



**HAL**  
open science

# Acquisition du bain de fusion avec une caméra CMOS pour le procédé de fabrication Wire Arc Additive Manufacturing en aluminium

Anthony Dellarre, Nicolas Béraud, Nicolas Tardif, Frédéric Vignat, Maxime  
Limousin

► **To cite this version:**

Anthony Dellarre, Nicolas Béraud, Nicolas Tardif, Frédéric Vignat, Maxime Limousin. Acquisition du bain de fusion avec une caméra CMOS pour le procédé de fabrication Wire Arc Additive Manufacturing en aluminium. Conference Manufacturing21, Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay [ENS Paris Saclay], Oct 2022, Gif Sur Yvette, France. hal-04011635

**HAL Id: hal-04011635**

**<https://hal.science/hal-04011635>**

Submitted on 2 Mar 2023

**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.



# Acquisition du bain de fusion avec une caméra CMOS pour le procédé de fabrication Wire Arc Additive Manufacturing en aluminium

Anthony Dellarre<sup>(a)</sup>, Maxime Limousin<sup>(a)</sup>, Nicolas Beraud<sup>(a)</sup>, Frédéric Vignat<sup>(a)</sup>, François Villeneuve<sup>(a)</sup>, Nicolas Tardif<sup>(b)</sup>

(a) Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP\*, G-SCOP, 3800 Grenoble, France

\*Institut d'Ingénierie Univ. Grenoble Alpes

(b) Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, LaMCoS, UMR5259, 69621 Villeurbanne, France

Mail : [anthony.dellarre@grenoble-inp.fr](mailto:anthony.dellarre@grenoble-inp.fr)

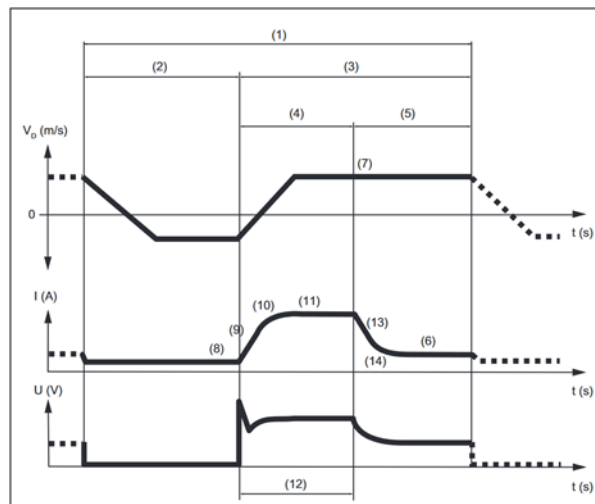
**Résumé :** Afin de produire des pièces fonctionnelles en Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), la maîtrise de la qualité des pièces est un défi majeur. La littérature met en évidence le lien entre les conditions thermiques et les défauts des pièces. Ainsi, la surveillance d'un paramètre thermique, par exemple le bain de fusion dans cette étude, est un indicateur crucial pour décrire la qualité des pièces. L'article vise à étudier la pertinence d'utiliser une caméra CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) pour suivre des métriques dimensionnelles d'une homothétie du bain de fusion pour les pièces fabriquées par WAAM. Dans ce domaine, la littérature manque encore d'informations concernant ce capteur fonctionnant en condition industrielle, notamment pour les alliages d'aluminium compte tenu de sa faible température de fusion et donc de ce faible rayonnement dans le visible-PIR. Une expérience et une méthode numérique

sont développées pour estimer sa sensibilité et sa robustesse. Les critères de validation de la méthode sont présentés et confirment son intérêt.

**Mots clés :** WAAM, Monitoring, Caméra proche infrarouge, Thermique, Aluminium.

## 1 Introduction

Le WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) est un procédé de fabrication additive émergeant. Il permet de produire des pièces complexes et de grandes tailles en superposant des cordons de soudure métallique couche par couche. La matière et l'énergie sont fournies par une torche de soudure montée sur un robot ou une machine à commande numérique (CNC). Plusieurs solutions sont disponibles pour la modulation de l'énergie d'apport (Wu et al. 2018). Le Cold Metal Transfert (CMT) est l'une de ces solutions. Par rapport à d'autres mode de soudage, il présente un faible apport de chaleur, peu de projections et une plus grande flexibilité d'usage. Sa particularité est de lier le déplacement du fil avec un cycle électrique comme illustré dans la Figure 1. Plusieurs matériaux sont disponibles avec cette solution comme l'acier ou les alliages d'aluminium.



Overview of the CMT characteristic parameters

- |                         |                 |
|-------------------------|-----------------|
| (1) CMT cycle time      | (4) Boost phase |
| (2) Short-circuit phase | (5) Burn phase  |
| (3) Plasma phase        |                 |

Figure 1 Cycles électriques et mécaniques du CMT. (Fronius)

Néanmoins, de multiples défauts ne sont pas maîtrisés lors de la fabrication telle que la porosité (Marinelli et al. 2019), les contraintes résiduelles et les déformations (Ding et al. 2015) ou les défauts dimensionnels (Chergui 2021). Leurs origines sont principalement dues à une mauvaise gestion thermique lors du dépôt. Manokruang illustre cette relation en ce qui concerne les défauts dimensionnels en mesurant les dimensions des cordons en fonction de la température du substrat (Manokruang 2020).

Une mesure en cours de fabrication peut être une solution pour comprendre et maîtriser ces défauts (Everton et al. 2016). Ainsi, il est intéressant de monitorer le bain de fusion pendant le soudage (Monier et al. 2017), pour cela, différentes solutions sont exposées

dans la littérature. Une caméra ultrarapide avec un éclairage laser et un filtre passe-bande sur la longueur d'onde du laser mesurant la réflexion de la lumière sur le bain de fusion peut être utilisée. En choisissant judicieusement la longueur d'onde du laser, cette solution est capable de fonctionner indépendamment de l'arc électrique (Halisch et al. 2020). Les mêmes dispositifs peuvent être utilisés avec une source de lumière de fond (Chen et al. 2017). Les contours du fil et du bain de fusion peuvent ainsi être observés en fonction d'une disposition spécifique des appareils. Un microbolomètre peut également être utilisé pour obtenir le champ thermique du bain de fusion (García de la Yedra et al. 2019). Cependant, ces dispositifs sont volumineux et ne peuvent être utilisés dans des conditions industrielles. Une autre solution consiste à utiliser une caméra CCD (Charge-Coupled Device) ou CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) ordinaire et à mesurer le rayonnement lumineux émis thermiquement dans le visible et le proche infrarouge (Xiong et al. 2017). Seuls des phénomènes globaux sont mesurés autour du bain de fusion, mais le dispositif est facile à mettre en œuvre et est adapté aux conditions industrielles. Des mesures dimensionnelles de l'homothétie du bain de fusion, telles que la longueur et la largeur, peuvent être effectuées. La littérature rapporte cette application pour les alliages d'acier (Rouquette et al. 2020) mais pas pour les alliages d'aluminium. De plus, il est nécessaire de caractériser le dispositif en termes de robustesse et sensibilité.

La majorité des dispositifs précédents permet une compréhension fine du bassin de fusion en termes d'échelle, de temps ou de température. Ces dispositifs expérimentaux sont volumineux, nécessitent de rester en conditions de laboratoire et génèrent une grande quantité de données. L'objectif de cette étude est de développer une méthode de mesure du bain de fusion afin de détecter des déviations du processus de fabrication ou de le contrôler en boucle fermée pour des pièces en aluminium en condition industriel. Ainsi, l'information requise est une évolution métrique de l'homothétie du bain de fusion pendant la fabrication. Des acquisitions à basse fréquence et des caractérisations générales du bain de fusion sont suffisantes et une caméra CMOS répond à ces attentes. Si cette solution a été approuvée pour des applications en acier (Xiong et al. 2017; Rouquette et al. 2020), la littérature manque encore d'informations concernant le monitoring du bain de fusion de l'aluminium avec ce dispositif.

Pour évaluer la possibilité d'utiliser des caméras CMOS pour surveiller le bain de fusion d'un alliage d'aluminium, le résultat fourni par cette solution doit être comparable entre différentes expériences, robuste en ce qui concerne les perturbations pendant le soudage et sensibles aux variations du bain de fusion.

## **2 Configuration expérimentale**

Il est difficile d'observer le bain de fusion pendant le soudage à cause des arcs électriques qui saturent le capteur CMOS. Pour surmonter ce problème, une caractéristique du CMT est exploitée : la torche crée un arc intermittent qui, pour l'alliage d'aluminium, commence toutes les 20 ms et dure environ 10 ms (phase (3) sur Fig1). La caméra CMOS BAUMER VCXU-04M a été sélectionnée avec une gamme spectrale comprise entre 400 nm et 1000

nm. Cela correspond aux spectres du visible et du proche infrarouge. Compte tenu de la faible température de fusion de l'aluminium, le flux émis par le bain fondu est quasiment inexistant dans le visible. Cependant, la sensibilité du capteur CMOS dans le proche infrarouge permet de capter une partie du flux rayonné par le bain fondu. En supposant l'émissivité égale à 1 (Monier et al. 2017), la loi de Planck et la sensibilité spectrale de la caméra permettent d'évaluer l'intensité lumineuse intégrée ou perçue par le capteur CMOS en fonction de la température (Fig. 2). Cette intensité lumineuse est liée à la température et peut représenter l'environnement thermique du bain de fusion.

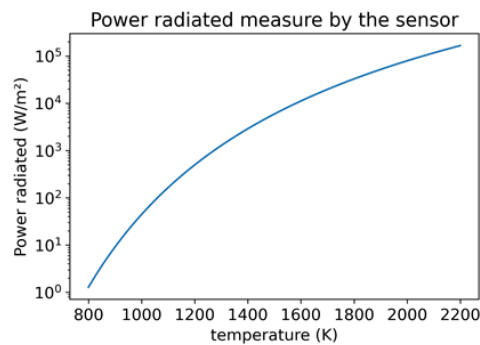


Fig. 2. Puissance lumineuse mesurée par l'appareil

L'appareil est placé à une distance fixe du bain de fusion et prend des images à une fréquence d'images fixes. Il n'y a pas de déclencheur physique connecté à la caméra.

Ensuite, les images sont traitées afin de caractériser les zones thermiques et de les comparer. Comme expliqué précédemment et mis en évidence dans la figure 2, une relation théorique entre la température et la puissance lumineuse est possible. Une interpolation exponentielle semble pertinente entre 800K et 1200K qui correspond à l'état liquide de l'aluminium dans le bain de fusion. Ainsi, un traitement logarithmique est appliqué à l'image pour améliorer le contraste. Ensuite, un seuillage est appliqué. Chaque pixel dont l'intensité est inférieure à 75% de la valeur maximale est mis à 0 (Fig. 3, traitement d'image, ligne rouge) et ceux au-dessus de 75% sont distribués linéairement entre 0 et le maximum (Fig. 3, traitement d'image, ligne verte). Enfin, un seuil est appliqué à 15% de la valeur maximale (Fig. 3, seuil, ligne rouge) pour sélectionner une zone thermique qui est comparée aux autres pendant le processus de soudage. Ces valeurs de seuillage ont été trouvées expérimentalement comme satisfaisantes pour la mesure dimensionnelle. Trois dimensions sont mesurées manuellement avec ImageJ (Schneider et al. 2012) la surface, la longueur et la hauteur. Ces mesures sont utilisées pour décrire une image de la taille de la zone thermique.

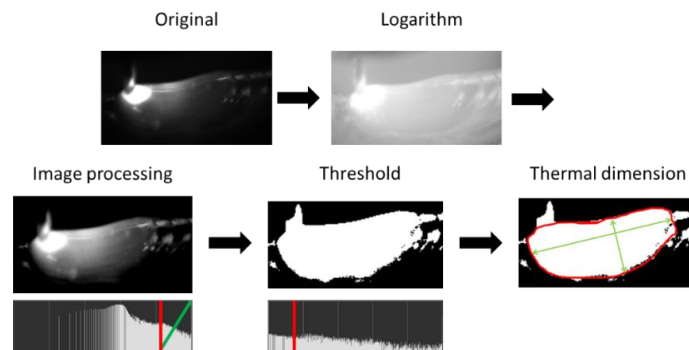


Fig. 3. Traitement des images valides. L'histogramme de l'image précédente est montrée pour l'étape de l'image processing et le threshold

La caméra est installée sur un trépied. Les pièces sont produites avec un robot à 6 axes Yaskawa MA1440 et un positionneur avec 2 axes. Le poste de soudure est un Fronius T.P.S. CMT 4000 Advanced. Afin de maximiser la présence du bain de fusion dans le plan focal de la caméra, un cylindre est fabriqué en utilisant la rotation de la plaque de gauche et le robot ne réalise que le déplacement vertical. Cette expérience est illustrée sur la figure 4 et les paramètres de fabrication sont détaillés dans le tableau 1. Les paramètres de la caméra sont dans le tableau 2.

Tableau 1. Paramètres de fabrication

Loi sur la soudure	Vitesse de déplacement	Vitesse de tir du fil	Gaz	Matériau	Rayon du cylindre
CMT P+Adv 1314	60 cm/min	6 m/min	100% Argon	AlSi4	3 cm

Tableau 2. Paramètres de la caméra

Optique	Temps d'exposition	FPS (image par seconde)	Résolution	Binning	Profondeur de bit
F :2.0 Plan focal : 12 mm	1,5 ms	591	208*114	Vert :2 Horiz :2	12 bits

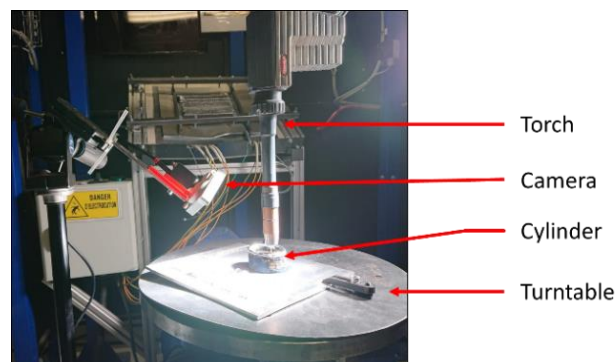


Fig. 4. Orientation de la caméra pendant l'expérience

### 3 Résultats et discussion

Trois résultats sont attendus : une solution répétable pour comparer les résultats entre eux, la robustesse pour faire face aux perturbations et la sensibilité aux variations de la taille du bassin de fusion. Les boîtes à moustache sont utilisées pour présenter les données (Frigge et al. 1989).

#### 3.1 Répétabilité de la méthode

Pour quantifier la répétabilité, le bain de fusion est filmé, et 6 images sont sélectionnées. Les mesures sont réalisées 6 fois pour chaque image en utilisant *ImageJ* (Schneider et al. 2012).

Pour chaque image, la moyenne de toutes les dimensions et leur dispersion, égale à 2 fois l'écart-type, sont calculées. Ensuite, les résultats sont fusionnés et sont présentés dans le tableau 3. Une dimension et une dispersion globale sont obtenues. La dispersion est suffisamment faible pour caractériser l'expérience comme répétable. Une comparaison entre les résultats de différentes expériences est possible.

Tableau 3. Valeurs dimensionnelles

Mesure	Surface	Longueur	Hauteur
Moyenne	7021	145	56
Dispersion	4%	5%	8%

#### 3.2 Robustesse de la méthode

Pour évaluer la robustesse, différents types de bruits observés pendant les expériences sont ajoutés numériquement aux images originales. Ensuite, le traitement et la mesure dimensionnelle sont effectués en suivant le protocole décrit dans la section 2. Chaque mesure sur une image bruitée est comparée à la dimension moyenne de l'image de référence obtenue dans la section précédente. L'écart par rapport à la valeur moyenne pour cette image est calculé et comparé aux écarts présentés dans le tableau 3. Selon cette comparaison, la méthode est qualifiée de robuste ou non. Trois types de bruits sont examinés : les projections pendant le soudage, les variations de taille de la région d'intérêt (ROI) et les images floues.

##### 3.2.1 Projection

Même si le soudage CMT crée peu de projections, certaines sont enregistrées. Il s'agit de petites particules très chaudes qui saturent une petite zone de l'image (Fig.5) et sont encore présentes après le tri numérique. Leur influence sur le résultat doit être quantifiée. Pour ce faire, les artefacts numériques sont mis sur les mêmes 6 images de référence. La figure 6 met en évidence la transformation et les résultats de l'expérience sont dans la figure 7. Toutes les mesures sont contenues dans l'incertitude de la mesure de dispersion. Les artefacts numériques n'affectent donc pas de manière significative les dimensions enregistrées et la méthode est considérée comme robuste en ce qui concerne les projections pendant le soudage.



Fig. 5. Projection dans les images valides

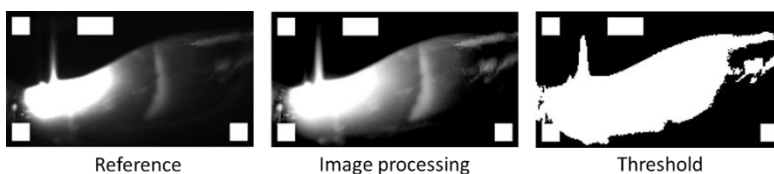


Fig. 6. Artéfacts numériques et processus numérique

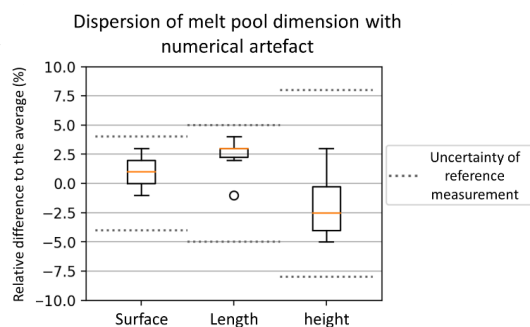


Fig. 7. Résultats pour les artefacts numériques

### 3.2.2 Variations de taille de la région d'intérêt

Le dispositif possède une bande passante maximale qui est définie en fonction du poids de l'image et de la fréquence d'images. Par conséquent, choisir la bonne résolution peut augmenter le taux de rafraîchissement. Pour chaque expérience, la résolution est optimisée en activant des pixels dans le ROI avec le logiciel de la caméra. L'influence des variations de taille du ROI doit être quantifiée. Les images de référence sont modifiées en ajoutant des pixels noirs dans le ROI pour des facteurs de taille de 2 et 12. Les images sont rassemblées dans la figure 8 et les résultats sont présentés dans la figure 9. D'après les résultats, une variation de la taille du ROI n'affecte pas significativement les dimensions. La méthode est donc également considérée comme robuste face à ces déviations.



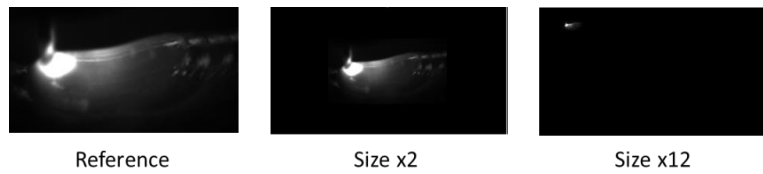


Fig. 8. Variabilité numérique de la taille de la région d'intérêt

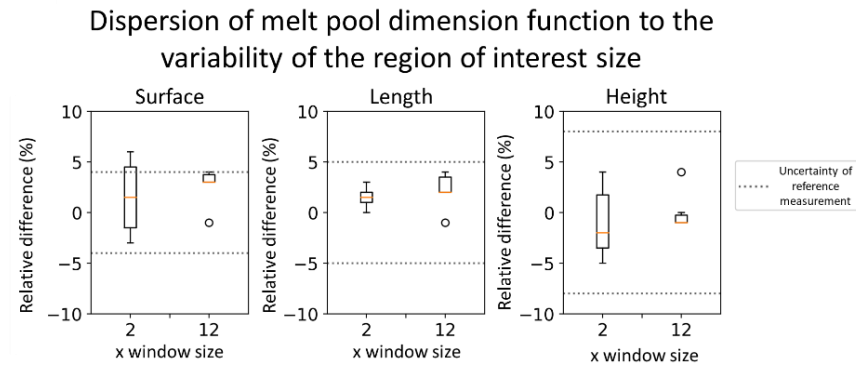


Fig. 9. Résultat pour la variabilité numérique de la taille de la région d'intérêt.

### 3.2.3 Photos floues

Si le bain de fusion est hors du plan focal, l'image est alors floue. Pour quantifier cette influence, un flou est généré numériquement avec un filtre gaussien avec la bibliothèque python `scipy.ndimage` (Virtanen et al. 2020) en utilisant la fonction `gaussian_filter` sur les images de référence. Trois types de flous sont générés avec des sigmas différents (1, 3, 5) correspondant à un flou de plus en plus important. Les images floues sont rassemblées dans la figure 10 et les résultats sont présentés dans la figure 11. Plus le flou est élevé, plus la dispersion sur la surface est importante. Néanmoins, pour un flou généré avec un  $\sigma = 1$  qui est le plus probable, aucun effet n'est détecté. La méthode est considérée comme robuste tant que les conditions ne sont pas trop détériorées.

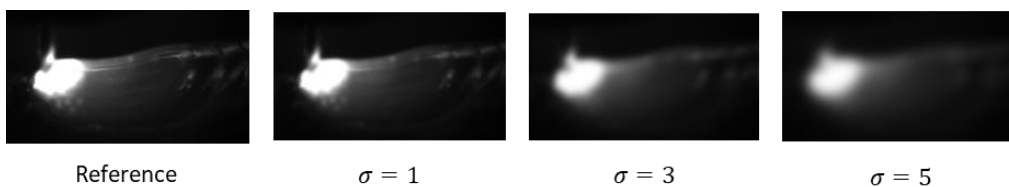


Fig. 10. Fonction numérique de flou à sigma

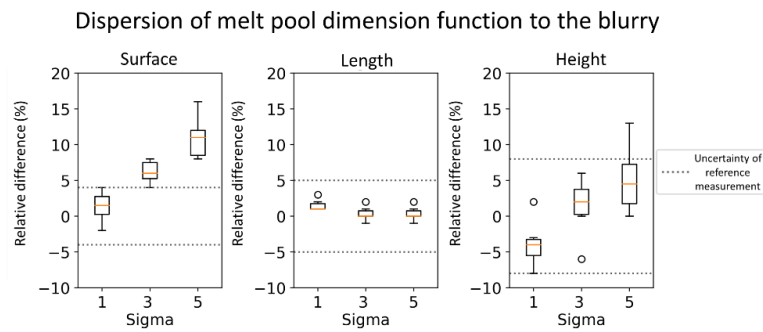
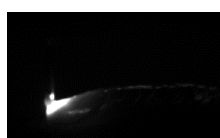


Fig. 11. Résultat pour le flou numérique

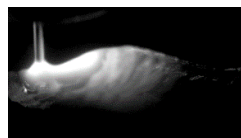
#### 4 Sensibilité de la méthode

Pour quantifier la sensibilité de la méthode, trois cylindres différents sont fabriqués avec des paramètres de soudage différents. Trois vitesses d'avance du fil (WFS) sont choisies : WFS égale à 6 m/min, 9 m/min et 12 m/min. Le poste de soudage fonctionne en mode synergique. Cela signifie que le poste de soudage change automatiquement l'apport d'énergie en fonction du WFS afin de souder correctement. La variation du WFS modifie significativement la soudure et permet de quantifier la sensibilité du dispositif. (Xia et al. 2020).

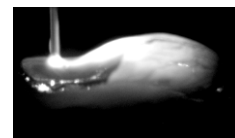
Pour cette expérience, le nombre de pixels actifs de la caméra passe à 360\*214 pixels et le FPS à 550. Les autres paramètres du procédé et ceux de la caméra restent inchangés. Une image de chaque expérience est donnée dans la figure 12 et les résultats sont présentés dans la figure 13. Le résultat est manifeste : plus le WFS est élevé, plus les dimensions de la zone thermique sont élevées. Ainsi, la méthode est très nettement sensible à la variation du WFS et donc aux variations géométriques du bain de fusion.



WFS = 6 m/min



WFS = 9 m/min



WFS = 12 m/min

Fig. 12. Taille de la fonction de la zone thermique par rapport à la WFS

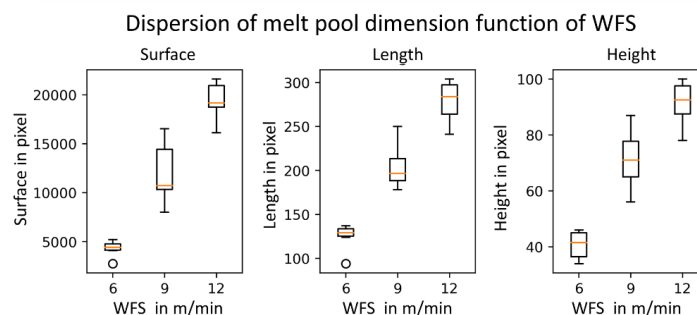


Fig. 13. Résultat pour la taille de la zone thermique

## 5 Conclusion

Une méthode a été présentée dans cet article afin de monitorer le bain de fusion d'aluminium pendant la fabrication WAAM. Une caméra CMOS appropriée a été choisie pour observer le rayonnement proche infrarouge du bain de fusion en utilisant les données de la littérature et les caractéristiques physiques attendues du bain de fusion. Une méthode numérique a été développée pour trier les images et les traiter. Des mesures dimensionnelles caractérisent la zone thermique. Pour évaluer la cohérence entre les différentes mesures, la répétabilité a été vérifiée. Ensuite, la robustesse a été évaluée en fonction de 3 bruits de mesure observés : les projections, la variation de taille du ROI et le flou. Enfin, la sensibilité a été validée en étudiant les variations métriques de l'homothétie du bain de fusion pour différents WFS. Sur la base de nos expériences, nous pouvons conclure que la mesure du bain de fusion avec une caméra CMOS et la méthode proposée est répétable, robuste et sensible.

La faisabilité de l'acquisition du bain de fusion à l'aide d'une caméra proche infrarouge en WAAM avec des alliages en aluminium a été prouvée. Un prototype industriel du dispositif peut être développé en implémentant un déclencheur physique basé sur la mesure de la tension entre la buse et la pièce pour viser les fenêtres de court-circuit permettant de s'affranchir de l'éclairement induit par l'arc électrique, en automatisant la mesure des dimensions de la zone thermique et en le fixant la caméra sur la torche. Il pourra être utilisé pour le monitoring ou le contrôle en boucle fermée.

Enfin, le même protocole peut être réalisé pour l'alliage d'acier afin de comparer la robustesse et la sensibilité de ce dispositif avec l'alliage d'aluminium.

### Référence

- Chen M, Zhang D, Wu C (2017) Current waveform effects on CMT welding of mild steel. *Journal of Materials Processing Technology* 243:395–404.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.004>
- Chergui A (2021) Simulation Based Deposition Strategies Evaluation and Optimization in Wire Arc Additive Manufacturing, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03273221>
- Ding D, Pan Z, Cuiuri D, Li H (2015) Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 81(1–4):465–481.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>
- Everton SK, Hirsch M, Stravroulakis P, Leach RK, Clare AT (2016) Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. *Materials & Design* 95:431–445. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.099>
- Frigge M, Hoaglin DC, Iglewicz B (1989) Some Implementations of the Boxplot. :6.  
<https://doi.org/10.2307/2685173>
- Fronius RCU 500i Operating instructions  
[https://www.fronius.com/~downloads/Perfect%20Welding/Operating%20Instructions/42,0426,0021,EN.pdf](https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect%20Welding/Operating%20Instructions/42,0426,0021,EN.pdf)

- García de la Yedra A, Pflieger M, Aramendi B, Cabeza M, Zubiri F, Mitter T, Reitingner B, Scherleitner E (2019) Online cracking detection by means of optical techniques in laser-cladding process. *Structural Control and Health Monitoring* 26(3):e2291. <https://doi.org/10.1002/stc.2291>
- Halisch C, Radel T, Tyralla D, Seefeld T (2020) Measuring the melt pool size in a wire arc additive manufacturing process using a high dynamic range two-colored pyrometric camera. *Weld World* 64(8):1349–1356. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00892-5>
- Manokruang S (2020) Process Parameters Effect on Weld Beads Geometry Deposited by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *JCM 2020, LNME*, pp 9–14, 2021. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-70566-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-70566-4_3)
- Marinelli G, Martina F, Ganguly S, Williams S (2019) Development of Wire + Arc Additive Manufacturing for the production of large-scale unalloyed tungsten components. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* :16. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.05.009>
- Monier R, Thumerel F, Chapuis J, Soulié F, Bordreuil C (2017) Liquid metals surface temperature fields measurements with a two-colour pyrometer. *Measurement*. <https://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.031>
- Rouquette S, Cambon C, Bendaoud I, Soulié F (2020) Estimation of the heat source parameters during the deposition of SS316L wire with GMAW-CMT process: application to additive manufacturing. *Société Française de Thermique*. <https://doi.org/10.25855/SFT2020-128>
- Schneider CA, Rasband WS, Eliceiri KW (2012) NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat Methods* 9(7):671–675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- Virtanen P, Gommers R, Oliphant TE, Haberland M, Reddy T, Cournapeau D, Burovski E, Peterson P, Weckesser W, Bright J, van der Walt SJ, Brett M, Wilson J, Millman KJ, Mayorov N, Nelson ARJ, Jones E, Kern R, Larson E, Carey CJ, Polat İ, Feng Y, Moore EW, VanderPlas J, Laxalde D, Perktold J, Cimrman R, Henriksen I, Quintero EA, Harris CR, Archibald AM, Ribeiro AH, Pedregosa F, van Mulbregt P (2020) SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nat Methods* 17(3):261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Wu B, Pan Z, Ding D, Cuiuri D, Li H, Xu J, Norrish J (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, Zhang S, Li H, Xu Y, Chen S (2020) Model-free adaptive iterative learning control of melt pool width in wire arc additive manufacturing. *Int J Adv Manuf Technol* 110(7–8):2131–2142. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05998-0>
- Xiong J, Lei Y, Chen H, Zhang G (2017) Fabrication of inclined thin-walled parts in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing with flat position deposition. *Journal of Materials Processing Technology* 240:397–403. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.10.019>