



HAL
open science

Modélisation d'une chaîne opto-mécanique de fabrication additive avec prise en compte des défauts d'assemblage

Kevin Godineau, Sylvain Lavernhe, Christophe Tournier

► To cite this version:

Kevin Godineau, Sylvain Lavernhe, Christophe Tournier. Modélisation d'une chaîne opto-mécanique de fabrication additive avec prise en compte des défauts d'assemblage. *Machines et Usinage à Grande Vitesse*, Jun 2018, Bordeaux, France. hal-02292487

HAL Id: hal-02292487

<https://hal.science/hal-02292487>

Submitted on 19 Sep 2019

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 d'une chaîne opto-mécanique de fabrication additive avec prise en compte des défauts d'assemblage

Kevin Godineau^(a), Sylvain Lavernhe^(a), Christophe Tournier^(a)

(a) LURPA, ENS Paris-Saclay, Institut Farman (FR3311), Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 94235 Cachan, France
Mail : kevin.godineau@ens-paris-saclay.fr

Résumé : Les machines de fabrication additive utilisées dans les procédés SLM et SLA sont composées d'un système de balayage laser permettant de focaliser et diriger un faisceau laser pour fusionner la matière brute (poudre ou liquide). Une des problématiques majeures consiste à maîtriser la position du spot laser dans le plan de travail. Celle-ci dépend essentiellement de la géométrie de la machine et de la position angulaire des galvanomètres. Dans la littérature, la plupart des modèles utilisent des hypothèses restrictives sur la géométrie du système de balayage. Ces hypothèses induisent des déviations sur la position réelle du spot laser comparée à la position désirée, ce qui affecte les performances de la machine. Cette communication présente deux modèles géométriques du système de balayage laser : un modèle nominal et un modèle avec prise en compte des défauts géométriques d'assemblage. Ces modèles géométriques, souvent utilisés en usinage et en robotique, sont ici mis en œuvre pour créer une machine de fabrication additive virtuelle. En utilisant ces modèles, la position du spot laser peut être simulée en connaissant certains paramètres géométriques de la machine et l'orientation des galvanomètres. Le second modèle géométrique est utilisé pour extraire l'influence des défauts d'assemblage sur la position du spot laser. Il permet également d'accélérer le processus de construction des tables de correspondance tout en maîtrisant les erreurs d'interpolation effectuées. Le travail réalisé permet de mettre en évidence et quantifier l'impact de chaque défaut d'assemblage sur la précision de positionnement du spot laser.

Mots clés : fabrication additive, modèles géométriques, défauts d'assemblage, erreur volumétrique.

1 Introduction

Dans le but de piloter les machines-outils et des robots, des modèles mathématiques ont été développés pour exprimer la relation entre l'espace des tâches (position et orientation de l'effecteur) et l'espace articulaire (position des axes). Ces modèles, aujourd'hui largement développés en usinage et en robotique sont intégrés dans les commandes numériques. De plus ces modèles permettent de prendre en compte de nombreux comportements mécaniques et leurs effets géométriques dans le but d'améliorer les performances des systèmes (défauts d'assemblage, déformation de la structure sous chargement inertiel ou sollicitations extérieures...).

Les travaux présentés dans cet article se focalisent sur la modélisation géométrique des machines de fabrication additive SLM et SLA. Pour ces procédés, les systèmes opto-mécaniques utilisés pour positionner précisément le spot laser dans le plan de travail peuvent être divisés en deux catégories (Ehrmann, 1991) : les systèmes de balayage laser pré-objectif et les systèmes de balayage laser post-objectif. Les travaux développés peuvent être appliqués aux deux types de système cependant cet article présente les développements dans le cas des systèmes de balayage laser post-objectif. Dans ces systèmes, le faisceau laser passe à travers un dispositif de focalisation et se réfléchit ensuite sur deux miroirs orientables afin d'être dévié vers le plan de travail pour faire fondre la matière brute. Les miroirs sont actionnés par des galvanomètres et servent à positionner avec précision le spot laser. Dans ce système, l'espace de travail est défini par la position du spot laser et l'espace articulaire est défini par les positions angulaires des galvanomètres.

De nombreux modèles mathématiques établissent des relations entre la position du spot laser et les positions angulaires des miroirs (Cui, 2009), (Eberle, 2013), (Li, 2005), (Manakov, 2011), (Xie, 2005). Toutefois, diverses hypothèses fortement restrictives sont formulées. Par exemple, l'axe de rotation et la surface réfléchissante des miroirs sont souvent confondus (Cui, 2009), (Manakov, 2011), (Xie, 2005), ce qui simplifie grandement le modèle. Afin d'obtenir une relation finale entre la position des miroirs et la position du spot laser dans le plan de travail pour chaque machine, ces modèles sont discrétisés en tables de correspondance, puis celles-ci sont améliorées par une étape de calibration expérimentale (Delgado, 2016). L'étape de discrétisation est nécessaire afin de pouvoir effectuer la correspondance entre l'espace des tâches et l'espace articulaire en temps réel. La pertinence du modèle mathématique initial influe grandement sur la qualité et le temps de calibration. Par conséquent, il est nécessaire de développer des modèles mathématiques permettant de représenter le plus fidèlement possible la géométrie de la machine de fabrication additive.

C'est pourquoi, dans cet article, deux modèles géométriques sont proposés. Le premier modèle représente le fonctionnement nominal d'une machine de fabrication additive. Le second modèle propose un paramétrage des défauts d'assemblage et permet de visualiser, quantifier et comprendre l'impact de ces défauts sur la position du spot laser dans le plan de travail.

Cet article est organisé de la manière suivante : la section 2 présente le modèle géométrique nominal de la chaîne opto-mécanique, la section 3 enrichit ce modèle en intégrant les défauts d'assemblage, enfin la section 4 analyse l'influence des défauts d'assemblage sur la position du spot laser dans le plan de travail.

2 Modèle géométrique nominal

2.1 Hypothèses et paramétrage

Contrairement aux modèles de la littérature, dans ce modèle deux vitres w_1 et w_2 sont intégrées afin de dissocier l'environnement de production de l'environnement de la source laser comme c'est le cas dans les machines SLM. L'indice de réfraction des vitres est noté n_2 et l'indice de réfraction des différents milieux gazeux est supposé similaire et noté n_1 . Le modèle nominal du système représenté en (Figure 1) et (Figure 2) est soumis aux hypothèses suivantes :

1. La position du point d'intersection entre le faisceau laser et le plan de travail n'est pas influencée par le dispositif de focalisation (Dynamic Focus Module ou DFM). Par conséquent dans ces travaux, seul le système permettant de positionner le spot laser dans le plan de travail est étudié.
2. L'origine de la source laser O_s est située au centre de la lentille équivalente du dispositif de focalisation (DFM).
3. Le faisceau laser atteint le plan de travail perpendiculairement pour la configuration articulaire $(\theta_x, \theta_y) = (0,0)$. Le point d'intersection est nommé O_p .
4. Les surfaces des miroirs, du plan de travail et des fenêtres sont considérées comme parfaitement planes.
5. L'épaisseur des fenêtres est constante et égale à e_v .
6. Les surfaces des vitres et du plan de travail sont parallèles entre elles.
7. On se place dans le cadre des lois de l'optique géométrique. Par conséquent, le faisceau laser est modélisé par un rayon lumineux.
8. La distance entre l'axe de rotation du miroir ax (ay) et la surface de réflexion du miroir mx (my) est non nulle. Cette distance est nommée e_m .

Le modèle géométrique nominal est exprimé en suivant le trajet du faisceau laser. Afin de simplifier l'élaboration de ce modèle, un repère est associé à chaque élément et des matrices de transformation sont créées pour changer de repère simplement. Par exemple, pour passer du repère lié au miroir y (my) au repère lié à la source laser (s) il suffit

d'appliquer les trois matrices de transformation suivantes (T_{s-ay0} , T_{ay0-ay} , T_{ay-my}). Les paramètres utilisés pour positionner les différents repères entre eux sont nommés X, Y et Z pour les translations (A, B et C pour les rotations).

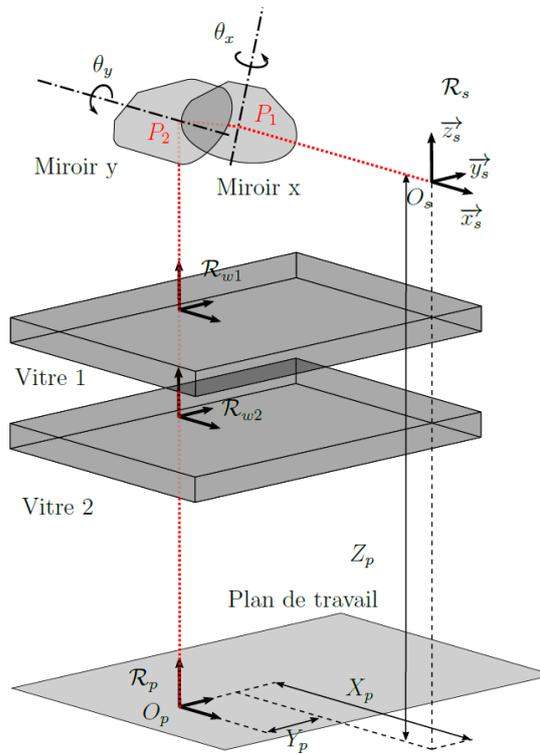


Figure 1 : Modèle nominal

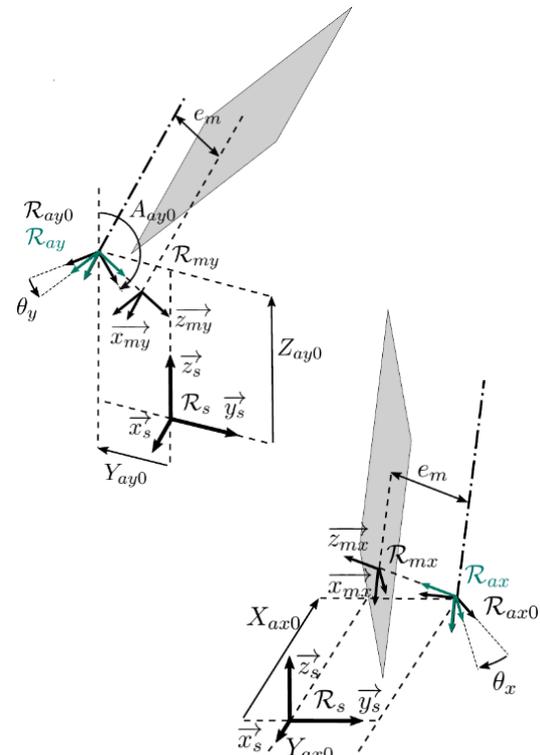


Figure 2 : Paramétrage des miroirs

Dans le but de généraliser la méthode à d'autres systèmes, le formalisme homogène est utilisé pour décrire les matrices de changement de repère. Les matrices de rotation sont définies à l'aide du paramétrage extrinsèque de Tait-Bryan (xyz). Par exemple, l'équation (Equ 1) représente la matrice de transformation homogène du repère R_{ay0} au repère R_s . Seules les transformations optiques (réflexion / réfraction) sont établies sans ce formalisme homogène.

$$T_{s-ay0} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(A_{ay0}) & -\sin(A_{ay0}) & Y_{ay0} \\ 0 & \sin(A_{ay0}) & \cos(A_{ay0}) & Z_{ay0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

2.2 Modèle géométrique direct

Le modèle géométrique direct (MGD) du système $(x, y) = h(\theta_x, \theta_y)$ est déterminé en suivant le chemin optique de la source laser jusqu'au plan de travail. Les variables K_1 , K_2 et K_3 définies dans les équations (Equ 2), (Equ 3) et (Equ 4) sont utilisées pour réduire la taille des équations du modèle géométrique direct (Equ 5) et (Equ 6).

$$K_1 = \frac{e_m + Z_{ay0} \cos(A_{ay0} + \theta_y) - Y_{ay0} \sin(A_{ay0} + \theta_y)}{\cos(A_{ay0} - B_{ax0} + \theta_y)} \quad (2)$$

$$K_2 = Z_p + 2e_v - K_1 \cos(B_{ax0}) \quad (3)$$

$$K_3 = \sqrt{\cos(2\theta_x)^2 \cos(2\theta_y)^2 - 1 + \frac{n_2^2}{n_1^2}} \quad (4)$$

$$x = -X_p + X_{ax0} + \frac{e_m - Y_{ax0} \cos(-A_{ax0} + \theta_x) \sin(B_{ax0})}{\sin(-A_{ax0} + \theta_x)} - K_2 \frac{\tan(2\theta_x)}{\cos(2\theta_y)} - K_1 \tan(2\theta_x) + \frac{2e_v \sin(2\theta_x)}{K_3} \quad (5)$$

$$y = -Y_p - K_1 \sin(B_{ax0}) - K_2 \tan(2\theta_y) + \frac{2e_v \cos(2\theta_x) \sin(2\theta_y)}{K_3} \quad (6)$$

Ce modèle nominal tient compte de nombreux paramètres géométriques et permet donc de modéliser une grande variété de systèmes de balayage laser. Enfin, les équations du MGD étant peu complexes, elles peuvent être intégrées dans des applications temps réel. Ce modèle permet de représenter le comportement géométrique d'une machine virtuelle, nominale.

2.3 Modèle géométrique inverse

Le modèle géométrique inverse (MGI) $(\theta_x, \theta_y) = h^{-1}(x, y)$ est utilisé pour convertir des consignes de positions exprimées dans l'espace des taches (trajectoires du spot laser lors de la fabrication) en consignes articulaires pour les actionneurs. Il ne peut être obtenu analytiquement compte tenu des équations du MGD. Par conséquent, un algorithme de descente de gradient de type Newton-Raphson est utilisé pour déterminer les solutions du MGI numériquement. Cette méthode augmente significativement le temps de calcul du MGI et le rend impossible à utiliser en temps réel pour générer les consignes articulaires. Il est donc nécessaire d'utiliser des tables de correspondance entre les deux espaces afin de réduire le temps d'exécution du MGI (Delgado, 2016).

3 Modèle avec prise en compte des défauts d'assemblage

3.1 Liste des défauts d'assemblage

Le modèle précédent peut être enrichi afin de tenir compte de différentes sources de défauts qui perturbent le fonctionnement nominal de la chaîne opto-mécanique : défauts

optiques, défauts géométriques de surfaces, défauts thermiques qui introduisent des déformations de toutes les pièces du système, défauts dynamiques... La suite de l'article se concentre sur l'intégration et l'analyse des défauts d'assemblage des différents composants élémentaires.

À l'exception de la troisième et de la sixième, les hypothèses précédentes restent valides. L'analyse du paramétrage du système précédent (Figure 1) et (Figure 2) permet de montrer, qu'avec le paramétrage proposé, trente défauts d'assemblage ont un impact sur la position du spot laser. Ces défauts d'assemblage sont répertoriés dans le (Tableau 1). Chaque défaut est noté δ_γ , les indices x, y et z (ou a, b et c) correspondent aux défauts de position le long des axes x, y et z (ou défauts de rotation autour des axes x, y et z).

Tableau 1 : Liste des défauts d'assemblage inclus dans le modèle géométrique

	x	y	z	a	b	c
Source laser		δ_{y_s}	δ_{z_s}		δ_{b_s}	δ_{c_s}
Axe de rotation x		$\delta_{y_{ax}}$	$\delta_{z_{ax}}$	$\delta_{a_{ax}}$	$\delta_{b_{ax}}$	$\delta_{c_{ax}}$
Miroir x			$\delta_{z_{mx}}$	$\delta_{a_{mx}}$	$\delta_{b_{mx}}$	
Axe de rotation y		$\delta_{y_{ay}}$	$\delta_{z_{ay}}$	$\delta_{a_{ay}}$	$\delta_{b_{ay}}$	$\delta_{c_{ay}}$
Miroir y			$\delta_{z_{my}}$	$\delta_{a_{my}}$	$\delta_{b_{my}}$	
Fenêtre 1				$\delta_{a_{w1}}$	$\delta_{b_{w1}}$	
Fenêtre 2				$\delta_{a_{w2}}$	$\delta_{b_{w2}}$	
Plan de travail	δ_{x_p}	δ_{y_p}	δ_{z_p}	δ_{a_p}	δ_{b_p}	δ_{c_p}

3.2 Intégration des défauts d'assemblage

La (Figure 3) représente la géométrie de la chaîne opto-mécanique avec les trente défauts d'assemblage. L'intégration de ces défauts dans le modèle nominal est effectuée par l'ajout de nouvelles matrices de transformation homogènes non linéarisées associées aux éléments avec défauts. Par exemple, le passage du repère du miroir y au repère de la source laser nécessite maintenant six matrices de transformation (T_{sdef-s} , T_{s-ay0} , T_{ay0-ay} , $T_{ay-aydef}$, $T_{aydef-my}$, $T_{my-mydef}$). Parmi ces six matrices, on retrouve les trois matrices du modèle nominal précédent. Les trois nouvelles matrices permettent de passer des repères nominaux aux repères avec défauts pour les trois composants suivants (source laser, axe du miroir y et miroir y).

Le MGD avec prise en compte des défauts d'assemblage est obtenu comme précédemment (en suivant le trajet du faisceau laser). Ce modèle permet d'obtenir une machine virtuelle avec défauts $(x, y) = h_\delta(\delta_{y_s}, \dots, \delta_{c_p}, \theta_x, \theta_y)$ capable de simuler de nombreux comportements de la chaîne optique réelle. De plus, les défauts d'assemblage insérés dans le modèle final ne sont pas linéarisés. Il est donc relativement aisé

d'améliorer la pertinence de la modélisation géométrique du système en y intégrant ces nouveaux paramètres d'assemblage.

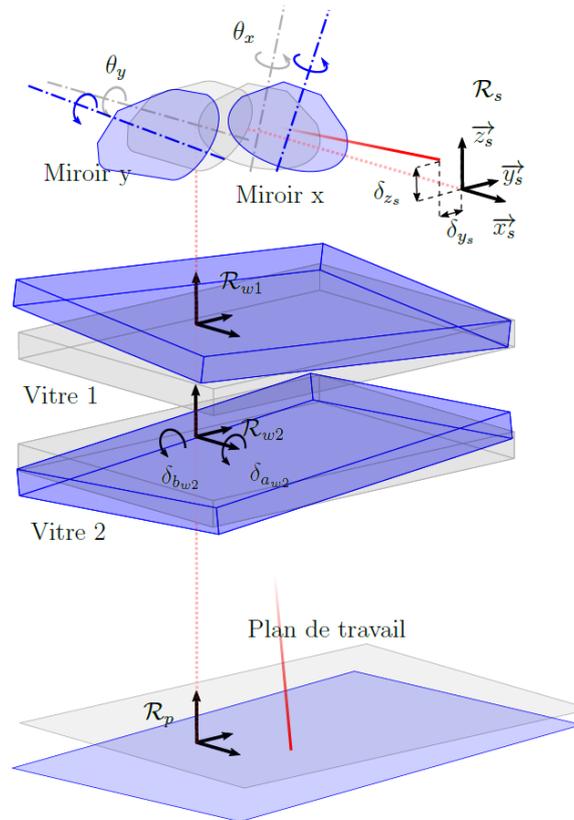


Figure 3 : Représentation des défauts d'assemblage dans le modèle

Le MGI avec défauts est lui aussi obtenu à l'aide d'un algorithme de type Newton-Raphson. L'augmentation du nombre de variables augmente la complexité mathématique et donc le temps de calcul. Les modèles géométriques direct et inverse avec prise en compte des défauts d'assemblage ne peuvent donc pas être utilisés en temps réel, mais peuvent servir à générer directement des tables de correspondance proches du comportement du système réel.

4 Influence des défauts d'assemblage

4.1 Visualisation des défauts d'assemblage

Les deux modèles précédemment développés permettent de caractériser l'influence des défauts d'assemblage de la chaîne opto-mécanique. Effectivement, la soustraction entre le modèle avec défauts d'assemblage et le modèle nominal permet de quantifier l'impact théorique d'un défaut d'assemblage δ_i sur la position du spot laser dans le plan de travail (Equ 7).

$$I_{\delta_i}(\theta_x, \theta_y) = h_{\delta_i}(0, \dots, 0, \delta_i, 0, \dots, 0, \theta_x, \theta_y) - h(\theta_x, \theta_y) \quad (7)$$

La (Figure 4) représente le déplacement du spot laser pour le défaut d'assemblage unitaire ($\delta_{y_s} = 1 \text{ mm}$) et ce dans toutes les configurations articulaires. Les flèches indiquent la direction de la déviation et les couleurs indiquent l'amplitude. Le déplacement de la position du spot laser induit par le défaut δ_{y_s} sur tout le plan de travail peut être représenté par deux composantes. La première est le défaut évalué au point O_p c'est-à-dire pour la configuration $(\theta_x, \theta_y) = (0,0)$. Elle représente de manière qualitative le défaut global sur tout le plan de travail. La seconde représente le défaut relatif de chaque point du plan de travail par rapport au défaut évalué au point O_p . Cette composante du déplacement traduit la non-linéarité de la chaîne optique dans le plan XY. Dans le cas de la (Figure 4) le déplacement global est d'environ 1 mm et l'effet des non linéarités est compris entre 0 et 0.12 mm sur l'ensemble du plan de travail. La forme du champ d'écart est due à l'inclinaison de l'axe du miroir x.

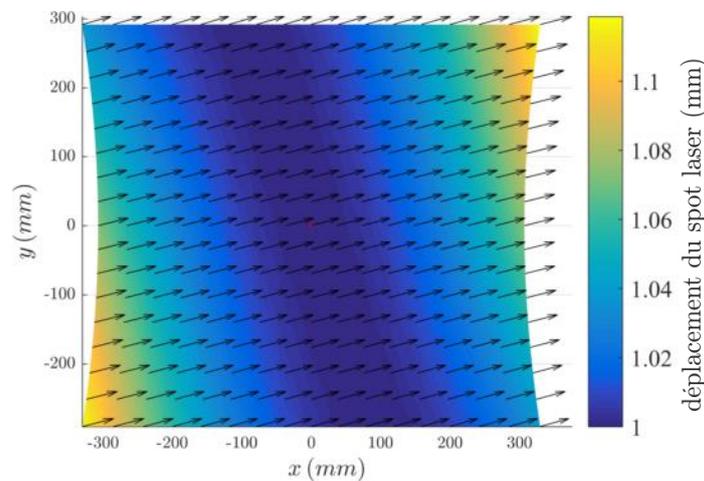


Figure 4 : Impact du défaut d'assemblage ($\delta_{y_s} = 1 \text{ mm}$)

4.2 Impact et caractérisation de chaque défaut d'assemblage

La (Figure 5) rassemble l'effet de chaque défaut d'assemblage unitaire ($\delta_{\gamma} = 1 \text{ mm}$ ou 1 mrad). Cette figure permet de montrer que l'impact des défauts d'orientation des vitres est négligeable (1000 fois moins important). Certains défauts ont un impact minimum au centre du plan de travail (coïncidence entre la borne minimum du défaut relatif et le défaut au point O_p). Les défauts ayant le plus d'influence sur la position du spot laser appartiennent à la tête de balayage laser. Ce graphique montre que les défauts de position et d'orientation de la source laser ont plus d'impact que les défauts liés au plan de travail. Ces travaux permettent donc de hiérarchiser l'influence des différents défauts.

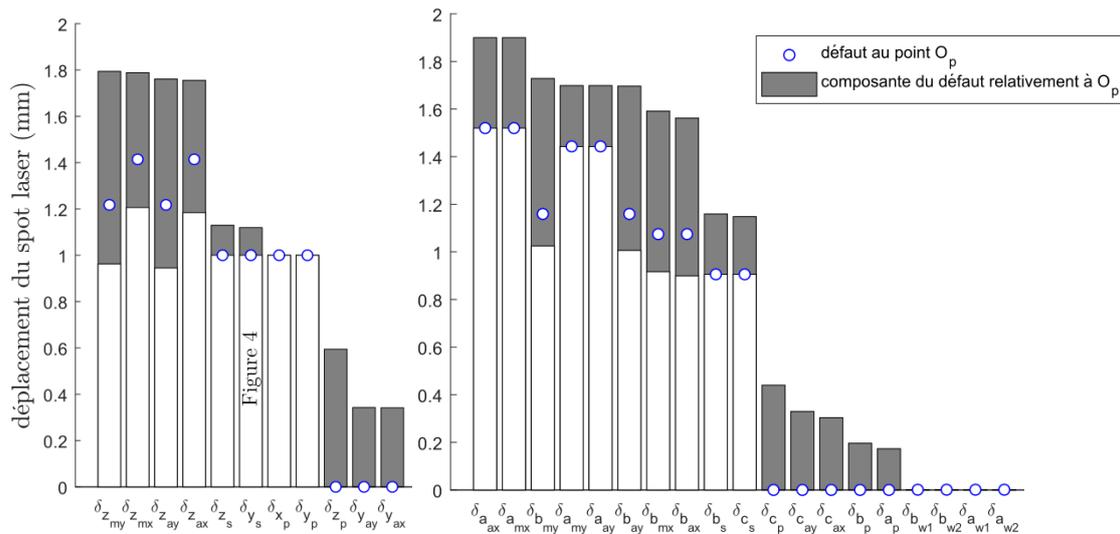


Figure 5 : Caractérisation macroscopique de l'influence de chaque défaut d'assemblage (défauts de position à gauche, défauts d'orientation à droite)

Enfin, à l'aide des modèles mathématiques développés, une machine de fabrication additive virtuelle avec défauts peut être créée afin de quantifier les écarts de position du spot laser. La (Figure 6) présente l'impact des 30 défauts d'assemblage du (Tableau 2) sur la position du spot laser dans le plan de travail. Ces travaux permettent d'obtenir une cartographie des écarts et de pouvoir apporter une correction en conséquence.

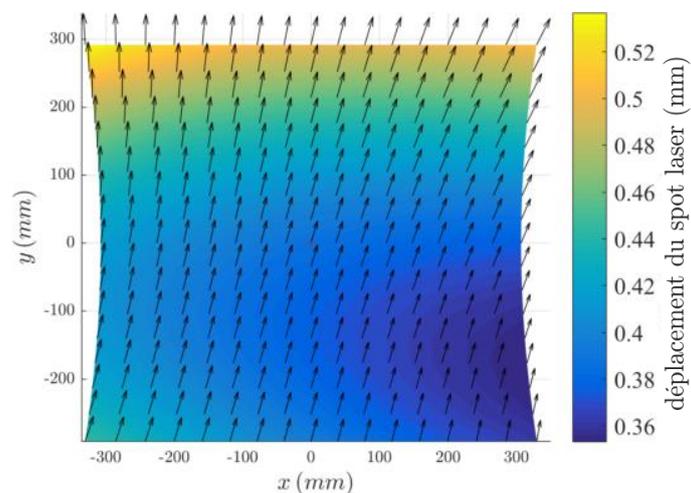


Figure 6 : Effet des 30 défauts d'assemblage du (Tableau 2) sur la position du spot laser

5 Conclusions et perspectives

La maîtrise de la position du spot laser dans les procédés de fabrication additive SLM et SLA est un enjeu majeur, car elle influe sur la qualité des pièces produites. Afin d'identifier l'effet de la géométrie de la chaîne opto-mécanique sur la position du spot laser, deux modèles ont été créés. Le premier modèle représente le système nominal avec peu

d'hypothèses restrictives sur la géométrie de celui-ci par rapport à l'état de l'art actuel. Le second modèle introduit trente défauts d'assemblage dans le but de représenter plus fidèlement le comportement d'une machine réelle. Ces deux modèles permettent de mettre en évidence et de quantifier l'effet d'un défaut d'assemblage sur la précision de positionnement du spot laser dans le plan de travail.

L'une des perspectives majeures de cette étude consiste à identifier les valeurs des défauts d'assemblage à partir de mesures expérimentales de la position du spot laser. L'utilisation de ces modèles permettrait ainsi de gagner un temps conséquent pendant la phase de calibration des machines de type SLM.

Tableau 2 : Valeurs des défauts d'assemblage introduits pour obtenir la (Figure 6). Les valeurs des défauts sont générées aléatoirement entre ± 0.1 mm et ± 0.1 mrad.

	x (mm)	y (mm)	z (mm)	a (mrad)	b (mrad)	c (mrad)
Source laser		-0.063	-0.085		-0.069	-0.065
Axe de rotation x		-0.040	-0.023	0.030	0.063	0.053
Miroir x			-0.025	-0.062	0.029	
Axe de rotation y		-0.099	-0.043	-0.028	0.018	-0.035
Miroir y			0.000	-0.075	0.047	
Fenêtre 1				-0.069	-0.013	
Fenêtre 2				0.066	-0.028	
Plan de travail	-0.085	0.011	-0.045	-0.074	0.040	-0.003

Références

- Cui S, Zhu X, Wang W et Xie Y, "Calibration of a laser galvanometric scanning system by adapting a camera model" *Appl. Opt.*, vol. 48, pp. 2632-2637, 2009.
- Delgado M A O et Lasagni A F, "Reducing field distortion for galvanometer scanning system using a vision system" *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 86, pp. 106-114, 2016.
- Eberle G, Dold C and Wegener K, "Building a vector model representation of a two-axis laser scanhead using numerical analysis for simulation purposes" *IJMIC*, vol. 20, pp. 199-207, 2013.
- Ehrmann J S, "Optics for vector scanning", *Beam Deflection and Scanning Technologies*, SPIE vol. 1454 pp. 245-255, 1991.
- Li Y, "Beam deflection and scanning by two-mirror and two-axis systems of different architectures: a unified approach" *Appl. Opt.*, vol. 47, pp. 5976-5985, 2008.
- Manakov A, Seidel H-P and Ihrke I, "A Mathematical Model and Calibration Procedure for Galvanometric Laser Scanning Systems" 2011.
- Xie J, Huang S, Duan Z, Shi Y and Wen S, "Correction of the image distortion for laser galvanometric scanning system" *Optics & Laser Technology*, vol. 37, pp. 305-311, 2005.