



HAL
open science

Surveillance in process multi-capteurs du WAAM : détection de l'instabilité du procédé par une analyse des signaux électriques

Sarra Oueslati, Elodie Paquet, Mathieu Ritou, Philippe Le Bot, Farouk
Belkadi

► To cite this version:

Sarra Oueslati, Elodie Paquet, Mathieu Ritou, Philippe Le Bot, Farouk Belkadi. Surveillance in process multi-capteurs du WAAM : détection de l'instabilité du procédé par une analyse des signaux électriques. Manufacturing'21, UGA, Grenoble INP, CNRS, Jun 2024, GRENOBLE, France. hal-04784374

HAL Id: hal-04784374

<https://hal.science/hal-04784374v1>

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.



Surveillance in process multi-capteurs du WAAM : détection de l'instabilité du procédé par une analyse des signaux électriques

Sarra OUESLATI^(a,b), Elodie PAQUET^(a), Mathieu Ritou^(a), Philippe LE BOT^(b), Farouk BELKADI^(a)

(a) Nantes Université, École Centrale Nantes, LS2N (Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes, UMR 6004, F-44000 Nantes, France

(b) Nantes Université, IRT Jules Verne, F-44340 Bouguenais, France

Mail : sarra.oueslati@etu.univ-nantes.fr

Résumé : La technique de fabrication additive par soudage à l'arc, également nommée WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) se présente comme une méthode prometteuse pour la fabrication de pièces métalliques de grandes dimensions à faible coût et avec un taux de dépôt important. La complexité de la mise en œuvre du procédé WAAM est engendrée par la diversité des paramètres opératoires et des phénomènes physiques impliqués qui rends sa maîtrise ardue. Cependant, la mise en place d'une surveillance multi-capteurs en cours de fabrication peut contribuer à une meilleure maîtrise et compréhension de celui-ci. Afin de produire une pièce sans défauts et de manière stable, les paramètres opératoires doivent être choisis judicieusement. Toutefois, l'apparition d'écarts géométriques par rapport au modèle souhaité est fréquente. Pendant le dépôt, l'accumulation de ces écarts affecte la distance entre l'extrémité de l'effecteur et la pièce, appelée Contact Tube to Workpiece Distance (CTWD). Il peut en résulter l'apparition d'instabilités dans le procédé, avec notamment des projections. Cette étude a pour but d'étudier les corrélations entre les instabilités du procédé et les signaux électriques monitorés moyennant un système de surveillance en cours de dépôt. Des critères de surveillance sont ensuite extraits à partir de données expérimentales. La corrélation avec les instabilités sera confirmée à l'aide d'une caméra thermique.

Mots clés: WAAM, Monitoring, Fabrication additive, Smart manufacturing.

1 Introduction

La fabrication additive (FA) regroupe l'ensemble de procédés permettant de créer une pièce en superposant des couches successives de matériaux. Elle présente une longue liste d'avantages, notamment la complexité de conception élevée qui n'est pas atteignable par les procédés de fabrication soustractives comme l'usinage et la réduction des déchets de matériaux et des coûts de fabrication (Tomar, 2022). Le procédé WAAM appartient à la famille DED (Directed Energy Deposition) des procédés FA qui impliquent un dépôt de matière sous l'effet d'une énergie concentrée (Ahn, 2021). La technique de transfert à froid de métal (Cold Metal Transfer - CMT) est une variante du soudage Gas Metal Arc Welding (GMAW) développée par Fronius. Elle est principalement utilisée en WAAM pour son faible apport de chaleur, sa grande stabilité et ses faibles projections (Wang, 2017). En GMAW l'apport d'énergie est assuré par un arc électrique créé entre un fil d'apport et un substrat métallique. La particularité du CMT est qu'il implique une action mécanique de rétraction du fil permettant le transfert du métal fondu en court-circuit (Williams, 2016). De plus, des méthodes de protection gazeuse sont mises en œuvre afin de préserver le métal en fusion des contaminants atmosphériques.

En WAAM, l'apparition de défauts constitue un défi majeur. Parmi les anomalies couramment observées, on peut citer la porosité, les déformations par les contraintes résiduelles, les fissures de surfaces les projections et les coulures. Ces imperfections résultent souvent d'une configuration inappropriée des paramètres opératoires, d'une accumulation excessive de chaleur ou encore de l'influence de paramètres liés à l'environnement extérieur, tels que la contamination gazeuse ou des dysfonctionnements de la machine utilisée (Li, 2022; Wu, 2018). Ainsi, un premier pas vers l'optimisation de la qualité des pièces et la stabilité de la fabrication résulte dans le monitoring du procédé (Mu, 2023).

Plusieurs méthodes de surveillance sont utilisées pour le procédé WAAM : le monitoring thermique, le monitoring des signaux électriques de soudage, le monitoring par vision des géométries ou encore le monitoring des signaux sonores (Xia, 2020). En effet, plusieurs travaux ont montré que les caméras optiques et infrarouges se sont avérées efficaces pour la surveillance du procédé et de la pièce, à savoir les dérives géométriques (Dellarre, 2023) et la porosité (Sreedhar, 2012). Cependant, en raison de la sensibilité aux conditions d'éclairage, la collecte de données peut être difficile dans des conditions de soudage. D'autre part, les capteurs acoustiques excellent dans la caractérisation du transfert de métal et la détection de génération de projection (Pal, 2010). Toutefois, il est difficile de discerner avec précision les différents signaux de soudage à cause des interférences et des bruits d'environnement.

Pour produire une pièce par impression 3D, on commence par trancher le modèle CAO virtuellement en couches horizontales avec une hauteur généralement constante ce qui définit la trajectoire de la torche. Ensuite, le réglage des paramètres du procédé tels que la vitesse de dévidage du fil (WFS), la vitesse de la torche (TS) et le débit de gaz, est crucial (Nguyen, 2023; Zhou, 2022). Malheureusement, malgré l'optimisation de ces paramètres, les erreurs géométriques peuvent survenir car la géométrie des couches est influencée par l'historique thermique au sens de la construction, qui dépend des couches précédentes. Lorsque l'erreur géométrique résultante est positive et importante, le stick-out devient trop important, ce qui se traduit par une protection insuffisante, entraînant l'apparition de porosités et l'instabilité du procédé. Cette instabilité se manifeste par la survenue de projections (Hölscher, 2022). De nombreux chercheurs soulignent la nécessité de se concentrer davantage sur l'identification des critères de surveillance qui permettraient de mieux comprendre le procédé WAAM, y compris les projections (Bernard, 2023).

Cet article présente une approche de surveillance multi-capteurs pour la détection d'instabilité du procédé WAAM. La section 2 décrit la procédure expérimentale. Les résultats expérimentaux sont présentés dans la section 3. Dans la section 4, l'identification de l'instabilité dans les signaux conduit à la proposition de critères de surveillance, validée par les données de la caméra thermique.

2 Procédure expérimentale et méthodologie

Les expériences ont été menées à l'aide d'un poste à souder Fronius TPS 500i© qui propose plusieurs lois de synergie, dont la CMT MIX qui a été choisie. L'effecteur de soudage est intégré sur un robot Staübli TX90© (Figure 1).

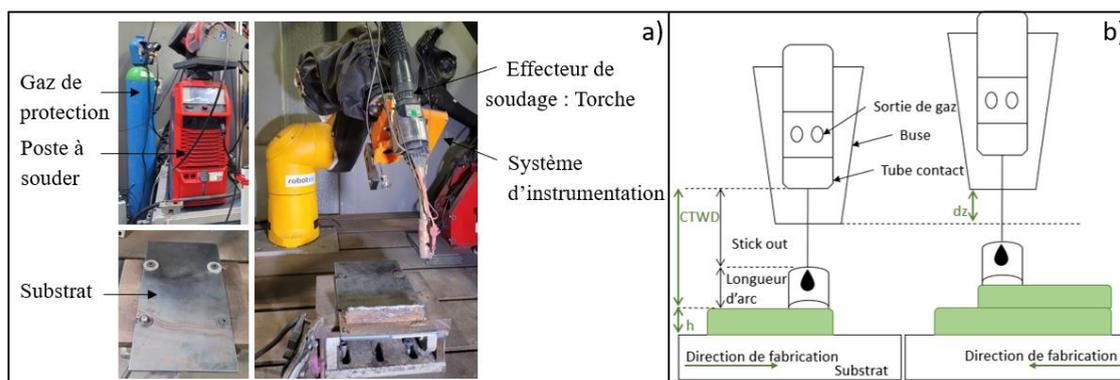


Figure 1: Dispositif expérimental (a), Schématisation du procédé WAAM (b)

Pour toutes les expériences, le débit de gaz a été fixé à 20L/min. Les dépôts ont été effectués avec un fil en acier d'un diamètre de 1mm sur un substrat en acier d'épaisseur 6mm (boulonné sur un support rigide). Les paramètres fixes communs à toutes les expériences sont répertoriés dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1: paramètres process fixés

Matériau du fil d'apport	Diamètre du fil d'apport	Composition du gaz de protection	Débit du gaz de protection	Epaisseur du substrat
ER70S-6	1 mm	(M20 Ar+5-10%CO ₂)	20 L/min	6 mm

Le courant d'arc a été mesuré moyennant une sonde Pico TA167© fixée sur la masse du poste à souder. Quant à la tension, elle est mesurée par une sonde différentielle GE8100 aux points les plus proches possibles, entre le substrat et le tube contact, afin de réduire l'interférence extérieure et le bruit du signal. Pour capter tous les phénomènes, une carte National Instrument© a été utilisée à une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz. Enfin, une caméra Optris© IR a été fixée sur la torche de soudure. Les images obtenues serviront pour la vérification des détections d'instabilité du procédé à partir des signaux électriques de l'arc.

Tableau 2 : Paramètres opératoires expérimentaux

N strate	WFS (m/min)	U _c (V)	I _c (A)	TS (mm/s)	CTWD _{nom} (mm)
1	11	239	25,4	10	14
2	11	239	25,4	10	17
3	11	239	25,4	10	20

Pour le plan d'expérience, trois murs de 24 strates ont été fabriqués comme illustrés à travers le tableau 2. Un incrément de hauteur $\Delta z_{\text{dép}}$ a été établi sur la base d'essais préliminaires et a été maintenu constant pendant tous les essais. Des ajustements de la distance entre l'extrémité de l'effecteur et la pièce CTWD sont effectués manuellement aux 12^e et 24^e strates.

3 Résultats expérimentaux

La figure 2 présente des signaux de tension et de courant observés lors des essais. Les formes d'onde la loi de synergie CMT-MIX choisie montrent une périodicité, de 115 ms environ, alternant des cycles CMT froids et des séquences d'arcs chauds pulsés de 4 ms. Cette synergie garantit un processus stable et rapide avec un apport de chaleur contrôlé (da Silva, 2011).

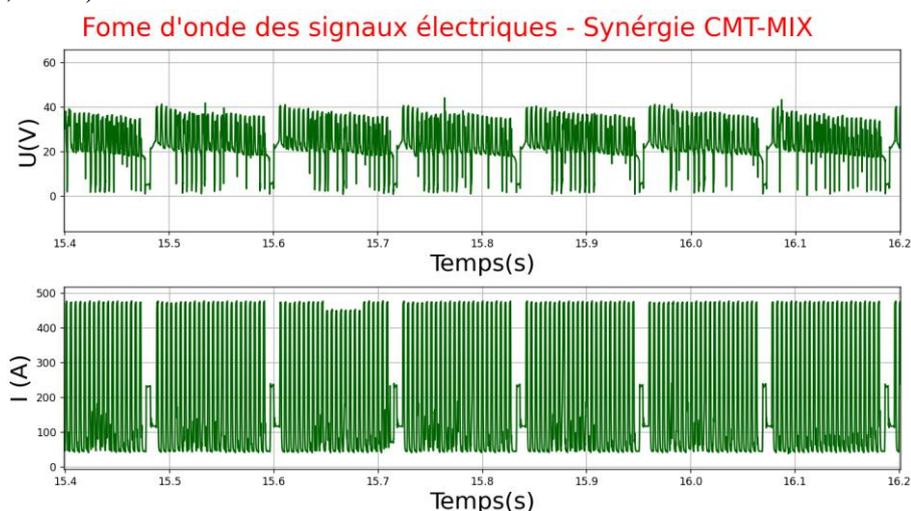


Figure 2 : Mesures de tension et d'intensité pour la loi de synergie CMT-MIX

Lors du dépôt, plus on dépose des couches, plus les erreurs géométriques se cumulent. La différence entre la valeur réelle observée de $\Delta z_{\text{réel}}$ et la valeur $\Delta z_{\text{dép}}$ augmente progressivement. Pour tous les murs, à partir de la 7^{ème} couche, des instabilités du procédé se manifestent sous la forme de projections. Au niveau des signaux électriques, ces instabilités sont illustrées pour la couche 10 du premier mur à la Figure 3. La valeur réelle du CTWD était de 31mm tandis que $CTWD_{\text{nom}}$ était de 14 mm.

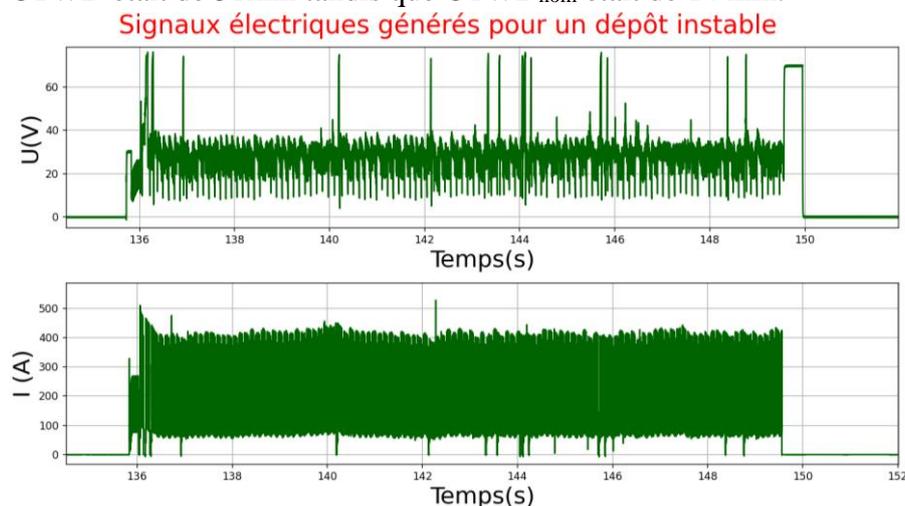


Figure 3 : Signaux électriques d'un dépôt instable (écart important du CTWD par rapport à $CTWD_{\text{nom}}$)

Dès que le CTWD est manuellement ajusté à sa valeur nominale $CTWD_{nom}$ à la 12^e couche, le dépôt reprend un aspect stable, reflété par une diminution importante des projections. La figure 4 montre les signaux électriques de la couche 12 du même mur, juste après l'ajustement manuel à sa valeur $CTWD_{nom}$ de 14mm. On peut observer que les signaux électriques sont plus stables (stationnarité et absence de pics erratiques). Le même comportement est observé entre la 13^e et la 24^e strate pour les trois murs.

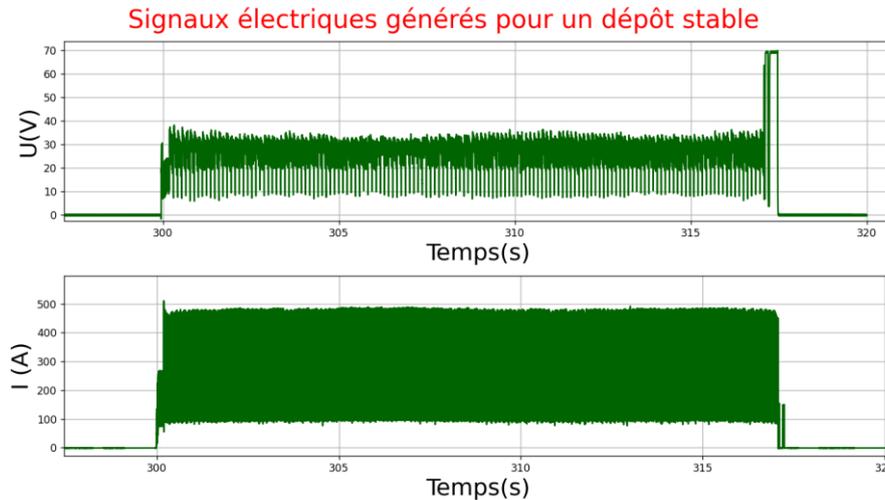


Figure 4 : Signaux électriques d'un dépôt stable ($CTWD_{nom} = 17mm$)

4 Résultats et discussions

Les résultats expérimentaux ont montré une corrélation entre le CTWD et la stabilité des signaux électriques : lorsque l'écart entre $CTWD_{nom}$ et la valeur réelle du CTWD augmente en raison de l'accumulation des écarts géométriques, le dépôt devient instable. En fait, trois variables distinctes et interconnectées sont impliquées pendant de dépôt : l'incrément de hauteur (Δz), la hauteur de la couche (h) et la distance entre l'extrémité de l'effecteur et la pièce (CTWD) illustrés dans la figure 1. Il est important de noter que la hauteur de la couche n'a pas de valeur constante pendant le dépôt (Reisgen, 2019).

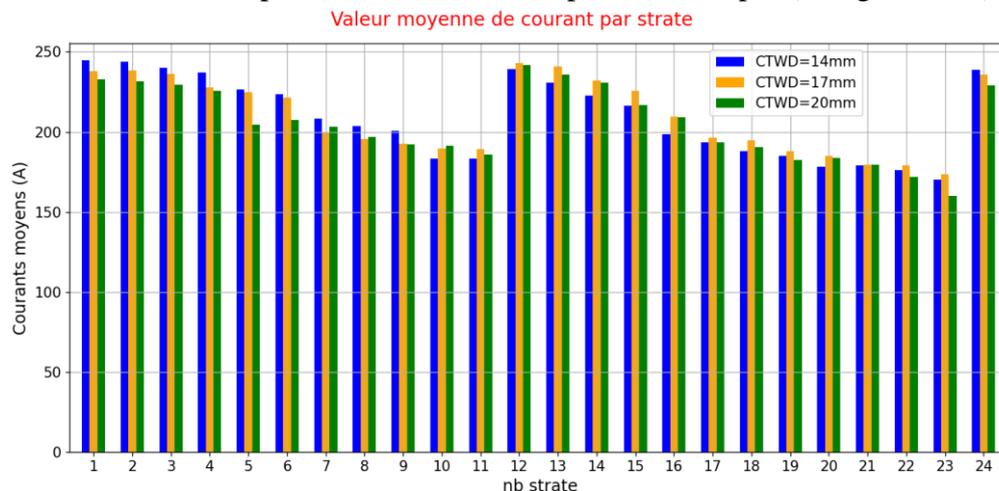


Figure 5 : Courant moyen par strate pour les 3 murs ($CTWD = CTWD_{nom}$ pour les strates 1, 4, 12 et 24)

Le défaut géométrique résultant est l'accumulation des variations de h au fil des strates. En conséquence, CTWD devient de plus en plus supérieur par rapport à $CTWD_{nom}$. Lorsque le CTWD augmente, le générateur Fronius ajuste de manière autonome la valeur

du stick out (SO) afin de maintenir une longueur d'arc constante, ce qui entraîne une augmentation proportionnelle de SO. La valeur élevée du stick-out entraîne une résistance élevée du fil. Le générateur Fronius exécute des mesures correctives en manipulant les courants. La figure 5 montre une diminution des courants moyens au fur et à mesure que le CTWD augmente. Une fois le CTWD corrigé, les courants moyens remontent comme observé dans les strates 12 et 24, approchant des valeurs presque égales au courant de consigne ($I_c = 239A$).

La figure 6 illustre une tension moyenne presque constante et alignée sur la valeur consigne ($U_c = 25,4 V$) pour les trois murs. Les données enregistrées pour les couches 5 et 7 montrent des valeurs plus faibles, en raison de problèmes survenus avec la sonde de tension pendant le dépôt de ces couches. Cette constatation confirme que lorsque le CTWD augmente, entraînant une augmentation de la résistance, le poste Fronius réagit en cherchant à maintenir une tension d'arc constante, ce qui se traduit par une diminution des tensions. Cette corrélation entre les ajustements du CTWD et les changements de courant souligne la capacité de correction en temps réel du générateur Fronius, assurant la stabilité du dépôt de matière malgré des conditions géométriques variables.

4.1 Détection d'instabilités par analyse des pics des dans les signaux de tension

La figure 3 montre que, pour un grand CTWD de 31 mm, les signaux de tension manifestent une instabilité marquée, avec des pics importants et aléatoires. Ce comportement a également été observé pour les autres couches instables. Afin de caractériser ces instabilités, un critère de surveillance est proposé reposant sur la détection de pics dans les signaux de tension. La détection et le comptage de pics ayant des amplitudes supérieures à un seuil fixé T_u comme le montre l'équation (1) permet de quantifier le nombre de pics dépassant un seuil défini T_{pic} qui informe sur la stabilité du procédé.

$$T_u = 1,5 \cdot U_c \quad (1)$$

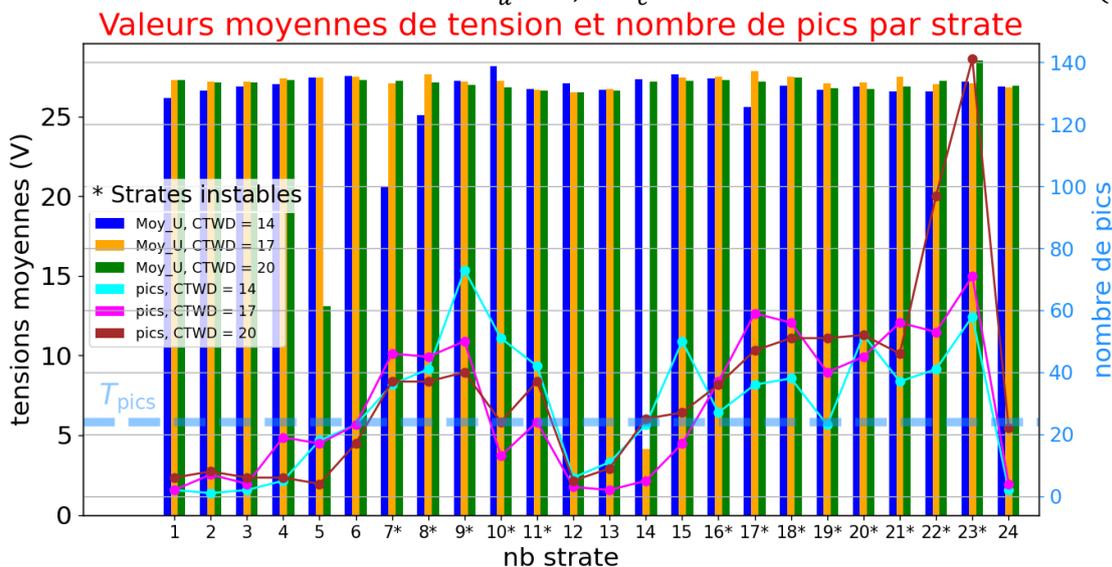


Figure 6 : Tensions moyennes et nombre de pics par strate

La figure 6 illustre l'augmentation du nombre de pics avec l'accumulation de strates, ce qui correspond à l'accumulation d'erreurs géométriques et à l'augmentation de l'écart entre le CTWD réel et $CTWD_{nom}$. Lors de l'ajustement manuel du CTWD à la strate 12, une

diminution du nombre de pics est observée. Cette tendance se répète jusqu'à l'ajustement final du CTWD à la strate n° 24.

Pour valider ce résultat, les images de la caméra infrarouge montrent une abondance de projections dans la zone de dépôt avant la correction du CTWD (voir figure 7.a). Inversement, une diminution notable des projections est évidente dans la couche immédiatement après l'ajustement manuel du CTWD à sa valeur nominale (voir figure 7.b). Ces résultats suggèrent la possibilité d'apprendre un seuil pour le nombre de pics ou de projections, ce qui donnerait des indications précieuses sur la stabilité du procédé.

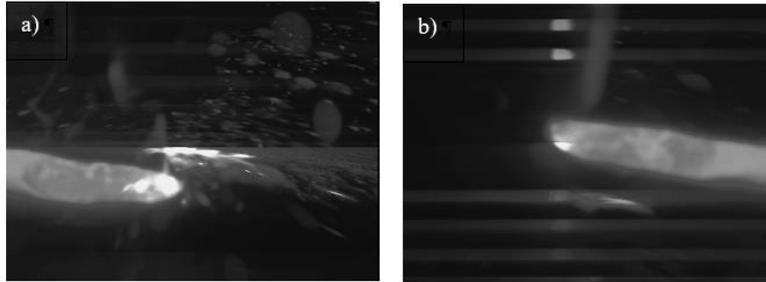


Figure 7 : Images IR de a) dépôt instable, b) dépôt instable

4.2 Analyse fréquentielle des signaux d'intensité

Vue la périodicité de la synergie WAAM CMT MIX, une étude des signaux électriques dans le domaine fréquentiel est menée. Le but de cette étude est de caractériser la dynamique du procédé. Dans la figure 8, on observe les spectres fréquentiels des strates du mur 3 sur une plage de fréquences allant jusqu'à 5000 Hz. Au-delà de la fréquence 600 Hz, les pics sont des harmoniques avec des amplitudes moyennes inférieures à 50 A. Ainsi, l'observation jusqu'à la première harmonique s'avère suffisante, uniquement les fréquences inférieures 600 Hz seront considérées. Pour toutes les figures, les spectres des strates labellisées « dépôt stable » seront tracés en nuances de violet. Quant à celles labellisées « dépôt instable », elles seront tracées en nuances de vert et marqué par un astérisque.

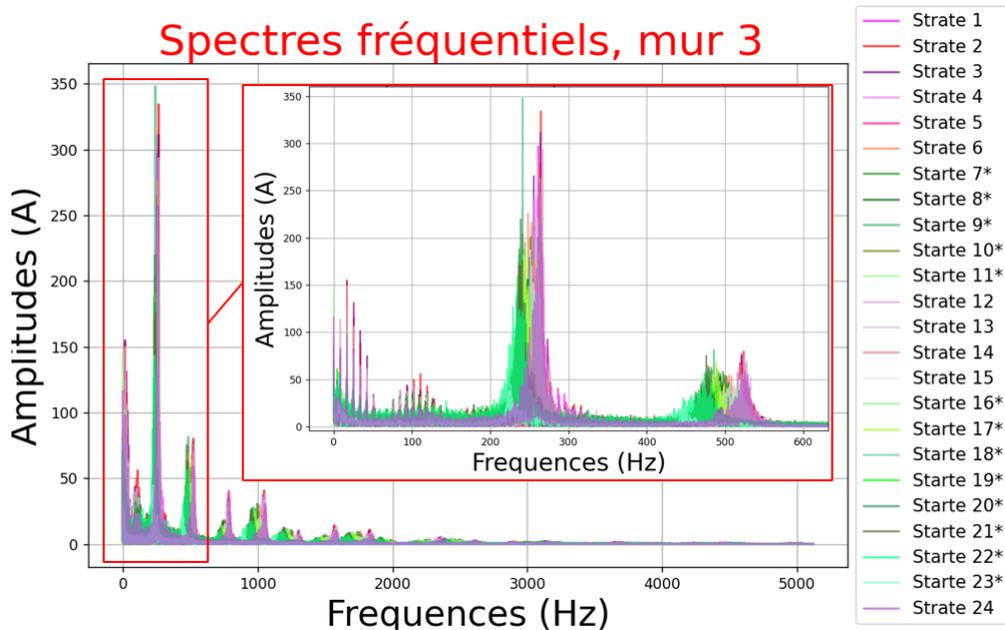


Figure 8 : Spectres fréquentiels des courants des 24 strates du mur 3

On peut identifier deux séries harmoniques. La première est corrélée à la fréquence des cycles CMT MIX (F_{cmt}) d'environ 115ms (zoom a de la figure 9). La deuxième correspond aux pulses (F_{pulse}) de courants autour de 250 Hz.

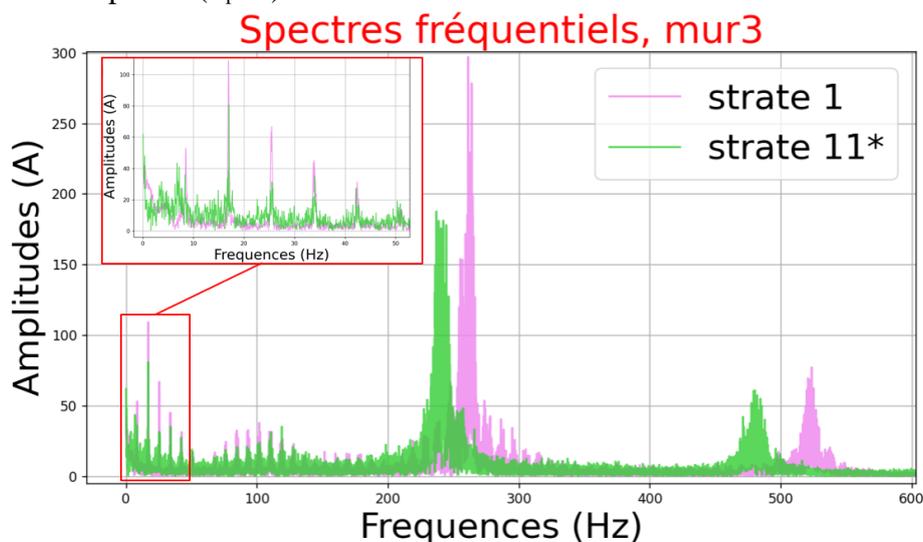


Figure 9 : Spectres fréquentiels de courant d'un dépôt stable (strate 1) et d'un dépôt instable (strate 11)

La figure 9 présente un spectre fréquentiel de dépôt stable et un spectre fréquentiel de dépôt instable. Elle montre que pour les dépôts instables, les harmoniques correspondant aux pulses sont décalées dans le domaine fréquentiels de manière que la fréquence des pulses lors d'un dépôt stable (F_{pulses}) soit inférieure à la fréquence de pulses pour un dépôt instable (F_{pulseS}). Cependant les harmoniques des cycles CMT MIX restent superposées sur les mêmes fréquences F_{CMT} . En addition, on constate un bruit plus important pour les dépôts instables dans les harmoniques des cycles CMT MIX. Les résultats montrent que la régulation des courants du poste à souder Fronius s'effectue non seulement sur les amplitudes des courants, mais également sur les durées des impulsions. Ce constat est confirmé par la comparaison entre la périodicité des pics d'intensité entre un dépôt stable et un dépôt instable illustrées à la figure 10. On peut clairement voir que pour le dépôt instable, la période des pics est supérieure à la période des pics des dépôts stables. La figure 11 met en évidence une diminution de la fréquence des pulses en cas d'instabilité pour les 3 murs, ce qui peut constituer un deuxième critère de monitoring.

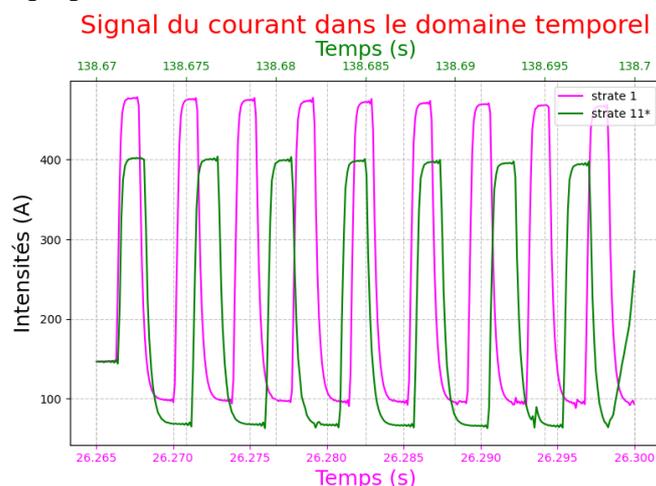


Figure 10 : Périodicité des pics d'un dépôt stable et d'un dépôt instable

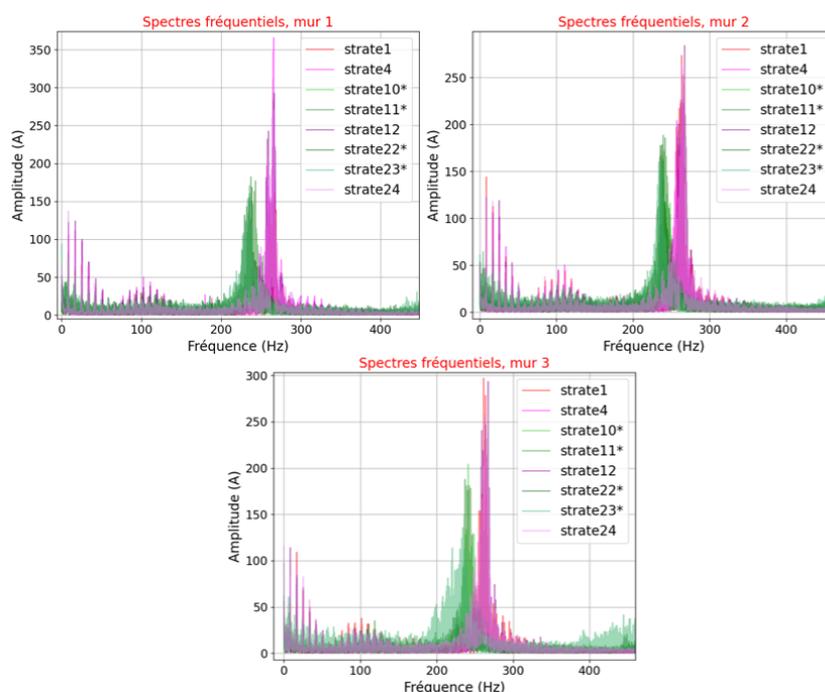


Figure 11 : Spectres fréquentiels d'intensité lors de dépôts stables et instables (*) pour les trois murs.

5 Conclusion et perspectives

A travers cette étude, une corrélation entre le CTWD et l'occurrence d'instabilités en cours de dépôt de matière par WAAM a été établie, grâce au monitoring des signaux électriques. L'analyse de la détection de pics de tension révèle une corrélation entre l'accumulation de couches, les erreurs géométriques et l'augmentation du CTWD. L'ajustement manuel du CTWD diminue considérablement ces pics de tension et rend le procédé stable, avec beaucoup moins de projections. Ceci suggère la possibilité d'établir un seuil de détection de la stabilité du procédé. Les images de la caméra infrarouge valident nos résultats, démontrant une diminution des projections après l'ajustement manuel du CTWD. D'autre part, l'étude des spectres fréquentiels des signaux d'intensité montre que les instabilités peuvent également être détectées par une diminution de la fréquence des pulses par rapport aux dépôts stables. Les résultats présentés dans cet article marquent le début des fouilles des données d'une plus large campagne expérimentale. Des données géométriques et thermiques ont été collectées et sont en cours d'analyse. Enfin des critères de surveillance seront proposés.

Remerciements

Les auteurs remercient le financement et le soutien du programme doctoral PERFORM de l'IRT-Jules Verne.

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), 703–742. <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7>
- Bernard, A., Kruth, J.-P., Cao, J., Lanza, G., Bruschi, S., Merklein, M., ... da Silva, E. J. (2023). "Vision on metal additive manufacturing: Developments, challenges and future trends." *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 47, 18–58. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.08.005>

- da Silva, E. F., M, J. R., Scotti, A., & de Oliveira, J. C. (2011). "Power quality analysis of gas metal ARC welding process operating under different drop transfer modes." In XI Brazilian Power Electronics Conference (pp. 129–135). <https://doi.org/10.1109/COBEP.2011.6085187>
- Dellarre, A., Béraud, N., Tardif, N., Vignat, F., Villeneuve, F., & Limousin, M. (2023). "Qualify a NIR camera to detect thermal deviation during aluminum WAAM." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 127(1), 625–634. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11587-8>
- Hölscher, L. V., Hassel, T., & Maier, H. J. (2022). "Detection of the contact tube to working distance in wire and arc additive manufacturing." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(1), 989–999. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08805-0>
- Li, Y., Su, C., & Zhu, J. (2022). "Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects." *Results in Engineering*, 13, 100330. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100330>
- Mu, H., He, F., Yuan, L., Commins, P., Wang, H., & Pan, Z. (2023). "Toward a smart wire arc additive manufacturing system: A review on current developments and a framework of digital twin." *Journal of Manufacturing Systems*, 67, 174–189. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.01.012>
- Nguyen, V.-T., Minh, P. S., Uyen, T. M. T., Do, T. T., Ngoc, H. V. T., Le, M.-T., & Tien Nguyen, V. T. (2023). "WAAM Technique: Process Parameters Affecting the Mechanical Properties and Microstructures of Low-Carbon Steel." *Metals*, 13(5), 873. <https://doi.org/10.3390/met13050873>
- Pal, K., Bhattacharya, S., & Pal, S. K. (2010). "Investigation on arc sound and metal transfer modes for on-line monitoring in pulsed gas metal arc welding." *Journal of Materials Processing Technology*, 210(10), 1397–1410. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.03.029>
- Reisgen, U., Mann, S., Oster, L., Lozano, P., & Sharma, R. (2019). "Study on Workpiece and Welding Torch Height Control for Polydirectional WAAM by Means of Image Processing." In 2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) (pp. 6–11). <https://doi.org/10.1109/COASE.2019.8843076>
- Sreedhar, U., Krishnamurthy, C. V., Balasubramaniam, K., Raghupathy, V. D., & Ravisankar, S. (2012). "Automatic defect identification using thermal image analysis for online weld quality monitoring." *Journal of Materials Processing Technology*, 212(7), 1557–1566. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.03.002>
- Tomar, B., Shiva, S., & Tameshwer, N. (2022). "A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances | Elsevier Enhanced Reader." *Materials Today Communications*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103739>
- Wang, P., Hu, S., Shen, J., & Liang, Y. (2017). "Characterization the contribution and limitation of the characteristic processing parameters in cold metal transfer deposition of an Al alloy." *Journal of Materials Processing Technology*, 245, 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.02.019>
- Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G., & Colegrove, P. (2016). "Wire + Arc Additive Manufacturing." *Materials Science and Technology*, 32:7, 641-647, DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000073.
- Wu, B. (2018). "A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement." *Journal of Manufacturing Processes*, 35, 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>
- Xia, C., Pan, Z., Polden, J., Li, H., Xu, Y., Chen, S., & Zhang, Y. (2020). "A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system." *Journal of Manufacturing Systems*, 57, 31–45. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.08.008>
- Xiong, J., & Zhang, G. (2014). "Adaptive control of deposited height in GMAW-based layer additive manufacturing." *Journal of Materials Processing Technology*, 214(4), 962–968. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.11.014>
- Zhou, S., Xie, H., Ni, J., Yang, G., Qin, L., & Guo, X. (2022). "Metal transfer behavior during CMT-based Wire Arc Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V alloy." *Journal of Manufacturing Processes*, 82, 159–173. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.07.063>