



HAL
open science

Caractérisation d'une commande thermique du procédé Wire Arc Additive Manufacturing pour l'asservissement

Anthony Dellarre, Nicolas Beraud, Frédéric Vignat, Nicolas Tardif, François Villeneuve

► To cite this version:

Anthony Dellarre, Nicolas Beraud, Frédéric Vignat, Nicolas Tardif, François Villeneuve. Caractérisation d'une commande thermique du procédé Wire Arc Additive Manufacturing pour l'asservissement. Manufacturing'21, UGA, Grenoble INP, CNRS, Jun 2024, GRENOBLE, France. hal-04784356

HAL Id: hal-04784356

<https://hal.science/hal-04784356v1>

Submitted on 15 Nov 2024

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.



Caractérisation dynamique du procédé Wire Arc Additive Manufacturing : vers la mise en place d'une boucle fermée

Anthony Dellarre^(a), Nicolas Beraud^(a), Frédéric Vignat^(a),

Nicolas Tardif^(b), François Villeneuve^(a)

(a) Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP*, CNRS, G-SCOP, 38000 Grenoble, France

*Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes

(b) Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, Lamcos, UMR5259, 69100, Villeurbanne, France

Mail : anthony.dellarre@grenoble-inp.fr

Résumé : Maitriser l'apparition de défauts en WAAM est essentiel pour son usage industriel. La littérature montre que ces défauts sont principalement d'origine thermique et ils nécessitent d'être contrôlés. L'asservissement est une solution pertinente pour répondre à cet enjeu. Le projet ANR METALIC propose d'étudier la faisabilité d'un asservissement de la qualité des pièces par la maîtrise thermique du procédé. La mise en place d'une boucle fermée est basée par un monitoring du bain de fusion à l'aide d'une caméra. Cet article a pour objectif la caractérisation dynamique du système proposé en boucle ouverte. La méthode utilisée est de mesurer le temps de réponse de plusieurs grandeurs à un échelon en consigne : les grandeurs physiques du poste de soudure (tension, intensité, puissance et vitesse de dévidage), la largeur prédite provenant d'un post-traitement d'une image du bain fusion obtenue par une caméra proche infrarouge, et la géométrie du cordon obtenue avec un scan 3D post-process. Les résultats montrent que le temps de réponse du système est de l'ordre de la seconde, soit une distance de l'ordre du centimètre. Cette grandeur est compatible pour un asservissement du procédé WAAM.

Mots clés : Wire Arc Additive Manufacturing, Caractérisation, Dynamique, Pilotage

1 Introduction

Le procédé Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) est un procédé de Dépôt Direct d'Énergie (DED) (Ahn, 2021). En DED, la matière et l'apport d'énergie se font avec le même outil. Plusieurs outils sont disponibles en WAAM dont la torche Gas Metal Arc Welding (GWAM) (Ding *et al.*, 2015) avec la technologie Cold Metal Transfert (CMT) de Fronius®. Cette approche est très performante par son fort taux de déposition de matière et sa large disponibilité de matériaux soudables.

Néanmoins, plusieurs types de défauts (Rodrigues *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2021) ne sont pas maîtrisés. Ces défauts dépendent du matériau (Wu *et al.*, 2018). Des défauts de porosité (Béraud *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2023), de contraintes résiduelles (Sun *et al.*, 2021), de microstructure (Tonelli *et al.*, 2021) ou dimensionnels (Laghi *et al.*, 2019; Yildiz *et al.*, 2020) sont observés. L'origine de ces défauts provient majoritairement d'une mauvaise gestion de la thermique pendant la fabrication (Köhler, Hensel and Dilger, 2020).

La littérature montre que des méthodes sont possibles pour maîtriser l'apparition de ces défauts : l'une d'elles est la réalisation de campagnes expérimentales qui permettent de déterminer des comportements phénoménologiques (Manokruang, 2020), une autre méthode est de développer des modèles numériques simulant le procédé de fabrication afin d'optimiser les trajectoires (Chergui *et al.*, 2022), ou encore la mise en place d'une boucle fermée pour modifier les paramètres de fabrication en temps réel (Stavropoulos *et al.*, 2013). Le projet ANR METALIC (ELGUEDJ, METALIC project ANR-21-CE10-0003) propose d'étudier la faisabilité d'un asservissement de la qualité des pièces produites par la maîtrise thermique du procédé. L'établissement de la boucle fermée est basé sur un monitoring du bain de fusion à l'aide d'une caméra permettant de prédire la largeur du cordon (Dellarre, Beraud, *et al.*, 2023). Elle est illustrée à la Figure 1. La spécificité du poste de soudure réside dans le fait que seul le paramètre synergique (S) peut être modifié efficacement pour piloter le poste de soudure. Ce paramètre modifie l'ensemble des paramètres définissant un cycle de soudure CMT (durée de l'arc, durée de court-circuit, intensité de crête ...)(Dellarre, Béraud, *et al.*, 2023). Une variation de S modifie l'apport de matière et la quantité d'énergie. Ces variations sont systématiquement couplées. Pour conserver une géométrie constante, la vitesse de déplacement de la torche (Travel Speed, TS) doit être ajustée de manière proportionnelle à la vitesse de dévidage (Wire Feed Speed, WFS).

Afin de définir le cahier des charges du contrôleur nécessaire pour un tel pilotage, cet article propose de caractériser la dynamique de ce système en boucle ouverte (Figure 1). La réponse à un échelon d'une variation de S est observée. Une variation de S change les grandeurs physiques de tension, d'intensité, de puissance et de vitesse de dévidage du poste de soudure, ainsi que du TS de la torche pour ne piloter que l'apport d'énergie. Les variations de S agissent directement sur la soudure, modifiant le bain de fusion et par conséquent sur la qualité du cordon déposé. L'étude de la largeur du cordon uniquement sera étudiée. Les essais sont instrumentés à l'aide d'une caméra qui observe le bain de fusion *operando*. Un traitement d'image par un réseau de neurones permet de lier les informations contenues dans les images à la prédiction d'une largeur de cordon (« Conditionneur » sur Figure 1). L'évaluation du temps de réponse (TR) des grandeurs physiques du poste de soudure, de la largeur après solidification et de la largeur prédite par le capteur est analysée en fonction du paramètre synergique de consigne S.

Ce papier mesure et compare les TRs du poste de soudure, de la largeur prédite par la mesure du bain de fusion et la largeur d'entrée à la réponse d'un échelon de consigne au niveau du poste de soudure.

Dans un premier temps, le protocole expérimental mis en place pour caractériser les TRs est présenté. Ensuite, la description de chaque dispositif de mesure et les traitements des données associés sont détaillés. La méthode de mesure des TRs est ensuite définie. Les résultats sont enfin présentés et discutés.

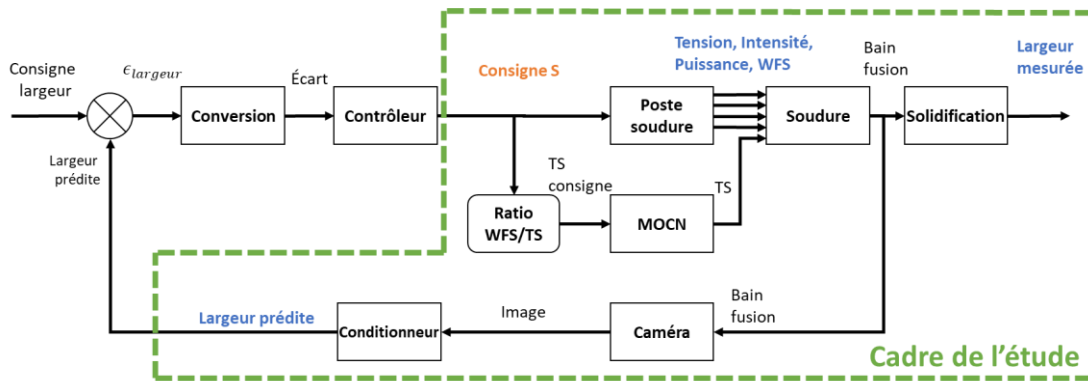


Figure 1 : Framework de l'asservissement et cadre de l'étude. En vert : le cadre de l'étude. En orange : la consigne. En bleu : les différentes grandeurs physiques mesurées.

2 Méthode

2.1 Design de l'expérience

Pour caractériser le WAAM, le TR à un échelon de chacun des éléments du système est mesuré. Pour ce faire, un mur de 3 couches de 200 mm de long est fabriqué avec des paramètres constants. Ces couches permettent de se rapprocher des conditions de fabrication proches de la fabrication additive (s'éloigner du substrat et de l'influence de son préchauffage). Sur la 4^e couche, les 100 premiers millimètres sont fabriqués avec des paramètres constants puis une consigne en échelon est réalisée sur le paramètre synergique S. Deux expériences sont réalisées, une avec un échelon sur front montant et une avec un échelon sur front descendant. Chaque expérience est réalisée 3 fois afin d'évaluer la répétabilité. Pour chaque expérience, la tension, l'intensité, la puissance et la vitesse de dévidage sont mesurées sur le poste de soudure, une largeur est prédite à partir d'une mesure du bain de fusion et une largeur est mesurée après fabrication. Un TR peut être mesuré pour chaque grandeur et il peut être comparé aux autres. La machine outil à commande numérique (MOCN) est considérée comme parfaite et son TR est négligé par rapport aux autres.

2.2 Dispositifs expérimentaux

2.2.1 Conditions de fabrication

Le poste de soudure utilisé est un poste Fronius® TPS 400i. La machine de fabrication est un centre d'usinage Deckel® DMU 50 avec un CN Heidenhain® TNC 640 modifié permettant une fabrication hybride (Figure 2). La machine est capable de faire des opérations soustractives de fraisage et des opérations additives avec une torche de soudure. Le matériau utilisé est l'alliage d'aluminium 5356 (AlMg3Cr) et la loi de soudure utilisée est la loi CMT numéro 4138.

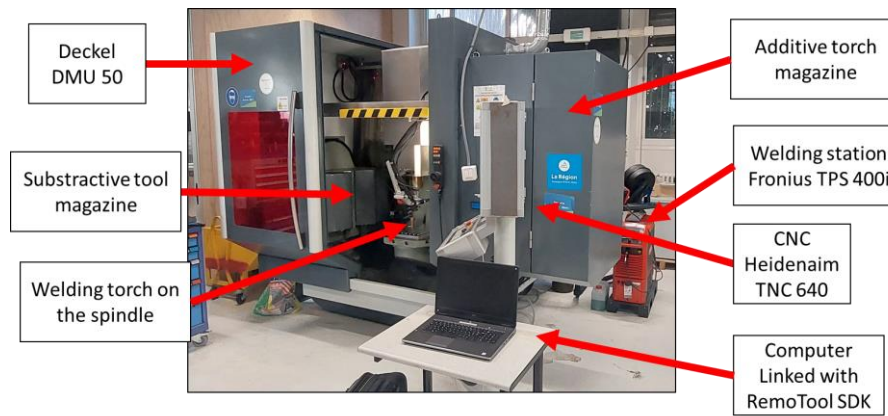


Figure 2 : Machine hybride

Le substrat utilisé est une plaque en alliage d'aluminium 6000 de dimension 250x250x20 mm. 6 murs sont fabriqués sur la plaque avec une distance entre eux de 40 mm. La distance entre les bords de la plaque et le cordon est de 25 mm.

2.2.2 Stratégie de pilotage du poste de soudure

Le pilotage est imposé de façon à conserver une relation de proportionnalité constante entre la vitesse de dévidage du fil et la vitesse d'avance de la torche. Ce ratio permet d'obtenir une aire de section du cordon constante. Une variation de consigne change la quantité d'énergie volumique apportée et le temps de fabrication. En effet, lors d'une diminution de S , l'énergie volumique diminue et le temps de fabrication (lié à TS) augmente donc l'énergie dans la pièce diminue. Lors d'une augmentation de S , l'énergie d'apport augmente. Cette modulation de l'énergie est particulièrement utile pour la maîtrise thermique du procédé.

$$Aire_{section} = \frac{\text{Volume de matière déposé par la torche}}{\text{Vitesse avance de la torche}} = \frac{\pi \phi_{fil}^2 WFS}{4 \times TS} \quad (1)$$

Pour la suite de l'article, la vitesse de dévidage en m/min sera approximée à la valeur du paramètre synergique. La littérature montre que la soudure est satisfaisante lorsque le ratio WFS/TS est égal à 10 (Verbist *et al.*, 2023). Une stratégie de dépôt en zigzag est utilisée. Les trois premiers cordons sont fabriqués avec des paramètres constants : $S = 5$, $TS = 0,5$ m/min. Les paramètres de la dernière couche sont décrits ci-dessous. Un temps d'attente de 10 secondes entre chaque couche est défini.

Tableau 1 : Paramètres de l'échelon

	Expérience 1		Expérience 2	
	S	TS (mm/min)	S	TS (mm/min)
De 0 à 100 mm	4	400	5	500
De 100 à 200 mm	5	500	4	400

2.2.3 Mesure des grandeurs physiques du poste de soudure

La tension, l'intensité, la puissance et la vitesse de dévidage sont enregistrées par le poste de soudure. Le déphasage entre U et I est pris en compte par Fronius pour le calcul de la puissance. Ces grandeurs sont les valeurs moyennes sur un pas de temps défini. Le pas de temps choisi est de 0,1 s, le minimum disponible.

2.2.4 Mesure operando du bain de fusion

Pour la mesure operando du bain de fusion, une caméra Mako G-040B monochromatique CMOS avec un objectif Kow LM35JC (focale de longueur 35 mm) est utilisée. Afin de maintenir une distance constante entre la caméra et le cordon de soudure, celle-ci est fixée sur la torche (Figure 3). Comme le CMT produit un arc intermittent, un trigger est utilisé afin de prendre des images uniquement en l'absence d'arc électrique. Afin de filmer uniquement les émissions infrarouges, un filtre passe-haut coupant les longueurs d'onde inférieures à 800 nm est utilisé.

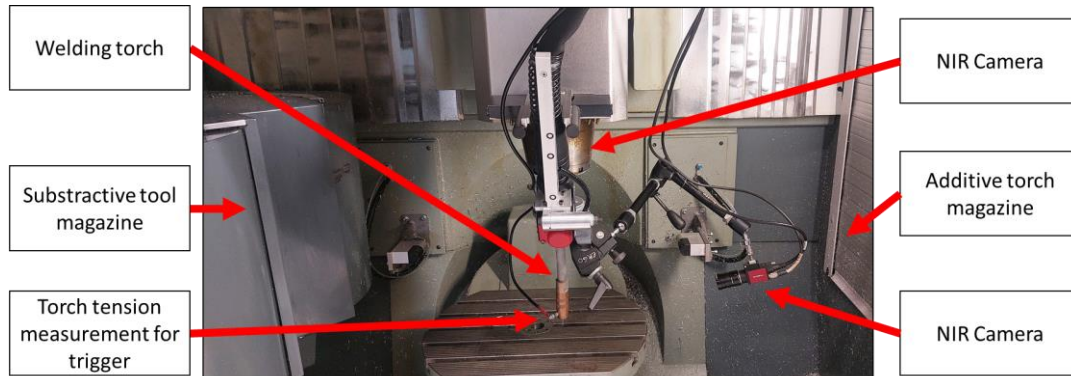


Figure 3 : Fixation de la caméra sur la torche

2.2.5 Mesure de la largeur du mur

Afin de mesurer géométriquement le mur, un scanner 3D HandyScan de Creaform® est utilisé. Le scanner a une résolution spatiale de 0,2 mm et une précision de 0,025 mm. Le repère du scan et le repère de la machine sont recalés grâce à la géométrie de la plaque. Le scan produit un maillage en version STL.

2.3 Post-traitement des données

2.3.1 Données du scan

Après récupération du scan de la plaque, chaque mur est isolé. Pour en extraire une géométrie, le maillage est intersecté avec des plans perpendiculaires au sens de fabrication, espacée de 1 mm, pour obtenir un profil de cordon. Sur ces tranches, contenant les 4 cordons empilés, le dernier cordon est extrait (hauteur fixe) et son contour est approximé par un cercle. La largeur du cordon à cette position de la tranche est considérée comme égale à deux fois le rayon (Limousin *et al.*, 2023).

2.3.2 Données des images

Afin de prédire une largeur à partir d'une image, un réseau de neurones est utilisé. Il prend en entrée une image centrée sur le bain de fusion et prédit une largeur. La méthode utilisée reprend des travaux soumis en article journal.

Le réseau de neurones permet une prédiction de la largeur avec un écart absolu de 0,2 mm en moyenne. Le temps de post-traitement des images est de l'ordre de 0,1 s.

2.4 Détection de passage de seuil

Il n'y a pas d'appareil de mesure avec un trigger principal pour synchroniser les mesures. Chaque mesure liée à la MOCN est synchronisée au niveau du TCP par un temps et une position. Il est alors possible de synchroniser les mesures du poste de soudure avec son horloge interne ayant comme départ commun avec la MOCN le début de la soudure. Il est possible de synchroniser les mesures du scan avec la géométrie du substrat et au bridage sur la MOCN.

Afin de mesurer le TR, il faut détecter pour chaque donnée le passage d'un régime à un autre. La solution retenue est de découper le cordon en 6 portions (Figure 4) représentant les différents régimes de fabrication de la dernière couche. La méthode est illustrée pour la mesure de la puissance du poste de soudure, avec l'expérience d'un échelon en front descendant du paramètre S (Figure 5). La méthode est appliquée à chaque grandeur physique mesurée.

Les données des phases 1 et 2 stabilisées sont approximées par des droites. Deux seuils sont obtenus correspondant à 2,3 fois l'écart type des résidus respectifs (correspondant à un intervalle de confiance à 98% des données). Ces approximations sont prolongées dans les zones de transition.

Lorsqu'un point dans la zone de transition aval se trouve hors de la zone de tolérance, le début du transitoire est mesuré. Le premier point sortant de la zone de transition de la phase 1 est considéré comme le début de transitoire. Le dernier point entrant dans la zone de la 2^e phase est considéré comme la fin de la partie transitoire. Le TR correspond au temps entre le début de l'échelon en consigne et le point mesuré à la fin du transitoire.

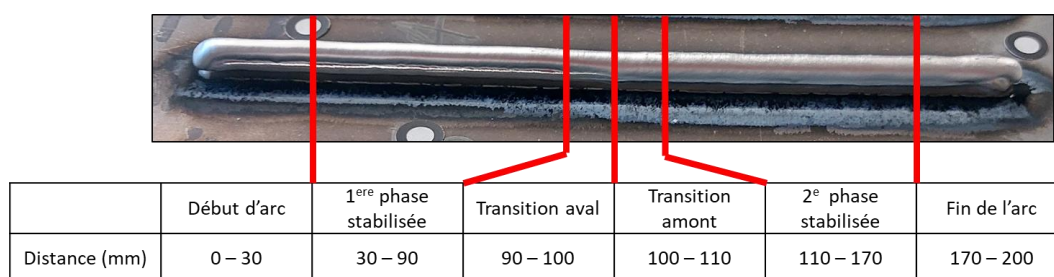


Figure 4 : Découpage du cordon

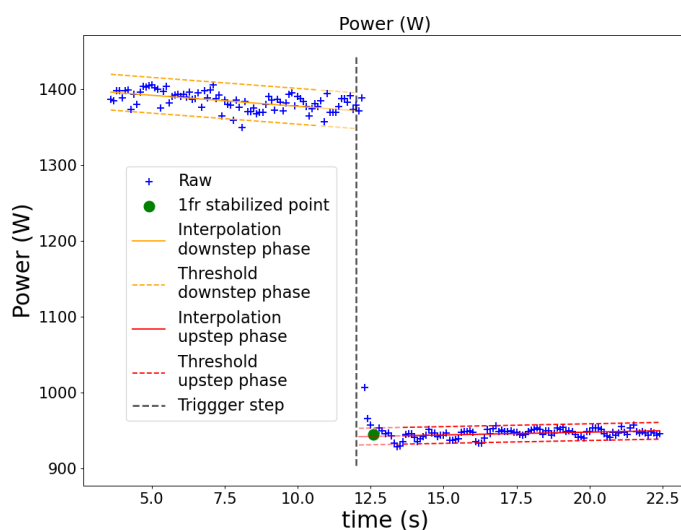


Figure 5 : Détection des passages des seuils pour la détection du TR.

2.5 Partage des données

L'ensemble des données est partagé à l'aide d'un dépôt de donnée (Dellarre, 2024). L'ensemble des graphiques et des données brutes s'y trouve. L'architecture du dépôt est dans la description du dépôt de donnée.

3 Résultat et discussions

Les données sont présentées ci-dessous en deux graphiques : un graphique avec un échelon en front montant avec $S = 4$ puis $S = 5$ (Figure 6) et un graphique avec un échelon en front descendant avec $S = 5$ puis $S = 4$ (Figure 7). Les 6 grandeurs physiques sont affichées : quatre proviennent du poste de soudure (l'intensité, la tension, la puissance et la vitesse de dévidage), une provient des images du bain de fusion (la largeur prédite) et une provient du cordon fabriqué (la largeur mesurée). Pour chaque grandeur physique, 3 lignes sont tracées correspondant aux trois essais pour chaque expérience. Le carré en début de ligne correspond à la détection du début transitoire de la grandeur physique. Le point en fin de ligne correspond à la détection de la fin du transitoire. L'abscisse principale est le temps, dont la valeur 0 correspond au front de l'échelon. L'abscisse secondaire est la distance synchronisée avec le temps. La vitesse de la torche étant modifiée après l'échelon, la répartition de la distance n'est pas la même avant et après l'échelon.

Les grandeurs physiques du poste de soudure sont répétables sur les trois expériences, excepté pour la tension. Cela provient du fait que le poste de soudure est un générateur de courant et que la valeur de la tension est subie. Le poste de soudure a un TR qui n'est pas négligeable. Il est de 0,3 s pour le front montant et de 0,4 s pour le front descendant. La valeur de l'intensité est prise comme référence pour mesurer ce TR. Cette valeur est un ordre de grandeur, car la synchronisation temporelle des données du poste de soudure est mauvaise, de l'ordre de 0,1 s. Le poste de soudure a un retard à la réaction du front de 0,1 s lors d'une consigne en front descendant. Ce retard a une influence sur la suite des phénomènes de soudure.

Le capteur prédisant la largeur du cordon a un retard de 0,2 s par rapport au début de la réaction du poste de soudure. Ce temps peut être décomposé en deux parties, l'un provenant du temps d'exécution de l'algorithme du conditionneur qui est d'environ 0,1 s et du phénomène physique observé dont son temps de réaction est évalué à 0,1 s. La durée du transitoire est très variable. Il varie de 0,1 s à 1,5 s. Ce temps est en moyenne plus longue pour le front montant. Un ordre de grandeur du TR de la soudure et de la boucle de retour de 1 s est retenu, soit une distance d'environ 10 mm.

La largeur vraie mesurée avec le scan 3D a une avance sur le début de son transitoire. Cela provient du fait que la largeur vraie du cordon se crée au niveau du front de solidification. Lorsque le bain de fusion est modifié à la distance d , il a une influence sur la largeur du cordon de quelques millimètres en amont du TCP, car le front de solidification change avec la modification de l'apport d'énergie. Ce front de solidification du front descendant a un temps transitoire plus court de 10 mm par rapport au front montant. La dynamique de la largeur mesurée est plus lente que la dynamique du capteur donnant la largeur prédite.

La réponse des phénomènes physiques observables montre un comportement du poste de soudure et de la dynamique de la soudure différente lors d'un front montant ou lors d'un front descendant. De plus, en fonction de l'état thermique, une même qualité peut être obtenue avec des paramètres de soudure différente. Cela illustre un fonctionnement non linéaire de la physique du WAAM-GMAW CMT.

Le TR de l'ordre à la réponse de la boucle de retour est de l'ordre de la seconde soit une distance de l'ordre du centimètre avec un retard de 0,2 s. Ces résultats de la dynamique du système en boucle ouverte montrent la compatibilité d'un asservissement de la largeur proposé dans le cadre du projet METALIC (Figure 1).

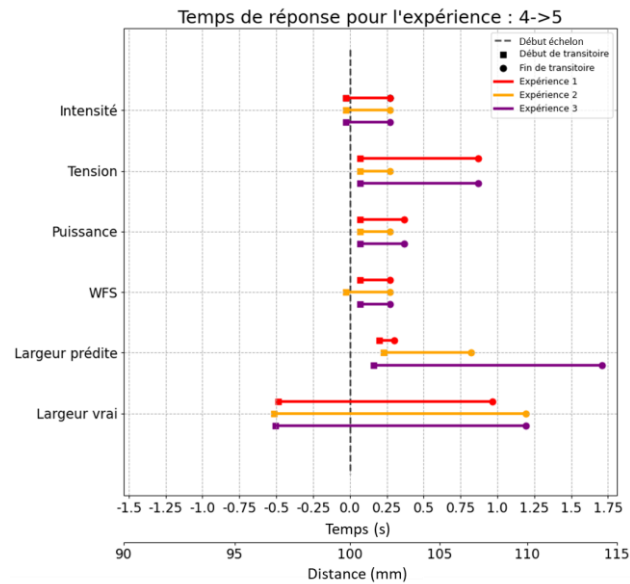


Figure 6 : Temps et distance de réponse pour un échelon de $S = 4$ à $S = 5$

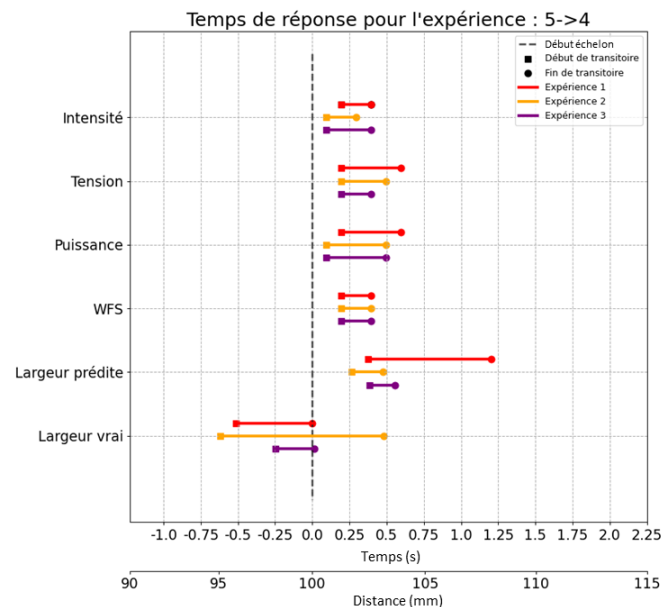


Figure 7 : Temps et distance de réponse pour un échelon de $S = 5$ à $S = 4$

4 Conclusion et perspective

Cet article propose une méthode expérimentale pour caractériser dynamiquement du processus WAAM. 6 grandeurs physiques sont mesurées et comparées : 4 provenant du poste de soudure, une provenant d'un capteur monitorant le bain de fusion et une de la géométrie finale de la pièce solidifiée. Le temps caractéristique du système est de l'ordre de la seconde soit une distance caractéristique de l'ordre du centimètre avec un retard de 0,2 s. La réaction du système est différente lors d'un front montant par rapport au front descendant.

Les résultats montrent que la dynamique du système proposé est compatible avec la mise en place d'un asservissement dans le cadre du projet METALIC. (ELGUEDJ, 2021)

La caractérisation des TRs peut permettre de proposer un modèle dynamique du procédé WAAM. Approximer la dynamique pourrait être réalisé à l'aide d'un système linéaire du premier ordre. Les TRs mesurée peuvent être identifié à un TR à 95%, permettant de retrouver la constant de temps du modèle linéaire de premier ordre. L'étape suivante est l'évaluation de la boucle fermée avec un contrôleur compatible avec la dynamique mesurée (Figure 1). En effet, la paramétrisation du contrôleur devra prendre en compte les effets dynamiques observés afin d'éviter les instabilités.

5 Références

Ahn, D.-G. (2021) 'Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art', *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8(2), pp. 703–742. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7>.

Béraud, N. *et al.* (2022) 'An indicator of porosity through simulation of melt pool volume in aluminum wire arc additive manufacturing', *Mechanics & Industry*, 23, p. 1. Available at: <https://doi.org/10.1051/meca/2021052>.

Chen, X. *et al.* (2021) 'A review on wire-arc additive manufacturing: typical defects, detection approaches, and multisensor data fusion-based model', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(3–4), pp. 707–727. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07807-8>.

Chergui, A. *et al.* (2022) 'Thermal simulation of wire arc additive manufacturing: a new material deposition and heat input modelling', *International Journal on Interactive Design and Manufacturing [Preprint]*. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12008-021-00824-7>.

Dellarre, A., Béraud, N., *et al.* (2023) 'Caractérisation d'un poste de soudure Cold Métal Transfer pour le pilotage du procédé Wire Arc Additive Manufacturing', in *18ème colloque national S.mart.* Carry Le Rouet, France. Available at: <https://doi.org/hal-04278696>.

Dellarre, A., Beraud, N., *et al.* (2023) *Qualify a near-infrared camera to detect thermal deviation during aluminum alloy Wire Arc Additive Manufacturing*. Available at: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2556623/v1>.

Dellarre, A. (2024) 'Caractérisation dynamique du procédé Wire Arc Additive Manufacturing : vers la mise en place d'une boucle fermée'. Recherche Data Gouv. Available at: <https://doi.org/10.57745/QQ9QYA>.

Ding, D. *et al.* (2015) 'Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(1–4), pp. 465–481. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>.

ELGUEDJ, T. (2021) *ANR : METALIC - Model and monitoring basEd real Time process and trAjectory control for metal deposition in addltive manufaCturing*. Available at: METALIC project ANR-21-CE10-0003.

Köhler, M., Hensel, J. and Dilger, K. (2020) 'Effects of Thermal Cycling on Wire and Arc Additive Manufacturing of Al-5356 Components', *Metals*, 10(7), p. 952. Available at: <https://doi.org/10.3390/met10070952>.

Laghi, V. *et al.* (2019) 'Geometrical Characterization of Wire-and-Arc Additive Manufactured Steel Element', *Advanced Materials Letters*, 10(10), pp. 695–699. Available at: <https://doi.org/10.5185/amlett.2019.0019>.

Li, W. *et al.* (2023) 'Processing aluminum alloy with hybrid wire arc additive manufacturing and ultrasonic nanocrystalline surface modification to improve porosity, surface finish, and hardness', *Journal of Manufacturing Processes*, 103, pp. 181–192. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.08.047>.

Limousin, M. *et al.* (2023) 'Effect of temperature and substrate geometry on single aluminium weld bead geometry deposited by Wire Arc Additive Manufacturing: Proposition of an experimental procedure', *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 45, pp. 61–68. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.06.010>.

Manokruang, S. (2020) 'Process Parameters Effect on Weld Beads Geometry Deposited by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)'. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-70566-4_3.

Rodrigues, T. *et al.* (2019) 'Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)', *Materials*, 12, p. 1121. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma12071121>.

Stavropoulos, P. *et al.* (2013) 'Monitoring and Control of Manufacturing Processes: A Review', *Procedia CIRP*, 8, pp. 421–425. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.127>.

Sun, J. *et al.* (2021) 'Residual stress in wire and arc additively manufactured aluminum components', *Journal of Manufacturing Processes*, 65, pp. 97–111. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.021>.

Tonelli, L. *et al.* (2021) 'AA5083 (Al–Mg) plates produced by wire-and-arc additive manufacturing: effect of specimen orientation on microstructure and tensile properties', *Progress in Additive Manufacturing*, 6(3), pp. 479–494. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00189-z>.

Verbist, D. *et al.* (2023) 'Approche phénoménologique du contrôle de la géométrie de cordons en WAAM'. Available at: <https://doi.org/hal-04131351>.

Wu, B. *et al.* (2018) 'A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement', *Journal of Manufacturing Processes*, 35, pp. 127–139. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>.

Yildiz, A.S. *et al.* (2020) 'Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108(11–12), pp. 3391–3404. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05482-9>.