

L'optimisation topologique et la fabrication additive, amélioration de la chaîne de conception

Yannick Louvigny
Université de Liège
Bat B52 - Chemin des chevreuils 1
4000 Liège – Belgique
Yannick.Louvigny@ulg.ac.be

Bertrand Meunier
Université de Liège
Bat B52 - Chemin des chevreuils 1
4000 Liège – Belgique
Ber.Meunier@student.ulg.ac.be

Jonathan Nzisabira
Université de Liège
Bat B52 - Chemin des chevreuils 1
4000 Liège – Belgique
Jonathan.Nzisabira@ulg.ac.be

Pierre Duysinx
Université de Liège
Bat B52 - Chemin des chevreuils 1
4000 Liège – Belgique
P.Duysinx@ulg.ac.be

Résumé—*L'intérêt de combiner l'optimisation topologique avec les méthodes de fabrication additive vient du fait que d'une part, l'optimisation topologique permet de générer des géométries complexes que les procédés d'usinage conventionnels ne sont pas capables de réaliser et que, d'autre part, la fabrication additive permet de réaliser des formes complexes telles que des cavités emprisonnées dans un volume ou des canaux non rectilignes, impossibles à reproduire en fonderie ou par usinage. De plus et contrairement aux techniques traditionnelles, la réalisation des géométries complexes n'influence pas le coût pour les techniques additives. Pour ces techniques, le coût est lié principalement au volume de la pièce. La complexité de la pièce n'est plus un problème mais un atout. Toutefois cette combinaison n'est pas encore exploitable au niveau industriel. En effet, les résultats fournis par l'optimisation topologique doivent être modifiés, souvent manuellement, pour les rendre utilisables par les méthodes de fabrication additive. Et ces modifications coûtent cher. Il est donc intéressant de limiter ou au mieux d'éliminer les étapes manuelles de la chaîne de conception. Ce papier propose une chaîne de conception optimisée pour une pièce devant être fabriquée par les méthodes additives. En outre, la prise en compte des contraintes inhérentes aux procédés de fabrication par addition de matière reste problématique. Une démarche simplifiée est proposée pour identifier les types de contraintes inhérentes aux procédés de fabrication par addition de matière, les quantifier pour certaines techniques et les intégrer dans le code d'optimisation topologique. La nouvelle chaîne de conception minimise les interventions du concepteur qui rendent le processus plus lourd et moins viable industriellement. Dans cette nouvelle chaîne de conception, certaines étapes sont réalisées plus rapidement et génèrent de meilleurs résultats.*

Mots-clés— *Optimisation topologique, fabrication additive, chaîne numérique de conception, contraintes de fabrication, maillage, calcul éléments finis.*

I. INTRODUCTION

Pour se différencier et rester compétitives, les entreprises doivent recourir à des techniques de conception et de fabrication innovantes. Les contraintes environnementales imposées par les donneurs d'ordre et les consommateurs deviennent de plus en plus pressantes et le respect de l'environnement constitue un nouvel argument de vente. Le projet FRED (Fabrication Rapide et Eco Design), dans lequel s'inscrit cet article, propose aux entreprises du secteur de la mécanique d'intégrer l'écoconception dans leur processus de développement de produit et de s'approprier les techniques additives comme mode de fabrication. En effet, la fabrication additive a un certain nombre d'avantages environnementaux : moins de matières premières consommées, réduction sensible des besoins en énergie (la fabrication additive permettrait d'économiser plus de 50% de l'énergie actuelle dépensée pour la fabrication « soustractive », selon le Département américain de l'Energie), utilisation limitée des produits chimiques dangereux, diminution des besoins de transport (relocalisation, production près du consommateur) et réparation possible des objets pour éviter l'accumulation des déchets.

Les phases de conception et de fabrication s'avèrent cruciales car c'est à ces étapes que doivent être validés les exigences fonctionnelles, environnementales et de coût. Les méthodes de fabrication mécanique classiques font face à beaucoup de défis liés notamment à la complexité des pièces à réaliser, aux délais et au coût de production sans oublier les impacts environnementaux qu'elles génèrent.

Les techniques de fabrication additive constituent une alternative viable pour répondre à ces défis. Le développement rapide de produits est une approche permettant de mettre au point des innovations tout en considérant les critères classiques : performances techniques, qualité, coût et délai. Le concept de développement rapide de produits tire avantage d'une mise en œuvre ininterrompue des outils de la chaîne numérique : conception assistée par ordinateur (CAO) et de simulation numérique, prototypage, outillage et fabrication

rapides. Parmi ceux-ci l'optimisation topologique est un outil d'aide à la conception capable de proposer des concepts originaux de composants mécaniques sur base d'une distribution optimale de matière. C'est une méthode numérique qui vise à construire une géométrie optimisée, sans à priori, en ne connaissant que les charges, les conditions de supports, les limites du volume de la structure et les exigences de l'utilisateur.

En combinaison avec les procédés d'impression 3D, cet outil novateur permet d'améliorer et d'accélérer la conception de produits à très hautes performances. En effet, l'intérêt de combiner les deux techniques vient du fait que l'optimisation topologique permet de générer des géométries complexes que les procédés d'usinage conventionnels ne sont pas capables de réaliser. Elle permet en outre de minimiser la compliance et la masse. Contrairement aux techniques traditionnelles, la réalisation des géométries complexes n'influence pas le coût pour les techniques additives. Pour ces techniques, le coût est lié principalement au volume de la pièce. La complexité de la pièce n'est plus un problème mais un atout [1].

Toutefois cette combinaison n'a pas encore atteint la maturité industrielle. Et pour cause, les résultats de l'optimisation topologique nécessitent souvent une intervention du concepteur avant de satisfaire aux contraintes liées à la fabrication additive. Ces manipulations manuelles supplémentaires risquent d'affecter les avantages de l'optimisation topologique et le coût.

Le but de cet article est de proposer une chaîne de conception optimisée qui minimise les interventions du concepteur qui rendent le processus plus lourd et moins viable industriellement. Dans cette nouvelle chaîne de conception, certaines étapes sont réalisées plus rapidement et génèrent de meilleurs résultats.

Un second objectif consiste à répertorier les types de contraintes inhérentes aux procédés de fabrication par addition de matière, à les quantifier pour certaines techniques et à proposer un démarche appropriée pour les intégrer dans un code d'optimisation topologique.

II. LES TECHNIQUES ADDITIVES

La fabrication additive désigne un ensemble de procédés de mise en forme par ajout de matière, en empilant des couches successives, par opposition au procédé de mise en forme par enlèvement de matière, tel que l'usinage. Cette technique est également appelée communément impression 3D.

Lors de ses débuts, il y a 30 ans, la fabrication additive, appelée alors prototypage rapide, devait permettre la réduction des délais pour la création de pièces prototypes. La technologie de l'époque permettait la fabrication de pièces en matières plastiques dans des dimensions restreintes et avec des propriétés mécaniques limitées. Ces prototypes étaient non-fonctionnels et n'avaient pour but que d'illustrer ou de valider un concept.

Mais la technologie a évolué de façon très rapide, les dimensions des machines ont augmentés, les procédés se sont améliorés et diversifiés, entraînant avec eux un plus large

choix de matériaux et une amélioration des propriétés mécaniques de la pièce fabriquée. Les techniques additives permettent à l'heure actuelle de réaliser des prototypes fonctionnelles, des pièces finies ou semi-finies en petites séries (fabrication rapide) ou de fabriquer des moules et de l'outillage pour de la production à grande échelle (outillage rapide).

De par son principe même de conception couche par couche, la fabrication additive permet une plus grande liberté de conception que les procédés traditionnels. Il est en effet possible de créer des formes, telles que des cavités emprisonnées dans un volume ou des canaux non rectilignes, impossibles à reproduire en fonderie ou par usinage. De plus, il existe un nombre croissant de procédés de fabrication additive (stéréolithographie, dépôt de filament en fusion, stratoconception, impression 3D à partir de poudres métalliques ou non-métalliques, rechargement laser, fusion sélective par laser ou par faisceau d'électron...) offrant de nombreuses possibilités aux concepteurs.

Mais, chacun des procédés souffre quand même de limitations imposant de nouvelles contraintes de conception. Par exemple [2], dans le cas de la fusion sélective par laser, la pièce sera fabriquée sur une plaque support et les premières strates de fabrications seront des supports permettant d'évacuer la chaleur et de séparer la pièce de la plaque. Cela a une influence négative sur le temps et sur le coût de fabrication, de plus la taille et le positionnement de ces supports requièrent une certaine expérience de l'utilisateur. Le choix de l'orientation de la pièce lors de la fabrication requière également une bonne connaissance du procédé et résulte d'un compromis entre la dimension du bac et le besoin de limiter au maximum la dimension du bain de fusion pour chaque couche. Il faut également prévoir un ou plusieurs chemins d'évacuation des poudres résiduelles. Après fabrication de la pièce, un traitement thermique de relaxation ou des opérations de post-usinage afin d'améliorer l'état de surface des zones fonctionnelles sont éventuellement à prévoir.

Le manque de connaissance et de recul quant aux opportunités et aux limitations de ces nouveaux procédés de fabrication ainsi que leur coût encore important limitent actuellement leur développement industriel. En effet, les bureaux d'études sont habitués à concevoir des pièces avec des géométries qui doivent être simple à fabriquer par les procédés classiques, ce sont les bases du « design for manufacturing (DFM) ». Afin de bénéficier du plein potentiel de la fabrication additive, il est nécessaire de développer des outils d'aide à la conception adaptés à ces nouveaux procédés de fabrication (DFAM « design for additive manufacturing »). Il existe à l'heure actuelle encore peu de méthodologie de ce type [3, 4] et souvent, elles ne permettent pas de garantir la fabricabilité de la pièce ou ne tirent pas profit des avantages de la fabrication additive.

Pour pallier à ces inconvénients, le développement d'une méthodologie de DFAM intégrant l'optimisation topologique permettrait de tirer pleinement parti du potentiel offert par la fabrication additive à condition de pouvoir intégrer les nouvelles contraintes de fabrication inhérentes aux différents

procédés d'addition de matière de manière à garantir la fabricabilité de la pièce.

III. L'OPTIMISATION TOPOLOGIQUE

La complexité des designs obtenus par optimisation topologique ne permet pas souvent de les réaliser par des méthodes de fabrication traditionnelles ou alors au prix de nombreuses concessions. De ce fait, l'optimisation topologique est un partenaire idéal des procédés de fabrication additive et des nouvelles possibilités de conception qu'ils autorisent.

L'optimisation topologique est une technique d'optimisation des structures qui permet d'aller plus loin dans la recherche du design optimal que les méthodes de dimensionnement automatique et d'optimisation de forme. En effet, elle permet de déterminer la nature et la connectivité des éléments constitutifs d'une structure dans un problème où seules les conditions aux limites et le domaine spatial où il est possible de placer la structure, sont spécifiés [5]. La solution optimisée n'est donc plus dépendante d'un choix de design ou de concept effectué a priori par l'utilisateur.

Dans l'approche milieu continu, l'optimisation topologique permet de déterminer la distribution de matière optimale permettant, avec une restriction sur la masse, de maximiser un critère (souvent la raideur de la structure). Pour cela, un espace de conception doit être défini, discrétisé en éléments finis et les conditions limites et les charges y sont appliquées. La densité de matière variant entre 0 (le vide) et 1 (la matière pleine) dans chaque élément fini devient les variables de conception d'un problème d'optimisation classique.

Cette approche présente deux défauts, la solution va dépendre du maillage et des zones de densité de matière intermédiaires vont apparaître. Pour éviter cela, l'algorithme d'optimisation a souvent recours à une loi de pénalisation de type SIMP (Simply Isotropic Material with Penalization) qui va pénaliser les densités intermédiaires par rapport à une répartition plus binaire. Cela amène le risque de voir apparaître des zones en damier ou avec des zones avec des parties structurelles très fines. Ces zones intermédiaires ne sont généralement pas recherchées car elles vont avoir un impact négatif important sur le coût de fabrication. Ils existent différentes méthodes afin de garantir une épaisseur minimale des membres structurels [6, 7].

Mais dans le cas d'une fabrication par addition de matière, il est possible de réaliser des topologies très complexes incluant des zones poreuses (lattice structures) sans augmentation des coûts de production. L'utilisation de loi de type SIMP ne se justifie donc pas forcément dans le cas de pièces qui seront fabriquées par technologie additive [8]. De même, l'utilisation de filtres permettant d'éviter la création de structure en damier peut entraîner la perte de détails structurels [9] et conduire à une solution non-optimale dans le cadre de fabrication additive.

L'utilisation combinée des technologies additives et de l'optimisation topologique présente un gros potentiel en matière de conception et de fabrication en petites séries. Cependant, cette manière de concevoir n'a pas encore atteint

sa maturité industrielle. En effet, les résultats de l'optimisation topologique nécessitent généralement d'être fortement remaniés manuellement avant de satisfaire aux contraintes inhérentes à la fabrication additive. Ces manipulations supplémentaires, en plus d'annihiler certains avantages de l'optimisation topologique, augmente considérablement le coût.

IV. CHAÎNE DE CONCEPTION PAR OPTIMISATION TOPOLOGIQUE

Les chaînes de conception actuelle faisant intervenir l'optimisation topologique ne sont pas encore arrivées à maturité et souffrent encore d'un nombre trop élevé d'étapes manuelles coûteuse en temps et en argent et dépendante de l'expérience de l'utilisateur. La figure 1 illustre la chaîne de conception utilisée par l'Université de Liège et le Sirris (le Sirris est le centre collectif de l'industrie technologique belge et un des partenaires du projet FRED).

La première étape de cette chaîne de conception est la définition d'un cahier des charges décrivant le volume enveloppe, les différents cas de charge et un objectif de masse à atteindre.

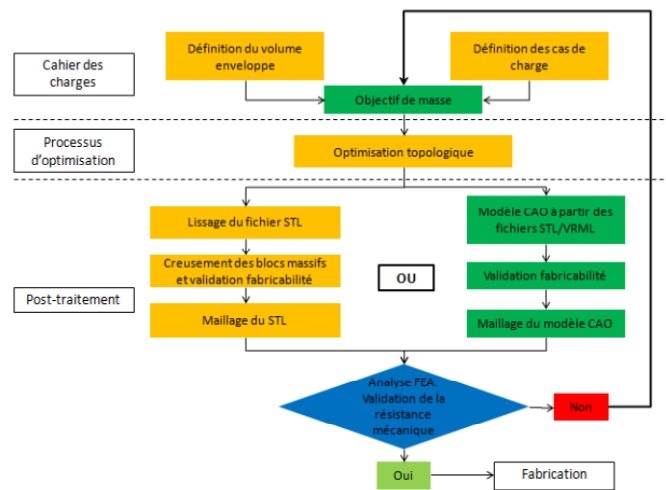


Figure 1. CHAÎNE DE CONCEPTION ACTUELLE

La seconde étape est le processus d'optimisation en lui-même à l'aide d'un logiciel adéquat. A la fin de l'optimisation, le logiciel va nous générer un fichier reprenant la topologie optimale (sous format STL dans le cas du logiciel TOPOL développé par Samtech et l'Université de Liège) qui aura besoin d'être post-traiter avant de pouvoir être utiliser pour la fabrication ou dans un calcul éléments finis.

La dernière étape est le post-traitement des résultats issus de l'optimisation topologique. Deux méthodes différentes peuvent être utilisées pour rendre utilisable le fichier. La première consiste à reconstruire le modèle CAO de la pièce à partir de la géométrie proposée par l'optimisation topologique. La pièce est ensuite maillée puis analysée par éléments finis pour vérifier sa résistance mécanique. Si cette dernière n'est pas suffisante, la reconstruction manuelle du modèle CAO est répétée jusqu'à ce que le cahier des charges soit satisfait. Cette façon de procéder peut se révéler longue et fastidieuse. La deuxième méthode possible consiste en un lissage de la

géométrie du fichier STL (le choix du format STL est historique, le but était de pouvoir fabriquer directement le design issu de l'optimisation topologique en prototypage rapide) afin d'éliminer les arêtes vives formées par les éléments du maillage qui sont conservés. Cependant, cette étape est souvent compromise à cause de la grossièreté du maillage et de la nature de ses éléments. De plus, la purge des éléments de densité inférieure au seuil choisi par l'utilisateur de l'optimisation topologique peut laisser des éléments isolés ou, pire encore, faire perdre leur continuité aux membres de la structure. Il convient alors de supprimer ou rajouter de la matière manuellement. Des modifications de ces membres sont également à prévoir pour rencontrer les exigences de la fabrication additive. Le maillage du fichier STL nécessaire à l'analyse par éléments finis, n'est pas non plus aisé et doit se faire à l'aide de logiciels spécialisés (comme GEOMAGIC par exemple).

L'apport de ce travail réside donc dans l'identification des améliorations à apporter aux étapes de la chaîne de conception qui nécessitent un travail manuel trop lourd pour rendre le procédé viable industriellement. Au vu des observations qui ont été faites dans les sections précédentes, il semble évident que ces améliorations doivent se faire sur deux fronts. D'une part, le nombre d'étapes réalisées manuellement doit être réduit au minimum, car ce sont les plus onéreuses (mis à part la fabrication elle-même). Bien qu'à l'heure actuelle il apparaît comme impossible d'automatiser l'ensemble de la chaîne de conception, de nombreuses améliorations sont envisageables. D'autre part, la prise en compte de certaines contraintes de fabrication doit se faire dès le processus d'optimisation topologique. Il en résulte que l'algorithme utilisé doit être adapté spécifiquement pour la fabrication additive.

V. AMÉLIORATION DE LA CHAÎNE DE CONCEPTION

La rédaction claire et précise du cahier des charges est une étape cruciale en optimisation topologique car le cahier des charges détermine entièrement et complètement la topologie de la pièce à concevoir. Ce cahier des charges doit contenir le volume enveloppe et les informations sur le positionnement de la pièce par rapport aux autres composants, les surfaces fonctionnelles (non-modifiables par l'optimiseur), les différents cas de charge, les propriétés mécaniques souhaitées qui influenceront le choix du matériau et du procédé de fabrication, les tolérances dimensionnelles qui imposeront éventuellement des étapes de post-usinage et un objectif de masse.

Le résultat de l'optimisation, ainsi que le temps de calcul, dépendent de la qualité du maillage utilisé. De plus, ce maillage peut être la source de plusieurs problèmes lors du post-traitement des résultats. Pour satisfaire nos exigences, le logiciel utilisé devrait être capable de mailler n'importe quelle géométrie avec des éléments quadrangulaires ou hexaédriques, ce type d'élément permettant un lissage plus efficace du design de la pièce finale.

Après l'optimisation, la purge des éléments de densité inférieure au seuil choisi peut laisser des éléments isolés ou faire perdre leur continuité aux membres de la structure, il convient donc d'assurer la continuité et la régularité de la

géométrie. Pour cela, il faut détecter les éléments ou groupe d'éléments membres mais également les éléments qui ne se touche que par un nœud ou par un segment (NMN ou NMS) et corriger le problème en les désactivant ou en réactivant les éléments voisins [10].

Dans cette nouvelle chaîne de conception, nous choisissons de ne travailler qu'avec le fichier STL et de ne pas reconstruire de modèle CAO manuellement car c'est une étape très longue et couteuse. Il convient alors de lisser la géométrie dans le fichier STL. Lors de cette étape, l'utilisateur pourra également choisir de creuser certaines zones massives de la pièce.

Pour terminer, le fichier STL sera remaillé afin de pouvoir procéder à des calculs de vérification par éléments finis. La figure 2 illustre ces différentes étapes de la chaîne de conception améliorée.

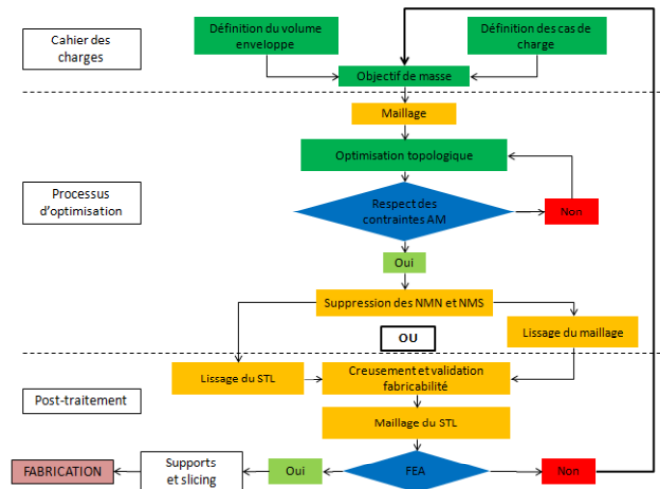


Figure 2. NOUVELLE CHAÎNE DE CONCEPTION

VI. LES CONTRAINTES DE LA FABRICATION ADDITIVE

Nous allons répertorier les types de contraintes inhérentes aux procédés de fabrication par addition de matière et proposer des pistes pour les intégrer directement dans un logiciel d'optimisation topologique.

La première contrainte à vérifier est que les dimensions du volume enveloppe ne soient pas supérieures à celles du bac de fabrication. Afin de minimiser le bain de fusion de chacune des couches, il est d'ailleurs préférable que la plus grande dimension de la pièce n'excède pas la hauteur de l'enceinte de la machine.

Ensuite, il faut déterminer l'orientation de la pièce dans le bac, puisque celle-ci détermine complètement les limites de la machine selon les trois dimensions de l'espace ainsi que le positionnement des supports.

Si des espaces internes de grande dimension doivent être créés, il faudra probablement recourir à des supports lors de leur fabrication. Mais ses supports risquent de ne pas pouvoir être post-usiné et il faudrait alors tenir compte de leur présence si ces espaces internes sont fonctionnels. Il est préférable de modifier l'algorithme d'optimisation

topologique pour que les espaces internes n'aient plus besoin de supports lors de la fabrication et pour qu'il ne modifie pas la géométrie des espaces fonctionnels pré-dimensionnés manuellement.

Afin d'éviter de devoir créer des supports dans certaines zones difficilement accessible, il faut garantir un contrôle de la taille des membres en fonction de la longueur des surplombs et des angles d'inclinaisons comme illustré dans [9].

Il faudra également veiller à ce qu'il existe toujours une voie d'évacuation des poudres résiduelles.

Une fois l'optimisation topologique terminée et le post-traitement de la pièce effectué, il ne devrait alors plus y avoir qu'à générer les supports qui serviront à supporter la pièce durant la fabrication et à évacuer la chaleur. Cette étape doit se faire en aval de l'optimisation topologique puisque ces supports seront ensuite retirés et ne contribueront donc plus à la résistance mécanique de la pièce.

La figure 3 résume ces différentes contraintes, celles qui sont en vert pourraient être assez facilement automatisées et incluses dans un code d'optimisation topologique, les autres ont toujours besoin d'une intervention manuelle.

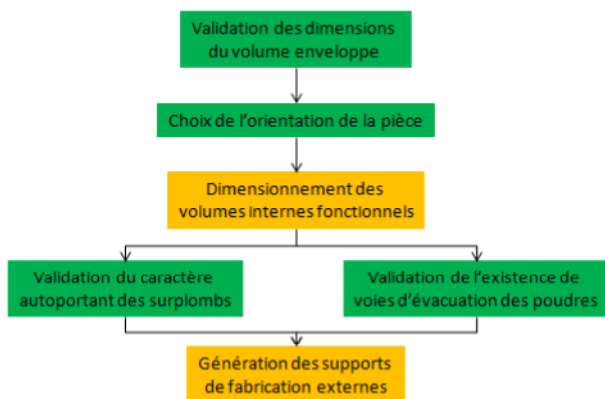


Figure 3. SCHEMA D'INTEGRATION DES CONTRAINTES DE FABRICATION

La prochaine étape, qui fera l'objet d'un travail ultérieur, consiste à exprimer ces contraintes sous forme mathématique afin de pouvoir les intégrer dans un code d'optimisation topologique comme l'a fait G. Michailidis [11] avec les contraintes imposées par les méthodes de fonderie.

VII. CONCLUSIONS

En conclusion, pour que le couplage de ces deux technologies devienne une réalité industrielle, il va falloir s'employer à développer les outils nécessaires à rendre la chaîne de conception plus performante et plus automatique. Ceux-ci peuvent se présenter sous la forme d'un logiciel de maillage approprié, d'un algorithme d'optimisation topologique prenant en compte une partie des contraintes de fabrication, ou encore d'un logiciel comportant toutes les fonctionnalités nécessaires au post-traitement des résultats obtenus. Alors, il deviendra possible de répondre à un besoin essentiel des entreprises qui est de concevoir plus vite, plus efficacement et à moindre coût des composants toujours plus complexes et légers.

VIII. REMERCIEMENTS

Cette étude n'aurait pas pu avoir lieu sans le soutien financier du programme Interreg IV-A et de la région wallonne.

IX. RÉFÉRENCES

- [1] R. HAGUE. "Rapid Manufacturing: an industrial revolution for the digital age", John Wiley & Sons, Chapitre N° 2, 2006.
- [2] B. MEUNIER. "Perspectives de développement pour le couplage optimisation topologique et fabrication additive de composants mécaniques", travail de fin d'étude, Université de Liège, 2014.
- [3] R. PONCHE. "Méthodologie de conception pour la fabrication additive, application à la projection de poudres", thèse de doctorat, Ecole centrales Nantes, 2013.
- [4] H. RODRIGUE, M. RIVETTE, V. CALATORU, S. RICHIR. "Une méthodologie de conception pour la fabrication additive", Actes de : 9^e Congrès International de Génie Industriel, Canada, 2011.
- [5] P. DUYSINX "Optimisation topologique: du milieu continu à la structure élastique", thèse de doctorat, Université de Liège, 1996.
- [6] J. GUEST, J. PREVOST, T. BELYTSCHKO. "Achieving minimum length scale in topology optimization using nodal design variables and projection functions", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Wiley, Vol. N°61, 2004, pp. 238–254.
- [7] J. GUEST. "Imposing maximum length scale in topology optimization", Structural Multidisciplinary Optimization, Springer, Vol. N°37, 2009, pp. 463–473.
- [8] A. AREMU, I. ASHCROFT, R. HAGUE, R. WILDMAN, C. TUCK "Suitability of SIMP and BESO topology optimization algorithms for additive manufacture", Actes de : 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, pp 679-692, Austin, 2010.
- [9] D. BRACKETT, I. ASHCROFT, R. HAGUE "Topology optimization for additive manufacturing", Actes de : 22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, pp 348-362, Austin, 2011.
- [10] J-C. CUIILLERE, V. FRANCOIS, J-M DROUET. "Automatic mesh generation and transformation for topology optimization methods", Computer-Aided Design, Elsevier, Vol. N°45, 2013, pp 1489-1506.
- [11] G. MICHAILIDIS. "Manufacturing constraints and multi-phase shape and topology optimization via a level-set method", thèse de doctorat, Ecole polytechnique, 2014.