

# Optimisation topologique des structures autoportantes pour la Fabrication Additive : Application au cas de poutre PMH de la caisse en Blanc

N. SABKHI<sup>a,\*</sup>, D.FREY<sup>b</sup>, S. BEN AFIA<sup>a</sup>

a. Altran Département de recherche, 27 Rue Becquerel, 90000 Belfort, France

b. Altran Département de recherche, Bd Sébastien Brant, 67400 Illkirch-Graffenstaden, France

\*naoual.sabkhi@altran.com

## Résumé :

*Les procédés de la fabrication Additive (FA) permettent la génération de pièces fonctionnelles complexes, avec un ratio (résistance/poids) important, possible également avec plusieurs matériaux. Cette nouvelle méthode de fabrication apporte de nouvelles possibilités dans le cycle de conception et de fabrication grâce à la capacité de fabrication par ajout de matière par couche et à ses nouveaux attributs. D'autre part, les techniques de l'optimisation de la topologie sont considérées comme un outil puissant pour la réduction de poids et l'optimisation des structures mécaniques. Toutefois, en général, ils ne fonctionnent pas bien pour ce type de processus car les procédés de FA nécessitent l'application de règles de conception dédiées. Pour surmonter cette difficulté, nous proposons une nouvelle méthode qui permet d'intégrer les contraintes de conception de la fabrication additive dans l'approche de l'optimisation de la topologie. Dans cet article, nous proposons de développer l'intérêt de combiner l'approche de l'optimisation topologique avec la fabrication additive. Ensuite, un algorithme d'optimisation topologique développé sur Python est présenté. Il est basé sur la méthode Optimal Criteria (OC). Enfin, une description d'une nouvelle formulation de l'approche de l'optimisation topologique qui inclut un modèle de fabrication additive simplifié est mise en œuvre sous la forme d'une procédure de filtrage par couches. Cette procédure permet d'exclure les géométries non imprimables de l'espace de conception afin d'obtenir des géométries autoportantes à partir du processus d'optimisation topologique. La procédure est illustrée par des exemples numériques impliquant la minimisation de la compliance des poutres PMH de la caisse en Blanc des véhicules avec la prise en compte des contraintes appliquées au matériau optimisé et le contrôle de masse.*

## Abstract:

*The Additive Manufacturing (AM) process allows the generation of complex functional parts, with an important ratio (resistance / weight), also possible with several materials. This new manufacturing method brings new design process possibilities through its new parameters and the capacity manufacturing by adding layer-upon-layer of material. Topology optimization techniques are considered as a powerful tool for weight reduction and optimization of mechanical structures.*

*However, in general, topology optimization does not work well for this type of process because AM processes requires the application of dedicated design rules. To overcome this difficulty, we propose a method that integrates the design constraints of additive manufacturing into the topology optimization approach. In this article, we propose to develop the interest of combining the approach of topological optimization with additive manufacturing. Next, a topological optimization algorithm developed on Python language is presented. It is based on the Optimal Criteria (OC) method. Finally, a description of a new topological optimization formulation that includes a simplified additive manufacturing model implemented in the form of a layer filtering procedure. This procedure allows you to exclude non-printable geometry from the design space to obtain self-supporting geometry from the topology optimization process. The procedure is illustrated by numerical examples involving the minimization of the compliance of the PMH beams of the body in white vehicles, taking into account the constraints applied to the optimized material and the mass control.*

**Mots clefs : Fabrication additives, Optimisation Topologique, Allègement, Contraintes de conceptions, Poutre PMH.**

## 1 Introduction

La Fabrication Additive (FA) est un domaine en pleine évolution qui a fait son apparition dans les années 1980, [1]. Elle a été développée, au début, à partir du prototypage rapide (PR), mais elle n'est pas limitée à la création de simples prototypes puisqu'elle vise aussi à produire des pièces en série. Aujourd'hui, grâce aux importants progrès technologiques, il est possible de fabriquer directement des pièces finies. Ceci permet d'ouvrir de nouveaux défis (matériaux, géométries et structures internes) pour le processus de conception et améliorer ainsi la liberté de conception, [2]. Grâce à ce procédé de fabrication par couche, des pièces avec une complexité nettement supérieure peuvent être produites par rapport aux processus traditionnels (usinage, emboutissage, etc,...). Il se caractérise par différents avantages tels qu'une plus grande liberté dans la conception de la géométrie des pièces, d'autant plus que les coûts de fabrications sont relativement indépendants de la complexité des pièces en question, [3]. Ceci offre la possibilité de concevoir des pièces plus optimisées.

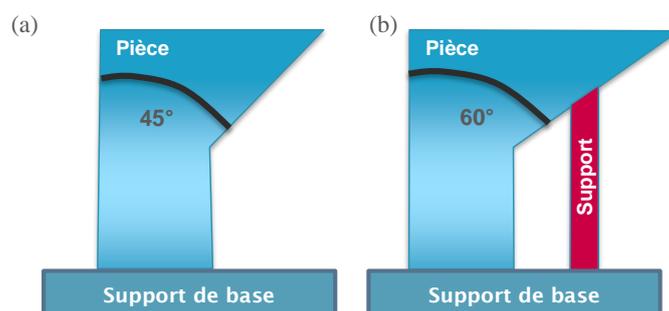
L'optimisation topologique est un outil mathématique identifié pour remplir l'aspect de réduction de poids en répartissant de manière optimale la matière dans un domaine de conception soumis à des sollicitations mécaniques. Elle permet d'obtenir une géométrie optimisée sans connaître la forme de celle-ci ni la disposition finale ou le nombre des ouvertures dans la pièce, ce qui permet au concepteur de facilement optimiser la pièce. Le concepteur ne connaît rien par rapport à la géométrie finale de la pièce. Il doit définir les contraintes géométriques liées aux volumes qui doivent absolument être occupés par le volume final ainsi que les limites dans lequel l'algorithme peut placer du matériau et les conditions limites appliquées (Encastremets, Forces appliquées,...).

La combinaison entre les procédés de FA et l'optimisation topologique peut ainsi fournir les conceptions nécessaires pour profiter pleinement de la liberté donnée par ces procédés. Cependant, les approches d'optimisation de la topologie existantes ne prennent pas en compte les limitations spécifiques à la FA au cours du processus de conception. En effet, si l'optimisation topologique permet un allègement de masse et une réduction de matière et des coûts, les formes optimisées peuvent nécessiter des supports additionnels lors de la fabrication de la pièce, si ces dernières présentent des surplombs horizontaux de matière à des angles trop faibles par rapport à l'horizontale. Les inconvénients de ces supports additionnels sont divers : ils engendrent un surcoût puisque il s'agit de la matière supplémentaire qui est utilisée et ils nécessitent une opération de post-traitement pour les

retirer. Ils contraignent les géométries optimisées puisque ces supports doivent être accessibles pour être retirés.

De ce fait, il est nécessaire de reprendre manuellement la géométrie de la pièce pour qu'elle soit fabricable. Une pièce fabricable par un processus de production doit respecter les contraintes de fabrication des procédés, qui interviennent dans le processus de fabrication et les exigences, exprimées dans le cahier des charges. Les contraintes de fabrication sont liées à un procédé particulier, elles décrivent les limites de ce qu'il est possible d'être fabriqué avec ce procédé. Ces contraintes sont liées à des caractéristiques géométriques et des propriétés de comportement (type de matériaux, propriétés mécaniques), ce qui permet d'établir des règles de conception pour chaque procédé.

Pour la fabrication additives, il existe des règles de conception et certain contraintes techniques liées à ce type de procédé qui doivent être satisfaites pour générer des géométries cohérentes, [4]. Parmi ces contraintes, on peut citer l'épaisseur minimale des membrures, la distance en surplomb, l'orientation d'impression de la pièce et l'inclinaison des membres structurels [5], [6]. Les éléments extrêmement minces ne peuvent pas être correctement imprimés, si cette épaisseur est inférieure à l'épaisseur minimale autorisée. L'angle critique de porte à faux est une autre contrainte qui fait partie de ces règles. Elle possède une grande importance pour garantir que la pièce ne s'effondrera pas pendant le processus d'ajout de couche lorsque la fabrication additive est utilisée, [1]. La Figure 1 montre un exemple de deux géométries de pièces caractérisées par un angle critique de porte à faux différent. La Figure 1-(b) implique le besoin d'un support supplémentaire pour un angle supérieur à  $45^\circ$ . De ce fait, pour la fabrication additive, il est plus intéressant de concevoir des géométries qui peuvent s'auto-supporter et donc qui ne nécessitent pas de supports additionnels.



**Figure 1. Exemple de deux pièces (a) pièce autoportante (b) pièce qui nécessite un support lors de la fabrication.**

Pour répondre à cette problématique, différentes méthodes ont déjà été présentées dans la littérature. Des travaux d'optimisation des structures de support ont été proposés afin de réduire au maximum la quantité de matière utilisée pour la création des supports, [7]. L'idée est de faciliter le processus d'enlèvement de ces supports et de réduire le surcout et le temps nécessaires de post traitement. Toutefois, le post traitement reste nécessaire pour ce type de solutions. D'autre part, Leary et al. [8] ont proposé d'intégrer les supports additionnels dans la géométrie de la pièce optimisée pour conserver un auto-support, c'est-à-dire de ne pas retirer ces supports. Le problème de cette méthode est qu'on s'éloigne de la topologie optimale théorique pour être en accord avec les contraintes de la fabrication additives. Pour éviter ce type de problèmes, plusieurs travaux ont été menés pour intégrer directement ces contraintes lors de la phase de l'optimisation topologique de la structure mécanique. Brackett et al. [9] ont développé une méthode qui permet de détecter et de pénaliser les angles critiques lors de chaque itération de l'optimisation topologique de la pièce. Cependant, la fonction de pénalisation n'était pas incluse dans l'analyse de sensibilité. Par conséquent, la contrainte de l'angle critique (angle de porte à faux) n'est pas directement considérée dans la conception finale, ce qui fait de l'algorithme une approche heuristique. Plus récemment, certains chercheurs ont proposé d'intégrer la

prise en compte de l'angle critique dans le processus de l'optimisation topologique afin d'obtenir une pièce optimisée autoportante. Gaynor et Guest [10] ont développé une méthode, faisant intervenir un filtre spatial de forme pour contrôler l'orientation du bord de la géométrie pendant le processus d'optimisation. Ceci est disponible uniquement pour une approche en deux dimensions. Langelaar [11] a développé, de son côté, un filtre par couche permettant de vérifier l'imprimabilité des éléments à chaque itération de l'optimisation topologique. Ces procédures permettent de générer des géométries de pièces imprimables sans ajout de support supplémentaire pour les régions de porte à faux.

Dans ce travail, nous allons présenter une nouvelle approche d'optimisation topologique permettant de concevoir des structures autoportantes optimales, prêtes à être fabriquées via une fabrication additive sans avoir besoin des modifications manuelles ni à des structures de support supplémentaires. La méthode proposée s'appuie sur l'intégration d'un filtre de calcul d'imprimabilité des éléments du maillage de la pièce à optimiser. La procédure implémentée permet au concepteur de spécifier la direction d'impression choisit pour la fabrication de la pièce pour un angle critique de 45°.

Le document est organisé comme suit : La section 2 rappelle l'approche d'optimisation topologique de base de notre travail. Ensuite, une description du principe du filtre test de l'imprimabilité des éléments est donnée. Ce filtre est introduit dans l'algorithme d'optimisation de la topologie avec une formulation dominante basée sur la densité. En incluant ce filtre appliqué par couches, la restriction d'angle de porte à faux appliquée aux processus de la fabrication additive ciblés est appliquée rigoureusement à chaque itération du processus d'optimisation. Enfin, les résultats de la méthode proposée ont été comparés avec d'autres méthodes existantes dans la littérature. L'ensemble des problèmes considérés implique une minimisation de la compliance en considérant une rigidité statique.

## 2 Développement Algorithme d'optimisation topologique

Le code d'optimisation topologique a été développé en se basant sur les travaux menés par O. Sigmund et al. [12]. Il s'agit d'une suite des travaux de F. Halila et al. [13]. Dans cet article, nous allons rappeler les éléments utiles pour la compréhension de l'algorithme d'optimisation topologique de base. Ensuite, une description de la procédure de l'intégration des contraintes de fabrication dans le code d'optimisation sera développée.

### 2.1 Algorithme d'optimisation topologique de base

La Figure 2 montre l'architecture de l'algorithme pour lancer le calcul de l'optimisation topologique. La méthode est basée sur le couplage entre ABAQUS et le code développé en Python. La définition de la géométrie et le maillage du domaine de conception de la pièce à optimiser sont traités sur le logiciel ABAQUS où il est plus simple de considérer plusieurs types de géométrie. Ensuite, il y a 3 étapes de calcul nécessaires pour trouver la solution finale de la pièce optimisée.

Pour fonctionner, l'algorithme nécessite que l'utilisateur remplisse un vecteur contenant 2 paramètres d'entrée, voir Figure 2:

- *Penal* représente un facteur qui permet de pénaliser les densités intermédiaires (comprises entre 0 et 1). Grâce à une étude paramétrique, Bendsoe et Sigmund [20] ont montré qu'une valeur de *Penal* = 3 est « physiquement admissible » dans le sens où une telle valeur permettait de restituer des résultats réels. Dans la suite de notre étude nous allons adopter une valeur fixe de *Penal* = 3.
- *Rmin* représente une surface de vide minimum à respecter par l'algorithme afin qu'il ne propose pas une section avec une multitude de petits trous mais plutôt avec quelques trous importants (dans un but de fabricabilité). Pour cette étude nous allons fixer  $R_{min} = 1.5$  [20].

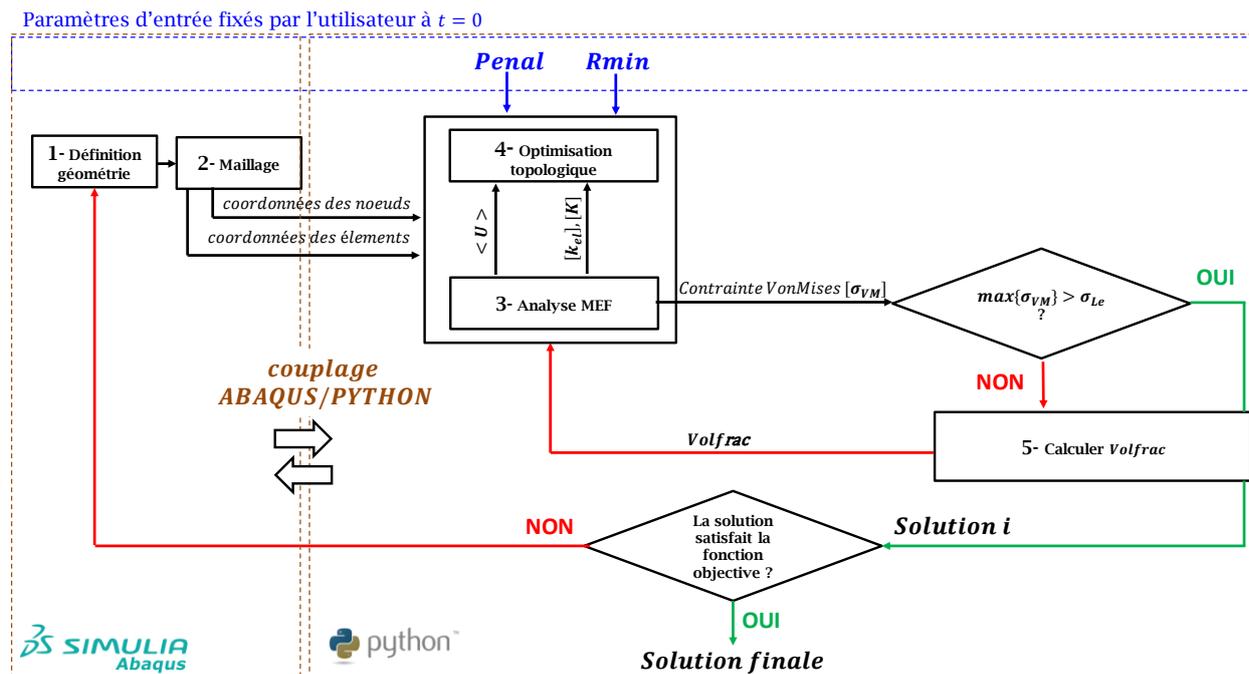


Figure 2 : Organigramme descriptif du fonctionnement de l'algorithme d'optimisation topologique

Cette méthode, fonctionnant par itération, débute par le concepteur qui pose le problème et les conditions. Ensuite, la partie itérative de l'algorithme débute entre le calcul par méthode d'éléments finis des déplacements et déformations locales à travers la géométrie et l'algorithme de l'optimisation topologique qui permet de faire varier la densité d'un élément (de 1 pour plein matière à 0 pour le vide) en fonction des déplacements des nœuds calculés précédemment et d'obtenir ainsi une nouvelle répartition de la matière. Si l'amélioration est marginale ou si des conditions d'optimalités sont définies et satisfaites l'algorithme s'arrête. Sinon on continue à l'étape suivante. Dans ce cas d'application, la boucle s'arrête lorsque la différence entre la solution  $i$  et la solution  $i - 1$  soit inférieure à 2 %.

## 2.2 Algorithme d'optimisation topologique modifié

Les premières étapes de l'intégration des contraintes de fabrication spécifiques de la fabrication additive dans le processus d'optimisation de la topologie seront développées dans cette section. L'idée est d'introduire un filtre de calcul de géométrie imprimable dans la partie itérative du concept de l'optimisation topologique, voir Figure 3. Le principe est assez simple ; les couches sont successivement balayées dans la direction de l'impression pour évaluer la densité imprimable de chaque élément. Un élément « e » peut devenir un élément solide si et seulement s'il a suffisamment de matière pour le supporter.

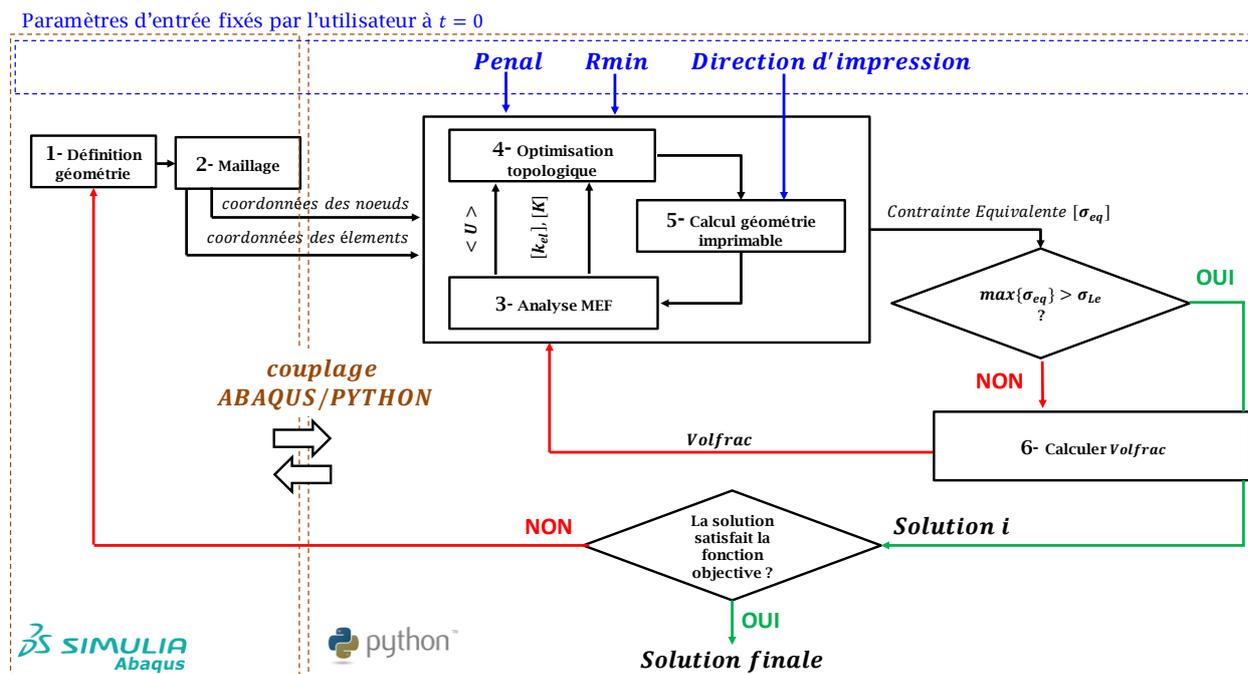


Figure 3 : Organigramme descriptif du fonctionnement de l'algorithme d'optimisation topologique

## 2.2.1 Formulation mathématique

Le filtre développé est défini sur un maillage régulier et uniforme (hexaédrique linéaire) discrétisés en  $n_i \times n_j \times n_k$  éléments. Il est basée sur les travaux de Langelaar [11], [14]. Pour identifier les différents couches de la pièce à optimiser, chaque élément du maillage est associé à une variable de densité  $x_p(i,j,k)$ . Les indices indiquent la position de chaque élément dans le domaine de conception, la première couche du plan de base ayant un indice  $k = 1$  en supposant que la direction d'impression est selon l'axe  $z$ .

Seuls les éléments suffisamment supportés par les éléments imprimés dans la couche sous-jacente peuvent être imprimés. Par définition, tous les éléments supportés par le plan de base ( $k = 1$ ) peuvent être imprimés. Dans les couches suivantes, chaque élément est associé à une région de support  $S(i, j, k)$ , constituée de l'élément situé directement sous l'élément considéré et des 4 voisins directs de celui-ci, voir Figure 4. Ce choix est motivé par le fait que l'angle critique d'autoportant des pièces imprimées par fabrication additives était généralement de 45 degrés [10], [11].

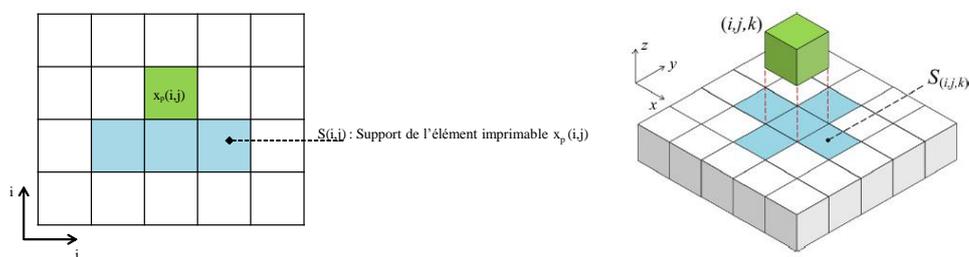


Figure 4 : Définition du support  $S(i, j, k)$  (éléments en bleu) d'un élément en position  $(i, j, k)$  dans un maillage en 2D et en 3D.

Dans ce modèle de processus, nous définissons que chaque densité imprimée  $x_p(i, j, k)$  ne peut pas être supérieure à la densité imprimée maximale  $x_s(i, j, k)$  dans sa région de support,  $S(i, j, k)$ . La nouvelle densité imprimable  $x_p(i, j, k)$  s'écrit :

$$x_p(i, j, k) = \min\{x(i, j, k), x_s\} \text{ Avec } x_s = \max\{x_s \in S(i, j, k)\} \quad (1)$$

En effet, ce procédé requiert que chaque élément imprimé soit supporté par les éléments le portant. Par exemple sur la Figure 4, l'élément vert ne peut exister si aucun élément bleu n'existe. Ceci avec l'hypothèse que l'angle critique d'impression est fixé à 45°. Pour assurer la viabilité de la géométrie optimisée, l'algorithme commence par séparer les éléments par couche. Ils sont ainsi numérotés dans l'ordre où ils seront imprimés avant de commencer l'optimisation topologique.

Sous cette forme, l'équation(1) n'est pas différentiable en raison des opérateurs min et max non lisses. Or, pour l'intégrer dans le processus de l'optimisation topologique, il est nécessaire de présenter sous une forme différentiable à l'aide d'approximations lisses. Dans cet article, nous optons pour les approximations suivantes :

$$\min\{x(i, j, k), x_s(i, j, k)\} \approx (x(i, j, k), x_s(i, j, k)) = \frac{1}{2} \left( x + x_s - ((x - x_s)^2 + \varepsilon)^{\frac{1}{2}} + \sqrt{\varepsilon} \right) \quad (2)$$

$$\max\{x_s \in S(i, j, k)\} \approx x_s \in S(i, j, k) = \tilde{x}_s = \left( \sum_{e \in S} x_e^P \right)^{\frac{1}{Q}} \quad (3)$$

Les paramètres  $\varepsilon$ ,  $P$  et  $Q$  permettent de réduire les erreurs d'approximation. Par défaut, les valeurs suivantes sont utilisées :

$$\varepsilon = 10^{-4}; P = 40; Q = P + \frac{\log(5)}{\log(p_0)}; p_0 = 0.5$$

En utilisant ce filtre, l'algorithme utilise, désormais, une nouvelle variable  $x_p(i, j, k)$  correspondant à la densité de la géométrie prenant en compte les contraintes liées à la fabrication additive. La sensibilité s'exprime ainsi de la manière suivante :

$$\left[ \frac{\partial f}{\partial x_k} \right] = \lambda_k^T \cdot \frac{\partial \tilde{x}_s}{\partial x_k} \quad (4)$$

Avec :

$$\lambda_k^T = \begin{cases} \frac{\partial f}{\partial x_1} = \frac{\partial f}{\partial x_{p_1}} \text{ pour } k = 1 \\ \left[ \frac{\partial f}{\partial x_{p_k}} \right] + \lambda_{k+1}^T \left[ \frac{\partial \tilde{x}_s}{\partial x_{p_k}} \right] \text{ pour } 1 < k < n \\ \frac{\partial f}{\partial x_{p_n}} \text{ pour } k = n \end{cases} \quad (5)$$

Avec  $k$  est l'indice des couches ( $k=1$  est la couche de base),  $n$  est le nombre total des couches.

### 2.2.1 Application à la minimisation de la compliance

L'algorithme de l'optimisation topologique est basé, dans ce cas d'application, sur la méthode Optimal Criteria (OC) traitant, comme fonction objective la minimisation de la compliance sous un chargement statique. La méthode d'optimisation topologique est considérée dans un cas de problème avec des contraintes d'égalité et d'inégalité. La fonction objective s'écrit alors sous cette forme :

$$\begin{cases} \min x : c(x_p) = U^T K U \\ \text{subject to : } \begin{cases} \frac{V(x_p)}{V_0} = \text{Volfrac} \\ K U = F \\ 10^{-3} \leq x_p \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

où  $c$  est la fonction objectif.  $U$ ,  $K$  et  $F$  sont respectivement le vecteur déplacement, la matrice de rigidité et le vecteur force.  $u_e$  est le déplacement et  $k_e$  la rigidité d'un seul élément.  $x_p$  est la densité d'un élément imprimable qui varie entre  $10^{-3}$  (différent de 0 pour éviter les singularités numériques) et 1 (la densité 1 étant présence de matière et  $10^{-3}$  étant pas de matière). La somme des densités  $V(x_p)$  divisé par le volume total  $V_0$  est égale à la fraction volumique (Volfrac). La fonction de sensibilité devient en fonction de la densité imprimable :

$$\left[ \frac{\partial c}{\partial x_{p_i}} \right] = -1 \cdot [U]^T \cdot \left[ \frac{\partial K}{\partial x_{p_i}} \right] \cdot [U] \quad (7)$$

### 3 Résultats obtenus : Poutre en PMH (Polymer Metal Hybrid)

Nous avons tout d'abord travaillé avec des géométries simples de poutre en flexion avec un maillage hexaédrique régulier, afin de définir un algorithme de base pour ajouter les contraintes de fabrication permettant d'assurer un angle critique de  $45^\circ$ . Il s'agit d'une poutre avec une charge totale de 100 N distribuée sur le bord inférieur avant et des déplacements nuls sur la face arrière du domaine, voir Figure 5. Le matériau de la poutre est un polymère PA6-GF30 ayant les caractéristiques mécaniques suivantes : Module de Young  $E = 9 \text{ GPa}$ , un coefficient de poisson  $\nu=0.4$ , limite élastique  $\sigma_l = 150 \text{ MPa}$  et une densité  $\rho = 1400 \text{ Kg/m}^3$ .

Sans contraintes de fabrication lors de l'optimisation topologique, nous obtenons la géométrie présentée en Figure 6. Cette géométrie présente des éléments dont le support est insuffisant pour une impression en 3D.

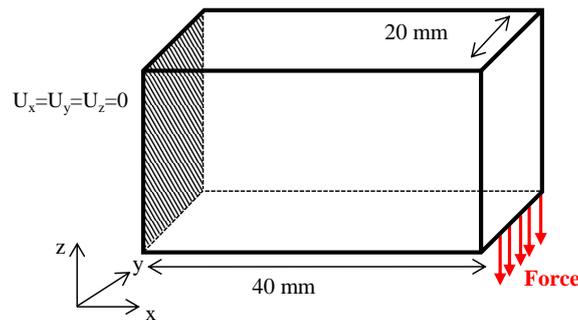
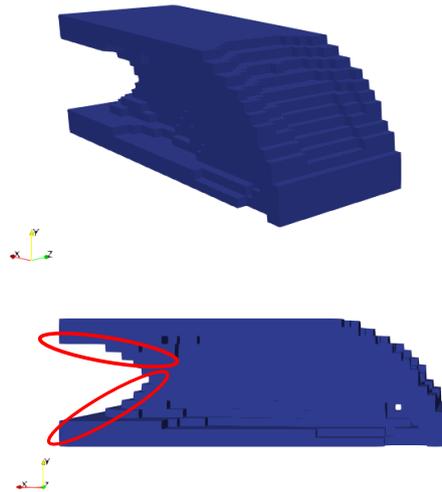
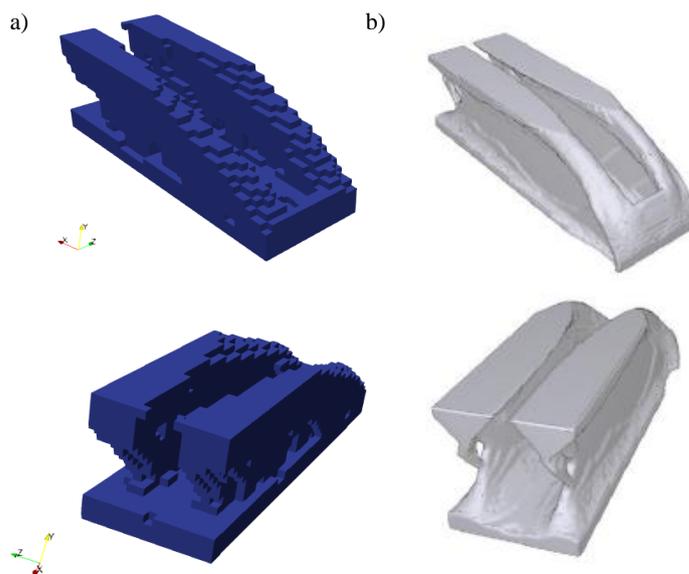


Figure 5 : Domaine de conception de la poutre en flexion.



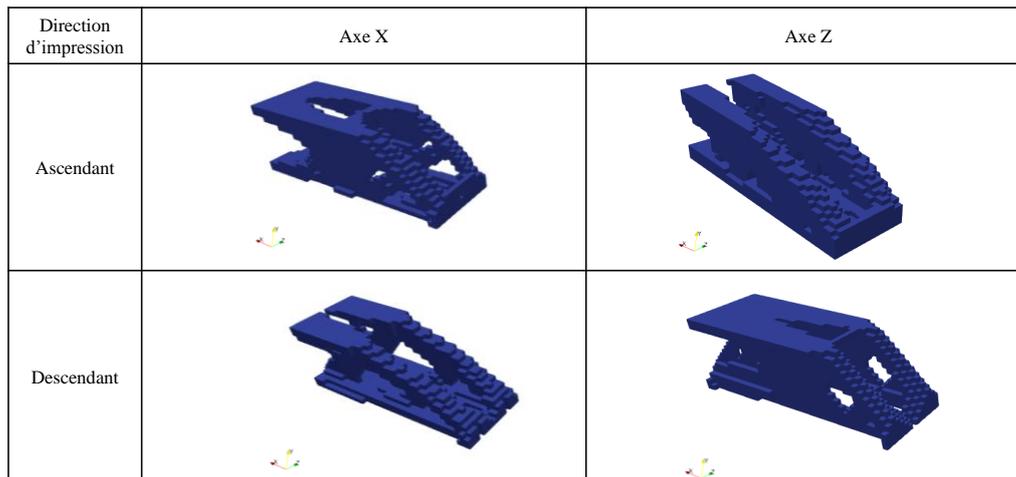
**Figure 6 : Géométrie de pièce obtenue avec l'algorithme d'optimisation topologique de base.**

Afin de vérifier si l'implémentation numérique de notre modèle était correctement effectuée, nous avons reproduit les mêmes conditions présentés par Langelaar [11]. La Figure 7 montre une comparaison entre nos résultats, présentés à gauche, et les résultats obtenus par Langelaar [11] à droite. Nous pouvons remarquer qu'on obtient des géométries optimisées semblables. Ceci nous permet ainsi de valider notre méthode.



**Figure 7 : Comparaison entre géométrie de pièce optimisée avec les contraintes de fabrication pour la direction d'impression  $z$  ascendante (a) obtenue avec notre algorithme d'optimisation topologique (b) obtenue par Langelaar [11].**

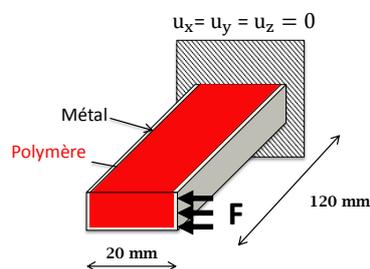
La Figure 8 montre les géométries de pièces obtenues avec les contraintes de fabrication selon les directions d'impression  $X$  et  $Z$  (ascendant et descendant). Il est clair que les géométries optimisées sont affectées par la direction d'impression choisie et que le processus d'optimisation trouve différentes solutions, spécifiques à l'orientation, pour satisfaire les contraintes de fabrication appliquées. Pour évaluer la meilleure solution entre ces géométries, un travail futur consiste à considérer le comportement mécanique de la pièce lors de l'optimisation.



**Figure 8 : Géométrie de pièce obtenue avec les contraintes de fabrication selon les directions d'impression X et Z.**

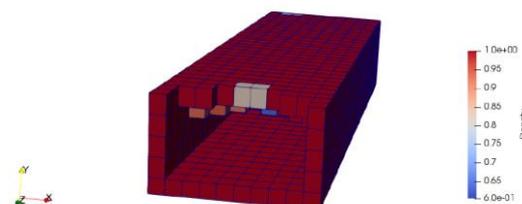
En prenant en compte du couplage entre Abaqus et notre code d'optimisation implémenté avec python, un cas d'une poutre en PMH est alors considéré comme cas d'application. Il s'agit d'une poutre soumise à un effort de cisaillement à une extrémité et encastée de l'autre, voir Figure 9.

Le polymère est un matériau plastique ayant les caractéristiques mécaniques suivantes : Module de Young  $E = 9 \text{ GPa}$ , un coefficient de poisson  $\nu = 0.4$ , limite élastique  $\sigma_l = 150 \text{ MPa}$  et une densité  $\rho = 1400 \text{ Kg/m}^3$ . Concernant la partie métallique, un acier de construction S235 a été considéré et ayant les caractéristiques mécaniques suivantes : Module de Young  $E = 210 \text{ GPa}$ , coefficient de poisson  $\nu = 0.3$ , limite élastique  $\sigma_l = 235 \text{ MPa}$  et une densité  $\rho = 7800 \text{ Kg/m}^3$ .



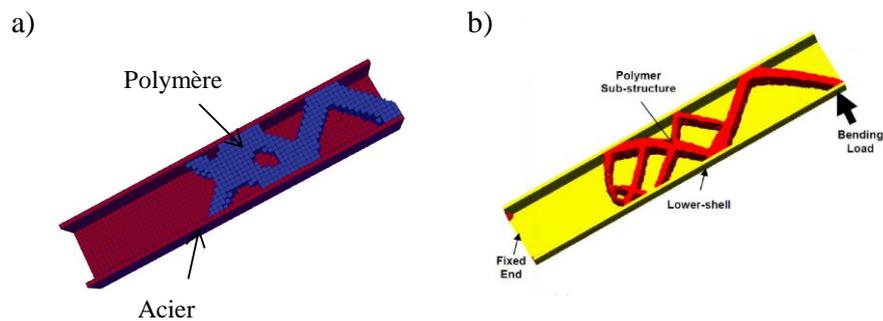
**Figure 9 : Domaine de conception de la poutre PMH**

En considérant uniquement un chargement statique de flexion, nous avons mis en place un calcul d'optimisation topologique sur la partie polymère d'une poutre PMH aux dimensions mentionnées sur la Figure 9. Le comportement mécanique de la partie métallique a été pris en compte lors du calcul par éléments finis. Le processus d'optimisation de cette poutre PMH, a permis d'obtenir une géométrie non fabricable sans contraintes de fabrication ; la matière était concentrée sur le haut et aucune couche intermédiaire ne permettait de la supporter, voir Figure 10.



**Figure 10 : Géométrie de pièce obtenue avec l'algorithme d'optimisation topologique de base (sans contraintes de fabrication).**

Avec l'application des contraintes de fabrication, nous avons obtenu de bons résultats avec notre algorithme : des couches successives se forment et la forme en zigzag trouvée, voir Figure 11-(a). Sur cette figure, les couleurs distinguent les deux matériaux. Le même modèle a été étudié par Grujicic et al. [15] sans que la méthode de prise de compte des contraintes n'ait pas été détaillée. Le résultat de son optimisation est montré par Figure 11-(b). La configuration n'est pas suffisamment précise dans l'article pour reproduire exactement le même cas de figure, ce qui est à prendre en compte lors de la comparaison des résultats. Il est judicieux de mentionner également que dans le cas de notre étude une parfaite liaison est considéré dans les interfaces de contact entre Polymère/Métal. Grujicic et al. [15] ont montré que des efforts de cisaillement  $\geq 10$  MPa ont pour effet de rompre la liaison polymère/métal. Par conséquent, la prise en compte des interfaces de contact dans l'algorithme d'optimisation topologique est un travail de perspective indispensable.



**Figure 11 : Comparaison entre les résultats obtenus avec les contraintes de fabrication suivant la direction de l'axe Y (a) avec notre algorithme d'optimisation topologique (b) par Grujicic et al. [15].**

## 4 Conclusions

Cet article présente une méthode permettant de générer des géométries de pièces optimisées entièrement autonomes en trois dimensions. Il combine l'optimisation de la topologie basée sur la densité établie à partir d'un filtre de test de l'imprimabilité des éléments d'un maillage structuré uniforme. Ce filtre peut exclure les densités des éléments qui ne respectent pas les critères d'angle de porte à faux critique généralement rencontrés dans les processus de fabrication additive. Par conséquent, les conceptions optimisées ne nécessitent pas de supports supplémentaires pour prendre en charge les dépassements, ce qui simplifie le post-traitement de ces pièces et réduit les coûts.

Cette nouvelle méthode permet de contribuer à améliorer l'utilisation de l'optimisation topologique pour la fabrication additive, en supprimant les complications liées aux restrictions géométriques basées sur les règles de conception à respecter. Les exemples numériques ont montré que l'orientation de construction choisie peut avoir un impact significatif sur les performances pouvant être atteintes. À l'heure actuelle, c'est toujours un aspect qui doit être entrée par l'utilisateur dans le processus d'optimisation et, en fonction des résultats des cas de test, il est recommandé de toujours explorer différentes orientations d'impression. Comme perspective, les travaux seront amenés à adapter ce filtre pour le maillage non structuré et à automatiser le choix optimal de l'orientation de l'impression dans un problème d'optimisation. Il est également prévu d'affiner davantage notre modèle afin d'inclure d'autres critères liés à la fabrication additive tel que la variation de l'angle de porte à faux et la valeur minimale de l'épaisseur de membrure de la pièce optimisée, par exemple.

## Références

- [1] A. Garaigordobil, R. Ansola, J. Santamaría, et I. Fernández de Bustos, « A new overhang constraint for topology optimization of self-supporting structures in additive manufacturing », *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 58, n° 5, 2018, pp. 2003-2017
- [2] R. Ponche, O. Kerbrat, P. Mognol, et J.-Y. Hascoet, « A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process », *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 30, n° 4, 2014, pp. 389-398
- [3] N. Hopkinson, R. Hague, et P. Dickens, *Rapid manufacturing: an industrial revolution for the digital age*. John Wiley & Sons, 2006
- [4] Z. Doubrovski, J. C. Verlinden, et J. M. P. Geraedts, « Optimal Design for Additive Manufacturing: Opportunities and Challenges », in *Volume 9: 23rd International Conference on Design Theory and Methodology; 16th Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference*, Washington, DC, USA, 2011, pp. 635-646
- [5] K.-H. Chang et P.-S. Tang, « Integration of design and manufacturing for structural shape optimization », *Advances in Engineering Software*, vol. 32, n° 7, 2001 pp. 555-567
- [6] M. Leary, M. Babaee, M. Brandt, et A. Subic, « Feasible Build Orientations for Self-Supporting Fused Deposition Manufacture: A Novel Approach to Space-Filling Tesselated Geometries », *Advanced Materials Research*, vol. 633, 2013, p. 148-168
- [7] J. Vanek, J. A. G. Galicia, et B. Benes, « Clever support: Efficient support structure generation for digital fabrication », in *Computer graphics forum*, vol. 33, 2014, pp. 117-125
- [8] M. Leary, L. Merli, F. Torti, M. Mazur, et M. Brandt, « Optimal topology for additive manufacture: A method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures », *Materials & Design*, vol. 63, 2014, pp. 678-690
- [9] D. Brackett, I. Ashcroft, et R. Hague, « Topology optimisation for additive manufacturing », *Proceedings of the solid freeform fabrication symposium*, vol. 1, 2011, pp. 348-362
- [10] A. T. Gaynor et J. K. Guest, « Topology optimization considering overhang constraints: Eliminating sacrificial support material in additive manufacturing through design », *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 54, n° 5, 2016, pp. 1157-1172
- [11] M. Langelaar, « Topology optimization of 3D self-supporting structures for additive manufacturing », *Additive Manufacturing*, vol. 12, 2016, pp. 60-70
- [12] O. Sigmund, « A 99 line topology optimization code written in Matlab », *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 21, n° 2, 2001, pp. 120-127
- [13] Faycel, Halila, Valentin, Fauvin, et Armand, Polmard, « Algorithmes d'optimisation topologique pour l'allègement des poutres en PMH de la caisse-en-blanc en utilisant un couplage entre Matlab et Ansys », *Congrès Français de Mécanique*, 2017
- [14] M. Langelaar, « An additive manufacturing filter for topology optimization of print-ready designs », *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 55, n° 3, 2017, pp. 871-883
- [15] M. Grujicic et al., « Application of Topology, Size and Shape Optimization Methods in Polymer Metal Hybrid Structural Lightweight Engineering », *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, vol. 4, n° 4, 2008, pp. 305-330