

# Chaîne numérique pour la fabrication additive métallique : de la conception à l'impression

H. Sapardanis<sup>1</sup>, J.P. Berro<sup>1</sup>, E. Beauchesne<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Altair Engineering France, Antony, {hsapardanis,jpbramirez,ebeauche}@altair.com

---

**Résumé** — Les développements des outils numériques vont de pair avec les évolutions des procédés de fabrication. Une chaîne numérique a été mise en place pour couvrir les différentes étapes de la conception à la fabrication d'une pièce pour le procédé de fabrication additive. Cette chaîne permet de réaliser les étapes de design, préparation de la fabrication mais aussi prédiction de la géométrie de la pièce pendant et après fabrication grâce à la simulation du procédé.

**Mots clefs** — Fabrication additive, chaîne numérique, optimisation topologique, simulation procédé.

---

## 1. Introduction

Le procédé de fabrication additive métallique s'est largement développé au cours des deux dernières décennies [1]. Il est désormais possible de réaliser des formes complexes et de produire des petites séries de pièces avec un haut degré de personnalisation pour différents domaines d'application comme l'automobile, le médical ou encore l'aéronautique [2]. De nouveaux outils et de nouvelles méthodologies numériques ont donc été développés pour pouvoir accompagner cet essor : la conception des pièces, la préparation de leur fabrication, le process et le post traitement.

Les développements dans le domaine de la fabrication additive se focalisent désormais sur l'amélioration de la productivité et des coûts pour passer de la petite série à la production de masse et la partie logicielle est un point clé de cette expansion [3]. Pour les phases qui précèdent la fabrication – la définition des pièces et la préparation – le challenge est de proposer de nouvelles solutions numériques plus intégrées pour réduire leur temps de réalisation et améliorer leur précision mais aussi diminuer la quantité de rebus grâce à la prédiction de l'état mécanique des pièces en fin de chaîne de fabrication.

C'est dans ce cadre qui s'inscrivent les travaux présentés dans cet article. L'objectif est de mettre en place une chaîne numérique robuste permettant à l'utilisateur de réaliser les phases de design, de préparation de la fabrication dans un seul environnement. Cette chaîne inclut la simulation du procédé de fabrication pour prédire la géométrie de la pièce en fin de process.

## 2. Chaîne numérique

La Figure 1 présente la chaîne numérique en 3 étapes principales, proposée sous un seul environnement, Altair Hyperworks. La première étape permet de définir une géométrie optimale des pièces en utilisant l'optimisation topologique combinée à des techniques de modélisation géométrique (NURBS) qui accélèrent le processus d'interprétation géométrique à partir des résultats bruts issus de l'optimiseur.

Une fois la géométrie finale reconstruite, la chaîne se poursuit par la préparation de la fabrication. Dans cette étape, il s'agit d'optimiser l'orientation de la pièce via l'analyse de la géométrie et ensuite

de créer des supports de fabrication strictement à l'endroit où elles sont nécessaires. Après avoir orienté la géométrie et créé les supports, deux options sont proposées :

- Un export de la géométrie par tranches « slicing » directement utilisable par les machines d'impression
- La simulation du procédé pour vérifier le déplacement résiduel ou prédire des éventuels problèmes lors de l'impression.

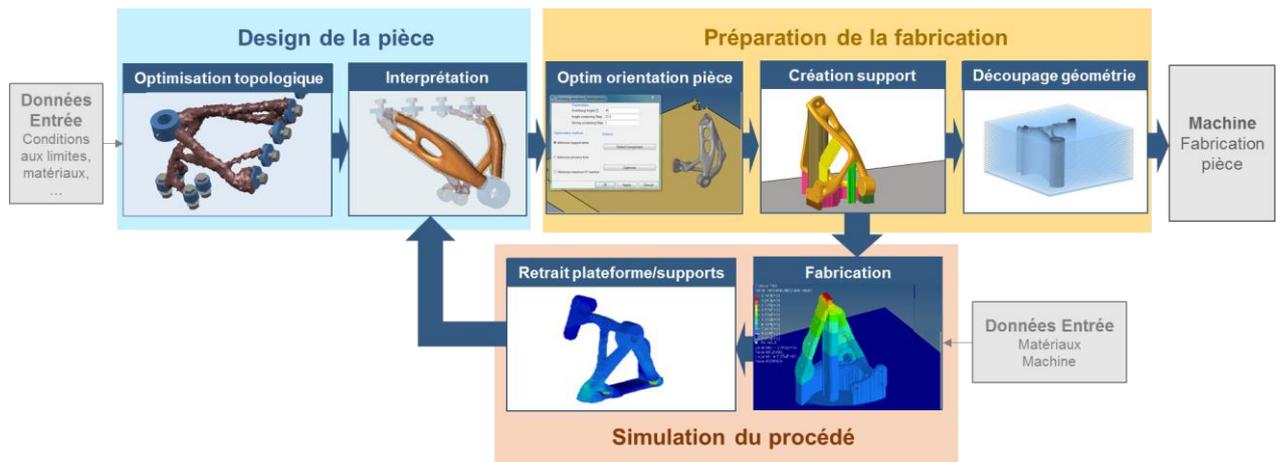


Figure 1 – Chaîne numérique pour la fabrication additive

## 2.1. Design de la pièce

D'une première idée à un concept final de pièce, les choix de conception pour la fabrication additive peuvent engendrer des coûts de production conséquents. De plus, cette phase d'étude peut s'avérer coûteuse en temps. L'optimisation de structure et plus précisément l'optimisation topologique apparaît comme l'outil nécessaire pour minimiser ces coûts [4].

Cette méthode permet de guider la conception d'une pièce afin d'atteindre un design optimal à partir d'un espace de conception donné par l'utilisateur. Le solveur de calculs implicite développé par Altair, OptiStruct®, se base sur la méthode SIMP (Solid Isotropic Microstructure with Penalization) [5,6] qui permet de faire varier la densité de chaque élément de l'espace de conception entre 0 (vide) et 1 (solide), les valeurs intermédiaires représentant un matériau fictif, avec la technique de pénalisation suivante :

$$K_p(\rho) = \rho^p K_r$$

où  $K_p$  et  $K_r$  sont respectivement les matrices de raideurs pénalisée et vraie d'un élément,  $\rho$  la densité et  $p$  le facteur de pénalisation qui est toujours supérieur à 1. Cette méthode prend en compte l'angle de surplomb [7].

Dans le cadre de la fabrication additive, nous avons associé à l'étape d'optimisation topologique une étape d'intégration et d'optimisation de structures lattices dans l'espace de conception. Les zones où la densité prend des valeurs intermédiaires sont transformées en structure lattices (les arrêtes des

éléments finis sont transformées en éléments poutres avec un diamètre donné). Cette nouvelle géométrie hybride est optimisée une seconde fois : une optimisation paramétrique ayant comme variables les diamètres de toutes les poutres des structures lattices. Cette méthode est appliquée sur un démonstrateur de porte fusée automobile, Figure 2.



Figure 2 – Design optimisé du porte fusée, partie supérieure creuse partiellement remplie de lattice

L'interprétation a pour but de dessiner la nouvelle géométrie basée sur les résultats d'optimisation topologique. Pour cela nous utilisons des outils de création des surfaces NURBS (Non-Uniform Rational Basis Splines) [8], déjà existants dans la suite Hyperworks. Ces outils permettent une reconstruction rapide et intuitive d'un résultat d'optimisation (partie solide). La partie supérieure solide du porte fusée, Figure 2, a été conçue à grâce aux surfaces NURBS.

Pour finir, il est nécessaire d'analyser les performances de la nouvelle géométrie pour s'assurer qu'elle respecte le cahier des charges initial. En effet, il y a toujours un écart entre le modèle optimal brut et celui « interprété » par l'ingénieur.

## 2.2. Préparation de la fabrication

Le procédé de fabrication additive nécessite le plus souvent l'utilisation de structures support lors de l'impression d'une pièce qui ont à la fois une fonction mécanique (support du plan d'impression) et thermique (dissipation de la chaleur apportée par le laser lors de l'impression). Pour faciliter la définition de ces supports et s'assurer d'en ajouter une quantité nécessaire et suffisante, une étape d'analyse de la géométrie et de création des supports après optimisation ont été intégrée à la chaîne proposée.

L'étape d'analyse repose sur un maillage surfacique de la géométrie à imprimer. Selon l'angle limite d'impression imposé par l'utilisateur, l'outil est capable de détecter les zones à supporter en évaluant la projection de la normale de chaque élément sur la direction d'impression. En fonction de la valeur de sortie, les éléments sont classés en deux groupes : supportés et non-supportés. Cette classification

seule est insuffisante pour pouvoir générer la géométrie des supports. Par conséquent, un algorithme de regroupement est introduit pour créer des zones à supporter ou « patches ». Cela permet de générer des structures supports plus efficacement en s'adaptant à l'environnement de la zone traitée (par exemple en créant des supports non-droits).

L'analyse des zones supportées nous a conduit à introduire trois types d'optimisation de l'orientation de la pièce pour l'impression :

- 1) Minimisation de l'aire supportée. Ce critère permet de minimiser la quantité de supports.
- 2) Minimisation du temps d'impression. Il s'agit ici de déterminer l'orientation de la pièce pour laquelle la hauteur à imprimer sera la plus faible. L'orientation finale permet donc de minimiser le nombre des couches à imprimer.
- 3) Minimisation de la plus grande section de la pièce. Il est connu que les contraintes résiduelles (et donc la distorsion) sont plus importantes dans les zones de grande section. Ici, un ensemble d'orientations possibles est généré et, pour chaque orientation, la valeur de la plus grande section est calculée pour ensuite déterminer un minimum.

La dernière étape permet de générer les structures supports sous forme de surfaces. Plusieurs types de supports sont implémentés : enveloppes de supports, lamelles, « honeycomb », tubes, etc. Puis, deux options sont possibles : soit la géométrie des pièces et des supports sont « tranchées » et exportées en format CLI (Common Layer Interface) [9] pour être imprimées, soit on simule l'impression de l'ensemble.

### **2.3. Simulation du procédé**

La phase de simulation a pour objective de prédire des tendances sur la distorsion de la pièce pendant et après le procédé d'impression. Une simulation thermomécanique couplée est mise en place pour cela. Dans un premier temps et pour permettre une transition automatique entre la géométrie et la génération du modèle, la pièce et les supports sont voxelisés.

Dans un second temps, la mise en données est réalisée à partir des paramètres matériaux et machine. Tous les paramètres du procédé sont utilisés : vitesse diamètre laser, puissance laser, pouvoir d'absorption de la poudre, épaisseur de couche, temps de raclage, etc. Une caractérisation thermomécanique du matériau est aussi nécessaire avec notamment la dépendance à la température des grandeurs mécaniques (limite élastique, dilatation, etc.). Une technique d'activation des éléments « Birth-Death » [10] est utilisée pour représenter l'ajout de matière lors de l'impression. Cette activation peut être par couche complète, par ligne ou par élément.

Cette simulation a été appliquée à un second démonstrateur, un syphon, permettant de prédire des zones critiques lors de l'impression, zones qui ont ensuite été mises en évidence par les essais d'impression, Figure 3.

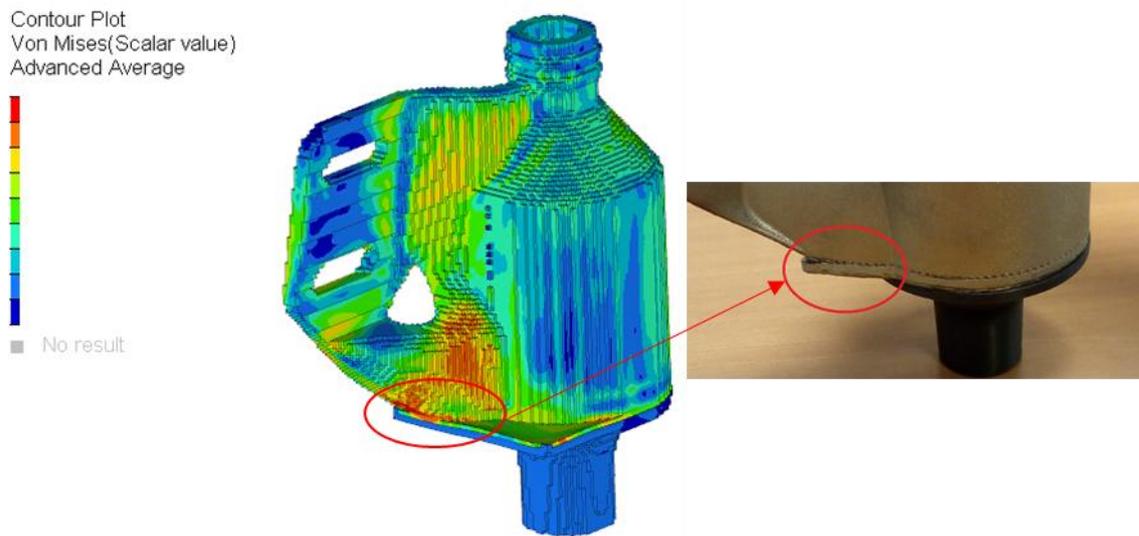


Figure 3 – Cartographie des contraintes de Von Mises du démonstrateur après impression et comparaison qualitative avec les résultats expérimentaux

### 3. Conclusions et perspectives

Une chaîne numérique permettant d’aller de la conception jusqu’à l’impression d’une pièce a été développée et appliquée sur plusieurs cas de démonstration. Cette chaîne permet de concevoir de façon optimale grâce à l’optimisation topologique, mais aussi orienter correctement la pièce pour l’impression ainsi que générer et manipuler des structures supports.

La prochaine étape, en cours d’implémentation, vise à ajouter une seconde boucle d’optimisation reliant la simulation de procédé à la création des structures supports pour une optimisation des contraintes résiduelles et de l’évacuation de la chaleur lors de l’impression.

### 4. Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet MAESTRO, *Modular laser-based additive manufacturing platform for large scale industry*, projet H2020 FoF-13-2016 Grant Agreement Number : 723826. Le porte fusée est le démonstrateur sélectionné par CRF (Centro Ricerche Fiat). Le syphon d’évacuation des eaux de pluie est le démonstrateur sélectionné par ALSTOM.

### Références

- [1] Wohlers TT. Wohlers report 2014: additive manufacturing and 3D printing state of the industry: annual worldwide progress report. Fort Collins, Wohlers Associates, 2014.
- [2] Identifying current and future application areas, existing industrial value chains and missing competences in the EU, in the area of additive manufacturing (3D-printing) ; EC/EASME; July 2016.
- [3] Final FoFAM implementation roadmap, Deliverable number: D4.3, Grant Agreement No 636882, December 2017.

- [4] G. I. N. Rozvany. Aims, scope, methods, history and unified terminology of computer-aided topology optimization in structural mechanics. *Structural and Multidisciplinary optimization*, vol. 21, no 2, p. 90-108, 2001.
- [5] M. P. Bendsøe. Optimal shape design as a material distribution problem. *Structural optimization*, vol. 1, no. 4, p. 193–202, 1989.
- [6] G. I. N. Rozvany. A critical review of established methods of structural topology optimization. *Structural and multidisciplinary optimization*, vol. 37, no 3, p. 217-237, 2009.
- [7] A.T. Gaynor, J.K. Guest. Topology optimization considering overhang constraints: Eliminating sacrificial support material in additive manufacturing through design, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 54, no. 5, p. 1157-1172, 2016.
- [8] L. Piegl, W. Tiller. *The NURBS book*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [9] R. Jamieson, H. Hacker. Direct slicing of CAD models for rapid prototyping. *Rapid Prototyping Journal*. Vol. 1, no. 2, p. 4-12, 1995.
- [10] W. Hofmeister, M. Wert, J. Smugeresky, J.A. Philliber, M. Griffith & M. Ensz. Investigating solidification with the laser-engineered net shaping (LENSTM) process. *Jom*, vol. 51, no. 7, p. 1-6, 1999.