoin a tout d'abord été menée, prenant en compte l'ensemble des objectifs du présent travail de recherche, mais aussi les besoins futurs des utilisateurs potentiels du système.

Expression du besoin :

Il s'agit de concevoir et de fabriquer une machine (banc d'essai) dédiée à la recherche permettant d'étudier le procédé WAAM-CMT afin de mieux comprendre l'influence des différents paramètres du procédé sur le transfert de matière et d'énergie lors des dépôts successifs. Afin de pouvoir plus facilement étudier les transferts de matière, la torche de soudage devra être fixe.

Cahier des charges :

- **Fonctions**
 - Fonction principale : fabrication de pièces métalliques par l'addition de dépôts de matière par le procédé WAAM-CMT à l'aide d'une torche fixe, grâce à un contrôle du mouvement (trajectoires et vitesses) du plateau de travail en 3 dimensions.
 - Fonctions secondaires :
 - Contrôle du démarrage et de l'arrêt de la torche de soudage en coordination avec les séquences de dépôt et trajectoires de construction planifiées.
 - Enregistrement des données du procédé (signaux électriques, images, etc.).
- **Ergonomie** : la torche de soudage doit être fixe (pour pouvoir observer par exemple le transfert de matière), le plateau de travail doit être facile d'accès afin de pouvoir être instrumenté, le système de pilotage et de contrôle de la fabrication des pièces doit être simple (interface par ordinateur).

- **Qualité** : le positionnement géométrique doit être suffisamment précis pour permettre d'obtenir les caractéristiques de dépôts souhaitées. Une précision de positionnement de 0,1 mm a été retenue. Les vitesses de déplacement dans le plan doivent pouvoir être régulées de manière précise, dans une gamme allant de 50 à 3000 mm/min.
- **Dimensions** : la machine doit posséder un volume de travail minimal de 300 x 300 x 300 mm³. Le plateau doit pouvoir supporter un poids maximum de 30 kg.

2.1.2 Choix du type de mécanisme

Une fois définies les caractéristiques du prototype souhaitées, il a fallu mener une étude comparative entre les différents types de mécanismes utilisables. Le cahier des charges spécifiant que le système de dépôt (torche de soudage CMT) doit demeurer fixe, c'est donc le plateau de travail supportant la pièce en construction qui doit se déplacer. Il existe, nous l'avons dit, trois principaux types de mécanismes permettant de générer le déplacement d'un point matériel en 3D : les mécanismes basés sur des systèmes cartésiens, qui sont ceux équipant généralement les machines-outils (fraiseuses, machines à commandes numériques), mais aussi la plupart des imprimantes 3D « open source » [25, 88] ; les mécanismes parallèles, tels que les robots Delta, qui sont aussi utilisés pour certaines imprimantes 3D open source [89,90] ; et enfin les mécanismes basés sur des bras robot anthropomorphes [55, 91, 92].

Pour la conception de notre machine de FA, les caractéristiques suivantes sont à considérer en priorité afin de faire un choix de mécanisme :

- **Précision** : la machine de FA sera basée sur la technologie WAAM, qui ne permet pas d'atteindre de grandes précisions géométriques, mais est plutôt dédiée à la fabrication de pièces de grandes dimensions. La précision n'est donc pas ici un critère prépondérant (une précision de positionnement de 0,1 mm a été choisie dans le cahier des charges), et les trois types de mécanismes sont capables de répondre à ces exigences de précisions.
- **Vitesse** : les vitesses de déplacement utilisées avec le procédé WAAM atteignent en général des valeurs maximales de l'ordre de un à quelques m/min. Là encore, les trois types de mécanismes permettent d'atteindre de telles vitesses.
- **Volume de travail et encombrement** : le volume de travail autorisé par un robot anthropomorphe peut être très important, et est toujours très supérieure à son encombrement au sol. Pour les autres types de mécanismes en revanche, le volume de travail souhaité déterminera la taille de l'installation, qui sera donc en général plus importante que dans le cas de l'utilisation d'un robot anthropomorphe.
- **Répétabilité** : la capacité du mécanisme retenu à répéter avec précision les trajectoires est primordiale. Le mécanisme cartésien présente un avantage certain par rapport à cette caractéristique.
- **Rigidité** : les mécanismes parallèles sont considérés être plus rigides, en raison de leurs bras multiples. Un mécanisme de type cartésien peut cependant aussi avoir une grande rigidité, si les sections des éléments de la structure et les actionneurs sont suffisamment dimensionnés. Les robots anthropomorphes peuvent en revanche présenter des limites de rigidité lorsqu'ils sont soumis à de fortes charges et des vitesses élevées en position « déployée ».

Le tableau 2.1 résume les avantages et inconvénients des trois types de mécanismes, au regard des principaux éléments du cahier des charges.

Tableau 2.1 Avantages et inconvénients de chaque type de mécanisme pour l'application envisagée

Robot	Avantages	Inconvénients
Anthropomorphe	<ul style="list-style-type: none"> • On peut changer l'orientation de la torche de soudage facilement. • Il donne la possibilité de fabriquer des géométries plus complexes. • Le volume de fabrication est simplement limité par l'aire de mouvement et la taille du bras. 	<ul style="list-style-type: none"> • On peut perdre en précision pendant le processus. • Pas de création automatique des trajectoires pour la FA. • On est contraint d'utiliser le langage de programmation propre au robot. • La torche n'est pas en position fixe, puisqu'elle doit être positionnée à l'extrémité du bras du robot.
Parallèle	<ul style="list-style-type: none"> • On peut fabriquer des pièces de grande hauteur. • Il existe un micrologiciel (Firmware) open-source adapté à cette configuration pour une utilisation comme imprimante 3D. • Il existe des cartes électroniques open-source développées pour ce type de mécanisme 	<ul style="list-style-type: none"> • Les géométries de pièces réalisables sont limitées du fait de l'impossibilité d'orienter la torche de soudage. • Le volume de construction est limité. • Les logiciels existants permettant le control et la création des trajectoires sont encore rares et toujours en développement.
Cartésien	<ul style="list-style-type: none"> • Il existe une grande variété de micrologiciels (Firmware) de contrôle adaptés à cette configuration pour une utilisation comme imprimante 3D. • On peut utiliser la plupart des logiciels de création de trajectoires pour imprimantes 3D, qui sont adaptés à ce type de mécanisme. • On peut utiliser et adapter la riche documentation open source concernant les composants électroniques à utiliser pour ce type de mécanisme 	<ul style="list-style-type: none"> • Les géométries de pièces réalisables sont limitées du fait de l'impossibilité d'orienter la torche de soudage. • Le volume de construction est limité.

Au regard des avantages et inconvénients des différents types de mécanismes, c'est le mécanisme de type cartésien qui paraît le plus adapté pour notre banc d'essai. C'est de plus le type de mécanisme le plus utilisé dans les imprimantes 3D de type « open-source », ce qui permet de bénéficier des nombreux développements réalisés pour ce type d'application.

2.1.3 Conception du système cartésien de mouvement

L'exigence imposée d'avoir une torche de soudage (T sur les figures du tableau 2) en position fixe réduit fortement le nombre de configurations possibles du mécanisme de type cartésien qui

sera utilisé. Ce mécanisme doit permettre les mouvements de translation du plateau de travail selon les trois axes X, Y et Z, chaque translation étant contrôlée par un mécanisme élémentaire, qui sera relié aux deux autres pour former le mécanisme cartésien. Cette configuration impose qu'un ordre soit défini entre ces trois translations et les mécanismes qui les contrôlent, aboutissant au déplacement en 3D du plateau de travail, qui devra être positionné au-dessous de la torche de soudage. Le tableau 2.2 explique les trois configurations possibles pour déplacer le plateau de travail selon les trois axes X, Y et Z.

Tableau 2.2 : Configurations d'axes possibles pour assurer le déplacement en 3D du plateau de travail

Configuration	Diagramme	Caractéristiques
1 XYZ (ou YXZ)		<p>Axe X fixe.</p> <p>Axes Y et Z mobiles.</p> <p>L'axe X supporte les axes Y et Z.</p> <p>La longueur des axes X et Y détermine l'aire de travail dans le plan (X,Y).</p> <p>La longueur de l'axe Z détermine la hauteur du volume de travail mais augmente aussi la hauteur totale de la machine.</p> <p>L'axe Z a besoin d'un second axe pour un meilleur guidage.</p> <p>1 axe fixe, 3 axes mobiles.</p>
2 XZY (ou YZX)		<p>Axe X fixe, besoin d'un second axe pour un meilleur guidage.</p> <p>Axes Y et Z mobiles.</p> <p>La longueur de l'axe Y est égale au double de la largeur de l'aire de travail.</p> <p>L'axe Z a besoin d'un second axe pour un meilleur guidage.</p> <p>2 axes fixes, 3 axes mobiles.</p>
3 ZXY (ou ZYX)		<p>Axe Z fixe, besoin d'un second axe pour un meilleur guidage.</p> <p>Axes X et Y mobiles.</p> <p>La longueur des axes X et Y est égale au double de la largeur de l'aire de travail.</p> <p>2 axes fixes, 2 axes mobiles.</p>

En prenant en compte les diverses possibilités de construction par sous-systèmes, la facilité de contrôle et de guidage des différents axes, la facilité d'assemblage (les axes mobiles seront plus difficiles à assembler), le nombre d'éléments à lier par câblage, ou encore l'optimisation du volume de la machine, c'est finalement la troisième configuration du tableau 2 qui a été retenue.

2.1.4 Conception Mécanique

La construction d'un mécanisme ou robot cartésien nécessite l'utilisation de mécanismes de mouvement linéaire qui facilitent le contrôle précis des déplacements, suivant les trois axes de translation. Dans le domaine de la construction de machines, les options pour arriver à la création d'un mécanisme de ce type sont très variées. On utilise généralement pour construire un tel mécanisme la combinaison d'un moteur électrique avec une transmission de type mécanique.

Les moteurs électriques sont fréquemment utilisés comme éléments de contrôle dans les systèmes de mouvement, afin de contrôler la position ou la vitesse. On peut ainsi choisir entre différents types de moteurs électriques : moteurs pas à pas, moteurs à courant continu, moteurs à courant alternatif, ou servomoteurs. Parmi ces différentes options, c'est sans doute le moteur pas à pas qui semble le plus adapté à notre application, puisqu'il permet un contrôle facile en boucle ouverte, et possède une très grande précision, chaque pas correspondant à une rotation de $1,8^\circ$, précision qui peut encore être améliorée par des méthodes de contrôle électronique permettant la décomposition de chaque pas en « micro-pas ». Ce type de moteur permet de transmettre des couples importants, et donc de déplacer des charges élevées. C'est souvent ce type de moteur que l'on rencontre dans les machines d'usinage à commandes numériques, ou dans les imprimantes 3D commerciales [93,94].

Les systèmes de transmission mécanique associés aux moteurs pas à pas doivent transformer le mouvement de rotation du moteur en un mouvement linéaire. Cette transformation peut se faire à l'aide de courroies dentées, de chaînes, de mécanismes pignon/crémaillère, de vis à billes ou de vis de précision. Les systèmes de transmission par courroies dentées ou vis de précision sont cependant les plus utilisés dans les machines de FA industrielles. En prenant en compte le type de contrôle envisagé, le nombre de composants requis pour l'utilisation de chaque type de système, et la charge à entraîner, l'utilisation de vis de précision paraît être la meilleure solution pour notre application.

Une solution à base de moteurs pas à pas et vis de précision a donc été retenue pour chacun des mécanismes de translation du plateau de travail, selon les trois axes X, Y et Z. Ces mécanismes seront assemblés et reliés au plateau de travail en utilisant des éléments de structure standards (profilés, cornières, axes cylindriques ...). La figure 2.2 représente une modélisation CAO de la machine finalement conçue. Ce schéma montre la configuration des axes, les mécanismes élémentaires de mouvement, et la structure du bâti de la machine, constitué de profilés en aluminium de dimensions standard.



Figure 2.2 : Modèle CAO du banc d'essai conçu

2.1.5 Dimensionnement des différents composants mécaniques du banc d'essai

Une fois les différents éléments « mécaniques » du banc d'essai identifiés, il a été nécessaire de les dimensionner pour affiner les spécifications techniques de chaque composant à utiliser. Le système mécanique constituant le banc d'essai peut être décomposé en trois sous-ensembles liés, qui vont former le mécanisme cartésien complet :

- Le mécanisme de mouvement dans le plan XY ;
- Le mécanisme de mouvement suivant l'axe Z ;
- Le châssis de la machine.

Le mécanisme complet de mouvement dans le plan XY est modélisé sur la Figure 2.3. Il comprend les fonctions et caractéristiques suivantes :

- Il est constitué de deux mécanismes de mouvement linéaire liés, perpendiculaires entre eux.
- Le mécanisme complet en fonctionnement sera en déplacement vertical, donc il doit être adaptable au mécanisme Z.
- Ce mécanisme doit supporter le plateau de travail et les pièces qui seront fabriquées.
- Le mécanisme permettra le déplacement du plateau d'une distance minimum de 300 mm sur chaque axe (X et Y).

Chacun des axes X et Y devra posséder 4 rails de guidage, du fait de l'exigence de mobilité du plateau de travail. Notons que les liaisons entre le plateau et les 4 rails de guidage sur lesquels il repose sont des appuis mobiles, tout comme les liaisons entre ces rails et les rails de guidage périphériques. Nous avons choisi d'utiliser des paliers glissants pour chacun de ces appuis mobiles.

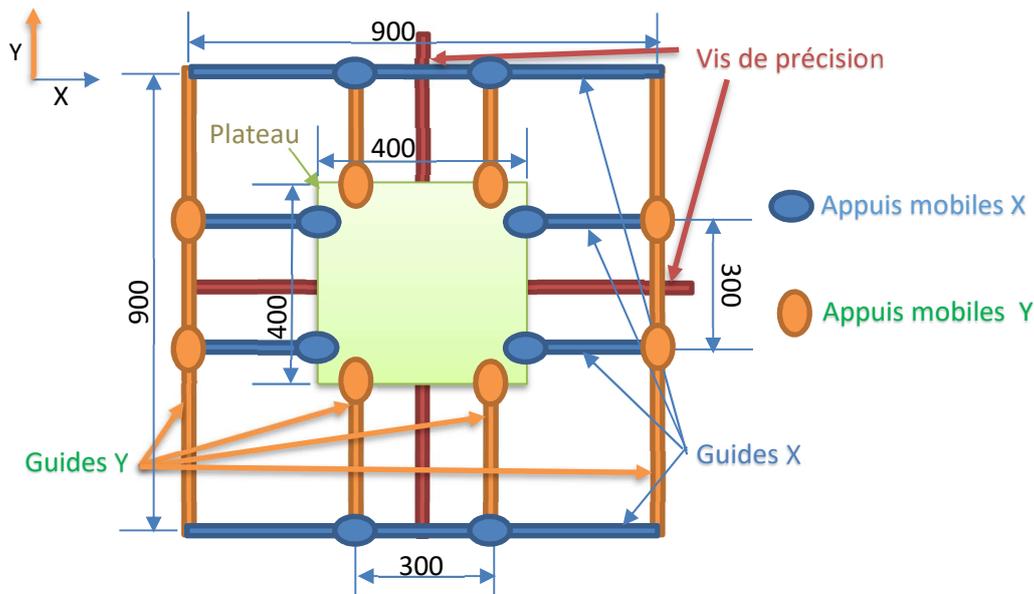


Figure 2.3 : Modélisation du mécanisme de mouvement dans le plan XY

Les longueurs des différents éléments du mécanisme de mouvement dans le plan XY sont imposées par les dimensions de l'aire de travail fixées dans le cahier de charges. Les sections des rails de guidage (cylindres pleins) ont ensuite été dimensionnées par rapport à ces longueurs, afin de limiter les déformations du système, et conserver une bonne précision de positionnement du plateau (cf. Annexe 1).

Des arbres en alliage d'aluminium anodisé de diamètre 12 mm, fournis par la société IGUS, ont finalement été choisis pour les rails de guidage, associés à des paliers glissants en matériau plastique résistant à l'usure et à la température, qui permet un fonctionnement à sec (sans lubrifiant). L'utilisation d'un matériau plastique présente un second avantage par rapport à notre application, car les paliers assureront ainsi l'isolation électrique entre le plateau de travail, qui sera relié à la masse du générateur de soudage, et les autres éléments métalliques du système.

Les translations selon les axes X et Y doivent être assurées avec un contrôle précis des positions et des vitesses. Les moteurs utilisés devront donc avoir un couple suffisant pour maintenir les vitesses constantes, quel que soit la vitesse choisie et pour toutes les positions du plateau. La vitesse de construction maximale généralement utilisée pour les applications WAAM est de 2000 mm/min environ. Afin de s'assurer une marge de sécurité, les composants (moteurs pas à pas et vis) ont été dimensionnés par rapport à une vitesse de translation maximale du plateau de 5000 mm/min. Pour atteindre ces grandes vitesses de déplacement avec des systèmes constitués de moteurs pas à pas et vis, il est fortement recommandé d'utiliser des vis hélicoïdales, qui possèdent un pas longitudinal plus grand. C'est donc ce type de vis que nous avons choisi, en fonction des exigences de précision, de vitesse de translation et de couple à transmettre, issus du cahier des charges (cf. Annexe 1).

Pour le mouvement de translation selon l'axe Z, la vitesse de déplacement pourra être plus faible (il s'agira juste de translater de quelques mm le plateau entre chaque tranche de construction), et une valeur maximale de 2500 mm/min a été retenue. En revanche, la précision de positionnement, qui sera conditionnée par le pas du moteur et de la vis associée, doit être aussi élevée que pour les axes X et Y. Le moteur employé pour l'axe Z devra de plus être plus puissant, pour supporter et déplacer le poids du plateau avec la pièce, mais aussi le poids des mécanismes des axes X et Y, qui sont mobiles. La charge totale à déplacer est estimée à 500 N.

Une vis de type trapézoïdal a été retenue, qui est plus efficace pour transmettre des charges verticales. Le pas de la vis finalement choisie est plus faible que celui des axes X et Y, ce qui améliore la précision de positionnement, et son diamètre plus important (cf. Annexe 1).

La sélection des moteurs a été faite en fonction de la valeur des couples calculés qu'ils devront transmettre pour déplacer les poids prévus, et maintenir les vitesses demandées constantes, jusqu'aux valeurs limites précédemment indiquées (cf. Annexe 1).

Enfin, la structure du banc a été conçue comme un châssis rigide constitué d'un assemblage de profilés carrés rainurés en aluminium. Aux vues des dimensions souhaitées et des exigences mécaniques, un profilé carré standard de dimensions 45x45 mm a été choisi. La figure 2.4 montre une photo du banc d'essai fabriqué.



Figure 2.4: Photo du banc d'essai assemblé

2.1.6 Electronique

Les moteurs choisis ont besoin d'une alimentation de 24 volts, et chaque moteur a besoin d'une intensité de 4,2 A pour fonctionner. Comme il y aura quatre moteurs à alimenter, il faudra une alimentation pouvant délivrer une puissance de plus de 400 watts lorsque tous les moteurs fonctionneront en même temps. L'alimentation choisie est une alimentation de marque Meanwell, de 24 volts et 480 watts.

Pour le contrôle de la machine, nous avons choisi d'utiliser la carte de contrôle spécialement développée pour les imprimantes 3D open-source RAMPS 1.4 (Reprap Arduino Mega Pololu Shield) [95], et un micrologiciel (firmware) associé open-source, développé aussi pour les mêmes machines. La carte RAMPS est spécialement conçue pour s'adapter à l'électronique et aux composants utilisés dans les imprimantes de type RepRap (imprimantes 3D open-source). Il s'agit d'une carte qui a une interface avec un module Arduino Mega 2560. Son design inclut les branchements et prises pour les contrôleurs de moteurs pas à pas, et pour le contrôle de la résistance chauffante située à l'extrémité des têtes d'imprimantes 3D RepRap.

Du fait de la puissance élevée des moteurs utilisés sur notre banc d'essai, en comparaison des puissances des moteurs utilisés sur les machines RepRap, les contrôleurs montés sur la carte

RAMPS ne sont pas suffisants. Il a donc fallu trouver des contrôleurs adaptables au fonctionnement de la carte, et qui puissent fournir la puissance requise pour faire fonctionner les moteurs. Nous avons choisi un module de commande pour moteur pas à pas CW 5045, qui travaille avec une alimentation pouvant délivrer 4,5 ampères maximum, et qui permet d'utiliser le moteur avec plusieurs options de micro-pas, permettant d'obtenir des précisions de déplacement variables. Les nouveaux composants ajoutés (alimentation et modules CW 5045) ont simplement été reliés aux connexions de la carte déjà prévues pour l'alimentation et les contrôleurs moteurs.

2.1.7 Logiciels de contrôle et de commande

Il existe une grande variété des micrologiciels (firmware) développés pour le contrôle des imprimantes 3D open-source, et utilisables avec une carte RAMPS. Le plus répandu, car il permet d'envoyer en une seule fois de longues séquences de commandes à la carte RAMPS (sous la forme d'un programme en langage G-code), est le logiciel Marlin. Pour être utilisable avec le procédé de FA WAAM, ce micrologiciel a cependant nécessité certaines modifications (Tableau 2.3). La version du logiciel de 2015/2016 Marlin Release [96] a servi de base, et a été modifiée pour pouvoir fournir toutes les instructions nécessaires à la FA par le procédé WAAM.

Tableau 2.3 : Liste des modifications du micrologiciel Marlin pour adaptation au procédé WAAM

Modification de commande	Description de la modification
Line 47 <pre>#define MOTHERBOARD 34</pre>	Choix de la carte de contrôle utilisée. 34 correspond à la carte RAMPS 1.4
Line 336 <pre>// Travel limits after homing #define X_MAX_POS 175 #define X_MIN_POS -175 #define Y_MAX_POS 175 #define Y_MIN_POS -175 #define Z_MAX_POS 300 #define Z_MIN_POS 0</pre>	Mise en place de limites de déplacement adaptées aux dimensions du volume de travail de 300 x 300 x 300 mm ³ .
Line 480 <pre>// default settings #define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {200.0*125/25,200*1255/25,200.0*2/4,0} // default steps per unit #define DEFAULT_MAX_FEEDRATE {100, 100, 5, 25} // (mm/sec) #define DEFAULT_MAX_ACCELERATION {500,500,100,10000} // X, Y, Z, E maximum start speed for accelerated moves. #define DEFAULT_ACCELERATION 500 // X, Y, Z and E max acceleration in mm/s^2 for printing moves #define DEFAULT_RETRACT_ACCELERATION 500.</pre>	Définition du nombre de pas moteur par unité de translation. Nombre de pas par unité = (Nombre de pas)*(Nombre de micro-pas)/(Pas de la vis)

Enfin, le logiciel utilisé pour commander la machine depuis l'ordinateur est Repetier Host V1.6, version 2016 [97]. Il s'agit d'un logiciel libre de commande pour imprimantes 3D plastiques, permettant notamment le placement automatique de l'objet à imprimer, le découpage automatique de l'objet (slicing), et le lancement de l'impression. Le logiciel peut aussi être utilisé pour éditer et éventuellement modifier le programme G-code qui commande le travail de la machine, mais aussi pour positionner la machine « manuellement » avec l'interface de contrôle manuel.

Afin de pouvoir utiliser le logiciel Repetier pour commander le travail de la machine de FA WAAM, il a été nécessaire d'adapter la configuration des programmes G-code standards, en particulier pour les paramètres de découpage des objets à fabriquer, qui sont très différents en WAAM de ceux employés dans les imprimantes 3D plastiques. A cette fin, nous avons utilisé le logiciel de découpage d'objets (slicing) Slic3r [98]. Il s'agit d'un logiciel libre permettant de modifier un grand nombre de paramètres d'impression 3D, et de générer des programmes G-code adaptés à un très grand nombre d'imprimantes 3D par extrusion de matériaux thermoplastiques. Le logiciel Slic3r nous a permis de réaliser les modifications suivantes de paramètres des programmes G-code générés :

- dimensions de travail : elles sont modifiées pour correspondre à la taille de la zone de travail du banc d'essai : 300 x 300 x 300 mm³ ;
- diamètre de la buse : ce paramètre est choisi pour le procédé WAAM égal à la largeur du cordon à déposer ;
- hauteur de couche : on choisit comme valeur de référence la hauteur des cordons obtenus ;
- vitesses de travail : les plages de vitesses de travail, mais aussi les vitesses pour les déplacements libres sont adaptées au procédé WAAM.

Ces modifications permettent d'obtenir une prévisualisation de l'objet à fabriquer découpé en tranches, et surtout la création rapide d'un programme G-code adapté aux caractéristiques du procédé WAAM, à partir des modèles géométriques de pièces obtenus grâce aux logiciels de CAO (Figure 2.5).

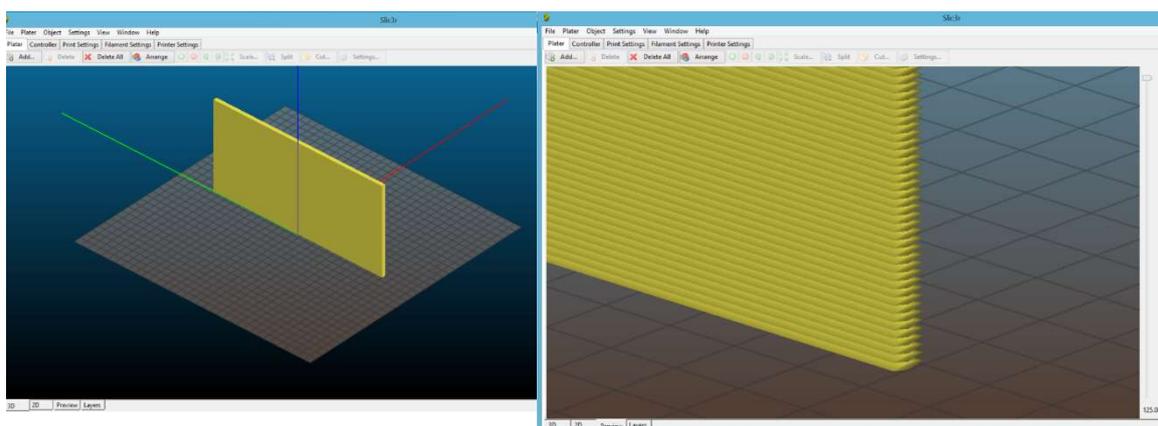


Figure 2.5: Prévisualisation d'un objet découpé avec les caractéristiques géométriques de fabrication

Après la création automatique du programme G-Code avec le logiciel Slic3r, le fichier est chargé dans le logiciel Repetier, pour être envoyé à la machine et démarrer le processus de dépôt de métal.

Les premiers tests ont montré que quelques adaptations du format des programmes G-code générés étaient encore nécessaires pour améliorer le contrôle du procédé (Tableau 2.4).

Tableau 2.4 : Modifications de format des programmes G-code pour améliorer la qualité des pièces produites par le procédé WAAM

Besoin/difficulté	Problème/Solution	Commande G-code
Pause entre couches (temps de refroidissement)	Il existe une instruction G-code permettant de mettre en pause le procédé pendant un temps indiqué.	G4 S15 // Pause de 15 secondes G4 P1500 // Pause de 15 secondes
Code pas nécessaire	Une instruction G-code existe pour contrôler le chauffage des résistances des buses d'extrusion, qui doit être effacée pour le procédé WAAM	
Enregistrement des données procédé	Enregistrement des signaux électriques (tension et courant), et éventuellement des images au cours du dépôt. On a ajouté une instruction qui commande le démarrage et l'arrêt de l'enregistrement.	M04 P6 S255 // démarrage d'enregistrement M04 P6 S0 // arrêt d'enregistrement
Démarrage de la torche indépendant du déplacement du plateau	Ajouter un temps d'attente entre le démarrage de la torche et le démarrage du déplacement du plateau, et entre l'arrêt du déplacement du plateau et l'arrêt de la torche. Ajouts d'instructions dans le fichier G-code.	M04 P4 S255 // démarrage de la torche G4 S0.15 // attente avant déplacement du plateau ...//déplacement G4 S0.15 // attente avant d'arrêter la torche M04 P4 S0 // arrêt de la torche

Le programme G-Code est enregistré dans un fichier avec une extension *.gcode, mais il peut être traité comme un fichier texte. Pour faciliter les modifications listées plus haut, nous avons programmé un script en langage python appelé GCodeModifyer.py. Ce programme permet de lire le fichier G-code créé grâce au logiciel Slic3r, d'identifier le code des trajectoires qui décrit chaque couche de l'objet, d'ajouter les instructions nécessaires et de supprimer celles qui sont inutiles pour le procédé WAAM, et finalement d'écrire un nouveau fichier G-code modifié.

2.2 Le procédé de soudage CMT

Le procédé de soudage CMT est une variante du procédé GMAW (Gas Metal Arc Welding) [44]. C'est un procédé de soudage GMAW basé sur un mode de transfert par « court-circuit contrôlé », qui utilise un principe breveté pour créer, grâce à un mouvement alterné du fil-électrode, le détachement des gouttes de métal fondu à l'extrémité du fil lors des phases de court-circuit (cf. Chapitre 1). Ce contrôle mécanique du détachement des gouttes permet de déposer des cordons de soudure sans projections, et le soudage de tôles fines.

Le principe du procédé CMT est basé sur une régulation numérique très précise du mouvement du fil-électrode. Celui-ci se déplace vers l'avant, et dès que le système détecte le court-circuit, grâce à la chute de tension, le recul du fil commence, facilitant le détachement mécanique de la

goutte de métal liquide formée à l'extrémité du fil. Le cycle CMT peut ainsi être décrit en quatre étapes, représentées sur la figure 2.6 :

Durant la phase d'arc (1), l'extrémité du fil-électrode, chauffée par la chaleur de condensation des électrons, fond, formant une gouttelette de métal liquide, et le fil est guidé vers le bain de fusion.

Au moment où l'extrémité du fil entre en contact avec le substrat ou le cordon déjà déposé (court-circuit), l'arc électrique s'éteint (2), et l'intensité de soudage est abaissée, tandis que le mouvement du fil s'inverse.

Le mouvement de recul du fil permet le détachement de la goutte, produisant la rupture du court-circuit (3), et laissant sur le substrat une goutte de métal liquide, qui se solidifie ensuite.

A la rupture du court-circuit, l'intensité du courant augmente à nouveau, permettant le réamorçage de l'arc électrique (4), et le cycle recommence.

Le mouvement de va-et-vient du fil a lieu à une fréquence pouvant atteindre 130 fois par seconde. L'arc électrique n'est donc présent que pendant une partie du cycle de transfert de métal, ce qui permet de limiter l'apport de chaleur, en comparaison des autres modes de transfert rencontrés en soudage GMAW (cf. chapitre 1). De plus, contrairement au régime de transfert par court-circuit classique, le courant est maintenu à une intensité faible pendant toute la phase de court-circuit, permettant un transfert de matière sans projections. Enfin, la longueur de l'arc étant principalement contrôlée par la phase de retrait du fil après le court-circuit, qui se fait à vitesse de retrait constante, la hauteur d'arc demeure relativement constante, même si la surface sur laquelle le métal est déposé n'est pas plane.

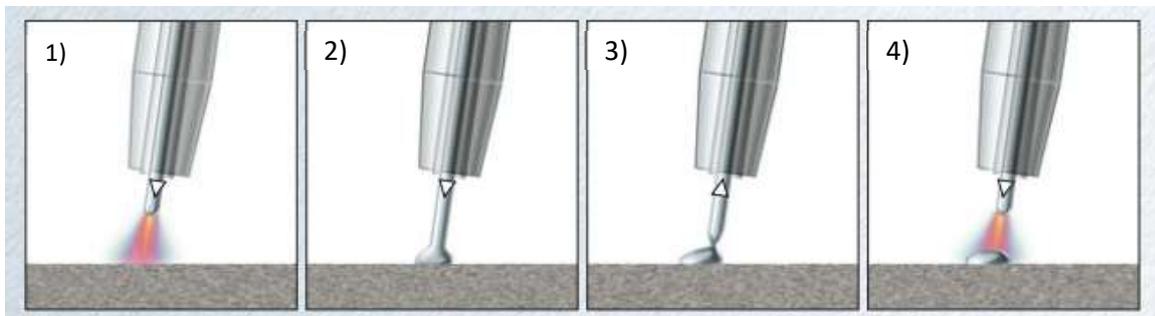


Figure 2.6: Représentation schématique du cycle de transfert CMT [16]

2.2.1 Paramètres caractéristiques du procédé CMT

Le procédé CMT fait intervenir un grand nombre de paramètres, qui doivent être ajustés pour permettre un transfert régulier de métal d'apport et de chaleur. Un préréglage de ces paramètres est toujours proposé par le fabricant (Fronius), sous la forme de « courbes caractéristiques », ou « courbes synergiques » [48]. Celles-ci sont constituées d'une série de « points de fonctionnement » qui regroupent, pour chacun d'entre eux, un jeu de paramètres optimisés pour un type de fil métallique et de gaz de protection, permettant de délivrer une énergie moyenne donnée, ou un taux de dépôt donné. Ces valeurs d'énergie moyenne ou de taux de dépôt ne sont toutefois qu'indicatifs, car la complexité du processus de transfert de matière et d'énergie en CMT rendent toute prévision assez imprécise. Selon le fabricant Fronius, « la création et le traitement des courbes caractéristiques CMT est une tâche complexe qui exige des compétences spécialisées en recherche et développement. La création et le traitement des courbes caractéristiques CMT requièrent une technique de mesure spéciale (par exemple caméra à grande vitesse, oscilloscope, etc.), ainsi que des connaissances et des qualifications étendues.

L'optimisation des courbes caractéristiques CMT sur place sert exclusivement à l'optimisation de l'application correspondante » [48].

Les paramètres du procédé CMT, au nombre de 17 en configuration « classique » peuvent être regroupés en trois catégories : les paramètres d'amorçage (6 paramètres), de soudage (9 paramètres), et de fin de soudage (2 paramètres). La description de ces paramètres est donnée dans le tableau 2.5. Notons que pour l'aluminium, on ne peut accéder qu'à 15 paramètres dans les courbes caractéristiques.

La figure 2.7 décrit de manière schématique l'évolution de la vitesse du fil, du courant et de la tension au cours d'un cycle de transfert en CMT, ainsi que les 9 paramètres de soudage. On peut identifier les trois phases du cycle de transfert de métal propre au procédé CMT : la phase de « boost » ou « d'arc chaud », correspondant au pic de courant (I_{boost}), la phase d'attente (wait) ou « d'arc froid » au cours de laquelle l'intensité devient plus faible et le fil descend vers le support, et la phase de court-circuit, au cours de laquelle la tension est quasiment nulle et le fil se rétracte, jusqu'à la rupture du court-circuit et le réamorçage de l'arc électrique.

Tableau 2.5 : Description des paramètres du procédé CMT

Paramètre	Description	Plage de valeurs
Paramètres d'amorçage		
vd_ignition	Valeur de consigne de la vitesse d'avance du fil avant le début du soudage.	-30 à +30 m/min
I_ignition	Valeur de consigne du courant d'amorçage au début du soudage.	5 à 550 A
t_ignition	Durée pendant laquelle les paramètres vd_ignition et I_ignition sont activés au début de soudage.	0 à 100 ms
U_hotstart	Paramètre permettant de modifier la longueur de l'arc électrique au début du soudage.	10 à 40 V
t_hotstart	Durée pendant laquelle la modification de la longueur de l'arc électrique au début du soudage est activée.	0 à 655 ms
slaghammer	Fonction permettant de retirer les scories à l'extrémité du fil-électrode. Le fil-électrode effectue un rapide mouvement d'aller-retour et effleure la surface de la pièce à souder jusqu'à ce qu'une scorie éventuelle présente se détache du fil-électrode et que l'amorçage puisse intervenir.	On : 1 / Off : 0 Pour l'aluminium, ce paramètre est toujours fixé à 0.
Paramètres de soudage		
(1) I_sc_wait	Valeur de consigne du courant à la suite de la phase Boost jusqu'au trempage du fil-électrode dans le bain de fusion.	5 à 550 A
(2) vd_sc_wait	Vitesse d'avance du fil à la suite de la phase Boost jusqu'au trempage du fil-électrode dans le bain de fusion.	0 à 80 m/min
(3) I_sc2	Valeur de consigne du courant pendant la phase de court-circuit.	0 à 300 A

(4) d_boostup	Vitesse de hausse linéaire du courant au début de la phase Boost.	0,1 à 1000 A/ms
(5) tau_boostup	Paramètre de hausse non linéaire du courant au début de la phase Boost.	0,08 à 5,00 ms
(6) I_boost	Valeur de consigne du courant pendant la phase Boost.	5 à 550 A
(7) t_I_boost	Durée de la phase Boost, depuis le début de la hausse du courant jusqu'au début de la baisse du courant.	0 à 100 ms
(8) d_boostdown	Vitesse de baisse linéaire du courant à la suite de la phase Boost.	0,1 à 1000 A/ms
(9) tau_boostdown	Paramètre de baisse non linéaire du courant à la suite de la phase Boost.	0,08 à 20 ms
Paramètres de fin de soudage		
I_drop_melt	Valeur de consigne du courant pour la formation d'une « boule » à l'extrémité du fil à la fin du soudage (t=10 ms).	3 à 500 A
t_burnback	Durée du retrait du fil après l'interruption du soudage à la vitesse de 6 m/min.	0 à 200 ms

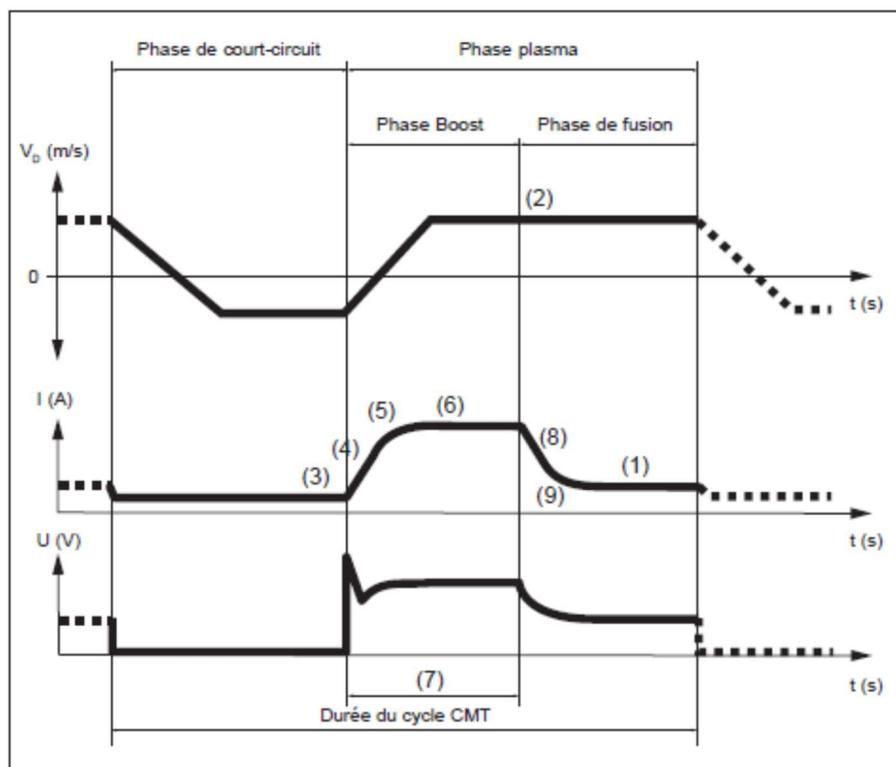


Figure 2.7 : Evolution au cours du cycle de transfert CMT de la vitesse du fil, de l'intensité et de la tension, et représentation des paramètres (1) à (9) de soudage décrits dans le tableau 2.5

2.2.2 Enregistrement et traitement des données

L'enregistrement des signaux électriques pendant le processus de dépôt de métal est primordial pour comprendre et analyser les mécanismes physiques résultants, et tenter d'optimiser les

points de fonctionnement des courbes caractéristiques en vue de l'utilisation du procédé CMT pour la fabrication additive de pièces métalliques.

La tension et le courant du procédé CMT sont enregistrés à l'aide d'une carte d'acquisition de données (DAQ) de marque National Instruments NI 9215. Il s'agit d'une carte avec quatre canaux d'entrée simultanés analogiques ($\pm 10V$), permettant une vitesse d'acquisition pouvant atteindre 100 kHz. Nous n'utilisons ici que deux canaux, un pour la tension et un autre pour l'intensité, à la vitesse d'acquisition de 25 kHz.

La tension est mesurée entre le tube de guidage du fil situé à l'extrémité de la buse de soudage (tube-contact), relié à la borne positive du générateur de soudage, et la borne négative du générateur (Figure 2.8). Cette tension peut varier entre 0 et au maximum environ 40 V au cours du soudage. Pour ne pas dépasser la limite de 10V admissible par la carte d'acquisition, la tension est conditionnée avant d'arriver dans la carte DAQ grâce à un diviseur de tension (Figure 2.8).

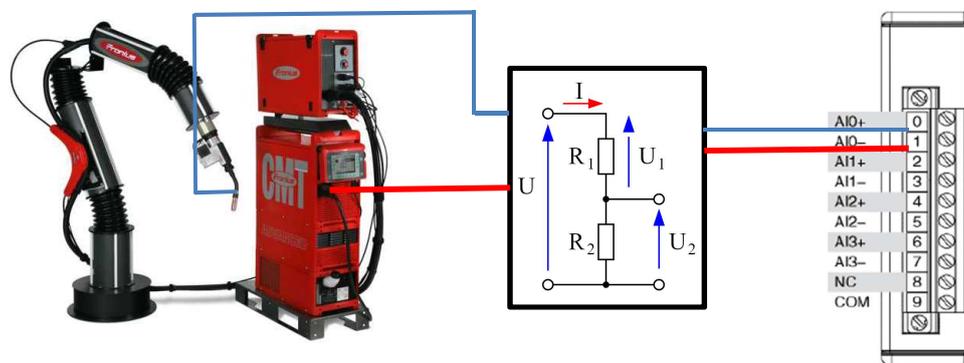


Figure 2.8 : Schéma de câblage de la carte DAQ pour la mesure de tension

Le courant est mesuré en employant un capteur de courant à boucle fermée à effet Hall de type LEM LF 305-S. Ce capteur permet de mesurer des intensités comprises entre 0 et 500 A, à une fréquence pouvant atteindre 100 kHz. La boucle du capteur est placée autour du « câble de masse » reliant la borne négative du générateur de soudage au support métallique sur lequel seront réalisés les dépôts (Figure 2.9).

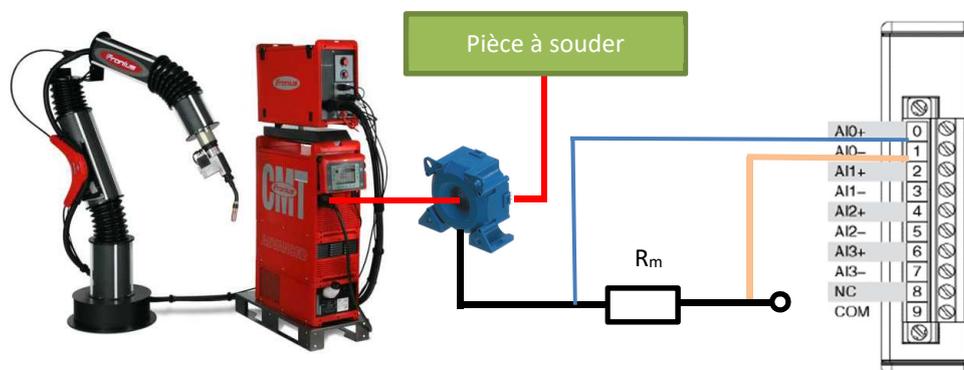


Figure 2.9 : Schéma de câblage de la carte DAQ pour la mesure de courant

Pour l'enregistrement et le traitement des signaux, une application a été développée sous LabView. Cette application convertit les valeurs de tension enregistrées grâce à la carte d'acquisition (tensions comprises entre -10 V et +10 V), pour obtenir les tensions et intensités de soudage. Ces données sont ensuite enregistrées sous la forme de fichiers texte dans un répertoire unique pour chaque cordon ou groupe de cordons dans le cas de la construction de murs.

Les données stockées peuvent ensuite être traitées à l'aide de divers programmes Python développés au cours de la thèse, en fonction des informations à extraire, à tracer ou à analyser.

Le programme « Tracer » permet par exemple de visualiser, à partir des fichiers texte enregistrés pour un cordon dans un répertoire donné, l'évolution de la tension et de l'intensité au cours du temps (Figure 2.10). Dans le cas de murs multi-cordons, plusieurs fichiers sont stockés dans le même répertoire (un par cordon), et le programme « TracerChoix » permet en plus de sélectionner, parmi tous les fichiers, celui que l'on veut visualiser.

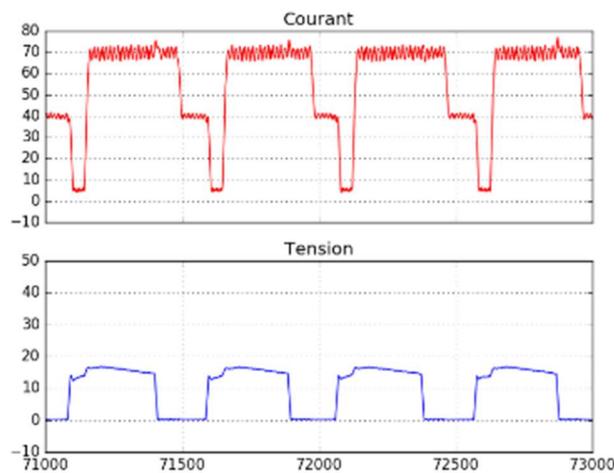


Figure 2.10 : Visualisation du courant et de la tension au cours du temps, pour un cordon donné

Un programme « Calcul » a en particulier été développé pour analyser les caractéristiques du cycle de transfert CMT. Ce programme permet de :

- Compter le nombre total de cycles, grâce au nombre de court-circuit, pour un cordon donné ;
- Calculer la puissance moyenne et l'énergie de chaque phase de chaque cycle CMT (phases « boost », « wait » et court-circuit), et leurs valeurs moyennes pour un cordon donné ;
- Calculer les durées de chaque phase du cycle CMT, et leurs valeurs moyennes pour un cordon donné.

D'autres programmes ont également été développés pour traiter de manière automatique les images de caméra rapide, enregistrées pour visualiser le transfert de matière à l'extrémité du fil lors des cycles de transfert CMT.

2.3 Caractérisation géométrique des dépôts

La caractérisation géométrique des dépôts sera déterminante pour évaluer l'influence des différents paramètres, et identifier des jeux de paramètres optimisés pour la construction

d'éléments par fabrication additive. Il est donc important de disposer d'un outil précis et rapide pour accéder à ces mesures géométriques, et qui ne soit de préférence pas intrusif, afin de ne pas affecter les propriétés des pièces mesurées, en vue de leur caractérisation mécanique ou microstructurale ultérieure, voire de l'utilisation des pièces fabriquées. C'est pour cette raison que nous avons choisi d'utiliser un scanner 3D, qui permet d'obtenir une représentation numérique de la pièce, pour accéder aux caractéristiques géométriques des éprouvettes fabriquées.

La récupération d'un modèle numérisé d'une pièce n'est cependant que le début du processus de caractérisation. Le modèle numérisé devra en effet être modifié et subir divers traitements afin de pouvoir accéder à l'information recherchée. Deux méthodes de traitement ont été employées pour accéder aux caractéristiques géométriques des dépôts fabriqués, à partir des fichiers numériques issus du scanner 3D, que nous désignerons par la suite méthode graphique et méthode numérique.

2.3.1 Numérisation des pièces et récupération des modèles numériques

Un scanner de type «BREUCKMANN OPTO TOP-HE» [99,100] 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 2.11). 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 2.11 : Photo du scanner 3D BREUCKMANN OPTO TOP-HE utilisé pour la numérisation des pièces

Dans le cas de pièces métalliques, la réflexion de la lumière blanche par la surface peut empêcher la numérisation des surfaces. Il est alors nécessaire d'appliquer au préalable un revêtement mat sur les surfaces à numériser. On utilise en pratique 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 (Figure 2.12), qui donnera des images scannées constituées de « nuages de points » pouvant être numérisées. Une fois l'opération terminée, la couche de spray peut être nettoyée facilement avec une brosse ou de l'eau et une éponge [101,102].



Figure 2.12 : Préparation de la pièce par pulvérisation d'un spray de couleur blanche

Les paramètres du scanner sont réglés depuis un ordinateur à l'aide du logiciel Optocat [103]. Ce logiciel permet de configurer les paramètres des images enregistrées par la caméra (saturation, luminosité, contraste, résolution...), et le nombre d'images pour chaque champ d'observation, qui doit permettre d'obtenir des nuages de points suffisamment denses. Un traitement manuel des données scannées est aussi souvent nécessaire, également réalisé avec le même logiciel, qui permet notamment d'éliminer les points situés en dehors de l'objet étudié. Finalement, les différentes vues de l'objet scanné sont associées de manière à reconstituer la géométrie en 3D de l'objet. Un fichier au format STL est alors généré à partir de ces nuages de points, qui décrit la surface de l'objet à partir de facettes triangulaires de normales définies.

Les objets numérisés peuvent présenter des défauts, qui se traduisent par exemple par la présence de « trous » lors de la visualisation des surfaces contenues dans les fichiers STL générés par le scanner. La présence de ces défauts peut s'expliquer par une réflexion trop importante de la lumière par les surfaces correspondantes, ou par la présence de zones concaves qui ne sont pas visibles par la caméra. La mesure des caractéristiques géométriques des pièces nécessitant généralement de disposer de surfaces continues, ces défauts doivent être « réparés ». Le logiciel Geomagic Studio [104] est utilisé pour réaliser ces modifications. Les zones de « trous » observées sur les surfaces sont bouchées de manière automatique, selon des méthodes d'interpolation permettant de reconstituer les surfaces manquantes à partir des caractéristiques des surfaces voisines. Cette « réparation » introduit donc des approximations des surfaces réelles des pièces. Pour conserver des surfaces numérisées représentatives des pièces réelles, on doit s'assurer que la surface des zones réparées reste très inférieure à 1% de la surface totale (Figure 2.13).

Les mesures des caractéristiques géométriques des pièces scannées sont effectuées par rapport à un système de coordonnées cartésiennes, qui doit être choisi de manière judicieuse par rapport à la forme de l'objet analysé. Dans le cas de dépôts rectilignes, ou de la construction de murs droits par l'empilement de dépôts, il sera par exemple judicieux de choisir un repère cartésien dont l'un des axes sera aligné avec la direction de dépôt. Le logiciel Geomagic Studio permet aussi de réaliser cet alignement : le plan (X,Y) du repère cartésien est aligné avec le plan du substrat sur lequel sont déposées les couches, et l'axe X avec la direction de dépôt.

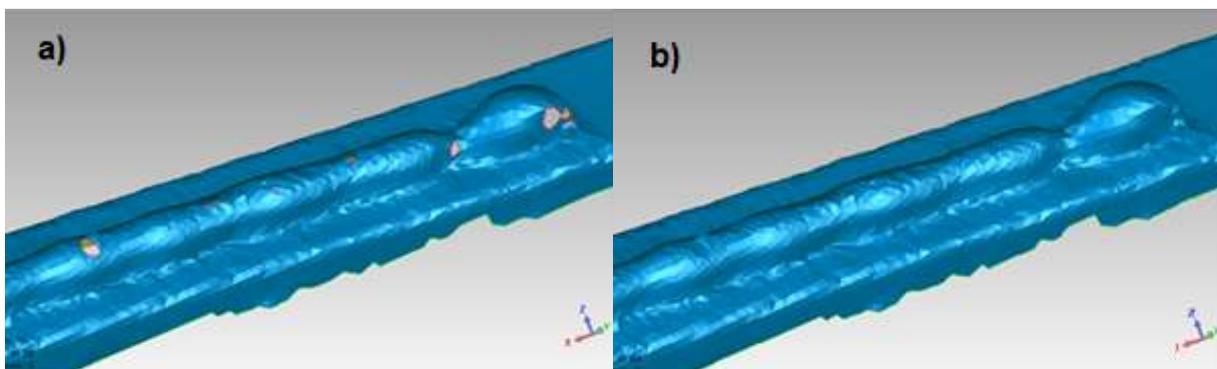


Figure 2.13 : Réparation des fichier STL a) avant réparation, on voit la présence de trous, b) après réparation

2.3.2 Méthode de mesure graphique

Pour effectuer les mesures des différentes caractéristiques géométriques des dépôts, nous avons dans un premier temps essayé d'utiliser les outils de traitement existants correspondant à la suite de logiciels associés au scanner 3D. Le logiciel Geomagic Qualify [105] est un outil précis et rapide d'analyse des caractéristiques géométriques d'une pièce, à partir de fichiers STL issus de la numérisation de ces pièces. Il est basé sur la comparaison des géométries numérisées avec une géométrie de référence, et est souvent utilisé en contrôle qualité de la production, pour vérifier que les tolérances dimensionnelles de pièces sont bien respectées après fabrication, en utilisant comme référence le fichier de conception CAO de la pièce.

Nous nous intéresserons dans le cadre de cette étude à deux types de géométries, dont les caractéristiques sont différentes : des géométries de mono-cordons, pour lesquelles les paramètres géométriques pertinents seront la largeur L , la hauteur maximale H , et l'angle de raccordement A (qui est lié à l'angle de mouillage du dépôt) ; des géométries multi-cordons formant un mur, pour lesquels les paramètres géométriques pertinents seront la largeur moyenne L et la hauteur totale H (Figure 2.14). Le volume total de matière déposée, qui permettra d'accéder au taux de dépôt (quantité de matière déposée par seconde), sera également une caractéristique géométrique importante, pour les deux types de géométries.

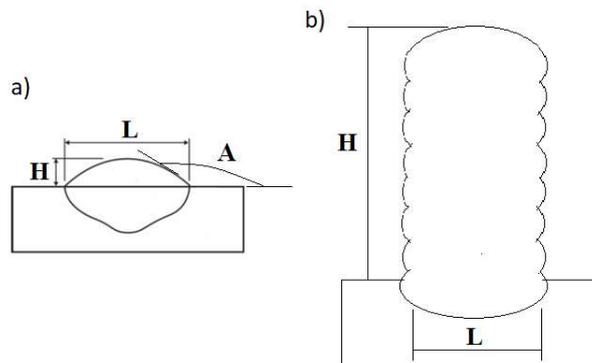


Figure 2.14 : Caractéristiques géométriques à mesurer a) sur un mono-cordon b) sur l'empilement de plusieurs cordons (multi-cordons)

Pour pouvoir utiliser le logiciel Geomagic Qualify pour obtenir ces caractéristiques géométriques, il est nécessaire de disposer d'une géométrie de référence, par rapport à laquelle on pourra comparer les géométries scannées, et mesurer les écarts. Pour pouvoir étudier la géométrie des dépôts, la référence choisie est la tôle métallique utilisée comme substrat. La première étape de traitement des fichiers numérisés consiste donc, à l'aide du logiciel Geomagic Studio, à effacer les cordons et à réparer les surfaces éliminées par interpolation, de manière à obtenir un fichier STL représentatif de la surface de la tôle support (Figure 2.15), qui fera office de géométrie de référence.

La comparaison des géométries de la référence et de la pièce scannée permet alors d'accéder aux caractéristiques géométriques des cordons déposés. Seule la partie centrale des dépôts est étudiée (Figure 2.16), les débuts et fins de cordon présentant parfois des défauts géométriques. Ces zones seront toutefois également étudiées dans les chapitres suivants, afin de caractériser ces défauts et de mieux comprendre leur origine.

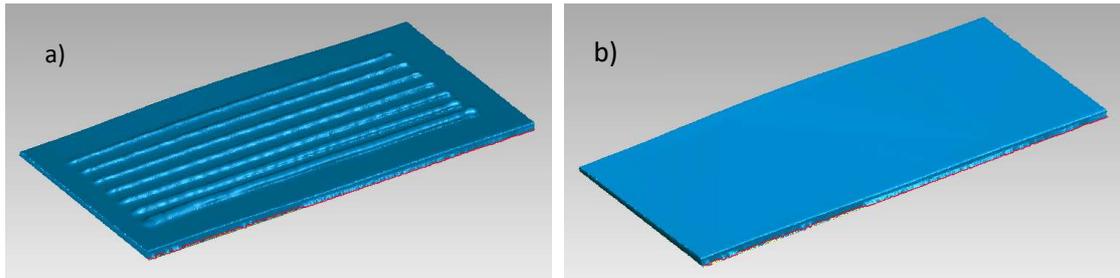


Figure 2.15 : Création de la géométrie de référence par élimination des cordons sur le fichier STL scanné (a), puis « réparation » pour boucher les zones de trous laissées et obtenir un fichier représentatif de la géométrie de la tôle substrat (b)



Figure 2.16 : Sélection de la zone retenue pour la caractérisation géométrique des cordons

La comparaison des deux géométries permet de mesurer notamment l'écart, selon l'axe Z (hauteur), entre la référence et la pièce scannée, ce qui donne donc accès à la hauteur du dépôt en chaque point (Figure 2.17).

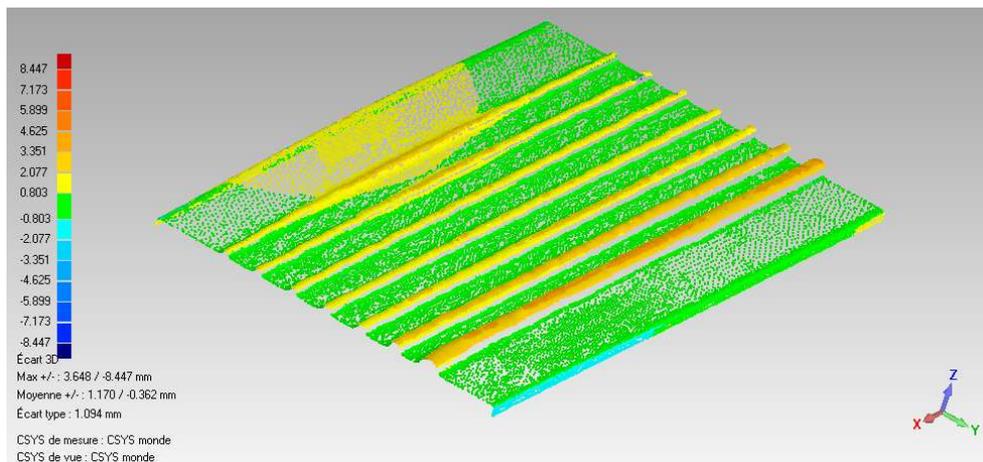


Figure 2.17 : Résultat de la comparaison 3D entre la référence et la pièce scannée sur l'aire choisie, qui montre l'écart selon l'axe Z (hauteur)

Pour mesurer la hauteur moyenne d'un cordon, il faut ensuite sélectionner manuellement un plan vertical (plan X,Z) situé au centre du cordon qui nous intéresse, de manière à extraire sur une coupe longitudinale du cordon les écarts entre référence et pièce scannée.

La figure 2.18 montre les écarts selon l'axe Z entre la pièce scannée et la référence, dans une coupe longitudinale choisie au centre d'un cordon. L'un des avantages de cet outil est qu'il fournit très rapidement des valeurs de hauteur en tout point de la section longitudinale, mais aussi les valeurs moyenne, maximale, et l'écart-type, qui sont des données importantes pour évaluer la régularité et la précision des dépôts. En revanche, le résultat dépend du positionnement manuel de la section longitudinale étudiée, qui n'est pas forcément optimal pour être représentatif de la hauteur de cordon.

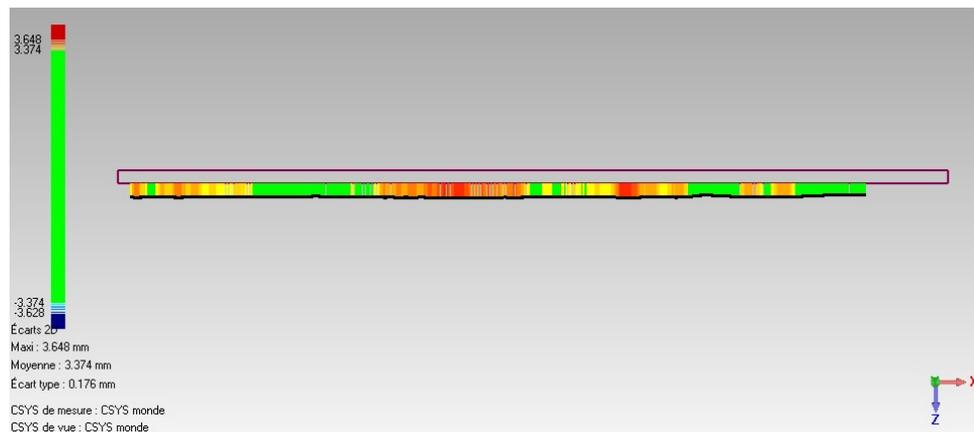


Figure 2.18 : Écarts selon l'axe Z entre la pièce scannée et la référence, dans la coupe longitudinale du cordon sélectionnée

Une méthodologie identique a été employée pour la mesure de la hauteur de murs multicordons.

La méthodologie développée pour mesurer la largeur et l'angle des cordons est plus longue, car elle ne peut s'appuyer sur les mesures semi-automatiques permises par le logiciel. Les mesures doivent en effet être effectuées dans ce cas sur des sections transversales de la pièce, et les écarts mesurés par rapport à la référence selon l'axe Z ne sont pas d'une grande utilité. Pour chaque dépôt étudié, 15 sections transversales sont extraites dans la partie centrale des pièces scannées (Figure 2.19). Les mesures de largeur et d'angle sont ensuite effectuées manuellement, grâce aux outils de mesures géométriques disponibles (Figure 2.20). Des largeurs moyennes et angles moyens, ainsi que des écarts-types, peuvent aussi être calculés à partir de ces 15 mesures.

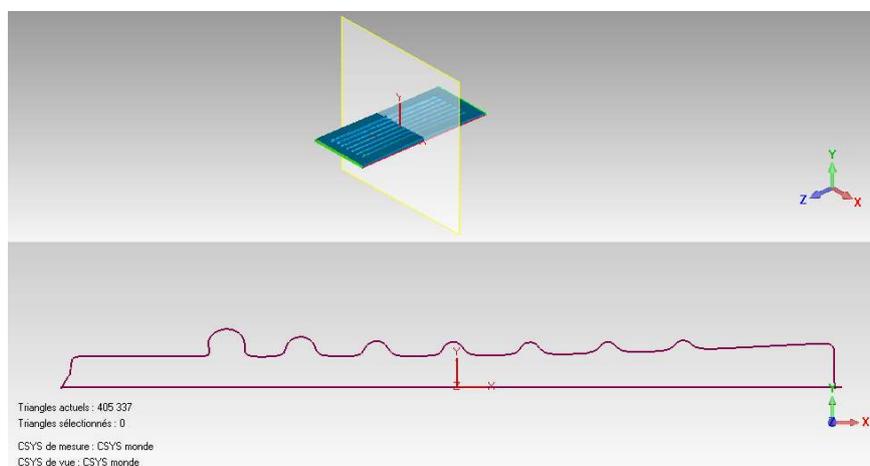


Figure 2.19 : Sélection des sections transversales pour la mesure des largeurs et angles de raccordement des cordons

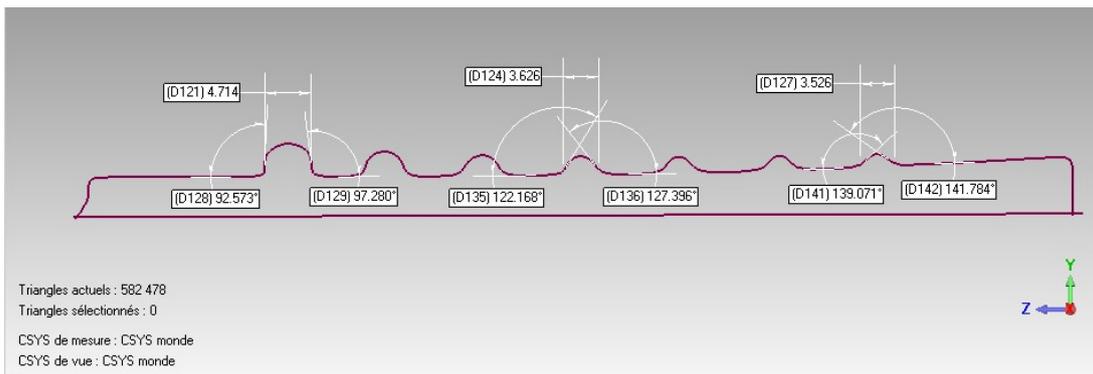


Figure 2.20 : Mesure des largeurs et angles de contact des cordons dans l'une des sections transversales sélectionnées

La méthodologie développée pour mesurer la largeur des murs est différente de celle retenue pour les dépôts mono-cordons. L'une des surfaces verticales du mur est choisie comme référence, en ne retenant que la zone centrale des murs, pour ne pas prendre en compte les défauts géométriques souvent rencontrés aux extrémités des murs (Figure 2.21). On compare ensuite l'écart selon l'axe Y entre cette surface de référence et la surface opposée, ce qui donne accès à la largeur du mur en chaque point (Figure 2.22). On peut aussi en déduire de manière automatique la valeur moyenne de la largeur, la valeur maximale, et l'écart-type.

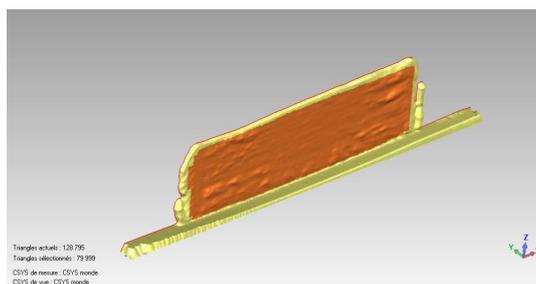


Figure 2.21 : Choix de la surface de référence pour la mesure de largeur des murs

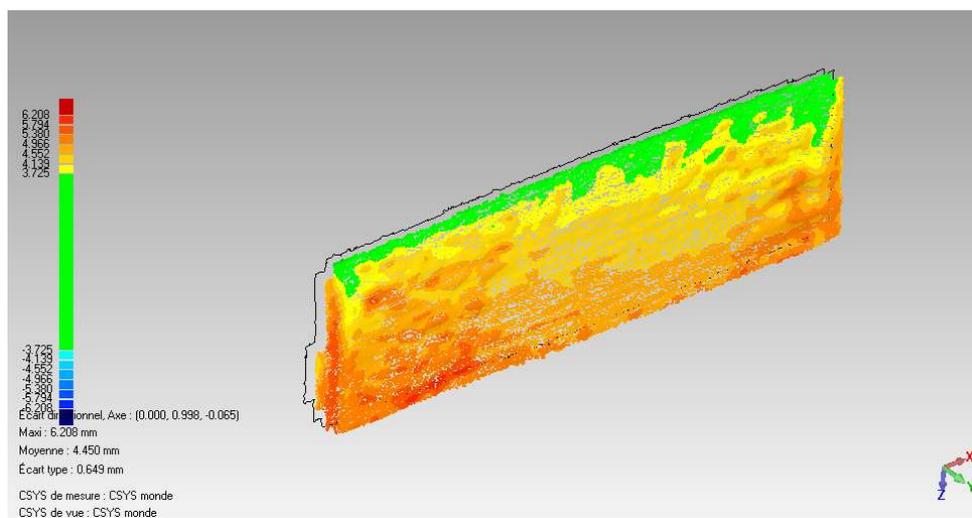


Figure 2.22 : Largeur de mur aux différents points obtenue par mesure des écarts selon l'axe Y entre les deux faces du mur

Le volume des dépôts peut aussi être calculé automatiquement à partir des fichiers STL des objets numérisés grâce au logiciel Geomagic. Pour cela, le fichier STL doit être fermé, c'est-à-dire qu'il doit avoir été « réparé » si le fichier initial présentait des « trous ». Afin de ne mesurer que le volume de métal déposé, il faut délimiter manuellement la zone de l'objet numérisé dont on veut extraire le volume (Figure 2.23).

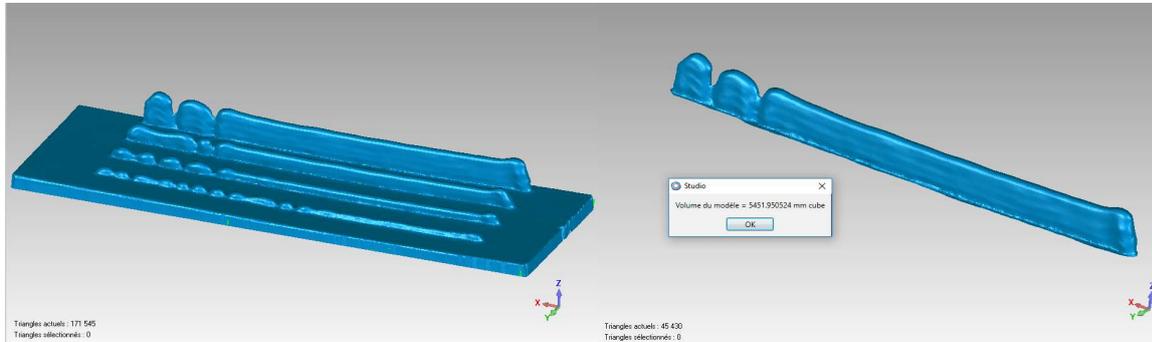


Figure 2.23 : Sélection d'un cordon à partie du fichier STL et calcul automatique de son volume par le logiciel Geomagic

Afin de valider les résultats fournis par le logiciel Geomagic, nous l'avons testé sur une pièce de géométrie simple, dont on a pu estimer le volume à partir d'approximations géométriques (Figure 2.24).

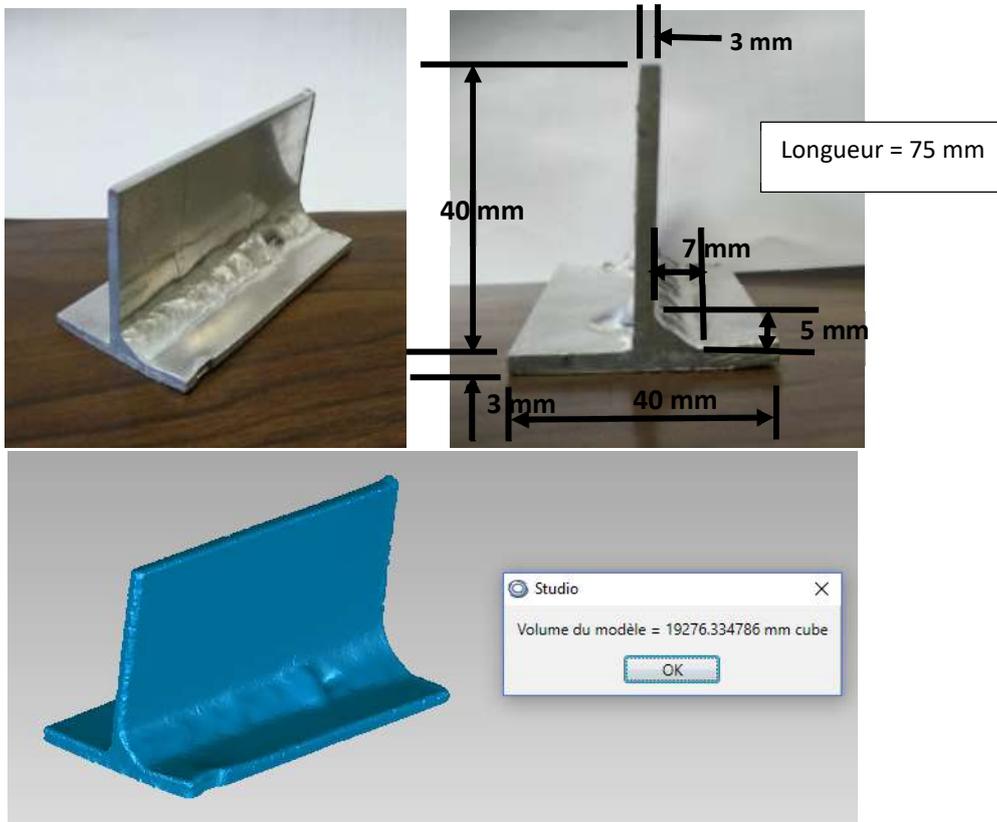


Figure 2.24 : Géométrie de l'éprouvette utilisée pour la validation de la méthode de calcul de volume par le logiciel Geomagic, et image numérisée de l'éprouvette

Tableau 2.6 : Comparaison des volumes calculés par Geomagic et par approximation géométrique

Volume calculé par approximation géométrique (mm ³)	Volume calculé par Geomagic (mm ³)
19312,5	19276,3

Le tableau 2.6 montre que le volume calculé à l'aide de l'application Geomagic est très proche du volume calculé par approximation géométrique, avec une différence de seulement 0,19%.

2.3.3 Méthode de mesure numérique

La méthode graphique, qui se base sur l'utilisation des outils déjà disponibles de traitement des fichiers STL, impose cependant un prétraitement des fichiers, et des repérages manuels des plans à étudier pour en extraire les données recherchées, qui induisent nécessairement des imprécisions. Utilisé de plus au départ comme un moyen rapide d'accéder aux mesures recherchées, il n'a finalement pas atteint son objectif pour mesurer en particulier la largeur et l'angle de contact des mono-cordons, qui nécessitent de définir manuellement, dans les diverses coupes transversales des cordons extraites, chaque mesure à réaliser.

Pour remédier à ces défauts, nous avons donc développé une seconde méthode, basée sur un traitement totalement automatisé des fichiers numérisés à partir du scanner, à l'aide d'un programme en langage Python, tirant ainsi bénéfice des nombreuses bibliothèques logiciels existantes. Nous avons en particulier utilisé pour développer ce programme la bibliothèque VTK [106], qui rassemble de nombreux outils dédiés à la visualisation de données 2D et 3D et au traitement d'image.

Le programme 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 (15 au minimum), fixé en fonction des dimensions du cordon ou du mur à étudier. Chaque coupe transversale est alors constituée d'un ensemble de points décrivant le contour du cordon, qui sont traités afin de calculer les valeurs de la hauteur dans chaque coupe, puis les valeurs moyennes et les écarts type calculés sur l'ensemble des coupes d'un même cordon ou mur.

La hauteur de la couche dans la coupe transversale étudiée est estimée par la valeur la plus élevée de la coordonnée selon l'axe Z des points du contour extraits à partir du fichier STL (Figure 2.25). Les valeurs relevées dans les différentes coupes transversales sont enregistrées, puis la moyenne et l'écart type sont calculés.

La mesure de la largeur est quant à elle effectuée à partir de coupes longitudinales du cordon, selon un plan parallèle à la surface du substrat. Cinq coupes sont ici retenues, situées à des distances de la surface du substrat comprises entre 0,1 et 0,5 mm, et les coordonnées des points délimitant le contour de ces sections sont extraites (Figure 2.26). A partir de ces coupes longitudinales, un pourcentage (par exemple 10% = 1,5 cm, quand le cordon est d'une longueur de 15 cm) des points situés aux extrémités sont éliminés, afin de ne pas prendre en compte les défauts géométriques souvent observés en début et fin de cordon.

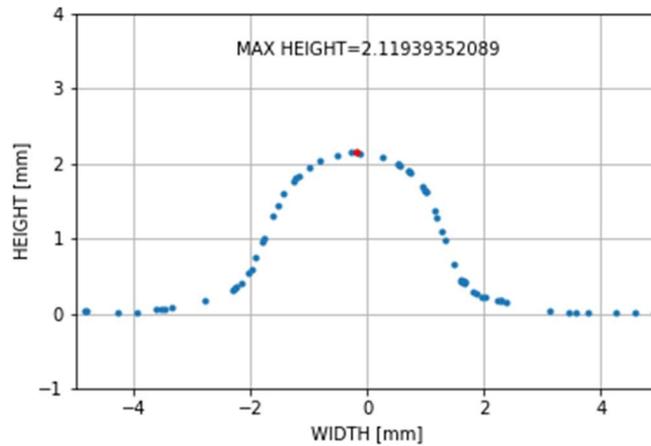


Figure 2.25 : Représentation du contour du cordon dans une coupe transversale, et repérage du point (en rouge) donnant la hauteur du cordon

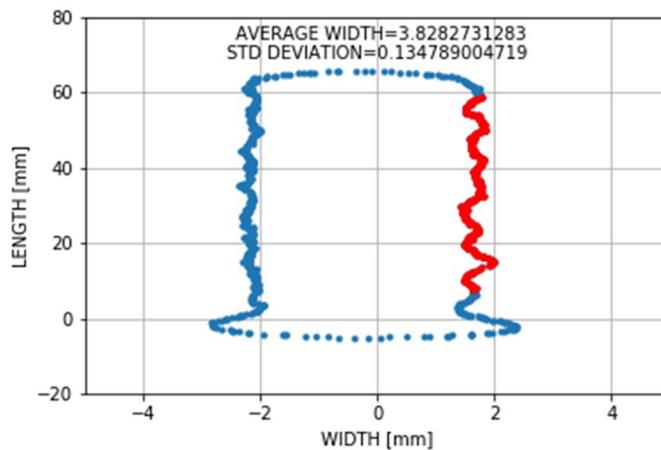


Figure 2.26 : Représentation du contour du cordon dans une coupe longitudinale parallèle au plan du substrat, et séparation des points du contour en deux catégories pour la mesure de largeur

Puis les points sont séparés 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 2.27). Toutes les distances calculées entre ces points sont stockées pour chaque coupe, et la valeur moyenne ainsi que l'écart-type sont calculés, pour chacune des coupes mais aussi pour l'ensemble des cinq coupes d'un même cordon.

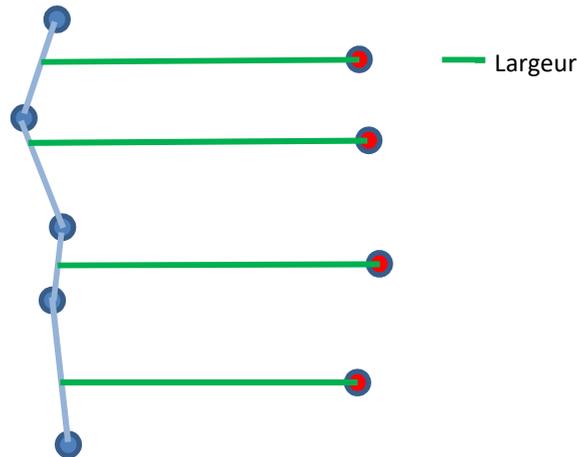


Figure 2.27 : Description de la méthode de mesure de la largeur des cordons aux différents points de la coupe longitudinale

Le volume peut être aussi calculé en utilisant des bibliothèques python développées pour obtenir les propriétés d'objets 3D modélisés sous la forme de fichiers STL. Comme pour la méthode graphique, l'objet à analyser doit d'abord être isolé, en sélectionnant manuellement la zone qui nous intéresse, puis le volume est automatiquement calculé grâce à une routine Python. Les résultats obtenus avec cette méthode, testés sur un mur, sont extrêmement proches de ceux obtenus avec Geomagic (Tableau 2.7). La qualité des résultats dépend cependant de la sélection 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. Pour des raisons pratiques, c'est le logiciel Geomagic qui a été utilisé par la suite pour estimer le volume de matière déposée après chaque dépôt.

Tableau 2.7 : Comparaison des volumes calculés avec le logiciel Geomagic et le script Python développé, pour un mur constitué de 16 couches superposées

Volume calculé avec Geomagic (mm ³)	Volume calculé avec le programme Python (mm ³)
5451,950524	5451,950552

2.4 Autres techniques de caractérisation

En plus de l'analyse des signaux électriques caractérisant le transfert de métal avec le procédé CMT et la caractérisation géométrique des dépôts formés, d'autres techniques ont également été employées, pour étudier les caractéristiques du procédé en cours de fonctionnement (caméra rapide), ou pour caractériser les propriétés microstructurales de la matière obtenue.

2.4.1. Caméra rapide

La visualisation du transfert de métal est d'une grande importance si l'on veut pouvoir étudier l'effet des paramètres du procédé sur les mécanismes de transfert. Pour pouvoir étudier ces mécanismes de transfert, une caméra rapide PHANTOM ir300, qui permet d'obtenir des images dans le proche infrarouge, dans un spectre de longueur d'ondes allant de 600 à 1100 nm environ, a été utilisée. La vitesse d'acquisition de la caméra peut atteindre 10 000 images par seconde pour une résolution de 256x256 pixels, et peut même monter beaucoup plus haut pour des résolutions moindres. Nous avons choisi une fréquence d'acquisition de la caméra plus faible, de 2200 images par seconde, avec une résolution d'image de 256x128 pixels, caractéristiques

suffisantes pour l'observation du transfert de matière. 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 2.28).

Pour pouvoir observer avec un bon contraste le métal liquide formé à l'extrémité du fil d'apport et son transfert sur le matériau de base, il est nécessaire de s'affranchir du rayonnement intense de l'arc électrique. Pour y parvenir, la technique de l'ombroscopie a été employée. Le fil d'apport est éclairé par l'arrière, dans l'axe de la caméra, par une lampe halogène de 250 W (Figure 2.28). 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. 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.

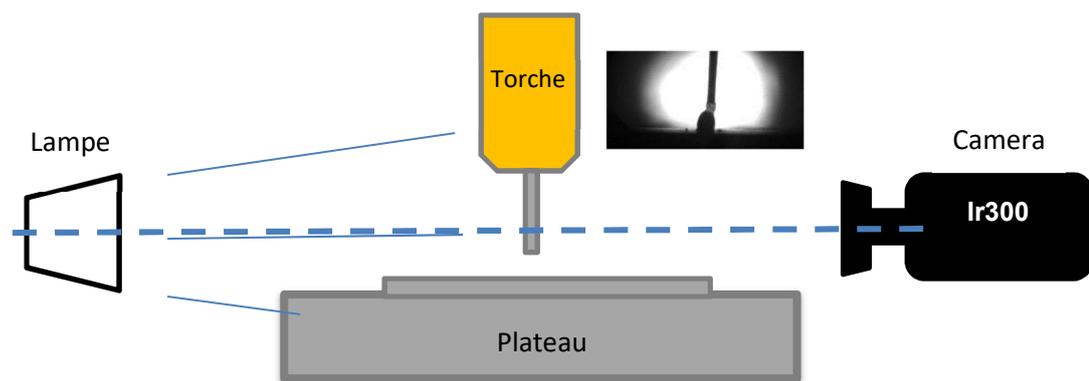


Figure 2.28 : Principe de la technique d'ombroscopie appliquée à l'observation du transfert en soudage à l'arc

2.4.2 Caractérisation micrographique

Afin de pouvoir observer la microstructure des cordons et murs obtenus, les échantillons ont été découpés par jet d'eau, afin d'obtenir des surfaces montrant les coupes transversales des dépôts. Cette méthode de découpe permet d'éviter tout échauffement ou déformation plastique qui pourrait modifier la microstructure du matériau. Les échantillons sont ensuite polis manuellement en utilisant d'abord des papiers abrasifs au carbure de silicium de granulométrie 180, 300, 600, 800 et 1200 avec une lubrification à l'eau, puis une pâte diamantée (6, 3, 1 µm) en finition pour obtenir un poli miroir. Afin de révéler la microstructure de l'aluminium, la surface polie subit finalement une attaque chimique au réactif de Keller (1% HF, 1,5% HCl, 2,5% HNO₃, H₂O).

Les observations macrographiques ont été réalisées avec un microscope sur colonne LEICA Z16 APO 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 équipé lui aussi d'une caméra permettant l'acquisition et le stockage informatique des images.

2.5 Conclusion

Ce second chapitre a permis de décrire le banc d'essai développé pour fabriquer des pièces métalliques par la technologie de fusion à l'arc électrique de fil métallique. Les caractéristiques du procédé de soudage utilisé comme source de fusion et de dépôt de la matière métallique fondue, le procédé CMT, dérivé du procédé de soudage à l'arc GMAW (Gas Metal Arc Welding), ont aussi été détaillées. Enfin, les techniques de caractérisation du procédé, qui

permettront d'étudier sa stabilité et d'optimiser ses paramètres, ainsi que les techniques et méthodologies de caractérisation des dépôts, ont été présentées.

Les prochains chapitres sont consacrés à l'étude de l'influence des paramètres du procédé CMT et de la stratégie de fabrication sur les caractéristiques des transferts de matière et de chaleur au cours du dépôt de mono-cordons ou de multi-cordons, et sur les caractéristiques finales, principalement géométriques, des dépôts. Le chapitre suivant présente les premiers essais de dépôts mono-cordon réalisés avec les paramètres standard préprogrammés dans les courbes synergiques du procédé CMT.

Chapitre 3. Etude des dépôts réalisés avec les paramètres standards du procédé CMT

Afin d'étudier les caractéristiques géométriques des cordons déposés à l'aide du procédé CMT décrit dans le précédent chapitre, des essais sont réalisés en conservant dans un premier temps les paramètres « standards » préprogrammés par le constructeur dans le générateur de soudage. Les essais ont été réalisés à l'aide du banc d'essai présenté dans le chapitre précédent, en utilisant un fil d'alliage d'aluminium Al-5Si de diamètre 1,2 mm sur une tôle « support » en aluminium pur (nuance 1050) d'épaisseur 3 mm.

3.1 Paramètres procédé

L'optimisation du cycle de soudage CMT pour obtenir une fusion du fil d'apport et un dépôt régulier de matière nécessite le réglage d'une quinzaine de paramètres différents (cf. chapitre 2). Nous avons choisi dans cette première partie d'utiliser la « synergie » CMT C0876 programmée dans le générateur, qui fournit un jeu de paramètres adaptés en fonction de la vitesse de dépôt souhaitée. Cette synergie a été établie pour un fil d'alliage d'aluminium Al5Si (1,2 mm) et un gaz de protection argon pur, comme dans la configuration actuelle. Pour tous les essais réalisés, hormis ceux présentés dans le dernier paragraphe de ce chapitre, la hauteur de la torche était réglée avant chaque essai pour que la distance entre le tube-contact et la surface de la tôle soit égale à 15 mm. En début d'essai, avant l'amorçage de l'arc électrique, la longueur de « fil libre » depuis le tube-contact était réglée à environ 12 mm (Figure 3.1).

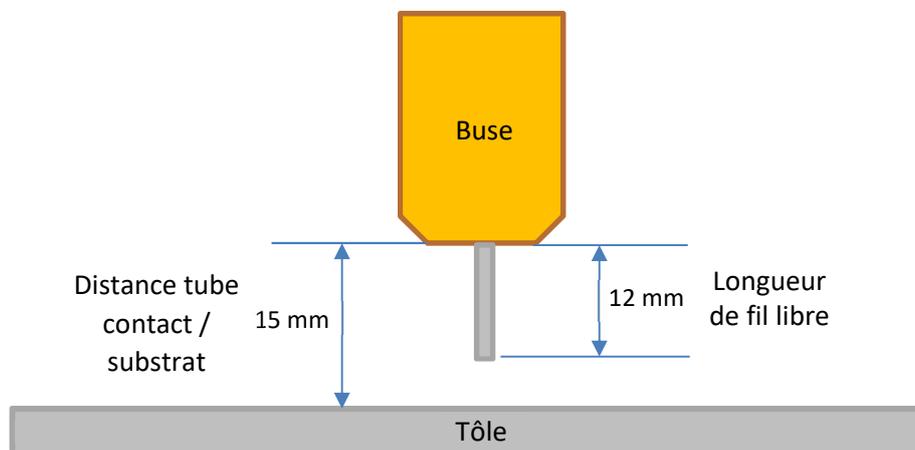


Figure 3.1 Distance tube-contact / pièce et longueur de fil libre en début d'essai

La synergie CMT C0876 est définie par 13 points de fonctionnement associant chacun des valeurs spécifiques des 15 paramètres du cycle CMT. Les valeurs de ces 15 paramètres sont rassemblées dans le tableau 3.1 ci-dessous.

Tableau 3.1 Valeurs des paramètres du cycle CMT associées aux points de fonctionnement de la synergie

Point de fonctionnement		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
Paramètres d'amorçage														
Vd ignition	m/min	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	-2	-2	-2	-2
I ignition	A	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
t ignition	ms	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
U hotstart	V	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
t hotstart	ms	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Paramètres de soudage														
I_sc wait	A	15	15	25	50	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Vd_sc wait	m/min	20	20	20	20	25	35	37,5	40	40	42,5	45	45	45
I_sc2	A	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
d boostup	A/ms	1000	1000	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
tau boostup	ms	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,34	0,6	0,6	0,6
I_boost	A	15	30	150	150	150	150	135	120	160	165	170	250	250
t I boost	ms	50	15	1	2	2	5	9,5	14	10	19,99	30	30	30
d_boostdown	A/ms	1000	1000	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Paramètres de fin du soudage														
I_drop_melt	A	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
t_burnback	ms	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ces 13 points de fonctionnement fournissent des puissances moyennes croissantes, et sont associés à des vitesses de dépôt, ou de dévidage du fil, croissantes, comme le montre le tableau 3.2. Notons que les valeurs moyennes données dans le tableau 3.2 sont indicatives, et que la puissance réelle ou le taux de dépôt réel peuvent être un peu différents de ces valeurs selon les conditions d'essai, étant donné la complexité des phénomènes physiques intervenant lors du transfert de matière avec le procédé CMT.

Tableau 3.2: Valeurs indicatives des intensités, tensions et vitesses de dévidage associées aux points de fonctionnement de la synergie C0876

Point de fonctionnement		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
Intensité moyenne	A	16	26	36	59	76	81	88,5	96	110	121	132	152	180
Tension moyenne	V	10	10,7	10,7	11,5	12,3	12,5	12,6	12,7	13,3	14,6	15,9	16,8	17
Vitesse moyenne de dévidage	m/min	1,2	1,7	2,4	3,7	4,2	4,9	5,1	5,3	5,4	5,8	6,2	6,7	8,1

3.2 Caractéristiques des cordons déposés

3.2.1 Aspect général des cordons déposés

Les premiers dépôts ont été réalisés avec chacun des treize différents points de fonctionnement de la synergie. Le but était de déterminer quels points de la synergie permettent d'obtenir un

dépôt (ou cordon) régulier avec le fil d'alliage d'aluminium retenu, pour différentes vitesses d'avance. Pour ces premiers essais, les vitesses de déplacement de la table ont varié entre 300 mm/min et 3300 mm/min. Le tableau 3.3 synthétise les résultats obtenus.

Tableau 3.3: Observations générales sur les premiers dépôts pour les différents points de fonctionnement

Point de fonctionnement	Remarques et observations sur les dépôts
P1 à P3	La fusion du fil n'est pas possible par manque d'énergie, il n'y a pas de dépôt
P4	Un dépôt de matière irrégulier, voire discontinu, se forme
P5 à P7	Les cordons sont réguliers (Figure 2). Pour le point 5, les cordons deviennent moins réguliers pour les vitesses supérieures à 2100 mm/min.
P8 à P10	Les cordons sont assez réguliers, mais très étalés, surtout pour les plus faibles vitesses (inférieures à 600 mm/min), où la tôle est parfois percée, et les cordons moins réguliers
P11 à P13	Ces points de synergie n'ont pas été utilisés suite aux résultats obtenus avec le point de fonctionnement 10

La figure 3.2 montre l'aspect général des cordons obtenus avec les réglages correspondant aux points de fonctionnement 5 à 8, et pour des vitesses d'avance comprises entre 300 et 3300 mm/min. Les dépôts sont globalement plus larges lorsque l'on passe des points de fonctionnement 5 à 8, ce qui est bien cohérent avec le fait que les puissances moyennes et les taux de dépôt sont sensé être plus élevés lorsque l'on passe à des points de la synergie supérieurs (Tableau 3.2).

On peut aussi observer que le points 5, qui est associé à la plus faible énergie, donne des cordons irréguliers lorsque la vitesse d'avance dépasse 2100 mm/min, l'énergie et/ou la quantité de métal déposé n'étant pas suffisants pour former un cordon continu. Des essais avec « préchauffage » préalable de la tôle, en maintenant la torche statique pendant deux secondes une fois l'arc amorcé avant de démarrer la translation à des vitesses d'avance supérieures à 2500 mm/min ont toutefois permis d'améliorer la régularité des cordons (Figure 3.3), montrant que la température de la tôle support joue un grand rôle sur le mouillage du métal déposé. Ces essais s'accompagnent cependant de la formation d'un « amas » important de matière déposée au début du cordon, dû au transfert de matière en position statique pendant les deux premières secondes de l'essai, qui constitue un défaut géométrique pouvant gêner la fabrication lors de l'empilement de plusieurs couches.

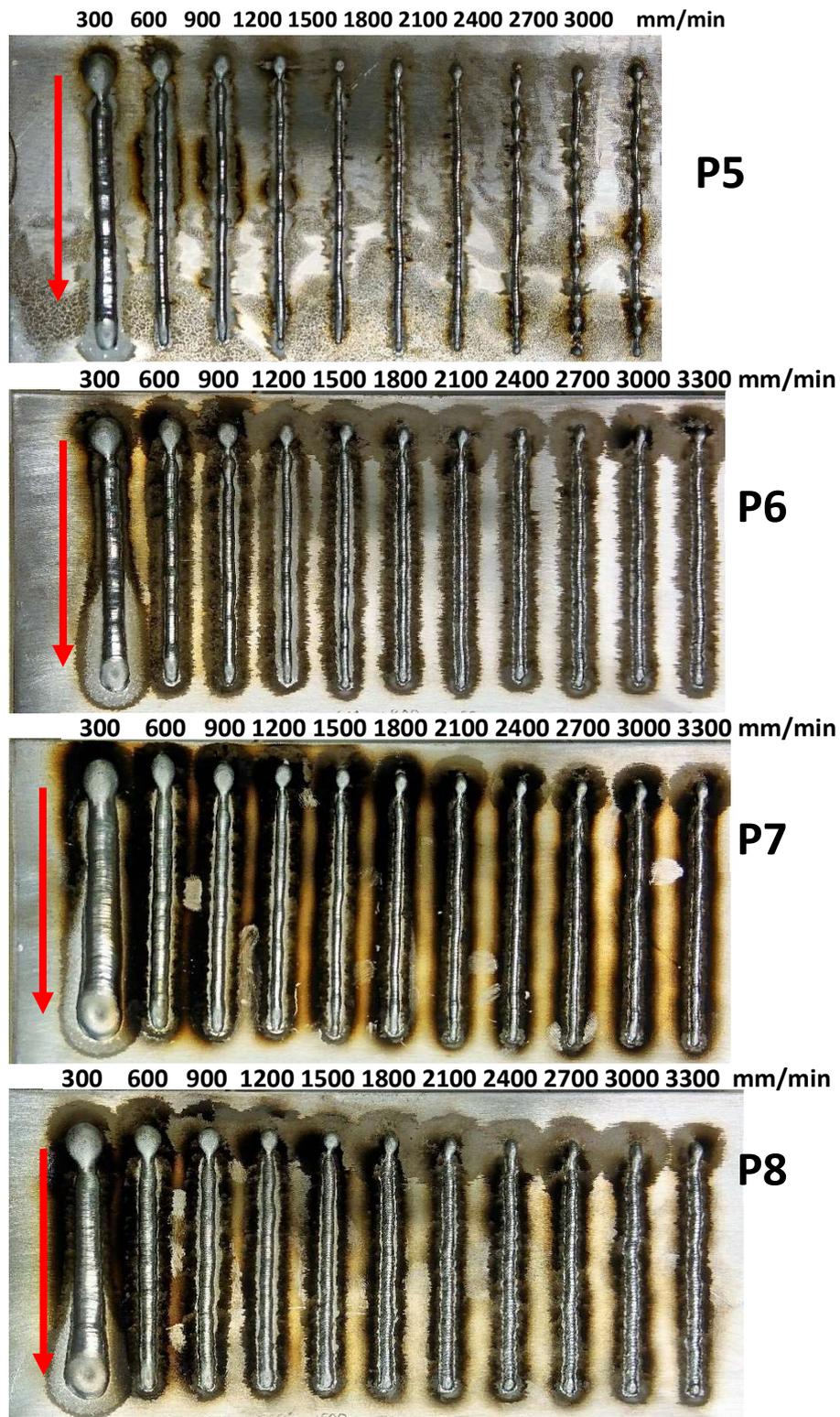


Figure 3.2 Aspect général des dépôts pour différents points de fonctionnement et différentes vitesses (cordons de 70 mm)

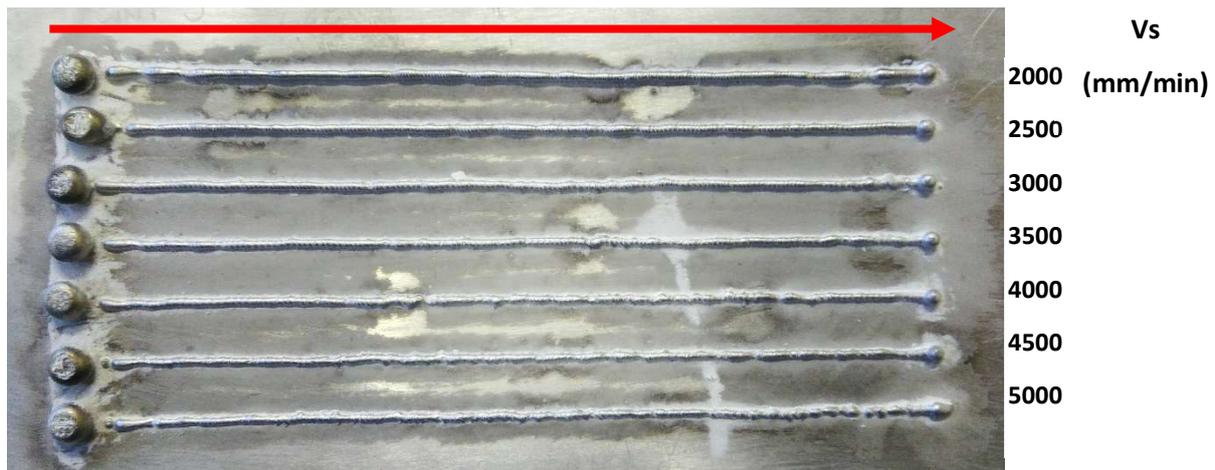


Figure 3.3 Aspect des cordons déposés avec le point de fonctionnement 5 en « préchauffant » la tôle grâce à un maintien statique de la torche pendant 2 secondes en début d'essai

Lorsque les vitesses sont trop lentes au contraire, la largeur de cordon augmente progressivement au cours du dépôt, sous l'effet de l'accumulation de chaleur (Figure 3.4a). La zone de fusion dans la tôle support sous le cordon s'étend alors, pouvant conduire à un affaissement en face envers lorsque la zone de fusion « pénètre » jusqu'à la face opposée de la tôle (Figure 3.4b). Ce phénomène apparaît pour des vitesses d'avance inférieures à 300 mm/min pour les points 5 à 7, et même jusqu'à 600 mm/min, voire 1200 mm/min pour les points 8 à 10.

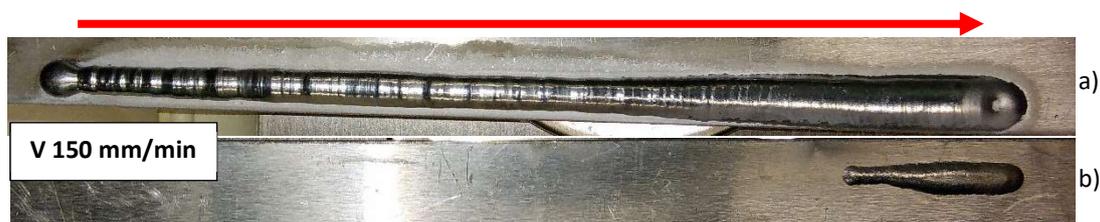


Figure 3.4 Aspect du cordon lorsque la vitesse d'avance est trop faible, produisant un affaissement en face envers de la tôle support (point de fonctionnement 5), (a) face endroit, (b) face envers

Ces premières observations qualitatives ont montré que les points de fonctionnement 5 à 10 de la synergie permettent de réaliser un dépôt de matière continu pour différentes vitesses de déplacement. Par la suite, nous avons quantifié les dimensions des dépôts obtenus avec ces différents points de fonctionnement, en faisant varier pour chacun la vitesse sur toute la gamme dans laquelle les cordons restent assez réguliers (vitesses suffisamment élevées pour éviter l'élargissement des cordons et l'affaissement de la tôle, et suffisamment lentes pour maintenir des cordons continus). Le tableau 3.4 rassemble les plages de vitesse correspondantes.

Tableau 3.4 : Gammes de vitesses retenues à l'issue des premiers essais

Point de fonctionnement	Intervalle des vitesses qui a permis d'obtenir un dépôt régulier (mm/min)
P5	300-2400 2500-5000 : la tôle est préchauffée par un transfert statique de matière d'une durée de 2 secondes avant déplacement
P6	300-2400
P7	600-2700

P8	600-2700
P9	600-2400
P10	600-2400

3.2.2 Caractéristiques géométriques des cordons

Sur chaque cordon déposé, le contour du dépôt est extrait à l'aide de l'application Geomagic Qualify (cf. chapitre 2), puis la largeur moyenne L , la hauteur moyenne H et l'angle de contact moyen A sont calculés, ainsi que les écarts-types caractérisant la régularité des dépôts (Figure 3.5). Les figures 3.6 à 3.8 montrent les résultats obtenus.

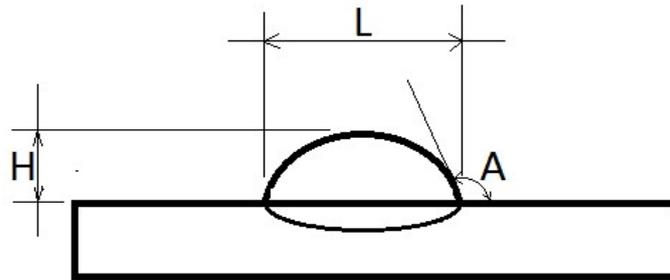


Figure 3.5 Caractéristiques géométriques mesurées sur les cordons : hauteur H , largeur L et angle de contact A

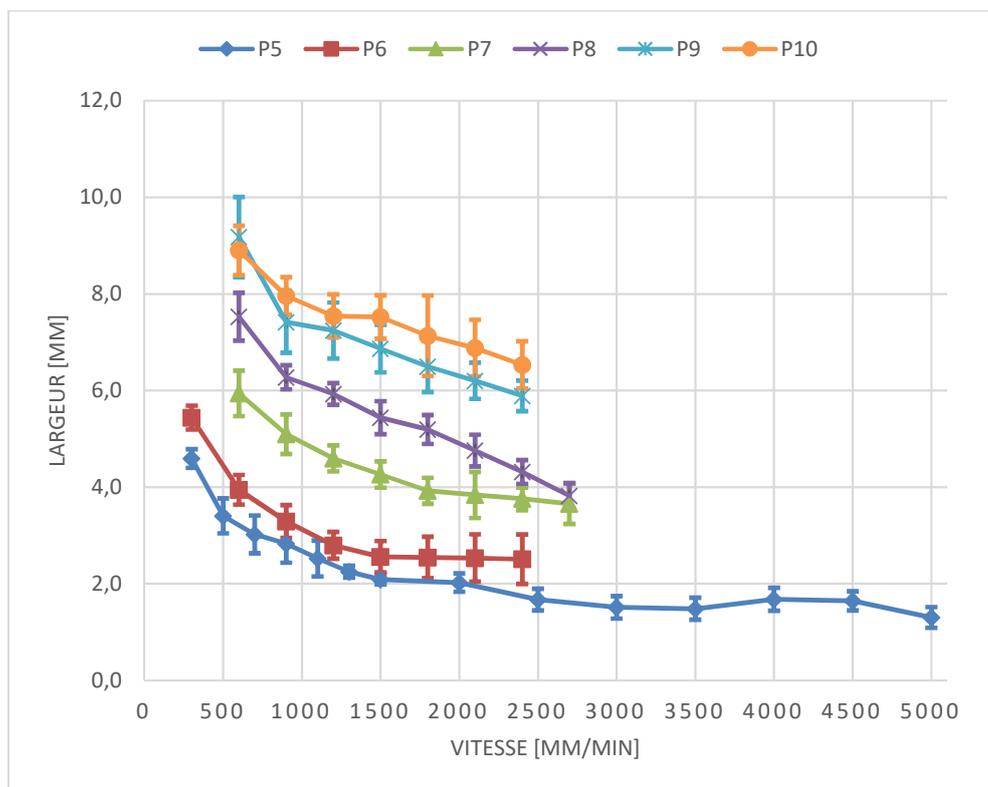


Figure 3.6 Largeur moyenne des cordons pour différentes vitesses de déplacement et différents points de fonctionnement

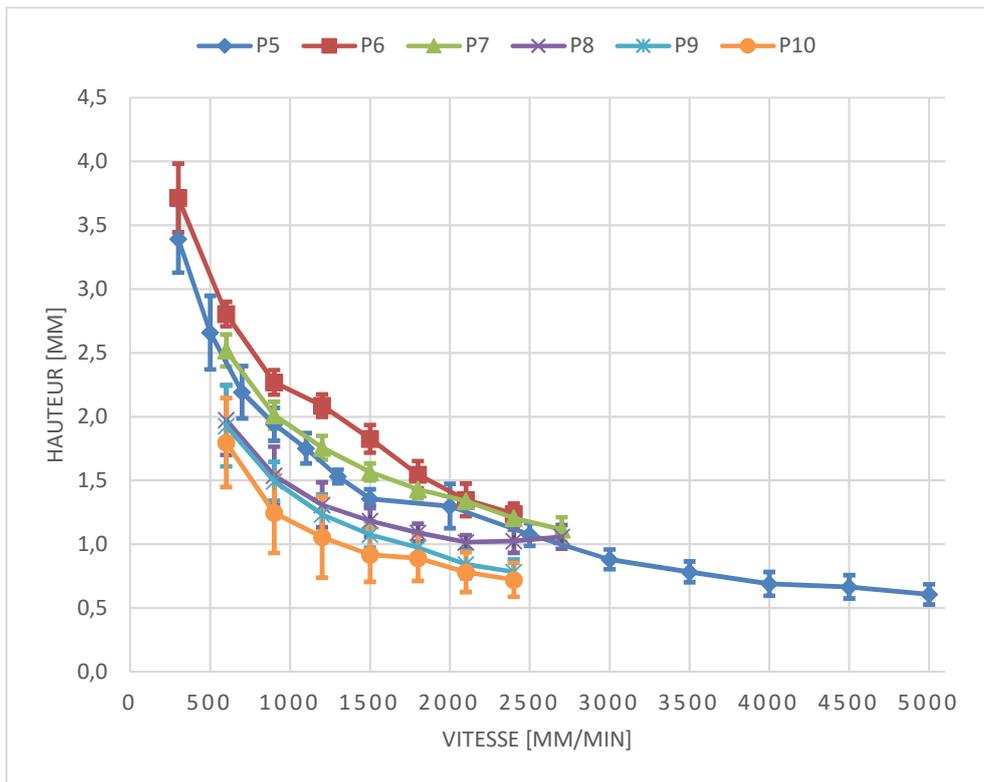


Figure 3.7 Hauteur moyenne des cordons pour différentes vitesses de déplacement et différents points de fonctionnement

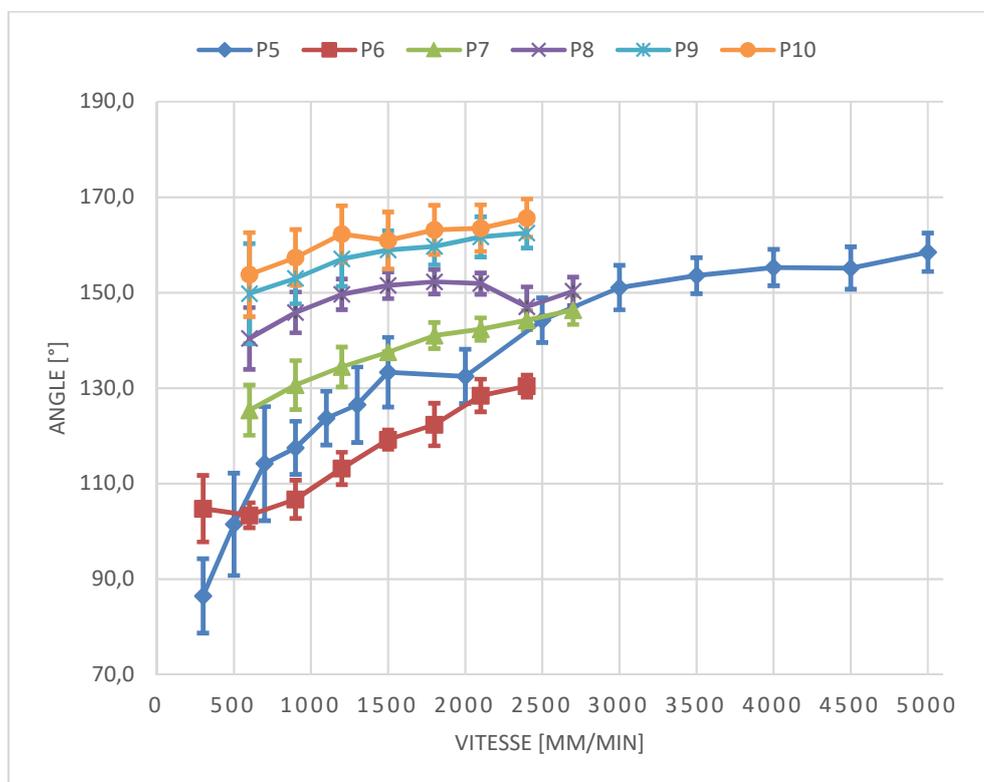


Figure 3.8 Angles de contact des cordons pour différentes vitesses de déplacement et différents points de fonctionnement

On constate que pour une vitesse de déplacement fixée, la largeur du cordon augmente lorsqu'on passe du point de fonctionnement 5 au point 10, tandis que la hauteur du cordon a tendance à diminuer. En passant du point 5 au 10, on augmente la puissance moyenne et donc l'énergie de l'arc électrique, ce qui peut produire un échauffement plus important de la tôle support, et un métal déposé plus chaud, présentant donc une plus faible viscosité. Il a alors tendance à s'étaler, comme le montre l'augmentation de l'angle de contact. Notons que les cordons obtenus avec le point 5 présentent un comportement atypique, puisque malgré une puissance moyenne censée être plus faible, ils présentent une hauteur plus faible et un meilleur mouillage (angle de contact plus élevé) que le point 6.

Si on fixe le point de fonctionnement et qu'on augmente la vitesse de déplacement, on diminue l'énergie de soudage linéique correspondant au rapport entre la puissance et la vitesse d'avance, qui caractérise la quantité d'énergie déposée par unité de longueur de cordon. La tôle qui reçoit le dépôt est alors moins échauffée. On diminue de la même façon la quantité de matière déposée par unité de longueur de cordon. Comme attendu, on remarque pour tous les points de fonctionnement que la hauteur et la largeur du dépôt diminuent lorsque la vitesse augmente. Cependant, si la hauteur continue de diminuer même aux plus fortes vitesses, la largeur quant à elle tend à se stabiliser à une valeur minimale comprise entre 1,5 et 2,5 mm pour les points 5 et 6.

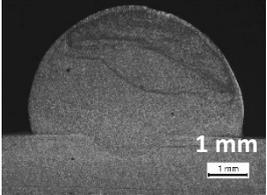
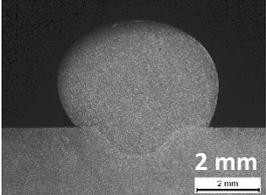
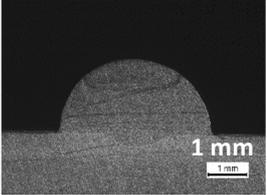
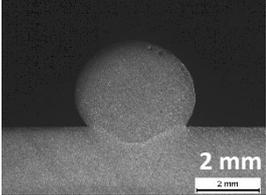
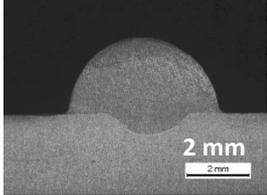
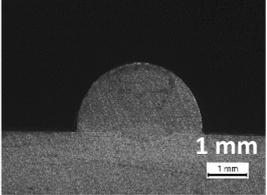
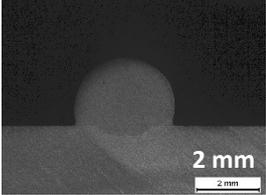
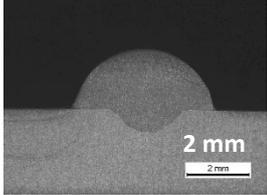
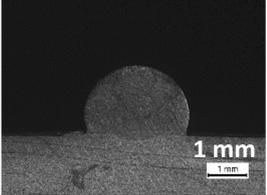
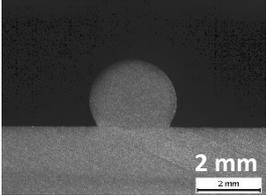
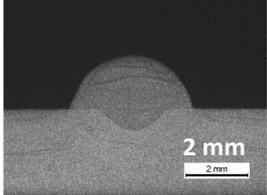
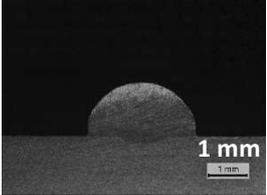
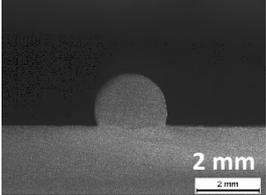
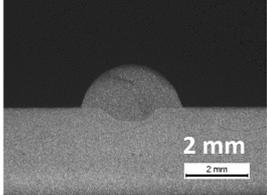
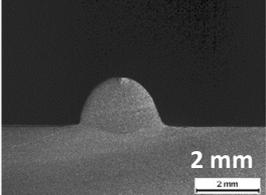
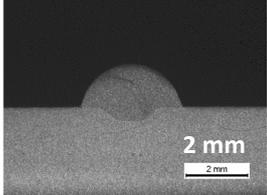
Pour le point 5, on observe aussi une tendance à la stabilisation de la hauteur autour de 1,25 mm entre 1500 mm/min et 2000 mm/min. Si l'on continue d'augmenter la vitesse au-delà de 2400 mm/min, la largeur du cordon devient alors plus irrégulière, et il est nécessaire de maintenir la torche de soudage statique pendant 2 secondes au démarrage pour conserver un cordon régulier. Ce maintien produit un « préchauffage » de la tôle support, et permet alors un meilleur mouillage du métal déposé, ce qui s'accompagne aussi d'une diminution de la hauteur du cordon obtenu avec le point 5 au-delà de 2400 mm/min (Figure 3.7).

D'un point de vue géométrique, les cordons ont une forme régulière, comme le montrent les faibles écarts-types mesurés. Les points 6 et 7 de la synergie présentent les cordons les plus réguliers, alors que les points 9 et surtout 10 donnent les plus fortes fluctuations de largeurs. Pour tous les jeux de paramètres, des vitesses inférieures ou égales à 600 mm/min produisent les cordons les plus larges mais aussi les plus irréguliers, avec les plus forts écarts-types.

La caractérisation géométrique à partir des surfaces scannées des cordons a été complétée par des observations macrographiques sur des coupes transversales des cordons, qui permettent d'observer notamment la pénétration de la zone de fusion dans la tôle substrat. Les résultats sont rassemblés dans les figures 3.9 et 3.10. La figure 3.9 montre que la pénétration est très faible pour les cordons déposés avec les paramètres synergiques des points 5 et 6, et dans une moindre mesure du point 7. La pénétration est particulièrement faible pour le point 6 pour des vitesses supérieures à 600 mm/min, plus faible encore que celle obtenue avec le point 5 pour les mêmes vitesses, ce qui peut expliquer le moins bon mouillage mesuré sur les cordons déposés avec le point 6. Pour les points de fonctionnement 8 à 10 en revanche (Figure 3.10), la pénétration de la zone de fusion dans la tôle support est importante, et atteint même la surface inférieure de la tôle pour le point 9 lorsque la vitesse d'avance est inférieure à 1500 mm/min, et pour le point 10 lorsqu'elle est inférieure à 1800 mm/min.

On peut observer sur la figure 3.9 que les angles de contact sur les coupes transversales des cordons obtenus avec les points 5 et 6 paraissent parfois inférieurs à 90 degrés, alors que les mesures à partir des surfaces scannées donnaient des angles de contact légèrement supérieurs à 90 degrés. Ces différences peuvent provenir des fluctuations observées le long des cordons, les coupes transversales observées n'étant pas toujours représentatives de l'ensemble du cordon. Il

est cependant aussi probable que la méthode employée pour mesurer ces angles à partir des surfaces scannées surestime les angles de contact, lorsque le mouillage est faible. En effet, les zones de contact entre les cordons et le substrat sont alors constituées de surfaces concaves, qui sont difficilement accessibles par la caméra du scanner utilisé. Cela se traduit par la présence de « trous » sur les fichiers scannés, qui sont ensuite réparés par interpolation à partir des surfaces voisines (cf. Chapitre 2). On peut donc penser que les valeurs des angles mesurés à partir des surfaces scannées surestiment les angles de contact, en particulier pour les angles mesurés proches de 90 degrés.

P5		P6		P7	
300		300			
500		600		600	
900		900		900	
1100		1200		1200	
1500		1500		1500	
		1800		1800	

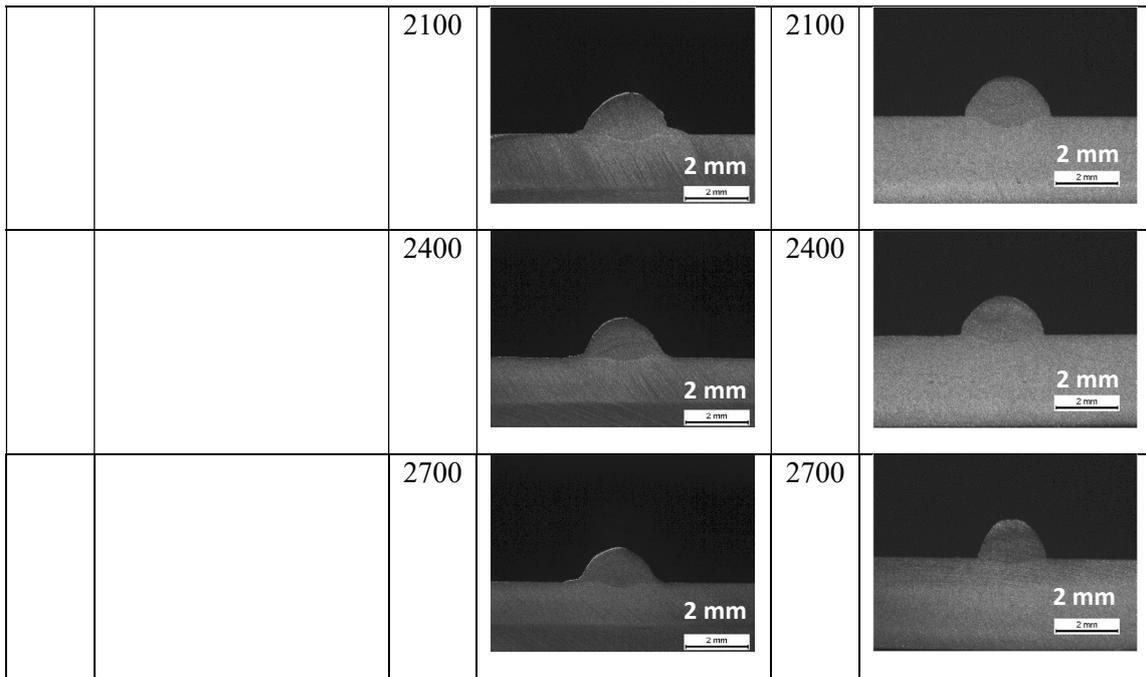
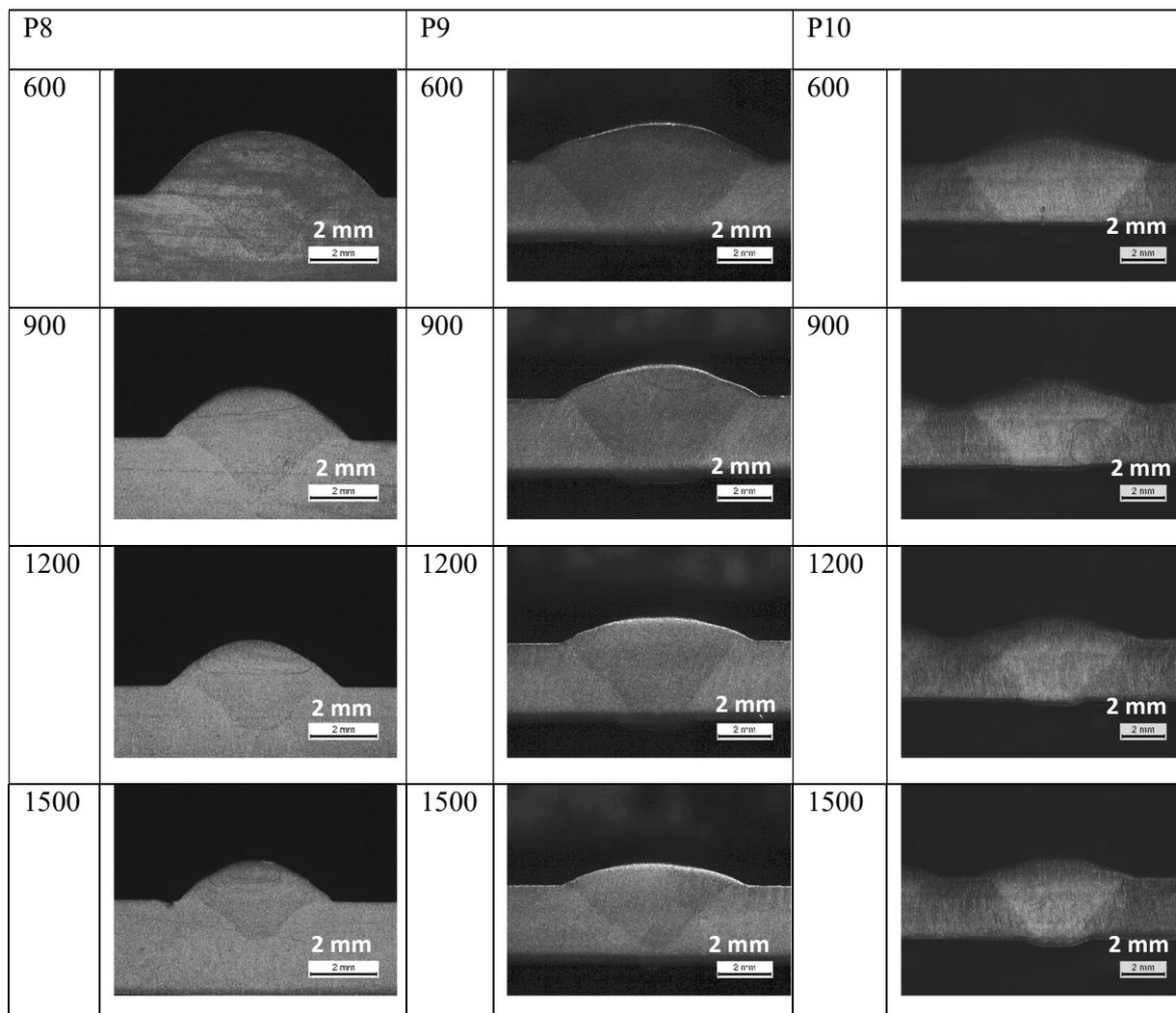


Figure 3.9 Macrographies des coupes transversales des cordons obtenus avec les points de fonctionnement 5, 6 et 7 en fonction de la vitesse d'avance (900 mm/min).



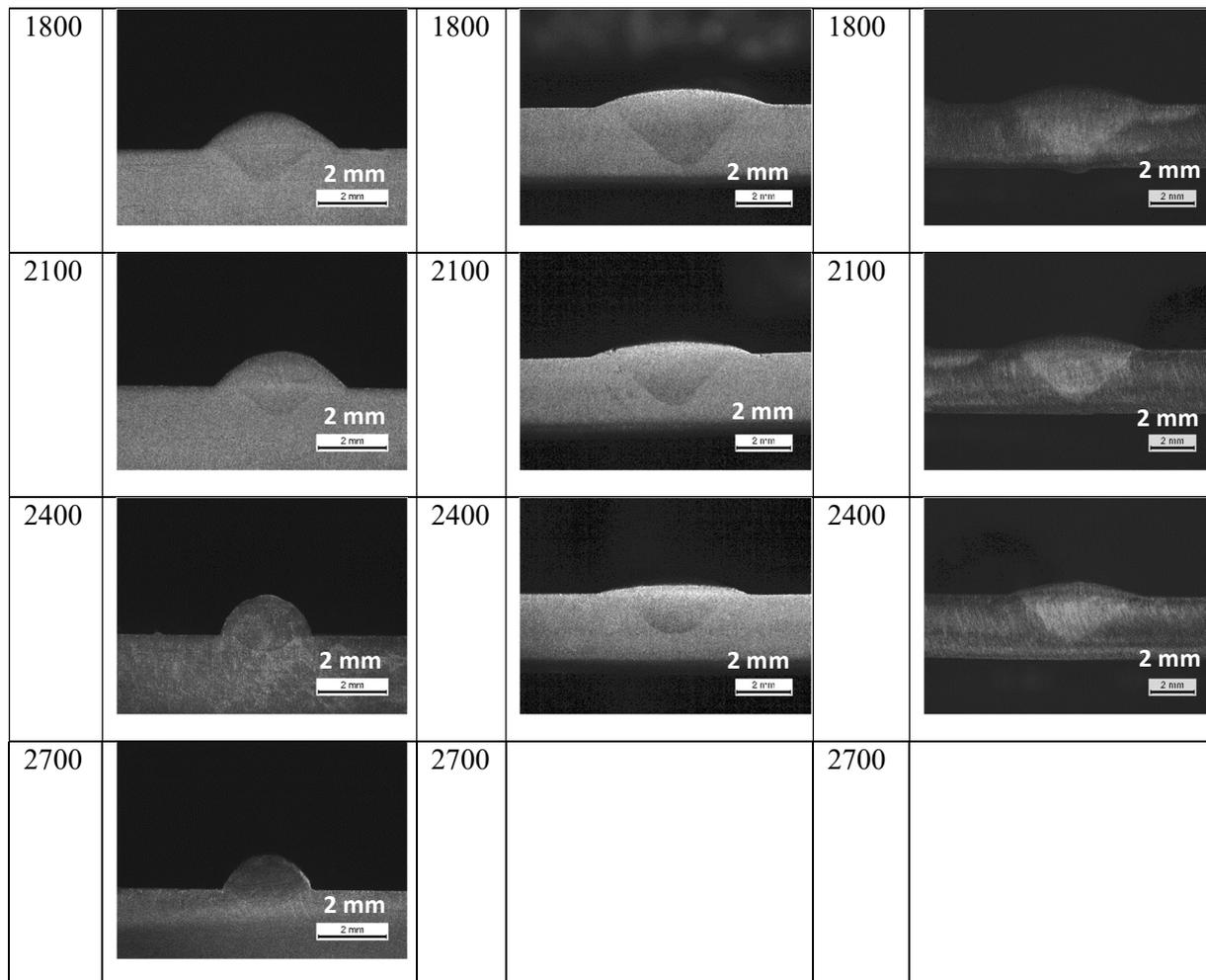


Figure 3.10 Macrographies des coupes transversales des cordons obtenus avec les points de fonctionnement 8, 9 et 10 en fonction de la vitesse d'avance (900 mm/min).

3.2.3 Volume de matière déposé

En plus des caractéristiques morphologiques des différents cordons déposés, les volumes et les masses de matière déposée pour les différentes conditions d'essais sont aussi mesurés. Seuls les points de fonctionnement 5 à 7 de la synergie, qui sont les seuls à donner des cordons de caractéristiques géométriques compatibles avec l'objectif de réalisation de pièces par superposition de dépôts, sont retenus pour la suite. En effet, les points de fonctionnement 8 et au-delà produisent une fusion très importante de la tôle substrat, et des cordons trop étalés. Les figures 3.11 et 3.12 rassemblent les résultats obtenus pour les cordons réalisés avec les différentes conditions retenues. Le volume des cordons est calculé à partir des fichiers scannés des cordons à l'aide de l'application Geomagic (cf. Chapitre 2), et le poids est ensuite calculé en considérant une masse volumique de l'alliage d'aluminium égale à $2,7 \text{ g/cm}^3$.

Le volume déposé diminue bien sûr avec la vitesse d'avance. Comme on pouvait s'y attendre, le volume déposé, pour une même vitesse, est un peu plus important lorsque le numéro du point de fonctionnement de la synergie augmente. Le taux de dépôt moyen, exprimé en gramme de métal déposé par seconde, varie aussi en fonction du point de fonctionnement. Il est cependant très proche pour les points de fonctionnement 6 et 7, pour des vitesses d'avance inférieures à 1500 mm/min. Notons que le taux de dépôt augmente légèrement avec la vitesse d'avance, surtout pour le point 7, l'augmentation de la vitesse de déplacement semblant donc favoriser le dépôt de matière, pour des paramètres de soudage fixés. L'analyse de l'évolution des puissances

et des énergies au cours des cycles CMT peut nous permettre de mieux comprendre ces différences.

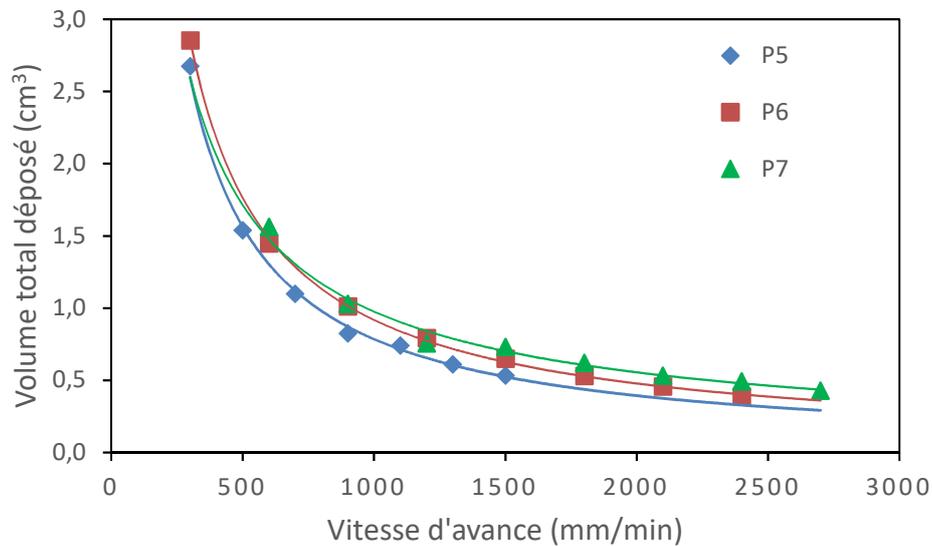


Figure 3.11 Evolution du volume de métal déposé en fonction de la vitesse d'avance et du point de fonctionnement

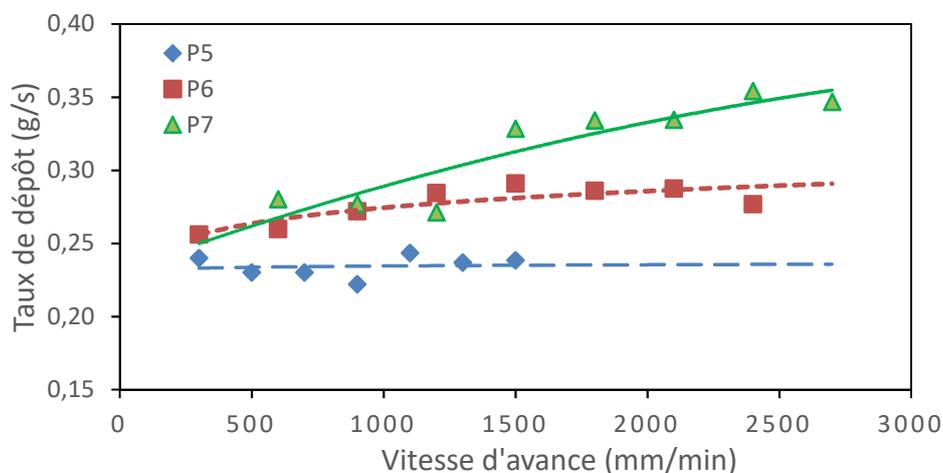


Figure 3.12 Evolution du taux de dépôt en fonction de la vitesse d'avance et du point de fonctionnement

3.3 Caractérisation de la puissance et de l'énergie associée aux différentes phases du cycle CMT

3.3.1 Méthodologie

Les mécanismes de fusion et de transfert de matière avec le procédé CMT étant assez complexes, nous avons mené une étude de l'énergie produite par le procédé lors des différentes phases du cycle CMT, afin de tenter de mieux comprendre les caractéristiques des dépôts obtenus. En effet, la puissance moyenne fournie par l'arc électrique n'est pas suffisante avec ce procédé pour expliquer les caractéristiques de volume et de température des gouttes de métal

déposé. Il est alors utile de séparer les trois phases caractéristiques du cycle CMT : la phase d'arc « chaud » correspondant au pic de courant ou « boost », la phase d'arc « froid » au moment du dévidage du fil d'apport jusqu'à son contact avec le bain, et la phase de court-circuit, au cours de laquelle s'effectue le dépôt de matière, mais aussi la majeure partie du transfert de chaleur dans le support et la pièce déjà construite (Figure 3.13).

Nous avons pour cela utilisé l'information fournie par l'enregistrement des signaux de tension et d'intensité pendant toute la durée des dépôts (cf. Chapitre 2). Comme la tension et l'intensité fluctuent au cours du temps, le calcul de la puissance délivrée doit se faire par intégration sur tout l'espace temporel :

$$\frac{1}{t_f} \int_{t_i}^{t_f} UI dt \quad (1)$$

Comme les signaux obtenus sont enregistrés de manière discrète, on peut appliquer la formule suivante :

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i I_i \quad (2)$$

On peut ainsi calculer la puissance moyenne de soudage, mais aussi la puissance moyenne associée à chaque phase du cycle CMT, suite à un traitement des données de tension et d'intensité mesurées.

Un programme python a été développé pour séparer sur les signaux les différentes phases du cycle CMT. Les signaux de tension et d'intensité sont d'abord filtrés à l'aide d'un filtre passe haut numérique, qui élimine les signaux parasites, de manière à obtenir un signal de qualité (Figure 3.14). En fonction de l'évolution des valeurs d'intensité et de tension observées au cours du cycle CMT, des valeurs seuil d'intensité (Lim 1 et Lim2) et de tension (Lim3) sont choisies afin de pouvoir délimiter les trois phases du cycle CMT (Figure 3.14). Quatre conditions sont alors définies par rapport à ces valeurs (Tableau 3.5).

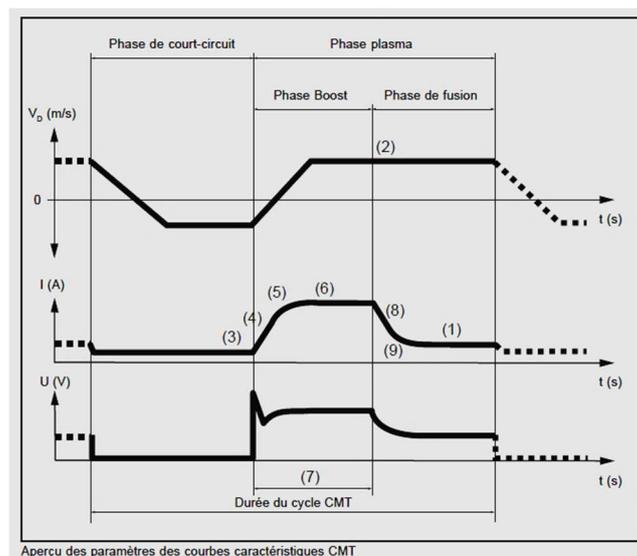


Figure 3.13 Représentation schématique de l'évolution des paramètres Vitesse de fil (V_d), intensité (I) et tension (U) au cours du cycle CMT

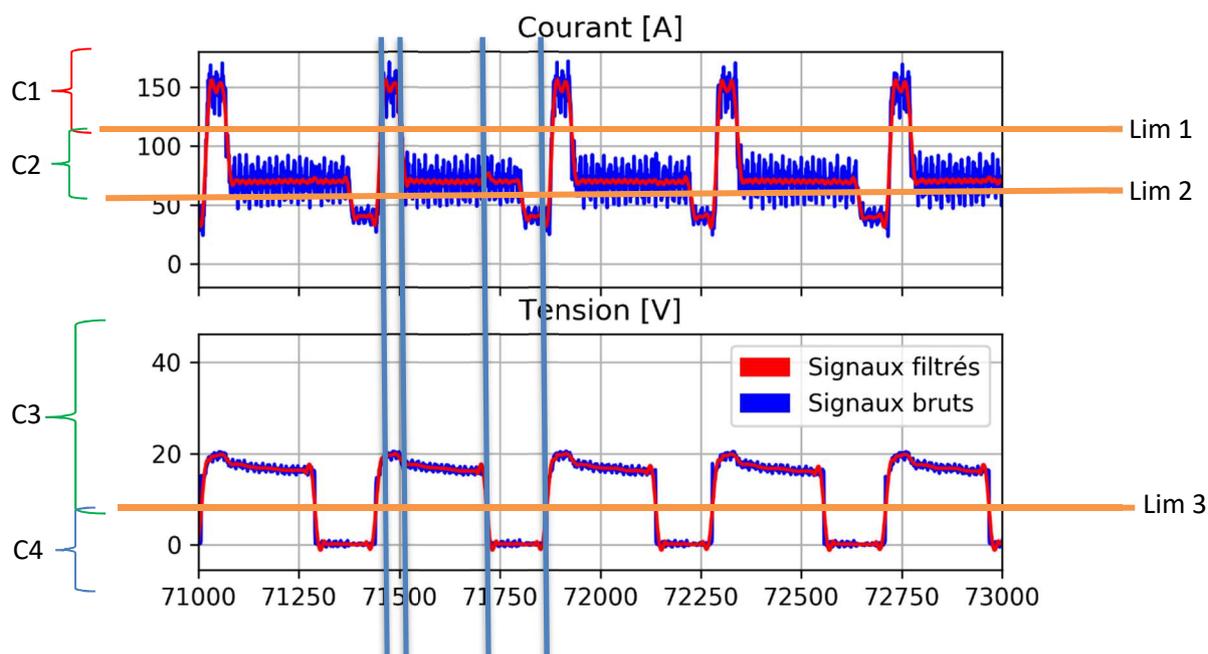


Figure 3.14 Définition des valeurs seuils retenues sur les signaux de courant et de tension filtrés pour séparer les trois phases du cycle CMT

Tableau 3.5 Conditions retenues pour séparer à partir des signaux de courant et de tension les trois phases du cycle CMT

Conditions	
C1	Valeur d'intensité supérieure à Lim1
C2	Valeur d'intensité comprise entre Lim1 et Lim2
C3	Valeur de tension supérieure à Lim3
C4	Valeur de tension inférieure à Lim3

Les signaux de tension et d'intensité enregistrés sont constitués d'un ensemble de points associant à chaque pas de temps une valeur de tension et d'intensité. Chacun de ces pas de temps est classé dans l'une des trois phases du cycle CMT, caractérisées par les conditions suivantes : la phase d'arc chaud ou « boost » correspond aux conditions C1 et C3 réunies ; la phase froide correspond aux conditions C2 et C3 réunies ; enfin, la phase court-circuit correspond à la condition C4. Les changements d'une phase à l'autre sont également comptés, de manière à déterminer le nombre de cycles, et donc de court-circuit, dans un cordon donné. Grâce à ce traitement des signaux de tension et d'intensité, les caractéristiques suivantes de chacune des phases ont pu être calculées :

- Le nombre d'occurrences de la phase dans un cordon donné ;
- La durée de la phase pour chaque cycle et sa durée moyenne pour l'ensemble des cycles dans un cordon donné ;
- L'intensité, la tension et la puissance moyennes de la phase pour chaque cycle et leurs moyennes pour l'ensemble des cycles dans un cordon donné ;

- L'énergie moyenne apportée par la phase pour chaque cycle et pour l'ensemble du cordon ;
- Les écart-types pour la durée moyenne, la puissance moyenne et l'énergie moyenne de la phase dans un cordon donné.

3.3.2 Résultats

L'étude des caractéristiques des différentes phases du cycle CMT et des puissances et énergies associées a été menée uniquement pour les points de fonctionnement 5, 6 et 7 de la synergie. La figure 3.15 montre la forme des signaux de tension et d'intensité filtrés pour les trois points de fonctionnement retenus. On remarque sur cette figure que lorsque la durée de la phase d'arc chaud augmente, la durée de la phase d'arc froid diminue, ce qui permet d'éviter le détachement de gouttelettes de métal liquide qui pourrait se produire si la fusion du fil était trop importante, perturbant ainsi le mode de transfert par court-circuit du procédé CMT.

Afin de disposer d'enregistrements de durée suffisante pour que les analyses soient représentatives, des cordons un peu plus longs que les précédents, de longueur 150 mm, ont été réalisés, en ne retenant que trois vitesses d'avance : 600, 1200 et 2400 mm/min. De plus, pour vérifier la reproductibilité des résultats, un minimum de six cordons a été réalisé pour chaque condition de dépôt. Les caractéristiques calculées sont rassemblées dans les tableaux suivants.

Le calcul du nombre total de cycles pour chaque cordon permet d'en déduire un nombre de cycles CMT par seconde pour chaque condition de dépôt étudiée (Tableau 3.6). Ce nombre de cycles correspond au nombre de court-circuit, et donc au nombre de gouttes déposées à chaque seconde. La vitesse d'avance ne semble pas avoir d'effet sur le nombre de gouttes déposées par seconde pour les points P5 et P7. La durée moyenne de chacune des phases du cycle reste également sensiblement constante quel que soit la vitesse d'avance pour les points 5 et 7 (Tableaux 3.7 et 3.9). En revanche, pour le point 6, la fréquence des cycles CMT est plus lente à faible vitesse d'avance. Ce résultat peut s'expliquer par le fait qu'une vitesse de déplacement plus élevée facilite la rupture du court-circuit, en augmentant la vitesse de retrait du fil, qui est la combinaison de la vitesse de retrait vertical contrôlée par le moteur du dévidoir de la torche, qui reste constante, et de la vitesse de déplacement horizontale. La diminution de la durée de la phase de court-circuit lorsque la vitesse d'avance augmente (Tableau 3.8) confirme cette interprétation. Notons que si la durée du court-circuit diminue, la durée pendant laquelle le fil électrode s'éloigne de la tôle support diminue également, et donc la hauteur d'arc aussi. Cela peut expliquer que la durée de la phase d'arc froid diminue également avec la vitesse d'avance. La hauteur d'arc étant plus faible, il faudra moins de temps au fil pour atteindre la tôle au cours de la phase d'arc froid.

Si l'on compare les caractéristiques de cycles des trois points retenus, on voit que la durée de la phase de court-circuit est celle qui change le moins d'un essai à l'autre. La vitesse de retrait du fil augmente pourtant entre les points de fonctionnement P5, P6 et P7. Etant donné que les intensités des phases de court-circuit, et donc les forces de Lorentz produites, qui favorisent la striction du fil, sont les mêmes pour les trois points, on aurait pu s'attendre à une diminution de la durée des phases de court-circuit avec l'augmentation de la vitesse du fil. La vitesse de retrait du fil ne semble donc pas être le seul paramètre contrôlant la vitesse de détachement des gouttes déposées. Il est en effet probable que d'autres facteurs, comme la taille des gouttes formées à l'extrémité du fil, ou leur température, ont aussi une influence sur la rupture du court-circuit. Notons tout de même que malgré ces faibles variations, la durée de court-circuit est la plus faible pour le point P6, qui est celui qui donne les cordons présentant le plus faible mouillage. La durée de la phase d'arc froid diminue en revanche avec l'augmentation de la vitesse du fil, ce qui est une évolution logique. Elle est ainsi minimale pour le point P7. Enfin, la durée

moyenne de la phase d'arc chaud mesurée suit relativement bien la valeur de consigne imposée dans chaque jeu de paramètres synergiques (Tableau 3.1).

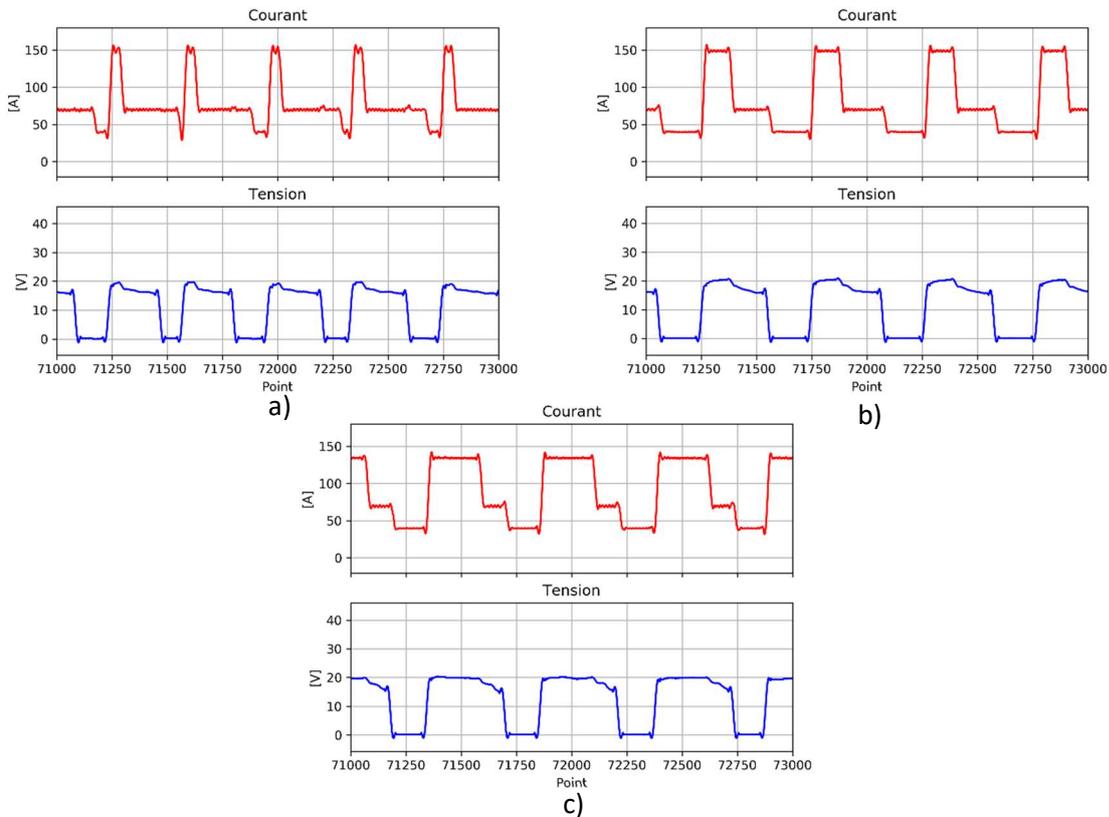


Figure 3.15 Formes d'ondes du courant et de la tension pour les points de fonctionnement P5 (a), P6 (b) et P7 (c)

Tableau 3.6 Nombre de cycles par seconde calculés selon le point de fonctionnement et la vitesse d'avance

		Point de fonctionnement		
Vitesse d'avance (mm/min)		P5	P6	P7
600	Moyenne (s ⁻¹)	52,5	55,7	48,2
1200	Moyenne (s ⁻¹)	51,2	56,9	48,3
2400	Moyenne (s ⁻¹)	52,7	65,2	47,9
Nombre de cycles moyen par point (s⁻¹)		52,1	57,9	48,1

Les écarts types mesurés, s'ils sont loin d'être négligeables pour les durées des phases d'arc froid et de court-circuit le long des différents cordons, montrent cependant une certaine régularité des caractéristiques des cycles. Notons que la durée totale d'un cycle calculée (Tableaux 3.7 à 3.9) est très légèrement inférieure à celle que l'on peut calculer à partir de la fréquence des cycles (Tableau 3.6). Cela provient du fait que dans la méthodologie de découpage du cycle en trois phases, on ne tient pas compte des points situés dans l'intervalle

de transition entre la phase de court-circuit et la phase chaude (points compris entre le seuil de tension Lim3 et le seuil d'intensité Lim1, figure 3.12).

Tableau 3.7 Durée moyenne de chaque phase du cycle CMT pour le point de fonctionnement 5

Vitesse d'avance (mm/min)		Phase d'arc chaud (ms) $t_{Iboost} = 2 \text{ ms}$	Phase d'arc froid (ms)	Phase de Court-circuit (ms)
600	Moyenne	2,006	9,884	6,811
	Ecart-type	0,101	2,319	1,340
1200	Moyenne	2,002	10,158	6,886
	Ecart-type	0,144	2,785	1,280
2400	Moyenne	1,996	9,727	6,576
	Ecart-type	0,202	3,045	0,950
Durée moyenne par phase (ms)		2,001	9,923	6,758
Durée moyenne du cycle : 18,682 ms				

Tableau 3.8 Durée moyenne de chaque phase du cycle CMT pour le point de fonctionnement 6

Vitesse d'avance (mm/min)		Phase d'arc chaud (ms) $t_{Iboost} = 5 \text{ ms}$	Phase d'arc froid (ms)	Phase de Court-circuit (ms)
600	Moyenne	5,000	5,809	6,751
	Ecart-type	0,241	2,058	1,362
1200	Moyenne	4,991	5,595	6,514
	Ecart-type	0,337	2,262	1,075
2400	Moyenne	4,973	4,390	5,481
	Ecart-type	0,449	2,795	0,816
Durée moyenne par phase (ms)		4,988	5,265	6,249
Durée moyenne du cycle : 16,502 ms				

Tableau 3.9 Durée moyenne de chaque phase du cycle CMT pour le point de fonctionnement 7

Vitesse d'avance (mm/min)		Phase d'arc chaud (ms) $t_{Iboost} = 9,5 \text{ ms}$	Phase d'arc froid (ms)	Phase de Court-circuit (ms)
600	Moyenne	9,398	4,428	6,310
	Ecart-type	0,485	1,848	1,519
1200	Moyenne	9,369	4,444	6,438
	Ecart-type	0,686	2,651	1,176
2400	Moyenne	9,320	4,534	6,340
	Ecart-type	0,977	3,529	0,913
Durée moyenne par phase (ms)		9,362	4,469	6,363
Durée moyenne du cycle : 20,194 ms				

Tableau 3.10 Puissance moyenne des différentes phases pour le point de fonctionnement 5

Puissance (W)				
Point de fonctionnement 5		Phase d'arc chaud t_Iboost = 2 ms	Phase d'arc froid	Phase de Court-circuit
600	Moyenne	2735,683	1165,558	30,909
1200	Moyenne	2808,558	1187,268	31,444
2400	Moyenne	2853,657	1184,113	33,245
Moyenne par phase		2799,299	1178,980	31,866
PUISSANCE MOYENNE GLOBALE : 922,268 W				

Les puissances moyennes calculées pour chacune des trois phases du cycle, pour un point de fonctionnement donné, ne varient pas de manière significative avec la vitesse d'avance (Tableaux 3.10 à 3.12).

Tableau 3.11 Puissance moyenne des différentes phases pour le point de fonctionnement 6

Puissance (W)				
Point de fonctionnement 6		Phase d'arc chaud t_Iboost = 5 ms	Phase d'arc froid	Phase de Court-circuit
600	Moyenne	2817,615	1146,090	29,083
1200	Moyenne	2922,177	1192,631	28,643
2400	Moyenne	2893,531	1183,924	34,3086
Moyenne par phase		2877,774	1174,215	30,6782
PUISSANCE MOYENNE GLOBALE : 1234,529 W				

Tableau 3.12 Puissance moyenne des différentes phases pour le point de fonctionnement 7

Puissance (W)				
Point de fonctionnement 7		Phase d'arc chaud t_Iboost=9,5 ms	Phase d'arc froid	Phase de Court-circuit
600	Moyenne	2513,406	1182,985	30,600
1200	Moyenne	2518,389	1186,747	31,512
2400	Moyenne	2513,684	1169,811	31,639
Moyenne par phase		2515,16	1179,848	31,25033
PUISSANCE MOYENNE GLOBALE : 1407,145 W				

Les puissances moyennes dissipées lors de chaque phase sont assez proches pour les trois points de fonctionnement étudiés. Ces résultats étaient prévisibles car les valeurs de courant de soudage dans chaque phase sont identiques, excepté pour l'intensité de la phase chaude du point P7, qui est un peu plus faible (cf. Tableau 3.1), ce qui est cohérent avec les valeurs de puissance moyenne calculées pour ce dernier point (Tableau 3.12).

Le tableau 3.13 donne l'énergie moyenne calculée pour chaque phase lors du dépôt des cordons. Ces valeurs sont calculées en multipliant la puissance moyenne de chaque phase par sa durée moyenne. Rappelons que ces résultats sont des moyennes calculées en prenant en compte un minimum de 6 cordons pour chaque condition de dépôt. On peut ainsi constater que la plus grande partie de l'énergie produite au cours d'un cycle CMT provient de la phase d'arc froid pour le point de fonctionnement 5, alors que pour les deux autres points, c'est la phase d'arc chaud qui produit la majeure partie de l'énergie. Cette différence vient de la faible durée de la phase d'arc chaud du point de fonctionnement 5, qui limite l'énergie produite durant cette phase, mais aussi de la plus faible vitesse de dévidage du fil durant la phase d'arc froid, ce qui prolonge la durée de cette phase. La durée de la phase d'arc froid est en effet bien plus longue pour le point 5 (Tableaux 3.7 à 3.9), ce qui conduit à une énergie générée durant cette phase plus importante que pour les deux autres points de fonctionnement (Tableau 3.13). L'énergie produite durant la phase de court-circuit est quant à elle presque négligeable, quel que soit le point de fonctionnement.

Tableau 3.13 Energie moyenne apportée par chaque phase pour les 3 points de fonctionnement

Energie moyenne apportée par phase (J)				
Point de fonctionnement	Phase d'arc chaud	Phase d'arc froid	Phase de Court-circuit	Energie totale par cycle
P5	5,601	11,699	0,215	17,516
P6	14,354	6,182	0,192	20,728
P7	23,547	5,273	0,199	29,019

Les énergies linéiques (rapport puissance/vitesse de déplacement) augmentent légèrement avec les points de fonctionnement, et donc la quantité de chaleur apportée par le procédé (Tableau 3.14). On remarque également que si la vitesse de déplacement est doublée, l'énergie est quasiment divisée par deux. C'est un effet bien connu : lorsqu'on augmente la vitesse, on diminue l'énergie dissipée par unité de longueur. Si l'on rapporte ces résultats à la quantité de métal déposé, on voit de la même façon que la quantité d'énergie par gramme de métal déposé augmente avec les points de fonctionnement (Tableau 3.15).

Tableau 3.14 Energies linéiques mesurées pour les différents points de fonctionnement et vitesses d'avance

Energies linéiques moyennes (J/mm)				
Point de fonctionnement		600 mm/min	1200 mm/min	2400 mm/min
P5	Moyenne	92,07	46,99	23,82
P6	Moyenne	119,26	62,70	33,30
P7	Moyenne	144,28	71,78	35,82

Tableau 3.15 Energie par gramme de métal déposé pour les différents points de fonctionnement

Point de fonctionnement	P5	P6	P7
Energie par gramme de métal déposé (J/g)	4939	5115	5236

Ces résultats sont à comparer aux caractéristiques géométriques des cordons déposés. Lorsque l'on passe du point 5 au point 6 puis au point 7, la quantité d'énergie apportée par seconde, la masse de matière déposée, et la quantité d'énergie par gramme de matière déposée augmentent. On peut donc s'attendre à un échauffement plus important du substrat, et donc un meilleur étalement du cordon déposé pour les points de fonctionnement 6 et surtout 7. Pourtant, le point 6 est celui qui présente le moins bon mouillage, malgré un volume de métal déposé plus important que le point 5, et une quantité d'énergie produite par gramme de métal déposé plus élevée, ce qui laisse supposer que ce dernier doit être un peu plus chaud. Si l'on compare les énergies moyennes produites durant la phase d'arc, on arrive en effet à des valeurs de plus de 20 Joules accumulés avant chaque court-circuit pour le point 6, contre seulement 17 Joules pour le point 5. Ce résultat doit cependant être discuté au regard de la durée du court-circuit, qui est plus court pour le point 6. C'est en effet durant cette phase de court-circuit que la chaleur accumulée par la goutte liquide à l'extrémité du fil est transmise au substrat et l'échauffe. Si cette phase est plus courte, la partie de la goutte formée restant accrochée au fil après retrait a moins de temps pour transférer sa chaleur, limitant ainsi l'échauffement du substrat, et donc le mouillage du cordon.

On peut alors expliquer le transfert de chaleur de la manière suivante : durant la phase d'arc (phases chaude et froide), le fil s'échauffe sous l'effet principalement de la chaleur de condensation des électrons traversant l'arc électrique. Une partie de la chaleur reçue est cependant transférée par conduction à travers le fil, jusqu'au tube contact, et ce d'autant plus que cette phase d'arc est longue. Le substrat s'échauffe mais de manière limitée durant cette phase, sous l'effet notamment du rayonnement. Au moment du court-circuit, la goutte de métal liquide transfère une partie de la chaleur qu'elle contient par conduction au substrat, jusqu'à la rupture du court-circuit. La quantité de chaleur transférée dépend donc principalement de la température et du volume de la goutte au moment du court-circuit, qui déterminent la quantité de chaleur transférable, et du temps d'interaction.

3.4 Influence de la distance tube-contact / substrat

Tous les essais discutés dans les paragraphes précédents ont été réalisés en imposant une distance entre le tube-contact de la torche de soudage et la surface de la tôle substrat de 15 mm. Si cette distance peut facilement être contrôlée dans le cas du dépôt de mono-cordons, ce contrôle est plus délicat dans le cas de dépôts multi-cordons, car la hauteur des couches déposées, qui doit déterminer la hauteur de translation du plateau de construction entre deux couches, n'est pas connue avec une très grande précision, et sa valeur peut de plus varier le long d'un même cordon. Il est donc important d'étudier l'influence de la variation de cette distance sur les caractéristiques du transfert et la géométrie des cordons obtenus.

Des essais ont été réalisés avec les points de fonctionnement 5 et 6 en faisant varier la distance entre le tube-contact et la surface de la tôle-substrat entre 5 mm et 30 mm. Le tube contact est l'élément qui permet le guidage du fil d'apport, mais aussi la liaison électrique avec le générateur de soudage. L'espace entre le tube contact et la surface du substrat est rempli par le fil libre sortant du tube-contact, et par l'arc électrique lors des phases d'arc (Figure 3.16).

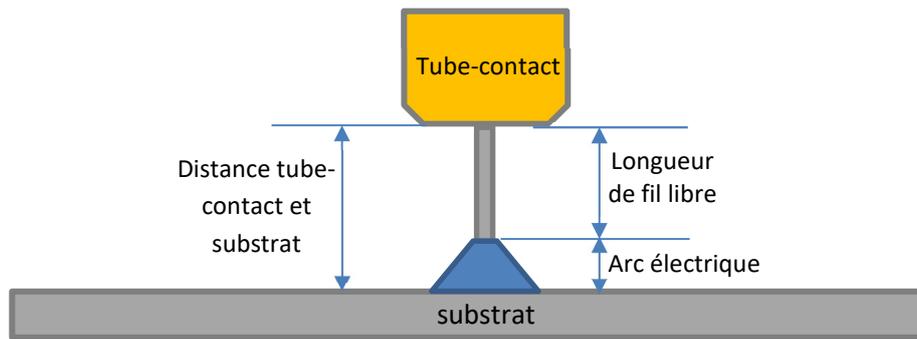


Figure 3.16: Représentation schématique de l'extrémité de la torche montrant le tube contact, la longueur de fil libre et l'arc électrique

Si la puissance moyenne reste relativement constante lorsque la distance tube contact-substrat augmente, tout comme le taux de dépôt, les caractéristiques du cycle de transfert CMT, ainsi que la géométrie des cordons déposés, montrent des différences significatives. Les figures 3.17 à 3.19 montrent l'évolution de la puissance moyenne de chacune des phases du cycle CMT en fonction de la distance tube-substrat. La puissance moyenne de la phase de court-circuit, qui est très faible car la tension durant cette phase est proche de zéro, augmente légèrement, du fait que la tension augmente un peu avec l'augmentation de la longueur du fil libre sous le tube-contact (Figure 3.17). En revanche, la puissance moyenne des phases d'arc diminue avec la distance tube-substrat, sous l'effet d'une baisse de la tension, qui témoigne d'une diminution de la longueur de l'arc (Figures 3.18 et 3.19).

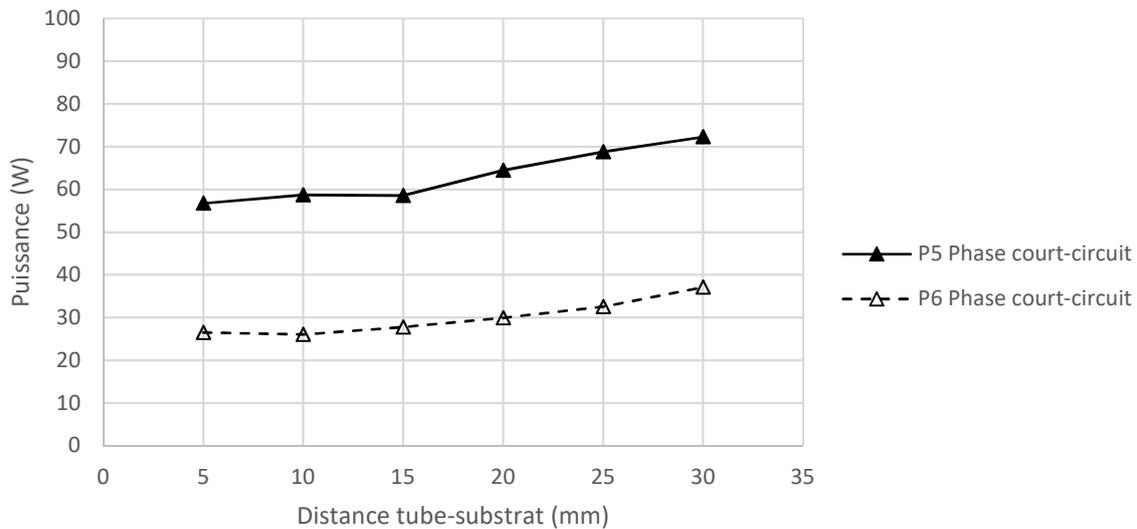


Figure 3.17 Evolution de la puissance moyenne des phases de court-circuit en fonction de la distance tube contact – substrat

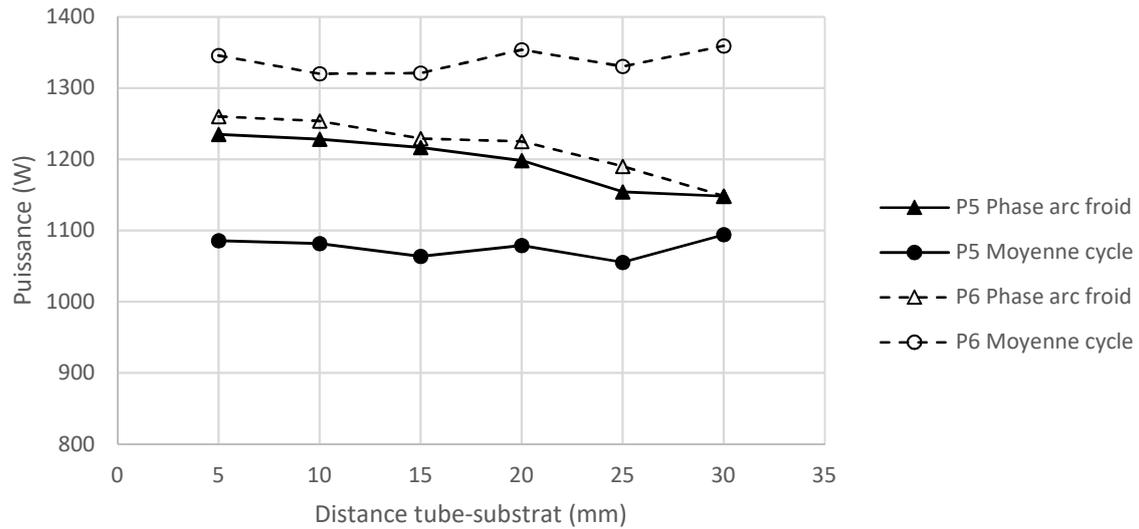


Figure 3.18 Evolution de la puissance moyenne du cycle et de la puissance moyenne des phases d'arc froid en fonction de la distance tube contact - substrat

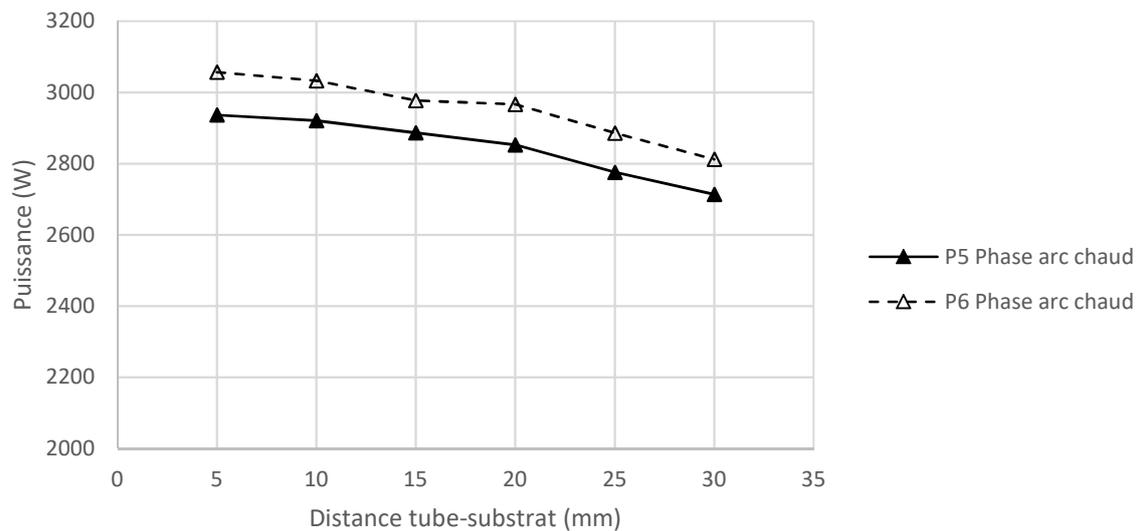


Figure 3.19 Evolution de la puissance moyenne des phases d'arc chaud en fonction de la distance tube contact - substrat

Si l'on observe maintenant la durée moyenne des différentes phases (Figure 3.20), on peut voir que celle de la phase d'arc chaud ne varie pas avec la distance tube contact-substrat. En revanche, la durée moyenne des deux autres phases diminue avec l'augmentation de cette distance. Ce résultat est à rapprocher de la baisse de tension des phases d'arc observée lorsque la distance tube-substrat augmente. Les durées de court-circuit étant plus courtes, le fil doit remonter moins longtemps pour rompre le court-circuit, conduisant à une hauteur d'arc, et donc une tension, plus faibles. Ce résultat pourrait être lié à une température plus élevée du métal liquide, qui est alors moins visqueux et se sépare plus facilement du fil à la fin de la phase de court-circuit.

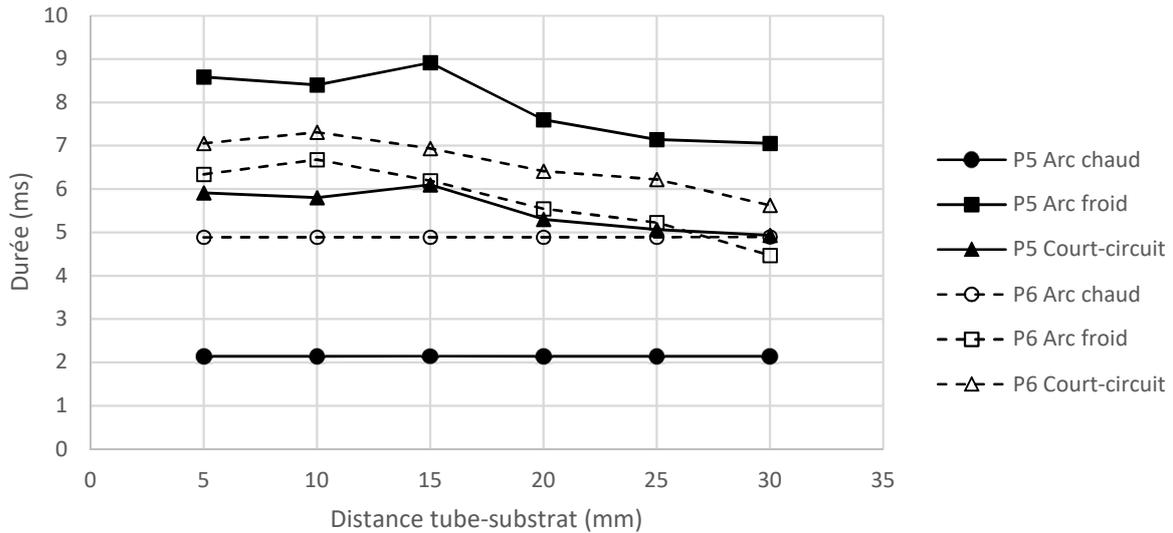


Figure 3.20 Evolution de la durée moyenne des différentes phases en fonction de la distance tube contact - substrat

Le meilleur mouillage du métal déposé lorsque la distance tube contact-substrat augmente, que révèle l'augmentation de la largeur et la diminution de la hauteur des cordons déposés (Figure 3.21), semble confirmer cette hypothèse d'un métal liquide plus chaud. La puissance moyenne étant sensiblement identique, tout comme le volume de matière déposée (Figure 3.21), on peut penser que cette amélioration du mouillage vient d'un meilleur rendement thermique du procédé, qui transfère une quantité de chaleur plus importante au substrat lorsque la distance tube contact-substrat augmente. La longueur de fil libre étant plus élevée, l'extrémité fondue du fil est alors plus éloignée du tube contact, ce qui doit réduire le transfert de chaleur par conduction dans la torche de soudage, et augmente donc la quantité de chaleur transférée au substrat. Une augmentation de la distance tube contact-substrat semble donc améliorer le mouillage, et pourrait donc être favorable. Cependant, bien que le cordon mouille mieux le substrat, les écarts-type mesurés sur la largeur et la hauteur des cordons augmentent lorsque cette distance dépasse 20 mm. Ces résultats confirment donc le choix d'une distance tube contact-pièce de 15 mm, qui devra rester relativement stable durant la fabrication pour ne pas modifier les conditions de transfert de matière et de chaleur, et la géométrie des dépôts.

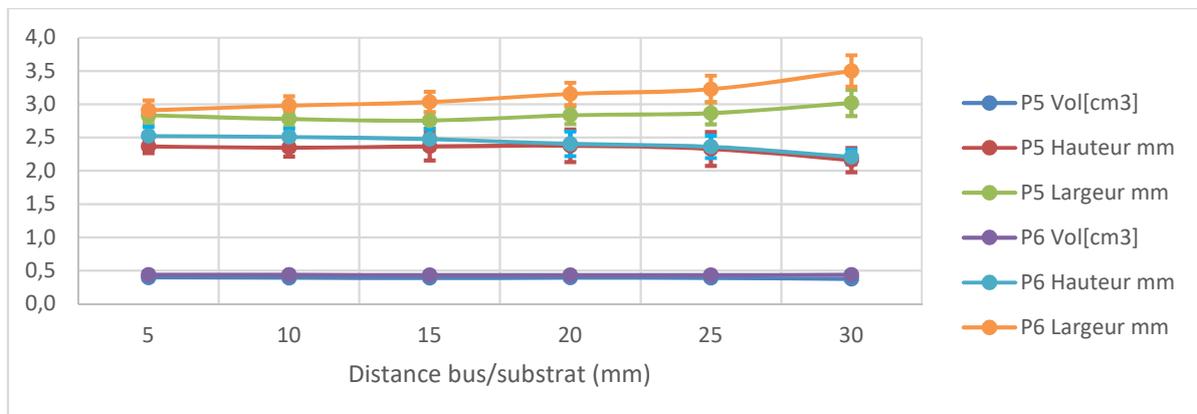


Figure 3.21 Evolution du volume et de la hauteur et largeur moyennes des cordons en fonction de la distance tube contact - substrat

3.5 Conclusion

Ces premiers essais ont montré que les paramètres standard préprogrammés dans le générateur de soudage CMT correspondant aux points de fonctionnement 5, 6 et 7 de la synergie C0876 permettaient d'obtenir des cordons relativement réguliers, avec des vitesses d'avance comprises entre environ 600 et 2000 mm/min. L'augmentation de la vitesse d'avance modifie la géométrie des cordons déposés, en réduisant simultanément leur largeur et leur hauteur, sans toutefois modifier leur régularité, sauf lorsque les vitesses deviennent trop faibles ou trop élevées. L'analyse des puissances et énergies générées durant les différentes phases du cycle CMT a permis de mieux comprendre les phénomènes de transfert de matière et de chaleur associés au procédé, et d'expliquer en partie les différences de géométrie des cordons observées. Enfin, l'étude de l'influence de la distance entre le tube-contact et la surface de la pièce en construction a montré qu'une distance trop élevée améliorerait le mouillage, mais diminuait aussi la régularité des cordons.

Ces premiers résultats montrent donc que des géométries très variables de cordons peuvent être obtenues en modifiant les paramètres du procédé, pouvant conduire à une amélioration des caractéristiques géométriques des dépôts, ou au contraire à l'apparition de défauts réduisant la qualité des pièces produites. Pour pouvoir prévenir l'apparition de ces défauts, ou pour tenter de les corriger, il est cependant nécessaire de mieux comprendre l'influence des différents paramètres du procédé, dont les valeurs sont ajustées dans chaque point de fonctionnement de la synergie étudiée.

Dans le chapitre suivant, nous allons nous intéresser à l'influence de ces différents paramètres sur les mécanismes de transferts de matière et de chaleur et sur la géométrie des dépôts, de manière à identifier les paramètres prépondérants à contrôler pour prévenir et/ou corriger les défauts géométriques.

Chapitre 4. Optimisation des paramètres procédé

Ce chapitre est consacré à l'analyse de l'influence des différents paramètres du procédé contrôlant les phases d'amorçage, de dépôt et de fin de cordon, sur les mécanismes de transfert de matière et de chaleur, et sur les caractéristiques des cordons obtenus. La première partie est consacrée plus particulièrement à l'analyse des phénomènes responsables de l'apparition de défauts en début de cordon, et de l'influence des paramètres d'amorçage sur ces défauts. La seconde partie est consacrée à l'étude de l'influence de chaque paramètre du cycle de dépôt en CMT sur la géométrie des cordons, en essayant de comprendre comment chaque paramètre agit sur le transfert de chaleur et de métal fondu. Enfin, la troisième partie s'intéresse à l'analyse de l'évolution des caractéristiques des formes d'onde de courant et de tension des différentes phases du cycle CMT en cours de dépôt, pour tenter de relier les variations de ces caractéristiques à la géométrie des cordons déposés, et poser les bases d'une méthode de contrôle en ligne de la fabrication.

4.1 Analyse et réduction des défauts géométriques dans les dépôts mono-cordon

En plus des irrégularités géométriques déjà étudiées dans le précédent chapitre, estimées à partir des écart-types sur les mesures de largeur, hauteur et angle de contact, d'autres défauts géométriques plus importants ont été observés, qui peuvent devenir problématiques dans le cas de la construction de pièces. En effet, la fabrication additive consistant à superposer plusieurs dépôts/cordons de matière pour former la géométrie d'une pièce mécanique, généralement issue de la CAO, l'empilement de ces cordons doit être bien contrôlé et surtout régulier pour arriver à construire la pièce avec une bonne précision géométrique, ce qui suppose l'absence de défauts géométriques sur chacune des couches, en particulier en début et fin de cordons. Les principaux défauts géométriques observés au cours des expériences réalisées sont analysés dans cette partie, de manière à tenter d'identifier leur cause, et de les réduire voire de les éliminer en optimisant certains des paramètres du procédé.

4.1.1 Longueur de dépôt inférieure à la consigne

4.1.1.1 Manque de matière en début de cordon

Les premiers essais ont révélé que le début de cordon était décalé par rapport à la position initiale de la torche, ce qui se traduit par des cordons plus courts que la géométrie souhaitée. Ce décalage augmente lorsque la vitesse d'avance augmente (Figure 4.1). Il est dû à un retard de dépôt du fil fondu, puisque celui-ci doit d'abord être chauffé par l'arc électrique pour passer à l'état liquide, puis être déposé par dévidage du fil sur la tôle support. Comme le plateau du banc d'essai se déplace dès que le procédé CMT démarre, il y a donc un décalage entre la position initiale de la torche par rapport au support et le début du cordon, qui est d'autant plus important que la vitesse de translation du plateau est grande.

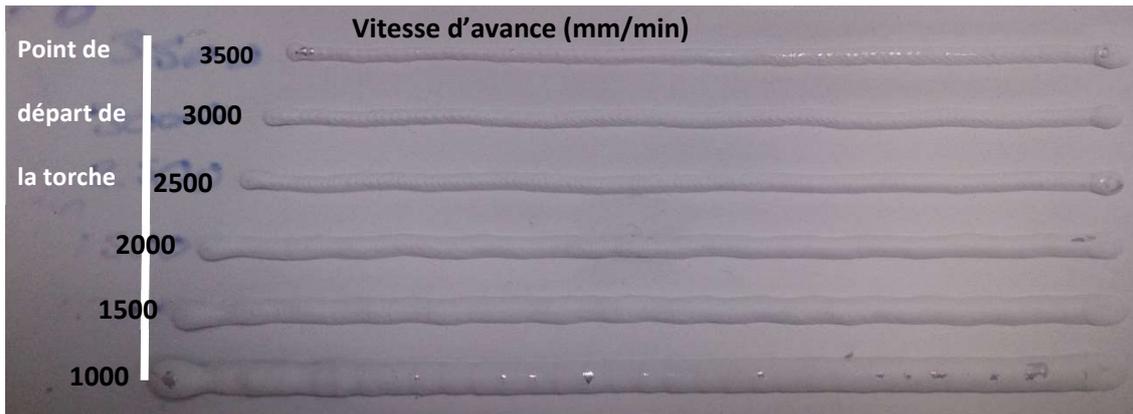


Figure 4.1 Retard de dépôt des cordons entraînant un écart entre la géométrie attendue et la géométrie réelle

Pour corriger ce défaut, il a fallu ajouter un temps d'attente pour que l'extrémité du fil fonde et dépose la première goutte au point initial indiqué avant de commencer le déplacement du plateau. Ce temps a été estimé de manière expérimentale, et dépend des options et paramètres de cycle d'amorçage retenus, qui modifient la durée entre le lancement du procédé et le dépôt de la première goutte de métal liquide sur le substrat (cf. paragraphes suivants). Cependant, de faibles écarts subsistent encore entre les positions de démarrage des différents cordons, car le temps qu'il faut pour déposer la première goutte dépend généralement de la distance entre le fil et la tôle au début de chaque dépôt, qui n'est pas rigoureusement constante d'un essai à l'autre. En effet, bien que la distance entre le tube-contact de la torche et la surface de la pièce soit relativement bien contrôlée, la longueur de fil libre à l'extrémité du tube contact n'est pas toujours parfaitement identique entre deux dépôts, et un contrôle manuel de cette longueur après chaque couche déposée n'est pas envisageable lors de la fabrication de pièces. De plus, lors de l'empilement de plusieurs couches, la distance entre le tube-contact et la surface peut légèrement varier en fonction de la géométrie de la couche précédemment déposée. Une solution plus pertinente consisterait à utiliser un automate qui ne déclencherait le mouvement de la table qu'une fois le premier court-circuit détecté. Cette solution n'a cependant pas pu être développée par manque du temps.

4.1.1.2 Manque de matière déposée en fin de cordon

Des manques de matière déposée en fin de cordon ont aussi été observés, en particulier pour les vitesses d'avance les plus élevées (Figure 4.2). Ce défaut peut être réduit en ajoutant dans le programme de commande de la fabrication un temps de maintien du cycle CMT après l'arrêt du déplacement du plateau à la fin du dépôt, qui permet d'alimenter en matière déposée la fin de cordon. Ce temps de maintien doit être adapté en fonction de la vitesse d'avance.

Une autre option consisterait à utiliser l'option « deux temps spécial » en fin de dépôt, de manière à modifier l'apport d'énergie et de matière en fin de cordon pour augmenter le taux de dépôt et compenser le manque de matière. Cette option n'a pas été utilisée dans le cas de ce défaut, car l'ajout d'un temps de maintien permet de l'éliminer presque totalement, même si ce temps est ajusté de manière empirique selon la vitesse d'avance. En revanche, cette option est décrite dans la section suivante, et son effet sur la phase d'amorçage du cordon sera discuté.

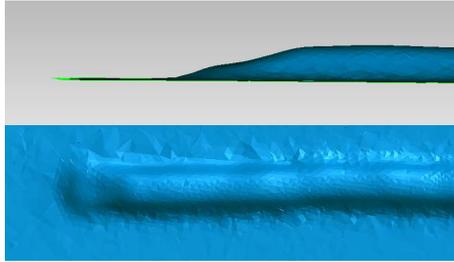


Figure 4.2 Manque de matière en fin de cordon

4.1.2 Accumulation de matière en début de cordon

Le défaut le plus critique, et qui a été observé sur presque tous les cordons, concerne l'accumulation de matière en début de cordon, cette zone formant alors une « macro-goutte » de volume plus ou moins important selon la vitesse d'avance choisie, parfois presque totalement séparée du reste du cordon par un « cou » étroit (Figure 4.3). Dans certains cas, notamment pour les vitesses d'avance rapides, une seconde macro-goutte, voire une troisième, se forment encore, avant l'apparition d'un cordon régulier.

Les paramètres d'amorçage (cf. Tableau 3.1 du chapitre 3) du procédé CMT permettent d'augmenter l'apport énergétique en début de cordon, de manière à produire un échauffement plus important de la tôle et ainsi atténuer le régime thermique transitoire généralement observé en début de soudage, probablement responsable des défauts observés. Une optimisation des paramètres du cycle d'amorçage pourrait donc permettre de réduire, voire d'éliminer ce défaut géométrique.

Des tests ont donc été réalisés pour tenter de réduire ces défauts à l'amorçage par le choix de bons paramètres de cycle d'amorçage. Des options ou variantes du procédé CMT (paramètres « 2 temps spécial », inversion de polarité à l'amorçage) sont également testées dans cette partie pour tenter de remédier à ce défaut.

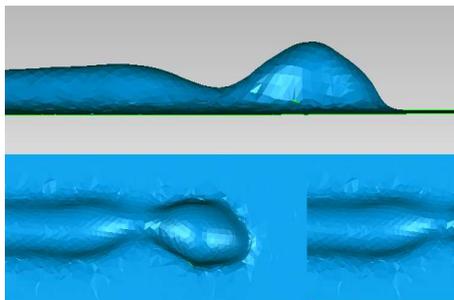


Figure 4.3 Accumulation de matière en début de cordon

4.1.2.1 Analyse du défaut et de ses causes

Le défaut est caractérisé par une accumulation irrégulière de matière au début du cordon, formant une grosse goutte de métal (ou macro-goutte), reliée au reste du cordon par un « cou » plus étroit (Figure 4.3). Cette macro-goutte présente un mauvais mouillage sur la tôle substrat, avec des angles de contact inférieurs à 90° (angles de mouillage supérieurs à 90°).

Si on analyse le cycle de courant et de tension lors d'une phase d'amorçage réalisée avec les paramètres par défaut préprogrammés dans la synergie (cf. Tableau 3.1 du chapitre 3), on constate que lorsque le fil entre en contact avec la tôle substrat (lorsque la tension chute à presque 0 V), l'intensité du courant est très faible (30 A), ce qui est très insuffisant pour produire par effet joule la fusion du fil (Figure 4.4). Notons que ce paramètre ne fait pas partie des

paramètres « modifiables » du cycle d'amorçage. Au moment où le court-circuit est rompu grâce au retrait mécanique du fil, l'arc électrique s'amorce, avec une tension d'arc de moins de 20 V, mais là encore, l'intensité est très faible ($I_{\text{ignition}} = 60 \text{ A}$, valeur inférieure à l'intensité de la phase d'arc froid du cycle de soudage, qui est de 70 A), tout comme la durée t_{ignition} de cette phase (15 ms), ce qui ne permet pas de former une gouttelette de métal fondu à l'extrémité du fil de volume et de température suffisants pour permettre la fusion localisée de la tôle substrat lors du court-circuit suivant, et faciliter ainsi le mouillage de la goutte sur le substrat.

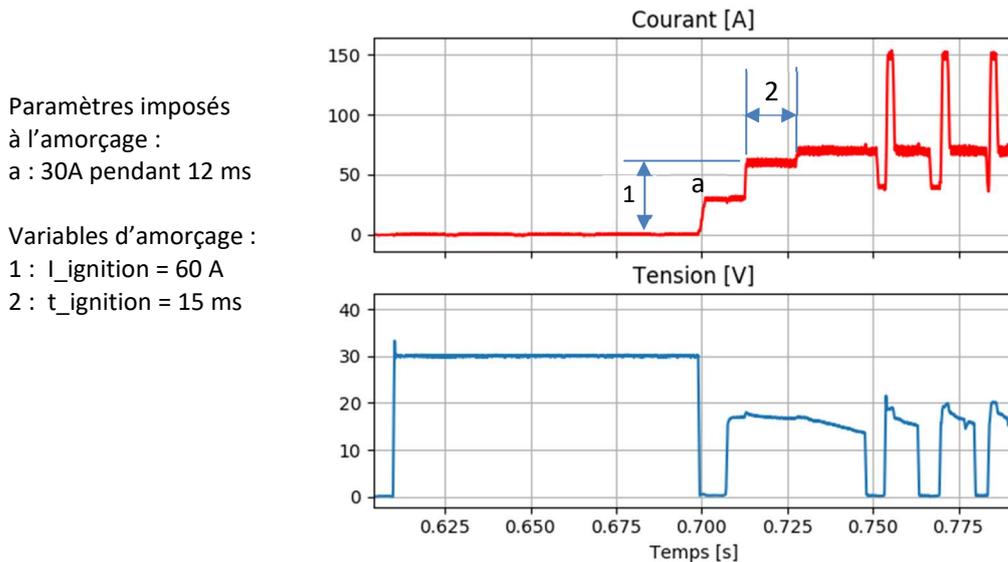


Figure 4.4 Cycle d'amorçage par défaut du procédé CMT

Des observations à l'aide d'une caméra rapide du transfert de métal durant les premiers instants du dépôt permettent de comprendre le mécanisme entraînant l'apparition de ce défaut. La figure 4.5 montre l'évolution du profil de la macro-goutte formée en début de cordon par le dépôt successif des gouttelettes fondues à l'extrémité du fil d'apport lors de chaque court-circuit. Lors du dépôt de la première gouttelette, au premier court-circuit après l'amorçage de l'arc électrique, la goutte déposée ne mouille que très mal le substrat (Figure 4.5.a). Bien que la goutte de métal liquide déposée grossisse lors des court-circuit suivants, formant une « macro-goutte », la largeur de contact ne varie pas pendant les 9 premiers court-circuit, la hauteur de goutte augmentant sans que la surface de contact de bouge (Figures 4.5a-c).

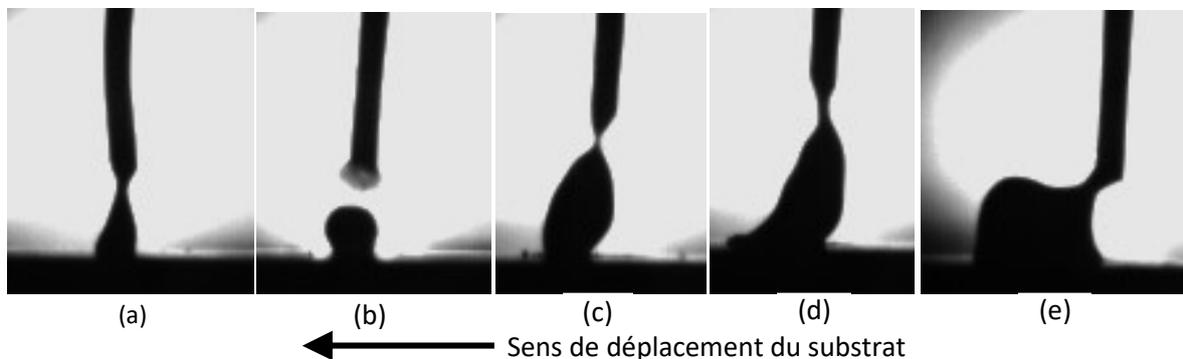


Figure 4.5 Images extraites des vidéos obtenues par caméra rapide montrant l'évolution de la forme de la macro-goutte lors du dépôt des premières gouttelettes de métal liquide, (a) 1^{ère} goutte, (b) 5^{ème} goutte, (c) 9^{ème} goutte, (d) 10^{ème} goutte, (e) 15^{ème} goutte

La question de la position de la ligne de contact, ou ligne triple solide-liquide-gaz, lors du dépôt d'un métal liquide sur un substrat solide, est un problème complexe qui a fait l'objet de nombreuses études. Selon certains auteurs [107, 108], c'est la solidification du liquide, qui démarre au niveau de la ligne de contact, qui fige sa position. Dans le cas du dépôt des gouttes en CMT sur la tôle substrat, qui est initialement à la température ambiante, il est probable que la solidification de la ligne de contact de la première goutte se produise très rapidement après le contact, ce qui fige sa position. Il faut alors que la ligne de contact fonde pour qu'elle puisse se déplacer, permettant l'étalement du liquide sur le substrat, et donc un meilleur mouillage. Les images de vidéo rapide montrent que la ligne de contact ne bouge pas jusqu'au dixième court-circuit (Figure 4.5.d). La ligne de contact à l'arrière de la macro-goutte se déplace alors un peu, sans doute sous l'effet de la fusion du métal au niveau de la ligne de contact, grâce à la chaleur accumulée par les gouttes ajoutées. La ligne se fige un peu plus loin, sans doute sous l'effet de la resolidification du liquide, qui se trouve au contact d'un substrat plus froid. A partir de cet instant, la position de la ligne de contact à l'arrière de la macro-goutte n'évolue plus, et la solidification progresse depuis cette ligne vers le haut et l'avant de la macro-goutte. En revanche, la ligne de contact à l'avant de la macro-goutte commence à son tour à se déplacer de manière progressive avec l'apport de nouvelles gouttes de métal fondu à l'avant. Le mouillage est bien meilleur à l'avant, du fait de l'apport continu de chaleur par les gouttelettes successives, qui produisent l'échauffement, voire la fusion du substrat, empêchant la solidification de la ligne de contact à l'avant de la macro-goutte (Figure 4.5.e).

A l'arrière de la macro-goutte, comme la ligne de contact s'est solidifiée et ne peut donc plus se déplacer, l'apport de nouvelles gouttes entraîne une augmentation de la hauteur, produisant une augmentation de l'angle de mouillage, qui dépasse rapidement la valeur seuil de 90° (Figure 4.5.e). Au-delà de cette valeur, le rayon de la macro-goutte, si on l'assimile à une calotte sphérique, augmente avec l'accroissement de la hauteur (Figure 4.6).

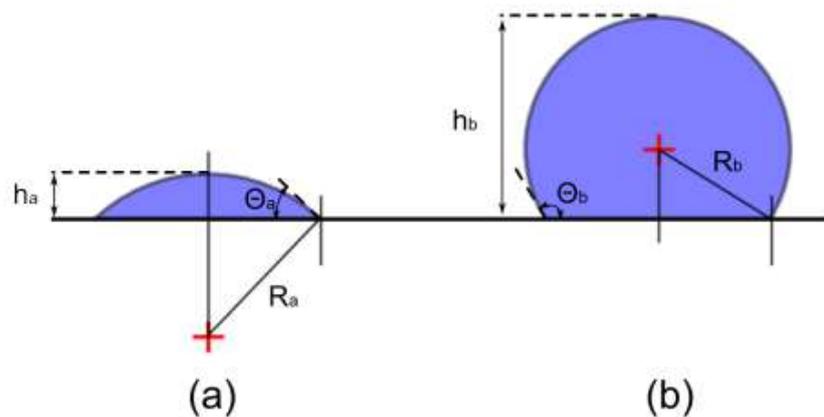


Figure 4.6 Géométries simplifiées de macro-goutte, (a) pour un angle de mouillage inférieur à 90° , et (b) pour un angle de mouillage supérieur à 90°

Selon l'équation de Laplace (éq. 1), la pression interne de la macro-goutte diminue lorsque son rayon augmente.

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

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.

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. Dans le cas de la macro-goutte, le mouillage étant meilleur à l'avant (angle de mouillage inférieur à 90°), l'augmentation de hauteur due au dépôt de nouvelles gouttes entraîne une diminution du rayon de courbure (Figure 4.6.a), et donc une augmentation de la pression interne. Le liquide déposé à l'avant de la macro-goutte aura donc tendance à migrer vers l'arrière, accroissant encore la hauteur de la partie arrière de la macro-goutte.

On peut observer ce phénomène sur les images de caméra rapide (Figure 4.7). La gouttelette déposée à l'avant de la macro-goutte semble « aspirée » vers l'arrière, faisant encore croître sa hauteur et amplifiant le défaut en début de cordon, au lieu de former un cordon s'étalant vers l'avant.



Figure 4.7 Migration de la goutte de liquide déposée à l'avant vers l'arrière de la macro-goutte venant amplifier le défaut en début de cordon

Ce phénomène ne s'interrompt que lorsque la partie arrière de la macro-goutte finit par se solidifier. Dans la partie avant de la macro-goutte, l'angle de mouillage est inférieur à 90° . L'augmentation de hauteur du cordon a alors tendance à augmenter la pression interne, favorisant une répartition constante de la hauteur sur toute la longueur du cordon (Figure 4.8).

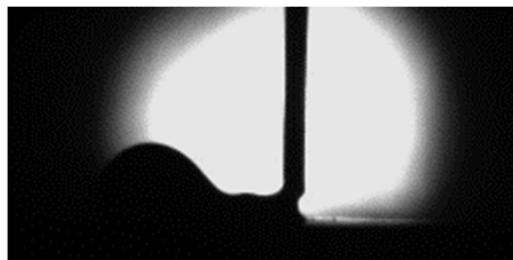


Figure 4.8 Formation d'un cordon de hauteur régulière une fois l'arrière de la macro-goutte solidifié (dépôt de la quarantième goutte)

Cette analyse montre qu'un bon mouillage de la goutte (angle de mouillage inférieur à 90°) dans la phase de démarrage du cordon est nécessaire pour éviter le phénomène « d'aspiration » dû à la dépression produite par l'accroissement de la hauteur de goutte. Nous avons donc testé dans la partie suivante l'influence de divers paramètres sur le mouillage des premières gouttes déposées.

4.1.2.2 Modification des paramètres du cycle d'amorçage

Il est possible d'augmenter l'apport énergétique durant la phase d'amorçage, en modifiant l'intensité d'amorçage I_{ignition} ou sa durée t_{ignition} (Figure 4.9).

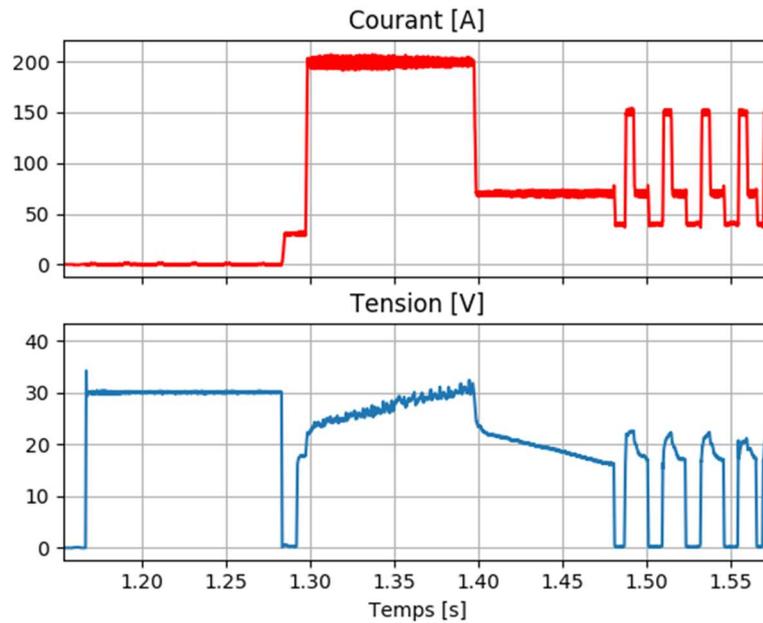
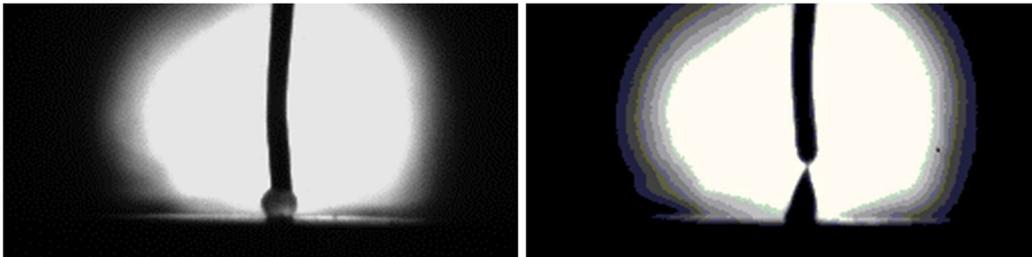
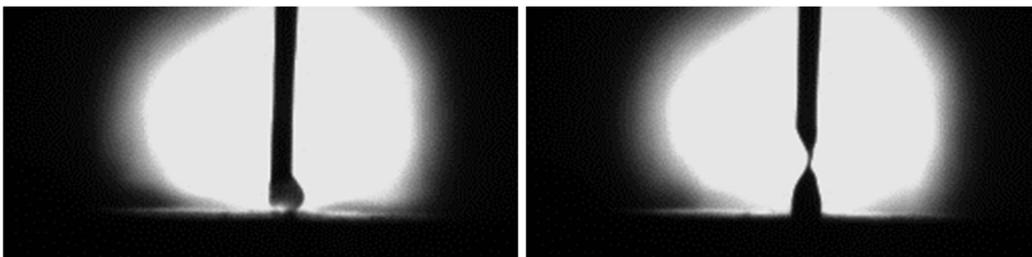


Figure 4.9 Evolution des signaux électriques durant la phase d'amorçage du procédé CMT ($I_{\text{ignition}} = 200 \text{ A}$, $t_{\text{ignition}} = 100 \text{ ms}$)

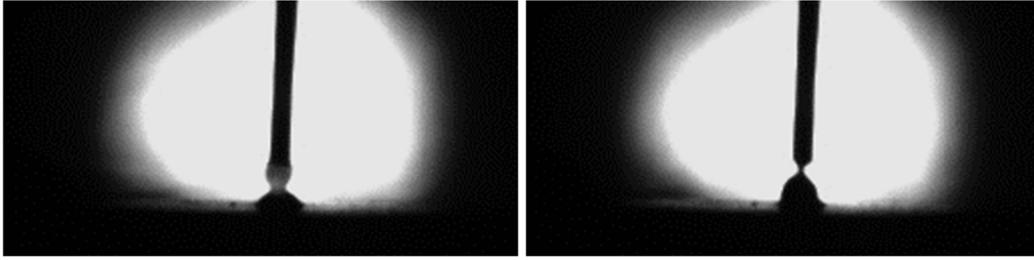
La figure 4.10 montre les images issues des enregistrements par caméra rapide du début et de la fin du premier court-circuit, pour des paramètres d'intensité d'amorçage (I_{ignition}) ou des durées de phase d'amorçage (t_{ignition}) de plus en plus élevées.



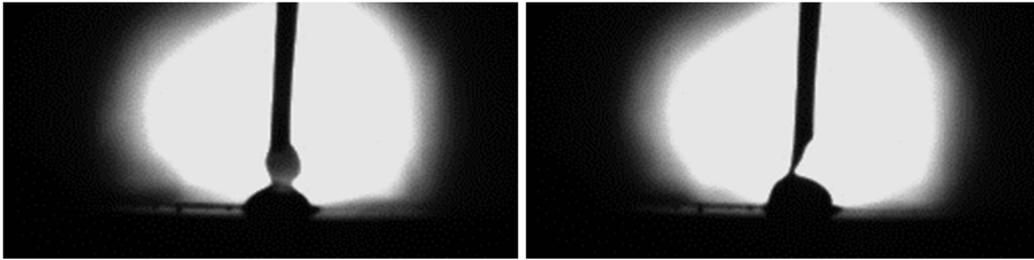
(a) $I_{\text{ignition}} = 60 \text{ A}$, $t_{\text{ignition}} = 15 \text{ ms}$



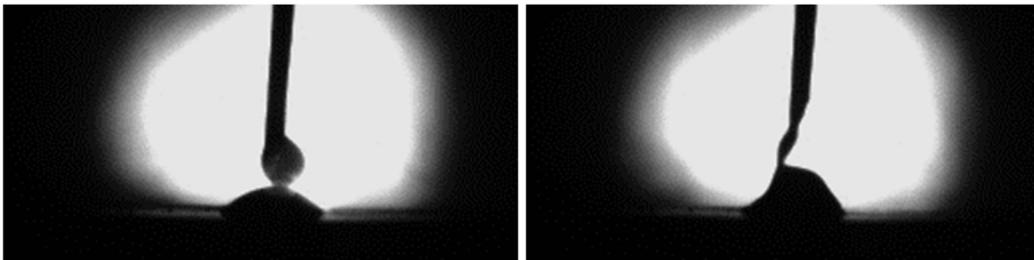
(b) $I_{\text{ignition}} = 100 \text{ A}$, $t_{\text{ignition}} = 15 \text{ ms}$



(c) $I_{\text{ignition}} = 200 \text{ A}$, $t_{\text{ignition}} = 15 \text{ ms}$



(d) $I_{\text{ignition}} = 200 \text{ A}$, $t_{\text{ignition}} = 50 \text{ ms}$



(e) $I_{\text{ignition}} = 200 \text{ A}$, $t_{\text{ignition}} = 100 \text{ ms}$

Figure 4.10 Profils des gouttes formées lors du début (à gauche) et de la fin (à droite) du premier court-circuit, pour différents paramètres d'amorçage

L'augmentation de l'intensité d'amorçage permet d'augmenter la fusion de l'extrémité du fil avant le premier court-circuit. Lorsque ce paramètre augmente jusqu'à 100 A, on n'observe pas de modification significative, même si la goutte formée à l'extrémité du fil avant le premier court-circuit est un peu plus grosse, ce qui permet d'avoir un étalement très légèrement supérieur à celui observé avec la valeur par défaut, de 60A, de ce paramètre. En revanche, lorsque ce paramètre atteint 200A, on doit dépasser le niveau d'intensité minimum correspondant au régime de transfert globulaire ou par pulvérisation axiale (cf. chapitre 1), car des gouttelettes se détachent pendant la phase d'amorçage, en nombre d'autant plus important que la durée de la phase d'amorçage (t_{ignition}) est élevée. Ces gouttes, qui possèdent une température élevée car elles sont en permanence bombardées par les électrons de l'arc, mouillent bien mieux le substrat que les gouttes déposées par court-circuit, cette phase sans arc produisant un refroidissement rapide du liquide. Lors du premier court-circuit qui suit cette phase d'amorçage, la goutte formée à l'extrémité du fil entre alors en contact avec une macro-goutte déjà formée par les gouttelettes projetées durant la première phase, et non plus avec le substrat solide, ce qui permet un meilleur mouillage (Figure 4.10.c-e). Cependant, dès le second ou troisième court-circuit, l'apport de chaleur étant plus limité que durant la phase d'amorçage, la ligne de contact à l'arrière de la macro-goutte se solidifie, et l'angle de mouillage augmente pour devenir supérieure à 90° , produisant le même effet d'aspiration que celui précédemment décrit (Figure 4.11.a). Lorsque les gouttelettes projetées pendant la phase d'amorçage forment une macro-goutte étendue ($I=200\text{A}$ et $t=100\text{ms}$), la ligne de contact et la base de la macro-

goutte se solidifie dès le premier court-circuit, et la nouvelle goutte déposée forme une nouvelle ligne de contact sur la macro-goutte solidifiée, faisant croître l'angle de mouillage avec l'arrivée de nouvelles gouttes, et produisant le phénomène d'aspiration dès que cet angle dépasse 90° (Figure 4.11.b).

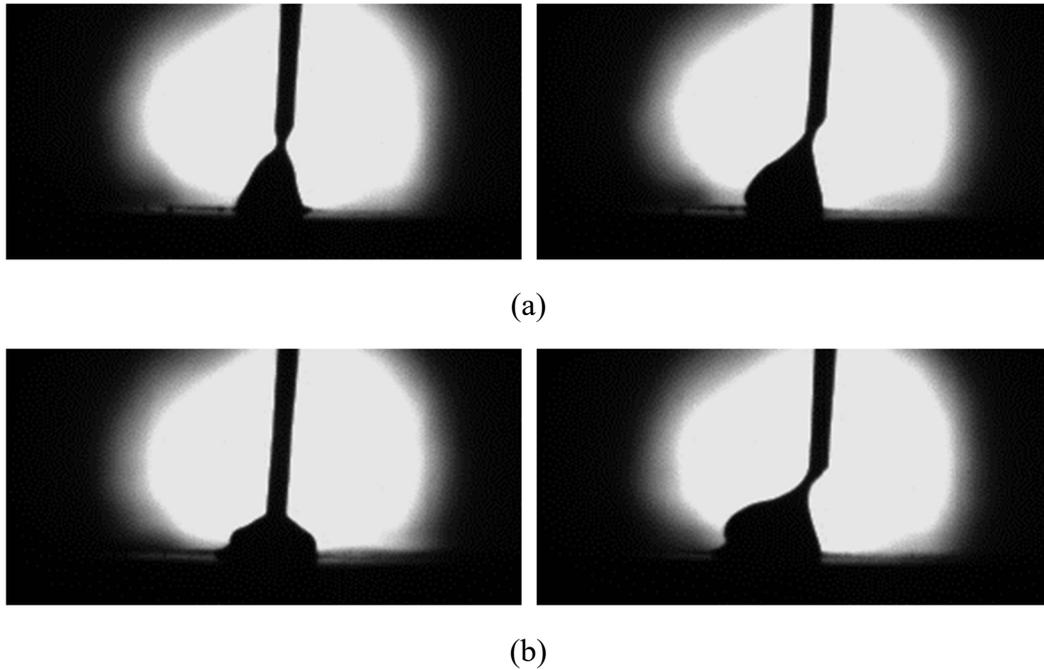


Figure 4.11 Evolution du profil des macro-gouttes au court des premiers court-circuit, (a) 200A, 50 ms, (b) 200A, 100 ms

Notons que lorsque les intensités et durées de la phase d'amorçage sont trop élevées, des projections peuvent se produire (Figure 4.12). Du fait de la perte d'une partie du métal fondu et de la quantité de chaleur qu'il contient, ces projections peuvent limiter l'échauffement, et favoriser la solidification de la ligne de contact.

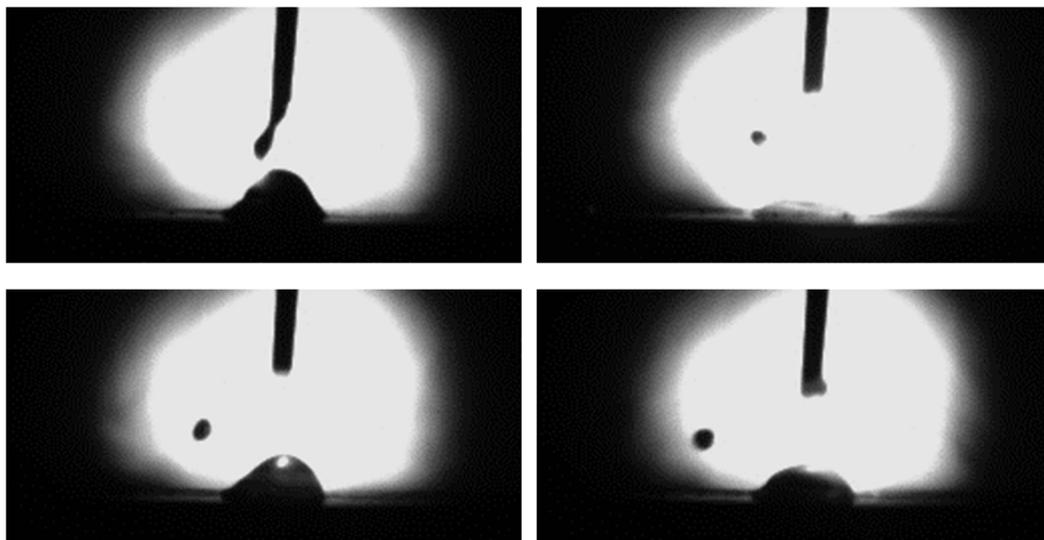


Figure 4.12 Projection de goutte de métal en fusion durant la phase d'amorçage ($I_{\text{ignition}} = 200 \text{ A}$, $t_{\text{ignition}} = 100 \text{ ms}$)

4.1.2.3 Utilisation de l'option « hotstart »

Le paramètre t_{hotstart} , fixé par défaut à zéro dans la synergie, peut aussi être augmenté pour modifier la phase d'amorçage. Ce paramètre permet de générer une montée progressive du courant, (Figure 4.13), qui fait grossir la goutte à l'extrémité du fil, jusqu'à ce qu'elle atteigne une taille suffisante pour produire son détachement sous l'effet combiné de la gravité et des forces de Lorentz.

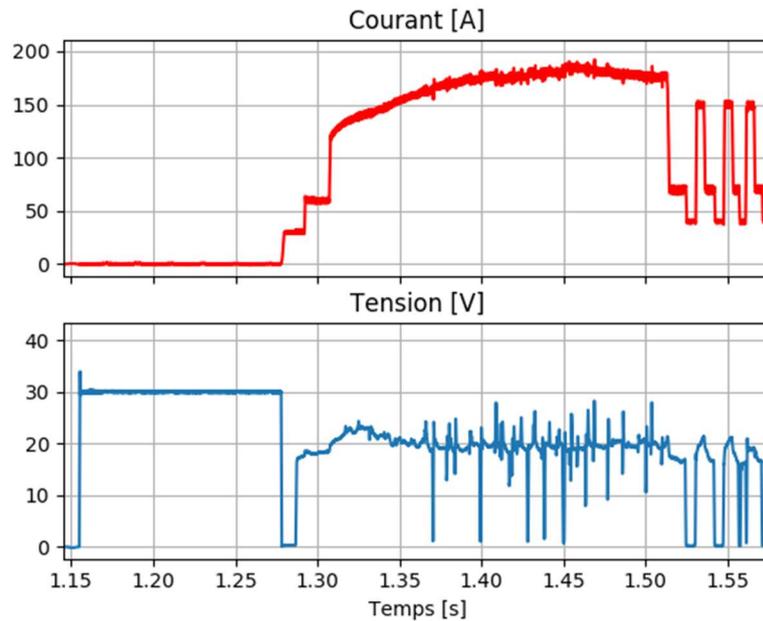
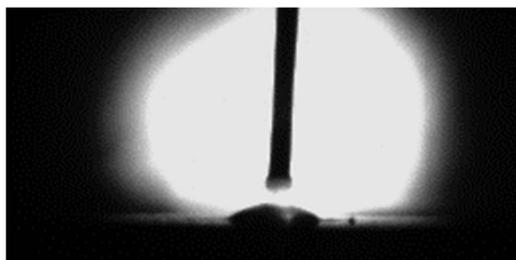
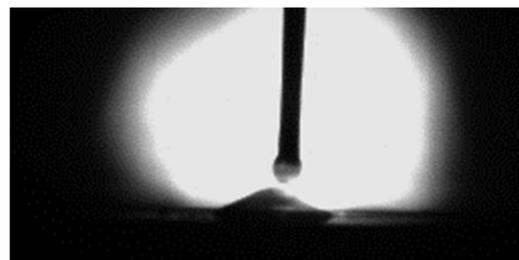


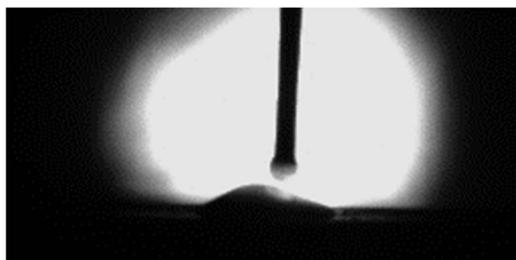
Figure 4.13 Evolution des signaux électriques durant la phase d'amorçage avec l'option « hotstart » ($t_{\text{hotstart}} = 200 \text{ ms}$)



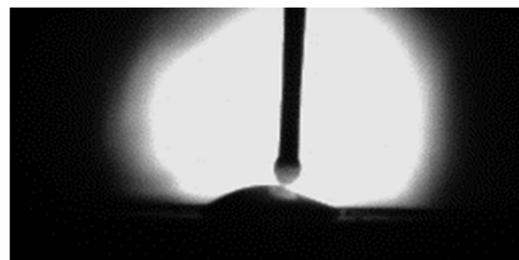
(a) $t_{\text{hotstart}} = 50 \text{ ms}$, $U_{\text{hotstart}} = 20 \text{ V}$



(b) $t_{\text{hotstart}} = 100 \text{ ms}$, $U_{\text{hotstart}} = 20 \text{ V}$



(c) $t_{\text{hotstart}} = 150 \text{ ms}$, $U_{\text{hotstart}} = 20 \text{ V}$



(d) $t_{\text{hotstart}} = 200 \text{ ms}$, $U_{\text{hotstart}} = 10 \text{ V}$

Figure 4.14 Profil de gouttes formées juste avant le premier court-circuit, pour différentes valeurs de paramètre hotstart

La quantité de métal liquide déposé avant le premier court-circuit augmente logiquement avec l'augmentation du paramètre t_{hotstart} (Figure 4.14), augmentant l'échauffement de la tôle et favorisant le mouillage, comme lorsque les paramètres d'amorçage I_{ignition} et t_{ignition} augmentent.

La hauteur d'arc étant généralement plus faible que celle observée avec le cycle d'amorçage standard (on peut la contrôler à l'aide du paramètre U_{hotstart}), le premier court-circuit se produit alors plus tôt après la phase d'amorçage terminée, ce qui doit limiter le refroidissement de la macro-goutte déjà formée avant le premier contact fil-goutte, et favoriser le mouillage des nouvelles gouttes déposées pendant les premiers court-circuit. Cependant, si la durée de la phase hotstart est trop faible, la quantité de chaleur transmise par l'intermédiaire des gouttelettes déposées durant le cycle hotstart est limitée, et l'arrière de la macro-goutte déposée avant le premier court-circuit est déjà solidifiée au moment du premier contact. Les nouvelles gouttes déposées lors des court-circuit présentent alors un mauvais mouillage, l'arrière se solidifiant très tôt au contact du métal solide déjà refroidi, formant un angle de mouillage supérieur à 90° , ce qui reproduit le phénomène d'augmentation de la hauteur de goutte déposée et d'aspiration du métal liquide conduisant au défaut déjà décrit, même s'il est un peu atténué (Figure 4.15.a).

Lorsque la durée de la phase hotstart atteint 100 ms, la quantité de métal liquide déposée et la quantité de chaleur associée sont plus importantes, maintenant une température du substrat plus élevée, ce qui permet un meilleur mouillage des gouttes suivantes, avec un angle de mouillage de 90° environ (Figure 4.15.b). Si le paramètre augmente encore, la solidification de l'arrière de la goutte est plus lente, permettant un meilleur étalement du dépôt, et des angles de mouillage inférieurs à 90° (Figure 15.c). Le phénomène d'aspiration ne se produit plus alors, l'accroissement de hauteur du dépôt produisant, selon la loi de Laplace, une augmentation de la pression, ce qui favorise un étalement régulier du liquide dans toute la longueur du cordon déjà déposé. En revanche, les puissances moyennes produites par la phase d'amorçage avec l'option hotstart, tout comme pour la phase d'amorçage classique d'ailleurs, étant plus élevées que les puissances moyennes associées à la phase de dépôt, les vitesses de fusion du fil sont plus grandes, ce qui conduit à une quantité de matière déposée par seconde plus élevée, et donc des cordons qui sont plus larges au début, si leur hauteur est sensiblement identique à celle du cordon en régime stationnaire (Figure 4.16).

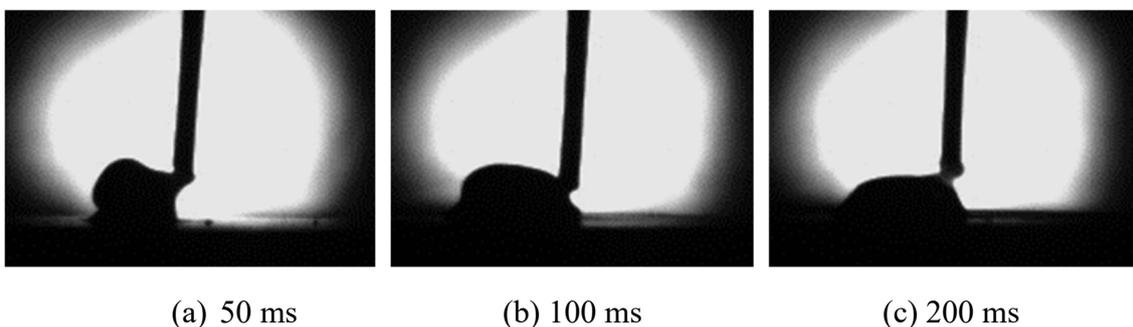


Figure 4.15 Profil de la macro-goutte formée après quelques dizaines de court-circuit pour différentes valeurs du paramètre t_{hotstart}

Afin de tenter de réduire cette accumulation de matière, le paramètre U_{hotstart} a été diminué, de manière à réduire la hauteur d'arc. Ceci permet de réduire un peu la quantité de métal déposé à l'amorçage, en diminuant la puissance de l'arc, et en même temps de réduire le temps entre la fin de la phase d'amorçage et le premier court-circuit, limitant donc le refroidissement de la macro-goutte liquide déjà formée avant le premier court-circuit. Cette modification permet de réduire un peu la sur-largeur en début de cordon, sans modifier la hauteur, donc améliore un

peu la géométrie. En revanche, le régime de transfert est plus instable, quelques court-circuits se produisant parfois lorsque les gouttes grossissent et entrent en contact avec la surface du bain déposé, qui oscille sous la pression d'arc, ce qui provoque des projections.

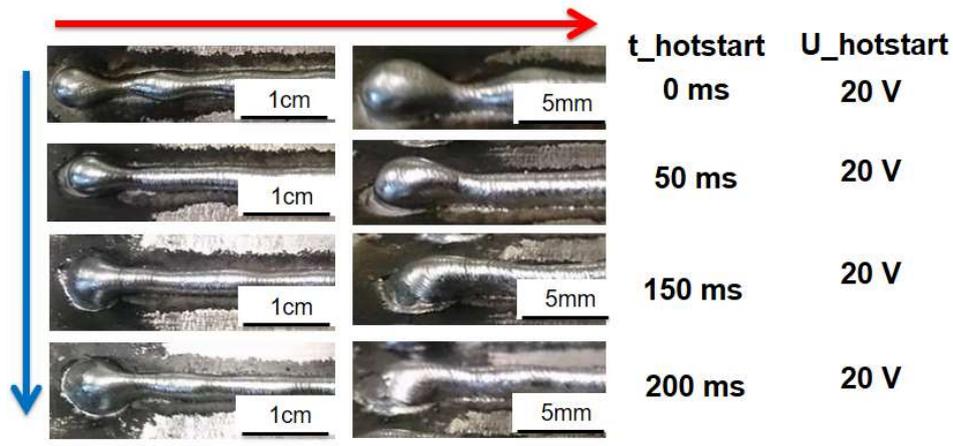


Figure 4.16 Evolution de la géométrie du début de cordon en fonction de la durée de la phase d'amorçage avec l'option hotstart

4.1.2.4 Utilisation du mode « deux temps spécial »

Une autre solution pouvant permettre de limiter le défaut en début de cordon consiste à utiliser une option disponible sur le générateur de soudage CMT, appelée « 2 temps spécial ». Cette option permet de modifier la forme d'onde du courant lors des premiers et/ou derniers cycles de dépôt d'un cordon. Cette option ne peut cependant pas être combinée au cycle d'amorçage avec les paramètres « hotstart » activés. L'option 2 temps spécial permet d'imposer des impulsions de courant (correspondant à la phase « boost » du cycle CMT) différentes pendant un certain temps, avant de démarrer le cycle CMT standard. Il est possible de régler l'intensité I_s de ces pics et la durée totale t_s de cette phase, la durée des pics étant imposée à environ 30 ms (Figures 4.17-4.18). Les mêmes caractéristiques peuvent être modifiées en fin de dépôt.



Figure 4.17 : Evolution du courant maximal (durant les phases d'arc chaud) lors des phases d'amorçage et d'arrêt avec l'option « 2 temps spécial »

Cette option permet d'améliorer le mouillage, si l'intensité de pic est suffisante, mais entraîne aussi une augmentation du taux de dépôt, les puissances moyennes étant plus élevées que pendant le cycle CMT « normal ». Une optimisation de l'intensité du cycle permettant de déposer des gouttes plus chaudes, grâce à un temps d'arc plus long, mais des taux de dépôt sensiblement équivalents, peut permettre de déduire ce défaut. Cependant, si l'intensité devient trop faible (inférieure à 120 A environ), la solidification de la ligne d'arrêt de la macro-goutte se produit plus tôt, et le défaut de surépaisseur réapparaît en début de cordon. Lorsque ce

paramètre devient très inférieur à 100 A, le défaut est même amplifié, la macro-goutte formée par les premières gouttes déposées se solidifiant totalement, conduisant à l'apparition d'une seconde macro-goutte, produisant un second défaut avant le démarrage d'un cordon plus régulier (Figures 4.19 et 4.20).

Il ne semble donc pas possible d'obtenir un début de cordon ayant à la fois une hauteur et une largeur identiques au reste du cordon avec cette option.

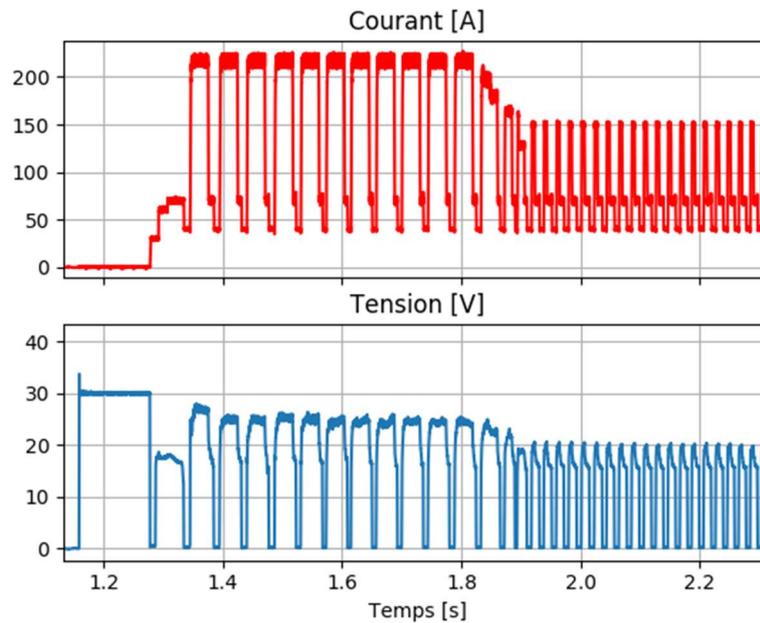


Figure 4.18 Forme d'onde du courant et de la tension durant la phase de démarrage de cordon avec l'option « 2 temps spécial » (I_s réglé à 150%)

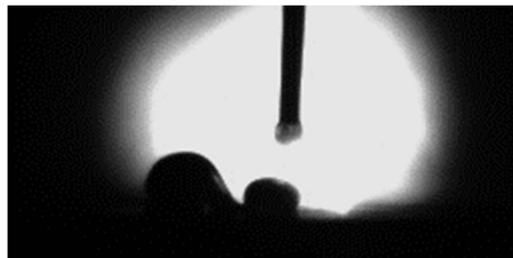


Figure 4.19 Défaut formé lorsque l'intensité de pic durant la phase « 2 temps spécial » est trop faible (75A)

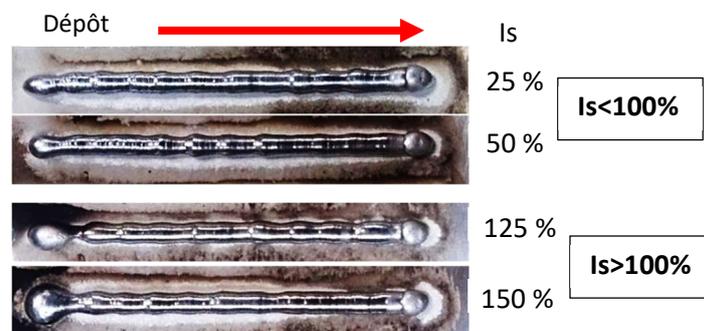


Figure 4.20 Aspect des cordons obtenus avec l'option 2 temps spécial

4.1.2.5 Utilisation du mode « CMT advanced »

Finalement, une dernière option du générateur CMT est testée, l'inversion de polarité durant les premiers cycles du dépôt. Après le premier court-circuit, effectué en polarité positive (le fil électrode est relié à la polarité positive du générateur), la polarité est inversée pour un nombre défini de cycles (Figure 4.21), et le transfert de gouttes se poursuit de la même manière. Cette inversion de polarité, en inversant le sens de déplacement des électrons dans l'arc, peut favoriser l'échauffement du substrat, celui-ci recevant l'énergie de condensation des électrons. Cependant, les résultats n'ont pas montré d'amélioration significative, peut-être en raison de la trop courte durée des phases d'arc électrique entre les phases de court-circuit, ne permettant pas un échauffement suffisant du substrat, qui se refroidit alors de la même façon qu'en polarité positive. De plus, le mouillage de la macro-goutte à l'avant est très faible, sans doute du fait de la présence d'oxydes en surface en quantité plus importante qu'en polarité positive, car l'effet de décapage cathodique n'intervient pas.

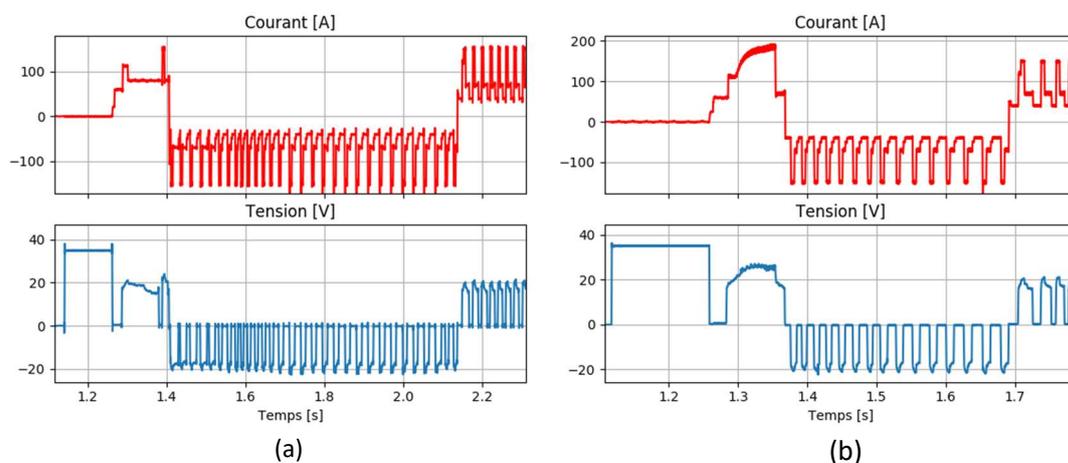


Figure 4.21 Forme d'onde du courant et de la tension durant la phase de démarrage de cordon avec le mode « advanced », (a) sans Hotstart, (b) avec Hotstart

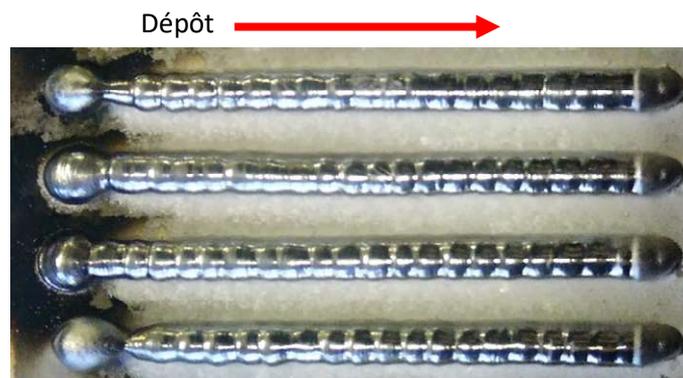


Figure 4.22 Aspect des cordons obtenus avec le mode CMT Advanced

4.1.3 Irrégularités de forme périodiques du cordon

Si la vitesse d'avance devient trop importante pendant le soudage, des défauts périodiques apparaissent, donnant un cordon formant une série de bosses et de creux (figure 4.23). Ce défaut, appelé humping, est bien connu en soudage, bien que son origine ne soit pas encore bien expliquée. Ce défaut n'apparaissant en général que pour des intensités et vitesses d'avance élevées, il est possible de l'éliminer en réduisant la vitesse d'avance, ou en modifiant un peu

l'énergie. Ce défaut ayant tendance à s'amplifier lors du dépôt de cordons multicouches, il sera à nouveau discuté dans le dernier chapitre de ce mémoire.



Figure 4.23 Défaut de humping observé pour de fortes énergies et de grandes vitesses de déplacement

4.2 Influence des paramètres de la synergie CMT sur la géométrie des cordons

Les paragraphes précédents ont montré qu'il était possible d'améliorer significativement les défauts formés en début de cordon grâce à l'optimisation des paramètres contrôlant le cycle d'amorçage. Bien que la partie centrale des cordons soit beaucoup plus régulière, une certaine dispersion sur la largeur et la hauteur des cordons a pu être observée lorsque l'on utilise les paramètres standard préprogrammés dans le générateur CMT. Dans le but de mieux comprendre l'influence des différents paramètres du procédé CMT sur les mécanismes de transfert de chaleur et de matière durant le dépôt, afin de tenter de minimiser les irrégularités géométriques observées avec les paramètres procédé standards, plusieurs cordons ont été réalisés en faisant varier la valeur de chaque paramètre procédé autour des valeurs de synergie préprogrammées. Sur les 13 paramètres réglables du procédé CMT, seuls les 8 paramètres du cycle de soudage (cf. tableau 2.5 du Chapitre 2) sont étudiés, les autres paramètres ayant uniquement une influence sur les phases d'amorçage et de fin de cordon. La signification des 8 paramètres étudiés est rappelée dans la figure 4.24. Parmi ces différents paramètres, cinq contrôlent la phase « d'arc chaud » ou « boost » du cycle CMT (paramètres 4 à 8), 2 contrôlent la phase « d'attente », ou phase « d'arc froid » (paramètres 1 et 2), et un seul contrôle la phase de court-circuit (paramètre 3).

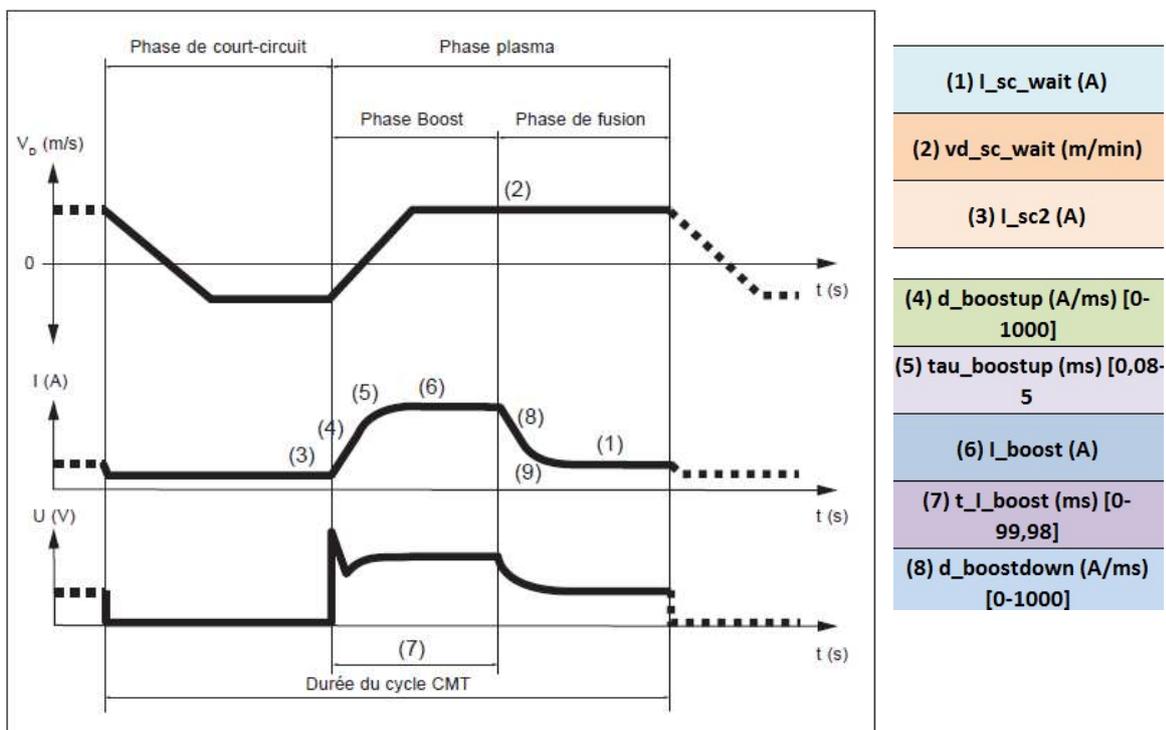


Figure 4.24 Aperçu des 8 paramètres caractérisant le cycle de soudage en CMT

4.2.1 Mise en évidence des valeurs limites de chaque paramètre

Les points de fonctionnement 5 et 6 (cf. Tableau 3.1 du chapitre 3) ont été choisis comme références. Des cordons d'une longueur de 70mm sont déposés, à une vitesse d'avance de 900 mm/min. Dans un premier temps, les 8 paramètres du cycle de soudage CMT sont successivement modifiés autour des valeurs standards correspondant aux points de fonctionnement 5 et 6, dans des plages de variation relativement larges, de manière à observer qualitativement leur effet sur la géométrie du dépôt, et identifier les valeurs limites de chaque paramètre. La figure 4.25 montre l'aspect des cordons obtenus lorsque l'on fait varier chaque paramètre en partant des valeurs du point de fonctionnement 5, repérées en vert. On peut ainsi observer que la plupart des paramètres a un effet sur la géométrie du dépôt, en particulier sa largeur, et que de fortes irrégularités, voire des cordons discontinus, apparaissent lorsque les valeurs sont trop élevées ou trop basses.

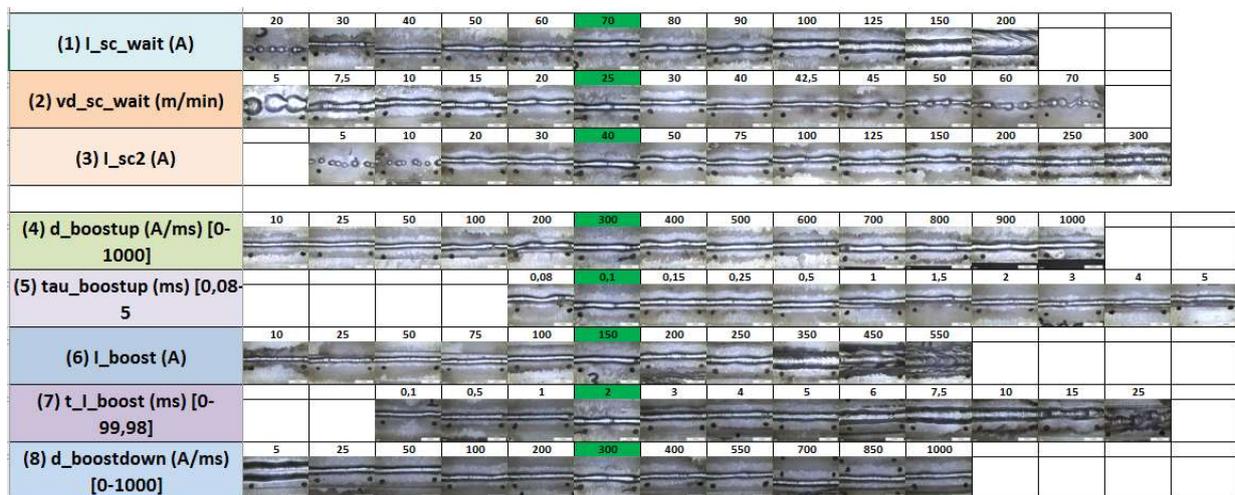


Figure 4.25 Effet de la variation des 8 paramètres caractérisant le cycle CMT sur l'aspect des cordons obtenus.

Ces observations qualitatives ne sont cependant pas suffisantes pour comprendre comment chaque paramètre agit sur le transfert de matière et de chaleur. Dans la suite, nous avons donc mené une étude plus approfondie de l'influence de chaque paramètre sur les formes d'onde de courant et de tension et les caractéristiques énergétiques associées, et sur les caractéristiques géométriques des dépôts obtenus. Des données quantitatives plus détaillées sont aussi rassemblées dans l'annexe 2.

4.2.2 Influence des paramètres de la phase d'arc chaud

La phase d'arc chaud ou boost du cycle CMT est la phase durant laquelle la majeure partie de l'apport énergétique est fournie. C'est pour cette raison qu'on l'appelle parfois la « phase chaude » du cycle. Durant cette phase, une impulsion de courant d'intensité I_{boost} est fournie, pendant une durée t_{boost} , permettant la fusion de l'extrémité du fil métallique, formant une goutte de métal liquide qui sera déposée sur le substrat lors de la phase de court-circuit. La phase boost est contrôlée par cinq paramètres, dont l'effet est étudié dans les paragraphes suivants.

4.2.2.1 Influence du paramètre $d_{boostup}$

Ce paramètre caractérise l'augmentation linéaire du courant au début de la phase boost, au moment de la rupture du court-circuit. Un aperçu de l'évolution des formes d'onde de courant et de tension avec différentes valeurs de cette variable est donné dans la figure 4.26. Une augmentation de la valeur de ce paramètre au-delà de 300 A/ms, valeur standard de la synergie

pour les points de fonctionnement 5 et 6, n'a quasiment pas d'effet sur les formes d'onde, tout comme sur l'aspect des cordons déposés. En revanche, une diminution de ce paramètre réduit la durée de la phase boost, voire la supprime totalement, la valeur de courant de la phase boost n'étant pas atteinte avant la fin de cette phase, dont la durée est relativement courte. Le cycle CMT est alors uniquement constitué d'une phase de court-circuit de faible intensité (40 A), et d'une phase « d'arc froid » comprenant une montée plus ou moins rapide du courant puis une stabilisation du courant à 70 A, valeur de l'intensité de la phase d'arc froid.

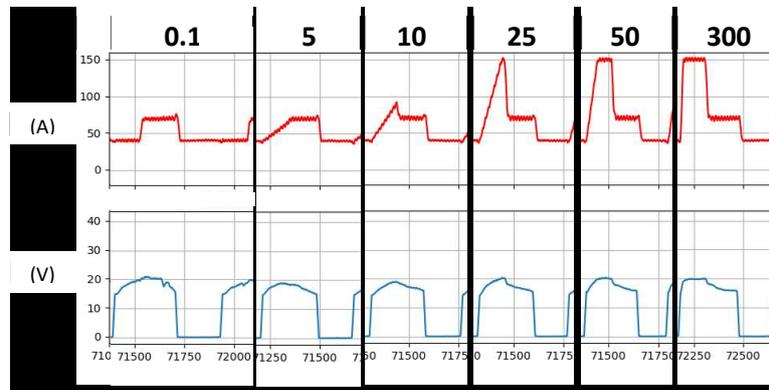


Figure 4.26 Evolution des formes d'onde de courant et de tension avec la modification du paramètre $d_{boostup}$ (en A/ms) pour le point 5 de la synergie

La figure 4.27 montre l'évolution de la durée des différentes phases, découpées selon l'algorithme présenté dans le chapitre 3, en fonction de la valeur du paramètre $d_{boostup}$. Pour des valeurs inférieures à 10 A/ms, on voit bien que la phase boost disparaît, alors que sa durée augmente de manière continue au-dessus de cette valeur. La durée de la phase de court-circuit n'est pas modifiée par ce paramètre, tandis que la phase d'arc froid augmente très légèrement avec la disparition de la phase boost.

En revanche, les niveaux d'énergies générées sont fortement affectés par la disparition de la phase boost (Figure 4.28). L'énergie totale produite au cours d'un cycle CMT diminue plus fortement pour le point de fonctionnement 6 que pour le point 5 lorsque le paramètre $d_{boostup}$ diminue, car l'énergie produite durant la phase boost y est plus élevée, alors que celle correspondant à la phase d'arc froid est au contraire plus faible, cette phase étant plus courte en raison d'une vitesse de descente du fil plus élevée.

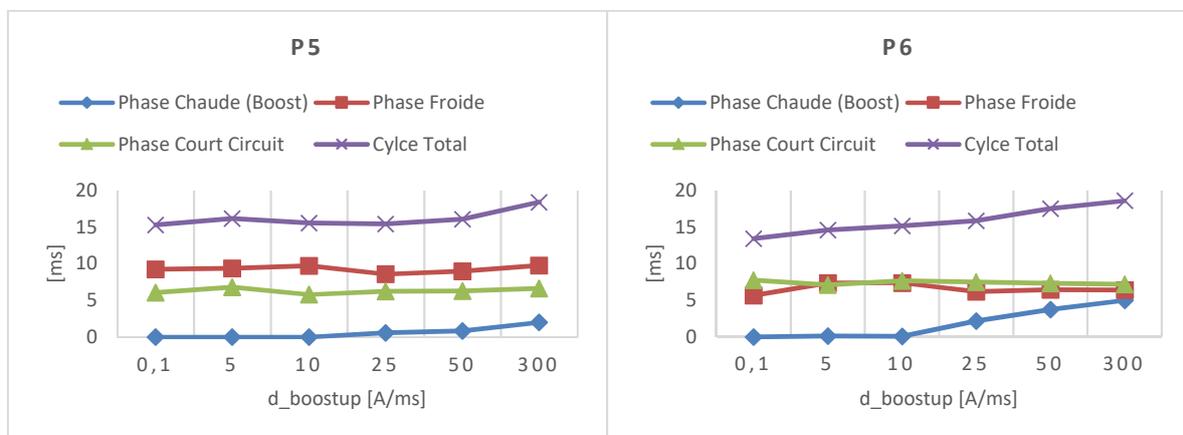


Figure 4.27 Evolution de la durée des phases du cycle CMT en fonction de la valeur du paramètre $d_{boostup}$

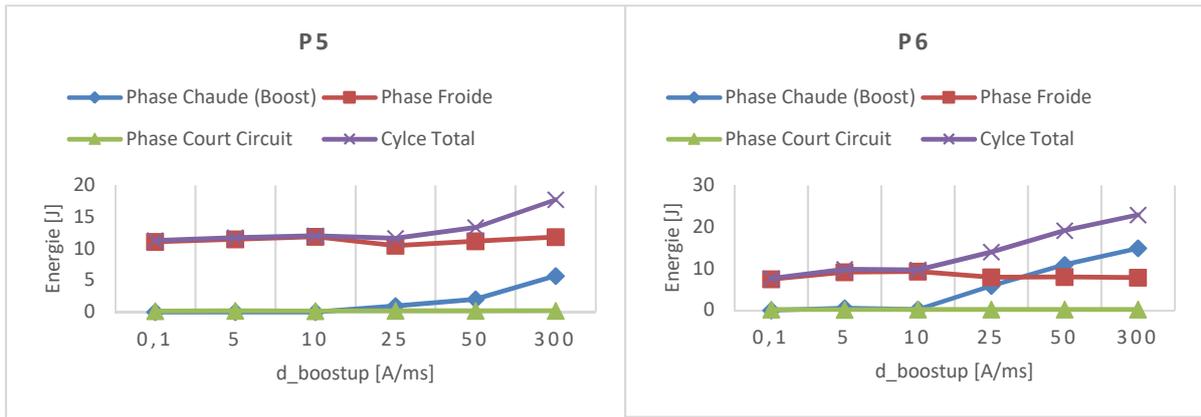


Figure 4.28 Evolution de l'énergie générée par phase du cycle CMT en fonction de la valeur du paramètre $d_{boostup}$

La diminution des énergies avec la diminution du paramètres $d_{boostup}$ produit logiquement une diminution du taux de dépôt de matière, qui suit relativement bien l'évolution de la puissance électrique moyenne sur un cycle (Figure 4.29). Notons que la caractéristique du transfert qui varie le plus est le poids moyen de chaque goutte déposée. Lorsque le paramètre $d_{boostup}$ diminue, la fréquence de transfert des gouttes augmente un peu (la durée totale du cycle diminue, cf. Figure 4.27), mais le poids de chaque goutte diminue fortement, conduisant à un taux de dépôt plus faible.

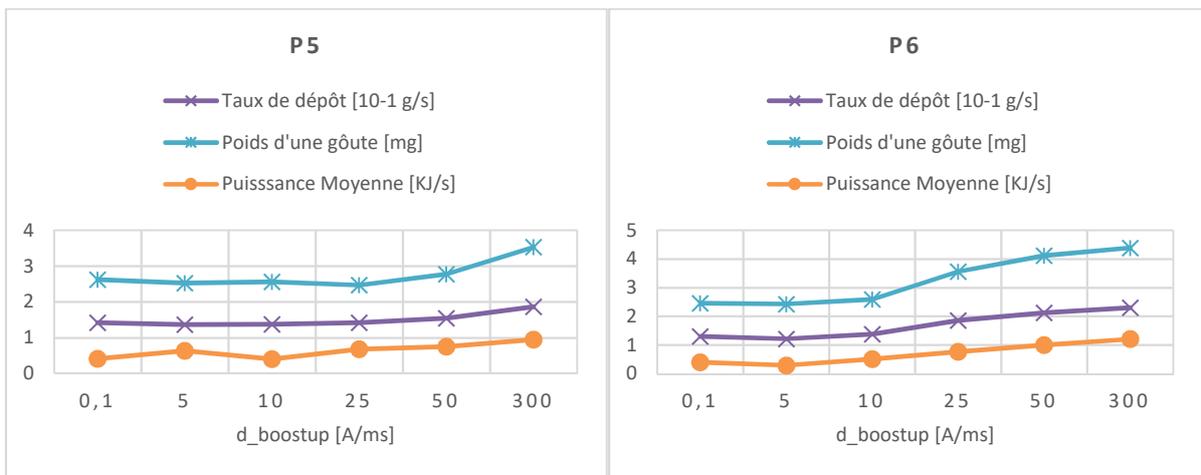


Figure 4.29 Evolution du taux de dépôt, du poids moyen des gouttes déposées et de l'énergie moyenne en fonction de la valeur du paramètre $d_{boostup}$

Si l'on compare la géométrie des cordons (Figure 4.30), la diminution du paramètre $d_{boostup}$ ne produit qu'une légère variation de hauteur, mais une diminution assez importante de la largeur. Le cordon s'étale donc moins sur le substrat, ce qui peut être associé à la plus faible énergie transmise au substrat, qui s'échauffe moins, réduisant le mouillage du dépôt liquide. La régularité géométrique des cordons, que l'on peut estimer à partir des écart-types indiqués sur le figure 4.30, ne semble pas pouvoir être améliorée en diminuant la valeur du paramètre $d_{boostup}$, même si une légère amélioration de la régularité de la hauteur du cordon est observée par rapport au point de fonctionnement 5 pour des valeurs comprises entre 25 et 50 A/ms.

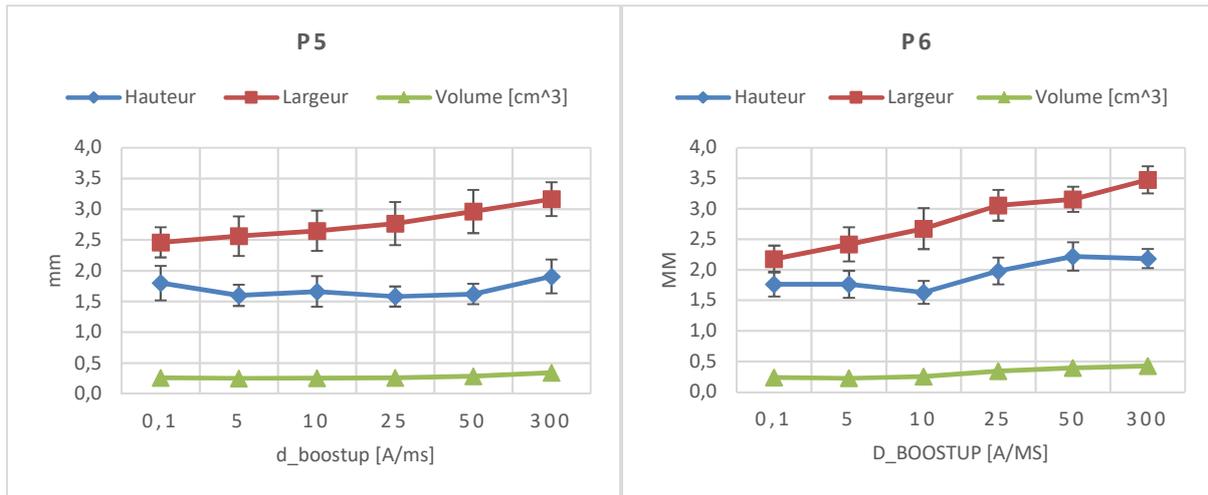


Figure 4.30 Evolution des caractéristiques géométriques des cordons en fonction de la valeur du paramètre $d_{boostup}$

4.2.2.2 Influence du paramètre $\tau_{boostup}$

Ce paramètre caractérise la variation non linéaire de courant pour atteindre la valeur du courant de la phase boost. Tout comme le paramètre précédent, la variation de ce paramètre modifie la durée de la phase boost (Figure 4.31). Lorsque sa valeur est très faible (inférieure à 0,1 ms, valeur standard de la synergie), l'augmentation du courant à la fin de la phase de court-circuit est presque linéaire, jusqu'à ce que la valeur de courant de la phase boost soit atteinte. En revanche, lorsque la valeur de ce paramètre augmente, la hausse du courant est de moins en moins linéaire, retardant d'autant le moment où le courant atteint la valeur de consigne I_{boost} de la phase boost. Si ce paramètre est réglé à une valeur supérieure à 2 ms environ, l'intensité I_{boost} n'est pas atteinte avant la fin de la phase boost (Figure 4.31).

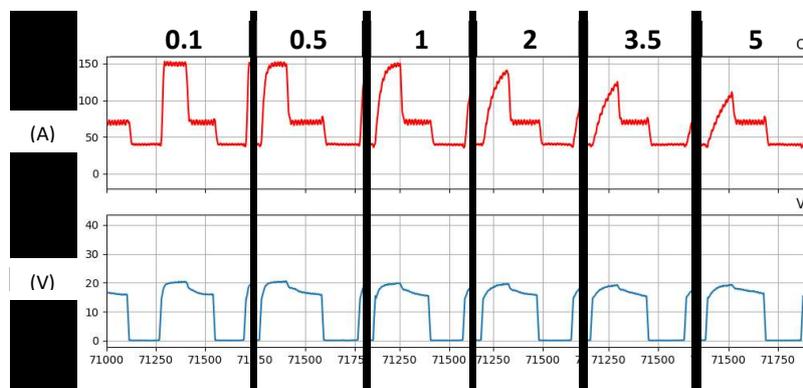


Figure 4.31 Evolution des formes d'onde de courant et de tension avec la modification du paramètre $\tau_{boostup}$

Comme on peut le voir sur la figure 4.32, l'augmentation de la valeur de $\tau_{boostup}$ réduit progressivement la durée de la phase chaude, jusqu'à la faire disparaître complètement. La durée de la phase d'arc froid augmente quant à elle légèrement, mais sans compenser la diminution de la durée de la phase chaude, ce qui fait que la durée totale du cycle CMT diminue. Notons que ce dernier résultat est en partie lié à l'algorithme de découpage du cycle en phases, qui ne tient pas compte de certains points situés entre la phase de court-circuit et la phase boost (Figure 3.31).

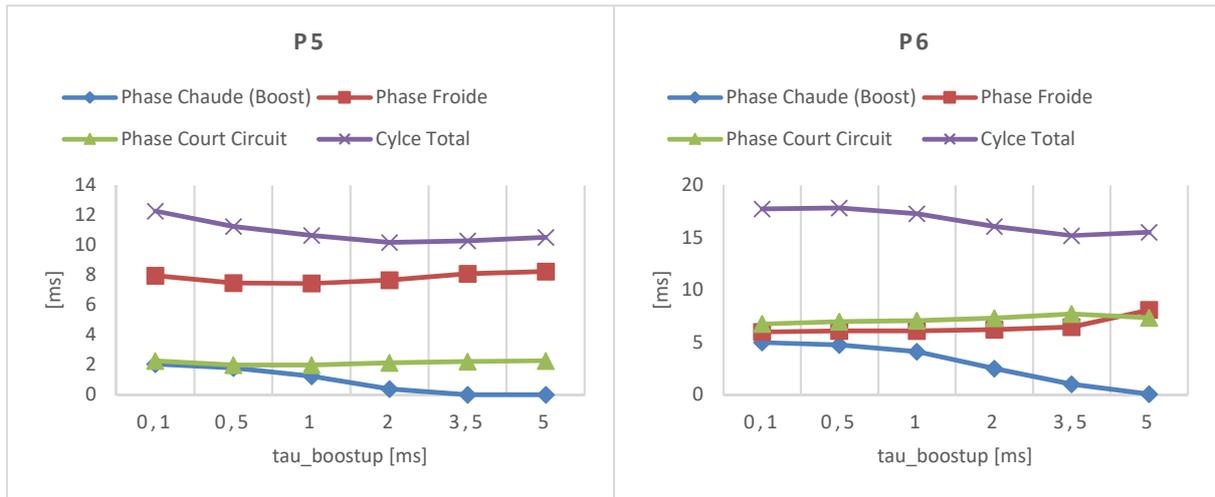


Figure 4.32 Evolution de la durée des phases du cycle CMT en fonction de la valeur du paramètre $\tau_{boostup}$

Ces modifications des durées des différentes phases du cycle CMT ont évidemment des répercussions sur les énergies produites, l'énergie totale diminuant sous l'effet de la diminution de l'énergie de la phase chaude, qui n'est pas compensée par la légère augmentation de l'énergie de la phase d'arc froid (Figure 4.33). Toutefois, la valeur minimale atteinte, égale à environ 10 J pour le point de fonctionnement 5, semble encore suffisante pour former un dépôt continu (Figure 4.25).

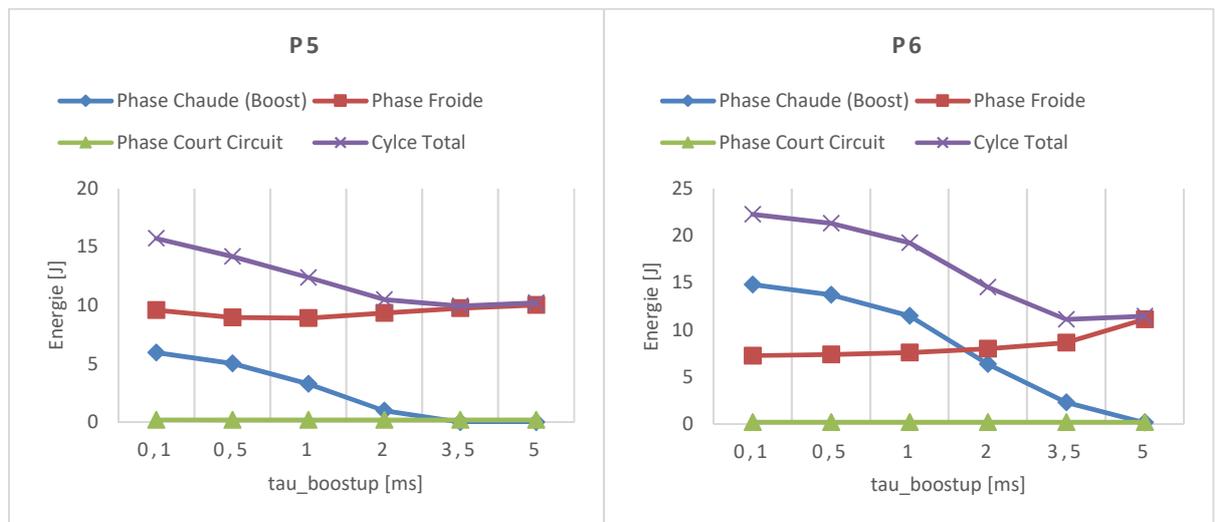


Figure 4.33 Evolution de l'énergie générée par phase du cycle CMT en fonction de la valeur du paramètre $\tau_{boostup}$

Si l'on compare l'évolution de la puissance moyenne et du taux de dépôt, ces deux grandeurs suivent logiquement les mêmes tendances, avec une diminution lorsque le paramètre $\tau_{boostup}$ augmente (Figure 4.34). Le poids moyen des gouttes déposées décroît quant à lui, surtout pour le point de fonctionnement 6, où il passe de 3,9 mg à 2,8 mg.

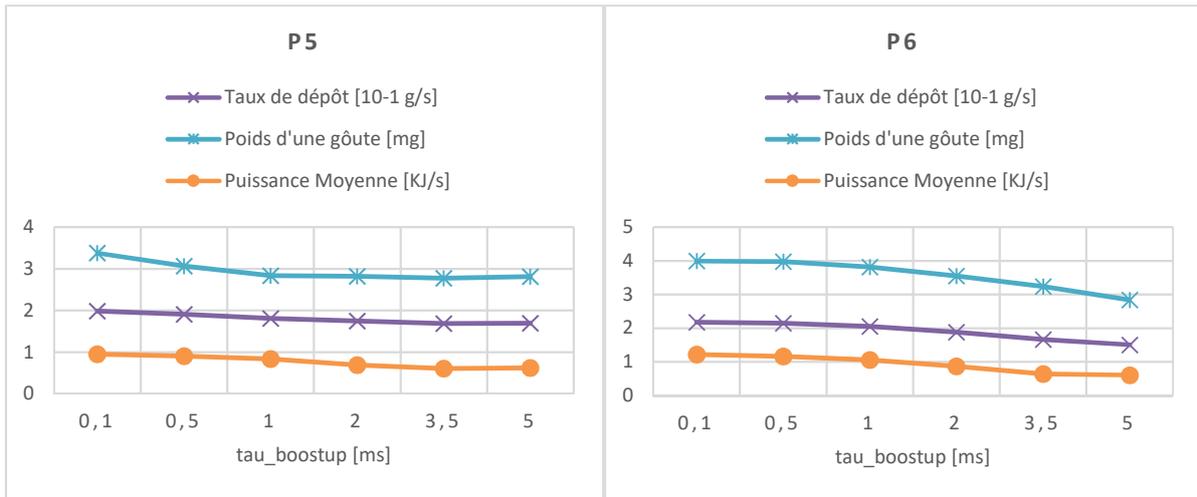


Figure 4.34 Evolution du taux de dépôt, du poids moyen des gouttes déposées et de l'énergie moyenne en fonction de la valeur du paramètre tau_boostup

La variation du paramètre tau_boostup ne modifie pas significativement la géométrie des cordons obtenus avec le point de fonctionnement 5 (Figure 4.35). En revanche, les cordons obtenus avec le point 6 montrent de légères variations géométriques, avec une faible diminution de la largeur et du volume des cordons avec l'augmentation de la valeur du paramètre tau_boostup. On observe également une diminution des écart-types, témoignant d'une amélioration de la régularité des cordons, lorsque le paramètre augmente un peu.

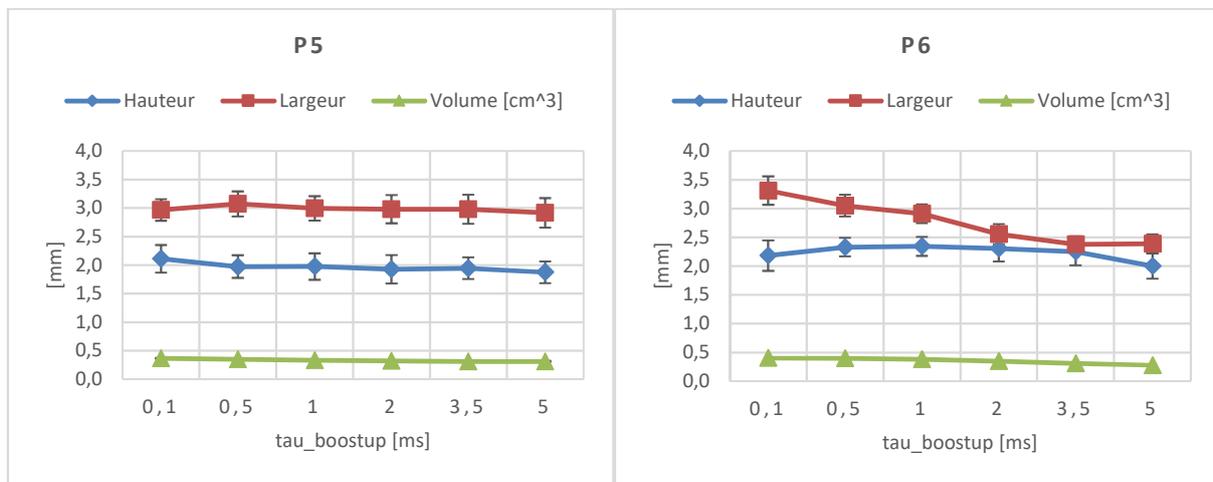


Figure 4.35 Evolution des caractéristiques géométriques des cordons en fonction de la valeur du paramètre tau_boostup

4.2.2.3 Influence du paramètre I_boost

Ce paramètre correspond à la valeur de consigne du courant pendant la phase boost (Figure 4.36). C'est probablement le paramètre le plus important avec le paramètre t_I_boost. C'est en effet principalement durant la phase boost, pendant laquelle l'intensité de l'arc électrique est la plus élevée, que l'extrémité du fil d'apport s'échauffe et fond. Les cordons montrent logiquement un dépôt de matière et un mouillage plus importants lorsqu'on augmente la valeur de I_boost (Figure 4.25). Notons qu'au-delà de 350 A, le cordon présente une forme irrégulière et « brûlée » (noircissement de la surface), ce qui semble indiquer une vaporisation importante du métal. Cette évolution peut s'expliquer par un changement de régime de transfert de métal liquide, qui ne se produit plus uniquement lors des court-circuit contrôlés propres au procédé

CMT, mais aussi par transfert de fines gouttelettes pendant les phases boost, du fait des intensités élevées (régime de transfert par « pulvérisation axiale »).

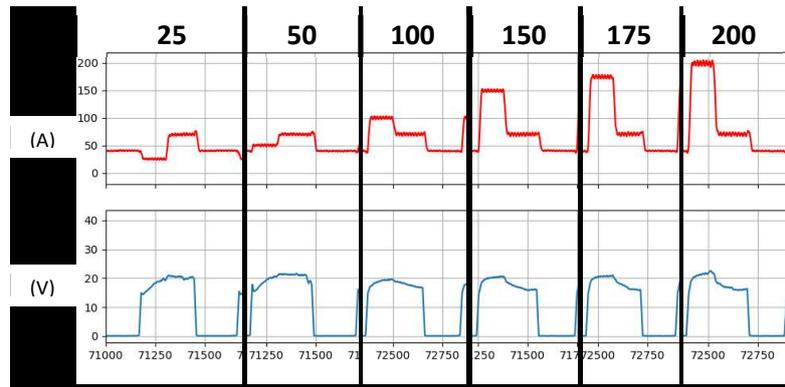


Figure 4.36 Evolution des formes d'onde de courant et de tension avec la modification du paramètre I_{boost}

La durée des phases reste relativement constante lorsque le paramètre I_{boost} augmente, avec toutefois une légère diminution de la durée de la phase d'arc froid (Figure 4.37), due au fait que la goutte formée pendant la phase boost devenant plus grosse avec l'augmentation du courant, elle entre plus rapidement en contact avec le substrat. La durée des phases de court-circuit est aussi un peu réduite, ce qui peut s'expliquer par une température des gouttes déposées plus élevée, qui réduit la viscosité du métal et favorise ainsi le détachement du fil.

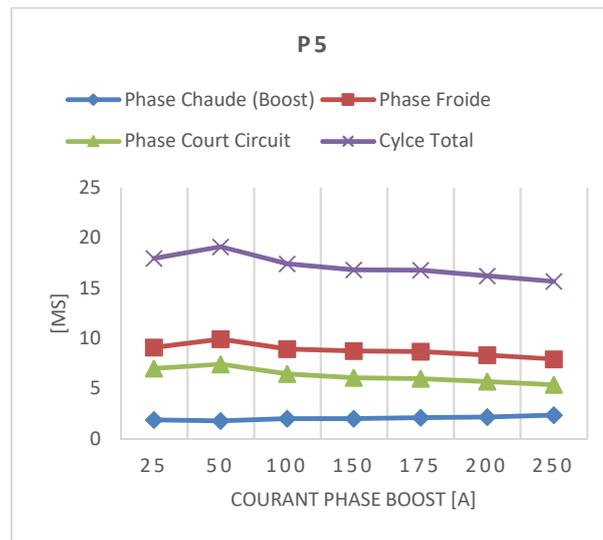


Figure 4.37 Evolution de la durée des phases du cycle CMT en fonction de la valeur du paramètre I_{boost} (point de fonctionnement 5)

Evidemment l'énergie apportée par le cycle CMT est fortement modifiée, du fait principalement de l'augmentation de la puissance de la phase chaude (Figure 4.38). Le taux de dépôt, ainsi que le poids moyen des gouttes déposées augmente aussi de manière significative (Figure 4.39).

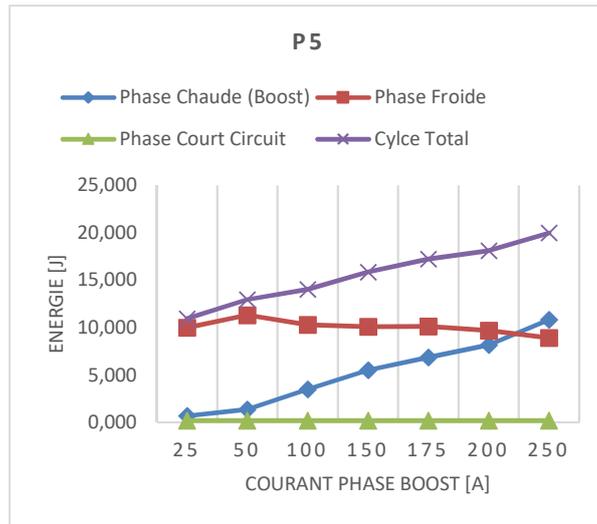


Figure 4.38 Evolution de l'énergie générée par phase du cycle CMT en fonction de la valeur du paramètre I_{boost} (point de fonctionnement 5)

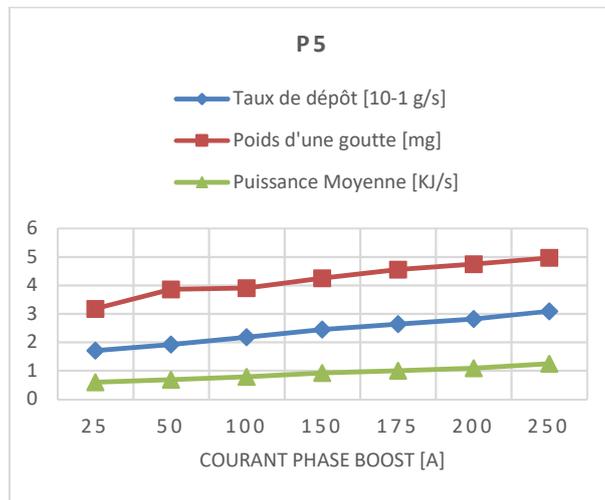


Figure 4.39 Evolution du taux de dépôt, du poids moyen des gouttes déposées et de l'énergie moyenne en fonction de la valeur du paramètre I_{boost} (point de fonctionnement 5)

La géométrie des dépôts est également fortement modifiée par ce paramètre (Figure 4.40). L'augmentation de I_{boost} entraîne en effet l'accroissement à la fois de la hauteur et de la largeur des dépôts, ce dernier paramètre augmentant plus fortement, ce qui indique un meilleur mouillage du cordon sur le substrat, sans doute sous l'effet de l'augmentation de la température du substrat et des gouttes déposées. En revanche, ce meilleur mouillage ne s'accompagne pas d'une amélioration significative de la régularité des cordons déposés, les valeurs des écart-types calculées pour la hauteur et la largeur des cordons restant assez constantes.

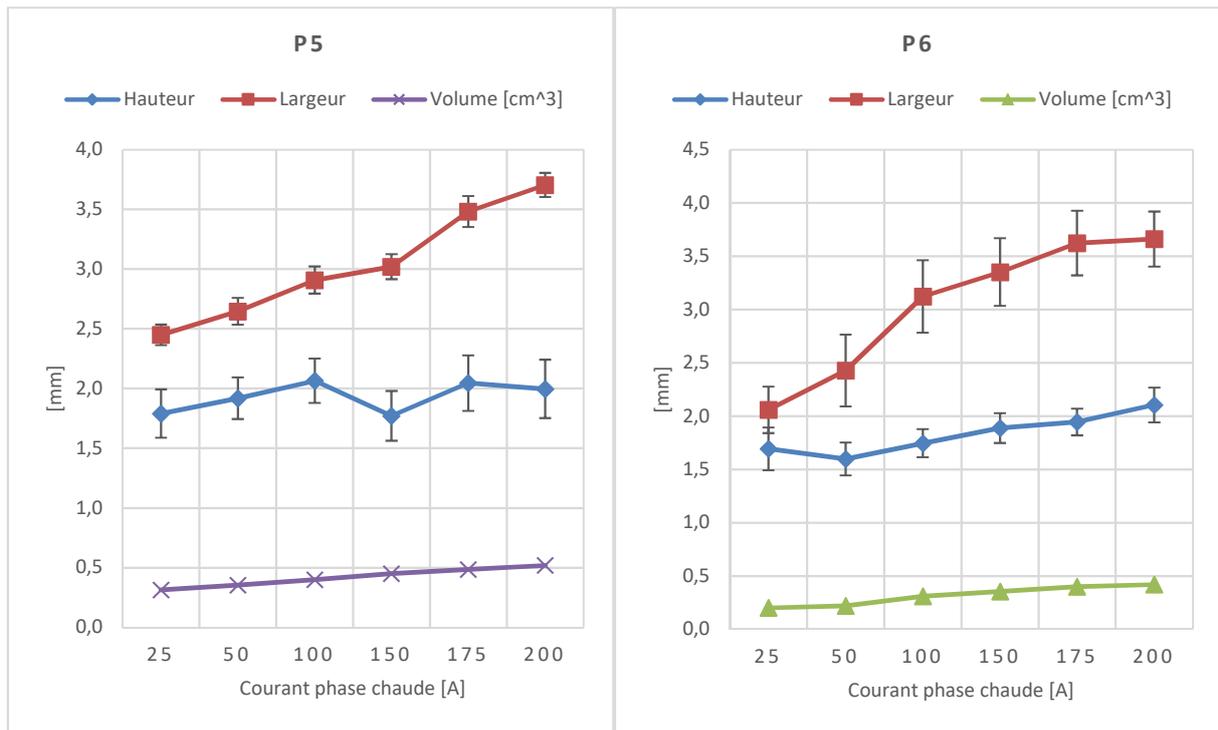


Figure 4.40 Evolution des caractéristiques géométriques des cordons en fonction de la valeur du paramètre I_{boost}

4.2.2.4 Influence du paramètre $t_{I_{boost}}$

Ce paramètre correspond à la durée de la phase boost pendant laquelle est appliquée la consigne I_{boost} (Figure 4.41). Lorsque cette durée augmente, on observe, comme pour le paramètre précédent, que la durée de la phase froide diminue (Figure 4.42), ce qui peut s'expliquer, comme indiqué précédemment, par l'augmentation de la taille de la goutte formée à l'extrémité du fil, qui entre plus rapidement en contact avec la tôle substrat.

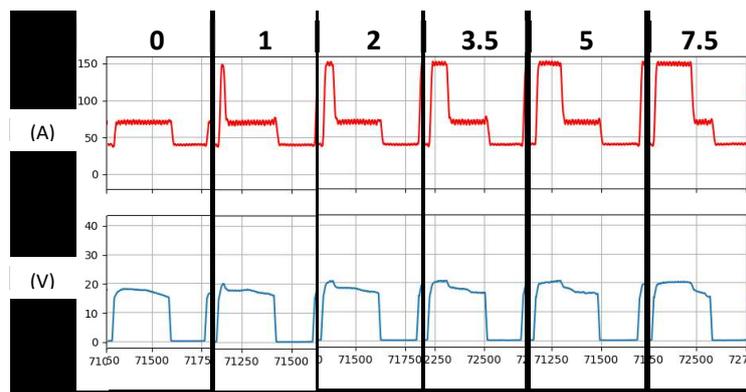


Figure 4.41 Evolution des formes d'onde de courant et de tension avec la modification du paramètre $t_{I_{boost}}$ (en ms)

Lorsque la durée $t_{I_{boost}}$ atteint 7.5 ms, les cordons montrent des irrégularités plus marquées (Figure 4.25). Ces défauts sont à relier aux évolutions de durée des phases du cycle CMT (Figure 4.42). On observe en effet pour le point de fonctionnement 5 une forte diminution de la durée moyenne des phases de court-circuit. Cette diminution est en réalité due à une instabilité du transfert de métal, des gouttes se détachant sous l'effet combiné des forces de Lorentz et de leur poids excessif. Cela se traduit par des chutes de tension de très courtes durées, qui sont

considérées comme des phases de court-circuit dans le calcul des durées moyennes des phases du cycle CMT (Figure 4.43).

Pour le point 6 les instabilités n'apparaissent pas encore pour des durées t_{I_boost} de 7,5 ms, et la durée moyenne calculée des court-circuit reste sensiblement constante, même si elle diminue un peu, ce qui peut s'expliquer par la diminution de la viscosité du métal liquide du fait des températures plus élevées, qui facilite le détachement des gouttes et donc la rupture du court-circuit. Cette absence d'instabilités pourrait s'expliquer par la plus grande vitesse de descente du fil d'apport, qui permet au court-circuit de s'établir avant le détachement des gouttes.

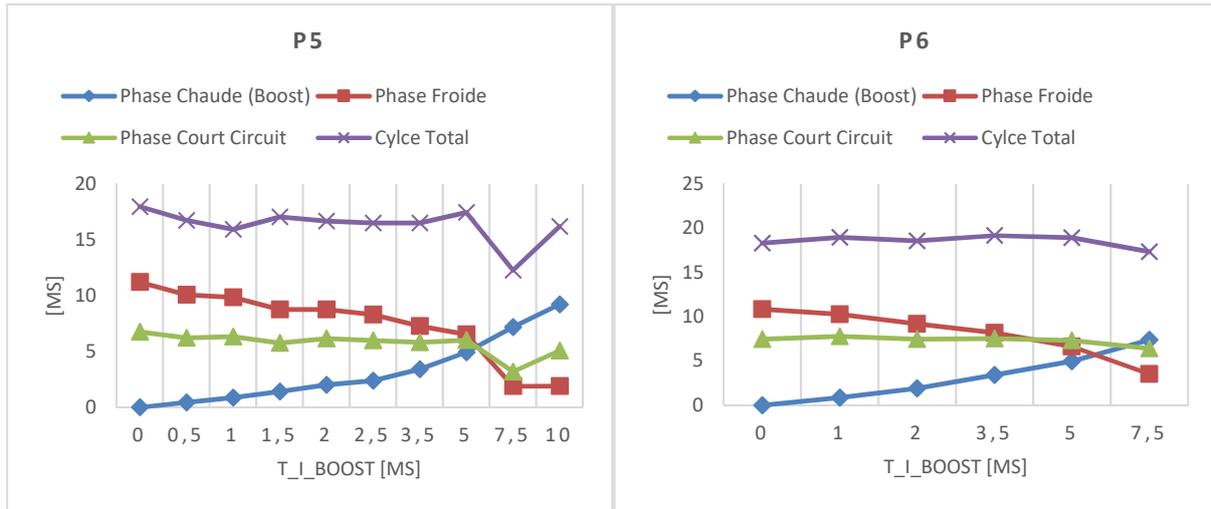


Figure 4.42 Evolution de la durée des phases du cycle CMT en fonction de la valeur du paramètre t_{I_boost}

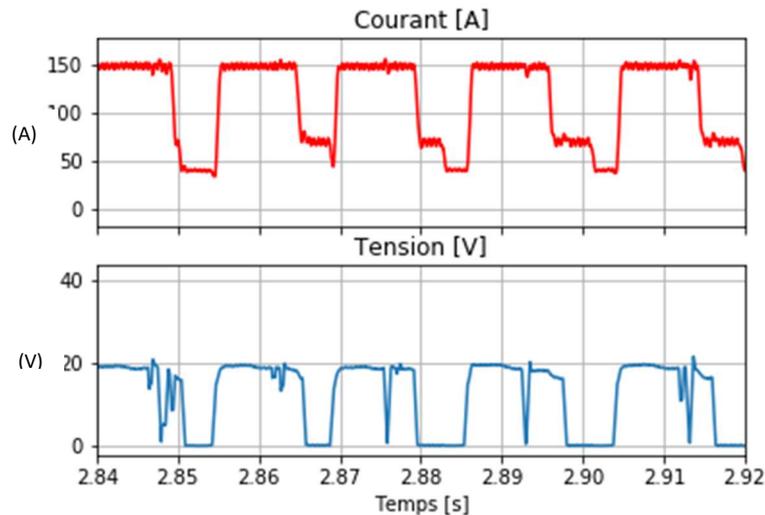


Figure 4.43 Instabilité du transfert observable par des chutes de tension correspondant au détachement de gouttelettes entre les courts-circuits, lorsque la durée t_{I_boost} est trop élevée

Lorsque la durée t_{I_boost} dépasse 15 ms, les cordons deviennent très irréguliers, et présentent des « brûlures ». On a vu précédemment que pour un courant I_{boost} supérieur à 350 A et un temps t_{I_boost} de 2 ms (paramètre standard du point 5), c'est-à-dire un produit $I \times t$ supérieur à 700 A.ms, le cordon présentait des résidus noirs, attribués à une vaporisation excessive de

l'aluminium. Le même défaut est observé pour une durée de t_{I_boost} supérieure ou égale à 15 ms pour une valeur I_{boost} de 150 A, soit une valeur de $I \times t$ de 2250 A.ms. Si l'on suppose que les tensions d'arc sont du même ordre dans les deux cas, l'énergie minimum pour entraîner une vaporisation importante du fil est alors plus élevée si l'on augmente la durée du pic de courant que si l'on augmente son intensité, sans doute du fait que l'augmentation de la durée augmente aussi les « pertes thermiques », notamment par conduction dans le fil et la torche de soudage.

Le paramètre t_{I_boost} définissant la durée du pic d'intensité de l'arc électrique, l'apport d'énergie est évidemment d'autant plus important que cette durée est longue (Figure 4.44). La contribution à l'apport d'énergie de la phase d'arc froid diminue en revanche, du fait du raccourcissement de la durée de cette phase. Le taux de dépôt, tout comme la taille moyenne des gouttes formées, augmente également avec l'augmentation de la durée de la phase boost (Figure 4.45).

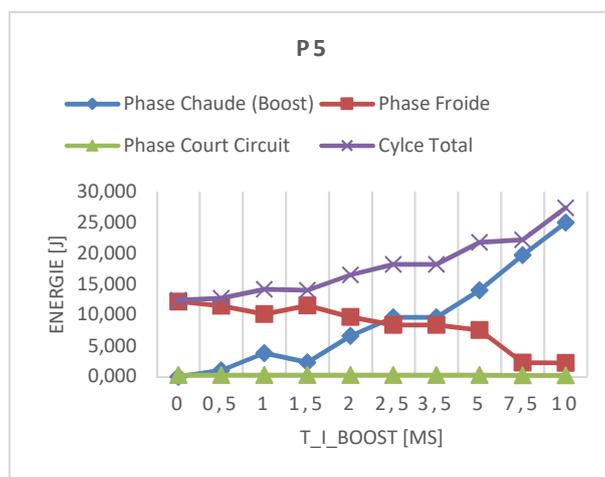


Figure 4.44 Evolution de l'énergie générée par phase du cycle CMT en fonction de la valeur du paramètre t_{I_boost} (point de fonctionnement 5)

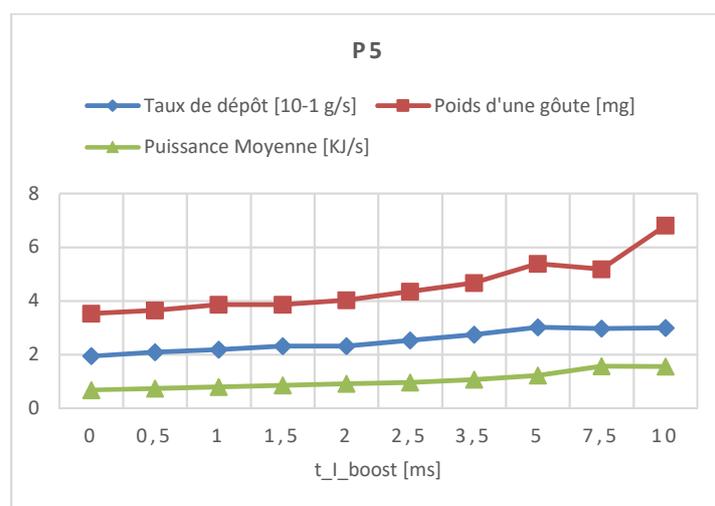


Figure 4.45 Evolution du taux de dépôt, du poids moyen des gouttes déposées et de l'énergie moyenne en fonction de la valeur du paramètre t_{I_boost} (point de fonctionnement 5)

L'effet sur la géométrie des cordons est sensiblement le même que pour le paramètres I_{boost} (Figure 4.46). L'augmentation de $t_{I_{boost}}$ produit un meilleur mouillage, avec des cordons dont la hauteur reste sensiblement constante, mais dont la largeur augmente. Notons que l'instabilité de transfert observée pour le point 5 lorsque le paramètre $t_{I_{boost}}$ dépasse 5 ms s'accompagne également d'une moins bonne régularité des cordons, avec une augmentation significative de l'écart-type de la hauteur de cordon.

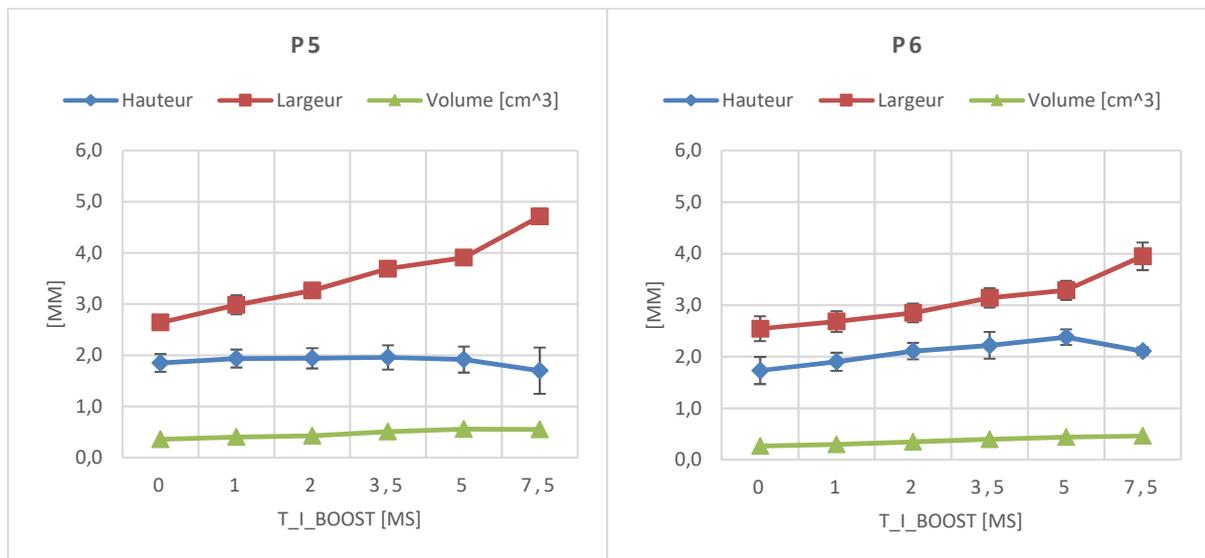


Figure 4.46 Evolution des caractéristiques géométriques des cordons en fonction de la valeur du paramètre $t_{I_{boost}}$

4.2.2.5 Influence du paramètre $d_{boostdown}$

Ce paramètre caractérise la diminution linéaire de courant à la suite de la phase boost. Son effet sur la forme d'onde est surtout marqué quand on diminue sa valeur en dessous de 25 A/ms (Figure 4.47). La baisse de l'intensité après le pic n'est alors pas assez rapide, ce qui se traduit par une augmentation de la durée de la phase boost et une diminution de celle de la phase d'arc froid, produisant un excès de chaleur. Cet excès d'énergie produit des projections, repérables par des fluctuations de la tension mesurée (Figure 4.47).

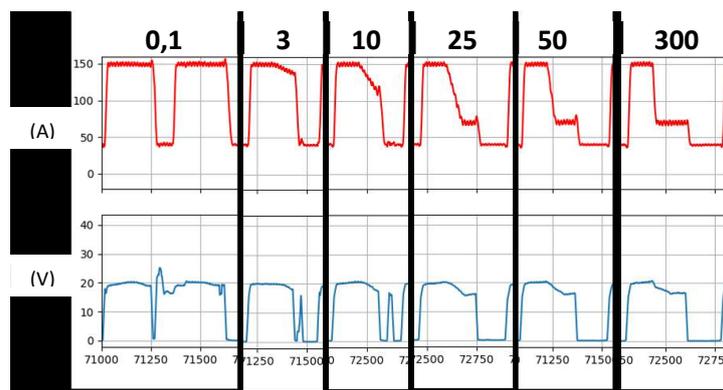


Figure 4.47 Evolution des formes d'onde de courant et de tension avec la modification du paramètre $d_{boostdown}$

Les cordons obtenus pour des valeurs inférieures à 25 A/ms sont alors moins hauts et plus larges, mais surtout plus irréguliers (Figure 4.48).

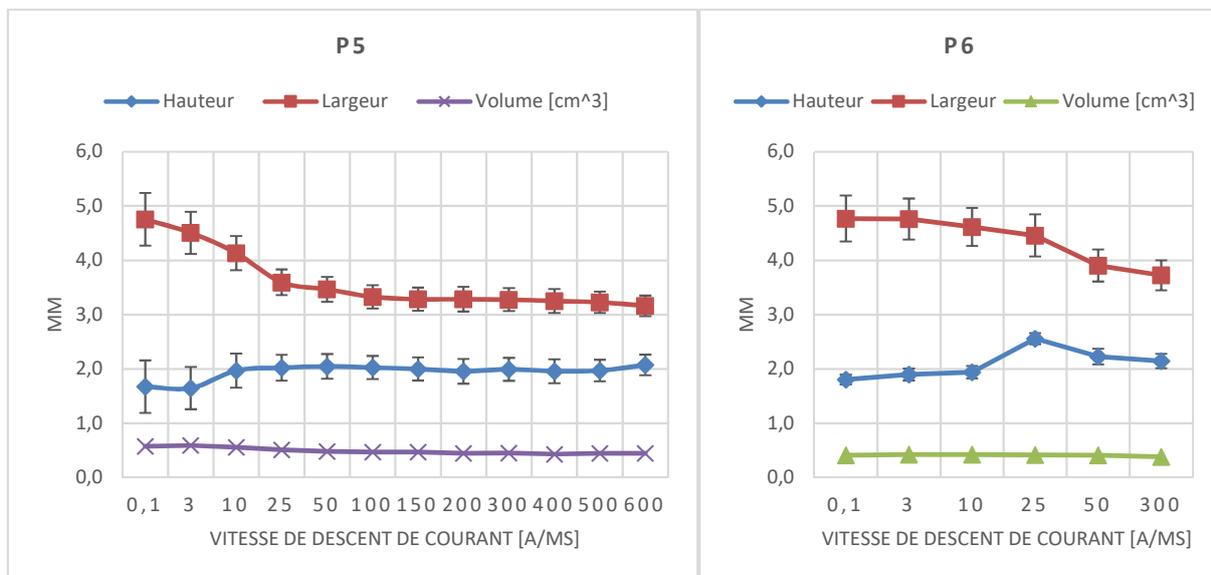


Figure 4.48 Evolution des caractéristiques géométriques des cordons en fonction de la valeur du paramètre $d_{boostdown}$

4.2.3 Influence des paramètres de la phase d'arc froid

4.2.3.1 Influence du paramètre I_{sc_wait}

Ce paramètre correspond à la valeur de consigne du courant de l'arc électrique pendant la phase « d'attente » ou d'arc froid qui suit la phase boost, au cours de laquelle le fil électrode descend jusqu'à ce qu'il entre en contact avec le bain de fusion, produisant le court-circuit et l'extinction de l'arc électrique (Figure 4.49).

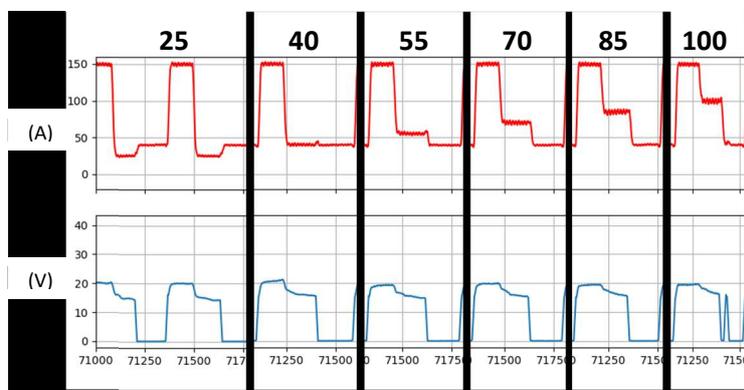


Figure 4.49 Evolution des formes d'onde de courant et de tension avec la modification du paramètre I_{sc_wait}

Ce courant permet de contrôler l'évolution des caractéristiques de la goutte formée à l'extrémité du fil, en particulier son volume et sa température, avant son dépôt sur le substrat ou le cordon déjà déposé. L'augmentation de la valeur de ce paramètre accroît logiquement l'énergie fournie durant la phase d'arc froid, sans que les énergies produites au cours des autres phases ne soient modifiées (Figure 4.50). Lorsque l'intensité de la phase froide devient trop faible, le cordon déposé devient discontinu (Figure 4.25), sans doute du fait que la quantité de chaleur contenue dans les gouttes déposées est insuffisante pour produire l'échauffement du substrat, et la ligne de contact se solidifie alors très rapidement, empêchant le mouillage du dépôt sur le substrat. En revanche, lorsque ce courant est trop élevé (à partir de 100 A si l'on considère le point de fonctionnement 5), l'énergie produite durant les phases d'arc devient trop élevée, et produit le

détachement de gouttes avant que le court-circuit ne soit établi, produisant des chutes de tension durant la phase d'arc froid (Figure 4.49).

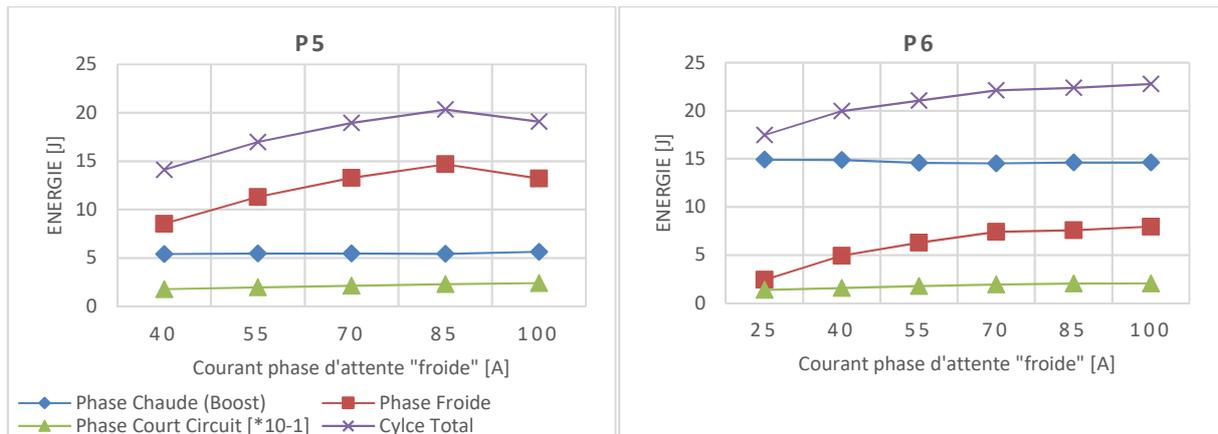


Figure 4.50 Evolution de l'énergie générée par phase du cycle CMT en fonction de la valeur du paramètre I_{sc_wait}

L'augmentation de l'intensité de la phase d'arc froid fait également croître le volume des gouttes déposées, mais réduit aussi la durée de la phase, car les gouttes étant plus grosses, elles entrent plus rapidement en contact avec le substrat (Figures 4.51 et 4.52). La fréquence des court-circuit augmente donc, tout comme le volume de chaque goutte déposée, ce qui a tendance à faire croître le taux de dépôt plus rapidement que la puissance moyenne (Figure 4.52).

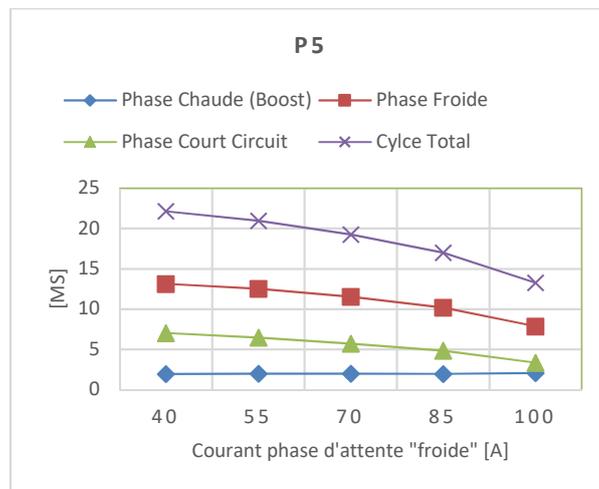


Figure 4.51 Evolution de la durée des phases du cycle CMT en fonction de la valeur du paramètre I_{sc_wait} (point de fonctionnement 5)

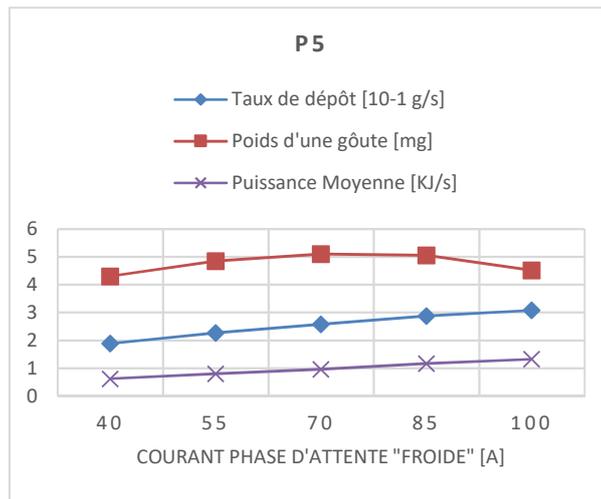


Figure 4.52 Evolution du taux de dépôt, du poids moyen des gouttes déposées et de l'énergie moyenne en fonction de la valeur du paramètre I_{sc_wait} (point de fonctionnement 5)

Des cordons réguliers peuvent être obtenus lorsque l'intensité de la phase d'arc froid est comprise entre 30 et 85 A environ. Les cordons formés présentent une hauteur qui diminue un peu, et surtout une largeur qui augmente avec la valeur du courant, le mouillage étant amélioré par l'augmentation de la puissance moyenne (Figure 4.53). Les écart-types de la mesure de largeur ont cependant tendance à augmenter un peu, surtout lorsque le courant I_{sc_wait} dépasse 85 A. Des projections sont aussi observées au cours du dépôt, qui apparaissent lorsque l'énergie produite durant la phase d'arc dépasse environ 20 joules, conduisant à des pertes de métal, ce qui peut expliquer la baisse du poids moyen des gouttes mesurée pour les fortes intensités (Figure 4.52).

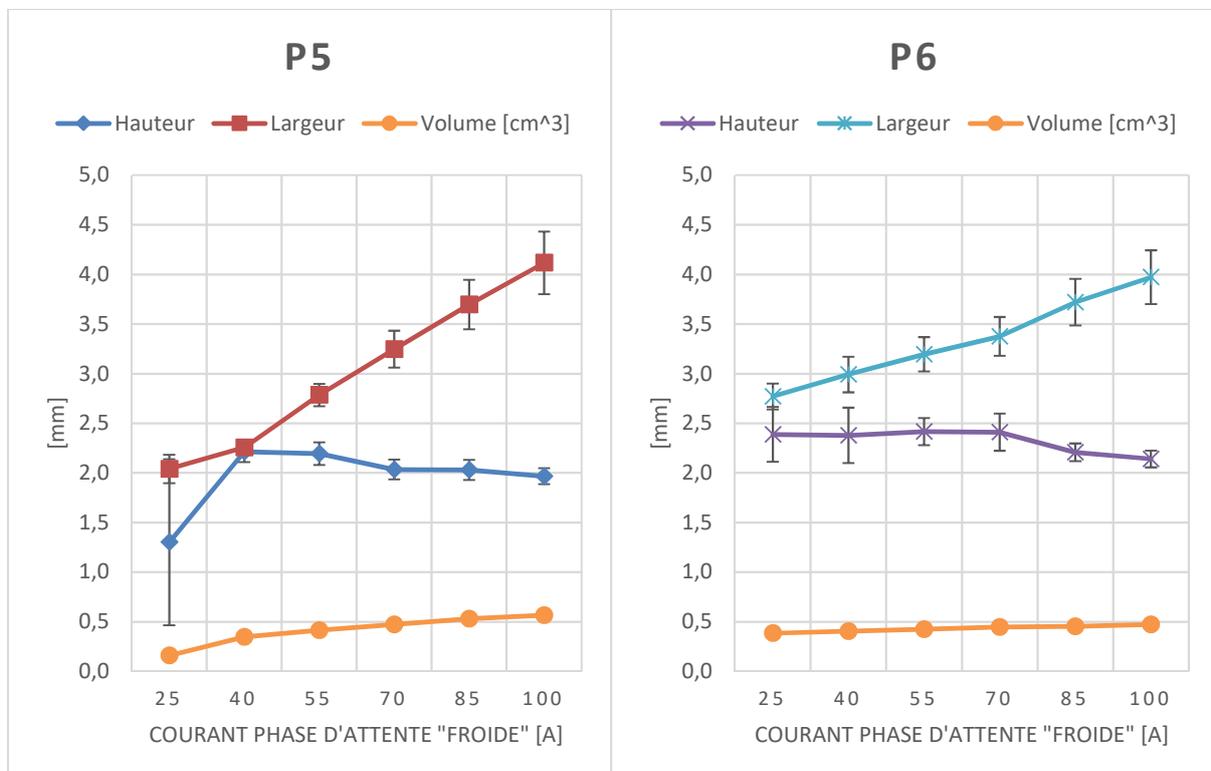


Figure 4.53 Evolution des caractéristiques géométriques des cordons en fonction de la valeur du paramètre I_{sc_wait}

4.2.3.2 Influence du paramètre Vd_sc_wait

Ce paramètre correspond à la vitesse d'avance du fil au cours de la phase d'arc froid jusqu'à l'établissement du court-circuit, ou de remontée du fil au cours de la phase de court-circuit jusqu'à la rupture de celui-ci. La diminution de cette vitesse d'avance du fil augmente la durée de la phase d'attente, ce qui augmente le temps d'arc et donc l'énergie générée, et favorise la fusion du fil, qui déposera au moment du court-circuit de plus grosses gouttes de métal liquide (Figure 4.54). La fréquence des court-circuit étant diminuée, on dépose alors des gouttes de métal liquide plus grosses, mais plus espacées lorsque la valeur de ce paramètre diminue, ce qui peut conduire à la formation de cordons moins réguliers, voire discontinus (Figure 4.25). Par contre, si on augmente fortement cette vitesse (à partir de 45 m/min), le cordon devient plus fin et irrégulier, car le temps d'arc est trop court pour fondre suffisamment de fil entre deux court-circuit. La durée moyenne des court-circuit est de plus augmentée (Figure 4.55), traduisant un détachement plus lent des gouttes, peut-être sous l'effet d'une augmentation de la viscosité du métal avec la baisse de sa température. A partir de 60 m/min, le cordon devient discontinu (Figure 4.25).

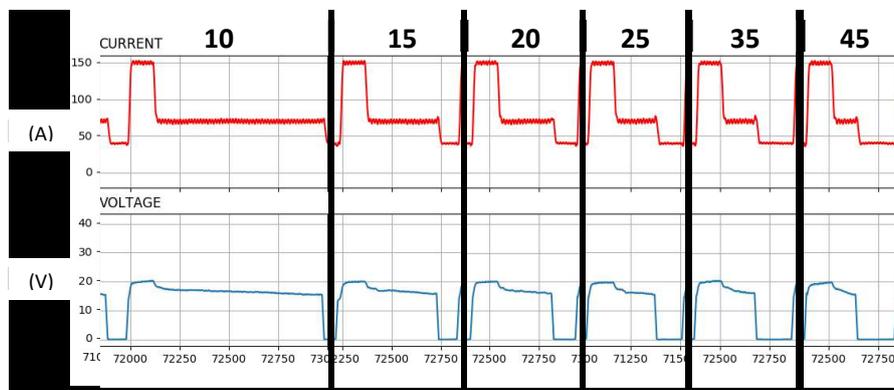


Figure 4.54 Evolution des formes d'onde de courant et de tension avec la modification du paramètre Vd_sc_wait

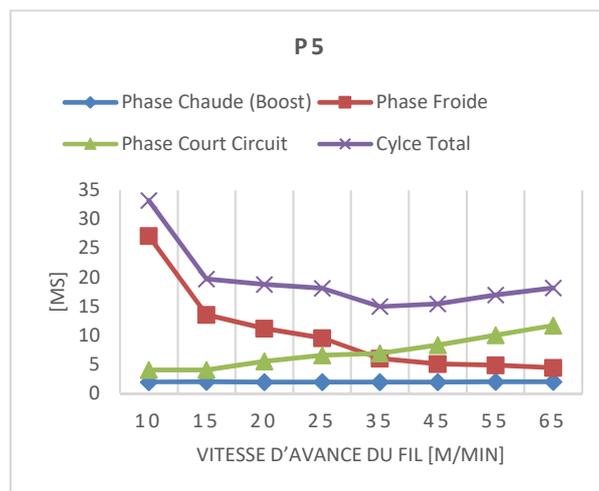


Figure 4.55 Evolution de la durée des phases du cycle CMT en fonction de la valeur du paramètre Vd_sc_wait (point de fonctionnement 5)

4.2.4 Influence du paramètre de la phase de court-circuit

Le paramètre I_{sc2} (A) correspond à la valeur de consigne du courant durant la phase de court-circuit (Figure 4.56). Ce paramètre a une influence assez faible sur l'aspect du cordon. On note toutefois que si on diminue trop cette valeur, on obtient un cordon discontinu, ce qui montre que l'échauffement du fil par effet joule durant la phase de court-circuit est nécessaire pour maintenir un volume de métal fondu suffisant (Figure 4.25). Inversement, si on augmente fortement cette valeur, on obtient un dépôt plus large, l'échauffement par effet joule du fil accélérant alors sa fusion.

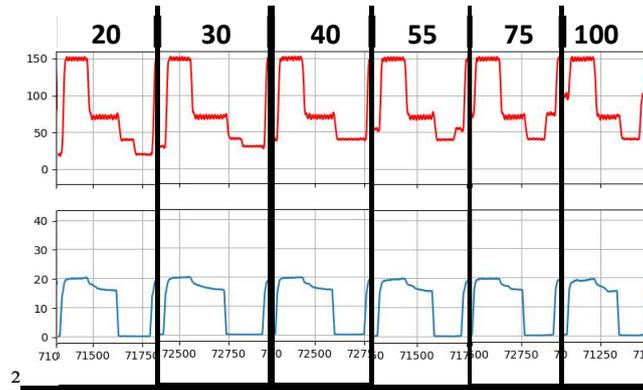


Figure 4.56 Evolution des formes d'onde de courant et de tension avec la modification du paramètre I_{sc2}

L'augmentation de la valeur de ce paramètre réduit la durée des court-circuit, l'échauffement par effet joule favorisant le détachement du fil, mais aussi un peu la durée de la phase d'arc froid. Ce résultat s'explique par une hauteur d'arc plus faible produite par une durée de retrait du fil pour rompre le court-circuit plus faible. La fréquence des court-circuit est alors un peu plus élevée lorsque ce courant augmente. En revanche, les énergies produites par chaque cycle sont plus faibles du fait principalement de la baisse de l'énergie produite par la phase d'arc froid, un peu plus courte, et les gouttes déposées lors de chaque court-circuit sont un peu plus petites, ce qui fait que le taux de dépôt ne varie quasiment pas. La géométrie des cordons obtenus n'est que très peu modifiée, avec une légère augmentation de la largeur avec l'augmentation de la valeur du courant, tout comme leur régularité, sauf si le courant de court-circuit devient trop faible (Figure 4.57).

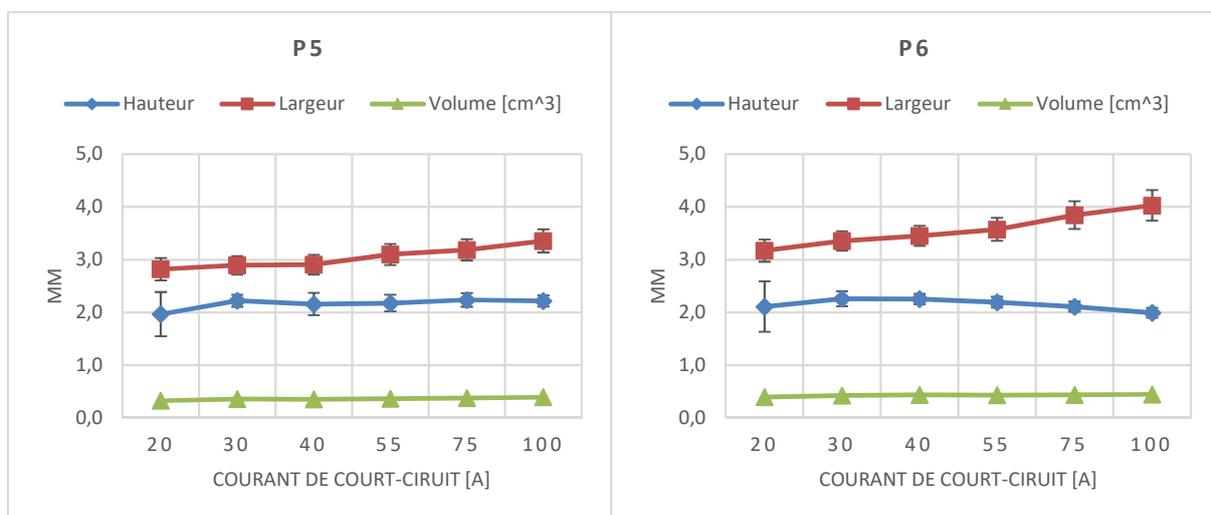


Figure 4.57 Evolution des caractéristiques géométriques des cordons en fonction de la valeur du paramètre I_{sc2}

4.3 Vers un contrôle en ligne du procédé

L'analyse de l'influence des divers paramètres procédé présentée dans les paragraphes précédents a montré qu'ils agissaient sur les caractéristiques géométriques des cordons formés, et qu'une bonne régularité de ces cordons pouvait être maintenue, tant que les paramètres ne sortent pas de plages déterminées. Ces limites admissibles pour chacun des paramètres doivent cependant dépendre de la configuration du dépôt, mono-cordon ou multi-cordons notamment, mais aussi de la vitesse de déplacement. Il peut donc s'avérer nécessaire de modifier ces paramètres en cours de fabrication, en fonction de la configuration et de l'étape du procédé de fabrication, afin d'éviter de sortir des plages de réglage permettant de maintenir des caractéristiques acceptables de dépôts.

L'observation des caractéristiques des formes d'onde de courant et de tension a aussi montré que les instabilités de transfert pouvaient être détectées à partir des signaux électriques, et qu'elles sont souvent corrélées à des modifications géométriques de cordons. L'analyse des formes d'onde de courant peut donc fournir des informations utiles sur la géométrie des cordons, et pourrait permettre de détecter des instabilités du transfert pouvant conduire à l'apparition de défauts, et ainsi de corriger les paramètres avant que des défauts critiques n'apparaissent.

Dans cette partie, nous allons donc tenter d'extraire quelques caractéristiques des formes d'onde révélatrices de ces instabilités, et d'analyser leurs causes et leurs conséquences sur la géométrie des cordons, de manière à poser quelques bases pour pouvoir réaliser à terme un contrôle en ligne du procédé avec correction des paramètres automatique.

Parmi les différentes caractéristiques des formes d'onde étudiées, la durée des différentes phases du cycle CMT paraît être l'un des paramètres les plus représentatifs des instabilités de transfert pouvant apparaître en cours de procédé. Ce paramètre pourrait aisément être suivi en continu, de manière à détecter les dérives potentielles du procédé. Nous nous intéressons dans la suite à l'analyse de ces durées, et de leurs liens avec les paramètres procédé et la géométrie des dépôts.

4.3.1 Analyse de l'évolution de la durée de la phase boost (chaude)

Parmi les trois phases du cycle CMT, la phase boost est celle dont la durée est la plus régulière, car elle est contrôlée par la carte électronique du générateur, à travers le paramètre t_{I_boost} d'abord, mais aussi indirectement à travers les paramètres $d_{boostup}$, $\tau_{boostup}$ et $d_{boostdown}$. La figure 4.58 représente l'évolution de la durée des trois phases pour chaque cycle, au cours du dépôt d'un cordon de géométrie « régulière ». Afin de ne pas tenir compte des petites fluctuations intervenant à chaque cycle qui parasitent le signal, toutes les valeurs mesurées dont l'écart à la durée moyenne de la phase sur l'ensemble du cordon est dans l'intervalle $\pm 10\%$ sont recalées à la valeur moyenne. La courbe permet alors de révéler uniquement les cycles dont la durée s'écarte de plus de 10% de la moyenne pour l'ensemble des cycles. Cet écart peut bien sûr être modifié en fonction de la précision souhaitée sur la régularité des cycles. La figure 4.58 montre ainsi qu'un transfert de matière stable est donc toujours associé à une durée de la phase boost constante.

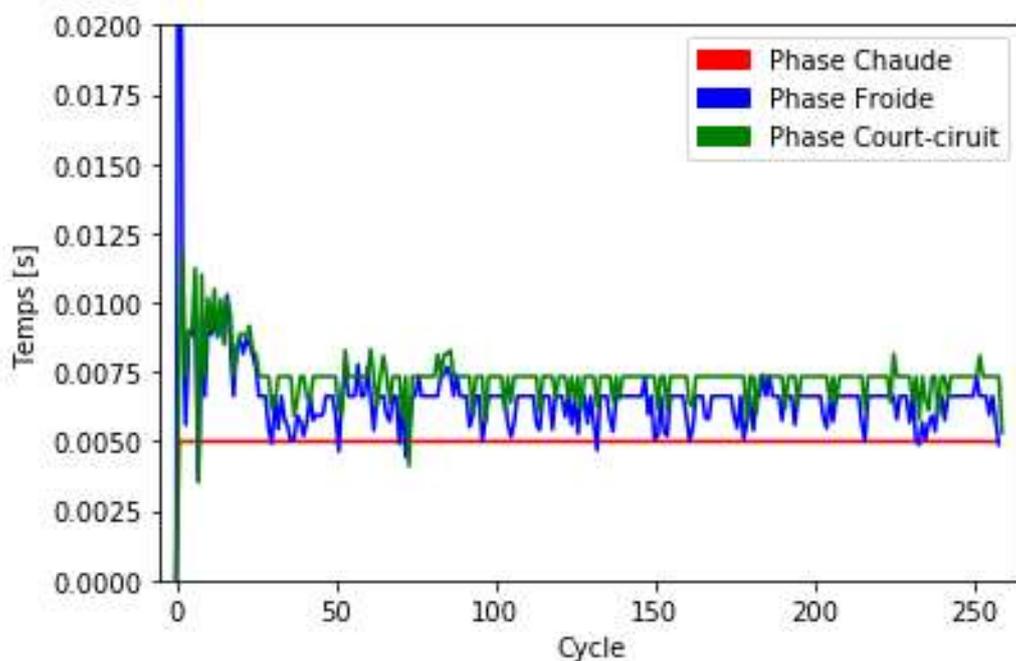
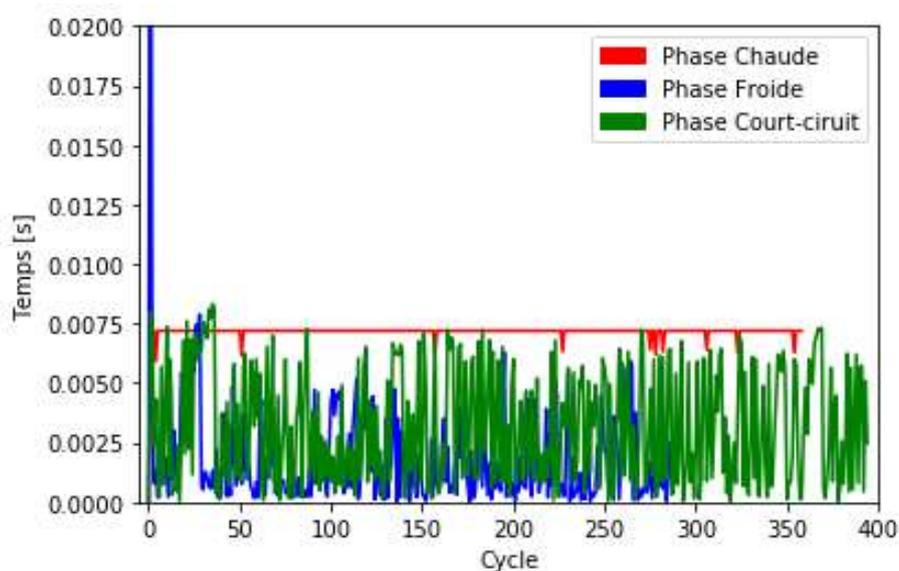
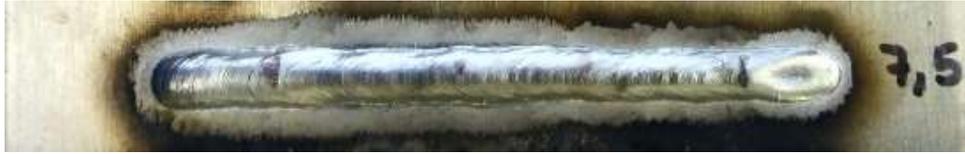


Figure 4.58 Evolution de la durée des trois phases du cycles CMT en fonction du cycle au cours du dépôt d'un cordon

Dans certains cas, des fluctuations de la durée de la phase boost peuvent cependant apparaître, à intervalles plus ou moins réguliers (Figure 4.59). Ces irrégularités sont dues au détachement de gouttes de métal à l'extrémité du fil pendant les phases d'arc chaud, et apparaissent toujours lorsque l'énergie de la période d'arc est trop élevée. Si ce genre d'instabilité détectée dans la forme d'onde ne conduit pas toujours à des cordons irréguliers, et peut même parfois réduire le défaut géométrique observé en début de cordon, en revanche l'apport énergétique étant élevé, les cordons ont toujours une largeur importante, car le cordon mouille très bien le substrat (Figure 4.59.b). Ce type de géométrie n'est pas forcément défavorable pour la première couche déposée. En revanche, dans le cas de dépôts multicouches, un tel apport de chaleur conduit à l'effondrement des cordons.



(a)



(b)

Figure 4.59 (a) Fluctuations de la durée de la phase boost associée au détachement de gouttes pendant la phase boost sous l'effet d'une énergie d'arc trop élevée, (b) aspect des cordons obtenus

Les causes de telles instabilités ont pu être identifiées dans les précédents paragraphes, et peuvent donc être corrigées si elles sont détectées. Les paramètres du « premier ordre » qui génèrent ces instabilités sont une intensité et/ou une durée de la phase boost trop élevées. Deux autres paramètres peuvent cependant aussi être responsables de telles instabilités, le paramètre $d_{\text{boostdown}}$ si sa valeur est trop basse, et le paramètre $I_{\text{sc_wait}}$ si sa valeur est trop élevée. Une légère modification de l'un de ces paramètres, si l'instabilité est détectée suffisamment tôt, suffira donc à prévenir les défauts géométriques avant qu'ils n'apparaissent. Notons que les irrégularités de durée de la phase boost sont toujours associées à des fluctuations importantes des durées des autres phases (Figure 4.59).

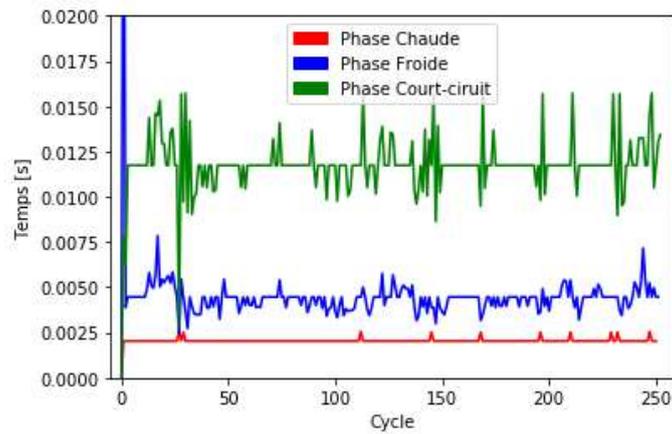
4.3.2 Analyse de l'évolution de la durée de la phase de court-circuit

Les causes des fluctuations de la durée de la phase de court-circuit peuvent être multiples, et de ce fait plus difficiles à analyser que celles de la phase boost. La durée de cette phase dépend des paramètres procédé, à travers le paramètre $Vd_{\text{sc_wait}}$ qui contrôle la vitesse de descente et de remontée du fil, mais aussi des mécanismes physiques conduisant à la séparation du fil et du dépôt liquide, un pont liquide plus ou moins étroit se formant durant la phase de retrait, avant que la rupture du court-circuit n'ait lieu (Figure 4.60). Ces phénomènes physiques sont influencés par les paramètres du procédé contrôlant les phases d'arc électrique.

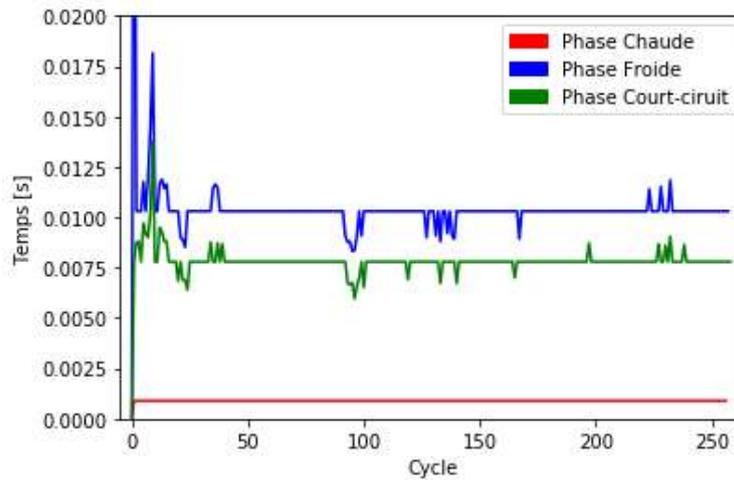


Figure 4.60 Formation d'un pont liquide de plus en plus étroit sous l'effet de la remontée du fil avant la rupture du court-circuit

Des fluctuations aléatoires de la durée de court-circuit autour de la valeur moyenne semblent associées à des énergies de soudage faibles (faible Intensité I_{boost} , durée $t_{\text{I_boost}}$ trop faible ou vitesse d'avance $Vd_{\text{sc_wait}}$ trop élevée), et pourraient s'expliquer par un mauvais mouillage des cordons sur le substrat et à la forte viscosité du liquide, conduisant à des défauts géométriques parfois critiques (Figure 4.61). Ces fluctuations sont généralement associées à des variations similaires de la durée de la phase d'arc froid, ce qui permet de les identifier facilement sur les courbes comme étant la signature d'une trop faible énergie.



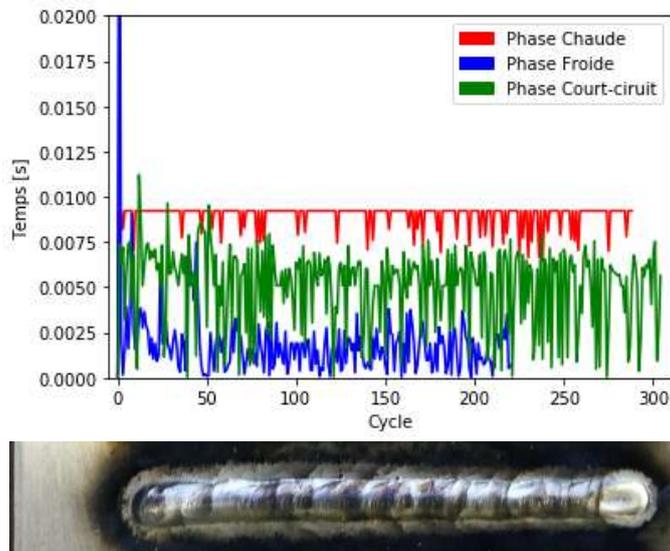
(a)



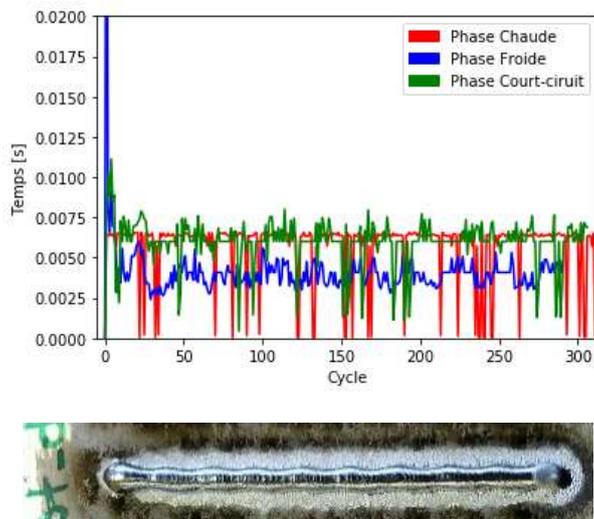
(b)

Figure 4.61 Fluctuations de la durée de la phase de court-circuit associée à une trop faible énergie pendant la phase d'arc et aspect des cordons obtenus, (a) paramètre Vd_sc_wait trop grand, (b) paramètre t_I_boost trop court

Des fluctuations de la durée de court-circuit peuvent aussi être causées par des projections, produites lorsque l'énergie de la phase d'arc est trop élevée, et elles sont alors associées aux fluctuations de la durée de la phase boost déjà décrites. La durée de court-circuit mesurée présente alors des baisses importantes, correspondant au détachement des gouttes qui créent des baisses de tension considérées comme des court-circuit de très courte durée. Ces fortes baisses sont souvent associées à une durée trop élevée de la phase boost, ou encore à un paramètre $d_boostdown$ trop faible (Figure 4.62).



(a)



(b)

Figure 4.62 Fluctuations de la durée de la phase de court-circuit associée à des fluctuations de la durée de la phase boost dues à une trop forte énergie pendant la phase d'arc, et aspect des cordons obtenus, (a) paramètre t_{I_boost} trop élevé, (b) paramètre $d_boostdown$ trop faible

4.3.3 Analyse de l'évolution de la durée de la phase d'arc froid

La durée de la phase d'arc froid est moins régulière que celle de la phase boost, et ses fluctuations peuvent être produites par plusieurs types d'instabilités. Elles révèlent une variation de la hauteur d'arc, qui peut être produite par la fusion excessive de l'extrémité du fil, qui forme une gouttelette de trop grande taille, ou un mauvais mouillage du cordon, dont la hauteur augmente localement, ou encore une variation de la viscosité du métal liquide, qui produit une rupture tardive du court-circuit, et donc un retrait plus important du fil. Enfin, cela peut être lié à des pertes de métal à l'extrémité du fil sous l'effet de projections, qui accroît de ce fait la hauteur d'arc. Toutes ces instabilités vont produire un accroissement ou une diminution de la durée d'une ou plusieurs phases d'attente successives.

Des irrégularités de la durée de cette phase apparaissent en particulier durant la phase d'amorçage. La viscosité du liquide déposé lors des premiers court-circuit étant élevée en raison du refroidissement rapide au contact du substrat, la durée de la phase de retrait du fil pour rompre le court-circuit est plus longue, ce qui produit des hauteurs d'arc plus élevées, et donc des phases d'arc froid plus longues également pour retrouver le contact avec la macro-goutte. Ce phénomène a pu être observé sur les enregistrements des vidéos rapides (Figure 4.63). Une augmentation simultanée des durées des phases de court-circuit et d'arc froid est donc la signature du défaut à l'amorçage, décrit dans la partie 1 de ce chapitre (Figure 4.64).

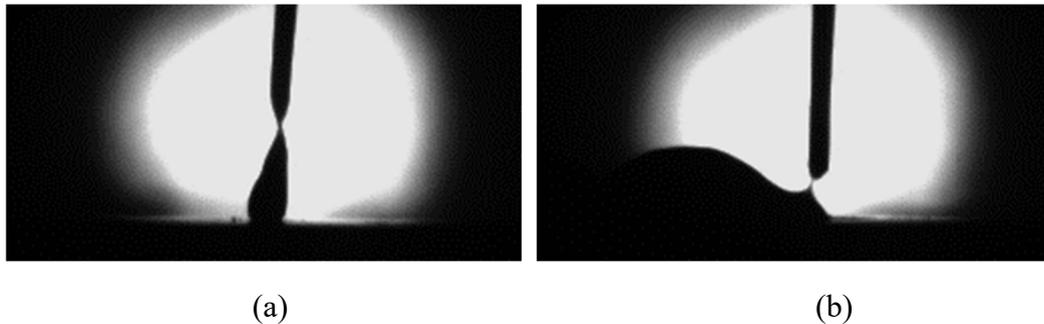


Figure 4.63 Comparaison de la hauteur d'arc en début de cordon (a) et en milieu de cordon (b)

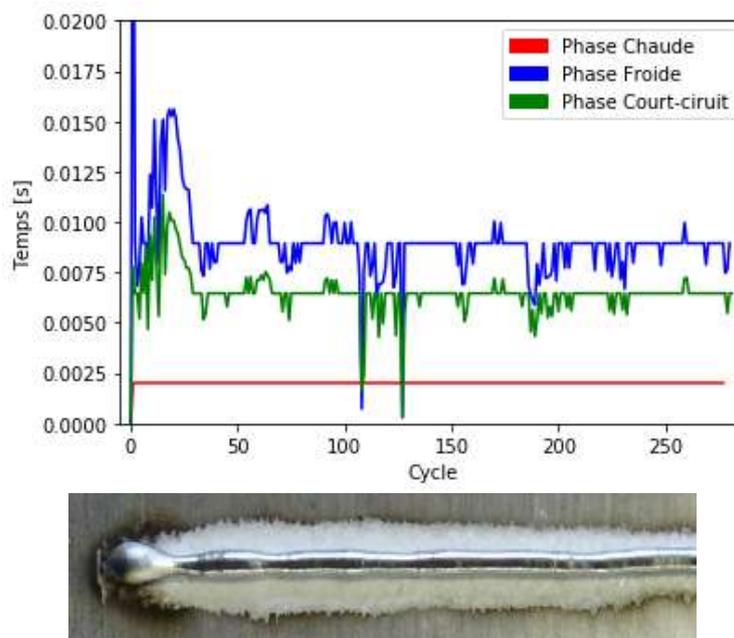


Figure 4.64 Augmentation simultanée de la durée des phases d'arc froid et de court-circuit révélant le défaut en début de cordon, et aspect du cordon obtenu

Une augmentation de la durée ou de l'intensité de la phase boost permet de réduire ce défaut, même si d'autres défauts peuvent ensuite apparaître durant le régime de dépôt stationnaire du cordon (Figure 4.65).

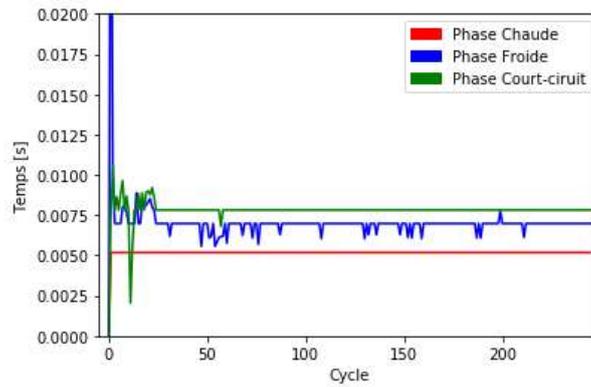


Figure 4.65 Réduction du défaut en début de cordon détectable sur le signal de durée des phases, grâce à l'augmentation de l'intensité I_{boost}

Cette forme de signal de durée des phases est aussi révélatrice du phénomène de « humping » qui apparaît lorsque la vitesse d'avance est trop élevée ou le paramètre I_{wait} trop faible (Figure 4.66). Ainsi, une augmentation de ce paramètre permet de réduire ou d'éliminer le défaut de « humping ».

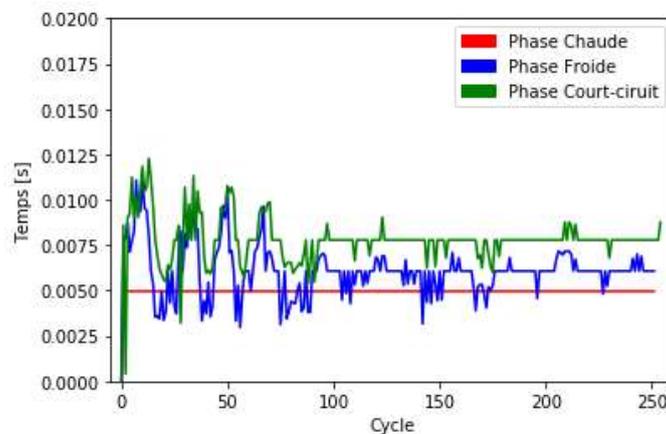


Figure 4.66 Forme du signal de l'évolution des durées des phases révélant le défaut de « humping »

D'autres fluctuations, plus fréquentes, et parfois isolées, montrent au contraire une diminution de la durée de la phase d'arc froid, souvent associée à une ou plusieurs diminutions de la durée de court-circuit. Ces défauts sont les plus fréquemment rencontrés dans les dépôts, et sont associés à des irrégularités de largeur et de hauteur parfois très légères, mais qui produisent de fortes variations de la durée des phases (Figure 4.67). Le suivi des durées semble donc être un bon indicateur des irrégularités.

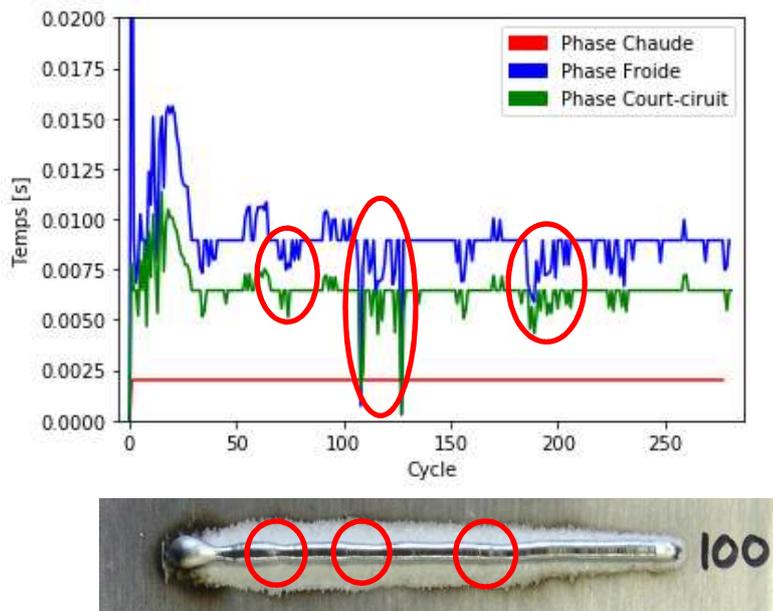


Figure 4.67 Diminutions simultanées de durée des phases d'arc froid et de court-circuit liées à la diminution localisée de la hauteur du cordon

Ce résultat est lié à l'accroissement localisé de la hauteur de dépôt, sous l'effet sans doute d'un moins bon mouillage, qui produit le phénomène d'aspiration du liquide vers le haut du cordon déjà décrit en début de chapitre, ainsi qu'un rétrécissement du cordon à l'avant, ce qui accélère le détachement du fil, et réduit donc la durée du court-circuit. La hauteur d'arc au moment de la rupture du court-circuit étant plus faible, la durée de la phase d'arc froid est aussi réduite.

Les causes de ce défaut sont multiples : une vitesse d'avance trop élevée, une protection insuffisante contre l'oxydation, et/ou un métal déposé trop froid notamment. Il reste à déterminer sur quel paramètre agir en priorité pour réduire ces instabilités. L'étude paramétrique donne quelques pistes qu'il faudra approfondir. Une augmentation de l'intensité de la phase de court-circuit pourrait par exemple apporter une légère amélioration de la régularité de hauteur, sans modifier la régularité de largeur. Les paramètres considérés secondaires de la phase boost peuvent aussi apporter quelques améliorations : une diminution du paramètre $d_{\text{boostdown}}$, ou une augmentation du paramètre $\tau_{\text{I_boostup}}$ en particulier.

4.4 Conclusion

Ce chapitre a révélé quelques pistes pour réduire les défauts observés en début et fin de cordon, en agissant sur les paramètres d'amorçage, ou encore en utilisant certaines options disponibles sur le générateur CMT. Ces modifications agissent principalement sur l'apport de chaleur en début de cordon, qui doit permettre de ralentir la solidification de la macro-goutte formée par les premières gouttelettes déposées, et faciliter son mouillage, pour que l'angle de mouillage reste inférieur à 90° .

Une étude paramétrique a permis d'analyser l'influence des paramètres du cycle de soudage CMT sur les mécanismes de transfert de matière et de chaleur, et sur la géométrie des cordons obtenus. Ils ont permis de mieux comprendre comment la modification de ces paramètres agit sur les mécanismes physiques responsables du transfert de chaleur et du dépôt de matière avec le procédé CMT. Grâce à ces résultats, il est possible d'identifier un ou plusieurs paramètres procédé à corriger pour réduire un défaut géométrique, ou simplement pour modifier les caractéristiques géométriques des cordons déposés.

Enfin, les bases d'une méthode de suivi en ligne du procédé ont été posées, s'appuyant sur l'analyse de l'évolution de la durée des différentes phases du cycle CMT, qui permet de révéler l'apparition d'instabilités de transfert, souvent associées à des irrégularités géométriques des dépôts.

Toutes ces analyses ont cependant été menées uniquement sur des dépôts mono-cordon. Le dernier chapitre est consacré à la réalisation de dépôts multi-cordons, étape nécessaire pour pouvoir produire des pièces avec le procédé étudié. Les différentes analyses menées sur les dépôts mono-cordon seront donc appliquées à ces dépôts multi-cordons.

Chapitre 5. Fabrication de dépôts multi-cordons

Le cinquième et dernier chapitre est consacré à l'étude des dépôts multi-cordons permettant, par la superposition de cordons, de former des « murs », et de manière générale des formes coques de géométrie quelconque. Le problème de l'accumulation de chaleur dans les éprouvettes en construction est d'abord étudié, d'un point de vue expérimental en utilisant les paramètres standards déjà testés pour les dépôts mono-cordon, puis à l'aide de la simulation numérique. Des modifications des paramètres procédé sont ensuite proposées, en se basant sur les résultats de l'étude sur les mono-cordons, afin d'améliorer les caractéristiques géométriques des pièces fabriquées. Finalement, la méthode de contrôle du procédé proposée dans le chapitre 4 est appliquée aux dépôts multi-cordons, dans le but de tenter de détecter l'apparition de défauts géométriques et de les corriger par la modification des paramètres de fabrication.

5.1 Etude de l'effet de la superposition de plusieurs cordons

5.1.1 Stratégie de construction

La stratégie de construction d'une pièce est une étape importante lors de la programmation d'une opération de fabrication additive. Cette étape consiste à définir la séquence de superposition des couches qui va conduire à l'obtention de la pièce 3D. Elle est généralement réalisée automatiquement par les logiciels de commande des machines d'impression 3D. Dans notre cas, la stratégie de fabrication est réalisée manuellement, même si les adaptations réalisées sur les logiciels de commande open source utilisés pour piloter notre banc d'essai permettent aussi d'automatiser cette étape. La définition de la stratégie consiste à choisir les positions de début et de fin de dépôt pour chaque couche, ainsi que le pas de translation vertical entre deux couches.

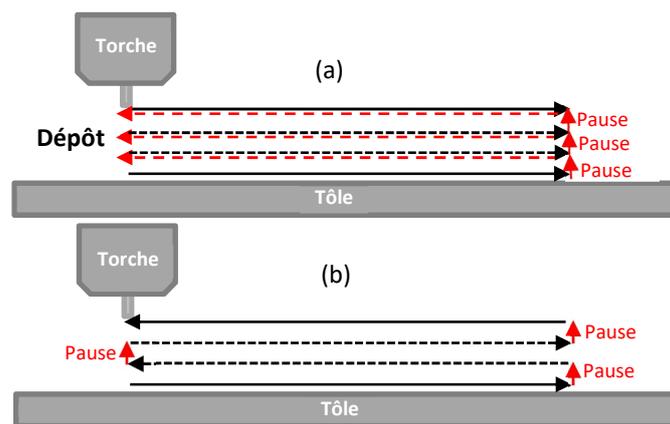


Figure 5.1 : Stratégies de construction pour la fabrication de murs, (a) sens de dépôt identique pour chaque couche, (b) sens de dépôt alterné entre chaque couche

Pour fabriquer des murs par la superposition de cordons, deux stratégies sont possibles (Figure 5.1) : en alternant le sens de construction de chaque couche, ce qui permet de ne pas stopper la construction pour ramener la torche en position de démarrage pour une nouvelle couche, ou en

gardant le même sens de construction pour chaque couche, ce qui oblige à ramener la tête de soudage en position initiale entre chaque couche. Cette opération peut toutefois favoriser le refroidissement du cordon déposé, ce qui peut être bénéfique, comme on le verra par la suite.

Dans le cas de l'alliage d'aluminium utilisé, des défauts en fin et surtout en début de cordons sont observés, et ont été en partie corrigés en utilisant l'option « hotstart » à l'amorçage (cf. Chapitre 4). Ces défauts au démarrage n'ont cependant pas pu être totalement supprimés, et ont tendance à s'accroître lorsque les superpositions de cordons sont faites en conservant un même sens de dépôt pour l'ensemble des couches (Figure 5.2). En revanche, une stratégie de dépôt alternée permet de compenser ces irrégularités lors de la superposition des couches. C'est donc cette dernière stratégie qui est retenue.



Figure 5.2: Amplification des défauts géométriques en début et en fin de cordon lors de la superposition de cordons réalisés en conservant pour chaque cordon le même sens de dépôt, donné par le sens de la flèche

Le second paramètre important dans la stratégie de construction est la hauteur de translation du plateau entre deux couches. Cette translation doit en effet correspondre à la hauteur de cordon déposé, sinon la distance entre le tube contact et la surface varie, modifiant les paramètres énergétiques et la géométrie des dépôts, qui deviennent plus larges et moins hauts si cette distance augmente (cf. 3.4). Les résultats sur les dépôts mono-cordon ont montré que les hauteurs de dépôt, lorsque ces derniers sont réguliers, étaient comprises entre 1 et 2 mm selon la vitesse d'avance. Des essais préliminaires de dépôts multi-cordons ayant révélé que la hauteur de cordon déposée a tendance à diminuer avec la superposition des premières couches, la hauteur de translation entre deux couches a été fixée à la valeur minimale observée sur les mono-cordons, de 1 mm.

5.1.2 Evolution de la géométrie des dépôts avec l'addition des cordons

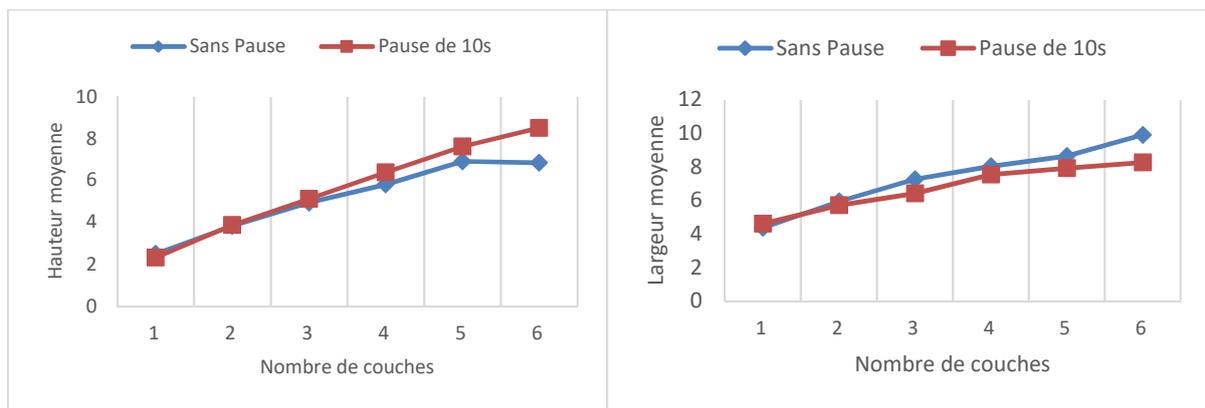
Des empilements de plusieurs cordons formant des « murs » ont été réalisés à partir des points de fonctionnement 5, 6 et 7, qui avaient montré de bons résultats lors des dépôts mono-cordon (cf. Chapitre 3). La stratégie de construction décrite dans le précédent paragraphe est utilisée pour superposer des cordons linéaires de longueurs 150 mm, en conservant des paramètres procédé et des vitesses d'avance identiques pour chaque cordon.

Afin d'étudier l'influence de chaque nouvelle couche déposée sur les caractéristiques géométriques des dépôts, des murs formés par la superposition de 2 à 6 cordons sont comparés. La distance entre le tube contact et la surface de la tôle substrat est fixée en début d'essai à 15 mm. Rappelons que le plateau de travail est translaté d'une hauteur de 1 mm entre chaque couche, ce qui ne correspond pas strictement à la hauteur de dépôt, et la distance entre le tube contact et la surface de dépôt varie donc un peu d'une couche à l'autre.

La figure 5.3 montre l'évolution de la hauteur et de la largeur moyennes des murs formés en utilisant le point de fonctionnement 7 et une vitesse d'avance de 600 mm/min, mesurées selon la méthodologie décrite dans le chapitre 2, en fonction du nombre de couches déposées. Ces résultats montrent que si l'on enchaîne les cordons sans effectuer de pause entre les couches, la largeur moyenne augmente de manière continue pendant le dépôt des 6 premiers cordons, tandis

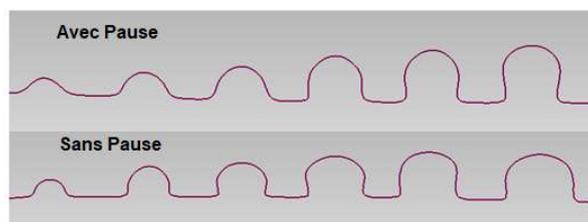
que la hauteur ajoutée à chaque couche diminue. Ce résultat s'explique par la refusion complète ou partielle des cordons déjà déposés lors du dépôt d'une nouvelle couche, formant une zone fondue de plus en plus volumineuse, qui a tendance à s'étaler, donnant donc après solidification des cordons de plus en plus larges. L'augmentation du volume de matière refondue lors de la superposition des cordons est liée à l'augmentation de la température de la couche sur laquelle est déposé le nouveau cordon, qui peut rester élevée si le substrat situé au-dessous a déjà été chauffé par la chaleur transmise lors des précédents dépôts, limitant alors le refroidissement par conduction thermique dans la tôle substrat.

En modifiant la géométrie des cordons déposés, l'accumulation de chaleur dans les dépôts est donc un problème crucial avec ce procédé de fabrication additive. Si ce phénomène peut améliorer le mouillage du métal liquide déposé sur le solide, comme cela a été discuté au chapitre 4, il favorise aussi la fusion de cette surface solide, qui peut devenir excessive pour conserver une géométrie donnée. Le transfert de chaleur par conduction est de plus modifié par la configuration géométrique du cordon déposé. En effet, le transfert par conduction sera favorisé lors du dépôt du ou des premiers cordons, car la chaleur peut diffuser directement dans la tôle substrat et dans le plateau de la machine sur laquelle elle repose depuis le cordon solidifié, alors que pour les cordons suivants, la chaleur devra d'abord diffuser dans les cordons déjà déposés, plus ou moins larges, avant de pouvoir atteindre la tôle substrat, et le refroidissement sera nécessairement ralenti du fait de cette modification de configuration géométrique, même si la température initiale du substrat et des cordons déjà déposés était la même que celle du substrat au moment du premier dépôt.



(a)

(b)



(c)

Figure 5.3: Evolution de (a) la hauteur et (b) la largeur moyennes des dépôts obtenus avec le point de fonctionnement 7 et une vitesse d'avance de 600 mm/min, en fonction du nombre de cordons déposés, et (c) contours des dépôts en coupe transversale.

Afin de favoriser le refroidissement des cordons déposés avant le dépôt d'un nouveau cordon, un temps de pause de 10 secondes a par la suite été imposé entre deux cordons. La figure 5.3

montre que cette pause améliore la régularité géométrique des cordons, en limitant la refusion, et donc l'augmentation de la largeur moyenne des dépôts avec la superposition des cordons. La largeur moyenne augmente toujours lors du dépôt des premiers cordons, mais semble atteindre une largeur presque stabilisée après la quatrième couche déposée. La hauteur quant à elle augmente plus régulièrement avec le maintien de ce temps de pause, avec une augmentation quasi-linéaire.

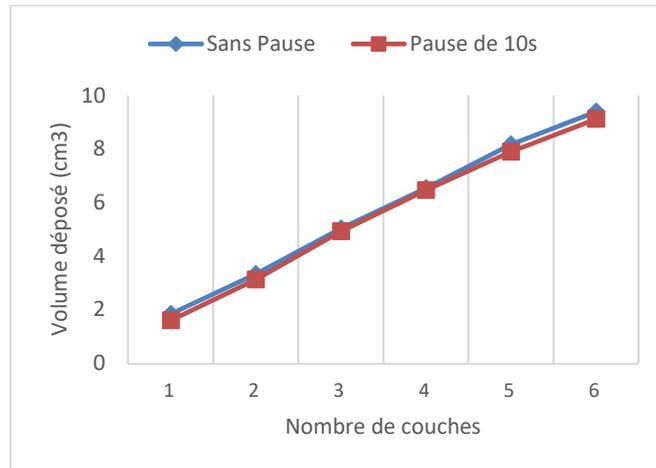


Figure 5.4: Evolution du volume de métal déposé avec le point de fonctionnement 7 et une vitesse d'avance de 600 mm/min en fonction du nombre de cordons déposés

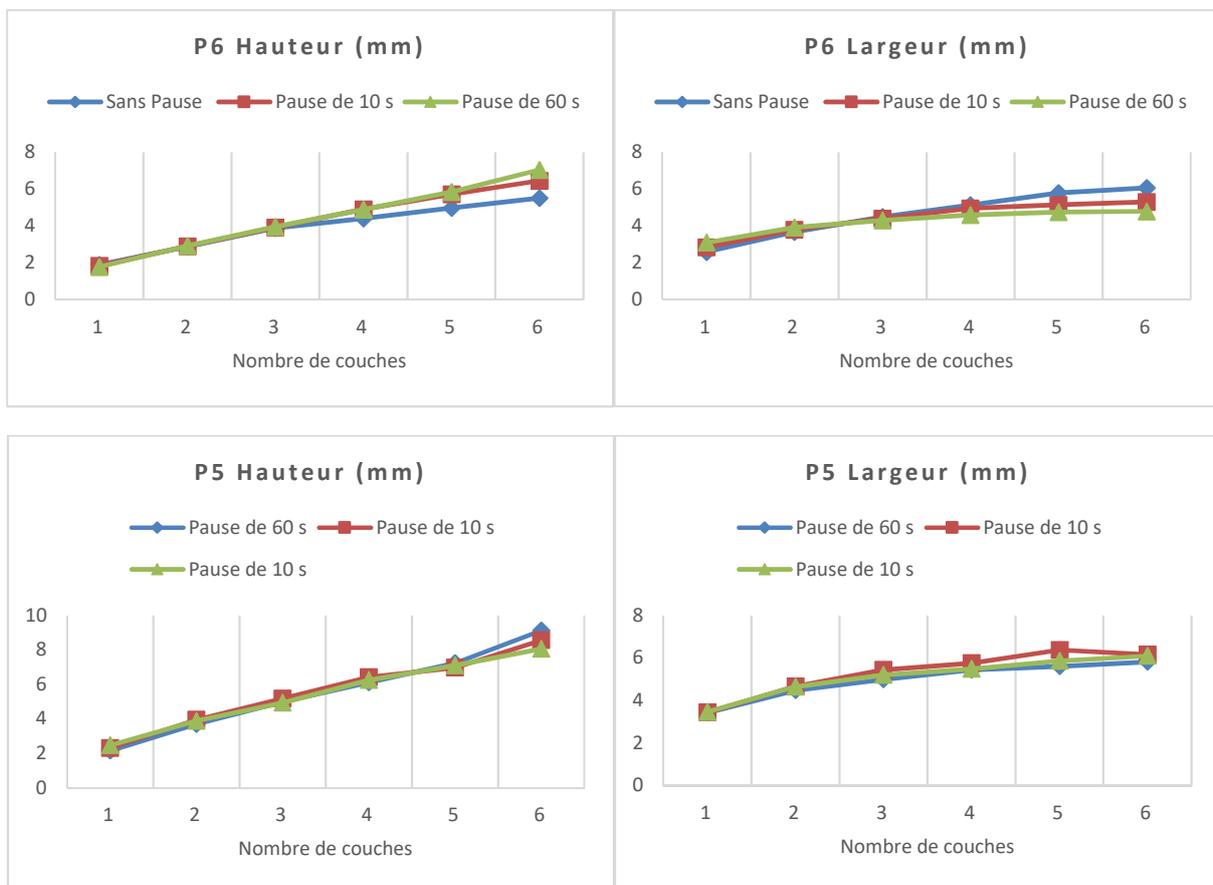


Figure 5.5: Evolution de la hauteur et de la largeur moyennes des cordons déposés avec les points de fonctionnement 5 et 6 et une vitesse d'avance de 600 mm/min en fonction du nombre de cordons déposés et de la durée du temps de pause entre deux dépôts

L'ajout d'un temps de pause n'a en revanche pas d'effet sur le volume de métal déposé, qui augmente de manière sensiblement linéaire avec le nombre de cordons déposés, quel que soit le point de fonctionnement utilisé (Figure 5.4).

L'influence de la durée de pause entre deux cordons sur la géométrie des dépôts a été testée pour les points de fonctionnement 5 et 6 (Figure 5.5). On peut constater qu'une augmentation de ce temps de 10 à 60 secondes stabilise la largeur des dépôts formés un peu plus tôt pour le point 6, dès le troisième cordon au lieu du quatrième avec une pause de 10 secondes, et permet d'avoir un accroissement de la hauteur avec le nombre de cordons déposés un peu plus linéaire, mais les différences de géométrie restent minimales. L'effet est encore moins marqué pour le point 5. En revanche, le temps de fabrication est environ trois fois plus long si l'on utilise une pause de 60 secondes au lieu de 10 secondes (Figure 5.6). Pour ces raisons, nous avons choisi dans la suite un temps de pause de 10 secondes entre la fin du dépôt d'un cordon et le début du dépôt du cordon suivant. Ce temps a toutefois été augmenté à 15 secondes dans certains cas, ce qui sera alors signalé.

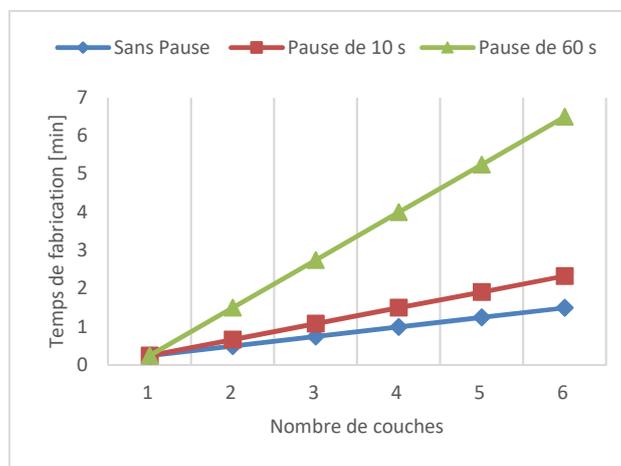


Figure 5.6: Evolution du temps de fabrication en fonction du nombre de cordons déposés et de la durée du temps de pause entre deux dépôts, pour le point de fonctionnement 6 et une vitesse d'avance de 600 mm/min

5.1.3 Influence de la vitesse d'avance sur la géométrie des dépôts

Afin d'évaluer l'influence de la vitesse d'avance sur l'évolution géométrique des dépôts multicordons, des murs ont été réalisés à partir des points de fonctionnement 5, 6 et 7, pour trois vitesses différentes : 600, 1200 et 2400 mm/min. Le temps de pause entre chaque cordon a été fixé à 10 secondes, dans l'intention de laisser refroidir partiellement le matériau déposé et la tôle support. Au cours de ces expériences, les signaux électriques du procédé ont été enregistrés afin d'évaluer la régularité du procédé de transfert de métal. Les figures 5.7 à 5.9 montrent l'évolution des largeurs et hauteurs moyennes obtenues pour les différentes conditions d'essais.

On constate que, quel que soit le point de fonctionnement utilisé, la hauteur de dépôt augmente de manière sensiblement linéaire au cours de la superposition des 6 premiers cordons déposés. La hauteur augmente plus vite lorsque la vitesse d'avance est plus faible. En revanche, pour une vitesse donnée, le point de fonctionnement n'influe que très peu sur l'évolution de la hauteur, les 3 points de fonctionnement testés produisant sensiblement les mêmes hauteurs de dépôts jusqu'à 6 couches.

D'autres essais ont été réalisés à la vitesse de 2400 mm/min dans les mêmes conditions avec les points de fonctionnement 5 et 6, mais en superposant cette fois jusqu'à 64 cordons, qui

confirment qu'une relation quasi-linéaire existe entre la hauteur de dépôt et le nombre de cordons superposés (Figure 5.10.a).

La largeur des dépôts augmente également avec le nombre de cordons déposés, mais selon une évolution logarithmique. Pour la vitesse d'essai la plus élevée, l'augmentation de la largeur semble tendre vers une asymptote, qui dépend du point de fonctionnement. Ces observations sont confirmées par les mesures réalisées sur des dépôts constitués d'un plus grand nombre de cordons (jusqu'à 64 cordons superposés), qui montrent que la largeur moyenne atteint une valeur maximale de 3,5 mm environ pour le point 5, et de 4 mm environ pour le point 6, pour une vitesse d'avance de 2400 mm/min (Figure 5.10.b).

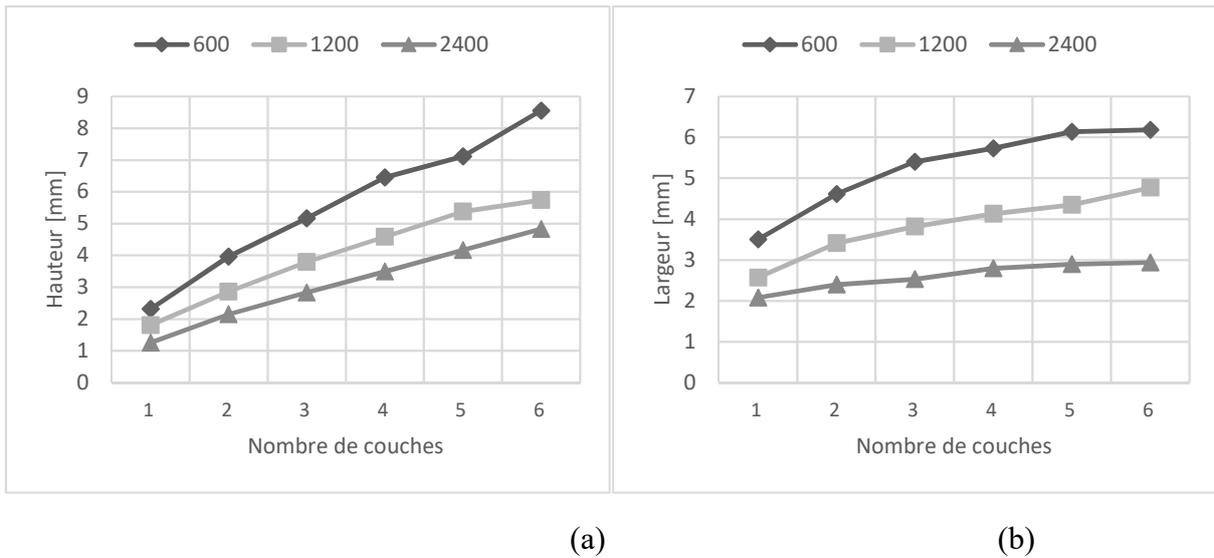


Figure 5.7: Evolution de la hauteur (a) et de la largeur (b) moyennes des dépôts réalisés avec le point de fonctionnement 5 en fonction du nombre de cordons déposés et de la vitesse de déplacement

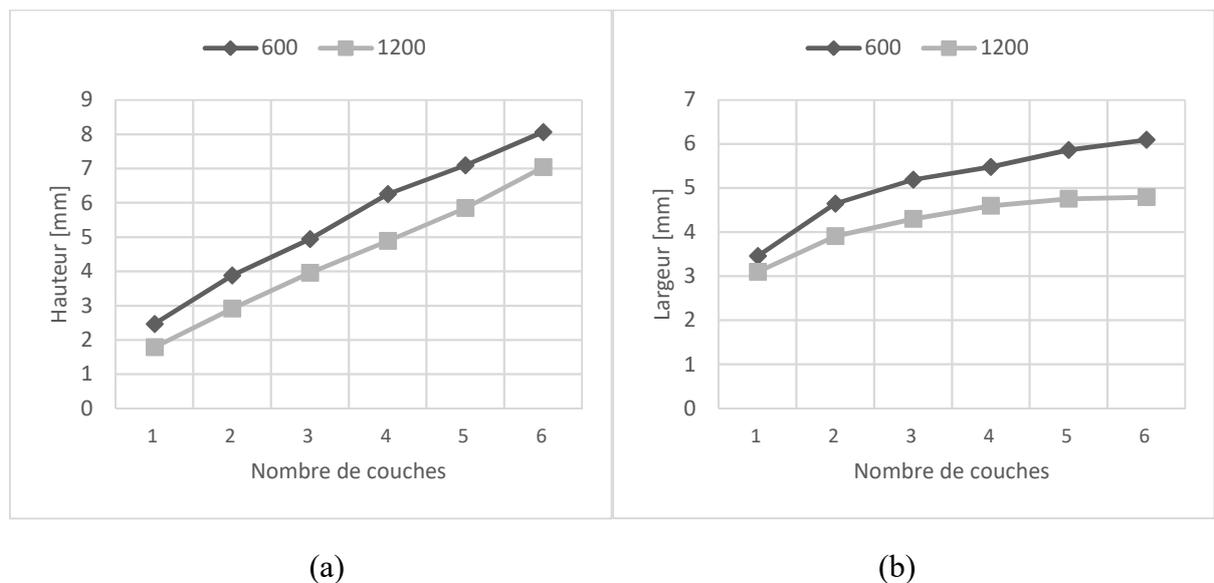


Figure 5.8: Evolution de la hauteur (a) et de la largeur (b) moyennes des dépôts réalisés avec le point de fonctionnement 6 en fonction du nombre de cordons déposés et de la vitesse de déplacement

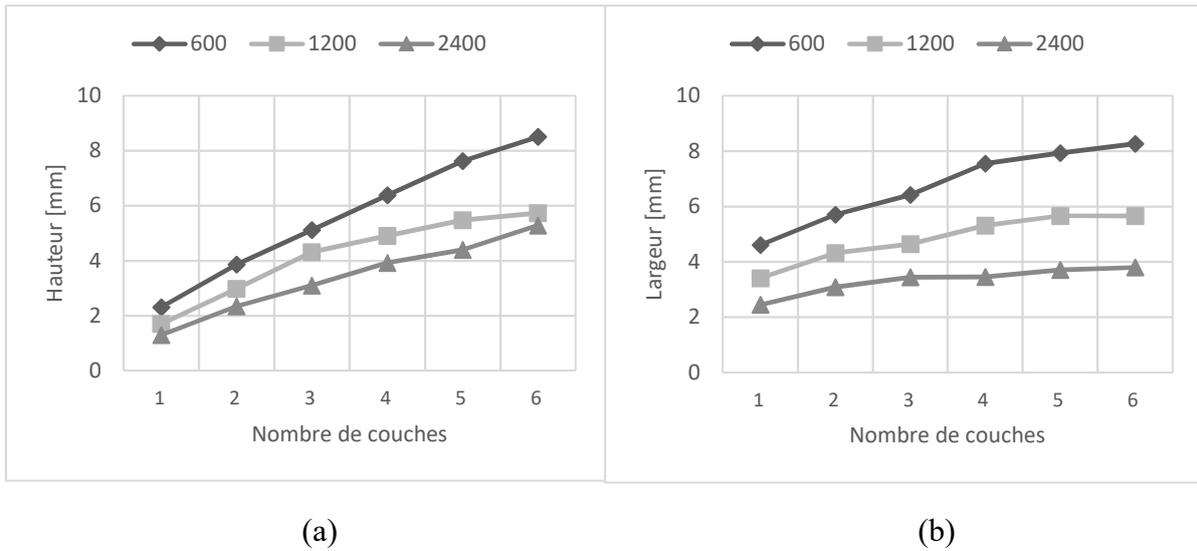


Figure 5.9: Evolution de la hauteur (a) et de la largeur (b) moyennes des dépôts réalisés avec le point de fonctionnement 7 en fonction du nombre de cordons déposés et de la vitesse de déplacement

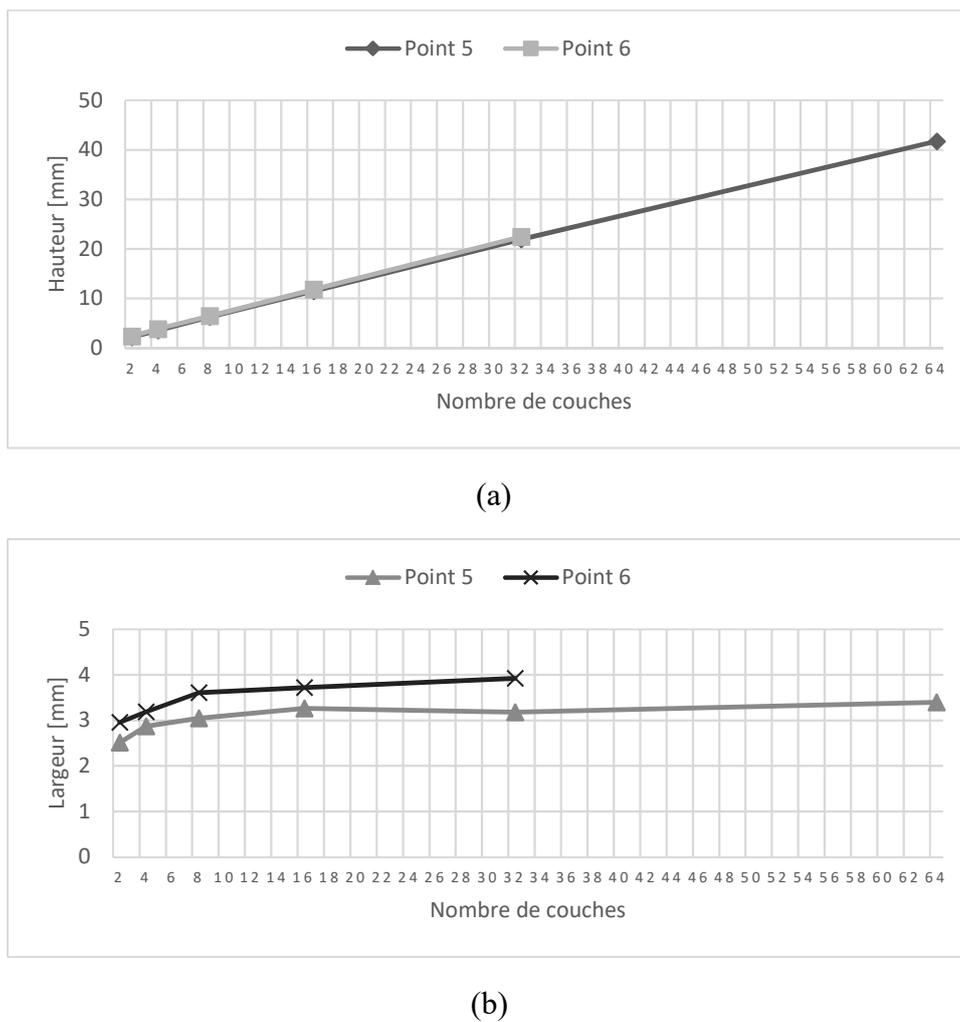


Figure 5.10: Evolution de la hauteur (a) et de la largeur (b) moyennes des dépôts réalisés avec les points de fonctionnement 5 et 6 à la vitesse d'avance de 2400 mm/min en fonction du nombre de cordons superposés

Ces résultats sont particulièrement intéressants pour définir la stratégie de construction d'objets 3D, car si la hauteur de couche augmente quasi-linéairement avec le nombre de cordons déposés, un pas de translation du plateau suivant l'axe Z constant entre deux couches peut être choisi pour effectuer la construction avec une vitesse d'avance et un point de fonctionnement donnés. D'autre part, la largeur moyenne des dépôts augmente mais se stabilise après la superposition d'un certain nombre de cordons, à une valeur qui varie selon la vitesse d'avance ou le point de fonctionnement. Le choix du point de fonctionnement et de la vitesse d'avance pourra donc être fait en fonction de l'épaisseur de pièce à construire. Les hauteurs moyennes déposées à chaque couche ainsi que la largeur moyenne stabilisée après la superposition d'un nombre suffisant de cordons, en fonction du point de fonctionnement et de la vitesse d'avance, sont donnés dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1: Hauteur moyenne déposée pour chaque cordon et largeur moyenne « stabilisée » estimées, pour les différents points de fonctionnement et vitesses d'avance

	Vitesse (mm/min)	Hauteur moyenne ajoutée à chaque couche (mm)	Largeur moyenne du mur (mm)
Point 5	600	1,4	6,1
	1200	1,0	4,7
	2400	0,7	3,4
Point6	600	1,4	6,1
	1200	1,1	4,8
	2400	0,7	3,9
Point7	600	1,4	8,1
	1200	1,0	5,7
	2400	0,8	3,8

Ces résultats, même si des variations sont observées dans les différentes couches d'un mur multi-cordons, peuvent être utilisés comme références pour définir la gamme de fabrication d'une pièce de géométrie et dimensions données.

Notons pour finir que les largeurs de murs mesurées ne sont généralement pas constantes dans toute la hauteur du mur. En effet, si la superposition des dépôts produit une élévation de la température moyenne des dépôts et du substrat avant chaque nouveau dépôt, sous l'effet de l'accumulation de chaleur, entraînant une refusion importante des cordons déjà déposés, et des bains liquides de plus en plus larges, la refusion des premiers cordons n'est pas complète, et leur base conserve généralement sa largeur initiale. On observe ainsi une augmentation rapide de la largeur depuis la base vers le haut des murs au niveau des premiers cordons (Figure 5.11). La largeur finit cependant par se stabiliser, ou au moins à augmenter plus faiblement, après un nombre de cordons compris entre 5 et 10 environ. Cependant, une augmentation presque

continue de la largeur peut se poursuivre dans certains cas, notamment pour les faibles vitesses d'avance, jusqu'au cinquantième cordon environ, voir plus (Figure 5.12). Il peut donc être nécessaire de modifier les paramètres de dépôt au cours de la construction, pour tenter de garder une largeur de mur régulière. Nous étudierons, dans la section suivante, l'évolution thermique dans les cordons à l'aide de la simulation numérique, afin de tenter de prévoir l'apparition éventuelle d'un régime thermique stationnaire avec la superposition des cordons.

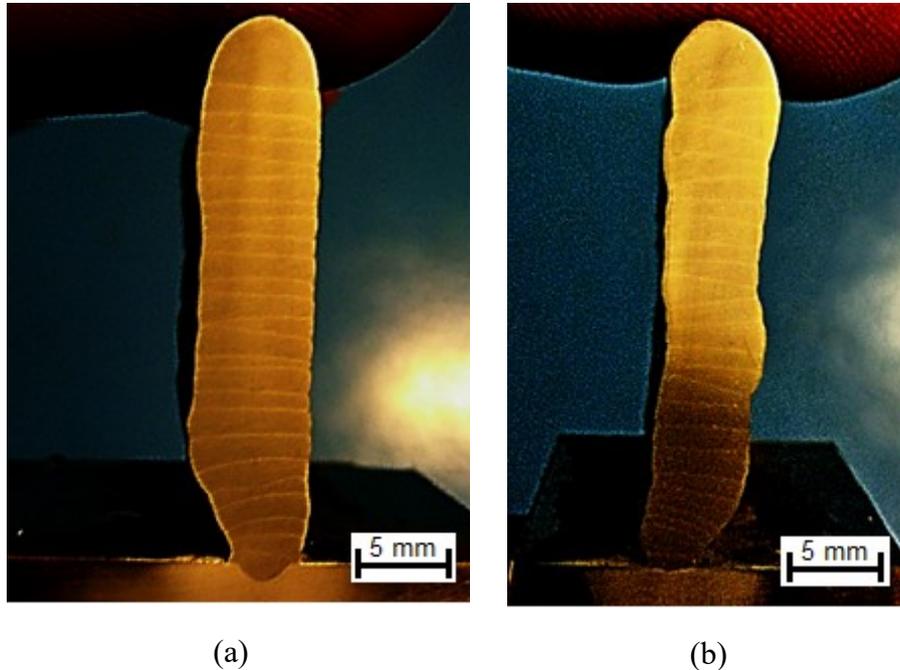


Figure 5.11: Evolution de la largeur des cordons réalisés avec les points de fonctionnement 6 (a) et 7 (b) et une vitesse d'avance de 900 mm/min, en laissant un temps de pause de 15 secondes entre les couches, en vue de coupe

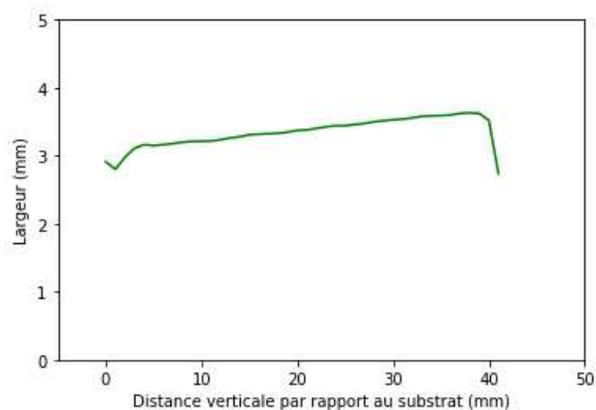


Figure 5.12: Evolution de la largeur des murs fabriqués avec le point de fonctionnement 5 et une vitesse d'avance de 2400 mm/min, dans la hauteur du cordon

5.1.4 Influence des paramètres de dépôt sur le transfert de métal

Les graphiques suivants (Figure 5.13) présentent l'évolution des volumes de métal déposé en fonction du nombre de cordons, pour les différents points de fonctionnement et vitesses d'avance. Le fait que le volume de matière déposée, calculé à partir des fichiers scannés des dépôts obtenus (cf. chapitre 2) augmente linéairement avec le nombre de cordons semble

démontrer que le régime de transfert de métal est relativement stable, avec peu de projections qui pourraient modifier la quantité de matière déposée sur le mur.

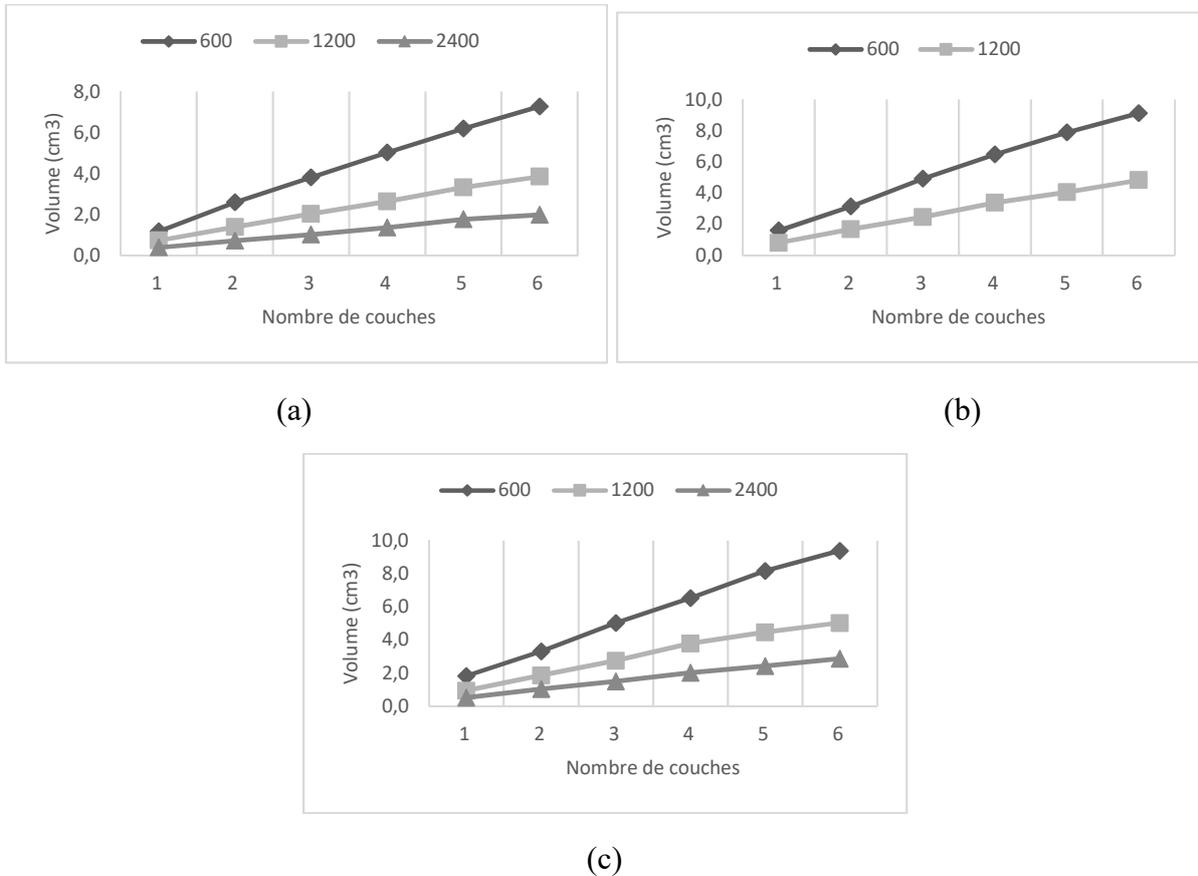
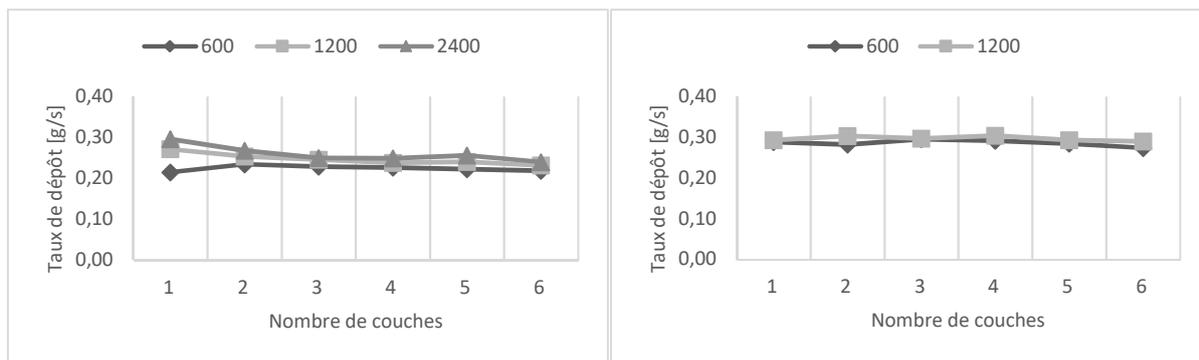


Figure 5.13: Evolution du volume de métal déposé en fonction du nombre de cordons déposés pour les différentes vitesses d'avance, pour les points de fonctionnement 5 (a), 6 (b) et 7 (c) (cordons de longueur 150 mm)

On peut déduire de ces résultats le taux de dépôt moyen, correspondant à la masse de métal déposé par seconde, en considérant la masse volumique du matériau égale à $2,7 \text{ g/cm}^3$ (Figure 5.14). Le taux de dépôt moyen, pour des paramètres procédé fixés, varie très peu avec le nombre de cordons déposés. La valeur un peu supérieure du taux de dépôt mesurée sur les premiers cordons déposés avec le point de fonctionnement 5 peut s'expliquer par une surestimation du volume mesuré à partir de la surface scannée du cordon, qui ne reproduit pas bien la zone de contact concave entre le cordon et la tôle substrat (cf. chapitre 2). En revanche, l'augmentation de la vitesse d'avance semble un peu accroître le taux de dépôt, surtout pour le point de fonctionnement 7. Ce résultat avait déjà été observé sur les dépôts mono-cordon (cf. chapitre 3).

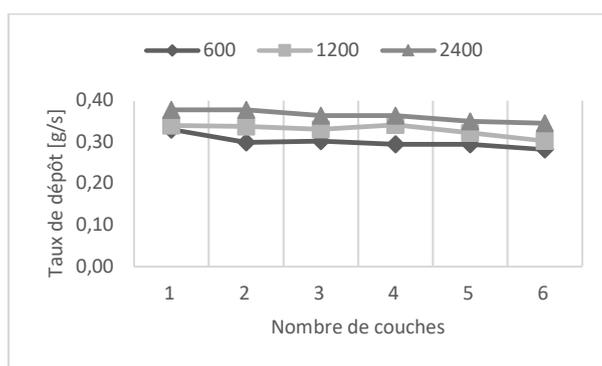
Les résultats sont résumés dans le tableau 5.2. On observe également que le taux de dépôt augmente en passant des points de fonctionnement 5 à 7. Ce résultat était attendu puisque les puissances moyennes augmentent entre les points 5 et 7, la fusion du fil doit donc être plus rapide.

Afin d'analyser plus précisément l'évolution du phénomène de transfert de métal avec la superposition des cordons, nous avons aussi analysé l'évolution des durées moyennes des phases du cycle CMT. Seuls les résultats obtenus avec le point de fonctionnement 5 sont présentés ici.



(a)

(b)



(c)

Figure 5.14: Evolution du taux de dépôt moyen estimé en fonction du nombre de cordons déposés pour les différentes vitesses de déplacement, pour les points de fonctionnement 5 (a), 6 (b) et 7 (c)

Tableau 5.2: Taux de dépôts moyens calculés

Point de synergie	Vitesse	600	1200	2400
P5	Taux de dépôt [g/s]	0,224	0,247	0,260
	Ecart-type	0,0065	0,0129	0,0182
P6	Taux de dépôt [g/s]	0,286	0,297	0,298
	Ecart-type	0,0070	0,0052	0,0089
P7	Taux de dépôt [g/s]	0,300	0,329	0,363
	Ecart-type	0,0148	0,0135	0,0123

Si l'on observe l'évolution de la durée totale moyenne du cycle de transfert CMT, on constate une certaine tendance à la diminution avec la superposition des cordons, même si cette tendance est peu marquée pour la vitesse d'avance de 1200 mm/min (Figure 5.15). Cette tendance est due à une diminution de la durée des phases d'arc froid et de court-circuit, et s'accompagne d'une diminution du poids moyen des gouttes déposées à chaque court-circuit (Figure 5.16). Ainsi, en superposant les cordons, on dépose des gouttes plus petites, à une fréquence un peu

plus élevée. Cela conduit à un taux de dépôt sensiblement constant, avec une légère diminution pour les vitesses d'avance élevées (Figure 5.16). Ce résultat peut s'expliquer par la variation de la distance entre le tube contact et la surface, le pas de translation verticale entre deux couche étant fixé à 1mm, ce qui ne correspond pas exactement à la hauteur des couches (cf. Figure 5.7 et tableau 5.1), ou par l'augmentation de la température du substrat avec l'addition des cordons. La distance tube contact - pièce évolue cependant différemment selon les vitesses. Pour la vitesse de 600 mm/min, la hauteur moyenne de couche est plus élevée que la hauteur de translation, surtout pour les premiers cordons, et la distance tube contact - pièce diminue, ce qui devrait conduire, d'après les résultats observés au chapitre 3, à une augmentation de la durée moyenne des phases de court-circuit et d'arc froid, c'est-à-dire une variation inverse de celle observée. Pour la vitesse de 2400 mm/min en revanche, la distance tube contact - pièce a tendance à augmenter légèrement (la hauteur moyenne de couche déposée est inférieure à 1 mm), ce qui doit produire une diminution des durées des phases de court-circuit et d'arc froid. Ces résultats contradictoires laissent donc supposer que l'augmentation de la fréquence des cycles est plutôt liée à l'augmentation de température du liquide, qui est moins visqueux, et conduit à une rupture plus rapide du pont liquide reliant le fil à la goutte lors du retrait du fil.

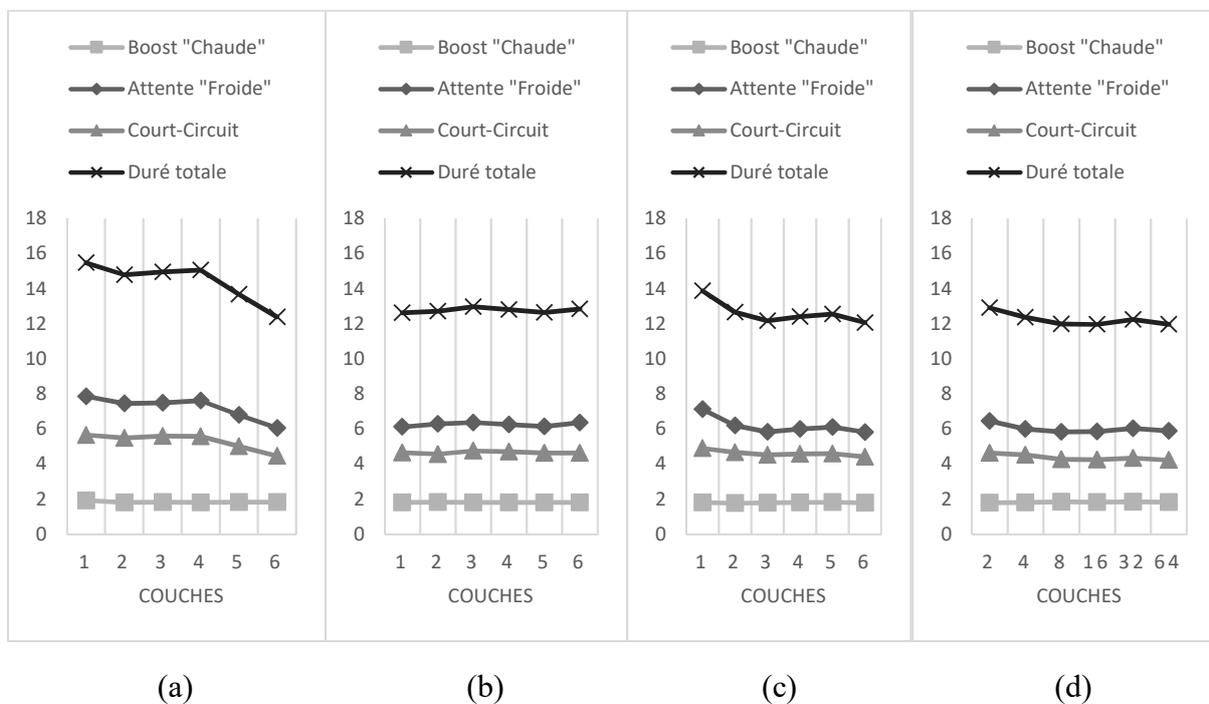


Figure 5.15: Duré moyenne (en ms) des différentes phases du cycle CMT en fonction du nombre de cordons superposés, pour le point de fonctionnement 5, à la vitesse d'avance (a) de 600 mm/min, (b) de 1200 mm/min, (c) de 2400 mm/min, et (d) de 2400 mm/min avec une translation horizontale du plateau entre deux cordons de 0,75 mm au lieu de 1 mm

Cette hypothèse est confirmée par le second essai réalisé à la vitesse de 2400 mm/min, pour lequel la hauteur de translation du plateau est fixée à 0,75 mm, valeur très proche de la hauteur moyenne des couches déposées. La diminution de la durée des phases de court-circuit et d'arc froid est presque la même qu'avec une hauteur de translation verticale du plateau de 1 mm, ce qui montre que la variation de la distance tube contact – surface est trop faible pour avoir des effets significatifs sur le transfert de métal.

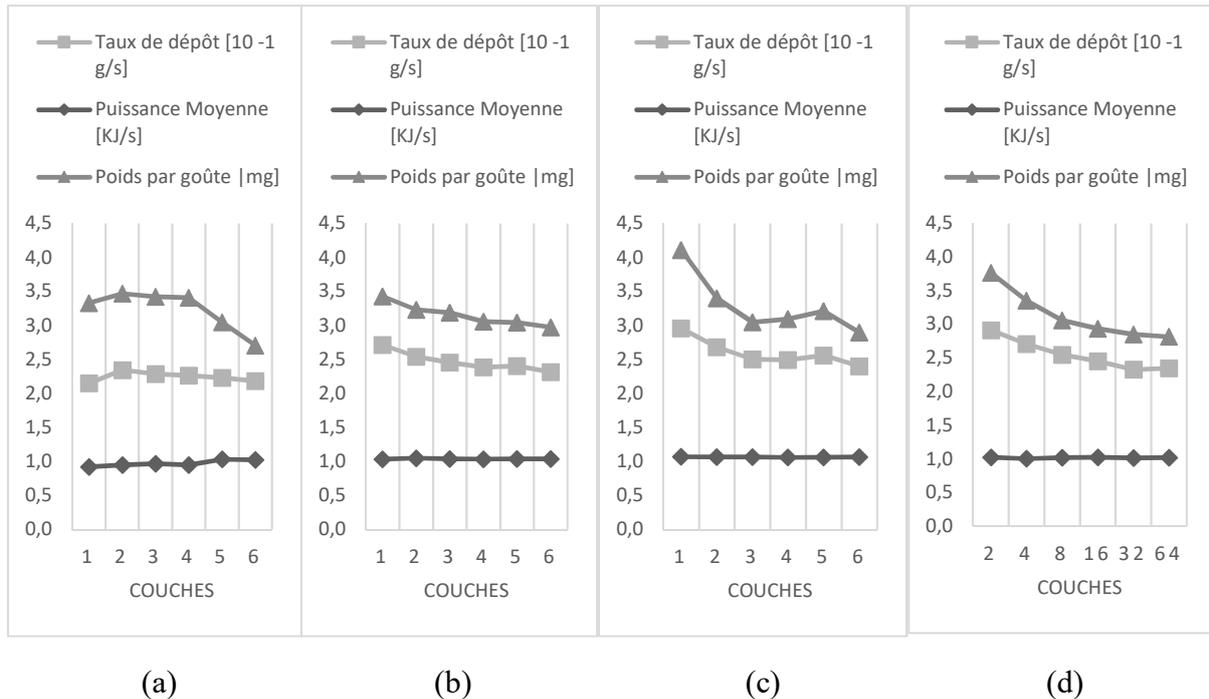


Figure 5.16: Caractéristiques du transfert de matière en fonction du nombre de cordons superposés, pour le point de fonctionnement 5, à la vitesse d'avance (a) de 600 mm/min, (b) de 1200 mm/min, (c) de 2400 mm/min, et (d) de 2400 mm/min avec une translation horizontale du plateau entre deux cordons de 0,75 mm au lieu de 1 mm

5.2 Simulation numérique thermique des dépôts

Afin de mieux comprendre les évolutions géométriques observées lors du dépôt des premiers cordons, une simulation thermique du procédé de fabrication a été menée à l'aide du logiciel Elmer. Cette simulation a aussi pour objectif de permettre de déterminer le nombre de cordons minimum à superposer avant d'atteindre un régime thermique quasi-stationnaire, qui devrait donner des géométries de cordons stabilisées.

5.2.1 Définition de la géométrie d'étude

Le domaine d'étude $\Omega \in \mathbb{R}^3$ est défini par une plaque en aluminium de dimensions $L \times l \times e = 200 \times 25 \times 3$ mm, (Figure 5.17). Seule une moitié de la plaque est considérée dans la modélisation géométrique du problème, comme on peut le voir sur la figure 5.17, du fait de la symétrie du problème physique, les cordons étant supposés être déposés au milieu de la plaque dans la direction de sa longueur. La géométrie des cordons est modélisée de manière simplifiée par des volumes semi-cylindriques de section définie par les largeurs et hauteurs de dépôt mesurées sur les cordons présentés dans les sections précédentes. L'étude est réalisée dans le repère cartésien (Oxyz) comme représenté sur la figure 5.17.

La direction de déplacement de la source de chaleur (torche de soudage CMT) est donc la direction (Oy). La plaque d'aluminium est désignée par le symbole Ω . Les surfaces du domaine Ω sont définies par Γ_{sup} , la surface supérieure où est réalisé le dépôt métallique (à $z=3$ mm), Γ_{inf} est la surface inférieure (à $z=0$ mm), Γ_{lat} est la surface latérale à $x=25$ mm, Γ_{ini} est la surface à $y=0$ mm et Γ_{fin} est la surface à $y=200$ mm. Γ_{sym} est le plan de symétrie de la plaque à $x=0$ mm. On notera que la face inférieure est en contact avec le plateau mobile de l'imprimante 3D contrairement aux autres faces qui échangent avec l'air. L'équation de la conduction de la chaleur et les conditions aux limites sont définies dans les sections suivantes.

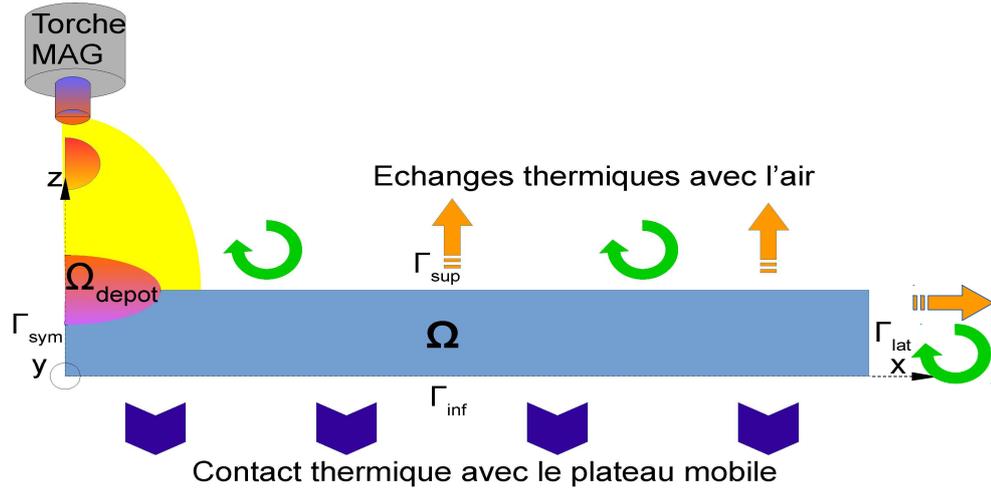


Figure 5.17: géométrie utilisée pour la simulation numérique du dépôt multi-cordons, et transferts thermiques appliqués sur le domaine considéré.

5.2.2 Équation de la conduction de la chaleur

Soit $\Omega \in \mathbb{R}^3$ le domaine d'étude et le vecteur $\vec{x} \in \Omega$ défini par $\vec{x} = (x, y, z)$. Soit I l'intervalle de temps de la simulation défini comme $I = [0, t_f]$. L'équation de la conduction de la chaleur appliquée au solide immobile Ω avec une source de chaleur volumique Q s'écrit :

$$\rho(T) \cdot C_p^{eq}(T) \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial \vec{x}} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial \vec{x}} \right) = Q(\vec{x}) \quad \text{dans} \quad \Omega \times I \quad (1)$$

avec ρ , C_p^{eq} et λ respectivement la masse volumique, la chaleur spécifique et la conductivité thermique. On supposera que ces propriétés dépendent uniquement de la température. $T(x, y, z, t)$ est le champ de température et $t \in I$ est la variable temporelle.

Le symbole « eq » du paramètre C_p^{eq} signifie que l'on prend en compte la chaleur latente de fusion H_{fus} dans le paramètre chaleur spécifique de la manière suivante :

$$C_p^{eq}(T) = C_p(T) + H_{fus} e^{-\left(\frac{T-T_f}{\Delta T_f}\right)^2} \quad (2)$$

$$\text{avec } T_f = \frac{T_{solidus} + T_{liquidus}}{2} \quad \text{et} \quad \Delta T_f = T_{liquidus} - T_{solidus}.$$

L'équation (1) est une équation différentielle aux dérivées partielles avec coefficients (propriétés thermophysiques) qui dépendent du champ de température. L'équation (1) doit être associée à un système d'équations (conditions aux limites) afin de calculer numériquement le champ de température en chaque point du domaine Ω et chaque instant de l'intervalle de temps I .

Les différentes frontières du domaine Ω sont définies sur la figure 5.17. Les équations résultant de ces conditions aux limites sont :

Sur Γ_{sup} :

$$-\lambda \left(\frac{\partial T(\vec{x}, t)}{\partial \vec{n}} \right) \cdot \vec{n} = Q_{MAG}(\vec{x}, t) + h(T)(T(\vec{x}, t) - T_{amb}) + \varepsilon(T) \sigma (T^4(\vec{x}, t) - T_{amb}^4) \quad (3)$$

où le terme de gauche de l'équation (3) représente le flux de chaleur (loi de Fourier). Le premier terme de droite de l'équation (3) Q_{MAG} est l'apport de chaleur fourni par l'arc électrique, le second terme de droite représente les pertes de chaleur par convection avec $h(T)$ qui est le coefficient de convection thermique et le dernier terme de droite représente les pertes de chaleur par rayonnement avec ε l'émissivité du matériau (cas de l'hypothèse d'un corps gris) et σ est la constante de Planck.

Sur les frontières Γ_{lat} , Γ_{ini} , Γ_{fin} (cf. Figure 5.17), on a des échanges thermiques par convection et par rayonnement entre la plaque en aluminium et l'environnement gazeux ambiant (air) :

$$-\lambda \left(\frac{\partial T(\vec{x}, t)}{\partial \vec{n}} \right) \cdot \vec{n} = h(T)(T(\vec{x}, t) - T_{amb}) + \varepsilon(T)\sigma(T^4(\vec{x}, t) - T_{amb}^4) \quad (4)$$

Sur la frontière Γ_{inf} , la plaque support en aluminium est au contact du plateau métallique de la machine de fabrication additive, et le transfert de chaleur sera donc plus important que sur les autres surfaces. Cette condition est modélisée par une modification du coefficient d'échange h dans l'équation (4) que l'on écrira H_{thc} . Ce coefficient d'échange est calculé de la manière classique suivante : $H_{thc} = \frac{1}{R_{thc}} = \frac{\lambda_{air}}{e_{air}}$ avec R_{thc} la résistance thermique de contact. Pour une lame d'air d'épaisseur $e = 0,1$ mm et une conductivité thermique de l'air de $0,0262$ W/m/K, on obtient un coefficient d'échange de 262 W/m²/K à la température ambiante. De plus, on négligera les échanges par rayonnement, ainsi l'équation (4) devient :

$$-\lambda \left(\frac{\partial T(\vec{x}, t)}{\partial \vec{n}} \right) \cdot \vec{n} = H_{thc}(T(\vec{x}, t) - T_{plateau}) \quad (5)$$

Sur la frontière Γ_{sym} , on applique une condition de symétrie dans le plan (O,y,z) ou condition de Neuman homogène :

$$-\lambda \left(\frac{\partial T(\vec{x}, t)}{\partial \vec{n}} \right) \cdot \vec{n} = 0 \quad (6)$$

Afin de résoudre le système d'équations aux dérivées partielles (1) à (6), on lui associe une condition initiale pour le champ de température dans le domaine Ω (ou la plaque en aluminium) :

$$T(\vec{x}, t = 0s) = T_{amb} \approx 293K \quad (7)$$

Notons que pour la simulation des dépôts de plusieurs cordons, la température initiale avant chaque dépôt sera progressivement augmentée pour prendre en compte l'échauffement de la tôle.

5.2.3 Modèle de source de chaleur équivalent pour le procédé MIG-CMT

La résolution du problème défini par les équations (1) à (7) à l'aide de la méthode des éléments finis requiert de définir l'expression de la source de chaleur provenant de l'arc électrique et absorbée par les pièces métalliques. Plusieurs expressions mathématiques ont été proposées pour la modélisation de la source de chaleur équivalente dans le cadre du soudage, qu'il soit d'origine électrique (soudage à l'arc TIG, MIG ...) ou à haute densité d'énergie (faisceau d'électrons et laser). Pavelic et al [109] ont proposé de modéliser la source de chaleur à l'aide d'une distribution gaussienne dans une aire limitée par un disque de rayon r tel que : $q(r) = q(0)e^{-(Cr^2)}$ avec $q(r)$ le flux de chaleur au rayon r (en W/m²), $q(0) = \eta IU$ est le flux maximum au centre du disque de rayon R_{max} (η est le rendement du procédé de soudage, I est l'intensité de soudage et U est la tension de soudage) et C est un coefficient de concentration (en m⁻²) qui

est défini comme : $R_{max} = \frac{1}{\sqrt{c}}$. Cette modélisation convient bien lorsque qu'il n'y a pas fusion de la pièce. Goldak et al [110] ont amélioré le modèle de Pavelic en proposant d'utiliser une double ellipsoïde comme schématisée sur la figure 5.18. Goldak et al distinguent la partie avant (front) et arrière de la zone échauffée en les caractérisant avec un jeu de 3 coefficients a, b, c. Une expression gaussienne est aussi employée mais un coefficient différent est utilisé dans les 3 directions du repère.

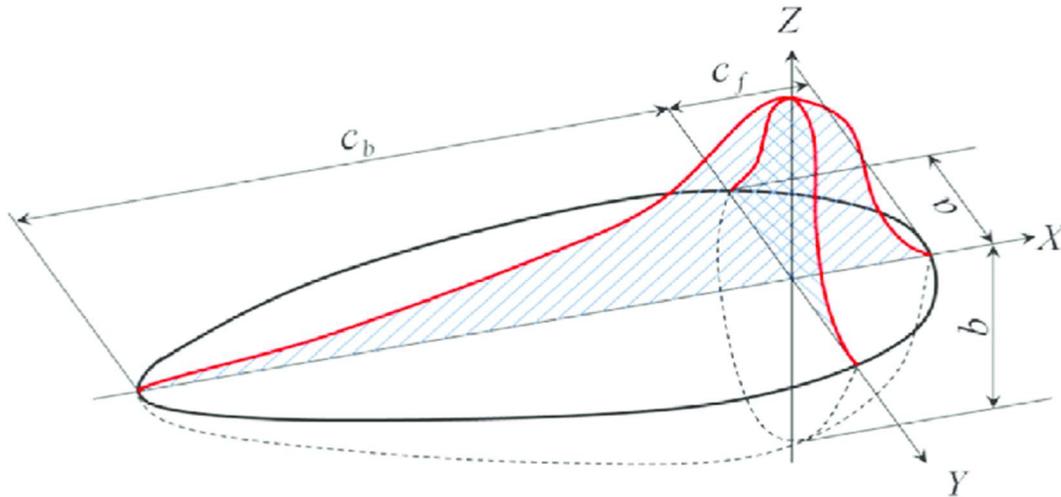


Figure 5.18: modélisation de la source de chaleur équivalente par une double ellipsoïde Gaussienne.

L'expression mathématique de cette double ellipsoïde Gaussienne, dans un repère cartésien fixe, est donnée par :

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}fQ}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-\left(\frac{3x^2}{c^2}\right)} e^{-\left(\frac{3y^2}{a^2}\right)} e^{-\left(\frac{3[z+v(\tau-t)]^2}{b^2}\right)} \quad (8)$$

avec $f = f_f$ à l'avant de la torche, et $f = f_r$ à l'arrière, sous la condition $f_f + f_r = 2$.

Le coefficient f permet d'obtenir des gradients thermiques plus importants à l'avant de la source de chaleur et moins importants à l'arrière, comme l'a constaté Goldak et al. lors d'essais de soudage avec le procédé arc submergé. C'est cette modélisation qui est retenue pour représenter la source de chaleur équivalente du procédé CMT. On retrouve souvent des valeurs respectives pour f_f et f_r égales à 0,6 et 1,4 que ce soit pour simuler le soudage par faisceau d'électron [110], ou le soudage MIG [66,70] et 0,4 et 1,6 dans le cas du soudage TIG [68]. Pour des raisons de continuité de la double ellipsoïde dans le plan $x=0$, une autre contrainte apparaît sur le coefficient c qui lui aussi prend une valeur différente sur la partie frontal de la source de chaleur par rapport à la partie arrière. On a ainsi : $\frac{f_f}{c_f} = \frac{f_r}{c_r}$ ce qui donne la relation suivante :

$$f_f = 2 \frac{c_f}{c_f + c_r} = 2 - f_r \quad [111].$$

Si nous prenons les valeurs de 0,6 et 1,4 respectivement pour f_f et f_r , nous obtenons la relation suivante : $C_r = 2,33C_f$.

5.2.4 Simulation thermique du dépôt de matière par le procédé CMT

La chaleur latente de fusion, qui a peu d'effet sur la précision des résultats mais un effet important sur le temps de calcul, n'a pas été prise en compte ici.

5.2.4.1 Simulation thermique du dépôt d'un mono-cordon

La simulation thermique d'un dépôt mono-cordon d'une longueur de 100 mm à la vitesse de 900 mm/min sur une tôle de longueur 200 mm a d'abord été réalisée. La géométrie de la section du dépôt modélisé a la forme d'un quart de cylindre, de rayon $r=1,8$ mm. Ces dimensions sont proches de celles des cordons réalisés avec le point de fonctionnement 5 à la vitesse de 900 mm/min. La géométrie utilisée est décrite sur la figure 5.19. Le volume du dépôt ainsi que la zone sous le dépôt dans la tôle sont maillés avec des éléments parallélépipédiques (dans la tôle support sous le cordon) et tétraédriques (dans le cordon) d'une taille de $300 \mu\text{m}$ (dans les 3 directions). Des éléments tétraédriques (reste de la tôle support) sont uniquement utilisés dans les zones éloignées avec une taille augmentant progressivement (environ 1,5 mm sur le bord de la tôle en $x=20$ mm).

Cette simulation va servir à déterminer la zone dite « quasi-stationnaire », dans laquelle les cycles de température des points situés à une même distance du centre de la source subissent les mêmes variations. D'un point de vue expérimental, lorsque le cordon atteint un régime quasi-stationnaire thermique, la forme géométrique du cordon devrait rester la même car les forces de tension superficielles sur le bain devraient être constantes et produire un cordon avec le même mouillage.

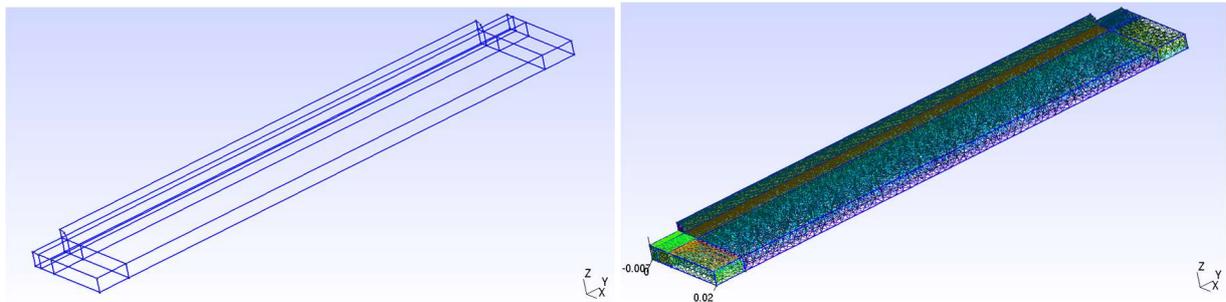


Figure 5.19: (gauche) géométrie utilisée pour l'étude numérique thermique d'un dépôt sur une tôle en aluminium. (droite) maillage généré avec une taille d'éléments finis imposée de $300 \mu\text{m}$ sur la zone proche de l'axe de symétrie ($x=0$ mm).

Afin de limiter le temps de calcul, seul l'échauffement produit par le passage de la source de chaleur suivi d'un refroidissement de 15 secondes est simulé. Le retour à la température ambiante de l'ensemble n'est donc pas atteint. Pour éviter que le dépôt ne perturbe le champ de température à l'avant de la source, une technique dite « birth element » est employée. Elle consiste à conférer aux éléments finis du dépôt qui sont devant la source de chaleur des propriétés physiques (densité, conductivité thermique, chaleur spécifique) proches de celles d'un gaz, jusqu'au passage de la source. Les paramètres de soudage ainsi que les propriétés thermophysiques de l'Aluminium sont donnés ci-dessous.

Tableau 5.3: Paramètres de soudage et de la double ellipsoïde retenus pour la simulation

Paramètre	I (A)	U (V)	Vf (mm/s)	η	c_f (mm)	b (mm)	a (mm)	f_f
Valeur	76	12,3	15	0,79	2	1,1	4	0,6

Les valeurs retenues pour les propriétés thermophysiques de l'alliage d'Aluminium 4043(Al-5Si) sont issues de [112]. Les expressions pour la densité, la chaleur spécifique et la conductivité en fonction de la température sont les suivantes :

$$\rho_{sol}(T) = 2680 - 0,212(T - 293) \text{ tant que } T < T_m \text{ sinon } \rho_{liq} = 2385\text{kg/m}^3 \text{ lorsque } T > T_m$$

$$C_{psol}(T) = 728,4 + 0,5.T - 8e - 4T^2 \text{ si } T < T_m \text{ sinon } C_{pliq}(T) = 1160\text{J/kg}$$

$$\lambda(T) = 149,7 + 0,0809.T - 0,0001.T^2 \text{ si } T < T_m \text{ sinon } \lambda_{sol} = 68\text{W/m/K}$$

Les cycles de température relevés le long de l'axe de symétrie (en $x=0$ mm) sur la surface supérieure (en $z=3$ mm), représentés sur la Figure 5.20, restent quasiment identiques pour tous les points situés au-delà de 30 mm environ du début du cordon, distance parcourue après les 2 premières secondes de dépôt. Le régime thermique quasi-stationnaire, à la vitesse de déplacement de 900 mm/min, est ainsi atteint après environ 30 mm de dépôt, ce qui peut expliquer les difficultés de mouillage du dépôt observées au début des cordons. Le point situé en fin de cordon ($y=100$ mm), qui correspond à la zone d'extinction de la source de chaleur, atteint une température maximale un peu plus faible. Cette faible valeur est probablement due à la manière de programmer l'arrêt de la source numériquement. La source de chaleur est stoppée lorsqu'elle dépasse la valeur $y=100$ mm. Une condition d'arrêt sur le temps éliminerait probablement cet artefact numérique. Notons que les valeurs maximales atteintes le long de cet axe, qui correspondent à la température du cordon à l'état liquide, ne sont pas représentatives de la température réelle du dépôt, car les phénomènes de convection produits par les écoulements de fluide ne sont pas modélisés.

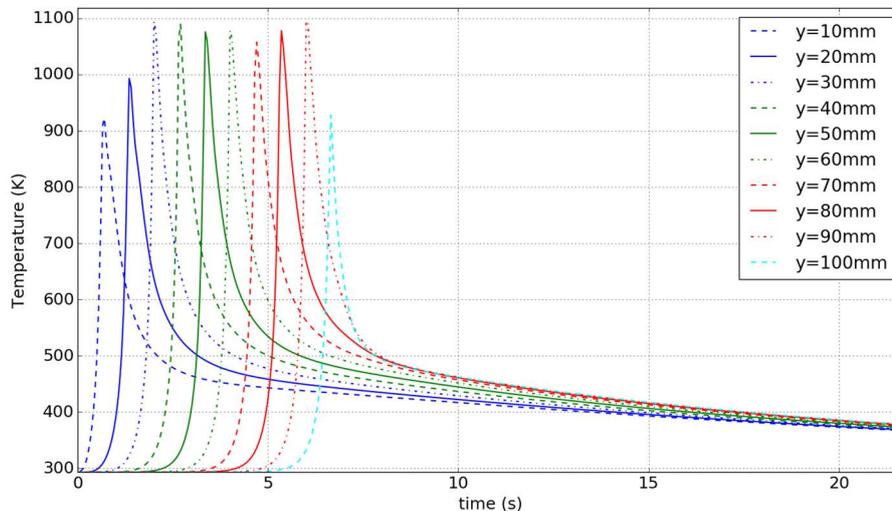


Figure 5.20 : évolution des cycles de température au cours du dépôt le long de l'axe de symétrie (en $x=0$ et $z=3$ mm)

On constate que le gradient de température est très important dans la section transverse au moment du passage de la source de chaleur, mais que ce gradient se réduit très vite, puisqu'il n'est plus que de quelques degrés après 4 à 5 secondes entre le point situé au centre de la source et le point situé sur la face envers à 15 mm du plan de symétrie (Figure 5.21).

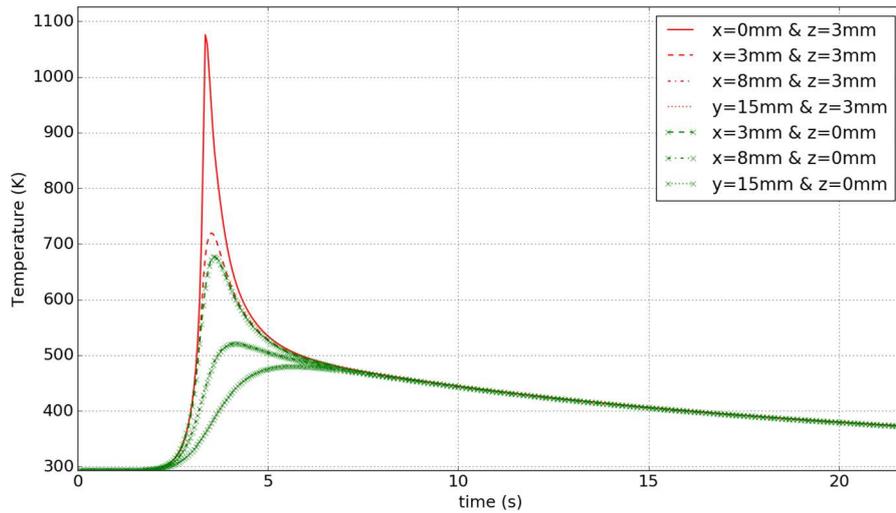


Figure 5.21: évolution de la température en différents points situés sur la section transverse au déplacement de la source de chaleur, en $y=50\text{mm}$ ($t=3.2\text{s}$).

Les figures 5.22 et 5.23 présentent l'évolution de la température en différents points alignés le long de l'axe y mais à une distance différente de l'axe de symétrie : respectivement 3 mm et 8 mm. On remarque nettement, comme pour la figure 5.20, que les pics de température sont du même ordre à partir de 30 mm de cordon déposé. Ces pics de température restent très stables avant d'atteindre la fin du cordon en $y=100\text{ mm}$. On voit sur la figure 5.23, que le pic de température en $y=90\text{ mm}$ est inférieur à ceux compris entre 30 mm et 80 mm. Il semble qu'il y ait un effet de bord sur la fin du cordon, et la température n'atteint pas celle des pics précédents. Il semble donc que le régime thermique quasi-stationnaire soit atteint dans la tôle uniquement dans les zones situées entre 30 mm et 80 mm du début du cordon (pour un cordon de longueur 100 mm), alors que pour le cordon (figure 5.20), le régime quasi-stationnaire est également atteint après 30 mm, mais est conservé jusqu'à l'extinction de l'arc d'après les simulations.

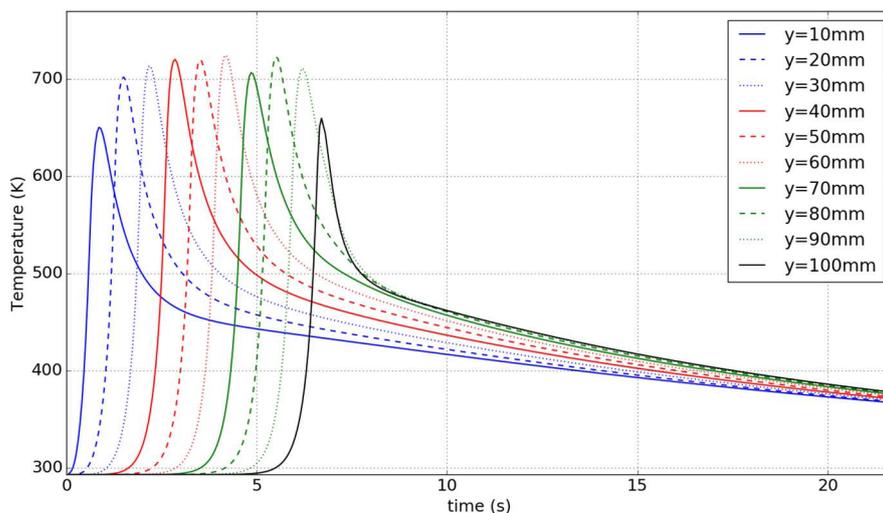


Figure 5.22 : évolution de la température en différents points situés à 3 mm de l'axe de symétrie sur la face supérieure de la tôle.

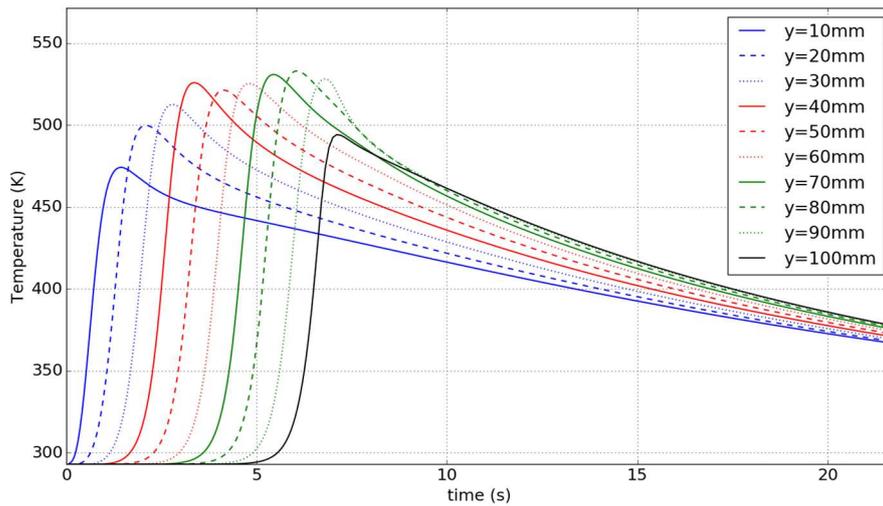
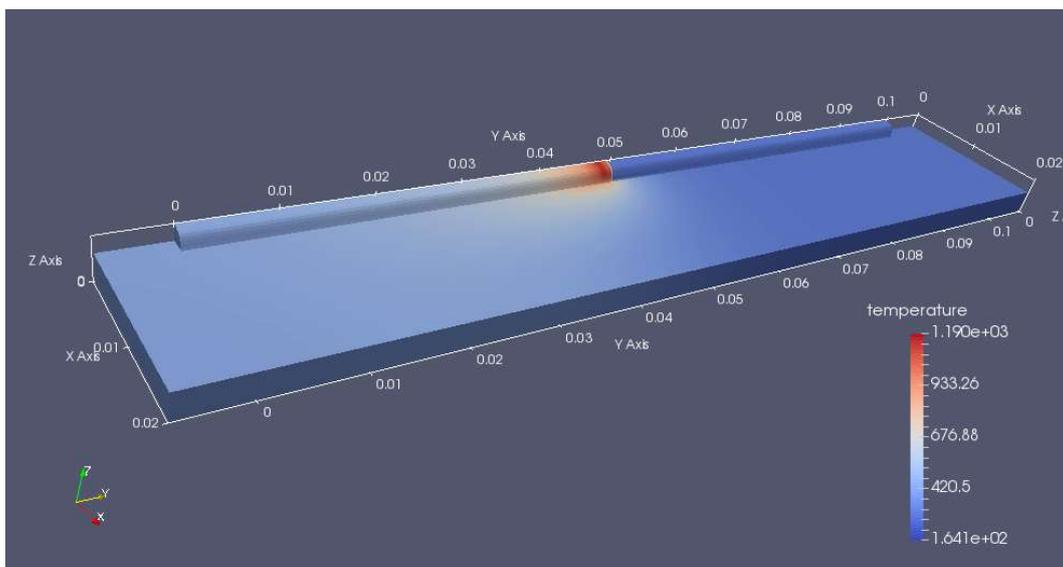


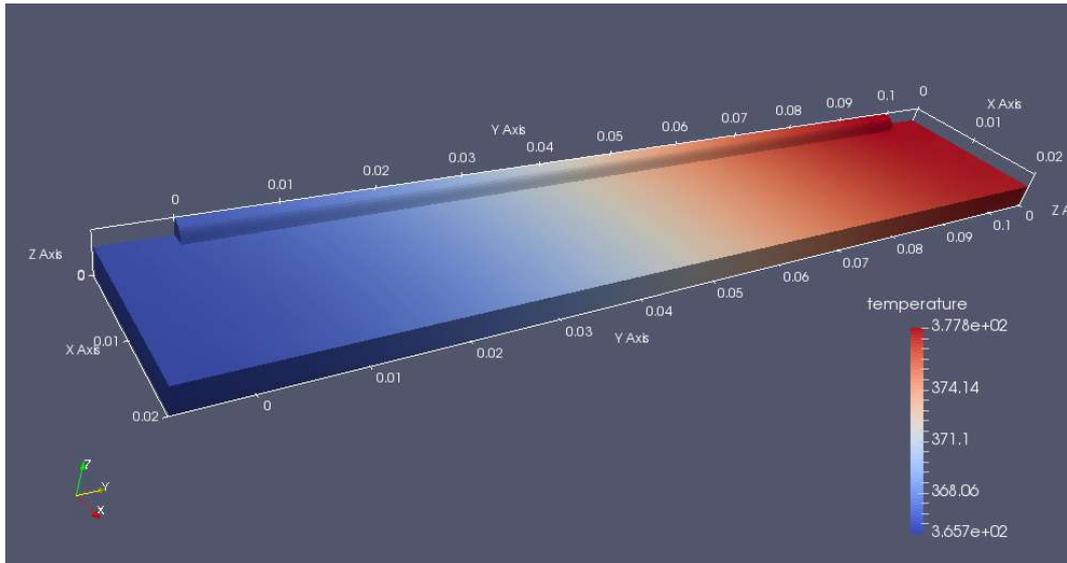
Figure 5.23 : évolution de la température en différents points situés à 8 mm de l'axe de symétrie sur la face supérieure de la tôle.

Notons qu'à la fin de la simulation, soit 15 secondes après l'extinction de la source de chaleur, les températures sont presque uniformes en tous les points étudiés. Les températures dans la tôle support et le cordon sont alors comprises entre 365K et 378K (cf. figure 5.24b). La vitesse de refroidissement est très lente, de l'ordre de 7 K/s, ce qui montre que le refroidissement jusqu'à la température ambiante sera long (cette vitesse de refroidissement dépend cependant fortement du contact thermique entre la tôle support et le plateau mobile). Ce résultat valide en partie le choix du temps d'attente entre deux cordons, de 10 secondes, qui paraît suffisant pour produire l'homogénéisation des températures dans le cordon et la tôle par conduction thermique. Au-delà de cette durée, les gradients thermiques dans la tôle étant très faibles, le refroidissement se poursuivra principalement par des transferts de chaleur par conduction dans le plateau de la machine d'essai et par convection avec le milieu gazeux environnant, qui sont beaucoup plus lents.

Les figures 5.24 montrent la distribution de la température dans la tôle support et le dépôt à deux instants différents.



(a)



(b)

Figure 5.24 (a) champ de température après 3.2s de simulation ($T_{max} \sim 1190K$), (b) champ de température après 21,67s de simulation ($T_{min} \sim 365K$ & $T_{max} \sim 378K$).

Sur la figures 5.24a, la source de chaleur a parcouru une distance de 50 mm, et on voit bien sa position à travers l'échauffement qu'elle produit sur le cordon. La partie de la tôle située à l'avant est encore froide, sa température étant toujours proche de la température ambiante. En revanche, la partie de la tôle située à l'arrière est relativement chaude (plus de 450 K), et possède une température relativement uniforme, ce qui montre que la chaleur diffuse très vite après le passage de la source de chaleur, du fait de la grande conductivité thermique de l'aluminium. La figure 5.24b montre la tôle 15s après l'extinction de la source de chaleur, et on peut constater que la température est presque uniforme dans toute la tôle et le dépôt, avec des températures comprises entre 365 K et 378 K.

5.2.4.2 Simulation thermique de dépôts multi-cordons

Dans cette partie, nous étudions l'influence de la superposition de plusieurs cordons sur l'évolution des températures dans les murs formés et la tôle substrat. Le but de ces travaux est de pouvoir estimer le nombre de cordons à partir duquel le cycle thermique des dépôts devient identique dans les différents cordons. Les résultats précédents ont montré que la température de la tôle et du dépôt devenait presque uniforme 10 à 15 secondes après l'extinction de la source, durée qui correspond sensiblement au temps d'attente imposé entre deux dépôts (10 ou 15 secondes selon les essais). Afin de limiter les temps de calcul, chaque dépôt est simulé séparément, et la température moyenne calculée à la fin du calcul est utilisée comme température initiale pour la simulation du dépôt du cordon suivant. La réalisation d'un dépôt constitué de 12 cordons superposés a ainsi été simulée.

Les figures 5.25a-d présentent le champ de température à l'instant $t=4$ s, soit après 60 mm de cordon déposé, lors du dépôt des cordons 3, 6, 9 et 12. On peut voir que la température maximale augmente progressivement jusqu'à une valeur relativement élevée, de 1630 K, mais a tendance à se stabiliser après 9 à 12 couches, les pertes par convection et rayonnement à partir de la surface de la tôle, et surtout par conduction dans le plateau support de la machine, équilibrant l'apport de chaleur produit par la source de chaleur.

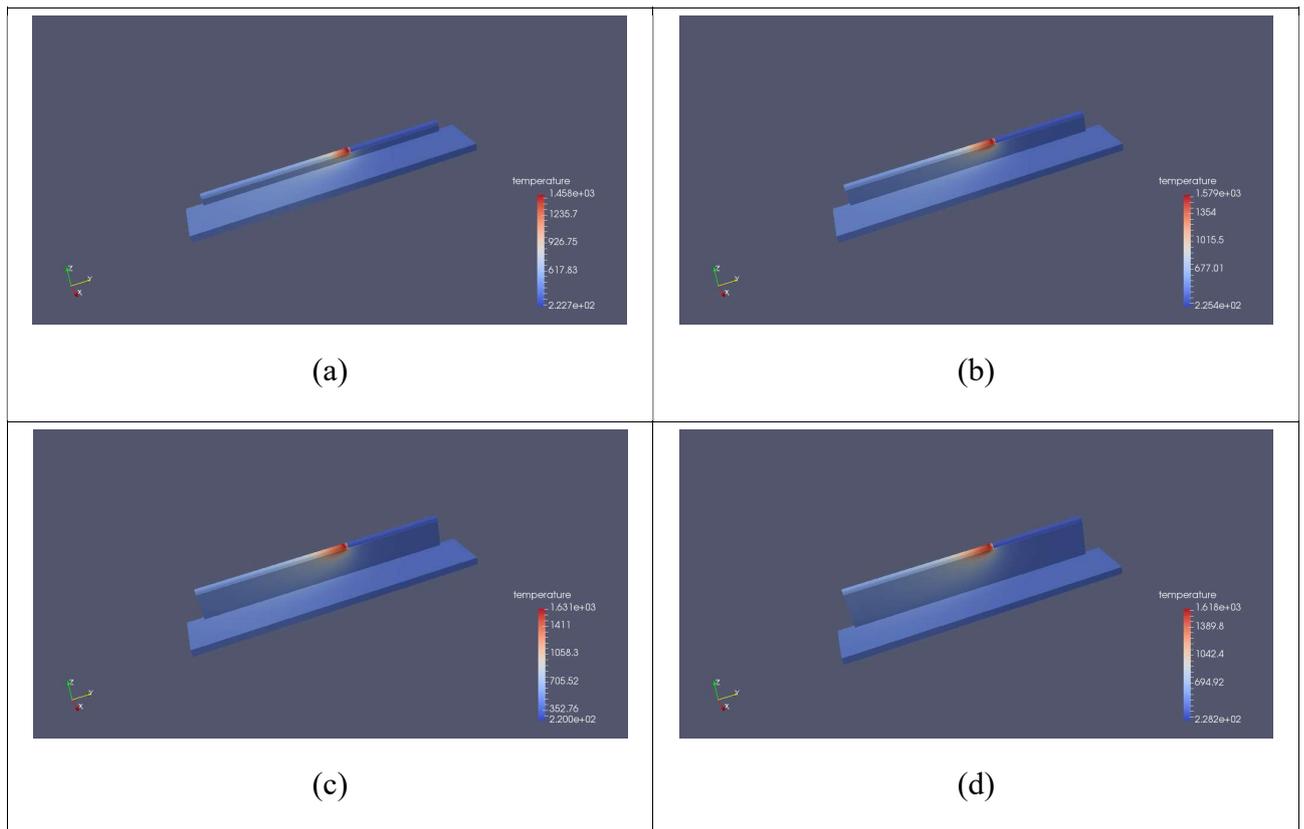


Figure 5.25 Champs de température à l'instant $t=4$ s, soit après 60 mm de cordon déposé dans les dépôts obtenus après (a) le troisième, (b) le sixième, (c) le neuvième et (d) le douzième cordon.

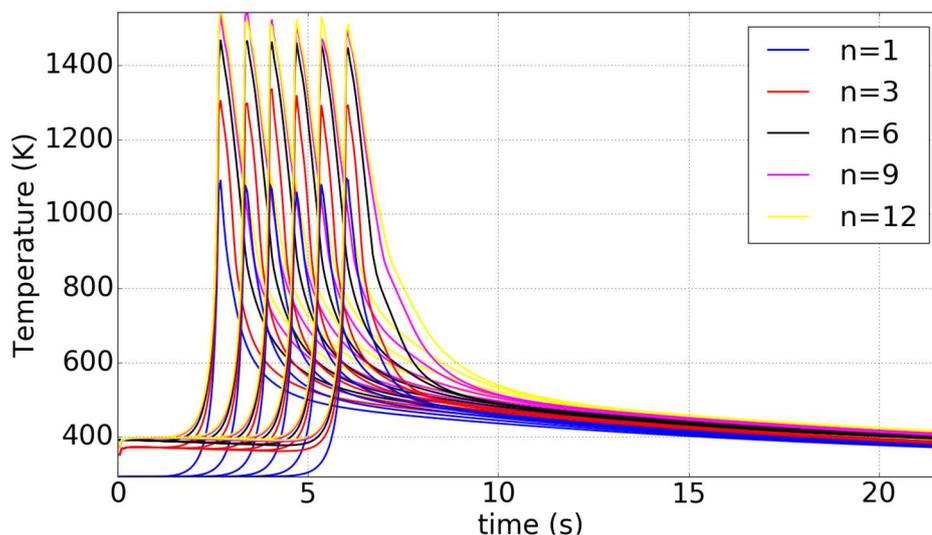


Figure 5.26 évolution de la température en différents points de l'axe de symétrie (en $x=0$ mm et en $z=3$ mm), pour un nombre de cordon $n = 1, 3, 6, 9$ et 12 .

La figure 5.26 présente l'évolution des cycles thermiques subis en différents points de l'axe de symétrie (en $x=0$ m), sur la surface supérieure de la tôle (soit $z=3$ mm), lors du dépôt de différents cordons. On peut constater que la température initiale au début du dépôt augmente fortement entre le premier et le second cordon, passant de 293 K à 370 K environ, mais qu'elle n'augmente ensuite que très peu, de 10 K seulement à chaque nouveau dépôt, et tend même à

se stabiliser un peu au-dessus de 400 K à partir du neuvième dépôt. Cette stabilisation s'observe également sur l'ensemble des cycles thermiques subis par les différents points le long de l'axe de symétrie. Ces derniers ne varient quasiment plus après la réalisation du 9^{ème} cordon dans la zone quasi-stationnaire.

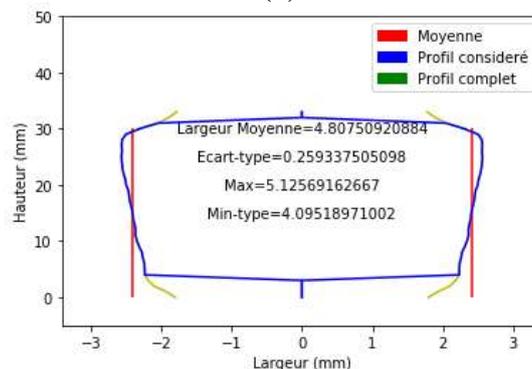
Ces résultats numériques confirment les résultats expérimentaux, qui montraient que la largeur des cordons tendait à se stabiliser après la superposition de 5 à 10 cordons.

5.3 Correction des défauts de fabrication

Les résultats de simulation numérique ont montré que la température moyenne des dépôts augmentait progressivement avec la superposition des cordons, ce qui conduit à des cordons de plus en plus larges pour les premiers cordons. Ce résultat explique la géométrie des murs obtenus dans la première partie du chapitre, avec des paramètres de construction identiques pour l'ensemble des cordons superposés. D'autres défauts sont aussi souvent observés : l'apparition, après la superposition de quelques cordons, de « vagues » de forte amplitude dans la hauteur des murs, associées à des variations plus ou moins périodiques de la largeur (Figure 5.27). Ce défaut est souvent observé lors de l'utilisation du point de fonctionnement 5, et parfois aussi avec les points de fonctionnement 6 et 7. Ces défauts semblent s'apparenter au phénomène de « humping » déjà observé sur les dépôts mono-cordon réalisés à grande vitesse d'avance (cf. 4.1.3), mais ils apparaissent dans les dépôts multi-cordons même à de faibles vitesses d'avance. Ce phénomène s'accompagne en outre toujours d'une forte augmentation de la largeur de mur dans les premiers cordons superposés (Figure 5.27b).



(a)



(b)

Figure 5.27: Mur obtenu par la superposition de 30 cordons déposés avec le point de fonctionnement 5 à la vitesse de 900 mm/min : (a) fluctuations de la hauteur du mur, et (b) évolution de la largeur du dépôt en fonction de la hauteur

Ces défauts s'apparentent également à ceux observés à l'amorçage, lorsque le mouillage de la macro-goutte n'est pas suffisant, produisant un angle de mouillage supérieur à 90° (cf. 4.1.2.1). Dans le cas des dépôts multi-cordons, la largeur de dépôt s'accroît lors de la superposition des premiers cordons, du fait de l'accumulation de chaleur. Ce phénomène peut produire des cordons dont l'angle de mouillage avec le cordon sous-jacent est supérieur à 90°. Une augmentation localisée de la hauteur du cordon produit alors une augmentation de son rayon dans la section transversale (Figure 5.28), et une diminution de la pression interne, conduisant

au phénomène d'aspiration du métal vers le haut du bain liquide. Il faut alors attendre que le sommet de la « vague » se solidifie pour que le phénomène disparaisse. L'aspiration du métal liquide vers le sommet de la vague, produit un manque de matière responsable de la formation de « vallées » plus étroites entre les « bosses » plus larges.

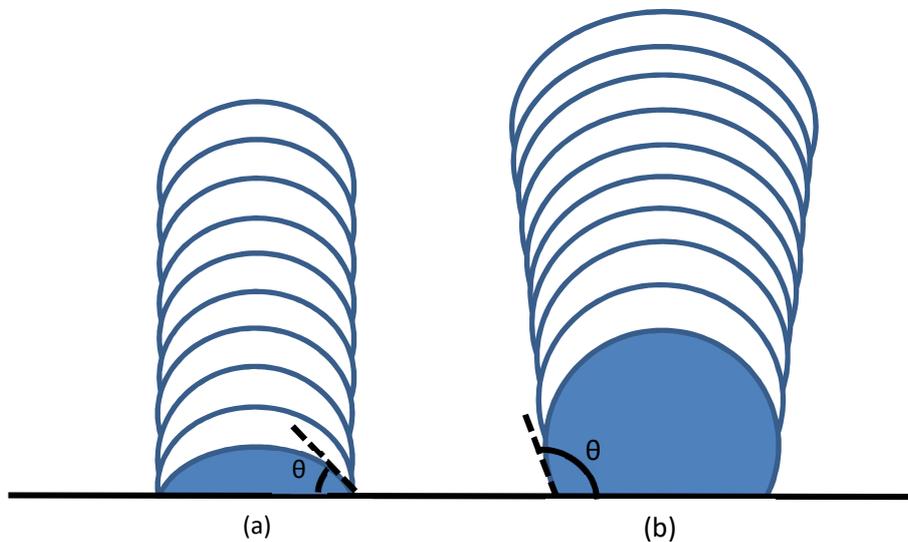


Figure 5.28: Représentation simplifiée de la géométrie, en coupe transversale, des cordons déposés sur les murs, (a) pour une largeur de cordon constante ou qui diminue (angle de mouillage inférieur à 90°), et (b) pour une largeur de cordon qui augmente (angle de mouillage supérieur à 90°)

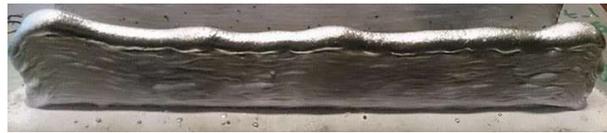
Pour éviter l'apparition de ce défaut, il faut alors éviter que la largeur des murs n'augmente, c'est-à-dire qu'il faut conserver un bain de fusion de volume suffisamment faible en comparaison des cordons déjà déposés, pour conserver un angle de mouillage inférieur à 90° .

5.3.1 Amélioration de la géométrie des dépôts multi-cordons

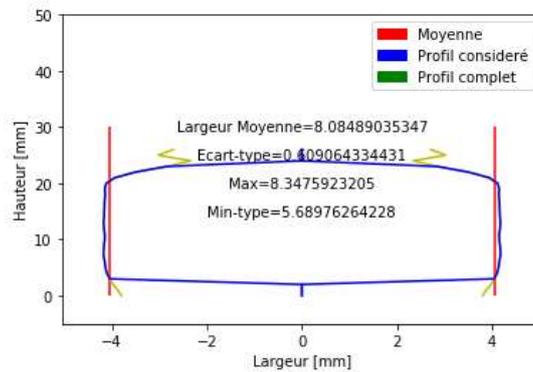
Plusieurs solutions ont été recherchées pour améliorer la régularité des murs et éliminer ce défaut. Dans un premier temps, les paramètres ont été modifiés de manière à augmenter l'énergie apportée pour permettre un meilleur mouillage du premier cordon sur le substrat, et produire des cordons plus larges dans les premières couches.

La figure 5.29 montre la géométrie de mur obtenue en augmentant la durée de la phase d'arc chaud jusqu'à 5 ms (au lieu de 2 ms), en conservant tous les autres paramètres du point de fonctionnement 5 constants.

Les ondulations sur la surface du mur ont été réduites, mais pas totalement éliminées. La largeur du mur est en revanche beaucoup plus régulière, hormis dans le premier cordon déposé, où elle demeure plus faible. La largeur est cependant fortement accrue, puisque les murs formés ont une largeur moyenne de 8 mm environ, au lieu de 5 mm environ (mais avec de fortes variations depuis la base vers le haut du mur) avec les paramètres standards du point 5. La hauteur moyenne de chaque couche déposée est plus faible (0,9 mm au lieu de 1,1 mm environ), ce qui nécessite alors plus de cordons pour obtenir une hauteur de pièce équivalente, et donc des temps de fabrication plus élevés.



(a)



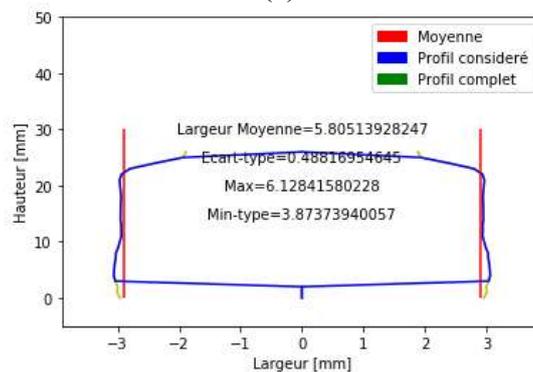
(b)

Figure 5.29: (a) Aspect général et (b) évolution de largeur du dépôt multi-cordons obtenu par la superposition de 30 cordons réalisés en augmentant l'intensité de la phase d'arc chaud du point de fonctionnement 5 (5 ms au lieu de 2 ms), à la vitesse d'avance de 900 mm/min.

Toujours dans le but d'accroître la puissance moyenne, et donc l'énergie produite, la vitesse de fil a été réduite à 10 m/min (au lieu de 25 m/min avec les paramètres standards du point de fonctionnement 5), de manière à augmenter la durée de la phase d'arc froid, en conservant tous les autres paramètres du point de fonctionnement 5 constants. Les résultats sont plus concluants, montrant un mur qui est presque régulier, en hauteur comme en épaisseur (Figure 5.30).



(a)



(b)

Figure 5.30 : (a) Aspect général et (b) évolution de largeur du dépôt multi-cordons obtenu par la superposition de 30 cordons réalisés en diminuant la vitesse de descente du fil du point de fonctionnement 5 (10 m/min au lieu de 25 m/min), à la vitesse d'avance de 900 mm/min.

La largeur est ici plus faible que celle obtenue après l'augmentation de la durée de la phase d'arc chaud (6 mm environ). En revanche, la hauteur déposée est du même ordre, donc plus faible qu'avec les paramètres standard, ce qui peut s'expliquer d'une part par la plus forte

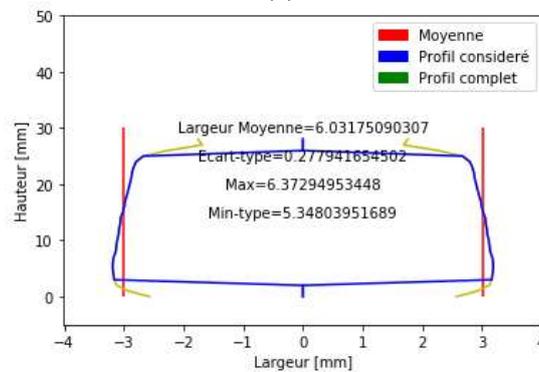
largeur, mais aussi par un taux de dépôt plus faible, la diminution de la vitesse du fil réduisant fortement la fréquence des courts-circuits, qui n'est pas entièrement compensée par l'augmentation du poids des gouttelettes déposées à chaque court-circuit.

Les modifications suivantes ont consisté à réduire progressivement l'énergie linéique déposée, de manière à tenter de compenser l'augmentation de la température des dépôts et du substrat par une diminution de la quantité de chaleur apportée, et conserver ainsi une largeur de mur constante.

La première modification a consisté à réduire progressivement l'intensité du courant d'arc chaud, de manière à limiter l'énergie linéique. Une diminution de 1 ampère à chaque couche n'a pas été suffisante pour empêcher l'élargissement des cordons lors des premiers dépôts (Figure 5.31b). En revanche, après une dizaine de cordons déposés, la largeur se réduit. Ce résultat n'est pas surprenant, puisque la simulation numérique a révélé qu'un régime thermique quasi-stationnaire s'établissait après la superposition d'une dizaine de cordons, ce nombre pouvant cependant varier selon les énergies linéiques employées, du fait de l'équilibre entre l'apport de chaleur supplémentaire par le nouveau cordon déposé et les pertes par les surfaces de l'éprouvette. La diminution de l'intensité du courant de la phase d'arc chaud lorsque ce régime quasi-stationnaire est atteint réduit donc la quantité de chaleur apportée, et la largeur de cordon.



(a)



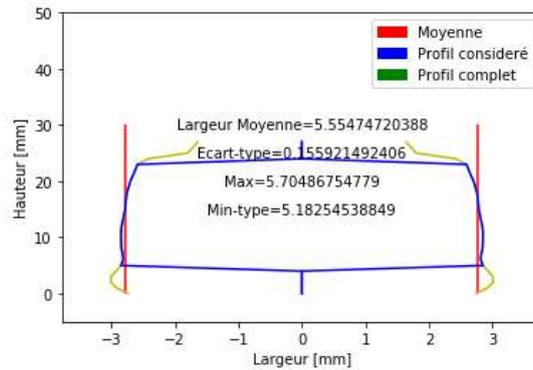
(b)

Figure 5.31: (a) Aspect général et (b) évolution de largeur du dépôt multi-cordons obtenu par la superposition de 30 cordons réalisés en diminuant à chaque cordon l'intensité de la phase d'arc chaud de 1 A, à partir des paramètres du point de fonctionnement 6.

La modification suivante a consisté à augmenter progressivement la vitesse d'avance après le premier cordon déposé, d'un pas de 15 mm/min à chaque nouveau cordon, en partant d'une vitesse de 900 mm/min pour la première couche, de manière à tenter là encore de conserver une largeur de cordon sensiblement constante, malgré l'accumulation de chaleur dans la pièce. Le point de fonctionnement 6 est choisi cette fois. Les résultats de la figure 5.32 montrent que cette stratégie conduit, après une stabilisation relative de la largeur du mur, à une diminution de celle-ci, indiquant vraisemblablement que le régime thermique quasi-stationnaire est atteint, et que la vitesse d'avance devrait alors être maintenue constante pour conserver une largeur régulière.



(a)



(b)

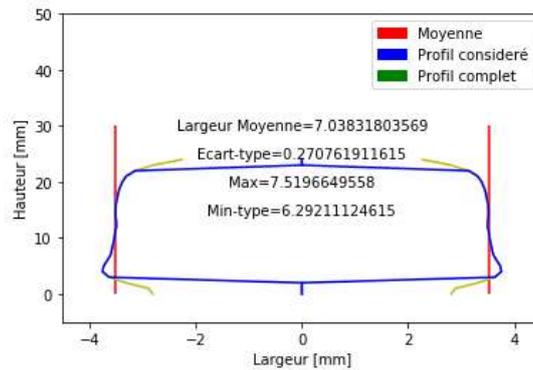
Figure 5.32: (a) Aspect général et (b) évolution de largeur du dépôt multi-cordons obtenu par la superposition de 30 cordons réalisés en augmentant par pas de 15 mm/min la vitesse d'avance, en partant d'une valeur de 900 mm/min pour le premier cordon, avec le point de fonctionnement 6.

Les deux dernières stratégies ont permis d'éliminer en grande partie les oscillations de la surface des murs, ce qui confirme que ces défauts sont au moins partiellement liés à l'élargissement des murs lors du dépôt des premiers cordons.

Par la suite, seul le paramètre vitesse d'avance est modifié, en utilisant les paramètres du point de fonctionnement 5, qui produisent les plus fortes ondulations de murs.



(a)



(b)

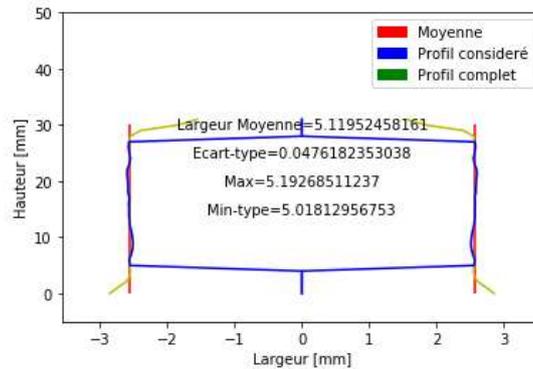
Figure 5.33: (a) Aspect général et (b) évolution de largeur du dépôt multi-cordons obtenu par la superposition de 30 cordons réalisés en augmentant pendant les 10 premiers cordons, par pas de 45 mm/min, la vitesse d'avance, en partant d'une valeur de 600 mm/min pour le premier cordon, avec le point de fonctionnement 5.

La figure 5.33 montre le mur formé après la superposition de 30 cordons, en augmentant progressivement la vitesse durant les dix premiers cordons pour passer de 600 mm/min à 900 mm/min. Cette variation n'élimine pas complètement l'augmentation de l'épaisseur durant les premiers cordons, même si les ondulations sont significativement réduites.

Finalement, les meilleurs résultats sont obtenus en augmentant fortement la vitesse dès le deuxième dépôt. La figure 5.34 montre les murs obtenus avec le point de fonctionnement 5 en passant d'une vitesse d'avance de 300 mm/min au premier dépôt à 900 mm/min à partir du second dépôt.



(a)



(b)

Figure 5.34: (a) Aspect général et (b) évolution de largeur du dépôt multi-cordons obtenu par la superposition de 30 cordons réalisés en augmentant dès le second cordon la vitesse d'avance de 300 mm/min à 900 mm/min, puis en maintenant cette vitesse constante, avec le point de fonctionnement 5.

Le mur obtenu dans ces conditions, s'il n'est pas totalement régulier dans la hauteur, est le plus régulier en largeur, avec une valeur moyenne légèrement supérieure à 5 mm.

5.3.2 Contrôle du procédé

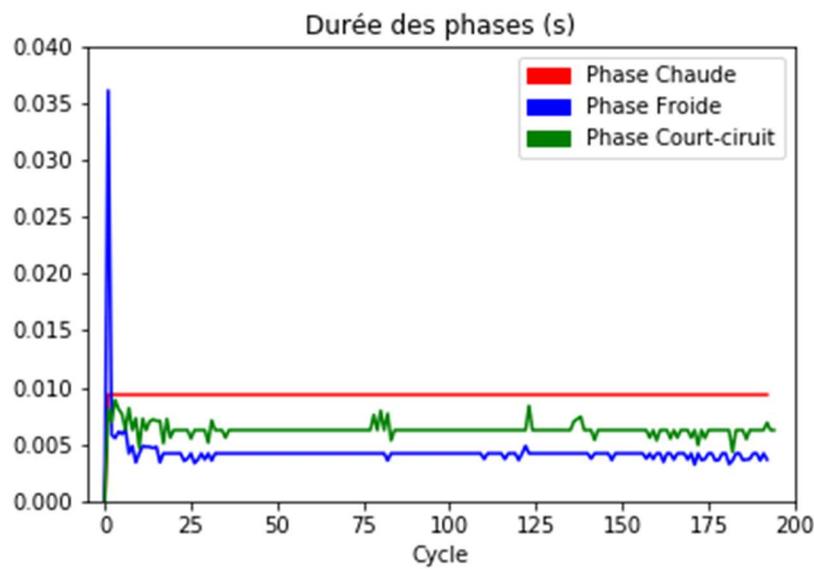
Nous avons montré dans la section précédente que les défauts géométriques pouvaient être en partie éliminés en modifiant certains paramètres du procédé ou de la stratégie de construction. Ce travail n'a cependant pu être réalisé qu'à posteriori, à partir de l'analyse de défauts géométriques constatés sur des murs, ce qui en conditions de production aurait conduit au rebut de ces pièces. Nous avons montré dans le chapitre 4 que l'analyse des caractéristiques des signaux électriques du procédé CMT, en particulier les durées des phases du cycle CMT, pouvaient permettre de détecter précocement des défauts, et peut-être de les corriger avant qu'ils ne deviennent critiques.

Nous allons dans cette partie appliquer ces méthodes de contrôle pour tenter de diagnostiquer des défauts et tenter de les corriger.

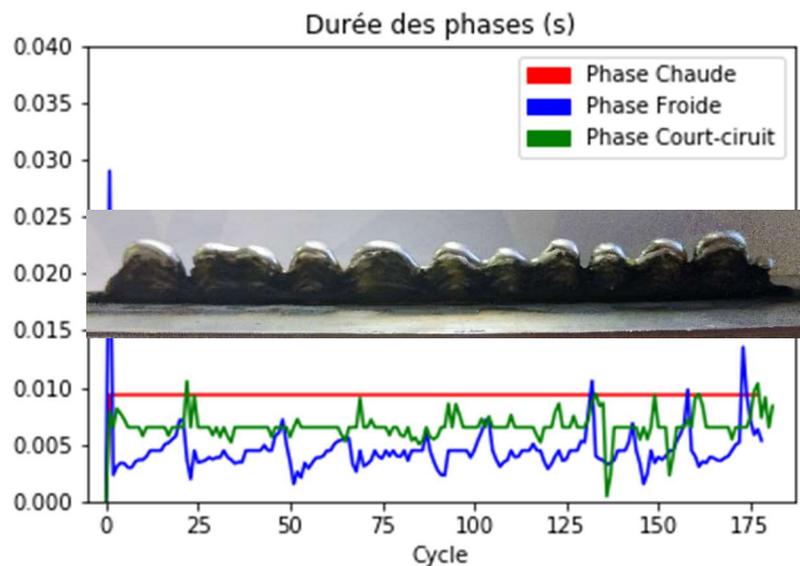
5.3.2.1 Mise en évidence des défauts géométriques par traitement des signaux

Comme dans le cas des dépôts mono-cordon, l'évolution de la durée des phases de court-circuit et d'arc froid peut être analysée pour tenter de détecter le défaut d'ondulation décrit dans le

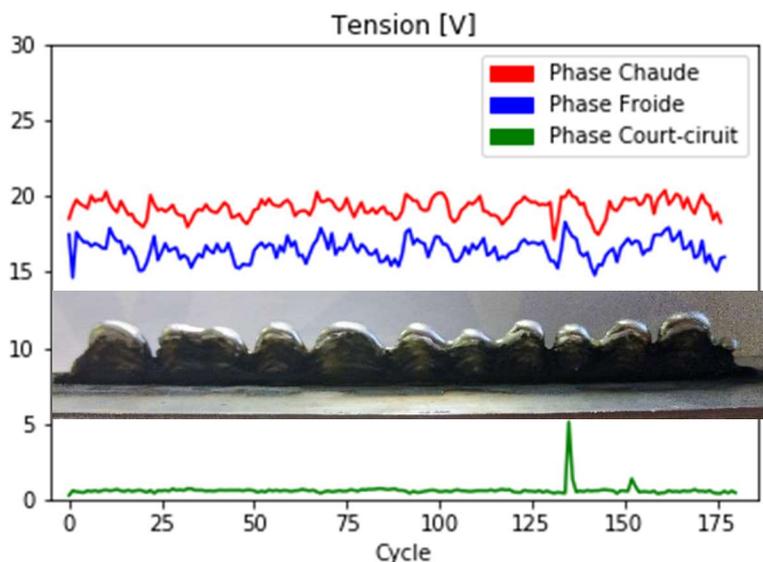
précédent paragraphe. Pour bien mettre en évidence le lien entre ces caractéristiques du signal électrique enregistré en cours de procédé et ce défaut géométrique, nous avons choisi une condition de dépôt particulièrement défavorable, obtenue avec le point de fonctionnement 7 et une vitesse d'avance de 2400 mm/min. La figure 5.35 montre l'évolution des durées d'arc froid et de court-circuit le long du cordon, pour le premier et le dernier cordon correspondant à un mur constitué de 17 cordons superposés présentant de fortes ondulations. Si le premier cordon déposé, qui était relativement régulier, montre des durées de phases assez constantes, ce n'est plus du tout le cas pour le dernier cordon déposé. On peut observer une concordance étonnante entre la durée de la phase d'arc froid pour le dernier cordon déposé et les irrégularités de hauteur du cordon. Cette caractéristique du signal électrique est bien plus révélatrice du défaut géométrique que l'évolution de la tension, qui est souvent utilisée en soudage pour réguler les opérations d'assemblage. Cette caractéristique varie en effet beaucoup moins lorsque ces défauts apparaissent que la durée de la phase d'arc froid (Figure 5.35b et c).



(a)



(b)



(c)

Figure 5.35: Evolution de la durée des phases du cycle CMT en fonction des cycles (a) pour le premier cordon déposé, (b) pour le dernier cordon déposé, et (c) évolution de la tension des phases du cycle pour le dernier cordon déposé (17 cordons superposés réalisés avec le point de fonctionnement 7 et une vitesse d'avance de 2400 mm/min)

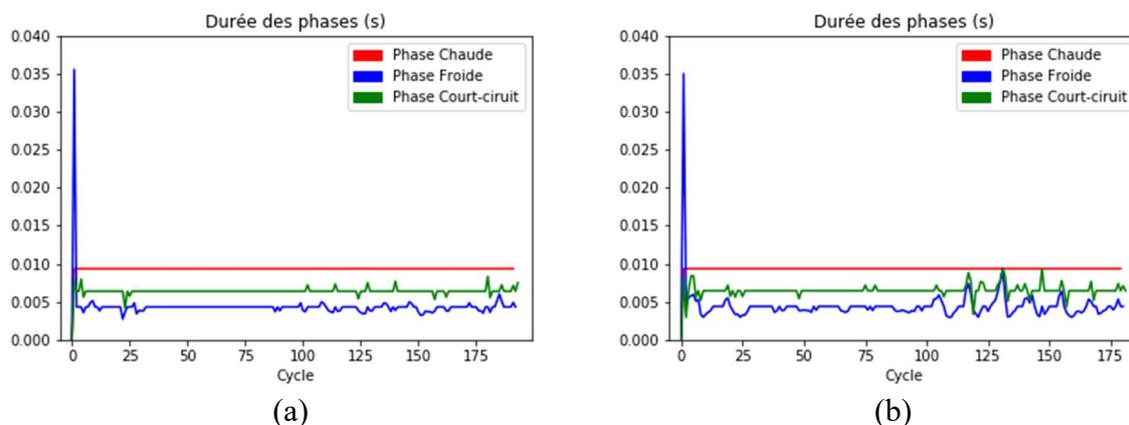


Figure 5.36: Evolution de la durée des phases du cycle CMT en fonction des cycles (a) pour le troisième cordon déposé, (b) pour le cinquième cordon déposé, montrant l'apparition de défauts géométriques qui s'amplifient.

L'apparition d'une « bosse » sur le dépôt s'accompagne ainsi d'une augmentation significative de la durée de la phase d'arc froid, tandis que l'apparition d'une « vallée » entraîne au contraire une diminution de cette durée. Ce résultat a été confirmé par des observations de la formation du dépôt par caméra rapide, qui ont montré que la durée de la phase froide pouvait augmenter de près de 50% lorsqu'une macro-goutte formant une surépaisseur dépassant du cordon de 1 mm seulement se forme, ce qui montre que ce paramètre est très sensible à l'apparition de ce type de défaut. Si l'on étudie les signaux de tous les cordons déposés dans le mur considéré, il est possible de détecter, dès le troisième cordon déposé, l'apparition des premiers défauts dans la deuxième moitié du cordon (Figure 5.36). Ces premiers défauts sont encore peu visibles sur le dépôt, mais vont s'amplifier avec la superposition des couches, jusqu'à former les grandes oscillations observées sur la figure 5.35.

Il est donc important de pouvoir détecter ces défauts dès leur apparition, de manière à les corriger par une modification des paramètres avant qu'ils ne deviennent critiques. Nous allons dans la suite utiliser cette méthode de traitement et d'analyse des signaux électriques pour tenter de détecter et corriger deux types de défauts.

5.3.2.2 Contrôle et correction des défauts d'ondulation

Le premier défaut étudié est le défaut d'ondulation observé sur le dépôt de 30 couches réalisé avec le point de fonctionnement 5 à la vitesse de 900 mm/min (cf. 5.3.1). Le signal électrique enregistré pour ces cordons a d'abord été analysé de manière à tenter de détecter l'apparition de ces défauts géométriques. Bien que le défaut soit moins marqué que dans le cas de l'exemple précédent, on observe des variations importantes de la durée de la phase d'arc froid, qui présente une succession d'accroissements puis de diminutions, probablement révélatrices de l'apparition d'ondulations sur le profil du cordon dès le troisième, et surtout le cinquième cordon déposé (Figure 5.37).

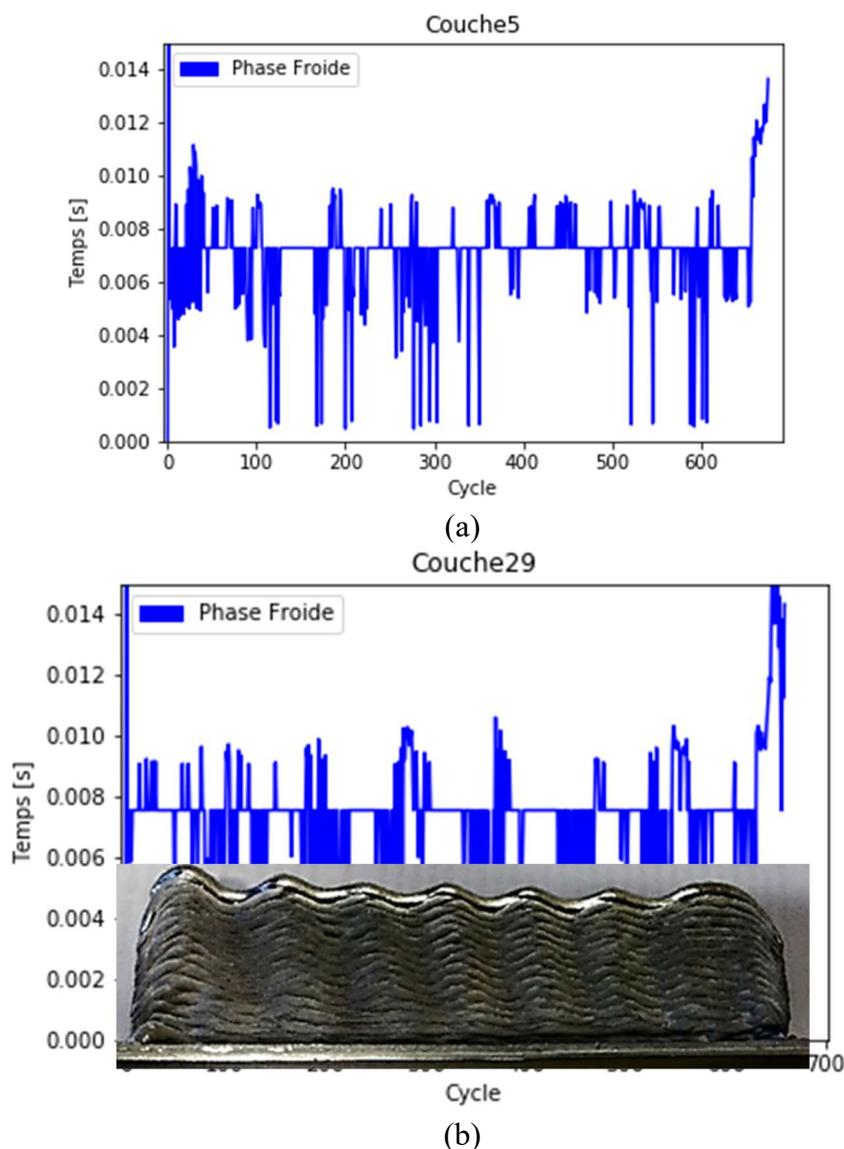


Figure 5.37: Evolution de la durée de la phase d'arc froid au cours des cycles, (a) pour le cinquième cordon déposé, et (b) pour le dernier cordon déposé

Il semblerait, comme cela a été discuté dans la section 5.3.1., que ce défaut soit lié à l'augmentation de largeur du mur durant les premières couches. Afin de tenter de maintenir une largeur de cordons sensiblement constante, l'énergie linéique doit être limitée au fur et à mesure de la superposition des cordons, de manière à compenser l'augmentation de la température initiale du substrat. De nombreuses solutions ont été testées pour parvenir à ce résultat, dont certaines ont déjà été présentées dans la partie 5.3.1. Nous présentons ici d'autres améliorations proposées, discutées cette fois au regard de l'évolution des géométries produites, mais aussi des durées des phases d'arc froid.

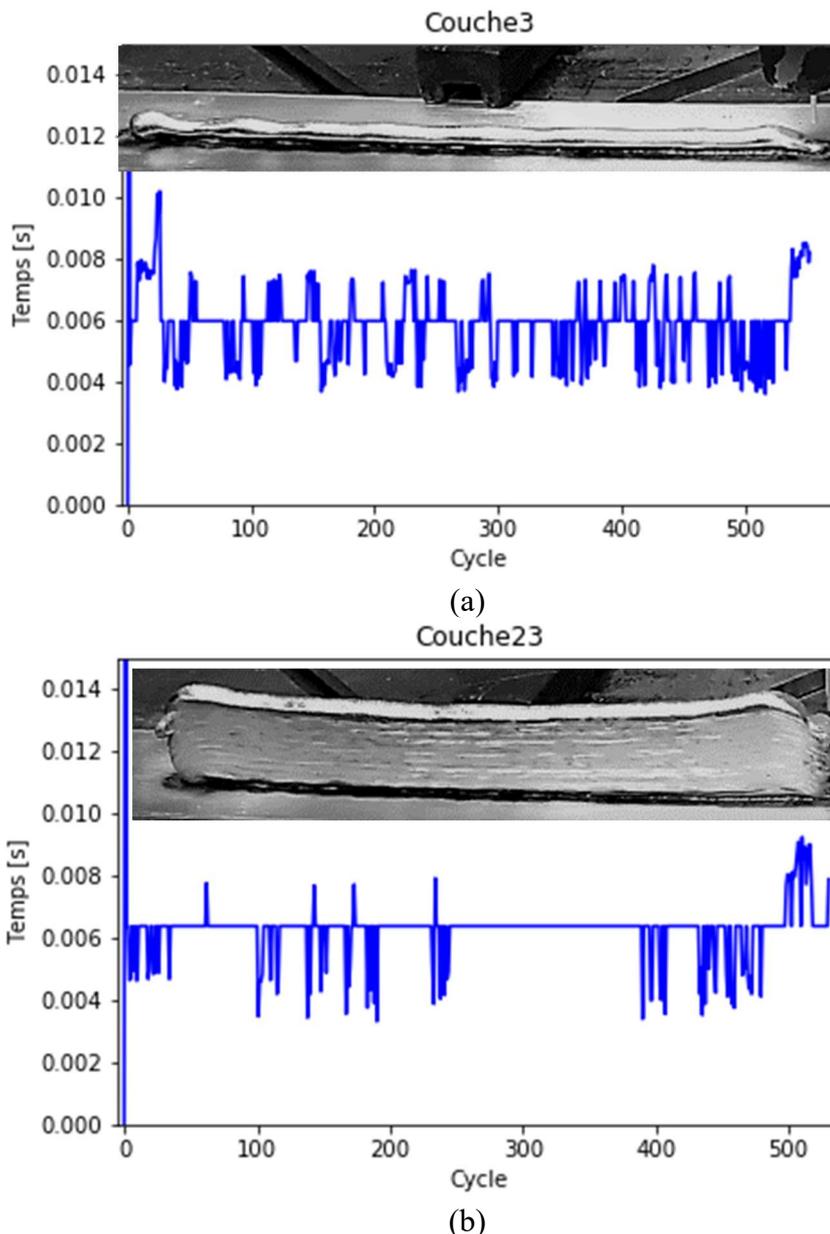


Figure 5.38: Evolution de la durée de la phase d'arc froid au cours des cycles, (a) pour le 3ème cordon déposé, et (b) pour le 23ème cordon déposé

La figure 5.38 montre l'évolution de la régularité d'un mur construit en superposant des cordons à la vitesse d'avance constante de 900 mm/min, en diminuant progressivement l'intensité de la phase d'arc chaud de 1 ampère à chaque nouveau cordon, à partir de paramètres initiaux correspondant au point de fonctionnement 5. Cette diminution produit une stabilisation de la largeur de dépôt dès les premiers cordons, puis une réduction progressive de cette largeur au-

delà de la dixième ou douzième couche, ce qui améliore la régularité de hauteur, et surtout élimine les oscillations dues à la formation de macro-gouttes sous l'effet d'un angle de mouillage supérieur à 90° . L'effet bénéfique de cette modification peut être observé par le suivi des durées des phases d'arc froid à chaque cycle. En effet, au cours des premiers cordons déposés, cette durée fluctue beaucoup, alternant plusieurs phases d'augmentation révélatrices de la formation d'une macro-goutte liquide, suivie d'une diminution, révélatrice de la formation d'une vallée plus étroite derrière la macro-goutte. Sous l'effet de la diminution du courant de la phase d'arc chaud, ces variations s'atténuent et disparaissent au-delà du dixième cordon déposé, seules quelques petites oscillations persistantes encore.

Une autre option testée a consisté à démarrer les premiers cordons avec une vitesse beaucoup plus faible, de 450 mm/min, de manière à avoir un apport de chaleur et de métal plus important, et former des cordons plus larges dans les premières couches, puis à augmenter progressivement la vitesse, par pas de 45 mm/min, à chaque nouveau cordon, jusqu'au dixième cordon. La vitesse reste ensuite constante lors de l'addition des 20 cordons suivants.

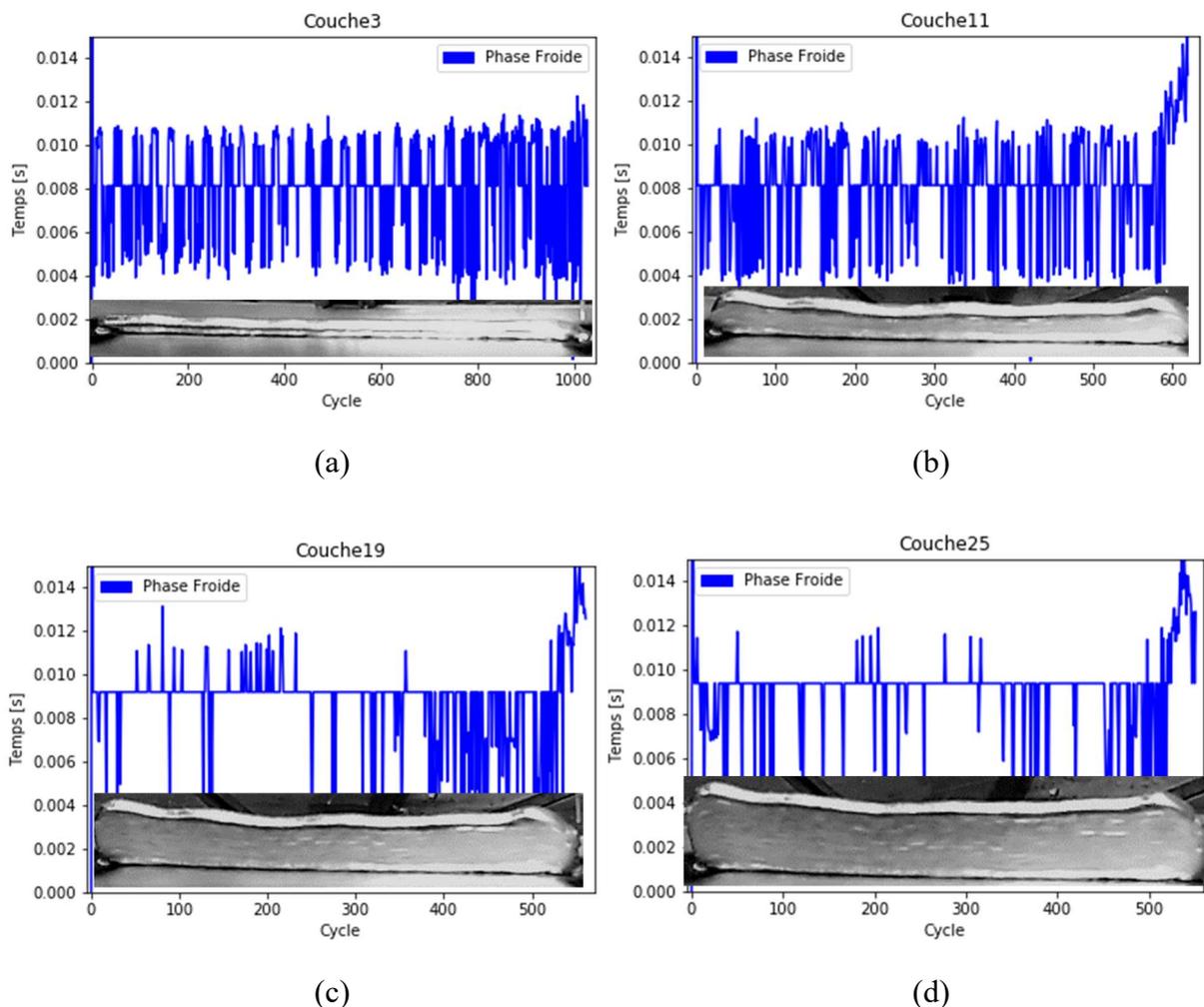


Figure 5.39: Evolution de la durée de la phase d'arc froid au cours des cycles, (a) pour le 3ème cordon déposé, (b) pour le 11ème cordon, (c) pour le 19ème cordon, (d) pour le 25ème cordon déposé

L'évolution de la durée de la phase d'arc froid varie beaucoup lors du dépôt des premiers cordons, et ces variations sont associées comme précédemment à des variations géométriques

des dépôts (Figure 5.39). Notons que le signal paraît plus « bruité » que dans les cordons précédents, mais ce phénomène est en fait dû à un nombre plus important de court-circuit avec la baisse de la vitesse dans les premiers cordons déposés. L'augmentation de la vitesse ne parvient cependant pas à éliminer les défauts générés dans les premiers cordons, des ondulations de la hauteur de dépôt étant encore observées après le dépôt du onzième cordon, alors que la vitesse de déplacement s'est stabilisée à 900 mm/min. Cependant, le nombre d'ondulations a été réduit, passant de plus d'une vingtaine de « vagues » après le dépôt du troisième cordon à trois ou quatre après le dépôt du onzième cordon. Ces ondulations peuvent aussi être détectées par les variations de durée des phases d'arc froid, qui deviennent de moins en moins perturbées au-delà du onzième cordon déposé, traduisant l'atténuation des ondulations des dépôts.

5.3.2.3. Défauts apparaissant en cours de construction

Un autre défaut a été observé lors de la construction de murs réalisés avec de grandes vitesses de déplacement (point de fonctionnement 5 à 2400 mm/min). La figure 5.40 montre un mur de 30 couches qui demeure relativement régulier jusqu'au dépôt du vingtième cordon. Un défaut apparaît alors dans la partie centrale du mur, qui s'amplifie lors du dépôt des cordons suivants, et devient rédhibitoire pour obtenir une géométrie de pièce régulière.



Figure 5.40: Défauts formés dans un mur de 30 cordons superposés réalisé avec le point de fonctionnement 5 à la vitesse de 2400 mm/min

Ce dépôt multi-cordons a été réalisé en déposant un premier cordon à la vitesse de 600 mm/min, puis en augmentant dès le second cordon la vitesse à une valeur de 2400 mm/min, vitesse maintenue constante pour les 29 autres cordons déposés.

L'analyse plus détaillée des différents cordons déposés et des signaux électriques associés montre que les cordons présentent de légères oscillations dès le troisième cordon, qui sont détectables par la baisse localisée de la durée de la phase d'arc froid, au niveau de zones de « pincement » où le cordon devient un peu plus étroit. Ces oscillations ne s'amplifient cependant pas, et ont même tendance à se résorber en certains points. Notons que ces légères variations ne semblent pas produites par la formation de macro-gouttes, comme lors des défauts précédents, mais pourraient être plutôt liées à une quantité insuffisante de métal déposé pour conserver un cordon de largeur continue, la vitesse étant ici très élevée. A partir du vingt et unième cordon cependant, des défauts plus importants apparaissent, dans la partie centrale du mur. Ces défauts s'amplifient ensuite fortement dans les cordons suivants, produisant une géométrie non acceptable. Cette apparition semble liée à la forte variation de la distance tube contact / pièce. En effet, à ces vitesses d'avance, la hauteur de cordon est bien plus faible, alors que le pas de translation verticale entre deux cordons est toujours fixé à 1 mm. La distance tube contact - pièce augmente donc, produisant un élargissement du cordon (cf. chapitre 3), qui conduit aux défauts déjà rencontrés. Cette variation de la distance tube contact - pièce peut être détectée par la diminution de la tension moyenne de la phase d'arc chaud (Figure 5.41). Celle-ci diminue en effet de manière continue depuis le premier cordon déposé, passant de 18,8 V à 18V seulement à partir du quinzième cordon. C'est à partir de cette valeur, qui doit révéler une distance tube contact - pièce trop faible, que le défaut apparaît et s'amplifie.

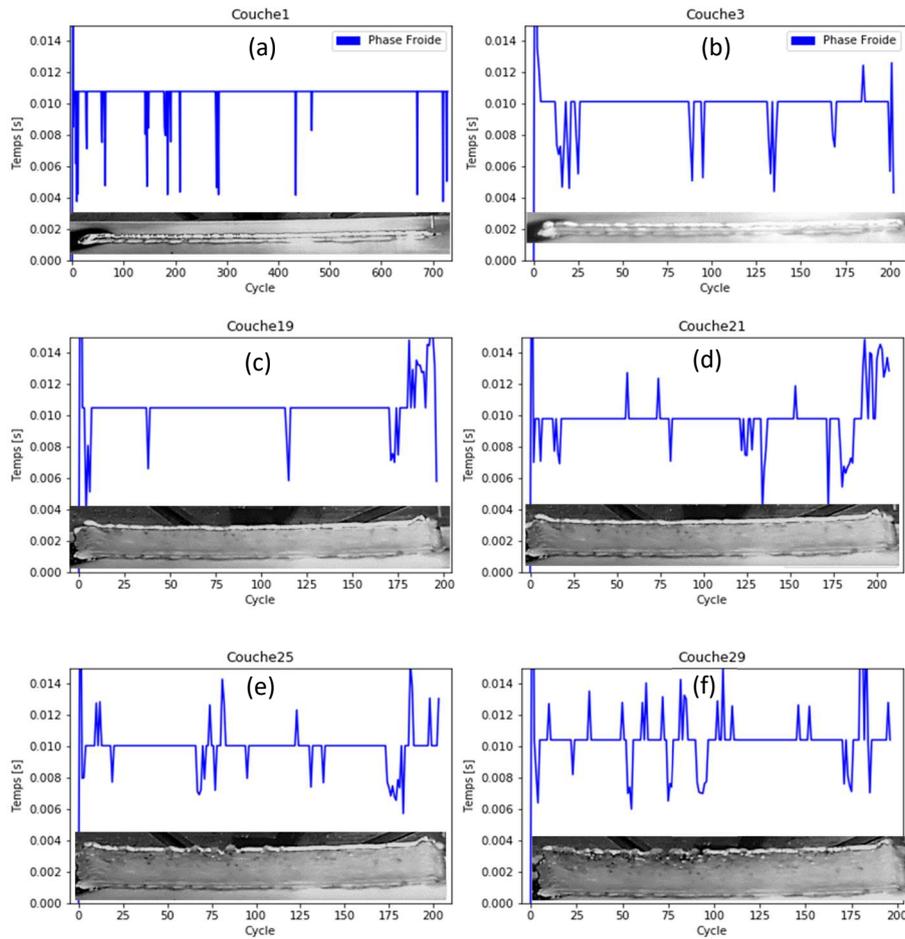


Figure 5.41: Evolution de la durée de la phase d'arc froid au cours des cycles, (a) pour le 1er cordon déposé, (b) pour le 3ème cordon, (c) pour le 19ème cordon, (d) pour le 21ème cordon déposé, (e) pour le 25ème cordon, (f) pour le 29ème cordon déposé

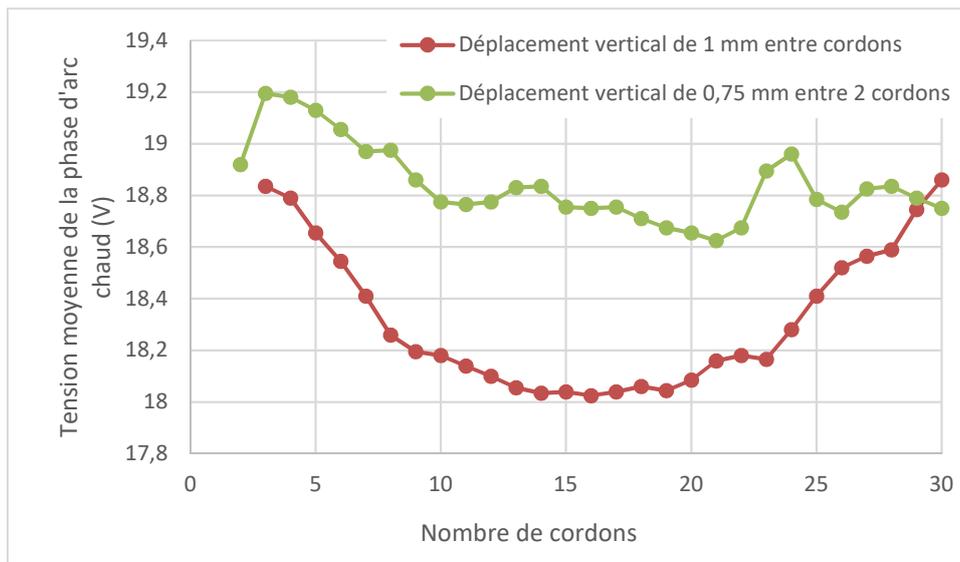


Figure 5.42: Evolution de la tension moyenne de la phase d'arc chaud au cours de la fabrication des murs par superposition de 30 cordons

Un nouvel essai a été réalisé en gardant les mêmes vitesses (900 mm/min pour la première couche, puis 2400 mm/min à partir de la seconde couche), mais en imposant une hauteur de translation verticale entre deux couches de 0,75 mm seulement, valeur proche de la hauteur moyenne des couches déposées à cette vitesse, et en augmentant la durée de la phase d'arc chaud à 5 ms (au lieu de 2 ms), de manière à augmenter un peu la température du fil et favoriser ainsi un meilleur transfert des gouttes lors du court-circuit et un meilleur mouillage. Les résultats présentés sur la figure 5.43 montrent que les défauts ont presque disparu, même après la superposition de 30 cordons. La tension moyenne des phases d'arc chaud pour les différents cordons varie également beaucoup moins que dans le cas du précédent essai (Figure 5.42), signifiant que la distance tube contact – pièce est plus régulière.

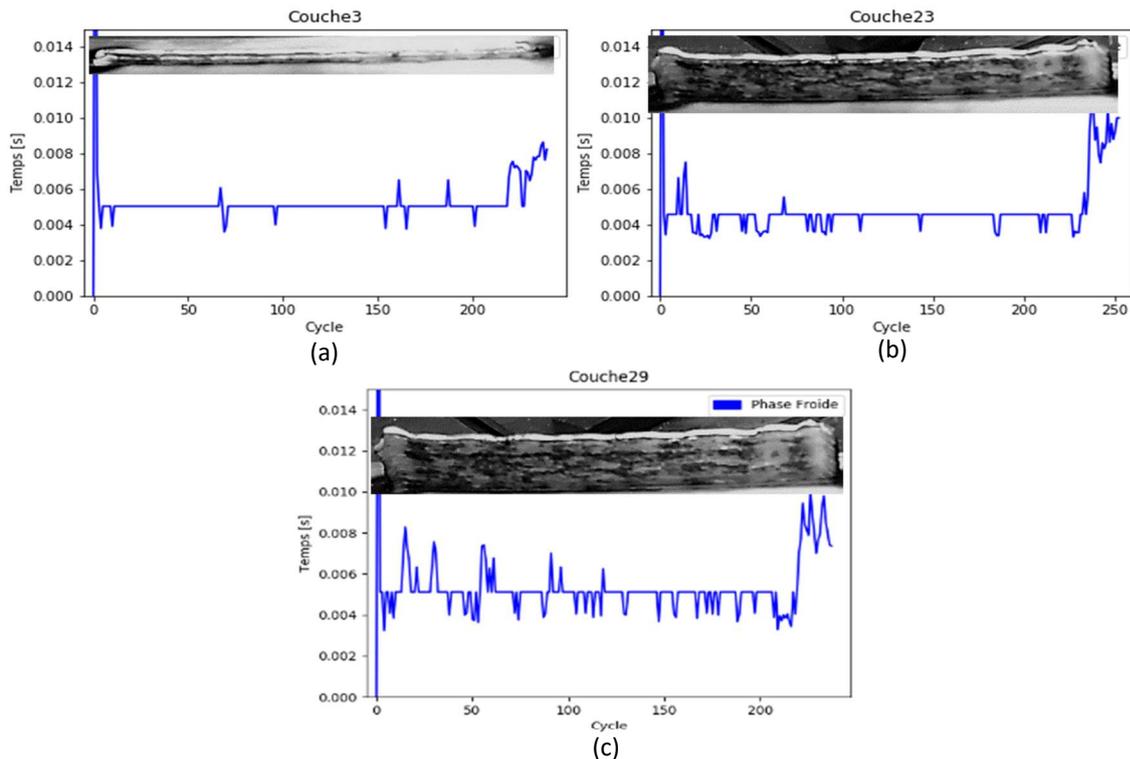


Figure 5.43: Evolution de la durée de la phase d'arc froid au cours des cycles, (a) pour le 3eme cordon déposé, (b) pour le 23ème cordon, (c) pour le 29ème cordon

L'analyse couplée des évolutions de la durée des phases d'arc froid et de la tension moyenne de la phase d'arc chaud peut ainsi fournir des informations complémentaires pour détecter un défaut et ses causes, et tenter d'y remédier par la modification des paramètres.

5.4 Conclusion

Ce dernier chapitre consacré à la réalisation de dépôts multi-cordon a révélé les problèmes d'accumulation de chaleur dans les dépôts et la tôle substrat suite à la superposition de nombreux cordons. Pour éviter un accroissement excessif de la largeur des cordons déposés, il a ainsi été nécessaire d'ajouter un temps de pause entre chaque cordon, de manière à laisser refroidir les cordons déjà déposés. La simulation numérique a aussi révélé qu'un régime thermique quasi-stationnaire pouvait apparaître à partir de la superposition d'une dizaine de cordons, mais ce nombre est très dépendant des énergies linéiques employées.

Les défauts géométriques majeurs que sont les ondulations de forte amplitude apparaissant dans la hauteur des dépôts, liées à l'augmentation de l'épaisseur des dépôts dans les premiers

cordons, ont pu être analysés et corrigés en proposant plusieurs modifications possibles de paramètres procédé. Enfin, les bases d'une méthode de contrôle en ligne de la fabrication permettant de détecter, à partir de l'analyse des signaux électriques du procédé CMT enregistrés, l'apparition d'un défaut avant qu'il ne devienne critique, et de suivre son évolution afin de s'assurer que la modification des paramètres proposée permet bien de le corriger, ont été posées.

Conclusion et perspectives

Le travail présenté dans ce mémoire avait pour ambition de contribuer à l'approfondissement des connaissances du procédé CMT, et en particulier du rôle des nombreux paramètres contrôlant le procédé sur les phénomènes de transfert de matière et de chaleur lors de la fusion par l'arc électrique du fil métallique et de son dépôt, dans le cas d'un alliage d'aluminium Al-5Si. Cette compréhension est en effet nécessaire pour pouvoir maîtriser les caractéristiques, notamment géométriques, des dépôts formés avec ce procédé, qui permettront la fabrication de pièces.

Le premier chapitre, à travers une présentation générale de la littérature, a permis de rappeler les difficultés actuelles que posent les procédés de fabrication additive arc-fil métallique, et les axes de recherche en cours dans ce domaine.

Pour mener à bien ce travail de recherche, un banc d'essai, décrit dans le second chapitre, a été conçu et développé, sur le principe des imprimantes 3D de type open source. Le procédé de soudage CMT, qui est une variante améliorée du procédé de soudage à l'arc conventionnel MIG (Metal Inert Gas), a été utilisé comme source de fusion de la matière, mais aussi comme moyen d'assurer le transfert de métal fondu, pour former un dépôt. Une méthodologie originale de caractérisation des dépôts, basée sur l'utilisation d'un scanner et la mesure des géométries à partir de leurs surfaces numérisées, a été employée.

Le procédé a été utilisé dans un premier temps, comme cela est décrit dans le troisième chapitre, avec ses paramètres standard, préenregistrés dans le générateur de soudage CMT. Ces paramètres permettent de produire la fusion du fil métallique en alliage d'aluminium, puis son dépôt à vitesse contrôlée sur la surface de construction. Des plages de réglages « acceptables », en termes de puissance électrique moyenne et de vitesse de déplacement relative de la tête de dépôt, ont ainsi pu être identifiées, ainsi que l'évolution des caractéristiques géométriques des dépôts mono-cordon, en fonction des conditions de dépôt. Une analyse des signaux de tension et d'intensité, pour chaque jeu de paramètres standard, a aussi été menée, permettant de révéler l'effet de ces paramètres sur l'évolution des puissances électriques au cours des différentes phases du procédé, qui contrôlent les phénomènes de fusion et de transfert de métal depuis l'extrémité du fil, sous la forme d'une gouttelette de métal liquide qui vient alimenter le bain liquide, formant après solidification un cordon. Finalement, l'influence d'un paramètre difficilement contrôlable pendant la fabrication, la distance entre le tube contact et la surface du plateau de construction, a été étudiée. Les résultats montrent que l'augmentation de cette distance diminue la hauteur et augmente la largeur des cordons déposés.

Dans le quatrième chapitre de ce mémoire, les défauts géométriques observés sur les cordons obtenus avec les paramètres procédé standard ont été analysés, et en particulier le défaut en début de cordon dû à la formation d'une « macro-goutte », du fait d'un mauvais mouillage. Ce défaut a été analysé grâce à l'utilisation d'une caméra rapide, et en partie corrigé par l'optimisation des paramètres du cycle d'amorçage du procédé. L'influence des différents paramètres contrôlant le cycle de transfert de métal avec le procédé CMT a également été étudiée, et des relations entre ces paramètres, les caractéristiques des transferts de matière et d'énergie, et la forme des cordons obtenus, ont pu être établies. Enfin, les bases d'une méthode

de contrôle en ligne du procédé ont été posées, en démontrant que l'analyse des signaux électriques caractérisant le dépôt, et en particulier la durée des différentes phases caractérisant le cycle de fusion du fil et de transfert du métal fondu avec le procédé CMT, permettaient de révéler l'apparition de défauts géométriques avant qu'ils n'atteignent une taille critique.

Le dernier chapitre était consacré à la fabrication de murs constitués par la superposition de nombreux cordons. Les premiers essais ont révélé que l'accumulation de chaleur dans les éprouvettes avec la superposition des cordons conduisait à un élargissement important des dépôts. L'ajout d'un temps de pause de 10 secondes entre chaque dépôt permet de limiter cet effet. Une simulation numérique thermique du procédé a été menée pour évaluer l'effet des conditions de dépôt sur l'accumulation de chaleur. Les calculs ont montré qu'un régime thermique quasi-stationnaire s'établissait dans chaque cordon après une longueur de cordon déposée de 30 mm environ, ce qui explique les défauts géométriques observés en début de cordon, produits par un mouillage insuffisant du métal liquide déposé, qui se refroidit trop rapidement. Ces simulations ont aussi permis de confirmer que la superposition de cordons dans un mur produit un échauffement de plus en plus important de la tôle support lors du dépôt des premiers cordons, qui n'a pas le temps de refroidir totalement entre deux cordons, ce qui explique l'élargissement des cordons observé. Cette température moyenne de la tôle support se stabilise cependant après la superposition d'une dizaine de cordons, à une valeur de 420 K environ, qui peut varier selon les conditions de fabrication. Passée cette température, l'énergie supplémentaire transmise lors de l'addition d'un nouveau cordon est compensée par les pertes à partir des surfaces de l'éprouvette, par conduction dans le plateau de construction de la machine de fabrication additive, ou par convection et rayonnement dans le milieu environnant. Enfin, la méthode de contrôle en ligne du procédé a été testée sur des murs formant des défauts géométriques, confirmant que l'évolution de la durée des phases du cycle CMT permettait bien de révéler précocement l'apparition de défauts, et de suivre leur atténuation par la modification des paramètres procédé adaptés.

Des résultats significatifs ont donc été obtenus dans ce travail, qui peuvent déjà permettre de fabriquer par cette technique des pièces en alliage d'aluminium. Un certain nombre de défauts apparaissent avec ce matériau, dont certains ont pu être corrigés dans ce mémoire. D'autres sont cependant plus difficiles à corriger, comme ceux observés dans la zone de raccordement de pièces de géométries fermées (Figure C.1), qui n'ont pas été discutés dans ce mémoire, mais qui ont été observés lors des nombreux essais réalisés. Si des stratégies de correction de ces défauts de fermeture ont été testées, aucune n'a cependant permis d'éliminer complètement ce défaut, et des travaux complémentaires sont encore à mener.



Figure C.1: Défaut de raccordement dans une pièce de géométrie fermée

Une autre problématique qu'a soulevé ce travail est liée à l'accumulation de chaleur dans les pièces pendant leur construction. Une solution viable a été identifiée, avec l'ajout d'une pause

de 10 secondes entre chaque cordon. Des méthodes de refroidissement accéléré pourraient cependant être envisagées, en ajoutant un support refroidi par eau sous la tôle support, ou encore par l'utilisation de gaz cryogéniques, qui pourraient être envoyés directement sur les cordons. Un refroidissement accéléré par fluide cryogénique pourrait en outre avoir un effet bénéfique sur les déformations et contraintes résiduelles générées, qui n'ont pas été discutées dans ce mémoire, mais qui constituent également une limitation du procédé, comme en témoignent les déformations observées sur les tôles support après la réalisation de murs de forte hauteur.

Enfin, un travail important reste à mener sur le contrôle en ligne du procédé. Des éléments de diagnostic d'un défaut ont été proposés à partir du traitement des signaux électriques enregistrés, et les paramètres procédé à modifier pour corriger le défaut ont été identifiés. Il reste maintenant à développer cette analyse en temps réel, et à lui associer une boucle de contrôle qui commandera la modification du ou des paramètres du procédé à corriger.

Annexe 1 : dimensionnement du mécanisme de mouvement dans le plan XY

A1.1 Dimensionnement des rails de guidage

Les longueurs des différents éléments du mécanisme de mouvement dans le plan XY, décrit dans la chapitre 2, sont rappelées sur le figure A.1.

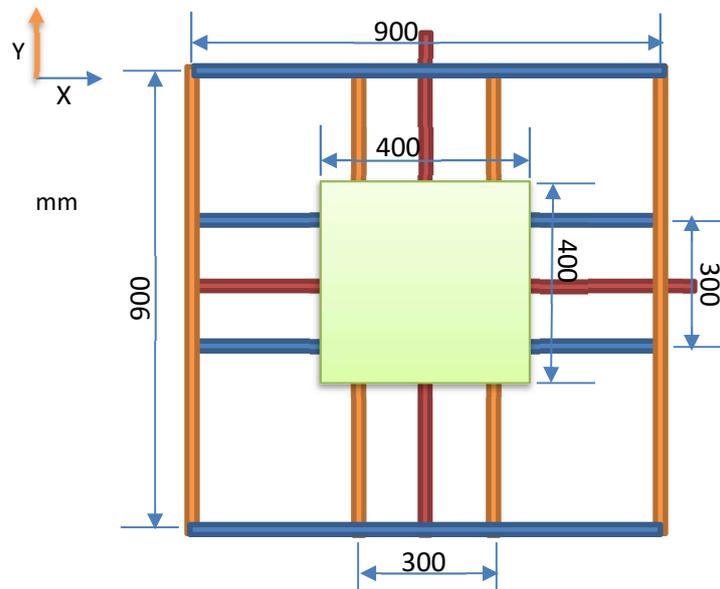


Figure A1.1: Longueurs des principaux éléments du mécanisme de mouvement dans le plan XY

Les guidages utilisés seront des cylindres pleins, dont le diamètre minimum doit être calculé pour limiter les déformations du système, et conserver une bonne précision de positionnement du plateau. La figure A.2 montre une représentation schématique du système étudié pour le dimensionnement des rails de guidage selon les axes X et Y, les rails correspondant aux deux axes étant supposés supporter le même chargement.

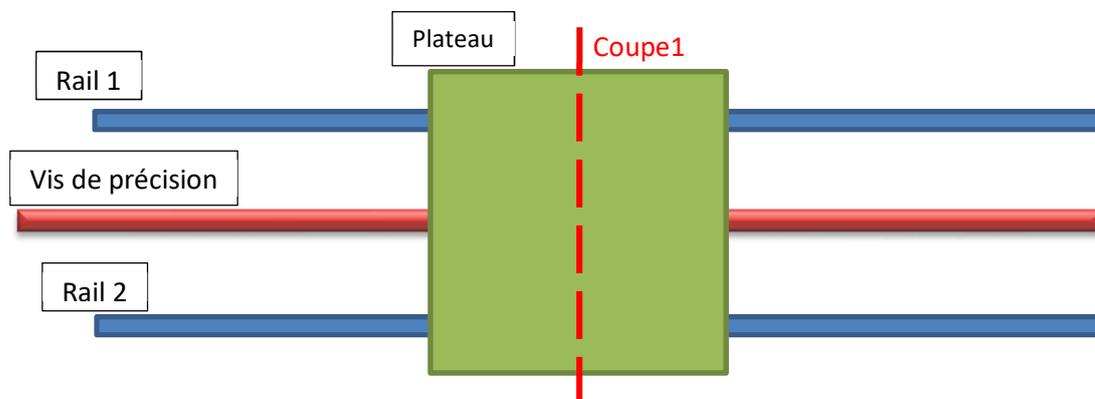


Figure A1.2: Configuration de base pour le dimensionnement des rails de guidage selon les axes X ou Y

La présence de la vis n'est pas prise en compte, et l'on suppose que le plateau s'appuie uniquement sur les deux rails, appliquant sur chacun la moitié de la charge qu'il supporte, estimée à 30 kg au maximum selon les valeurs données par le cahier des charges (Figures A.3 et A.4).

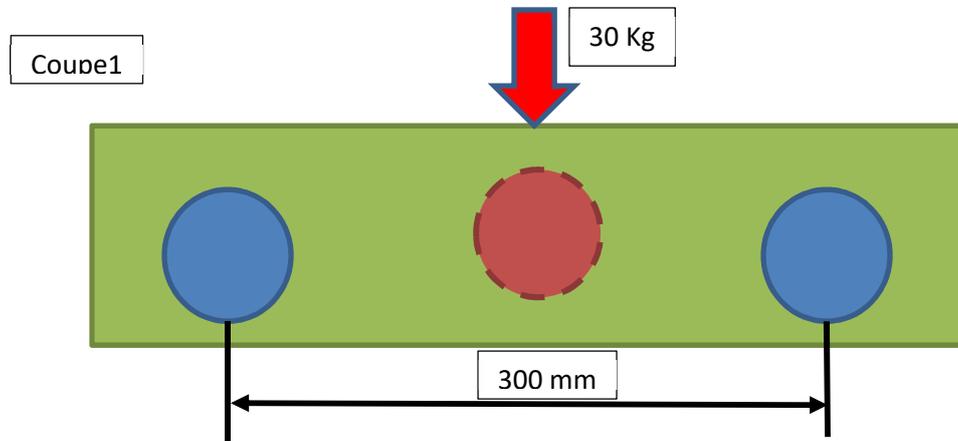


Figure A1.3: Coupe du plateau permettant d'observer la position des deux rails

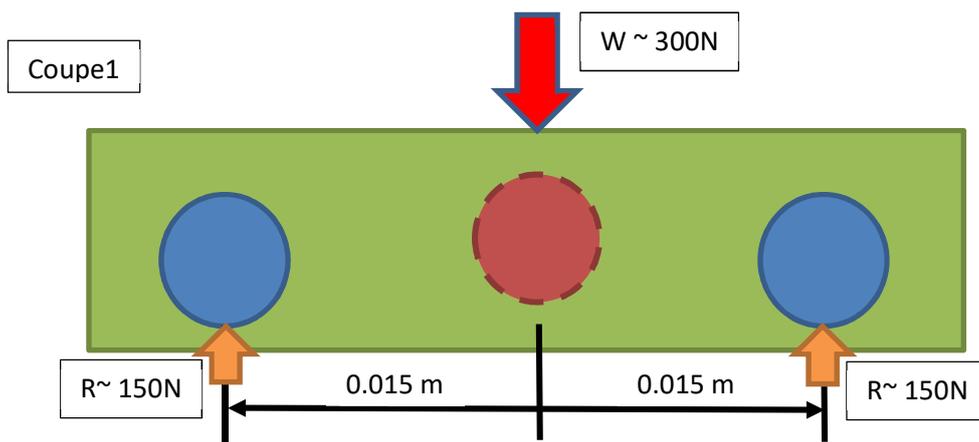


Figure A1.4: Répartition des charges sur les deux rails

Pour simplifier le calcul des réactions, on ne prend pas en compte la condition d'hyperstatisme du système conçu (4 appuis sur un seul rail, Figure A.5). On fera alors le calcul selon deux hypothèses (Figure 7) : selon la première hypothèse, on considère que chaque rail de guidage repose sur les deux appuis mobiles intérieurs, situés à l'extrémités du plateau (Figure A.6) ; selon la deuxième hypothèse, on suppose que les rails de guidage reposent sur les deux appuis extérieurs. Ces deux configurations permettront ainsi d'estimer les contraintes et déformations subies par les rails dans ces deux cas extrêmes.

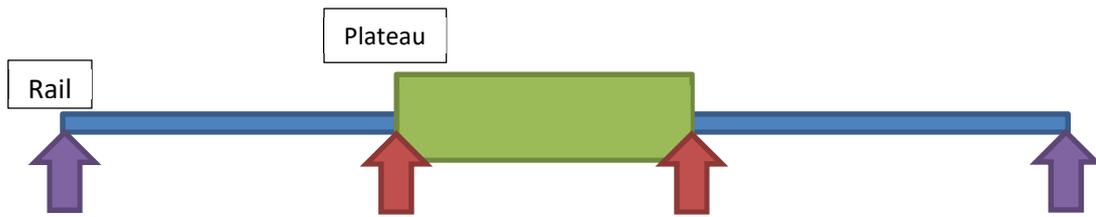


Figure A1.5: Modélisation des appuis sur chacun des rails

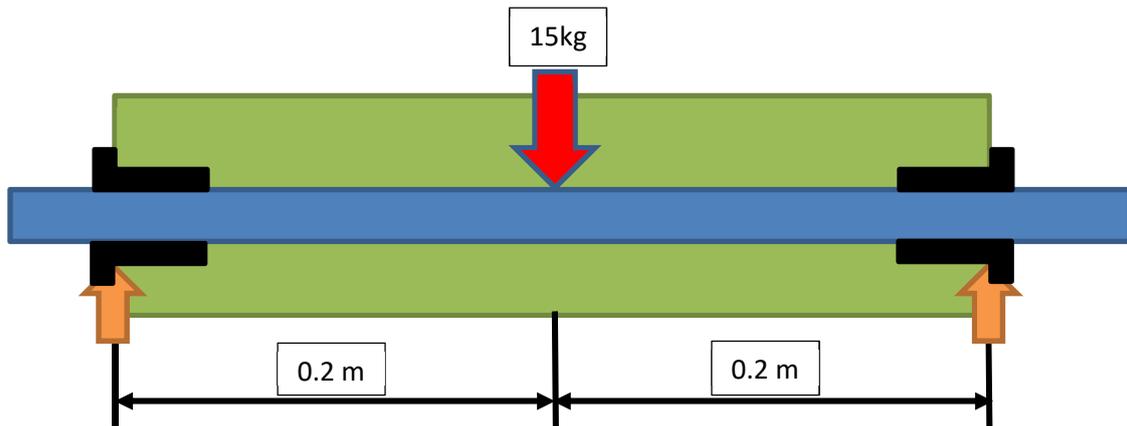


Figure A1.6: Réaction des appuis sur le rail si celui-ci repose sur les appuis mobiles aux extrémités du plateau

La Figure A1.7 représente les diagrammes de l'effort tranchant et du moment de flexion dans chacun des rails, pour les deux configurations extrêmes, qui diffèrent par la localisation des appuis.

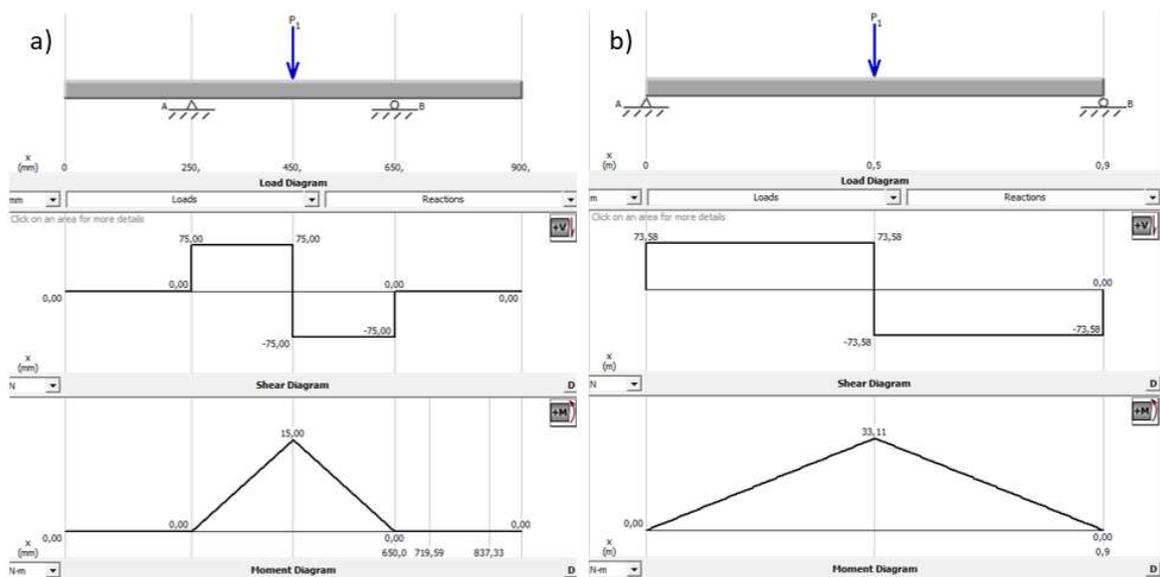


Figure A1.7: Diagrammes de l'effort tranchant et du moment de flexion dans chacun des rails de guidage a) avec les appuis dans le plateau b) avec les appuis extérieurs

Selon la théorie des poutres, on peut calculer la contrainte maximale en fonction du moment de flexion dans une poutre à section circulaire, en négligeant l'influence de l'effort tranchant, grâce à la relation suivante [113,114] :

$$\sigma = \frac{M \left(\frac{d}{2}\right)}{I} = \frac{32 M}{\pi d^3}$$

Où

M est le moment de flexion maximum subi par le rail de guidage,

d le diamètre du rail,

I le moment d'inertie de la section circulaire.

En comparant cette contrainte maximale à la « résistance ultime » des matériaux constituant les rails, il est possible de calculer un diamètre minimum de rail permettant d'éviter sa rupture. L'alliage d'aluminium 6061 T6, alliage couramment utilisé pour les rails de guidage, possède une résistance ultime σ_{ult} de 350 MPa, à comparer à celle d'un acier de construction de type S355, qui est de 550 MPa [115]. On peut ainsi calculer le diamètre minimal de rail selon la relation suivante :

$$d = \sqrt[3]{\frac{32M}{\pi \sigma_{ult}}}$$

Le tableau A.1 donne les valeurs de diamètre minimum de rail admissibles, pour des rails en alliage d'aluminium ou en acier, d'après les deux hypothèses extrêmes retenues concernant la position des appuis.

Tableau A1.1: Valeurs minimums de diamètres des rails

Diamètre rail [m]	Aluminium	Acier
Rails Plateau	0,007586	0,006525
Rails Externes	0,009877	0,008496

Ces calculs montrent qu'un diamètre minimum de rails de guidage de 10mm environ sera nécessaire si on utilise un rail en aluminium, et de 8,5 mm environ si on utilise un rail en acier. Pour le choix final des composants, et afin d'affiner ces calculs, nous avons utilisé l'outil d'aide à la conception proposé par l'entreprise IGUS [116], distributeur des composants pour la construction des systèmes de mouvement. Cet outil permet de choisir le palier à utiliser, le matériau des arbres, la configuration géométrique des arbres et l'entraînement (Figures A.8 et A.9). L'application développée fournit une table de résultats fournissant notamment des indications sur l'usure et le comportement du système (Figure A.10).

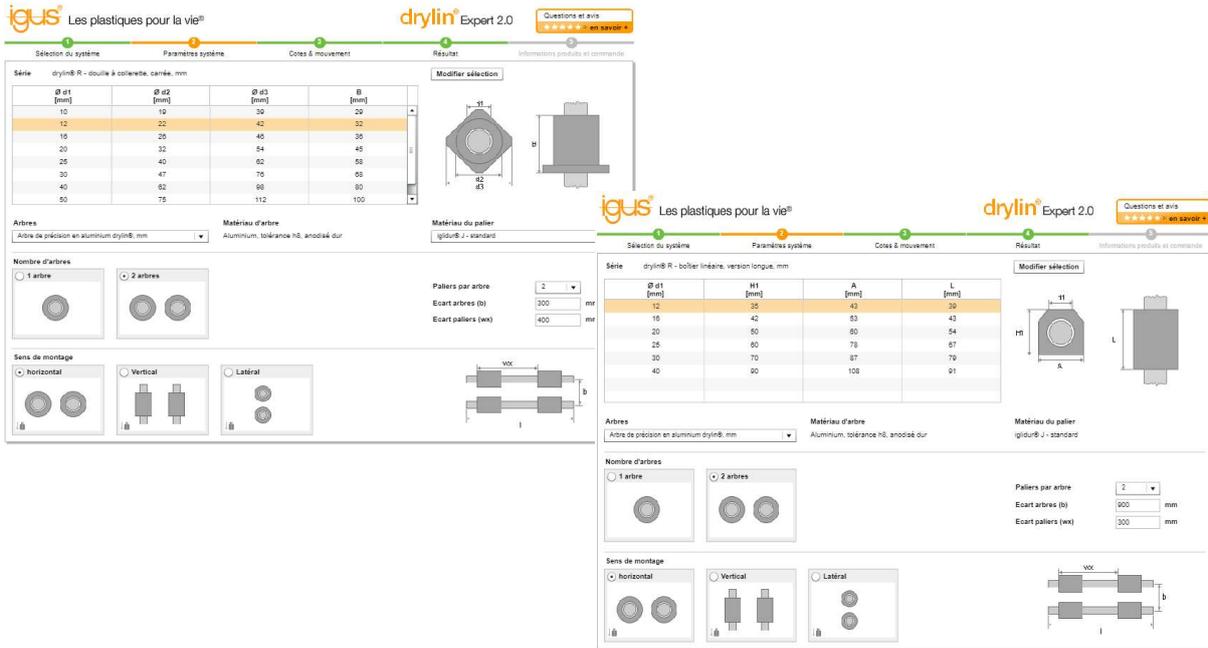


Figure A1.8: Sélection du type de palier, du matériau d'arbre, du nombre d'arbres, de leur orientation, et de l'écart entre arbres et paliers, à l'aide de l'outil développé par la société IGUS [116].

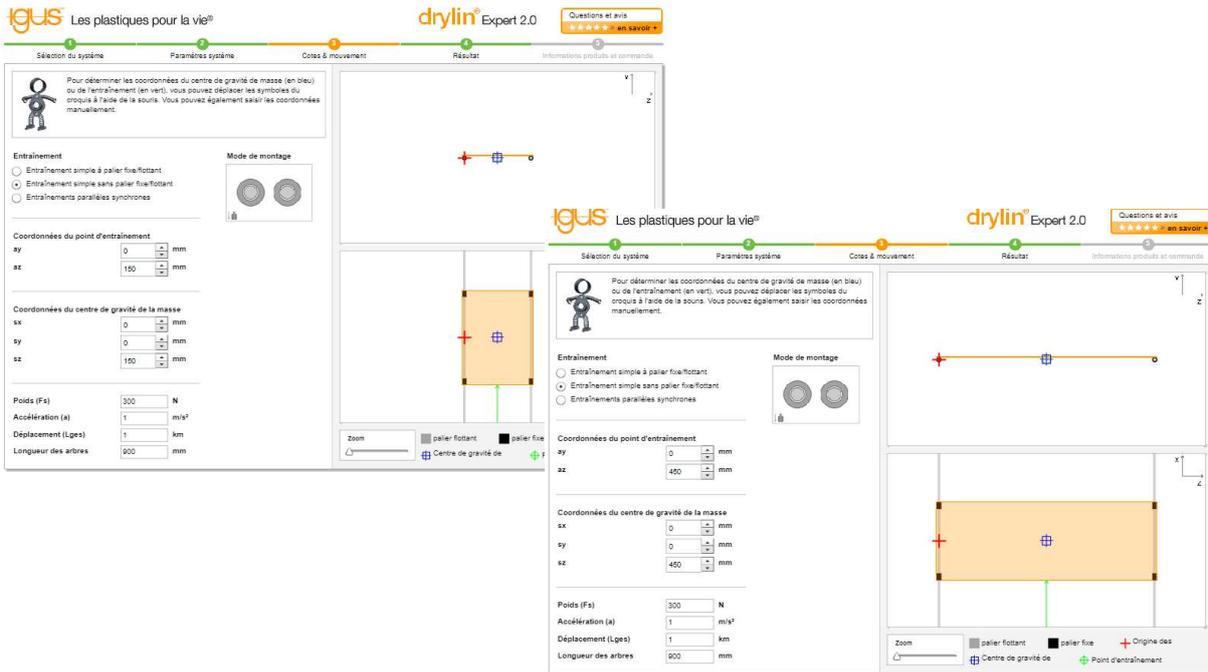


Figure A1.9: Sélection du type d'entraînement, des coordonnées d'entraînement, et des coordonnées et du poids à supporter, à l'aide de l'outil développé par la société IGUS [116].

Résultat		Résultat	
Propriété	Valeur	Propriété	Valeur
Comportement en mouvement	OK	Comportement en mouvement	OK
charge	OK	charge	OK
usure	OK	usure	OK
Usure dans l'axe y	0 mm	Usure dans l'axe y	0 mm
Usure dans l'axe z	0 mm	Usure dans l'axe z	0 mm
Vitesse maxi admissible en continu	0,53 m/s	Vitesse maxi admissible en continu	0,18 m/s
Force d'entraînement mini requise	101 N	Force d'entraînement mini requise	179 N
Température admissible du palier	90 °C	Température admissible du palier	90 °C
Sollicitation maxi axe y	75 N	Sollicitation maxi axe y	75 N
Facteur de sécurité axe y	12,8	Facteur de sécurité axe y	12,8
Sollicitation maxi axe z	26 N	Sollicitation maxi axe z	222 N
Facteur de sécurité axe z	36,27	Facteur de sécurité axe z	4,32
Jeu au niveau du centre de gravité (état neuf)	0,1 mm	Jeu au niveau du centre de gravité (état neuf)	0,3 mm
Jeu au niveau du centre de gravité (en fin de vie utile)	0,1 mm	Jeu au niveau du centre de gravité (en fin de vie utile)	0,3 mm

Figure A1.10: Résultats du calcul à l'aide de l'outil développé par la société IGUS [116].

Sur la base de l'ensemble de ces analyses, des arbres en alliage d'aluminium anodisé d'IGUS de diamètre 12 mm sont choisis pour les rails de guidage, associés à des paliers glissants en matériau plastique résistant à l'usure et à la température, qui permettent un fonctionnement à sec (sans lubrifiant). L'utilisation d'un matériau plastique présente un second avantage par rapport à notre application, car les paliers assureront ainsi l'isolation électrique entre le plateau de travail, qui sera relié à la masse du générateur de soudage, et les autres éléments métalliques du système.

A1.2 Choix des moteurs et vis d'entraînement

Les axes X et Y exigent un contrôle important des vitesses, qui détermineront la vitesse de construction des couches lors de la fabrication de pièces. Les moteurs devront avoir un couple suffisant pour maintenir ces vitesses constantes, quel que soit la vitesse choisie et pour toutes positions du plateau.

La vitesse de construction maximale généralement utilisée pour les applications WAAM est de 2 m/min environ. Afin de pouvoir étudier les limites du procédé WAAM en termes de vitesses, nous avons choisi comme vitesse maximale d'entraînement 5 m/min.

Pour atteindre ces grandes vitesses de déplacement avec des systèmes constitués de moteurs pas à pas et vis, il est fortement recommandé d'utiliser des vis hélicoïdales, qui possèdent un pas longitudinal plus grand. Afin de choisir les caractéristiques géométriques de la vis qui sera utilisée (Figure A.11), nous devons prendre en compte la précision de positionnement souhaitée, et le couple qui devra être transmis par les moteurs. Rappelons que les moteurs pas à pas retenus fournissent 200 pas pour chaque révolution (chaque pas correspondant à une rotation de la vis associée de 1,8 degrés). Supposant que le coefficient de frottement est égal à 0,2 (coefficient choisi à partir des caractéristiques de matériaux données par IGUS pour les écrous d'entraînement), il faudra appliquer un effort horizontal de 60 N pour pouvoir déplacer un poids de 300 N, valeur maximale choisie dans le cahier des charges. Afin de conserver une marge de sécurité, nous choisissons un coefficient de sécurité supérieure à 3, ce qui donne un effort horizontal de 200 N. Le couple T nécessaire pour appliquer cette force horizontale W peut être calculé à l'aide de la relation suivante [113]:

$$T = W \left[r_m \left(\frac{\tan \alpha + f / \cos \theta_m}{1 - f \tan \alpha / \cos \theta_m} \right) + f_c r_c \right]$$

T= Couple/Moment appliqué pour faire tourner la vis ou l'écrou.

W=Charge parallèle à la vis

r_m = rayon moyen de la vis

r_c = rayon effectif de la surface de frottement où la charge est supportée/appuyée

f = coefficient de frottement entre vis et écrou

f_c = coefficient de frottement dans la surface d'appui

α = angle d'hélice de la vis dans le rayon moyen

θ_m = angle entre la tangente du profil de dent (filet de la vis) et une ligne radiale, mesurée dans un plan normal au filet de la vis au rayon moyen.

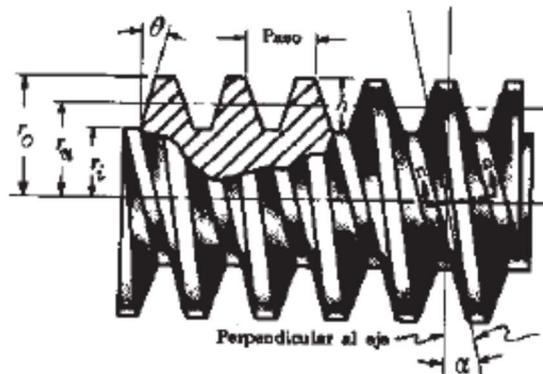


Figure A1.11: Caractéristiques géométriques des vis hélicoïdales

Le tableau A.2 ressemble les caractéristiques géométriques des vis hélicoïdales de dimensions standard, et les précisions associées, ainsi que le couple maximum que devra transmettre le moteur pour déplacer la charge contenue sur le plateau de travail.

Tableau A1.2: Caractéristiques géométriques des vis hélicoïdales standards [117], et couple nécessaire pour déplacer une charge de 200 N

Config	Nombre de pas dans le moteur	Pas des vis hélicoïdales standard P [mm]	Précision minimum (par pas du moteur)	Rev/min pour arriver à la vitesse de 5000mm/min	Angle de pas □ (°)	Nombre de filets	Diamètre de vis	Couple T pour déplacer une charge de 200N
1	200	10	0,05	500	21,7	4	8	0,97
2		12	0,06	416,6666667	21,54	4	10	1,21
3		15	0,075	333,3333333	30,83	6	8	1,39
4		25	0,125	200	38,51	8	10	2,42
5		25	0,125	200	33,55	8	12	2,35
6		25	0,125	200	29,61	5	14	2,33
7		30	0,15	166,6666667	34,3	6	14	2,82
8		40	0,2	125	35,55	8	18	3,82
9		50	0,25	100	57,86	10	10	11,03

En utilisant une vis hélicoïdale de même diamètre que les rails de guidage (12mm), le pas de la vis standard sera de 25 mm, ce qui donne une précision de positionnement de 0,125 mm à chaque pas, soit un peu supérieure à la précision fixée dans le cahier des charges (0,1mm). Cette précision pourra cependant être améliorée par un traitement électronique qui permet d'augmenter le nombre de pas par révolution. Ce pas de vis important, de 25 mm, permettra de plus d'atteindre les vitesses de translation maximales souhaitées (5000 mm/min), puisque de telles vitesses seront atteintes avec une vitesse de rotation du moteur de 200 tours/min, ce qui est tout à fait acceptable pour ce type de système. Une vérification est finalement réalisée en utilisant les recommandations du fournisseur IGUS [118], pour une vis hélicoïdale possédant les caractéristiques géométriques précédemment sélectionnées, soumise à un effort axiale de 200 N, devant atteindre une vitesse d'avance maximale de 0,1 m/s, avec une longueur de course de 300mm (Figure A.12).

Saisie **Résultat** **Configuration**

Matériau Prix de l'écrou à partir de [EUR] Matière de la vis Filetage d1 x P d2 [mm] h1 [mm] Vis avec usinage Couple nécessaire [Nm] Durée de vie min [courses doubles]

Matériau	Prix de l'écrou à partir de [EUR]	Matière de la vis	Filetage d1 x P	d2 [mm]	h1 [mm]	Vis avec usinage	Couple nécessaire [Nm]	Durée de vie min [courses doubles]
R	Prix sur demande	Acier inoxydable (1.4301)	Ds 14x40.6	30	27		2,62	109.058
R	Prix sur demande	Acier inoxydable (1.4301)	Ds 18x24	40	36		1,68	105.783
J	33,23	Acier inoxydable (1.4301)	Sg 18x100	40	36		8,02	90.848
J	Prix sur demande	Acier inoxydable (1.4301)	Ds 12x25	28	24		1,64	78.791
J	Prix sur demande	Aluminium anodisé dur (EN AW6060)	Ds 10x12	22	20		0,90	75.595
J	Prix sur demande	Acier inoxydable (1.4301)	Ds 10x12	22	20		0,90	75.595
J	Prix sur demande	Aluminium anodisé dur	Ds 10x50	22	20		3,68	73.372

Les tolérances générales de la norme DIN ISO 2768 mK s'appliquent pour les dimensions. Les pivots d'arbre sont fabriqués avec une tolérance de H9.

Figure A1.12: Validation du choix final de la configuration des vis hélicoïdales IGUS [118]

Pour le mouvement de translation selon l'axe Z, la vitesse de déplacement pourra être plus faible (il s'agira juste de translater de quelques mm le plateau entre chaque tranche de construction), et une valeur maximale de 2500 mm/min a été retenue. En revanche la précision de positionnement, qui sera conditionnée par le pas du moteur et de la vis associée, doit être aussi élevée que pour les axes X et Y. Le moteur employé pour l'axe Z devra de plus être plus puissant, pour supporter et déplacer le poids du plateau, mais aussi le poids des mécaniques des axes X et Y, qui sont mobiles. La charge totale à déplacer est estimée à 500 N. Une vis de type trapézoïdal sera utilisée, qui est plus efficace pour transmettre des charges verticales. Le pas de la vis sera plus faible, ce qui améliore la précision de positionnement, et le diamètre plus important.

La sélection des moteurs se base sur la valeur des couples calculés qu'ils devront transmettre pour déplacer les poids prévus, et maintenir les vitesses demandées constantes. Les précédents calculs ont donné les valeurs de couples suivantes pour les deux types de mécanismes:

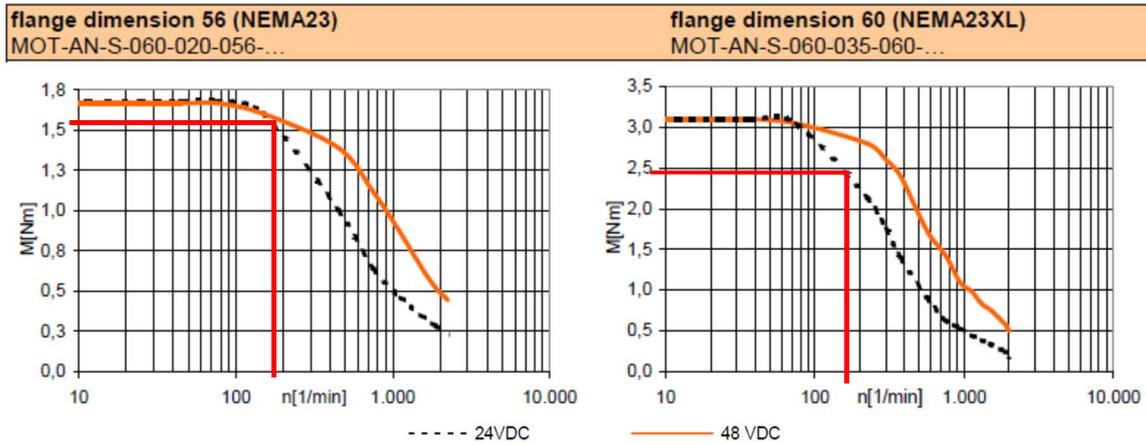
	Couple calculé [Nm]	Couple recommandé par IGUS [Nm]
Mécanismes X et Y	2,35	1,64
Mécanisme Z	2,59	2,45

Nous retiendrons les valeurs fournies par les outils de calculs fournis par IGUS, qui sont les plus adaptés à ce type de matériel. Dans la gamme de moteurs standards proposés par IGUS [8], les moteurs NEMA23 peuvent transmettre les couples nécessaires calculés. On choisira donc d'utiliser des moteurs de type NEMA23 pour les mécanismes X et Y, et de type NEMA23XL pour le mécanisme Z, qui requiert un couple plus important.

technical data						
flange dimension		28(NEMA11)	42(NEMA17)	56(NEMA23)	60(NEMA23XL)	86(NEMA34)
motor						
max voltage	[VDC]	60	60	60	60	60
nominal voltage	[VDC]	24-48	24-48	24-48	24-48	24-48
nominal current	[A]	1,0	1,8	4,2	4,2	6,4
holding torque	[Nm]	0,12	0,5	2,0	3,5	5,9
detent torque	[Nm]	0,004	0,022	0,068	0,075	0,210
step angle	[°]	1,8 ±5%	1,8 ±5%	1,8 ±5%	1,8 ±5%	1,8 ±5%
resistance / phase	[Ω]	2,30 ±10%	1,75 ±10%	0,50 ±10%	0,65 ±10%	0,33 ±10%
inductance / phase	[mH]	1,80 ±20%	3,30 ±20%	2,20 ±20%	3,20 ±20%	3,00 ±20%
moment of inertia / rotor	[kgcm ²]	0,018	0,082	0,48	0,84	2,70
max. shaft load axial	[N]	7	7	15	15	65
max. shaft load radial	[N]	20	20	52	63	200

Figure A1.14: Caractéristiques techniques des moteurs IGUS [120]

Grace aux caractéristiques des couples moteurs en fonction de la vitesse de rotation fournies par le fabricant IGUS, on peut déterminer la vitesse maximale de rotation des moteurs (Figure A.15).



	Couple recommandé par IGUS [Nm]	n [1/min]	Vitesse [mm/min]
Mécanismes X et Y [pas= 25 mm]	1,64	180	4500 mm/min
Mécanisme Z [pas= 4]	2,45	170	680 mm/min

Figure A1.15: Courbes caractéristiques Couple/Vitesse de rotation des moteurs NEMA23, et vitesses de rotation maximales pour l'application visée [120]

Les vitesses de rotation maximales que peuvent atteindre les moteurs en maintenant les couples recommandés est donc suffisante pour satisfaire les exigences du cahier des charges.

Annexe 2 : influence des paramètres de la synergie CMT sur les caractéristiques du transfert et sur la géométrie des cordons

A2.1 Influence des paramètres de la phase d'arc chaud

Paramètre $d_boostup$ [A/ms]

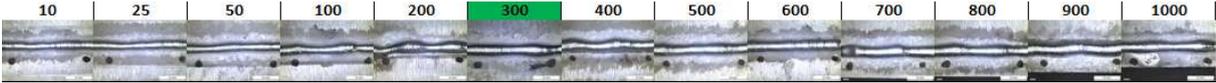
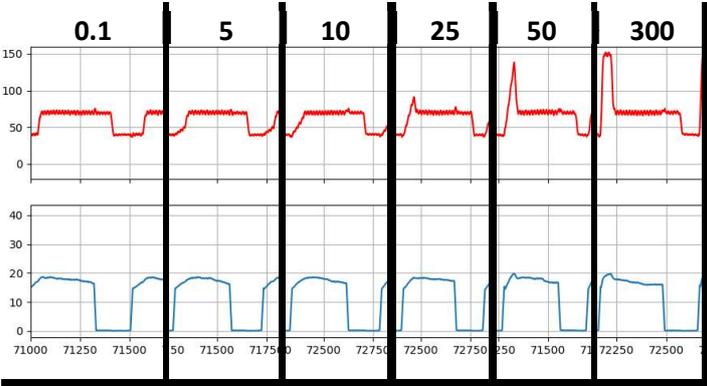
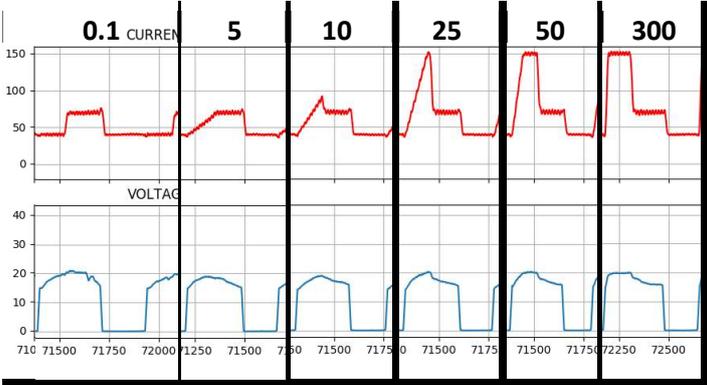


Figure A2.1: Evolution de la géométrie de cordon pour différentes valeurs de $d_boostup$



a)



b)

Figure A2.2: Modifications du cycle CMT avec différentes valeurs de $d_boostup$ a) P5 b) P6

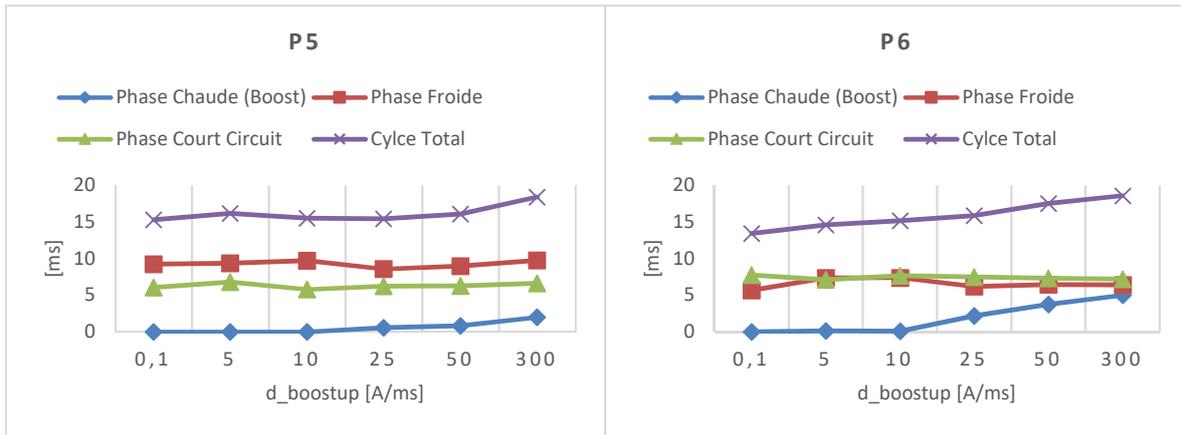


Figure A2.3: Evolution de la durée des phases du cycle CMT

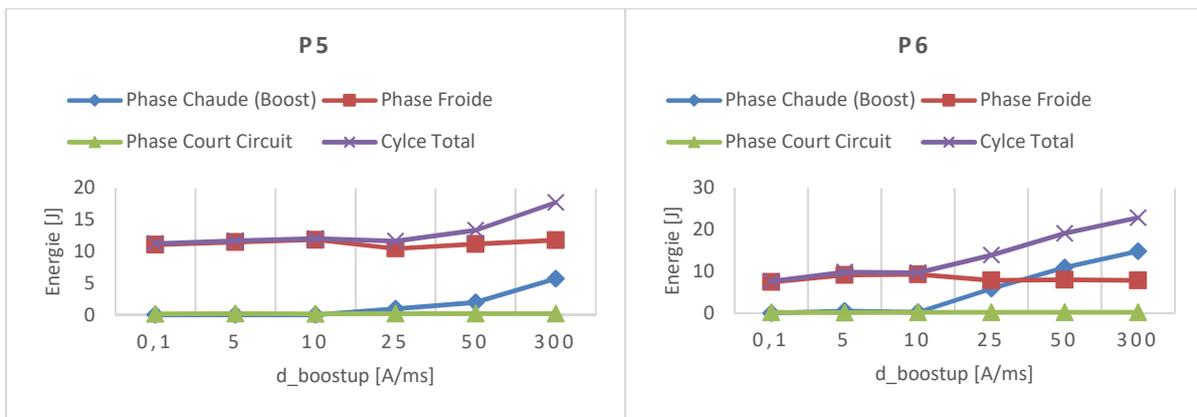


Figure A2.4: Energie apporté par phase dans les cycles CMT

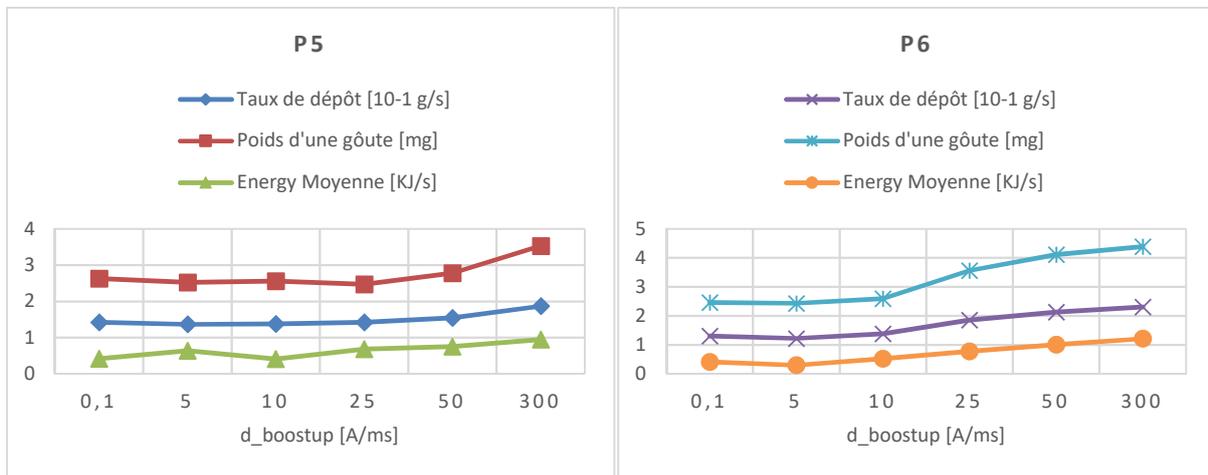


Figure A2.5: Evolution du taux de dépôt, du poids de la goûte et de l'énergie moyenne pendant le dépôt d'un cordon.

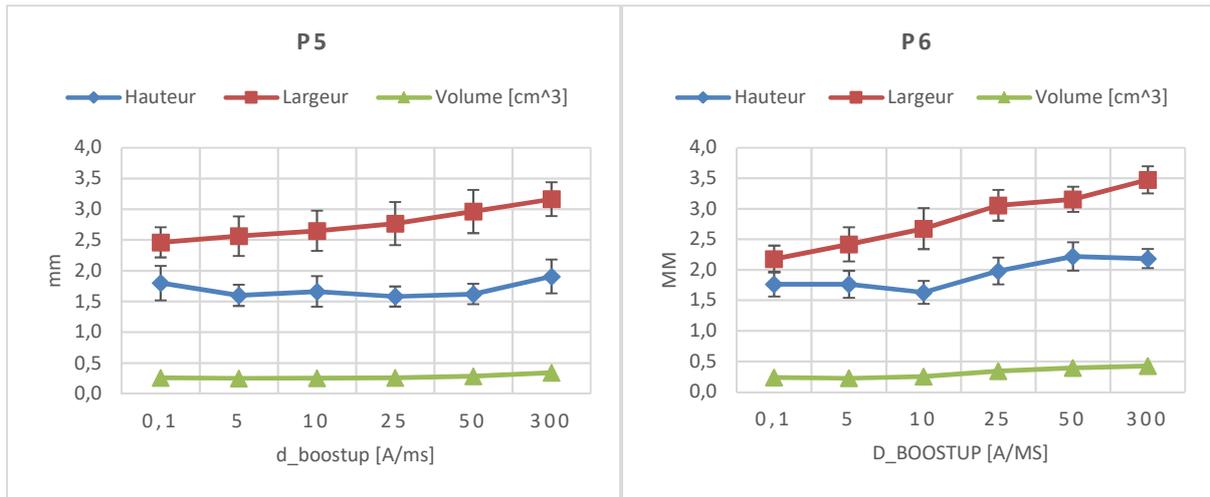


Figure A2.6: Caractéristiques géométriques en fonction du paramètre $d_{boostup}$

Paramètre $\tau_{boostup}$ [ms]

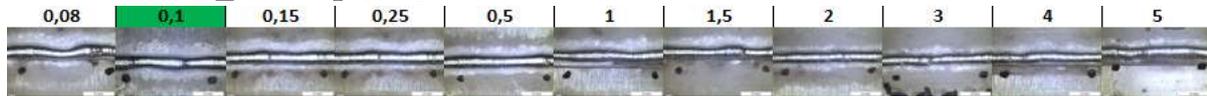


Figure A2.7: Evolution de la géométrie de cordon pour différentes valeurs de $\tau_{boostup}$

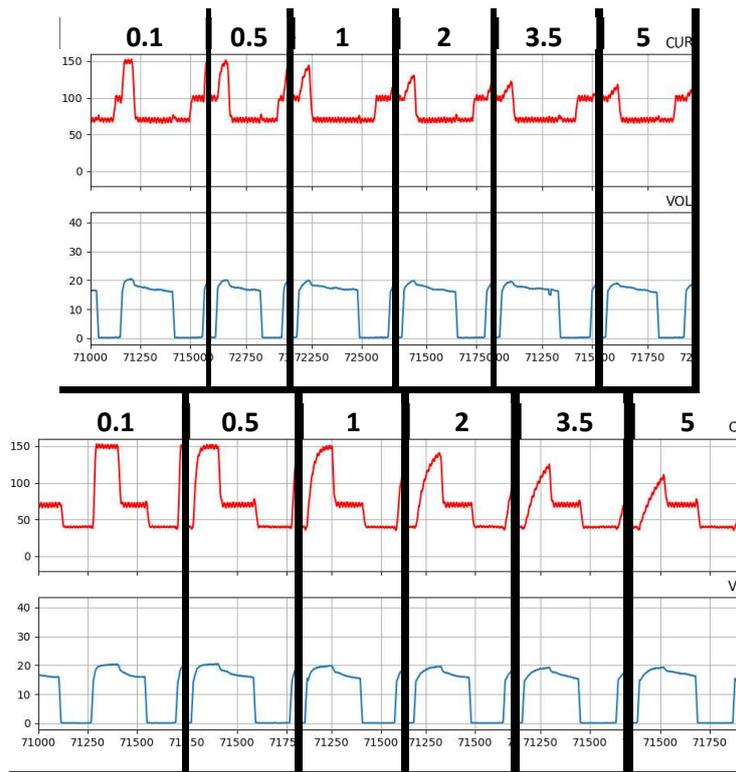


Figure A2.8: Modifications du cycle CMT avec différentes valeurs de $\tau_{boostup}$ a) P5 b) P6

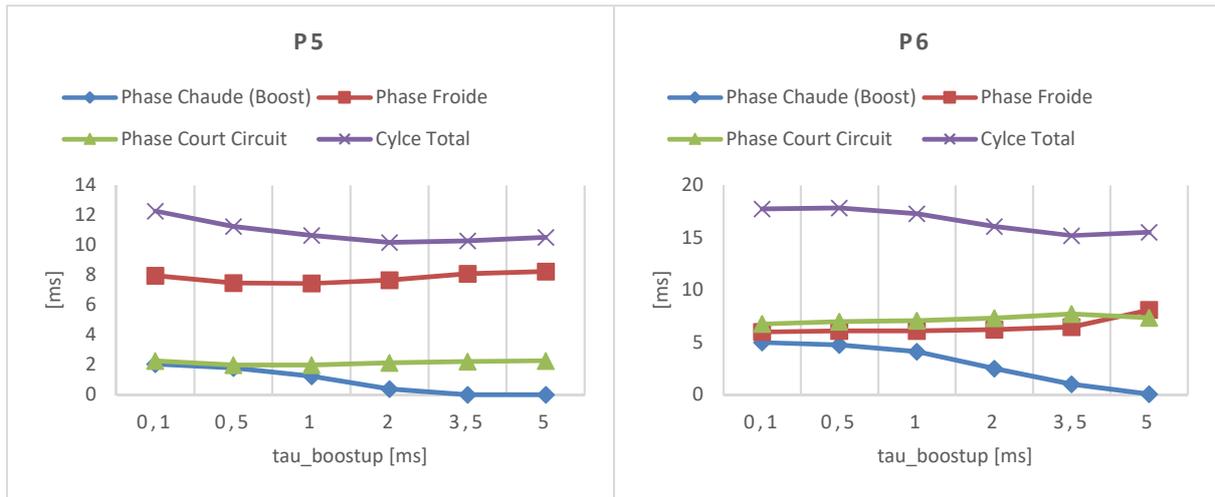


Figure A2.9: Evolution de la durée des phases du cycle CMT

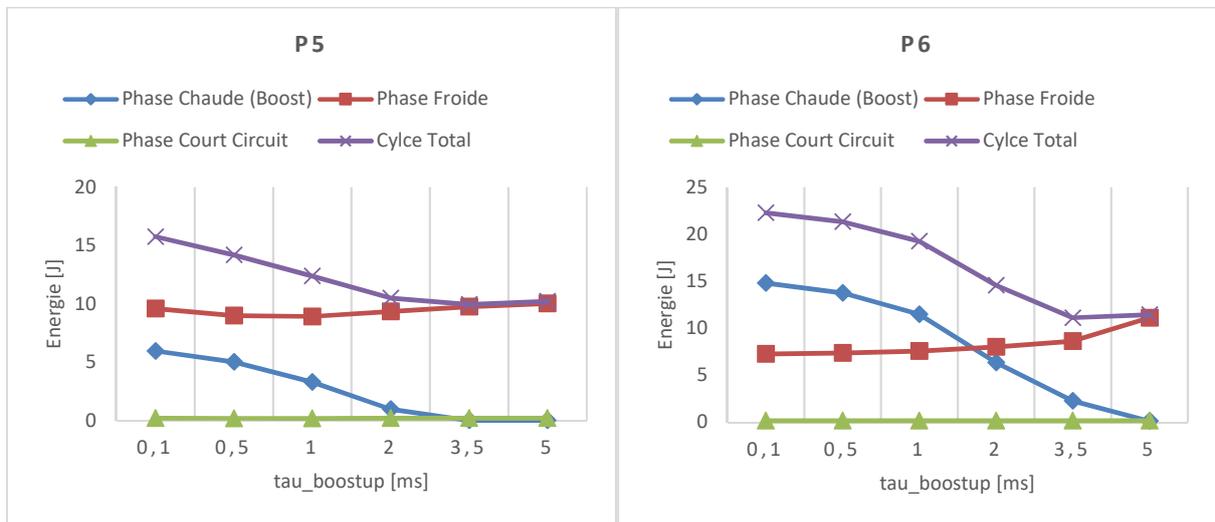


Figure A2.10: Energie apporté par phase dans les cycles CMT

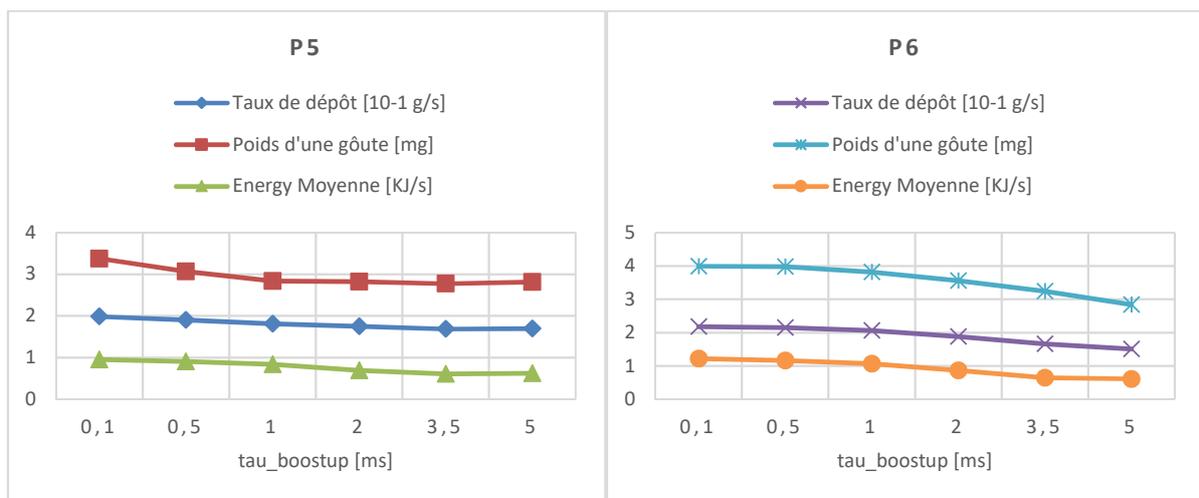


Figure A2.11: Evolution du taux de dépôt, du poids de la goûte et de l'énergie moyenne pendant le dépôt d'un cordon.

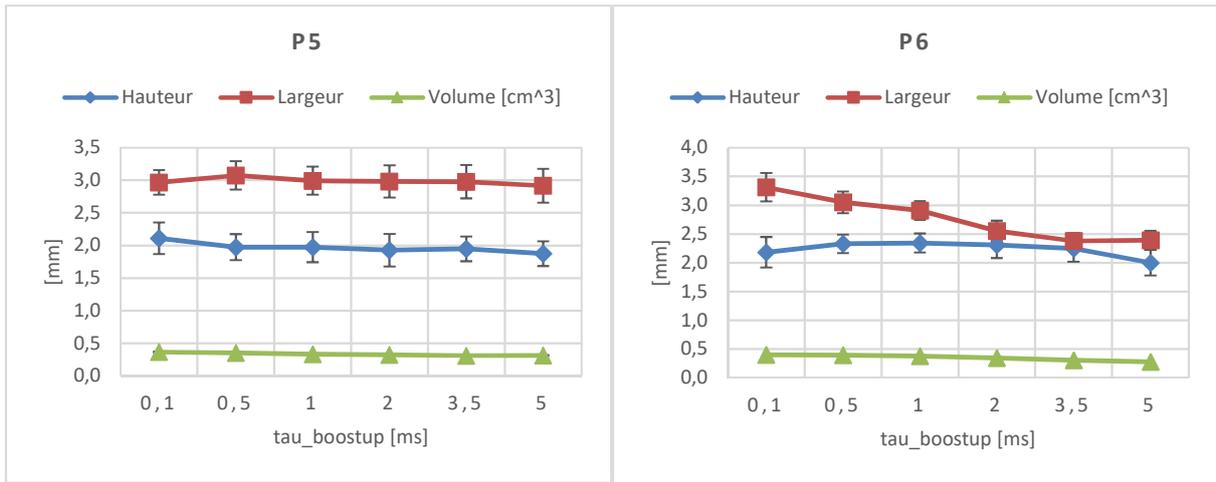


Figure A2.12: Caractéristiques géométriques en fonction du paramètre tau_boostup

Paramètre I_boost [A]

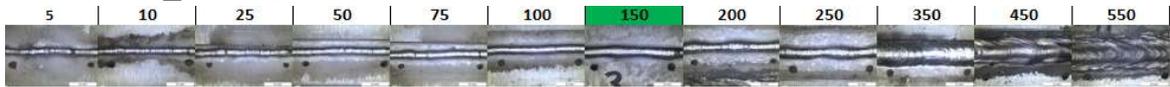


Figure A2.13: Evolution de la géométrie de cordon pour différentes valeurs de I_boost

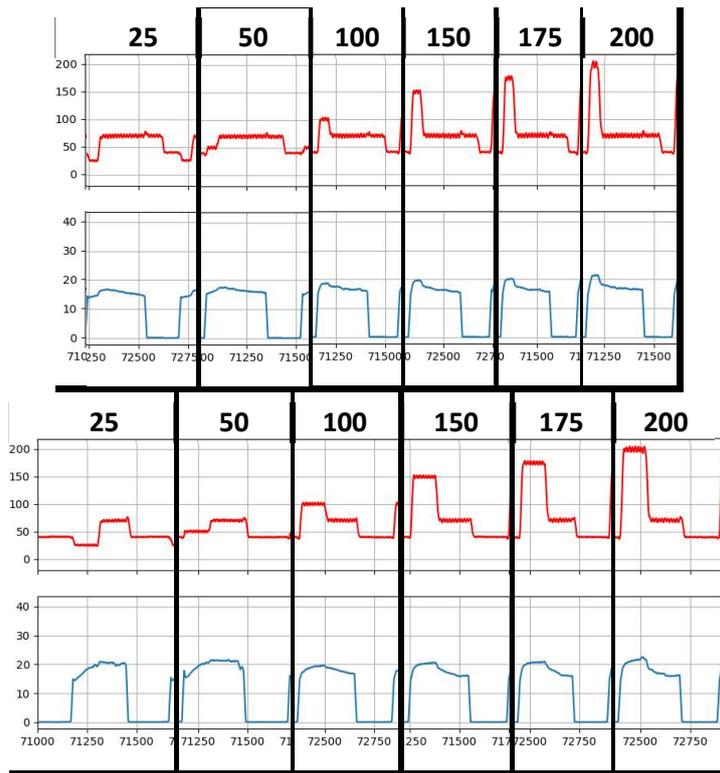


Figure A2.14: Modifications du cycle CMT avec différentes valeurs de I_boost a) P5 b) P6

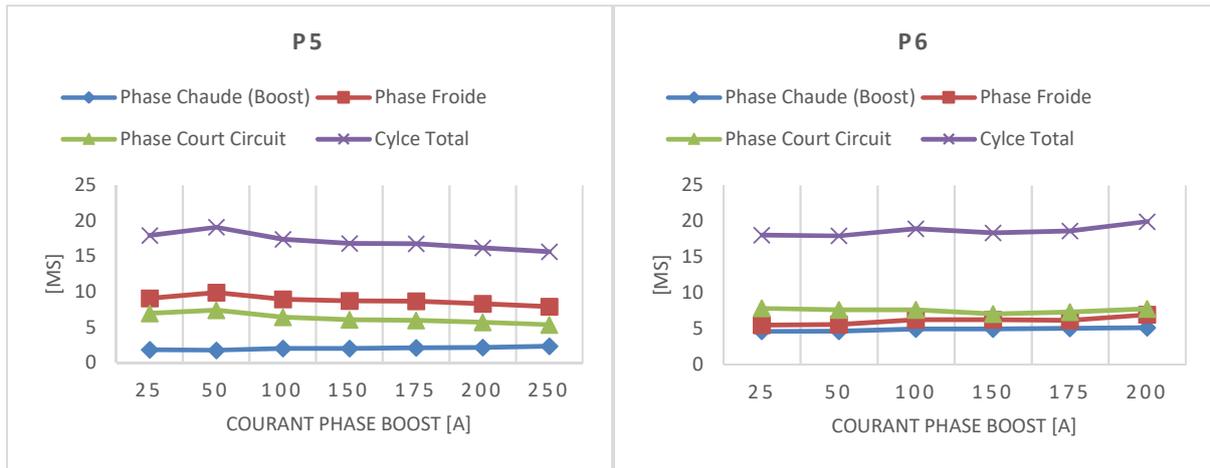


Figure A2.15: Evolution de la durée des phases du cycle CMT

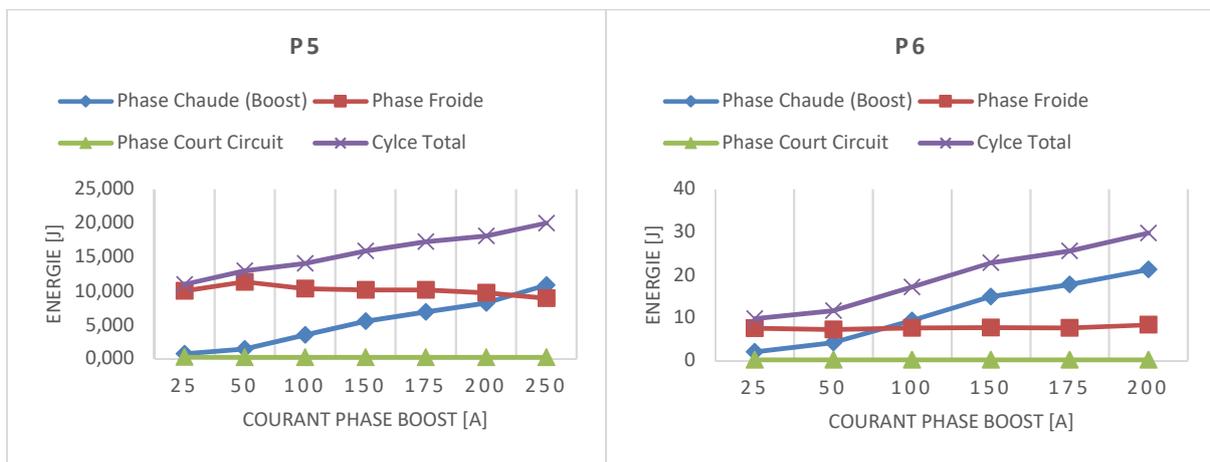


Figure A2.16: Energie apporté par phase dans les cycles CMT

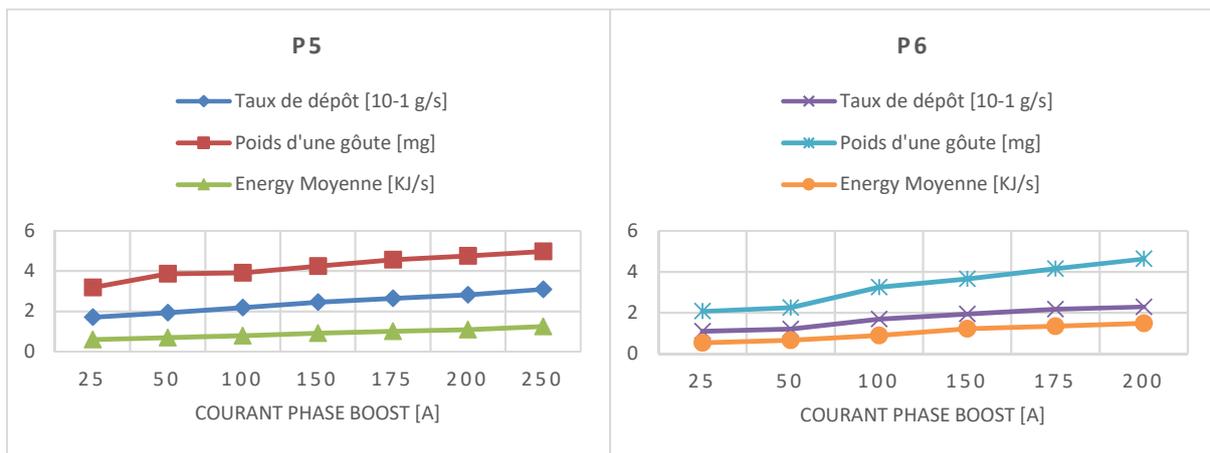


Figure A2.17: Evolution du taux de dépôt, du poids de la goutte et de l'énergie moyenne pendant le dépôt d'un cordon.

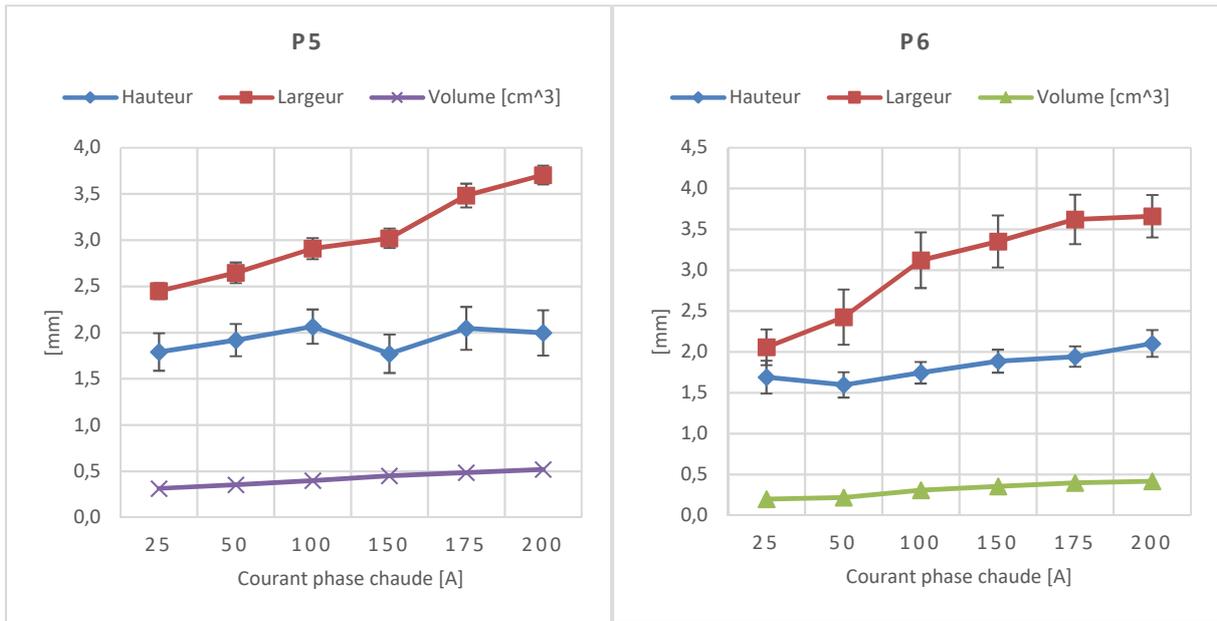


Figure A2.18: Caractéristiques géométriques en fonction du paramètre I_{boost}

Paramètre $t_{I_{boost}}$ [ms]



Figure A2.19: Evolution de la géométrie de cordon pour différentes valeurs de $t_{I_{boost}}$

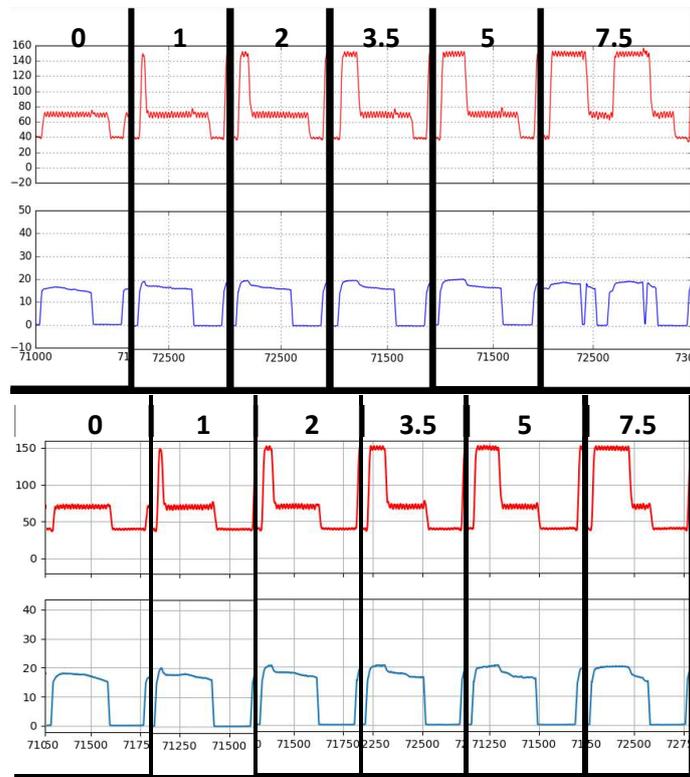


Figure A2.20: Modifications du cycle CMT avec différentes valeurs de $t_{I_{boost}}$ a) P5 b) P6

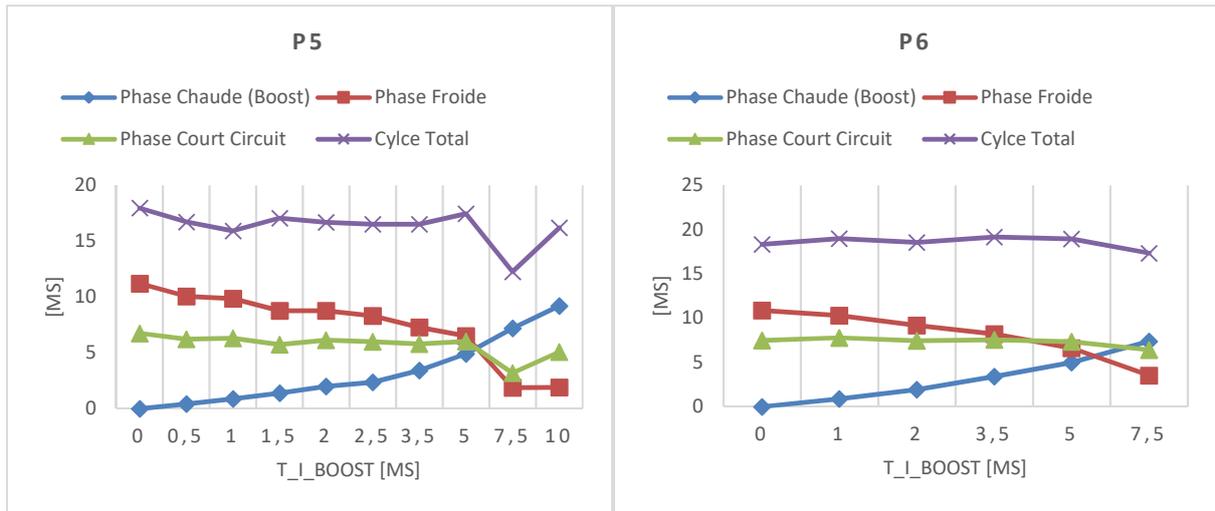


Figure A2.21: Evolution de la durée des phases du cycle CMT

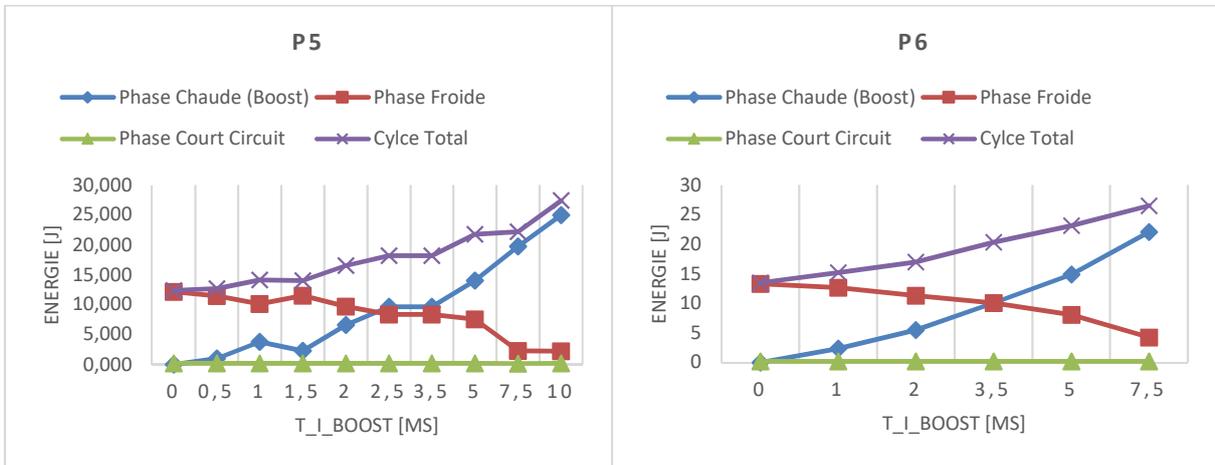


Figure A2.22: Energie apporté par phase dans les cycles CMT

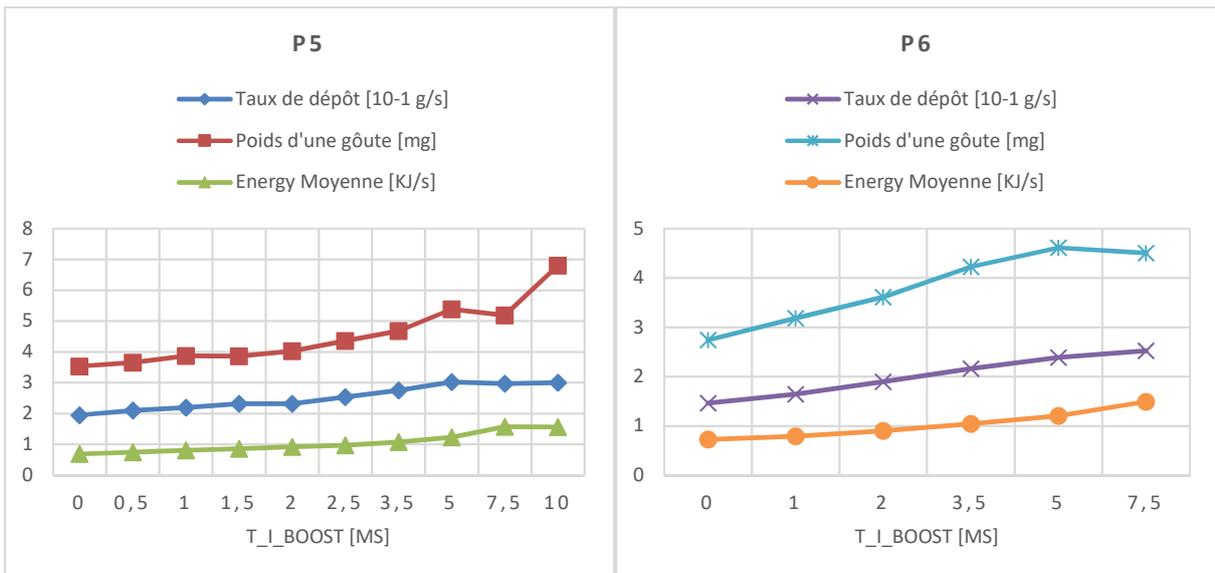


Figure A2.23: Evolution du taux de dépôt, du poids de la goûte et de l'énergie moyenne pendant le dépôt d'un cordon.

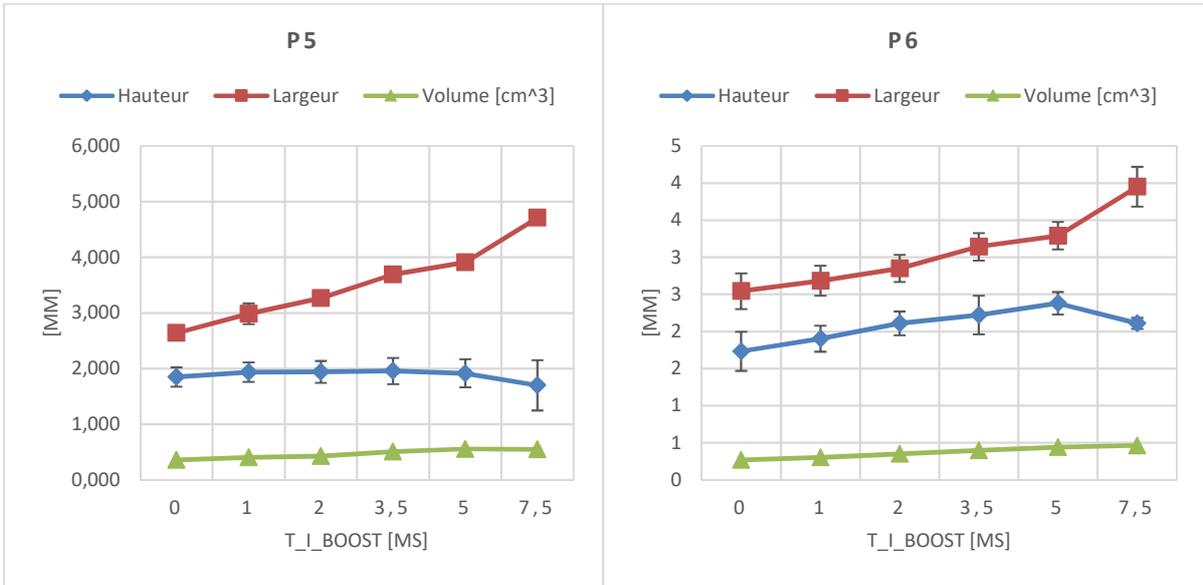


Figure A2.24: Caractéristiques géométriques en fonction du paramètre t_I_boost

Paramètre $d_boostdown$ [A/ms]

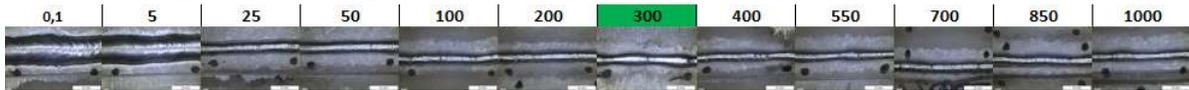


Figure A2.25: Evolution de la géométrie de cordon pour différentes valeurs de $d_boostdown$

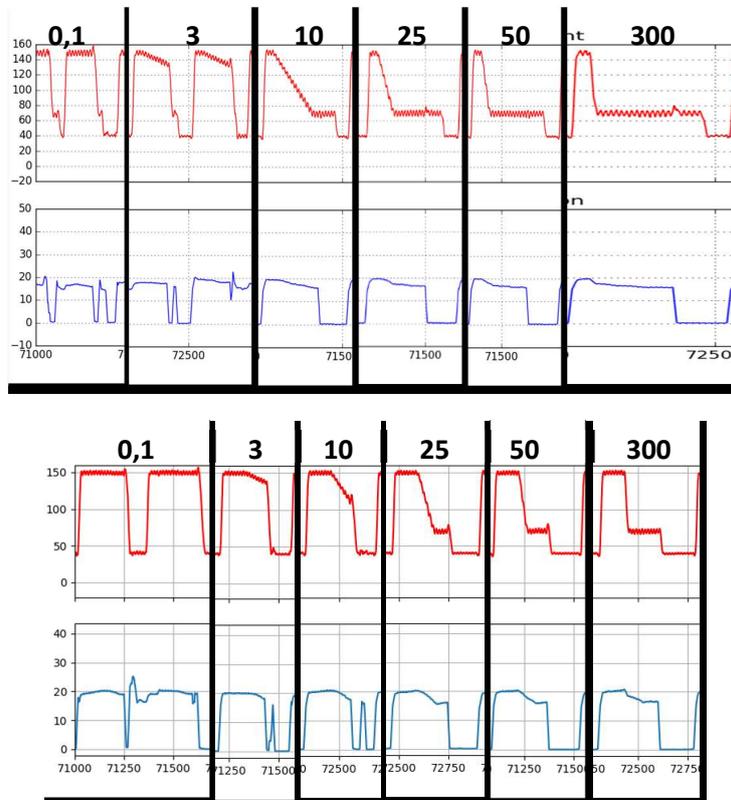


Figure A2.26: Modifications du cycle CMT avec différentes valeurs de $d_boostdown$ a) P5 b) P6

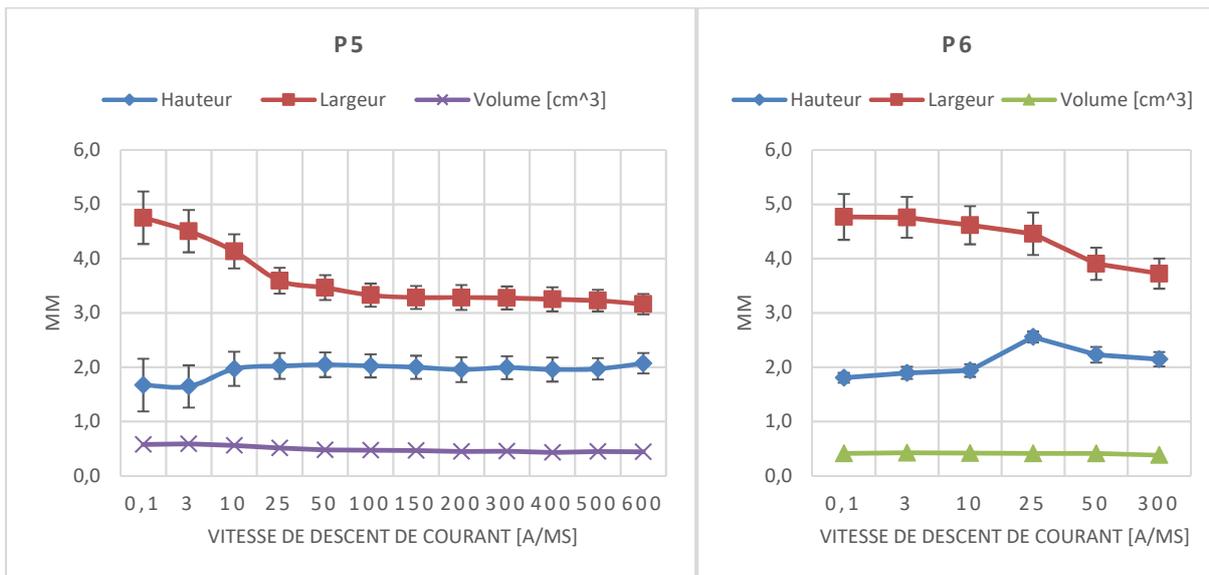


Figure A2.27: Caractéristiques géométriques en fonction du paramètre $d_{boostdown}$

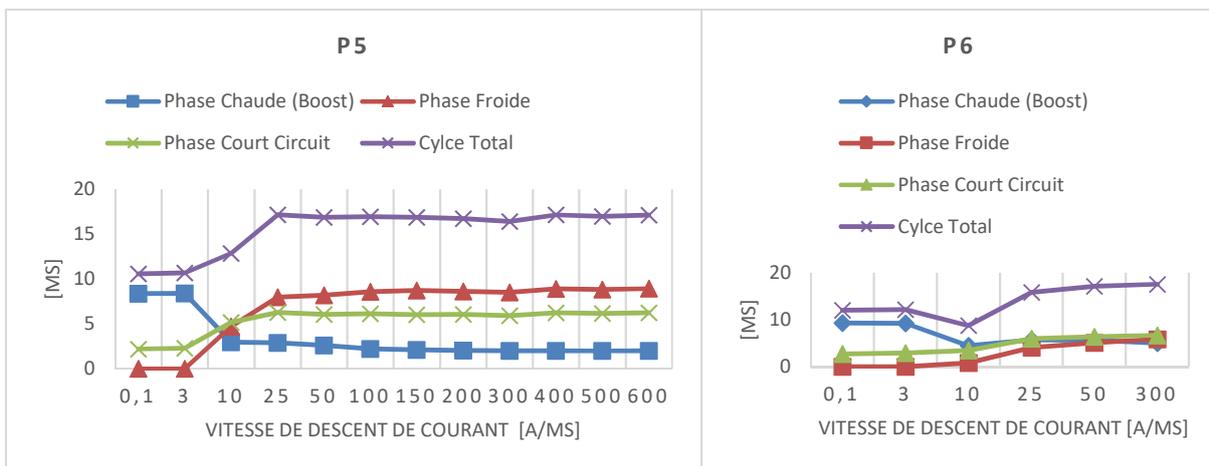


Figure A2.28: Evolution de la durée des phases du cycle CMT

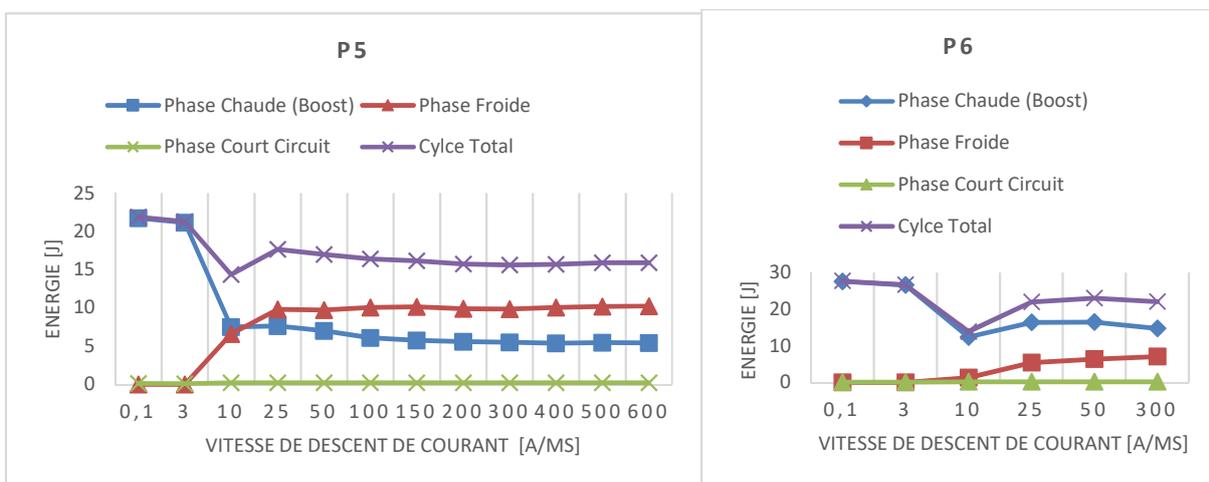


Figure A2.29: Energie apporté par phase dans les cycles CMT

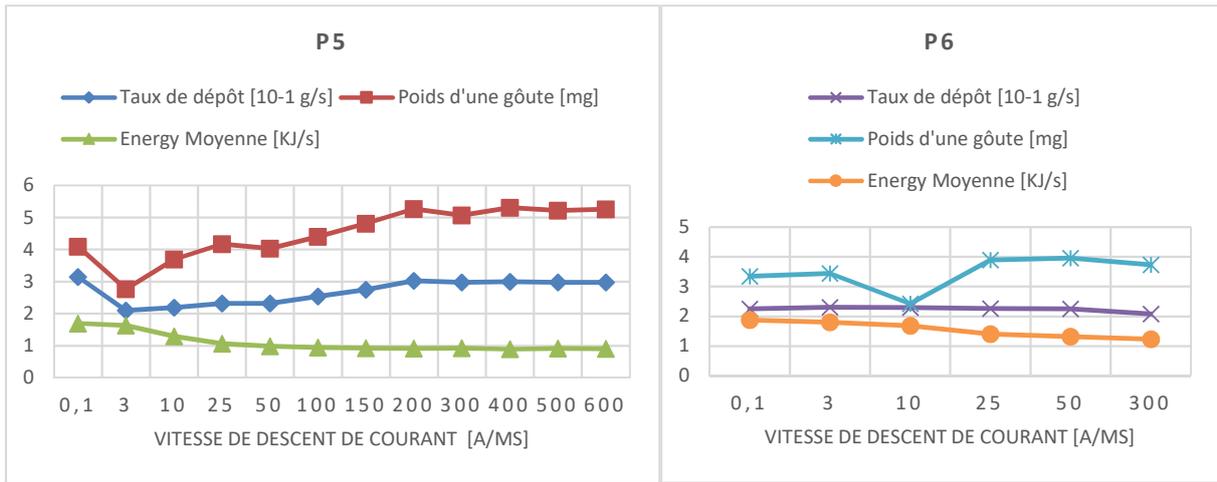


Figure A2.30: Evolution du taux de dépôt, du poids de la goute et de l'énergie moyenne pendant le dépôt d'un cordon.

A2.2 Influence des paramètres de la phase d'arc froid

Paramètre I_{sc_wait} (A)

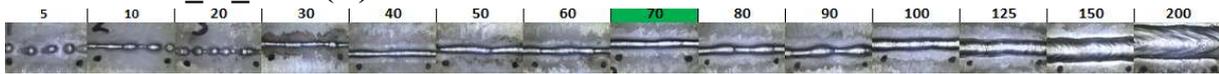


Figure A2.31: Evolution de la géométrie de cordon pour différentes valeurs de I_{sc_wait}

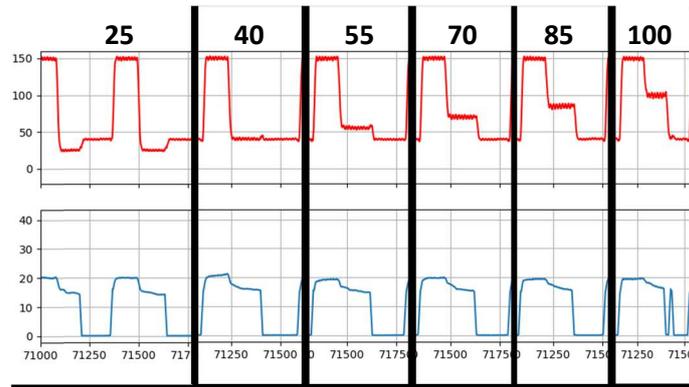


Figure A2.32: Modifications du cycle CMT avec différentes valeurs I_{sc_wait} (P6)

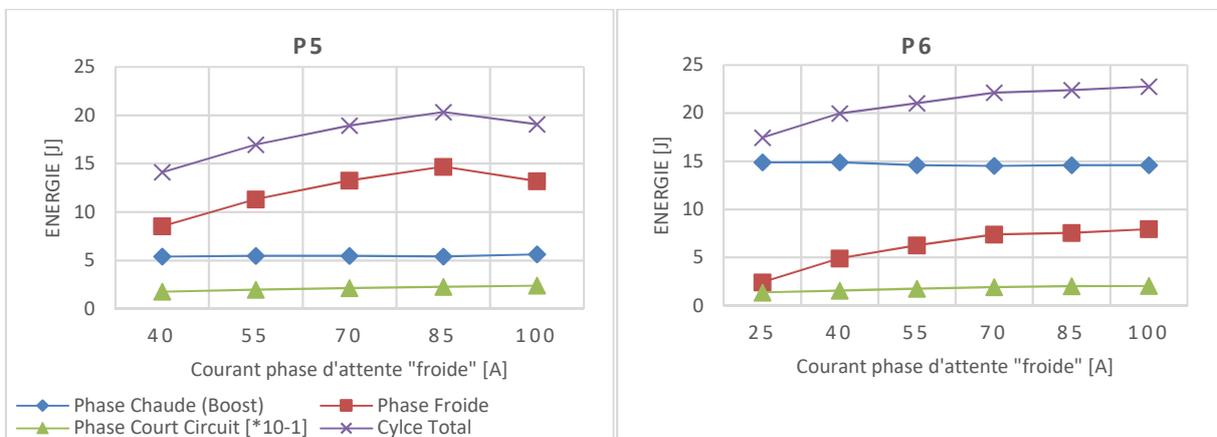


Figure A2.33: Energie apporté par phase dans les cycles CMT

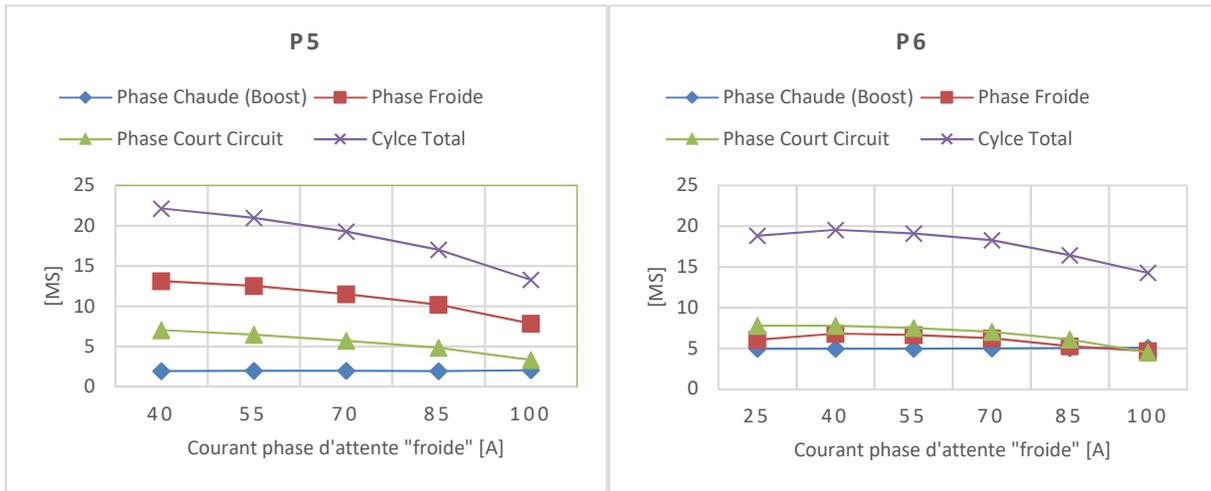


Figure A2.34: Evolution de la durée des phases du cycle CMT

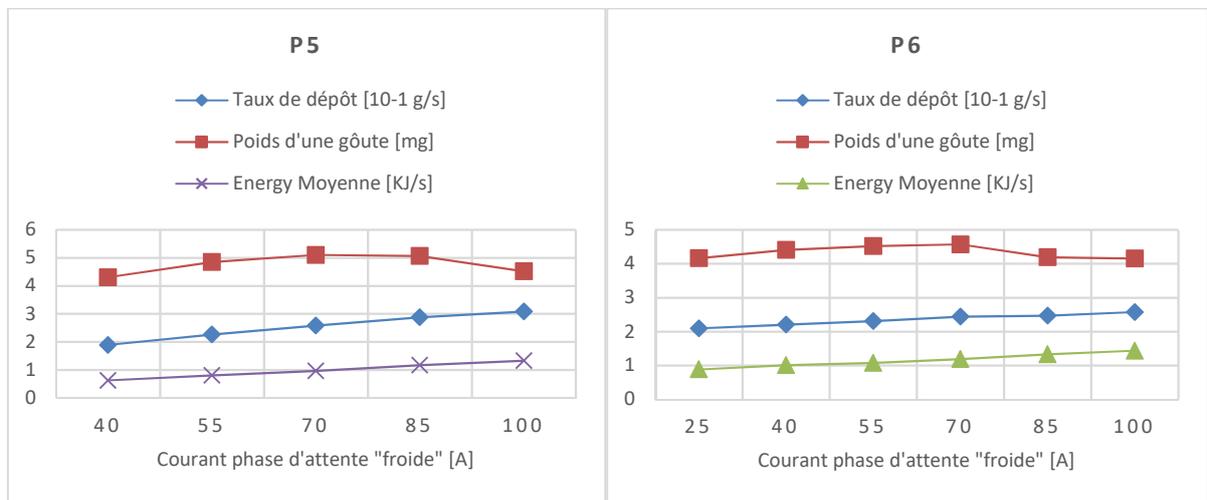


Figure A2.35: Evolution du taux de dépôt, du poids de la goûte et de l'énergie moyenne pendant le dépôt d'un cordon.

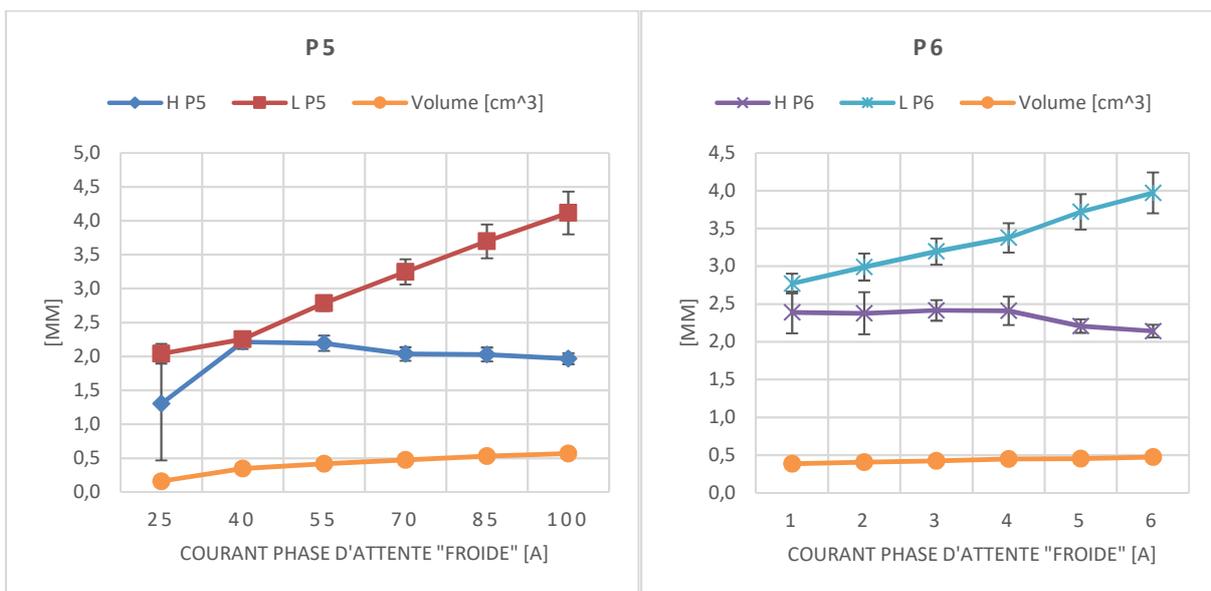


Figure A2.36: Caractéristiques géométriques en fonction du paramètre I_{sc_wait}

Paramètre Vd_sc_wait (m/min)

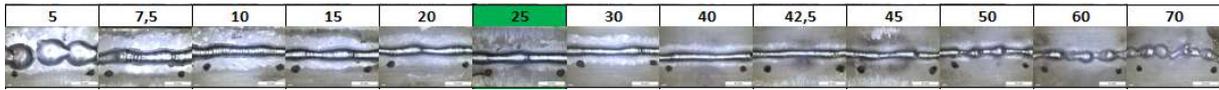


Figure A2.37: Evolution de la géométrie de cordon pour différentes valeurs de Vd_sc_wait

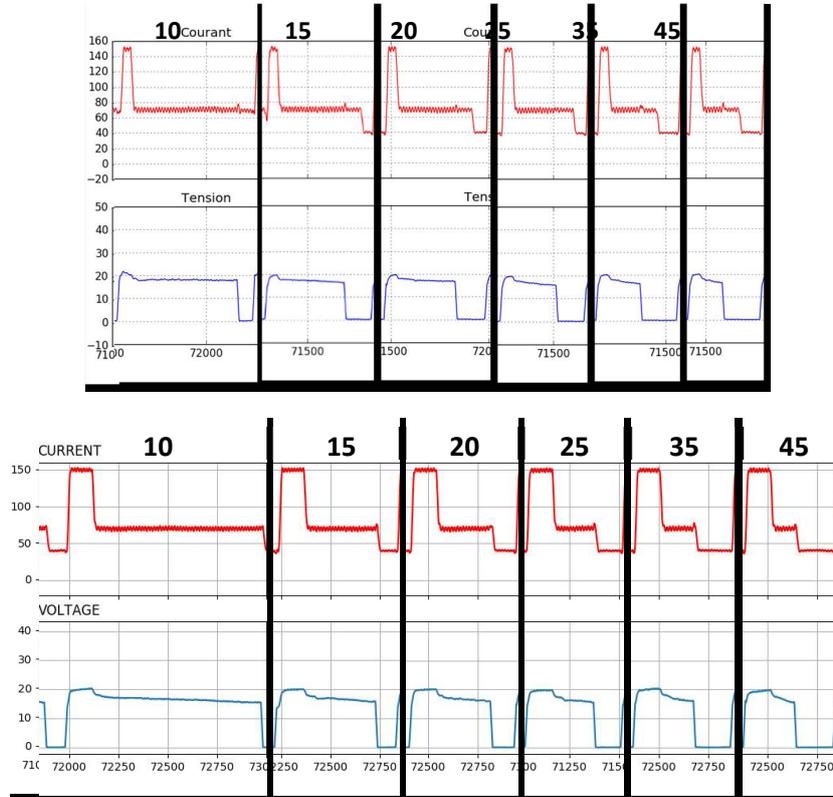


Figure A2.38: Modifications du cycle CMT avec différentes valeurs de Vd_sc_wait a) P5 b) P6

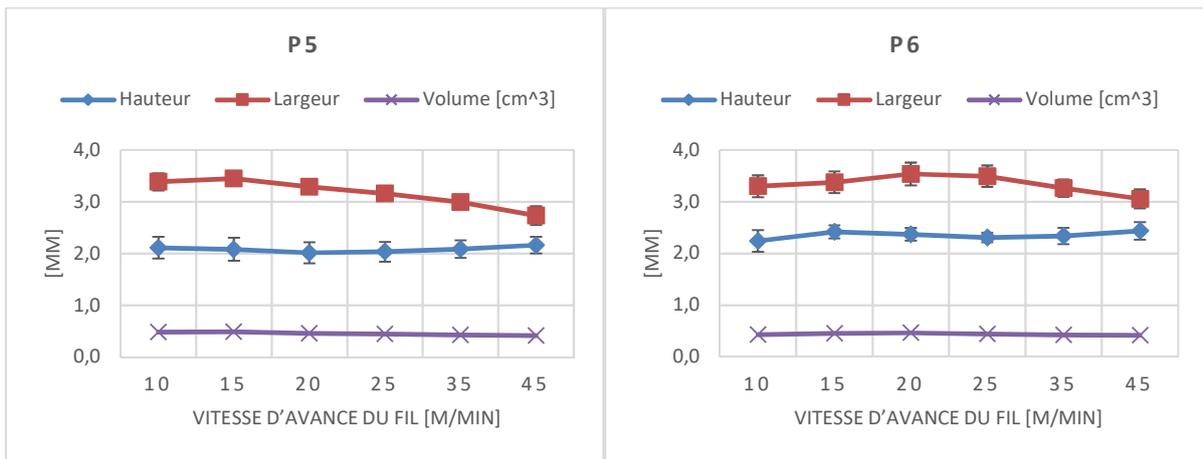


Figure A2.39: Caractéristiques géométriques en fonction du paramètre Vd_sc_wait

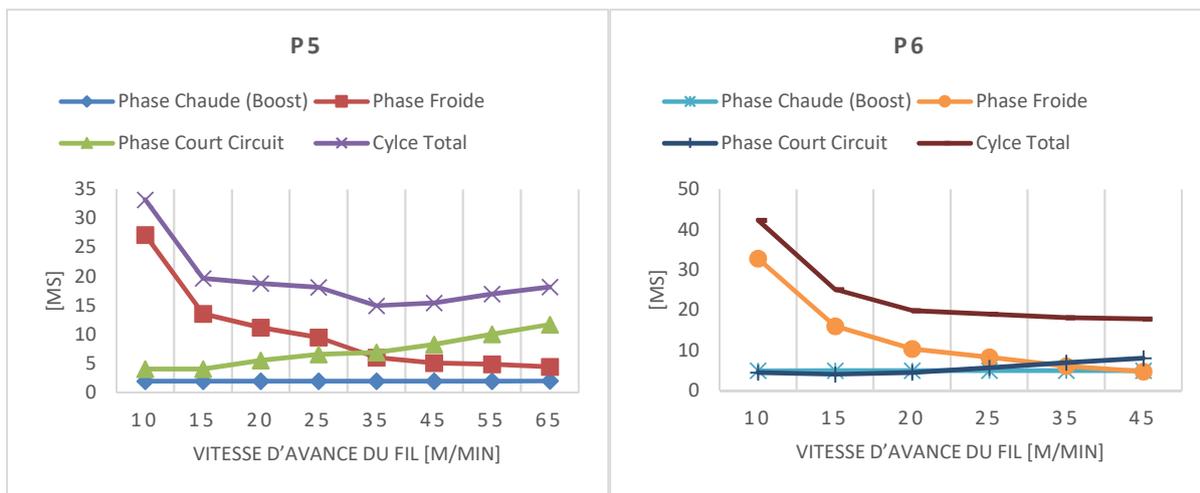


Figure A2.40: Evolution de la durée des phases du cycle CMT

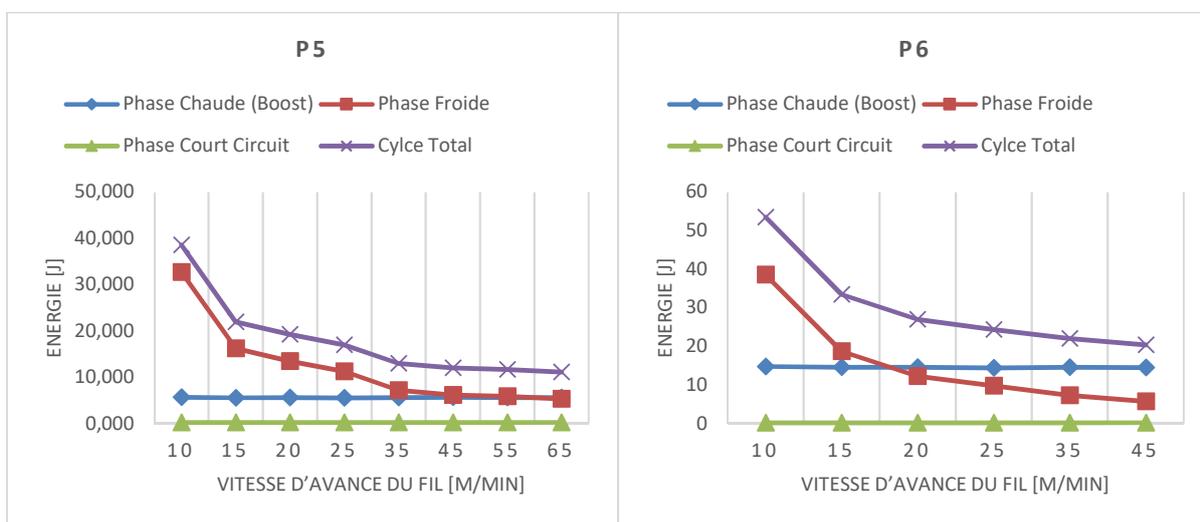


Figure A2.41: Energie apporté par phase dans les cycles CMT

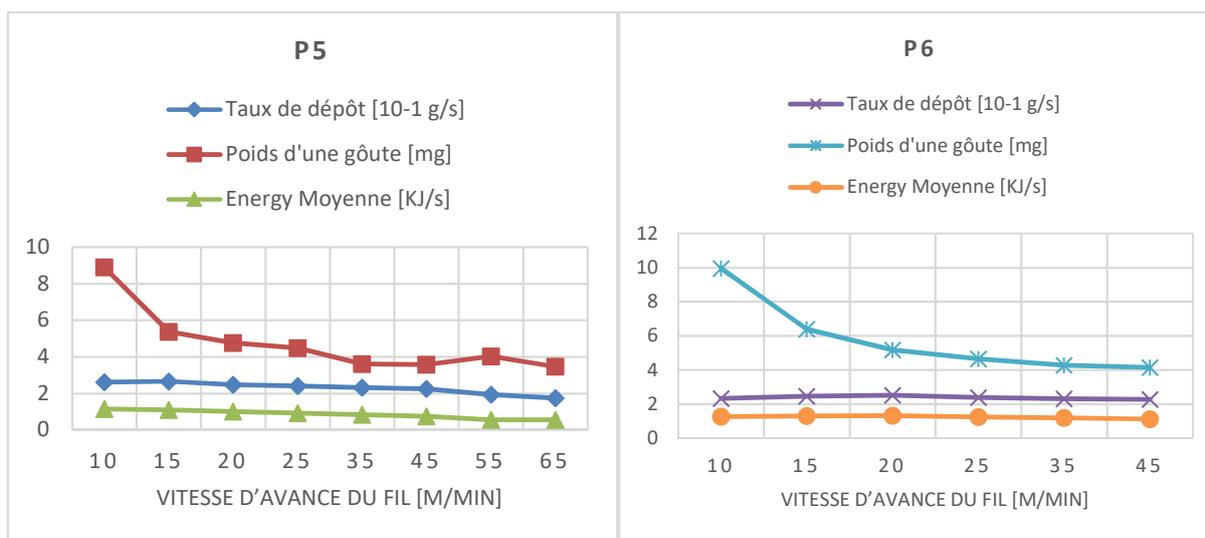


Figure A2.42 : Evolution du taux de dépôt, du poids de la goûte et de l'énergie moyenne pendant le dépôt d'un cordon.

A2.3 Influence des paramètres de la phase court-circuit

Paramètre I_{sc2} [A]

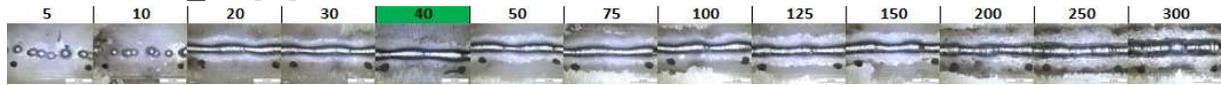


Figure A2.43: Evolution de la géométrie de cordon pour différentes valeurs de I_{sc2}

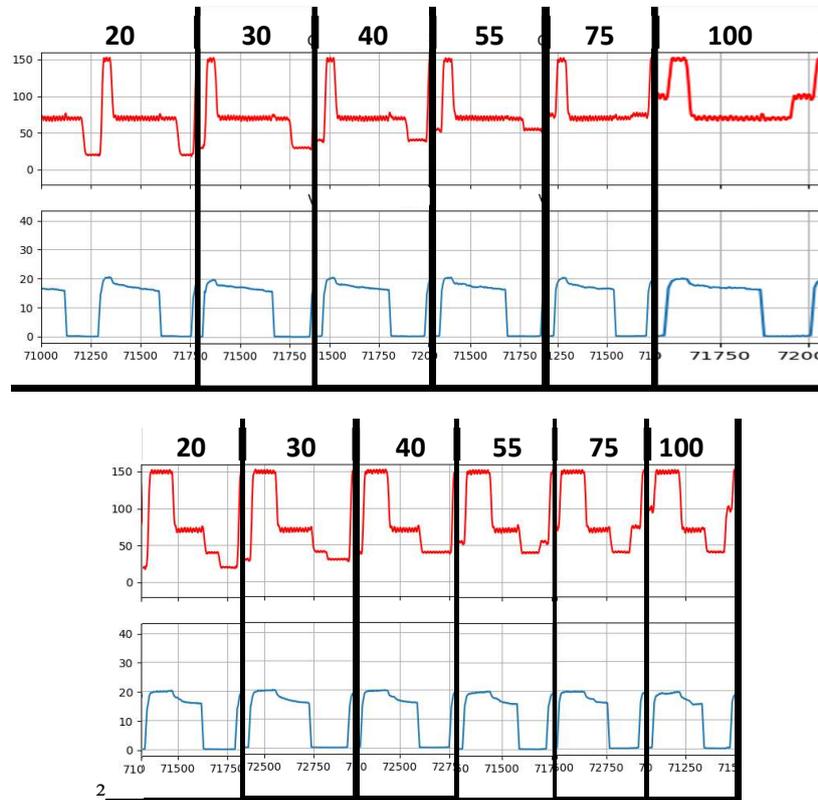


Figure A2.44: Modifications du cycle CMT avec différentes valeurs de I_{sc2} a) P5 b) P6

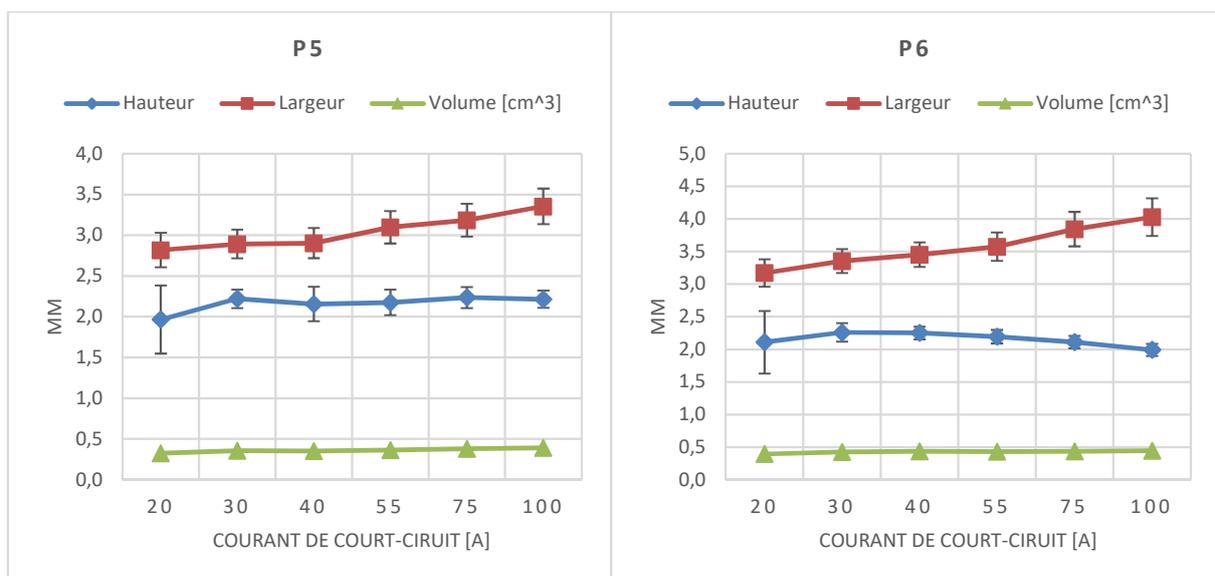


Figure A2.45: Caractéristiques géométriques en fonction du paramètre I_{sc2}

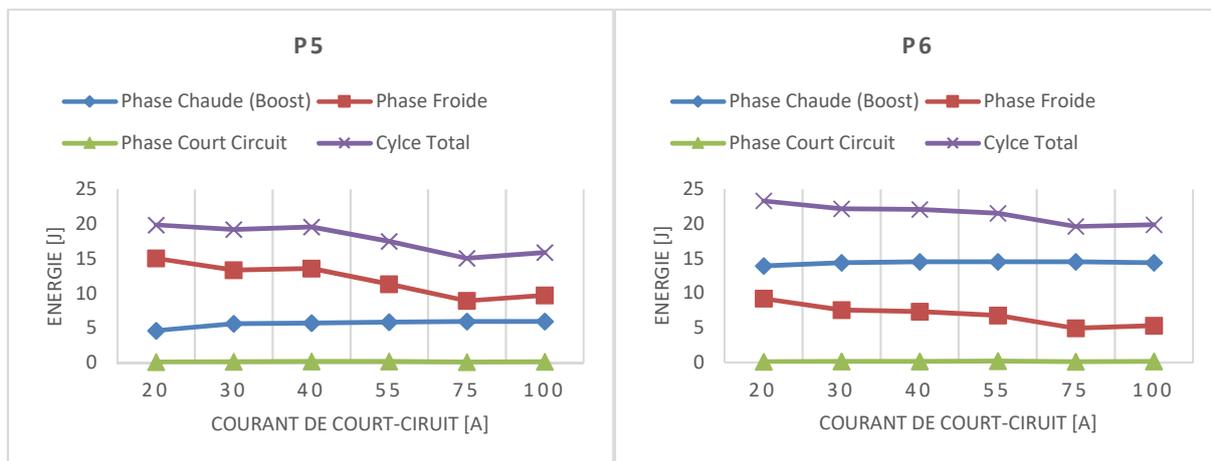


Figure A2.46: Energie apporté par phase dans les cycles CMT

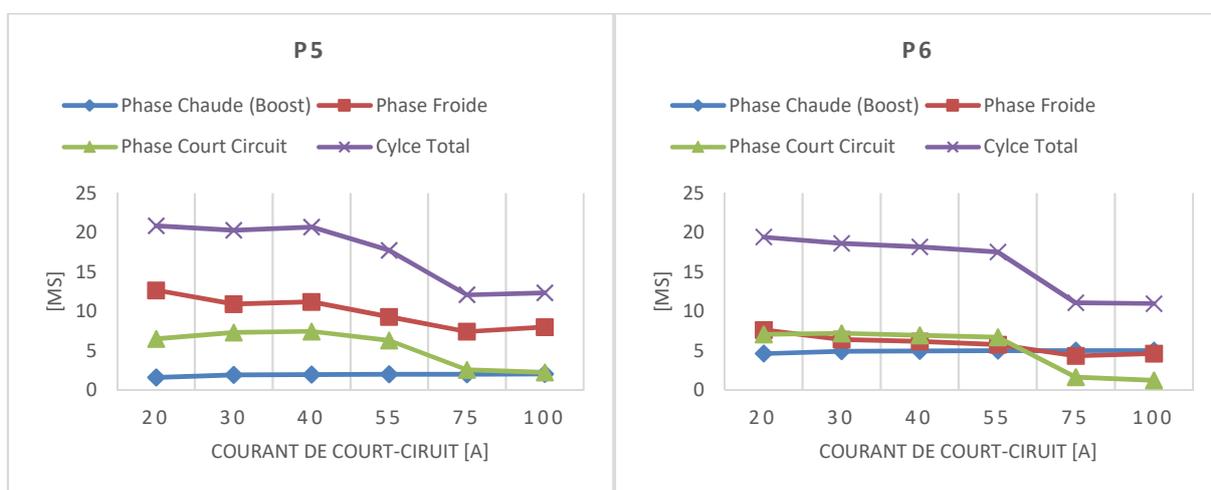


Figure A2.47: Evolution de la durée des phases du cycle CMT

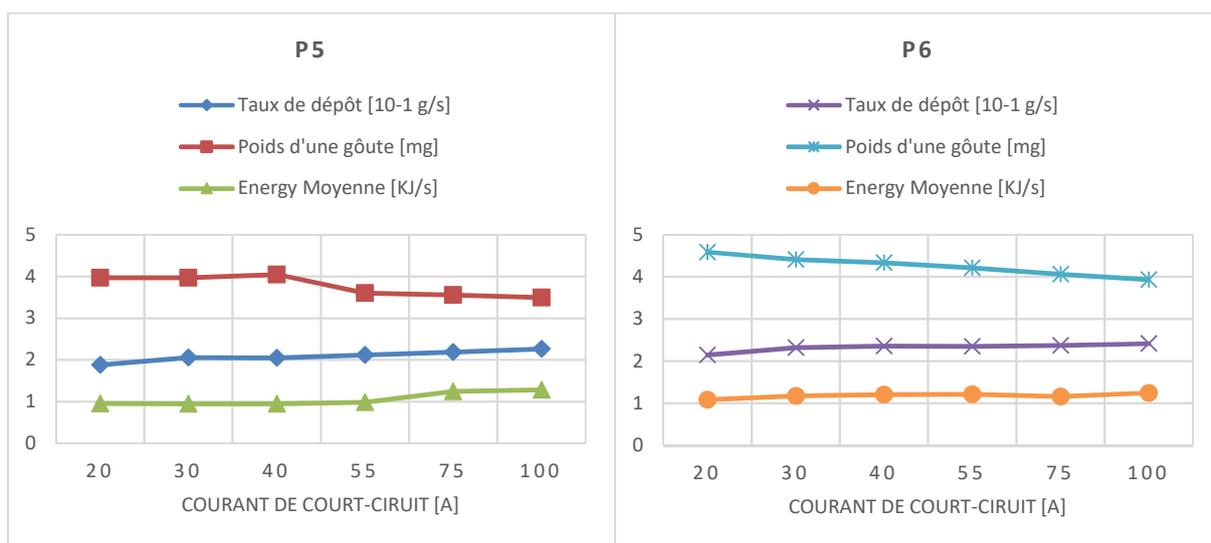
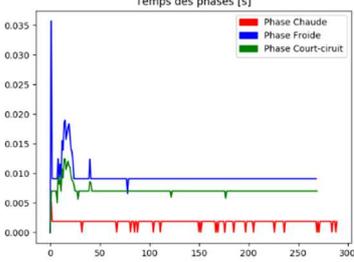
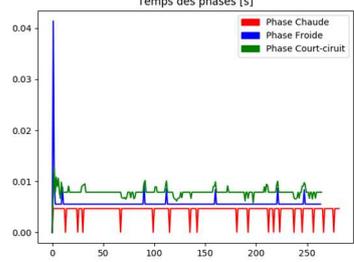
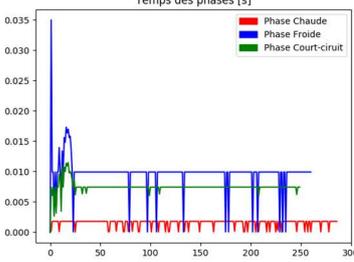
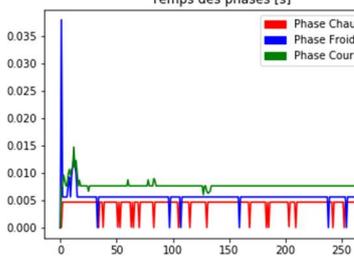
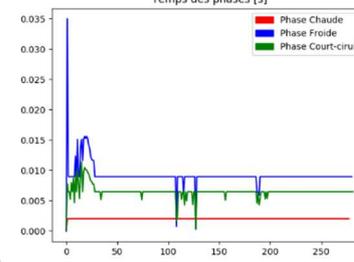
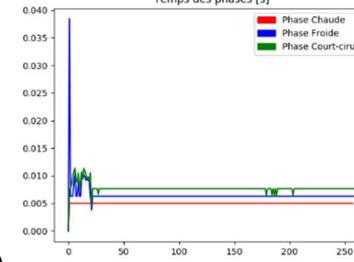
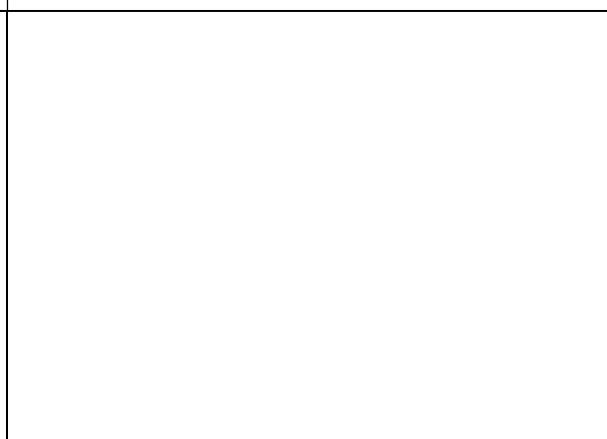
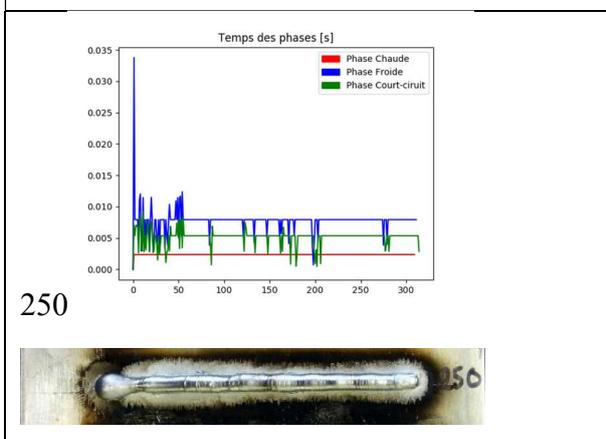
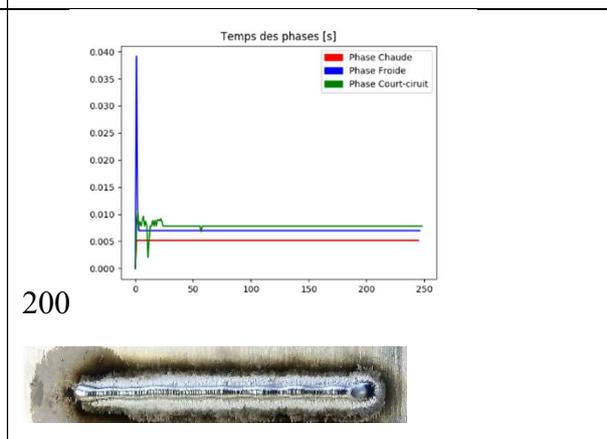
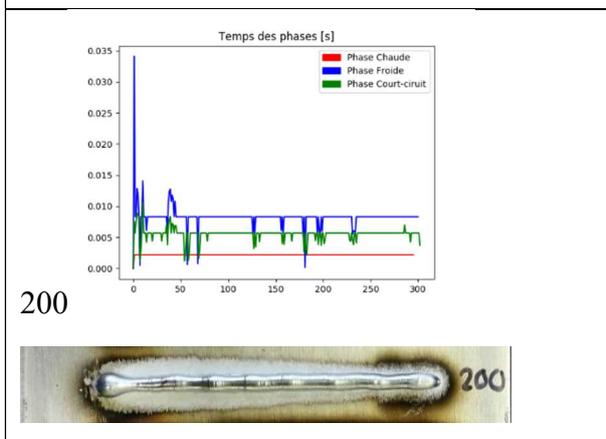
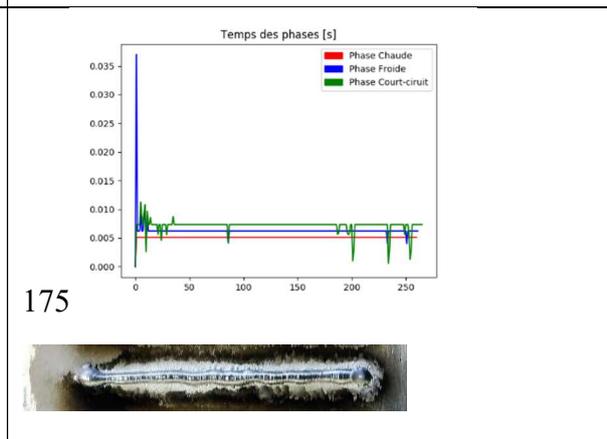
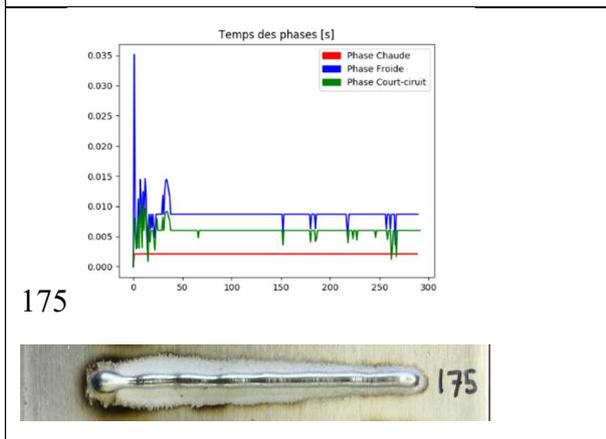
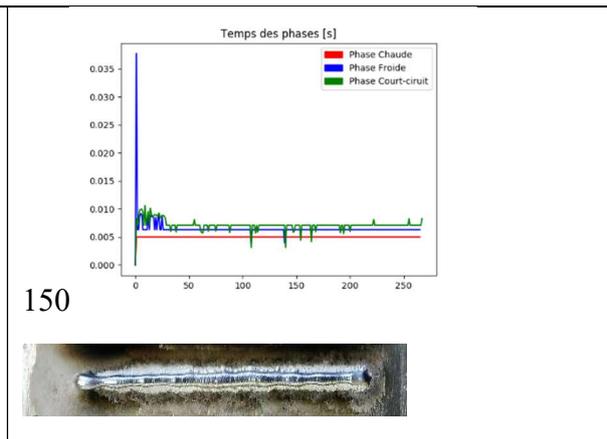
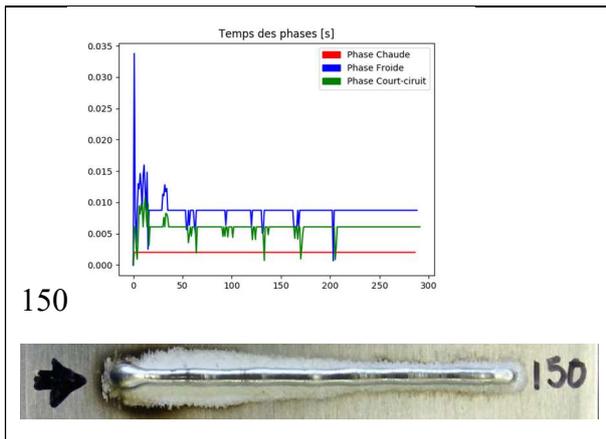


Figure A2.48: Evolution du taux de dépôt, du poids de la gôte et de l'énergie moyenne pendant le dépôt d'un cordon.

Annexe 3 : évolution de la durée des phases du cycle CMT le long du dépôt

Tableau A3.1 Influence du paramètre I_{boost}

P5	P6
<p>25</p>  	<p>25</p>  
<p>50</p>  	<p>50</p>  
<p>100</p>  	<p>100</p>  



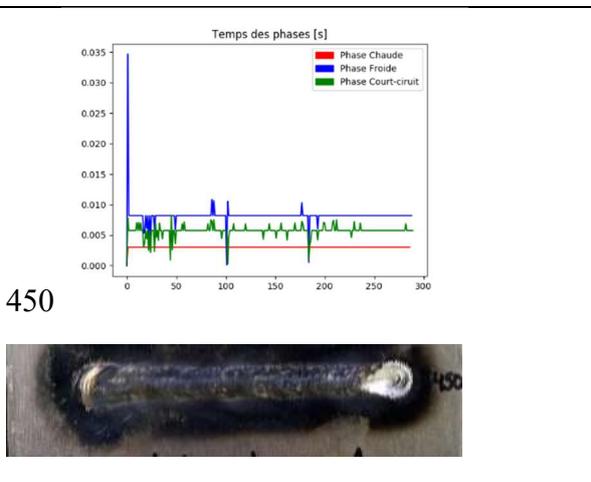
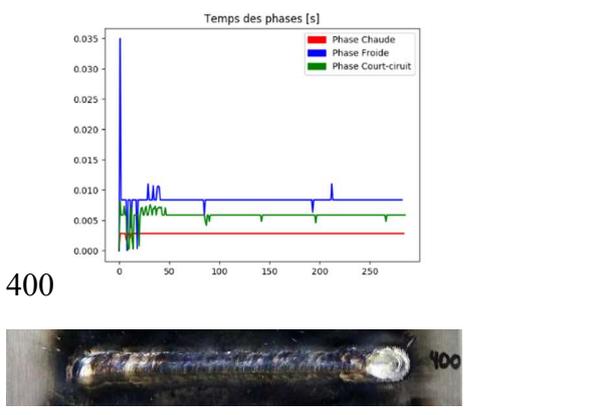
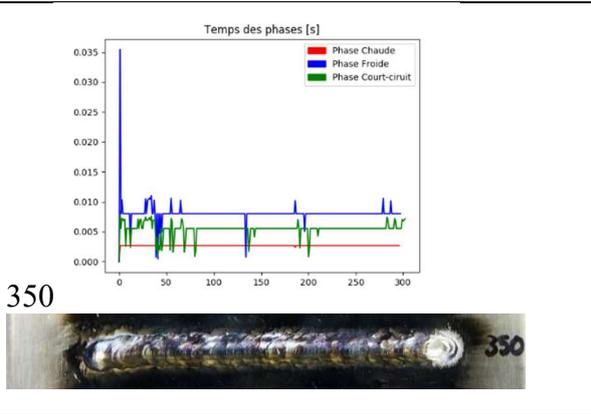
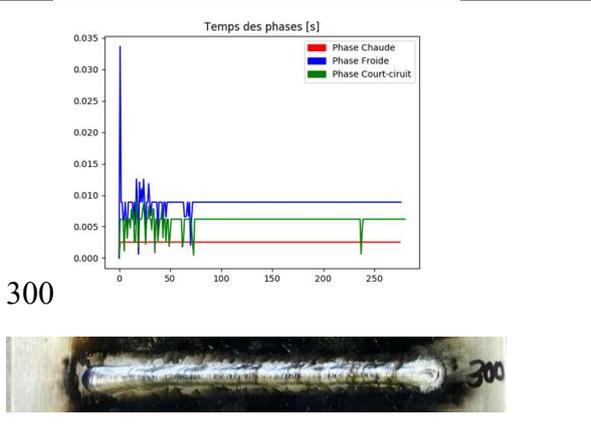
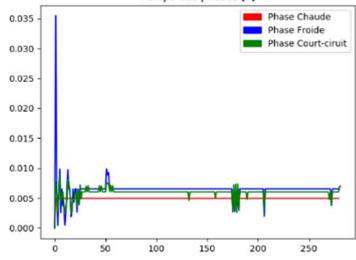
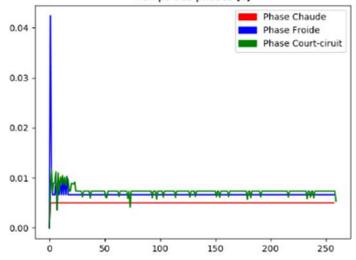
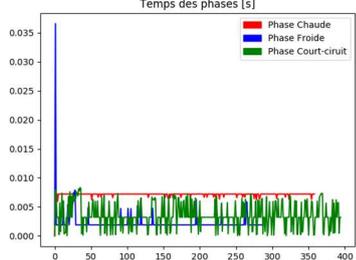
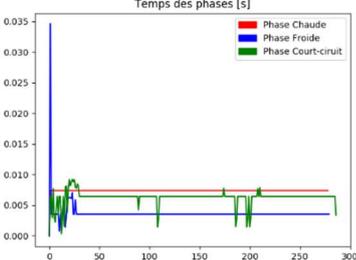
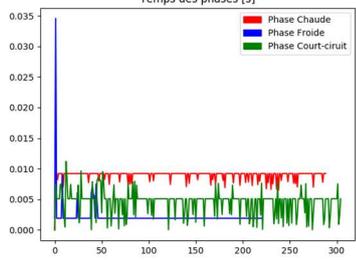
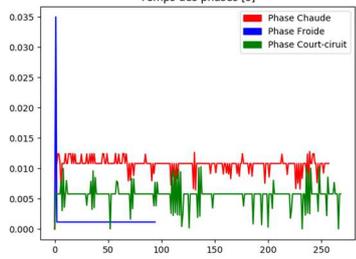
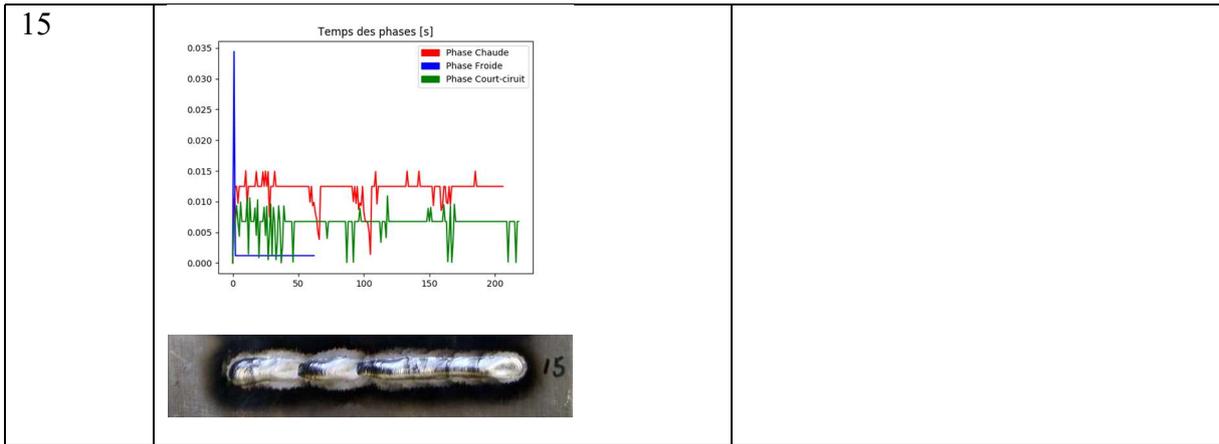


Tableau A3.2 Influence du paramètre t_{I_boost}

	P5	P6
0	 	
1	 	
2	 	
3.5	 	

		
5	<p>Temps des phases [s]</p>  	<p>Temps des phases [s]</p>  
7.5	<p>Temps des phases [s]</p>  	<p>Temps des phases [s]</p>  
10	<p>Temps des phases [s]</p>  	
12.5	<p>Temps des phases [s]</p>  	



<i>Tableau A3.3 Influence du paramètre $d_{boostdown}$</i>		
	P5	P6
0.1	<p style="text-align: center;">Temps des phases [s]</p> <p style="text-align: center;">0,1</p>	<p style="text-align: center;">Temps des phases [s]</p> <p style="text-align: center;">0,1</p>
3	<p style="text-align: center;">Temps des phases [s]</p> <p style="text-align: center;">3</p>	<p style="text-align: center;">Temps des phases [s]</p> <p style="text-align: center;">3</p>
10	<p style="text-align: center;">Temps des phases [s]</p> <p style="text-align: center;">10</p>	<p style="text-align: center;">Temps des phases [s]</p> <p style="text-align: center;">10</p>

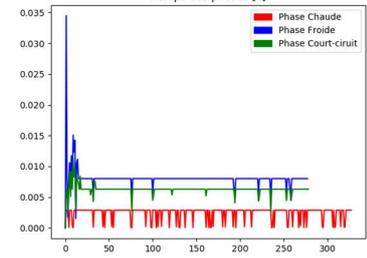
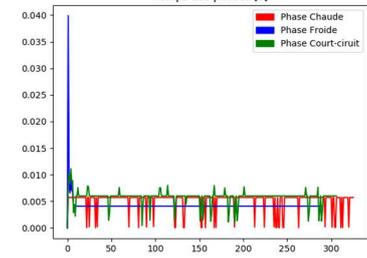
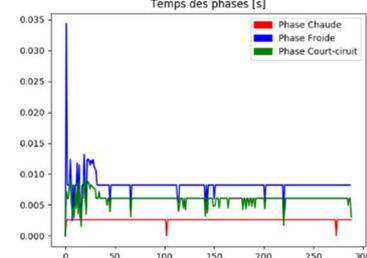
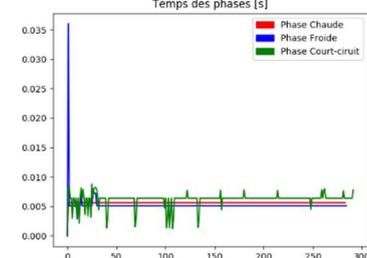
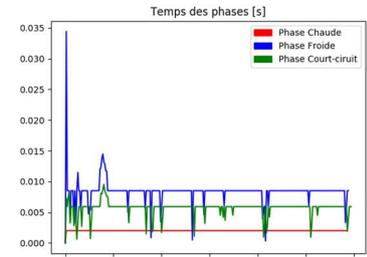
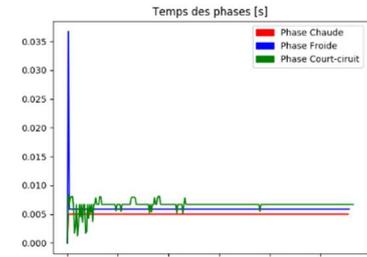
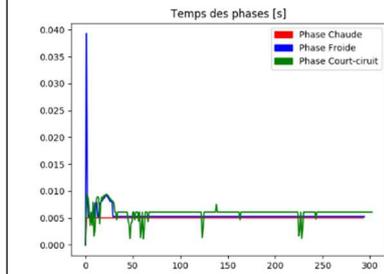
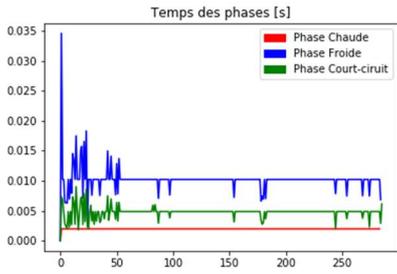
		
25	<p>Temps des phases [s]</p>  	<p>Temps des phases [s]</p>  
50	<p>Temps des phases [s]</p>  	<p>Temps des phases [s]</p>  
300	<p>Temps des phases [s]</p>  	<p>Temps des phases [s]</p>  

Tableau A3.4 Influence du paramètre I_{sc_wait}

	P5	P6
25	 	
40	 	
55	 	
70	 	

85



100

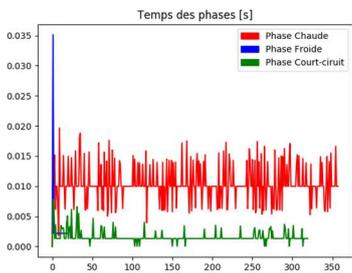
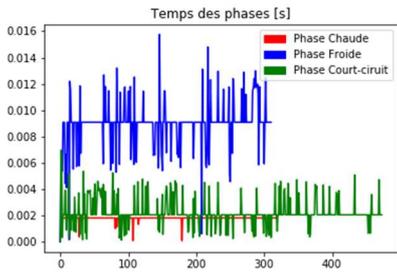
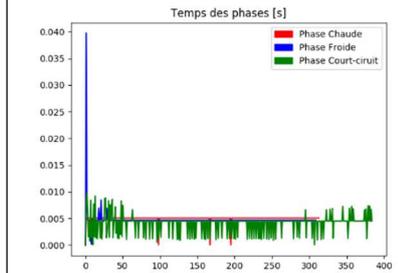
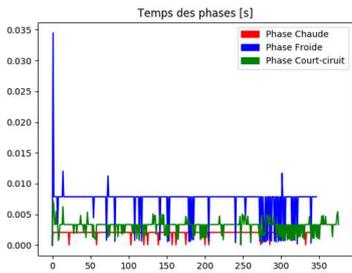
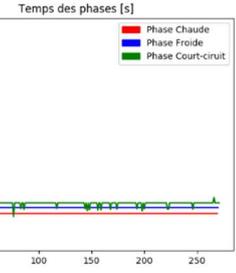
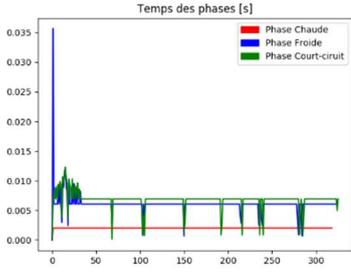


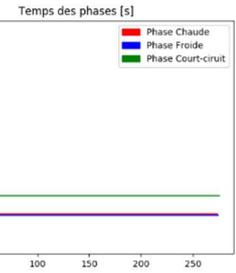
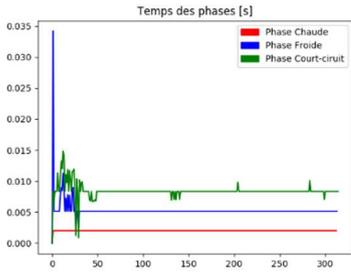
Tableau A3.5 Influence du paramètre Vd_{sc_wait}

	P5	P6
10	 	
15	 	
20	 	
25	 	

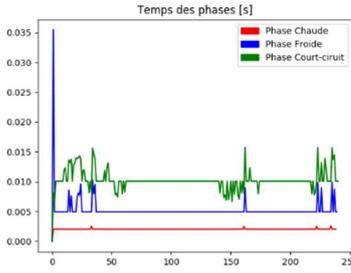
35



45



55



65

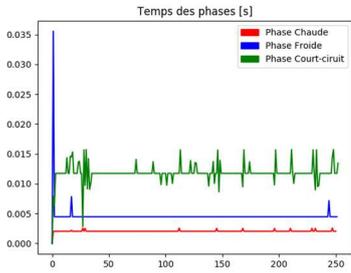
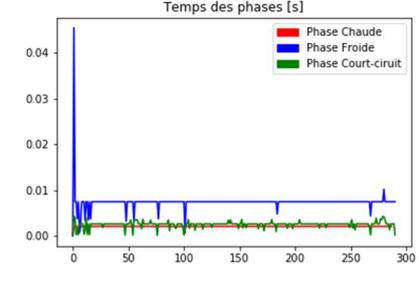
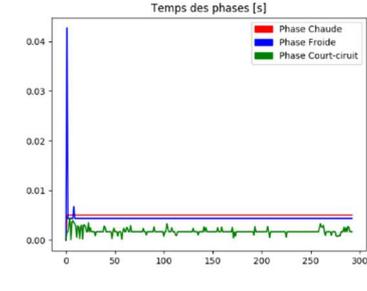
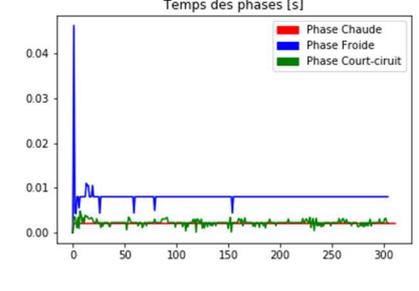
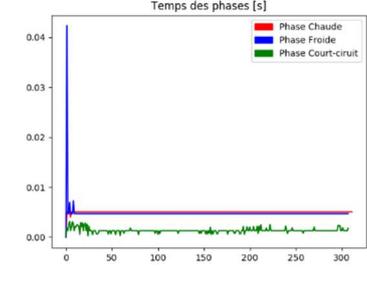


Tableau A3.6 Influence du paramètre I_{sc2}

	P5	P6
20	 	
30	 	
40	 	
55	 	

		
75	<p>Temps des phases [s]</p>  	<p>Temps des phases [s]</p>  
100	<p>Temps des phases [s]</p>  	<p>Temps des phases [s]</p>  

Références

- [1] H. Gerling, *Alrededor de las máquinas-herramienta*, 3^e éd. REVERTE, 2016.
- [2] M. P. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing. Materials, Processes and Systems*, 5^e éd. Wiley, 2012.
- [3] R. Noorani, *Rapid Prototyping: Principles and Applications*, 1^{re} éd. Wiley, 2005.
- [4] « Le grand dictionnaire terminologique ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.granddictionnaire.com/Resultat.aspx>. [Consulté le: 23-févr-2017].
- [5] P. Dubois, A. Aoussat, et R. Duchamp, *Prototypage rapide, généralités*. Techniques de l'ingénieur, 2000.
- [6] I. Gibson, D. W. Rosen, et B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*, 1^{re} éd. Boston, MA: Springer US, 2010.
- [7] V. Petrovic, J. Vicente Haro Gonzalez, O. Jorda Ferrando, J. Delgado Gordillo, J. Ramon Blasco Puchades, et L. Portoles Grinan, « Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies », *Int. J. Prod. Res.*, vol. 49, n° 4, p. 1061–1079, 2011.
- [8] G. B. Kannan et D. K. Rajendran, « A Review on Status of Research in Metal Additive Manufacturing », in *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*, D. I. Wimpenny, P. M. Pandey, et L. J. Kumar, Éd. Singapore: Springer Singapore, 2017, p. 95-100.
- [9] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, et H. Li, « Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 81, n° 1-4, p. 465-481, oct. 2015.
- [10] « 3D Printing: What's the difference between Selective Laser Sintering (SLS) and Selective Laser Melting (SLM)? - Quora ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.quora.com/3D-Printing-Whats-the-difference-between-Selective-Laser-Sintering-SLS-and-Selective-Laser-Melting-SLM>. [Consulté le: 24-févr-2017].
- [11] « 3D Systems ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.3dsystems.com/>. [Consulté le: 27-févr-2017].
- [12] T. Wholers et T. Gornet, « History of additive manufacturing », WOHLERS ASSOCIATES, INC., 2014.
- [13] « Concept Laser - Metal 3D printers for parts ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.concept-laser.de/en/home.html>. [Consulté le: 27-févr-2017].
- [14] « Metal Additive Manufacturing | Metal Powder Industries Federation ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.mpif.org/IntroPM/metal-am.asp>. [Consulté le: 18-sept-2017].
- [15] « 3D Printing Electronics Laser Additive Manufacturing Systems », *Optomec*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.optomec.com/>. [Consulté le: 28-juill-2017].
- [16] « DMD3D Technology ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.pomgroup.com/>. [Consulté le: 27-févr-2017].
- [17] « Laser additive manufacturing », *Mechatronic Vehicle Systems Lab*, 08-avr-2015. [En ligne]. Disponible sur: <https://uwaterloo.ca/mechatronic-vehicle-systems-lab/research/laser-additive-manufacturing>. [Consulté le: 14-sept-2017].
- [18] « Controlled Metal Build Up Process for Generation, Modification and Repair of Molds and Dies : MoldMaking Technology ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.moldmakingtechnology.com/columns/controlled-metal-build-up-process-for-generation-modification-and-repair-of-molds-and-dies>. [Consulté le: 27-févr-2017].

- [19] « Electron Beam Melting - EBM Process, Additive Manufacturing », *Arcam AB*. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/>. [Consulté le: 27-févr-2017].
- [20] « EBM-by-ARCAM ». [En ligne]. Disponible sur: <http://allabout3dprinting.com/wp-content/uploads/2014/02/EBM-by-ARCAM.jpg>. [Consulté le: 14-sept-2017].
- [21] S. Belakhowsky, *Théorie et pratique du soudage*. PYC-Edition, Desforges, 1973.
- [22] *Air Liquide Welding. Les procédés de soudage à l'arc : les soudages TIG, MIG et MAG*. SAF, 2002.
- [23] « Rapid Production of Large Aerospace Components(RAPOLAC) ». [En ligne]. Disponible sur: [http://www.2020-horizon.com/RAPOLAC-Rapid-Production-of-Large-Aerospace-Components%20\(RAPOLAC\)-s26465.html](http://www.2020-horizon.com/RAPOLAC-Rapid-Production-of-Large-Aerospace-Components%20(RAPOLAC)-s26465.html). [Consulté le: 27-juill-2017].
- [24] C. Arnesen, « Norsk Titanium », *Norsk Titanium*. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.norsktitanium.com/>. [Consulté le: 27-juill-2017].
- [25] P. M. Sequeira Almeida, « Process control and development in wire and arc additive manufacturing », PhD, Cranfield University, School of applied sciences, 2012.
- [26] R. Baker, « Method of Making Decorative Articles », US Patent 1533,300, avr-1925.
- [27] J. Ding, F. Martina, et S. W. Williams, « Production of large metallic components by additive manufacture - issues and achievements », *Conf. Pap.*, nov. 2015.
- [28] S. VACQUIÉ, « Arc électrique, traité Génie Electrique, Convertisseurs et machines électriques », *Tech. L'ingénieur*, vol. D4, n° D 2870, p. 1-27, 2005.
- [29] B. Le BOURGEOIS, *Soudage à l'arc-Tome 1 - Notions d'électricité à l'usage du soudage - Généralités sur le soudage électrique à l'arc*. Institut de soudure, 2002.
- [30] CAZES Roland, « Soudage à l'arc », *Tech. Ing. Assem. Matér. Par Soudage*, vol. base documentaire : TIB512DUO, n° ref. article : b7730, août 1995.
- [31] « Soudage TIG (Tungsten Inert Gas) ». [En ligne]. Disponible sur: <http://isgroupe.com/fr/metiers/centre-technique-rd/plateforme-assemblage/Pages/Soudage-TIG.aspx>. [Consulté le: 14-sept-2017].
- [32] « Le soudage plasma ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.ep-c.fr/services-industriel/le-soudage/137-le-soudage-plasma.html>. [Consulté le: 26-nov-2017].
- [33] J. CHAPUIS, « Une approche pour l'optimisation des opérations de soudage à l'arc. », PhD thesis, Université de Montpellier 2, 2011.
- [34] J. Norrish et F. Richardson, « Metal transfer mechanisms. », *Weld. Met. Fabr.*, vol. 56 (1988), p. 17-22, févr. 1988.
- [35] K.-A. Stenbacka et N. Persson, « Shielding gases for gas metal arc welding. », *Weld. J.*, vol. 68, p. 41-47, 1989.
- [36] « Chapter 4. Le soudage MIG et MAG », in *Les procédés de soudage à l'arc : les soudages TIG, MIG et MAG*, Air Liquide Welding, 2004, p. 45-83.
- [37] J. Chapuis, T. Opperbecke, et J. M. Fortain, « Compréhension et évaluation d'un poste de soudage mig-mag " pinch effect ". », Master's thesis, Polytech'Montpellier-Air Liquide Welding (CTAS), 2007.
- [38] A. Lesnewich, « Control of melting rate and metal transfer in gas-shielded metal-arc welding, part 2 – control of metal transfer. », *Weld. J.*, 1958.
- [39] A. TUDURI, « Etude du transfert veine liquide tournante à faible énergie en soudage mag. », Master's thesis, Polytech'Montpellier (FQSC), 2010.
- [40] Y. S. Kim et T. W. Eagar, « Metal transfer in pulsed gas metal arc welding. », *Weld. J.*, p. 279-287, juill. 1993.
- [41] J. Chapuis, E. Romero, F. Soulié, et C. Bordreuil, « Transient behaviour of deposition of liquid metal droplets on a solid substrate », *Heat Mass Transf.*, vol. 52, p. 2283-2292, oct. 2016.

- [42] T. Rosado, P. Almeida, I. Pires, R. Miranda, et L. Quintino, « Innovations in arc welding. », présenté à 2^o Congresso de Engenharia de Moçambique, 2008.
- [43] « Fronius International - The new revolution in digital GMA welding ». [En ligne]. Disponible sur: <http://preview.fronius.com/en>. [Consulté le: 27-juill-2017].
- [44] « Fronius International - Cold Metal Tansfer. » [En ligne]. Disponible sur: <http://preview.fronius.com/en>. [Consulté le: 27-juill-2017].
- [45] L. Wang, C. Song, F. Sun, et Q. Zhai, « Microstructure and mechanical properties of 12 wt.% cr ferritic stainless steel with ti and nb dual stabilization. », *Mater. Des.*, vol. 30, p. 49-56, 2008.
- [46] Z. W. Nkosi, M. Sephton, et J. H. Potgieter, « Corrosion of hot end automotive exhaust components. », présenté à 8th International Corrosion Conference, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2006.
- [47] « Lincoln Electric - Waveform control technology: Surface Tension Transfer. » [En ligne]. Disponible sur: <http://www.lincolnelectric.com/>. [Consulté le: 27-juill-2017].
- [48] « Fronius International - RCU 5000i manual ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect%20Welding/Operating%20Instructions/42%2C0426%2C0021%2CFR.pdf>. [Consulté le: 27-juill-2017].
- [49] G. MURRY, « Soudage et soudabilité métallurgique des métaux », *Tech. Ing. Mise En Forme Métaux Asp. Mécaniques Therm.*, vol. base documentaire : TIB348DUO., n^o ref. article : m715, 2017.
- [50] « Soudage à l'arc de l'aluminium et des ses alliages - france soudage ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.france-soudage.fr/faq/soudage_arc.aspx. [Consulté le: 28-févr-2017].
- [51] *Smithells Metals Reference Book*, 7th éd. E.A.Brandes & G.B. Brook (Butterworth & Heineman), 1992.
- [52] H. Wang, W. Jiang, J. Ouyang, et R. Kovacevic, « Rapid prototyping of 4043 Al-alloy parts by VP-GTAW », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 148, n^o 1, p. 93-102, mai 2004.
- [53] P. M. Dickens, M. S. Pridham, R. C. Cobb, I. Gibson, et G. Dixon, « Rapid prototyping using 3-D welding », in *Proc. Solid Freeform Fabrication Symp*, 1992, p. 280–290.
- [54] P. Kazanas, P. Deherkar, P. Almeida, H. Lockett, et S. Williams, « Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture », *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 226, n^o 6, p. 1042-1051, juin 2012.
- [55] R. Kovacevic et H. Beardsley, « Process Control of 3D Welding as a Droplet-Based Rapid Prototyping Technique », in *Proc. of the SFF Symposium, Univ. of Texas at Austin, Austin TX*, 1998, p. 57–64.
- [56] S. F. Jacono, « Quality of gas metal arc welds for rapid prototyping and wear replacement », Master of Engineering, University of Wollongong, 1999.
- [57] Yu Ming Zhang, Pengjiu Li, Yiwei Chen, et Alan T. Male, « Automated system for welding-based rapid prototyping », *Mechatronics*, vol. 12, p. 37-53, 2002.
- [58] M. Siminski, « Weld path optimisation for rapid prototyping and wear replacement by robotic gas metal arc welding », 2003.
- [59] B. Cong, J. Ding, et S. Williams, « Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 76, n^o 9-12, p. 1593-1606, févr. 2015.
- [60] J. Gu, B. Cong, J. Ding, S. W. Williams, et Y. Zhai, « Wire+ arc additive manufacturing of aluminium », in *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, 2014, p. 451–58.
- [61] B. Baufeld et O. van der Biest, « Mechanical properties of Ti-6Al-4V specimens produced by shaped metal deposition », *Sci. Technol. Adv. Mater.*, vol. 10, n^o 1, p. 015008, janv. 2009.

- [62] B. Baufeld, O. V. der Biest, et R. Gault, « Additive manufacturing of Ti–6Al–4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties », *Mater. Des.*, vol. 31, p. S106-S111, juin 2010.
- [63] B. Baufeld, E. Brandl, et O. van der Biest, « Wire based additive layer manufacturing: Comparison of microstructure and mechanical properties of Ti–6Al–4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, n° 6, p. 1146-1158, juin 2011.
- [64] P. S. Almeida et 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*.
- [65] A. S. Haselhuhn *et al.*, « Substrate Release Mechanisms for Gas Metal Arc Weld 3D Aluminum Metal Printing », *3D Print. Addit. Manuf.*, vol. 1, n° 4, p. 204-209, déc. 2014.
- [66] J. Ding, P. Colegrove, J. Mehnen, S. Ganguly, P.M. Sequeira Almeida, F. Wangb, S. Williams, Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts, *Computational Materials Science*, Vol. 50, pp. 3315–3322 (2011).
- [67] Z. Jandric, M. Labudovic, et R. Kovacevic, « Effect of heat sink on microstructure of three-dimensional parts built by welding-based deposition », *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, n° 7-8, p. 785-796, juin 2004.
- [68] V. D. Fachinotti, A. Cardona, B. Baufeld, et O. Van der Biest, « Finite-element modelling of heat transfer in shaped metal deposition and experimental validation », *Acta Mater.*, vol. 60, n° 19, p. 6621-6630, nov. 2012.
- [69] D. Clark, M. R. Bache, et M. T. Whittaker, « Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 203, n° 1-3, p. 439-448, juill. 2008.
- [70] F. Montevecchi, G. Venturini, A. Scippa, et G. Campatelli, « Finite Element Modelling of Wire-arc-additive-manufacturing Process », *Procedia CIRP*, vol. 55, p. 109-114, 2016.
- [71] Pedro Miguel Sequeira Almeida, « Process Control and Development in Wire and Arc Additive Manufacturing », PhD Thesis, Cranfield University, SCHOOL OF APPLIED SCIENCES, 2012.
- [72] C. Doumanidis et Y.-M. Kwak, « Multivariable adaptive control of the bead profile geometry in gas metal arc welding with thermal scanning », *Int. J. Press. Vessels Pip.*, vol. 79, n° 4, p. 251–262, 2002.
- [73] J. Xiong, G. Zhang, Z. Qiu, et Y. Li, « Vision-sensing and bead width control of a single-bead multi-layer part: material and energy savings in GMAW-based rapid manufacturing », *J. Clean. Prod.*, vol. 41, p. 82-88, févr. 2013.
- [74] J. Xiong et G. Zhang, « Online measurement of bead geometry in GMAW-based additive manufacturing using passive vision », *Meas. Sci. Technol.*, vol. 24, n° 11, p. 115103, nov. 2013.
- [75] J. Xiong et G. Zhang, « Adaptive control of deposited height in GMAW-based layer additive manufacturing », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, n° 4, p. 962-968, avr. 2014.
- [76] J. Xiong, Z. Yin, et W. Zhang, « Closed-loop control of variable layer width for thin-walled parts in wire and arc additive manufacturing », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 233, p. 100-106, juill. 2016.
- [77] Y.-M. Kwak et C. C. Doumanidis, « Geometry regulation of material deposition in near-net shape manufacturing by thermally scanned welding », *J. Manuf. Process.*, vol. 4, n° 1, p. 28–41, 2002.

- [78] Y. Cao, S. Zhu, X. Liang, et 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, n° 3, p. 641-645, juin 2011.
- [79] J. Xiong, G. Zhang, H. Gao, et 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, n° 2, p. 417-423, avr. 2013.
- [80] F. Martina, S. W. Williams, et P. Colegrove, « Design of an empirical process model and algorithm for the tungsten inert gas wire+ arc additive manufacture of ti-6al-4v components », janvier 2013.
- [81] J. Mehnert, J. Ding, H. Lockett, et P. Kazanas, « Design study for wire and arc additive manufacture », *Int. J. Prod. Dev.*, vol. 19, n° 1, p. 2–20, 2014.
- [82] A. F. Ribeiro et J. Norrish, « Rapid prototyping using robot welding: slicing system developmens », 1996.
- [83] D. Ding, Z. S. Pan, D. Cuiuri, et H. Li, « A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 73, n° 1-4, p. 173–183, 2014.
- [84] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, et H. Li, « A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM) », *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, vol. 31, p. 101-110, févr. 2015.
- [85] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, et H. Li, « A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures », *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, vol. 34, p. 8-19, août 2015.
- [86] G. Venturini, F. Montevecchi, A. Scippa, et G. Campatelli, « Optimization of WAAM Deposition Patterns for T-crossing Features », *Procedia CIRP*, vol. 55, p. 95-100, 2016.
- [87] « RepRap Options - RepRapWiki ». [En ligne]. Disponible sur: http://reprap.org/wiki/RepRap_Options. [Consulté le: 05-sept-2017].
- [88] Y. M. Zhang, P. Li, Y. Chen, et A. T. Male, « Automated system for welding-based rapid prototyping », *Mechatron. - Pergamon*, vol. 12, p. 37-53, 2002
- [89] G. C. Anzalone, Chenlong 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.
- [90] A. S. Haselhuhn, “Design for Low-Cost Gas Metal Arc Weld-Based Aluminum 3-D Printing,” 2016.
- [91] P. Kazanas, P. Deherkar, P. Almeida, H. Lockett, et S. Williams, « Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture », *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 226, n° 6, p. 1042-1051, juin 2012.
- [92] A. F. Ribeiro et J. Norrish, « Rapid prototyping using robot welding: slicing system developmens », 1996.
- [93] B. Evans, *Practical 3D printers: [the science and art of 3D printing ; calibrate, modify, and create amazing things with your 3D printer]*. New York, NY: Apress, Springer, 2012.
- [94] W. Bolton, *Mecatrónica: Sistemas de control electrónico en ingeniería mecánica y eléctrica*, 2a. Alfaomega, 2001.
- [95] « RAMPS 1.4 - RepRapWiki ». [En ligne]. Disponible sur: http://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4. [Consulté le: 12-sept-2017].
- [96] MarlinFirmware, « Home », *Marlin 3D Printer Firmware*. [En ligne]. Disponible sur: <http://marlinfw.org/>. [Consulté le: 12-sept-2017].
- [97] « Repetier Software ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.repetier.com/>. [Consulté le: 12-sept-2017].
- [98] « Slic3r - G-code generator for 3D printers ». [En ligne]. Disponible sur: <http://slic3r.org/>. [Consulté le: 12-sept-2017].
- [99] « Breuckmann-OptoTOP-HE-Case-Study.pdf ». .

- [100] « Metrology Equipment». [En ligne]. Disponible sur: <http://metrology.survice.com/metrology-equipment>. [Consulté le: 13-sept-2017].
- [101] « Spray pour scan 3D », *Makershop*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.makershop.fr/scanners-3d/56-spray-pour-scan-3d.html>. [Consulté le: 18-sept-2017].
- [102] « 3D Scan Spray Video : 3DScanSpray.com ». [En ligne]. Disponible sur: <https://3dscanspray.com/3d-scan-spray-video/>. [Consulté le: 18-sept-2017].
- [103] « Optocat - Introduction », *Portail d'information de l'école centrale de paris, CAO mécanique*. [En ligne]. Disponible sur: <http://cao.etudes.ecp.fr/optocat/index.html>. [Consulté le: 13-sept-2017].
- [104] « Logiciel GEOMAGIC STUDIO ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.boutique-3d.com/Logiciel-GEOMAGIC-Studio-version-12-Node>. [Consulté le: 13-sept-2017].
- [105] « Logiciel GEOMAGIC QUALIFY ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.boutique-3d.com/Logiciel-GEOMAGIC-Qualify-version-12-Node>. [Consulté le: 13-sept-2017].
- [106] « VTK - The Visualization Toolkit ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.vtk.org/>. [Consulté le: 04-sept-2017].
- [107] F. Tavakoli, S. H. Davis, et H. P. Kavehpour, « Spreading and arrest of a molten liquid on cold substrates », *Langmuir*, vol. 30, n° 10151, 2014.
- [108] R. De Ruitter, P. Colinet, P. Brunet, J. H. Snoeijer, et H. Gelderblom, « Contact line arrest in solidifying spreading drops », *Phys. Rev. FLUIDS*, vol. 2, n° 043602, 2017.
- [109] V. Pavelic, R. Tanbakuchi, O. A. Uyehara, and P. S. Myers. Experimental and Computed Temperature Histories in Gas Tungsten Arc Welding in Thin Plates, *Welding Journal Research Supplement*, vol. 48, pp. 295s-305s, (1969)
- [110] J. Goldak, A. Chakraverti, M. Bibby. A new finite element model for welding heat sources, *Metallurgical Transactions B*, vol. 15B, pp299-305 (1984)
- [111] N. T. Nguyen, A. Ohta K. Matsuoka, N. Suzuki, Y. Maeda. Analytical Solutions for Transient Temperature of Semi-Infinite Body Subjected to 3-D Moving Heat Sources, *Welding Research Supplement* (1999).
- [112] Juan J. Valencia, Peter N. Quedsted. *Thermophysical Properties*, ASM Handbook, Vol. 15, pp. 468-481 (2008).
- [113] A. S. Hall, A. R. Holowenco, and H. G. Laughlin, *Diseño de Maquinas*. McGraw-Hill, 1987.
- [114] R. L. Norton, *Diseño de maquinas: Un enfoque integrado*, 4ta ed. Pearson Educación, 2011.
- [115] “Online Materials Information Resource - MatWeb.” [Online]. Available: <http://www.matweb.com/>. [Accessed: 12-Sep-2017].
- [116] “igus® Conception du système et calcul de durée de vie drylin®.” [Online]. Available: <http://www.igus.fr/Apps/drylinexpert/default.aspx>. [Accessed: 27-Aug-2017].
- [117] “igus® drylin®- vis hélicoïdales et écrous.” [Online]. Available: http://www.igus.fr/wpck/7001/DryLin_Steilgewindemuttern. [Accessed: 12-Sep-2017].
- [118] “igus® Entraînements par vis trapézoïdale ou hélicoïdale.” [Online]. Available: http://www.igus.fr/wpck/9111/Screwdrives_productfinder. [Accessed: 27-Aug-2017].
- [119] “igus® Vis filetées trapézoïdales drylin® - aperçu.” [Online]. Available: http://www.igus.fr/wpck/3810/DryLin_Trapezgewindespindel. [Accessed: 12-Sep-2017].
- [120] “igus® Aperçu des moteurs et accessoires drylin® E.” [Online]. Available: http://www.igus.fr/wpck/7357/DryLin_E_Overview#Section_3. [Accessed: 27-Aug-2017].

Liste de Figures

Figure 1.1 Modèle CAO de la pièce à réaliser	10
Figure 1.2 Représentation de la pièce au format STL.....	11
Figure 1.3 : Découpe du fichier STL en tranches et création du fichier de commande en langage G-code.....	11
Figure 1.4 : Classification générale des procédés de fabrication additive [3,5,6].....	12
Figure 1.5 : Classification des procédés de fabrication additive de pièces métalliques selon la forme de la matière utilisée.....	14
Figure 1.6 : Processus de frittage sélectif par laser (SLS) [14].	16
Figure 1.7: Principe de la fabrication additive par Laser Engineering Net Shaping (LENS) [17].....	16
Figure 1.8 : Principe de la technologie Electron Beam Melting (Arcam) [20]	17
Figure 1.9 : Schéma des différentes zones de l'arc électrique, et répartition des tensions [29]	20
Figure 1.10 : Caractéristique d'arc, à longueur d'arc fixée (U à l'arc) et contribution des différentes zones de l'arc à la tension totale [29]	20
Figure 1.11 : Relation entre tension et hauteur d'arc, à intensité constante [29].....	21
Figure 1.12 : Principe du soudage TIG [31]	21
Figure 1.13: Principe du soudage plasma [32]	22
Figure 1.14 : Principe du soudage MIG/MAG [33]	23
Figure 1.15 : Représentation des transferts en soudage MIG/MAG en fonction de l'énergie pour un fil-électrode en acier de diamètre 1,2 mm [36].....	23
Figure 1.16 : Transfert par court-circuit : diagramme de tension et images associées pour une période [37] ...	24
Figure 1.17 : Transfert globulaire : diagramme intensité/tension et image associée [37].....	25
Figure 1.18 : Transfert par pulvérisation axiale : diagramme intensité/tension et image associée [37]	25
Figure 1.19 : Visualisation du transfert par veine liquide tournante [39]	26
Figure 1.20 : Transfert pulsé : diagramme d'intensité et images associées [41]	26
Figure 1.21 : Principe du transfert par court-circuit contrôlé STT (Surface Tension Transfer) [47]	27
Figure 1.22 : (a) Principe de dévidage alterné du fil d'apport, et (b) formes d'ondes du courant I et de la tension U , et vitesse de dévidage du fil V_D lors d'un cycle de transfert de goutte avec le procédé CMT [48]	28
Figure 1.23 : Fabrication par WAAM d'une pièce en aluminium en utilisant le procédé de soudage TIG[52]...	30
Figure 1.24: Influence des paramètres du procédé MIG sur la régularité des couches déposées [54].....	31
Figure 1.25 : (a) Installation WAAM composée d'un poste de soudage MIG et d'un robot de soudage, (b) mur fabriqué en régime de transfert globulaire, et (c) mur fabriqué en régime de transfert par court-circuit [56]...	31
Figure 1.26 : (a) Défauts de raccordement de pièces de géométrie fermée, (b) défauts au démarrage et à l'arrêt du cordon, et optimisation des trajectoires de construction en vue de leur réduction [57].....	32
Figure 1.27 : Calcul de la température dans les cordons [68].....	33
Figure 1.28 : Système de refroidissement par eau du plateau de construction permettant de diminuer les temps de refroidissement [71]	34
Figure 1.29 : Pièces fabriquées en MIG à l'aide d'un robot de soudage [53]	34
Figure 1.30 : Contrôle des températures et des géométries des dépôts en cours de fabrication [77]	35
Figure 1.31 : Influence de la séquence de construction sur la géométrie des pièces fabriquées [58].....	36
Figure 1.32 : Optimisation des trajectoires de dépôt en vue de minimiser les défauts géométriques [81]	37
Figure 2.1: Principales méthodes de construction de couches en FA [6]	39
Figure 2.2 : Modèle CAO du banc d'essai conçu	45
Figure 2.3 : Modélisation du mécanisme de mouvement dans le plan XY.....	46
Figure 2.4: Photo du banc d'essai assemblé.....	47
Figure 2.5: Prévisualisation d'un objet découpé avec les caractéristiques géométriques de fabrication	49
Figure 2.6: Représentation schématique du cycle de transfert CMT [16].....	51

Figure 2.7 : Evolution au cours du cycle de transfert CMT de la vitesse du fil, de l'intensité et de la tension, et représentation des paramètres (1) à (9) de soudage décrits dans le tableau 2.5.....	53
Figure 2.8 : Schéma de câblage de la carte DAQ pour la mesure de tension	54
Figure 2.9 : Schéma de câblage de la carte DAQ pour la mesure de courant.....	54
Figure 2.10 : Visualisation du courant et de la tension au cours du temps, pour un cordon donné.....	55
Figure 2.11 : Photo du scanner 3D BREUCKMANN OPTO TOP-HE utilisé pour la numérisation des pièces ..	56
Figure 2.12 : Préparation de la pièce par pulvérisation d'un spray de couleur blanche.....	57
Figure 2.13 : Réparation des fichier STL a) avant réparation, on voit la présence de trous, b) après réparation	57
Figure 2.14 : Caractéristiques géométriques à mesurer a) sur un mono- cordon b) sur l'empilement de plusieurs cordons (multi-cordons).....	58
Figure 2.15 : Création de la géométrie de référence par élimination des cordons sur le fichier STL scanné (a), puis « réparation » pour boucher les zones de trous laissées et obtenir un fichier représentatif de la géométrie de la tôle substrat (b).....	59
Figure 2.16 : Sélection de la zone retenue pour la caractérisation géométrique des cordons	59
Figure 2.17 : Résultat de la comparaison 3D entre la référence et la pièce scannée sur l'aire choisie, qui montre l'écart selon l'axe Z (hauteur)	59
Figure 2.18 : Ecarts selon l'axe Z entre la pièce scannée et la référence, dans la coupe longitudinale du cordon sélectionnée.....	60
Figure 2.19 : Sélection des sections transversales pour la mesure des largeurs et angles de raccordement des cordons.....	60
Figure 2.20 : Mesure des largeurs et angles de contact des cordons dans l'une des sections transversales sélectionnées	61
Figure 2.21 : Choix de la surface de référence pour la mesure de largeur des murs.....	61
Figure 2.22 : Largeur de mur aux différents points obtenue par mesure des écarts selon l'axe Y entre les deux faces du mur.....	61
Figure 2.23 : Sélection d'un cordon à partir du fichier STL et calcul automatique de son volume par le logiciel Geomagic	62
Figure 2.24 : Géométrie de l'éprouvette utilisée pour la validation de la méthode de calcul de volume par le logiciel Geomagic, et image numérisée de l'éprouvette	62
Figure 2.25 : Représentation du contour du cordon dans une coupe transversale, et repérage du point (en rouge) donnant la hauteur du cordon.....	64
Figure 2.26 : 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.....	64
Figure 2.27 : Description de la méthode de mesure de la largeur des cordons aux différents points de la coupe longitudinale	65
Figure 2.28 : Principe de la technique d'ombroscopie appliquée à l'observation du transfert en soudage à l'arc	66
Figure 3.1 Distance tube-contact / pièce et longueur de fil libre en début d'essai.....	68
Figure 3.2 Aspect général des dépôts pour différents points de fonctionnement et différentes vitesses (cordons de 70 mm)	71
Figure 3.3 Aspect des cordons déposés avec le point de fonctionnement 5 en « préchauffant » la tôle grâce à un maintien statique de la torche pendant 2 secondes en début d'essai	72
Figure 3.4 Aspect du cordon lorsque la vitesse d'avance est trop faible, produisant un affaissement en face envers de la tôle support (point de fonctionnement 5), (a) face endroit, (b) face envers.....	72
Figure 3.5 Caractéristiques géométriques mesurées sur les cordons : hauteur H, largeur L et angle de contact A	73
Figure 3.6 Largeur moyenne des cordons pour différentes vitesses de déplacement et différents points de fonctionnement.....	73
Figure 3.7 Hauteur moyenne des cordons pour différentes vitesses de déplacement et différents points de fonctionnement.....	74

Figure 3.8 Angles de contact des cordons pour différentes vitesses de déplacement et différents points de fonctionnement.....	74
Figure 3.9 Macrographies des coupes transversales des cordons obtenus avec les points de fonctionnement 5, 6 et 7.....	77
Figure 3.10 Macrographies des coupes transversales des cordons obtenus avec les points de fonctionnement 8, 9 et 10.....	78
Figure 3.11 Evolution du volume de métal déposé en fonction de la vitesse d'avance et du point de fonctionnement.....	79
Figure 3.12 Evolution du taux de dépôt en fonction de la vitesse d'avance et du point de fonctionnement.....	79
Figure 3.13 Représentation schématique de l'évolution des paramètres Vitesse de fil (V_d), intensité (I) et tension (U) au cours du cycle CMT.....	80
Figure 3.14 Définition des valeurs seuils retenues sur les signaux de courant et de tension filtrés pour séparer les trois phases du cycle CMT.....	81
Figure 3.15 Formes d'ondes du courant et de la tension pour les points de fonctionnement P5 (a), P6 (b) et P7 (c).....	83
Figure 3.16: Représentation schématique de l'extrémité de la torche montrant le tube contact, la longueur de fil libre et l'arc électrique.....	88
Figure 3.17 Evolution de la puissance moyenne des phases de court-circuit en fonction de la distance tube contact – substrat.....	88
Figure 3.18 Evolution de la puissance moyenne du cycle et de la puissance moyenne des phases d'arc froid en fonction de la distance tube contact - substrat.....	89
Figure 3.19 Evolution de la puissance moyenne des phases d'arc chaud en fonction de la distance tube contact - substrat.....	89
Figure 3.20 Evolution de la durée moyenne des différentes phases en fonction de la distance tube contact - substrat.....	90
Figure 3.21 Evolution du volume et de la hauteur et largeur moyennes des cordons en fonction de la distance tube contact – substrat.....	90
Figure 4.1 Retard de dépôt des cordons entraînant un écart entre la géométrie attendue et la géométrie réelle	93
Figure 4.2 Manque de matière en fin de cordon.....	94
Figure 4.3 Accumulation de matière en début de cordon.....	94
Figure 4.4 Cycle d'amorçage par défaut du procédé CMT.....	95
Figure 4.5 Images extraites des vidéos obtenues par caméra rapide montrant l'évolution de la forme de la macro-goutte lors du dépôt des premières gouttelettes de métal liquide, (a) 1 ^{ière} goutte, (b) 5 ^{ème} goutte, (c) 9 ^{ème} goutte, (d) 10 ^{ème} goutte, (e) 15 ^{ème} goutte.....	95
Figure 4.6 Géométries simplifiées de macro-goutte, (a) pour un angle de mouillage inférieur à 90°, et (b) pour un angle de mouillage supérieur à 90°.....	96
Figure 4.7 Migration de la goutte de liquide déposée à l'avant vers l'arrière de la macro-goutte venant amplifier le défaut en début de cordon.....	97
Figure 4.8 Formation d'un cordon de hauteur régulière une fois l'arrière de la macro-goutte solidifié (dépôt de la quarantième goutte).....	97
Figure 4.9 Evolution des signaux électriques durant la phase d'amorçage du procédé CMT ($I_{\text{ignition}} = 200 \text{ A}$, $t_{\text{ignition}} = 100 \text{ ms}$).....	98
Figure 4.10 Profils des gouttes formées lors du début (à gauche) et de la fin (à droite) du premier court-circuit, pour différents paramètres d'amorçage.....	99
Figure 4.11 Evolution du profil des macro-gouttes au court des premiers court-circuit, (a) 200A, 50 ms, (b) 200A, 100 ms.....	100
Figure 4.12 Projection de goutte de métal en fusion durant la phase d'amorçage ($I_{\text{ignition}} = 200 \text{ A}$, $t_{\text{ignition}} = 100 \text{ ms}$).....	100
Figure 4.13 Evolution des signaux électriques durant la phase d'amorçage avec l'option « hotstart » ($t_{\text{hotstart}} = 200 \text{ ms}$).....	101

Figure 4.14 Profil de gouttes formées juste avant le premier court-circuit, pour différentes valeurs de paramètre hotstart	101
Figure 4.15 Profil de la macro-goutte formée après quelques dizaines de court-circuit pour différentes valeurs du paramètre t_hotstart.....	102
Figure 4.16 Evolution de la géométrie du début de cordon en fonction de la durée de la phase d'amorçage avec l'option hotstart.....	103
Figure 4.17 : Evolution du courant maximal (durant les phases d'arc chaud) lors des phases d'amorçage et d'arrêt avec l'option « 2 temps spécial »	103
Figure 4.18 Forme d'onde du courant et de la tension durant la phase de démarrage de cordon avec l'option « 2 temps spécial » (Is réglé à 150%)	104
Figure 4.19 Défaut formé lorsque l'intensité de pic durant la phase « 2 temps spécial » est trop faible (75A). 104	
Figure 4.20 Aspect des cordons obtenus avec l'option 2 temps spécial	104
Figure 4.21 Forme d'onde du courant et de la tension durant la phase de démarrage de cordon avec le mode « advanced », (a) sans Hotstart, (b) avec Hotstart	105
Figure 4.22 Aspect des cordons obtenus avec le mode CMT Advanced	105
Figure 4.23 Défaut de humping observé pour de fortes énergies et de grandes vitesses de déplacement.....	106
Figure 4.24 Aperçu des 8 paramètres caractérisant le cycle de soudage en CMT.....	106
Figure 4.25 Effet de la variation des 8 paramètres caractérisant le cycle CMT sur l'aspect des cordons obtenus.	107
Figure 4.26 Evolution des formes d'onde de courant et de tension avec la modification du paramètre d_boostup (en A/ms).....	108
Figure 4.27 Evolution de la durée des phases du cycle CMT en fonction de la valeur du paramètre d_boostup	108
Figure 4.28 Evolution de l'énergie générée par phase du cycle CMT en fonction de la valeur du paramètre d_boostup.....	109
Figure 4.29 Evolution du taux de dépôt, du poids moyen des gouttes déposées et de l'énergie moyenne en fonction de la valeur du paramètre d_boostup	109
Figure 4.30 Evolution des caractéristiques géométriques des cordons en fonction de la valeur du paramètre d_boostup.....	110
Figure 4.31 Evolution des formes d'onde de courant et de tension avec la modification du paramètre tau_boostup.....	110
Figure 4.32 Evolution de la durée des phases du cycle CMT en fonction de la valeur du paramètre tau_boostup	111
Figure 4.33 Evolution de l'énergie générée par phase du cycle CMT en fonction de la valeur du paramètre tau_boostup.....	111
Figure 4.34 Evolution du taux de dépôt, du poids moyen des gouttes déposées et de l'énergie moyenne en fonction de la valeur du paramètre tau_boostup	112
Figure 4.35 Evolution des caractéristiques géométriques des cordons en fonction de la valeur du paramètre tau_boostup.....	112
Figure 4.36 Evolution des formes d'onde de courant et de tension avec la modification du paramètre I_boost 113	
Figure 4.37 Evolution de la durée des phases du cycle CMT en fonction de la valeur du paramètre I_boost (point de fonctionnement 5).....	113
Figure 4.38 Evolution de l'énergie générée par phase du cycle CMT en fonction de la valeur du paramètre I_boost (point de fonctionnement 5).....	114
Figure 4.39 Evolution du taux de dépôt, du poids moyen des gouttes déposées et de l'énergie moyenne en fonction de la valeur du paramètre I_boost (point de fonctionnement 5).....	114
Figure 4.40 Evolution des caractéristiques géométriques des cordons en fonction de la valeur du paramètre I_boost.....	115
Figure 4.41 Evolution des formes d'onde de courant et de tension avec la modification du paramètre t_I_boost (en ms).....	115
Figure 4.42 Evolution de la durée des phases du cycle CMT en fonction de la valeur du paramètre t_I_boost 116	

<i>Figure 4.43</i> Instabilité du transfert observable par des chutes de tension correspondant au détachement de gouttelettes entre les courts-circuits, lorsque la durée t_{I_boost} est trop élevée.....	116
<i>Figure 4.44</i> Evolution de l'énergie générée par phase du cycle CMT en fonction de la valeur du paramètre t_{I_boost} (point de fonctionnement 5)	117
<i>Figure 4.45</i> Evolution du taux de dépôt, du poids moyen des gouttes déposées et de l'énergie moyenne en fonction de la valeur du paramètre t_{I_boost} (point de fonctionnement 5).....	117
<i>Figure 4.46</i> Evolution des caractéristiques géométriques des cordons en fonction de la valeur du paramètre t_{I_boost}	118
<i>Figure 4.47</i> Evolution des formes d'onde de courant et de tension avec la modification du paramètre $d_{boostdown}$	118
<i>Figure 4.48</i> Evolution des caractéristiques géométriques des cordons en fonction de la valeur du paramètre $d_{boostdown}$	119
<i>Figure 4.49</i> Evolution des formes d'onde de courant et de tension avec la modification du paramètre I_{sc_wait}	119
<i>Figure 4.50</i> Evolution de l'énergie générée par phase du cycle CMT en fonction de la valeur du paramètre I_{sc_wait}	120
<i>Figure 4.51</i> Evolution de la durée des phases du cycle CMT en fonction de la valeur du paramètre I_{sc_wait} (point de fonctionnement 5)	120
<i>Figure 4.52</i> Evolution du taux de dépôt, du poids moyen des gouttes déposées et de l'énergie moyenne en fonction de la valeur du paramètre I_{sc_wait} (point de fonctionnement 5).....	121
<i>Figure 4.53</i> Evolution des caractéristiques géométriques des cordons en fonction de la valeur du paramètre I_{sc_wait}	121
<i>Figure 4.54</i> Evolution des formes d'onde de courant et de tension avec la modification du paramètre Vd_{sc_wait}	122
<i>Figure 4.55</i> Evolution de la durée des phases du cycle CMT en fonction de la valeur du paramètre Vd_{sc_wait} (point de fonctionnement 5)	122
<i>Figure 4.56</i> Evolution des formes d'onde de courant et de tension avec la modification du paramètre I_{sc2} ... 123	123
<i>Figure 4.57</i> Evolution des caractéristiques géométriques des cordons en fonction de la valeur du paramètre I_{sc2}	123
<i>Figure 4.58</i> Evolution de la durée des trois phases du cycles CMT en fonction du cycle au cours du dépôt d'un cordon	125
<i>Figure 4.59</i> (a) Fluctuations de la durée de la phase boost associée au détachement de gouttes pendant la phase boost sous l'effet d'une énergie d'arc trop élevée, (b) aspect des cordons obtenus	126
<i>Figure 4.60</i> Formation d'un pont liquide de plus en plus étroit sous l'effet de la remontée du fil avant la rupture du court-circuit	126
<i>Figure 4.61</i> Fluctuations de la durée de la phase de court-circuit associée à une trop faible énergie pendant la phase d'arc et aspect des cordons obtenus, (a) paramètre Vd_{sc_wait} trop grand, (b) paramètre t_{I_boost} trop court.....	127
<i>Figure 4.62</i> Fluctuations de la durée de la phase de court-circuit associée à des fluctuations de la durée de la phase boost dues à une trop forte énergie pendant la phase d'arc, et aspect des cordons obtenus, (a) paramètre t_{I_boost} trop élevé, (b) paramètre $d_{boostdown}$ trop faible.....	128
<i>Figure 4.63</i> Comparaison de la hauteur d'arc en début de cordon (a) et en milieu de cordon (b).....	129
<i>Figure 4.64</i> Augmentation simultanée de la durée des phases d'arc froid et de court-circuit révélant le défaut en début de cordon, et aspect du cordon obtenu.....	129
<i>Figure 4.65</i> Réduction du défaut en début de cordon détectable sur le signal de durée des phases, grâce à l'augmentation de l'intensité I_{boost}	130
<i>Figure 4.66</i> Forme du signal de l'évolution des durées des phases révélant le défaut de « humping »	130
<i>Figure 4.67</i> Diminutions simultanées de durée des phases d'arc froid et de court-circuit liées à la diminution localisée de la hauteur du cordon.....	131
<i>Figure 5.1</i> : Stratégies de construction pour la fabrication de murs, (a) sens de dépôt identique pour chaque couche, (b) sens de dépôt alterné entre chaque couche	133

<i>Figure 5.2: Amplification des défauts géométriques en début et en fin de cordon lors de la superposition de cordons réalisés en conservant pour chaque cordon le même sens de dépôt, donné par le sens de la flèche</i>	<i>134</i>
<i>Figure 5.3: Evolution de (a) la hauteur et (b) la largeur moyennes des dépôts obtenus avec le point de fonctionnement 7 et une vitesse d'avance de 600 mm/min, en fonction du nombre de cordons déposés, et (c) contours des dépôts en coupe transversale.</i>	<i>135</i>
<i>Figure 5.4: Evolution du volume de métal déposé avec le point de fonctionnement 7 et une vitesse d'avance de 600 mm/min en fonction du nombre de cordons déposés.....</i>	<i>136</i>
<i>Figure 5.5: Evolution de la hauteur et de la largeur moyennes des cordons déposés avec les points de fonctionnement 5 et 6 et une vitesse d'avance de 600 mm/min en fonction du nombre de cordons déposés et de la durée du temps de pause entre deux dépôts</i>	<i>136</i>
<i>Figure 5.6: Evolution du temps de fabrication en fonction du nombre de cordons déposés et de la durée du temps de pause entre deux dépôts, pour le point de fonctionnement 6 et une vitesse d'avance de 600 mm/min.....</i>	<i>137</i>
<i>Figure 5.7: Evolution de la hauteur (a) et de la largeur (b) moyennes des dépôts réalisés avec le point de fonctionnement 5 en fonction du nombre de cordons déposés et de la vitesse de déplacement.....</i>	<i>138</i>
<i>Figure 5.8: Evolution de la hauteur (a) et de la largeur (b) moyennes des dépôts réalisés avec le point de fonctionnement 6 en fonction du nombre de cordons déposés et de la vitesse de déplacement.....</i>	<i>138</i>
<i>Figure 5.9: Evolution de la hauteur (a) et de la largeur (b) moyennes des dépôts réalisés avec le point de fonctionnement 7 en fonction du nombre de cordons déposés et de la vitesse de déplacement.....</i>	<i>139</i>
<i>Figure 5.10: Evolution de la hauteur (a) et de la largeur (b) moyennes des dépôts réalisés avec les points de fonctionnement 5 et 6 à la vitesse d'avance de 2400 mm/min en fonction du nombre de cordons superposés... </i>	<i>139</i>
<i>Figure 5.11: Evolution de la largeur des cordons réalisés avec les points de fonctionnement 6 (a) et 7 (b) et une vitesse d'avance de 900 mm/min, en laissant un temps de pause de 15 secondes entre les couches, en vue de coupe.....</i>	<i>141</i>
<i>Figure 5.12: Evolution de la largeur des murs fabriqués avec le point de fonctionnement 5 et une vitesse d'avance de 2400 mm/min, dans la hauteur du cordon</i>	<i>141</i>
<i>Figure 5.13: Evolution du volume de métal déposé en fonction du nombre de cordons déposés pour les différentes vitesses d'avance, pour les points de fonctionnement 5 (a), 6 (b) et 7 (c) (cordons de longueur 150 mm)</i>	<i>142</i>
<i>Figure 5.14: Evolution du taux de dépôt moyen estimé en fonction du nombre de cordons déposés pour les différentes vitesses de déplacement, pour les points de fonctionnement 5 (a), 6 (b) et 7 (c).....</i>	<i>143</i>
<i>Figure 5.15: Duré moyenne (en ms) des différentes phases du cycle CMT en fonction du nombre de cordons superposés, pour le point de fonctionnement 5, à la vitesse d'avance (a) de 600 mm/min, (b) de 1200 mm/min, (c) de 2400 mm/min, et (d) de 2400 mm/min avec une translation horizontale du plateau entre deux cordons de 0,75 mm au lieu de 1 mm</i>	<i>144</i>
<i>Figure 5.16: Caractéristiques du transfert de matière en fonction du nombre de cordons superposés, pour le point de fonctionnement 5, à la vitesse d'avance (a) de 600 mm/min, (b) de 1200 mm/min, (c) de 2400 mm/min, et (d) de 2400 mm/min avec une translation horizontale du plateau entre deux cordons de 0,75 mm au lieu de 1 mm.....</i>	<i>145</i>
<i>Figure 5.17: géométrie utilisée pour la simulation numérique du dépôt multi-cordons, et transferts thermiques appliqués sur le domaine considéré.</i>	<i>146</i>
<i>Figure 5.18: modélisation de la source de chaleur équivalente par une double ellipsoïde Gaussienne.</i>	<i>148</i>
<i>Figure 5.19: (gauche) géométrie utilisée pour l'étude numérique thermique d'un dépôt sur une tôle en aluminium. (droite) maillage généré avec une taille d'éléments finis imposée de 300 μm sur la zone proche de l'axe de symétrie ($x=0$mm).....</i>	<i>149</i>
<i>Figure 5.20 : évolution des cycles de température au cours du dépôt le long de l'axe de symétrie (en $x=0$ et $z=3$mm)</i>	<i>150</i>
<i>Figure 5.21: évolution de la température en différents points situés sur la section transversale au déplacement de la source de chaleur, en $y=50$mm ($t=3.2$s).</i>	<i>151</i>
<i>Figure 5.22 : évolution de la température en différents points situés à 3 mm de l'axe de symétrie sur la face supérieure de la tôle.....</i>	<i>151</i>

Figure 5.23 : évolution de la température en différents points situés à 8 mm de l'axe de symétrie sur la face supérieure de la tôle.....	152
Figure 5.24 (a) champ de température après 3.2s de simulation ($T_{max} \sim 1190K$), (b) champ de température après 21,67s de simulation ($T_{min} \sim 365K$ & $T_{max} \sim 378K$).....	153
Figure 5.25 Champs de température à l'instant $t=4$ s, soit après 60 mm de cordon déposé dans les dépôts obtenus après (a) le troisième, (b) le sixième, (c) le neuvième et (d) le douzième cordon.....	154
Figure 5.26 évolution de la température en différent points de l'axe de symétrie (en $x=0mm$ et en $z=3mm$), pour un nombre de cordon $n = 1, 3, 6, 9$ et 12	154
Figure 5.27: Mur obtenu par la superposition de 30 cordons déposés avec le point de fonctionnement 5 à la vitesse de 900 mm/min : (a) fluctuations de la hauteur du mur, et (b) évolution de la largeur du dépôt en fonction de la hauteur	155
Figure 5.28: Représentation simplifiée de la géométrie, en coupe transversale, des cordons déposés sur les murs, (a) pour une largeur de cordon constante ou qui diminue (angle de mouillage inférieur à 90°), et (b) pour une largeur de cordon qui augmente (angle de mouillage supérieur à 90°)	156
Figure 5.29: (a) Aspect général et (b) évolution de largeur du dépôt multi-cordons obtenu par la superposition de 30 cordons réalisés en augmentant l'intensité de la phase d'arc chaud du point de fonctionnement 5 (5 ms au lieu de 2 ms), à la vitesse d'avance de 900 mm/min.	157
Figure 5.30 : (a) Aspect général et (b) évolution de largeur du dépôt multi-cordons obtenu par la superposition de 30 cordons réalisés en diminuant la vitesse de descente du fil du point de fonctionnement 5 (10 m/min au lieu de 25 m/min), à la vitesse d'avance de 900 mm/min.....	157
Figure 5.31: (a) Aspect général et (b) évolution de largeur du dépôt multi-cordons obtenu par la superposition de 30 cordons réalisés en diminuant à chaque cordon l'intensité de la phase d'arc chaud de 1 A, à partir des paramètres du point de fonctionnement 6.....	158
Figure 5.32: (a) Aspect général et (b) évolution de largeur du dépôt multi-cordons obtenu par la superposition de 30 cordons réalisés en augmentant par pas de 15 mm/min la vitesse d'avance, en partant d'une valeur de 900 mm/min pour le premier cordon, avec le point de fonctionnement 6.....	159
Figure 5.33: (a) Aspect général et (b) évolution de largeur du dépôt multi-cordons obtenu par la superposition de 30 cordons réalisés en augmentant pendant les 10 premiers cordons, par pas de 45 mm/min, la vitesse d'avance, en partant d'une valeur de 600 mm/min pour le premier cordon, avec le point de fonctionnement 5.....	159
Figure 5.34: (a) Aspect général et (b) évolution de largeur du dépôt multi-cordons obtenu par la superposition de 30 cordons réalisés en augmentant dès le second cordon la vitesse d'avance de 300 mm/min à 900 mm/min, puis en maintenant cette vitesse constante, avec le point de fonctionnement 5.....	160
Figure 5.35: Evolution de la durée des phases du cycle CMT en fonction des cycles (a) pour le premier cordon déposé, (b) pour le dernier cordon déposé, et (c) évolution de la tension des phases du cycle pour le dernier cordon déposé (17 cordons superposés réalisés avec le point de fonctionnement 7 et une vitesse d'avance de 2400 mm/min)	162
Figure 5.36: Evolution de la durée des phases du cycle CMT en fonction des cycles (a) pour le troisième cordon déposé, (b) pour le cinquième cordon déposé, montrant l'apparition de défauts géométriques qui s'amplifient.....	162
Figure 5.37: Evolution de la durée de la phase d'arc froid au cours des cycles, (a) pour le cinquième cordon déposé, et (b) pour le dernier cordon déposé.....	163
Figure 5.38: Evolution de la durée de la phase d'arc froid au cours des cycles, (a) pour le 3ième cordon déposé, et (b) pour le 23ième cordon déposé.....	164
Figure 5.39: Evolution de la durée de la phase d'arc froid au cours des cycles, (a) pour le 3ème cordon déposé, (b) pour le 11ème cordon, (c) pour le 19ème cordon, (d) pour le 25ème cordon déposé.....	165
Figure 5.40: Défauts formés dans un mur de 30 cordons superposés réalisé avec le point de fonctionnement 5 à la vitesse de 2400 mm/min	166
Figure 5.41: Evolution de la durée de la phase d'arc froid au cours des cycles, (a) pour le 1er cordon déposé, (b) pour le 3ème cordon, (c) pour le 19ème cordon, (d) pour le 21ème cordon déposé, (e) pour le 25ème cordon, (f) pour le 29ème cordon déposé.....	167

Figure 5.42: Evolution de la tension moyenne de la phase d'arc chaud au cours de la fabrication des murs par superposition de 30 cordons	167
Figure 5.43: Evolution de la durée de la phase d'arc froid au cours des cycles, (a) pour le 3eme cordon déposé, (b) pour le 23ème cordon, (c) pour le 29ème cordon.....	168
Figure C.1: Défaut de raccordement dans une pièce de géométrie fermée	171
Figure A1.1: Longueurs des principaux éléments du mécanisme de mouvement dans le plan XY.....	173
Figure A1.2: Configuration de base pour le dimensionnement des rails de guidage selon les axes X ou Y.....	173
Figure A1.3: Coupe du plateau permettant d'observer la position des deux rails	174
Figure A1.4: Répartition des charges sur les deux rails.....	174
Figure A1.5: Modélisation des appuis sur chacun des rails	175
Figure A1.6: Réaction des appuis sur le rail si celui-ci repose sur les appuis mobiles aux extrémités du plateau	175
Figure A1.7: Diagrammes de l'effort tranchant et du moment de flexion dans chacun des rails de guidage a) avec les appuis dans le plateau b) avec les appuis extérieurs.....	175
Figure A1.8: Sélection du type de palier, du matériau d'arbre, du nombre d'arbres, de leur orientation, et de l'écart entre arbres et paliers, à l'aide de l'outil développé par la société IGUS [116].	177
Figure A1.9: Sélection du type d'entraînement, des coordonnées d'entraînement, et des coordonnées et du poids à supporter, à l'aide de l'outil développé par la société IGUS [116].	177
Figure A1.10: Résultats du calcul à l'aide de l'outil développé par la société IGUS [116].	178
Figure A1.11: Caractéristiques géométriques des vis hélicoïdales	179
Figure A1.12: Validation du choix final de la configuration des vis hélicoïdales IGUS [118]	180
Figure A1.13: Validation du choix final de la configuration des vis trapézoïdales IGUS [119].....	181
Figure A1.14: Caractéristiques techniques des moteurs IGUS [120]	182
Figure A1.15: Courbes caractéristiques Couple/Vitesse de rotation des moteurs NEMA23, et vitesses de rotation maximales pour l'application visée [120].	183
Figure A2.1: Evolution de la géométrie de cordon pour différentes valeurs de $d_{boostup}$	184
Figure A2.2: Modifications du cycle CMT avec différentes valeurs de $d_{boostup}$ a) P5 b) P6	184
Figure A2.3: Evolution de la durée des phases du cycle CMT	185
Figure A2.4: Energie apporté par phase dans les cycles CMT.....	185
Figure A2.5: Evolution du taux de dépôt, du poids de la goûte et de l'énergie moyenne pendant le dépôt d'un cordon.	185
Figure A2.6: Caractéristiques géométriques en fonction du paramètre $d_{boostup}$	186
Figure A2.7: Evolution de la géométrie de cordon pour différentes valeurs de $\tau_{boostup}$	186
Figure A2.8: Modifications du cycle CMT avec différentes valeurs de $\tau_{boostup}$ a) P5 b) P6	186
Figure A2.9: Evolution de la durée des phases du cycle CMT	187
Figure A2.10: Energie apporté par phase dans les cycles CMT.....	187
Figure A2.11: Evolution du taux de dépôt, du poids de la goûte et de l'énergie moyenne pendant le dépôt d'un cordon.	187
Figure A2.12: Caractéristiques géométriques en fonction du paramètre $\tau_{boostup}$	188
Figure A2.13: Evolution de la géométrie de cordon pour différentes valeurs de I_{boost}	188
Figure A2.14: Modifications du cycle CMT avec différentes valeurs de I_{boost} a) P5 b) P6.....	188
Figure A2.15: Evolution de la durée des phases du cycle CMT	189
Figure A2.16: Energie apporté par phase dans les cycles CMT.....	189
Figure A2.17: Evolution du taux de dépôt, du poids de la goûte et de l'énergie moyenne pendant le dépôt d'un cordon.	189
Figure A2.18: Caractéristiques géométriques en fonction du paramètre I_{boost}	190
Figure A2.19: Evolution de la géométrie de cordon pour différentes valeurs de $t_{I_{boost}}$	190
Figure A2.20: Modifications du cycle CMT avec différentes valeurs de $t_{I_{boost}}$ a) P5 b) P6.....	190
Figure A2.21: Evolution de la durée des phases du cycle CMT	191
Figure A2.22: Energie apporté par phase dans les cycles CMT.....	191

<i>Figure A2.23: Evolution du taux de dépôt, du poids de la goûte et de l'énergie moyenne pendant le dépôt d'un cordon.</i>	191
<i>Figure A2.24: Caractéristiques géométriques en fonction du paramètre t_{I_boost}</i>	192
<i>Figure A2.25: Evolution de la géométrie de cordon pour différentes valeurs de $d_{boostdown}$</i>	192
<i>Figure A2.26: Modifications du cycle CMT avec différentes valeurs de $d_{boostdown}$ a) P5 b) P6</i>	192
<i>Figure A2.27: Caractéristiques géométriques en fonction du paramètre $d_{boostdown}$</i>	193
<i>Figure A2.28: Evolution de la durée des phases du cycle CMT</i>	193
<i>Figure A2.29: Energie apporté par phase dans les cycles CMT</i>	193
<i>Figure A2.30: Evolution du taux de dépôt, du poids de la goûte et de l'énergie moyenne pendant le dépôt d'un cordon.</i>	194
<i>Figure A2.31: Evolution de la géométrie de cordon pour différentes valeurs de I_{sc_wait}</i>	194
<i>Figure A2.32: Modifications du cycle CMT avec différentes valeurs I_{sc_wait} (P6)</i>	194
<i>Figure A2.33: Energie apporté par phase dans les cycles CMT</i>	194
<i>Figure A2.34: Evolution de la durée des phases du cycle CMT</i>	195
<i>Figure A2.35: Evolution du taux de dépôt, du poids de la goûte et de l'énergie moyenne pendant le dépôt d'un cordon.</i>	195
<i>Figure A2.36: Caractéristiques géométriques en fonction du paramètre I_{sc_wait}</i>	195
<i>Figure A2.37: Evolution de la géométrie de cordon pour différentes valeurs de Vd_{sc_wait}</i>	196
<i>Figure A2.38: Modifications du cycle CMT avec différentes valeurs de Vd_{sc_wait} a) P5 b) P6</i>	196
<i>Figure A2.39: Caractéristiques géométriques en fonction du paramètre Vd_{sc_wait}</i>	196
<i>Figure A2.40: Evolution de la durée des phases du cycle CMT</i>	197
<i>Figure A2.41: Energie apporté par phase dans les cycles CMT</i>	197
<i>Figure A2.42 : Evolution du taux de dépôt, du poids de la goûte et de l'énergie moyenne pendant le dépôt d'un cordon.</i>	197
<i>Figure A2.43: Evolution de la géométrie de cordon pour différentes valeurs de I_{sc2}</i>	198
<i>Figure A2.44: Modifications du cycle CMT avec différentes valeurs de I_{sc2} a) P5 b) P6</i>	198
<i>Figure A2.45: Caractéristiques géométriques en fonction du paramètre I_{sc2}</i>	198
<i>Figure A2.46: Energie apporté par phase dans les cycles CMT</i>	199
<i>Figure A2.47: Evolution de la durée des phases du cycle CMT</i>	199
<i>Figure A2.48: Evolution du taux de dépôt, du poids de la goûte et de l'énergie moyenne pendant le dépôt d'un cordon.</i>	199

Liste de Tableaux

Tableau 1.1 : Classification des procédés de fabrication additive de pièces métalliques selon l'ASTM [9].....	13
Tableau 1.2 : Procédés de FA de pièces métalliques par fusion localisée classés en fonction de la source de fusion employée.....	14
Tableau 1.3 : Propriétés physiques de l'aluminium à température ambiante [51].....	29
Tableau 2.1 Avantages et inconvénients de chaque type de mécanisme pour l'application envisagée	42
Tableau 2.2 : Configurations d'axes possibles pour assurer le déplacement en 3D du plateau de travail.....	43
Tableau 2.3 : Liste des modifications du micrologiciel Marlin pour adaptation au procédé WAAM.....	48
Tableau 2.4 : Modifications de format des programmes G-code pour améliorer la qualité des pièces produites par le procédé WAAM.....	50
Tableau 2.5 : Description des paramètres du procédé CMT.....	52
Tableau 2.6 : Comparaison des volumes calculés par Geomagic et par approximation géométrique.....	63
Tableau 2.7 : Comparaison des volumes calculés avec le logiciel Geomagic et le script Python développé, pour un mur constitué de 16 couches superposées.....	65
Tableau 3.1 Valeurs des paramètres du cycle CMT associées aux points de fonctionnement de la synergie.....	69
Tableau 3.2: Valeurs indicatives des intensités, tensions et vitesses de dévidage associées aux points de fonctionnement de la synergie C0876.....	69
Tableau 3.3: Observations générales sur les premiers dépôts pour les différents points de fonctionnement.....	70
Tableau 3.4 : Gammes de vitesses retenues à l'issue des premiers essais.....	72
Tableau 3.5 Conditions retenues pour séparer à partir des signaux de courant et de tension les trois phases du cycle CMT.....	81
Tableau 3.6 Nombre de cycles par seconde calculés selon le point de fonctionnement et la vitesse d'avance	83
Tableau 3.7 Durée moyenne de chaque phase du cycle CMT pour le point de fonctionnement 5.....	84
Tableau 3.8 Durée moyenne de chaque phase du cycle CMT pour le point de fonctionnement 6.....	84
Tableau 3.9 Durée moyenne de chaque phase du cycle CMT pour le point de fonctionnement 7.....	84
Tableau 3.10 Puissance moyenne des différentes phases pour le point de fonctionnement 5.....	85
Tableau 3.11 Puissance moyenne des différentes phases pour le point de fonctionnement 6.....	85
Tableau 3.12 Puissance moyenne des différentes phases pour le point de fonctionnement 7.....	85
Tableau 3.13 Energie moyenne apportée par chaque phase pour les 3 points de fonctionnement.....	86
Tableau 3.14 Energies linéiques mesurées pour les différents points de fonctionnement et vitesses d'avance....	86
Tableau 3.15 Energie par gramme de métal déposé pour les différents points de fonctionnement.....	87
Tableau 5.1: Hauteur moyenne déposée pour chaque cordon et largeur moyenne « stabilisée » estimées, pour les différents points de fonctionnement et vitesses d'avance.....	140
Tableau 5.2: Taux de dépôts moyens calculés	143
Tableau 5.3: Paramètres de soudage et de la double ellipsoïde retenus pour la simulation.....	149
Tableau A1.1: Valeurs minimums de diamètres des rails	176
Tableau A1.2: Caractéristiques géométriques des vis hélicoïdales standards [117], et couple nécessaire pour déplacer une charge de 200 N	179
Tableau A1.3: Caractéristiques géométriques des vis trapézoïdales standards, et couple nécessaire pour déplacer une charge de 500 N	181
Tableau A3.1 Influence du paramètre I_boost.....	200
Tableau A3.2 Influence du paramètre t_I_boost.....	203
Tableau A3.3 Influence du paramètre d_boostdown.....	205
Tableau A3.4 Influence du paramètre I_sc_wait	207
Tableau A3.5 Influence du paramètre Vd_sc_wait	209
Tableau A3.6 Influence du paramètre I_sc2	211

