



HAL
open science

Mesure de température du bain fondu en fabrication additive avec une caméra RGB

Loic Jegou, Joël Lachambre, Nicolas Tardif, Thomas Elguedj, Valérie Kaftandjian

► **To cite this version:**

Loic Jegou, Joël Lachambre, Nicolas Tardif, Thomas Elguedj, Valérie Kaftandjian. Mesure de température du bain fondu en fabrication additive avec une caméra RGB. S-MART 2023 : 18ème Colloque national S.mart, Arts et Métiers Paristech ENSAM Aix-en-Provence, Université de Toulon [UTLN], Apr 2023, Carry-le-Rouet, France. hal-04397911

HAL Id: hal-04397911

<https://hal.science/hal-04397911>

Submitted on 16 Jan 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.

Mesure de température du bain fondu en fabrication additive avec une caméra RGB

L. Jegou ^{a,b,*}, J. Lachambre ^a, N. Tardif ^a, T. Elguedj ^a, V. Kaftandjian ^b

^a Univ.Lyon, INSA Lyon, CNRS, Lamcos, UMR5259, 69100, Villeurbanne, France

^b Univ.Lyon, INSA Lyon, LVA, 69100, Villeurbanne, France

* e-mail : loic.jegou@insa-lyon.fr

1. INTRODUCTION

La fabrication additive de pièces métalliques est une technologie qui s'est améliorée en continue depuis les dix dernières années. Elle consiste à fabriquer une pièce en ajoutant de la matière, couche par couche. [1] est un passage en revue des différentes technologies qui existent et de leurs challenges respectifs. Ce papier se concentre plus particulièrement sur deux procédés : la Fabrication Directe par Projection Laser (avec de la poudre), et la fabrication type soudage arc-fil.

Le premier consiste à fondre une petite portion du substrat en surface avec une source laser, et à apporter de la matière sous forme de poudre de manière continue [2]. Le second est plus répandu car il permet la production de pièce plus grande plus facilement. Il consiste à fondre du métal d'apport sur le substrat avec un apport de chaleur créé par un arc électrique [3]. Ces deux procédés ont de nombreux paramètres qui impactent les propriétés mécaniques des pièces produites [4]. Le bain fondu est une zone critique lors de la fabrication et c'est un très bon indicateur de la formation des défauts [5] : apparitions de porosités, manque de fusion... Il existe différentes façons d'observer et de contrôler cette zone, et chaque méthode présente ses avantages et ses inconvénients : un champ de vue global ou réduit, une résolution plus ou moins fine, dans le domaine visible ou infrarouge... Les méthodes non-intrusives sont généralement privilégiées car les mesures par contact peuvent introduire des erreurs non négligeables [6]. Par exemple, la radioscopie est une méthode non-intrusive très intéressante pour observer l'intérieur d'une pièce [7], mais c'est une méthode coûteuse à mettre en place et qui requiert une instrumentation conséquente. L'imagerie optique permet d'observer la surface du bain et de contrôler par exemple sa forme [8,9]. Toutefois, l'identification des contours de la zone fondue est souvent un problème assez complexe,

et l'imagerie optique est couplée à l'imagerie thermique pour observer le champ de température.

Les caméras infrarouges sont largement utilisées pour cet aspect, à la fois en FPDL [10] et en Arc-Fil [11]. Ces appareils restent encombrants et parfois difficilement adaptables sur d'autres procédés, et coûteux par rapport à des caméras CMOS (« *Complementary Metal Oxide Semiconductor* ») ou CCD (« *Charged Coupled Device* ») avec une résolution similaire.

L'imagerie thermique est aussi faisable dans le domaine proche-infrarouge [12] et dans le domaine visible puisque le principe reste le même. Ces méthodes se basent sur de la spectroscopie ou de la pyrométrie. Dans les deux cas, l'émissivité de la surface est un facteur clé dans le calcul de la température [13]. En fabrication additive, il a été montré qu'elle varie autour du bain fondu, lorsque la température augmente [14], ce qui complique les méthodes de mesures avec un champ de vue global.

La pyrométrie à plusieurs couleurs a été introduite il y a une trentaine d'années [15] et il a été montré que plus de deux couleurs n'apportait pas d'avantage significatifs au niveau de la précision de la mesure. Par ailleurs, la pyrométrie multi-chromatique est plus intéressante dans le domaine visible que l'infrarouge [16]. Différentes méthodes ont été envisagées pour effectuer ce genre de mesures. L'une d'elles est constituée de 2 caméras CCD montées sur un appareil avec un miroir divergent qui sépare le chemin optique en deux [17]. Chaque nouveau chemin est équipé d'un filtre à une longueur d'onde précise, et ce dispositif permet de faire de la mesure bichromatique. D'autres dispositifs existent avec des montages différents [18]. Dans toutes ces études, le temps d'exposition de la caméra est un facteur très important. Des temps d'expositions faibles permettent d'observer des zones très lumineuses et donc plus chaudes, tandis que des temps d'expositions plus long permettent

d'observer des zones plus froides. Il y a donc un compromis à faire sur ce paramètre, et l'observation de zones avec des gradients thermiques importants reste problématique.

C'est pourquoi une approche avec plusieurs temps d'exposition a été choisie pour cette étude, pour étudier des zones avec une forte variation de température. La solution présentée est compacte et combine une bonne résolution spatiale avec une thermographie fiable. Il s'agit d'une caméra CMOS avec :

- Une résolution de $6.9 \mu\text{m} \times 6.9 \mu\text{m}$,
- Une imagerie avec multi-temps d'exposition en temps réel,
- Un filtre RGB dans le visible où 2 des 3 canaux sont utilisés pour calculer la température.

Dans un premier temps, quelques rappels sur la loi de Planck sont donnés et la calibration du système est détaillée. Enfin, la dernière partie est une application de cette méthode sur les procédés de fabrication FPD et Arc-Fil où les contours du bain fondu et les gradients thermiques sont tracés sur les images.

2. METHODOLOGIE

2.1. Théorie

La température (T en Kelvin) d'un objet à une longueur d'onde donnée (λ en mètres) augmente avec le flux lumineux qu'il émet (*i. e.* sa luminance notée $L(\lambda, T)$ en $\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1}$). Elle dépend également de l'émissivité (ε) de sa surface, comprise entre 0 et 1.

On distingue 2 types de corps particuliers :

- Le corps noir : il absorbe tous les rayonnements qui arrivent sur sa surface. Sa luminance est notée L^0 et son émissivité est égale à 1 ($\varepsilon_0 = 1$).
- Le corps gris : dont l'émissivité ne dépend pas de la longueur d'onde.

L'approximation de Wien de la loi de Planck permet de calculer la luminance d'un corps noir en fonction de sa température pour une longueur d'onde donnée :

$$L^0(\lambda, T) = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{T\lambda}\right)}, \quad (1)$$

Où $C_1 = 2hc^2 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ et $C_2 = \frac{hc}{k} \text{m} \cdot \text{K}$ sont deux constantes avec :

- $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ (Constante de Planck)
- $k = 1,3806 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ (Constante de Boltzmann)
- $c = 2,9979 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Célérité de la lumière)

Un corps quelconque absorbe seulement une partie du rayonnement incident, et la quantité restante est réfléchi. Ainsi, sa luminance est la somme du flux qu'il émet, et du flux qu'il réfléchit via un environnement translucide avec une transmittance τ (généralement l'air). Dans le cadre de cette étude, le flux réfléchi par l'environnement extérieur est négligeable par rapport au

flux émis car les températures étudiées sont très élevées ($\geq 1000 \text{K}$). De plus, la luminance d'une surface quelconque à une température T_s est nécessairement égale à la luminance d'un corps noir à une température différente T_{CN} tel que :

$$L(\lambda, T_s) = \varepsilon_s \times \tau \times L^0(\lambda, T_s), \quad (2)$$

$$= L^0(\lambda, T_{CN}).$$

Cette équation nécessite de connaître l'émissivité du corps en question pour évaluer sa température. Cette grandeur dépend de nombreux paramètres (la rugosité, l'orientation ou la température de la surface, et la longueur d'onde à laquelle elle est mesurée). La méthode bichromatique consiste à réaliser 2 mesures à deux longueurs d'ondes différentes (λ_1 et λ_2) pour obtenir une expression de la température en fonction du ratio des émissivités :

$$T_s = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)}{5 \ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) + \ln\left(\frac{L^0(\lambda_1, T_1)}{L^0(\lambda_2, T_2)}\right) + \ln\left(\frac{\varepsilon(\lambda_2)}{\varepsilon(\lambda_1)}\right) + \ln\left(\frac{\tau(\lambda_2)}{\tau(\lambda_1)}\right)}. \quad (3)$$

La transmissivité de l'environnement entre la caméra et la surface est supposée constante en fonction de la longueur d'onde ($\frac{\tau(\lambda_2)}{\tau(\lambda_1)} = 1$), et il est possible de faire l'hypothèse de corps gris sur une bande spectrale étroite ($\frac{\varepsilon(\lambda_2)}{\varepsilon(\lambda_1)} = 1$). Dans cette étude, l'objectif est de mesurer la température à l'aide d'une caméra RGB (*Red Green Blue*), où deux des trois canaux seront utilisés dans l'équation (3).

2.2. Système de mesure

Le système de mesure utilisé est une caméra embarquable haute performance (IOI Victorem 51B136) avec une réponse spectrale dans le visible. Elle est équipée avec un capteur Sony IMX250, un filtre infrarouge et un filtre bayer pour avoir des images en couleurs. Les réponses spectrales de tous ces composants sont connues via les données constructeurs (Figure 1).

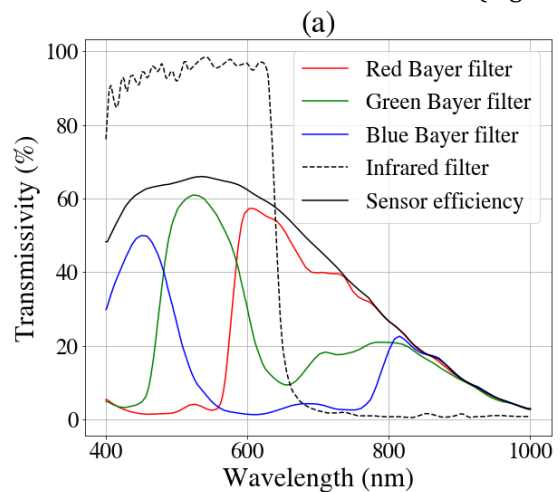


Figure 1: Réponse spectrale de la caméra.

Grâce à ces informations, il est possible de calculer théoriquement l'intensité lumineuse d'un objet observé via cette caméra, dans deux canaux de couleurs (I_{th_rouge} et I_{th_vert}) puis de déterminer numériquement les températures T_1 et T_2 de l'équation (3) lors de la phase de calibration puisque la relation entre l'intensité théorique d'un corps et sa température est connue.

2.3. Calibration

La caméra est calibrée sur un corps noir (HGH infrared RCN1250) pour des températures entre 900 et 1470 K, et une lampe à ruban de tungstène (Osram W1 17 G) pour des températures entre 1900 et 2300 K). Ces deux systèmes sont placés perpendiculairement à l'axe optique, et le flux lumineux est mesuré sur la caméra.

Les profils des intensités théoriques (I_{th}) dans les canaux rouge et vert sont tracés en fonction de l'intensité expérimentale mesurée sur le corps noir et la lampe à ruban de tungstène sur la Figure 2.

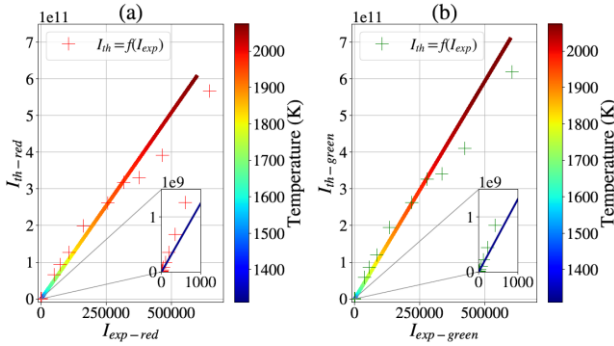


Figure 2 : Intensités théoriques en fonction de l'intensité expérimentale dans (a) le canal rouge et (b) le canal vert.

Il existe une relation linéaire entre ces deux grandeurs :

$$I_{exp-canal} = I_{th-canal} \times \alpha_{canal},$$

Qui est représentée sur la Figure 2 par la droite multicolore où l'échelle de couleur est fonction de la température. Le coefficient α dépend de la configuration de la caméra (selon l'objectif qui est monté dessus, sa distance focale et son ouverture).

Aussi, comme l'expression de l'intensité théorique en fonction de la température est connue : $I_{th-canal} = f(T_{canal})$ (Figure 2), il est possible d'exprimer la température de couleur T_{canal} en fonction de l'intensité expérimentale :

$$T_{canal} = f^{-1}\left(\frac{I_{exp-canal}}{\alpha_{canal}}\right). \quad (4)$$

En connaissant les températures T_{rouge} et T_{vert} , il est possible de calculer les luminances $L^0(\lambda_{rouge}, T_{rouge})$ et $L^0(\lambda_{vert}, T_{vert})$ en choisissant un couple de longueurs d'ondes initiales ($\lambda_{rouge}^0 = 650 \text{ nm}$ et $\lambda_{vert}^0 = 450 \text{ nm}$). Le choix de ces longueurs d'ondes initiales est arbitraire et conditionne le reste de la calibration. Les dernières inconnues de l'équation (3) sont les longueurs d'onde équivalentes λ^{eq} . À l'inverse d'un pyromètre, cette caméra intègre le signal lumineux sur une bande spectrale, et le chemin optique des objectifs qui sont montés dessus est

inconnu. Ainsi l'optimisation de ces longueurs d'onde permet de réduire les erreurs liées à ces incertitudes.

$$T_s = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_{vert}^{eq}} - \frac{1}{\lambda_{rouge}^{eq}} \right)}{5 \ln \left(\frac{\lambda_{rouge}^{eq}}{\lambda_{vert}^{eq}} \right) + \ln \left(\frac{L^0(\lambda_{rouge}^0, T_{rouge})}{L^0(\lambda_{vert}^0, T_{vert})} \right)} \quad (5)$$

L'estimation de λ_{rouge}^{eq} et λ_{vert}^{eq} est faite en minimisant l'écart entre la température calculée via la caméra, et la température réelle des dispositifs de calibration. Pour la configuration utilisée en FPDFL, $\lambda_{rouge}^{eq} = 652 \text{ nm}$ et $\lambda_{vert}^{eq} = 451,1 \text{ nm}$.

2.4. Multi-temps d'exposition

Chaque image de la caméra est composée de pixels encodés sur 8 bits et pouvant prendre une valeur entre 0 et 255. Une zone surexposée correspond à une zone où le capteur est saturé, et la valeur des pixels est proche de 255. Au contraire, quand les valeurs des pixels tendent vers 0, la zone est dite sous-exposée. Pour observer en détail les procédés de fabrication additive, la méthode HDR (*High Dynamic Range*) consiste à prendre plusieurs images d'une même scène à différents temps d'expositions [19]. Le temps d'exposition est le paramètre qui permet de contrôler ce phénomène. Quand l'obturateur reste ouvert un temps très court par rapport à la variation de luminosité observée, le nombre de photons transmis est plus faible, ce qui permet d'observer les zones très brillantes en limitant la surexposition.

Cette technique est très efficace pour observer les zones avec de forts gradients de température. Plusieurs images à différents temps d'expositions sont prises successivement à des temps d'intervalles très courts (par rapport à la vitesse à laquelle évolue la température), et une image médiane est reconstruite sans sur/sous-exposition (Figure 3).

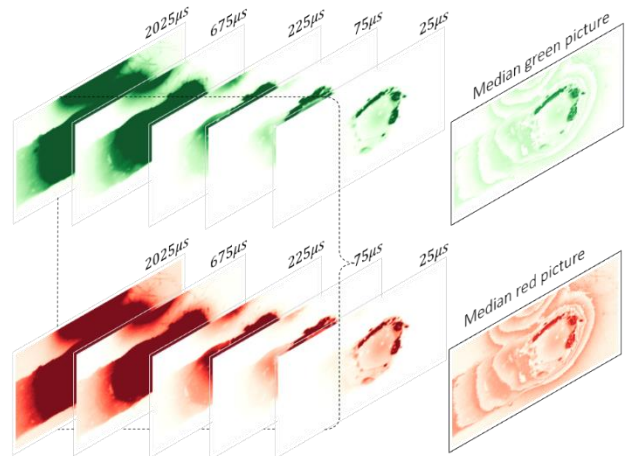


Figure 3 : Image médiane du bain fondu dans les canaux rouges et verts.

Le champ de température est supposé constant pendant l'intervalle de temps Δt où n images sont prises. Cet aspect est discuté plus en détail dans la suite de ce document.

3. OBSERVATION DU BAIN FONDU

3.1. En fabrication directe par projection laser (poudre)

Le dispositif de mesure RGB présenté dans ce document est très compact et facilement ajustable sur n'importe quel type d'installation. La machine de fabrication directe par projection laser est composée d'un bras robot 6 axes (Staubli RX160) équipé avec :

- Un laser à diode avec une longueur d'onde pouvant varier entre 900 et 1200 nm, et un faisceau de diamètre 1.4 mm.
- Un distributeur de poudre avec 2 compartiments distincts pour pouvoir utiliser différents matériaux.
- Un système d'extraction ATEX pour limiter les résidus de poudre dans la cabine de fabrication.
- Une lentille optique avec un filtre à 660 nm.

La caméra RGB est montée co-axialement au laser, au-dessus de la lentille optique, pour avoir une vue de dessus du bain de fusion (Figure 4).

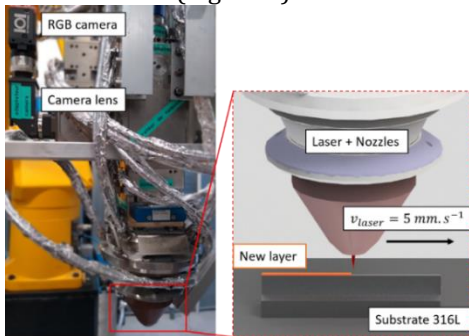


Figure 4 : Dispositif FDPL pour l'observation du bain fondu.

La poudre d'acier inoxydable 316L est déposée sur un substrat en acier inoxydable 316L également. Le débit de gaz, la vitesse et la puissance du laser sont constants au cours de la fabrication ($Q_{poudre} = 3.4 \text{ g. min}^{-1}$; $P_{laser} = 250 \text{ W}$; $v_{laser} = 5 \text{ mm. s}^{-1}$). Pour observer à la fois la zone fondue et la zone solide, on choisit les 7 temps d'expositions suivant : 0.025, 0.050, 0.100, 0.200, 0.500, 1.000 and 2.000 ms, et une série d'images est prise toutes les 160 ms (Figure 5).

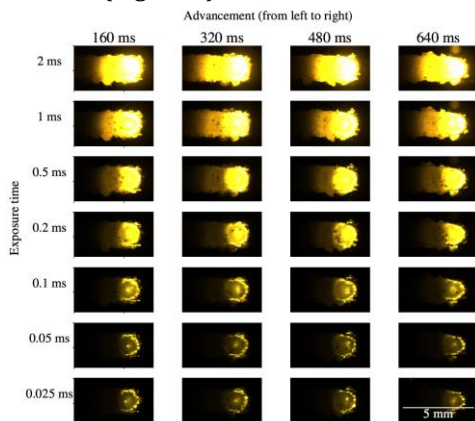


Figure 5 : Images successives du bain fondu avec tous les temps d'expositions.

Chaque colonne correspond à une série d'image prise avec des temps d'expositions différents. Les images de la première ligne sont surexposées au centre (la région la plus chaude), mais elles permettent d'observer la température dans la zone solide (sur le substrat). En combinant les 7 images, on peut étudier à la fois la température de la zone solide et celle de la zone liquide.

Pour ces essais, la vitesse du laser est de 5 mm. s^{-1} , et le temps total de la prise des 7 images est de $\Delta t = 3 \text{ ms}$. Comme la caméra est fixée sur le laser, le déplacement maximal de la zone observée entre la première et la dernière image est de $1.5 \mu\text{m}$, soit environ 1000 fois plus petit que la taille du bain fondu. Dans ces conditions, l'hypothèse de champs de température constant est valable.

La Figure 6 est une image reconstruite en termes d'intensité (dans le canal rouge). Juste à côté, il s'agit de la même image mais en termes de température (b). Globalement, la température augmente lorsque l'intensité augmente. Sur le profil de température, la température de fusion de l'acier inoxydable 316L est tracée en pointillés noirs (1673 K). Cette méthode permet donc de déterminer à la fois la température du bain fondu, et sa forme.

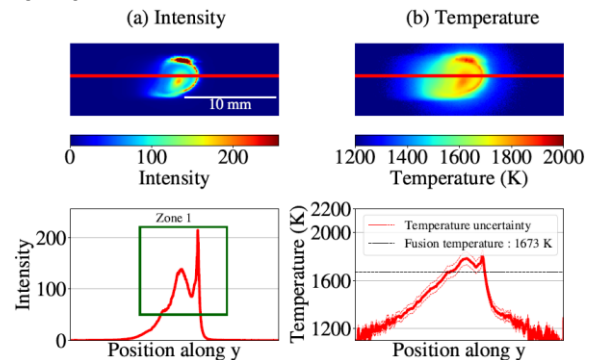


Figure 6 : Evolution de (a) l'intensité et de (b) la température le long du bain fondu.

Sur le graphique de gauche, la zone encadrée est un peu particulière car l'intensité diminue énormément (ce qui se traduit par une diminution de la température calculée). C'est un comportement contre-intuitif car le centre du bain fondu devrait être la zone la plus chaude. Des effets similaires ont été observés avec une caméra infrarouge [20]. Ces effets sont dus à l'oxydation du substrat, autour du bain fondu, et qui résulte en une variation de l'émissivité de la surface observée.

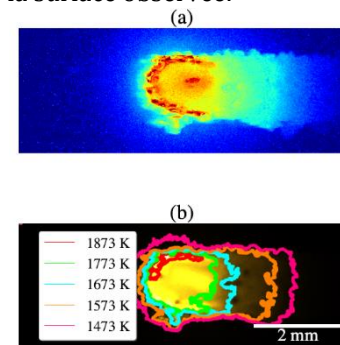


Figure 7 : (a) Cartographie thermique du bain fondu. (b) Isothermes dans et autour du bain.

La Figure 7 montre plusieurs isothermes qui ont été tracés autour de la zone de fusion, à la fois dans la zone liquide et dans la zone solide. Cette cartographie permet de faciliter la visualisation des gradients thermiques.

Finalement, la résolution fine de la caméra permet à la fois d'étudier la température de la surface observée ainsi que les mouvements du bain de fusion pendant la fabrication.

3.2. En fabrication additive Arc Fil

La Figure 8 indique l'installation utilisée pour le procédé de fabrication arc-fil. Les paramètres de fabrication sont les suivants :

- Un fil d'acier de diamètre 1.2 mm est utilisé pour l'apport de matière (OK Aristorod 12.50)
- La vitesse d'avance du fil vaut 3500 mm.min⁻¹.
- La vitesse de déplacement de la torche est de 400 mm.min⁻¹.
- Le gaz de protection est fait d'argon (18%) et de CO₂ (82%) avec un débit de 18 L.min⁻¹.

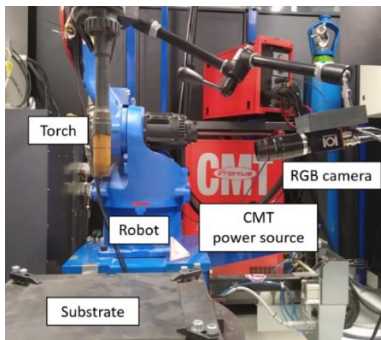


Figure 8 : Dispositif de fabrication additive arc-fil.

La caméra est fixée sur la torche et permet d'observer le profil de la pièce en cours de fabrication. L'acquisition des images est déclenchée entre 2 arcs électriques juste après que le fil soit entré en contact avec le bain de fusion.

De la même façon que pour le procédé FPDFL, on étudie l'évolution de l'intensité et de la température (Figure 9). Dans la zone encadrée, l'intensité atteint la valeur maximale de 255 au niveau de l'endroit où la troche rentre en contact avec le bain. Localement, cette zone est saturée et la température calculée va être sous-estimée car d'après [21], dans ces conditions de pressions particulières, la température de cette zone peut atteindre plusieurs milliers de Kelvin.

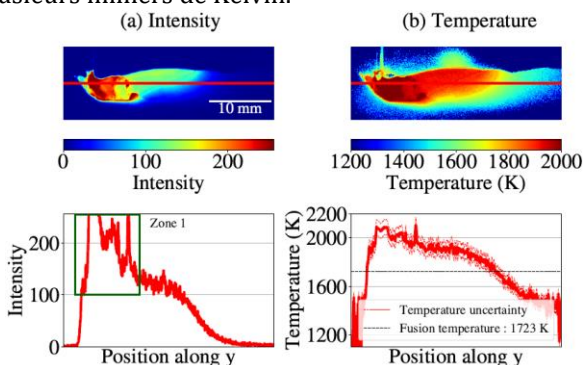


Figure 9 : Evolution de (a) l'intensité et (b) la température le long du bain de fusion lors du procédé arc-fil.

La température de fusion de l'acier de soudure est d'environ 1723 K, et il est encore une fois possible de tracer plusieurs isothermes pour visualiser les gradients de température (Figure 10).

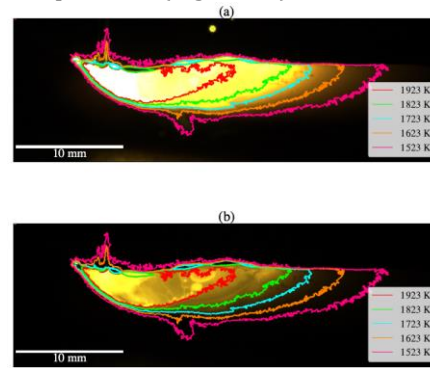


Figure 10 : Isothermes dans et autour du bain de fusion en procédé arc-fil, dessinés sur (a) le plus long temps d'exposition (0.20 ms) et (b) le plus court (0.04 ms).

Les contours sont tracés sur deux images prises successivement à 2 temps d'exposition différents, avec un intervalle de temps de 2 ms entre les 2 acquisitions. Le déplacement maximal de la caméra pendant ce temps-là est de 1.7 μ m (environ 1000 fois plus petit que la taille du bain), donc l'hypothèse d'un champ de température constant est valide. Toutefois, on remarque des différences de forme au niveau de la surface, car le bain fondu reste une zone hautement dynamique.

Finalement, ces images montrent les atouts d'une mesure thermique globale puisqu'il est possible d'étudier sur une même image des gradients thermiques dans des zones liquides et solides.

4. CONCLUSION

La méthode de mesure de température présentée dans ce papier est un système compact basé sur une caméra RGB avec une réponse spectrale dans le domaine visible. Elle utilise le principe bichromatique pour s'affranchir de l'émissivité des surfaces dans le calcul de la température. L'hypothèse de corps gris qui est faite est valable dans un environnement contrôlé, mais peut introduire des erreurs lorsque des perturbations externes apparaissent sur le champ de vue de la caméra (des oxydes, ou l'orientation de la surface qui varie sur les zones liquides).

Cette caméra a permis d'estimer la température dans des zones liquides et solides sur une plage de température allant de 1000 à 2500 K avec une incertitude relative maximal de 5% sur les mesures réalisées. Elle permet également de suivre l'évolution de la position du front de fusion et de visualiser facilement les gradients thermiques d'une pièce. De plus, sa bonne résolution spatiale permet d'étudier la morphologie des zones observées ce qui en fait un bon atout pour la fabrication additive où le contrôle de la zone fondue est crucial pour assurer une bonne qualité de fabrication.

Des phénomènes très rapides peuvent être étudiés selon le même principe, le facteur limitant est la fréquence d'acquisition de la caméra.

RÉFÉRENCES

1. Frazier, W. E. Metal additive manufacturing: A review. *J. Mater. Eng. Perform.* **23**, 1917–1928 (2014).
2. Svetlizky, D. *et al.* Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Mater. Today* **49**, 271–295 (2021).
3. Wu, B. *et al.* A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *J. Manuf. Process.* **35**, 127–139 (2018).
4. Lewandowski, J. J. & Seifi, M. Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties. *Annu. Rev. Mater. Res.* **46**, 151–186 (2016).
5. Scime, L. & Beuth, J. Using machine learning to identify in-situ melt pool signatures indicative of flaw formation in a laser powder bed fusion additive manufacturing process. *Addit. Manuf.* **25**, 151–165 (2019).
6. Jailin, T. *et al.* Measuring both thermal and kinematic full-fields using a single CMOS camera during high temperature tests. *Opt. Lasers Eng.* **158**, 107107 (2022).
7. Gould, B. *et al.* In Situ Analysis of Laser Powder Bed Fusion Using Simultaneous High-Speed Infrared and X-ray Imaging. *Jom* **73**, 201–211 (2021).
8. Sun, Z., Guo, W. & Li, L. In-process measurement of melt pool cross-sectional geometry and grain orientation in a laser directed energy deposition additive manufacturing process. *Opt. Laser Technol.* **129**, 106280 (2020).
9. Gibson, B. T. *et al.* Melt pool size control through multiple closed-loop modalities in laser-wire directed energy deposition of Ti-6Al-4V. *Addit. Manuf.* **32**, 100993 (2020).
10. Liu, S., Farahmand, P. & Kovacevic, R. Optical monitoring of high power direct diode laser cladding. *Opt. Laser Technol.* **64**, 363–376 (2014).
11. Yamazaki, K. *et al.* Measurement of surface temperature of weld pools by infrared two colour pyrometry. *Sci. Technol. Weld. Join.* **15**, 40–47 (2010).
12. Rotrou, Y., Sentenac, T., Le Maout, Y., Magnan, P. & Farré, J. Near infrared thermography with silicon FPA - comparison to MWIR and LWIR thermography. *Quant. Infrared Thermogr. J.* **3**, 93–115 (2006).
13. Schöpp, H. *et al.* Temperature and emissivity determination of liquid steel S235. *J. Phys. D. Appl. Phys.* **45**, (2012).
14. Kozakov, R. *et al.* Weld pool temperatures of steel S235 while applying a controlled short-circuit gas metal arc welding process and various shielding gases. *J. Phys. D. Appl. Phys.* **46**, (2013).
15. Khan, M. A., Allemand, C. & Eagar, T. W. Noncontact temperature measurement. I. Interpolation based techniques. *Rev. Sci. Instrum.* **62**, 392–402 (1991).
16. Duvaut, T. Comparison between multiwavelength infrared and visible pyrometry: Application to metals. *Infrared Phys. Technol.* **51**, 292–299 (2008).
17. Monier, R., Thumerel, F., Chapuis, J., Soulié, F. & Bordreuil, C. Liquid metals surface temperature fields measurements with a two-colour pyrometer. *Meas. J. Int. Meas. Confed.* **101**, 72–80 (2017).
18. Chaitanya Krishna Prasad Vallabh, X. Z. Single-camera Two-wavelength imaging pyrometry for melt pool temperature measurement and monitoring in laser powder bed fusion based additive manufacturing.
19. Konstantinides, K., Su, G. M. & Gadgil, N. High dynamic range video coding. *Handb. Signal Process. Syst.* 165–191 (2018) doi:10.1007/978-3-319-91734-4_5.
20. Shi, D. *et al.* Modeling the effect of surface oxidation on the normal spectral emissivity of steel 316L at 1.5 μm over the temperatures ranging from 800 to 1100 K in air. *Infrared Phys. Technol.* **101**, 699–706 (2016).
21. Morville, S., Carin, M., Carron, D. & Masson, P. Le. 2D axial-symmetric model for fluid flow and heat transfer in the melting and resolidification of a vertical cylinder. *Eur. Comsol Conf.* 13 (2010).
22. Smurov, I., Doubenskaia, M. & Zaitsev, A. Comprehensive analysis of laser cladding by means of optical diagnostics and numerical simulation. *Surf. Coatings Technol.* **220**, 112–121 (2013).
23. Cadiou, S., Courtois, M., Carin, M., Berckmans, W. & Le masson, P. 3D heat transfer, fluid flow and electromagnetic model for cold metal transfer wire arc additive manufacturing (Cmt-Waam). *Addit. Manuf.* **36**, 101541 (2020).