

Vers une méthodologie de conception proactive pour la fabrication additive

Germain Sossou, Frédéric Demoly, Ghislain Montavon, Samuel Gomes

ICB UMR 6303, CNRS

Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, 90010 Belfort, France

germain.sossou@utbm.fr, frederic.demoly@utbm.fr, ghislain.montavon@utbm.fr, samuel.gomes@utbm.fr

Résumé—*L'émergence de la fabrication d'additive (FA) dans l'industrie manufacturière insuffle une dynamique nouvelle dans le domaine des théories et méthodologies de conception. La FA permet une liberté de conception conduisant à des pièces présentant des formes complexes et pouvant intégrer de nombreuses fonctions. La FA favorise également la reconception de produits par la consolidation de pièces et/ou l'amélioration des performances. Le but de cet article est de présenter une initiative de recherche visant à présenter une nouvelle méthodologie de conception intégrant les caractéristiques (libertés et contraintes) de la FA. L'approche proposée vise à tirer pleinement parti des capacités et libertés apportées par la FA en considérant l'intégration de fonctions pour la conception de nouveaux produits. Cette approche s'appuie sur les principes de l'analyse fonctionnelle interne, à partir de laquelle il est possible d'identifier et de relier soigneusement des surfaces fonctionnelles avec le juste nécessaire pour assurer les flux requis (efforts, matière, énergie, information, etc.). Cela permet la conception de produits dotés de composants intégrés et optimisés. L'approche aborde également une démarche qui tend à résoudre certains des problèmes rencontrés en phase de préfabrication (préparation du modèle CAO à l'impression), pendant la conception. Un cas d'étude est utilisé pour illustrer la méthodologie proposée.*

Mots-clés—*Fabrication additive, Design For Additive Manufacturing - DFAM, Méthodologie additive de conception*

I. INTRODUCTION

Au cours de ces trente dernières années, l'une des avancées majeures en termes de procédés de mise en forme des matériaux constitue l'émergence de la fabrication additive (FA), comme composante de la 4^{ème} révolution industrielle (Industrie 4.0). Depuis la machine de stéréolithographie (ancêtre de la FA) [1], de nombreux nouveaux procédés de FA ont été mis au point. D'abord utilisés pour du prototypage rapide, les techniques de FA permettent aujourd'hui de fabriquer de plus en plus de produits finis. Avec plus de 20 procédés regroupés en 7 familles [2], la FA permet aujourd'hui de réaliser des objets de presque n'importe quelle forme et avec des distributions de matériaux auparavant extrêmement compliquées (voire impossible) à obtenir.

A. Opportunités et contraintes liées à la fabrication additive

Avec l'évolution des procédés FA (de même que l'élargissement du spectre de matériaux utilisables par ces procédés), de nombreuses nouvelles capacités de fabrication

sont désormais possibles. Les nouvelles libertés qu'offre la FA permettent d'appréhender plusieurs niveaux de complexité [3] :

- **Complexité de forme** – Le principe de fabrication couche par couche des procédés FA permet de fabriquer des pièces indépendamment de leurs formes. En effet, des formes complexes inenvisageables avec des procédés conventionnels peuvent aujourd'hui être considérées. Cela permet la production de pièces personnalisées sans nécessiter d'outils de fabrication et/ou d'opérations post-fabrication supplémentaires.
- **Complexité hiérarchique** – Il est possible d'agir à plusieurs échelles de la matière mise en forme. La variation des conditions de fabrication (puissance de la source d'énergie, durée d'exposition, matériaux, etc.) peut permettre, selon les procédés utilisés, de contrôler la nano/microstructure d'un point à un autre d'un même objet. L'utilisation de structures en treillis permet un contrôle fin, région par région, de la matière et de la mésostructure, afin d'obtenir des propriétés particulières. Le nouveau groupement d'intérêt scientifique créé sur les matériaux architecturés témoigne des futurs défis à relever pour tirer pleinement profit de ces nouvelles capacités.
- **Complexité fonctionnelle** – L'accessibilité à tout le volume de matière mis en forme permet de fabriquer des mécanismes *in situ*. De nombreuses liaisons cinématiques ont d'ores et déjà été fabriquées par des procédés de FA (y compris par des procédés basés sur la fusion de poudres métalliques). Par ailleurs, il devient possible d'insérer des composants (mécanique, électronique, ...) dans un objet, lors de sa fabrication [4].
- **Complexité du matériau** – La possibilité de déposer de la matière couche par couche, voire même point par point, donne de nouvelles libertés sur la distribution du matériau et la possibilité de fabriquer des pièces multi-matériaux [5]. Les matériaux aux propriétés variables dans l'espace (*functionally graded materials*) sont désormais facilement synthétisables aussi bien pour des bases polymères que métalliques.

Toutes ces capacités permettent donc la fabrication de produits aux propriétés (géométriques, mécaniques, etc.) difficile (voire impossible) à mettre en œuvre avec les procédés de fabrication conventionnels. Cependant la FA possède aussi des contraintes, qui, lorsqu'elles ne sont pas (ou mal) considérées, peuvent conduire à concevoir des pièces/produits dont la fabrication est de mauvaise qualité et/ou dont la fabrication affecte significativement les propriétés prévues. Parmi ces contraintes, on peut citer :

- **Les dimensions minimales/maximales réalisables** – La plupart des machines de FA sont limitées par une zone d'obtention plutôt réduite. Un produit plus large que cette zone ne peut être fabriqué d'un seul tenant à moins qu'il ne soit fabriqué par morceaux [6] puis réassemblé, avec des impacts possibles sur sa tenue mécanique. Par ailleurs tous les procédés sont limités par une dimension de couche minimale fabricable ou résolution. L'épaisseur d'une couche régit la résolution dans la direction normale à la plateforme, la résolution dans les directions parallèles à la plateforme dépend des dimensions de la tête de fabrication (diamètre de laser, diamètre d'un embout, etc.). Un produit comportant des détails géométriques de dimensions inférieures à ces résolutions ne saurait être fabriqué correctement.
- **La nécessité de support** – Même les procédés à base de poudres (en particulier les poudres métalliques) peuvent nécessiter l'utilisation de supports (pour éviter le gauchissement d'éléments plans de structures par exemple). La nécessité d'utiliser ces supports peut augmenter significativement les temps de fabrication et de post-traitement. Par ailleurs, le retrait des supports peut conduire à la détérioration/rupture de la pièce fabriquée. Enfin la présence de supports sur une surface impacte la qualité d'aspect.
- **L'anisotropie** – Les propriétés des pièces obtenues par FA ne sont pas identiques dans toutes les directions. Cette anisotropie, est plus ou moins marquée selon les procédés et les matériaux utilisés.

La FA offre donc de nombreuses opportunités, mais présente également des contraintes spécifiques. Parce qu'elle élimine nombre de contraintes de fabrication liées aux procédés de fabrication classiques, concevoir des objets destinés à être fabriqués par cette nouvelle famille de procédés nécessite un changement de paradigme. Concevoir efficacement pour la FA devrait donc répondre à deux types d'objectifs dont (1) la prise en compte des contraintes du procédé (pour maximiser la fabricabilité de la pièce) et (2) la saisie des opportunités offertes par le procédé (pour maximiser les performances de la pièce). Dans la littérature, des travaux ont déjà été entrepris sur le sujet, afin de permettre aux concepteurs de suivre ces changements de paradigme. Un bref état de l'art de ces travaux est présenté ci-après :

B. État de l'art sur les méthodes de conception pour la FA

A l'image des efforts de recherches qui ont été (et qui continuent d'être) dédiés au développement de méthodologies de conception, en phase avec les procédés de fabrication

classiques (incluant les techniques d'assemblage), de plus en plus de travaux de recherche sont dédiés à la conception pour la fabrication additive [7]. Le challenge consiste à mettre au point des méthodes de conception pour tirer pleinement profit de la FA. On peut classer ces travaux en deux grandes catégories : les règles de conception spécifiques aux différents procédés de FA, les approches de conception, voire celles destinées à la reconception.

1) *Les règles de conception pour la FA liées aux procédés*
 Pour aider les concepteurs, en phase de conception détaillée, des compilations de recommandations, principalement d'ordre géométrique, matériaux et conditions de fabrication, ont été formulées, sur la base d'expériences réalisées. Ces compilations sont analogues aux Handbooks sur la conception pour la fabrication et l'assemblage. Un projet allemand intitulé *Direct Manufacturing Design Rules* propose des règles géométriques pour les procédés de frittage laser (SLS), de fusion laser (SLM) et dépôt de fil fondu (FDM) [8]. De manière similaire, Thomas [9] a développé des règles pour le procédé SLS. En considérant des entités géométriques basiques relatives aux structures légères, Kranz et al. [10] ont mis au point une base de données pour guider la conception de structures fabriquées par fusion laser d'un alliage titane-aluminium (TiAl6V4). Afin de réduire l'inertie psychologique due aux habitudes des concepteurs familiarisés avec les procédés de fabrication conventionnels, Becker et al. [11] ont proposé une liste de recommandations et de principes généraux, permettant aux concepteurs de tirer pleinement profit des techniques de FA. Ces règles sont particulièrement utiles lorsque ces derniers sont déjà à des étapes suffisamment avancées du processus de conception. Par ailleurs, elles sont réactives par nature car amenant à reconcevoir la pièce. D'autres approches ciblent la prise en compte des spécificités de la FA dans des phases plus en amont du processus de conception.

2) *Les approches descendantes de conception*
 Ces approches sont des méthodes globales de conception qui, en partant des spécifications d'un produit et des capacités du procédé considéré, permettent de faire émerger une géométrie du produit. Une tendance qui se démarque clairement dans ces approches, est celle qui consiste à faire de l'optimisation topologique afin de maximiser uniquement les performances de la structure mécanique du produit conçu, aux niveaux permis par la FA. C'est ainsi qu'il existe des méthodes de conception basées sur l'optimisation topologique et qui permettent d'optimiser la masse [12], la résistance et la raideur [13] voire même la flexibilité [14]. Une étape de post-traitement, en modélisation 3D, est en général nécessaire sur les géométries issues de ces optimisations. Des challenges restent néanmoins à relever dans ce type d'approches, en particulier celles relatives aux outils de modélisation et de calcul qui les mettent en œuvre (e.g. CAO, IAO). Ces derniers, dans l'état actuel de l'art, conviennent à des conceptions destinées aux procédés de fabrication classiques, mais peuvent ne pas supporter des géométries issues d'un résultat théorique d'optimisation topologique. Par exemple, des structures en treillis qui comportent plus de 2000

éléments peuvent difficilement être modélisées par des outils de CAO classiques. Par ailleurs, ce type d'approche qui ne tire profit que des libertés de forme offertes par la FA appliquées à des pièces unitaires, ne permet pas, a priori, de faire émerger la géométrie d'un mécanisme multi-corps complet.

D'autres approches, plus globales, consistent à s'appuyer sur des exigences fonctionnelles et sur des caractéristiques du procédé considéré, pour aboutir à une géométrie convenable. Ponche et al. [15] ont développé une méthodologie pour concevoir des pièces métalliques obtenues par les procédés basés sur laser. En considérant des spécifications fonctionnelles, des caractéristiques du procédé et les phénomènes physiques liés à la fusion des poudres, l'approche permet de générer un modèle CAO réaliste ainsi qu'un programme de fabrication. La géométrie de la pièce, les directions et trajectoires de fabrication sont optimisées de sorte à minimiser la différence entre ce qui est conçu et ce qui est réellement fabriqué. Cette équipe de recherche a également proposé une autre approche globale [16] et qui est indépendante d'un procédé en particulier. Une autre méthode dédiée à la FA des pièces métalliques a été proposée par Vayre et al. [17]. Elle consiste en quatre étapes dont (1) l'analyse des spécifications des produits, (2) la proposition d'esquisses pour le produit, (3) l'optimisation paramétrique des concepts proposés (en considérant les capacités du procédé telles que les longueurs minimales fabricables) et (4) la validation d'un concept. Considérant que la plupart des contributions sur la conception pour la fabrication additive n'aide le concepteur que sur une seule phase de conception du produit, Kumke, et al. [18] ont, quant à eux, proposé un cadre de travail basé sur les méthodologies générales de conception (telles que celles issues du VDI 2221 [19]) et destiné à accompagner le concepteur de l'idée qu'il a du produit jusqu'à la solution finale. Ce cadre de travail suit une logique d'intégration de toutes les contributions liées à la conception pour la fabrication additive (DFAM). Par ailleurs ce cadre de travail tient compte de la connaissance qu'a le concepteur de la FA et du degré d'innovation qu'il souhaite.

II. METHODOLOGIE PROPOSEE DE CONCEPTION ADDITIVE PROACTIVE POUR LA FABRICATION ADDITIVE

La chaîne de développement actuelle destinée à la conception orientée FA comprend plusieurs acteurs qui travaillent typiquement séparément et séquentiellement (ils peuvent même ne pas être situés dans le même pays). Leurs tâches comprennent la conception (création du concept, conception détaillée, optimisation de la forme, etc.), les opérations de prétraitement (mise à l'échelle, orientation des pièces, génération des supports, tranchage, etc.) et les activités de post-traitement (enlèvement du support et assemblage), et pour lesquelles il subsiste un effet de cloisonnement de ces activités (effet « *over-the-wall* »). Dans un tel processus cloisonné, des cas où le post-traitement d'un produit serait trop difficile voire impossible à appréhender sans endommager les pièces sont entrevus ; le processus de développement génère donc des boucles de reconception. En outre, sur l'ensemble du développement du produit, certaines optimisations peuvent être opérées uniquement en local. Dérouler les activités de conception des produits susmentionnées dans une approche d'ingénierie intégrée ou considérer plus tôt certaines des

problématiques qui se posent aval dans le processus, permettrait certainement de réaliser des économies (en temps et en coût). L'approche que nous proposons constitue une première étape vers une telle intégration proactive, en phase de conception, des libertés et contraintes issues des métiers de la FA. Dans le cadre actuel de la production orientée FA, quatre tâches principales [20] se produisent pendant le traitement avant fabrication : l'orientation des pièces, la génération du support, le découpage des couches et la planification des chemins. À des degrés différents, ils influent sur la qualité de la pièce finie, en sachant que l'orientation de la pièce reste la plus influente [21]. L'approche proposée consiste donc à fournir un contexte orienté FA (à partir duquel les concepteurs pourraient effectuer la conception détaillée) en résolvant les problèmes rencontrés dans la tâche d'orientation des pièces, en amont, pendant la phase de conception, c'est-à-dire bien avant qu'une géométrie n'émerge. De plus, dans la mesure où il est possible de fabriquer *in situ* des mécanismes fonctionnels, l'approche proposée est également dédiée à la conception d'assemblages. En guise de première démarche, nous avons choisi de nous appuyer sur notre propre approche proactive dédiée à la conception orientée assemblage [22]. L'idée fondamentale qui sous-tend l'approche proposée est la suivante : compte tenu de la façon dont les pièces interagissent au sein d'un produit (leurs relations/contraintes) et des flux énergétiques (mécanique, thermique), de matière, d'information, etc., qui les traversent, tout le produit peut être conçu en matérialisant ces flux, en tenant compte des libertés, capacités et contraintes issues de la FA. L'approche qualifiée de « conception additive pour la FA » est structurée en trois étapes principales (voir Figure 1) décrites dans les sections suivantes. Considérant les différentes phases de conception classique, on positionne l'approche proposée au début de la phase de conception architecturale. Ceci suppose l'existence préalable d'un concept du produit à concevoir. L'approche, limitée à la prise en compte des flux, est illustrée à travers un cas d'application simple : une pince de désincarcération hydraulique.

A. Analyse fonctionnelle

Dans le cadre de l'élaboration du cahier des charges du produit à concevoir, les entités fonctionnelles nécessaires sont dans un premier temps définies. Une décomposition de la (des) fonction(s) principale(s) du produit est réalisée (en utilisant la méthode d'Analyse Fonctionnelle Externe - AFE APTE, par exemple), et de même les composants remplissant les fonctions techniques, issues de la méthode FAST, sont déterminés. Enfin, les interactions entre le produit et son milieu extérieur, et celles entre les composants du produit sont spécifiées. Sur la base de cette décomposition du produit et de leurs interactions avec les spécifications fonctionnelles (Analyse Fonctionnelle Interne - AFI), les Surfaces Fonctionnelles (SFs) du produit peuvent être générées. Nous définissons une SF comme une surface (plane ou non), qui remplit une fonction spécifique et qui se trouve à l'interface entre deux composants ou entre un composant et un élément du milieu extérieur faisant partie du fonctionnement. Les interactions au sein d'un produit et entre le produit et son

environnement se font au niveau des SFs. L'approche de Demoly et al [22], portée sur la génération de squelettes géométriques d'assemblage et d'interface, peut être exploitée pour générer les SFs entre les composants du produit. Selon les parties en interaction, et selon les physiques impliquées

différents types flux (matière, énergie ou information), qui doivent impérativement être identifiés et analysés, circulent pour assurer le fonctionnement du produit. Une telle analyse peut être effectuée à l'aide d'une représentation graphique telle que celle représentée sur la Figure 2a.

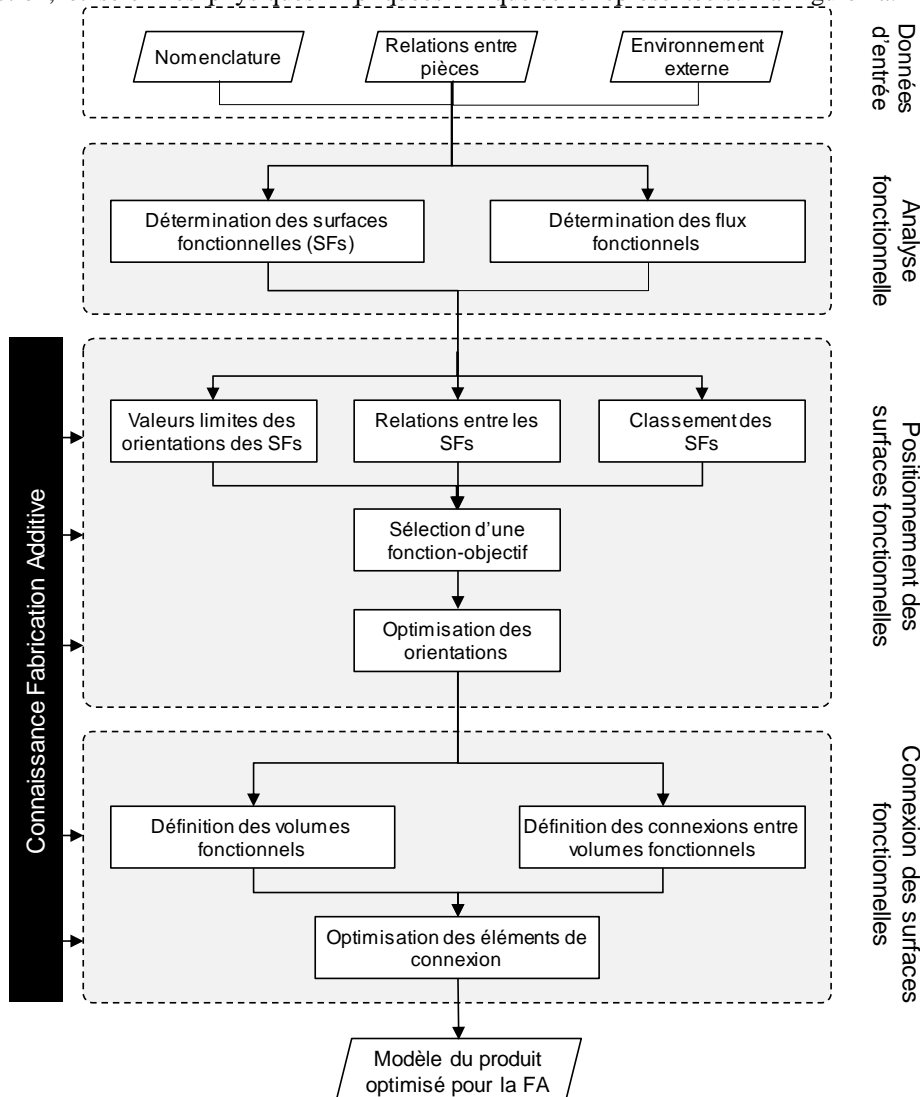


Figure 1. SCHEMA GLOBAL DE LA METHODOLOGIE DE CONCEPTION PROACTIVE POUR LA FABRICATION ADDITIVE

B. Mise en position des surfaces fonctionnelles (Figure 2b)

Nombre de difficultés rencontrées dans les phases de traitement avant fabrication, relèvent de la disposition (déjà figée) des différentes SFs et la manière dont elles sont connectées. Cela peut conduire à reconcevoir le produit, de sorte, par exemple, que l'on puisse trouver une orientation de fabrication réduisant le temps de fabrication, ou la quantité de support, ou une orientation maximisant la résistance d'un élément de structure. Une particularité de l'approche proposée est de considérer ces problématiques au moment du choix de la position des SFs tout en respectant les exigences fonctionnelles. En clair, il s'agit de positionner de façon optimale les SFs en tenant compte des conditions de fabrication choisies, de sorte à anticiper en amont certains

problèmes de fabrication avant que ceux-ci ne puissent se poser. L'approche proposée a pour but d'appréhender le problème d'orientation de fabrication avant qu'une géométrie ne soit figée. L'orientation d'une SF peut influencer de diverses manières (parfois contradictoires) plusieurs facteurs (temps de fabrication, supports, qualité de surface, etc.). Alors qu'une orientation peut conduire à minimiser la quantité de support, elle peut favoriser un temps de fabrication plus long, ou une résistance minimale. Même si le positionnement des SFs peut se faire en résolvant un problème d'optimisation multi-objectif, nous avons choisi de ne considérer que le facteur quantité de support pour déterminer l'orientation des SFs. Une mesure de la quantité requise de structure de support pour une surface donnée est fournie par la projection de cette surface sur le plan de la plateforme de fabrication.

Il est supposé que certaines SFs du produit sont planes et d'autres sont en trois dimensions, et que ces dernières sont positionnées manuellement. En outre, une ou plusieurs des SFs planes devraient d'abord être choisies pour être posées sur le lit d'impression. Ce choix s'effectue en fonction du procédé de FA utilisé et de la qualité de surface requise pour ces SFs car, pour certains procédés, la réduction ou l'élimination de supports obtenus par la pose d'une surface sur le lit d'impression, est au prix d'une surface résultante rugueuse. On optimise alors les orientations (définies par des angles géométriques – par exemple l'angle entre une normale extérieure et le sens supposé de fabrication), des SFs planes restantes. Leur positionnement s'effectue à travers les tâches suivantes:

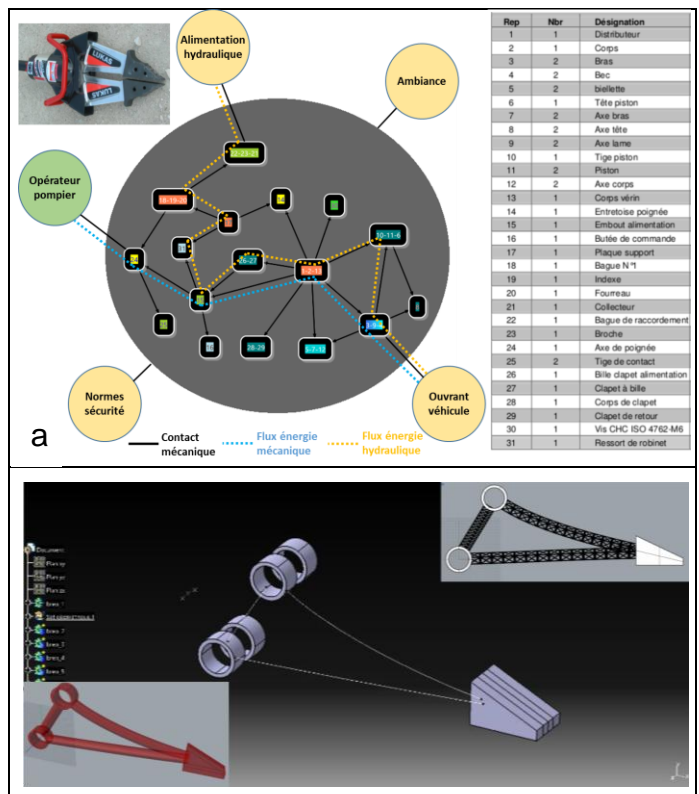
- 1. Valeurs limites des orientations** – Il peut être utile, pour respecter des exigences fonctionnelles, de restreindre certaines surfaces à des orientations particulières.
- 2. Contraintes entre orientations** – Certaines SFs peuvent ne pas être indépendantes les unes des autres (par exemple il peut y avoir une contrainte de parallélisme entre deux surfaces). De telles contraintes sont traduites par des équations entre les angles d'orientation des surfaces concernées.
- 3. Classement des SFs** – Il est vraisemblable que toutes les surfaces fonctionnelles ne contribuent pas de façon équivalente au(x) facteur(s) choisis pour optimiser leurs orientations. Par ailleurs, l'orientation de certaines surfaces peut ne pas avoir d'importance d'un point de vue fonctionnel. Un classement des SFs est alors créé et utilisé pour définir des poids correspondant à la contribution des SFs dans la valeur d'une fonction-objectif choisie.
- 4. Choix d'une fonction-objectif** – Une fonction-objectif dont les variables sont les orientations des SFs doit être définie, afin de pouvoir mesurer le(s) facteur(s) choisi(s). Cette fonction peut s'écrire sous la forme :
$$F = \sum_{i=1}^n w_i f_i(\theta_i) \quad (1)$$
où $f_i(\theta_i)$ est une mesure relative à la surface SF_i et w_i le poids défini à l'étape 3.
- 5. Optimisation** – F est alors optimisée pour définir les orientations prioritaires à donner aux SFs.

Une fois que les SFs sont positionnées, leurs formes spécifiques peuvent être définies, dans la mesure où, jusqu'à présent, seuls leurs plans ont été considérés. Contrairement aux formes spécifiques destinées à être fabriquées par des procédés classiques, celles destinées à être fabriquées avec des procédés de FA peuvent être plus complexes dans un but de maximisation de la performance souhaitée. La tâche de conception des SFs doit donc être réalisée avec la plus grande liberté de conception. Cependant, des règles spécifiques pour certains procédés FA doivent être suivies pour obtenir une bonne précision et en améliorer la fabricabilité, sans omettre d'œuvrer pour réduire les temps machine, donc les coûts. Par

ailleurs, en fonction des phénomènes physiques impliqués dans les interactions matière/énergie/information au sein du système complexe étudié, certaines caractéristiques géométriques doivent être évitées. Par exemple, des angles aigus doivent être évités (ou filetés ou chanfreinés) dans les procédés impliquant la fusion de métaux.

C. Connexion des surfaces fonctionnelles (Figure 2b et 2c)

Chaque SF appartient à une pièce, il peut s'agir d'une SF qui appartient uniquement à la pièce telle qu'une SF sans contact (réalisant par exemple une fonction esthétique, d'étanchéité, de dissipation de chaleur, etc.) ou une SF de préhension. Il peut également s'agir d'une SF appartenant à deux pièces, telle qu'une SF permettant leur mise en position dans un assemblage. Afin que cette pièce soit créée, ses SFs doivent être liées en fonction des flux définis dans l'étape d'Analyse Fonctionnelle Interne - AFI. Après la définition de la forme d'une SF d'une pièce, elle est épaissie en un Volume Fonctionnel (VF) plein ou à base de structures en treillis, qui est la forme physique de la SF (Figure 2b). L'épaisseur est régie à la fois par la résolution du procédé FA considéré et les tolérances liées à la SF; Ponche et al. [16] ont fourni une formule pour les épaisseurs de VF en tenant compte des deux paramètres susmentionnés. Les VFs sont ensuite connectés en utilisant des éléments de connexion afin d'aboutir au produit final (Figure 2c). Ceux-ci sont d'abord définis simplement en connectant tous les VFs, puis leurs formes aux deux extrémités sont spécifiées.



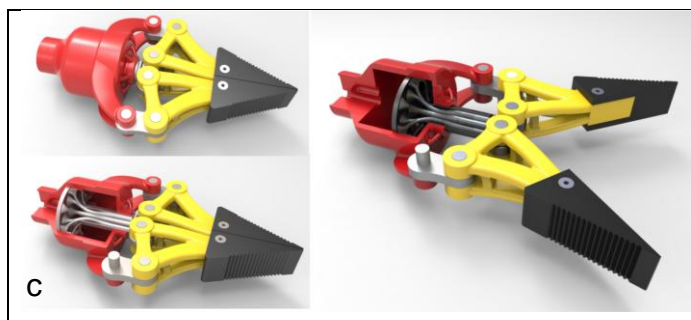


Figure 2. (A) ARCHITECTURE DU PRODUIT ET RELATIONS, (B) SURFACES FONCTIONNELLES DU BRAS ET (C) GEOMETRIE FINALE

Pour améliorer la performance de la pièce, sans coût de fabrication significatif supplémentaire, les sections peuvent être de différents types : pleine, pleine avec une structure en treillis, creuse, creuse avec une structure en treillis, etc. Une fois tous ces paramètres choisis, les éléments de liaison et les VFs sont alors dimensionnés (modélisation et simulation numérique, puis optimisation paramétrique) de sorte que la pièce se comporte selon les spécifications attendues et transmette les flux appropriés.

III. CONCLUSION ET TRAVAUX FUTURS

Dans cet article, une approche de conception proactive pour la fabrication additive a été initiée. En tenant compte des spécifications du produit et des caractéristiques et contraintes de la FA, l'approche proposée conduit à une conception du produit en connectant simplement ses surfaces fonctionnelles en fonction des flux fonctionnels. Contrairement aux travaux actuels de DFAM à base d'optimisation topologique, l'approche proposée permet une conception par ajout de matière de sorte à acheminer les flux fonctionnels juste nécessaire. Elle pourrait de fait être qualifiée de « conception additive pour la fabrication additive ». Même si notre approche semble efficace (au moins en ce qui concerne l'économie de masse), il demeure que des travaux de validation doivent encore être réalisés. Un travail futur consistera à comparer, pour un même cahier de charge, les produits conçus en utilisant notre approche et les conceptions résultant d'autres approches orientées DFAM. En particulier, une comparaison avec une approche basée sur l'optimisation topologique permettrait de démontrer et de clarifier les avantages et limites de notre approche par rapport à cette technique. De plus, l'approche proposée permet de contrôler la façon dont les surfaces fonctionnelles sont connectées. En effet, différents types d'éléments de liaison peuvent être utilisés et optimisés soit pour des besoins physiques, soit pour des raisons esthétiques, voire pour les deux. L'exemple introduit a été limité à un problème mécanique. Cependant cette approche peut être utilisée pour des conceptions de produits impliquant d'autres flux physiques (thermique, acoustique, électrique, etc.).

REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment toute leur reconnaissance au pôle AIP-PRIMECA Franche-Comté qui a financé la machine utilisée pour la réalisation par fabrication additive de l'exemple décrit.

IV. REFERENCES

- [1] HULL, C.W., *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*. 1986, Google Patents.
- [2] ASTM, *Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. ASTM International.
- [3] GIBSON, I., D.W. ROSEN, and B. STUCKER, "Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing". 2009: Springer Publishing Company, Incorporated. 462.
- [4] KATARIA, A. and D.W. ROSEN, "Building around inserts: methods for fabricating complex devices in stereolithography" *Rapid Prototyping Journal*, 2001. **7**(5): p. 253-262.
- [5] VAEZI, M., et al., "Multiple material additive manufacturing – Part 1: a review" *Virtual and Physical Prototyping*, 2013. **8**(1): p. 19-50.
- [6] SONG, P., et al., "Printing 3D objects with interlocking parts" *Computer Aided Geometric Design*, 2015. **35-36**: p. 137-148.
- [7] THOMPSON, M.K., et al., "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints" *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2016. **65**(2): p. 737-760.
- [8] ADAM, G.A.O. and D. ZIMMER, "Design for Additive Manufacturing—Element transitions and aggregated structures" *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2014. **7**(1): p. 20-28.
- [9] THOMAS, D., *The Development of Design Rules for Selective Laser Melting*. 2009, University of Wales.
- [10] KRANZ, J., D. HERZOG, and C. EMMELMANN, "Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4" *Journal of Laser Applications*, 2015. **27**(S1): p. S14001.
- [11] BECKER, R., A. GRZESIAK, and A. HENNING, "Rethink assembly design" *Assembly Automation*, 2005. **25**(4): p. 262-266.
- [12] PAZ, R., et al., *Lightweight Optimization for Additive Manufacturing Parts Based on Genetic Algorithms, Metamodels and Finite Element Analysis*, in *Evolutionary Algorithms and Metaheuristics in Civil Engineering and Construction Management*, J. Magalhães-Mendes and D. Greiner, Editors. 2015, Springer International Publishing. p. 67-82.
- [13] REZAIE, R., et al., "Topology Optimization for Fused Deposition Modeling Process" *Procedia CIRP*, 2013. **6**: p. 521-526.
- [14] JOO, J.J., G.W. REICH, and J.T. WESTFALL, "Flexible Skin Development for Morphing Aircraft Applications via Topology Optimization" *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2009. **20**(16): p. 1969-1985.
- [15] PONCHE, R., et al., "A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process" *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2014. **30**(4): p. 389-398.
- [16] PONCHE, R., et al., "A new global approach to design for additive manufacturing" *Virtual and Physical Prototyping*, 2012. **7**(2): p. 93-105.

- [17] VAYRE, B., F. VIGNAT, and F. VILLENEUVE, "Designing for Additive Manufacturing" *Procedia CIRP*, 2012. **3**: p. 632-637.
- [18] KUMKE, M., H. WATSCHKE, and T. VIETOR, "A new methodological framework for design for additive manufacturing" *Virtual and Physical Prototyping*, 2016. **11**(1): p. 3-19.
- [19] ENGINEERS, V.D.I.A.O.G., "VDI 2221 - Systematic approach to the development and design of technical systems and products" 1993.
- [20] KULKARNI, P., A. MARSAN, and D. DUTTA, "A review of process planning techniques in layered manufacturing" *Rapid Prototyping Journal*, 2000. **6**(1): p. 18-35.
- [21] PANDEY, P.M., N. VENKATA REDDY, and S.G. DHANDE, "Part deposition orientation studies in layered manufacturing" *Journal of Materials Processing Technology*, 2007. **185**(1-3): p. 125-131.
- [22] DEMOLY, F., et al., "Geometric skeleton computation enabling concurrent product engineering and assembly sequence planning" *Computer-Aided Design*, 2011. **43**(12): p. 1654-1673.