HAL
open science

Calcul d'Orientation en Fabrication Additive Métallique sur Lit de Poudre - Une Nouvelle Approche Quantitative par Fonction de Désirabilité

Mouhamadou Mansour Mbow, Frédéric Vignat, Philippe René Marin, Nicolas Perry

To cite this version:

Mouhamadou Mansour Mbow, Frédéric Vignat, Philippe René Marin, Nicolas Perry. Calcul d'Orientation en Fabrication Additive Métallique sur Lit de Poudre - Une Nouvelle Approche Quantitative par Fonction de Désirabilité. 16e Colloque National S-mart, Apr 2019, Les Karellis (73), France. hal-02355161

HAL Id: hal-02355161

https://hal.science/hal-02355161v1

Submitted on 8 Nov 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.

Calcul d'Orientation en Fabrication Additive Métallique sur Lit de Poudre

Une Nouvelle Approche Quantitative par Fonction de Désirabilité

Mouhamadou Mansour MBOW (1)
mouhamadou-mansour.mbow@grenoble-inp.fr

Philippe René MARIN (1)
philippe.marin@grenoble-inp.fr

Frédéric VIGNAT (1)
frederic.vignat@grenoble-inp.fr

Nicolas PERRY (2)
nicolas.perry@ensam.eu

(1) Université Grenoble Alpes, CNRS, G-SCOP – *Projet ANR COFFA* – Grenoble, FRANCE
(2) Arts et Métiers, Univ Bordeaux, CNRS, I2M – *Projet ANR COFFA* – Talence, FRANCE

Résumé — *Les méthodes de fabrication additive par fusion de lit de poudre (PBF) gagnent de plus en plus d'importance commerciale et deviennent de plus en plus sophistiquées. Leur chaîne numérique met en jeu plusieurs paramètres parmi lesquels la sélection d'orientation optimale de la pièce dans l'espace de production reste encore une problématique d'actualité. Plusieurs outils de calcul d'orientation optimale ont été proposés mais ceux-ci n'intègrent pas souvent les connaissances métiers d'experts (critères de qualité, de performance, de coût…) en entrée et n'offrent pas une analyse quantitative en sortie pour permettre une grande liberté de décision. Dans l'optique de contribuer à l'amélioration des outils, ce document propose une nouvelle méthode d'évaluation quantitative des orientations d'une pièce basée sur des critères d'experts traduits sous forme de fonction de désirabilité. La méthode de définition et d'évaluation des critères sur des géométries pour plusieurs scénarios de positionnement de la pièce est exposée. L'outil établi permet en sortie, de pouvoir assigner des priorités aux différents critères prédéfinis pour trouver un compromis satisfaisant divers objectifs. Un cas d'étude est également présenté afin de montrer la cohérence des résultats de cette approche.*

Mots-clés : *Fabrication additive métallique, EBM, indices de fabricabilité, formalisation d'expertise, désirabilité*

I. INTRODUCTION

Les méthodes de fabrication additive métallique (FAM) sont de plus en plus utilisées par les entreprises de fabrication grâce à leur possibilité de génération de formes complexes telles que des structures cellulaires [1] et à leur capacité de prise en charge de différents types de matériaux. Autrefois utilisées comme outils de prototypage rapide, aujourd'hui les méthodes de FAM gagnent de plus en plus d'importance commerciale puisqu'elles permettent de fabriquer des pièces fonctionnelles utilisables en environnement industriel, médical etc… Les principales technologies de FAM peuvent être divisées en trois grandes familles qui sont :

- Les systèmes basés sur la fusion de lit de poudre,
- Les systèmes basés sur le dépôt de fil en fusion,
- Les systèmes basés sur la stratoconception,
- Les systèmes basés sur le transfert de poudre.

Le présent document s'intéresse aux systèmes basés sur la fusion de lit de poudre (PBF, tiré de l'anglais Powder Bed Fusion).

Les systèmes PBF utilisent soit une source d'énergie Laser ou un bombardement de faisceaux d'électrons pour fondre ou fritter les particules de poudre [2]. Le processus de fabrication consiste à ajouter successivement des couches de métal fondues ou frittées correspondant à la section droite d'un objet tridimensionnel. Différentes technologies PBF telles que l'Electron Beam Melting (EBM), le Selective Laser Melting (SLM) et le Direct Metal Laser Sintering (DMLS) ont été développées au cours des dernières années pour de plus en plus permettre un meilleur contrôle du processus de fabrication. Contrairement aux méthodes de fabrication traditionnelles (fraisage, tournage, forgeage, …), l'utilisation de ces technologies ne nécessite pas le développement d'outils spécifiques pour le maintien et la mise en position ou encore la mise en forme de la pièce.

Du design proprement dit à la mise en œuvre, la chaine numérique des méthodes PBF met en jeu plusieurs étapes (Figure 1) qui doivent être bien maitrisées pour la réalisation de produits de qualité tout en évitant de passer par un nombre indéterminé d'itérations ou d'essais. Une des étapes les plus importantes ayant fait l'objet de plusieurs études, est la sélection de l'orientation adéquate des pièces dans l'espace de fabrication ; celle-ci fait également l'objet de cette présente étude.

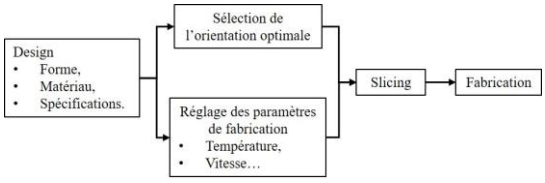

Figure 1. Chaine numérique FAM.

Bastian et al. [3] ont montré que 70% des règles de conception qui ont été établies pour la fabrication additive métallique par Kranz et al. [4] et Adam et Zimmer [5] dépendent de l'orientation. De plus, d'après quelques études [6, 7], certains

défauts géométriques pourraient être évités en déterminant une bonne orientation. Du fait de son importance significative, le calcul de l'orientation optimale a attiré l'attention de plusieurs chercheurs qui ont tenté de mettre en place des méthodes de calcul pour différents procédés de fabrication additive [8, 9].

L'évaluation de l'orientation est un problème à multi-réponses et les critères objectifs les plus souvent impliqués dans le calcul sont entre autres :

- Minimiser le volume de support,
- Améliorer l'état de surface,
- Réduire le temps de production,
- Eviter les distorsions géométriques,
- Faciliter l'enlèvement des supports,

Zweir et Wits [10] ont établi un algorithme pour réduire la quantité de support en utilisant la méthode du « Convex Hull ». Majhi et al. [11] se sont également appuyés sur la même méthode pour proposer une optimisation multi-objectifs visant à minimiser : le nombre de couches, le volume de support et l'effet escalier. Frank et Fadel [12] ont proposé un outil basé sur les opinions d'experts pour rechercher une orientation optimale. Danjou et Koehler [6] sont allés plus loin en construisant un algorithme d'optimisation du coût de fabrication en tenant compte de quelques facteurs d'influence de qualité et des propriétés mécaniques attendues. Dans la même idée d'assistance au choix de l'orientation optimale, certains auteurs ont établi des méthodes permettant de prendre en compte les restrictions des procédés dès les étapes de conception [3].

Cependant, les solutions existantes pour la recherche d'orientation ont dans la plupart des cas été développées pour des procédés comme le Dépôt de Filament en Fusion (FDM) et la Stéréolithographie (SLA). Leur usage pour les systèmes PBF pourrait ne pas donner des résultats précis compte tenu de la différence significative entre ces différents procédés. Par exemple, une étude effectuée auprès de partenaires industriels utilisant les méthodes PBF a montré tout un autre aspect qui met plutôt en avant des critères souvent fonctionnels [13]. De plus, pendant la recherche d'orientation optimale, il est possible que certains objectifs soient atteints au détriment d'autres. Pour cette raison, le designer ou préparateur de la fabrication doit pouvoir prioriser les critères qui lui semblent être les plus importants ; ce qui n'est pas possible avec la plupart des outils existant.

L'objectif de ce papier est d'exposer une nouvelle méthode quantitative pour l'évaluation du niveau de satisfaction pour chaque possible orientation d'une pièce donnée en FAM par fusion de lit de poudre. Pour cela, une approche par fonction de désirabilité visant à transformer les connaissances et préférences d'experts en valeurs testables sur des géométries est utilisée.

Les deux critères objectifs suivants ont été mis en avant pour illustrer la méthode proposée :

- Minimisation des supports et de leurs marques (soit C1),
- Positionnement à la verticale des surfaces fonctionnelles non post-traitées (soit C2).

La *section II* présente l'approche générale proposée, les *sections III* et *IV* développent respectivement la définition et l'évaluation des critères, et la *section V* présente un cas illustratif.

II. Approche generale

Dans l'approche proposée ici, l'opinion d'un expert vis-à-vis de chaque critère objectif est traduite sous forme de fonction de désirabilité (retranscrites graphiquement). Les fonctions de désirabilité permettent de normaliser des variables indépendantes qui sont de natures différentes en leur assignant des valeurs comprises entre 0 et 1 [14]. Dans la convention qui sera utilisée, les valeurs 0 correspondent aux réponses indésirables et les valeurs 1 correspondent aux réponses les plus désirées.

Les fonctions de désirabilité ont été largement utilisées dans plusieurs domaines pour convertir des problèmes à réponses multiples (*m* réponses) en une sortie unique [15] généralement agrégée en utilisant une moyenne géométrique (éq. (1), où les w_i représentent les poids de chaque réponse). Un des avantages de leur utilisation est le fait qu'elles offrent la possibilité d'assigner un poids ou un niveau de priorité à chaque réponse ou critère afin que la sortie soit agrégée selon des préférences bien définies. Des auteurs comme Derringer et Suich [16] ont déjà travaillé sur la mise en place de formulations mathématiques des fonctions de désirabilité allant de la moins sophistiquée à la plus sophistiquée. Dans cette étude les fonctions de désirabilité établies par [16] sont utilisées.

éq. (1) $: D_o = \left({d_1}^{w1} * {d_2}^{w2} * \ldots * {d_m}^{wm}\right)$ avec,

$$\sum_{i=1}^{m} w_i = 1$$

Dans la méthode de calcul proposée, la première étape est la définition des critères c'est-à-dire la conversion de l'opinion expérimentale en fonction de désirabilité (voir *section III*). La suite consiste à faire tourner la pièce dans l'espace grâce à l'utilisation de matrices de rotation de type Tait-Bryan [17] et à analyser ses surfaces. Pour un critère *i* et une position *n* donnée de la pièce, la désirabilité de chaque surface élémentaire est calculée en fonction de son orientation relative. Ensuite, ces valeurs de désirabilité élémentaires sont combinées pour obtenir la valeur de désirabilité totale de la pièce pour la position *n* et le critère *i* (voir *section IV*). Cette valeur est stockée et l'opération est répétée pour chaque position ou scénario d'orientation possible de la pièce. A la fin du calcul, une surface réponse en 3D représentant les rotations effectuées et leurs désirabilités correspondantes est tracée. Pour chaque critère une réponse individuelle est obtenue. Il est à noter qu'une orientation est d'autant plus satisfaisante que sa valeur de désirabilité est proche de 1.

III. Definition des criteres

A. *Minimisation des supports et de leurs marques*

En fonction de sa topologie, les surfaces constituant une géométrie peuvent dans certaines situations avoir besoin d'être supportées pendant leur fabrication. En fusion sur lit de poudre (FLP), les supports sont faits avec le même matériau que la pièce principale et nécessitent d'être enlevés en fin de production. Leur utilisation peut non seulement allonger le temps de production mais aussi induire des surcoûts liés à l'enlèvement

de leurs marques. Durant le processus de fabrication, la pièce est progressivement immergée dans un bac de poudre souvent consolidée par la chaleur fournie pour la fusion de chaque couche. Les auteurs [4, 7] ont montré que cette poudre consolidée peut faire office de support, offrant ainsi la possibilité de produire des surfaces auto-supportées à partir d'un certain angle seuil.

Soient d_1 la désirabilité, θ l'angle d'inclinaison d'une surface par rapport à l'horizontale, θ_1 l'angle à partir duquel l'auto-supportage devient possible, θ_2 l'angle à partir duquel le support n'est plus nécessaire et Min la valeur minimale de désirabilité. Le critère de minimisation des supports et de leurs marques est défini comme suit (tracé à la Figure 2):

- Si $\theta < \theta_1$: $d_1 = Min$
- Si $\theta_1 < \theta < \theta_2$: $d_1 = (1 - Min)\left(\frac{\theta-\theta_1}{\theta_2-\theta_1}\right) + Min$
- Si $\theta > \theta_2$: $d_1 = 1$

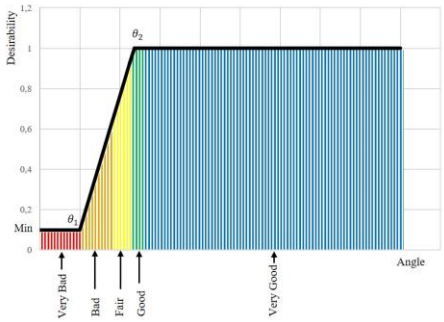

Figure 2. Fonction de désirabilité associée au critère C1.

A. *Positionnement à la verticale des surfaces fonctionnelles non post-traitées*

Pour plusieurs raisons différentes liées à la qualité, les utilisateurs des procédés de fabrication additive métalliques préfèrent positionner verticalement ou proche de la verticale certaines surfaces. Parmi celles-ci, il y a les surfaces fonctionnelles de la pièce qui ne seront pas post-traitées et donc par conséquent elles doivent être de bonne qualité dès la première fabrication.

Ainsi étant donnés d_2 la désirabilité, θ l'angle d'inclinaison d'une surface par rapport à l'horizontale, θ_1 l'angle à partir duquel la position devient désirable, θ_2 la position verticale, θ_3 l'angle à partir duquel la position n'est plus désirable et Min la valeur minimale de désirabilité. Le critère de positionnement des surfaces à la verticale est défini comme suit (tracé à la Figure 3):

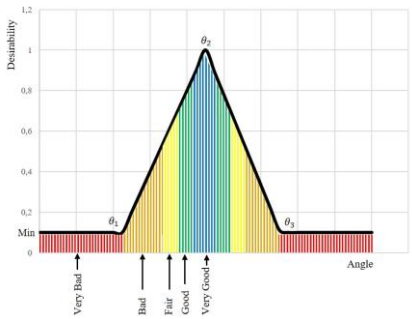

Figure 3. Fonction de désirabilité associée au critère C2.

- Si $\theta < \theta_1$: $d_2 = Min$
- Si $\theta_1 < \theta < \theta_2$: $d_2 = (1 - Min)\left(\frac{\theta-\theta_1}{\theta_2-\theta_1}\right) + Min$
- Si $\theta_2 < \theta < \theta_3$: $d_2 = (1 - Min)\left(\frac{\theta_3-\theta}{\theta_3-\theta_2}\right) + Min$
- Si $\theta > \theta_3$: $d_2 = Min$

IV. EVALUATION DES CRITERES

Le calcul de la désirabilité totale sur la pièce entière doit prendre en compte l'importance qu'occupe chaque surface élémentaire vis-à-vis de sa taille relative par rapport à la pièce, de son niveau de priorité etc… Pour les critères utilisés ici, la taille relative est considérée comme étant le facteur d'importance. Ainsi, pour une surface j donnée, la taille relative est définie par le rapport ($r_j = \frac{s_j}{s}$) entre l'aire de j et l'aire totale des p surfaces de la pièce.

La désirabilité totale se calcule donc à travers une opération pondérée par r_j, soit par somme soit par produit. Si une somme pondérée (éq. (2)) est effectuée entre les désirabilités élémentaires, une surface très grande (r_j grand) dans une position satisfaisante pourrait par exemple compenser ou cacher la non satisfaction d'une petite surface (r_j petit). Ce qui n'est pas forcément apprécié dans la mesure où le résultat peut indiquer de bonne orientations qui en réalité ne le sont pas. Les différentes surfaces de la pièce étant indépendantes, un produit pondéré ou géométrique de puissance (éq. (3)) peut atténuer cet effet compensatoire. La désirabilité totale donnée par l'équation (3) est ainsi utilisée.

éq. (2) : $D_{Tot} = \sum_{j=1}^{p} r_j d_j$

éq. (3) : $D_{Tot} = \prod_{j}^{p} {d_j}^{r_j}$

V. ETUDE DE CAS

A. *Généralités*

L'exemple étudié est une pièce présentant des formes issues d'une optimisation topologique. Les rotations s'effectuent autour des axes OX et OY respectivement par pas de 10°. Les fonctions de désirabilités associées à la minimisation de support et au positionnement à la verticale des surfaces fonctionnelles sont données par la Figure 4. Il faut noter que les surfaces ayant une inclinaison supérieure à 90° par rapport à l'horizontale ne nécessitent aucun support. Les surfaces de couleur grise sur la Figure 5 représentent celles qui sont fonctionnelles mais non post-traitées et doivent donc rendre une bonne qualité.

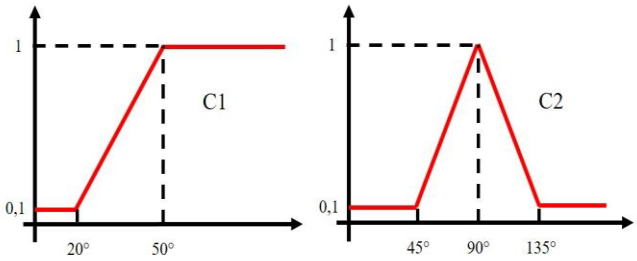

Figure 4. Fonctions de désirabilité appliquées à l'exemple.

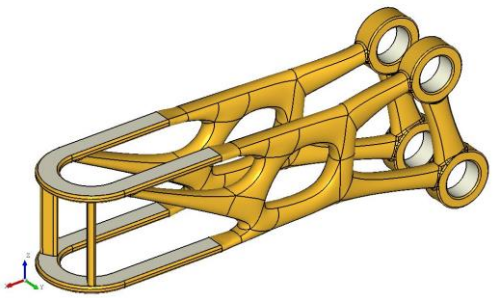

Figure 5. Pièce illustrative dans sa position initiale.

Les valeurs minimales choisies pour les critères C1 et C2 peuvent être différentes et dépendent de niveau d'acceptabilité accordé. Par exemple, si pour un critère $Min = 0$, il suffit qu'une seule surface ait une désirabilité égale à Min pour que toute la pièce ait une désirabilité nulle.

B. Résultats

Le tableau ci-dessous (Tableau 1) résume les performances de calcul de l'algorithme (durée, nombre de rotations, nombre de surfaces traitées).

Temps de calcul (s)	265
Nombre de rotations calculés	1296
Nombre de surfaces élémentaires	342

Tableau 1 : performances de calcul.

- Critère C1 : la Figure 6 représente la surface de réponse 3D des positions générées par l'algorithme pour le supportage. Les zones en bleu constituent des positions relativement bonnes donnant une valeur maximale de désirabilité d'environ 0,95 (Figure 7a). Dans le choix d'orientation minimisant le volume de support, il faudrait éviter les zones creuses. Par exemple le point X 270°, Y 180°, est un des points ayant la désirabilité la plus faible i.e. 0,67 et correspond à la position montrée à la Figure 7b.

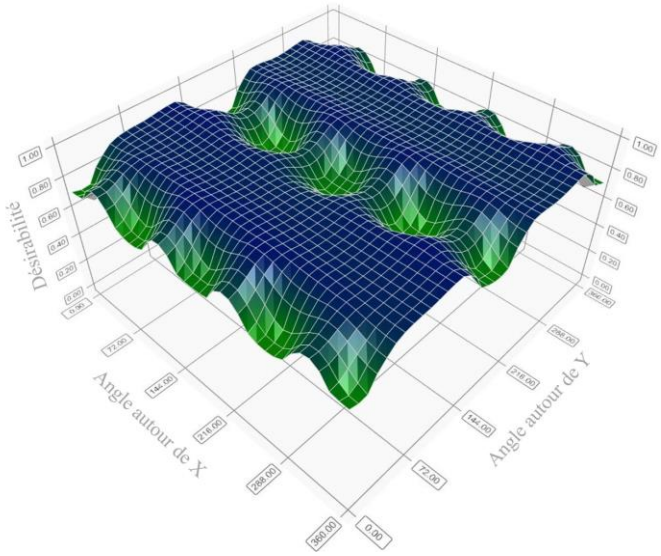

Figure 6. Surface de réponse du critère de supportage.

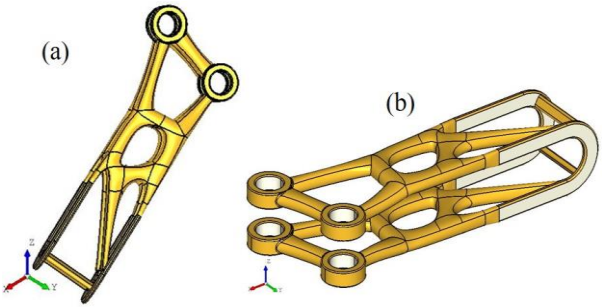

Figure 7. Positions (a) satisfaisante (X 230°, Y 40°) ; (b) nécessitant le plus de support (X 270°, Y 180°).

- Critère C2 : l'orientation objectif est celle mettant le plus de surface grise possible à la verticale. Dans le cas de cette pièce, les surfaces planes sélectionnées sont parallèles et les trous ont la même direction, donc la position recherchée est relativement facile à trouver. La désirabilité maximale est de 1 et la minimale est de 0,1. La Figure 8 montre des pics correspondant aux positions où toutes les surfaces sélectionnées sont positionnées verticalement.

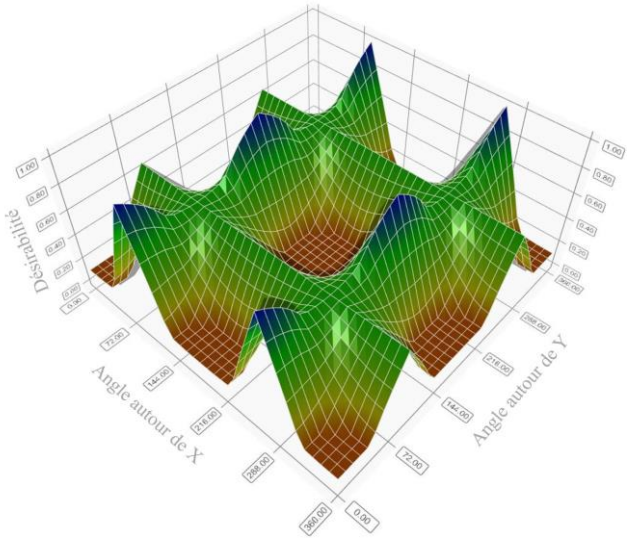

Figure 8. Surface de réponse du critère de positionnement à la verticale.

C. Agrégation

Une fois toutes les possibilités calculées pour tous les critères, il faut arriver à sélectionner une orientation qui doit à la fois satisfaire toutes les exigences. Ainsi tel qu'énoncé par l'équation éq. (1), des poids peuvent être assignés aux critères selon leur niveau d'importance. Trois situations sont exposées, la première considère que les deux critères sont de même poids (a), la deuxième met en priorité le critère de supportage (b) et la troisième place le critère de positionnement en priorité (c). En choisissant un angle quelconque autour de OX par exemple 90°, la désirabilité agrégée peut être tracée pour chaque cas en fonction de l'angle autour de OY.

(a) $w_1 = w_2 = 50\%$

(b) $w_1 = 80\%$; $w_2 = 20\%$

(c) $w_1 = 20\%$; $w_2 = 80\%$

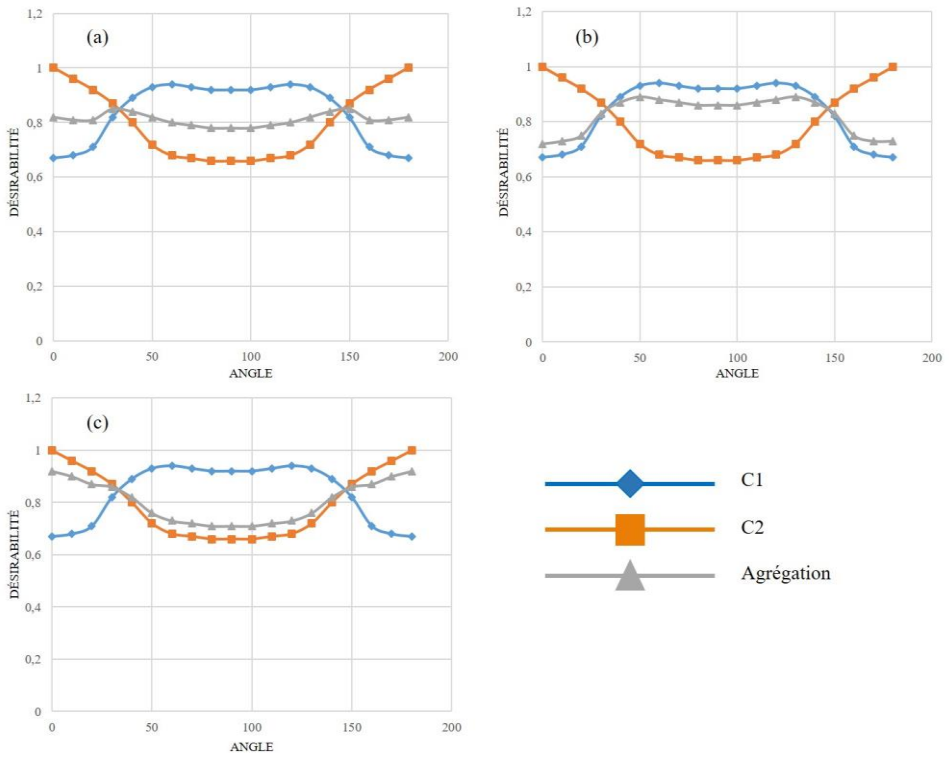

Figure 9. Sortie agrégée avec différents poids.

La 0 montre bien que selon le niveau de priorité assigné, la sortie prend une allure différente et tend vers le critère ayant le plus grand poids. Dans la plupart des situations, les deux critères sont en opposition mais ils arrivent dans certains cas à se couper (exemple pour X 90° et Y 32°). Lorsque les supports et leurs marques sont minimums, les surfaces fonctionnelles ne sont pas toutes verticales et vice versa. Il faut donc trouver un bon compromis.

VI. CONCLUSION

La fonction de désirabilité correspondant à chaque critère produit une réponse assez spécifique en fonction de la géométrie considérée. La pièce utilisée dans le cas d'étude, peut être orientée d'une multitude de manières mais chaque orientation a ses attributs dépendant des performances attendues. Les deux critères objectifs qui ont été appliqués ne peuvent pas dans toutes les situations aller dans le même sens mais des points d'intersection satisfaisants peuvent exister. Le travail devant être effectué en aval pour la sélection de la position optimale de fabrication peut s'avérer crucial car des situations conflictuelles se présentent souvent. Et ceci peut surtout être problématique pour un nombre de critère élevé.

Par le fait qu'elle ne fournit pas seulement la proposition d'une orientation particulière mais plutôt la cartographie des niveaux de qualité (désirabilité) de l'ensemble des orientations possibles, la méthode élaborée permet de supporter une prise de décision collective entre plusieurs experts afin de converger vers le meilleur scénario d'orientation. L'approche par fonction de désirabilité donne des résultats assez fiables pour le calcul de l'orientation d'une pièce en FAM sur lit de poudre et peut en perspectives être étendue à d'autres procédés de fabrication additive.

VII. REFERENCES

[1] C. Korner, "Additive Manufacturing of metallic components by Selective Electron Beam Melting – a review", International Materials Reviews 61:5 (2017) 187–192.

[2] William E. Frazier, "Metal Additive Manufacturing: A Review", Journal of Materials Engineering and Performance 23 (2014): 1917-1928.

[3] B. Leutenecker-Twelsiek, C. Klahn, M. Meboldt, "Considering Part Orientation in Design for Additive Manufacturing", Procedia CIRP 50 (2016) 408-413.

[4] J. Kranz, D. Herzog, C. Emmelmann, "Design Guidelines for Laser Additive Manufacturing of Lightweight Structures in TiAl6V4", Journal of Laser Applications 27 (2015).

[5] G. A. O. Adam, D. Zimmer, "Design for Additive Manufacturing-Element Transitions and Aggregated Structures", CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 7 (2014) 20-28.

[6] S. Danjou and P. Koehler, "Determination of Optimal Build Direction for Different Rapid Prototyping Applications", Proceedings of the 14th European forum on rapid prototyping, Ecole Centrale Paris (2009).

[7] F. Calignano, "Design optimization of supports for overhanging structures in aluminium and titanium alloys

by selective laser melting", Materials and Design 64 (2014) 203-213.
[8] S. H. Masood and W. Rattanawong, "A Generic Part Orientation System Based on Volumetric Error in Rapid Prototyping", International Journal of Advanced Manufacturing Technology 19 (2002) 209-216.
[9] S. Allen, D. Dutta, "On the computation of part orientation using support structures in layered manufacturing", Solid Freeform Fabrication Symposium, Texas USA (1994).
[10] M.P. Zweir and W.W. Wits, "Design for Additive Manufacturing: Automated Build Orientation Selection and Optimization", Procedia CIRP 55 (2016) 128–133.
[11] J. Majhi, R. Janardan, M. Smid and J. Schwerdt, "Multi-criteria geometric optimization problems in Layered Manufacturing", Proceedings of the 14th Annual ACM Symposium on Computational Geometry (1998), pp. 19–28.
[12] D. Frank and G. Fadel, "Expert system-based selection of the preferred direction of build for rapid prototyping processes", Journal of Intelligent Manufacturing 6 (1995) 339-345.
[13] C. Grandvallet, F. Pourroy, G. Prudhomme, F. Vignat, "From elicitation to structuring of additive manufacturing knowledge", Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17), Vol. 6: Design Information and Knowledge, Vancouver, Canada, 21.-25.08.2017.
[14] H. Trautmann and C. Weihs, "On the distribution of the desirability index using Harrington's desirability function", Metrika 63 (2006) 207-213.
[15] N. R. Costa, J. Lourenço and Z. L. Pereira, "Desirability function approach: A review and performance evaluation in adverse conditions", Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems 107 (2011) 234-244.
[16] G. Derringer and R. Suich, "Simultaneous Optimization of Several Response Variables", Journal of Quality Technology 12 (1980) 214-219.
[17] H. Murakami, K. Watanabe and M. Kitano, "A mathematical model for spatial motion of tracked vehicles on soft ground", Journal of Terramechanics 29 (1992) 71-81.