



HAL
open science

Optimisation topologique : outil clé pour la conception des pièces produites par fabrication additive ?

Pierre-Thomas Dautre, Thanh Hoang Vo, Philippe René Marin, Franck Pourroy, Guy Prudhomme, Frédéric Vignat

► To cite this version:

Pierre-Thomas Dautre, Thanh Hoang Vo, Philippe René Marin, Franck Pourroy, Guy Prudhomme, et al.. Optimisation topologique : outil clé pour la conception des pièces produites par fabrication additive?. 14ème Colloque National AIP PRIMECA, Mar 2015, La Plagne, France. hal-01236570

HAL Id: hal-01236570

<https://hal.science/hal-01236570>

Submitted on 1 Dec 2015

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.

Optimisation topologique : outil clé pour la conception des pièces produites par fabrication additive ?

Pierre-Thomas DOUTRE^{1,2}, Thanh Hoang VO¹, Philippe MARIN¹, Franck POURROY¹, Guy PRUDHOMME¹, Frédéric VIGNAT¹

¹Univ. Grenoble Alpes, G-SCOP, F-38000 Grenoble, France
CNRS, G-SCOP, F-38000 Grenoble, France
Pierre-thomas.doutre@g-scop.grenoble-inp.fr

²POLY-SHAPE, 235 rue des Canesteu ZI La Gandonne
Salon de Provence – France
Pt.doutre@poly-shape.com

Résumé— *Les procédés de fabrication additive qui existent depuis près de 25 ans ne sont plus destinés uniquement au prototypage rapide. Aujourd’hui avec ces nouveaux moyens de production, des pièces pour l’industrie sont fabriquées et leur utilisation laisse entrevoir la possibilité de fabriquer des géométries complexes irréalisables par des procédés conventionnels. Nous arrivons donc à une étape où nous libérons de nouvelles formes possibles. Ceci nous amène donc à chercher à obtenir la meilleure géométrie possible répondant aux exigences du client. Pour ce faire l’optimisation topologique s’appuyant sur des outils numériques semble prometteuse. Mais les pièces générées par des algorithmes n’intègrent pas forcément des critères qui ne sont pas formalisés ou le sont difficilement. Dans cet article les possibilités d’intégrer les différentes expertises du cycle de vie du produit sont donc étudiées. Quelles doivent alors être la place et l’importance respectives de l’optimisation topologique et de l’expertise dans un processus de conception ? Le positionnement de ce curseur dépend de plusieurs facteurs qui seront évoqués en fin d’article et pouvant intervenir lors de la conception de pièces.*

Mots-clés— *Optimisation topologique, Fabrication additive, Expertises, Cycle de vie du produit, Conception.*

I. INTRODUCTION

Les procédés de fabrication additive métallique en couches permettent la réalisation de pièces au sein d’un volume de poudre [1]. Ces technologies permettent de réaliser des pièces répondant à des critères fonctionnels précis [2] et possédant des géométries complexes [3]. Pouvoir fabriquer d’autres géométries, nous amène donc à vouloir repousser les limites en termes de conception et d’optimisation de pièces, en cherchant à obtenir les meilleures formes possibles répondant aux critères des différentes expertises et des différentes contraintes du cycle de vie du produit.

Les outils d’optimisation topologique s’inscrivent clairement dans cette logique. Ces logiciels permettent de trouver de manière itérative la répartition de matière idéale dans un volume donné (correspondant à tout ou partie d’une pièce) soumis à des sollicitations mécaniques [4]. Cette répartition de matière peut être, dans une certaine mesure, guidée au moyen de différentes contraintes géométriques ou dimensionnelles. La démarche utilisée pour optimiser topologiquement des pièces est de définir d’une part des surfaces fonctionnelles (les surfaces de contact entre la pièce et les autres composants), et d’autre part un espace de conception au sein duquel le logiciel pourra ajuster localement les densités de matière afin de réaliser l’optimisation topologique de la pièce [5]. L’Etape suivante consiste à effectuer une reconstruction de la pièce [1], [5]. Cette phase de reconstruction est réalisée par le concepteur et consiste à s’inspirer du résultat « idéal » de l’optimisation topologique, où l’on obtient la représentation discrète d’une pièce avec une géométrie souvent complexe, pour définir une forme fabricable et adaptée aux différentes exigences de l’équipe de conception. Ces étapes nécessitent un important travail de la part du concepteur, et la forme finale est souvent assez éloignée du résultat initialement proposé par le logiciel.

Avec les moyens de production conventionnels, on est limité par l’accessibilité des zones à usiner et donc par les formes réalisables. La fabrication additive fait donc apparaître de nouvelles perspectives dans le processus de conception [6] en offrant une grande liberté dans les formes fabricables. L’utilisation d’outils d’optimisation topologique génère des propositions de formes auxquelles le concepteur n’est pas habitué, et lui permet ainsi de s’affranchir de l’inertie psychologique qui l’empêcherait de tirer pleinement profit des opportunités offertes par la fabrication additive [7]. Dans l’utilisation d’outils d’optimisation topologique il est possible d’intégrer des contraintes de fabrication. Si nous prenons

l'exemple des outils Altair Technology¹, il est possible d'y intégrer des contraintes d'extrusion, de symétrie ou de moulage. En revanche, intégrer des contraintes subjectives et difficilement formalisables comme par exemple l'aspect d'une pièce ou encore des critères d'acceptabilité de celle-ci, devient plus difficile.

Il est donc légitime de se demander d'une part comment intégrer au mieux les outils d'optimisation topologique dans la conception de pièces pour la fabrication additive, et d'autre part, comment et à quel moment prendre en compte dans ce nouveau processus les expertises et contraintes liées aux exigences client et au cycle de vie du produit.

Afin d'apporter des premiers éléments de réponse à cette question, le papier est structuré en quatre parties. La première dresse un bref état de l'art qui nous amène à identifier différentes pistes pour intégrer l'optimisation topologique en conception pour la fabrication additive. La seconde partie présente, au travers d'une étude de cas, des exemples des différentes pistes d'intégration identifiées. Dans la troisième partie du papier, nous discutons et analysons les résultats obtenus. Ces résultats nous conduisent à proposer des leviers d'actions pour réaliser cette intégration. La dernière partie présente les conclusions, les limites, et les perspectives de ce travail.

II. OPTIMISATION TOPOLOGIQUE POUR LA FABRICATION ADDITIVE : UN TOUR D'HORIZON DES PRATIQUES

Les techniques d'optimisation topologique ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche, depuis les années 90 notamment. Dans une revue de bibliographie très complète, Eschenauer et Olhoff [8] identifient au travers de plus de 400 références, les grandes catégories de méthodes d'optimisation topologique, et discutent les limites et les enjeux qui leur sont associés.

Au-delà des techniques mathématiques et numériques liées à ces approches, d'autres travaux se sont focalisés davantage sur l'usage de l'optimisation topologique pour la conception de pièces et de systèmes mécaniques. A l'image de [9] qui s'intéresse à la production d'une géométrie adaptée à une réalisation par un processus d'extrusion, ou de [10] qui proposent l'usage en cascade de différents types d'optimisation, ces travaux sont souvent basés sur des études de cas, qui présentent et discutent les solutions obtenues en les inscrivant dans une démarche de conception plus globale.

Utiliser l'optimisation topologique pour dessiner des pièces destinées à la fabrication additive n'est pas une idée nouvelle. Mais si la mise en relation de ces deux techniques tombe sous le sens, la manière d'intégrer l'optimisation topologique dans la conception des pièces réalisées en fabrication additive est envisagée de diverses manières.

Ainsi, Tomlin et Meyer [11] questionnent l'intérêt de la fabrication additive pour l'aéronautique. Ils considèrent une pièce test pour laquelle ils effectuent différents cycles d'optimisation topologique à partir d'un espace de conception guidé par le résultat qu'ils souhaiteraient obtenir et par les

enseignements tirés des itérations précédentes. Pour chaque nouvelle topologie, une reconstruction d'un modèle CAO est réalisée en intégrant des contraintes provenant des différents experts de l'équipe de conception. Ce type de démarche est également préconisé par de récents travaux de thèse, et plus particulièrement pour la prise en compte des contraintes de fabrication en amont et en aval de l'optimisation topologique. Ceci dans le cas de procédés par projection de poudre [5], ou dans le cas de la technologie EBM² [1].

L'idée d'un espace de conception de plus en plus contraint au fil des boucles de conception/optimisation topologique est aussi reprise par Machunze et al. [12] pour orienter la topologie vers le type de résultat voulu. Les contraintes d'optimisation prennent en compte des paramètres de fabrication pour tenter par exemple de limiter la réalisation de supports. Dans leur approche, les auteurs visent également à éliminer la phase toujours coûteuse de reconstruction d'une géométrie CAO à partir de la topologie optimale. Ils mobilisent pour cela des outils de lissage des modèles STL issus de l'optimisation, et transmettent directement ces STL à la production.

A l'inverse de cette approche, les exemples proposés par Ewing [13], et Nickels [14], reportent intégralement l'intégration des contraintes et l'expertise des concepteurs sur la phase post optimisation de reconstruction de la géométrie CAO. Ici, l'espace de conception de l'optimisation topologique correspond exactement à la géométrie de la pièce (élément de cadre de vélo) que les auteurs s'attachent à re-concevoir.

Enfin, dans un souci d'efficacité, voulant tirer pleinement partie des possibilités offertes par l'additive en termes de complexité géométrique, plusieurs études proposent et discutent des approches très directes [3], [15], [16]. L'espace de conception est peu travaillé (il correspond souvent, comme précédemment, à la géométrie initiale de la pièce à reconcevoir). La reconstruction CAO est évitée sur la base d'un post-traitement de la topologie optimale (de façon identique à [12]).

Ainsi, cette revue des pratiques fait ressortir différents éléments. Tout d'abord, le coût actuel des pièces réalisées en fabrication additive rend quasi incontournable la recherche d'une topologie optimale, limitant la matière mise en œuvre. Ensuite, plusieurs approches sont possibles pour intégrer les outils d'optimisation topologique dans la démarche. Les unes intègrent, de façon plus ou moins marquée, les expertises des acteurs de la conception, en amont (par le biais de l'espace de conception et des contraintes d'optimisation), ou en aval (lors de la reconstruction CAO) de l'étape d'optimisation topologique. D'autres au contraire préconisent une automatisation plus forte, et une géométrie finale aussi proche que possible de la topologie optimale.

Cette dernière vision des choses est-elle raisonnable ? Si elle ne l'est pas, quels sont les moyens d'intégrer efficacement les expertises métier dans la démarche ? Nous proposons dans ce qui suit une étude de cas pour amener des éléments de réponse à ce questionnement.

¹ www.altairtechnology.com

² www.arcam.com

III. ETUDE DE CAS

Dans cette section nous présentons sur une étude de cas, la méthodologie développée afin d'utiliser l'optimisation topologique pour reconcevoir une pièce pour la fabrication additive. Les pièces fabriquées, seront réalisées par l'entreprise Poly-Shape grâce à son moyen de production EBM. Notre étude de cas se base sur l'optimisation de la pièce (Figure 1) mesurant 380 mm de long et étant soumise à 5 cas de charge (Figure 1) pouvant survenir à différentes étapes du cycle de vie.

- (1) Effort réparti suivant -x
- (2) Moment autour de x
- (3) Moment autour de z
- (4) Effort sur la structure suivant y
- (5) Effort sur la structure suivant -y
- (6) Encastrement

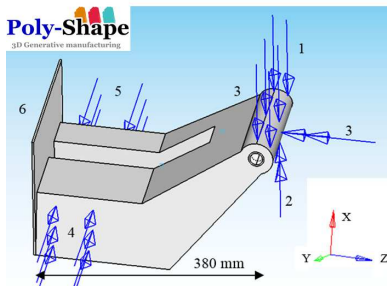


Figure 1. LA PIECE A ADAPTER POUR LA FABRICATION ADDITIVE.

A. Optimisation topologique

Nous allons chercher à optimiser cette pièce selon une approche directe : l'optimisation topologique est réalisée sans intégration d'expertise et sans reconstruction manuelle d'une CAO. Ceci afin de voir si grâce aux possibilités de la fabrication additive, nous pouvons obtenir une pièce admissible. Les logiciels Hypermesh et Optistruct de la suite d'Altair Technology sont utilisés. L'espace de conception est représenté Figure 2. Il repose uniquement sur des contraintes d'encombrement. La Figure 3 présente la topologie optimale obtenue, sur laquelle un lissage est finalement effectué Figure 4 après optimisation.

Nous constatons que la pièce obtenue à l'issue de ce processus n'est pas acceptable. En termes de fabricabilité, cette pièce comporte des zones trop fines < 0.7 mm [1] ne pouvant pas être réalisées en technologie EBM. Il existe également des zones creuses non débouchantes, dans lesquelles la poudre restera enfermée lors du processus de fabrication [1]. On perd donc tout l'intérêt de l'optimisation de la masse. Par ailleurs, la géométrie est trop accidentée et ne sera pas acceptée par le client qui souhaite des formes organiques mais à variations douces.

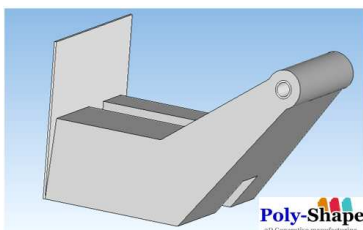


Figure 2. ESPACE DE CONCEPTION

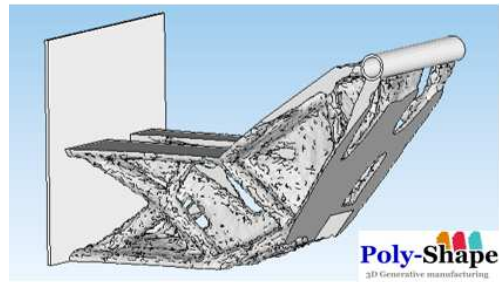


Figure 3. PREMIER RESULTAT D'OPTIMISATION TOPOLOGIQUE.

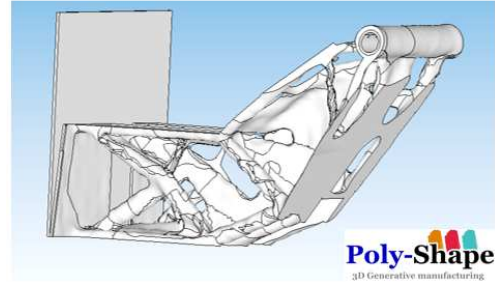


Figure 4. LA PIECE APRES LISSAGE EN SORTIE D'OPTIMISATION.

Sur cet exemple, nous constatons que malgré la liberté que nous donne la fabrication additive, utiliser uniquement des outils d'optimisation topologique sans intégrer d'expertise ne permet pas d'obtenir un résultat acceptable et fabricable. Nous allons donc chercher comment et où faire intervenir les différentes expertises afin de trouver la juste position du curseur régissant l'équilibre entre optimisation topologique et expertise pure.

B. Méthode avec intégration des expertises

1) Intégration des expertises après optimisation topologique

Pour cette approche, nous décidons d'intégrer les expertises dans la reconstruction d'une géométrie CAO « propre », en nous appuyant sur le résultat d'optimisation topologique de la Figure 3. Dans cette étape, l'objectif est principalement de faire disparaître les zones non débouchantes, d'avoir une pièce avec des surfaces lisses, d'avoir des épaisseurs et formes fabricable et d'avoir une pièce répondant aux critères esthétiques du client. Dans un second temps, sur la base d'un calcul par éléments finis, cette CAO est ajustée afin de résoudre certaines sur-contraintes. La géométrie ainsi reconstruite est présentée Figure 5.

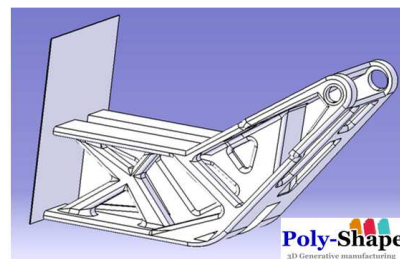


Figure 5. PREMIER RESULTAT DE RECONSTRUCTION CAO.

En intégrant de l'expertise lors de la reconstruction, il est possible de créer une pièce répondant aux exigences du client et étant fabricable. Cependant, si l'esthétique est acceptée par le client, elle ne correspond pas nécessairement aux formes qu'il imaginait. Par ailleurs, la reconstruction réalisée doit intégrer une multitude de critères parfois difficilement conciliables avec la forme issue de l'optimisation. C'est donc une étape extrêmement lourde et coûteuse dans le processus, et dont le résultat est parfois assez éloignée de la géométrie optimale.

2) Intégration avec un espace de conception guidé

Nous étudions maintenant la possibilité d'intégrer de l'expertise en amont de l'optimisation topologique, d'une part en modifiant l'espace de conception (nous parlerons par la suite d'espace de conception « guidé »), et d'autre part au travers des contraintes d'optimisation.. Nous cherchons donc à interpréter les désirs du client et à imaginer le type de pièce qu'il désire, et à exprimer différents critères de fabricabilité, tels que les épaisseurs minimum de parois. Ces éléments sont alors traduits à travers cet espace de conception guidé. Dans notre cas d'étude, le client désire avoir de la matière sur l'extérieur de la pièce. Le domaine de conception guidé, représenté Figure 6 est un domaine surfacique Ce domaine permet en même temps d'intégrer une part d'expertise du métier de la fabrication additive puisque l'utilisation d'éléments coques garantit une facilité de dépoudrage en sortie de fabrication EBM.

Les résultats d'optimisation et le résultat lissé sont donnés Figure 7 et Figure 8. Notons que dans notre le résultat brut de ce processus d'optimisation fournit une surface, qu'il est donc nécessaire de transformer en volume lors du post traitement. Si la fabrication de la pièce obtenue ainsi obtenue est possible, sa géométrie demeure complexe, et son analyse par les différents experts du processus de conception suggère un certain nombre de modifications, liées à des critères mal ou pas du tout pris en compte en amont de l'optimisation.

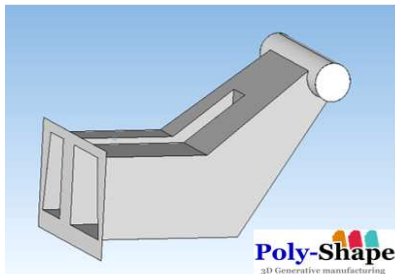


Figure 6. ESPACE DE DESIGN SOUS FORME DE SURFACE.

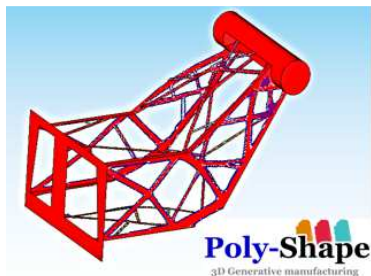


Figure 7. RESULTAT D'OPTIMISATION AVEC DES SURFACES.

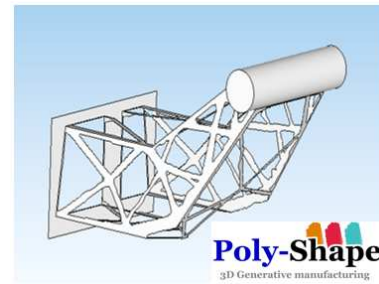


Figure 8. LISSAGE DU RESULTAT SURFACIQUE.

3) Ajout d'expertise dans la phase de reconstruction

A partir du résultat d'optimisation topologique précédant, basé une un domaine de conception guidé, nous effectuons finalement une reconstruction dans laquelle sont intégrées différentes expertises du cycle de vie du produit. Expertise de comportement mécanique permettant de supprimer de la matière dans les zones peu contraintes parce que rigidifiées par les pièces voisines (exemple sur la plaque de fixation sur la gauche en figure 9), mise en place de congés dans les zones où des concentrations de contraintes pourraient apparaître. Expertise de fabrication en favorisant des formes ne nécessitant pas de supports (par exemple ouverture du cylindre supérieur). Intégration enfin des souhaits du client qui préfère des formes relativement lisses et régulières dans chaque poutre. Le résultat de cette reconstruction est présenté Figure 9.

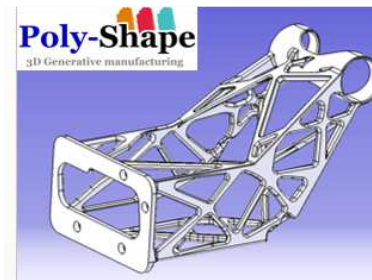


Figure 9. RESULTAT D'OPTIMISATION AVEC DES SURFACES.

Cette pièce, validée par le client, a été produite en technologie EBM. La figure 10 présente le résultat obtenu après fabrication et finition (sablage et microbillage).

IV. ANALYSE ET LEVIERS D'INTEGRATION

Dans cette étude, nous avons donc dans un premier temps mis en œuvre l'optimisation topologique comme outil unique de définition de la forme. Nous avons constaté que ce type de démarche n'est pas possible, les formes obtenues n'étant dans pas acceptables, et selon différentes expertises (client, fabrication...). Il est intéressant de noter que, bien qu'elle soit très centrée calcul, l'expert calcul lui-même n'est pas satisfait de la solution obtenue avec cette approche.

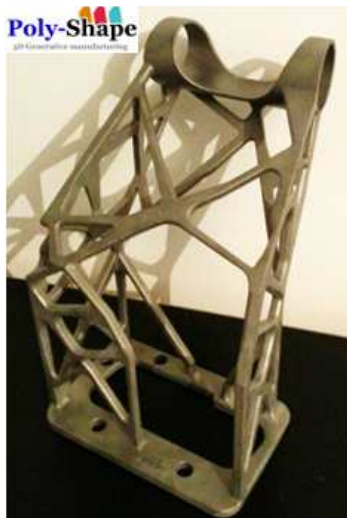


Figure 10. FABRICATION DE LA PIECE

Dans un second temps, pour pallier ce problème et pouvoir réaliser des pièces fabricables répondant aux expertises du cycle de vie, une reconstruction après optimisation topologique a été effectuée, qui intègre diverses l'expertises et notamment celle du fabricant. Le processus de reconstruction apparaît complexe et coûteux. Il conduit à des géométries peu conformes aux attentes, tout en étant parfois éloignées des géométries optimales calculées.

Ensuite, de l'expertise a été mobilisée pour guider la définition de l'espace de conception. L'optimisation, suivie d'un lissage a permis d'obtenir directement une géométrie fabricable et plus proche des attentes clients, mais qui présentait encore différents problèmes.

Finalement, la pièce retenue a été conçue en se basant d'une part sur un espace de design guidé, et d'autre part sur une reconstruction intégrant diverses expertises liées à la fabrication et aux critères d'acceptabilité du client.

Au travers de cette étude de cas, il est possible d'identifier différents leviers qui vont permettre d'intégrer des connaissances expertes à différentes phases du processus de reconception d'une pièce pour la fabrication additive, en amont ou en aval de l'optimisation topologique. Nous avons identifié qu'il pouvait être illusoire d'envisager un processus de conception basé uniquement sur l'optimisation topologique sans intégration d'expertises du cycle de vie du produit, et qu'il était possible de les intégrer dans la définition de l'espace de conception et/ou dans la phase de finalisation de la géométrie à fabriquer.

Dans notre cas, nous y avons intégré des expertises apportées par le client et par la fabrication. Ces expertises nous ont amenés à guider notre espace de conception vers une forme différente. Les espaces de conception représentent un levier important qui permet d'agir sur l'optimisation topologique et nous permettent de positionner un premier curseur entre de l'expertise pure et pas d'expertise en amont de la phase d'optimisation (Figure 11)

Un autre levier qui a été identifié est la phase de reconstruction de la pièce en s'inspirant de l'optimisation topologique, ou l'on peut aussi intégrer les différentes expertises du cycle de vie du

produit. Cette phase de reconstruction est primordiale pour que la pièce soit acceptée par le client. Ce levier nous permet de positionner un second curseur définissant le degré d'expertise que l'on intègre à cette étape (Figure 11).

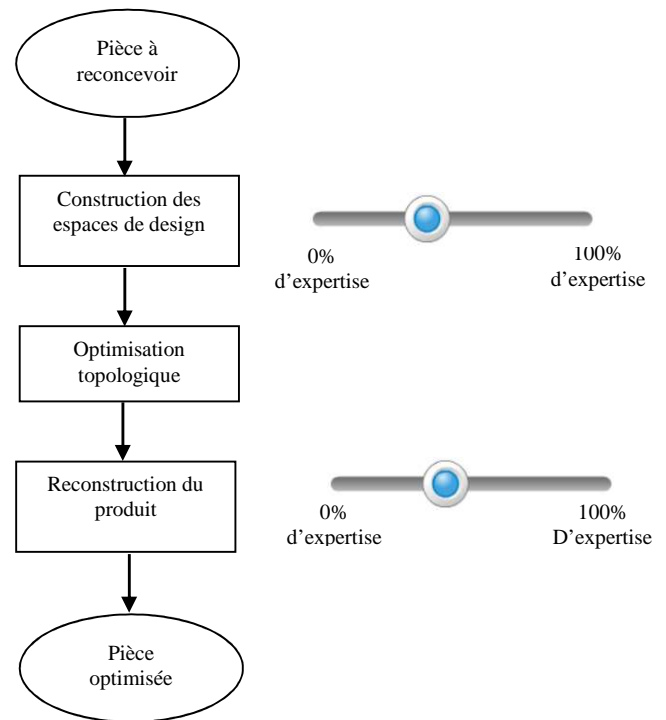


Figure 11. PLACE RELATIVE DE L'EXPERTISE ET DES ALGORITHMES D'OPTIMISATION

L'ajustement de ces curseurs peut dépendre du temps disponible pour développer le produit. Si par exemple le temps imparti pour la re-conception de pièce est faible, il sera difficile de faire des itérations où l'on cherche à intégrer des expertises. On peut penser que l'accent sera plutôt mis sur l'intégration des expertises à un unique endroit dans le processus de conception. En revanche si le temps de re-conception est important on peut envisager de faire plus d'itérations et d'intégrer d'avantage d'expertises dans les différentes phases.

V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cet article, Nous nous sommes intéressés, grâce à une étude de cas, à la place relative de l'optimisation topologique et d'autres expertises dans le développement de pièces à produire par fabrication additive. Cela nous a permis de constater son intérêt : l'obtention de formes qui sortent du cadre de réflexion habituel des concepteurs, la réduction de la masse qui permet d'atténuer l'impact des coûts relatifs à ces nouvelles techniques de production. Nous avons aussi clairement constaté que la génération d'une topologie ne peut pas non reposer uniquement sur ces outils d'optimisation. Nous avons constaté que nous pouvions intégrer des expertises en amont et en aval de la phase d'optimisation topologique. En amont, cette analyse a mis en évidence le rôle clé du domaine de conception dans la prise en compte de ces expertises métier. En aval, c'est la phase de

reconstruction qui permet cette intégration. Cette dernière phase peut se révéler très couteuse, et c'est bien la balance entre intégration amont et intégration aval qui va permettre de limiter ce coût de reconstruction.

Nous avons travaillé sur la base d'une étude de cas, et il sera nécessaire de consolider ces premiers résultats au travers d'autres cas.

Dans la suite de nos travaux, nous chercherons à identifier plus précisément les différents critères qui nous permettent d'intégrer des expertises à la reconstruction de pièces. Des critères comme l'inertie psychologique du client, la taille des pièces, le temps imparti pour réaliser la re-conception permettent aussi de positionner le curseur définissant le degré d'expertise que l'on souhaite intégrer. Cet équilibre pourrait aussi être modifié par les progrès au niveau des algorithmes de lissage qui permettent de faciliter la reconstruction.

Le travail présenté s'inscrit dans une recherche plus globale sur la démarche de conception pour la fabrication additive. Une autre question clé de cette démarche, celle de la place et de l'utilisation du prototype dans les phases d'analyse, fait l'objet d'un second papier [17].

Références

- [1] B. Vayre, "Conception pour la fabrication additive, application à la technologie EBM," Université de Grenoble, 2014.
- [2] D. L. Bourell, J. J. Beaman, M. C. Leu, and D. W. Rosen, "A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing : Looking Back and Looking Ahead," in US-Turkey workshop on rapid technologies, 2009, no. 2.
- [3] H. Rodrigue, M. Rivette, V. Calatoru, and S. Richir, "Une méthodologie de conception pour la fabrication additive," Science Arts & Métiers, 2011.
- [4] N. Gardan, "Optimisation numérique Plan de la présentation," in Assises européennes de la fabrication additive, 2013.
- [5] R. Ponche, "Méthodologie de conception pour la fabrication additive - Application à la projection de poudres," Ecole Centrale de Nantes, 2013.
- [6] B. Vayre, F. Vignat, and F. Villeneuve, "Designing for additive manufacturing," in 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2012.
- [7] S. Liao, W.-C. Fei, and C.-T. Liu, "Relationships between knowledge inertia, organizational learning and organization innovation," Technovation, vol. 28, no. 4, pp. 183–195, Apr. 2008.
- [8] H. A. Eschenauer and N. Olhoff, "Topology optimization of continuum structures: A review," Appl. Mech. Rev., vol. 54, no. 4, p. 331, 2001.
- [9] C. Li, I. Y. Kim, and J. Jeswiet, "Conceptual and detailed design of an automotive engine cradle by using topology, shape, and size optimization," Structural and Multidisciplinary Optimization, 29-Aug-2014. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/s00158-014-1151-6>. [Accessed: 18-Dec-2014].
- [10] M. Cavazzuti, A. Baldini, E. Bertocchi, D. Costi, E. Torricelli, and P. Moruzzi, "High performance automotive chassis design: a topology optimization based approach," Struct. Multidiscip. Optim., vol. 44, no. 1, pp. 45–56, Oct. 2010.
- [11] M. Tomlin and J. Meyer, "Topology Optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part," in The 7th Altair CAETechnology Conference, 2011, pp. 1–9.
- [12] W. Machunze, T. Lehmann, and P. Hein, "Topology design of a metallic load introduction bracket manufactured by ALM," European Altair Technology Conference, 2013. [Online]. Available: <http://fr.slideshare.net/AltairHTC/topology-design-of-a-metallic-load-introduction-bracket-manufactured-by-alm>.
- [13] D. Ewing, "Riding into the future – 3D printed bike," 2014.
- [14] L. Nickels, "3D printing the world's first metal bicycle frame," Met. Powder Rep., vol. 69, no. 2, pp. 38–40, Mar. 2014.
- [15] D. Brackett, I. Ashcroft, and R. Hague, "Topology optimization for additive manufacturing," in 24th Solid Freeform Fabrication Symposium, 2011.
- [16] F. Mouriaux, "Topology Optimisation of Tertiary Structures and Mass Savings for Satellite Structures," in European Altair Technology Conference, 2014.
- [17] T.H. Vo, P.T. Doutré, G. Prudhomme, P. Marin, F. Pourroy, F. Vignat, Place du prototype dans l'étape d'analyse d'un processus de reconception de pièce pour la fabrication additive, Actes du 14^{ème} Colloque AIP-Primeca, La Plagne, 2015