

Méthodologie pour le développement d'une gamme opératoire pour la fabrication additive métallique

L. TERRENOIR^a, J. LARTIGAU^a, C. MERLO^a, L. LAGUNA SALVADO^a,
A. ARJUNAN^b

a. Univ. Bordeaux, ESTIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY, F-64210 Bidart, France
l.terrenoir@estia.fr + j.lartigau@estia.fr + c.merlo@estia.fr + l.lagunasalvado@estia.fr

b. Additive manufacturing of functional materials research group (AMFM), School of Engineering, University of Wolverhampton, Telford Campus, TF2 9NT, UK
a.arjunan@wlv.ac.uk

Résumé :

Dans ces travaux, une méthodologie est développée pour générer une gamme opératoire du procédé de fabrication additive métallique WAAM. Les relations entre les paramètres de fabrication et les effets de ces paramètres sur les propriétés mécaniques des pièces produites mais également sur les aspects financiers, humains et environnementaux du processus de fabrication sont étudiées. Cette approche servira de base pour le développement d'un modèle d'aide à la décision, à destination des industriels, afin de déterminer les paramètres de fabrication correspondant aux indicateurs définis en amont. Ce modèle contribuera ainsi à l'industrialisation du procédé WAAM et pourrait être étendu à d'autres procédés.

Abstract:

This work features a methodology developed to generate an operational sequence for the WAAM metal additive manufacturing process. The relationships between the manufacturing parameters and the effects of these parameters on both the mechanical properties of the parts produced and the financial, human and environmental aspects of the manufacturing process are studied. This approach aims to feed a decision support model, intended for industrialists, to determine the manufacturing parameters corresponding to the indicators defined upstream. This model will thus contribute to the industrialisation of the WAAM process and could be extended to other processes.

Mots clefs : WAAM, modèle de maturité, caractérisation mécanique, caractérisation du processus, aide à la décision

1 Introduction

Les procédés de fabrication additive métallique (FAM) méritent encore des efforts d'investigation pour passer la porte des centres de recherche académiques et être employés par les industriels pour la production en petite ou moyenne série. En effet, ces derniers restent frileux à l'utilisation de ce type de procédé, dû en partie au manque de connaissances d'ordre organisationnel et technique. Dans ces

travaux, nous proposons de formaliser et valider une méthodologie d'aide à la décision pour l'élaboration d'une gamme opératoire en FAM. Cette gamme opératoire doit permettre de déterminer les paramètres de fabrications optimaux pour un procédé donné, en fonction à la fois des indicateurs relatifs à la pièce produite (aspects géométriques, mécaniques et microstructuraux) et des indicateurs économiques et socio-écologiques. Afin de développer ce modèle d'aide à la décision pour les industriels la méthodologie suivante a été employée : (i) la proposition d'un modèle de maturité adapté aux procédés de FAM, (ii) l'élaboration d'un modèle de connaissance et enfin (iii) le développement d'un modèle d'aide à la décision. Ce papier traite des points (i) et (ii). La partie 2 traite du modèle de maturité, de sa conception à son application dans le cadre de nos travaux. Puis la partie 3 présente le modèle de connaissance construit et les résultats expérimentaux relatifs au procédé *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM) *Cold Metal Transfer* (CMT).

2 Modèle de maturité

La première étape de notre démarche est de développer un modèle d'évaluation de la maturité des procédés de FAM. La maturité d'une technologie est un élément clé pour les industriels afin de mettre en évidence les risques et opportunités associés à son industrialisation [1]–[3]. Des échelles d'évaluation de la maturité, telles que les *Technological Readiness Levels* (TRL) et les *Manufacturing Readiness Levels* (MRL) ont été développées pour évaluer notamment les processus de fabrication. Cependant, aucun modèle spécifique à la fabrication additive métallique n'est connu et employé massivement à ce jour.

Les TRL et MRL ne sont pas spécifiquement adaptés à l'évaluation de la maturité de la FAM en raison des aspects plus larges qui doivent être pris en compte : machines, matériaux, conception et personnes [4]. Ainsi il est nécessaire de développer un modèle de maturité spécifique ; les échelles TRL et MRL semblent indiquées pour servir de base à son développement [5]. Un tel modèle devra également intégrer les aspects actuels propres au développement de l'industrie 4.0 tels que la fabrication durable [6].

2.1 Développement du modèle

Nous proposons d'évaluer la maturité d'une technologie de FAM en couplant cas d'utilisation et technologie (TUCC = Technology - Use Case Couple, en anglais). Ce faisant, l'évaluation est plus précise et plus proche de la réalité industrielle. La première étape de construction du modèle consiste à définir les technologies et les cas d'utilisation à évaluer puis lister les TUCC créés. Ensuite, pour chaque TUCC, la maturité est évaluée sur la base de critères technologiques et non technologiques. Le modèle d'évaluation de la maturité de la FAM proposé est illustré dans la figure 1.

L'évaluation techno-centrée s'appuie sur une évaluation AMRL (adaptée depuis les MRL). Elle vise à évaluer la maturité des parties techniques du processus. Tout d'abord, le TRL du TUCC est évalué. Ensuite, les catégories et critères adaptés des MRL sont évalués, en attribuant à chaque sous-catégorie une note de 1 à 10 sur l'échelle des MRL adaptés à la FAM. Les sous catégories sont les suivantes : développement de la technologie, programme de productibilité, manutention et spécificités, modélisation et simulation, maturité du processus de fabrication, qualité du produit.

L'évaluation non techno-centrée permet d'intégrer notamment les données de coût, d'impact environnemental et de maturité de la matière première. Sur la forme, elle est conçue de manière similaire à l'évaluation techno-centrée. Les critères définis sont notés sur une échelle de 1 à 10 et sont classés en trois catégories : durabilité, matériaux et stratégie. Cette partie de l'évaluation, notamment la durabilité, reste à développer. Vu le rôle de plus en plus fondamental des enjeux environnementaux dans l'industrie, il apparaît important de les prendre en compte pour le développement des futurs procédés industriels.

L'évaluation finale de la maturité est basée sur une échelle de 1 à 10, 1 étant le niveau de maturité le plus bas et 10 le plus élevé. Chacun des critères définis est évalué selon cette échelle, sur la base des références identifiées dans la littérature ou dans l'industrie. En considérant l'hypothèse qu'un TUCC ne peut pas être plus mature qu'un de ses critères, le score final de maturité évalué est égal au niveau de maturité le plus faible de l'ensemble des critères évalués.

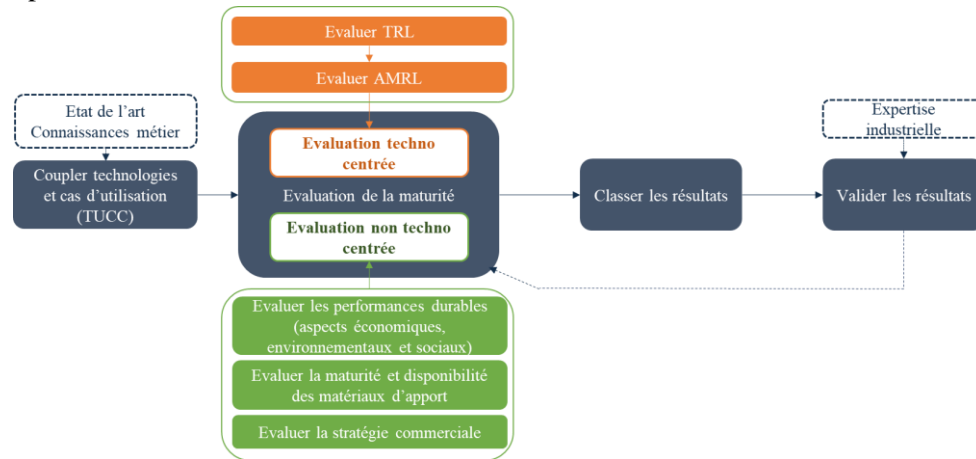


Figure 1: Proposition de modèle d'évaluation de la maturité pour la FAM

Une fois que tous les TUCC ont été évalués, ils sont classés en fonction de leur score. Les résultats ont été validés par des experts du domaine, issus des domaines industriels et académiques. Cette validation permet d'écartier tout biais de subjectivité de la part de l'évaluateur ou de l'équipe d'évaluateurs. En fonction de leurs commentaires, des itérations peuvent être envisagées pour vérifier l'évaluation. Enfin, le classement des TUCC en fonction de leur maturité est obtenu.

2.2 Application du modèle

Pour notre étude, sept technologies DED ont été sélectionnées, classées par source d'énergie (laser, faisceau d'électrons et arc électrique) et par type de matériau d'alimentation (poudre ou fil) [7]. Les technologies de l'arc électrique ont été séparées en quatre types selon les procédés de soudage utilisés, en raison des différences importantes en termes de stabilité des procédés et d'utilisation pour chacune de ces "sous-technologies".

Trois cas d'utilisation ont été associés à chacune de ces sept technologies :

- la fabrication d'une nouvelle pièce (*new part manufacturing*) fait référence à la fabrication d'une pièce à partir de zéro,
- l'ajout de fonction (*function add-on*), parfois appelé fonctionnalisation, est l'ajout d'une nouvelle caractéristique sur une pièce existante,
- et la réparation (*repair*) fait référence à la réparation d'un défaut sur une pièce existante.

Ces trois cas d'usage ont été choisis car ce sont les principales utilisations du DED envisagées pour une industrialisation en série [8]. De plus, cela permet de différencier les cas d'usage en fonction du support de fabrication (substrat, pièce fonctionnelle, ou pièce présentant un défaut). Au total, vingt et un TUCC sont définis et évalués dans la figure 2.

Pour chaque TUCC, la première étape a été l'évaluation TRL. L'évaluation AMRL étant une tâche conséquente, la décision a été prise d'écartier tous les TUCC dont le TRL est égal ou inférieur à 5. Les TUCC restants ont tous été évalués. Les scores AMRL sont donnés dans la figure 2. Les preuves qui justifient l'évaluation de chaque critère proviennent de diverses références scientifiques.

Dans notre étude, le TUCC le plus mature techniquement s'est avéré être le procédé *Wire Electron Beam AM* (WEAM) pour la fabrication de nouvelles pièces. Le *Cold Metal Transfer* (CMT) et le *Plasma Arc*

Welding (PAW) pour la fabrication de nouvelles pièces sont les deuxièmes TUCC les plus matures. Ce travail met en évidence le fait que les applications de réparation et d'ajout de fonctions ne sont pas aussi matures que la fabrication de nouvelles pièces, même si pour le dépôt de métal par laser, ces cas d'utilisation sont les plus proches de l'industrialisation.

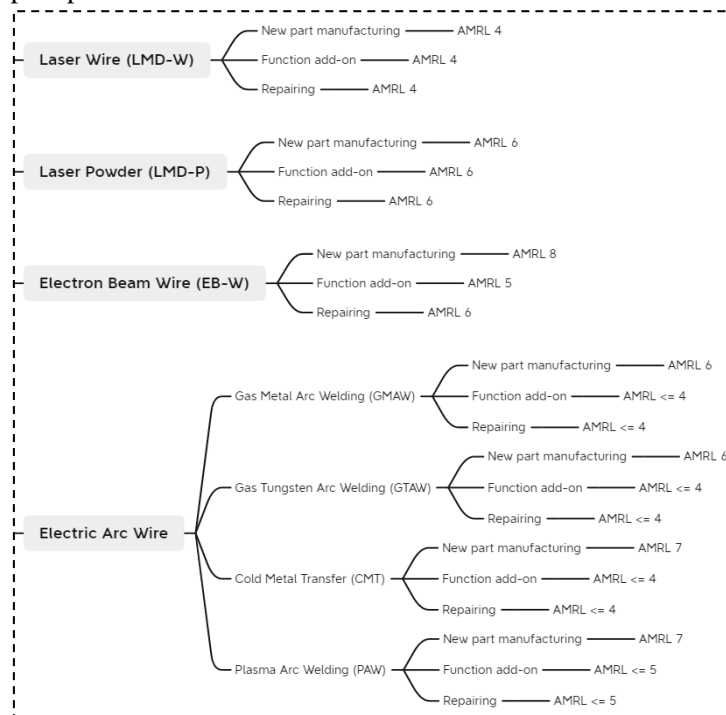


Figure 2 : Scores AMRL pour les 21 TUCC définis

2.3 Validation des résultats

Les résultats ont été présentés à quatre experts : deux d'entre eux sont des professeurs des universités impliqués dans de nombreux projets liés à la FAM, ce sont les experts 1 et 2. L'expert 3 est un ingénieur de recherche en charge d'un procédé de FAM sur une plateforme de recherche, depuis 4 ans. L'expert 4 est un directeur de projet avec 14 ans d'expérience en FA.

La principale remarque des experts est que le modèle a été appliqué aux technologies DED couplées à des cas d'utilisation généraux. Le manque de précision de la définition du TUCC a été souligné. Des TUCC plus spécifiques tenant compte des matériaux et même de la géométrie peuvent conduire à une évaluation plus précise, comme l'ont souligné les experts 2 et 4. La prise en compte de la localisation (soit le laboratoire ou le site industriel spécifique où le TUCC a été développé) permettrait d'appliquer l'évaluation non techno-centrée à notre application. L'expert 2 l'a souligné car les résultats lui ont paru surprenants du point de vue de la mise en œuvre de la FA dans son université et de ses travaux de recherche. L'expert 3 a approuvé les choix des auteurs mais, en accord avec les experts 2 et 4, a suggéré d'intégrer les matériaux et même les géométries dans le TUCC choisi.

Au vu de ces retours, le modèle devra être adapté. Le TUCC devra être étendu au matériau, au même niveau que la technologie et le cas d'étude. On pourrait alors parler de TMUCT (Technology Material Use Case Triplet).

2.4 Le cas d'étude

Comme les procédés WEAM et PAW ne sont pas directement à notre disposition, le choix s'est porté sur le procédé CMT pour la fabrication de nouvelles pièces.

Ce procédé utilise du fil métallique qui est fusionné grâce à un arc électrique. Le métal fusionné est déposé couche par couche. Le fil sert ici d'électrode consommable. La particularité du CMT réside dans la régulation de l'arc électrique. Celui-ci est régulé au travers d'un contrôle fin du courant et de la tension, couplé à un mouvement d'avance-recul mécanique du fil [7], [9]. Cette régulation permet un processus plus stable et mieux maîtrisé. De plus les installations nécessaires sont parmi les moins coûteuses pour la FAM [10]. Des applications industrielles de ce procédé ont été recensées comme par exemple le projet de pont métallique MX3D [11] ou le projet d'hélice de navire porté par RAMLAB [7], [12].

Diverses recherches ont porté sur la caractérisation du matériau déposé et l'optimisation des paramètres de fabrications [7], [13]–[16] et notamment pour l'acier inoxydable 316L [9], [17]. Cependant les auteurs n'ont pas identifié dans la littérature de travaux portant sur la fabrication de blocs épais et additionnant l'observation de réponses du processus de fabrication aux réponses de la pièce produite.

3 Modèle de connaissance

Le modèle de connaissance a pour objectif de recenser les paramètres influents liés au procédé WAAM CMT dans le contexte de la fabrication de nouvelles pièces et de déterminer leurs relations avec les réponses observées. Il est construit grâce aux connaissances existantes, relevées dans la littérature, mais aussi grâce à une campagne expérimentale. Cette campagne et les résultats qui en découlent sont l'objet de cette partie.

3.1 Matériels

Une cellule robotisée de fabrication additive arc-fil comprenant un robot KUKA KR 100 HA 2000 et un poste à souder FRONIUS TransPuls Synergic 3200 CMT est utilisée. Le robot et le poste de soudage communique grâce au protocole de communication AB DeviceNet.

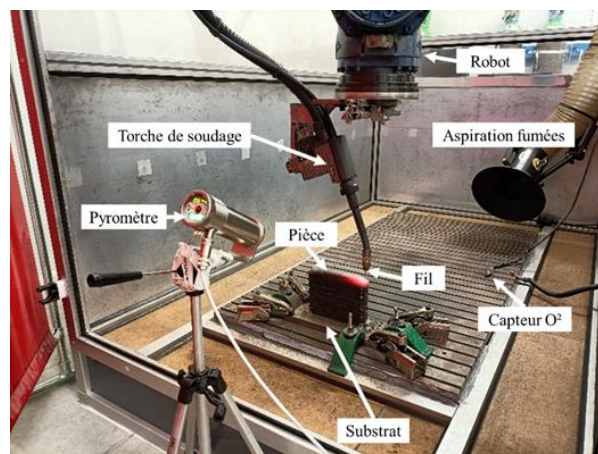


Figure 3 : Dispositif expérimental

De l'acier inoxydable austénitique 316L est utilisé sous forme de fil (diamètre 1,2 mm). Neuf pièces de 2,5 cm d'épaisseur, 18 cm de long et 16 cm de haut sont fabriquées.

3.2 Plan d'expériences

Les deux paramètres les plus influents du procédé WAAM sont la vitesse de fil, notée V_f , et la vitesse du robot ou vitesse de la torche, notée V_t [7]. Pour cette étude, le plan d'expériences est présenté dans le tableau 1.

Il s'agit d'un plan factoriel complet de deux facteurs à trois niveaux. Neuf pièces sont donc fabriquées. V_f et V_t sont définis comme facteurs de premier ordre, variant respectivement de 5 m/min à 10 m/min et de 0,6 à 0,9 m/min.

N° d'expérience	Paramètres	
	V_f (m/min)	V_t (m/min)
1	1	0
2	0	0
3	-1	0
4	-1	-1
5	0	-1
6	1	-1
7	1	1
8	0	1
9	-1	1

Niveau -1	5	0,6
Niveau 0	7,5	0,75
Niveau 1	10	0,9

Les facteurs de second ordre sont fixés. La loi synergique CMT 1627 (base 0979 – *welding programs database*, Fronius) définit le courant, I , et la tension, U , en fonction de V_f . La distance tube contact-pièce est fixée à 15 mm. La trajectoire de fabrication est triangulaire. La période de cette trajectoire triangulaire a été déterminée pour chaque couple V_f , V_t , selon le recouvrement optimal. Le temps inter-couche n'est pas fixé, il est dépendant de la température inter-couche. La couche $n+1$ ne sera déposée lorsque la température observée au milieu de la face supérieure de couche n sera inférieure à 400°C. Cette mesure est réalisée avec un pyromètre Endurance Fluke. Après le dépôt de chaque couche, la hauteur du bloc est relevée à l'aide d'un pied à coulisse. Lorsque la hauteur mesurée dépasse 160 mm, la fabrication est arrêtée.

Après la fabrication, un traitement thermique à 500°C pendant 4h, avec vitesses de chauffage et de refroidissement à 50°C par heure, a été réalisé sur chacune des pièces.

Tableau 1 : Plan d'expérience

3.3 Mesures in situ

Afin de monitorer le processus de fabrication et également pour mesurer les réponses économiques et socio-écologiques, un protocole a été mis en place lors de la fabrication de chaque pièce. Avant le dépôt de la première couche, et entre chaque couche, la température, l'humidité et la concentration d'oxygène dans la cellule de fabrication sont mesurées.

Lors du dépôt de chaque couche, le volume sonore est mesuré également à l'aide d'un sonomètre. Lors du dépôt de la première couche l'intensité délivrée par le poste de soudage est mesurée par un capteur à effet Hall et enregistrée via le logiciel DAQami. Le profil de l'arc électrique est ainsi déterminé. L'énergie consommée pendant toute la durée de la fabrication est relevée avec un puissance-mètre PEL 103 Power-Energy Logger.

La température de la couche supérieure est mesurée et enregistrée avec le pyromètre.

3.4 Mesures post fabrication

Une fois l'ensemble des pièces fabriquées et traitées, elles seront caractérisées mécaniquement. Chaque pièce sera usinée afin d'en extraire : cinq éprouvettes de traction verticales, cinq éprouvettes de traction horizontales et trois éprouvettes de micro-dureté (*Vickers*). Un échantillon par pièce sera dédié à une analyse par tomographie à rayons X afin de déterminer le taux de porosité. Un dernier échantillon permettra grâce à un microscope électronique à balayage (MEB) de caractériser la microstructure du matériau déposé. Enfin le fil d'apport sera également étudié par tomographie à rayons X et MEB.

Cette campagne expérimentale vise à :

- mettre en évidence l'isotropie du matériau déposé,
- quantifier les variations des propriétés mécaniques selon WFS et TS,
- comparer les propriétés mécaniques du 316L issu du procédé WAAM CMT au 316L forgé
-

3.5 Analyses des fabrications

Une première analyse visuelle laisse à penser que la vitesse de fil V_f la plus faible (ici 5m/min) garantit une pièce plus propre. Sur la figure 4 ci-dessous on peut observer une pièce sans écoulement et une pièce avec écoulement sur la figure 5. De plus on observe un affaissement des côtés de la pièce plus important pour une vitesse de fil plus élevée. Cela montre également que V_f a davantage d'influence que V_t sur la géométrie de la pièce. Ce résultat se traduit également par le poids des pièces produites. Le poids de la pièce fabriquée décroît plus V_t augmente et augmente plus V_f augmente comme on peut le voir dans le tableau 2.



Figure 4 : Bloc fabriqué $V_f=5\text{m/min}$ $V_t=0.75\text{ m/min}$

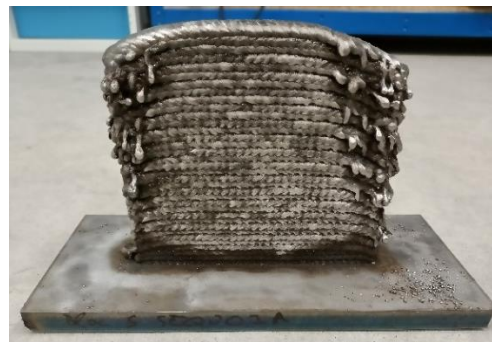


Figure 5 : Bloc fabriqué $V_f=7.5\text{ m/min}$, $V_t=0.6\text{ m/min}$

Les résultats relatifs au processus de fabrication, relevés dans le tableau 3, montrent qu'une vitesse de torche plus rapide induit une consommation de matière plus faible. Celle-ci augmente cependant avec une vitesse de fil plus importante. Le procédé de fabrication est plus stable pour des vitesses de fil plus faibles. On observe moins d'écoulement et de projection de matière pour $V_f = 5\text{ m/min}$ pour les vitesses de torche testées.

Le taux de dépôt de matière varie entre 2,68 kg/h et 4,98 kg/h. Ces taux correspondent à ceux identifiés dans la littérature [7]. Il a été remarqué que les taux plus élevés sont atteints pour les valeurs de V_f élevées. V_t n'influe que légèrement sur le taux de dépôt.

V_t m/min	V_f m/min	Hauteur de pièce mm	Poids de la pièce kg	Matériau consommé kg	Ratio matière	Hauteur de couche moyenne mm	Nombre de couches
0,6	5	161,7	5,88	5,97	98,5%	5,22	31
0,6	7,5	163,1	6,25	6,85	91,1%	4,66	35
0,6	10	164,8	6,84	7,77	88,0%	4,34	38
0,75	5	163,2	5,63	5,69	98,9%	4,80	34
0,75	7,5	161,1	6,20	6,79	91,3%	4,35	37
0,75	10	161,4	6,42	6,81	94,3%	3,51	46
0,9	5	164,8	5,46	5,51	99,0%	4,71	35
0,9	7,5	161,7	5,98	6,24	95,8%	4,26	38
0,9	10	160,5	6,44	6,90	93,3%	4,01	40

Tableau 2 : Résultats relatifs à la pièce produite

Le ratio matière correspond au poids de la pièce fabriqué divisé par le poids de matériau consommé pour la fabrication. Les ratios les plus élevés sont atteints pour V_f la plus faible.

Le temps de fabrication est plus court lorsque V_f est plus faible. Cela s'explique par l'apport de chaleur plus élevé avec des vitesses d'avance de fil plus grande. Dans le processus de fabrication mis en place, cela influe sur le temps de refroidissement inter-couche et ainsi sur le temps de fabrication.

Le temps de soudage correspondant au temps effectif de dépôt de matière est à l'inverse plus court pour des vitesses d'avance de fil plus élevées. En effet avec davantage de chaleur et davantage de matière, la trajectoire de fabrication est plus courte. Ces résultats montrent que pour les vitesses considérées, la rapidité gagnée par une augmentation de V_t n'est pas suffisante pour combler la distance supérieure à parcourir.

Plus V_f est élevé plus le volume sonore en cours de soudage est élevé.

Les résultats présentés pour la consommation de gaz, d'énergie électrique ainsi que la température et l'hygrométrie de la cellule proviennent de données brutes. Cependant il peut déjà être noté que la consommation de gaz est plus importante pour la vitesse de fil la plus faible, sans tenir compte de la vitesse robot. Pour la consommation électrique, il est remarqué que la vitesse d'avance de fil, qui conditionne l'énergie développée par le poste de soudage, est le paramètre le plus influent : plus V_f est faible, moins on consomme. A V_f égale, il semble que les vitesses de torche plus élevées favorisent une consommation réduite.

V_t m/min	V_f m/min	Temps de fabrication	Temps de soudage	Consommation d'énergie kWh	Taux de dépôt kg/h	Delta de température %	Delta d'hygrométrie %	Volume sonore moyen dB	Gaz consommé m ³
0,6	5	04:22:12	02:07:48	11,107	2,80	18%	-18%	75	2,2
0,6	7,5	04:06:36	01:39:18	11,523	4,13	19%	-15%	76	1,7
0,6	10	04:45:36	01:33:36	13,85	4,98	10%	-23%	77	1,6
0,75	5	03:54:36	02:06:00	10,54	2,71	16%	-16%	75	2,2
0,75	7,5	04:08:53	01:34:59	11,68	4,29	13%	-8%	76	1,7
0,75	10	05:24:36	01:39:43	14,707	4,10	17%	-3%	77	1,7
0,9	5	03:50:44	02:03:14	10,238	2,68	5%	-10%	74	2,1
0,9	7,5	04:04:38	01:33:47	11,13	3,99	19%	-16%	76	1,6
0,9	10	04:55:52	01:33:18	14,846	4,44	18%	-14%	77	1,6

Tableau 3 : Résultats relatifs au processus de fabrication

4 Conclusion et perspectives

Cet article présente les deux premières étapes d'une méthodologie permettant de générer une gamme opératoire pour la FAM. La première étape consiste à choisir un cas d'étude sur lequel baser le modèle de connaissance. Celui-ci permettra d'alimenter le modèle d'aide à la décision à travers lequel la gamme opératoire sera générée.

Le choix du cas d'étude repose sur la maturité non seulement de la technologie mais aussi du cas d'utilisation associé, couplés entre eux grâce à l'idée originale de couples technologie-cas d'utilisation (TUCC). Un modèle d'évaluation de la maturité pour la FAM, basé sur des approches existantes telles que TRL et MRL, a été développé. Les résultats ont montré que les technologies du fil à faisceau d'électrons et du WAAM pour la fabrication de nouvelles pièces étaient les plus proches de la maturité industrielle. Comme l'ont souligné les experts, les résultats devraient différer lorsqu'on utilise des TUCC plus précis, notamment en y intégrant le matériau au même rang que la technologie et le cas d'utilisation. Des travaux supplémentaires sont nécessaires concernant l'évaluation non centrée sur la technologie, comme le critère de coût. L'automatisation du modèle au travers d'un logiciel et son intégration dans un modèle d'aide à la décision sont les principales perspectives d'évolution du modèle

Ce modèle a permis le choix de la technologie *Cold Metal Transfer* pour la fabrication d'une nouvelle pièce. Un modèle de connaissance de ce cas d'étude est développé. L'influence des paramètres de vitesse d'avance de fil et de vitesse d'avance de torche sur les caractéristiques géométriques, mécaniques et métallurgiques de la pièce fabriquée ainsi que sur le coût et l'impact socio-écologique du processus de fabrication est étudié. De premiers résultats suivant la fabrication des neuf pièces d'acier inoxydable ont été présentés. Une vitesse d'avance de fil plus faible favorise un procédé de fabrication plus stable (pièces plus propres, moins de bruit pour l'opérateur) et un temps de fabrication réduit. Cela permet également de consommer moins d'énergie et de moins gaspiller de matière. Une vitesse d'avance de fil plus élevée permet de réduire le temps de soudage et la consommation de gaz. À vitesse de fil égale une

vitesse de torche plus élevée permet de réduire la consommation électrique. Ces résultats serviront à alimenter un modèle d'aide à la décision qui permettra de générer les paramètres de fabrication V_t et V_f optimaux selon les indicateurs choisis par les décideurs industriels.

Les prochaines étapes consistent en la caractérisation géométrique, mécanique et métallurgique des pièces produites. L'analyse des données relatives au processus sera poursuivie pour relier les paramètres d'entrées à des indicateurs économiques et socio-écologiques. Enfin l'intégration de ces relations à un modèle d'aide à la décision et le développement du modèle en lui-même permettront de finaliser la méthodologie de génération de gamme opératoire proposée. Cette méthodologie sera amenée à être étendue à d'autres technologies et cas d'utilisation. Ainsi au travers du système d'aide à la décision développé, la connaissance spécifique du comportement des procédés et cas d'utilisations étudiés sera formalisée et permettra de générer les paramètres optimisés du procédé selon les indicateurs définis par les décideurs industriels.

Références :

- [1] J. Y. Lee, M. Swink, and T. Pandepong, "Team diversity and manufacturing process innovation performance: the moderating role of technology maturity," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 55, no. 17, pp. 4912–4930, 2017, doi: 10.1080/00207543.2016.1272765.
- [2] L. A. Shah, A. Etienne, A. Siadat, and F. Vernadat, "Process-oriented risk assessment methodology for manufacturing process evaluation," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 55, no. 15, pp. 4516–4529, 2017, doi: 10.1080/00207543.2016.1268728.
- [3] S. Ross, "Application of System and Integration READINESS LEVELS to Department of Defense RESEARCH and DEVELOPMENT.," *Def. Acquis. Res. J. A Publ. Def. Acquis. Univ.*, vol. 23, no. 3, pp. 248–274, 2016.
- [4] T. Simpson, "ADDITIVE INSIGHTS Getting Ready for Additive Manufacturing," *ADDITIVE INSIGHTS*, pp. 32–34, 2020.
- [5] A. L. Olechowski, S. D. Eppinger, N. Joglekar, and K. Tomaschek, "Technology readiness levels: Shortcomings and improvement opportunities," *Syst. Eng.*, vol. 23, no. 4, pp. 395–408, Jul. 2020, doi: 10.1002/sys.21533.
- [6] C. G. Machado, M. P. Winroth, and E. H. D. Ribeiro da Silva, "Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 58, no. 5, pp. 1462–1484, Mar. 2020, doi: 10.1080/00207543.2019.1652777.
- [7] D. G. Ahn, *Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art*, vol. 8, no. 2. Korean Society for Precision Engineering, 2021.
- [8] S. Ford and M. Despeisse, "Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges," *J. Clean. Prod.*, vol. 137, pp. 1573–1587, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.150.
- [9] C. Bourlet, "Développement de la fabrication additive par procédé arc-fil pour les aciers : caractérisation microstructurale et mécanique des dépôts en nuances ER100 et 316L pour la validation des propriétés d'emploi de pièces industrielles," Accessed: Aug. 25, 2021. [Online]. Available: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-02860062>.
- [10] T. A. Rodrigues, V. Duarte, R. M. Miranda, T. G. Santos, and J. P. Oliveira, "Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM)," *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 7, 2019, doi: 10.3390/ma12071121.
- [11] S. Singh, S. kumar Sharma, and D. W. Rathod, "A review on process planning strategies and challenges of WAAM," *Mater. Today Proc.*, no. xxx, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.632.
- [12] J. M. Hallam, T. Kissinger, Z. Lin, K. Song, W. Ya, and X. Yu, "Parametric and metallurgical investigation of modified 3D AM 80 HD Steel for Wire and Arc Additive Manufacturing," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2101, p. 12049, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2101/1/012049.
- [13] F. R. Teixeira, F. M. Scotti, L. O. Vilarinho, C. A. M. da Mota, and A. Scotti, "Transferability

- of the working envelope approach for parameter selection and optimization in thin wall WAAM,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 119, no. 1–2, pp. 969–989, Mar. 2022, doi: 10.1007/S00170-021-08326-2.
- [14] M. Dinovitzer, X. Chen, J. Laliberte, X. Huang, and H. Frei, “Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure,” *Addit. Manuf.*, vol. 26, no. August 2018, pp. 138–146, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2018.12.013.
- [15] E. Aldalur, F. Veiga, A. Suárez, J. Bilbao, and A. Lamikiz, “Analysis of the Wall Geometry with Different Strategies for High Deposition Wire Arc Additive Manufacturing of Mild Steel,” *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 892, p. 892, Jul. 2020, doi: 10.3390/MET10070892.
- [16] F. Wang, S. Williams, P. Colegrove, and A. A. Antonysamy, “Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 44, no. 2, pp. 968–977, Feb. 2013, doi: 10.1007/S11661-012-1444-6/FIGURES/14.
- [17] S. H. Lee, “CMT-based wire arc additive manufacturing using 316l stainless steel: Effect of heat accumulation on the multi-layer deposits,” *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 2, Feb. 2020, doi: 10.3390/MET10020278.