

Observation de la morphologie et cartographie thermique du bain fondu pendant la fabrication additive d'un mur en acier 316L par LMD-p

L. Jegou^{1 2}, J. Lachambre^{1 3}, N. Tardif¹, A. Zaoui¹, V. Kaftandjian,² T. Elguedj¹

¹ Univ-Lyon, CNRS, INSA-Lyon, Lamcos, UMR5259 - 69621 Villeurbanne, France

joel.lachambre,nicolas.tardif,abderrahime.zaoui, thomas.elguedj@insa-lyon.fr

² Univ-Lyon, INSA-Lyon, LVA - 69621 Villeurbanne, France loic.jegou, valerie.kaftandjian@insa-lyon.fr

³ Univ-Lyon, CNRS, INSA-Lyon, UCBL - MATEIS, UMR5510, F-69621 Villeurbanne, France joel.lachambre@insa-lyon.fr

Résumé — Un système d'acquisition thermique sans contact est utilisé pour cartographier la température d'une pièce métallique en cours de fabrication par LMD-p. Un mur en acier inoxydable (316L) est imprimé couche par couche, et une caméra composée de capteurs CMOS et d'un filtre Bayer RGB dans le spectre visible ($[400; 1000]nm$) positionnée au dessus de la zone d'impression capture des images de la zone fondue liquide. Ce dispositif permet d'une part de calculer la température de cette zone et d'autre part d'observer l'évolution de la morphologie du bain fondu.

Mots clés — thermographie bichromatique, bain fondu, fabrication additive, LMD-p.

1 Introduction

La fabrication additive de pièces métalliques est un procédé de plus en plus présent dans l'industrie car il permet de répondre à des problématiques de personnalisation, d'agilité des moyens de production, de réduction d'assemblage et de réparation de pièces existantes. La technologie utilisée dans ce projet est la fabrication par *Laser Metal Deposition with powder* (LMD-p). Elle consiste à fondre localement la surface d'une pièce grâce à un laser focalisé, cette zone est appelée le *bain fondu*, puis de la poudre de métal est projetée dans ce dernier et ce dépôt de matière se solidifie en refroidissant. Afin d'éviter les phénomènes d'oxydation pendant le procédé, l'environnement est inerté avec de l'Argon. Les métaux utilisés pour la fabrication sont généralement des alliages de titane, chrome-cobalt, tungstène ou d'acier inoxydable. Au cours de cette étude, c'est de l'acier 316L qui est utilisé. Les phénomènes mécaniques et thermiques mis en jeu lors de la fabrication entraînent des changements de phase, de structure et peuvent ajouter des contraintes résiduelles dans la pièce après refroidissement. Plusieurs paramètres influent sur le résultat final dont : la puissance du laser, sa vitesse de déplacement, le débit massique de poudre, la hauteur d'une nouvelle couche de matériau... L'objectif de cette étude est d'observer l'évolution de la morphologie du bain fondu avec une caméra dans le visible, et de le cartographier thermiquement à partir de ces images. L'utilisation de cette méthode par J. Zalameda et al. a permis d'étudier des gammes de températures élevées au cours d'un procédé de fabrication additive différent (Electron-beam free form fabrication, [5]). F. Bardin et al. l'ont appliqué pour étudier la température au cours d'une soudure laser avec de l'acier inoxydable [1]. Enfin, Doubenskaia et al. ont étudié la température et la morphologie du bain fondu sur des alliages de titane avec des caméras infrarouge ([3], [4]).

2 Mise en oeuvre expérimentale

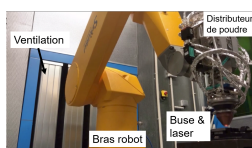


FIGURE 1 – LASCOL

Le dispositif LASCOL est une cabine ouverte de LMD-p. Il comprend un bras robot Staubli 6 axes (RX160) sur lequel sont montés : un laser à diode (Laserline LDM2000), une buse Precitec ($\varnothing \text{ faisceau} = 1,4mm$) et un distributeur de poudre (Oerlikon Twin 150). La cabine est équipée de systèmes d'extraction ATEX et le système est piloté par des packdrives Schneider (Figure 1).

Distributeur de poudre		Substrat	
Type de gaz	Argon	Matériau	Acier S235
Débit du gaz	$6L.min^{-1}$	Longueur	9.95mm
Débit massique de poudre	$3.4g.min^{-1}$	Epaisseur	1.02mm
Vitesse du mélangeur	30%		
Laser		Murs	
Puissance	350.0 – 250.0W	Matériau	Inox 316L
Vitesse du laser	$5mm.s^{-1}$	Longueur	60mm
		Nombre de couches	20
		Epaisseur de couche	0.2mm
Refroidisseur		Circuit d'inertage	
Consigne buse	20.0 °C	Débit	$8.8L.min^{-1}$
Consigne source	14.0 °C		
Pression	30Psi		

TABLE 1 – Paramètres du procédé LMD-p et dimensions des éprouvettes

2.1 Préparation des éprouvettes

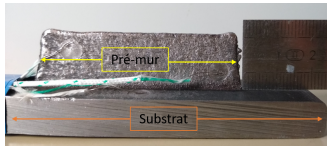


FIGURE 2 – Exemple d'éprouvette (longueur du pré-mur = 60 mm)

Dans le cadre de ces essais, 2 éprouvettes sont fabriquées puis instrumentées avant d'être étudiées. Une éprouvette est composée d'un substrat (un pavé en acier S235) sur lequel est construit un pré-mur en acier inoxydable (316L) à l'aide du procédé LMD-p (Figure 2). Les caractéristiques des éprouvettes et de la fabrication additive sont résumées dans le tableau suivant (Tableau 2.1).

Les éprouvettes sont ensuite mises et maintenues en position dans un étau. Les surfaces latérales du substrat sont en contact avec les mors de l'étau, et sa surface inférieure est à l'air libre (Figure 3). Le bras robot est placé au-dessus des pré-murs et 20 nouvelles couches sont imprimées avec un déplacement aller-retour du laser (balayage en "S", Figure 4).

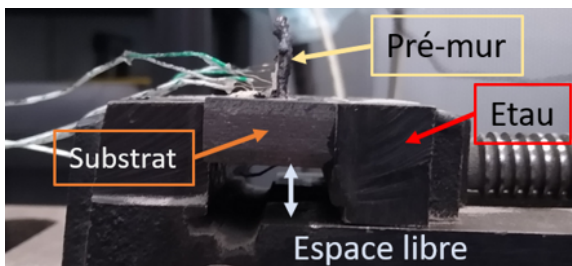


FIGURE 3 – Maintien en position des éprouvettes

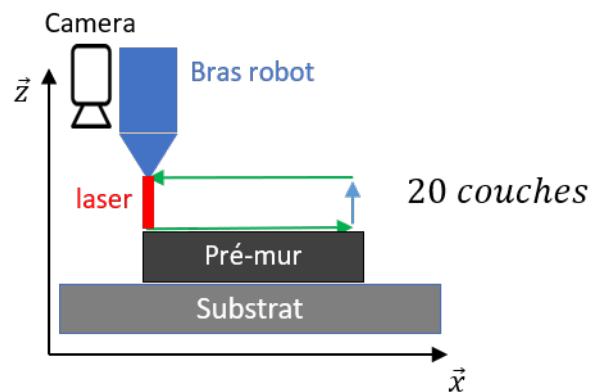


FIGURE 4 – Déplacement du bras robot

2.2 Mesures et capteurs

Pour récupérer les données thermiques lors de la fabrication d'un mur en impression LMD-p, une caméra est utilisée : Caméra compacte (IOI Victorem 51B163), fixée sur la buse (Figure 4). Elle permet d'obtenir des images du bain fondu en vue de dessus à l'aide d'un accès visuel coaxial au faisceau laser.

Le choix d'une caméra avec une bande spectrale dans le visible permet de ne pas observer le faisceau direct du laser qui a une longueur d'onde $\lambda \in [900; 1200]nm$. Une caméra CMOS a une sensibilité importante aux fortes températures. Elle est capable de mesurer sur une étendue d'environ 150 °C à partir d'une température supérieure à 700 °C (lorsque l'objet commence à rayonner dans le visible). Pour augmenter l'étendue de mesure, une stratégie de multi temps d'exposition est mise en place. Des slots d'images sont prises toutes les 0,4s. Chaque slot correspond à 5 images prises à des temps d'expositions croissant à une fréquence de 5 MHz. En faisant l'hypothèse de stationarité du champ de température pendant la période de la slot, il est possible de reconstruire une cartographie thermique sur une étendue de 1000 °C à partir de 700 °C. Cinq temps d'expositions sont choisis pour cette expérience, $t_{exposition} = (25; 75; 225; 675; 2025)\mu s$ (Figure 5).

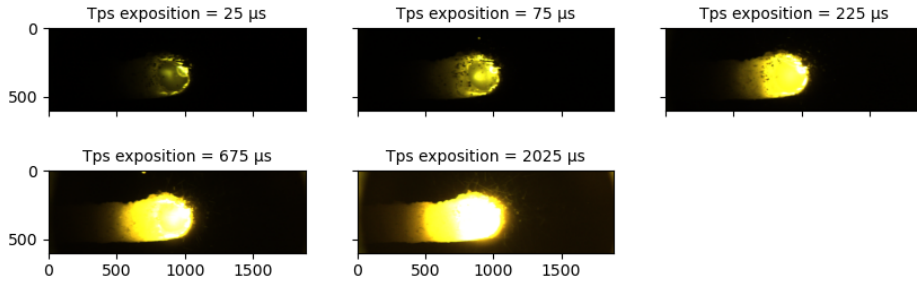


FIGURE 5 – 5 images prises au même instant t pour 5 temps d'exposition différents

Le système d'acquisition complet est composé :

- d'un *filtre Bayer* qui permet de séparer le signal reçu (polychromatique) en 3 canaux monochromatiques rouge, vert et bleu.
- d'un filtre infrarouge qui permet d'atténuer les radiations avec une longueur d'onde supérieure à 750nm.
- du capteur CMOS avec une efficacité variable en fonction de la longueur d'onde.

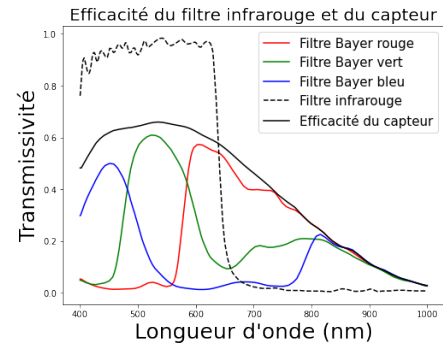


FIGURE 6 – Efficacité du filtre Bayer × Efficacité du filtre infrarouge et du capteur

2.3 Calibration

2.3.1 Principe de la mesure de température bichromatique

La luminance d'un corps noir est calculée d'après l'équation de Planck telle que :

$$L^0(\lambda, T) = \frac{2hc^2\lambda^{-5}}{\exp(\frac{hc}{\lambda kT}) - 1} = \frac{C_1\lambda^{-5}}{\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1} \quad (1)$$

- $L^0(\lambda, T)$: Luminance d'un corps noir à la longueur d'onde λ , à une température T donnée ($W.m^{-2}$)
- T : Température du corps étudié (K)
- h : Constante de Planck ($6.6255 \times 10^{-34} J.s$)
- c : Célérité ($2.998 \times 10^8 m.s^{-1}$)
- λ : Longueur d'onde (m)
- k : Constante de Boltzmann ($1.3805 \times 10^{-23} J.K^{-1}$)
- C_1 : Constante ($C_1 = 2hc^2 = 1.19106 \times 10^{-16} W.m^2$)
- C_2 : Constante ($C_2 = \frac{hc}{k} = 0.014388 m.K$)

On définit la luminance d'un corps quelconque $L(\lambda, T) = \epsilon_\lambda L^0(\lambda, T)$, avec ϵ_λ l'émissivité monochromatique hémisphérique d'un corps. C'est une grandeur difficilement mesurable et qui dépend de nombreux

paramètres (longueur d'onde, état de surface du matériau, orientation...).

Cette expression seule permet de calculer la température d'un objet, à condition de connaître son émissivité. Toutefois, les changements de phase du bain fondu (solide, liquide, pâteuse) ne permettent pas de connaître l'émissivité en tout point de l'image observée à travers la caméra.

Les pyromètres bichromatiques se basent sur des mesures de luminance faites à deux longueurs d'ondes différentes λ_1 et λ_2 et ont l'avantage de ne pas dépendre de l'émissivité d'un matériau :

$$\left\{ \begin{array}{l} L(\lambda_1, T) = \epsilon_{\lambda_1} L^0(\lambda_1, T) \\ L(\lambda_2, T) = \epsilon_{\lambda_2} L^0(\lambda_2, T) \end{array} \right\} \equiv \frac{L_{\lambda_1, T}}{L_{\lambda_2, T}} = \frac{\epsilon_{\lambda_1} L^0_{\lambda_1, T}}{\epsilon_{\lambda_2} L^0_{\lambda_2, T}} \equiv \frac{L_{\lambda_1, T}}{L_{\lambda_2, T}} = \frac{\epsilon_{\lambda_1}}{\epsilon_{\lambda_2}} \times \frac{C_1 \lambda_1^{-5}}{\exp(\frac{C_2}{\lambda_1 T}) - 1} \times \frac{C_1 \lambda_2^{-5}}{\exp(\frac{C_2}{\lambda_2 T}) - 1} \quad (2)$$

La première hypothèse qui est faite pour simplifier cette expression est celle d'un corps gris, c'est à dire que l'émissivité ne dépend pas de la longueur d'onde ($\epsilon_{\lambda_1} = \epsilon_{\lambda_2} = \epsilon$). La seconde est que $C_2 \gg \lambda T$ (approximation de Wien). D'après ces deux hypothèses, la température bichromatique est calculée telle que :

$$T_b = f(L_{\lambda_{rouge}}, L_{\lambda_{vert}}, \lambda_{rouge}, \lambda_{vert}) = \frac{C_2 (\frac{1}{\lambda_{vert}} - \frac{1}{\lambda_{rouge}})}{5 \ln(\frac{\lambda_{rouge}}{\lambda_{vert}}) + \ln(\frac{L_{\lambda_{rouge}}(T)}{L_{\lambda_{vert}}(T)})} \quad (3)$$

Dans l'expression ci-dessus, il y a 4 inconnues : λ_{rouge} , λ_{vert} , $L_{\lambda_{rouge}}$ et $L_{\lambda_{vert}}$ à déterminer. Dans un premier temps on calibre la caméra sur un corps noir dont la température est connue afin d'obtenir l'intensité expérimentale en fonction de la température (2.3.2).

2.3.2 Mesure expérimentale de l'intensité sur corps noir

Un corps noir à cavité haute température qui monte jusqu'à 1200 °C est utilisé pour cette calibration (RCN de HGH-Infrared).

On mesure l'intensité reçue à travers les filtres vert, bleu et rouge du corps noir pour différents temps d'expositions ($t_{exposition} \in [750; 30000 \mu s]$). La température du corps noir varie entre 700 °C et 1200 °C par paliers de 50 °C (Figure 7). On remarque que le canal bleu reçoit très peu d'intensité, raison pour laquelle les longueurs d'onde rouge et verte sont utilisées dans la calibration du pyromètre bichromatique.

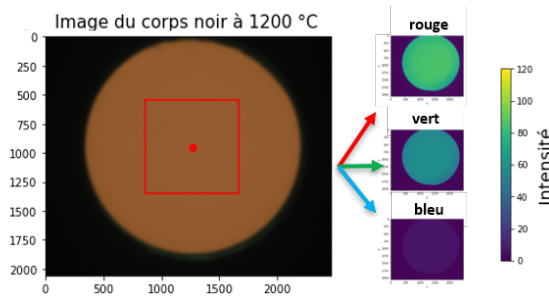


FIGURE 7 – Image du corps noir à 900 °C

Pour chaque canal monochromatique rouge et vert, l'intensité moyenne de la ROI de l'image est calculée dans la zone encadrée en rouge ci-dessus telle que :

$$I_{moy} = \frac{1}{t_{exposition}} \times \frac{\sum_{i=x_1}^{x_n} \sum_{j=y_1}^{y_n} I_{ij}}{x_n y_n} \quad (4)$$

Avec :

- x_n : le nombre de pixels sur une ligne horizontale de la zone de calibration ($x_n = 300$)
- y_n : le nombre de pixels sur une ligne verticale de la zone de calibration ($y_n = 300$)
- I_{ij} : l'intensité mesurée à la position i horizontalement et j verticalement ($0 < I < 255$)
- $t_{exposition}$: temps d'exposition.

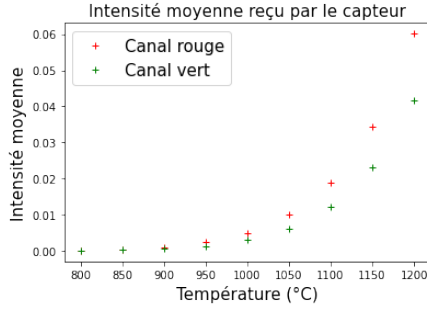


FIGURE 8 – Intensité moyenne reçue par le capteur

2.4 Calibration de la température bichromatique

L'expression de la température bichromatique (équation 3) compte 4 inconnues : λ_{rouge} , λ_{vert} , $L(\lambda_{rouge}, T)$ et $L(\lambda_{vert}, T)$. En utilisant la calibration sur corps noir, on *calcule* la luminance $L(\lambda, T)$ à partir de l'intensité mesurée.

2.4.1 Interpolation sur la gamme de calibration

Les courbes de calibrations obtenues précédemment (figure 8) permettent de trouver la température (T) d'un corps en fonction de l'intensité expérimentale mesurée I_{exp} . La luminance est une fonction de la température et de la longueur d'onde, donc pour la calculer il ne reste plus qu'à choisir le second paramètre. Sur les pyromètres bichromatique classiques, la longueur d'onde est une valeur unique donnée par le fabricant. Le fait d'avoir une caméra dans le visible signifie que l'intensité mesurée sur les canaux monochromatique rouge et vert est mesurée sur une bande spectrale ($[400; 800]nm$). On choisit donc des longueurs d'onde initiales λ_{vert}^{ini} et λ_{rouge}^{ini} sur cette bande spectrale qui permettent de calculer $L(\lambda_{vert}^{ini}, T)$ et $L(\lambda_{rouge}^{ini}, T)$, puis on optimise les longueurs d'onde inconnues dans l'équation 3 telles que : $(\lambda_{rouge}^{opt}, \lambda_{vert}^{opt}) = \text{argmin}(|T_b - T_{corpsnoir}|)$. T_b correspond à la température bichromatique calculée et $T_{corpsnoir}$ à la température mesurée sur le corps noir.

On obtient 2 couples de longueurs d'onde initiales et optimisées. Bien qu'il existe une seule solution λ^{opt} pour un λ^{ini} donné, il y a une infinité de couple de solution pour $\lambda_{ini} \in [400; 800]nm$. La solution retenue est la suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} (\lambda_{rouge}^{ini}; \lambda_{rouge}^{opt}) \\ (\lambda_{vert}^{ini}; \lambda_{vert}^{opt}) \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} (650; 599)nm \\ (450; 428)nm \end{array} \right\} \quad (5)$$

2.4.2 Interpolation en dehors de la gamme de calibration

La calibration sur corps noir permet de monter à des températures atteignant 1200 °C au maximum alors que le bain fondu est en réalité beaucoup plus chaud. Afin de pouvoir déterminer une température en dehors de la gamme de calibration, on étudie l'intensité théorique, qui correspond au flux lumineux qui provient de la source, à travers la chaîne d'acquisition (figure 6).

$$I_{theorique} = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} L(\lambda, T) \times \text{FiltreBayer} \times \text{FiltreIR} \times \text{Capteur} d\lambda \quad (6)$$

Avec $\lambda_a = 400nm$ et $\lambda_b = 1000nm$ car on se situe dans le spectre visible.

On remarque que le filtre infrarouge n'est pas parfait et transmet un signal non négligeable pour les faibles température. Comme le canal bleu n'est pas utilisé pour la calibration (2.3.2), il est soustrait aux deux autres pour éliminer le bruit du filtre infrarouge (figure 9).

L'intensité mesurée est proportionnelle à l'intensité calculée ($I_{exp} = k \times I_{theo}$). On trouve $k_{rouge} = 1.10^{11}$ et $k_{vert} = 8.4.10^{10}$. Ces deux constantes permettent de déterminer la température d'un corps à partir de l'intensité mesurée, même si cette température est supérieure à la limite de calibration ($T > 1200$ °C).

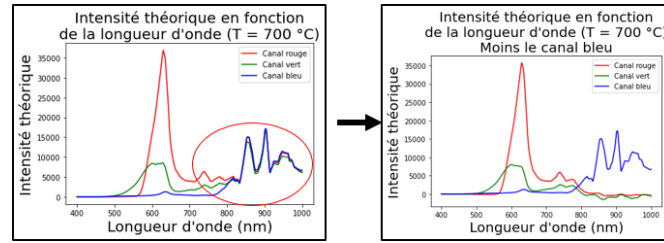


FIGURE 9 – Luminance théorique à travers la chaîne de mesure avant et après soustraction du filtre bleu

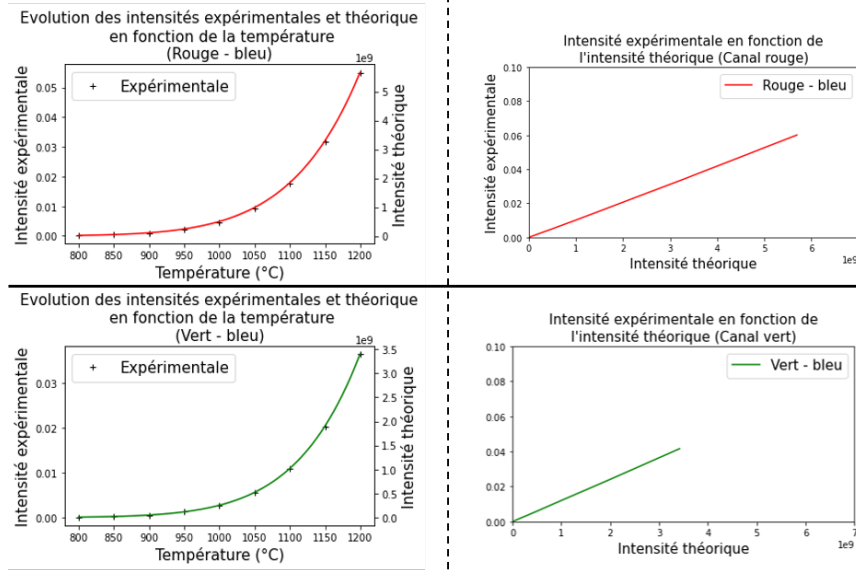


FIGURE 10 – Evolution de l'intensité expérimentale et de l'intensité théorique en fonction de la température

2.4.3 Exemple d'application

Le logigramme (Figure 11) permet de calculer la température bichromatique à partir des intensités reçues sur un pixel (I_r^{exp} , I_v^{exp} et I_b^{exp}), puis d'évaluer l'écart avec la température mesurée sur corps noir (Figure 12).

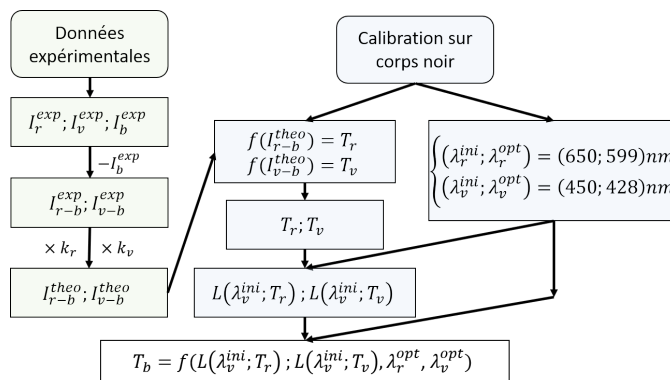


FIGURE 11 – logigramme

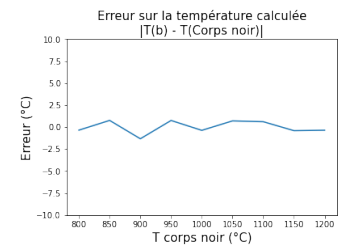


FIGURE 12 – $T_b - T_{corpsnoir}$

3 Analyse des résultats

L'utilisation de la méthode de calibration bichromatique dans le visible a permis de cartographier thermiquement le bain fondu en LMD-p.

3.1 Temperature de la zone fondue

Pour chaque passage du laser, une image moyenne en terme d'intensité est calculée pour les 5 temps d'expositions (figure 13). Afin d'améliorer la précision du calcul de la température, si la valeur de l'intensité est supérieure à 250 (surexposée), ou inférieure à 5 (trop peu de luminosité), alors la valeur est remplacée par $I = 0$.

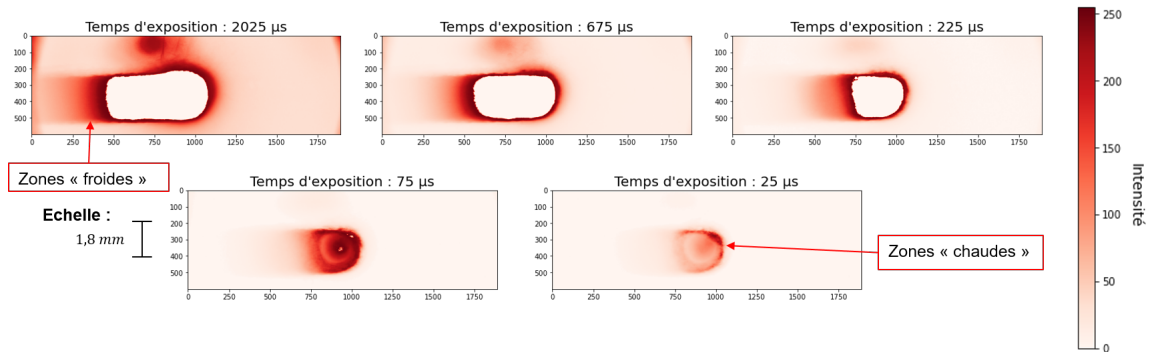


FIGURE 13 – Intensité (non normalisée) moyenne pour les 5 temps d'expositions

Ces images permettent de cartographier thermiquement le bain fondu grâce à la méthode de calibration présentée.

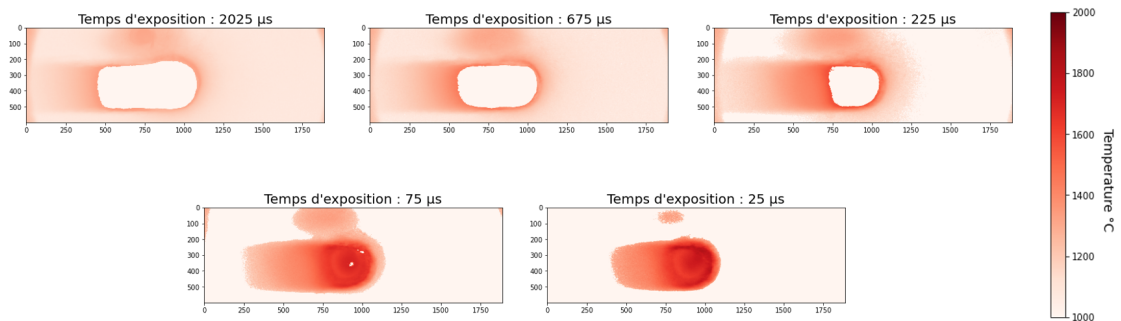


FIGURE 14 – Température moyenne du bain fondu

On remarque bien que les zones les plus chaudes sont observables sur les images avec un temps d'exposition faible. En superposant les températures calculées par chaque temps d'exposition, il est possible de caractériser *toute* la zone fondue et ses alentours (zone solide et liquide) (figure 15).

3.2 Résultats et discussions

La température d'un métal en fusion doit être plus importante que sa température lorsqu'il est solide. En partant de ce principe, la zone la plus chaude du bain fondu devrait être située au centre de l'image, là où le laser est focalisé pour faire fondre l'acier et apporter de la matière. Toutefois, on remarque 2 auréoles (figure 16).

Sur ces auréoles, la température calculée est faussée et l'une des hypothèses mise en avant par W. Devesse et al. [2] qui les ont observées également est que l'émissivité varie de manière non linéaire dans

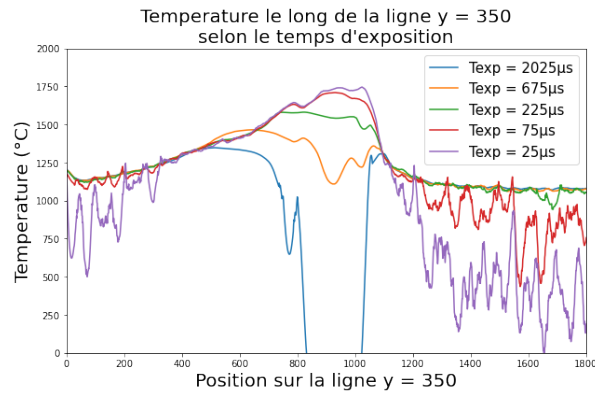


FIGURE 15 – Superposition des températures calculées aux 5 temps d'expositions, y = 350

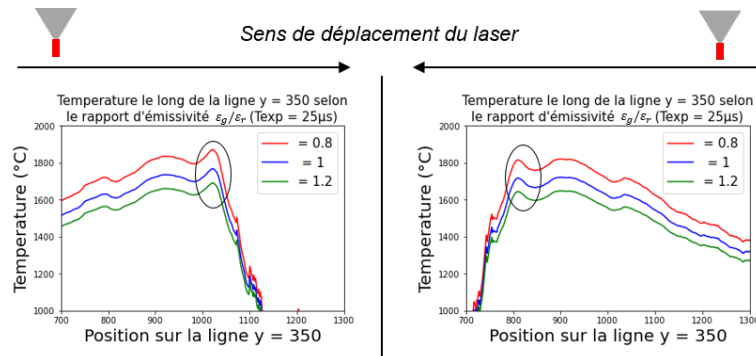


FIGURE 16 – Pics anormaux autour du bain fondu y = 350; et influence de l'émissivité sur le calcul de la température

la zone de transition entre l'état solide et liquide. Cette hypothèse contredit celle de corps gris et fausse le calcul de la température. Il s'agit toutefois d'une information importante sur les limites du contour de la zone fondue. De nouvelles études sont en cours pour vérifier qu'il s'agit bien de la zone pâteuse.

3.3 Conclusion

La mesure thermique par capteur CMOS RGB dans le visible est une solution peu coûteuse, avec une haute résolution et rapide pour cartographier thermiquement un objet. La solution de multi temps d'exposition permet d'étudier des zones avec des gradients de température importants. Finalement, cette solution globale est adaptée pour le monitoring de la température du bain fondu pendant une fabrication par LMD-p avec une hypothèse de corps gris. Cette dernière est à confirmer tout le long du bain fondu car la température est très sensible au rapport des émissivités (Figure 16).

Références

- [1] F. Bardin, S. Morgan, S. Williams, R. McBride, A. J. Moore, J. D. C. Jones, D. P. Hand. *Process control of laser conduction welding by thermal imaging measurement with a color camera*, Applied Optics, Vol 32 p 44, 2015.
- [2] W. Devesse, D. De Baere, P. Guillaume . *High resolution temperature measurement of liquid stainless steel using hyperspectral imaging*, Sensors, Vol 17, p. 91, 2017.
- [3] M. Doubenskaia, M. Pavlov, S. Grigoriev, I. Smurov. *Definition of brightness temperature and restoration of true temperature in laser cladding using infrared camera*, Surface Coating Technology, Vol. 220, p.244-247, 2013
- [4] I. Smurov, M. Doubenskaia, A. Zaitsev. *Comprehensive analysis of laser cladding by means of optical diagnostics and numerical simulation*, Surface Coating Technology, Vol. 220, p.112-121, 2013
- [5] J. Zalameda, E. Burke, R. Hafley, K. Taminger, C. Domack, A. Brewer and R. Martin. *Thermal imaging for assessment of electron-beam free form fabrication additive manufacturing welds*, The International Society for Optical Engineering, 2013