



HAL
open science

Instrumentation du procédé LMD-p in-operando en vue d'un contrôle en boucle fermée

Maxime Rey, Mady Guillemot, Joel Lachambre, Nicolas Tardif, Thomas Elguedj, Frédéric Vignat

► **To cite this version:**

Maxime Rey, Mady Guillemot, Joel Lachambre, Nicolas Tardif, Thomas Elguedj, et al.. Instrumentation du procédé LMD-p in-operando en vue d'un contrôle en boucle fermée. Manufacturing'21, UGA, Grenoble INP, CNRS, Jun 2024, GRENOBLE, France. hal-04784368

HAL Id: hal-04784368

<https://hal.science/hal-04784368v1>

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.



Instrumentation du procédé LMD-p in-operando en vue d'un contrôle en boucle fermée

Maxime REY^(a), Mady GUILLEMOT^(a), Joël LACHAMBRE^(a), Nicolas TARDIF^(a), Thomas ELGUEDJ^(a), Frédéric VIGNAT^(b)

(a) INSA Lyon, CNRS, LaMCoS, UMR5259, 69100, Villeurbanne, France

(b) Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, UMR5272, 38000, Grenoble, France

Mail : maxime.rey@insa-lyon.fr

Résumé : Les technologies de fabrication additive métallique de type LMD-p (Laser Metal Deposition powder) sont des procédés jeunes qui souffrent d'un manque de fiabilité pour atteindre les standards industriels d'une production automatisée capable de produire des séries unitaires à plus volumineuses de pièces maîtrisées en termes de géométrie et de santé matière.

Les pièces qui en découlent peuvent être caractérisées par des phases hors-équilibre, des fissures de solidification/liquation, une solidification directionnelle, des contraintes résiduelles, des porosités, de la délamination, du gauchissement.

Certaines de ces caractéristiques peuvent être significativement atténuées par une optimisation du procédé, un monitoring in-operando et un contrôle en boucle fermée du procédé.

Le papier décrit une méthode de mesure permettant d'obtenir la topographie du cordon ainsi que le champ de température en surface de la zone de dépôt de matière en utilisant une unique caméra coaxiale. Le monitoring est appliqué à des exemples de fabrications de murs en 316L en faisant varier les valeurs d'énergie surfacique [J/mm^2], de dépôt linéique [g/m] afin de mettre en évidence le caractère auto-régulant du procédé.

Mots clés : Laser Metal Deposition with Powder, Essais in operando, Cordon, Bain de fusion, Hauteur de couche, Etat résiduel.

1 Introduction

Le procédé LMD-p (Laser Metal Deposition-powder) est un procédé de fabrication additive par projection de poudre sous flux dirigé. La matière est déposée par projection de poudre métallique dans un bain fondu localement par un laser. La buse comporte le système de focalisation optique du laser, le système de focalisation de la poudre métallique, un circuit d'inertage de la zone active du procédé (Figure 1). La buse et/ou la pièce est mise en mouvement par une chaîne cinématique. La pièce est ainsi fabriquée couche par couche.

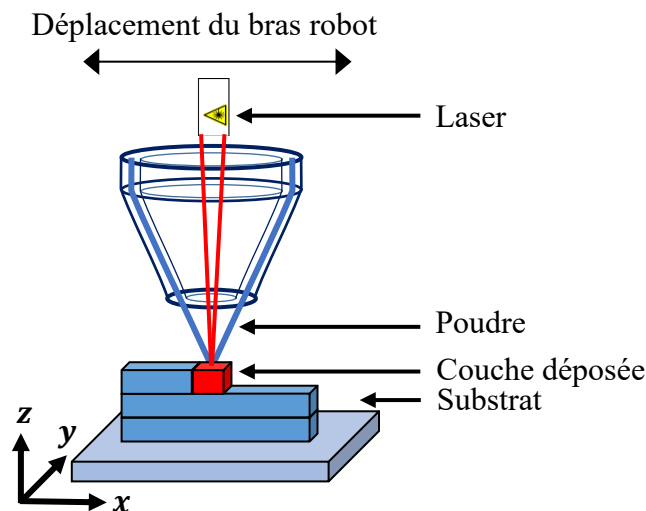


Figure 1 – Schéma de principe du procédé LMD-p

Il est admis que les paramètres les plus importants à définir sont ([Unocic, 2022](#)) ([Gibson, 2015](#)) : la puissance laser P [W], la vitesse d'avance du bras robot v [mm/s], le débit de poudre Q_p [g/min].

Lorsque les paramètres de dépôt sont constants, des défauts apparaissent : une morphologie du cordon changeante ([Heralić, 2010](#)), des propriétés mécaniques hétérogènes ([Farshidianfar, 2021](#)) et une accumulation de contraintes internes au sein du matériau ([Lu, 2019](#)). Cette accumulation de contraintes est liée principalement au *Temperature Gradient Mechanism* (TGM) décrit dans ([Mercelis, 2006](#)). La maîtrise de ce procédé engendrerait donc une atténuation des défauts constatés.

Il est donc nécessaire d'avoir une compréhension fine de l'impact de la stratégie de dépôt sur l'état résiduel des cordons déposés afin de minimiser ces défauts. Pour cela, une piste privilégiée est de mesurer, en cours de fabrication, certaines grandeurs physiques relatives à la morphologie et aux températures associées au cordon et de relier les fluctuations de ces grandeurs aux variations de l'état résiduel des cordons déposés ([Kriczky, 2015](#)).

Notamment, il est intéressant de mesurer la hauteur du dernier cordon déposé. Une mesure par triangulation à l'aide d'un laser de mesure dédié peut être réalisée ([Heralić, 2008](#))([Faes, 2014](#))([Binega, 2022](#))([Donadello, 2019](#)). La principale difficulté rencontrée dans ces travaux est liée aux rayonnements induits par la zone fondue qui perturbent la détection de la ligne projetée par le laser de mesure.

La prise d'images à l'aide d'une caméra coaxiale est relativement répandue dans une optique de monitoring de la zone fondue. Le choix se porte sur des caméras infrarouges

(Kim, 2023) ou RGB (Kledwig, 2019) sensibles au rayonnement émis par l'échauffement du métal. Des limitations liées à la méconnaissance de l'émissivité du matériau observé empêchent une mesure fiable des températures et obligent souvent à tisser un lien direct entre l'intensité des pixels de l'image et la morphologie du cordon sans déduire les températures associées.

L'article présente un dispositif permettant de coupler une mesure des températures associées à la zone de dépôt ainsi qu'une mesure de la topographie du cordon en cours de fabrication à l'aide d'une unique caméra CMOS RGB. Cette méthode permet de détecter in-operando les déviations du procédé induites par l'accumulation de chaleur en cours de fabrication. Le caractère auto-régulant du procédé est mis en évidence sur un exemple de fabrication.

2 Montage expérimental

2.1 Dispositif expérimental

La machine de LMD-P est constituée des éléments suivants :

- Laser de fabrication : Source laser à diode LaserLine LMD2000, $900 \text{ nm} < \lambda < 1070 \text{ nm}$, $P_{MAX} = 2000 \text{ W}$
- Buse Precitec Cladding Head YC52
 - Système de focalisation laser : $\varnothing_{spot} = 1.4 \text{ mm}$ et distance focale laser = 11 mm
 - Système de focalisation poudre : distance focale poudre = 11 mm
 - Système d'inertage : flux d'argon dirigé
- Robot Staübli RX 160 6 axes : porte la buse et définit la vitesse de dépôt

Le monitoring thermique par modèle radiométrique bichromatique est réalisé à l'aide d'une caméra Victorem 51B136 CMOS RGB équipée d'un capteur Sony IMX250, un filtre infrarouge et un filtre Bayer, coaxiale au faisceau laser, qui permet de prendre des images en vue de dessus.

Le monitoring de la distance buse-cordon par profilométrie utilise la même caméra et un laser de mesure ZQ1 500 mW, $\lambda = 638 \pm 6 \text{ nm}$, monté en biais.

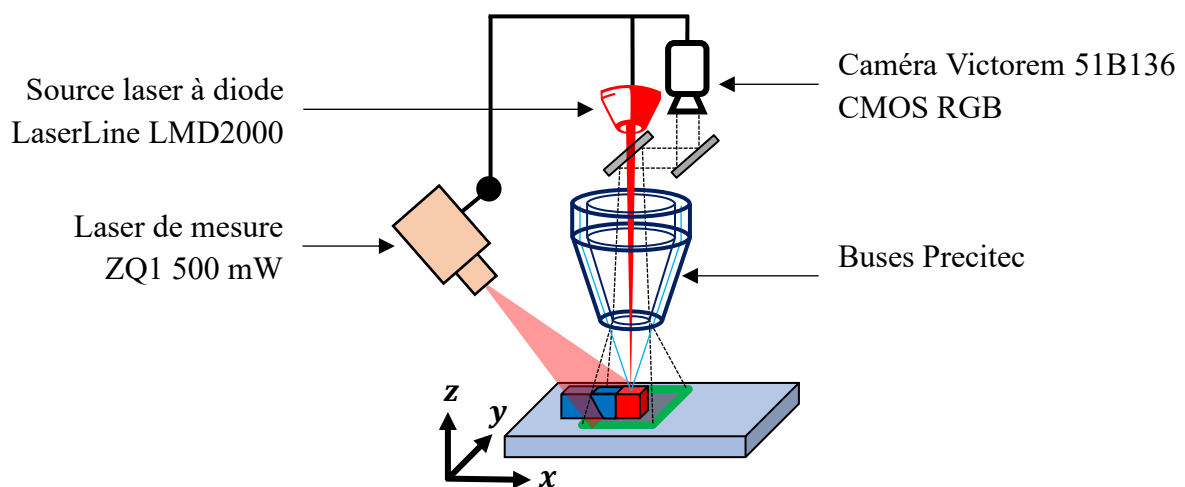


Figure 2 – Présentation du montage expérimental

Il est important de différencier en Figure 2 le « laser de fabrication » Laserline qui sert à fondre le substrat (laser monté sur la buse) du « laser de mesure » ZQ1. Le rôle du laser ZQ1 sera détaillé dans la partie Monitoring de la distance buse-cordon (DBC).

2.2 Fabrication d'un mur instrumenté

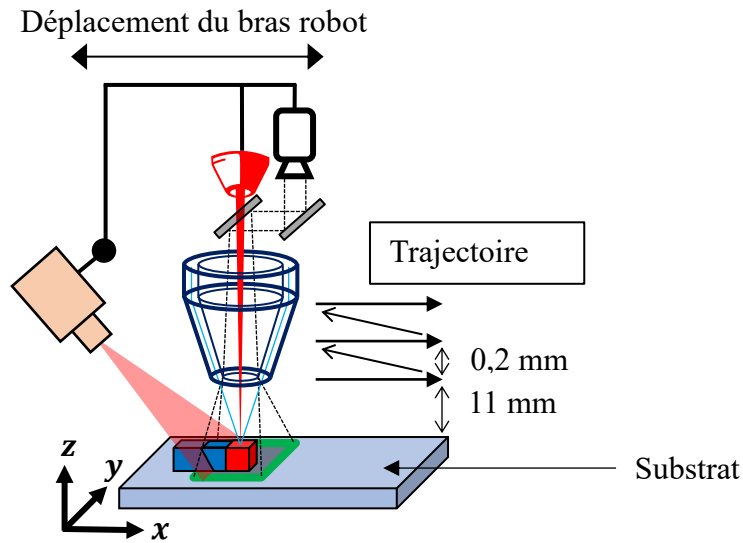


Figure 3 – Fabrication des murs

- Substrat : Tous les murs sont fabriqués sur un substrat en inox 304L qui a pour dimensions 60 mm x 20 mm x 5 mm (L x l x h). Le matériau 304L a été choisi pour son comportement proche du matériau déposé (316L).
- Trajectoire : La distance entre la buse et le plan focal poudre est de 11 mm, la distance initiale entre la buse et le substrat est donc fixée à 11 mm de manière à concentrer le faisceau de poudre sur le substrat et chercher ainsi à maximiser la quantité de poudre utilisée pour fabriquer les murs. L'épaisseur des cordons visée est de 0.2 mm, l'incrément en z de la buse entre chaque couche est donc fixé à 0.2 mm. Les cordons sont déposés selon la direction $+\vec{x}$, leur longueur est fixée à 20 mm. Après le dépôt successif de 20 cordons, un mur est obtenu.
- Paramètres de dépôt : Les paramètres de dépôt sont la puissance du laser de fabrication P [W], la vitesse relative entre la buse et le substrat V [mm/s] et le débit massique de poudre Q_p [g/min]. De ces trois paramètres, la densité d'énergie surfacique E_S en J/mm^2 , le débit linéique de poudre Q_L en g/m et un paramètre de comparaison S en $\frac{W.s^2}{g.mm}$ sont calculés de la manière suivante :

$$E_S = \frac{P}{V * \varnothing_{spot}} \quad (\text{Eq.1})$$

avec E_S la densité d'énergie surfacique [J/mm^2], P la puissance laser [W], V la vitesse de dépôt [mm/s], \varnothing_{spot} le diamètre du spot laser [mm].

$$Q_L = \frac{Q_P}{V * 60} * 1000 \quad (\text{Eq.2})$$

avec Q_L la densité linéique de poudre [g/m], Q_P le débit massique de poudre [g/min], et V la vitesse de dépôt [mm/s].

$$S = \frac{P}{V * Q_P / 60} \quad (\text{Eq.3})$$

avec S le paramètre de comparaison $\left[\frac{W.s^2}{g.mm}\right]$, P la puissance laser [W], V la vitesse de dépôt [mm/s], et Q_P le débit massique de poudre [g/min].

Ces grandeurs physiques sont de bons indicateurs des potentiels défauts susceptibles d'apparaître en cours de fabrication ([Cherry, 2015](#)) ([Sciammarella, 2015](#)) ([Svetlizky, 2021](#)).

Un exemple de paramètres de fabrication et des grandeurs physiques associées est présenté Tableau 1 :

Tableau 1 – Exemple de paramètres de dépôt, et grandeurs physiques associées

P [W]	v [mm/s]	Q_P [g/min]	E_S [J/mm ²]	Q_L [g/m]	S $\left[\frac{W.s^2}{g.mm}\right]$
385	11	7,5	25	11,36	280

3 Méthodes

3.1 Monitoring du bain de fusion

La caméra CMOS RGB est utilisée pour réaliser une mesure thermique du bain fondu. La caméra est sensible au rayonnement du bain fondu dans le visible.

Dérivée de la loi de Planck, l'approximation de Wien permet de calculer la luminance énergétique spectrale d'un corps noir, pour une température de couleur et une longueur d'onde données :

$$L^0(\lambda, T_s) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T_s}}} \quad (\text{Eq.4})$$

avec $L^0(\lambda, T_s)$ la luminance du corps noir observé [$W.m^{-3}.sr^{-1}$], T_s la température de couleur du corps observé [K], λ la longueur d'onde associée à cette luminance [m], h la constante de Planck [J.s], c la vitesse de la lumière dans le vide [$m.s^{-1}$] et k la constante de Boltzmann [$J.K^{-1}$].

Le bain fondu comporte des hétérogénéités de surface et des changements de phases. Des vapeurs peuvent se retrouver entre le bain fondu et le chemin optique de la caméra. Il est donc très difficile de connaître l'émissivité de la surface et la transmissivité du milieu environnant. Cela rend impossible une mesure fiable des températures de la zone

observée en considérant une unique longueur d'onde et en utilisant l'approximation de Wien.

Grâce au modèle radiométrique bichromatique développé dans ([Jegou, 2023](#)), il est possible d'exprimer la température T_S suivant (Eq.5):

$$T_S = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{5 * \ln \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) + \ln \left(\frac{L^0(\lambda_1, T_1)}{L^0(\lambda_2, T_2)} \right) + \ln \left(\frac{\varepsilon_S(\lambda_2)}{\varepsilon_S(\lambda_1)} \right) + \ln \left(\frac{\tau(\lambda_2)}{\tau(\lambda_1)} \right)} \quad (\text{Eq.5})$$

avec $L^0(\lambda_1, T_1)$ (resp. $L^0(\lambda_2, T_2)$) la luminance d'un corps noir qui, à la température de couleur T_1 [K] (resp. T_2), émettrait autant de rayonnement à la longueur d'onde λ_1 [m] (resp. λ_2) que le corps S à la température T_S , $\varepsilon_S(\lambda_1)$ (resp. $\varepsilon_S(\lambda_2)$) l'émissivité à la longueur d'onde λ_1 (resp. λ_2), et $\tau(\lambda_1)$ (resp. $\tau(\lambda_2)$) la transmissivité à la longueur d'onde λ_1 (resp. λ_2).

En faisant l'hypothèse d'une émissivité ε_S (hypothèse du corps gris) et d'une transmissivité τ indépendantes de la longueur d'onde considérée, les termes qui font intervenir ε_S et τ s'annulent et il devient possible de s'affranchir de ces valeurs.

Les trois canaux de la caméra sont sensibles à une certaine plage de longueurs d'ondes centrées autour de trois longueurs d'onde. Bien que les luminances soient mesurées par la caméra sur un certain spectre, l'hypothèse de la longueur d'onde effective permet d'utiliser les canaux rouge et vert de la caméra pour mesurer $L^0(\lambda_1, T_1)$ et $L^0(\lambda_2, T_2)$ (Eq.4) avec $\lambda_1 = \lambda_R$ et $\lambda_2 = \lambda_G$.

A l'aide de l'approximation de Wien, (Eq.5) peut alors s'écrire sous la forme :

$$T_{bichro} = \frac{B - 1}{\frac{B}{T_G} - \frac{1}{T_R}} \quad \text{avec } B = \frac{\lambda_R}{\lambda_G} \quad (\text{Eq.6})$$

avec T_{bichro} la température du corps qu'on souhaite connaître [°C], T_R (resp. T_G) la température de couleur du corps observé en considérant la longueur d'onde λ_R (resp. λ_G) [°C], et λ_R (resp. λ_G) la longueur d'onde considérée pour remonter à T_R (resp. T_G) en faisant l'hypothèse qu'on observe un corps noir [m].

Dans un premier temps, les images tirées des canaux rouge et vert de la caméra CMOS sont converties en champs de température avec l'hypothèse du corps noir (Eq.4). Lorsque ces deux champs de température sont injectés dans (Eq.6), le champ de température final avec l'hypothèse du corps gris et de la longueur d'onde effective est obtenu.

Cette hypothèse est source d'erreurs dans la mesure où il n'est pas certain que l'émissivité soit la même dans le rouge et dans le vert. Une erreur relative de 10% sur cette hypothèse peut entraîner une erreur de mesure de température pouvant monter à 80 K ([Jegou, 2023](#)).

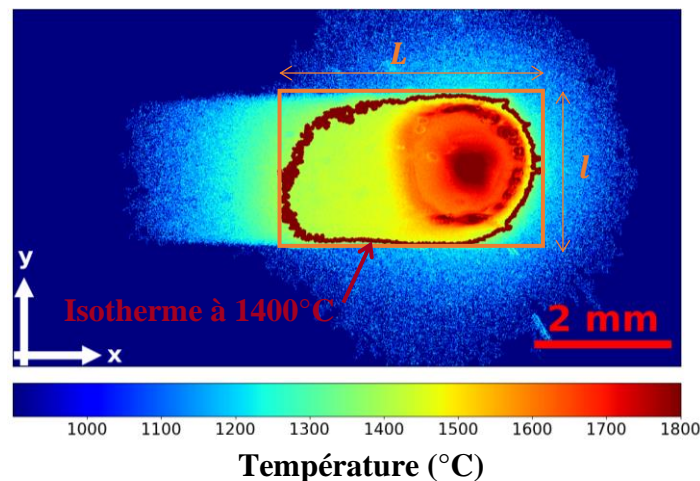


Figure 4 - Extraction des grandeurs physiques relatives à la zone fondue

A partir du traitement du champ de température obtenu, des grandeurs physiques intéressantes sont extraites (Figure 4) : Largeur de la zone à l'intérieur de l'isotherme 1400°C l [mm], Longueur de la zone à l'intérieur de l'isotherme 1400°C L [mm], Rapport longueur/largeur [], Aire de la zone à l'intérieur de l'isotherme 1400°C [mm²], Température moyenne de la zone à l'intérieur de l'isotherme 1400°C [°C], Température maximale de la zone à l'intérieur de l'isotherme 1400°C [°C].

L'évolution de ces grandeurs physiques dans le temps est représentative des changements des conditions de solidification de l'alliage et par extension de l'état résiduel des pièces fabriquées ([Huxol, 2019](#)).

La caméra CMOS RGB est donc utilisée pour réaliser une mesure thermique du bain fondu. Ce moyen de mesure tire avantage de l'encombrement réduit, du faible coût et de la bonne résolution spatiale de la caméra. Le modèle radiométrique bichromatique présente des résultats assez satisfaisants pour déduire de manière fiable des informations sur la thermique et les conditions de solidification de l'alliage.

3.2 Monitoring de la distance buse-cordon (DBC)

En plus des grandeurs physiques liées à la géométrie et aux températures de la zone à l'intérieur de l'isotherme 1400°C, il est intéressant de mesurer la distance entre la buse et le dernier cordon déposé. Le laser et le faisceau de poudre possèdent une certaine distance focale, ce qui signifie que les conditions de dépôt vont changer si la distance entre la buse et le dernier cordon déposé (appelée distance buse-cordon, abrégée DBC) change ([Mani, 2015](#)). Cette information est alors utile pour expliquer des variations de l'état résiduel et de la hauteur des cordons déposés.

Une méthode qui permet de mesurer en temps réel la distance buse-cordon a été développée. Cette méthode est analogue à celle présentée dans ([Faes, 2014](#)).

Le laser de mesure ZQ1, introduit dans la partie Montage expérimental, projette une ligne en biais à 638 ± 6 nm à une puissance de 500 mW. La ligne est visible dans le champ de vision de la caméra coaxiale pendant la fabrication des murs. Sa trajectoire est déviée par le dernier cordon déposé. Sur les images prises par la caméra coaxiale lorsque ce laser de mesure est activé, un traitement d'image illustré en Figure 5 permet d'isoler cette ligne laser déviée par le dernier cordon déposé.

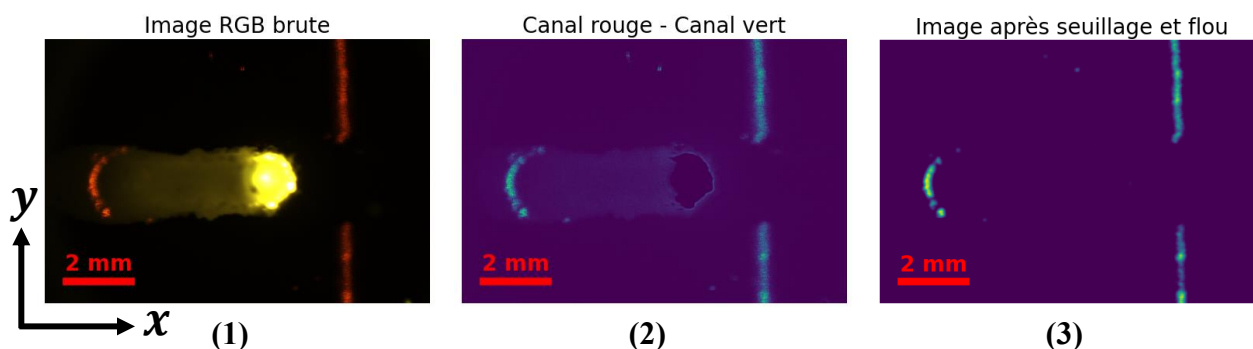


Figure 5 – Traitement d'image réalisé pour isoler la ligne laser sur les images prises

Cette ligne est visible sur le canal rouge des images, tandis que la zone fondue rayonne majoritairement dans les canaux rouge et vert. En soustrayant le canal vert au canal rouge (Figure 5-2), la ligne est isolée de la zone fondue après une étape finale de seuillage et de flou de l'image (Figure 5-3).

L'endroit où la ligne laser atteint le dernier cordon déposé est appelé « tache laser », visible Figure 5. Le déplacement selon x de cette tache laser renseigne sur une modification de la distance selon z entre la buse et le dernier cordon déposé.

Il devient nécessaire de connaître le lien entre le déplacement en pixels de cette tache selon l'axe x et le déplacement en mm de la DBC selon l'axe z . Ce lien est traduit par un coefficient de conversion appelé $coef_{px \rightarrow mm}$. Ce coefficient est trouvé grâce à une étape préliminaire de calibration, schématisée Figure 6. Avec le laser de mesure activé, des images d'un support sont prises avec la caméra coaxiale (voir Figure 6-1). Entre chaque prise d'image, la table micrométrique monte d'une certaine hauteur fixée à $\Delta z = 0.5$ mm, et la ligne laser se déplace selon l'axe x . Une superposition des images prises est visible Figure 6-2.

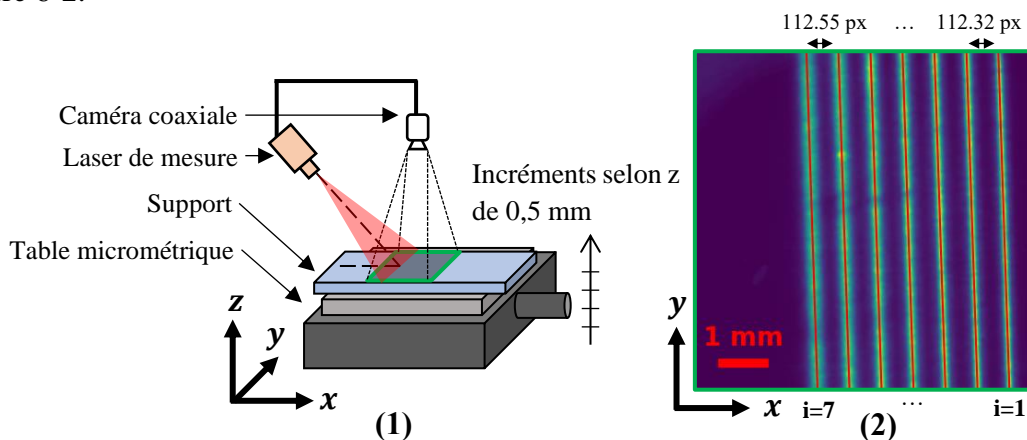


Figure 6 – Démarche expérimentale pour le calcul de $coef_{px \rightarrow mm}$

Une droite est superposée sur chaque ligne laser. On note x_i la position en x de la droite n°i pour $y = 0$. Il devient possible de calculer $coef_{px \rightarrow mm}$:

$$coef_{px \rightarrow mm} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - x_{i+1})}{\Delta z (n - 1)} \quad (\text{Eq.7})$$

avec $coef_{px \rightarrow mm}$ le coefficient de conversion [px/mm], x_i la position en x de la droite n°i pour $y = 0$, n le nombre de droites, et Δz l'incrément en z de la buse entre chaque prise d'image [mm].

Visible Figure 7-2, la ligne (c) représente l'endroit où la tache laser devrait être dans le cas où un cordon d'une hauteur nominale est déposé. On note $dist_{px}$ la distance en pixels selon x entre l'extrémité de la tache laser (b) et la ligne (c).

La distance buse-cordon s'écrit alors :

$$DBC = DBC_{init} - \frac{dist_{px}}{coef_{px \rightarrow mm}} \quad (\text{Eq.8})$$

avec DBC la distance entre la buse et le dernier cordon déposé [mm], DBC_{init} la distance initiale entre la buse et le substrat, fixée à 11 mm sur l'ensemble des murs fabriqués, $dist_{px}$ la distance en pixels selon x entre l'extrémité de la tache laser et la ligne laser théorique, $coef_{px \rightarrow mm}$ le coefficient de conversion [px/mm].

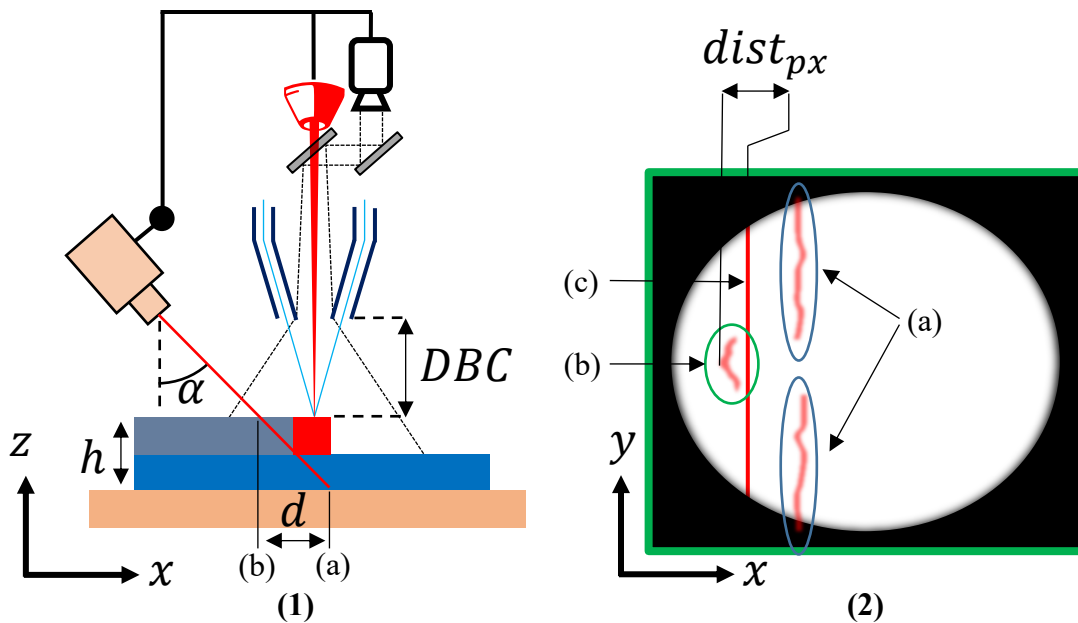


Figure 7 – (1) Principe de la mesure de distance par triangulation (2) Représentation de la projection de la ligne laser en biais après traitement d'image

La position de la tache selon x est influencée par la hauteur absolue de la buse, et par la hauteur du mur en cours de fabrication. Elle détermine la DBC, mais aussi la position en x de la mesure de cette DBC : si la DBC augmente, le décalage entre la position en x

de la buse et la position en x de la mesure de cette DBC se réduit. Ce décalage est pris en compte pour corriger la position de la mesure de la DBC selon x.

Grâce à une image prise par la caméra coaxiale en vue de dessus, il devient alors possible de mesurer en cours de fabrication la distance buse-cordon en analysant la déviation de la ligne laser par le cordon déposé. Il est aussi possible de remonter à la hauteur du cordon déposé et à la hauteur totale du mur. Avant d'utiliser ce moyen de mesure pour un contrôle en boucle fermée, il sera crucial de réduire les perturbations du milieu environnant. Notamment, moduler la puissance du laser qui projette la ligne et régler judicieusement le temps d'exposition pour la prise d'images permettront d'atténuer les perturbations induites par la zone fondue et ainsi de minimiser les facteurs qui pourront entraîner une incertitude de mesure.

4 Résultats

L'acquisition des grandeurs physiques grâce aux moyens de mesure présentés dans la partie Méthodes est illustrée à travers la fabrication d'un mur, avec les conditions expérimentales présentée dans la partie Matrice d'essais. Les données acquises permettent de suivre l'évolution des grandeurs thermiques liées à l'isotherme 1400°C, ainsi que l'évolution de la morphologie du cordon au cours du temps. Les données sont représentées sous la forme de boîtes à moustaches, dont chacune englobe les mesures d'une même couche.

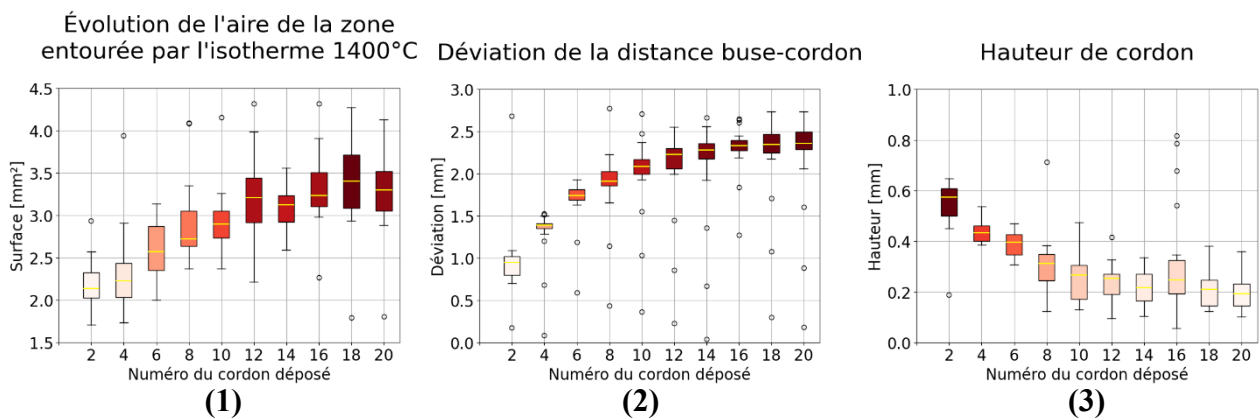


Figure 8 – Evolution des grandeurs physiques liées aux températures et à la morphologie du cordon en cours de fabrication

Les graphiques présentés Figure 8 comparent les mesures de trois grandeurs physiques lors de la fabrication du mur dont les paramètres de dépôt sont introduits dans la partie Méthodes.

Deux phénomènes sont constatés :

- Une stabilisation de la zone entourée par l'isotherme 1400°C visible Figure 8-1.
- Une stabilisation de la distance buse-cordon visible Figure 8-3.

Sur la Figure 8-1, deux phases sont visibles : une première phase transitoire jusqu'au dépôt du cordon n°12, et une phase stable ensuite. La phase transitoire marque le passage d'un échange de chaleur majoritairement piloté par conduction dans le substrat à un régime majoritairement piloté par rayonnement et convection sur les faces du mur.

D'autre part, la Figure 8-3 fait apparaître que les premiers cordons ont une hauteur supérieure à l'incrément selon +z défini pour la buse entre chaque dépôt de cordon. La distance buse-cordon diminue, et le haut du dernier cordon déposé se retrouve au-dessus du plan focal poudre. Le faisceau de poudre s'en retrouve défocalisé : à la hauteur de la zone fondue, la densité surfacique de poudre [g/mm²] diminue. La quantité de poudre disponible pour l'édification du cordon diminue. A largeur de cordon équivalente, la hauteur du cordon qui sera déposé ensuite va donc diminuer. La hauteur des cordons déposés se rapproche de l'incrément en z fixé pour la buse à mesure que la DBC diminue. Le faisceau de poudre se défocalise progressivement pour atteindre le stade où la densité surfacique de poudre [g/mm²] à la hauteur de la zone fondue est telle que la hauteur du cordon déposé vaut 0.2 mm. L'état stationnaire est atteint.

5 Conclusions et perspectives

Dans cet article l'instrumentation réalisée sur le dispositif expérimental du procédé Laser Metal Deposition-powder a été présentée. Ce procédé n'est pas encore technologiquement mature et sa maîtrise passe par la compréhension de la physique à l'œuvre pendant la fabrication des pièces.

Une montée en maturité du procédé passe par une stabilisation des grandeurs physiques mesurées afin d'obtenir la pièce mécanique la plus stable possible, autant du point de vue de la morphologie que des propriétés mécaniques.

L'instrumentation du procédé présentée ici devrait permettre à terme :

- De tisser un lien entre les paramètres de dépôt et l'état résiduel des cordons. Il est possible d'en déduire, pour un montage expérimental donné, les paramètres de dépôt P [W], V [mm/s] et Q_P [g/min] pour lesquels les cordons déposés sont sains (porosité maîtrisée, faible accumulation de contraintes internes, morphologie du cordon stabilisée). Ce travail sert alors de base pour décider quels paramètres de dépôt choisir a priori avant de lancer la fabrication d'une pièce mécanique.
- D'asservir le procédé. En effet si une mesure en temps réel des grandeurs physiques est réalisée, ces grandeurs pourront être utilisées en données d'entrée afin d'agir sur les paramètres de dépôt sous la forme d'une boucle de rétroaction.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Abderrahime ZAOUI pour son implication dans le bon déroulement des expérimentations.

Les auteurs sont également reconnaissants du soutien du laboratoire commun « Soudage et Réparation », une collaboration entre EDF, Framatome et l'INSA Lyon, ainsi que du projet METALIC ANR-21-CE10-0003.

Références

E. Binega, L. Yang, H. Sohn, et J. C. P. Cheng, « Online geometry monitoring during directed energy deposition additive manufacturing using laser line scanning », *Precision Engineering*, vol. 73, p. 104-114, janv. 2022, doi: [10.1016/j.precisioneng.2021.09.005](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.09.005).

J. A. Cherry, H. M. Davies, S. Mehmood, N. P. Lavery, S. G. R. Brown, et J. Sienz, « Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts

- by selective laser melting », *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 76, n° 5-8, p. 869-879, févr. 2015, doi: [10.1007/s00170-014-6297-2](https://doi.org/10.1007/s00170-014-6297-2).
- A. Da Silva, J. Frostevarg, et A. F. H. Kaplan, « Thermal monitoring for directed energy deposition of stainless steel, bronze, and cobalt-based alloy », *Surface and Coatings Technology*, vol. 451, p. 129078, déc. 2022, doi: [10.1016/j.surfcoat.2022.129078](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129078).
- S. Donadello, M. Motta, A. G. Demir, et B. Previtali, « Monitoring of laser metal deposition height by means of coaxial laser triangulation », *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 112, p. 136-144, janv. 2019, doi: [10.1016/j.optlaseng.2018.09.012](https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.09.012).
- M. Faes et al., « Process Monitoring of Extrusion Based 3D Printing via Laser Scanning ».
- M. H. Farshidianfar, F. Khodabakhshi, A. Khajepour, et A. P. Gerlich, « Closed-loop control of microstructure and mechanical properties in additive manufacturing by directed energy deposition », *Materials Science and Engineering: A*, vol. 803, p. 140483, janv. 2021, doi: [10.1016/j.msea.2020.140483](https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140483).
- I. Gibson, D. Rosen, et B. Stucker, « Directed Energy Deposition Processes », in *Additive Manufacturing Technologies*, New York, NY: Springer New York, 2015, p. 245-268. doi: [10.1007/978-1-4939-2113-3_10](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3_10).
- A. Heralić, A.-K. Christiansson, M. Ottosson, et B. Lennartson, « Increased stability in laser metal wire deposition through feedback from optical measurements », *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 48, n° 4, p. 478-485, avr. 2010, doi: [10.1016/j.optlaseng.2009.08.012](https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.08.012).
- A. Heralić, A.-K. Christiansson, K. Hurtig, M. Ottosson, et B. Lennartson, « Control Design for Automation of Robotized Laser Metal-wire Deposition », *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 41, n° 2, p. 14785-14791, 2008, doi: [10.3182/20080706-5-KR-1001.02503](https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.02503).
- A. Huxol et F.-J. Villmer, « DoE Methods for Parameter Evaluation in Selective Laser Melting », *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, n° 10, p. 270-275, 2019, doi: [10.1016/j.ifacol.2019.10.041](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.10.041).
- L. Jegou et al., « Bichromatic melt pool thermal measurement based on a Red, Green, and Blue camera: Application to additive manufacturing processes », *Optics & Laser Technology*, vol. 167, p. 109799, déc. 2023, doi: [10.1016/j.optlastec.2023.109799](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109799).
- S. Kim, I. Jeon, et H. Sohn, « Infrared thermographic imaging based real-time layer height estimation during directed energy deposition », *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 168, p. 107661, sept. 2023, doi: [10.1016/j.optlaseng.2023.107661](https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2023.107661).
- C. Kledwig, H. Perfahl, M. Reisacher, F. Brückner, J. Bliedtner, et C. Leyens, « Analysis of Melt Pool Characteristics and Process Parameters Using a Coaxial Monitoring System during Directed Energy Deposition in Additive Manufacturing », *Materials*, vol. 12, n° 2, p. 308, janv. 2019, doi: [10.3390/ma12020308](https://doi.org/10.3390/ma12020308).
- D. A. Kriczky, J. Irwin, E. W. Reutzler, P. Michaleris, A. R. Nassar, et J. Craig, « 3D spatial reconstruction of thermal characteristics in directed energy deposition through optical thermal imaging », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 221, p. 172-186, juill. 2015, doi: [10.1016/j.jmatprotec.2015.02.021](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.02.021).
- X. Lu et al., « Residual stress and distortion of rectangular and S-shaped Ti-6Al-4V parts by Directed Energy Deposition: Modelling and experimental calibration », *Additive Manufacturing*, vol. 26, p. 166-179, mars 2019, doi: [10.1016/j.addma.2019.02.001](https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.001).
- M. Mani, B. Lane, A. Donmez, S. Feng, S. Moylan, et R. Fesperman, « Measurement Science Needs for Real-time Control of Additive Manufacturing Powder Bed Fusion Processes », *National Institute of Standards and Technology, NIST IR 8036*, févr. 2015. doi: [10.6028/NIST.IR.8036](https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8036).
- P. Mercelis et J. Kruth, « Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting », *Rapid Prototyping Journal*, vol. 12, n° 5, p. 254-265, oct. 2006, doi: [10.1108/13552540610707013](https://doi.org/10.1108/13552540610707013).
- F. Sciammarella et B. Salehi Najafabadi, « Processing Parameter DOE for 316L Using Directed Energy Deposition », *JMMP*, vol. 2, n° 3, p. 61, sept. 2018, doi: [10.3390/jmmp2030061](https://doi.org/10.3390/jmmp2030061).
- D. Svetlizky et al., « Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications », *Materials Today*, vol. 49, p. 271-295, oct. 2021, doi: [10.1016/j.mattod.2021.03.020](https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020).
- Unocic, Raymond R. (Robert), « A fundamental investigation of process efficiencies in the Laser Engineered Net Shaping (LENS) solid freeform fabrication process ».