



HAL
open science

Modélisation de la répartition d'énergie en procédé de fabrication additive laser fil avec tête coaxiale

Clément Roch, Sylvain Lavernhe, Christophe Tournier

► **To cite this version:**

Clément Roch, Sylvain Lavernhe, Christophe Tournier. Modélisation de la répartition d'énergie en procédé de fabrication additive laser fil avec tête coaxiale. Conférence Manufacturing'21, Jun 2021, Angers (en ligne), France. hal-03268257

HAL Id: hal-03268257

<https://hal.science/hal-03268257>

Submitted on 23 Jun 2021

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.



Modélisation de la répartition d'énergie en procédé de fabrication additive laser fil avec tête coaxiale

Clément ROCH^{(a)*}, Sylvain LAVERNHE^(a), Christophe TOURNIER^(a)

(a) Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, LURPA, 91190, Gif-sur-Yvette, France

* Correspondant : clement.roch@ens-paris-saclay.fr

Résumé : le procédé de fabrication additive laser fil, ou Wire Laser Additive Manufacturing (WLAM) se caractérise par l'utilisation d'un laser comme source d'énergie pour faire fondre un fil métallique d'apport et déposer des cordons sur un substrat. Des études précédentes caractérisant l'influence des principaux paramètres du procédé sur les dimensions caractéristiques ont mis en avant la possibilité de contrôler indépendamment la largeur et la hauteur des cordons en modifiant l'apport de matière et la puissance. Ces résultats restent macroscopiques et ne permettent pas de caractériser l'influence de la répartition de la puissance apportée sur la géométrie des cordons et des pièces obtenues.

En particulier, le procédé de fabrication est piloté sans prendre en compte l'influence des paramètres géométriques et cinématiques de la tête de dépôt sur la répartition de la puissance délivrée. Ainsi, un modèle est proposé pour calculer l'apport de puissance en tout point de la géométrie ainsi que des critères pour quantifier les répartitions observées. Enfin, ces résultats sont exploités pour proposer des plages d'orientations de la tête de dépôt adaptées aux trajectoires et aux géométries à produire.

Mots clés : Fabrication additive, WLAM, tête coaxiale, trajectoire, cinématique

1 Introduction

L'utilisation de la fabrication additive tend à se démocratiser mais son utilisation dans les domaines de la production de pièces mécaniques reste un enjeu majeur, notamment pour les pièces métalliques. De nombreux procédés ont été proposés et mis en œuvre pour réaliser la génération de volumes, que ce soit à partir de matériaux sous forme de poudre ou sous forme solide. L'emploi de cette dernière forme permettrait de réduire les enjeux de santé liés aux poudres métalliques, et présente donc une voie intéressante pour le développement de procédés de fabrication additive. De plus l'utilisation d'un matériau d'apport sous forme de fil métallique permet de générer des pièces pleines sur des volumes conséquents, comme observé avec les technologies de fabrication additive par arc-fil, ou *Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)*.

D'autres procédés basés sur l'usage d'un fil existent, et notamment la fabrication additive laser-fil, ou *Wire Laser Additive Manufacturing (WLAM)*. Ce procédé combine plusieurs éléments, entre la source et le faisceau laser, l'apport de fil et le déplacement de la tête. Ainsi de nombreux paramètres influent sur les géométries des cordons, et donc à terme sur les géométries des entités géométriques produites. La figure 1 présente un classement de différents paramètres influents regroupés par catégories en fonction de leurs origines.

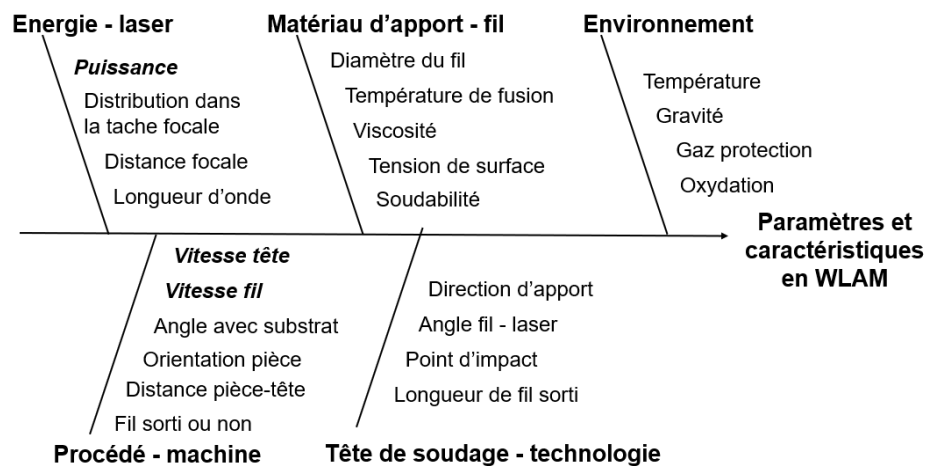


Figure 1 : Proposition de classification de différents paramètres influents sur le procédé laser-fil en différentes catégories.

Les études précédentes se sont principalement intéressées aux variations des dimensions de cordons en fonction de trois paramètres principaux, à savoir la puissance du laser, la vitesse d'apport du fil et la vitesse de déplacement de la tête (Oliari, 2017) portant le faisceau laser et le mécanisme d'apport du fil, en montrant notamment qu'il est possible de faire varier les largeurs et hauteurs des cordons indépendamment. D'autres études ont étudié l'impact de la direction d'apport du fil (Mok, 2008) et celui de l'angle par rapport au substrat (Liu, 2016). Cependant les têtes lasers majoritairement utilisées dans la bibliographie contiennent un faisceau laser dont l'axe est distinct de l'axe d'apport du fil. Certaines configurations proposées sortent de ce cadre en exploitant plusieurs faisceaux lasers pour s'approcher du cas où l'axe du fil et du laser sont identiques, avec des configurations à 8 faisceaux (Du, 2019) ou des solutions commerciales comme celle de Coaxworks avec une tête à 3 faisceaux. C'est une tête de ce type qui est utilisée au sein de la cellule hybride laser-fil du LURPA, ce qui

nous pousse à nous intéresser aux différences entre cette technologie et l'utilisation d'un seul faisceau.

Ainsi nous cherchons en premier à étudier l'impact de cette configuration sur la puissance issue du laser afin de vérifier si elle est en effet comparable à un unique faisceau laser coaxial, puis nous cherchons à établir l'impact de l'orientation et de la position de la tête, c'est-à-dire des paramètres de positionnement, sur les répartitions de puissance fournie à la pièce. En effet, les formes des cordons de soudures réalisés dépendent de la géométrie du bain de fusion, elle-même liée au rapport entre les actions des tensions de surface et de la gravité (Mohebi, 2020). Ainsi, la répartition de la puissance apportée à la pièce définit la quantité de matière fondue et la taille du bain de fusion, ce qui influera sur la forme du cordon.

Cet article présente la modélisation d'une tête laser à 3 faisceaux dite coaxiale en s'intéressant aux modèles choisis, leur mise en œuvre et aux critères pour décrire les résultats. Une comparaison avec un modèle de faisceau équivalent permet d'établir l'impact de cette configuration. Enfin, l'influence de la position et de l'orientation sur la répartition de puissance est étudiée.

2 Modélisation de la puissance issue du laser

Afin de décrire la quantité d'énergie apportée à la pièce, il est nécessaire de connaître la puissance apportée par le laser et le comportement du matériau. En effet, le faisceau laser incident possède une certaine quantité d'énergie et un profil de répartition défini. Il est donc possible de déterminer la répartition de puissance incidente d'un laser sur une surface avec un calcul d'irradiance. Pourtant cette puissance fournie par le laser en surface ne correspond pas entièrement à la puissance absorbée par la pièce. En effet, seule une partie du rayonnement est absorbée tandis en fonction des paramètres du matériaux et des surfaces (Nie, 2016). Cet article s'intéresse à la quantification de la puissance incidente sur la surface et ne présentera pas la puissance transmise au sein de la pièce.

2.1 Modélisation d'une source laser gaussienne

Il existe plusieurs types de sources laser présentant des profils de densité de puissance particuliers. On peut nommer en particulier les faisceaux gaussiens, super-gaussiens ou encore top-hat. Le choix a été fait de se concentrer en premier sur un faisceau de type gaussien, pour lequel la densité de puissance en n'importe quel point de l'espace peut être exprimée (Siegman, 1986) par l'équation suivante :

$$I(r, z) = I_0(z) e^{-\frac{2r^2}{w^2(z)}} \quad (1)$$

Avec r la distance radiale par rapport à l'axe, z la distance suivant l'axe, $w(z)$ et $I_0(z)$ la taille et l'irradiance au centre du faisceau, données par les équations :

$$I_0(z) = I_0 \left(\frac{w_0}{w(z)} \right)^2 \quad (2)$$

avec w_0 le col du faisceau, I_0 l'irradiance au centre du col du laser, et :

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (3)$$

avec z_R la distance de Rayleigh, définie comme la distance à partir du col telle que $w(z_R) = \sqrt{2}w_0$. Ces différents paramètres caractérisant le faisceau gaussien sont représentés à la figure 2.

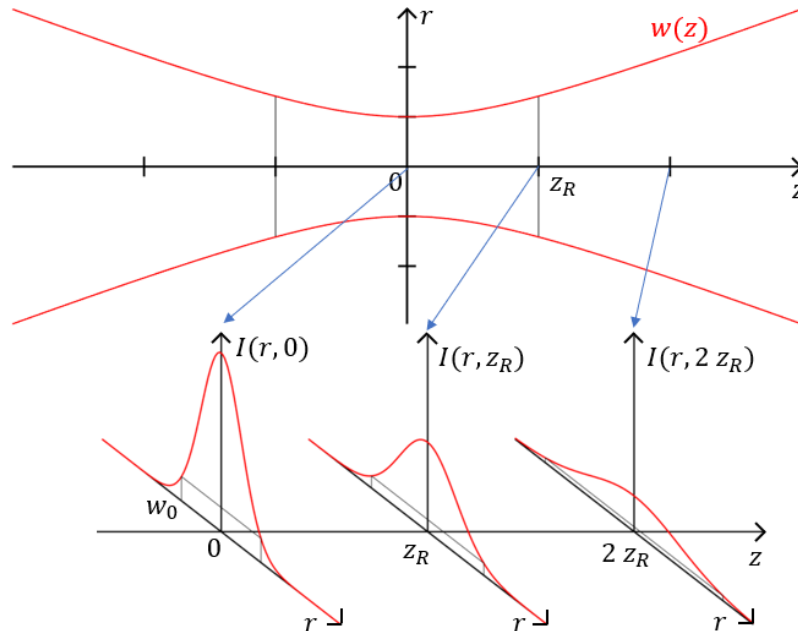


Figure 3: Schéma représentant l'évolution de la taille du faisceau gaussien suivant son axe. Les figures du dessous représentent différents profils d'irradiance pour différentes valeurs de z .

À partir de ces équations, il est possible de déterminer l'irradiance en tout point d'une surface par la loi de Lambert :

$$I_{\theta_L}(r, z) = I(r, z) \cos \theta_L \quad (4)$$

où I_{θ_L} est l'irradiance sur la surface, I la valeur d'irradiance normale obtenue par l'équation 1 et θ_L l'angle entre l'axe du faisceau et la normale à la surface au point étudié.

Le faisceau utilisé pour les simulations dont les résultats sont présentés par la suite a comme paramètres $w_0 = 1$ mm, $I_0 = 2,55$ kW/mm² et une longueur d'onde $\lambda = 1064$ nm, ce qui correspond à une puissance nominale de 4000 Watts.

2.2 Détermination de la puissance sur une surface

Ainsi il est possible de déterminer la répartition de puissance reçue sur une surface en exprimant chaque point de la géométrie dans le référentiel du faisceau laser. Le passage des coordonnées dans le repère pièce au repère de chaque faisceau fait intervenir les orientations des faisceaux par rapport à la tête et de la tête par rapport à la pièce. Un paramétrage de type Euler est utilisé pour caractériser l'orientation de la tête par rapport à la pièce, et l'utilisation de matrices homogènes permet d'écrire la matrice de

transformation T_{PT} entre les référentiels pièce P et tête T. Le paramétrage des axes z_L des lasers par rapport à la tête est représenté à la figure 3 et permet de décrire la matrice T_{LT} exprimant la position de l'axe z_L du laser par rapport à la tête.

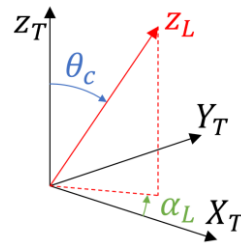


Figure 3 : paramétrage de l'axe z_L d'un laser par rapport au repère de la tête R_T

$$T_{LT} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_c)\cos(\alpha_L) & \cos(\theta_c)\sin(\alpha_L) & -\sin(\theta_c) & 0 \\ -\sin(\alpha_L) & \cos(\alpha_L) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_c)\cos(\alpha_L) & \sin(\theta_c)\sin(\alpha_L) & \cos(\theta_c) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$T_{LP} = T_{LT} \cdot T_{TP} \quad (6)$$

Il est alors possible d'exprimer les coordonnées de chaque point de la pièce dans le repère du laser et ainsi d'utiliser les formules définies à la section 3.1 pour déterminer l'irradiance sur la surface. L'application de cette démarche pour tous les points d'une surface permet de simuler le profil d'irradiance d'un faisceau laser sur celle-ci. Cependant, la tête de fabrication additive ne contient pas qu'un laser mais trois faisceaux concourants. L'utilisation de la matrice T_{LT} permet de considérer 3 faisceaux avec $\theta_c = 20$ et α_L valant 0° , 120° ou 240° . En faisant l'hypothèse qu'il n'y a pas d'interférences entre les faisceaux, il est possible de calculer la répartition totale en sommant les irradiances simulées pour les 3 faisceaux laser. La figure 4 présente des résultats de calcul d'irradiance obtenus pour un faisceau laser ou trois faisceaux dans la configuration étudiée.

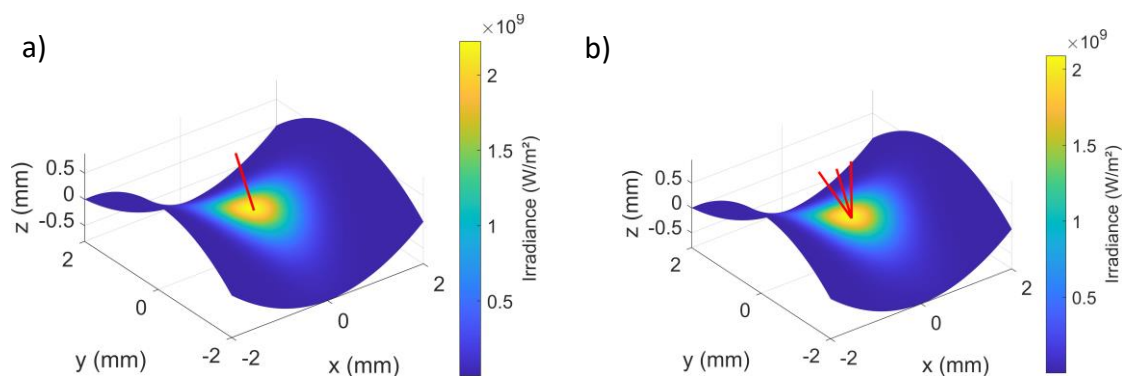


Figure 4 : Calcul de l'irradiance (W/m^2) sur une surface. Les axes rouges représentent les axes des faisceaux lasers. Cas d'une tête à un laser en (a). Cas d'une tête à trois lasers équirépartis sur un cône de demi-angle au sommet de 20° en (b).

Il est alors possible de simuler l'irradiance obtenue pour la tête à 3 faisceaux laser et de la comparer à l'irradiance équivalente d'un faisceau gaussien coaxial au fil. La figure 6a présente l'irradiance simulée ainsi que la différence au laser équivalent sur un plan pour des paramètres de positionnement par rapport au plan nuls. On observe alors quelques différences avec le modèle équivalent mais qui restent faibles par rapport à l'irradiance

maximale (0,154 kW/mm² de différence pour une irradiance maximale de 2.39 kW/mm²). Cependant, cette différence augmente lorsque les paramètres de positionnement évoluent (figure 5b).

Ainsi, la tête coaxiale 3 faisceaux présente un comportement similaire à un mono faisceau coaxial au fil lorsqu'elle est positionnée sans décalage ni orientation, mais un modèle équivalent ne peut être considéré pour étudier l'évolution de la répartition de puissance en fonction des paramètres de positionnement.

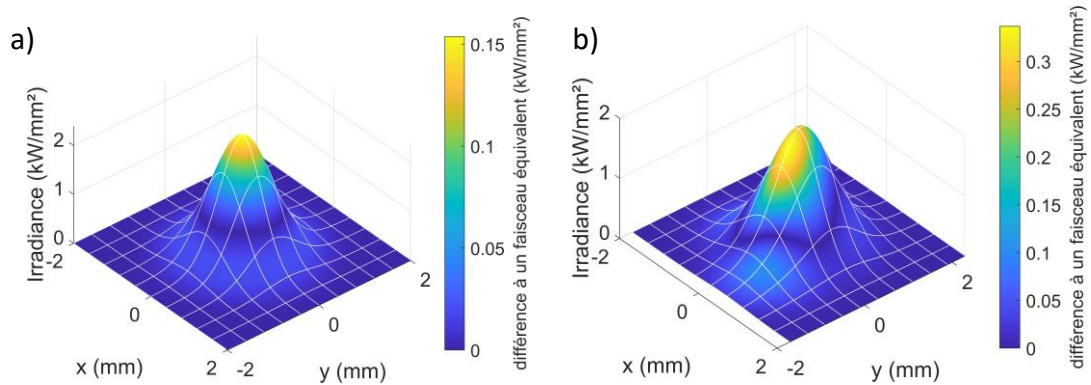


Figure 5 : comparaison entre les profils d'irradiance simulés sur un plan pour une tête à 3 faisceaux et un faisceau gaussien équivalent.

(a) Sans orientation ni décalage de la tête.

(b) Décalé de 0.5 mm et orienté de 30° par rapport à la normale.

3 Influence des paramètres cinématiques sur la puissance apportée

Afin de décrire la répartition d'irradiance sur une surface, la notion de tache (ou spot) laser est introduite. Celle-ci ne possède pas de définition universelle mais pourrait être définie comme la zone sur laquelle le laser influe. En effet la variation d'irradiance étant continue, une frontière claire en dehors de laquelle l'irradiance est nulle ne peut être définie. Ainsi, la tache laser peut être définie suivant plusieurs critères (Siegman 1998), notamment :

- $1/e^2$: un critère de seuil d'irradiance,
- D86 : un critère sur la puissance au sein de la tache.

Les sections suivantes détaillent ces deux critères ainsi que les raisons qui poussent à les choisir.

3.1 Utilisation d'un critère seuil d'irradiance

Le critère $1/e^2$ sert principalement à définir la taille d'un faisceau. Il est défini en considérant une section plane du faisceau perpendiculairement à son axe et en étudiant l'irradiance dans ce plan. La taille du faisceau est alors définie comme la zone au sein de laquelle l'irradiance est supérieure à $1/e^2$ de l'irradiance maximale. Pour adapter cette définition à l'étude de l'irradiance sur une surface quelconque, nous utilisons une définition plus appropriée considérant la tache laser comme l'ensemble des points de la surface pour lesquels l'irradiance est supérieure à $1/e^2$ de l'irradiance maximale observée sur la surface.

L'utilisation de ce critère couplé avec les simulations d'irradiance sur un plan permettent alors de déterminer les variations de la forme de la tache en fonction de l'angle de la tête, comme illustré à la figure 6 pour une surface plane. La tache semble passer d'une forme ronde pour une orientation normale de la tête laser à une forme elliptique lorsque

la tête est inclinée. Il est alors possible de déterminer la puissance incluse dans la tache laser à partir d'une intégrale de l'irradiance sur la surface. La figure 7 présente les variations de la puissance observée sur l'entièreté de la surface et de la puissance au sein de la tache en fonction de l'angle de la tête pour une tête à 1 ou 3 faisceaux. La puissance totale sur la surface reste constante en fonction de l'inclinaison pour les deux têtes, ce qui valide la conservation de puissance entre les deux modèles. Cependant, bien que la puissance contenue dans la tache d'un faisceau gaussien soit constante en fonction de l'orientation, ce n'est pas le cas de la superposition de 3 faisceaux. Dans ce dernier cas la puissance contenue dans la tache diminue en fonction de l'inclinaison, ce qui est cohérent avec le fait que ce critère n'est défini qu'à partir d'une valeur seuil et ne prend pas de notion de puissance dans sa définition.

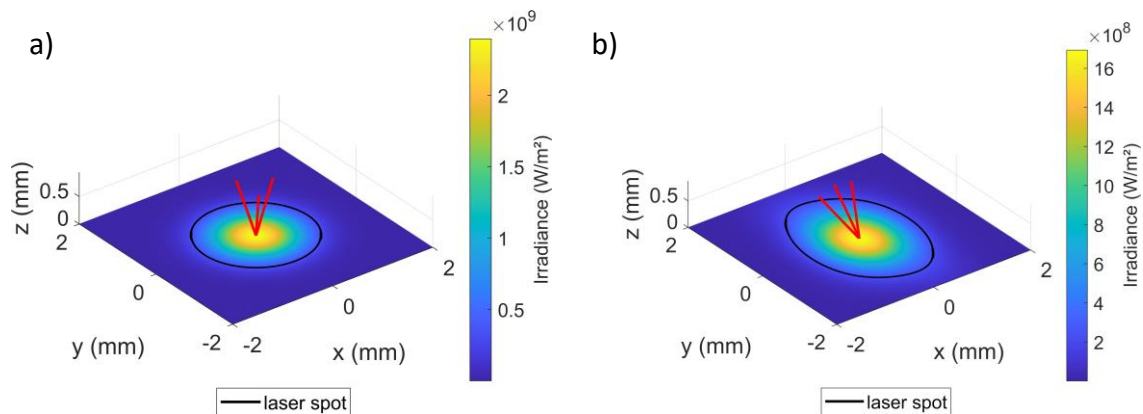


Figure 6 : Impact de l'angle de la tête sur la tache laser simulée sur un plan.

(a) Orientation normale de la tête à 3 lasers.

(b) Orientation de la tête de 45°.

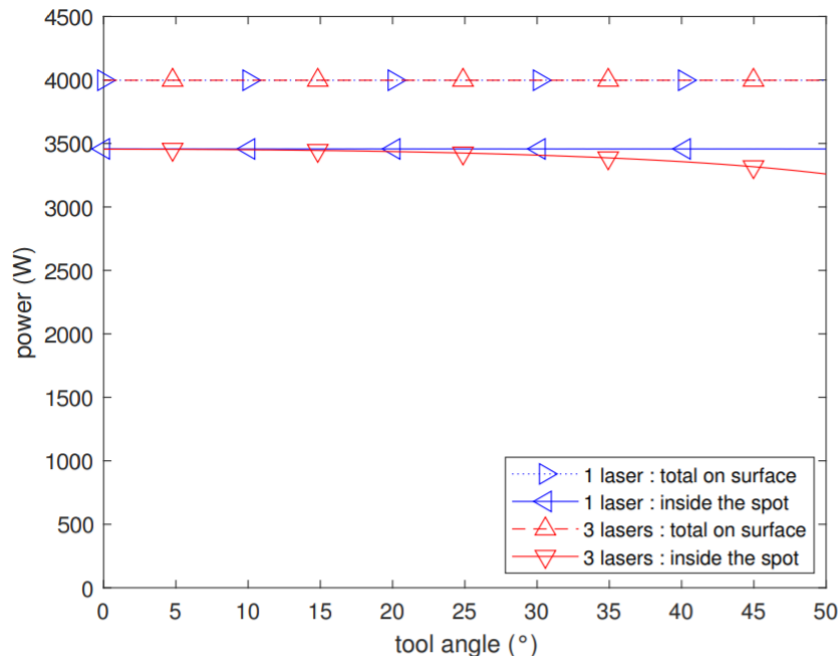


Figure 7 : Variations de la puissance totale sur la surface et de la puissance incluse dans la tache laser en fonction de l'angle de la tête. Les taches laser sont définies par le critère $1/e^2$ défini à la section 3.1.

Ainsi, considérer ce critère de définition de tache semble cohérent pour la modélisation d'un faisceau gaussien, mais ne permet pas de considérer une puissance donnée au sein

de la tache lors de l'étude de plusieurs faisceaux. En effet, la superposition de plusieurs faisceaux gaussiens orientés différemment ne donne pas une répartition gaussienne de l'irradiance. Ceci nous amène donc à choisir un autre critère de définition du spot permettant de conserver la puissance incluse indépendamment de l'angle.

3.2 Utilisation d'un critère en % de puissance

Un autre critère fréquemment utilisé pour définir la frontière d'un faisceau est le « D86 ». Dans le cas d'un faisceau circulaire il considère un plan de coupe perpendiculaire à l'axe du faisceau et définit la frontière comme la limite du disque centré contenant 86% de la puissance totale dans le plan de coupe. Cette valeur de puissance correspond au fait que l'application du critère $1/e^2$ sur un faisceau gaussien circulaire conduit à considérer 86% de la puissance, qui est aussi la valeur observée à la figure 7 pour 1 faisceau. Ces deux critères sont donc équivalents pour des faisceaux gaussiens circulaires et une variation de cette définition existe pour s'adapter aux faisceaux elliptiques. Cependant ces définitions ne permettent pas d'étudier les profils sur des surfaces non planes ni sur des faisceaux quelconques. Un autre critère s'inspirant du D86 est donc proposé en considérant que la tache laser sur une surface correspond à l'ensemble des points pour lesquels l'irradiance est supérieure à I_{86} , de sorte que la puissance incluse dans la tache corresponde à 86% de la puissance totale reçue sur la surface. La valeur de I_{86} est donc déterminée afin de garantir la condition de puissance, ce qui revient à définir une iso-irradiance. Ce critère « D86 » adapté s'appuie notamment sur le fait que la puissance reçue sur la surface ne varie pas avec l'angle d'inclinaison, comme observé à la figure 7.

L'application de ce critère permet alors de déterminer les frontières de la tache laser en conservant la puissance incluse. La figure 8 présente une comparaison entre ce critère et le critère $1/e^2$. Les formes obtenues par iso-irradiance ne correspondent plus à des ellipses, ce qui justifie le besoin d'adaptation du critère D86.

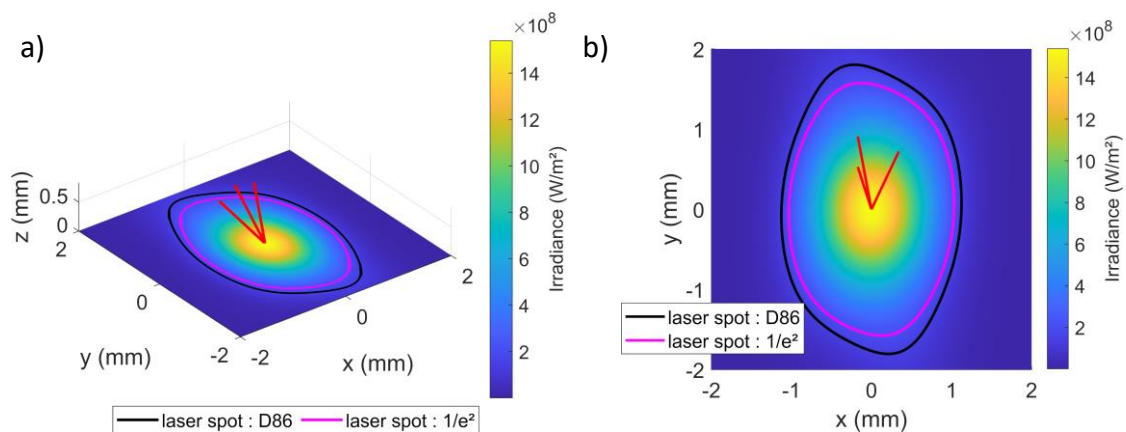


Figure 8 : Comparaison de deux critères de définition de la tache laser sur un plan pour une tête inclinée à 50°. Vue 3D en (a) et vue projetée en (b).

3.3 Influence des paramètres

Une fois la tache définie, plusieurs critères peuvent être utilisés pour observer l'évolution de la répartition de puissance en fonction des paramètres de positionnement de la tête. Dans un premier temps, nous nous appuyons sur des photographies issues de la documentation de la tête laser (figure 9a), présentant les taches laser pour différentes hauteurs afin de vérifier l'adéquation du modèle proposé. Ces images ne permettent pas d'établir une mesure de l'irradiance observée, mais les contours des taches peuvent

être extraits. En appliquant le même facteur d'échelle à toutes ces images, nous les comparons ensuite aux irradiances calculées pour chaque hauteur, en prenant en compte la définition des taches laser établie précédemment. Les résultats indiquent que les variations des taches laser sont comparables et permettent de représenter certains phénomènes (figure 9b), comme la séparation en plusieurs faisceaux pour des valeurs de z importantes (supérieures à 3mm). Il est à noter que les photographies semblent représenter des niveaux d'irradiances constants au sein des taches, ce qui n'est pas le cas pour les simulations avec modèle gaussien. Cette différence peut s'expliquer par une différence de source laser, en effet la source utilisée pour établir les photographies peut être d'un autre type comme top-hat par exemple.

Parmi les critères observables, la surface de la tache et l'irradiance maximale sont considérées. On observe sur la figure 9 que la surface augmente avec la distance alors que l'irradiance maximale diminue. Une étude sur l'influence de l'orientation de la tête montre qu'une augmentation de l'inclinaison de la tête entraîne une diminution de l'irradiance maximale mais une augmentation de la surface. Il est donc possible d'utiliser les paramètres de positionnement pour adapter l'apport d'énergie en cours de fabrication.

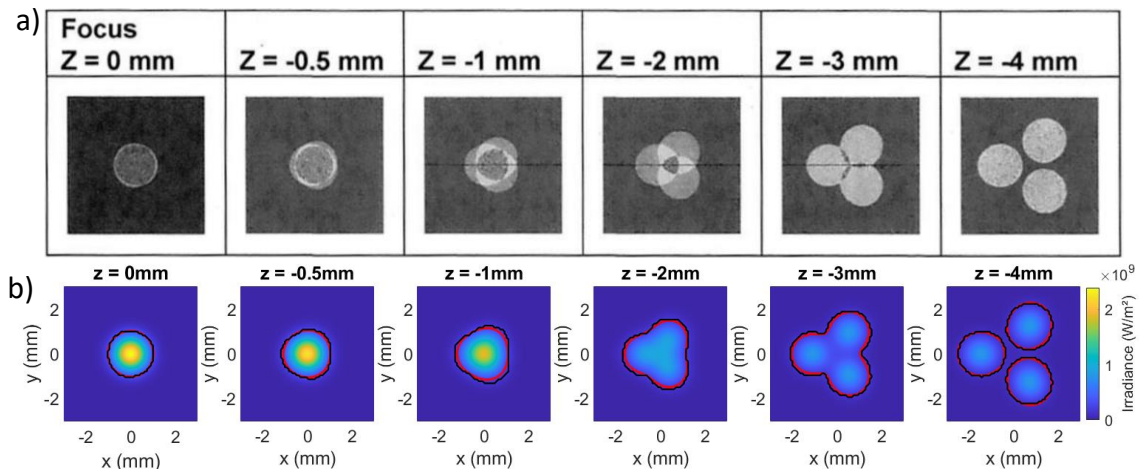


Figure 9 : (a) Images des taches laser pour différentes hauteurs Z (focus)
 (c) Comparaison entre les contours issus des photographies (en noir) et les contours de profils d'irradiance simulés avec un critère D86 (en rouge) pour différentes hauteurs z .

Cependant, les deux critères proposés (surface et irradiance maximale) ne suffisent pas à décrire complètement la répartition d'énergie, et ne permettent pas de garantir la forme de la tache. En effet, certaines valeurs d'orientation et de positionnement peuvent générer des répartitions s'éloignant fortement du comportement d'un laser équivalent, comme illustré à la figure 9b pour z supérieur à 2 mm. Ainsi d'autres critères peuvent être proposés pour décrire plus fidèlement la forme de la tache ainsi que la répartition de puissance sur la surface.

4 Conclusion et perspectives

Plusieurs phénomènes observés permettent donc d'établir que l'utilisation de 3 lasers au lieu d'un seul n'implique pas de différence majeure dans la répartition de puissance si l'orientation et le décalage sont nuls. On peut également observer que la configuration donnant la répartition d'énergie la plus dense est obtenue pour une orientation et un

décalage nuls. Modifier ces paramètres permettrait donc d'augmenter la taille de la tache mais avec une diminution de la densité de puissance. Ainsi pour conserver une densité similaire au cas sans décalage, il serait possible de modifier la puissance totale apportée à la pièce confirmant ainsi les résultats d'études précédentes (Ocylok,2016). Les travaux présentés ici sont théoriques et n'ont pas pu être comparés à des mesures réelles ou à des résultats expérimentaux. Ainsi, les conclusions tirées servent d'indications mais leur validité et application à la fabrication additive restent à étudier. Les travaux suivants pourront s'intéresser à la modélisation de la quantité de chaleur fournie à la pièce. En effet, les calculs d'irradiance permettent de quantifier la puissance fournie par le laser sur la surface et non la puissance absorbée par la pièce. Les résultats présentés sont établis pour un modèle gaussien, alors que les sources employées peuvent présenter d'autres profils, notamment de type top-hat. Une adaptation de ces conclusions à ces profils de faisceaux permettrait de généraliser ces conclusions. Au-delà de la modélisation de la puissance absorbée, le lien avec les formes des cordons résultants pourrait être établi à partir soit de simulations, soit de résultats expérimentaux.

Références

F. Du, J. Zhu, X. Ding, Q. Zhang, H. Ma, J. Yang, H. Cao, Z. Ling, G. Wang, X.M. Duan & S. Fan (2019) Dimensional characteristics of Ti-6Al-4V thin-walled parts prepared by wire-based multi-laser additive manufacturing in vacuum. *Rapid Prototyping Journal*, vol 25:5, pp. 849-856.

Q. Liu, Y. Wang, H. Zheng, K. Tang, H. Li & S. Gong (2016) Wire feeding based laser additive manufacturing TC17 titanium alloy. *Materials Technology*, vol 31:2, pp. 108-114.

M.S. Mohebbi, M. Kühn & V.A. Ploshikhin (2020) thermo-capillary-gravity model for geometrical analysis of single-bead wire and arc additive manufacturing (WAAM). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol 109, pp. 877-891.

S. H. Mok, G. Bi, J. Folkes & I. Pashby (2008) Deposition of Ti-6Al-4V using a high power diode laser and wire, Part I: Investigation on the process characteristics. *Surface and Coatings Technology*, vol 202:16, pp. 3933-3939.

Z. Nie, G. Wang, J.D. McGuffin-Cawley, B. Narayanan, S. Zhang, D. Schwam, M. Kottman & Y. Rong (2016) Experimental study and modeling of H13 steel deposition using laser hot-wire additive manufacturing, *Journal of Materials Processing Technology*, vol 235, pp. 171-186

S. Ocylok, M. Lechnitza, S. Thiemeb & S. Nowotnyb (2016) Investigations on laser metal deposition of stainless steel 316L with coaxial wire feeding, 9th International Conference on Photonic Technologies

S. Oliari, A.S. d'Oliveira & M. Schulz (2017) Additive Manufacturing of H11 with Wire-Based Laser Metal Deposition. *Soldag. insp. [online]*, vol.22:4, pp. 466-479.

A. E. Siegman (1986) *Lasers*, University Science Books, chap 6

A. E. Siegman (1998) How to (Maybe) Measure Laser Beam Quality, *DPSS (Diode Pumped Solid State) Lasers: Applications and Issues*, vol. 17 of *OSA Trends in Optics and Photonics (Optical Society of America)*, paper MQ1.